

علم التلوث

POLLUTION SCIENCE



ترجمة: أ.د. فوزي محمد الدومي



منشورات جامعة عمر المختار

2022



علم التلوٲ

POLLUTION SCIENCE

ترجمة

أ.د. فوزي محمد الدومي



منشورات جامعة عمر المختار 2022

اسم الكتاب: علم التلوث.

اسم المؤلف: فوزي الدومي.

رقم الإيداع: 2018/146م.

دار الكتب الوطنية بنغازي - ليبيا

© 2022 المؤلف

هذا كتاب يخضع لسياسة الوصول المفتوح (المجاني) ويتم توزيعه بموجب شروط ترخيص إسناد المشاع الإبداعي (CC BY-NC-ND 4.0)، والذي يسمح بالنسخ وإعادة التوزيع للأغراض غير التجارية دون أي اشتقاق، بشرط الاستشهاد بالمؤلف وبجامعة عمر المختار كناشر الأصلي.

منشورات
جامعة عمر المختار
البيضاء



الترقيم الدولي

ردمك 978-9959-79-101-6 ISBN

DOI: <https://doi.org/10.54172/OMUP.23>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَأذْكُرُوا إِذْ جَعَلْنَاكُمْ خُلَفَاءَ مِنْ بَعْدِ عَادٍ وَبَوَّأْنَاكُمْ فِي الْأَرْضِ أَنْ تَحْتَضِرُوا مِنْ سُهُولِهَا قُصُورًا

وَنَنْحِتُونَ الْجِبَالَ بُيُوتًا فَاذْكُرُوا آيَةَ اللَّهِ وَلَا تَعْنُوا فِي الْأَرْضِ مُفْسِدِينَ ﴿74﴾

سورة الأعراف

جدول المحتويات

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
	الباب (1) مستوى أو مدى التلوث العالمي	
3	.....تحديد الأسباب	1.1
7	.....البيئة كسلسلة متصلة	2.1
8	.....التلوث وضغط السكان	3.1
11	.....العلم والتلوث	4.1
14	.....علم التلوث ومستقبل العالم	5.1
15	.....المراجع	-
16	.....أسئلة	-
	الباب (2) الخصائص غير الحية للتربة	
17	.....التربة	1.2
19	.....الطور الصلب	2.2
19	.....تعريف التربة ونطاق فادوز	1.2.2
19	.....قطاعات التربة	2.2.2
20	.....الحبيبات الأولية وقوام التربة	3.2.2
23	.....بناء التربة	4.2.2
24	.....السعة التبادلية الكاتيونية	5.2.2
27	.....الرقم الهيدروجيني للتربة	6.2.2
29	.....المادة العضوية	7.2.2
31	.....الطور الغازي	3.2
31	.....مكونات هواء التربة	1.3.2
32	.....وفرة الأكسجين وتنفس التربة	2.3.2
33	.....الطور السائل	4.2
33	.....خصائص الماء	1.4.2
34	.....جهد ماء التربة	2.4.2
37	.....المراجع	-

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
38	..... مسائل حسابية وأسئلة.....	-
	الباب (3) العمليات الفيزيائية التي تؤثر على تلوث الهواء الجوي	
39	..... التركيب الكيميائي.....	1.3
46	..... الخصائص الفيزيائية والبنائية.....	2.3
47	..... الكثافة، الضغط، الرياح.....	1.2.3
53	..... درجة الحرارة.....	2.2.3
61	..... بخار الماء والمطول.....	3.2.3
62	..... الانتقال الإشعاعي.....	4.2.3
64	..... الغلاف الجوي الأدنى.....	5.2.3
67	..... الغلاف الجوي الأعلى.....	6.2.3
68	..... المراجع.....	-
69	..... أسئلة.....	-
	الباب (4) النشاط الحيوي في التربة والماء	
71	..... مجموعات الكائنات الرئيسية.....	1.4
74	..... البكتيريا.....	1.1.4
75	..... تصنيف البكتيريا.....	1.1.1.4
77	..... أنواع مستقبلات الإلكترونات.....	2.1.1.4
77	..... التصنيف البيئي.....	3.1.1.4
78	..... البكتيريا السائدة بالتربة.....	4.1.1.4
79	..... التوزيع والوظيفة.....	5.1.1.4
80	..... الأكتينومايسيتات.....	2.1.4
81	..... أوجه شبه الأكتينومايسيتات مع البكتيريا والفطريات.....	1.2.1.4
81	..... التوزيع والوظيفة.....	2.2.1.4
83	..... الفطريات.....	3.1.4
84	..... التوزيع والوظيفة.....	1.3.1.4
92	..... عوامل التربة التي تؤثر على نمو ونشاط ميكروبات التربة.....	2.4

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
92	الإجهاد الحيوي.....	1.2.4
93	الإجهاد غير الحيوي	2.2.4
93	الضوء	1.2.2.4
93	رطوبة التربة	2.2.2.4
94	درجة حرارة التربة.....	3.2.2.4
94	درجة تفاعل التربة.....	4.2.2.4
95	قوام التربة	5.2.2.4
95	كربون ونيروجين التربة	6.2.2.4
96	جهد الأكسدة والاختزال بالتربة.....	7.2.2.4
98	الحالة العامة ونشاط الميكروبات في التربة.....	3.4
101	المراجع	-
102	مسائل وأسئلة.....	-
الباب (5) العمليات الفيزيائية المؤثرة علي مصير ملوث ونقله في التربة والماء		
103	ماء التربة والمياه الجوفية.....	1.5
103	ماء التربة.....	1.1.5
107	جهد ماء التربة.....	2.1.5
112	قياس ماء التربة.....	3.1.5
115	العلاقات بين جهد ماء التربة ومحتوى التربة من الماء.....	4.1.5
117	حركة الماء في التربة والمياه الجوفية.....	2.5
117	التدفق المشبع.....	1.2.5
119	التدفق غير المشبع.....	2.2.5
122	التدفق المتغير الانتقالي.....	3.2.5
125	حركة الملوثات في التربة والمياه الجوفية	3.5
127	آليات النقل الكيميائي.....	1.3.5
132	الحركة خلال أعمدة في اتجاه واحد.....	2.3.5
139	الحركة خلال ترب الحقل.....	3.3.5
140	حالة للدراسة: التخلص من مخلفات ذات مستوى منخفض من المواد المشعة في سهل وورد.....	-

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
146	المراجع.....	-
148	مسائل وأسئلة.....	-
	الباب (6) العمليات الكيميائية المؤثرة على مصير ملوث معين وحركته في التربة والماء	
151	أطوار التربة.....	1.6
152	القابلية للذوبان والتطاير.....	2.6
152	ذوبانية الملوثات غير العضوية.....	1.2.6
155	ذوبانية الملوثات العضوية.....	2.2.6
159	تبخر الملوثات العضوية.....	3.2.6
160	تطاير الملوثات العضوية.....	4.2.6
161	إدمصاص (شد) الملوثات.....	3.6
162	آليات الإدمصاص الخاصة بالملوثات غير العضوية.....	1.3.6
166	آليات الإدمصاص الخاصة بالملوثات العضوية.....	2.3.6
167	الإدمصاص الحراري.....	3.3.6
170	انتقال الملوثات المدمصة.....	4.6
174	تقدير توزع أطوار الملوثات.....	5.6
177	تفاعلات تحول غير حيوية.....	6.6
177	التحليل المائي.....	1.6.6
180	المراجع.....	-
181	مسائل حسابية وأسئلة.....	-
	الباب (7) العمليات البيولوجية المؤثرة على مصير الملوث وانتقاله	
183	تأثيرات بيولوجية على الملوثات.....	1.7
185	معمل عملية التحلل الحيوي.....	2.7
191	النشاط الميكروبي والتحلل الحيوي.....	3.7
192	التأثيرات البيئية على التحلل الحيوي.....	1.3.7
194	الأكسجين.....	1.1.3.7
195	المجاميع الميكروبية والمحتوى من المادة العضوية.....	2.1.3.7

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
197	..... النيتروجين	3.1.3.7
197	..... تركيب الملوث	2.3.7
200	..... مسارات التحلل الحيوي	4.7
201	..... التحلل الحيوي تحت الظروف الهوائية	1.4.7
201	..... الهيدروكربونات الأليفاتية	1.1.4.7
204	..... الهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية	2.1.4.7
206	..... الهيدروكربونات العطرية	3.1.4.7
209	..... مسارات التحلل الحيوي تحت ظروف لاهوائية	2.4.7
212	..... الهيدروكربونات الأليفاتية	1.2.4.7
214	..... الهيدروكربونات الأروماتية (العطرية)	2.2.4.7
215	..... تحول الملوثات الفلزية	5.7
217	..... تأثيرات الفلزات على الأيض الميكروبي	1.5.7
221	..... المراجع	-
222	..... أسئلة ومسائل حسائية	-
الباب (8) الإحصاء في علم التلوث		
227	..... مفاهيم إحصائية	1.8
228	..... العينة الإحصائية	1.1.8
229	..... العرض المرئي للبيانات	2.1.8
232	..... مسميات رياضية في الإحصاء	3.1.8
232	..... قياسات وصفية	2.8
233	..... توزيعات تكرار مقاسة	1.2.8
241	..... المجتمعات والتوزيعات التكرارية الافتراضية	2.2.8
244	..... أهمية دالة التوزيع	3.2.8
246	..... توزيعات أخرى	4.2.8
254	..... تقديرات لأعداد العينات	3.8
255	..... حدود الثقة للمتوسط	1.3.8

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
262	..... مصطلحات مصداقية القيم التقديرية	2.3.8
263	..... تحليل الانحدار	4.8
270	..... المراجع	-
272	..... مسائل حسابية وأسئلة	-
الباب (9) الرصد البيئي في علم التلوث		
277	..... الرصد البيئي	1.9
278	..... أخذ العينات وطرق جمعها	2.9
282	..... أنماط أخذ العينات	3.9
283	..... أنماط ثنائية الأبعاد لأخذ العينات	1.3.9
286	..... اعتبارات عند أخذ عينات ثلاثية الأبعاد وعينات زمنية	2.3.9
288	..... جمع عينات من بيئة التربة	4.9
288	..... أخذ عينات تربة بطريقة إتلافية	1.4.9
290	..... أخذ عينات تربة بطرق غير إتلافية	2.4.9
294	..... اعتبارات ومحددات أخرى عند اخذ عينات التربة	3.4.9
299	..... جمع عينات لبيئة الماء	5.9
300	..... أخذ عينات من مياه سطحية	1.5.9
304	..... أخذ عينات من مياه جوفية	2.5.9
306	..... تحليل المياه - اعتبارات ومحددات أخرى عند أخذ العينات	3.5.9
310	..... رصد تلوث الهواء	6.9
311	..... رصد تلوث هواء المناطق الحضرية (المدن) ومصادره	1.6.9
218	..... رصد الانبعاثات الغازية من الترب والمكببات	2.6.9
318	..... أساليب الحجرة أو الغرفة	1.2.6.9
321	..... أساليب إحصائية دقيقة	2.2.6.9
322	..... أساليب قطاع التربة	3.2.6.9
324	..... الدقة وإعادة توليد القراءات للقياسات البيئية	7.9
328	..... المراجع	-

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
330	أساليب ومسائل حسائية.....	-
الباب (10) التخلص من المخلفات		
333	نظرة حول التخلص من المخلفات	1.10
334	أنواع وفتات المخلفات	1.1.10
337	المكبات	2.10
340	المكبات الصحية الحديثة	1.2.10
343	تخفيض كمية المخلفات الصلبة للمدن	2.2.10
345	معالجة المياه العادمة	3.10
348	فلاحة الأرض	4.10
348	طرق التخلص من الوحل	1.4.10
349	فوائد إضافة المخلفات للأراضي الزراعية	2.4.10
351	الأخطار المحتملة لإضافة المخلفات	3.4.10
351	النترات	1.3.4.10
352	الفلزات	2.3.4.10
355	كيماويات عضوية سامة	3.3.4.10
356	الكائنات المرضية	4.3.4.10
356	الاستخدام الزراعي لوحل محطات مصافي النفط	4.4.10
358	حقن الآبار العميقة بالمخلفات السائلة	5.10
361	الترميد ومنع الحركة	6.10
361	الترميد.....	1.6.10
362	منع الحركة	2.6.10
365	ضخ المخلفات من مصدر محدد للمياه المفتوحة	7.10
367	مخلفات خاصة وأساليب التخلص منها	8.10
368	المراجع.....	-
370	أسئلة ومسائل حسائية.....	-

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
الباب (11) المعالجة		
371	..... مفاهيم أساسية	1.11
378	..... الاحتواء	2.11
378	..... العوائق الفيزيائية (الطبيعية)	1.2.11
380	..... العوائق الهيدروليكية	2.2.11
382	..... الإزالة	3.11
382	..... الحفر وإخراج الحفريات	1.3.11
382	..... الضخ والمعالجة	2.3.11
386	..... الإزالة المحفزة	3.3.11
389	..... استخلاص بخار التربة	4.3.11
391	..... المعاملة عند الموقع	4.11
391	..... الإصحاح الحيوي	1.4.11
396	..... إضافة الأكسجين أو غازات أخرى	1.1.4.11
398	..... إضافة المغذيات	2.1.4.11
400	..... تحفيز التحلل اللاهوائي باستخدام قابلات إلكترونيات بديلة	3.1.4.11
400	..... إضافة المنشطات السطحية	4.1.4.11
402	..... إضافة كائنات دقيقة	5.1.4.11
403	..... الملوثات الفلزية	6.1.4.11
405	..... المعاملة الكيميائية عند الموقع	2.4.11
407	..... حالة للدراسة: ناقلة النفط	-
409	..... المراجع	-
410	..... أسئلة ومسائل حسابية	-
الباب (12) تلوث الهواء الجوي		
413	..... مفاهيم تلوث الهواء	1.12
417	..... مصادر تلوث الهواء	2.12
421	..... ملوثات رئيسية	1.2.12

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
421	..... أحادي أكسيد الكربون	1.1.2.12
423	..... الهيدروكربونات	2.1.2.12
424	..... المواد الجسيمية العالقة	3.1.2.12
425	..... ثاني أكسيد الكبريت	4.1.2.12
426	..... أكاسيد النيتروجين	5.1.2.12
426	..... ملوثات ثانوية	2.2.12
432	..... أنماط التلوث في الولايات المتحدة	3.12
433	..... المناخ والملوثات	4.12
434	..... النبات والانقلابات	1.4.12
436	..... الرياح والاضطراب وعلاقتها بتلوث الهواء	2.4.12
445	..... تحول الملوثات وإزالتها	3.4.12
448	..... قضايا تلوث الهواء الرئيسية	5.12
448	..... الاحتباس الحراري	1.5.12
452	..... استنزاف الأوزون	2.5.12
456	..... دورة تدمير الأوزون بواسطة أكاسيد النيتروجين	1.2.5.12
457	..... دورة تدمير الأوزون بواسطة بخار الماء	2.2.5.12
457	..... دورة تدمير الأوزون بواسطة مركبات الكلوروفلوروكربون	3.2.5.12
458	..... المراجع	-
459	..... أسئلة	-
الباب (13) تلوث المياه السطحية		
461	..... موارد المياه السطحية العذبة	1.13
463	..... مصادر المياه البحرية	2.13
464	..... المنطقة الساحلية	1.2.13
467	..... مياه المحيط المفتوحة	2.2.13
468	..... مصادر تلوث المياه السطحية	3.13
470	..... أعمال البناء واستخدام الأرض	1.3.13
472	..... الصرف البلدي والحضري	2.3.13

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
473	الكائنات الدقيقة المعوية	1.2.3.13
475	المادة العضوية	2.2.3.13
476	التقدير الكمي لتلوث المياه السطحية.....	4.13
476	مواد الكائنات الكاشفة	1.4.13
481	المادة العضوية والأكسجين الذائب	2.4.13
483	قياس المتطلبات المحتملة للمواد العضوية في الصرف من الأكسجين	3.4.13
483	الاحتياج الكيميائي للأكسجين	1.3.4.13
484	الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين	2.3.4.13
484	تحديد الاحتياجات البيوكيميائية للأكسجين	5.13
486	تأثير الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين على الأكسجين الذائب في المياه الداخلة.....	1.5.13
490	تخفيف تركيز الدفق	6.13
491	تخفيف التركيز في الجداول المائية والأنهار	1.6.13
494	تخفيف التركيز في الأجسام المائية الكبيرة.....	2.6.13
498	التخفيف الأولي والنقل	1.2.6.13
500	القياسات والحسابات	2.2.6.13
504	تتبع الأقماع باستخدام الأصباغ	7.13
508	التفاوت الزمني والمكاني لتراكيز القمع	8.13
509	مراقبة تنفيذ التعليمات	9.13
510	مواقع الخلط	1.9.13
511	تنظيم الاستخدام.....	2.9.13
512	أخذ عينات للتحقق	3.9.13
514	المراجع.....	-
515	أسئلة ومسائل حسائية.....	-
الباب (14) الأسمدة الزراعية كمصدر للتلوث		
517	التربة كمصدر لتغذية النبات	1.14
519	النيتروجين كمصدر للتلوث	2.14
520	استخدام الأسمدة النيتروجينية في إنتاج المحاصيل	1.2.14

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
521	..... دوران النيتروجين في الترب	2.2.14
528	..... تلوث المياه الجوفية بالنترات	3.2.14
530	..... العوامل التي تؤثر على التلوث بالأسمدة النيتروجينية	4.2.14
532	..... تطبيقات الإدارة الأفضل	5.2.14
538	..... الفوسفور كمصدر للتلوث	3.14
538	..... استخدام أسمدة الفوسفور في الإنتاج الزراعي	1.3.14
539	..... تلوث المياه بالفوسفور	2.3.14
541	..... العوامل المؤثرة على التلوث بالأسمدة الفوسفاتية	3.3.14
543	..... دراسة حالة	-
548	..... المراجع	-
549	..... أسئلة	-
الباب (15) الرسوبيات (تعرية التربة) كمصدر للتلوث		
551	..... التلوث بالرسوبيات	1.15
553	..... مدى انتشار التلوث الناتج عن الرسوبيات	2.15
561	..... التنبؤ بالفاقد من الرسوبيات	3.15
571	..... الإجراءات العملية للتحكم في التعرية	4.15
576	..... المراجع	-
577	..... أسئلة	-
الباب (16) المخلفات الحيوانية		
579	..... المنظور التاريخي	1.16
581	..... مصادر التلوث الأولية المباشرة ومصادر التلوث الثانوية غير المباشرة	2.16
585	..... ملوثات محددة	3.16
588	..... جودة الهواء	4.16
591	..... مصير الملوثات	5.16
591	..... النترات	1.5.16
592	..... الفوسفور	2.5.16

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
593	..... البكتيريا القولونية البرازية	3.5.16
594	..... رصد وكشف الملوثات	6.16
595	..... المنع والإصحاح	7.16
596	..... اختيار موقع المنشأة	1.7.16
596	..... خطة إدارة المخلفات	2.7.16
597	..... عناصر نظام المخلفات	8.16
597	..... الجمع (المواد الصلبة)	1.8.16
598	..... التوصيل (المواد السائلة وشبه السائلة)	2.8.16
598	..... مياه الجريان السطحي الناتجة عن عاصفة مطرية	3.8.16
599	..... التخزين	4.8.16
599	..... غلق المرفق لأسباب بيئية	5.8.16
601	..... الإضافة للأرض والتخلص من المخلفات	9.16
605	..... ميكروبيولوجيا تحلل المخلفات الحيوانية	10.16
612	..... المراجع	-
613	..... أسئلة	-
الباب (17) المبيدات كمصدر للتلوث		
615	..... النظرة الاجتماعية للمبيدات	1.17
618	..... أصناف المبيدات	2.17
620	..... المبيدات الحشرية	1.2.17
626	..... مبيدات القوارض	2.2.17
626	..... مبيدات الحشائش	3.2.17
629	..... منظمات نمو النبات ومبيدات الفطريات والمطهرات	4.2.17
630	..... مدى استعمال المبيدات	3.17
631	..... معايير الإفصاح عن بيانات المبيدات	1.3.17
633	..... مدى استعمال المبيدات	2.3.17
635	..... مصير المبيدات	4.17
642	..... تخفيف التلوث بالمبيدات	5.17

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
647	المراجع	-
649	مسائل وأسئلة	-
الباب (18) مصادر التلوث الصناعي		
651	المخلفات الصناعية	1.18
654	الصور الرئيسية للمخلفات الصناعية	2.18
657	المياه العادمة	1.2.18
660	المخلفات الصلبة والوحل	2.2.18
661	مخلفات صناعية ذات محتوى عالٍ من الفلزات	3.2.18
661	التعدين	1.3.2.18
662	انبعاثات الهواء	2.3.2.18
664	مخلفات صناعية ذات محتوى عالٍ من الأملاح	4.2.18
664	حفر آبار النفط والتكرير	1.4.2.18
666	محطات توليد الكهرباء بحرق الفحم	5.2.18
667	مخلفات صناعية ذات محتوى عالٍ من الكيماويات العضوية	6.2.18
667	معالجة المخلفات الصناعية والتخلص منها	3.18
668	انبعاثات الغاز والمواد العالقة	1.3.18
668	الترسيب الكيميائي	2.3.18
669	التليد والتخثير	3.3.18
670	التصليب أو التثبيت	4.3.18
670	الأكسدة	5.3.18
672	الردم	6.3.18
673	تكديس نفايات التعدين والأوحال	7.3.18
673	معالجة وإعادة استخدام المخلفات الصناعية	4.18
674	استرجاع الفلزات	1.4.18
675	استرجاع الطاقة	2.4.18
675	استرجاع المذيبات	3.4.18
676	إعادة استخدام المخلفات	4.4.18

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
677	.....المراجع	-
678	.....مسائلة حسابية وأسئلة	-
الباب (19) الكائنات الممرضة في البيئة		
679	.....أمراض ميكروبية مرتبطة بالماء	1.19
683	.....فئات الأمراض وأنواع الممرضات	2.19
686	.....أنواع الكائنات الممرضة	3.19
688	.....الفيروسات	1.3.19
694	.....البكتيريا	2.3.19
694	.....البكتيريا المعوية	1.2.3.19
697	.....الليجنيللا	2.2.3.19
700	.....الممرضات البكتيرية الانتهازية	3.2.3.19
701	.....البكتيريا الدالة	4.2.3.19
702	.....اختيار العدد الأكثر احتمالاً	5.2.3.19
705	.....اختبار المرشح الغشائي	6.2.3.19
705	.....اختبار وجود أو عدم وجود البكتيريا الواوية	7.2.3.19
710	.....البروتوزوا	3.3.19
710	.....الجيارديا	1.3.3.19
712	.....الكريبتوسبورديوم	2.3.3.19
716	.....حالة للدراسة	-
717	.....الديدان المعوية	3.3.3.19
720	.....الطحالب الخضراء المزرقة	4.3.3.19
720	.....مصادر الكائنات الممرضة في البيئة	4.19
724	.....الحمأة	1.4.19
727	.....المخلفات الصلبة	2.4.19
727	.....مصير الكائنات الممرضة وانتقالها في البيئة	5.19
731	.....المراجع	-

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
732	مسائل.....	-
الباب (20) معالجة المخلفات البلدية ومياه الشرب		
733	الماء والحضارة.....	1.20
734	طبيعة المياه العادمة (الصرف الصحي).....	2.20
738	معالجة المياه العادمة (الصرف الصحي).....	3.20
738	خزانات الصرف الصحي.....	1.3.20
741	العملية الإجمالية لمعالجة المياه العادمة.....	2.3.20
742	المعالجة الأولية.....	1.2.3.20
744	المعالجة الثانوية.....	2.2.3.20
747	المعالجة الثالثة.....	3.2.3.20
747	معالجة الحمأة (الوحل).....	3.3.20
751	إضافة المياه العادمة للأرض.....	4.3.20
754	الأراضي الرطبة ونظم الزراعة المائية.....	5.3.20
757	نموذج محطة حديثة لمعالجة الصرف الصحي.....	6.3.20
759	المخلفات الصلبة.....	4.20
763	معالجة مياه الشرب.....	5.20
772	المراجع.....	-
773	أسئلة.....	-
الباب (21) مبادئ علم السموم		
777	التاريخ الحديث لعلم السموم في الولايات المتحدة الأمريكية.....	1.21
780	السام مقابل غير السام.....	2.21
781	التعرض والجرعة.....	3.21
786	تقييم السمية.....	4.21
790	مظاهر السمية.....	1.4.21
793	اختبار السمية.....	2.4.21
797	اختبارات السمية المتعلقة بالتسرطن.....	3.4.21

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
798	الدراسات الوبائية	4.4.21
802	اختيارات سمية قصيرة المدى	5.4.21
804	التأثيرات الحدية	6.4.21
806	الاستجابات للمواد السامة	5.21
807	الامتصاص	1.5.21
809	التوزع	2.5.21
810	الإفراز	3.5.21
813	الأيض	4.5.21
814	مسببات السرطان (المسرطنات) والمطفرات والماسخات	6.21
819	السمية الكيميائية: اعتبارات عامة	7.21
822	السمية الكيميائية: مواد مختارة	8.21
822	العناصر الثقيلة	1.8.21
827	النويات المشعة غير العضوية	2.8.21
829	المبيدات الحشرية	3.8.21
833	مبيدات الحشائش	4.8.21
835	الهيدروكربونات المهلجنة	5.8.21
838	المراجع	-
839	مسائل حسائية وأسئلة	-
الباب (22) تقييم المخاطرة أو المجازفة		
841	مفهوم تقييم المجازفة	1.22
849	عملية تقييم الخطر	2.22
849	التعرف على الخطر	1.2.22
852	تقييم التعرض	2.2.22
856	تقييم علاقة الجرعة - الاستجابة	3.2.22
868	تحديد خصائص المخاطرة	4.2.22
868	تحليل عدم الثقة	1.4.2.22
869	توقعات المخاطرة والإدارة	2.4.2.22

الصفحة	الموضوع	رقم الموضوع
870	تقييم المخاطرة الأيكولوجية	3.22
875	تقييم المخاطرة الميكروبية	4.22
888	دراسة حالة	-
891	المراجع	-
893	أسئلة	-
الباب (23) القوانين والتنظيمات الفيدرالية والولاية		
895	مراجعة تنظيمية	1.23
897	قانون مياه الشرب الآمنة	2.23
898	قانون المياه النظيفة	3.23
901	القانون الشامل للمسؤولية والتعويض والاستجابة	4.23
902	قانون المبيدات الحشرية والقوارض الفيدرالي	5.23
903	قانون الهواء النظيف	6.23
904	قانون منع التلوث	7.23
906	المراجع	-
الباب (24) التلوث في القرن الواحد والعشرين		
907	قياس الجودة البيئية: إلى أي مدى يكون التنظيف نظيفاً؟	1.24
911	دور الحكومة	2.24
913	أنماط من التشريعات / والنشاطات البيئية	3.24
913	الهواء النقي	1.3.24
915	مياه شرب آمنة	2.3.24
917	الأرض والهواء والماء	3.3.24
918	منع التلوث	4.3.24
919	التخطيط للقرن الواحد والعشرين	4.24
922	الخاتمة	-
923	المراجع ولمزيد الاطلاع	-

الصور والأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
6	..... منحنى نمو نموذجي لمستعمرة بكتيريا نقية.....	: (1.1)
6	..... تزايد أعداد سكان العالم من بداية خلق الإنسان وحتى عام 1993	: (2.1)
	الكثافة السكانية العالمية حسب الأقاليم مبنية: (أ) الكثافة السكانية الكلية، (ب) النسبة	: (3.1)
10	..... المثوية للنمو السكاني الحضري، (ج) معدل النمو الحضري السنوي.....	
21	..... قطاعات تربة نموذجية	: (1.2)
22	..... مثلث قوام التربة	: (2.2)
26	..... حبيبات التربة الأولية والتجمعات الثانوية	: (3.2)
31	..... توضيح تخطيطي لتكون المادة العضوية بالتربة	: (4.2)
48	..... تغيرات الكثافة والضغط والارتفاع في الهواء الجوي للكرة الأرضية	: (1.3)
50	..... الدوران العام للهواء الجوي	: (2.3)
	تغيرات درجة حرارة الهواء مع الارتفاع خلال حالات الاعتدال وعدم الاستقرار	: (3.3)
60	..... والاستقرار.....	
65	..... تركيب الغلاف الجوي	: (4.3)
73	..... الحجم النسبي وشكل وأنواع ممثلة من البكتيريا والاكثينومايسيتات والفطريات.....	: (1.4)
74	..... البكتيريا مكون حيوي للكائنات الحية بالتربة	: (2.4)
76	..... أنواع من البكتيريا مع بعض من البكتيريا والاكثينومايسيتات.....	: (3.4)
98	..... علاقات $\frac{E_h}{pH}$ المثالية لمختلف الكائنات الحية بالتربة	: (4.4)
100	..... الحالات الفسيولوجية للكائنات الحية بالتربة	: (5.4)
104	..... الدورة الهيدرولوجية	: (1.5)
105	..... ثقب تم حفره خلال تربة غير مشبعة وحتى التربة المشبعة	: (2.5)
109	..... ارتفاع الماء بالخاصية الشعرية	: (3.5)
113	..... جهاز مقياس الشد مزود بجهاز قراءة رقمي	: (4.5)
116	..... منحنيات شد ماء التربة	: (5.5)
119	..... عمود تربة مشبع له مقطع A يمكن عن طريق حساب التوصيل الهيدروليكي المشبع بواسطة	: (6.5)

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
	قياس الدفع وكذلك ΔH و Z	
120	علاقات التوصيل الهيدروليكي مقابل الشد	(7.5):
131	استخدام الليسمترات في الدراسة المحكمة بالموقع	(8.5):
132	استخدام القواطع لدراسة حركة الماء والأملاح خلال قطاع التربة	(9.5):
133	التجهيز الاختباري لدراسات الأعمدة	(10.5):
134	توزيعات تركيز الراشح	(11.5):
136	التركيز مقابل الزمن لماء يتم تنقيطه خلال تربة عميقة وغير مشبعة	(12.5):
136	جبهة انتشار التريتيوم في تربة غير مشبعة	(13.5):
138	انتشار جبهة الكلور في خزان رملي	(14.5):
149	توضيح لمشدادين لحل المسألة أ، ب	(15.5):
153	تحول الأطوار ملوث مع طوري الماء والغاز	(1.6):
163	التبادل الكاتيوني على حبيبات الطين	(2.6):
165	مسارات ذوبان وامتصاص المعادن في التربة	(3.6):
168	علاقات خطية ولاخطية لامتناس ملوثات	(4.6):
172	تأثير الإدمصاص على انتقال الأملاح الذائبة	(5.6):
174	تأثير إقصاء الأيونات على انتقال الأملاح	(6.6):
187	معدنة هوائية لمركب عضوي	(1.7):
188	تسلسل عملية تحلل المركبات العضوية	(2.7):
190	أكسدة الميثان بواسطة بكتيريا الميثان	(3.7):
191	تفاعلات البلمرة التي تحدث لمبيد البروبانيل خلال التحلل الحيوي	(4.7):
193	المواقع الرئيسية لحدوث التلوث في النظم الحيوية الأرضية	(5.7):
193	هيدروكربونات عطرية وحلقية وإيفاتية	(6.7):
194	تأثيرات الأكسدة على قابلية مركبات أليفاتية للتحلل حيوياً	(7.7):
199	مركبات (ABS) الخطية والمتفرعة النشطة سطحياً	(8.7):
203	مسارات التحلل الهوائي لمركبات أليفاتية	(9.7):

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
205	تحلل حيوي تحت ظروف هوائية لمركبات أليفاتية مكلورة	: (10.7)
206	تحلل حيوي تحت ظروف هوائية لمركب الهكسان الحلقي	: (11.7)
208	مسارات تحلل حيوي تحت ظروف هوائية لمركبات عطرية	: (12.7)
	مدى جهود الأكسدة والاختزال التي توجد في البيئات التي تعيش فيها عادة كائنات دقيقة نشطة أيضاً	: (13.7)
211	.....
212	مسار عام لتحلل حيوي لاهوائي لمركب ألكين	: (14.7)
213	إزالة الهالوجينات اختزالياً لمركب هيدروكربوني مكلور	: (15.7)
215	مثال عن سلسلة غذاء لاهوائية	: (16.7)
220	الألكلة الميكروبية للزئبق	: (17.7)
231	الانبعاث السنوي من مركبات الكلوروفلوروكربون للفرد الواحد	: (1.8)
238	الشكل العمودي التكراري والتراكمي للطين	: (2.8)
243	دالة توزيع تكراري وتراكمي	: (3.8)
246	توزيع طبيعي لوغاريتمي للمتغير (x)	: (4.8)
251	رسم بياني للتشتت والتوزيع التكراري	: (5.8)
258	علاقة عدد العينات بالدقة لتقدير المتوسط	: (6.8)
261	التوقيع البياني لغاز CO ₂ المنطلق أثناء التكسير الميكروبي لمكونات النفط الخام	: (7.8)
265	إنتاجية الخس مقابل تركيز غاز الأوزون	: (8.8)
283	اختيارات لأغماط أخذ عينات مكانية	: (1.9)
287	آبار تم حفرها لأخذ عينات لتحديد مدى انتشار ملوث في مياه جوفية	: (2.9)
290	منصة حفر متنقلة مزودة بأوَجْر مجزأ لأخذ عينات تربة حسب العمق	: (3.9)
298	التوزيع الموسمي للنترات في الطبقة العلوية من تربة حقل مزروع	: (4.9)
311	بالونات لقياس درجة الحرارة والضغط والرطوبة	: (5.9)
320	وعاء مغلق لقياس تدفق غاز للهواء الجوي	: (6.9)
322	أجهزة إحصائية دقيقة لقياس تدفق N ₂ O	: (7.9)
323	منظر لمكب في مدينة توسان، أريزونا	: (8.9)

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
336	..... طبيعة مكونات قمامة المنازل في الولايات المتحدة الأمريكية	: (1.10)
339	..... نظام مكب صحي من طراز قديم وآخر حديث	: (2.10)
340	..... مكب في نيويورك الأضخم في العالم	: (3.10)
341	..... المسارات الرئيسية للتخلص من القمامة الصلبة للمدن في الولايات المتحدة	: (4.10)
347	..... ضخ وحل الصرف الصحي لمدينة توسان إلى خزان شاحنة	: (5.10)
349	..... إضافة الوحل البلدي للأرض	: (6.10)
358	..... إضافة المخلفات الزيتية للأراضي الزراعية	: (7.10)
360	..... تصميم بئر حقن عميق وحالات الفشل الممكنة	: (8.10)
365	..... مصدر تلوث رئيسي يضح مخلفاته إلى مجرى مائي	: (9.10)
347	..... عملية تطبيق التمويل العظيم للتعامل مع موقع مخلفات خطره	: (1.11)
376	..... عملية الاستقصاء العلاجي / دراسة الجدوى	: (2.11)
379	..... الاحتواء الفيزيائي للملوث معين باستخدام حائط وحل لزوج	: (3.11)
387	..... احتواء جبهة انتشار الملوث بواسطة حاجز هيدروليكي	: (4.11)
388	..... إزالة ملوث معين بواسطة عمليات الضخ والمعاملة	: (5.11)
390	..... تفاعلات المنشطات السطحية والملوثات العضوية	: (6.11)
395	..... إصحاح حيوي عند الموقع في النطاق غير المشبع والمياه الجوفية	: (7.11)
399	..... الإصحاح الحيوي لأبخرة متسربة من خزان تجميع تحت الأرض	: (8.11)
401	..... صورة إلكترونية لمادة منشطة سطحية تم إنتاجها ميكروبياً	: (9.11)
418	..... الترسبات الجوية الناتجة عن تلوث هواء المدن وتدهور النصب الرخامية	: (1.12)
420	..... إسهامات المصادر المختلفة للتلوث في الولايات المتحدة ومصادرها الأساسية	: (2.12)
422	..... الحرائق العشوائية مصدر طبيعي لتلوث الهواء الجوي	: (3.12)
429	..... تفاعل الهيدروكربونات مع أكاسيد النيتروجين	: (4.12)
431	..... أنماط تلوث الهواء في الولايات المتحدة الأمريكية	: (5.12)
435	..... تدفق الهواء وخلطه وسرعته النسبية وتأثيرها بالارتفاع	: (6.12)
437	..... نمط القمع الناتج عن انبعاث مستمر من مدخنة	: (7.12)
442	..... تأثير الاستقرار الجوي على نمط القمع المدخني	: (8.12)

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
445	..... نمط القمع الناتج عن انبعاثات من مدخنة فوق مستوى ارتفاع الانقلاب وتحتة.....	(9.12):
448	..... زيادة التصنيع وزيادة الانبعاثات من غاز ثاني أكسيد الكربون في الهواء الجوي.....	(10.12):
465	..... تنظيمات تلوث المياه في المنطقة الساحلية.....	(1.13)
472	..... نموذج أنبوب صرف قديم.....	(2.13):
485	..... نتائج نموذجية لاختبار احتياج الأكسجين البيوكيميائي.....	(3.13):
489	..... منحى انبعاث الأكسجين الذائب باستخدام قيم K وقيم الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين.	(4.13):
498	..... منظر عن قرب لصورة في سلسلة زمنية (شكل 6.13).....	(5.13):
499	..... مونتاج صور فوتوغرافية لاختبار التشتت والترسيب لرحل مجاري.....	(6.13):
506	..... قمع سطحي تم صبغه بمادة الرودامين لمياه مجاري معالجة جزئياً.....	(7.13):
520	..... أنماط تاريخية لاستخدام المغذيات التسميدية في الولايات المتحدة.....	(1.14):
526	..... تحولات نيتروجين التربة.....	(2.14):
531	..... توزيع مساحي لتراكيز النترات في المياه الجوفية بالولايات المتحدة.....	(3.14):
534	..... الحد الأدنى للحرق لمحصول الذرة في ولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة.....	(4.14):
535	..... منحى مثالي لإنتاج محصول ما والفقد المصاحب من النيتروجين.....	(5.14):
537	..... النمط الموسمي لامتنصاص (N) بواسطة محصول حولي نموذجي.....	(6.14):
554	..... استخدام الأراضي بالولايات المتحدة الأمريكية.....	(1.15):
556	..... أراضي زراعية سيئة الصرف في مناطق منخفضة.....	(2.15):
558	..... القيود السائدة التي تحد من ملائمة ترب الولايات المتحدة لزراعة المحاصيل.....	(3.15):
560	..... خريطة الولايات المتحدة ومعدلات تعرية التربة السنوية.....	(4.15):
562	..... قطرة مطر إثر اصطدامها بسطح التربة وتأثير إدارة الأراضي على التعرية.....	(5.15):
565	..... خارطة الولايات المتحدة وخطوط قابلة التربة للتعرية.....	(6.15):
584	..... الأمطار المتواصلة مدة 24 ساعة خلال 25 عاماً بالولايات المتحدة.....	(1.16):
594	..... الارتشاح المحتمل للملوثات في التربة المسامية.....	(2.16):
600	..... تدفق عام للمخلفات من مرفق لتربية الأبقار الحلوب.....	(3.16):
601	..... تكويم الروث في ردهات حلب الأبقار.....	(4.16):
603	..... قطاعات في البرك الهوائية واللاهوائية.....	(5.16):

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
634	المبيعات المسجلة من المبيدات المختلفة.....	: (1.17)
638	مصير المبيدات في التربة	: (2.17)
642	الحركة والبقاء النسبي في التربة	: (3.17)
658	مصادر وطرق تحرر الملوثات في البيئة.....	: (1.18)
682	العوامل المرضية المرتبطة بالحالات المرضية المنقولة بالمياه.....	: (1.19)
691	فيروس نورووك.....	: (2.19)
693	تقييم كمي للفيروسات والبكتيريا.....	: (3.19)
696	طريقة القيام باختبار الفيروس الملتهم للبكتيريا.....	: (4.19)
704	خطوات القيام باختبار العدد الأكثر احتمالاً للبكتيريا القولونية في عينات مياه.....	: (5.19)
707	طريقة الترشيح الغشائي لتحديد أعداد البكتيريا القولونية في عينة مياه	: (6.19)
708	الكشف عن البكتيريا الدالة باستخدام الكاشف Colilert.....	: (7.19)
715	الحويصلات البيضوية (oocysts) للكريبتوسبورديوم	: (8.19)
721	يمكن أن يصبح المستحون مصدراً شائعاً للكائنات المرضية.....	: (9.19)
735	المسارات التي يمكن للمخلفات البلدية عن طريقها تلويث المياه الجوفية	: (1.20)
740	نظام خزان الصرف الصحي	: (2.20)
	عمليات معالجة نمطية بمنشآت معالجة حديثة للمياه العادمة باستخدام خزان الهضم الهوائي.....	: (3.20)
743	الهوائي.....	
748	طريقة ترشيح بالتنقيط تمثل طريقة بسيطة لمعالجة ثانوية	: (4.20)
750	عمليات معالجة الحمأة ووظائفها	: (5.20)
752	ثلاث طرائق رئيسية لإضافة المياه العادمة للأرض.....	: (6.20)
756	نباتات مائية شائعة تستخدم في الأراضي الرطبة الصناعية	: (7.20)
758	محطة معالجة المياه العادمة بطرق روجر بمدينة توسان	: (8.20)
761	منظر علوي لمنشأة تصنيع الكمبوست تستخدم طريقة السطور	: (9.20)
762	صنع الكمبوست بطريقة الكومة الموهوة الثابتة	: (10.20)
766	قطارات عمليات معالجة المياه النمطية	: (11.20)
806	المسارات الرئيسية لامتناس وانتشار وإفراز مادة كيماوية	: (1.21)

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
817	..... تركيب مواد كيميائية سامة مصنعة وطبيعية موجودة في البيئة	: (2.21)
820	..... مثال عن مواد كيميائية متشابهة تركيبياً ولها قوة سمية مختلفة	: (3.21)
850	..... حساسية علم الأوبئة على كشف المخاطر ذات الاهتمام التنظيمي	: (1.22)
852	..... يتطلب تقييم المخاطرة تحديد مستويات الملوث في عينات بيئية	: (2.22)
858	..... استنتاجات لمنحنيات الجرعة - الاستجابة	: (3.22)
865	..... عامل الفعالية أو القوة لمادة مسرطنة	: (4.22)
872	..... إطار تقييم مخاطرة إيكولوجي	: (5.22)
877	..... يتطلب تقييم المخاطر تقنيات متطورة	: (6.22)
878	..... نتائج التعرض لفيروسات معوية	: (7.22)
897	..... عمليات تطور تنظيم معين حسب قانون مياه الشرب الآمنة	: (1.23)
904	..... قانون التمويل العظيم لا يتعرض لمسألة التعويض المالي للمعانة الناجمة عن المخلفات الخطرة التي تم التخلص منها بصورة غير قانونية	: (2.23)
905	..... أدى تشريع الهواء النظيف إلى تحسين في جودة الهواء عالمياً	: (3.23)
910	..... التقنيات الحديثة بدلاً عن صور التحليل القديمة	: (1.24)

تقديم المؤلفين

إلى الطالب:

التلوث هو دون مناص نتائج لجميع الاقتصاديات الصناعية - وهو فعلياً أحد التكاليف التي ندفعها مقابل نمط حياتنا. وعلى ذلك، فهو أمر يتعين عليك أنت وكذلك صناع القرار المنتخبون إدارته في الوقت الحاضر ومستقبلاً. وستوفى بك المفاهيم والخطوط الإرشادية الواردة في هذا الكتاب التبرير العلمي للقرارات التي تؤثر مباشرة على البيئة من حولك. إن مثل هذه القرارات قد تكون سهلة بسيطة مثل خيار إعادة تدوير مكونات البلاستيك والزجاج في مخلفاتك، أو أنها قد تشمل القضايا المعقدة التي يتم الجدل حولها عند أعلى سلطة تشريعية بالبلاد.

وبقدر ما أمكن تم الابتعاد عن إدخال أي أيديولوجية سياسية قد تترك التقييم العلمي للجودة البيئية حيث تم الالتزام بالأسس العلمية، والأنماط القياسية، والمشاهدات. وفي هذا الكتاب، حاولنا تحديك عزيزي الطالب بمسائل وأسئلة ترتبط بكل موضوع كما تم تقديم وقائع حقيقية في الحياة تتضمن حالات للدراسة في مجالات عدة مختلفة لعلم التلوث. إن ما ورد في هذا الكتاب لا يسعى إلى تحديد إجابات أو أساليب لمشاكل تلوث محددة، وبدلاً عن ذلك طرحنا إطار عمل أو مبادئ يمكن استخدامها لفهم أي مشكلة تلوث. كما شملنا أيضاً أجزاء حول الرصد البيئي وطرق أخذ العينات، واستخدام الإحصائيات المناسبة. وعليك عزيزي الطالب أن تلاحظ أن هذا التقديم لا يصف الأجزاء المختلفة من الكتاب ولذا فإذا كنت تريد معرفة ما في هذا الكتاب - أقرأه وبقدر من التوفيق سوف تجد

أن هذا الكتاب مصدر قيم لك ولفترة طويلة بعد انتهاءك من الفصل الدراسي. نتمنى لكم أعزائي الطلبة الخير و نأمل أن بعضاً منكم سوف يسعى للانخراط في مهنة تهدف إلى تحقيق بيئة صحية لنا جميعاً.

إلى المدرس:

أن القضية البيئية تجذب اهتماماً متزايداً على المستويات المحلية والوطنية والدولية وتمثل المشكلة الكبرى التي تواجه المجتمع والحكومة على السواء في اختيار الاستراتيجيات التي تصون بيئة آمنة دون اللجوء إلى المزيد من القوانين وتكبد تكاليف مفرطة. إن الكشف عن وجود عدد محدود من الأفراد من ذوي الخبرة الكافية لاتخاذ قرارات كهذه نتج عنه تطور علم تخصصي جديد في الكثير من الجامعات والكليات هو العلم البيئي (Environmental Science) إن هذه البرامج في معظمها قوية وعلى أساس علمي وتتطلب خلفية واسعة في علوم الأرض والكيمياء والفيزياء والأحياء والرياضيات.

عندما أنشأنا تخصصاً في العلم البيئي في جامعة أريزونا خريف عام 1993، اتضح لنا أنه يلزم إيجاد مقررراً دراسياً جيداً عن التلوث تتكامل فيه المعرفة من عدة مجالات علمية. كما شعرنا أيضاً أن كتاباً مرجعياً يتميز بقاعدة علمية من هذا النوع سيكون مهماً جداً لنجاح المقرر الدراسي. لكنه، اكتشف وبسرعة أنه لا يوجد كتاباً مرجعياً من هذا النوع يغطي المادة العلمية المناسبة بتوسع وعمق كافيين. ونتيجة لتطلعنا لتدريس هذا المقرر دون وجود كتاب برز لدينا مفهوم تأسيس كتاب منهجي يشترك في إعداده عدة مؤلفين تم اختيارهم من قسمنا وهو قسم التربة والمياه وعلوم البيئة. ونحن نشعر أن المساهمات من عدة مجالات علمية مختلفة ضروري لتتبع الجوانب الحرجة التي ترتبط بمصير الملوثات والتقليل من

أضرارها على امتداد الحدود التقليدية الفاصلة فيما بين التخصصات. وعلى ذلك فإن هذا الكتاب يمثل جهداً طليعياً.

وقد صمم هذا الكتاب ليكون مفهوماً لمدى واسع من الطلبة من ذوي الخلفيات العلمية المختلفة. فمن حيث المفهوم، فإن هذا الكتاب يمكن الولوج فيه من قبل أي طالب تقريباً. يكون عنده قدر جيد من العلوم الأساسية، إضافة لذلك تجدر الإشارة إلى وجود قدر من الصعوبة حتى يكون الكتاب مرجعاً متخصصاً للطلبة في المرحلة المتقدمة. ويركز الكتاب على تلوث الهواء الجوي والمياه السطحية والترربة والمياه الجوفية. وقد كتبت أبواب هذا الكتاب بواسطة عدة مساهمين، العديد منهم معروفين على المستوى القومي، حيث كتب كل واحد منهم في مجال تخصصه.

وعادة ما تكون الكتب التي يشترك في إعدادها عدة كتاب غير مرتبة لعدم وجود تجانس كافٍ واختلاف الأسلوب. لكن استخدام عدة كتاب من مؤسسة واحدة يسهل من جهد التنسيق، والمراجعة وتكامل الأجزاء المختلفة لهذا الكتاب. وفي الوقت الذي نعتبر فيه مستوى المادة العلمية المقدمة تحدياً في حد ذاته، فقد حاولنا أن نجعل هذا الكتاب محفزاً للطلبة. وتساعد الشروحات والصور الملونة المتعددة على توضيح المفاهيم الرئيسية لهذا الكتاب.

وعلى ذلك، نأمل أن يلهمك هذا الكتاب ويشجعك على تدريس مواضيع واسعة المدى التي تشكل مجال علم التلوث.

المؤلفون:

- Ian Pepper.
- Chuck Gerba.
- Mark Brusseau.

مقدمة الترجمة

يُجمع الخبراء على أن التلوث البيئي في وقتنا الحالي أصبح يشكل التحدي الأكبر الذي يواجه الإنسان عموماً، فلقد طالت هذه الظاهرة الحياة في صورها كافة؛ لما تسببه من تدهور لخصائص العناصر البيئية الأساسية المتمثلة في الهواء والماء والتربة، وبدرجة غير مسبوقة في حدتها وخطورتها.

لقد تناول مؤلفو هذا الكتاب (علم التلوث) بصورة شاملة أساسيات وعناصر هذا الموضوع الحيوي الهام بأسلوب علمي رصين، مدعوم بالصور والجداول، بما يمنح القارئ فرصة للإلمام بكافة الجوانب المرتبطة بهذه الظاهرة التي نعيش إرهاباتها، بل وكوارث تداعياتها السلبية الخطيرة التي بدأت فعليا برصد تغير في نمط الحياة بأقطار عدة من العالم.

إن مواجهة ما يتعرض له كوكب الأرض من سوء استثمار لموارده الطبيعية، وعجز في إدارتها بكفاءة يتطلب تعاضداً محلياً ودولياً فورياً، من خلال نشر ثقافة بيئية بين شرائح المجتمع كافة، واستصدار القوانين ومتابعتها بما يؤدي إلى الحد من ممارسات الإنسان السلبية.

إن ما يضمه هذا الكتاب من سرد علمي وتحليل دقيق لحالات تلوث كيميائي وبيولوجي حقيقية، وكذلك مراحل استصدار القوانين المنظمة التي تهدف إلى المحافظة على العناصر البيئية الأساسية؛ ستكون مفيدة للطالب والباحث وعضو هيئة التدريس الجامعي وصنّاع القرار.

لقد أخذت ترجمة هذا الكتاب الكثير من الجهد والوقت لتنوع المواضيع الهامة الواردة به، وأدعو الله سبحانه وتعالى أن يتحقق من ورائه نشر المعارف الواردة فيه حتى تترسخ وتنعكس على أداء وسلوك كل من تصل إليه.

أتوجه بجزيل الشكر والامتنان للسيدتين الفاضلتين: الدكتورة صالح مصطفى النويصري، والدكتور ميكائيل يوسف الفيتوري عضوي هيئة التدريس بجامعة طرابلس وعمر المختار على التوالي، لما بذلاه من جهد في المراجعة العلمية لترجمة هذا الكتاب.

كما أتوجه بالشكر والتقدير للأستاذ سليمان هاشم المريني على مراجعته للنصوص العربية وما بذله من جهد وإتقان. وختاماً فإني أتوجه بالشكر لكل من الأخوين منير الشلوي وحافظ البجيتي على طباعتهما لهذا الكتاب الذي لم يكن نزهة سهلة لما تضمنه من تفاصيل دقيقة حرصاً على القيام بها.

المترجم

The Editors

All three editors are professors in the Department of Soil, Water and Environmental Science at the University of Arizona.



Ian L. Pepper Ph.D., The Ohio State University, 1975. Currently Professor of Environmental Microbiology. Dr. Pepper's diverse research interests are reflected in the fact that he is Fellow of the Soil Science Society of America, The American Academy of Microbiology, and the American Society of Agronomy. He is a pioneer in the use of molecular analyses for the detection of microbial diversity and activity in environmental samples. He has also been heavily involved in the evaluation of the benefits and hazards of waste utilization.

"I was born in Tonypandy, Wales, where the world consisted of coal mines, cricket, soccer, and tea. Now I live in the Sonoran Desert, a far cry from those green valleys of my youth. Neither ecosystem has been immune to the ravages of pollution including the effects of mining and the influence of locally high population densities. We must however, meet the formidable challenges and problems of pollution through a combination of science and common sense."



Charles P. Gerba Ph.D., University of Miami, 1973. Currently Professor of Microbiology. Dr. Gerba is a Fellow of the American Academy of Microbiology and a Member of the EPA Science Advisory Board. As such he has been influencing national research areas of study within the environmental science arena. He has an international reputation for his methodologies for pathogen detection in water and food, pathogen occurrence in households, and risk assessment.

"My interest in microbiology was sparked by Paul DeKruif's inspiring tales of the scientific achievements of early microbiologists in the book *The Microbe Hunters* and my mother's error in giving me a microscope for Christmas instead of the chemistry set I wanted. In my first summer job out of college I was introduced to environmental microbiology by studying sewage disposal. Later I examined the fate of viruses in sewage discharged into the ocean. These beginnings led me to an exciting and adventurous career in environmental microbiology where every day brings a new problem to be addressed."



Mark L. Brusseau Ph.D., University of Florida, 1989. Currently Associate Professor of Subsurface Hydrology and Environmental Chemistry. Dr. Brusseau's research is focused on developing a fundamental understanding of the factors and processes influencing the transport and fate of chemicals in the subsurface. He is especially well known for integrating physical, chemical, and microbiological processes into subsurface hydrology using both experimental and model-based approaches. He is also involved in the development and evaluation of subsurface remediation systems. Dr. Brusseau has received the National Academy of Sciences Young Investigator Award and the U.S. Department of Energy Distinguished Young Faculty Award.

"I have been interested in earth science since high school. However, it took many years and a tortuous path before I finally discovered the "name" for my interests—Environmental or Pollution Science. I hope this text will help others to discover their interest in this field."

Editor Photographs: R.F. Walker.

Technical Editor



Jeffrey W. Bredecke Technical Editor and Scientific Graphic Artist. President of Anagenesis Custom Graphic Solutions. M.S., The University of Arizona, 1992. Mr. Bredecke incorporates his computer graphics expertise with an extensive background in chemistry, biology, agriculture, and environmental science to design and illustrate conventional and multimedia materials for education and commerce. In addition to this text, some of his other published works are found in the journal *Microcontamination*, *The Guidebook: Nitrogen Best Management Practices for Concentrated Animal Feeding Operations in Arizona*, and *Environmental Microbiology: A Laboratory Manual*, which he also co-authored.

Technical Editor Photograph: R.F. Walker.

Acknowledgments

The editors and authors extend their sincere thanks to many individuals for their assistance with this textbook. We thank Emily Thompson of E.T. Editorial Services, Ft. Worth, Texas, for her invaluable copyediting. Don Armstrong, Carlos Enriquez, Dave Garret, Eileen Maura Jutras, Kelly Reynolds, and Ken Weber all helped find information, at times on an emergency basis. We gratefully acknowledge the tireless word-processing skills of Elenor Loya, who took the various drafts and diligently formatted them. Peter Gerba, Deborah Newby, Barbara Pepper, Timberley Roane, and James Tanguay all assisted in the proofing of the text, and Kelly Tate and Beth Petruccio helped in the development of the subject index. We appreciate the constructive suggestions on the fine tuning of the design and layout supplied by Jean Bredecke, Linda Shapiro, Emily Thompson, and James Tanguay. Mridula Gupta, M.T. Macari, Sheri A. Musil, Joe Vinson, and Y. Zhang assisted with the initial drafts of several of the illustrations. Olivia Montañó and Jean Bredecke helped prepare the digital information for pre-press.

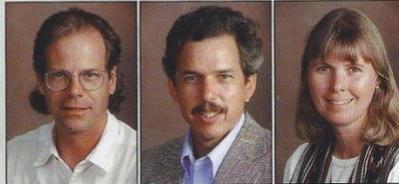
Contributing Authors



Janick F. Artiola Associate Research Scientist
Ph.D., The University of Arizona, 1980

Don J. Baumgartner Professor
Ph.D., Oregon State University, 1967

Hinrich L. Bohn Professor
Ph.D., Cornell University, 1963



Mark D. Burr Research Specialist
Ph.D., The University of Arizona, 1996

Robert J. Freitas Assistant in Extension
M.S., The University of Arizona, 1991

Karen L. Josephson Senior Research Specialist
B.S., The University of Arizona, 1980



Allan D. Matthias Associate Professor
Ph.D., Iowa State University, 1979

Raina M. Miller Associate Professor
Ph.D., Rutgers University, 1988

Sheri A. Musil Senior Research Specialist
B.S., The University of Arizona, 1979



Donald F. Post Professor
Ph.D., Purdue University, 1967

Thomas L. Thompson Assistant Professor
Ph.D., Iowa State University, 1991

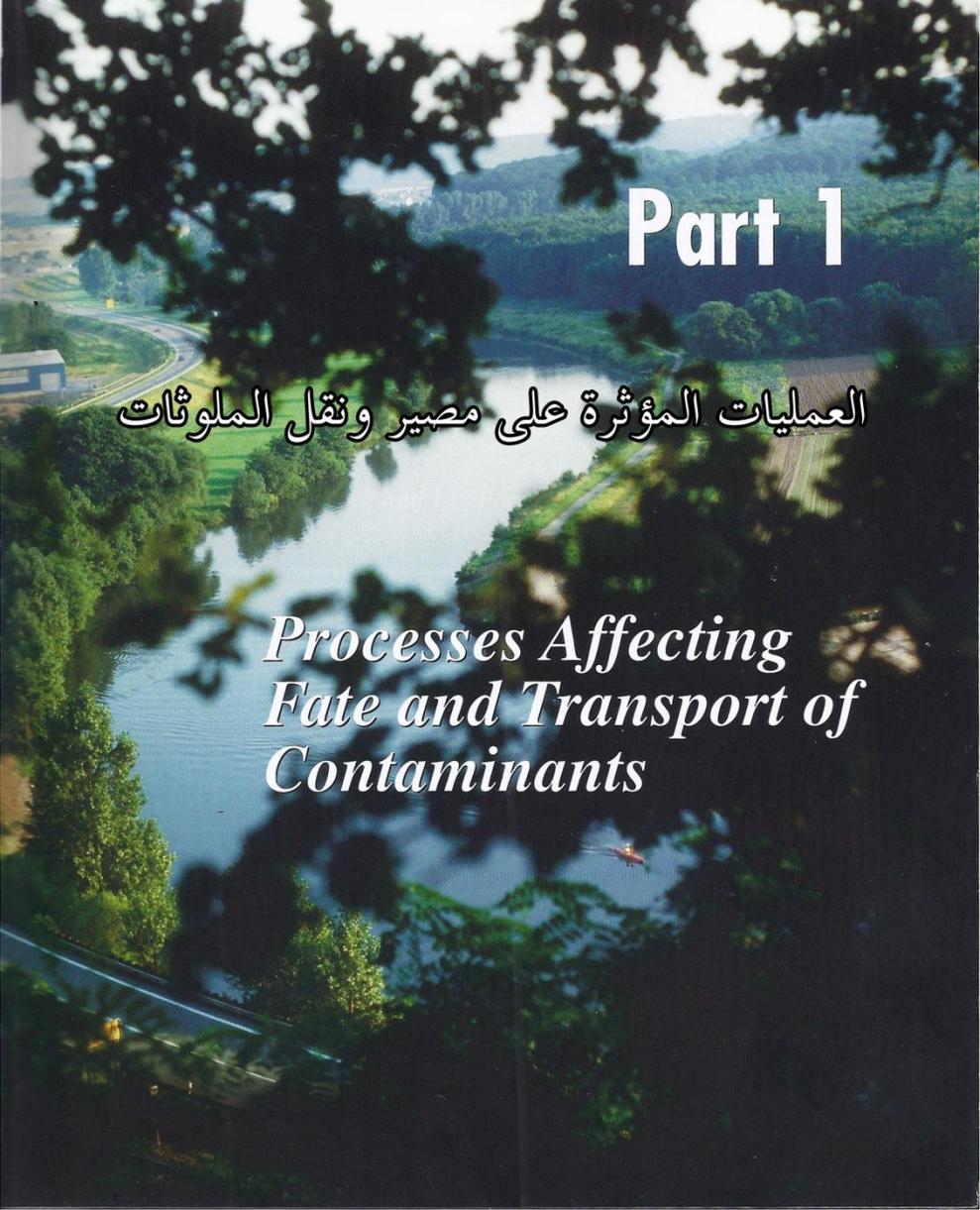
Arthur W. Warrick Professor
Ph.D., Iowa State University, 1967



Jack E. Watson Associate Extension Specialist
Ph.D., The University of Arizona, 1982

Peter J. Wierenga Professor and Department Head
Ph.D., University of California at Davis, 1968

Author Photographs: R.F. Walker.



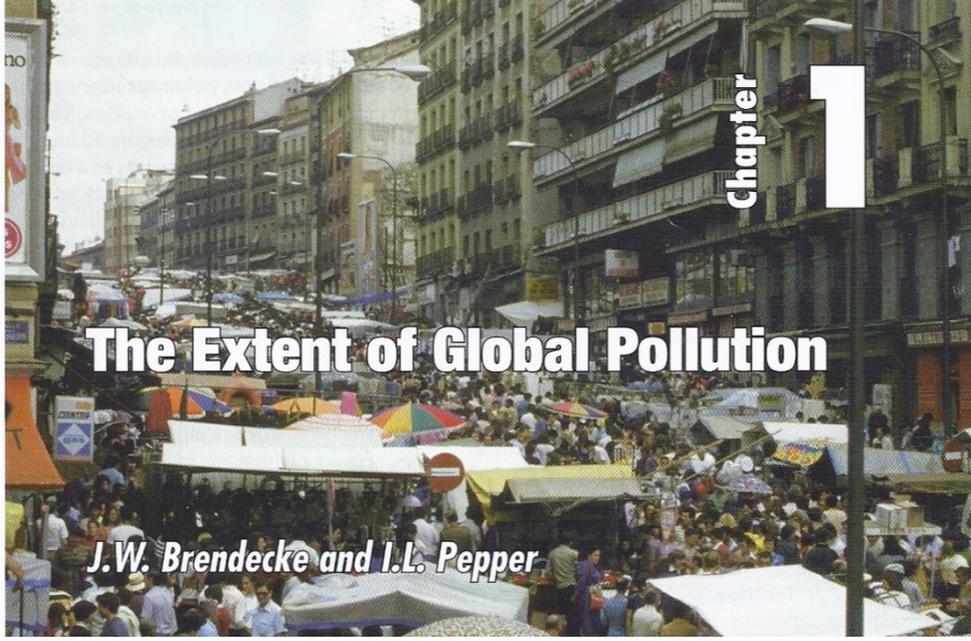
Part 1

العمليات المؤثرة على مصير ونقل الملوثات

*Processes Affecting
Fate and Transport of
Contaminants*

الباب الأول

مستوى أو مدى التلوث العالمي



يعطي علم التلوث القاعدة المعرفية الضرورية للتعامل مع التلوث على الرغم من التزايد المستمر لضغط السكان.

1.1 تحديد الأسباب

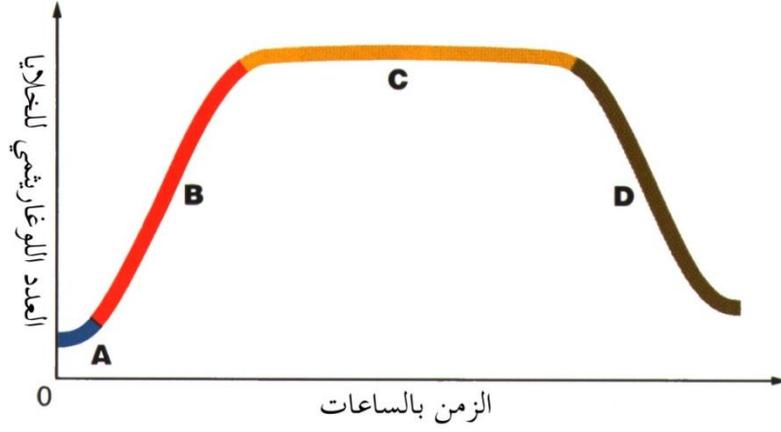
لفهم التلوث يتعين أولاً تحديد ماهية التلوث وما هي أسبابه، وعموماً فإن التلوث هو تراكم الملوثات وتفاعلاتها السلبية مع البيئة، وتنتج المواد الملوثة عادة عن مصدرين: نشاطات كائنات حية وعمليات تتعرض لها مواد غير حية، ويتمثل المصدر الأول في تراكم المخلفات التي تنتج عن نشاط الكائنات الحية، ويعتبر الإنسان الكائن الحي الأكثر ارتباطاً

بالتلوث إذ يمكنه أن يسبب تلوثاً إما بشكل مباشر أو غير مباشر من خلال نشاطاته مع الكائنات الأخرى، فمثلاً يمكن أن يتسبب في حدوث تلوث بشكل مباشر عن طريق إضافة كميات مفرطة من الأسمدة الكيميائية أو المبيدات، أو بصورة غير مباشرة عن طريق سوء إدارة محطات تربية الأبقار. أما المصدر الثاني للمواد الملوثة فهو نتاج لعمليات طبيعية مثل تراكم العناصر المعدنية التي تنتج عن ذوبان الصخور أو تداخل مياه البحر مع المياه العذبة بسبب ظروف الجفاف، ولكن أكثر أمثلة التلوث خطورة تظل تلك التي تصاحب نشاطات الإنسان أو تحدث بسببه.

وعلى الرغم من أن التلوث قد وجد عبر تاريخ الإنسانية، إلا أن الزيادة الكبيرة في تعداد السكان خلال النصف الثاني من القرن العشرين، يمثل في الوقت الراهن تهديداً خطيراً للبيئة العالمية. ولفهم العلاقة بين تعداد السكان والتلوث، دعنا نفحص منحنى نمطياً لمستعمرة نقية من البكتريا في بيئة سائلة (شكل 1.1). بداية، فإن البكتريا التي تنمو في هذه البيئة لا تتزايد أعدادها معنوياً، وذلك بسبب انخفاض كثافتها، التي ينتج عنها عمل هذه الكائنات ككيانات منفصلة، ويعرف طور النمو المنخفض الأولي هذا بفترة الطور التحضيري (Lag period). يلي ذلك تزايد أعداد الكائنات بحدة لفترة محدودة من الوقت. ويعرف هذا الطور من النمو بالطور اللوغاريتمي (Log phase). بعد ذلك يبدأ طور الثبات (stationary phase) حيث تنتج كائنات جديدة باستمرار، بينما أخرى تموت ليظل العدد الكلي للكائنات ثابتاً. وأخيراً، نلاحظ طور الموت (death phase). وفيه يتناقص العدد الكلي لهذه الكائنات. ومن المعروف أن البكتريا تتكاثر بالانشطار الثنائي. ولذلك فإنه من

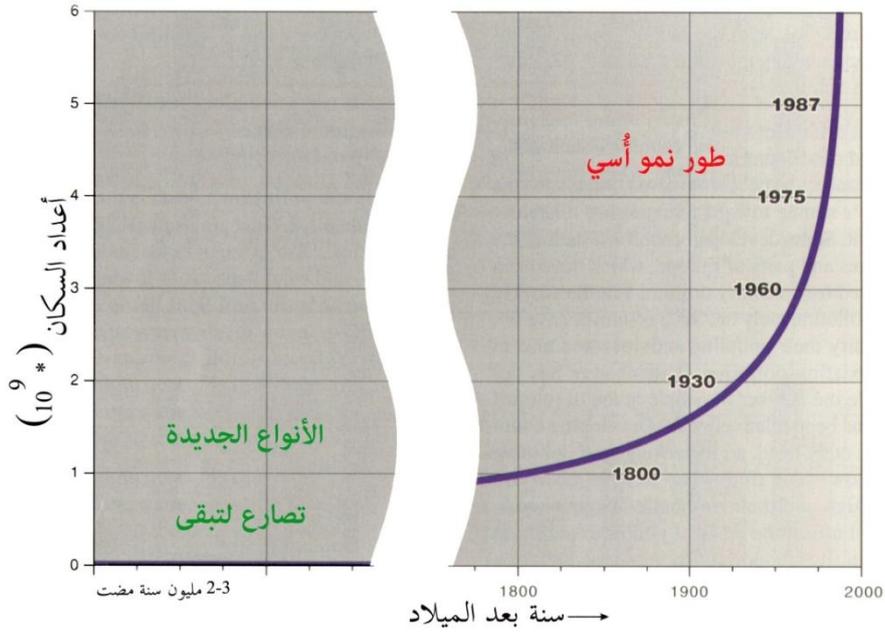
السهل تصور تضاعف أعداد البكتريا خلال الطور اللوغاريثمي، ولكن، ما الذي يتسبب في حدوث طوري الثبات والموت؟

توجد آليتان تمنعان زيادة أعداد الكائنات إلى ما لانهاية: الأولى، أن الكائنات الدقيقة تتعرض لنضوب المغذيات؛ ثانياً، أن النواتج من المخلفات تبدأ بالتراكم داخل بيئة النمو وتصبح سامة للكائنات الحية. ويوجد وضع مطابق لهذا في حالة الإنسان، إذ أنه في فترة ما قبل التاريخ، كانت كثافة السكان منخفضة، ولم تزد أعداد السكان زيادة معنوية أو سريعة (انظر الشكل 1-2). وخلال هذه الفترة كانت الموارد وفيرة، وبذلك فإن البيئة استطاعت بسهولة استيعاب كمية المخلفات المنتجة. بعدها، بدأت أعداد السكان تزداد بسرعة كبيرة جداً، وعلى الرغم من أن ذلك لم يكن بمعدل لوغاريثمي. إلا أن مرحلة النمو هذه مشابهة لمرحلة النمو اللوغاريثمي، في الكائنات الدقيقة. وبذلك فإنه خلال هذه الفترة تم استهلاك كميات كبيرة من الموارد، وإنتاج مخلفات بكميات متزايدة على الدوام، وهذه الفترة مازالت مستمرة حتى الآن، لكن يبدو أننا نقترّب من فترة سيؤدي فيها نقص الموارد أو تراكم المخلفات (بمعنى التلوث) إلى الحد من استمرار النمو - وهو ما نتج عنه اهتمام متزايد في إعادة تدوير المواد إضافة للتحكم، وإدارة وإزالة المخلفات. وللقيام بذلك كله يتعين علينا الوصول إلى فهم خصائص المكونات الحية وغير الحية للبيئة.



شكل (1-1): منحنى نمو نموذجي لمستعمرة بكتيرية نقية

A = طور تحضيري B = طور لوغاريتمي C = طور الثبات D = طور التراجع



شكل (2-1): تزايد أعداد سكان العالم من بداية خلق الإنسان وحتى عام 1993

المصدر: (Population Reference Bureau, Inc., 1990)

2.1 البيئة كسلسلة متصلة

تلعب البيئة (environment) دوراً أساسياً في تحديد المصير النهائي للملوثات. وتتكون البيئة من التربة، والمياه السطحية، والغلاف الجوي؛ إذ أن مصادر الملوثات جميعها تنطلق بداية أو تنتهي في أحد أطوار هذه المنظومة البيئية. وعند تفاعل الملوثات مع البيئة، فإنها تتعرض لتغيرات فيزيائية وكيميائية لتصبح جزءاً منها في نهاية المطاف. وبذلك فإن البيئة تعمل كسلسلة متصلة توضع داخلها جميع المخلفات، وبدورها تخضع الملوثات للقانون الثاني للديناميكا الحرارية الذي ينص على أن المادة لا يمكن إفناؤها، بل إنها تُحوّل فقط من صورة لأخرى. لذلك فإن الطريقة التي تتم بها إضافة المواد للبيئة ومعدل إضافتها، والتغيرات اللاحقة التي تحدث لها، تشكل في مجموعها العوامل التي تحدد مدى تأثير المخلفات على البيئة. ومن المهم ترسيخ مفهوم البيئة على أنها سلسلة متصلة، ذلك أن الكثير من العمليات الفيزيائية والكيميائية لا تحدث فقط داخل طور واحد من أطوارها، مثل الهواء دون غيره، بل إنها تحدث عند حدود التقاء طورين مثل التربة/الماء.

ويعتمد مفهوم السلسلة المتصلة على منطلق أن الموارد تستثمر بمعدل يمكن عنده استبدالها أو تجديدها، و أن المخلفات تضاف للبيئة بمعدل يمكن عنده دمجها دون أن تسبب إخلالاً بالبيئة. وتاريخياً فإن المخلفات الطبيعية التي تم تولدها كان ممكناً تفتيتها بسهولة أو تحويلها إلى مركبات مفيدة أو على الأقل غير ضارة. لكن التلوث الصناعي تسبب في تكون مركبات حيوية غريبة (xenobiotic) عن النظم البيئية الطبيعية وتتميز بمقاومتها للتحلل، وفي بعض الحالات يمكن فعلياً أن تؤدي العمليات الطبيعية إلى رفع سمية الملوثات. فمثلاً، بعض

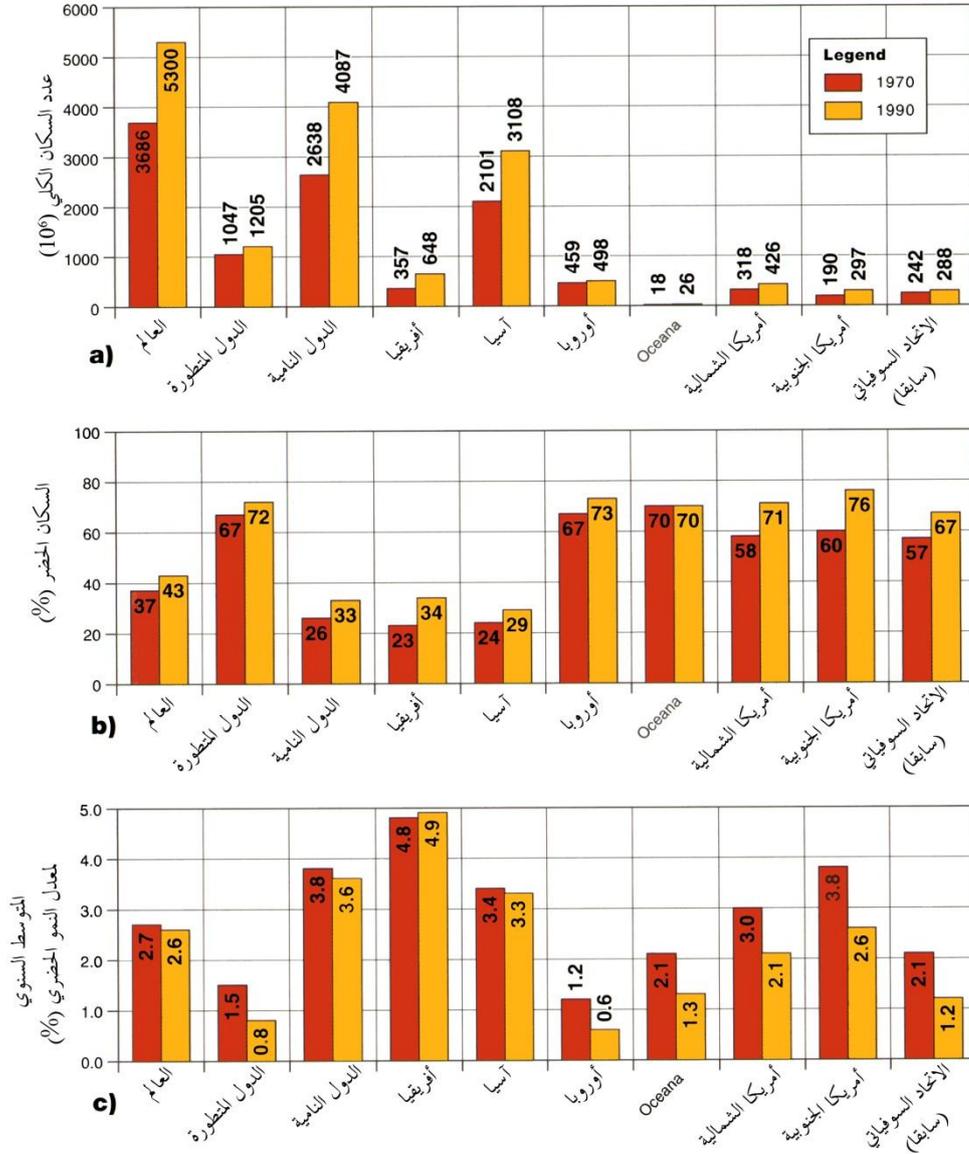
المركبات العضوية التي ليست بطبيعتها مسرطنة يمكن أن تتحول ميكروبياً إلى مواد مسرطنة. وهناك مركبات أخرى، حتى تلك التي لا تعتبر عادة ملوثات يمكنها أن تسبب تلوثاً إذا ما أضيفت للبيئة بمعدلات ينتج عنها تراكيزات عالية منها، وهناك مثال ممتاز على ذلك وهو سماد النترات، الذي يتم غالباً إضافته للتربة بمعدلات مرتفعة إذ يمكن لهذه النترات أن تصل إلى مصادر مياه الشرب وتسبب مشاكل في دم الأطفال حديثي الولادة وهو ما يعرف بمرض الطفل الأزرق (methemoglobinemia)، وتوجد بعض الملوثات، مثل الميكروبات الممرضة التي يعتبر وجودها في البيئة بتراكيزات منخفضة جداً أمراً طبيعياً تماماً ومع ذلك، فإنها تظل قادرة على التسبب في أمراض للإنسان والحيوان، إن هذه الكائنات الدقيقة الطبيعية تصنف أيضاً على أنها ملوثات، وأن وجودها ضمن البيئة يستلزم التحكم فيه بعناية.

3.1 التلوث وضغط السكان

لو أن تعداد سكان العالم اقتصر على بضعة ملايين من الأفراد، ما كان للتلوث أن يصبح مشكلة كما هو الآن، حتى مع تنوع النشاطات الإنسانية في أيامنا هذه لكنه، ونظراً إلى تعدادنا الحالي (يفوق سبعة بلايين ويتزايد بسرعة)، فإن مشكلة التلوث تتفاقم باستمرار. وليس هذا فقط لأننا ننتج مواد خطيرة من خلال نشاطاتنا الصناعية والزراعية، ولكن أيضاً لأننا ننتج ملوثات أصبحت وبكل بساطة خطيرة بسبب كمياتها كما هو في حالة مخلفات المدن.

ويوجد نمطان يصاحبان السكان ويقودان في الوقت الحاضر إلى تزايد مستويات التلوث، الأول أن التعداد الإجمالي لسكان العالم قد ازداد دراماتيكياً (شكل 1 - 2)، ففي

الفترة ما بين 1930 - 1995 فقط، ارتفع تعداد السكان في العالم من 2 إلى 5.5 بليون نسمة. وفي نفس الوقت، تغيرت تركيزات السكان داخل أجزاء مختلفة من العالم أيضاً. فالدول النامية وهي تلك التي تتميز بوجود مجتمعات ريفية يعيش فيها أغلب سكان العالم، ارتفع تعداد سكانها مقارنة بالدول الصناعية أو المتمدينة (الدول المتطورة) (شكل 1-3a) أما الآن فإن نمطاً جديداً بدأ في البروز. فمع تزايد سكان العالم والإغراء المادي الذي يصعب مقاومته، أخذ الناس في الانتقال من المناطق الريفية قليلة السكان إلى المراكز الحضرية الأكثر ازدهاراً (شكل 1-3b). ونمطياً، فإن المناطق الحضرية تستهلك كميات أكبر من الموارد الطبيعية وتنتج كميات أكبر من الفضلات للفرد الواحد مقارنة بالمناطق الريفية. وتحت الظروف الحضرية، حيث لا يكون إنتاج الطعام الوظيفة الأولى للسكان، ينتج الناس فضلات أكثر منه في المناطق الريفية، وتكون هذه الفضلات أيضاً أكثر خطورة. كذلك فإن اتساع المناطق الحضرية يضع ضغطاً على القطاع الزراعي لإنتاج كميات أكبر من الغذاء على مساحات أقل من الأرض، وهو ما يقود إلى زيادة التلوث الزراعي. وفي الدول المتطورة، حيث مستوى الرفاهية يظل أعلى نسبياً، فإن مستوى التطور العمراني ارتفع بنسبة 7% فقط من عام 1970 حتى 1990 (شكل 1-3b)، بينما تراجع معدل زيادة السكان فيها من 1.5% سنوياً عام 1970 إلى 0.8% سنوياً في عام 1990 (شكل 1-3c)، أما في الدول النامية فقد ارتفع التطور العمراني خلال الفترة نفسها بنسبة 27% (شكل 1-3b)، وظل معدل زيادة السكان ثابتاً تقريباً عند نسبة 3.7% سنوياً (شكل 1-3c).



شكل (1-3): الكثافة السكانية العالمية حسب الأقاليم مبنية: (أ) الكثافة السكانية الكلية، (ب) النسبة المئوية للنمو السكاني الحضري، (ج) معدل النمو الحضري السنوي.

تجدر الإشارة إلى أن الاختلافات الرئيسية في التلوث بين الدول الصناعية وغير الصناعية لا تكمن أسبابها فقط في أعداد السكان، بل تشمل أيضاً موقف كل منهم من مبدأ المحافظة على بيئة صحية. إن بعض الدول المتقدمة مثل الولايات المتحدة وأجزاء من أوروبا، التي أصبحت صناعية منذ قرن أو يزيد، واستشعرت التأثيرات السلبية للتلوث في وقت مبكر حيث بدأت هذه الدول بتحويل نشاطاتها الملوثة وكذلك تنظيف ما يوجد من تلوث . وحدث هذا التغير عندما كانت أعداد الناس في الدول المتقدمة منخفضة نسبياً. من جهة أخرى، صعدت الدول النامية الآن من نشاطاتها الملوثة في وقت تميز فيه أعداد سكانها بالارتفاع نسبياً ومواردها الاقتصادية بالانخفاض، وعدم القدرة على تحمل تكاليف تقليل التلوث وتنظيفه. ومن المهم الإشارة إلى أن مشاكل التلوث تتفاقم عموماً بسبب المشاكل الاقتصادية أو شح في الموارد المالية.

4.1 العلم والتلوث

بالنظر لسرعة الاتصال في الوقت الحاضر، فإن من السهل جداً اكتساب حس متطور بالتهديد الوشيك الذي يمكن أن يسببه التلوث. إن وسائل الإعلام فعالة جداً في أن تجعل من أية مشكلة بيئية وكأنها خطوة متقدمة في اتجاه جعل هذا الكوكب غير ملائم للحياة. وتقود تقارير الكوارث إلى استقطاب الناس في دائرة تخلق دوامة من الفعل ورد الفعل التي كثيراً ما تؤدي إلى عرقلة الجهود المبذولة للعثور على حل منطقي وسليم لمشكلة التلوث في الوقت الحاضر. من جهة أخرى، يوفر لنا العلم أداة مفيدة لفهم العالم حولنا، ووسيلة قيمة للحديث عن التلوث.

علم التلوث

هو دراسة العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تحدد مصير وانتقال الملوثات وتخفيف أثارها التي تنشأ نتيجة لأنشطة الإنسان وكذلك العمليات الطبيعية. وبدراسة التلوث من خلال العلم، وموازنة الإجابات فإن ذلك سيعطينا (في وجود اقتصاد قوى وحزم قانوني يقوم على استنتاجات علمية صحيحة) إمكانية الاقتراب أكثر من تحقيق هدف المحافظة على بيئة صحية ليس لنا فقط، ولكن أيضاً لجميع الكائنات على الأرض. ولا اتخاذ قرار متى وكيف يمكن التصرف حيال أي وضع للتلوث، يتعين علينا طرح بعض التساؤلات الهادفة حول:

ما هو الملوث؟

ما هي الماهية الكيميائية للملوث؟ ما هي خصائصه الفيزيائية والكيميائية؟ كيف يدخل الملوث البيئة، وماذا يحدث له عندما يوجد في النظام البيئي؟ هل انبعاث الملوث ناشئ عن مصدر محدد أو بمستويات منخفضة على امتداد مساحة كبيرة (ليس متولداً من مصدر محدد)؟ وبالإجابة على هذه الأسئلة، يمكن صياغة خطوات إما بوقف إنتاج الملوثات أو بتخفيف تركيزاتها في البيئة عن طريق إيجاد طرق أخرى للتصنيع أو التعامل مع الملوثات. ويمكن أيضاً استخدام هذه المعلومات لاختيار وتطوير خطط للتنظيف إذا كان ضرورياً: هل أن الأسلوب الكيميائي، أو المعاملة الفيزيائية، أو التحويل البيولوجي ممكن في حالة معينة؟

هل أن الملوث ضار؟

هل المادة ذاتها ضارة، أم أنها تحولت إلى شيء آخر ضار في البيئة أو داخل كائنات حية؟ وإلى أي درجة هي ضارة؟ إن الإجابة على هذه الأسئلة هام جداً لوضع خطوط إرشادية للمستويات المسموح بها من هذا الملوث في البيئة وضبط الظروف التي يسمح للملوث تحتها الوصول إلى تلك المستويات. فمثلاً، توجد بعض أنواع الفلزات التي تكون سامة تحت بعض الظروف لكنها ليست كذلك تحت ظروف أخرى. إضافة لذلك، هناك بعض التأثيرات السلبية للملوثات، مثل التسبب في مرض السرطان، وتلف طبقة الأوزون، أو الاحتباس الحراري، قد لا تكون مؤكدة تماماً إلا بعد انقضاء العديد من سنوات البحث والدراسة؛ ولذا فإن القرارات القائمة على بيانات أولية ربما يتعين تعديلها.

ما هي التكاليف المصاحبة للملوث؟

يتعين هنا الأخذ في الاعتبار الجانبين الاجتماعي والتكاليف المالية، هل أن الملوث يؤثر سلباً على صحة الإنسان أو البيئة؟ ماذا ستكون تكاليف التحول لأسلوب إنتاج بديل أو طرق تعامل أخرى مع المخلفات؟ وهل يوجد بديل، أو تقنيات ملائمة اقتصادياً لتخفيض تركيز الملوث؟ هل يمكن أن تُسنّ تشريعات، أو العمل للتوصل إلى اتفاقيات عالمية لتشجيع أو فرض احترام السياسات المنظمة دون إيذاء شريحة المجتمع ذات العلاقة؟

مثلاً، مع ظهور البنزين الخالي من الرصاص وكذلك جهاز التحويل المحفز لهذا العنصر في السيارات في أوائل السبعينيات من القرن الماضي، أصبح التشريع الذي يؤكد على

معايير هواء نقي مقبولاً اقتصادياً. ومنذ ذلك الحين انخفضت تركيزات الرصاص في الهواء بنسبة 89% بمناطق معينة، حسب قياسات أجريت في الفترة ما بين 1982 و1991.

كما أن نسبة استخدام بدائل وقود ذات محتوى منخفض من الكبريت، مثل غاز الطهو الطبيعي بدلاً عن الفحم في إنتاج الطاقة، أدى إلى انخفاض معتبر في ابتعاث غاز ثاني أكسيد الكبريت، وهو الملوث الذي يمكن أن يسهم في إحداث أمراض تنفسية، والمطر الحمضي، وتآكل المباني والنصب التذكارية. لكن، ماذا كان الثمن بالنسبة لمنتجات الفحم؟ ولعمال المناجم؟ هل يمكن تنظيف المنطقة الملوثة؟ ما هي الطريقة الأكثر ملاءمة اقتصادياً لإصحاح الموقع؟ هل يمكن القيام بتنظيف المواقع الملوثة، مثل تلك التي حددها التمويل الضخم في الولايات المتحدة، لمستوى آمن بتكاليف مقبولة، أم أن احتواء الملوث ومنع انتشاره سيكون خياراً أفضل؟.

5.1 علم التلوث ومستقبل العالم

يمكن فقط الإجابة على جميع الأسئلة التي تم طرحها آنفاً استناداً إلى أسس متينة في علم التلوث. ولهذا، فليس من المستغرب أن الإسهامات للقاعدة المعرفية التي يوفرها علم التلوث ضرورية إذا كنا نرغب في جعل مستويات التلوث منخفضة لمستويات آمنة يمكن التعامل معها. إن الأجهزة الحكومية ومجالس المستشارين في المدن والولايات والدول والقارات والعالم يحتاجون إلى مساعدة للتعامل مع التلوث. وعلى ذلك، يمكن لعلم التلوث الإسهام في مساعدة المجتمعات الواعية على اتخاذ قرارات عقلانية وسليمة من الناحية البيئية. إن مثل هذه القرارات يمكن أن تؤدي إلى تفاقم مشكلة التلوث عالمياً، أو تؤدي إلى وجود بيئة نظيفة وصحية.

المراجع

-Population Reference Bureau, Inc. (1993). World Population Data Sheet of the Population Reference Bureau, Inc. Population Reference Bureau, Inc., Washington, D.C.

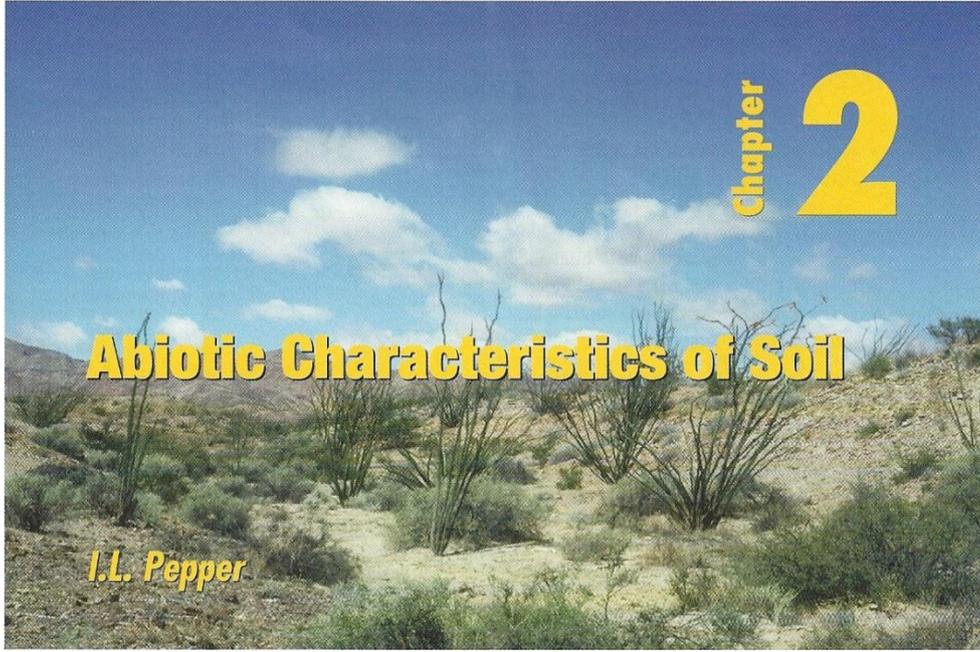
-UNEP(1991) United Nations Environmental programmed Environmental Data Report, 3 rd edition . Basil Blackwell, Oxford.

أسئلة

1. ما هما العاملان الأساسيان اللذان يحددان معدل النمو السكاني؟
2. صف المراحل الرئيسية المصاحبة لمنحنى نمو مثالي لمزرعة نقية من البكتريا؟
3. أين توجد أكبر التجمعات البشرية في العالم على أساس المناطق المتطورة، النامية، الحضرية، والريفية؟

الباب الثاني

الخصائص غير الحية للتربة



الترب متنوعة في طبيعتها وتوجد حتى في البيئات شديدة التطرف.

1.2 التربة

تقع بيئة الإنسان عند سطح الأرض وهو يعتمد بقوة على سلسلة التربة/ الماء/ الغلاف الجوي. وكمفهوم عام تتحكم هذه السلسلة في جميع نشاطاتنا، كما أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لكل طور من هذه الأطوار تتداخل فيما بينها. ومع أنه قد

يكون من الواضح بدهاءة أن عمليات التربة والماء وثيقتا الارتباط فإنه ليس واضحاً تماماً أنهما بدورهما مرتبطان بالغللاف الجوي. فالتربة تتكون من مواد صلبة وسائلة وغازية، كل واحد من هذه الأطوار في حالة اتزان مع الغللاف الجوي، وكذلك مع الأنهار والبحيرات والمحيطات، وعلى هذا، فإن مصير الملوثات ونقلها يتأثر بكل واحد من هذه المكونات.

وتعتبر التربة نظاماً معقداً ومتداخلاً، لكنه كيان قائم ودائم يؤثر بصورة مباشرة أو غير مباشرة على نوعية حياتنا. وبالتعبير العامي تعرف التربة بأنها تراب، وينظر إليها من قبل الكثيرين على أنها إحدى المسلمات، ومع ذلك تظل التربة ضرورية لوجودنا اليومي، فهي مسؤولة على نمو النبات، وتدوير جميع العناصر المغذية من خلال التحولات الميكروبية، وتسهم في المحافظة على توازن الأكسجين/ ثاني أكسيد الكربون للغللاف الجوي. كما أنها تمثل المكان الأساسي للتخلص من معظم المخلفات. وتعتبر التربة خليطاً معقداً من حبيبات الصخور التي تم تجويتها، وبقايا عضوية، وماء وبلايين من الكائنات الحية. وقد لا يتجاوز سمك التربة 15 سم أو ربما يصل سمكها مائة متر أو أكثر. ونظراً لأن الترب تنتج عن مصادر فريدة لمواد أصل معينة تحت ظروف مناخية محددة، فإنه لا توجد تربتان متشابهتان تماماً. وعلى ذلك توجد آلاف من أنواع الترب داخل الولايات المتحدة الأمريكية وحدها. وتتميز هذه الترب بأن لها خصائص مختلفة وهو ما يؤثر على أسلوب الاستفادة منها بصورة مثالية. ونظراً لأن أنواعاً مختلفة وكثيرة من المكونات يتم إضافتها للتربة، وأن التربة في تماس مباشر مع الماء والغللاف الجوي، فإن المصير النهائي للملوث معين وتأثيره على البيئة يعتمد مباشرة على

نوع التربة. وعموماً، يطلق على الجزء العلوي من الأرض اسم تربة، وهي التي تمثل بيئة نمو النبات ويسمى الجزء الذي يقع تحت التربة اسم نطاق فادوز (Vadose Zone).

2.2 الطور الصلب

1.2.2 تعريف التربة ونطاق فادوز

التربة هي ناتج التجوية النهائي الذي تكوّن بسبب فعل المناخ والكائنات الحية على مادة أصل لها طبوغرافيا معينة، على امتداد الزمن. ويشار إلى قائمة العوامل أعلاه على أنها العوامل الخمسة لتكوين التربة. ويتكون الجزء الحى في التربة من كل من الكائنات الدقيقة والنباتات. أما نطاق فادوز (Vadose Zone) فهي المادة غير المشبعة بالماء والتي لم تتعرض عموماً للتجوية وتوجد بين مستوى الماء الجوفي وسطح الأرض.

توجد عدة خصائص للتربة تؤثر بقوة على مصير ونقل ملوثات البيئة، وسيتم الآن مناقشة هذه الخصائص مع القيام في الوقت نفسه بإعطاء نظرة شاملة عن التربة كجسم طبيعي يؤثر على التلوث وتتوفر كتب كثيرة لأولئك الذين يرغبون في الحصول على معلومات أكثر تفصيلاً (انظر قائمة المراجع).

2.2.2 قطاعات التربة

يتولد عن عملية تكوين التربة طبقات أفقية مختلفة، أو آفاق تربة، تميز تربة معينة. إن عدد، وطبيعة، وكذلك انتشار هذه الآفاق هو الذي يعطى تربة معينة خاصيتها الفريدة. ويوضح الشكل (1-2) قطاع تربة نموذجي. وعموماً، تحتوي الترب على طبقة داكنة اللون غنية بالمادة العضوية، تسمى بأفق O، يلي ذلك طبقة أقل غمقاً تسمى أفق A، حيث

تتراكم بعض المواد العضوية الدبالية. ويطلق على الطبقة التي توجد تحت هذا الأفق اسم أفق E لأنه يتميز بتعرضه للغسيل (eluviation) وهي عملية إزالة أو انتقال لمغذيات ومواد غير عضوية من الأفق A. ويوجد تحت أفق B الذي يتميز بظاهرة (illuviation) التي هي عبارة عن تراكم المواد المنقولة إلية من الأفق E. ويوجد تحت الأفق B أفق C الذي يحتوي على مادة الأصل التي لم تتعرض عموماً للتجوية والتي نشأت عنها التربة. وأخيراً، يوجد تحت الأفق C الأفق R، وهو الرمز الذي يستخدم للإشارة للطبقة الصخرية. ومع أن بعض الآفاق تعتبر شائعة في معظم الترب، إلا أنه ليس من الضروري أن تحتوى جميع الترب على كل من هذه الآفاق.

3.2.2 الحبيبات الأولية وقوام التربة

تتكون التربة عادة من نحو 95% مواد غير عضوية و(1-5)% مادة عضوية وذلك على أساس الوزن. وتضم المادة الأولية غير العضوية بدورها ثلاث مجموعات أساسية هي: الرمل، السلت، والطين التي تفصل عن بعضها على أساس الحجم (جدول 1-2).

جدول (1-2): التصنيف الحجمي للحبيبات الثلاثة الأساسية للتربة (حسب تعريف

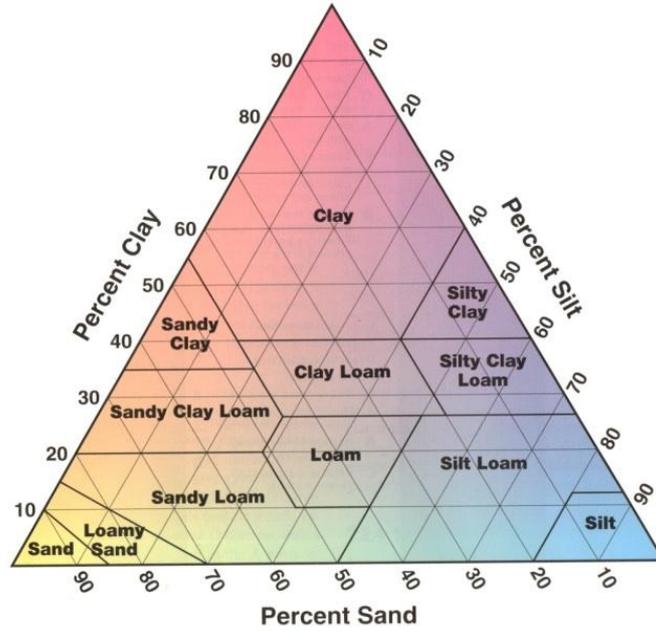
إدارة الزراعة الأمريكية)

المدى الحجمي (القطر)	الحبيبة الأولية
2 ملم - 0.05 ملم	الرمل
0.05 ملم - 0.002 ملم	السلت
أقل من 0.002 ملم (2 ميكرومتر)	الطين



شكل (1-2): قطاعات تربة نموذجية، توضح الآفاق المختلفة للتربة. تتطور هذه الآفاق تحت تأثير عوامل تكوين التربة الخمسة وينتج عنها ترب متباينة.

وتحدد نسبة الرمل والسلت والطين في تربة معينة قوام التربة، الذي يؤثر على كثير من خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وينتج عن خلط نسب متباينة من هذه المكونات الأساسية الثلاثة فئات قوام مختلفة (شكل 2-2)، ومن بين الحبيبات الأولية الثلاثة، يعتبر الطين العامل الأكثر أهمية في تحديد خصائص تربة معينة، ويعود هذا إلى وجود عدد أكثر من حبيبات الطين في وحدة الوزن مقارنة بالرمل والسلت بسبب صغر حجم حبيبات الطين، بالإضافة لذلك، فإن حبيبات الطين تعتبر الوحيدة من بين حبيبات التربة التي يوجد عليها شحنة كهربائية (انظر الجزء 1.3.6)، إن سيادة الدور الذي تلعبه حبيبات الطين تفسر سبب أن أية تربة تزيد فيها نسبة الطين على 35% على أساس الوزن توصف بأنها طينية في فئات القوام.



شكل (2-2): مثلث قوام التربة يوضح فئات القوام المختلفة حسب نظام إدارة الزراعة الأمريكية. فئات القوام هذه تحدد طبيعة الترب حسب العديد من خصائصها الفيزيائية. للتعرف على وصف فئات الحجم للحبيبات انظر الجدول (1-2).

4.2.2 بناء التربة

عادة لا تبقى حبيبات التربة الأولية ككيانات منفصلة، بل إنها تتجمع لتكون بناءات ثانوية نتيجة لمواد صمغية، ومواد عديدة التسكر (Polysaccharides)، ومواد أبيضية ميكروبية أخرى تربط هذه الحبيبات معاً، إضافة لذلك يمكن أن تتماسك الحبيبات مع بعضها فيزيائياً من خلال خيوط الفطريات وجذور النباتات. ويمكن أن تكون هذه التجمعات الثانوية، التي تعرف بالوحدات الثانوية (peds)، ذات أحجام وأشكال مختلفة حسب خصائص التربة، إن الترب التي تحتوى على طين وإن كان بكميات محدودة يوجد بها عادة وحدات ثانوية (peds) جيدة المعالم وبذلك يكون لها بناء واضح. وتبقى التجمعات الثانوية للحبيبات الأولية متماسكة طالما لم تتعرض التربة لأي عامل اضطراب، كالحرث مثلاً. وبالمقابل، فإن الترب الرملية التي تتميز بانخفاض نسبة الطين عموماً لا تملك بناء واضحاً.

إن خاصية بناء التربة لها تأثير بالغ على الخصائص الطبيعية للتربة، ويوضح الشكل (2-3) مفهوم التربة كنظام بيئي غير متواصل مكون من خليط من مواد عضوية وغير عضوية ذات أحجام مختلفة، مرتبطة معاً وتعيش فيها كائنات التربة. ونظراً لأن حبيبات التربة مرتبة في صورة تجمعات ثانوية، فإن حجماً معيناً من التربة يشمل فجوات ممتلئة إما بالهواء أو الماء. وتوفر الترب التي يتميز بناؤها بوجود عدد كبير من هذه الفجوات داخل الوحدات الثانوية وفيما بينها ظروف جيدة لكائنات التربة وجذور النبات، التي يحتاج كل منها للأوكسجين والماء. أما الترب التي لا بناء لها، أي تلك التي تتكون من حبيبات أولية مفردة

فإن بناءها يصنف على أنه كتلي (massive). ويتميز هذا النوع من الترب بأن له عدداً قليلاً (وكذلك صغيراً جداً) من الفجوات وهو ما يعنى حجماً قليلاً لكل من الهواء والماء. تعرف الفجوات في التربة بالفراغ المسامي (pore space). وقد يكون بعض المسامات مفتوحة إلى خارج الوحدة الثانوية (ped) للتربة أو مغلقة، وعموماً تكون المسامات المغلقة التي تحتوي على كائنات هوائية ذات تركيزات منخفضة من الأكسجين مقارنة بالمسامات المفتوحة حيث أن الهواء الجوي يستطيع عندئذ أن ينتشر بحرية داخل المسام. ويمكن توسيع الفراغ المسامي عن طريق جذور النبات والديدان، والحشرات والثدييات الصغيرة حيث تؤدي ممرات الجذور، أو الثقوب التي تحدثها الديدان والحشرات وغيرها إلى خلق فتحات مسامية كبرى. ويمكن أن ينتج عن هذه الفراغات الواسعة تهوية معتبرة للتربة السطحية وتحت السطحية وكذلك المواد الرسوبية إضافة لتحسين ارتشاح الماء وسريانه خلال التربة.

5.2.2 السعة التبادلية الكاتيونية

يعزى المؤشر المعروف باسم السعة التبادلية الكاتيونية (CEC) إلى وجود الشحنة المصاحبة لحبيبات الطين. وتتطور هذه الشحنة التي تكون عادة سالبة نتيجة لأحد سببين:

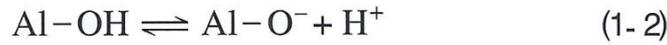
1. الاستبدال المتماثل

توجد حبيبات الطين على هيئة شبكة غير عضوية تتكون من أكاسيد سليكون وألومنيوم، وينتج عن إحلال كاتيون المغنيسيوم (Mg^{2+}) ثنائي التكافؤ لأيون الألومنيوم

(Al³⁺) ثلاثي التكافؤ فقدان شحنة موجبة واحدة، وهو ما يكافئ اكتساب شحنة واحدة سالبة. ويمكن أن تقود استبدالات أخرى إلى زيادة في الشحنة السالبة.

2. التآين

يمكن لمجموعات الهيدروكسيل (-OH) عند حواف حبيبات الطين أن تتآين، مما ينتج عنه تولد شحنة سالبة، المعادلة:



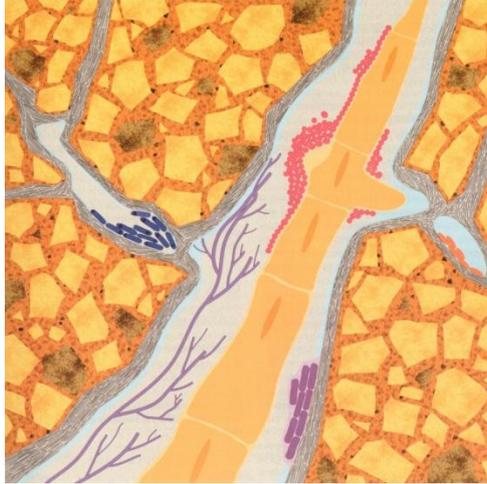
وتسمى هذه الآلية أيضاً روابط الحواف المكسورة. إن تآينات مثل هذه تزداد عادة مع زيادة الرقم الهيدروجيني، وعلى ذلك تعرف على أنها الشحنة المعتمدة على الرقم الهيدروجيني. وتعرض أيضاً المجموعات الكيميائية للمادة العضوية مثل مجموعات الكربوكسيل للتآين، ويمكن أن تسهم في إجمالي الشحنة المعتمدة على الرقم الهيدروجيني. وتقاس عادة الشحنة السالبة الكلية على أساس المليمولات من الشحنة الموجبة للكيلوجرام من التربة (مليمول (+)/كجم) وهي قياس للسعة التبادلية الممكنة للتربة⁽¹⁾. وعندما تتراوح السعة التبادلية الكاتيونية ما بين 150 - 200 مليمول (+)/كجم لتربة معينة فإنها تعتبر متوسطة، بينما تعتبر السعة التبادلية الكاتيونية التي تزيد على 300 مليمول (+)/كجم مرتفعة.

⁽¹⁾ سابقاً، كانت السعة التبادلية الكاتيونية تقاس بالمليمكافئ/100 جم تربة، ويساوي المليمكافئ الواحد (meq) جزءاً واحداً على ألف من وزن المكافئ الواحد. وتنسب مكافئات المواد الكيميائية للهيدروجين، الذي حدد بأن وزنه المكافئ يساوي واحد. وهنا فإن الوزن المكافئ لعنصر يساوي وزنه الذري مقسوماً على تكافؤه. فمثلاً، يساوي الوزن المكافئ لأيون الكالسيوم 40 ÷ 2 = 20 جم. 1 مليمكافئ / (100 جم) لأيون معين = 10 مليمول (+) كجم لنفس الأيون.

جدول (2-2): نظم الرقم الهيدروجيني في التربة

الرقم الهيدروجيني	التربة
أقل من 5.5	حمضية
6 – 8	متعادلة
أكثر من 8.5	قاعدية

وتجدر ملاحظة أن حبيبات الطين والمادة العضوية هي التي تحمل شحنات سالبة. ونظراً لصغر حجمها، فإنها تسمى إجمالاً غرويات التربة (Soil Colloids) إن وجود السعة التبادلية الكاتيونية هو الذي يسمح بحدوث ظاهرة تبادل الكاتيونات (انظر الجزء 3.1.6).



شكل (2-3): ترتبط حبيبات التربة الأولية معاً مكونة تجمعات ثانوية لينتج عنها مسامات التربة. تظهر المسامات هنا، مبطنة بطبقة رقيقة من الطين (قشرة الطين تبدو بلون رمادي)، تشغلها فطريات وأكتينوميستات وبكتيريا. يلاحظ أن المسام الرئيسي (الوسط) مفتوح على الهواء الجوي ويحتوي على غلاف مائي رقيق. يوجد داخل المسام كائنات عديدة تشمل كمية كبيرة من الخيوط الفطرية (لون برتقالي) وأكتينومايسيتات متفرعة (أرجواني). تلتصق إحدى مستعمرات البكتيريا مباشرة بجدار الثغر بواسطة إفرازاتها (أسفل اليمين) وهناك بكتيريا أخرى (شكل كروي) تلتصق مباشرة بالفطر. يلاحظ وجود فراغين مقللين. ويوجد فراغ مغلق آخر (على اليمين) تسكنه أيضاً بكتيريا لكنه ممتلئ تماماً بالماء. لمزيد من المعلومات حول الكائنات الدقيقة بالتربة انظر الباب (4).

6.2.2 الرقم الهيدروجيني للتربة

يعرف الرقم الهيدروجيني على أنه اللوغاريتم السالب لتركيز أيون الهيدروجين:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (2-2)$$

وعادة تتأين الماء إلى H^+ و OH^- :



ويعرف ثابت التفكك على أنه:

$$K_{\text{eq}} = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{HOH}]} \quad (4-2)$$

ونظراً لأن HOH كبير مقارنة بتركيز H^+ و OH^- فإنه يعطى عادة القيمة (1)،

لذلك فإن:

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14} \text{ M} \quad (5-2)$$

وفي حالة محلول متعادل فإن:

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \times 10^{-7} \text{ M} \quad (6-2)$$

ويكون الرقم الهيدروجيني:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = -(-7) = 7 \quad (7-2)$$

وتشير قيمة pH أقل من 7 إلى حمضية، بينما يشير pH أعلى من 7 إلى قاعدية.

وتتميز عادة الترب برقم هيدروجيني كما هو موضح بالجدول (2-2).

جدول (2-3): المكونات الرئيسية لمخلفات النبات

المكون	الوزن الجاف (%)
سليولوز	15 - 60
هيميسليولوز	10 - 30
ليقنين	5 - 30
بروتين وأحماض أمينية	2 - 15
مواد قابلة للذوبان مثل السكر	10

وفي المناطق ذات المعدلات العالية من الأمطار تميل الكاتيونات القاعدية للغسيل من قطاع التربة، وزيادة على ذلك، فإن الترب التي تتطور في هذه المناطق تتميز بمحتوى أعلى من المادة العضوية، التي تحتوي على مكونات وبقايا حمضية. وعليه فإن هذه الترب تميل لأن يكون رقمها الهيدروجيني منخفضاً وتكون حمضية في طبيعتها، أما الترب في المناطق الجافة فهي لا تتعرض لغسل كاتيوناتها القاعدية، ويكون محتواها من المادة العضوية منخفضاً، إضافة لذلك، يميل الماء للتبخر في هذه المناطق، مما يسمح بتراكم الأملاح. وبذلك فإن هذه الترب تكون قاعدية، ولها قيم pH أعلى.

يؤثر الرقم الهيدروجيني للتربة على ذوبانية المواد الكيماوية في الترب من خلال تأثيره على درجة تأين المركبات وشحناتها عموماً. إن مدى التأين مرتبط بالرقم الهيدروجيني للبيئة وثابت التفكك (K_{eq}) للمركب، لهذا فإن الرقم الهيدروجيني للتربة قد يكون حرجاً من حيث تأثيره على نقل الملوثات المحتملة خلال التربة وطبقة الغادوز.

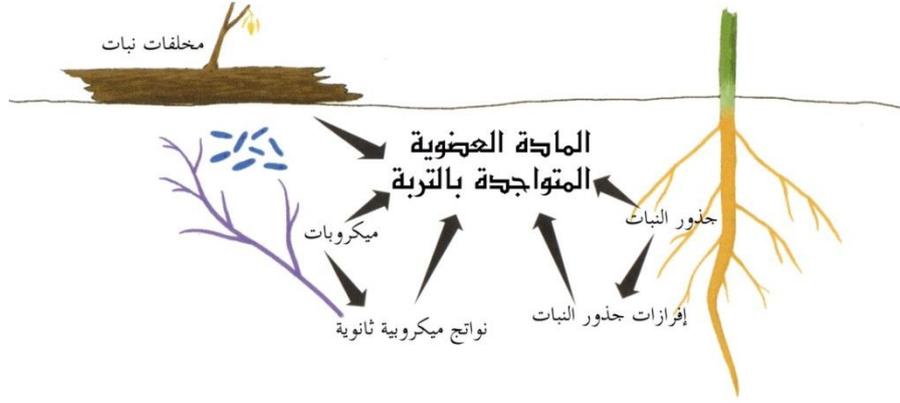
7.2.2 المادة العضوية

تحتل المركبات العضوية بالتربة عند السطح من خلال مخلفات النبات مثل الأوراق أو المواد العشبية. ويتم تحليل هذه المخلفات العضوية ميكروبياً بواسطة الكائنات الدقيقة للتربة؛ التي تستخدم الجزء العضوي كغذاء أو كمادة تفاعل ميكروبية. إن مكونات النبات الأساسية الموضحة بالجدول (2-3) تتفاوت في درجة تعقيدها ومدى سهولة تحليلها بواسطة الميكروبات. وعموماً فإن المكونات القابلة للذوبان يتم تمثيلها وتحليلها بسهولة، بينما يتميز اللجنين، مثلاً بأنه شديد المقاومة للتحلل الميكروبي. وتتمثل النتيجة النهائية للتحلل الميكروبي في تحرر عناصر مغذية ضرورية لعملية الأيض في الميكروبات أو النباتات، إضافة للتحلل الجزئي لمخلفات النبات المعقدة، وفي نهاية المطاف فإن المخلفات المعقدة التي تم تحويلها ميكروبياً تندمج ضمن جزئيات كبرى لتشكل الأساس المستقر للمادة العضوية بالتربة. ويتم الاستفادة من مكونات هذه المادة العضوية المستقرة ببطء بواسطة كائنات التربة، وهي العملية التي ينتج عنها تحليل نحو 2% من هذه المادة المعقدة سنوياً. ونظراً للتحلل البطيء والمستمر لمكونات المادة العضوية والإضافات السنوية لمخلفات جديدة من النبات، فإن اتزاناً سيتم تحقيقه تظل عنده الكمية الإجمالية للمادة العضوية في التربة ثابتة. وفي المناطق الرطبة التي تتميز بمعدلات أمطار عالية يمكن أن تصل نسبة المادة العضوية في التربة 5% على أساس الوزن الجاف، أما في المناطق الجافة التي تتميز بمعدلات عالية من التحلل وانخفاض معدلات الإضافة من مخلفات النبات، فإن القيمة تقل عادة عن 1%. ويبين الجدول (2-4)

المصطلحات التي تستخدم لتعريف المادة العضوية بالتربة، أما تكون المادة العضوية بالتربة فإنه موضح بالشكل (4-2).

جدول (4-2): المصطلحات المستخدمة لتعريف المادة العضوية بالتربة

الاسم	التعريف
- مخلفات عضوية	- كتلة حيوية نباتية وميكروبية غير متحللة ومنتجاتها المتحللة جزئياً.
- الكتلة الحيوية للتربة	- كتلة حيوية ميكروبية حية.
- المادة العضوية للتربة أو الدبال	- تشمل المادة العضوية كلها التي توجد بالتربة، باستثناء المخلفات العضوية والكتلة الحيوية بالتربة.
- مواد دبالية	- جزيئات كبرى مستقرة ومعقدة، ذات وزن جزيئي عال وليس لها خصائص فيزيائية أو كيميائية واضحة. إن هذه المواد لا تكون أبداً متماثلة في أية ترتيبين وذلك نتيجة لاختلاف المواد الناتجة عنها وكذلك البيئة. تعتبر هذه المواد العمود الفقري للمادة العضوية بالتربة، ويتم تحليلها ببطء (2% سنوياً).
- مواد لا دبالية	- مواد كيميائية معروفة مثل الأحماض الأمينية، والأحماض العضوية، والكربوهيدرات، أو الدهون. وتشمل جميع المركبات البيوكيميائية المعروفة، ولها خصائص فيزيائية وكيميائية واضحة، وهي عادة ما تكون سهلة التحلل بواسطة الميكروبات.



شكل (2-4): توضيح تخطيطي لتكون المادة العضوية بالتربة

يكون لتحرر العناصر المغذية الذي يصاحب تحلل مخلفات النبات تأثيرات عدة على التربة. ويؤدي تحفيز النشاط الميكروبي إلى تحسن بناء التربة، الذي يؤثر بدوره على الخصائص الفيزيائية للتربة، مثل التهوية وارتشاح الماء. وتحتوي المواد الدبالية الثابتة بالتربة على الكثير من المجموعات الكيميائية الفعالة التي تسهم في سعتها التبادلية الكاتيونية التي تعتمد على الرقم الهيدروجيني. وزيادة على ذلك فإن كثيراً من المواد الدبالية واللدبالية يمكن أن تعقد أو تخلب عناصراً ثقيلة، وهو ما يؤثر على تيسرها للنباتات وميكروبات التربة وكذلك إمكانية انتقالها إلى الطبقات تحت السطحية.

3.2 الطور الغازي

1.3.2 مكونات هواء التربة

التربة والهواء الجوي على اتصال مباشر؛ ولذلك فإن الغازات التي توجد في الهواء الجوي توجد أيضاً في هواء التربة، ولكن عند تركيزات مختلفة، وتضم المكونات الغازية

الأساسية كلاً من الأكسجين، ثاني أكسيد الكربون، النيتروجين، ومكونات متطايرة أخرى مثل كبريتيد الهيدروجين أو الإيثيلين وتتراوح عادة تركيزات الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في هواء التربة على أساس الحجم ما بين 19 - 20 % و 1% على التوالي، مقارنة بتركيزاتها في الهواء الجوي حيث تساوي 21% و 0.035%. إن هذا التفاوت يعكس استغلال الأكسجين بواسطة كائنات التربة الهوائية وما ينتج عنه من انطلاق لغاز ثاني أكسيد الكربون. وتنظم التركيزات الغازية في التربة عادة عن طريق انتشار الأكسجين إلى داخل التربة وخروج ثاني أكسيد الكربون منها.

2.3.2 وفرة الأكسجين وتنفس التربة

يعتبر محتوى التربة من الأكسجين حيوياً للكائنات الدقيقة بالتربة، التي تستفيد من الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات أثناء تحليل المركبات العضوية. وتستطيع الكائنات اللاهوائية الاختيارية الاستفادة من الأكسجين أو الصور المركبة للأكسجين (مثل النترات) كمستقبل نهائي للإلكترونات. من ناحية أخرى، فإن الكائنات اللاهوائية لا تستطيع الاستفادة من الأكسجين كمستقبل، بل إن الكائنات اللاهوائية قد تتأثر لدرجة الموت في حالة وجود الأكسجين لأنها لا تحتوي على إنزيمات تستطيع تحليل مجموعات البيروكسيد السامة. ونظراً لأن التحلل الميكروبي لكثير من المركبات العضوية في التربة، بما في ذلك (Xenobiotics) يتم بواسطة الكائنات الهوائية، فإن وجود الأكسجين في التربة ضروري لهذا التحلل. وفيزيائياً يوجد الأكسجين إما ذائب في محلول التربة أو في مسام التربة، لكن تركيزات الأكسجين في محلول التربة تكون أقل كثيراً منها في مسام التربة.

يعتمد مقدار الفراغ المسامي الكلي على قوام التربة وبنائها. وتملك التربة التي تحتوي على نسبة عالية من الطين فراغاً مسامياً كلياً أعلى من جهة، ومسامات أصغر من جهة أخرى، وهو ما يسمح بحركة أسرع لكل من الماء والهواء. كذلك، وفي أي تربة كلما تحسن بناء التربة ازداد الفراغ المسامي الكلي. وتحتاج ميكروبات التربة الهوائية لكل من الماء والأكسجين اللذين يوجدان ضمن الفراغ المسامي. وعلى ذلك، فإن المحتوى الرطوبي يتحكم في مقدار الأكسجين المتاح في التربة. ففي التربة المشبعة بالماء، تكون المسام جميعاً ممتلئة بالماء، ويكون محتوى التربة من الأكسجين منخفضاً جداً. من ناحية أخرى تكون جميع المسام في التربة الجافة ممتلئة تقريباً بالأكسجين، ولهذا فإن محتوى التربة من الرطوبة يكون منخفضاً جداً. وعند السعة الحقلية، حيث تحتوي التربة على قدر معتدل من الرطوبة يكون الأكسجين والرطوبة متيسران بسهولة لميكروبات التربة. وتحت هذه الظروف، فإن تنفس التربة من خلال عمليات الأيض الميكروبي تكون عادة عند أقصى حد لها، لكنه من المهم ملاحظة أن المسام المغلقة تسمح بوجود مواقع دقيقة لا هوائية حتى في التربة جيدة التهوية، وهي بذلك تتيح ظروفاً مناسبة لنشاط الكائنات اللاهوائية الاختيارية وكذلك الكائنات اللاهوائية الإجبارية. إن ذلك يعتبر مثلاً ممتازاً عن الكيفية التي يمكن بها للتربة أن تعمل كنظام بيئي غير متصل متميز بتنوع كبير.

4.2 الطور السائل

1.4.2 خصائص الماء

بالطبع فإن الماء ضروري لجميع صور الحياة البيولوجية، ويعود ذلك جزئياً لطبيعة تركيبه الفريدة. فحقيقة أن السلبية الكهربائية لأيون الأكسجين في جزيء الماء هي أكثر قليلاً مقارنة بما يقابلها من أيونات الهيدروجين قد نتج عنه جزيء قطبي، وسمحت هذه القطبية

بالتالي للماء بالارتباط بجزيئات الماء المجاورة وكذلك جزيئات قطبية أخرى عن طريق الرابطة الهيدروجينية. إن هذه القدرة للارتباط مع كل الأشياء تقريباً لها تأثير عميق على النظم البيولوجية وهو ما يفسر السبب في أن الماء يكاد يكون مديباً كونياً، وهو يشرح أيضاً تأدردت الكاتيونات وإدمصاص الماء على غرويات التربة.

2.4.2 جهد ماء التربة

ترتبط كمية الماء التي توجد في التربة بجهد ماء التربة، الذي يعتبر في الواقع مقياساً للطاقة الحرة لماء التربة. إن ماء التربة كله يرتبط بالطاقة التي تضم إما أنواع طاقة حركية أو طاقة جهد. ففي الترب غير المشبعة، لا يتحرك الماء بحرية؛ وبذلك فإن طاقة الحركة المصاحبة يمكن إهمالها، حتى وإن كانت طاقة الجهد عالية.

جهد ماء التربة (ψ)

هو كمية طاقة الجهد لماء التربة مقارنة بطاقة الجهد لماء نقي تحت ظروف درجات حرارة وضغط قياسيين. ويُرمز للفرق في الجهد بين موقعين في تربة معينة بالرمز $\Delta\psi$. وعموماً فإن الماء يتحرك دائماً من الجهد الأعلى للجهد الأقل. ويوجد الماء عادة في التربة في صور غشاء رطوبي حول غرويات التربة التي تشد إليها جزيئات الماء وهو ما يؤدي إلى تقييد حركتها. وفي هذه الحالة، فإن الماء في التربة يكون أقل قدرة على الحركة منه في حالة الماء الحر الذي يوجد في بركة معينة. وعلى ذلك فإنه يلزم توفير طاقة لإزالة الماء بعيداً عن الغرويات لتمكينه من الحركة. ونظراً لأن الماء يوجد في التربة تحت شد، فإن جهد ماء التربة يكون سالباً مقارنة بالماء الحر. ومع تناقص محتوى التربة من الرطوبة، مما يتسبب في جعل

الغشاء المائي الذي يحيط بالغرويات أقل سمكاً، فإن ما يتبقى من رطوبة يتم شده بقوة أكبر بواسطة الغرويات ويصبح قيمة جهده (ψ) أكثر سلبية مع توفر طاقة جهد أقل للقيام بالشغل. وتكون وحدات الجهد (ψ) عادة بالميجا باسكال أو البار:

$$1 \text{ بار} = 0.987 \text{ ضغط جوي.}$$

$$10^5 \text{ باسكال (Pa)} = 0.1 \text{ ميجا باسكال (MPa).}$$

ومن بين هذه الوحدات تعتبر وحدة الميجا باسكال هي الأنسب. وإذا كان هناك موقعان في التربة لهما قيم طاقة (ψ) تساوي (-0.1) و (-2.0) ميجا باسكال، على التوالي، فإن الماء يتحرك من الموقع الأول (أعلى رطوبة) إلى الأخير (أقل رطوبة)، أي من جهد رطوبة التربة الأعلى إلى الأقل. وتوجد مناقشة لجهد ماء التربة في الجزء (1.5) من هذا الكتاب. يمكن حساب كمية الماء في عينة تربة عن طريق وزن التربة الرطبة، ثم إعادة وزن العينة بعد تسخينها لمدة 24 ساعة من أجل تبخير الماء كله.

$$\text{الرطوبة (\%)} = 100 \times \frac{d-w}{d} \quad (8-2)$$

حيث أن:

$$w = \text{الوزن الرطب للتربة، } d = \text{وزن التربة بعد التجفيف.}$$

وينتج عن ذلك تقدير محتوى التربة من الرطوبة على أساس الوزن الجاف، ويؤدي التعبير عن محتوى تربة معينة من الرطوبة بهذه الطريقة إلى جعل القيمة غير مرتبطة بالمحتوى الرطوبي لأي عينات محددة:

$$\text{الرطوبة (\%)} = 100 \times \frac{\text{كمية الماء}}{\text{الوزن الجاف للتربة}} \quad (9-2)$$

فمثلاً، إذا كانت $d = 66.6$ جم، وأن $w = 100$ جم، فإن:

$$100 \times \frac{\text{جم } 66.6 - \text{جم } 100}{66.6} = \text{الرطوبة (\%)} \quad (10 - 2)$$

$$\%50 =$$

المراجع

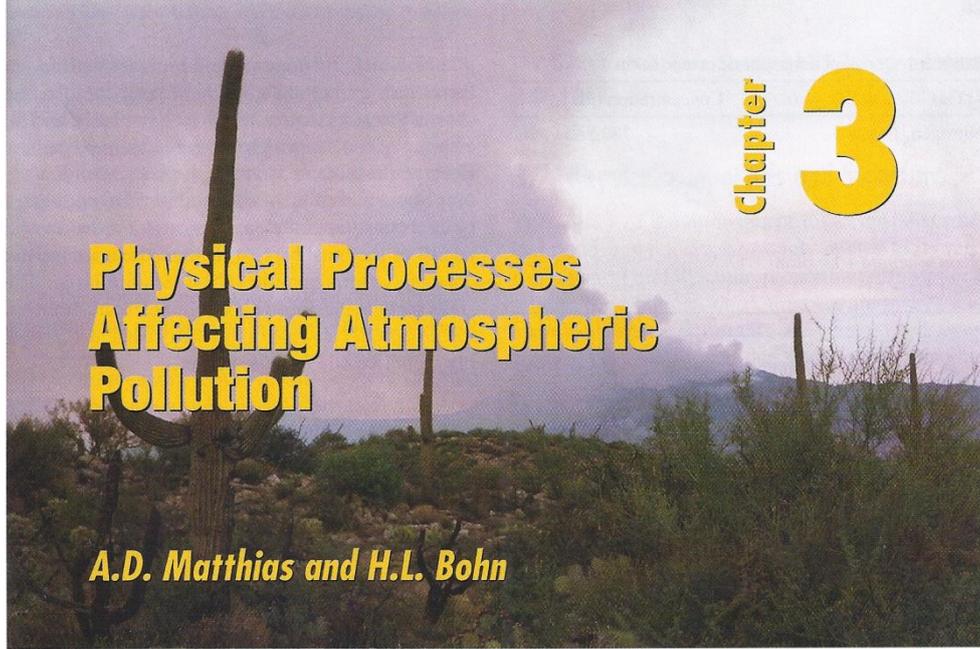
- Brady N.C (1990). *The nature and properties of soils 10th Edition.* MacMillan Publishing Company , London.
- Hassett J.J and Banwart W.L. (1992). *Soils and their environment.* Prentice Hall , Englewood Cliffs , New Jersey.

مسائل حسابية وأسئلة

1. يبلغ تركيز أيون الهيدروجين لمحلل التربة من تربة معينة 3.0×10^{-6} مول. ما هو الرقم الهيدروجيني (pH) لمحلل التربة؟
2. ما هي فئة القوام لتربة تحتوي على 20% رمل و60% سلت و20% طين؟
3. عينة تربة رطبة وزنها 100 جم، بلغ محتواها من الرطوبة بداية 15% على أساس الوزن الجاف، ما هو المحتوى الجديد للرطوبة إذا تمت إضافة 10.0 جم من الماء بصورة متجانسة وخلطها مع هذه التربة؟
4. أي من العوامل وردت بالأجزاء 3.2.2 - 7.2.2 ستؤثر على السعة التبادلية الكاتيونية (CEC) لتربة معينة؟ اشرح لماذا.
5. أي من العوامل الواردة بالأجزاء 3.2.2 - 7.2.2 لها قدرة التأثير على نقل الملوثات خلال التربة ومنطقة فادوز؟ اشرح لماذا.

الباب الثالث

العمليات الفيزيائية التي تؤثر على تلوث الهواء الجوي



يمكن أن تسهم حرائق الأراضي، مثل هذه خارج مدينة توسان بولاية أريزونا في تكون ملوثات عالقة بالهواء الجوي.

1.3 التركيب الكيميائي

إن أكثر من 99% من الهواء الجوي على أساس الكتلة والحجم يتكون من غازات النيتروجين (N_2) والأكسجين (O_2) والأرجون (Ar) (جدول 1-3). ويعتقد أن تركيزات هذه الغازات الجوية، إضافة للنيون (Ne) والهيليوم (He) والكربتون (Kr) ظلت ثابتة على امتداد ملايين السنين، ولا يتوقع تغييرها بدرجة ملحوظة سواء عن طريق وسائل طبيعية أو بشرية.

من ناحية أخرى فإن تركيزات الغازات الأثرية (trace gases) متغيرة. إن هذه الغازات التي تشكل موضوعاً يحظى باهتمام واسع قد أدرجت في الجدول (2-3). {ملحوظة: على الرغم من أن بخار الماء قد أدرج ضمن المكونات المتغيرة، إلا أنه سوف لن يناقش هنا}. ومن المعروف أن هذه الغازات جميعاً تتأثر بنشاطات الإنسان وكذلك بالتفاعلات مع التربة، والنطاق الحيوي، والمحيطات. وتصدر الإشارة هنا بأن مقدار التغير الذي ينتج عن نشاط الإنسان، وكذلك ما هو ناتج عن أسباب طبيعية أخرى ما يزال غير واضح. وقد أثير حول هذه التغيرات جدل واسع وتخوفات كثيرة، لكن بعضاً من هذه المخاوف ربما لا أساس له لأنها أسست على أبحاث غير كافية وقصيرة المدى، ومن المرجح جداً أن التذبذبات قصيرة المدى سوف يتضح بأن لها أهمية ضئيلة على المدى البعيد.

ويزداد الجدل تعقيداً نظراً لأن التربة، على سبيل المثال، تعمل في ذات الوقت كمصدر وبالوعة لجميع الغازات تقريباً الواردة في الجدول (2-3). إن ما يحدد فيما إذا كان دور التربة كمصدر أو كبالوعة يمكن أن يتغير بين فترتي النهار والليل، وحسب الموسم، والمحتوى من الماء والعمليات الزراعية، والتسميد، والغاز الذي هو قيد البحث. كذلك، فإن المحيطات تتذبذب في سلوكها ما بين مصدر وبالوعة.

بلغ تركيز⁽¹⁾ ثاني أكسيد الكربون (CO₂) في الهواء الجوي حوالي 355 ميكرو لتر/لتر وذلك في منتصف عام 1990، وهو ما يمثل زيادة عما كان عليه وهو 300 ميكرو

(1) تستخدم وحدات مختلفة للتعبير عن تركيزات غاز معين في الهواء الجوي. وهنا سوف تستخدم وحدة ميكرو لتر/لتر كما ستستخدم أيضاً نسب مئوية على أساس الكتلة والحجم. وتعادل الوحدة (ميكرو لتر/لتر) وحدة أخرى شائعة الاستخدام هي جزء في المليون على أساس الحجم (ppmv).

لتر/لتر عام 1900. وينخفض تركيز غاز CO₂ في فترة الصيف بمقدار بضعة أجزاء في المليون نتيجة لعمليات التمثيل الضوئي الذي تقوم به نباتات اليابسة. أما مع بداية فصل الخريف وخلال فصل الربيع فإن تركيز CO₂ يرتفع بسبب عمليات تحليل المادة العضوية الذي تقوم به الكائنات الدقيقة، إضافة لتنفس النبات. إن الارتفاع الموسمي لغاز CO₂ وكذلك فترات انخفاضه يتم معادلتها عن طريق دورة البناء والهدم في المحيطات التي تتميز بتغيرات موسمية أقل. وفي النصف الجنوبي من الكرة الأرضية، تكون أعلى وأقل تراكيز لغاز CO₂ مختلفة تماماً مدة ستة أشهر عن تلك في نصف الكرة الأرضية الشمالي، كما أن كمية هذا الغاز تكون أقل كثيراً وذلك لأن الأراضي الجنوبية تعتبر أصغر كثيراً من حيث المساحة لأن النسبة الأعلى منها جافة.

جدول (3-1): المكونات الثابتة للهواء الجوي

الغاز	التركيز (ميكرو لتر/ لتر)
النيتروجين (N ₂)	780,840
الأكسجين (O ₂)	209,460
الأرجون (Ar)	9,340
النيون + الهيليوم + الكريبتون (Kr + He + Ne)	24

وتعزى زيادة تركيز غاز CO₂ في العادة لحرق مواد الوقود الأحفورية (Fossil Fuels)، لكن ما ينتج عن حرق الوقود الأحفوري الكربوني لا يمثل إلا نحو 10% فقط من غاز CO₂ سنوياً مما يتحرر منه بسبب تحليل المادة العضوية في التربة والمحيطات. وهناك مصادر أخرى

كما يمكن أيضاً تعريف كل من ميكرو لتر/ لتر والجزء في المليون على أساس الحجم على أنها عدد جزيئات أو ذرات غاز معين في مليون من جزيئات أو ذرات الهواء، يستخدم أيضاً للتعبير عن ملوثات الهواء وكذلك لأغراض تنظيمية وحدة الكتلة/ الحجم أي (مجم/م³).

أقل أهمية لغاز CO₂ تشمل: (1) حرث وزراعة الأراضي، وهو ما يُحدث تحولاً لبعض من المادة العضوية بالتربة إلى غاز CO₂؛ (2) المحاصيل الزراعية، التي تؤدي إلى تراكم كتلة حيوية تحتوي على كربون بكميات قليلة لأنها موسمية، وأقل كثافة، وتتميز بموسم نمو قصير مقارنة بالنباتات المتوطنة؛ (3) إزالة الغابات، وهو ما يتسبب في تخفيض كتلة الكربون الحيوي. ونظراً لأن زيادة تركيز CO₂ في الهواء الجوي يبلغ نحو نصف الكمية الكلية من CO₂ الناتج فقط عن حرق الوقود فإنه يمكن القول بأن قدرة النطاق الحيوي، والترب، والمحيطات على معادلة التغيرات في تركيز غاز CO₂ الهواء الجوي تكون كبيرة جداً. وتشمل البالوعات تزايد عمليات التمثيل الضوئي والكتلة الحيوية وتزايد امتصاص غاز CO₂ بواسطة المحيطات، وربما أيضاً ازدياد المادة العضوية بالتربة.

جدول (2-3): تركيز الغازات في الهواء الجوي

التركيز (ميكرو لتر / لتر)	الغاز
التشبع - 10000	بخار الماء (H ₂ O)
355	ثاني أكسيد الكربون (CO ₂)
1.5	الميثان (CH ₄)
0.50	الهيدروجين (H ₂)
0.27	أكسيد النيتروز (O ₃)
0.02	الأوزون (O ₃)
أقل من 0.05	أول أكسيد الكربون (CO)
0.004	الأمونيا (NH ₃)
0.001	ثاني أكسيد النيتروجين (NO ₂)
0.001	ثاني أكسيد الكبريت (SO ₂)
0.0005	أكسيد النيتريك (NO)
0.00005	كبريتيد الهيدروجين (H ₂ S)

هناك غاز آخر يحتوى على الكربون وهو الميثان (CH_4)، الذي تمثل المستنقعات والغاز الطبيعي المتسرب ونشاطات حشرة الأرضة مصادره الأساسية. وقد أصبحت تراكيز غاز الميثان في الهواء الجوي في تزايد منذ عدة عقود كما أن غاز الهيدروجين ينطلق من المستنقعات ولكن بكميات قليلة.

ويتم انطلاق أكسيد النيتروز (N_2O) والأمونيا (NH_3) وكذلك امتصاصها طبيعياً بواسطة التربة، ويكون تحرر هذين الغازين بكميات أكبر بعد التسميد. وقد وجد أيضاً أن غاز أكسيد النيتروز في ازدياد بطيء. ويتميز هذا الغاز بأنه قليل التفاعلية وله فترة بقاء طويلة في الهواء الجوي تزيد على المائة عام، كما لوحظ أيضاً أن تركيز غاز الأمونيا في الهواء الجوي مرتفع خاصة في المناطق الصناعية حيث يأخذ هذا الغاز صورة كبريتات الأمونيوم $(NH_4)_2SO_4$.

ينتج كل من ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) وكذلك (N_2O_4)، وأكسيد النيتريك (NO) [التي تجمع عادة معاً وتكتب على أنها NO_x] عن حرق الفحم والبتروك كما هو الحال أيضاً بالنسبة لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2). وبينما يكون الكبريت أحد مكونات الفحم والنفط، فإن أكاسيد النيتروجين هي نواتج ثانوية للأفران عالية الحرارة ومحركات الحرق الداخلي. إضافة لذلك فإن NO_x تنتج عن الصواعق. وتعتبر هذه الغازات عالية الفاعلية مع الهواء: فهي تتأكسد بسرعة إلى حمض نيتريك وحمض كبريتيك، اللذين يذوبان بسرعة في الماء ويسقطان في صورة أمطار حمضية (انظر الجزء 2.12)، ويتم أيضاً امتصاص هذه الغازات مباشرة من الهواء الجوي بواسطة النباتات والتربة الكلسية.

بدأ الاهتمام بالأمطار الحمضية في التساؤل، فقد أظهرت دراسات حديثة أن الأشجار الأوروبية تموت بسبب التقادم وليس نتيجة للأمطار الحمضية. والحقيقة أن الغابات صغيرة السن تنمو في هذه المناطق بشكل جيد، وبالمثل فإن البحيرات بالدول الإسكندنافية وكذلك الجزء الشرقي من أمريكا الشمالية تم زيادة حموضتها نتيجة لإعادة الأراضي الزراعية لتصبح غابات طبيعية مع قلة إضافة الجير الزراعي للتربة، وليس نتيجة للأمطار الحمضية. إن درجة تحميض بحيرة معينة الذي لوحظ في السابق ثبت بأنه يعود جزئياً للطريقة المستخدمة في قياس حموضة البحيرة، ومع ذلك فإن الأمطار الحمضية توجد فعلاً وتظل بدرجة معينة خطراً بيئياً مُلحاً.

وعلى المستوى العالمي، فإن أول أكسيد الكربون (CO) لا يعتبر ملوثاً للهواء الجوي لأن الكائنات الدقيقة بالتربة تقوم بإدمصاصه بسرعة نسبياً وأكسدته إلى غاز CO₂. من جهة أخرى، فإن أول أكسيد الكربون يمكن أن يتراكم في المناطق الحضرية بالمدن خاصة في فترة الذروة لازدحام المركبات.

وللتقليل من تلوث الهواء الجوي، فإن وكالات تنظيمية في جميع أنحاء العالم قد وضعت مزيداً من القيود على انبعاثات كل من SO₂ و NO_x والكيماويات العضوية. إن مدناً مثل لندن وبييتسبرج وسان فرانسيسكو ولوس أنجلوس ومدن كثيرة في أمريكا الشمالية وأوروبا قد سجلت تحسناً ملحوظاً. ولسوء الحظ فإن مدناً أخرى، مثل مكسيكوسيتي (انظر الشكل 10-12) يحتمل أن يزداد الوضع فيها سوءاً قبل أن يتحسن.

يعتبر الأوزون (O_3) ملوثاً للهواء في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي لأنه ضار للنباتات والإنسان. وينتج الأوزون عن طريق تفاعل أشعة الشمس فوق البنفسجية (UV) مع الهواء الملوث الذي يحتوي على غازات عضوية مثل المذيبات الصناعية، والوقود، والهيدروكربونات المؤكسدة جزئياً. وعلى ذلك فإن تركيز الأوزون قد اعتمد بواسطة وكالة حماية البيئة (EPA) الأمريكية على أنه مؤشر لتلوث الهواء.

أما في طبقات الغلاف الجوي العليا، فإن مشكلة التلوث المميزة تتمثل في ما يسمى بثقب الأوزون (Ozone hole)، فقد سجل تناقصاً موسمياً في تركيز الأوزون بالستراتسفير فوق القطب الجنوبي. وقد ازداد ثقب الأوزون اتساعاً في السنوات الأخيرة. ويمتص أوزون الستراتسفير معظم الأشعة فوق البنفسجية لأشعة الشمس، ويؤدي زيادة الأشعة فوق البنفسجية إلى زيادة سرطان الجلد للإنسان والحيوان، كما يؤدي ذلك أيضاً إلى تقزم نمو النباتات.

في طبقات الجو العليا يُهاجم الأوزون بواسطة الكلور (Cl) وبدرجة أقل NO_x . ففي هذه المنطقة المرتفعة حيث تشتد الأشعة فوق البنفسجية، تتحلل مركبات الكلوروفلوروكربونات (Chlorofluorocarbons) مثل CCl_2F_2 إلى Cl_2 ، الذي يقوم بتفكيك الأوزون (O_3) إلى أكسجين، كما يقوم NO_x بتكسير الأوزون O_3 ، ولكن بدرجة أقل. وتجدر الإشارة إلى أن غاز N_2O يتم تحويله إلى NO_x في طبقات الجو العليا بواسطة الأشعة فوق البنفسجية (انظر الجزء 2.5.12).

2.3 الخصائص الفيزيائية والنباتية

ترتبط قدرة الهواء الجوي على قبول أو تفريق أو إزالة الملوثات بدرجة قوية على خصائصه الفيزيائية والديناميكية المختلفة. فالرياح، مثلاً تحدد المسارات والسرعة التي تنتقل بها الملوثات بعيداً عن المصادر مثل السيارات والمدخن. وهناك عملية فيزيائية أخرى، وهي تكثف بخار الماء إلى قطرات مطر وندى، مما يؤدي إلى تنظيف الهواء الجوي من الملوثات القابلة للذوبان في الماء، وهو ما يحدد في نهاية المطاف معدل إزالتها منه، إضافة لذلك فإن الاختلاف الرأسي لدرجة الحرارة يؤثر كثيراً على استقرار الهواء الجوي ومن ثم على الخلط العنيف للهواء الملوث مع الهواء النقي. كما تؤثر درجة الحرارة أيضاً على معدلات التفاعل بين الأنواع الكيميائية، كتلك التي ترتبط بتكوين الأوزون في البيئات الملوثة الحضرية.

وتوفر الأجزاء التالية مقدمة مختصرة للخصائص الفيزيائية والديناميكية للهواء الجوي التي ترتبط أكثر ما يمكن بفهمنا لعمليات تلوث الهواء. إن الهدف هنا هو اكتساب فهم عام لكثافة الهواء، الضغط، الرياح، بخار الماء، هطول الأمطار، انتقال الإشعاع الضوئي، ودرجة الحرارة. وسوف لن يتم هنا تغطية عدة مواضيع هامة مثل، الاضطرابات المناخية على مدى واسع (مثل العواصف) أو التنبؤ بحالات الطقس من أجل إصدار تنبيهات عن تلوث الهواء. إن المهتمين بهذه المواضيع يتعين عليهم الاستعانة بكتب أكثر شمولية في علم المناخ للحصول على تفاصيل أكثر، وهناك عدد من المراجع المقترحة تم إدراجها في نهاية هذا الباب.

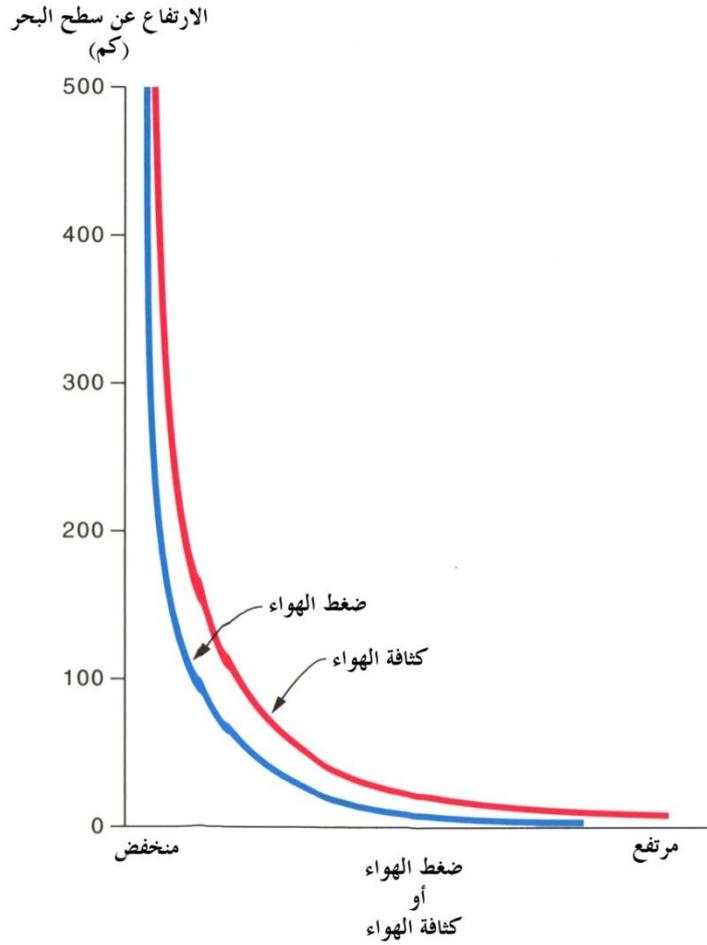
1.2.3 الكثافة، الضغط، والرياح

الهواء عبارة عن خليط متعدد المكونات من جزيئات غازية وذرات، في حالة حركة دائمة حول نفسها مما يؤدي إلى اصطدامات عديدة، وتضفي الكتلة والطاقة الحركية لكل من الجزيئات المتحركة قوة للتصادم، وهو ما يتسبب في رفع الضغط الجوي. إن الاختلافات الأفقية للضغط، الذي ينتج عنه تدفق الهواء (الرياح) عبر سطح الأرض هي عامل هام في انتشار ملوثات الهواء.

الضغط

هو عبارة عن القوة على وحدة المساحة التي تبذلها جزيئات الهواء، ويعبر عنه عادة بوحدات نيوتن للمتر المربع ($N m^{-2}$) أو الباسكال $(Pa)^2$ ، ويبدل الضغط بصورة متساوية في جميع الاتجاهات وذلك لأن الحركة على مستوى الجزيئات تكون موزعة بشكل متجانس في جميع الاتجاهات. وعلى ذلك فإنه عند أي ارتفاع في الهواء الجوي، يكون الضغط مساوياً للقوة التراكمية (الوزن) لوحدة المساحة المبدولة بواسطة جميع الجزيئات فوق هذا المستوى من الارتفاع، وتحت ظروف الاتزان الساكن، فإن وزن الهواء الجوي الضاغظ عند أي ارتفاع على حزمة من الهواء إلى أسفل يتم معادلته تماماً بواسطة قوة تدرج في الضغط تدفع إلى أعلى. يؤدي وزن الهواء الجوي إلى ضغط جزيئات الهواء قريباً من سطح الأرض، وفي الواقع فإن نحو الثلثين من إجمالي جزيئات الهواء الجوي تتواجد ضمن مسافة واحدة على مقياس الارتفاع تبلغ نحو تسعة كيلومترات فوق سطح الأرض ويكون كل من كثافة الهواء (مقاسة بالكيلوجرام/ متر مكعب) والضغط أعلى ما يمكن عند مستوى سطح البحر حيث يبلغان في المتوسط 1.2 كجم م⁻³ و 101.3 كيلو باسكال (1013 مللي بار)، على التوالي. ومن سطح

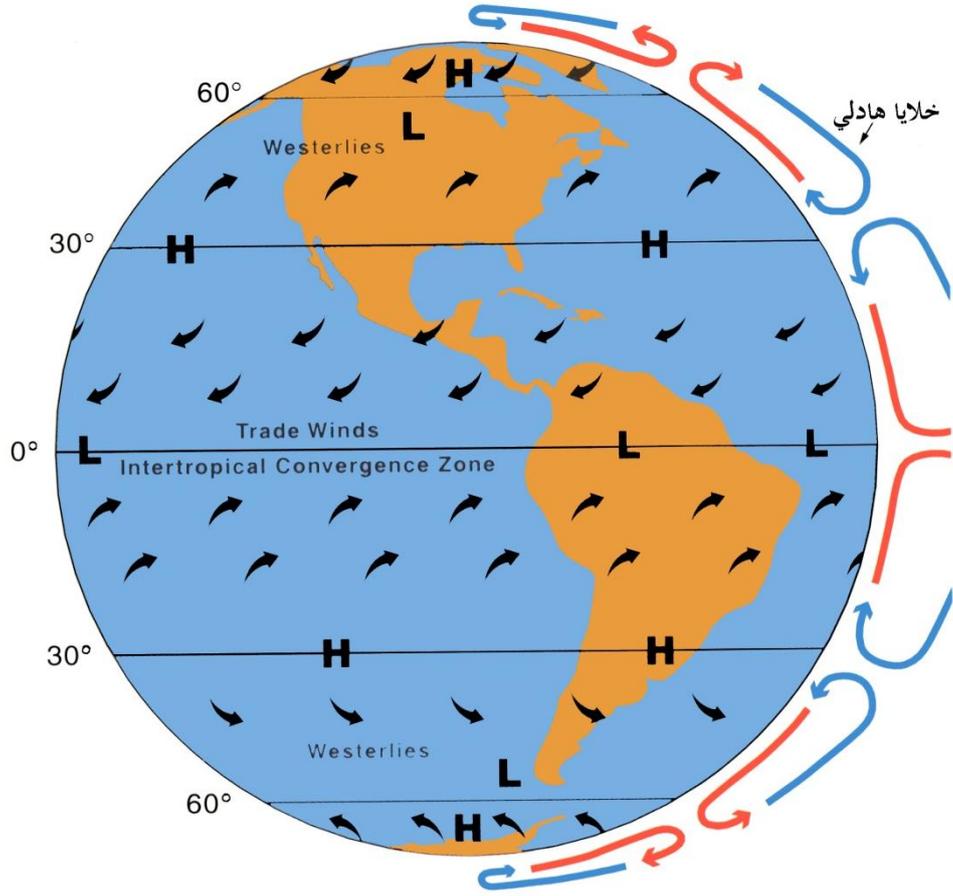
البحر لأعلى فإن كلاً منهما يتناقص لوغاريثمياً (exponentially) مع الارتفاع، كما هو موضح بالشكل 1-3. وعند ارتفاعات تزيد على 100 كيلومتر تقريباً فإن قليلاً جداً من الجزيئات (والذرات والأيونات) تكون موجودة إلى الحد الذي يمكن فيه إهمال كل من الكثافة والضغط.



شكل (1-3): تغيرات الكثافة والضغط مع الارتفاع في الهواء الجوي للككرة الأرضية.

يختلف الضغط عند مستوى سطح البحر بشكل زمنياً ومكانياً عبر سطح الأرض. فمثلاً عند أي وقت من اليوم، ربما يكون الضغط في مدينة سياتل بولاية واشنطن عدة ملي بارات أعلى أو أقل منه بمدينة ميامي بولاية فلوريدا، وذلك على الرغم من أن كلا منهما تقع عند مستوى سطح البحر. ويمكن أن تنشأ الاختلافات (التدرج) في الضغط السطحي من عوامل عدة، مثل التباينات في تسخين جزيئات الهواء بواسطة الشمس، أو التذبذبات في بخار الماء بالهواء الجوي وغطاء السحب ودوران الأرض. وتلف الكرة الأرضية أحزمة شبه دائمة من ضغط سطحي مرتفع (H) ومنخفض (L) عند ارتفاعات مختلفة. إن هذه الأحزمة هي نتيجة لدوران عام للهواء الجوي، كما هو موضح بشكل مبسط في الشكل 3-2. إن الدوران على نطاق واسع يتكون (في المتوسط) من ست خلايا توصيل رئيسية تعرف بخلايا هادلي (Hadley cells). وتأتي الطاقة اللازمة لدفع الحركة داخل هذه الخلايا من التوزيع الارتفاعي غير المتساوي لتسخين السطح بواسطة أشعة الشمس.

يتم امتصاص قدر أكبر من ضوء الشمس بالنسبة لوحدة المساحة السطحية عند خط الاستواء منه عند القطبين، وبذلك فإن الخلايا (خلايا هادلي) تقوم بنقل الطاقة من خط الاستواء الدافئ في اتجاه المناطق القطبية الباردة. إضافة لذلك تقوم هذه الخلايا بتسهيل النقل لمسافات طويلة للمواد المعلقة وملوثات الهواء الغازية على امتداد سطح الأرض.



شكل (2-3): الدوران العام للهواء الجوي يوضح على المدى الواسع خلايا التوصيل (Hadley cells) واتجاهات الرياح السطحية السائدة، ومعالم الضغط عند سطح الأرض H = ضغط عال، L = ضغط منخفض، الأسهم السوداء تشير إلى اتجاه الرياح السطحية.

ينتج ضغط سطحي منخفض عندما يصعد من سطح الأرض إلى أعلى هواء دافئ ورطب، مثل ذلك الذي يوجد عند خط الاستواء، ويرتفع الهواء الرطب فوق خط الاستواء لأن درجة الحرارة تكون مرتفعة نسبياً، ولأن الهواء الرطب (قد يحتوي على 2-4% بخار ماء) يكون أقل كثافة (أخف وزناً) من الهواء الجاف. إن الانخفاض النسبي للوزن الجزيئي لبخار الماء (18) مقارنة بالهواء الجاف (29) يخفض متوسط الوزن الجزيئي للهواء الرطب، ويتحرك الهواء الأخف وزناً إلى أعلى ويتسبب في ضغط أقل نسبياً عند السطح.

تلتقي تدفقات الهواء الرطب المصاحبة للرياح التجارية عند منطقة الالتقاء بين الاستوائي (ITCZ) قرب خط الاستواء (انظر الشكل 3 - 2)، ومع تجمع التدفقات الهوائية من نصفي الكرة الشمالي والجنوبي، يسخن الهواء الجوي بواسطة حرارة الشمس الاستوائية فيصعد إلى أعلى. ومع ارتفاع الهواء عن سطح الأرض، يبرد ويفقد رطوبته عن طريق التكثف والهطول، وعند الارتفاعات العالية يتركز الهواء الصاعد شمالاً وجنوباً. وعند خطوط تحت مدارية (نحو 30° شمالاً وجنوباً)، يهبط تدفق الهواء الجوي الأعلى الجاف في اتجاه (غالباً) سطوح المحيط حيث يصبح مرة ثانية رطباً ويتدفق راجعاً إلى منطقة الالتقاء الاستوائي (ITCZ)، ويضغط الهواء الهابط (وبذلك يسخن) الهواء الجوي مما يتسبب في ارتفاع الضغط. وتجدر الإشارة إلى أن الهبوط قد يحدث بمعدل كيلو متر واحد في اليوم عند الخطوط تحت المدارية، ولذلك فإن الضغط المرتفع يكون مصاحباً للهواء الهابط الذي يكون دافئاً وجافاً نسبياً، إن هذه العملية لها دلالاتها الهامة بخصوص انتشار ملوثات الهواء.

إن أنماط الرياح السطحية المصاحبة لدوران الهواء الجوي تكون أكثر تعقيداً من أنماط التدفق المبسطة والمثالية الموضحة بالشكل (2-3)، وعموماً فإن الرياح السطحية تتأثر بعدة قوى تعمل على كتل الهواء، بما في ذلك تدرج الضغط (التدفق من مناطق الضغط العالي إلى مناطق الضغط المنخفض)، وانحراف الهواء إلى اليمين في نصف الكرة الشمالي بسبب دوران الأرض (coriolis)، والاحتكاك، والقوى الطاردة المركزية. وعموماً تتجمع هذه القوى في نصف الكرة الشمالي مؤدية إلى تدفق الهواء ضد اتجاه حركة عقارب الساعة حول الضغط المنخفض، وفي اتجاه عقارب الساعة حول الضغط المرتفع، ويسمى التدفق حول الضغط المنخفض بالتدفق السايكلوني (cyclonic flow)، أما التدفق حول الضغط المرتفع فيسمى بالتدفق ضد السايكلوني (anti - cyclonic flow). وعند الخطوط المنخفضة، يكون اتجاه الرياح التجارية السطحية السائدة عموماً من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي، أما عند الخطوط المتوسطة، فإن الرياح السطحية السائدة عموماً تكون من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي، أو ما يعرف بالغربي (Westerlies) انظر الشكل (2-3). من ناحية أخرى، فإن الهواء يتدفق عموماً في المناطق البعيدة عن خط الاستواء من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي، ونظراً للالتقاء عند منطقة بين الاستوائي ITCZ، فإن الرياح تميل لأن تكون خفيفة فوق خط الاستواء.

إن الدوران العام للهواء وما ينتج عنه من نمط موضعي لضغط مرتفع آخر منخفض يؤثر على نقل الملوثات لمسافات بعيدة. ففي المناطق ذات الضغط المرتفع شبه الدائم (مثل تلك التي تقع ضمن حزام المناطق تحت المدارية عالية الضغط عند خط 30° تقريباً)، فإن

حالة هادئة، وراكدة تكون عادة هي السائدة لفترات طويلة من الزمن، وبذلك فإنها تؤدي إلى تعاضم تركيزات ملوثات الهواء قرب سطح الأرض، فمثلاً يؤثر بدرجة كبيرة هبوط الهواء المصاحب للضغط المرتفع فوق الجزء الشرقي من المحيط الباسيفيكي (انظر الشكل 3-2) على جودة الهواء في المدن الساحلية لجنوب ولاية كاليفورنيا (انظر الشكل 12-4). وبنفس الكيفية يؤثر الضغط المرتفع فوق الجزء الجنوبي الغربي للولايات المتحدة سلباً على جودة الهواء في هذه المنطقة، وخاصة فوق المناطق الحضرية مثل مدينة فينكس بولاية أريزونا. ويمكن أيضاً للضغط المرتفع أن يسبب مشاكل فيما يخص جودة الهواء فوق مدينة القاهرة في مصر.

2.2.3 درجة الحرارة

درجة الحرارة هي قياس الطاقة الحركية (المحتوى الحراري) للجزيئات والذرات. وتؤثر درجة حرارة الهواء على جميع العمليات الفيزيائية والكيميائية والحيوية الواقعة ضمن نظام مناخ الكرة الأرضية. وأحسن مثال على ذلك هو تأثيرها على مناخ البيئات الحضرية الملوثة، حيث تؤدي درجة الحرارة المرتفعة إلى زيادة معدل تكون الضبخان (دخان + ضباب) بدرجة كبيرة. إضافة لذلك، فبمجرد تكون الضبخان، فإنه قد ينتشر لأعلى ولأسفل بسبب اضطرابات الهواء الجوي المتولدة عن الطفووية (buoyancy) الناتجة عن الاختلافات في درجة الحرارة (وهو ما يؤثر على الكثافة) بين حزم هواء فردية وما يحيط بها من مناخ. ويمكن رؤية تأثيرات الطفووية على حركة الهواء عن طريق مشاهدة الحركة المتذبذبة لبالون مملوء بغاز الهيليوم بمجرد إطلاقه إلى الهواء الجوي.

تختلف درجة حرارة الهواء قرب سطح الأرض بدرجة كبيرة على امتداد مقاييس زمنية مختلفة، تتراوح ما بين ثوانٍ وسنين. فعند منتصف الصيف مثلاً، ربما تختلف درجة حرارة الهواء على ارتفاع مترين فوق أرضية صحراء سونوران في ولاية أريزونا خلال ساعات النهار من نحو 45°م كدرجة حرارة قصوى (عند منتصف الظهيرة) إلى 20°م كحد درجة حرارة أدنى (عند الفجر). وفي منتصف فصل الشتاء فإن التغير اليومي في الصحراء قد يتراوح ما بين (10-30)°م. إن التغيرات الزمنية في درجة حرارة الهواء تحدث أساساً نتيجة للاختلاف في كمية الطاقة الشمسية التي تصل لسطح الأرض. إن درجة حرارة الجو عند ارتفاع معين وليكن 2 متر، يختلف أيضاً بشكل ملحوظ على امتداد سطح الكرة الأرضية وذلك نظراً للاختلافات في كميات الطاقة بسبب الموقع. وتحدث درجات الحرارة الأعلى في الصحاري التي تقع قريباً من خط الاستواء، مثل الصحراء الكبرى في أفريقيا، حيث تكون كمية الطاقة المضافة كبيرة جداً وكميات المياه المتاحة لتبريد سطح الأرض نتيجة التبخر قليلة.

إن السؤال عن كيفية تغير درجة حرارة الهواء مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض يعتبر مهماً عند تناول كيفية انتشار ظاهرة تلوث الهواء قرب سطح الأرض، وللإجابة على هذا السؤال، يتعين معرفة أن تبادل الطاقة يحدث بصورة مستمرة تقريباً بين سطح الأرض والهواء الجوي. يحدث بعض من تبادل الحرارة بواسطة التوصيل (conduction) خلال طبقة رقيقة جداً يبلغ سمكها بضع ملليمترات من الهواء فوق سطح الأرض؛ ومع ذلك فإن معظم تبادل الحرارة يتم عن طريق الحمل (convection)، الذي هو عبارة عن التبادل المضطرب الذي تسببه الطفوئية (buoyancy) وإجهاد القص (shear stress) ويزداد الحمل كفاءة مع

زيادة الارتفاع عن سطح الأرض. إن هذه الزيادة هي نتيجة لتناقص تأثير مقاومة الاحتكاك السطحي عند الارتفاعات الأعلى، وعادة يكون التغير في درجة الحرارة عند منتصف النهار مع الارتفاع فوق سطح الأرض كبيراً جداً، وقد يبلغ تدرج الحرارة فوق سطح تربة حارة بالصحراء -1°م. لكل ملليمتر واحد، ويلاحظ أن تدرج حرارة سالب يعني أن حرارة الهواء تنقص مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض. ونظراً لأن الحمل سرعان ما يصبح فعالاً جداً في عملية خلط الهواء مع زيادة الارتفاع، فإن تدرجات الحرارة ضمن الهواء المضطرب تنخفض بسرعة مع زيادة الارتفاع. ومن المهم تذكر أن الهواء الملامس لسطح الأرض خلال ساعات النهار يكون بشكل عام أكثر دفئاً من الهواء الأعلى، وبذلك فإن درجة حرارة الهواء تنخفض عموماً مع زيادة الارتفاع ضمن نطاق الجزء الأدنى من الهواء الجوي خلال فترة النهار.

يستخدم أخصائيو المناخ مصطلح معدل التفاوت (lapse rate) لوصف التغير الملحوظ (يكون عموماً نقصاً) في درجة حرارة الهواء مع الارتفاع ($\Delta T/\Delta z$). وربما يختلف معدل التفاوت كثيراً عند ارتفاع وموقع معين خلال ساعات النهار استجابة لتغيرات في تدفق الحرارة بين سطح الأرض والهواء الجوي. فمثلاً على ارتفاع 2 متر عند منتصف النهار فوق سطح تربة بالصحراء، قد يتراوح معدل الانحراف المؤقت من نحو -0.01 إلى 0.2°م للمتر الواحد، وضمن نطاق بعض الكيلومترات الأولى للهواء الجوي الأدنى، فإن معدل الانحراف المؤقت يكون في المتوسط، نحو -0.0065°م للمتر الواحد.

من ناحية أخرى، فإن الوضع خلال الليل يكون عموماً عكس ظروف ما هو خلال ساعات النهار، فسطح الأرض قد يفقد طاقة بسرعة للفضاء عن طريق انبعاث

تحت فوق الحمراء (انظر الجزء 4.2.3)، ويصبح بارداً نسبياً. إن عملية التبريد هذه تبرد أيضاً الهواء الملامس مباشرة لسطح الأرض، وعلى ذلك، فإن درجة حرارة الهواء تزداد عادة مع زيادة الارتفاع، حيث تكون مثالياً بمعدل 0.1 إلى 1°م للمتر الواحد. ويحدث ما يسمى انقلاب درجة حرارة الهواء (air temperature inversion) عندما تزداد درجة الحرارة مع الارتفاع إلى مستوى يسمى ارتفاع الانقلاب (inversion height) حيث تصل درجة حرارة الهواء أقصى حد لها. وعند تجاوز ارتفاع الانقلاب، فإن درجة الحرارة تقل مع الارتفاع، وتعتبر الانقلابات الإشعاعية شائعة بشكل خاص في بيئات الصحراء الجافة في جنوب غرب الولايات المتحدة وشمال شرق إفريقيا، حيث يتسبب الفقد الليلي للطاقة المشعة من الأرض في اتجاه الفضاء في تبريد الهواء الملاصق لسطح الأرض ويمكن أن تحدث الانقلابات أيضاً كنتيجة للهبوط المصاحب للتدفق ضد السايكلوني، الذي يعتبر شائعاً أيضاً فوق الجزء الجنوبي الغربي للولايات المتحدة، (إن هذه وأسباب أخرى للانقلابات الحرارية تم مناقشتها في الجزء 1.4.12).

وكما سيتم مناقشته في الفقرات التالية، فإن الظروف الهوائية المستقرة المصاحبة للانقلابات تميل إلى حجز الملوثات قرب مصادرها، ويحدد استقرار الهواء مدى قدرته على خلط ونشر الملوثات، ويمكن للهواء أن يكون غير مستقر، أو مستقراً، أو حيداً.

الهواء غير المستقر (unstable air)

يتسبب في حركة مضطربة يصاحبها تيارات حمل حرة نتيجة للطفوية خلال الهواء الجوي. إن حركة الطفو (Buoyant) تحفز اختراق الحزم الهوائية إلى أعلى داخل الهواء الجوي،

وهي بذلك تساعد على تفريق الملوثات. عندما تكون الظروف غير مستقرة فإن حزمة الهواء التي يتم إزاحتها دون حدوث تغير في درجة الحرارة (دون حدوث تبادل حرارى مع الهواء المحيط بها) في الاتجاه إلى أعلى أو إلى أسفل لمسافة قصيرة يتم دفعها بعيداً عن مكانها الأصلي بواسطة خاصية الطفو. ويكون الهواء غير مستقر لأن صافي قوة الطفو (buoyancy) التي تعمل الحزمة الهوائية على دفعها إما إلى أعلى أو إلى أسفل، حسب الاختلافات في درجة الحرارة (الكثافة) بين حزمة الهواء ومحيطها البيئي. وتسود ظروف الاستقرار خلال ساعات النهار عندما تنقل الحرارة بواسطة تيارات الحمل من سطح التربة إلى أعلى.

الهواء المستقر (stable air)

في حالة الهواء المستقر، فإن الاضطراب يكون محدوداً جداً أو غائباً تماماً. وتحت ظروف الاستقرار، تميل خاصية الطفو (buoyancy) إلى استعادة حزمة الهواء التي تمت إزاحتها دون حدوث تغير في درجة حرارتها إلى ارتفاعها الأصلي. وبمعنى آخر فإن قوة الطفو Buoyancy تعمل في اتجاه عكسي لحركة الطرد المزاح. وتحدث الحالة المستقرة أكثر ما يمكن في فترة الليل، عندما يكون اتجاه تدفق حرارة الحمل إلى أسفل من الهواء الجوي إلى سطح التربة.

الاستقرار المتعادل (neutral stability)

يعني أن قوة خاصية الطفو Buoyancy تساوى صفراً وأن هناك توازناً بين الجاذبية (تعمل في الاتجاه لأسفل) وقوة تدرج الضغط (تعمل في الاتجاه لأعلى) على حزمة

الهواء. ويساوي تدرج الضغط الفرق بين الضغوط عند قمة وقاع الحزمة الهوائية مقسوماً على المسافة بين القمة والقاع. وبذلك فإنه تحت ظروف التعادل تظل حزمة من الهواء تمت إزاحتها لأعلى أو لأسفل من ارتفاعها الأصلي عند ارتفاعها الجديد إلا إذا تم تعريضها لقوة خارجية. وكثيراً ما تحدث حالات التعادل لفترة قصيرة بعد شروق الشمس، وقبل الغروب، وذلك عندما يكون تدفق حرارة الحمل صفراً، أيضاً فإن الأيام الملبدة بالغيوم والتي تهب فيها الرياح تكون ملائمة للاستقرار المتعادل.

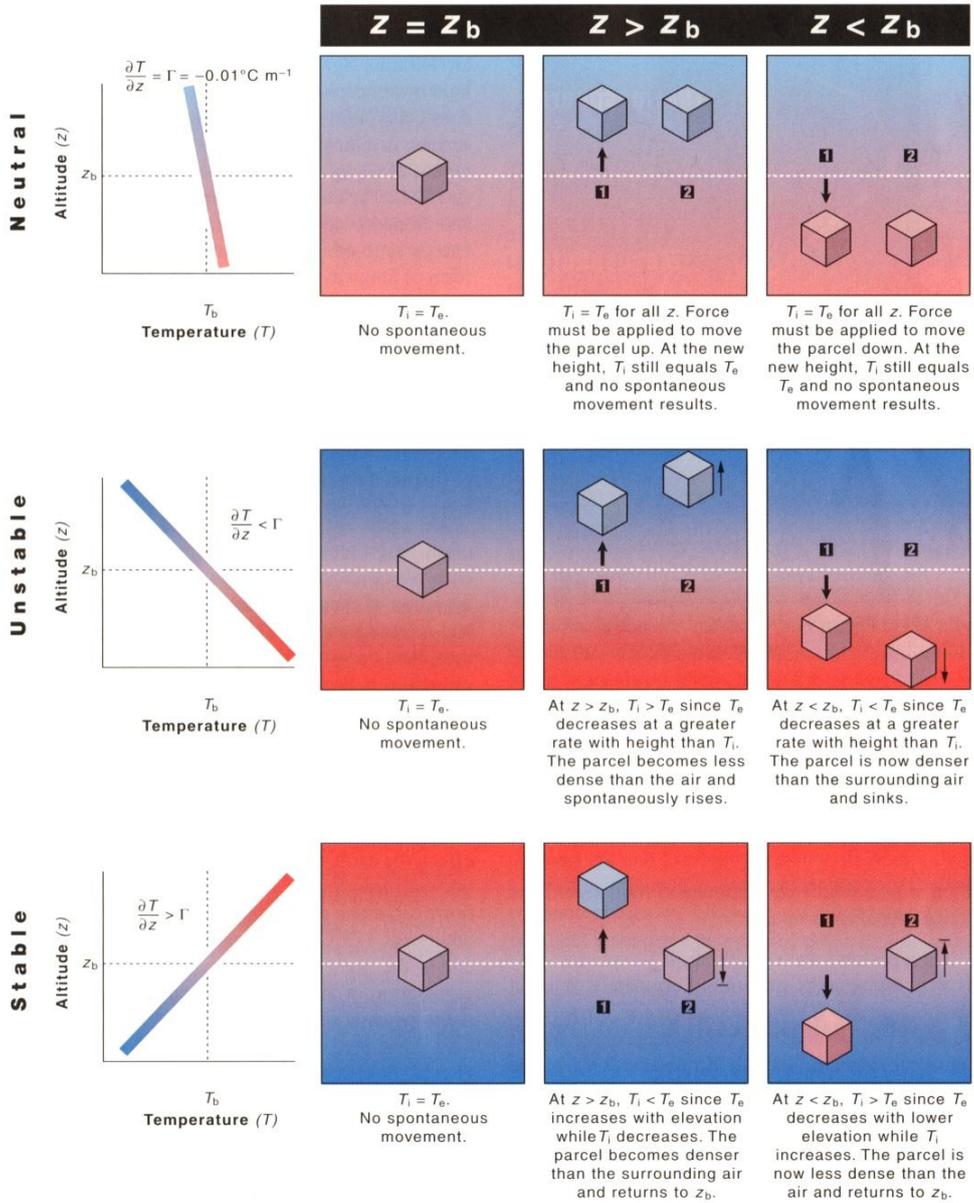
يعتمد تقييم قدرة الهواء الجوي على تشتيت الملوثات على التقدير الكمي لثباته. وأساساً يتم تحديد الثبات بواسطة القيمة المقاسة لمعدل التفاوت $\Delta T/\Delta z$ مقارنة بثبات معدل انحراف الحرارة (Γ) ويعرف الثابت (Γ) بأنه مقدار التغير في درجة حرارة حزمة من الهواء عندما تتم إزاحة هذه الحزمة لأعلى أو لأسفل دون كسب أو فقد في الحرارة من الارتفاع الأول z_b (انظر الشكل 3-3). إن التغير في درجة الحرارة ينتج عن تغير في الضغط، كما يوضح قانون الغاز المثالي وعندما يكون الهواء الجوي جافاً نسبياً، فإن Γ تساوي $\frac{g}{c_p}$ حيث أن g تساوي العجلة الناتجة عن الجاذبية عن c_p هي الحرارة النوعية للهواء عند ضغط ثابت. وبذلك فإن Γ لها قيمة تساوي حوالى 0.01°m^{-1} وهذا يعني أن درجة حرارة (T_b) لحزمة من الهواء يتم رفعها من المستوى z_b دون كسب أو فقد حرارة ستخفض بمقدار 0.01°m^{-1} لكل متر إزاحة وبالمثل إذا تم إزاحة حزمة من الهواء من الارتفاع z_b في الاتجاه لأسفل فستزداد درجة حرارته بمقدار 0.01°m^{-1} لكل متر إزاحة.

* عندما يكون $\Gamma > \Delta T/\Delta z$ مثل 0.05 م° للـمتر الواحد يكون أقل من 0.01 م° (للمتر الواحد) فإن الهواء يكون غير مستقر، كما هو موضح في الشكل 3-3 (الوسط). والسبب في كونه غير مستقر لأن حزمة من الهواء يتم إزاحتها لارتفاع أعلى من مستواها الأصلي عند z_b تكون دائماً أكثر دفئاً من الهواء المحيط. وعندما يتم إزاحتها لأسفل، فإنها تكون أبرد من محيطها، لذلك فإنه يمكن دفعها لأعلى أو لأسفل من المستوى z_b بواسطة قوة الطفو (buoyancy) مما يسبب اضطراباً.

* عندما يكون $\Gamma < \Delta T/\Delta z$ ، يقال عن هذه الظروف بأنها مستقرة (الشكل 3-3 أسفل). خلال ظروف الاستقرار، فإن كتلة من الهواء يتم إزاحتها لأعلى من z_b تصبح أبرد من محيطها، وعندما تتراح لأسفل، تصبح أدفاً من محيطها. وعلى ذلك، فإن قوة الطفو buoyancy تعيد كتلة من الهواء لمستواها الأصلي z_b مرة أخرى، وتثبط الحركة المضطربة.

* عندما تكون $\Gamma = \Delta T/\Delta z$ ، توجد ظروف متعادلة (الشكل 3-3، أعلى)، وتكون قوة الطفو Buoyancy التي تعمل على كتلة من الهواء مساوية للصفر عند أي ارتفاع، وتلخص المعايير التي تحدد الاستقرار كما يلي:

$\Gamma > \Delta T/\Delta z$	ظروف غير مستقرة:
$\Gamma < \Delta T/\Delta z$	ظروف مستقرة:
$\Gamma = \Delta T/\Delta z$	ظروف متعادلة:



شكل (3-3): تغيرات درجة حرارة الهواء مع الارتفاع تحت ظروف متعادلة، وغير مستقرة، ومستقرة.

3.2.3 بخار الماء والهطول

بخار الماء جزء من الهواء الجوي على درجة عالية من التباين. ففي المناطق الدافئة، والرطوبة، والغابات الاستوائية المطيرة، فإن معدلات البحر العالية من سطح الأرض تحفظ الهواء الجوي الأدنى مشبعاً باستمرار تقريباً. من ناحية أخرى، ففي المناطق الجافة والصحارى الحارة يحدث تبخر قليل ويكون بخار الماء في الهواء الجوي بكميات لا تكاد تذكر.

يتم توصيف بخار الماء في الجو بواسطة مؤشرات مختلفة، تشمل ضغط البخار، الرطوبة النسبية، درجة حرارة نقطة الندى، كثافة بخار الماء، والكثافة النوعية. وربما تكون الرطوبة النسبية المؤشر الأكثر شيوعاً، وتعرف بأنها النسبة بين ضغط البخار الفعلي إلى ضغط بخار الهواء عند التشبع الذي يعتمد فقط على درجة حرارة الهواء.

يحدث تكثف بخار الماء إلى سحاب أو قطرات ضباب عندما يتم تبريد الهواء المشبع عند درجة حرارة نقطة الندى. ويحدث التبريد عن طريق عمليات مختلفة، مثل التبريد الإشعاعي لسطح الأرض ليلاً، وحركة الحمل إلى أعلى، والحركة الأفقية للهواء الجوي الذي تقوم فيه جبهة هواء بارد بإزاحة هواء رطب دافئ إلى أعلى، والرفع الجبلي (الذي يرفع فيه الهواء فوق سلسلة جبلية).

يقوم الهطول في صورة مطر أو ثلج بنزع أنواع كثيرة من المواد المعلقة والغازات الملوثة من الهواء، وتعرف الإزالة بواسطة الغسيل بالترسيب الرطب. ويمكن إذابة الملوثات مباشرة في قطرات الماء، أو ربما تدمص على هذه القطرات. وتشمل الملوثات القابلة للذوبان في الماء،

من بين مركبات أخرى، أنواع مختلفة من أكاسيد الكبريت والنيروجين. إن إزالة هذه الملوثات يزيد من حموضة الأمطار، فتنتج مطراً حمضياً.

4.2.3 الانتقال الإشعاعي

يعتمد كثيراً المناخ الإشعاعي للأرض على ثلاث عمليات نقل إشعاعية رئيسية:

1. كمية تدفق الطاقة الإشعاعية التي تصل من الشمس إلى سطح الأرض.

2. إعادة توزيع الطاقة الإشعاعية داخل إطار الغلاف الجوي.

3. فقد الطاقة الإشعاعية للفضاء.

ويضم التوازن الإجمالي لنظام إشعاع الغلاف الجوي الأرضي عمليات الامتصاص والتفريق والتوصيل، والانبعث، التي يتم وصفها بإيجاز في الجزء التالي. هناك طولين موجيين للظيف الكهرومغناطيسي يعتبران على قدر كبير من الأهمية بالنسبة للاتزان الإجمالي للإشعاع: إشعاع موجى قصير (شمسي) وإشعاع موجى طويل. وتتكون الموجة القصيرة من المسافة الموجية التي تتراوح من نحو 0.15 - 3.0 ميكرومتر، ويقع داخل هذا الجزء مكونات الأشعة فوق البنفسجية (0.15 - 0.36 ميكرومتر)، والأشعة المرئية (0.36 - 0.75 ميكرومتر)، والأشعة القريبة من تحت الحمراء (0.75 - 3 ميكرومتر). وتنبعث الطاقة ذات الأمواج القصيرة بواسطة الشمس، التي تعتبر جسماً أسوداً مشعاً متكاملًا تقريباً تصل درجة حرارته إلى نحو 6000 درجة كلفن. أما الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي فيشكلان المكونات قصيرة الموجة الأكثر أهمية للمناخ الكوني.

وعلى أساس وحدة طول الموجة، فإن الأشعة فوق البنفسجية (UV) تعتبر إشعاعاً ذا طاقة عالية جداً. ولحسن الحظ، فإن معظم موجات الأشعة فوق البنفسجية عالية الطاقة يتم امتصاصها انتقائياً بواسطة الأوزون ومكونات أخرى في الجزء العلوي من الغلاف الجوي للأرض. لكن بعضاً من الأشعة فوق البنفسجية تصل إلى سطح الأرض، حيث يمكن أن تكون ضارة للحياة وتسهم في تكون ضباب دخاني (smog) كيميائي - ضوئي في الغلاف الجوي الأدنى.

إن معظم الإشعاع الموجي القصير يقع ضمن جزء الطيف المرئي. وفي الحقيقة، فإن الطول الموجي لأقصى تدفق للطاقة من الشمس يكون عند 0.48 ميكرومتر، الذي يكون مرئياً لعين الإنسان كضوء أخضر، ويمر معظم الضوء المرئي من الشمس خلال الهواء الخالي من الغبار دون أن يفقد كثيراً. من ناحية أخرى، فإن تشتتاً يحدث فعلياً للضوء المرئي بواسطة جزيئات الهواء الجوي، والسحب، وعوالق الهواء (الأيروسول). إن الضوء المرئي الذي يصل سطح اليابسة إما أن يمتص (75%) تقريباً أو ينعكس (25% تقريباً) بواسطة مواد على سطح الأرض (مثل النباتات، والماء، والتربة). وتقوم الطاقة الإشعاعية الممتصة بتدفئة التربة والهواء وتبخير الماء، كما أن بعضاً من الطاقة الممتصة يعاد انبعاثها مرة ثانية إلى الهواء الجوي في صورة إشعاع طويل الموجة.

يشمل الإشعاع طويل الموجة الطيف من نحو 3.0-100 ميكرومتر ويتم انبعاثه بواسطة المواد داخل نظام الهواء الجوي - الأرض. ونظراً لأن درجة حرارة اليابسة تبلغ نحو 290 كلفن، فإن طول الموجة لأقصى انبعاث موجي طويل تكون حوالي 10 ميكرومتر.

ويشار عادة إلى الإشعاع طويل الموجة إلى أنه أرضي (terrestrial) أو أشعة تحت الحمراء (infrared radiation).

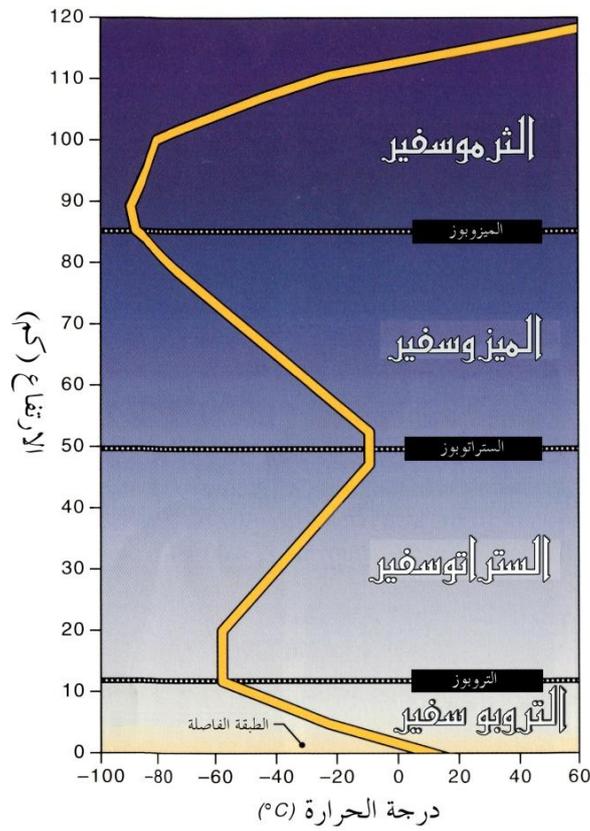
يعتبر الهواء الجوي للأرض غير منفذ في الغالب لمعظم أنواع الطيف طويل الموجة، ولكن توجد نافذة بين 8 و11 ميكرومتر تقريباً تسمح بحروب جزء من الطاقة طويلة الموجة إلى الفضاء. كما يحدث امتصاص وإعادة انبعاث للطاقة طويلة المدى داخل الهواء الجوي في صورة طاقة اهتزازية لأنواع جزيئية متنوعة، بما فيها بخار الماء، وثنائي أكسيد الكربون، وأكسيد النيتروجين و الميثان. إن هذه وبعضاً من الأنواع الأخرى تشكل ما هو معروف باسم غازات البيت الزجاجي، وهي مسؤولة عن تأثير البيت الزجاجي للأرض.

وبدون التدفئة بواسطة التأثير الطبيعي للبيت الزجاجي، فإن الكرة الأرضية ستكون أبرد بحوالي 33°م أبرد من متوسط درجة حرارتها الحالي الذي يبلغ 15°م تقريباً، وتجدر الإشارة إلى وجود اهتمام كبير في الأوساط العامة والعلمية بأن زيادة تتراوح ما بين (1-3)°م في مقدار التدفئة سيحدث على المستوى العالمي مع نهاية القرن الحادي والعشرين وذلك نتيجة للتراكم التدريجي لغازات البيت الزجاجي في الغلاف الجوي من مصادر بشرية.

5.2.3 الغلاف الجوي الأدنى

يحدد التباين في درجة الحرارة مع الارتفاع الطبقات المختلفة للغلاف الجوي. ويوضح الشكل 3-4 طبقات الهواء الأساسية، ويعتبر التروبوسفير الطبقة الرئيسية الأقل ارتفاعاً، وفي داخل طبقة التروبوسفير، يتميز الاختلاف الرأسي لدرجة الحرارة بحالات من معدلات التفاوت، وبذلك فإن التروبوسفير يكون عموماً غير مستقر وجيد الخلط. ويمتد التروبوسفير

إلى أعلى من سطح الأرض حتى ارتفاع يتراوح تقريباً ما بين 10 - 15 كيلومتراً، حسب خط العرض والموسم من السنة. ومن المؤكد أن التروبوسفير مألوف لنا جميعاً، إذا أن هواءه هو الذي نتنفس، أيضاً فإن معظم مناخنا يحدث في طبقة التروبوسفير، بما في ذلك تكون السحب، والمطر، والرياح، وعمليات أرساد جوية أخرى. ويمثل التروبوبوز الحد الأعلى لطبقة التروبوسفير ويفصله عن طبقة الستراتوسفير التي فوقه.



شكل (3-4): تركيب الغلاف الجوي كما هو محدد بواسطة متوسط التباين في درجة الحرارة مع الارتفاع.

إن الطبقة الفاصلة للغلاف الجوي التي تمثل طبقة تحتية هامة عند قاع التروبوسفير، تشكل الحدود المشتركة بين التروبوسفير وسطح الأرض. وفي هذه المنطقة من الغلاف الجوي، فإن أنماط الهواء تتأثر بقوة بتيارات الحمل الحر (Free convection) وقوى القص السطحي (الحمل المدفوع غير الحر). ويكون عادة التدرج الرأسي لدرجة حرارة الهواء وسرعة الرياح، والرطوبة الجوية، والكميات المتداخلة الأخرى في نطاق الأمتار الأولى فوق سطح الأرض كبيرة ومتغيرة مع الزمن، وتعود هذه التدرجات أساساً للتغير المؤقت للطاقة والكتلة (مثلاً، تبخر الماء) بين سطح الأرض والغلاف الجوي. ويختلف عمق الطبقة الفاصلة على امتداد اليوم فعند منتصف الظهيرة، قد يمدد الهواء الصاعد من سطح الأرض الساخن الطبقة الفاصلة حتى ارتفاع يصل كيلومتراً واحداً، ويشار إلى هذا الارتفاع على أنه عمق الخلط أو الطبقة المخلوطة. من ناحية أخرى، فإن كتل الهواء المضطرب التي يشار إليها عادة بالدوامة (eddies)، تتعرض لحركة تيارات دائرية. وخلال الليل، يبرد الغلاف الجوي، وربما تتعرض الطبقة الفاصلة للانكماش لسماك يصل فقط إلى 0.1 كيلومتر تقريباً. إن معظم عمليات نقل وتحول ملوثات الغلاف الجوي تحدث داخل نطاق هذه الطبقة الفاصلة. من ناحية أخرى فإن بعض الغازات المستقرة كيميائياً يتم تشتيتها إلى أعلى خلال معظم طبقة التروبوسفير. إن بعضاً من هذه الغازات مثل N_2O والكلوروفلوروكاربونات (CFCs) قد تنتشر في نهاية الأمر إلى أعلى لتصل طبقة تعرف باسم الطبقة السطحية (surface layer)، وتمتد هذه الطبقة عموماً إلى أعلى لتصل نحو عشر عمق الطبقة الفاصلة. إن خصائص الطبقة السطحية تتأثر بشكل مباشر بخشونة السطح والتبادل الحراري للسطح ويكون سريان

الطاقة والكتلة شبه ثابت مع الارتفاع في الطبقة السطحية؛ وبذلك فإن تحت الطبقة هذه تسمى أحياناً طبقة التدفق أو السريان الثابت (Constant Flux Layer).

6.2.3 الغلاف الجوي الأعلى

يعتبر الستراتوسفير الطبقة (الترتيب الطبقي) المستقرة للغلاف الجوي الممتدة من التروبوبوز باتجاه الأعلى إلى ارتفاع حوالي 50 كيلو متراً (الشكل 3-4). ويكون الستراتوسفير مستقراً جداً لأن درجة حرارة الهواء تزداد مع الارتفاع حتى طبقة الستراتوبوز، التي تمثل قمة انقلاب الحرارة (temperature inversion). إن ارتفاع درجة الحرارة في هذه الطبقة يعود أساساً لامتناس الأشعة فوق البنفسجية بواسطة الأنواع الكيميائية المختلفة، التي تشمل الأوزون والأكسجين الجزيئي اللذين يوجدان في طبقة الستراتوسفير، ويحدث أقصى تسخين في الجزء العلوي من الستراتوسفير. ونظراً لاستقرار الهواء، فإن خلط الملوثات يتم تثبيطه داخل هذه الطبقة، لذلك، فإن المواد الكيميائية الطبيعية (مثل N_2O) والاصطناعية (مثل CFC) التي تصل إلى طبقة الستراتوسفير من طبقة التروبوسفير تميل للانتشار إلى أعلى ببطء شديد داخل الستراتوسفير.

يتكون الأوزون طبيعياً ومن خلال تفاعلات كيمو ضوئية داخل الستراتوسفير، ويعتبر الأوزون ملوث في طبقة التروبوسفير، لكنه في طبقة الستراتوسفير يعتبر ضرورياً للحياة على الأرض لأنه يمتص الأشعة فوق البنفسجية (UV) الضارة بيولوجياً. ويعتبر كل من الميزوسفير والترموسفير طبقتين إضافيتين ضمن الغلاف الجوي فوق طبقة الستراتوسفير، إن هاتين الطبقتين شبه مفصولتين عن طبقة الستراتوسفير وطبقة التروبوسفير التي تحتها؛ لهذا، فإنهما يتسببان في تأثير قليل على مناخنا وكذلك في عمليات نقل الملوثات. وبالمثل فإن التلوث يكون له تأثير قليل أو معدوم تماماً على هاتين الطبقتين العلويتين من الغلاف الجوي.

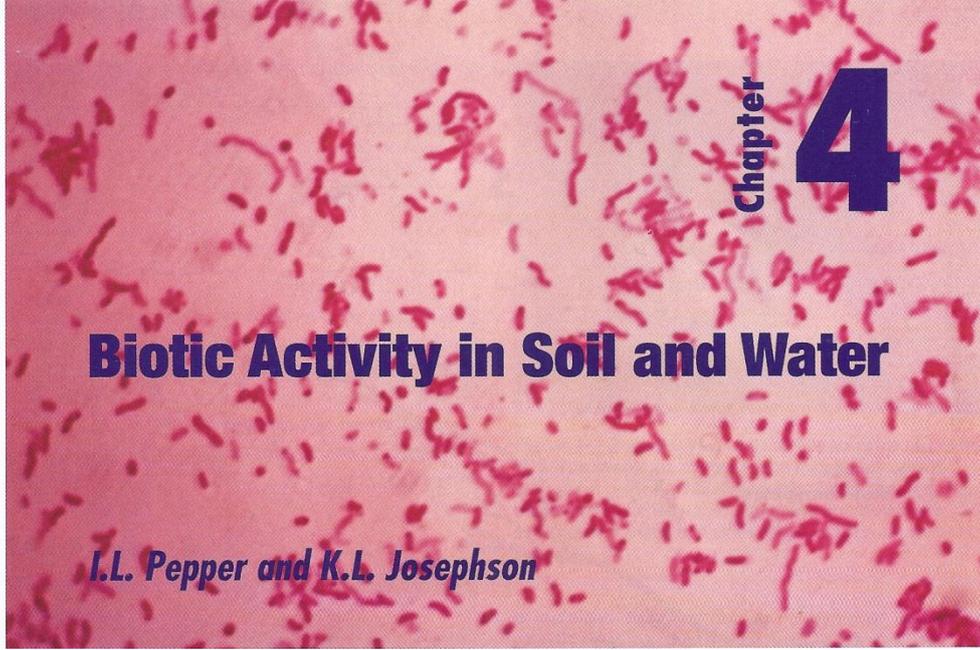
المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Ahrens C.D. (1993) *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. West Publishing Company, Minneapolis/St. Paul, Minnesota.
- Mitchell J.F.B. (1989) The greenhouse effect and climate change. *Reviews of Geophysics*. **27**, 115-139.

أسئلة

1. ما هي غازات البيت الزجاجي الأكثر أهمية؟ كيف تقوم هذه الغازات برفع متوسط درجة حرارة الأرض؟
2. ما الذي يسبب الريح؟ كيف تؤثر الريح على حركة الحرارة، وبخار الماء، والتلوث في الغلاف الجوي؟
3. كيف يمكن للضغط عند سطح الأرض أن يختلف بين مدينة فينيكس ومدينة نيويورك على الرغم من أن كلتا المدينتين تقعان عند مستوى سطح البحر؟
4. صف كيف ولماذا تختلف درجة حرارة الهواء مع زيادة الارتفاع في طبقتي التروبوسفير والستراتوسفير؟
5. لماذا يكون الهواء جيد الخلط في طبقة التروبوسفير ولكن ليس كذلك في طبقة الستراتوسفير؟

الباب الرابع
النشاط الحيوي في التربة والماء



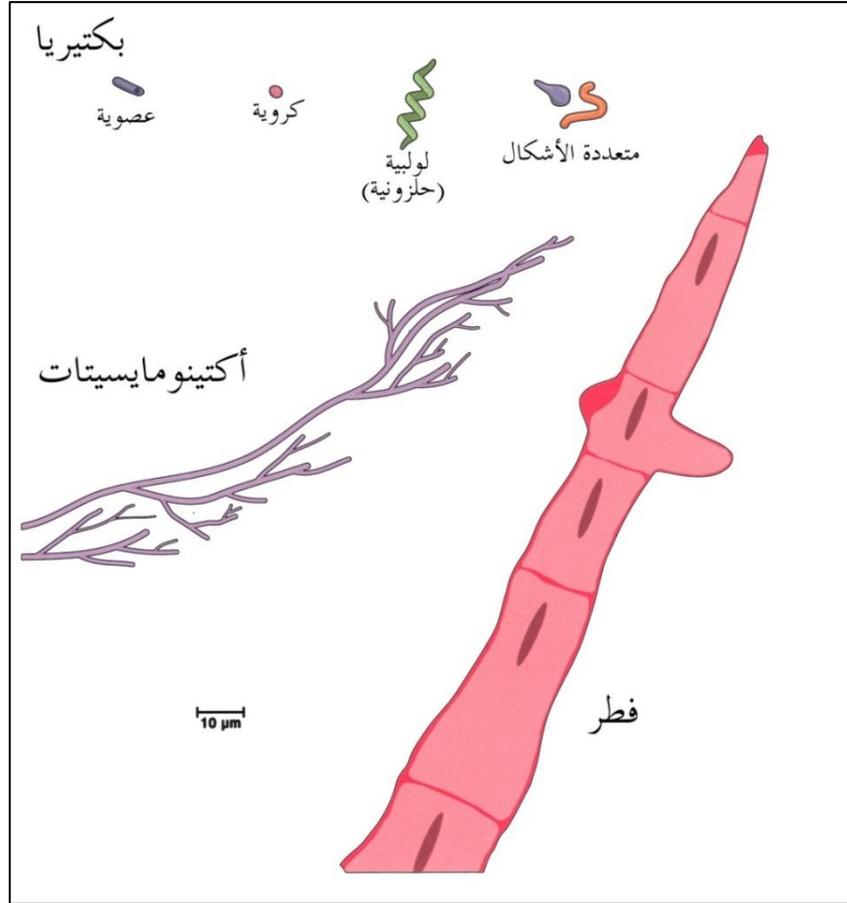
بكتريا عصوية مثل هذه، هي السبب في كثير من التحولات الكيموحيوية في التربة والماء.

1.4 مجموعات الكائنات الرئيسية

تؤثر الخصائص غير الحية للتربة والماء بقوة على التفاعلات الكيميائية في البيئة، ويتم التحكم في التفاعلات الكيموحيوية في التربة والماء بواسطة النشاط الحيوي: وتحديدًا، فإن جميع البيئات تحتوي على كائنات حية تسهل التحولات الكيموحيوية. إن التربة ومنطقة نمو

الجدور (vadose) ليسا استثناءً. فالتربة نفسها تحتوي عادة على بلايين من الكائنات، إضافة لمنطقة نمو الجدور التي تحتوي على أعداد أقل، ولكن تظل معتبرة. وتشمل المجموعات الأساسية في التربة كلاً من الفيروسات، والبكتيريا، والفطريات، والطحالب، والحيوانات الأولية (protozoa) والمفصليات (arthropods). إن لجميع هذه الكائنات متطلبات بيئية ووظيفية محددة، ويسهم كل منها في النشاط البيولوجي الكلي للبيئة. وبشكل خاص تعتبر كل من البكتيريا والفطريات مهمة في التحولات الكيموحيوية (انظر أيضاً الباب 7). ونتيجة لدورها الحيوي في التأثير على مصير وتقليل التأثير السلبي لعدد كبير من الملوثات، فسيتم التركيز على هاتين المجموعتين، بالإضافة إلى قسيم بكتيري كبير يشمل الأكتينومايسيتات التي كثيراً ما تعامل على أنها مجموعة منفصلة من الكائنات نظراً لخصائصها الفريدة. وفي النقاش التالي سيتم إعطاء ملخص عام للبكتيريا والأكتينومايسيتات والفطريات، وتفحص أهميتها من جانب التلوث.

إن أهمية الكائنات الدقيقة بالتربة مبنية على أساس أعدادها وكتلتها الحيوية، كما هو موضح في الجدول (1-4). ويمكن ملاحظة أن أعداداً كبيرة منها يمكن أن تتواجد في التربة. كذلك، فإن هذه المجموعات كثيرة التنوع، وبذلك فإن مجموعات كبيرة من كائنات مختلفة يمكن أن تسهم في عدد لا نهاية له من التحولات الكيموحيوية. ويوضح الشكل (1-4) الأحجام والأشكال المختلفة لهذه الكائنات.



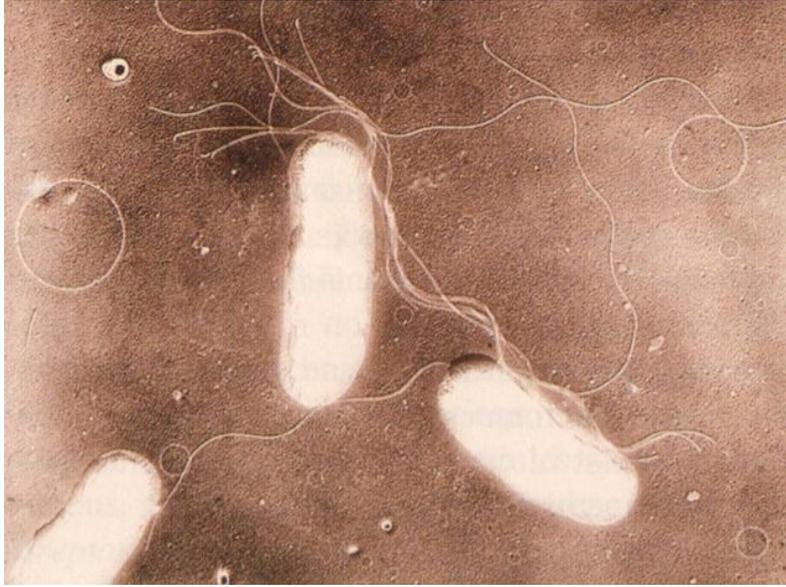
شكل (1-4): الحجم النسبي وشكل وأنواع ممثلة من البكتيريا والأكتينومايسيتات، والفطريات.

جدول (1-4): التقدير النسبي لأعداد الميكروبات في بيئة التربة

الميكروبات	العدد (على أساس جرام واحد من التربة)	الكتلة الحيوية في منطقة نمو الجذور (كجم / هكتار)
البكتيريا	10^8	500
الأكتينومايسيتات	10^7	500
الفطريات	10^6	1500

1.1.4 البكتيريا

تعتبر البكتيريا، وهي الكائنات الأكثر عدداً في التربة أو في أي مكان آخر على الأرض، كائنات بدائية النواة تفتقر لوجود غشاء نووي prokaryotic، وهي تتميز بغلاف خلوي معقد، يحتوي على سيتوبلازم ولكن بدون عضيات خلوية. وتعتبر البكتيريا قادرة على النمو السريع والتكاثر، من خلال الانشطار الثنائي (binary fission). ويحدث التبادل الوراثي بشكل رئيسي من خلال الالتحام أو الاقتران conjugation (وهو تلامس خلية بخلية أخرى) أو التنبيغ (transduction) وهو التبادل عن طريق الفيروسات الملتصقة للبكتيريا، كما يمكن أن يتم ذلك من خلال التحول (transformation) (انتقال جزيئات من DNA).



شكل (4-2): البكتيريا مكون حيوي للكائنات الحية بالتربة. تظهر الصورة العليا باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني رايذوبيوم ميليلوتي (*Rhizobium meliloti*)، وهي بكتيريا متعددة الأسواط. الدوائر عبارة عن أسواط مفصولة أخذت تلقائياً شكلاً دائرياً.

ويتراوح حجم البكتيريا عموماً من 0.1 إلى 2 ميكرومتر. ويمكن أن تكون بكتيريا التربة عضوية الشكل أو كروية أو لولبية أو متعددة الأشكال (انظر الشكلين 1.4 و 2.4).

1.1.1.4 يمكن تصنيف البكتيريا حسب طريقة تغذيتها إلى:

ذاتية التغذية (Autotrophic)

تتحصل بكتيريا التربة ذاتية التغذية بمعناها الضيق على الطاقة من مصادر لا عضوية وعلى الكربون من ثاني أكسيد الكربون. إن هذه الكائنات عموماً لها متطلبات قليلة. وتحصل البكتيريا ذاتية التغذية الكيميائية على الطاقة من أكسدة مواد لا عضوية (من المعادلة T9-4 إلى المعادلة T13-4 والمعادلة T15-4)، بينما تحصل البكتيريا ذاتية الضوئية على الطاقة من عملية البناء الضوئي (المعادلة T7-4).

غير ذاتية التغذية (Heterotrophic)

تتحصل البكتيريا غير ذاتية التغذية على الطاقة والكربون من مواد عضوية، وتحصل البكتيريا غير ذاتية التغذية الكيميائية على الطاقة من عمليات الأكسدة (المعادلة T4-8 والمعادلة T4-14 والمعادلة T4-16). من ناحية أخرى، تحصل البكتيريا غير ذاتية التغذية الضوئية على الطاقة من عملية البناء الضوئي مع ضرورة توفر مادة عضوية مانحة للإلكترونات. ويعرض الشكل (3-4) مستعمرات بكتيريا غير ذاتية التغذية منمأة على وسط غذائي.



شكل (3-4) أنواع من البكتيريا مع بعض من الاكتينومايسيتات تم عزلها من تربة حقل نامية بطبق بترى على وسط غذائي غير متخصص لبكتريا غير ذاتية التغذية.

وتسود في التربة بكتيريا ذاتية التغذية الكيميائية وغير ذاتية التغذية الكيميائية ؛ أما البكتريا الضوئية من النوعين الذاتي وغير الذاتي التغذية فهي محدودة العدد لأن التربة غير منفذة لضوء الشمس.

2.1.1.4 أنواع مستقبلات الإلكترونات

الكائنات الحية الهوائية: تستخدم الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات وتمتلك إنزيمات قادرة على تكسير مجموعة البيروكسيدات (المعادلة T4-8 إلى المعادلة T4-13).

الكائنات الحية اللاهوائية

لا تستخدم هذه الكائنات الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات (المعادلة T4-16). إن الكائنات اللاهوائية بالمعنى المحدود لا تمتلك الإنزيمات المناسبة (Super oxide dismutase أو catalase) وبذلك فهي تتسمم في وجود الأكسجين. ومع أن أنواعاً أخرى من الكائنات اللاهوائية تملك هذه الإنزيمات، إلا أنها تستخدم مستقبلات للإلكترونات غير الأكسجين مثل النترات والكبريتات. وتستطيع الكائنات اللاهوائية الاختيارية (Facultative anaerobes) استخدام الأكسجين أو صور مركبة من الأكسجين كمستقبلات للإلكترونات (كما يلاحظ في المعادلتين T4-14 و T4-15).

3.1.1.4 التصنيف البيئي

يمكن أن تكون البكتيريا المستوطنة بالتربة من نوع autochthonous أو Zymogenous. وتكون عملية الأيض في التربة بالنسبة للنوع الأول بطيئة، حيث تستخدم المادة العضوية في التربة كركيزة غذائية أو مادة تفاعل (Substrate). أما النوع الأخير فهو متأقلم على فترات من الكمون والنمو السريع حسب توفر الركيزة الغذائية عقب إضافة مادة غذائية من جديد أو إضافة مادة محسنة للتربة. أما الكائنات الدقيقة الحية التي تصنف على أنها Allochthonous، وهي كائنات دخيلة على التربة، فإنها تعيش عادة لفترات زمنية

قصيرة. لقد كان سرجى وينوقر ادسكي (1856 - 1953) مؤسس علم ميكروبيولوجيا التربة هو من قدم هذا التصنيف البيئي . لكن هناك نظرية تصنيف أكثر حداثة تقوم على مفهوم اختيار كل من r أو K . فالكائنات المتأقلمة للعيش تحت ظروف تكون فيها الركيزة الغذائية (Substrate) متوفرة بكثرة يشار إليها على أنها مختارة على أساس K .

وتعتبر الكائنات التي تعيش في المنطقة المحيطة بالجذور على الإفرازات الجذورية أمثلة على الكائنات المنتقاة على أساس K ، أما الكائنات التي تصنف على أنها مختارة على أساس r فهي تعيش في بيئات تكون فيها الركيزة الغذائية عاملاً حدياً باستثناء فترات قصيرة تتوفر فيها هذه المواد. وتعتمد الكائنات المختارة على أساس r على معدلات النمو السريع عندما تكون الركيزة الغذائية متوفرة، وهي توجد عادة في بيئات غير مزدحمة. وبالمقابل، فإن الكائنات المختارة على أساس K توجد في بيئات مزدحمة وهي تتميز بمقدرة تنافسية عالية.

4.1.1.4 البكتريا السائدة بالتربة

الارثوباكتر (Arthrobacter)

تعتبر البكتيريا الأكثر عدداً في التربة، وذلك حسب طرق التقدير العددي (plating procedures) ويمثل هذا النوع من البكتيريا ما يصل إلى 40% من أعداد بكتيريا التربة التي يمكن استنباتها. إن هذه الكائنات التي تصنف على أنها Autochthonous تكون متعددة الأشكال pleomorphic وتعطى تفاعلاً متبايناً مع صبغة جرام (Gram-variable). فالخلايا الحديثة تكون في شكل عصوي وسالبة لصبغة جرام (Gram- negative)، ثم تصبح لاحقاً كروية الشكل وموجبة لصبغة جرام (Gram – positive).

الستريبتومايسز

هذه الكائنات هي في الحقيقة أكتينومايسيتات (سيتم مناقشتها لاحقاً)، ويمكن أن تشكل 5-20% من أعداد البكتيريا في التربة، وهي كائنات موجبة لصبغة جرام وغير ذاتية التغذية-الكيميائية، وتنتج هذه الكائنات مضادات حيوية، بما في ذلك الستريبتومايسين (أكتشف بواسطة سلمان واكسمان، الذي منح جائزة نوبل في الطب عام 1942).

السودوموناس (Pseudomonas)

كائنات سالبة لصبغة جرام، تعرف أيضاً باسم السودومونودات (pseudomonads)، هي واسعة الانتشار ومتنوعة في الطبيعة. وهي عموماً هوائية وغير ذاتية التغذية، لكن بعضها ذاتية تغذية اختيارية. وكمجموعة تملك أنظمة مختلفة كثيرة من الانزيمات وهي قادرة على تحليل أنواع واسعة من المركبات العضوية، بما في ذلك المركبات غير قابلة للتحلل الحيوي أو المحللة بصعوبة Recalcitrant، ويمكن أن تمثل هذه الكائنات ما بين 10-20% من أعداد البكتيريا في التربة.

الباسيللس (Bacillus)

توجد بنفس أعداد السودوموناس تقريباً، وهي تتميز بأنها هوائية، موجبة لصبغة جرام تنتج جراثيم متحوصلة الخلية (endospores). إن هذا الجنس غير ذاتي التغذية ومتنوع، وتمثل الباسيللس عادة نحو 10% من تعداد البكتيريا في التربة.

5.1.1.4 التوزيع والوظيفة

تعتبر البكتيريا أكثر كائنات التربة عدداً، وبكتلة حيوية تصل إلى 500 كجم/هكتار

لعمق منطقة نمو الجذور. وعموماً فإن البكتيريا الهوائية أكثر انتشاراً من اللاهوائية، وخاصة في الأفق A (انظر الجزء 2.2.2). ومع التعمق أكثر في التربة، فإن أعداد البكتيريا اللاهوائية يزداد نسبة إلى الهوائية.

وتتشارك البكتيريا بقوة في جميع التحولات البيوكيميائية بالتربة وذلك في معظم الأحوال، بما في ذلك عمليات التحلل لكل من المواد العضوية وغير العضوية. إن أهمية بكتيريا التربة في مصير وتقليل التأثير السلبي للملوثات ليست أمراً مبالغاً فيه. ونظراً لكثرة البكتيريا وتنوعها، إضافة لسرعة معدلات نموها وتأقلمها، فإن لها قدرة لا محدودة تقريباً لتحليل معظم المواد الطبيعية وكثير من المواد الغريبة (xenobiotics)، وسيتم بالتفصيل فحص تأثير البكتيريا على الفضلات وتقليل التأثير السلبي للملوثات وذلك في الأبواب التالية من هذا الكتاب.

2.1.4 الأكتينومايسيتات (Actinomycetes)

هذه كائنات حية تصنف على أنها بكتيريا لكنها فريدة بدرجة كافية لتناولها كمجموعة بمفردها فهي تملك بعض الخصائص المشتركة مع البكتريا، لكنها مشابهة أيضاً في بعض الجوانب للفطريات، في أغلب فترات حياتها تعيش ككائنات هوائية غير ذاتية التغذية كيميائية تتكون من خلايا وحيدة متطاولة، وتظهر ميلا للتفرع إلى خيوط، أو هايفات hyphae، تشبه خيوط الفطريات، وتشبه هذه الهايفات في المظهر تلك الخاصة بالفطريات لكنها ذات أقطار أصغر (حوالي 0.5-2 ميكرومتر)، و غالباً ما تصل إجمالي عدد الأكتينومايسيتات في جرام واحد من التربة نحو (10⁷). وعموماً، فإن تعداد الأكتينومييسيتات

يقبل مرة أو مرتين عن عدد البكتريا الأخرى بالتربة.

وتعرف هذه الكائنات بأنها تتكاثر جنسياً لكنها جميعاً تنتج أبواغاً غير جنسية تسمى أبواغ كونيديية، ويسود جنس الستريتيومييسز أعداد الأكتينومايسيتات، وقد تمثل هذه الكائنات الموجبة لصبغة جرام 90% من إجمالي عدد الأكتينومايسيتات.

1.2.1.4 أوجه شبه الأكتينومايسيتات مع البكتريا والفطريات

مثل جميع أنواع البكتيريا، فإن الأكتينومايسيتات كائنات بدائية النواة (prokaryotic). إضافة لذلك، فإن محتوى البكتيريا والأكتينومايسيتات من الأدينين - ثايمين (adenine-thymine) والجوانين - سايتوسين (guanine-cytosine) متشابهة، وهو ما ينطبق أيضاً على مكونات الجدار الخلوي لكلا النوعين من الكائنات. أيضاً فإن حجم خيوط الأكتينومايسيتات هو مماثل لحجم الخلايا البكتيرية. من ناحية أخرى، فإن الأكتينومايسيتات مثل الفطريات تظهر تفرعاً خيطياً كثيفاً، وكلا النوعين من الكائنات تكون غزلاً فطرياً هوائياً وأبواغاً وكونيديية. إضافة لذلك، فإن نمو الأكتينومايسيتات في البيئات السائلة تميل لإنتاج كتل أو كريات تشبه النموات الفطرية بدلاً عن التعكر الذي ينتج بواسطة البكتيريا. وأخيراً، فإن معدل النمو في حالة الفطريات والأكتينومايسيتات ليست أسية مثلما هو في حالة البكتيريا، بل تكعيبية.

2.2.1.4 التوزيع والوظيفة

يمكن للأكتينومايسيتات أن تحلل أنواعاً مختلفة من المواد العضوية، بما في ذلك مركبات عضوية التي عادة لا تتحلل، مثل الفينولات والسيترويدات. وتعتبر المعادلة (13)-

(T4). مثالا لتحلل السيانيد بواسطة الستربتومايسز. كما أنها مهمة أيضاً في تحلل المركبات المتباينة الحلقات مثل مركبات النيتروجين المعقدة والبيراميدين. وكثيراً ما تكون نواتج التحلل لعملياتها الأيضية مركبات عطرية، وهي مركبات مهمة في تكوين مواد هيومية ودبال التربة. إن الرائحة الترابية المصاحبة لمعظم الترب هي نتيجة لمادة الجيوسمين (geosmin)، وهو مركب تنتجه الأكتينومايسيتات.

وتشكل الأكتينومايسيتات 10% من التعداد الكلي للبكتيريا، وكتلة حيوية تصل إلى نحو 500 كجم/هكتار لعمق منطقة نمو الجذور. وتعتبر هذه الكائنات أكثر تحملاً للترب القاعدية ($pH > 7.5$) ولكنها أقل تحملاً للترب الحمضية ($pH < 5.5$)، أيضاً فإن الأكتينومايسيتات أكثر تحملاً للمحتوى الرطوبي المنخفض مقارنة بأنواع البكتيريا الأخرى. ونظراً لذلك، إضافة لتحملها للترب القاعدية، فإن أعداد الأكتينومايسيتات تميل لأن تكون أعلى في ترب الصحراء، مثل جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية.

يوجد كثير من الأكتينومايسيتات التي تتفاعل مع النباتات في علاقات تكافلية ومرضية. فمثلاً، الجنس *Frankia* يكون عقداً جذرية مع النباتات غير البقولية المثبتة للنيتروجين، بينما النوع، *Streptomyces scabies* يعتبر عاملاً مسبباً لمرض جرب البطاطس. من جهة أخرى، فإن كثيراً من أنواع الستربتومايسز تنتج مضادات حيوية تضم الستربتومايسين، والكلورامفينيكول، والتيتراسايكلين والسايكلوهيكساميد، إن هذه المركبات يمكن أن تكون مهمة في التحكم في كائنات التربة الحية الأخرى.

3.1.4 الفطريات

الفطريات هي المجموعة الثالثة الرئيسية من الكائنات الحية بالتربة، لكنها تختلف عن البكتريا واللاكتينومايسيتات في أنها حقيقية النواة eukaryotic. ويشار إلى الكائنات الفطرية بالأسلوب العامي على أنها أعفان (mildews) أو أصداء، أو خمائر، أو عيش الغراب (mushroom). وتعتبر الفطريات جميعاً غير ذاتية التغذية، وأغلبها هوائية باستثناء فطريات الخمائر، التي هي كائنات مخمرة. وعلى الرغم من أن الفطريات من حقيقيات النواة eukaryotic، فإنها لا تحتوي على كلوروفيل؛ ولذلك فإنها لا تقوم بعملية البناء الضوئي. ومن بين الفطريات في التربة، تعتبر الفطريات الخيطية الأكثر فعالية في تحلل المواد العضوية ومن ثم في تقليل التأثير السلبي للتلوث، وتتميز هذه الفطريات بالفرع الكثيف والنمو الغزير للغزل الفطري، إضافة لإنتاج أبواغ جنسية ولاجنسية، فمن المعروف أن الفطريات الكيسية (Ascomycetes) والبازيدية (Basidiomycetes) تنتج أبواغاً جنسية في أجسام ثمرية متخصصة. كما أن الفطريات الناقصة (Deuteromycetes) هي أيضاً فطريات معقدة، لكن التكاثر الجنسي فيها غير معروف. كما تعرف الفطريات الناقصة بأنها فطريات غير كاملة (Fungi imperfecti) لأنها تفتقر إلى التكاثر الجنسي، لكن المراحل الجنسية كثيراً ما تكتشف في وقت لاحق، وفي هذه الحالة فإن الأمر يستوجب أن يعاد تصنيف الكائن ضمن مراتب تصنيفية معروفة. ومن أهم الأجناس الفطرية السائدة بالتربة كل من *Penicillium* و *Aspergillus* و *Rhizoctonia* و *Fusarium* و *Alternaria* و *Rhizopus*.

جدول (2-4) خصائص البكتيريا والاكثينومايسيتات والفطريات

الخاصية	البكتيريا	الأكثينومايسيتات	الفطريات
العدد	الأكثر عدداً	متوسط	الأقل عدداً
الكتلة الحيوية	البكتيريا والاكثينومايسيتات لها نفس الكتلة الحيوية		الأكثر كتلة حيوية
درجة التفرع	بسيط	خيطية، لكن بعضها تنقسم إلى خلايا فردية	في صور خيطية كثيفة
غزل فطري هوائي	لا يوجد	يوجد	يوجد
النمو في بيئة سائلة	نعم - تعكز	نعم - كريات	نعم - كريات
معدل النمو	أسي	تكعيبي	تكعيبي
جدار الخلية		Murein, teichoic acid, and lipopolysaccharide	كايتين (chitin) أو سيلولوز
أجسام ثمرية معقدة	لا توجد	بسيطة	معقدة
التنافسية على المواد العضوية البسيطة	الأكثر تنافسية	الأقل تنافسية	متوسطة العضوية البسيطة
تثبيت N	نعم	نعم	لا
الحاجة للهواء	هوائية، لاهوائية	غالباً هوائية	هوائية باستثناء الخميرة
الجهد الرطوبي	الأقل تحملاً	متوسطة	الأعلى تحملاً
الرقم الهيدروجيني (pH) المثالي	6 - 8	6 - 8	6 - 8
الرقم الهيدروجيني التنافسي	6 - 8	أكثر من 8	أقل من 5
التنافسية في التربة	جميع الترب	تسود في الترب الجافة عالية الرقم الهيدروجيني	تسود في الترب منخفضة الرقم الهيدروجيني

1.3.1.4 التوزيع والوظيفة

كما هو مقاس بواسطة العد في الأطباق، فإن تعداد الفطريات في الجرام الواحد من التربة يقع في حدود (10)⁶ على الرغم من أن هذه التقديرات منحازة في اتجاه الأنواع التي تتكاثر بالأبواغ (sporulating species)، ويبلغ قطر الخيط الفطري ما بين 10-50 ميكرومتر، إن هذا الحجم، الذي يسمح بتمييز الفطريات ظاهرياً عن الاكثينومايسيتات

الأصغر حجماً، ينتج عنه كتلة حيوية تصل إلى 1500 كجم/ هكتار، وبذلك فإن الكتلة الحيوية للفطريات أكبر من تلك الخاصة بالبكتيريا والأكتينومايسيتات، على الرغم من أنها عددياً أقل تواجد في معظم الترب.

إن الفطريات ذات علاقة وثيقة بتحليل المواد العضوية بالتربة. وكمجموعة، فإنها تحتوي على أنواع مختلفة جداً من الأنظمة الأنزيمية وهي بذلك تنافس الكائنات الأخرى من أجل السكريات البسيطة، الأحماض العضوية، والمركبات المعقدة مثل السيلولوز أو اللجنين. وإضافة لذلك، فإن الفطريات مهمة جداً في التحكم في المصير النهائي للملوثات العضوية التي تضاف للتربة. من جهة أخرى، فإن الفطريات غير مرتبطة بشكل مباشر في تحديد مصير الملوثات غير العضوية. ونظراً لأن الفطريات أكثر تحملاً للترب الحمضية ($pH < 5.5$) مقارنة بالبكتيريا أو الأكتينومايسيتات، فإنه يتوقع أن تكون ذات علاقة وثيقة جداً بتحليل المواد العضوية بالترب الحمضية (لاحظ أن الرقم الهيدروجيني المثالي لمعظم الفطريات يقع فعلاً ما بين 6 و8 وذلك في المزارع الفطرية النقية (كما هو موضح في الجدول 4-2). أما في الترب فإن الفطريات أكثر قدرة على التنافس من الكائنات الحية الأخرى وذلك في الترب ذات الرقم الهيدروجيني المنخفض ومثل الأكتينومايسيتات الخيطية، فإن الفطريات أيضاً تتحمل انخفاض رطوبة التربة.

تعمل الفطريات ارتباطات مرضية مع النباتات كما هو الحال في أنواع الفيوزاريوم (*Fusarium spp.*) على سبيل المثال، كما أن لها ارتباطات مفيدة مع أغلب النباتات من خلال الفطريات الجذرية (*mycorrhizal fungi*)، كذلك فإن الفطريات يمكن أن تنتج

مضادات حيوية مفيدة للإنسان، مثل البنيسيلين، الذي اكتشف بواسطة ألكسندر فلمنج (1881-1955). من ناحية أخرى، فإن الفطريات قادرة على التسبب في أمراض، وأن الأمراض التي تسببها قد يكون من الصعب معالجتها، (ونظراً لأن الفطريات والأنسان من حقيقيات النواة (eukaryotic) فإن الأيض في الفطريات يشبه عمليات الاستقلاب في الإنسان. وبذلك، فإنه يصعب استئصال الفطر عندما يتخذ من الإنسان عائلًا). فمثلاً يتسبب الجنس *Coccidioides* في المرض الرئوي المزمن المعروف بحمى الوادي في صحارى جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية.

يمكن أن ننظر إلى الكائنات الحية بالتربة إجمالاً ككيان بيولوجي واسع تعيش أجزاءه في انسجام وتوافق، وبقدرات متنوعة لتحليل جميع المواد العضوية الطبيعية وكثير من المواد الغريبة الدخيلة (Xenobiotics). في الجدول (4-2) حيث تمت مقارنة خصائص كل من البكتيريا والاكثينومايسيتات والفطريات، يمكن لنا أن نرى كيف تعمل مكونات هذا الكيان مع بعضها بشكل جيد.

نظرية تطبيقية: التوليد البيولوجي للطاقة

يتطلب النشاط الحيوي طاقة، وجميع الكائنات الحية الدقيقة تولد طاقة، ويتم لاحقاً تخزين هذه الطاقة في صورة مركب ادنيوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، الذي يمكن استثماره في النمو والعمليات الأيضية حسب الحاجة استناداً إلى القانون الثاني للترموديناميكا:

القانون الثاني للترموديناميكا

في أي تفاعل كيميائي معين، يستخدم جزء فقط من الطاقة للقيام بالتفاعل أما

الباقي من الطاقة فيفقد في صورة أنتروبيا.

طاقة جيبس Gibbs الحرة (ΔG) هي عبارة عن كمية الطاقة المتاحة لإتمام التفاعل لأي تفاعل كيميائي. فبالنسبة للتفاعل $D + C \rightleftharpoons B + A$ يُحدد ثابت الاتزان الترموديناميكي كالتالي:

$$K_{eq} = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad (1-T4)$$

الحالة (1): إذا كانت الأفضلية لنواتج التفاعل:

أي أنه، إذا كان:

$$[C][D] > [A][B] \quad (2-T4)$$

فإن $K_{eq} > 1$ وأن $\ln K_{eq}$ يكون موجباً. مثلاً، إذا كان:

$K_{eq} = 2.0$ ، فإن:

$$\ln K_{eq} = 0.69 \quad (3-T4)$$

الحالة (2): إذا لم تكن الأفضلية لنواتج التفاعل:

$$[C][D] < [A][B] \quad (4-T4)$$

فإن $K_{eq} < 1$ وأن قيمة K_{eq} تكون سالبة.

فمثلاً، إذا كان:

$K_{eq} = 0.20$ فإن:

$$\ln K_{eq} = -1.61 \quad (5-T4)$$

إن العلاقة بين معامل الاتزان (K_{eq}) والطاقة الحرة (ΔG) تمثلها المعادلة:

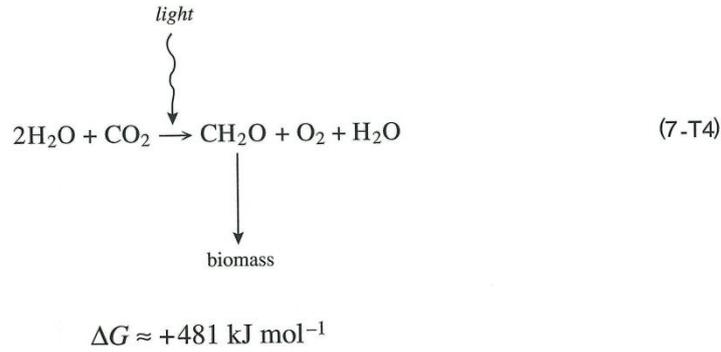
$$\Delta G = -RT \ln K_{eq} \quad (6-T4)$$

حيث أن R = الثابت العام للغازات، وأن T = درجة الحرارة المطلقة (K).
ويوضح الجدول التالي تأثير طاقة جيبس Gibbs الحرة على تلقائية تفاعل كيميائي ما والطاقة المتحررة الناتجة.

حالة الطاقة في التفاعل	$\ln K_{eq}$	K_{eq}	ΔG
تنطلق طاقة، التفاعل يمضي تلقائياً	موجبة	$K_{eq} > 1$ تلقائياً	سالبة
يجب بذل طاقة لحد التفاعل	سالبة	$< K_{eq} < 10$	موجبة

وبذلك، يمكن استخدام القيمة ΔG لأي تفاعل كيموحيوي تدخل فيه ميكروبات لتحديد فيما إذا كان هناك طاقة متحررة للقيام بعمل، وكمية الطاقة المتحررة. يمكن لكائنات التربة أن تولد طاقة عن طريق عدة آليات يمكن تقسيمها إلى مجموعتين أساسيتين:

1. البناء الضوئي (Photosynthesis):

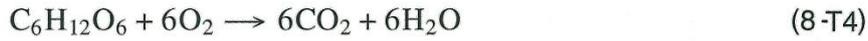


في هذا التفاعل يكون توفر الطاقة بواسطة الشمس ضرورياً، يتم فيما بعد استخدام الكربون العضوي المثبت لتوليد الطاقة من خلال التنفس. من أمثلة كائنات التربة الحية التي تقوم بعملية البناء الضوئي كل من الوردوسبيريلوم (*Rhodospirillum*)، والكروماتيوم (*Chromatium*) والكلوريوم (*Chlorobium*).

2. التنفس *Respiration*

(أ) تنفس هوائي، غير ذاتية التغذية:

توجد كائنات تربة كثيرة تسلك التنفس فيها هوائي وغير ذاتية التغذية، مثلاً، البسيدومونس (*Pseudomonas*) والباسيلس (*Bacillus*).



$$\Delta G = -2870 \text{ kJ mol}^{-1}$$

(ب) تنفس هوائي، ذاتية التغذية:

تُعرف التفاعلات التي تقوم بها النيتروزوموناس (*Nitrosomonas*) معادلة (9- T4) والنيتروباكت (*Nitrobacter*) معادلة (10 - T4) بالنترنة (*Nitrification*).



$$\Delta G = -280 \text{ kJ mol}^{-1}$$



$$\Delta G = -73.2 \text{ kJ mol}^{-1}$$

التفاعلات التالية اللذان تقوم بهما كل من *Beggiatoa* (المعادلة 11 - T4) والثايوباسيللس

(*Thiobacillus thiooxidans*) معادلة (T4-12) مثالان على أكسدة الكبريت:



$$\Delta G = -350 \text{ kJ mol}^{-1}$$



$$\Delta G = -992 \text{ kJ mol}^{-1}$$

التفاعل التالي يتعلق بتحليل السيانيد بواسطة الستربتومايسز:



$$\Delta G = -230 \text{ kJ mol}^{-1}$$

إن جميع التفاعلات السابقة توضح كيفية قيام كائنات التربة بتسهيل تفاعلات قد تسبب تلوثاً أو تقلل من حدوثه. على سبيل المثال يمكن أن يؤدي تفاعل النترة وأكسدة الكبريت إلى تكوين ملوثات معينة هي النترات وحمض الكبريتيك، بينما يكون تحلل السيانيد كما هو واضح مفيداً فيما يخص التخفيف من التلوث.

(ج) تنفس لا هوائي - اختياري، غير ذاتية التغذية:

تعتبر بكتريا البسيودوموناس دي نايترى فيكانس (*Pseudomonas denitrificans*) قادرة على القيام بهذا النوع من الأيض عن طريق استخدام النترات كمستقبل نهائي للإلكترونات بدلاً عن الأكسجين. لاحظ أن هذه البكتيريا يمكن أن تستخدم الأكسجين كمستقبل

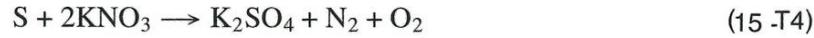
نهائي للإليكترونات في حالة توفره، وأن التنفس الهوائي أكثر كفاءة من التنفس اللاهوائي.



$$\Delta G = -150 \text{ kJ mol}^{-1}$$

(د) تنفس لاهوائي-اختياري، ذاتية التغذية: ثايوباسيللس دي نايتريفكانس

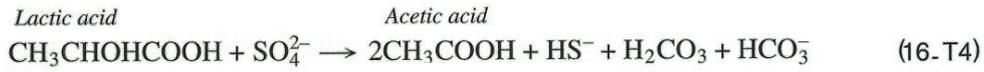
:(*Thiobacillus denitrificans*)



$$\Delta G = -280 \text{ kJ mol}^{-1}$$

يُعرف التفاعل في المعادلة T4-14 والتفاعل T4-15 بالدنترة (denitrification).

(هـ) تنفس لا هوائي، غير ذاتية التغذية: دي سلفوفبريو (*Desulfovibrio*):



$$\Delta G = -170 \text{ kJ mol}^{-1}$$

كما تدخل كائنات التربة في التخمر، وهي أيضاً عملية لاهوائية، لكن التخمر لا يعتبر واسع الانتشار في التربة. وبشكل عام توجد طرق كثيرة تستطيع كائنات التربة من خلالها توليد طاقة، وتوضح الآليات السابقة تنوع كائنات التربة وتبين مدى قدرتها على تفتيت أو تحويل أي مادة طبيعية تقريباً. بالإضافة لذلك، نشأت أنظمة أنزيمية لتحليل الجزيئات المعقدة، سواء كانت عضوية أو غير عضوية، إن هذه الإنزيمات يمكن أيضاً أن تستخدم لتحليل مواد حيوية غريبة (Xenobiotics) لها نفس التركيب الكيميائي. إن المواد الحيوية غير الطبيعية الغريبة التي لا تتحلل بسهولة في التربة، تكون عادة مختلفة كيميائياً عن

أي مادة طبيعية معروفة. لذلك فإن كائنات التربة لم تطور أنظمة إنزيمية قادرة على تحليل مثل هذه المركبات. وتوجد عوامل كثيرة تؤثر على تفتيت وتحلل المركبات الكيميائية، إن هذه العوامل سيتم تناولها في الباب (7).

2.4 عوامل التربة التي تؤثر على نمو ونشاط ميكروبات التربة

في الباب الثاني تمت مناقشة الخصائص غير الحية للتربة. وضمن هذا الإطار، يمكن النظر إلى هذه البيئة من زاوية ميكروبيولوجيا التربة لغرض فهم العوامل التي تحد من النشاط الميكروبي.

1.2.4 الإجهاد الحيوي

حيث أن ميكروبات التربة المتوطنة تتنافس مع بعضها البعض، فإن وجود أعداد كبيرة من الكائنات الحية ينتج عنه عوامل إجهاد حيوي. ويمكن أن يكون التنافس من أجل المواد الغذائية، أو الماء أو عوامل النمو، إضافة لذلك يمكن للميكروبات إفراز مواد مثبطة أو سامة بما في ذلك المضادات الحيوية التي تسبب ضرراً للكائنات المجاورة. وأخيراً، فإن كائنات حية كثيرة تكون مفترسة أو متطفلة على ميكروبات مجاورة. فمثلاً، الملتهمات الفيروسية phages تصيب كلا من البكتريا والفطريات. ونظراً للإجهاد الحيوي، فإن الكائنات الحية غير المتوطنة التي يتم إدخالها لبيئة تربة ما كثيراً ما تعيش لفترات قصيرة من الوقت (من أيام إلى بضعة أسابيع).

إن هذا التأثير له نتائج هامة بالنسبة للكائنات الممرضة (الباب 19) والكائنات الأخرى التي يتم إدخالها بهدف تحفيز التحلل البيولوجي (الجزء 5.1.4.11) وهذه العملية

التي تتمثل في إضافة كائنات حية للمساعدة في التحلل الحيوي تسمى التحسين البيولوجي (bioaugmentation).

2.2.4 الإجهاد غير الحيوي

1.2.2.4 الضوء

التربة غير منفذة للضوء، بمعنى أي ضوء لا يخترق أكثر من بضعة (سنتمترات) من سطح التربة. لذلك فإن الكائنات غير ذاتية التغذية الضوئية تكون مقتصرة على بضعة سنتمترات من التربة العلوية. من ناحية أخرى فإن المؤشرات الفيزيائية عند سطح التربة مثل درجة الحرارة والرطوبة تتذبذب بدرجة كبيرة خلال اليوم الواحد وكذلك موسمياً، ومن ثم فإن معظم الترب تميل إلى توفير بيئة قاسية للكائنات التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي. إن بعضاً من الكائنات غير ذاتية التغذية الضوئية بما في ذلك الطحالب تملك القدرة على التغيير إلى نظام تغذية متعدد في حالة غياب الضوء، إن مثل هذه الكائنات يمكن أن توجد على أعماق كبيرة داخل التربة. وتكون هذه الكائنات عادة غير قادرة على التنافس على مواد عضوية أولية مع كائنات أخرى متوطنة غير ذاتية التغذية.

2.2.2.4 رطوبة التربة

في العادة، فإن محتوى التربة من الرطوبة يتغير بشكل ملحوظ في أي تربة، وعلى كائنات التربة أن تتأقلم على مدى واسع للمحتوى الرطوبي بالتربة (انظر الجزء 2.4.2 للتعرف على المزيد من المعلومات حول المحتوى الرطوبي للتربة وكيف ترتبط بتيسر الماء). وتعتمد تهوية التربة على رطوبتها؛ فالتربة المشبعة بالماء تميل إلى أن تكون لاهوائية، بينما

تكون الترب الجافة عادة هوائية، لكن التربة بيئة غير متجانسة، فحتى الترب المشبعة بالماء تحتوى على جيوب لنظام هوائي، وأن الترب الجافة تضم مواقع دقيقة لا هوائية توجد في مراكز تجمعات ثانوية (Secondary aggregates). وعلى الرغم من أن البكتريا هي الأقل تحملاً للمحتوى المنخفض من رطوبة التربة، إلا أنها كمجموعة الأكثر مرونة بخصوص تهوية التربة، إذ أنها تضم بكتريا هوائية واختيارية لاهوائية بينما الأكتينومايسيتات والفطريات تكون غالباً هوائية.

3.2.2.4 درجة حرارة التربة

تتباين درجة حرارة التربة كثيراً، وخاصة قرب سطح التربة. إن معظم أنواع الكائنات الحية في التربة تكون مقاومة للتذبذبات الواسعة في درجات الحرارة على الرغم من أن كائنات التربة يمكن أن تكون متحملة أو مفضلة للبرد (psychrophilic)، أو محبة لدرجات الحرارة المتوسطة (mesophilic) أو محبة لدرجات الحرارة المرتفعة (thermophilic) حسب الموقع الجغرافي للتربة. إن معظم الكائنات الحية بالتربة هي من المحبة لدرجات الحرارة المتوسطة نظراً للتأثير المنظم (Buffering) للتربة على درجة الحرارة، وخاصة عند الأعماق التحتية من قطاع التربة.

4.2.2.4 درجة تفاعل التربة

الترب التي لم تتعرض لعمليات زراعية يكون لها عادة أرقام هيدروجينية مستقرة في نطاق 6-8، ويكون لمعظم كائنات التربة رقم هيدروجيني مثالي في نفس النطاق، ولكن هناك بالطبع استثناءات لهذه القاعدة كما هو الحال بالنسبة لبكتيريا الثيوباسيلس ثايوأوكسيدانز،

وهو الكائن الذى يقوم بأكسدة الكبريت إلى حمض كبريتيك وله رقم هيدروجيني مثالي من 2 إلى 3. ويمكن أيضاً أن تحدث نتيجة اختلاف المواقع الدقيقة تفاوتات في الرقم الهيدروجيني للتربة بسبب تحلل موضعي لمخلفات مادة عضوية إلى أحماض عضوية وهنا مرة ثانية، يلاحظ أن التربة تتصرف كبيئة غير متجانسة وغير متصلة، مما يسمح لكائنات حية ذات أرقام هيدروجينية مثالية مختلفة لتعايش معاً في مواقع متقاربة جداً.

وطبيعياً، فإن كائنات التربة لا تتأثر سلباً بالرقم الهيدروجيني إلا إذا تعرضت لتغيرات حادة ويمكن للتغيرات الحادة أن تحدث، مثلاً عندما يضاف جير زراعي للتربة لرفع الرقم الهيدروجيني أو عندما يضاف الكبريت من أجل تخفيضه.

5.2.2.4 قوام التربة

تكاد تحتوي جميع الترب تقريباً على مجاميع من الكائنات الحية بغض النظر عن قوام التربة (أنظر الجزء 3.2.2). وحتى الترب التي يكون قوامها متطرفاً، مثل الرمل الصافي أو الطين، تحتوي على عشائر من الميكروبات، وإن كانت بأعداد أقل مما في الترب الأقل تطرفاً في قوامها. إن معظم العناصر المغذية تكون مصاحبة لحبيبات الطين والسلت، التي تشد بكفاءة أيضاً برطوبة التربة. وعلى ذلك فإن الترب التي تحتوي على الأقل على بعض من حبيبات السلت أو الطين توفر بيئة أفضل للكائنات الحية من الترب التي لا توجد فيها هذه المكونات.

6.2.2.4 كربون ونيروجين التربة

الكربون والنيتروجين عنصران مغذيان يوجدان في الترب. وحيث أن هذين العنصرين

يوجدان بتركيزات منخفضة فإن، نمو ونشاط الكائنات الحية بالتربة محدود. في واقع الأمر فإن كثيراً من الكائنات توجد في التربة تحت ظروف غذائية محدودة وهي بذلك تلجأ إلى الكمون، وبدون إضافة مواد غذائية أولية أو محسنات، فإن الكائنات الحية عموماً تقوم بعملها الأيضية بمعدلات منخفضة. إن الاستثناء الرئيسي لهذه القاعدة هي المنطقة المحيطة بالجذور (rhizosphere) حيث تحافظ الإفرازات الجذرية على مستوى عالٍ من الكائنات الحية. وفي معظم الأحوال، يتم استخدام جميع مغذيات التربة المتيسرة على الفور. ويمثل دبال التربة مصدراً للمغذيات العضوية التي تتعدن ببطء بواسطة الكائنات المتوطنة بالتربة (autochthonous). وبالكيفية نفسها، فإن مجاميع ميكروبية تستطيع الاستفادة من المواد الحيوية غير الطبيعية (xenobiotics) كمادة أولية، على الرغم من أن معدل التحلل يكون أحياناً بطيئاً جداً. وهذه هي الآلية الأساسية للتحلل الحيوي (انظر الجزء 2.7).

7.2.2.4 جهد الأكسدة والاختزال بالتربة

جهد الأكسدة-الاختزال (Eh) قياس لميل بيئة معينة لأكسدة أو اختزال مادة أولية. بمعنى، أنه يمكن اعتباره مدى تيسر مستقبلات الكاتيونات نهائية مختلفة تكون ضرورية لكائنات حية معينة. أن مستقبلات الإلكترونات هذه توجد فقط عند جهود أكسدة - اختزال محددة، تقاس بالمللي فولت (mV). إن تربة جيدة التهوية، تمثل بيئة مؤكسدة، لها جهد أكسدة - اختزال أو Eh يساوي (+800) مللي فولت.

بينما في حالة تربة لا هوائية، تمثل بيئة مختزلة، فإن قيمة Eh يساوي (0) إلى (-300) مللي فولت. ويوجد الأكسجين في الترب عند جهد أكسدة - اختزال يساوي نحو

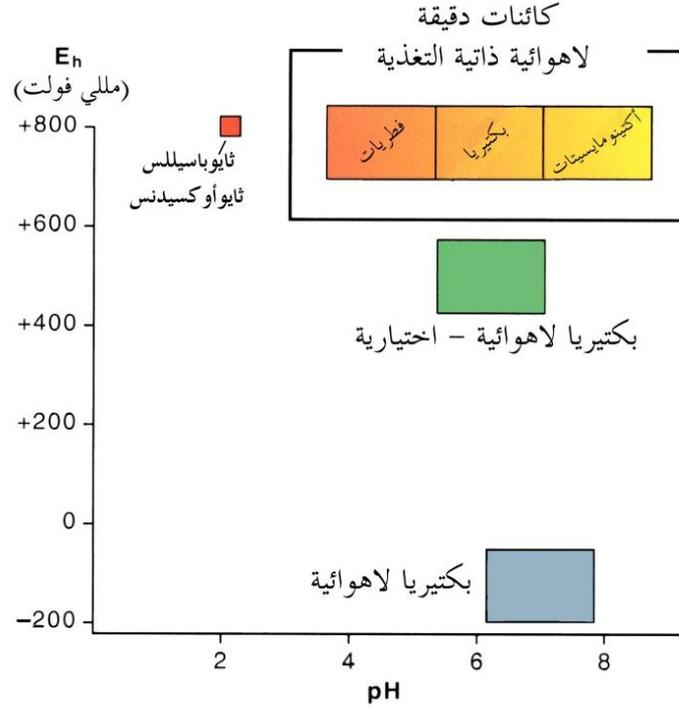
(+ 800) مللي فولت. وعندما توضع تربة في إناء مغلق فإن الأكسجين يستخدم بواسطة الكائنات الحية الهوائية كمستقبل نهائي للإلكترونات حتى يتم استنزافه بالكامل. ومع حدوث هذه العملية فإن جهد الأكسدة - اختزال للتربة يتناقص، وعندما يمكن أن تستخدم مركبات أخرى كمستقبلات للإلكترونات. ويوضح الجدول (4 - 3) جهد الأكسدة - الاختزال الذي يتم عنده الاختزال المواد الأولية المختلفة، وكذلك نشاط الأنواع المختلفة من الكائنات الحية في تربة معينة، (أنظر أيضاً الشكل 7 - 13 والجزء 2.4.7).

إن حقيقة وجود مستقبلات إلكترونات نهائية مختلفة متاحة لكائنات حية متنوعة لها متطلبات رقم هيدروجيني متباينة يعني أن بعض بيئات التربة تكون أكثر ملاءمة من غيرها للمجموعات المختلفة من الكائنات الحية. إن الشكل (4-4) الذي يوضح علاقات Eh/pH المثالية لمجموعات مختلفة من الكائنات، يبين أن جهد الأكسدة - الاختزال يؤثر على نشاط جميع الكائنات الحية.

جدول (3-4) جهد الأكسدة - الاختزال الذي يتم عنده اختزال المواد الغذائية الأولية

بالتربة. أيضاً، انظر الشكل (7-13)

نوع الكائن الحي	التفاعل	جهد الأكسدة - اختزال (مللي فولت mV)
هوائية	$H_2O \leftarrow O_2$	800 +
لاهوائية - اختيارية	$N_2, N_2O \leftarrow NO_3$	740 +
لاهوائية	$S^{-2} \leftarrow SO_4$	220 -
لاهوائية	$CH_4 \leftarrow CO_2$	300 -



شكل (4-4): علاقات E_h/pH المثالية لمختلف الكائنات الحية بالتربة.

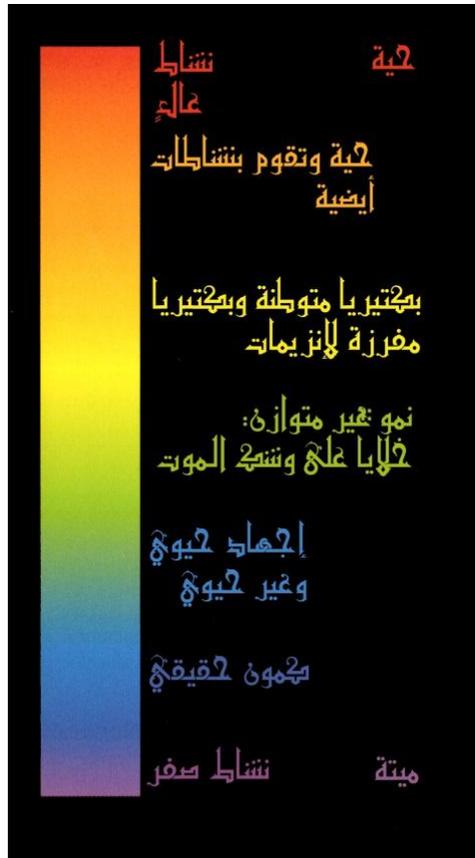
3.4 الحالة العامة ونشاط الميكروبات في التربة

هل يمكن اعتبار التربة بيئة ملائمة لميكروبات التربة؟ يوجد في الحقيقة إجابتان محتملتان لهذا السؤال. فمن ناحية التربة بيئة قاسية جداً، ومن ناحية أخرى فهي تحتوي على أعداد كبيرة جداً من الميكروبات، فكيف يكون ذلك؟ يبدو أن كائنات التربة متأقلمة بصورة جيدة على هذه البيئة القاسية ولذلك، فلا بد أن يكون لها آليات لاستثمار الموارد المتاحة. إن هذه الآليات تسمح أيضاً للكائنات أن تعيش فترات طويلة من الزمن عندما لا تكون هذه

الموارد متوفرة. وعند النظر إلى التربة على أنها مجتمع يمتلك أعداداً ضخمة من الكائنات الحية وتنوعاً ميكروبياً هائلاً، فإنه يمكن استنباط أن لكل نوع بيئة وموطن niche تماماً مثلما يكون لكل منها بيت ووظيفة، ونظراً لأن التربة بيئة غير متجانسة، فإن أنواعاً كثيرة مختلفة يمكن أن تتعايش معاً (انظر الشكل 2-3). إن التنوع يضمن أيضاً أن جميع المغذيات المتيسرة في التربة يتم استثمارها. ونتيجة للبيئة الفيزيائية القاسية للتربة وحقيقة أن العناصر المغذية تكون عادة حدية، فإن الكائنات الحية بالتربة لا تقوم بصورة نشطة بعمليات أيضية طويلة الوقت، وفي الحقيقة فإنها توجد تحت إجهاد، ولذا فقد تتعرض للضرر أو حتى الموت. ويوضح الشكل (4-5) الحالات المختلفة الممكنة لكائنات التربة، حيث يتبين أن الحالتين المتطرفتين هما ميكروبات حية وأخرى ميتة وبين هاتين الحالتين المتطرفتين، يكون وجود حالات فسيولوجية أخرى أمراً ممكناً، بما في ذلك حالات نشطة أيضاً وأخرى كامنة أو خاملة، وبما أن أعداداً كبيرة من الكائنات تتعرض في الواقع للضرر عند تواجدها في التربة وتكون لها متطلبات غذائية متنوعة ومتخصصة، فإن كثيراً من الكائنات الحية للتربة لا يمكن زراعتها باتباع الطرق الاعتيادية. وتوصف هذه الكائنات بأنها حية (Viable) ولكنها غير قابلة للاستزراع على بيئات غذائية (nonculturable).

[ملاحظة: عملياً، ربما يكون 99% من كائنات التربة غير قابلة للاستنبات على أوساط غذائية حسب ما ذكره (Rozak and Colwell, 1987). وعلى ذلك فإن أي أسلوب يعتمد على الحصول على كائنات تربة حية عن طريق الاستزراع ربما يكون في الحقيقة عينه ممثلة لجزء صغير جداً من الكائنات التي تعيش في التربة].

بناءً على ما دار من نقاش حول التربة كبيئة للميكروبات يمكننا بدرجة معقولة الاستدلال على الكائنات المتوطنة في تربة معينة وتم انتقاؤها عن طريق بيئة خاصة في تلك التربة. وكثيراً ما تكون الكائنات المتوطنة قادرة على مواجهة اختلافات واسعة في خصائص بيئية محددة. من ناحية أخرى، فإن الكائنات التي يتم إدخالها، لا يتوقع أن تكون متأقلمة بنفس الدرجة كما لا يمكن توقع أن تكون قادرة على التنافس مع الكائنات المتوطنة إلا في حالة توفر بيئة خاصة.



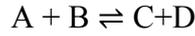
شكل (4-5): الحالات الفسيولوجية للكائنات الحية بالتربة.

References and Recommended reading

- Atlas R.M and Bartha, R. (1993) *Microbial Ecology*, 3rd Edition. The Benjamin/Cummings Publishing Company, New York.
- Paul E.A. and Clark F.E. (1988) *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, san Diego, California.
- Roszak D.B and Colwell R.R. (1987) Survival strategies of bacteria in the natural environmental. *Microbiological Reviews*. 51, 365-379.

مسائل وأسئلة

1. بالنسبة للتفاعل الكيميائي:



فإن ثابت الاتزان الترموديناميكي $K_{eq} = 0.38$ ، استنبط فيما إذا كان ΔG لهذا التفاعل تكون سالبة أم موجبة، هل توجد طاقة متحررة من هذا التفاعل، أو أنه يتعين إضافة طاقة لتحفيز التفاعل؟

2. بالنسبة للكائنات التالية، حدد المادة الأولية التي يمكن أن تتأكسد وكذلك مستقبل

الإليكترونات المستخدم بواسطة الكائن الحي:

أ. النيتروسوموناس (*Nitrosomonas spp.*).

ب. الثايوباسيللس ثايو أوكسيدانس (*Thiobacillus thiooxidans*)

ج. الثايوباسيللس دي نايتريفيكانس (*Thiobacillus denitrificans*)

د. دي سلفوفيبريو (*Desulfovibrio spp.*)

3. ناقش باختصار العبارة: (التربة بيئة ملائمة كموطن للكائنات الحية الدقيقة).

4. ناقش باختصار العبارة (التربة بيئة ملائمة لعمليات الأيض لكل من الكائنات): المتوطنة

(*autochthonous*) المفترزة للأنزيمات (*Zymogenous*).

5. ما هي العوامل الهامة التي تحد من النشاط الميكروبي في معظم الترب؟

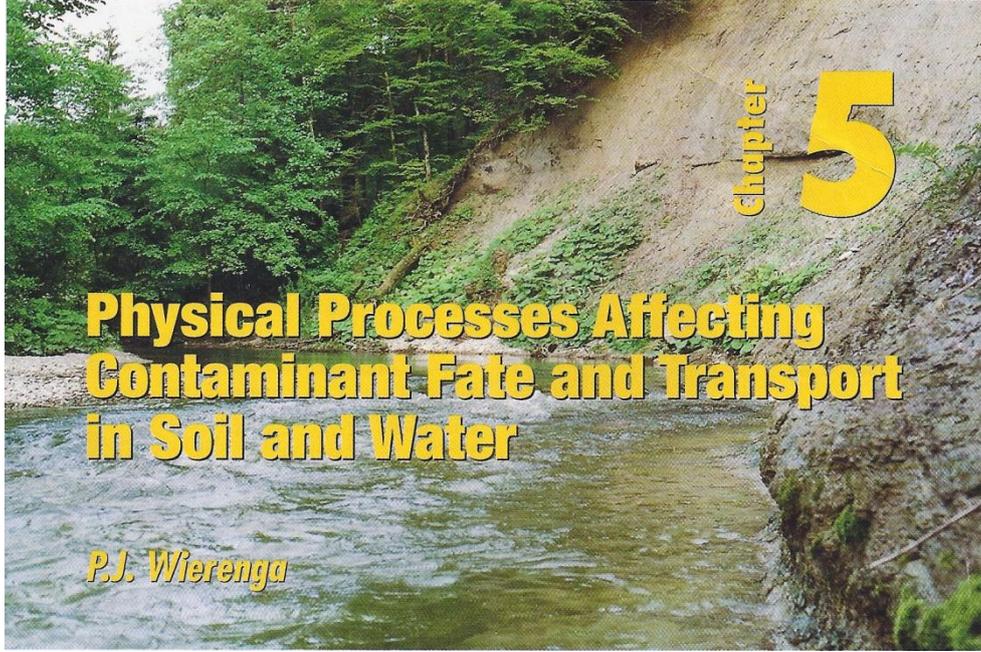
6. أي من هذه الكائنات الحية التالية التي يتوقع أن تلعب دوراً في تحليل المركبات العضوية:

Filamentous Fungi, Thiobacillus, Nitrosomonas, Pseudomonas,

actinomycetes, Bacillus؟ أعط تبريراً لإجابتك.

الباب الخامس

العمليات الفيزيائية المؤثرة على مصير ملوث ونقله في التربة والماء



إن فهم الخصائص الطبيعية لتربة ما لا يمكن الاستغناء عنها عند تطوير أنماط رياضية تصف بدقة معدل غسل

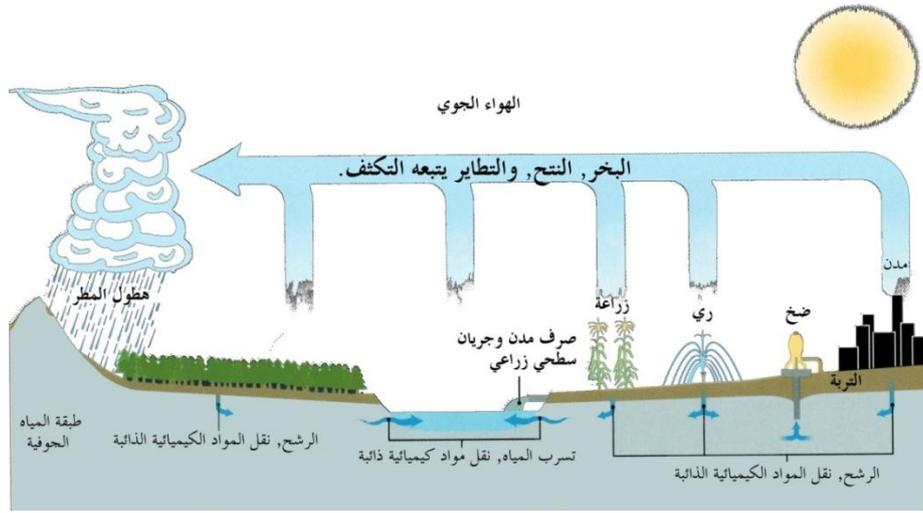
ملوث معين.

1.5 ماء التربة والمياه الجوفية

1.1.5 ماء التربة

يوجد الماء في كل مكان، فهو في الهواء الجوي، والتربة والخزانات الجوفية، إضافة للمحيطات والبحيرات والأنهار، ومع تسخين الشمس للمحيطات والبحيرات، فإن الماء يتبخر للهواء الجوي، ومن ثم يهطل على شكل أمطار أو ثلج، ويرشح خلال القشرة العليا

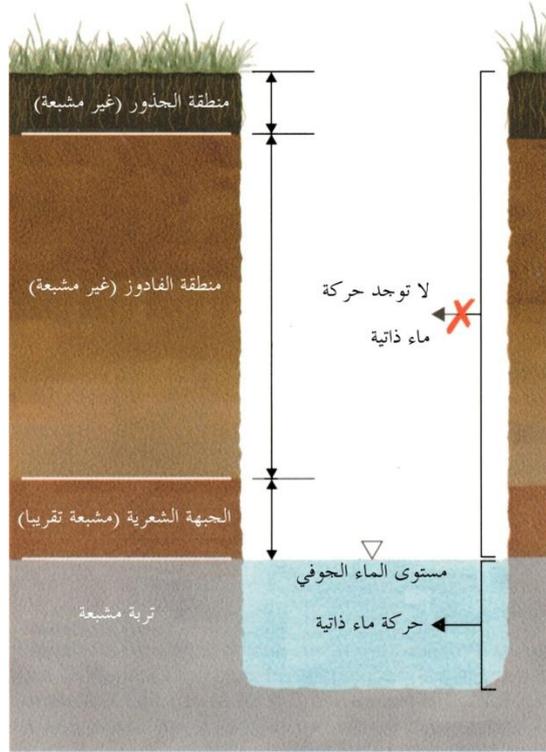
للأرض (التربة)، ليغسل إلى أسفل في اتجاه المياه الجوفية. ومن هنا، يصل ثانية للأهوار والبحيرات عن طريق النز أو يضح لأعلى لاستخدامه في الأغراض الحضرية أو لري المحاصيل. وأخيراً، فإن مياه النهر والدفق الفائض من مياه المدن أو المناطق الريفية ربما تصل المحيطات ثانية مستكملة الدورة، وتسمى هذه العملية والموضحة في الشكل (1-5) بالدورة الهيدرولوجية، وفي هذا الباب سيتم التركيز على ماء التربة والمياه الجوفية.



شكل (1-5): الدورة الهيدرولوجية التي توضح العلاقات المتداخلة بين الهواء، والتربة والمياه الجوفية والمياه السطحية.

يمكن أن نلاحظ بسهولة ماء التربة بعمل ثقب عمودي أو حفر حفرة (شكل 2-5)، وربما تكون التربة رطبة في الجزء العلوي من الثقب أو الحفرة، بمعنى، أن التربة تحتوي بشكل واضح على ماء، ولكنه ليس بالكثرة التي تجعله يجري بحرية من جدار الحفرة، وبالقرب من سطح التربة، تكون المسامات الدقيقة فقط مليئة بالماء، ويقال عن التربة أنها غير

مشبعة، وعند أعماق أكبر للحفرة، فإن الماء قد يتجمع ويشاهد عندها ماء حر. ويسمى هذا الماء مياه جوفية، أما ارتفاع أو مستوى الماء في الحفرة فإنه يسمى مستوى الماء الجوفي (groundwater table) وتكون الفراغات المسامية للتربة أدنى هذا المستوى مملوءة تماماً بالماء، وتكون التربة مشبعة، وتسمى المنطقة بين مستوى الماء الجوفي وسطح الأرض بالمنطقة غير المشبعة، ويستخدم عموماً لفظ منطقة الفادوز (Vadoze zone) للإشارة للمنطقة بين مستوى الماء الجوفي والنهية الدنيا لمنطقة الجذور.



شكل (5-2): ثقب تم حفره خلال تربة غير مشبعة وحتى التربة المشبعة، لاحظ الماء الجوفي عند قاع الحفرة وكذلك مستوى الماء الجوفي.

يختلف مستوى الماء الجوي من موقع لآخر، ويعتمد ذلك بدرجة كبيرة على نسبة الهطول (Precipitation) إلى البحر، ففي المناطق حيث يكون معدل الأمطار مرتفعاً ويكون البحر منخفضاً أو متوسطاً، فإن عمق مستوى الماء الجوي قد يتراوح ما بين أقل من 0.5 متر إلى 3 أمتار أو أكثر، أما في المناطق الجافة، فإن عمق الماء الأرضي ربما يكون 100 متراً أو أكثر لكنه، قد توجد حتى في المناطق الجافة، مواقع معينة، مثل أحواض الأنهار، تكون فيها مستويات الماء الجوي ضحلة وبذلك، فإن لكل موقع محدد، هناك مستوى ماء جوي مختلف. ويعتبر عمق مستوى الماء الجوي عاملاً هاماً في التلوث. ففي المناطق التي تتميز بمعدلات أمطار عالية ومستوى ماء جوي ضحل، مثلاً، فإن المسافة القصيرة ما بين سطح التربة والماء الجوي تعني أن الماء الجوي يمكن أن يصبح ملوثاً بسرعة. بينما في المناطق الجافة، التي تتميز بمعدلات أمطار منخفضة ومستوى ماء جوي عميق، فإن تلوث المياه الجوفية يحدث بسرعة أقل.

إن جميع الأراضي تقريباً يوجد تحتها مياه جوفية في خزانات حاملة (aquifers)، وهي عبارة عن وحدات جيولوجية منفذة يمكن لها أن تخزن وتوصل كميات معتبرة من الماء، ويمكن أن تكون الخزانات الجوفية الحاملة للمياه صغيرة نسبياً، من بضعة كيلومترات مربعة، أو كبيرة جداً، تصل إلى عدة آلاف من الكيلومترات المربعة، وكمثال على خزان مياه كبير جداً خزان أوجالا (Ogallala) الذي يوجد تحت مناطق واسعة من شمال ولاية تكساس وكانساس ونيبراسكا. ويتم سحب المياه من هذا الخزان لأغراض زراعية واستخدامات حضرية وصناعية. وعندما يرتشح الماء من السطح خلال الطبقة غير المشبعة إلى المياه الجوفية، فإن

الخزانات الجوفية يتم تعويضها أو إعادة شحنها بالماء، ونتيجة لقوة الجاذبية، فإن اتجاه حركة الماء خلال الطبقة غير المشبعة تكون غالباً عمودية. لكن حركة الماء في الخزانات (انظر الشكل 5-1) تكون غالباً أفقية وينتج ذلك بسبب الاختلافات في الضغط والمستوى. فمثلاً، إذا تم سحب كميات كبيرة من المياه من إحدى نهايات الخزان، فإن مستوى الماء الأرضي سينخفض، ويؤدي هذا الانخفاض إلى تدفق الماء ببطء مبتعداً عن النهاية الأخرى للخزان الجوفي حيث يكون مستوى الماء الأرضي أعلى.

2.1.5 جهد ماء التربة

عندما يقاس الماء المشدود في التربة عبر جوانب الحفرة (انظر الشكل 5-2)، فإنه يلاحظ تحت الظروف الساكنة، أن كمية الماء في التربة تزداد من السطح إلى أسفل حتى الماء الجوفي. إن الزيادة في المحتوى المائي من القاع إلى أعلى هي بالدرجة الأولى نتيجة لفعل الخاصية الشعرية. فبالقرب من مستوى الماء الحر، تكون الفراغات المسامية الأكبر والفراغات الشعرية ذات الأقطار الكبيرة ممتلئة بالماء (انظر الجزء 2.3.2). وبالابتعاد فوق مستوى الماء الحر تكون المسامات الكبيرة فارغة، ويمسك الماء فقط في المسامات الأصغر، ويستعرض الشكل (5-3) ظاهرة الخاصية الشعرية حيث يوضح أن الماء يرتفع لمستويات أعلى في المسامات الضيقة مقارنة بالمسامات الواسعة.

ويفسر ارتفاع الماء في مسامات ذات أقطار مختلفة بمعادلة الارتفاع الشعري:

$$h = \frac{2s \cos \alpha}{Dgr} \quad (1-5)$$

حيث أن: h = ارتفاع الماء بالخاصية الشعرية بالمتر (م) في أنبوب زجاجي.

r = قطر الأنبوب أو نصف قطر المسام بالمتر (م).

D = كثافة الماء بالميجا جرام/ المتر المكعب (ميجا جم/ م³).

g = التسارع بسبب الجاذبية.

a = زاوية الالتماس (درجات) بين الزجاج والماء.

s = التوتر السطحي للماء (نيوتن/متر).

وبالنسبة لتلامس التربة بالهواء، فإن $a = 0$ ، $\cos = 1$ ، وكثافة الماء = 0.998

ميجا جرام/م³، $s = 0.0728$ نيوتن/ م عند 20°م، $g = 9.81$ جول/ كجم.م.

وباستخدام هذه القيم، فإن المعادلة (1-5) يمكن اختصارها إلى الصورة:

$$h = \frac{3 \times 10^{-5}}{d} \quad (2-5)$$

حيث أن: d = قطر المسام بالأمتار.

وعلى الرغم من أن المعادلتين (1-5) و (2-5) لا يتم تطبيقهما تماماً على الترب،

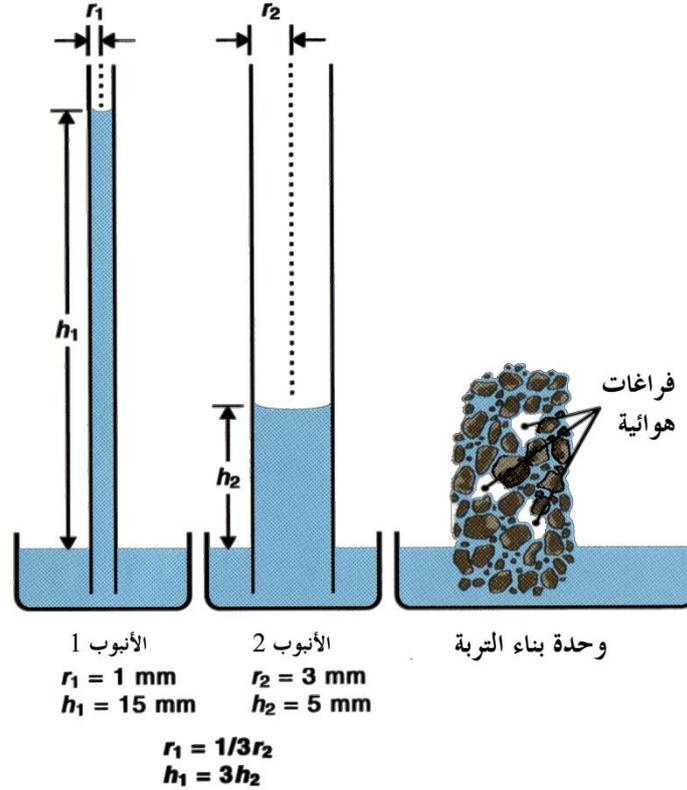
حيث أنه في حالة التربة لا يمكن رؤية مسام شعرية مستقيمة وغير مشوهة، إلا أن الفكرة

مفيدة في حالة مسامات التربة. فمثلاً، تشرح المعادلة (2-5) سبب انخفاض الارتفاع الشعري

مع زيادة قطر المسام، والعكس بالعكس. إن هذه الظاهرة قد تم مشاهدتها في ترب الحقل،

حيث تظهر الترب الرملية الخشنة (التي تتميز بمسام أكبر) ارتفاعاً شعرياً أقل كثيراً مقارنة

بالترب الطميية ذات القوام الناعم والمسام الأقل قطراً.



شكل (5-3): ارتفاع الماء بالخاصية الشعرية في أنابيب شعرية ذات أقطار مختلفة وفي وحدة بناء تربة.

ويعتبر فعل الخاصية الشعرية للترب، واحداً من الأسباب الرئيسية التي تفسر شد الماء في الترب غير المشبعة وعدم اندفاعه خارجاً من جدار الحفرة فوق مستوى سطح الماء الحر (الشكل 5-2)، إضافة لذلك، فإن الماء يتم شده عادة بقوة في التربة غير المشبعة لأنه يدمص على سطوح حبيبات التربة. فجزئيات الماء ثنائية القطبية، بمعنى، أن لها شحنة سالبة وشحنة موجبة. وعلى ذلك فإنها يمكن أن ترتبط بقوة لسطوح التربة، التي تكون أيضاً

مشحونة كهربائياً. وفي الحقيقة، يوجد عادة عدة طبقات من جزيئات الماء حول حبيبات التربة. ويشرح أيضاً إن التأثير المشترك للخاصية الشعرية والإدمصاص هو ما يفسر سبب شد الماء في إسفنجة رطبة: حيث أن ضغطاً قليلاً على النشافة يدفع الماء خارج المسام الكبيرة، بينما يؤدي الضغط الأقوى إلى فقد المسام الأصغر للماء. وبنفس الكيفية، يتعين بذل طاقة، عن طريق الضغط أو السحب لإخراج الماء من تربة غير مشبعة، وفي حالة التربة فوق مستوى الماء الجوفي في الشكل (5-2) يتعين بذل قوة سحب للتربة السطحية المكشوفة للحصول على عينة ماء. فالماء في هذه الحالة لا يخرج بذاته.

ما يُعرف بحالة الطاقة للماء في التربة، مثلاً، كم يلزم من الجهد لتحريك الماء بالتربة يعبر عنها من خلال طاقة الجهد الكلي لماء التربة، الذي يختصر عادة إلى جهد ماء التربة. وقد تم سابقاً تعريف جهد ماء التربة على أنه مقدار الشغل الميكانيكي اللازم لنقل الماء من التربة إلى حالة مرجعية قياسية (أي لإناء يحتوي على ماء عند نفس المستوى من الارتفاع)، حيث تكون طاقة الجهد الكلي لماء التربة حسب التعريف تساوى صفرًا. ويتشكل جهد ماء التربة من ثلاثة مكونات جهد هي: طاقة جهد الجاذبية، وطاقة جهد الضغط وطاقة جهد الأملاح. كما توجد مسميات طاقة إضافية تسهم في حالة الطاقة الكلية للماء في التربة. ولكن هذه الجهود الثلاثة كافية للمناقشة الحالية:

* **طاقة جهد الجاذبية، أو جهد الجاذبية:** ينتج عن حقل قوة الجاذبية. فالماء الذي يوجد عند ارتفاعات أعلى في قطاع تربة معينة أو مجرى نهرى يمتلك طاقة جهد أعظم من ماء يوجد عند مستوى أدنى في قطاع التربة أو مجرى نهرى ويتدفق الماء من طاقة جهد أعلى إلى

طاقة جهد أقل؛ ولهذا فإن الماء يتحرك إلى أسفل قطاع التربة، وفي اتجاه المصب عبر مجرى نهرى معين، كنتيجة للاختلاف في طاقة الجهد.

* **طاقة جهد الضغط أو جهد الضغط:** ينتج عن الخاصية الشعرية، والإدمصاصية، وقوى أخرى في الترب غير المشبعة. وهو يشير إلى قوة شد الماء في تربة معينة. وتكون قيمة جهد الضغط دائماً سالبة في الترب غير المشبعة (تذكر أنه يلزم طاقة لإزاحة ماء من تربة غير مشبعة). أما في الترب المشبعة، فإن قوى الخاصية الشعرية تكون صفراً، بينما يتعرض الماء تحت مستوى الماء الحر لضغط من الماء الذى فوقه. ونتيجة لذلك، فإن جهد الضغط تكون له قيمة موجبة تحت مستوى الماء الحر.

* **طاقة جهد الأملاح أو جهد الأملاح:** ينتج عن الفرق في طاقة الجهد بين محلول التربة وماء حر ونقي. وبما أن محلول التربة يحتوي على أنواع مختلفة من الأملاح الذائبة والمغذيات، فإن طاقته تنقص مقارنة بالماء النقي. ويمكن أن يكون هذا الانخفاض في طاقة الجهد نتيجة للأملاح الذائبة معنوياً، وهو ما يفسر كمية الطاقة الكبيرة المطلوبة لتحويل ماء البحر إلى مياه شرب، وتتسبب الاختلافات في الجهد الملحي بين الماء في التربة والماء في جذور النباتات في دخول الماء إلى الجذور، وفي داخل الجذور يكون الجهد الملحي أقل كثيراً نتيجة للأملاح والمواد العضوية الذائبة.

في المناقشات حول حركة الماء خلال الترب والمياه الجوفية، كثيراً ما يتم إهمال القوى الدافعة للامتصاص بواسطة جذور النباتات (اختلافات جهد الأملاح)، وتشمل المكونات المتبقية لحركة الماء كل من جهدي الجاذبية والضغط، ويعبر عموماً عن هاتين القوتين بوحدات

الضغط (بار أو ميغاباسكال) أو وحدات طول (أمتار من عمود من الماء):
 ويساوي 1.0 بار تقريباً 0.1 ميغاباسكال، الذي يساوي تقريباً 10.2 أمتار من
 الماء. وبالتعبير عن هذين الجهدين على أساس وحدات الطول، نحصل على:

$$H = h + z \quad (3-5)$$

حيث أن: H = جهد ماء التربة (أي طاقة الجهد الكلي لماء التربة معبراً عنه بأمتار الماء).

h = جهد الضغط (م).

z = جهد الجاذبية (م).

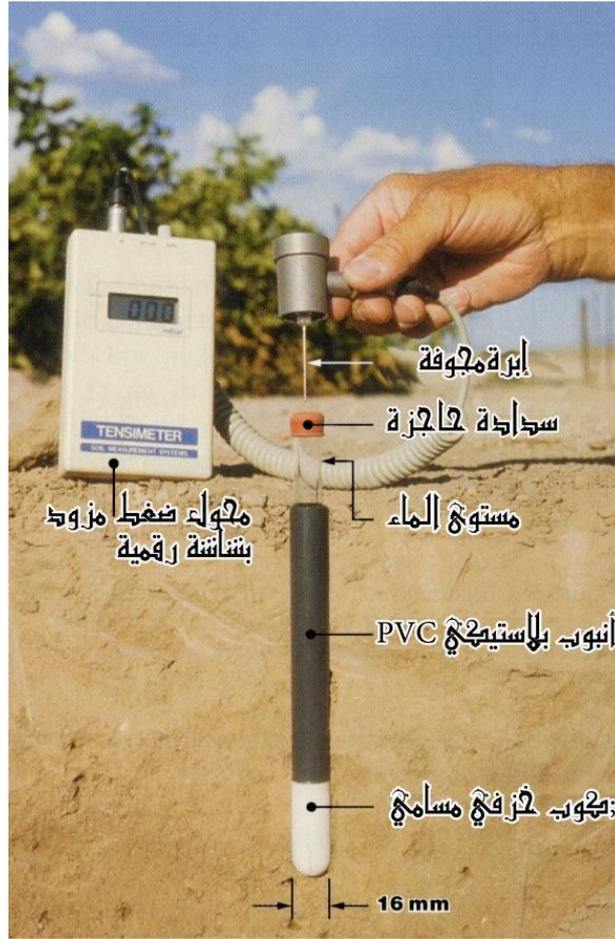
وإذا ما تم التعبير عن مكونات الجهد على أساس وحدات الطول، فإن مصطلح
 عمود (head) الذي يشير إلى المسافة هي التسمية التي كثيراً ما تستخدم. وعلى ذلك فإن
 المعادلة (3-5) تقرأ كما يلي: العمود الكلي (H) يساوي عمود الضغط (h) مضافاً إليه
 عمود الجاذبية (z). ويشير الفرق في جهد ماء التربة (H) بين موقعين في تربة معينة إلى أي
 اتجاه يمكن أن تكون حركة الماء.

3.1.5 قياس ماء التربة

لتقدير محتوى تربة معينة من الماء، يمكننا تحديد إما جهد ماء التربة أو محتوى التربة
 من الماء.

ويمكن قياس جهد ماء التربة باستخدام أنواع مختلفة من الأجهزة، ومن أبسط هذه
 الأدوات جهاز قياس الشد (Tensiometer)، الذي يقيس جهد الضغط (h). ويتكون هذا
 الجهاز من أنبوب بلاستيكي يوجد عند نهايته كوب فخاري مسامي. ويملأ الأنبوب بالماء،

ويقفل بسدادة حاجزة من المطاط، ويمكن إدخاله للتربة في وضع أفقي أو رأسي (الشكل 4-5).



شكل (4-5): جهاز مقياس الشد مزود بجهاز قراءة رقمي. بعد إدخال إبرة جهاز قياس الشد خلال السدادة الحاجزة، يسجل المحول الضغط السالب في جهاز قياس الشد ومن ثم في التربة.

ويتم وضع جهاز قياس الشد الموضح في الشكل (4-5) فوق مستوى الماء الحر حيث تكون التربة غير مشبعة ويكون جهد الضغط سالباً، ولذلك فإن الماء سوف يتحرك من جهاز قياس الشد خلال الكوب المسامي إلى داخل التربة. وينتج عن ذلك تطور تفريغ خفيف (ضغط سالب)، يسمى شد (tension) في الفراغ الهوائي عند قمة مقياس الشد. ويستمر خروج الماء من جهاز مقياس الشد حتى يصبح الضغط في التربة وفي الجهاز متساويين، وعندئذ يمكن تحديد الضغط السالب أو الشد باستخدام جهاز قياس الضغط المرفق بمقياس الشد أو عن طريق محول ضغط إلكتروني. وبإضافة طول عمود الماء في الأنبوب البلاستيكي لمقياس الشد إلى قراءة جهاز القياس أو المحول (بالستمرات من الماء)، يمكن الحصول على قياس لجهد ضغط ماء التربة عند موقع كوب مقياس التوتر السطحي.

إن الطريقة القياسية لتحديد محتوى التربة من الماء هي أخذ عينات تربة وتجفيفها في الفرن، ومن ثم حساب محتوياتها من الماء عن طريق الفرق بين كتلة التربة الرطبة والجافة. ويساوي المحتوى المائي الحجمي (θ) حجم الماء لوحدة حجم التربة ($\text{م}^3/\text{م}^3$). أما المحتوى الكتلي من الماء، ويسمى أيضاً المحتوى الوزني من الماء، فهو كتلة الماء لوحدة كتلة وزن التربة الجافة في الفرن (كجم/كجم). ويحسب المحتوى المائي الحجمي بضرب الأخير في الكثافة ρ ، حيث أن $\rho = \text{كتلة التربة الجافة في الفرن على حجم التربة الكلية، ميجا جرام/م}^3$. ويعتبر تقدير المحتوى المائي عن طريق أخذ العينات مدمراً للعينة ويستغرق وقتاً طويلاً. إضافة إلى ذلك، فإن هذا الأسلوب لأخذ العينات يكون أحياناً مستحيلاً. على سبيل المثال، تربة تحت مكب نفايات قد لا يكون من الميسور الوصول إليها.

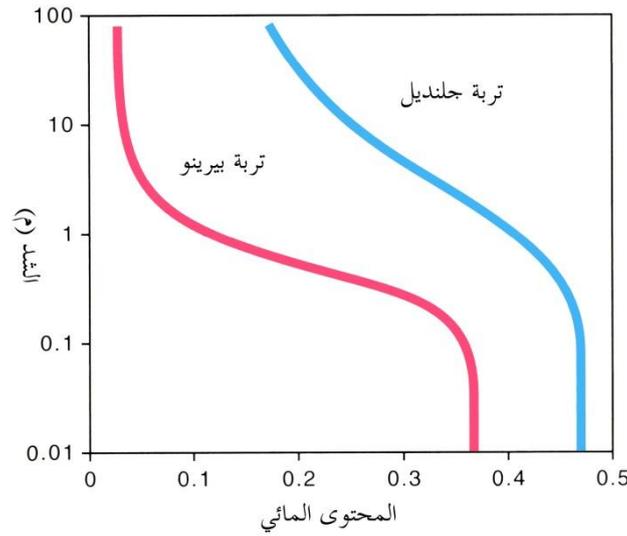
وعندما تكون هناك رغبة في الحصول على قياسات متكررة لمحتوى التربة من الماء، ربما يكون من الأفضل استخدام طرق غير مباشرة، ويعتبر الأسلوب غير المباشر الأكثر شيوعاً لتقدير المحتوى المائي في التربة الحقلية طريقة مسبار النيوترون (neutron probe). وتشمل هذه الطريقة غرس أنبوب مجوف في التربة وإنزال مصدر مشع يطلق نيوترونات سريعة خلال التربة، ويعتبر عدد النيوترونات التي تم إبطاء سرعتها بواسطة الهيدروجين قياساً لمحتوى التربة من الماء. وفي الطرق الأحدث لقياس محتوى التربة من الماء في الحقل، مثل جهاز قياس الانعكاس على امتداد الزمن (Time domain reflectometry, TDR)، حيث يتم استخدام ثابت العازل الكهربائي للماء، الذي هو أكبر كثيراً (60-180 مرة) مقارنة بثابت العازل الكهربائي لتربة جافة (أي 2-5).

ويعتبر مسبار النيوترون و TDR طريقتين جيدتين للقياس المتكرر لرطوبة التربة عند نفس الموقع، وهما مناسبان بشكل خاص لمراقبة التغيرات في المحتوى الرطوبي للتربة تحت مكبات النفايات أو أية أماكن أخرى للتخلص من المخلفات.

4.1.5 العلاقات بين جهد ماء التربة ومحتوى التربة من الماء

تعرف العلاقة بين كمية الماء المشدودة في التربة ومستوى طاقتها بالمنحنى الخاص لماء التربة أو منحنى شد ماء التربة. وتعتبر هذه العلاقة مميزة لكل تربة. ويبين الشكل (5-5) أمثلة لمنحنيات شد الماء لتربة رملية ناعمة طميية وتربة طميية طينية، وفي هذا الشكل يلاحظ أنه كلما جفت التربة فإن الشد يزداد (جهد الضغط يصبح أكثر سالبة)، إن الاختلافات بين المنحنيين كما هو موضح بالشكل (5-5) معنوية. فالتربة الطميية الطينية تتميز بمحتوى

مائي أعلى بكثير عند التشبع وكذلك عند المستويات المتوسطة من الشد، ويتميز منحني شد الماء للرمال الناعم بأنه شديد الانحدار عند مستويات شد أعلى من 10 أمتار.



شكل (5-5): منحنيات شد ماء التربة لتربة بيرينو الرملية الناعمة الطميية وتربة جلدليل الطينية، تحتوي تربة جلدليل الطميية الطينية على طين وسلت أكثر و تتميز بوجود مسام دقيقة وتحتفظ بكمية أكبر من الماء عند جميع مستويات الشد.

تستخدم بيانات شد الماء بكثرة في إعداد نماذج رياضية لحركة الماء خلال التربة فمثلاً، للقيام بإعداد نموذج رياضي باستخدام الحاسوب للتنبؤ بمدى سرعة تحرك الماء من السطح خلال المنطقة غير المشبعة من قطاع التربة ومن ثم إلى المياه الجوفية، فإنه يلزم معرفة خصائص شد الماء للتربة التي يمر خلالها. إن اختبارات وتطبيق النماذج الرياضية يكون عادة

مطلوباً لتحديد ما قد يترتب عن المشاريع الهامة، مثل مكبات النفايات على مستوى إقليمي (regional landfills)، على تدفق الماء والملوثات للمياه الجوفية.

عند إعداد نماذج رياضية لتدفق الماء في التربة غير المشبعة، يكون من الملائم جداً التعبير عن بيانات شد ماء التربة رياضياً، ومن التعبيرات الرياضية الأكثر شيوعاً لهذا الغرض معادلة فان جنيوختن (Van Genuchten):

$$S_e(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (4-5)$$

حيث أن:

S_e = التشبع الفعال (لا وحدات له لأنه يساوي النسبة $\frac{\theta}{\theta_s}$ لقيمة θ_r الصغيرة جداً).

θ = المحتوى الحجمي من الماء (م³/م³).

θ_r = المحتوى المائي المتبقي (م³/م³)، وهو المحتوى من الماء عند أقصى درجات الجفاف.

θ_s = المحتوى المائي عند التشبع (م³/م³)، وهو المحتوى من الماء عند التشبع الكامل.

α (م⁻¹) و n (بدون وحدات) و m (بدون وحدات) هي قياسات تجريبية. وتلائم هذه الدالة جيداً البيانات المسجلة لمدى واسع من التربة.

2.5 حركة الماء في التربة والمياه الجوفية

1.2.5 التدفق المشبع

أجريت الدراسات العملية المبكرة حول حركة الماء عن طريق رص التربة في أسطوانة مفتوحة الطرفين وجعل الماء يسري خلالها كما هو موضح في الشكل (5-6)، ولإجراء قياسات لما يدخل وما يخرج من ماء وكذلك قياس ضغط الماء عند مداخل ومخارج هذه

الأواني، فقد وجد أن حجم الماء (Q) الذي يتحرك خلال عمود تربة معينة يتناسب مع فرق العمود الهيدروليكي (hydraulic head) (ΔH) الذي يساوي ($\Delta H = \Delta h + \Delta Z$) بين نقطة الدخول ونقطة الخروج.

إضافة إلى مقطع المساحة (A) للعمود والزمن (t). كما أنه يتناسب عكسياً مع طول العمود (Z). وبذلك فإن:

$$Q = K \frac{\Delta H A t}{Z} \quad (5-5)$$

حيث يسمى ثابت التناسب (K) التوصيل الهيدروليكي. وتسمى المعادلة الرياضية (5-5) بقانون دارسي (Darcy's Law)، وقد قام بوضع هذه المعادلة أول مرة المهندس الفرنسي هنري دارسي في عام 1856، وتكون الوحدات العملية لوحدة هذه المعادلة كما يلي: ΔH بالأمتار (م)، A بالأمتار المربعة (م²)، t بالأيام، Z بالأمتار (م)، Q بالأمتار المكعبة (م³) و K بالمتر/ يوم (م/ يوم).

ويستخدم النموذج التحريبي الموضح في الشكل (6-5) لتقدير التوصيل الهيدروليكي المشبع لمواد تحت سطحية، فمثلاً: إذا كان $Z = 0.5$ متر، $\Delta H = 0.60$ متر، $A = 0.01$ م²، $t = 1$ يوم، $Q = 0.012$ م³، فإن:

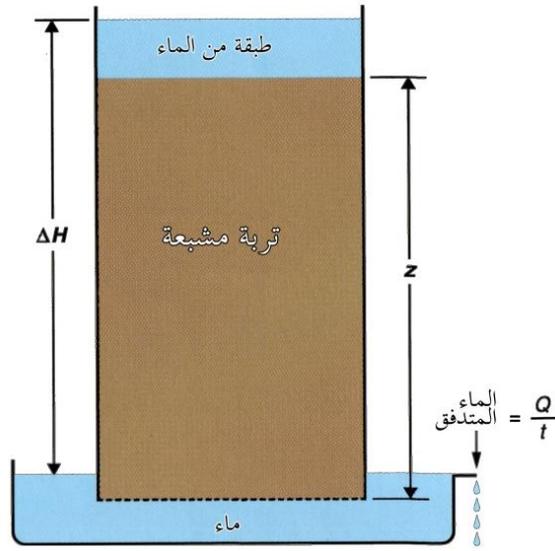
$$0.012 = K \left(\frac{0.60 \cdot 0.01 \cdot 1}{0.50} \right)$$

و

$$K = 1 \text{ m day}^{-1}$$

ويمكن إعداد حفر تجريبية للتعرف على مدى ملاءمة خزان جوفي لحفر بئر ماء أو

لأخذ عينة تربة أو ماء، ويتم عادة رص التربة التي تم إزاحتها خلال الحفر في أسطوانة (cylinder) مفتوحة الطرفين ومن ثم تقدير قيمة توصيلها الهيدروليكي (K). فإذا وجد أن قيمة K عالية (أي أكثر من 10 متر/ يوم) فإن الموقع ربما يكون ملائماً لحفر بئر ماء. لكنه إذا كانت قيمة K منخفضة (أي أقل من 0.10 متر/ يوم) فإن الموقع ربما لا يكون ملائماً لحفر بئر ماء.

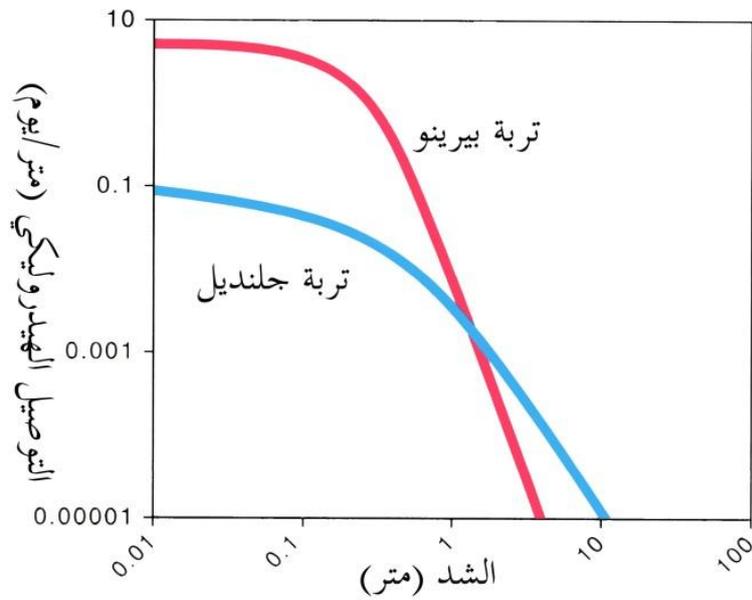


شكل (6-5): عمود تربة مشبع له مقطع A . بقياس الماء المتدفق، وكذلك ΔH و ΔZ يمكن حساب التوصيل الهيدروليكي المشبع للتربة.

2.2.5 التدفق غير المشبع

يستخدم قانون دارسي أيضاً لوصف حركة الماء في الترب غير المشبعة. ويكون الفرق فقط في حالة الترب غير المشبعة أن التوصيل الهيدروليكي ليس ثابتاً، بل ينقص بسرعة مع

تناقص محتوى التربة من الماء، ويعود ذلك إلى أنه مع فقد الماء، تكون المسامات فارغة (لا تحتوي على ماء) وتقل المساحة المقطعية للتدفق. وبذلك، فإن التربة الرملية التي تصرف ماءها بسرعة أكبر، تظهر تناقصاً أكبر في التوصيل الهيدروليكي مع تناقص محتواها من الماء مقارنة بالتربة الطينية، ونظراً لأن التربة الطينية تمتلك مسامات أكثر ذات أحجام متوسطة وأنها تصرف ماءها بسرعة أكثر بطئاً، فإن التوصيل الهيدروليكي للتربة الطينية يقل بسرعة أقل مع تناقص محتواها من الماء. ويوضح الشكل (5-7) مثلاً للتغيرات في التوصيل الهيدروليكي مع الشد.



شكل (5-7): علاقات التوصيل الهيدروليكي مقابل الشد لتربة بيرينو الرملية الناعمة الطميية وتربة جلنديل الطميية الطينية، لاحظ أنه عند قوة شد تزيد على 1.5 متر تقريباً، فإن تربة جلنديل الطميية الطينية تمتلك توصيلاً أعلى مقارنة بالتربة الرملية

وتبين المعادلة الرياضية التالية اعتماد قيمة التوصيل الهيدروليكي غير المشبع $K(h)$ على جهد الضغط (h) :

$$K(h) = K e^{\alpha h} \quad (6-5)$$

حيث أن: α (m^{-1}) ثابت تربة. ويجب أن تحسب قيمة التوصيل الهيدروليكي المشبع K و α بإدخال القيم المقاسة للتوصيل الهيدروليكي غير المشبع وجهد الضغط في المعادلة (6-5). وتظهر المعادلة (6-5) اعتماداً قوياً لقيمة $K(h)$ على الشد، ومن ثم على المحتوى المائي، ويعود ذلك إلى أن المحتوى من الماء والشد مرتبطان. ونظراً لهذا الاعتماد فإن انخفاضاً قليلاً نسبياً في المحتوى المائي أو الشد ربما يتسبب في نقص كبير جداً للتوصيل الهيدروليكي. فمثلاً لو أن تربة بيرينو الموضحة في الشكل (7-5) تركت لتجف بحيث ازدادت قوة شدتها للماء من 0.60 (رطوبة جداً) إلى 5 متر (جافة جداً)، فإن توصيلها الهيدروليكي سينقص من 0.1 إلى 10^{-5} متر/يوم، وهو نقص يساوي 10000 ضعفاً. إن هذه الزيادة في قيمة الشد تحدث في الترب عندما تسحب جذور النباتات الماء للقيام بعملية النتج. ونموذجياً يمكن للنباتات أن تسبب زيادة في شد ماء التربة إلى مستوى 100 متر، ولكن في الترب الصحراوية، فإن وجود قوى شد تصل إلى 300 متراً يعتبر أمراً عادياً. ومن الواضح أنه عند هذه المستويات العالية من الشد يكون التوصيل الهيدروليكي بطيئاً جداً (أنظر الشكل (7-5)). ونتيجة لذلك، فإن حركة السائل تكون قريبة من الصفر، ولهذا السبب فإن الترب الصحراوية تعتبر عادة مواقع ممتازة لإقامة منشآت للتخلص من المخلفات، إن قوى الشد العالية التي توجد في هذه الترب تجعل التوصيل الهيدروليكي منخفضاً جداً، وبذلك تقلل

بدرجة كبيرة فرص تحرك الماء بكميات هامة لمستوى الماء الجوفي.

3.2.5 التدفق المتغير الانتقالي (Transient Flow)

طورت معادلة دارسي أساساً للتدفق الثابت، حيث تكون قيمة Q ثابتة مع الزمن. وإذا كانت Q ثابتة، فإن المحتوى المائي وجهد الضغط يكونان عموماً ثابتين أيضاً. لكنه وفي كثير من الحالات العملية، يتغير كل من المحتوى المائي وجهد الضغط وكذلك التدفق مع الزمن. ويتعين في مثل ظروف هذا التدفق المتغير أن تكتب المعادلة (5-5) في صورة تفاضلية كما يلي:

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (7-5)$$

حيث أن: $q = \frac{Q}{At}$ يسمى تدفق دارسي (متر/يوم).

$\partial H / \partial z =$ الانحدار الهيدروليكي (متر/متر).

ويعرف المؤشر q على أنه حجم الماء الذي يتحرك خلال مقطع مساحته 1 متر مربع في وحدة الزمن، وتكون وحداته م³/م²، يوم الذي يعادل م/يوم. وللمقارنة، يُعبر أيضاً عن معدل الأمطار بالمتر/يوم (أو مم/يوم)، وهو حجم الماء الهاطل على متر مربع في يوم واحد، ويتعين ملاحظة أن السرعة الفعلية للماء المتحرك خلال تربة تكون أعلى بكثير من قيمة q . فالماء يتحرك فقط خلال الفراغ المسامي وليس خلال المواد الصلبة. لذلك فإن سرعة ماء المسام تكون أعلى بكثير من قيمة تدفق دارسي (q)، وعلى الرغم أن سرعة ماء المسام تعتمد على حجم المسام (حيث تكون أعلى في المسام الأكبر،

وأصغر في المسامات الدقيقة)، فإن متوسط سرعة ماء المسام تُعرف عموماً على أنها تساوي:

$$v = \frac{q}{\theta} \quad (8-5)$$

حيث v = سرعة ماء المسام.

وبالنسبة للتربة المشبعة فإن θ تساوي الفراغ المسامي الكلي أو المسامية. فإذا كانت المسامية 50% (أي أن الفراغ المسامي يساوي 50% من الحجم الكلي) فإنه حسب المعادلة (8-5) تكون سرعة ماء المسام:

$$v = \frac{q}{0.50}$$

أو ضعف قيمة تدفق دارسي (q).

أما بالنسبة للرمال غير المشبعة فإن θ ربما تنخفض لتصل الى 0.10 م³/م³، وفي هذه الحالة يكون متوسط تدفق السرعة أو المعدل الذي يتحرك به الماء خلال المسام 10 أضعاف قيمة تدفق دارسي (q). وبالتحديد أكبر، إذا هطلت أمطار على تربة غير مشبعة بمعدل ثابت يكون فيه = 0.025 متر/ يوم، ويكون محتوى التربة من الماء 10% (أي أن، $\theta = 0.10$ م³/م³)، فإنه يمكن تطبيق المعادلة (8-5) لتقدير سرعة ماء المسام في التربة (v) التي تساوي في هذه الحالة 0.25 متر/ يوم.

ومن المهم استيعاب مفهوم سرعة ماء المسام لأنه هو أيضاً المعدل الذي تتحرك به كثير من الملوثات خلال التربة والخزانات المائية.

وحتى يتم الوصف الكلي لحركة الماء خلال التربة، يتطلب دمج المعادلة (7-5) مع

معادلة الاستمرارية (equation of continuity)، وهذه المعادلة هي:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (9-5)$$

حيث أن:

$t =$ الزمن (أيام أو ثوان).

$\theta =$ المحتوى من الماء.

وببساطة تحدد المعادلة (9-5) أن التغير في المحتوى من الماء ($\partial \theta$) لوحدة الحجم من

التربة على امتداد جزئية من الزمن ∂t يساوي الفرق بين كمية الماء الداخلة وكمية الماء

الخارجة ($\partial \theta$).

على امتداد طول العينة ∂z . وينتج عن ضم المعادلتين (7-5) و (9-5) المعادلة:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (10-5)$$

وتسمى المعادلة (10-5) التي تصف التدفق العمودي غير المشبع خلال التربة

معادلة ريتشارد (Richards equation). وتنص المعادلة إلى أن التغيرات في المحتوى المائي مع

الزمن، ($\partial \theta / \partial t$) تنتج عن تدرجات ضغط، وهو الشق الأول من الطرف الأيمن للمعادلة

(10-5)، والتدفق بالجاذبية وهو الشق الثاني على الجانب الأيمن. وتستخدم المعادلة (10-5)

كأساس للنماذج الرياضية باستخدام الحاسوب، وتستخدم نماذج الكمبيوتر بكثرة للتنبؤ

بحركة الماء ولتحديد النتائج التي تترتب على اتخاذ القرارات المختلفة للإدارة وعلاقة ذلك بحركة الماء خلال التربة والمياه الجوفية، فمثلاً قد نحتاج للتنبؤ بسرعة وصول مياه الأمطار الهاطلة على تربة خلال عاصفة مطرية صيفية لمستوى الماء الحر للمياه الجوفية. وربما نريد أيضاً معرفة سرعة تحرك هذه المياه لبحيرة مجاورة أو نهر بمجرد وصولها إلى مستوى الماء الحر للمياه الجوفية. إن هذه التنبؤات وتنبؤات أخرى مشابهة تكون مهمة لإعداد تقارير حول تقييم الآثار البيئية. ويمكن أن يتم ذلك باستخدام أنماط رياضية مناسبة استناداً إلى المعادلة (5-10)، ومعرفة بعض الخصائص الفيزيائية للتربة مثل شد الماء (المعادلة (5-4) والتوصيل الهيدروليكي (المعادلة 5-6).

وبالنسبة للتربة المشبعة فإن المحتوى المائي (θ) وكذلك التوصيل الهيدروليكي K في المعادلة (5-10) يكونان ثابتين، وهذا يجعل المعادلة أبسط بعض الشيء، ويسمح بإجراء تنبؤات واسعة المدى لحركة المياه الجوفية.

3.5 حركة الملوثات في التربة والمياه الجوفية

بعد مناقشة كيفية تحرك الماء خلال التربة، يمكن الآن مناقشة كيف تتحرك المواد الكيماوية خلال التربة والمياه الجوفية.

في المجتمعات الصناعية، يمكن أن توجد المخلفات الكيميائية في كل مكان تقريباً. فمثلاً، تضاف المواد الكيميائية في صورة أسمدة لجعل المحاصيل تنمو بصورة أفضل، وتستخدم المبيدات أيضاً لمقاومة الحشرات والأعشاب الضارة، ويمكن أن تنقل الكيماويات عبر خطوط الأنابيب (مثل النفط) أو تخزن في خزانات ضخمة تحت الأرض (كيماويات صناعية). وفي

الماضي، كانت المخلفات الكيميائية ترمى في مكبات أو يتم التخلص منها في الأنهار والبحيرات أو المحيطات، أما في الوقت الحاضر فإن المخلفات تخزن عادة في برك مفتوحة أو خزانات تحت أرضية، ولسوء الحظ، فإن خطوط الأنابيب والصهاريج والبرك والمكبات تسمح بالتسرب وبذلك الكيماويات للبيئات تحت السطحية. كما تدخل الكيماويات أيضاً لتحت السطح عقب الترسيب الجوي (مثلاً، التريتيوم الناتج عن اختبار قنبلة ذرية) أو الجريان السطحي وما يعقبه من ارتشاح (الرصاص الناتج عن عوادم السيارات، وأملاح الطرق)، وبذلك فإن الكيماويات يمكن أن تدخل إلى البيئة تحت السطحية عن طريق عدد كبير من المصادر. ولكن، ما الذي يحدث للكيماويات بعد دخولها إلى التربة أو المياه الجوفية؟ منذ خمسين عاماً مضت، كان التخلص من الكيماويات بدفنها تحت سطح الأرض يعتبر إجراء مقبولاً. أما الآن فإننا نعرف أن تلك الكيماويات سوف تصل في نهاية الأمر للمياه الجوفية، مما يجعلها غير مناسبة كمصدر لمياه الشرب. وهناك كيماويات كثيرة يمكن أن تنتقل إلى المياه الجوفية لأنها تذوب في ماء التربة وتتحرك لأسفل حتى تصل المياه الجوفية في صورة أملاح (أنظر الشكل 5-1). وهناك كيماويات أخرى، مثل النواتج البترولية التي هي أقل ذوباناً في الماء، لكن حركة الماء لأسفل تظل تحفز وصولها إلى المياه الجوفية. إن المعدل الذي يحدث به هذا الأمر يتفاوت كثيراً، لأن ذلك يعتمد وبدرجة كبيرة على الظروف المناخية. ففي المناطق التي تتميز بمعدلات أمطار عالية، تكون حركة الماء ونقل الكيماويات في التربة أسرع بكثير منه في المناطق حيث تكون معدلات الأمطار منخفضة. وتجدر الإشارة، إلى أن عوامل كثيرة أخرى، مثل خصائص بعض الكيماويات، ونوع التربة، والمناخ، والغطاء النباتي تؤثر على

حركة الكيماويات خلال التربة والمياه الجوفية.

1.3.5 آليات النقل الكيماوي

تتحرك الكيماويات عادة خلال التربة بواسطة الماء وهي العملية التي تسمى النقل الكتلي (Mass Transport) أو النقل بالحمل (Convection). ويشير النقل الكتلي أو النقل بالحمل إلى الحركة غير النشطة (passive) للمواد الكيماوية الذائبة مع الماء. ويسمى معدل هذه الحركة غير النشطة بكثافة التدفق (J_m , Flux density) وله وحدات كيلوجرام/المتر المربع/يوم ($K_g m^{-2} day^{-1}$) وبذلك فإن كثافة التدفق تعبر عن معدل النقل الكيماوي عبر وحدة المساحة السطحية في وحدة الزمن:

$$J_m = q C \quad (11-5)$$

حيث أن:

q = سرعة دارسي (متر/يوم).

C = تركيز المادة الكيماوية في ماء المسام (مجم/لتر).

وقد تم شرح طريقة حساب قيمة (C) في الجزء (2.6).

بالإضافة للتدفق الكتلي، قد يتم ببطء توزيع المواد الكيماوية خلال ماء مسام التربة عن طريق الانتشار الجزيئي (molecular diffusion). وينتج النقل الانتشاري (J_D) من الحركة الحرارية الطبيعية للأيونات والجزيئات الذائبة. ويمكن وصف هذه العملية بقانون فيك للانتشار (Fick's law of diffusion)، كما يلي:

$$J_D = -\theta D_m \frac{\partial C}{\partial z} \quad (12.5)$$

حيث أن:

$D_m =$ معامل الانتشار لبيئة مسامية (متر²/يوم).

$Z =$ المسافة (متر).

وتعتمد قيمة معامل الانتشار على عوامل كثيرة، تشمل درجة الحرارة، ولكنه اقترح

تقديراً مفيداً لقيمته بالنسبة للتربة والمياه الجوفية تساوى 10^{-4} متر²/يوم.

وتشير المعادلة (5-12) أن النقل الانتشاري يساوي الانحدار في التركيز ($\partial C/\partial Z$)

مضروباً في معامل الانتشار (D_m). ويعتبر تأثير الانتشار الجزيئي على النقل الكيميائي في

الترب والمياه الجوفية قليلاً جداً عندما تكون الفترات الزمنية قصيرة، إلا إذا كانت المسافات

قصيرة جداً.

وتنتج الطبيعة المسامية للترب ومواد التربة في المنطقة غير المشبعة من القطاع بسبب

وجود المسام والشقوق وحفر الديدان ومظاهر أخرى، كما أنها تنتج أيضاً عن التراص

المفكك لمادة التربة نفسها. ويترتب عن الاختلاف في شكل وحجم وترتيب الفراغات

المفتوحة والمسام اختلاف في سرعة السائل التي تتباين من مكان لآخر، إضافة لذلك، فإن

سرعة السائل تختلف حتى خلال مسام معينة، حسب المكان من جدار المسام الذي تقاس

عنده السرعة. وتكون السرعة أقل ما يمكن بالقرب من جدار المسام. ويؤدي هذا التباين في

السرعة إلى اختلاف في معدل نقل الكيماويات مما يقود إلى خلط لها وهو ما يعتبر على

المستوى الكلي ممثلاً للانتشار الجزيئي. ويسمى هذا التوزيع الميكانيكي الناتج عن اختلافات

موضعية في السرعة بالتفريق الميكانيكي (mechanical dispersion). ويمكن وصف العملية

بواسطة معادلة رياضية تشبه المعادلة (5-12):

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C}{\partial z} \quad (13-5)$$

حيث أن:

$$J_h = \text{النقل التفريقي (جم/م}^2\text{/يوم)}.$$

$$D_h = \text{معامل التفريق الميكانيكي (م}^2\text{/يوم)}.$$

وتزداد قيمة معامل التفريق الميكانيكي مع زيادة سرعة الماء، وبذلك كلما تحرك الماء بسرعة أكبر خلال المسام ازداد انتشار المادة الكيميائية وأصبحت قيمة المعامل D_h في المعادلة (13-5) أعظم. إن العلاقة بين سرعة ماء المسام v (متر/يوم) ومعامل التفريق D_h في أبسط صورتها هي علاقة خطية، وبذلك فإن:

$$D_h = \alpha v \quad (14-5)$$

حيث أن:

$$a(m^{-1}) = \text{التفريق (dispersivity)}.$$

ونظراً لأن D_m و D_h متماثلان فإنهما يضافان لبعضهما. وبذلك فإن:

$$D = D_m + D_h \quad (15-5)$$

حيث أن D = معامل التفريق الطولي الهيدروديناميكي.

وبضم المعادلات (11-5) و (12-5) و (13-5) و (15-5) ينتج التدفق الكيميائي
(Chemical Flux, J_s)

$$J_s = -\theta D \frac{\partial C}{\partial z} + q C \quad (16-5)$$

وتنص المعادلة (5-16) أن كثافة التدفق الكلية للمواد الكيماوية خلال التربة J_s تنتج عن الانتشار (diffusion) والتفريق (dispersion) $(\partial C/\partial Z)$ زائداً التدفق بالحمل $(q C)$.

وحتى يمكن استخدام المعادلة (5-16) لأغراض إعداد نماذج رياضية، يتعين ضم هذه المعادلة مع معادلة الاستمرارية (equation of continuity) كما تم في حالة حركة الماء (المعادلة 5-9).

وفي حالة الانتقال الكيميائي فإن هذه المعادلة تكون:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J_s}{\partial z} \quad (17-5)$$

حيث أن:

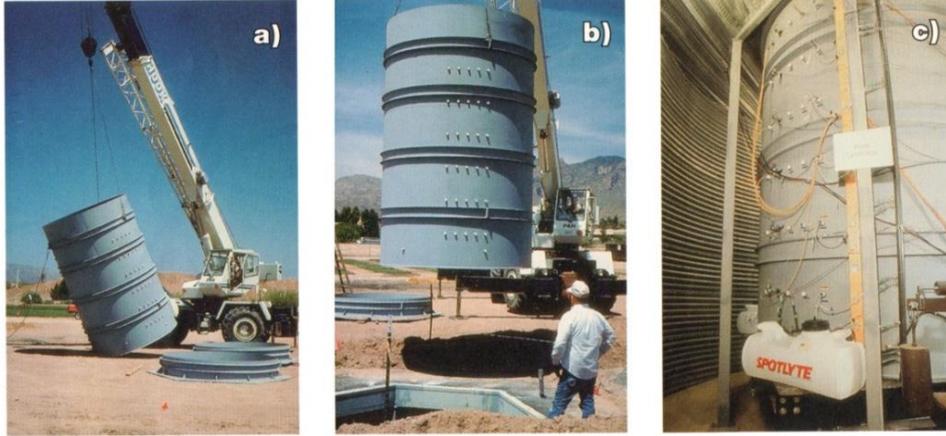
$$t = \text{الزمن}$$

وتنص المعادلة (5-17) أنه في حالة حجم صغير من التربة (مثلاً: مكعب تربة حجمه 10^{-6} م³)، فإن التغير في التركيز في هذا المكعب من التربة مع الزمن $(\partial C/\partial t)$ يجب أن يساوي الكمية الداخلة مطروحاً منها الكمية الخارجة $(\partial J_s/\partial Z)$. وبمعنى آخر، لا يوجد فقد للمادة الكيميائية. أما إذا كانت الكمية الداخلة أكثر من الخارجة، فإن كمية المادة الكيميائية داخل المكعب لا بد أن تزداد واحد وبضم المعادلتين (5-16) و (5-17) تنتج معادلة النقل الكيميائي العامة في اتجاه واحد:

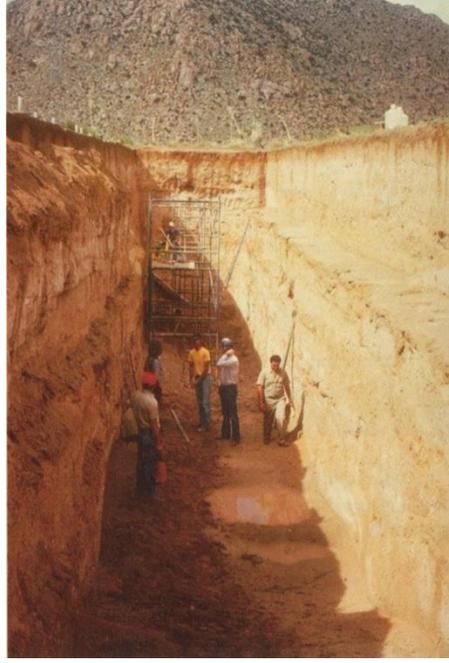
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - v C \right] \quad (18-5)$$

حيث أن: v هي السرعة المتوسطة الخطية لماء المسام (انظر المعادلة 5-8)، وتمثل القيمة $\partial C/\partial t$ في المعادلة (5-18) المعدل الذي يتغير به التركيز عند نقطة معينة في سائل متحرك (مثلاً، عند نقطة في مسام يحتوي على سائل يتحرك خلاله)، وتمثل القيمة $(v C)$ في المعادلة (5-18) مساهمة الانتشار والتفريق، بينما يمثل الآخر بمعادلة النقل الكتلي.

لقد تم استنباط المعادلة (5-18) لتلائم مادة كيميائية غير متفاعلة (noninteracting)، لكن ومن الناحية العملية، فإن كثيراً من المواد الكيماوية تدمص على التربة بينما تتحلل مواد أخرى حيويًا نتيجة لفعل الميكروبات. ولهذا السبب، فإن المعادلة (5-18) عادة ما يضاف إليها عوامل أخرى ليؤخذ في الاعتبار التفاعلات الكيماوية وتفاعلات التحول، وهو ما سيتم التعرض له بتفصيل أكثر في الأجزاء اللاحقة.



شكل (5-8): لا يمكن الاستغناء عن الليسمترات في الدراسة المحكمة التي تجري بالموقع لتتبع حركة الأملاح خلال عمود فعلي للتربة. في الصورة (a) و (b) يتم إنزال الليسمتر فوق موقع الدراسة بحيث يكون سطحه العلوي مستويًا مع سطح الأرض. توضح الصورة (c) الليسمتر في وضعه النهائي بالأرض. يتم الآن تعبئة المناطق التي تحيط بمقياس الشد (Tensiometer) وأنابيب تجمع السوائل الملحية بالتربة. يوضع الليسمتر كله فوق ميزان لتتم القياسات الدقيقة للتغير في مستوى الرطوبة بالتربة الذي يسببه بشكل خاص فقد الماء من خلال البحر السطحي وامتصاص الماء بواسطة جذور النبات.

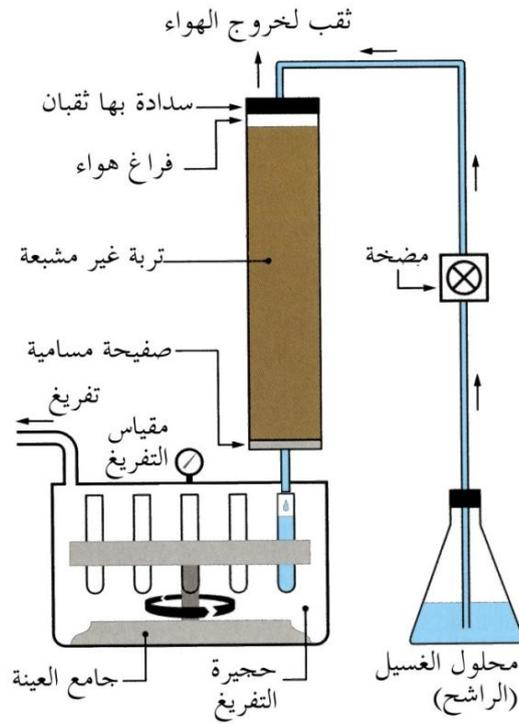


شكل (5-9): إن قواطع كهذه في ولاية نيومكسيكو تكون مفيدة لدراسة حركة الماء والأملاح خلال قطاع التربة.

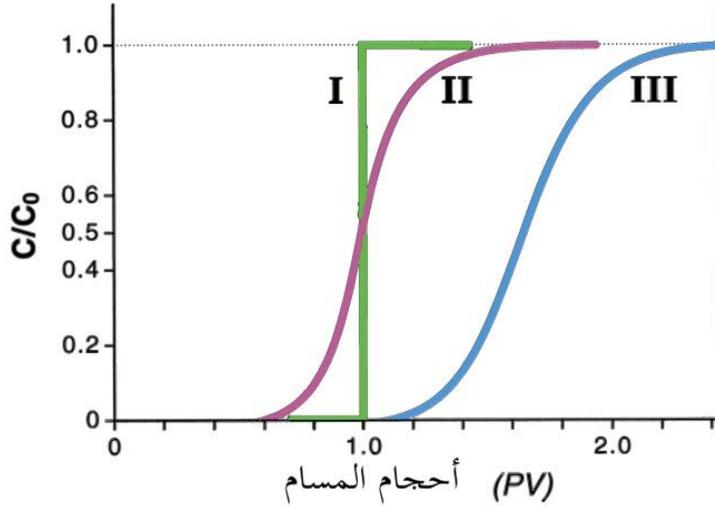
2.3.5 الحركة خلال أعمدة في اتجاه واحد

من الواضح أن حركة الكيماويات خلال التربة معقدة جداً. وقد أجرى العلماء والمهندسون دراسات مختبرية لسنوات عديدة لتحسين فهمهم لعمليات نقل الكيماويات خلال أعمدة التربة. وفي هذه الدراسات، تم إضافة ماء يحتوي على عنصر أو أكثر يمكن تتبعه أو ملوثات عند قمة العمود (الشكل 5-10). وتضاف بعد ذلك كميات أخرى من الماء ليتم نقل الملوث خلال التربة حتى النهاية الأخرى للعمود، حيث تجمع كميات صغيرة من الماء ويجرى تقدير لتركيز الملوث فيها. بعد ذلك يتم رسم علاقة بيانية لتركيز الملوث

مقابل الزمن الذي استغرقه جمع العينة أو مقابل الحجم الكلي للسائل الذي تم جمعه عند نهاية العمود. ويوضح الشكل (11-5) علاقة بيانية لتوزيع تراكيز ثلاثة أنواع من الراشح. لاحظ في الشكل (11-5) أن التركيز النسبي (C/C_0) قد استخدم في رسم العلاقة البيانية بدلاً عن التركيز المقاس في الراشح. ويتم حساب التركيز النسبي بقسمة تركيز الراشح (C) على تركيز المحلول المضاف (C_0)، وعندما يتم تمثيل التراكيز النسبية، فإن البيانات جميعها تكون على نفس المقياس، وبذلك يمكن مقارنة النتائج بسهولة أكبر.



شكل (10-5): التجهيز الاختباري لدراسات الأعمدة.



الشكل (11-5): توزيعات تركيز الراشح من العمود لثلاثة احتمالات (I) دفق مكبس (II) انتشار وتفريق (III) تفريق، انتشار، تثبيط.

ولنفس الأسباب، تستخدم عادة أحجام المسام النسبية للمقياس الأفقي بدلاً من الزمن، ويساوي حجم مسامي واحد (PV) الحجم الكلي للسائل في العمود، فمثلاً، إذا كان الحجم التراكمي للدفق (الرواشح) يساوي نصف الحجم الكلي للسائل في العمود، فإن $PV = 0.50$. وينطبق هذا التعريف للحجم النسبي للمسام لكل من التربة المشبعة وغير المشبعة، وللتسهيل، فإن توزيعات الراشح الثلاثة في الشكل (11-5) التي تسمى أيضاً منحنيات الاختراق (breakthrough curves)، تم تعريفها بالرموز I و II و III.

ويوضح المنحنى I في الشكل (11-5) أن تركيز الراشح يظل صفراً حتى يمر حجم مسامي واحد (PV) من السائل خلال العمود كله. مثلاً، بعد أن يستبدل السائل الأصلي كله في العمود بواسطة المحلول المضاف، ويمكن تصور ذلك إذا تم تخيل إضافة مادة ملونة

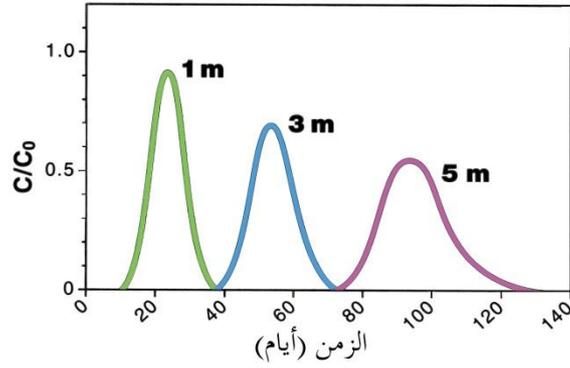
لقمة العمود في الشكل (5-10)، وإذا لم تتفاعل المادة مع التربة، فإن الراشح يكون في البداية عديم اللون، ولكن بعد حجم مسامي واحد تماماً، على سبيل المثال، فإن الماء الأصلي كله في العمود يكون قد استبدل بالماء الملون، ويتغير اللون في العمود فجأة، وتسمى العملية التي تسبب هذا التغير المفاجئ في التركيز بدفق المكبس (piston flow). وفي الحقيقة، فإن دفق المكبس، أو الاستبدال الكلي للسائل نادراً ما يحدث.

تحتوي التربة على مسام ذات أقطار مختلفة؛ لذلك، فإن الماء الذي يحتوي على مادة كيميائية يمكن اقتفاؤها (tracer) ستتحرك بسرعة أكبر خلال بعض المسامات مقارنة بأخرى. وينتج عن ذلك توزيع كما هو موضح بمنحنى الاختراق II، ولا يحتوي الراشح بداية على المادة الكيميائية القائفة التي يمكن متابعتها (أي أن الراشح يكون عديم اللون)، ولكن تركيزه يتغير تدريجياً (فيبدأ بالتلون) بعد مرور نحو 0.5 حجم مسامي، ليصل التركيز النسبي 1.0 (تطور لون كامل) وذلك بعد مرور 1.5 حجم مسامي تقريباً. لذلك، فإن اختلاف سرعة السائل في العمود يؤدي إلى جعل منحنيات الاختراق متفرقة.

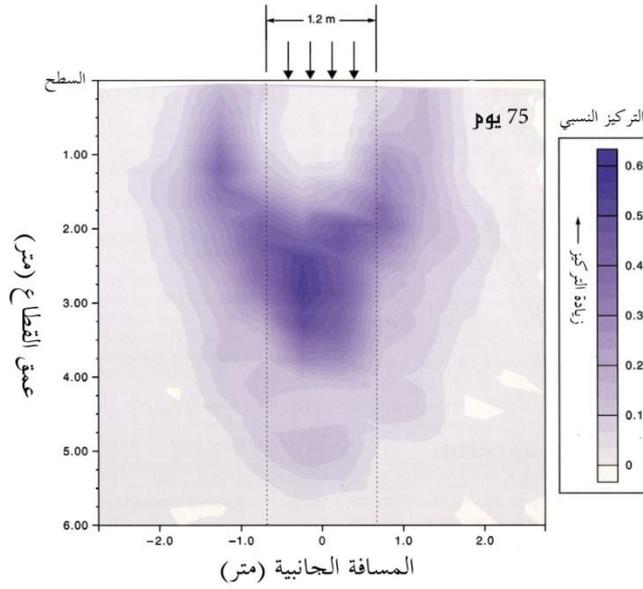
وتسمى العملية التي تجعل منحني تركيز الراشح مشتتة أو متفرقة، بعملية التفرق (dispersion)، ويحدث تفرق للأملاح في جميع الترب والمياه الجوفية، ويمثل المنحنى III في الشكل (5-11) مادة كيميائية تتفاعل مع التربة في العمود، وقد تم إبطاء المادة الكيميائية، وأزح المنحنى إلى اليمين. إن أسباب التفاعل الكيميائي مبينة في الجزء 3.6.

ويقدم الشكل (5-12) مثلاً لعنصر (تريتيوم) يتحرك خلال عمود تربة حقلية عميق وغير مشبع، وقد تم إضافة الماء في صورة مطر اصطناعي لهذا العمود بمعدل 21 مم/يوم لعدة

شهور، وقد أحتوى ماء المطر خلال فترة الأحد عشر يوماً الأولى على عنصر التريتيوم (^3H) فقط.

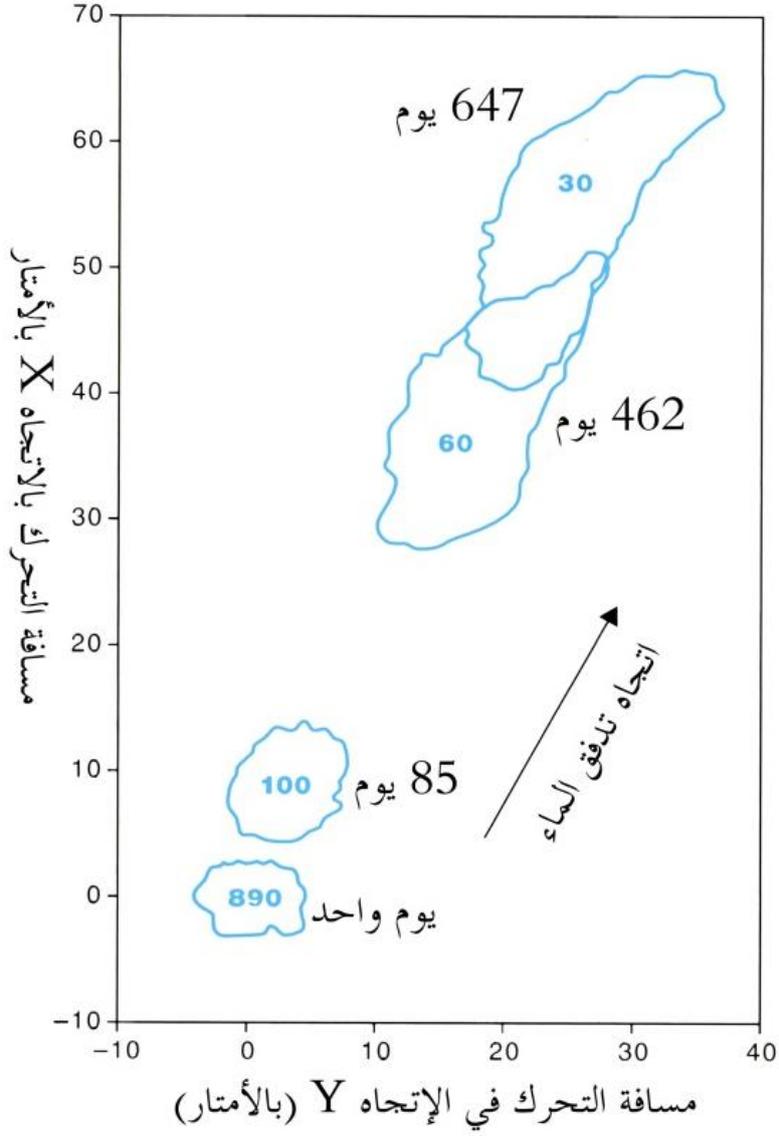


شكل (5-12): التركيز مقابل الزمن لماء يتم تنقيطه ويتحرك بمعدل سرعة ثابتة خلال تربة عميقة وغير مشبعة.



شكل (5-13): جبهة انتشار التريتيوم في تربة غير مشبعة.

وكعنصر يمكن متابعته واقتفاء المياه الجوفية بواسطته، تم قياس التريتيوم عند 1 و 3 و 5 أمتار تحت سطح الأرض. ويبين الشكل زيادة أعقبها نقص في التركيز النسبي للتريتيوم عند كل من الأعماق الثلاثة على امتداد الزمن. فمثلاً، عند العمق 1 متر، بدأ تركيز التريتيوم في الازدياد بعد 10 أيام من بداية المطر. وقد وصل أقصى تركيز له (نحو 0.97) بعد 22 يوماً، ثم بدأ في الانخفاض مرة ثانية. وبالمقابل، فقد وصل أعظم تركيز للتريتيوم عند عمق 3 أمتار بعد 53 يوماً، وعلى عمق 5 أمتار بعد 93 يوماً. وبذلك، فإن أعلى تركيز في المتوسط قد تحرك إلى أسفل بمعدل 0.056 متر/يوم. ويتعين ملاحظة أن أعظم تركيز للتريتيوم يتناقص مع المسافة من سطح التربة فكلما زادت المسافة إلى أسفل من سطح التربة، كلما تناقص التركيز الأقصى وزاد تفرق تركيز التريتيوم. إن الانخفاض في التركيز الأقصى واتساع النبضات للتريتيوم مرجعها الانتشار والتفرق، اللذين تم وصفهما رياضياً باستخدام معامل التفريق (D) في المعادلة (5-16).



شكل (5-14): انتشار جبهة الكلور في خزان رملي في بوردن بمقاطعة، أونتااريو، كندا أن نبضة الكلور الذي تم حقنه عند $(x,y) = (0,0)$ كان تركيزه 892 مجم/ لتر، لاحظ الانخفاض في التركيز الأعلى مع حركة الكلور مع المياه الجوفية في اتجاه حركة الماء.

3.3.5 الحركة خلال ترب الحقل

يصف الشكل (5-12) مصير عنصر اقتفاء أضيف عند سطح قطاع تربة عميق وغير مشبع متخذاً من عنصر التريتيوم (نظير الهيدروجين) مثالاً يوضح المبادئ التي تنطبق على مادة كيميائية مراقبة أو ملوث ما يتسرب من صهريج أو خزان. فبمجرد دخول ملوث كيميائي إلى التربة، فإن الماء المتحرك لأسفل ينقله خلال منطقة نمو الجذور فالمنطقة غير المشبعة التي توجد تحتها ليصل الماء الجوفي. وعند وصوله إلى المياه الجوفية، قد ينتشر الملوث الكيميائي في اتجاه أفقي. ويبين الشكل (5-13) انتشار التريتيوم في اتجاهين في تربة تحت سطحية لقطاع تربة يتميز بعمق مستوى الماء الحر. وقد أضيف التريتيوم مع الماء على امتداد شريط من الأرض عرضه متر واحد وذلك لمدة 15 يوماً، أعقبته فترة 60 يوماً أضيف خلالها ماء خال من التريتيوم. ويدل الشكل بوضوح أن معظم التريتيوم قد تحرك لأسفل القطاع، وقد وجد أن أقصى تركيز للتريتيوم كان عند عمق 2.5 متراً تحت سطح التربة. لكن انتشاراً جانبياً بدرجة معتبرة قد حدث أيضاً لهذا العنصر حيث تجاوز منطقة الإضافة التي تبلغ متراً واحداً، وذلك كما يتبين من وجود التريتيوم متجاوزاً الخطين المنقطين في الشكل (5-13). ومثل الحركة لأسفل فإن التوزيع الجانبي هو نتيجة للانتشار (diffusion) والتشتيت (dispersion) ويحدث في الترب وكذلك المياه الجوفية.

يوضح الشكل (5-14) كيف تتحرك الملوثات خلال المياه الجوفية. وقد أدخلت الملوثات الكيميائية للطبقة الحاملة للماء الجوفي عند النقطة $(y,z) = (0,0)$. ويبين الشكل انتشار الملوث في المياه الجوفية بعد 1 و 85 و 462 و 647 يوماً في مستوى الاتجاهين (y, z)

الموازي لمستوى الماء الجوفي. وكما هو في الشكل (5-13) فإن انتشاراً معنوياً قد حدث، وخاصة في اتجاه التدفق كما يتبين من استطلاعة الجبهة (plume). ويتعين ملاحظة أنه للتعرف على وجود ملوثات في المياه الجوفية يتعين أخذ عينات الماء داخل مساحة الجبهة (plume area) للحصول على أفضل النتائج. وإذا ما وضعت آبار أخذ العينات في أماكن خاطئة أو إذا ما تم أخذ العينات عند أعماق غير صحيحة، فإنه من غير المتوقع أن تكون المعلومات التي يتم الحصول عليها صحيحة.

حالة للدراسة

التخلص من مخلفات ذات مستوى منخفض من المواد المشعة في سهل وورد

تأتي المخلفات ذات المستوى المنخفض من الإشعاع المستخدمة في الطب، والبحث العلمي وبعض العمليات الصناعية، ومن محطات الطاقة النووية. إن معظم المخلفات بما في ذلك 95% من الكمية، يتحلل إلى مستويات مقبولة خلال مائة عام أو أقل. وبناءً على قانون التخلص من المواد المشعة ذات المستويات المنخفضة لعام 1980، فإن كل ولاية منفردة داخل الولايات المتحدة الأمريكية تكون مسؤولة عن مخلفاتها المشعة. وفي عام 1988 اتفقت ولاية كاليفورنيا مع ثلاث ولايات أخرى هي: أريزونا، داكوتا الشمالية، وداكوتا الجنوبية على تأسيس موقع نفايات ذي مستوى منخفض من المواد المشعة وذلك في ولاية كاليفورنيا. وبعد دراسات مكثفة للمناخ والجيولوجيا والنظام البيئي، والترب وهيدرولوجيا المياه الجوفية تم اختيار الموقع. وهذا الموقع هو سهل وورد الذي يقع في صحراء موهافي غرب نيدلز بولاية كاليفورنيا على نهر كولورادو. ويتميز سهل وورد بخصائص

عدة تجعله ملائماً كمكب لمخلفات نووية منخفضة المستوى. وتشمل هذه الخصائص معدل أمطار منخفض (125 مم سنوياً) وتربة سميكة غير مشبعة (190-213 متراً). إضافة لذلك، فهو يقع ضمن منطقة زلزالية منخفضة وبعيداً عن خزانات مياه جوفية هامة، وله ممر تدفق طويل لمصدر ماء أساسي (نهر كولورادو، 130 كم).

وبعد دراسات اختيار الموقع وإتمام مراجعة الخصائص البيئية وإصدار ترخيص الولاية، تقدمت ولاية كاليفورنيا بطلب للحكومة الفيدرالية بأن تقوم إدارة الداخلية للولايات المتحدة بنقل ملكية الأرض الفيدرالية إلى الولاية، وفي هذا الوقت قام ثلاثة هيدرولوجيين من ولاية كاليفورنيا (مجموعة ويلشاير) بإدراج سبع قضايا زعموا بأنها لم يتم تناولها بدرجة كافية في التقرير الخاص بالتأثير البيئي لهذا المشروع. وللوصول إلى حلول لهذه القضايا طلبت إدارة الداخلية من مجلس البحث القومي (NRC) اختيار لجنة لتقييم ادعاءات مجموعة ويلشاير، ويمكن الاطلاع على المناقشات الكاملة للقضايا السبع في تقرير سهل وورد الذي أعدته لجنة مجلس البحث القومي، وبالنسبة لهذه الحالة فإنه سيتم مناقشة قضيتين فقط من هذه القضايا السبع:

1. انتقال الملوثات خلال الطبقة غير المشبعة.
2. إمكانية الاتصال الهيدرولوجي بين موقع سهل وورد ونهر كولورادو.

القضية رقم (1): انتقال الملوثات خلال الطبقة غير المشبعة

خلصت لجنة مجلس البحث القومي إلى أن (تزايد أو احتمال انتقال الملوثات خلال المنطقة غير المشبعة إلى مستوى الماء الأرضي الحر غير متوقعة بدرجة عالية) وقد استندت اللجنة في خلاصتها على عدد من الشواهد:

(أ) المحتوى المائي، كما حدد بواسطة القياسات الوزنية للعينات وجهاز النيوترون، عند الموقع كانت منخفضة جداً؛ فمثلاً 94% من المحتويات المائية كانت أقل من 0.10 م³/م³، وعند هذه المستويات المائية المنخفضة، يكون التوصيل الهيدروليكي للتربة الطميية تحت السطحية منخفضاً جداً (انظر الشكل 5-7)، وتكون معدلات تدفق الماء تحت السطحي قريبة من الصفر.

(ب) كانت تراكيز الكلور في ماء التربة في الثلاثين متراً العليا عالية جداً، وتشير هذه المستويات المرتفعة إلى أن التدفق لأسفل لا بد أن يكون منخفضاً؛ إذ لو أن تدفق الماء لأسفل كان عالياً لأدى إلى غسل الكلور من التربة.

يحتوي ماء المطر على تراكيز قليلة من الكلور (من مياه المحيط)، وتستخدم النباتات مياه الأمطار المتساقطة على التربة في عملية النتج، لكن النباتات لا تمتص الكلور؛ لذلك فإن الكلور الكلي في قطاع التربة يزداد مع الوقت. وبحسب الوقت (t) اللازم لتراكم الكلور لأي عمق (Z) باستخدام المعادلة: (C5-1)

$$t = \frac{Z}{J_{C1}}$$

حيث يحسب الكلور الكلي من تركيز الكلور في التربة مضروباً في المحتوى المائي على أساس الحجم، وأن I_{Cl} يساوي متوسط الكلور المضاف، ويقدر على أنه يساوي 0.164 جم/م²/سنة، وعند معدل الإضافة هذا، يلزم نحو 50 ألف سنة لتراكم الكلور الذي وجد حالياً في القطاع حتى عمق $Z = 30$ سم. وقدرت معدلات تدفق الماء من بيانات الكلور هذه أن مداها يتراوح ما بين 0.3 و 0.05 مم/سنة، وهو ما يشير إلى معدل تغذية منخفضة جداً أو غير موجودة.

وعلى الرغم من أن معظم أعضاء لجنة سهل وورد قد أيدوا الخلاصات المشار إليها، فإن عضوين من بين السبعة عشر عضواً لم يوافقا عليها، وقد جادلا بأن اكتشاف وجود التريتيوم (نتج عن قنبلة تريتيوم وبذلك فإن عمره لا يتجاوز أربعين عاماً) في التربة عند عمق 30 متراً يشير إلى هجرة أسرع لماء التربة إلى أسفل مما تم افتراضه في طلب الحصول على الرخصة. أما أغلبية أعضاء اللجنة فقد أرجعوا وجود التريتيوم إلى عمق 30 متراً إلى خطوات أخذ العينات.

القضية رقم (2): إمكانية وجود اتصال هيدرولوجي بنهر كولورادو

خلصت اللجنة إلى أن (احتمال التأثير على جودة مياه النهر ستكون غير معنوية قياساً بالمستويات الطبيعية من النويات المشعة (radionuclides) الموجودة)، وقد استندت اللجنة جزئياً في خلاصاتها على قياسات الزمن اللازم للانتقال (travel time). يمكن تقدير زمن انتقال الملوثات باستخدام معادلة دارسي (المعادلة 5-7). وقد أوضحت قياسات الماء الجوي أنها في هذا الموقع توجد فوق مستوى مياه نهر كولورادو بمقدار

360 متراً، ويبلغ متوسط التوصيل الهيدروليكي المشبع للطبقة الحاملة للماء 5.8 متر/يوم. ويبلغ طول المسار الأكثر احتمالاً لتدفق الماء إلى النهر 130 كيلومتراً، وهو ما يعني تدرجاً هيدروليكياً $0.0028 = 130000/360$ متر/متر، وبتطبيق معادلة دارسي، يمكن حساب تدفق المياه الجوفية كما يلي: $0.0028 \times 5.8 = 0.016$ متر/يوم. وبافتراض أن المسامية الفعالة تساوي 0.1، فإن ذلك يعطى سرعة تدفق تساوي $0.1/0.016 = 0.16$ متر/يوم، أو 58 متر/سنة. إن زمن الانتقال لملوث لا يتفاعل مع مواد أخرى، أو بمعنى آخر، إن الزمن اللازم للوصول إلى النهر سيكون : $2240 = 58/130000$ سنة.

إن معظم نويات العناصر المشعة تتفاعل (تدمص) مع مواد الطبقة الحاملة للماء، وبذلك فإن الزمن الفعلي لانتقال الملوثات ربما يكون أطول من ذلك. إضافة إلى ذلك وكما تم التوضيح سلفاً، فإن الوقت اللازم لنقل ملوث خلال منطقة غير مشبعة يمكن أيضاً أن يستغرق مئات السنين أو أكثر، إن تحلل النويات المشعة ذات العمر القصير يكون أقل بكثير من 2240 سنة؛ وعلى ذلك، فإن النويات المشعة ذات العمر القصير لا تمثل أي تهديد لمياه نهر كولورادو.

توضح الأمثلة في الأشكال (5-12) إلى (5-14) انتقال ملوث ذي مسلك ثابت نسبياً. لكن المواد الكيميائية كثيراً ما تتحرك خلال التربة والمياه الجوفية عبر مسارات ملتوية وبطريقة لا يمكن توقعها بسهولة.

وتتميز الترب السطحية والمواد الجيولوجية الأكثر عمقاً بأنها غير متجانسة، إن ذلك هو نتيجة مباشرة لتكوّنها خلال الأزمان الجيولوجية السابقة، كما أن بناء الترب قد يختلف

أيضاً من مكان لآخر. وفي الترب ذات البناء والترب التي تحتوى على ثقوب التي تحدثها جذور النباتات وديدان الأرض، وكذلك الشقوق والمسامات الكبيرة فإن التشوهات هذه ستعمل كمسارات تسمح بحركة أسهل للماء والملوثات خلالها، ويسمى هذا النوع من الحركة بالتدفق التفضيلي (preferential flow)، وهو ما يسمح باختراق الماء والملوثات إلى أعماق أعظم وبسرعة أكبر، أو أنها تنتقل لمسافات أطول منها في تربة لا توجد بها مثل هذه التشوهات. ويمكن أن يكون التدفق التفضيلي عاملاً هاماً يسهم في تلوث المياه الجوفية.

References and Recommended reading

- Brady N.C., Weil R.R (1996) *The Nature and Property of soils*, Prentice Hall, New Jersey.
- Guymon G.L. (1994) *Unsaturated Zone Hydrology*. Prentice Hall, Englewood cliffs, New jersey.
- Hanks R.J. (1992) *Applied soil physics*, 2nd Edition. Springer Verlag, New York
- Hemond H.F. and Fechner, E.J. (1994) *Chemical Fate and Transport in the environment*. Academic Press, New York.
- Hillel, D. (1980) *Fundamental of soil Physics*. Academic Press, New York.
- Jury, W.A., Gardner, W.R., and Gardner, W.H. (1991). *Soil physics*, 5th Ed. John Wiley and Sons New York.
- Mackay D.M., Freyberg D.L., Roberts P.V., and Cherry J.A (1986) A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer:1. Approach and overview of plume movement. *Water Resources Research*. **22**, 2017-2029.
- Maidment D.R., Editor (1993) *Handbook of Hydrology* .McGraw-Hill, New- York.
- National Research Council (1995). *Ward Valley: An Examination of Seven Issues in earth Sciences and Ecology*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Porro I., Wierenga P.J., and Hills R.G. (1993) Solute transport through large uniform and layered soil columns. *Water Resources Research*. **29**, 1321-1330.
- van Genuchten, M.Th. and Wierenga P.J. (1986) Solute dispersion coefficients and retardation factors. In *Method of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (A. Klute, Editor), 2nd Edition, p.p.

1025-1045. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison Wisconsin.

- Wierenga P.J. (1995) Water and solute transport and storage. In *Handbook of Vadose Characterization & Monitoring* (L.G. Wilson, L.G. Everett, and S.J. Cullen, Editors), p.p. 41-0. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

مسائل وأسئلة

1. يتعين إضافة طول عمود الماء في أنبوب مقياس الشد (tensiometer) لقراءة مقياس الشد (معتبر عنها بالمتر ماء) للحصول على جهد الضغط عند موقع كوب المشداد، اشرح لماذا يتم ذلك؟ أو علل؟.

2. يستخدم مقياس التوتر (الشد) لقياس جهد الضغط (h) لماء التربة. وعندما يوضع مشدادان عند مستويين مختلفين من قطاع التربة فإن جهد الضغط يمكن أن يحسب عند كل عمق. وعند معرفة المسافة (العمودية للمستوى المرجعي المحدد مسبقاً، يمكننا استخدام هذه المعلومة لحساب جهود ماء التربة (H))، ومن ثم التدرج في جهد ماء التربة. ويحدد التدرج اتجاه حركة الماء (إلى أعلى أو إلى أسفل).

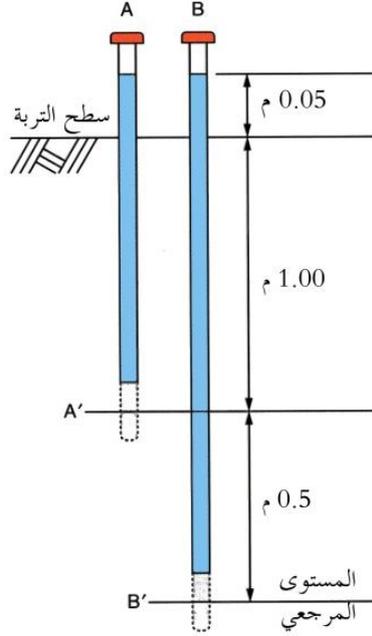
(أ) المشداد A له كوب خزفي عند عمق 1.0 متر تحت سطح التربة، بينما يوجد الكوب الخزفي للمشداد B عند عمق 1.5 متر تحت سطح التربة. وكانت القراءات عند A و B هي 1.5- و 2.0- متر ماء، على التوالي.

أحسب جهود الضغط (h) عند المستويين A و B، وحدد العمق الذي تكون التربة عنده أكثر جفافاً. أشرح.

(ب) احسب جهود ضغط ماء التربة (H) عند المستويين A و B هل إن الماء يتحرك لأعلى، أو لأسفل، أو لا يتحرك في هذه التربة غير المشبعة؟ ناقش.

(تلميح: تلعب الجاذبية دوراً كبيراً في حركة التربة. ولحل مسائل تتعلق بحركة الماء يتعين وضع مستوى مرجعياً، وللسهولة، يؤخذ عادة المرجع عند مستوى الكوب الأكثر عمقاً. ويكون

جهد الجاذبية (Z) عندئذ المسافة الرأسية بين مكان القياس والمستوى المرجعي).



شكل (5-15): توضيح للمشدادين كما هو مطلوب لإجابة السؤال 2 (أ) و (ب)

3. أضيف ماء لعمود تربة غير مشبعة (كما في الشكل 5-10) بمعدل 100 مل/ساعة ويبلغ

طول العمود 0.50 متراً ومساحة مقطعه $2 \times 10^{-3} \text{ م}^2$.

وبعد يوم واحد أضيفت مادة قائمة تعقب (tracer) غير متفاعلة لعمود التربة. بافتراض أن

المحتوى الحجمي من ماء التربة يساوي $0.25 \text{ م}^3/\text{م}^3$ ، احسب ما يلي:

(أ) سرعة ماء المسام.

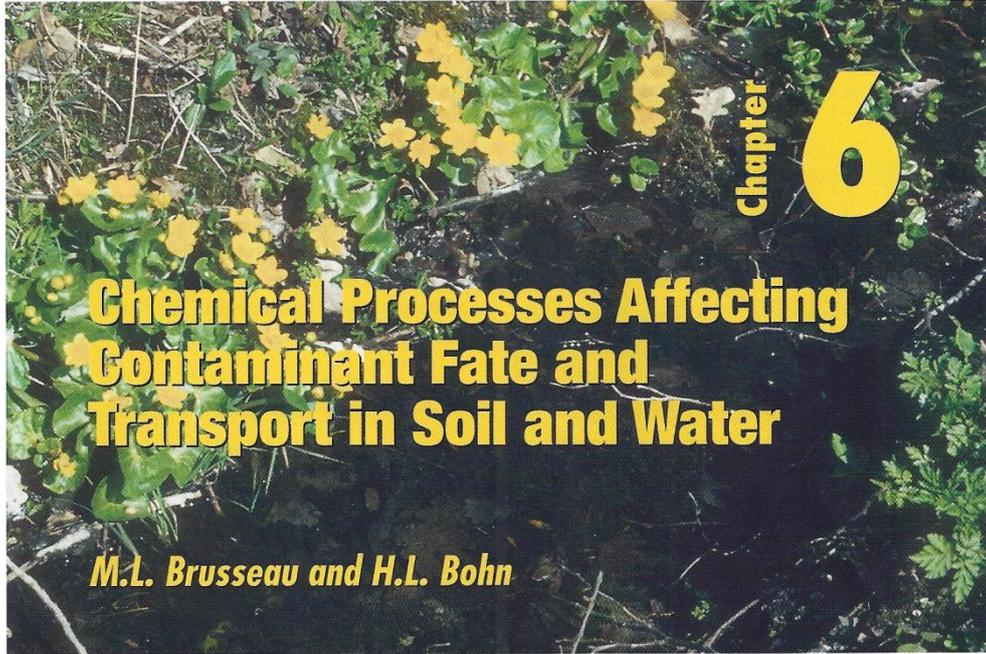
(ب) حجم مسام واحد.

(ج) الزمن بالساعات حتى تتحرك المادة القائمة (tracer) من قمة العمود (افتراض تدفق

piston flow) إلى قاع العمود.

الباب السادس

العمليات الكيميائية المؤثرة على مصير ملوث معين وحركته في التربة و الماء



تحدد الخصائص الكيميائية للتربة فيما إذا كان ملوث معين، مثل النترات، يتم شده بواسطة التربة أو أنه سيغسل إلى المياه الجوفية. إلى أعلى نبات الخوذان (Ranunculus) ذو الزهور الصفراء اللون. ينمو في مياه صرف ملوثة بالنترات.

1.6 أطوار التربة

تتكون التربة من ثلاثة أطوار على الأقل: الطور الصلب (حبيبات التربة)، والطور السائل (الماء)، والطور الغازي (هواء التربة)، وعندما تتلوث التربة بملوث ما، فإن الملوث قد يرتبط بطور أو أكثر من هذه الأطوار. وتعتمد درجة توزيع الملوث فيما بين أطوار التربة على

خصائص كل من الملوث وأطوار التربة. إن معرفة ما إذا كان؟ أو لماذا؟ أو كيف سيرتبط ملوث معين بأطوار التربة مهم لمعرفة مصير الملوث في التربة. لذلك، سيتم في بداية هذا الجزء التركيز على توزيع الملوثات فيما بين اثنين أو أكثر من هذه الأطوار (بمعنى، عمليات الانتقال بين الأطوار). وسيتم البدء فيما يلي باختبار عمليات الانتقال بين الأطوار بالملوثات:

التبخر: وهو التحول بين طور الملوث ذاته والطور الغازي.

الذوبان: وهو التحول بين طور الملوث ذاته وطور الماء.

التطاير: وهو التحول بين طور الماء والطور الغازي.

الإدمصاص: وهو التحول بين طور الماء والطور الصلب.

إن هذه العمليات موضحة في الشكل (6-1).

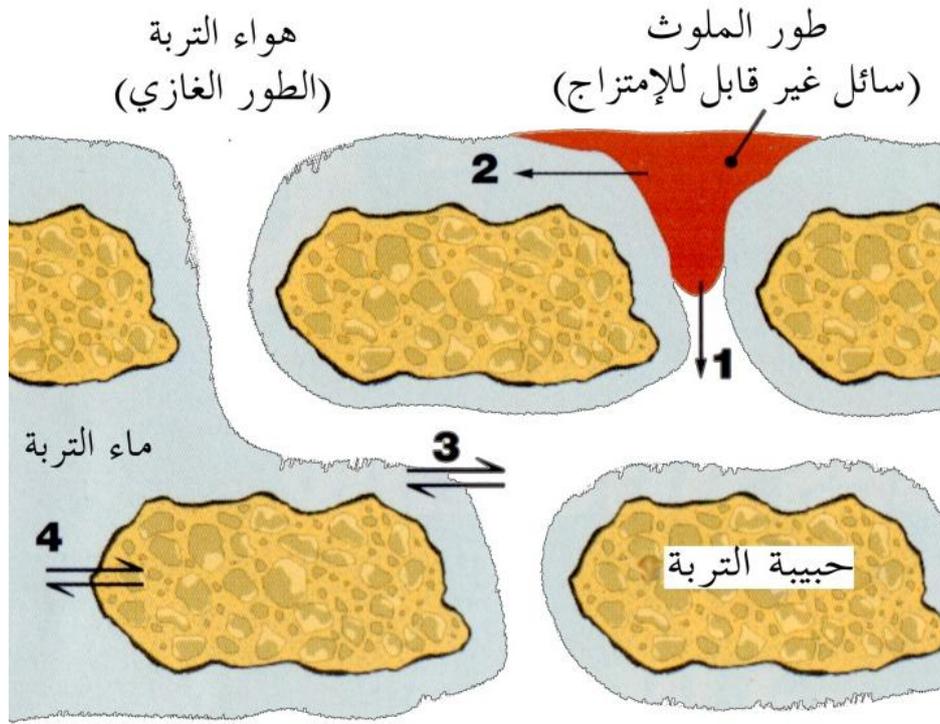
قد يكون كيفية تحول الملوثات غير العضوية والعضوية من طور إلى آخر مختلفة تماماً، لهذا سيتم تناول كل منها على حدة. أما في الجزء الثاني، فسيتم معاناة حركة أو انتقال الملوثات التي تتعرض للإدمصاص. وبعد ذلك سيتم بإيجاز مناقشة نوعين من التفاعلات الكيميائية التي يمكن أن تغير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للملوثات.

2.6 القابلية للذوبان والتطاير

1.2.6 ذوبانية الملوثات غير العضوية

إن مدى تحول أيونات جزيئات ملوث معين من صورتها النقية إلى صورة سائلة هو ذوبانيتها في الماء. ونظراً لشحنتها الكهربائية فإن الأيونات غير العضوية ستتفاعل بقوة مع

ذرة أكسجين لجزيء الماء (HOH). وهكذا، فإن الأيونات غير العضوية التي تم بسهولة إحاطتها بغلاف مائي تظهر قدرة عالية على الذوبان. لكن عادة ما توجد تداخلات منافسة تحد من ذوبان مركبات غير عضوية كثيرة. إن واحداً من العوامل الأساسية في الذوبانية هو الطاقة اللازمة لكسر الروابط بين جزيئات الطور الصلب. وهناك عامل رئيسي آخر هو وجود مكونات لمحلل آخر يمكن أن تكون رابطة مع الأيون.



شكل (1-6): تحول الأطوار الملوث مع طوري الماء والغاز: (1) التبخر (2) الذوبان (3) التطاير (4) الإدمصاص.

تحت معظم الظروف الطبيعية تكون تفاعلات أيونات العناصر القلوية (K⁺, Na⁺, Li⁺) والعناصر الأرضية (Ca²⁺ و Mg²⁺) مع مكونات محاليل أخرى ضعيفة نسبياً، وهو ما يعني أن هذه الأيونات غير العضوية يمكن أن تظل ذائبة في الماء. لكن كثيراً من الأيونات متعددة الشحنة تتفاعل بقوة مع جزيء الماء (HOH) لدرجة يمكن لهذه الأيونات أن تستخلص أيونات H⁺ من جزيء الماء لتكون هيدروكسيدات مثل SiO₂, Al(OH)₃, FeOOH. ونظراً لأن جزيئات الهيدروكسيدات هذه لا تحمل شحنة، فإنها تميل إلى الترسب من المحاليل المائية. إن بعض الكاتيونات عالية الشحنة (مثل: C⁴⁺, S⁶⁺) تتفاعل بقوة أكبر مع الأكسجين وتوجد فقط في صورة أيونات سالبة مؤكسدة (SiO₄²⁻, CO₃²⁻). وعلى الرغم من أن شحنة هذه الأيونات كان يفترض أن تجعلها قابلة للذوبان في الماء فإن بعضاً من هذه الأيونات (PO₄³⁻, MoO₄²⁻, CrO₄²⁻, PbO₄⁴⁻)، تكون مركبات لا تحمل شحنة مع أيونات موجبة متعددة التكافؤ (Ca²⁺, Fe⁺³, Al³⁺) وبذلك فإنها تصبح بدرجة كبيرة غير قابلة للذوبان.

يعبر عن ذوبانية المركبات غير العضوية في الماء بمعامل ناتج الذوبانية (Ksp)، الذي يتم تحديد قيمته تحت ظروف مثالية باستخدام مركبات نقية وماء نقي أيضاً، لكنه في حالة المواد الصلبة المعقدة مثل الترب، يكون ناتج الذوبانية مؤشراً غير دقيق لذوبانية الأيونات غير العضوية في الماء. وحالة ما تكون ذوبانية أيون معين في الترب أقل من القيمة المتوقعة باستخدام معامل ناتج الذوبانية (Ksp)، إضافة إلى ذلك، فإن الذوبانية تقل عادة مع كمية الأيون في النظام، حيث تنخفض عموماً متزامنة تقريباً مع الوقت بعد إضافة الأيون للتربة.

2.2.6 ذوبانية الملوثات العضوية

تعتمد الذوبانية المائية للملوثات العضوية بقوة على درجة تفاعل الماء وجزئيات الملوث وفي معظم الحالات، يمكننا الاستناد إلى القاعدة العامة التي تقول (شبيه الشيء يذوبه) للتعنب بالذوبانية. ونظراً لأن الماء عالي القطبية، فإن الذوبانية المائية للمركبات تعتمد بقوة على قطبية جزيئاتها، وبسبب أن الماء يمكنه التفاعل بسهولة مع مركبات قطبية أخرى، فإن الذوبانية المائية للمركبات العضوية الأيونية أو القطبية تكون عالية نسبياً، وعلى العكس يلزم للماء طاقة أكبر بكثير لتتفاعل مع، أو لتغلف مركبات عضوية لا قطبية، وبذلك فإن ذوبانية المركبات غير القطبية تكون عموماً أقل كثيراً من تلك المركبات القطبية والأيونية، إن ذوبانية ملوثات عضوية ممثلة مبينة في الجدول (6-1)، حيث يلاحظ أن الفينول السائل عالي القطبية يذوب في الماء بدرجة أعلى بكثير مقارنة بالبنزين السائل غير القطبي.

تحت الظروف الطبيعية (درجة الحرارة $T = 25^\circ\text{C}$ ، والضغط $P = 1$ جوي) توجد المركبات العضوية في صورتها النقية كمواد صلبة (مثل: النفثالين، والأنثراسين) وسوائل (مثل: البنزين والتولوين والزايلين)، وغازات (مثل: الميثان والبروبان). وتحتاج الإذابة إلى طاقة لكسر الروابط بين الجزيئات؛ وعلى ذلك تعتمد المركبات العضوية جزئياً على صورة المركب، فمثلاً تلزم طاقة أكبر لكسر الروابط الأقوى في المواد الصلبة من الروابط الضعيفة في حالة السوائل. وبذلك تكون ذوبانية المركبات العضوية الصلبة عادة أقل منها في حالة المركبات السائلة (انظر الجدول 6-1).

جدول (6-1): الذوبانية في الماء والضغط البخاري لمركبات عضوية مختارة

المصدر (Verschuieren, 1983)

المركب	الذوبانية في الماء (مجم/ لتر)	الضغط البخاري (مم زئبق) [*]	ثابت هنري (H-بدون وحدات)	الحالة (عدد درجة حرارة وضغط قياسي) ^{**}
البنزين	1780	76	0.18	سائل غير قطبي
التولوين	515	22	0.23	سائل غير قطبي
نفتالين	30	- 0.5	0.02	صلب غير قطبي
فينول	82000	0.2	0.00005	سائل قطبي

^{*} 1 مم زئبق = 133 باسكال

^{**} درجة الحرارة = 20م°، ضغط = 1.0 جوي؛ 1.0 جوي = 0.1 ميغا باسكال.

توجد خاصية مهمة للمركبات العضوية السائلة وهي مدى قدرتها على الاختلاط مع الماء - أي امتزاجها أو عدم امتزاجها معه. إن السائل العضوي الذي يمكن مزجه هو الذي يستطيع الاختلاط مع الماء منتجاً طوراً سائلاً واحداً. وتعتبر الكحولات البسيطة مثل الميثانول والايثانول أمثلة للسوائل القابلة للمزج، بمعنى أنها تعتبر قابلة للذوبان في الماء بدرجة لانهائية. وعلى العكس، فإن السائل غير القابل للامتزاج هو الذي لا يمكن خلطه مع الماء. فمثلاً، يعتبر البنزين وهو مركب هيدروكربوني عطري ومكون رئيسي للجازولين سائلاً غير قابل للامتزاج مع الماء وعندما يخلط حجم من بنزين سائل ونقي مع ماء، فإن السائلين ينفصلان بسرعة عن بعضهما بعد توقف عملية الخلط لكنه، ومثل معظم العمليات الكيميائية فإن القابلية للامتزاج لا تعتبر ظاهرة إما أن تحدث بالكامل أو لا تحدث وبذلك، فإن جزءاً صغيراً نسبياً من جزيئات البنزين ستنتقل إلى طور الماء، أي أن هذا الجزء من

البنزين سوف يذوب. إن أقصى كمية من البنزين يمكن لها الذوبان في الماء تمثل ذوبانية البنزين المائية. وعلى الرغم من أن الكمية القصوى التي يمكن أن تذوب في الماء من محلول لا يمتزج ربما تكون صغيرة جداً، فإنها قد تكون عالية الأهمية، فمثلاً تبلغ ذوبانية البنزين في الماء أقل من 2 جرام في اللتر، إلا أن المستوى الأقصى من البنزين المسموح به كملوث في الولايات المتحدة الأمريكية يبلغ 5 ملليجرامات فقط في اللتر الواحد.

ترتبط ذوبانية الملوثات العضوية في الماء بالتفاعلات الجزيئية للملوث مع الماء والملوث مع الملوث، وتعتمد بالدرجة الأولى على خصائص المركبات المعنية لكن عوامل أخرى ربما تؤثر أيضاً على الذوبانية. ومن العوامل درجة الحرارة. إن معظم المركبات العضوية تصبح أكثر ذوباناً مع زيادة درجة الحرارة، على الرغم من أن البعض الآخر يسلك اتجاهاً معاكساً. وعموماً، فإن الذوبانية تتغير بمعامل يقل عن 2 في مدى درجات حرارة أغلب النظم الطبيعية (0 إلى 35م°). كذلك فإن الملوحة أو القوة الأيونية يمكنها أيضاً أن تسبب انخفاضاً صغيراً في ذوبانية المركبات العضوية غير القطبية من خلال عملية تعرف بتأثير الترسيب (Salting - out effect)، ويكون هذا التأثير متوسط أيضاً بالنسبة للظروف المناخية المثالية، ويؤدي إلى تغير في الذوبانية بمعامل يقل عن 2.

في المناقشة السابقة، تم تناول الذوبانية لملوثات عضوية مفردة، من حيث انتقال جزيئات ملوث من طور ملوث نقي (صلب، سائل، أو غاز) إلى ماء. لكن مصادر ملوثات هامة كثيرة تحتوي على ملوثات متعددة. إن الأمثلة الجيدة لهذا النوع من التلوث هي السوائل متعددة المكونات وغير القابلة للمزج مع الماء مثل الجازولين، ووقود الديزل، وقطران الفحم.

إن معرفة السلوك التوزعي (partitioning) للسوائل متعددة المكونات ضروري جداً للتنبؤ بتأثيرها على جودة البيئة.

إن توزع مكونات مركب معين في الماء يتم التحكم فيه بواسطة الذوبانية المائية للمكون وتركيب السائل. ويوجد أسلوب بسيط لتقدير ذوبانية سوائل متعددة التركيب يشمل افتراضاً لسلوك مثالي في كل من الماء والطور العضوي وتطبيق قانون راولت (Raoult's law):

$$C_{w,i} = X_{o,i} S_{w,i} \quad (1-6)$$

حيث أن:

$$C_{w,i} = \text{التركيز المائي (مول/ لتر) للمكون } (i).$$

$$X_{o,i} = \text{الكسر المولي للمكون } (i) \text{ في السائل العضوي.}$$

$$S_{w,i} = \text{الذوبانية المائية (مول/ لتر) للمكون } (i).$$

ويساوي الكسر المولي تركيز المكون (i) في السائل غير القابل للمزج مع الماء.

ويوضح قانون راولت التركيز المائي الذي يتم الحصول عليه لأي مكون يتناسب مع

كمية هذا المكون في السائل غير القابل للمزج .

وكمثال أفترض أنه يوجد لدينا سائل من مكونين غير قابلين للمزج مع الماء، يكون

فيه الكسر المولي لكل مكون (B,A) يساوي 0.5، وهو ما يعني وجود كمية متساوية من كل

مكون، ولنفترض أيضاً أن الذوبانية المائية للمكون A تساوي 100 مجم/لتر، وللمكون B،

10 مجم/لتر. ونرغب الآن في حساب تركيز كل من A و B في حجم ماء متلامس مع

السائل غير القابل للمزج. وباستخدام قانون راولت، نجد أن التركيز المائي للمكون A يساوي

50 مجم/لتر، وللمكون B، 5 مجم/ لتر، وبذلك فإن التركيز المائي لكل مكون يساوي نصف ذوبانيته المائية ويعود ذلك إلى أن المكونين يتنافسان مع بعضهما للذوبان في الماء. إن فحص المعادلة (6-1) يوضح لنا أنه عندما يكون الكسر المولي يساوي واحداً (أي سائل ذو مكون واحد)، يكون التركيز المائي مساو للذوبانية المائية.

3.2.6 تبخر الملوثات العضوية

التبخّر هو الانتقال من الطور السائل أو الصلب النقي إلى الطور الغازي، لذلك فإن الضغط البخاري للملوث معين هو ضغط طوره الغازي الذي يكون في اتزان مع الطور الصلب أو السائل وهو مؤشر للدرجة التي سيتبخّر بها المركب، وبعبارة أخرى يمكننا أن ننظر إلى أن الضغط البخاري لمركب ما على أنه يمثل ذوبانية في الهواء، ويمكن أن يصبح التبخر عملية انتقال هامة عندما يوجد ملوث في طور نقي في منطقة الفادوز (Vadoze Zone)، حيث تنقل جزيئات الملوث إلى داخل بيئة التربة.

في الوقت الذي يتم التحكم في الذوبانية بواسطة كل من التفاعلات الجزيئية لملوث مع ملوث وملوث مع ماء، فإن التبخر يعتمد بالكامل تقريباً على تفاعلات ملوث مع ملوث (أي على طاقة الربط) في الطور الصلب أو السائل، ويمكن إهمال التفاعلات بين الجزيئية (intermolecular) للطور الغازي لأن الفراغ بين جزيئات الغاز تكون عادة كبيرة جداً. لهذا، وعلى مستوى بسيط، يمكننا القول أنه كلما زادت طاقة الربط بين جزيئات ملوث معين، قلّ ضغطه البخاري، لذلك فإن الضغط البخاري للسوائل يكون عادة أعلى بكثير من ذلك الخاص بالمواد الصلبة (انظر الجدول 6-1)، ولا غرابة إذاً فإن الضغط

البخاري ملوث ما يعتمد بقوة على درجة الحرارة، وذلك نظراً للتأثير القوي لدرجة الحرارة على عمليات التحول إلى الطور الغازي.

4.2.6 تطاير الملوثات العضوية

يعتبر التطاير وهو انتقال ملوث بين طوري الماء والغاز، وسيلة هامة لنقل مركبات عضوية كثيرة في منطقة الغادوز، ويكون التطاير مختلفاً عن التبخر الذي يحصر انتقال جزئيات ملوث معين من حالتها النقية إلى الطور الغازي، فمثلاً يسمى انتقال جزئيات البنزين من بركة جازولين إلى الهواء الجوي تبخراً، بينما يوصف انتقال جزئيات البنزين من ماء (يكون ذائباً فيه) إلى الهواء الجوي تطايراً، ويُعطى الضغط البخاري لمركب ما فكرة عامة عن مدى تطاير هذا المركب، لكن التطاير يعتمد أيضاً على ذوبانية المركب وكذلك عوامل بيئية أخرى.

يوصف توزيع ملوث معين بين طوري الغاز والماء عند الاتزان بواسطة قانون هنري

(Henry's Law):

$$C_g = HC_w \quad (2-6)$$

حيث أن :

C_g = تركيز الملوث في طور الغاز (بالمليجرام/لتر).

C_w = تركيز الملوث في طور الماء (بالمليجرام/لتر).

H = ثابت هنري (بدون وحدات).

ويمكن استخدام قانون هنري لتقييم مدى تفضيل ملوث معين لطور الماء والغاز.

لتأخذ مثلاً، تناول تفاضلية ثلاثة ملوثات A و B و C والتي توجد في ثلاثة أوعية منفصلة ومغلقة، ويحتفظ كل واحد منها بنفس الحجم من الماء والغاز. افترض أن ثابت هنري للملوث A ($H=1$)، وتعني القيمة واحد أن تركيز الملوث في الهواء يساوي تركيزه في الماء، لذلك فإن الملوث (A) يفضل الماء والهواء بنفس الدرجة. وافترض أن ثابت هنري للملوث B ($H=0.1$)، وتعني هذه القيمة أن تركيز الملوث في الهواء يقل عشر مرات عن تركيزه في الماء؛ أي أن الملوث B يفضل الماء. وإذا كان ثابت هنري للملوث C ($H=10$)، فإن هذا يعني أن تركيزه في الهواء يزيد عشر مرات على تركيزه في الماء.

وعندما نستخدم قانون هنري نفترض وجود ظروف اتزان، وهو ما يستنتج منه أن الانتقال بين الطور الغازي والماء يكون فورياً، وعلى الرغم أن الانتقال الفوري غير مضمون في النظم الطبيعية، إلا أن معدل انتقال ملوث بين طوري الماء والغاز في التربة يميل لأن يكون سريعاً جداً مقارنة بعمليات نقل أخرى، لذلك فإن الافتراض بأن الانتقال فوري نادراً ما يكون مشكلة هامة.

3.6 إدمصاص (شد) الملوثات

يعتبر الإدمصاص عملية رئيسية تؤثر على انتقال الملوثات في التربة، إن التعريف الواسع للإدمصاص (أو الشد) هو ارتباط جزيئات الملوث مع الطور الصلب للتربة (حبيبات التربة)، وفي الأجزاء التالية سوف تناقش كيفية إدمصاص الملوثات على التربة، وكيفية التقدير الكمي للإدمصاص. وعلى الرغم من أن فحصنا لآليات الإدمصاص سوف تركز على كل آلية بمعزل عن غيرها، فمن المهم فهم أن إدمصاص ملوث معين كثيراً ما يشمل أكثر من آلية

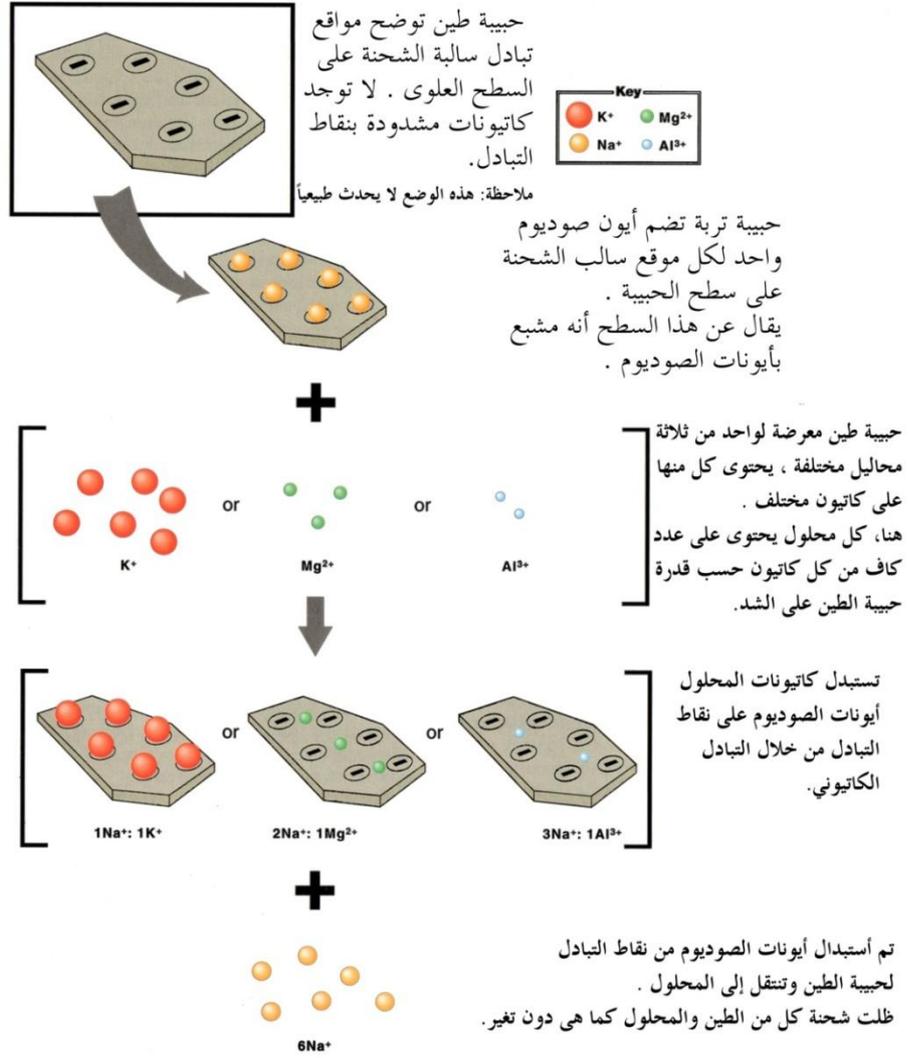
واحدة [ملاحظة: تحتفظ الترب بالمواد غير العضوية والعضوية عن طريق آليات معقدة كثيرة، وعلى ذلك فإن الشد قد يكون كلمة أكثر ملاءمة للاستخدام من الإدمصاص، لكنه سوف يتم هنا استخدام كلتي التسميتين].

1.3.6 آليات الإدمصاص الخاصة بالملوثات غير العضوية

نظراً لأن مكونات التربة مثل الطين تكون غالباً سالبة الشحنة، فإن التبادل الكاتيوني يمثل آلية رئيسة لإدمصاص الملوثات غير العضوية (شكل 2-6) وعموماً، فإن الأيونات موجبة الشحنة تنجذب للمواقع سالبة الشحنة على حبيبات الطين. وتشمل الكاتيونات الشائعة بالتربة كلا من: H^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ، التي يمكن أن توجد عند مواقع التبادل أو في محلول التربة. وإذا ما تم في محلول التربة تجاوز نواتج الذوبانية لهذه الكاتيونات، يمكن لهذه الكاتيونات أن ترتبط بأنواع كيميائية سالبة وتترسب من المحلول في صورة أملاح غير ذائبة. وعادة ما تكون الكاتيونات في محلول التربة في حالة اتزان مع الكاتيونات التي توجد عند مواقع التبادل، بينما تكون الكاتيونات عند مواقع التبادل أكثر عدداً من تلك الموجودة في المحلول. ويتحكم عدد الكاتيونات عند مواقع التبادل في أعداد تلك الكاتيونات التي توجد في محلول التربة من خلال آلية التبادل الكاتيوني. وعلى ذلك فإن كاتيونات محلول التربة التي تأتي مقتربة من كاتيون معين يوجد عند موقع تبادل تكون قادرة على استبدال ذلك الكاتيون.

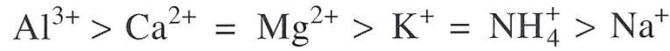
فمثلاً يمكن لكاتيون Na^+ أحادي الشحنة إحلال أو استبدال أيون K^+ أحادي الشحنة، بينما يستطيع كاتيون Mg^{2+} ثنائي الشحنة أن يستبدل كاتيون Ca^{2+} ثنائي الشحنة أو كاتيونين أحاديا الشحنة. و يعتمد كثيراً فيما إذا كان أيون معين سيتم استبداله أم لا على

كثافة الشحنة لكل من الكاتيونين المعينين، وعموماً فإن الكاتيونات الأعلى تكافؤاً يتم شدها بقوة أكبر عند مواقع التبادل.



شكل (6-2): التبادل الكاتيوني على حبيبات الطين.

ويستخدم مصطلح القابلية للإدمصاص (adsorption affinity) لوصف القوة التي يشد بها كاتيون معين مدمص عند موقع تبادل ما. وفيما يلي قابلية الإدمصاص لعدد من الكاتيونات الشائعة، في ترتيب تنازلي:



كما يؤثر حجم الكاتيون أيضاً على القابلية للإدمصاص، ومن ثم فإن Na^{+} وهو كاتيون صغير الحجم ويكون عادة عالي التميؤ، يتميز بقابلية إدمصاص منخفضة جداً ويمكن استبداله بسهولة كبيرة. ومع استهلاك أيونات محلول التربة بواسطة الكائنات الدقيقة أو امتصاصها بواسطة النباتات، فإن الاتزان بين تراكيز كاتيونات محلول التربة وتراكيز كاتيونات نقاط التبادل يتعرض للاضطراب مؤدياً إلى استبدال الكاتيونات من الغرويات إلى محلول التربة. وعندما لا تحتوي نقاط التبادل على كاتيون معين، فإن تراكيز محلول التربة من هذا الكاتيون يمكن تعويضها عن طريق ذوبان أملاح مترسبة (شكل 6-3). وبغض النظر عن آلية استبدال الكاتيونات في محلول التربة، فإن التركيز الأقصى لكاتيونات معينة يتوقف على نواتج الذوبان لكافة أنواع الكاتيونات/الأنيونات في المحلول، وعلى ذلك يمكن النظر إلى نقاط التبادل والأملاح المترسبة كإمدادات احتياطية للكاتيونات لتعويض محلول التربة.



شكل (3-6): مسارات ذوبان وامتصاص المعادن في التربة.

يعتبر التبادل عند نقاط سالبة الشحنة على سطوح التربة آلية شد أساسية لكاتيونات العناصر الثقيلة، التي تشكل إحدى فئات الملوثات المهمة. وتشمل هذه المجموعة كل من الكاديوم والرصاص والزنك. إن حقيقة انجذاب هذه الكاتيونات للتربة يؤثر أيضاً على حركة هذه الكاتيونات، وهو ما يؤثر بدوره على إمكانية غسيل تلك الكاتيونات خلال قطاع التربة. وهناك عاملان هامين يؤثران على حركة الأيونات في التربة وهما ذوبانية الأيون وشحنته. وعموماً، فإن الأيونات الأنيونية (سالبة الشحنة) لا تنجذب لنقاط تبادل التربة، التي تكون غالباً سالبة الشحنة، لذلك فإن الأيونات عادة متحركة جداً. ومن أمثلة الأيونات

المتحركة كل من Cl^- و NO_3^- . بينما تميل المواد الكيميائية التي ليست متحركة بنفس القدر لأن تكون كاتيونية أي موجبة الشحنة و/ أو قليلة الذوبانية، فمثلاً تميل أيونات Al^{3+} أو Cd^{2+} للإدمصاص عند نقاط التبادل الكاتيوني، بينما تميل أنواع غير ذائبة مثل $H_2PO_4^-$ للترسب من محلول التربة. إن حركة الكيماويات عموماً لها دلالات عميقة على احتمال انتقالها خلال التربة ومنطقة الفادوز ومنها إلى المياه الجوفية، وهي بذلك تؤثر مباشرة على احتمال تلوث المياه الجوفية.

2.3.6 آليات الإدمصاص الخاصة بالملوثات العضوية

إن الآليات التي يتم عن طريقها إدمصاص العديد من الملوثات العضوية أو شدها بواسطة التربة تكون عادة مختلفة تماماً عن تلك الخاصة بالملوثات غير العضوية، ويمكننا هنا استخدام قاعدة (شبيه الشيء يذيه) لتسهيل شرح إدمصاص المركبات غير القطبية، إن السطح السائد لإدمصاص الملوثات العضوية هي المادة العضوية المرتبطة بالتربة. وتعتبر المادة العضوية عموماً أقل قطبية من الماء وهي توفر ظروفاً أكثر ملاءمة للملوثات العضوية غير القطبية، لذلك فإن إدمصاص المواد العضوية غير القطبية مدفوع بالدرجة الأولى بواسطة تأثير كراهية الماء - أي عدم الانسجام بين الماء والمركب العضوي. وعليه فإن الملوثات العضوية تفضل الارتباط بالمادة العضوية للتربة لأن قطبيتها أكثر تشابهاً.

تجدر الإشارة إلى أن المركبات العضوية ليست بأجمعها غير قطبية، بل أن بعض الملوثات العضوية تكون قطبية أو أيونية، وأن الآليات التي تتحكم في شدها مشابهة لتلك التي تتحكم في شد الملوثات غير العضوية (مثلاً، التبادل الأيوني)، وتكون الكثير من

الملوثات العضوية الهامة القابلة للتأين (مثل الفينولات والكلوروفينولات) سالبة الشحنة تحت الظروف البيئية، ونظراً لأن معظم حبيبات التربة تملك صافي شحنة سالبة، فإنها لا تجذب الملوثات العضوية سالبة الشحنة، ويعني هذا أن إدمصاص الملوثات سالبة الشحنة يكون في العادة قليلاً جداً.

إن قطبية أي ملوث، سواء كان عضوياً أو غير عضوي، تكون محدداً مفصلياً للدرجة التي يدمص بها ملوث أو يشد بواسطة التربة. لكن، الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة تعتبر أيضاً عوامل هامة. فعلى سبيل المثال، يُحدد إدمصاص ملوثات عضوية غير قطبية عادة بواسطة كمية المادة العضوية المرتبطة بالتربة. كذلك فإن السعة التبادلية الكاتيونية للتربة ومحتواها من الطين وأكاسيد الفلزات تكون هامة لإدمصاص الملوثات الأيونية وتلك القابلة للتأين.

3.3.6 الإدمصاص الحراري (Sorption Isotherm)

إن الإدمصاص الحراري (الذي يقاس عند درجة حرارة واحدة) هو ببساطة وصفاً كيمياً للعلاقة بين تركيز الملوث المدمص بواسطة التربة والتركيز في الماء، ومن بين العديد من صور الإدمصاص الحراري التي تستخدم لوصف الإدمصاص، فإن أبسطها هي الصورة الخطية (التي تستند على نفس فكرة قانون هنري).

$$S = KC_w \quad (3-6)$$

حيث أن: S = تركيز الملوث المدمص بواسطة التربة (مجم/كجم).

K = معامل الإدمصاص (لتر/كجم أو مل/جم).

وكلما زادت قيمة K ، زادت الدرجة التي يتم بها إدمصاص الملوث بواسطة التربة، إن الملوث الذي يوصف إدمصاصه بالتربة بخط إدمصاص حراري مستقيم يبرز وجود تناسب بين تركيز الملوث في الماء والتركيز المدمص من هذا الملوث. ويكون إدمصاص كثير من الملوثات العضوية غير القطبية خطياً. ويوضح الشكل (4-6) مثلاً لخط إدمصاص حراري مستقيم (حيث تكون $l=n$). وتظهر بعض الملوثات العضوية وكثير من الملوثات غير العضوية إدمصاصاً غير خطي، إن إحدى معادلات الإدمصاص الحراري غير الخطي شائعة الاستخدام هي معادلة فريندليخ للإدمصاص (Freundlich isotherm)، الموضحة أدناه:

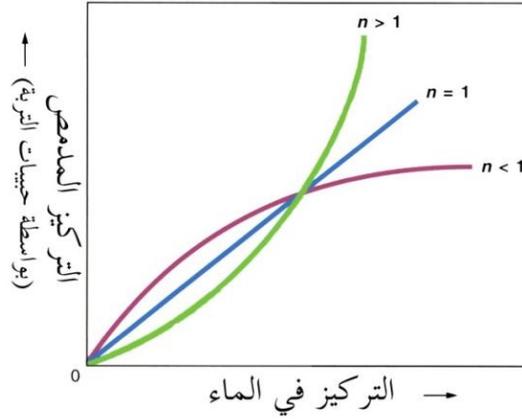
$$S = K_f C_w^n \quad (4-6)$$

حيث أن: K_f = معامل إدمصاص فريندليخ.

n = معامل أسى يرتبط بآلية أو آليات الإدمصاص.

يوضح الشكل (4-6) أمثلة لإدمصاص حراري لا خطي عندما تكون $n < 1$ ،

$n > 1$.



شكل (4-6): (a) علاقة خطية ($l=n$). (b) علاقة لا خطية ($n < 1, n > 1$) لإدمصاص ملوثات.

يكون لدرجة الحرارة تأثير قليل على إدمصاص الملوثات العضوية، ولكنة تأثير مقاس. ويعتمد تأثير درجة الحرارة على نوع آلية الإدمصاص، وكما لاحظنا فإن إدمصاص المركبات العضوية منخفضة القطبية يتم التحكم فيها بواسطة تفاعلات الذوبان المائية. لذلك إذا أحدث تغيراً في درجة الحرارة تغيراً في الذوبانية، يكون من المعقول أن تغيراً في درجة الحرارة ربما يسبب أيضاً تغيراً في الإدمصاص. إن المركبات العضوية الكبيرة كالانتراسين، مثلاً تزداد ذوبانيتها في الماء مع زيادة درجة الحرارة. لذلك فإن إدمصاص الأنتراسين ربما ينخفض مع زيادة درجة الحرارة. لكن آليات إدمصاص الملوثات غير العضوية تشمل تفاعلات قوية بين الملوث والسطح الذي يدمص عليه، ويمكن أن تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تنشيط هذا التفاعل مما ينتج عنه زيادة في الإدمصاص. كما أن تأثير الملحية أو القوة الأيونية على الإدمصاص يعتمد أيضاً على نوعية آلية الإدمصاص المستعملة. وبالنسبة للملوثات غير القطبية يكون التأثير في العادة ضئيلاً نسبياً، بينما يمكن أن يكون التأثير معتبراً في حالة الملوثات غير العضوية.

يقوم استخدام الإدمصاص الحرارى على فرضية وجود توازن بين طوري الحالة الصلبة والماء، ويكون هذا الافتراض عادة صحيحاً للملوثات التي تدمص بواسطة التبادل الكاتيوني. لكنه، قد لا يكون صحيحاً مع كثير من الملوثات العضوية. فمثلاً أظهر البحث أن معدل الإدمصاص للعديد من الملوثات العضوية غير القطبية كان بطيئاً جداً، حيث يستغرق ما بين عدة ساعات إلى عدة أشهر ليصل إلى الاتزان. ويعود معدل الإدمصاص البطيء عادة لبطء انتشار جزيئات الملوثات خلال فراغات التربة التي تتميز بفتحات أو مسامات صغيرة.

ونحن نعرف مثلاً أن إدمصاص كثير من الملوثات العضوية تسيطر عليه المادة العضوية بالتربة، التي تملك تركيباً متعدد البلمرة. ويمكن أن تأخذ جزيئات الملوثات وقتاً طويلاً لتتحرك من السطح إلى داخل هذه المادة العضوية متعددة البلمرة. أيضاً، تتميز بعض الترب بوجود حبيبات صلبة لها فراغات مسامية صغيرة، تنتشر خلالها جزيئات الملوثات ببطء شديد.

4.6 انتقال الملوثات المدمصة

الإدمصاص عملية مهمة لأنها تقلل من سرعة انتقال ملوث معين مقارنة بسرعة الماء، بمعنى أنه طالما أدمص جزيء ملوث ما بواسطة التربة، فإنه يعاق من الحركة مع الماء، لذلك فإن الملوث يستغرق وقتاً أطول ليقطع مسافة معينة عما هو في حالة الماء. ولأخذ في الاعتبار تأثير الإدمصاص على انتقال ملوث معين، يتعين تحويل المعادلة الكيميائية العامة رقم (5-18) التي وردت في الباب (5). وللتبسيط، افترض تدفق ثابت للماء في اتجاه واحد خلال بيئة متجانسة ومسامية، وعندئذ تكون المعادلة التي تحدد انتقال ملوث ذائب في الماء ويمكن إدمصاصه على حبيبات التربة كما يلي:

$$\theta \frac{\partial C_w}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = -q \frac{\partial C_w}{\partial z} + \theta D \frac{\partial^2 C_w}{\partial z^2} \quad (5-6)$$

حيث أن: $Q =$ الكثافة الظاهرية للتربة (ميجا جرام / م³).

$\theta =$ محتوى التربة من الرطوبة، الذي يساوي المسامية عندما تكون التربة مشبعة (م³ / م³).

$Z =$ المسافة (م).

أما بقية الرموز فهي كما تم تعريفها سابقاً.

وفي المعادلة (5-6) توجد قيمتا تركيز غير معروفتين، وهما C_w و S ، لذلك فإنه يلزم معادلة إضافية أخرى لحل المسألة، على أن تربط هذه المعادلة بين كل من تركيز الملوث في الطور المدمص والتركيز الذائب، وتكون هذه علاقة دالة إدمصاص حراري، التي تم التعرض لها سابقاً. ولاتباع أبسط الطرق سنستخدم الإدمصاص الحراري الخطي، واستبدال الرمز S في المعادلة (5-6):

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K \frac{\partial C_w}{\partial t} \quad (6-6)$$

وتعاد كتابة المعادلة كما يلي (مع إعادة الترتيب):

$$\left[1 + \frac{\rho K}{\theta} \right] \frac{\partial C_w}{\partial t} = -v \frac{\partial C_w}{\partial z} + D \frac{\partial^2 C_w}{\partial z^2} \quad (7-6)$$

حيث أن:

$$v = \text{سرعة الماء المتحرك.}$$

أما المقدار الذي وضع بين قوسين في المعادلة (7-6) فيسمى بعامل الإبطاء (retardation factor, R)، الذي يعرف بواسطة المعادلة:

$$R = \left[1 + \frac{\rho K}{\theta} \right] = \frac{v_w}{v_p} = \frac{d_w}{d_p} \quad (8-6)$$

حيث أن:

$$v_w = \text{سرعة الماء (م/ثانية).}$$

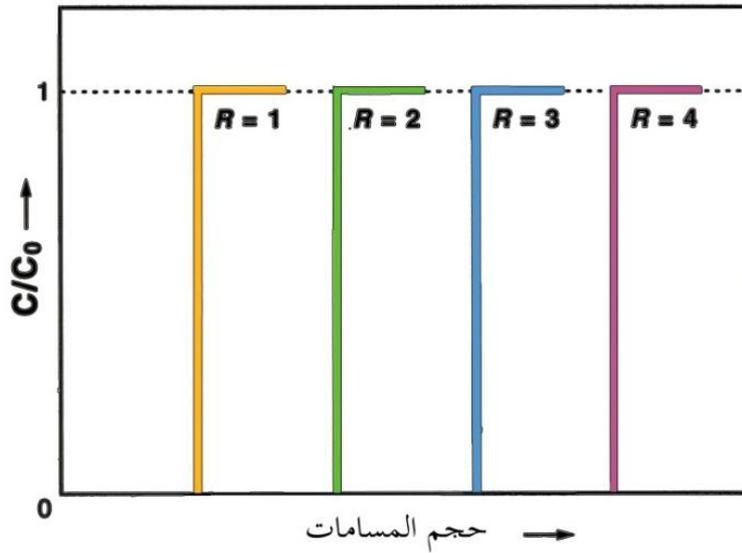
$$v_p = \text{سرعة الملوث (م/ثانية).}$$

$$d_w = \text{المسافة التي قطعها الماء.}$$

$$d_p = \text{المسافة التي قطعها الملوث.}$$

وبمعارنة المعادلة (6-8) يتبين أنه، بزيادة الإدمصاص (بمعنى زيادة قيمة K)، يزيد عامل الإبطاء.

ويعتبر عامل الإبطاء مكوناً هاماً يصف انتقال الملوثات في التربة. إن الإبطاء عن الحركة موضح في الشكل (6-5). وعندما لا يدمص ملوث بواسطة التربة (أي أن، $K = 0$) فإن عامل الإبطاء $R = 1$. ويعني ذلك أن الملوث يتحرك بنفس سرعة الماء ($v_p = v_w$) وعندما يكون $R = 2$ ، يتحرك الملوث عند سرعة فعلية تساوي نصف تلك الخاصة بالماء ($v_p = v_w = 0.5$) بمعنى أن الملوث يتحرك بسرعة تساوي نصف سرعة الماء. وعندما يكون $R = 10$ يتحرك الملوث بسرعة تساوي عُشر سرعة الماء ($v_p = 0.1 v_w$).

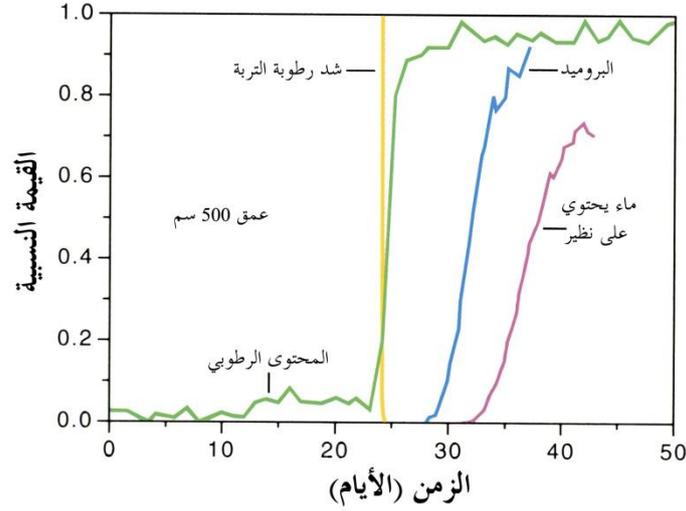


شكل (6-5): تأثير الإدمصاص على انتقال الأملاح الذائبة؛ لاحظ أن النظام قد تم تبسيطه بافتراض أنه لا يوجد تفرق.

تعتبر الملوثات التي لها معاملات إبطاء أقل من 10 متحركة نسبياً. ويمكن لهذه الملوثات أن تتحرك سريعاً من موقع معين تتجمع عنده لتلوث مساحة شاسعة نسبياً، وعلى العكس من ذلك تتحرك الملوثات التي لها عوامل إبطاء كبيرة جداً (أكثر من 1000) ببطء شديد مقارنة بالماء وتميل لخلق مواقع ملوثة أقل انتشاراً من التي تنتج عن طريق الملوثات المتحركة.

تمثل بعض النظم حالة خاصة لأن عامل الإبطاء (R) يكون أقل من (1)، وفي هذه الحالة يتحرك المذاب بسرعة أكبر من سرعة الماء المذيب. إن هذا السلوك يلاحظ أحياناً في انتقال الأيونات مثل Cl^- أو Br^- ، وكما تم مناقشة ذلك سابقاً، فإن صافي الشحنة على سطوح كثير من الترب تكون سالبة مما يجعلها تتنافر مع الأملاح المذابة سالبة الشحنة. وبالنسبة لقطاعات التربة التي تتميز بوجود مسامات صغيرة جداً، فإن هذا التنافر يمنع الملح من دخول المسامات حيث يوجد الماء. وعلى ذلك فإنه نظراً لأن الأملاح ترحل فقط خلال جزء من التربة، فإن النتيجة تبدو وكأن انتقال الملح أسرع من سرعة حركة الماء. إن ظاهرة إقصاء أو إبعاد الأيونات قد تم استعراضه في تجارب انتقال الأملاح، (انظر الشكل 6-6) حيث يلاحظ أن Br^- يتحرك بشكل أسرع من ماء يحتوي على نظير الهيدروجين. وهناك سبب آخر لكون قيمة R أقل من (1) وهو الإقصاء نتيجة لحجم الأيون، حيث تكون الأيونات كبيرة لدرجة تمنعها من المرور خلال المسامات الأصغر حجماً. وبذلك فإنه كما هو في حالة الإقصاء الأنيوني، فإن الملح يرحل فقط عبر جزء من التربة، مما ينتج عنه انتقال يبدو معدله أسرع من معدل حركة الماء. وقد تمت ملاحظة الإبعاد بسبب حجم الأيون في تجارب

انتقال لمثل هذه الأملاح في صورة حمض ذائب هيوميك وبكتريا.



شكل (6-6): تأثير إقصاء الأيونات علي انتقال الأملاح.

5.6 تقدير توزع أطوار الملوثات

كثير ما يكون من المهم التعرف علي الكيفية التي يتم بها توزع ملوث معين بين الأطوار الغازية والسائلة والصلبة، ومن الطرق البسيطة لتقدير توزيع الملوثات استخدام معاملات توزع الأطوار، وقد تعرفنا حتى الآن علي معاملي توزع رئيسيين: معامل الإدمصاص (K)، الذي يصف توزع ملوث ما بين الطورين الصلب والماء. وثابت هنري (H)، والذي يصف التوزع بين طور الغاز (الهواء) والماء. والآن، كيف نستخدم هذين المعاملين للحصول علي معلومات مفيدة؟.

إن المعلومة الأولى المهمة واضحة وهي: كم يوجد من الملوث في نظام التربة؟ ويمكننا تحديد الكتلة الكلية للملوث الذي يوجد في نظام تربة معينة باستخدام المعادلة:

$$M = V_w C_w + M_s S + V_g C_g \quad (9-6)$$

حيث أن: M = الكتلة الكلية للملوث.

$$V_w = \text{حجم طور الماء.}$$

$$M_s = \text{وزن جيبات التربة.}$$

$$V_g = \text{حجم غاز التربة.}$$

ويمكننا بعدها تحديد وحدة كتلة الملوث (M^*) بقسمة المعادلة (9-6) على V_T وهو الحجم الكلي لنظام التربة. كما يمكننا أيضاً تحديد M^* على أساس تركيز واحد بتعويض معادلات التوزيع (المعادلتين 2-6 و 3-6) ضمن المعادلة (9-6) وسنستخدم C_w على أنه التركيز الأساسي لأنه يمثل عادة التركيز المقاس في برامج المراقبة والمتابعة تحت السطحية. وتكون المعادلة المحوّرة لتقدير كتلة ملوث معين كما يلي:

$$M^* = (\theta + \rho K + \theta_{\text{gas}} H) C_w \quad (10-6)$$

حيث أن: θ_{gas} = محتوى التربة من الغاز (حجم غاز التربة/حجم التربة).

أما بقية الرموز فقد تم تعريفها سابقاً.

ويتعين الانتباه إلى أن M^* هي كتلة الملوث بالنسبة لحجم التربة، لذلك يحسب الوزن الكلي للملوث (M) كما يلي:

$$M = M^* V_T \quad (11-6)$$

أما الجزء من الملوث الذى يستقر ضمن طور الماء (X_w) و طور التربة (X_s) و طور غاز التربة (X_{gas}) فيمكن حسابها باستخدام المعادلات التالية:

$$X_w = \frac{\theta C_w}{M^*} \quad (12-6)$$

$$X_s = \frac{Q K C_w}{M^*} \quad (13-6)$$

$$X_{gas} = \frac{\theta_{gas} H C_w}{M^*} \quad (14-6)$$

من المهم أن نتذكر أن هذا الأسلوب يعتمد على افتراضية أن عمليات التوزيع قد وصلت الى الاتزان. فإذا لم يتحقق ذلك فإن التقديرات التي يتم الحصول عليها باستخدام المعادلات (12-6) إلى (14-6) تكون خاطئة.

لنفترض أنه لدينا القيم التالية لخصائص التربة:

$$\theta = 0.25 \text{ م}^3/\text{م}^3, \theta_{gas} = 0.25 \text{ م}^3/\text{م}^3, Q = 1.5 \text{ جم/سم}^3 \text{ (أو، جم/مل)},$$

وللتبسيط دعنا نقول أن $H = K = 1$ ، وافترض كذلك أن $C_w = 1$ مجم/لتر.

وبتعويض هذه القيم في المعادلة (6 - 10) إلى المعادلة (6 - 14) نتحصل على:

$$M^* = 2 \text{ مجم/لتر}, X_w = 0.125, X_s = 0.75, X_{gas} = 0.125.$$

وبذلك فإن: 75 في المائة من كتلة الملوث مرتبطة بجسيمات التربة، بينما يرتبط 12.5

في المائة من الملوث مع كل من الماء، والهواء.

6.6 تفاعلات تحوّل غير حيوية

يمكن أن تتحوّل بعض الملوثات بواسطة عمليات فيزيائية وكيميائية لحيوية. وفي هذا الجزء سوف يتم بإيجاز تناول عمليتي تحوّل لحيوية أساسية: التحلل المائي (hydrolysis) والتحلل الإشعاعي، وسيتم مناقشة التحولات الحيوية للملوثات في الباب (7) من هذا الكتاب.

1.6.6 التحلل المائي (Hydrolysis)

نظراً لأن الماء مكون ملازم لنظم التربة، فإن الملوثات تكاد تتلامس دائماً مع الماء بدرجة معينة، لذلك فمن الضروري معرفة فيما إذا كان ملوث ما سيتفاعل مع الماء ووقت حدوث ذلك، وتتفاعل الملوثات مع الماء من خلال الحلمة (hydrolysis)، وهي العملية التي تكتب عموماً كالتالي:



حيث أن RX مركب عضوي ما، وتمثل X مجموعة كيميائية كالهاليدات (مثلاً Cl)، ويتفاعل مع الماء، يتحوّل المركب الأصلي إلى مركب آخر (ROH). إن العاملين الرئيسيين في تفاعلات التحلل المائي هما خصائص الشحنة لجزيئات الملوث والرقم الهيدروجيني (pH)، ويمثل التحلل المائي أساساً تفاعلاً بين ($nucleophiles$)، وهي مواد لها فائض من الإلكترونات (مثل، OH^-) و ($electrophiles$)، وهي مواد فقيرة في الإلكترونات (مثل، H^+). وبذلك فإن خصائص الشحنة لجزيئات المركب تتحكم في تفاعلية الملوث مع الماء، وبالنسبة لكثير من المركبات، فإن التحلل المائي قد تحفز تحت

ظروف حمضية أو قاعدية، ويعني هذا أن كلاً من حدوث الحلمة ومعدلها تعتمد عادة على الرقم الهيدروجيني. فمثلاً يحدث تفاعل تحلل مائي يحفزها مجموعة OH^- بسرعة أكبر عند رقم هيدروجيني مرتفع، حيث تكون تراكيز OH^- عالية، كما يمكن أيضاً أن تتأثر عملية التحلل المائي (hydrolysis) بتفاعلات الإدمصاص فمثلاً، يكون الرقم الهيدروجيني لسطح كثير من الترب أقل من الرقم الهيدروجيني للماء الذى يحيط بحبيبات التربة: وبذلك فإن التحلل المائي تحت الظروف الحمضية يتم تحفيزه عندما يرتبط (يدمض) الملوث بالتربة.

ويمكن وصف معدل التحلل المائي (hydrolysis)، عند رقم هيدروجيني ثابت بمعادلة من الدرجة الأولى كما يلي:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k_h C \quad (16-6)$$

حيث أن $K_h =$ ثابت معدل التحلل المائي ($1/T$)، حيث أن $T =$ الزمن).

ومن المفيد في تفاعلات التحول تعرف فترة نصف العمر (half - life)، التي تمثل الزمن اللازم لتحول نصف الوزن الأصلي للملوث. وبالنسبة للتفاعلات التي تتمشى مع قانون الحركة من الدرجة الأولى فإن $T_{1/2}$ تعرف على أنها:

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{k_h} \quad (17-6)$$

ويمكن استخدام هذه المعادلة لتقدير الزمن اللازم لتحول ملوث معين، ويرتبط هذا الزمن بفترة بقاء الملوث في البيئة. فمثلاً، يظل أقل من 1% من الكتلة الأصلية للملوث بعد فترة زمنية تساوي 7 أعمار نصفية (half-lives). وبعد فترة زمنية تساوي 10 أعمار نصفية

يتبقى أقل من 0.1% من الكتلة الأصلية للملوث. وبالنسبة للملوث ما له فترة عمر نصفى تساوي يوماً واحداً، فإن ذلك يعني أن 0.1% فقط من هذا الملوث ستبقى دون تعرضها للتحويل بعد مضي عشرة أيام.

2.6.6 التحلل الإشعاعي

يعتبر التحلل الإشعاعي تفاعل تحول مهم لفئة خاصة من الملوثات، وتحديدًا العناصر المشعة. ويحدث التحلل الإشعاعي بسبب عدم استقرار النواة في الذرة، مما ينتج عنه إشعاع إما بروتونات ونيوترونات أو إلكترونات في صورة إشعاع. ويحدث هذا التحول تلقائياً، لكن معدل حدوثه يتفاوت بشكل واسع حسب طبيعة العنصر. ويعبر عن معدل التحلل الإشعاعي بقانون الحركة من الدرجة الأولى كما يلي:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k_d C \quad (18-6)$$

حيث أن: K_d = ثابت التحلل الإشعاعي $(1/T)$.

ويمكن حساب فترة العمر النصفى للتحلل الإشعاعي باستخدام المعادلة (6-17)،

والتعويض بقيمة K_d بدلاً عن R_h .

References and Recommended reading

- Brusseau M.L and Rao P.S.C. (1989) Sorption nonideality during organic contaminate transport in porous media. *CRC Critical Review in Environmental Control*. **19**, 33-99.
- Brusseau M.L. (1993) Complex mixtures and groundwater quality. *Environmental Research Brief*. EPA/600/S-93/004. U.S. Environmental Protection agency, Washington, D.C.
- Brusseau M.L (1994) Transport of reactive contaminants in heterogeneous porous media. *Reviews of Geophysics*. **32**, 285-314.
- Dragum J. (1988) The soil Chemistry of Hazardous Materials. Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Maryland.
- Porro I., Wierenga P.J. (1993) Transient and steady-state solute transport through a large unsaturated soil column. *Ground water*. **31**, 193-200.
- Schwarzenbach R.P., Gschwend P.m., and Imboden D.M. (1993) *Environmental Organic Chemistry*. Wiley, New York.
- Verschueren K. (1983) *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals*, 2nd Edition. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

مسائل حسابية وأسئلة :

1. الكيماويات تتعرض للتحلل المائي (hydrolysis) :

المادة الكيميائية	K_h (ساعة ⁻¹)
1	0.1
2	1.0
3	10
4	0.6
5	3

احسب العمر النصفى ($T_{1/2}$) لكل مادة كيميائية بالساعات.

2. أعطيت البيانات التالية:

$$\begin{aligned} 0.5 &= H & V_T &= 1 \text{ م}^3 \\ 2 &= K \text{ سم}^3/\text{جم} & \theta &= 0.3 \text{ م}^3/\text{م}^3 \\ 0.1 &= C_w \text{ مجم/لتر} & \theta_{\text{gas}} &= 0.1 \\ & & Q &= 1.5 \text{ جم/سم}^3 \end{aligned}$$

(أ) احسب الكتلة الكلية للملوث.

(ب) احسب نسبة الملوث التي توجد في الماء، وفي هواء التربة، والمدمصة على التربة.

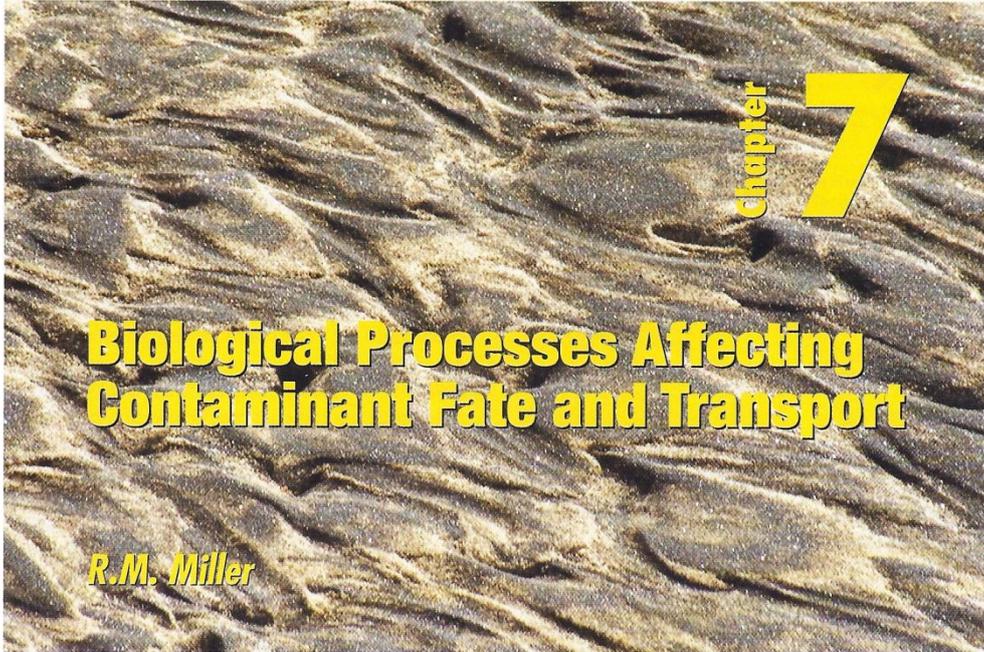
3. أعطيت البيانات التالية مع اعتبار أن $Q = 1.5 \text{ جم/سم}^3$ و $\theta = 0.3 \text{ م}^3/\text{م}^3$.

المادة الكيميائية	(سم ³ / كجم)
بنزين	0.1
تراي كلوروايثان	0.2
كلور وبنزين	0.4
نفثالين	0.6
PCB	10.0

- (1) احسب عوامل الإعاقة (إعاقة الحركة) لهذه الكيماويات.
- (2) احسب المسافات التي يتم قطعها لكل مادة كيميائية على حده آخذاً في الاعتبار المعلومات التالية:
- (أ) سرعة الماء التي تتحرك خلال التربة = 1 م/يوم.
- (ب) الزمن المنقضي 300 يوم.

الباب السابع

العمليات البيولوجية المؤثرة على مصير الملوث وانتقاله



إلى أعلى: رمل ملوث ببقايا زيوت من مصنع تكرير زيت قريب مكوناً تموجات على أحد شواطئ جنوب ولاية

كاليفورنيا.

1.7 تأثيرات بيولوجية على الملوثات

مع أن العوامل الفيزيائية والكيميائية تؤثر على مصير الملوثات في التربة والماء، إلا أنه يبدو أنها ليست العوامل الوحيدة التي تتحكم في مصيرها. لأنه لو كان ذلك صحيحاً، لحدث تراكم واسع للمادة العضوية، بما في ذلك الملوثات والمواد العضوية الطبيعية ولسادت

الأرض، وجعلت من مشاكل التلوث الحالية بالمقارنة ضئيلة جداً. لذلك فإنه يتعين علينا النظر إلى عامل رئيسي آخر، ألا وهو المكون البيولوجي للتربة والماء. وهذا المكون، الذي يعتبر مسؤولاً عن تحلل المواد العضوية الطبيعية، يخفف أيضاً من تأثير الملوثات على البيئة. وعلى الرغم من أنه قد حظى بقدر من الدراسة من قبل علماء التلوث تقل عن تلك التي خصصت للعوامل الفيزيائية والكيميائية، فإن العامل البيولوجي يحظى بعناية متزايدة حالياً نتيجة للاهتمام المتنامي لاستخدام الأساليب البيولوجية لإصحاح المواقع الملوثة. إن وجود الكائنات الدقيقة في التربة وفي الماء يمكن أن يؤثر على توزيع وحركة وتركيز الملوثات من خلال عملية التحلل البيولوجي (biodegradation). وفي واقع الأمر، فإن بعض الملوثات لها فترة عمر قصيرة جداً تحت الظروف المناخية الطبيعية لأنها تعمل كمصادر غذاء للكائنات الدقيقة النشطة. أما بالنسبة لملوثات أخرى، فإن تأثير الكائنات الدقيقة ربما يكون محدوداً لأسباب متنوعة، فانخفاض عدد الكائنات الدقيقة القادرة على تحليل المواد العضوية، أو تركيب الملوث الذي يكون مقاوماً لتأثير الميكروبات، أو الظروف البيئية غير الملائمة قد تكون جميعاً سبباً في حدوث تحلل بيولوجي بمعدلات شديدة الانخفاض.

في هذا الباب سوف يتم التركيز على فهم التفاعل بين الكائنات الدقيقة والملوثات في البيئة. كما ستتم معاينة التحلل البيولوجي لكل من الملوثات العضوية وغير العضوية، إضافة إلى تأثيرات عوامل المناخ وتركيب الملوث على تفاعلات التحلل الحيوي ومعدلاتها.

2.7 مجمل عملية التحلل الحيوي

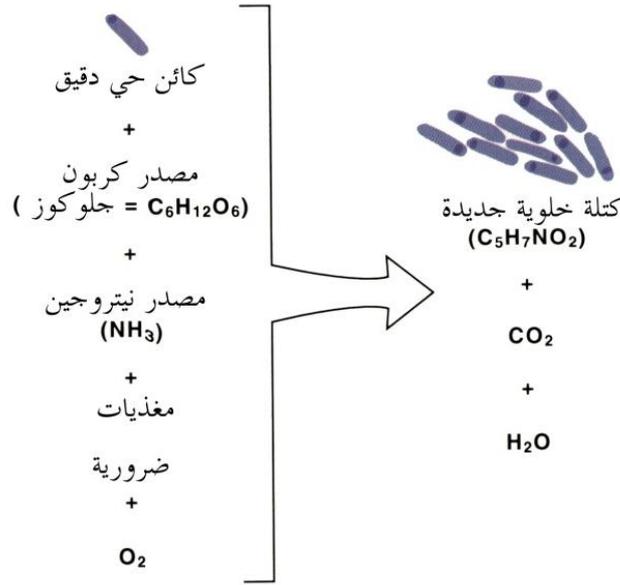
التحلل الحيوي (biodegradation) هو تكسير المركبات العضوية من خلال النشاط الميكروبي. وتعمل المركبات العضوية القابلة للتحلل الحيوي كمصدر غذاء، أو ركيزة للميكروبات. ويطلق على تيسر مادة عضوية معينة لهذه الميكروبات اسم التيسر البيولوجي (bioavailability) لهذه المادة العضوية. إن التيسر الحيوي، الذي يعتبر جانباً مهماً للتحلل الحيوي لأي مادة، يعتمد كثيراً على الماء. وتتكون الخلايا الميكروبية من 70-90% ماء، كما أن الغذاء الذي تحصل عليه هذه الخلايا مصدره الماء الذي يحيط بها. لذلك، فإن التيسر الحيوي لمادة معينة يشير إلى مقدار المادة الغذائية (substrate) في محلول الماء حول الخلية. وأحد العوامل الهامة التي تخفض من التيسر الحيوي إدمصاص المادة الغذائية (substrate) بواسطة التربة (انظر الجزء 6.3).

يمكننا التفكير في التحلل الحيوي للمركبات العضوية على أنه "خطوات متتالية للتحلل الحيوي أو مسارات نتج عنها في نهاية المطاف أكسدة المركب الأصلي". وكثيراً ما يتولد عن التحلل الحيوي لهذه المركبات طاقة (كما تم توضيحه في جزء: التوليد الحيوي للطاقة في الباب الرابع). ويشمل التحلل الحيوي الكامل، أو المعدنة، أكسدة المركب الأصلي لتكوين ثاني أكسيد الكربون وماء، وهي العملية التي توفر كلاً من الكربون والطاقة لنمو وتكاثر الخلايا. ويوضح الشكل (7-1) معدنة أي مركب عضوي تحت ظروف هوائية. إن سلسلة خطوات التحلل المكونة للمعدنة متشابهة، سواء كان مصدر الكربون سكرًا بسيطاً مثل الجلوكوز، أو بوليمر نباتي مثل السليلوز، أو جزيء لمادة ملوثة. إن كل خطوة تحلل

ضمن المسار يتم تسهيل حدوثها بواسطة عامل مساعد (catalyst)، أو إنزيم يتم تصنيعه بواسطة الخلية المتحللة. وتوجد الإنزيمات غالباً ضمن الخلية، لكنها تصنع أيضاً وتُحرَّر من الخلية لتساعد على انطلاق تفاعلات تحلل. وتعرف الإنزيمات التي توجد خارج الخلية على أنها إنزيمات خارجية (exoenzymes). وتعتبر الإنزيمات الخارجية مهمة في تحلل الجزيئات الكبرى (macromolecules) مثل بوليمر النبات المعروف بالسليولوز وذلك لأنه يتعين تكسير الجزيئات الكبرى إلى وحدات أصغر لتسمح بانتقالها داخل الخلية الميكروبية. إن كلا من الإنزيمات الداخلية (internal enzymes) والخارجية ضرورية جداً لعملية التحلل: فالتحلل سوف يقف عند أي خطوة إذا لم يكن الإنزيم المناسب موجوداً (الشكل 7-2). إن عدم وجود إنزيمات التحلل الحيوي المناسبة يمثل سبباً شائعاً لبقاء (persistence) بعض الملوثات دون تحلل، خاصة تلك التي تتميز بتركيب كيميائي غير مألوف لا تستطيع الإنزيمات التعرف عليه. وبذلك، يمكننا رؤية أن التحلل يعتمد على التركيب الكيميائي. فالملوثات التي تكون مشابهة تركيبياً لمواد أولية طبيعية تتحلل عادة بسهولة، بينما تتحلل عادة الملوثات التي لها تركيب مخالف للمواد الأولية الطبيعية غالباً ببطء، أو لا تتحلل أبداً.

يمكن أيضاً أن توصف المعدنة على أنها تفاعل كيميائي. وكما يوضح الشكل (7-1)، فإنه في وجود الأكسجين ومصدر للنيتروجين (مثل الأمونيا، NH_3)، سيتحول الجلوكوز إلى كتلة خلية جديدة (مقدرة بالصيغة الكيميائية $\text{C}_5 \text{H}_7 \text{NO}_2$)، وثاني أكسيد كربون، وماء. ومثل الجلوكوز، فإن كثيراً من جزيئات الملوثات كمعظم مكونات الجازولين

وكثير من مبيدات الأعشاب ومبيدات الآفات المستخدمة في الزراعة يمكن أن تتعمدن تحت الظروف المناسبة.



شكل (7-1): معدنة هوائية لمركب عضوي .

إن بعض المركبات العضوية تتحلل جزئياً فقط. ويمكن أن ينتج التحلل غير الكامل بسبب غياب إنزيم التحلل المناسب، أو قد ينتج من الأيض الثانوي (المساند) (cometabolism). وفي الأيض الثانوي تحدث أكسدة جزئية للمادة الأصلية، لكن الطاقة المشتقة من الأكسدة لا تستخدم في دعم نمو خلايا جديدة. وتبرز هذه الظاهرة عندما تمتلك الكائنات الحية إنزيمات يصادف أنها قادرة على تكسير ملوث معين؛ بمعنى أن إنزيماتها ليست متخصصة (nonspecific). ويمكن أن يحدث الأيض الثانوي ليس فقط خلال فترات

النمو النشط، ولكن أيضاً خلال الفترات التي تتفاعل فيها الخلايا (غير النامية) مع مركب عضوي معين. وعلى الرغم من صعوبة قياسه في البيئة، إلا أن الأيض الثانوي (المساند) قد تم إثباته لبعض الملوثات البيئية.



شكل (7-2): تسلسل عملية تحلل المركبات العضوية. يقوم إنزيم مختلف يقوم بتحفيز كل خطوة على مسار التحلل الحيوي. إذا فقد أي إنزيم، فإنه لا يتكون ناتج التفاعل الذي يقوم هذا الإنزيم بتحفيزه (يشار إليه بالعلامة الحمراء). يتوقف التفاعل عند هذه النقطة ولا تتكون نواتج أخرى بعدها (موضحة بلون مختلف).

فمثلاً، يمكن أن يتأكسد المذيب الصناعي المسمى ثلاثي كلور الإيثان (TCE) من خلال عملية الأيض الثانوي (المساندة) بواسطة بكتريا الميثان (methanotrophic bacteria)، التي يكون الميثان مصدرها الوحيد من الكربون. ويعتبر مركب ثلاثي كلور الإيثان في الوقت

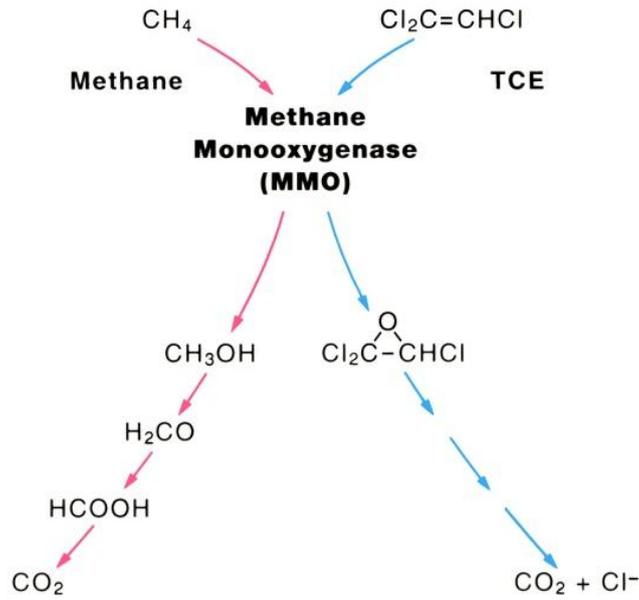
الحاضر على جانب كبير من الأهمية لعدة أسباب. فهو الملوث الأكثر تواجداً عند مواقع التخلص من المخلفات الخطرة، كما يشتهر في أنه مسبب للسرطان، وهو عموماً مقاوم للتحلل الحيوي.

وكما هو موضح بالشكل (7-3)، فإن الخطوة الأولى في أكسدة الميثان تحفز بواسطة أنزيم (methane monooxygenase)، وهو الأنزيم المنتج بواسطة بكتريا الميثان (methanotrophic bacteria).

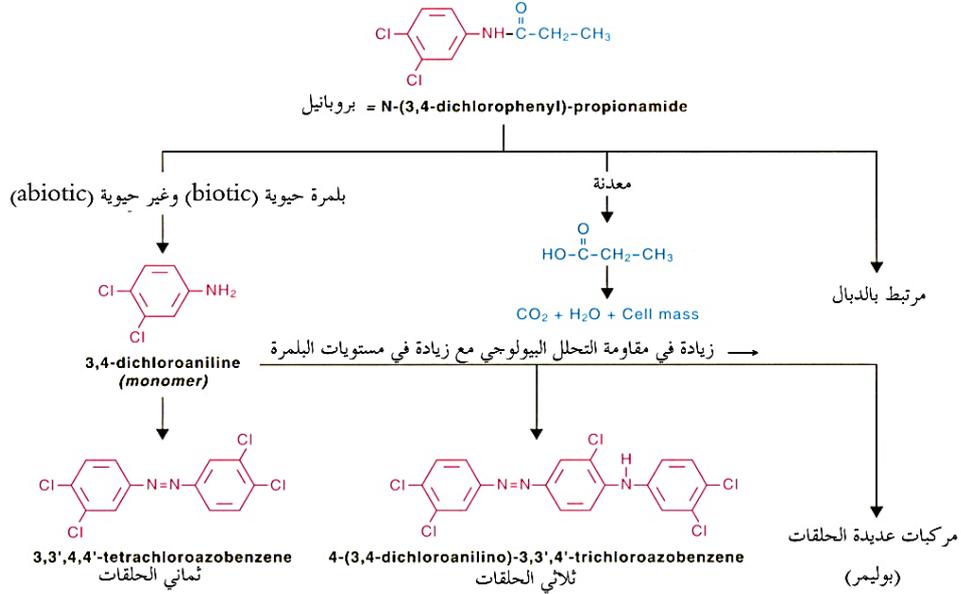
إن هذا الإنزيم إلى حد كبير غير متخصص إلى درجة أنه يؤدي دوراً أيضاً مسانداً في تحفيز الخطوة الأولى في أكسدة ثلاثي كلور الإيثان TCE عندما يتواجد كل من الميثان وTCE. ولا تستفيد البكتريا من أي طاقة عن خطوة التحلل الأيضية المساندة هذه. وقد تحفز خطوات التحلل اللاحقة المبينة بالشكل (7-3) تلقائياً، بواسطة بكتريا أخرى، أو في بعض الحالات بواسطة بكتريا الميثان (methanotrophs) نفسها. وربما يكون للتفاعل الأيضي المساعد (cometabolic) هذا أهمية كبيرة في إصحاح البيئة. وفي الوقت الحاضر يجري بحث لتقصي تأثير إضافة بكتريا الميثان للمواقع الملوثة بمادة TCE. كذلك فإن كائنات دقيقة أخرى تنمو على التولوين والبروبان، وحتى الأمونيا يتم أيضاً تقييم استخدامها لعلاج مشاكل التلوث بيولوجياً (bioremediation).

يمكن أيضاً أن يؤدي التحلل الجزئي أو غير الكامل إلى البلمرة (polymerization)، أي تخليق مركبات أكثر تعقيداً وثباتاً من المركب الأصلي. ويحدث ذلك عندما تقود خطوات التحلل الأولى، التي تحفز عادة بواسطة إنزيمات خارجية

(exoenzymes)، إلى تخليق مركبات وسيطة عالية التفاعلية، يمكنها من ثم أن ترتبط مع بعضها أو بمادة عضوية أخرى توجد في البيئة. وكما هو موضح بالشكل (4-7)، الذي يبين بعض تفاعلات البلمرة المحتملة التي تحدث لمبيد الحشائش البروبانيل (propanil) أثناء تعرضه للتحلل الحيوي، فإن هذه التفاعلات تؤدي إلى تكوين بوليمرات صغيرة وكبيرة تتميز جميعاً بشدة ثباتها في البيئة. إن هذا الثبات ربما يكون بسبب انخفاض التيسر الحيوي (bioavailability) نتيجة للإدمصاص الشديد (high sorption) أو غياب إنزيمات التحلل.



شكل (7-3): أكسدة الميثان بواسطة بكتريا الميثان المحفزة بواسطة إنزيم أكسدة الميثان. إن الإنزيم ذاته يستطيع أن يعمل لا تخصصياً على مركب TCE. ربما تحفز خطوات تحلل TCE اللاحقة تلقائياً، بواسطة بكتريا أخرى، أو في بعض الحالات بواسطة بكتريا الميثان (methanotroph).



شكل (4-7): تفاعلات البلمرة التي تحدث لمبيد البروبانيل خلال التحلل الحيوي. البروبانيل مبيد انتقائي يستخدم في حقول الأرز لمقاومة الأعشاب الضارة بعد الإنبات. ويعتبر ساماً لكثير من الأعشاب الحولية والمعمرة. يلقي المصير البيئي للبروبانيل اهتماماً، لأنه مثل كثير من المبيدات، سام لمعظم المحاصيل الأخرى (غير الحبوب) (noncereal crops) وهو سام أيضاً للأسماك. ويتبع الحرص عند إضافة البروبانيل لتفادي تلوث البحيرات وجداول المياه القريبة.

3.7 النشاط الميكروبي والتحلل الحيوي

كثيراً ما يكون صعباً التنبؤ بمصير ملوث معين في البيئة وذلك لأن التداخلات بين المكونات الميكروبية والكيميائية والفيزيائية للبيئة ما زالت غير مفهومة تماماً. ويعتمد النشاط الميكروبي الكلي على عدد من العوامل، مثل الكثافة العددية للميكروبات، والمغذيات المتيسرة، والظروف البيئية (بما في ذلك التربة)، وتركيب الملوث.

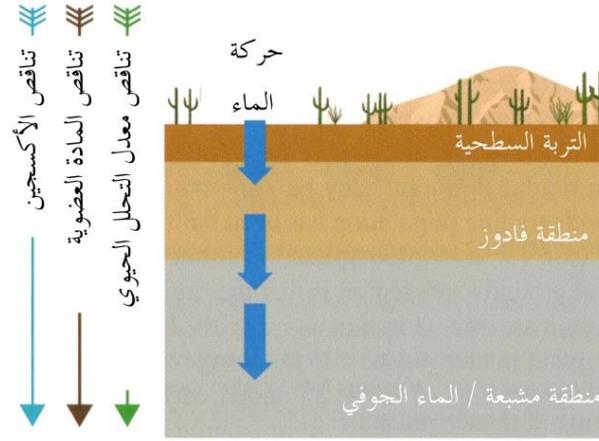
وفي هذا الجزء سيتم مناقشة تأثير بعض من العوامل الأكثر أهمية التي تؤثر على النشاط الميكروبي، مع معرفتنا ضمناً بأن النشاط الميكروبي يمكن أن يثبط بواسطة أي واحد من هذه العوامل، حتى وإن كانت جميع العوامل الأخرى عند مستوى مثالي.

1.3.7 التأثيرات البيئية على التحلل الحيوي

إن البيئة المحيطة بمجتمع ميكروبي ما - أي، مجموع العناصر الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تؤثر على كائن مجهري معين - تحدد فيما إذا كان هذه الكائن قادراً على البقاء واستقلاب الغذاء (metabolize). ويتحدد تواجد وكثرة الكائنات الدقيقة في بيئة معينة بواسطة تيسر المغذيات، وكذلك عوامل فسيولوجية - كيميائية مثل الرقم الهيدروجيني، وجهد الأكسدة والاختزال، ودرجة الحرارة، وقوام التربة والرطوبة. (هذه العوامل تم وصفها بالتفصيل في الباب (2) والباب (4) من هذا الكتاب). ونظراً لأن التحديد الذي يفرضه أي من هذه العوامل يمكن أن يؤدي إلى تثبيط التحلل البيولوجي، فإن سبب بقاء ملوث معين وعدم تحلله يكون أحياناً من الصعب تحديده بدقة .

ويعتبر توفر الأكسجين وكمية المادة العضوية وكذلك توفر النيتروجين، والتيسر الحيوي عوامل مهمة بشكل خاص في التحكم في التحلل البيولوجي لملوث معين في البيئة. ومن المثير أن العوامل الثلاثة الأولى يمكن أن تتغير بدرجة كبيرة، حسب موقع الملوث. وكما يبين الشكل (7-5) يمكن أن يحدث التلوث في النظم الحيوية الأرضية في ثلاثة مواضع أساسية: التربة السطحية، منطقة الفادوز، والمنطقة المشبعة. إن تيسر كل من الأكسجين والمادة العضوية يتفاوت بدرجة كبيرة في هذه المناطق. وعموماً، يتناقص كل من الأكسجين والمادة العضوية مع العمق، لذلك فإن نشاط التحلل الحيوي سينقص مع العمق أيضاً. وتوجد استثناءات لهذه القاعدة في حالة المناطق التي تتميز بمستوى ماء جوفي ضحل، التي

يمكن أن تتميز بمحتويات عالية من المادة العضوية وذلك لان معدلات تغذية الماء الجوفي تكون عالية.



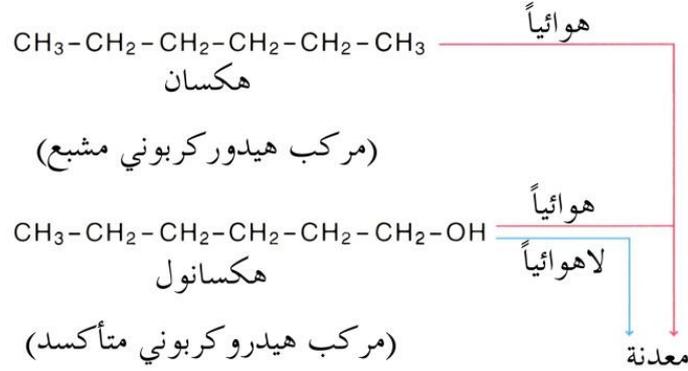
شكل (5-7): توجد ثلاثة مواقع رئيسية حيث يمكن أن يحدث تلوث في النظم الحيوية الأرضية التربة السطحية، منطقة فادوز، والمنطقة المشبعة. ويتفاوت كثيراً كل من الأكسجين والمادة العضوية في هذه المناطق. وكما تمت الإشارة فإن الأكسجين والمادة العضوية يتناقصا مع العمق، مما ينتج عنه انخفاض في نشاط التحلل البيولوجي مع العمق.

	Structure	Name	Physical State
Aliphatic	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	propane ($n = 1$)	gas
		hexane ($n = 4$)	liquid
		hexatriacontane ($n = 34$)	solid
Alicyclic		cyclopentane	liquid
		cyclohexane	liquid
Aromatic		benzene	liquid
		naphthalene	solid

شكل (6-7): هيدروكربونات عطرية وحلقية وإليفاتية.

1.1.3.7 الأوكسجين

الأوكسجين هام جداً في تحديد مدى ومعدل قابلية الملوثات للتحلل البيولوجي. وبشكل عام، يكون التحلل البيولوجي أسرع بكثير تحت الظروف الهوائية (في وجود الأوكسجين) منه تحت الظروف اللاهوائية (في غياب الأوكسجين). أيضاً، فإن بعض الملوثات التي تتحلل هوائياً لا تكون قابلة للتحلل لاهوائياً. وبذلك فإن الهيدروكربونات الأليفاتية المشبعة التي توجد في النفط والموضح بعض منها في الشكل (7-6)، تتحلل هوائياً بسهولة؛ ولكن ما لم توجد ذرة أوكسجين في البناء بداية، فإن هذه المركبات تكون عالية الثبات تحت الظروف اللاهوائية (الشكل 7-7) وهذا الثبات تحت الظروف اللاهوائية هو السبب في أن خزانات النفط الجوفية، التي لا تحتوي على أوكسجين، قد ظلت دون تغير لآلاف السنين، على الرغم من وجود كائنات دقيقة. وبالمقابل فإن المركبات العضوية عالية الكلورة تكون أكثر ثباتاً تحت الظروف الهوائية. بمعنى، أن زيادة المحتوى من الكلور يدفع إلى نزع الهالوجين (إزالة الكلور) لا هوائياً على حساب إزالته هوائياً.



شكل (7-7): تأثيرات الأكسدة على قابلية مركبات أليفاتية للتحلل حيويًا. الهيدروكربونات التي لا تحتوي على أوكسجين، مثل الهكسان، تتحلل فقط هوائياً، بينما تؤدي إضافة ذرة أوكسجين واحدة (هكسانول) إلى حدوث كل من التحلل الهوائي واللاهوائي.

وعلى أساس توفر الأكسجين، فإن التربة السطحية ومنطقة فادوز متماثلة، لأحدهما أساساً منطقتان هوائيتان. وبذلك، فإن هاتين المنطقتين تميلان إلى توفير ظروف تحلل هوائي للملوثات لكن هاتين المنطقتين قد تحتويان جيوباً يكون النشاط فيها لاهوائياً نتيجة لظروف موضعية (مثلاً، نشاط تحلل بيولوجي مرتفع، أو مناطق محدودة مشبعة) تؤدي إلى انخفاض مستويات الأكسجين. وبالمقابل، فإن تراكيز الأكسجين في المياه الجوفية أو المناطق المشبعة تكون منخفضة. إن صورة الأكسجين الوحيدة التي توجد في هذه المنطقة هي الأكسجين الذائب، وبذلك تكون مستويات الأكسجين منخفضة لأن الأكسجين ليس قابلاً للذوبان في الماء بدرجة عالية. وعلى ذلك، إذا ما حدث نشاط ميكروبي عالٍ، فإن الإمداد المحدود من الأكسجين يتم استهلاكه بسرعة، مسبباً في تطور ظروف لاهوائية (انظر أيضاً الجزء 1.4.11). إن إضافة الهواء أو الأكسجين كثيراً ما يؤدي إلى تحسين معدلات التحلل البيولوجي، خاصة في المناطق تحت السطحية التي تتميز بمحتوى عالٍ من الطين.

2.1.3.7 المجاميع الميكروبية والمحتوى من المادة العضوية

تضم التربة السطحية أعداداً كبيرة من الكائنات الدقيقة . عموماً تتراوح أعداد البكتيريا ما بين 10^6 و 10^9 في الجرام الواحد من التربة. بينما تكون أعداد الفطريات أقل نوعاً ما إذ تتراوح ما بين 10^4 و 10^6 في الجرام الواحد من التربة. وبالمقابل، فإن التعداد الميكروبي في المناطق الأكثر عمقاً، مثل منطقة الفادوز ومنطقة المياه الجوفية، تكون عادة أقل مائة مرة أو أكثر منها في التربة السطحية. ويعود هذا الانخفاض الكبير في أعداد الميكروبات مع العمق بشكل رئيسي إلى الاختلافات في المحتوى من المادة العضوية. فبينما قد تكون التربة

السطحية غنية بالمادة العضوية، فإن كلاً من منطقتي الفادوز والمياه الجوفية تحتويان على كميات منخفضة من المادة العضوية. إن إحدى نتائج الكثافة العددية المنخفضة من الكائنات الدقيقة هو أن أعداد الكائنات المحللة للملوثات التي توجد بداية تكون منخفضة أيضاً. وبذلك فإن التحلل الحيوي لملوث معين قد يكون بطيئاً إلى أن يتزايد تعداد الكائنات الدقيقة المحللة. أما السبب الثاني للتحلل الحيوي البطيء في منطقة فادوز ومنطقة المياه الجوفية فإنه يعود إلى أن الكائنات الحية في هذه المنطقة تكون عادة ساكنة نتيجة لانخفاض كمية المادة العضوية المتاحة. وإذا ما كانت الكائنات الدقيقة كامنة، فإن استجابتها لإضافة مصدر للكربون تكون بطيئة، خاصة إذا ما كان مصدر الكربون جزيئاً لمادة ملوثة لم تكن قد تعرضت له من قبل. بناء على هذين العاملين، وهما وفرة الأكسجين والمحتوى من المادة العضوية، فإنه يمكن إصدار عدة تعميمات حول التربة السطحية، ومنطقة فادوز ومنطقة المياه الجوفية (انظر الشكل 7-5):

1. أن التحلل الحيوي في التربة السطحية يكون بالدرجة الأولى هوائياً وسريعاً.
2. أن التحلل الحيوي في منطقة فادوز يكون أيضاً هوائياً بالدرجة الأولى، ولكن قد يكون ضرورياً توفر زمن كافٍ للتأقلم حتى تتزايد أعداد الكائنات الدقيقة المحللة.
3. أن التحلل الحيوي في منطقة المياه الجوفية يكون بطيئاً بداية نتيجة لانخفاض أعداد الكائنات الدقيقة، ويمكن بسرعة أن يصبح لاهوائياً نظراً لعدم توفر الأكسجين.

3.1.3.7 النيتروجين

النيتروجين من العناصر الكبرى التي كثيراً ما تحدد النشاط الميكروبي لأنه مكون ضروري لكثير من المركبات الأيضية للميكروبات ووحدات البناء، بما في ذلك البروتينات والأحماض الأمينية. وكما تم توضيحه للتركيب الكيميائي للخلية (الشكل 7-1)، فإن النيتروجين على أساس الكتلة يعتبر من المكونات الكبيرة للكائنات الدقيقة. كذلك، فإن النيتروجين عادةً يكون عرضة للإزالة من نظام التربة/ الماء عن طريق عمليات مختلفة مثل الغسيل والدنترة (انظر الجزء 2.2.14). إن كثيراً من المواد الحيوية الدخيلة (xenobiotics) تكون غنية بالكربون وفقيرة في محتواها من النيتروجين، لذا فإن حمية النيتروجين يمكن أن تثبط تحللها حيوياً بينما تؤدي الإضافة البسيطة لمركبات غنية بالنيتروجين عادةً إلى تحسينها. فمثلاً، في حالة سفك الزيوت النفطية، حيث يكون نقص النيتروجين حاداً، يمكن رفع معدلات التحلل البيولوجي لهذه الزيوت بدرجة كبيرة عن طريق إضافة أسمدة نيتروجينية. وعموماً، فإن الميكروبات لها متوسط نسبة كربون إلى نيتروجين (C:N) ضمن كتلتها الحيوية تتراوح ما بين 5:1 إلى 10:1 تقريباً، حسب نوع الكائن الدقيق، لذا فإن نسبة C:N لمادة تحلل بيولوجي يجب أن تكون 20:1 أو أقل. إن الاختلاف في النسب يعود لحقيقة أن نحو 50% من الكربون الذي يتم استقلابه يتحرر في صورة غاز ثاني أكسيد الكربون، بينما يدمج كل النيتروجين الذي يتم استقلابه تقريباً ضمن الكتلة الحيوية الميكروبية.

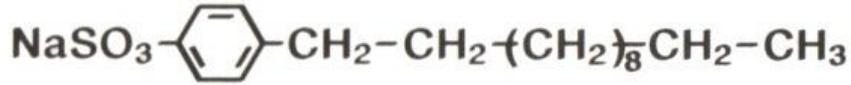
2.3.7 تركيب الملوث

إن معدل تحلل جزيء ملوث ما في البيئة يعتمد بدرجة كبيرة على تركيبه. فإذا كان الجزيء لا يوجد عادة في البيئة - أو أن تركيبه لا يماثل جزيئاً ما يتواجد عادة في البيئة - فإن كائناً محلاً لهذا الملوث قد لا يكون متوفراً. وفي هذه الحالة تكون فرص حدوث تحلل حيوي

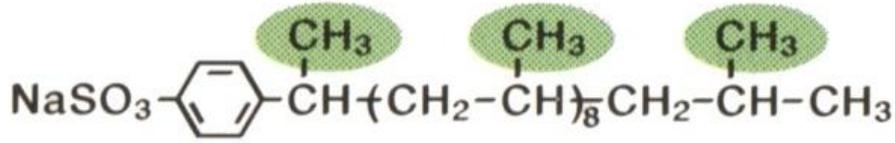
ضئيلة. كما يعتبر التيسر الحيوي للملوث غاية في الأهمية في تحديد معدل التحلل الحيوي. وإذا ما كانت ذوبانية الملوث في الماء شديدة الانخفاض، فإن التيسر البيولوجي للملوث ستكون منخفضة (انظر الجزء 1.4.11). إن كثيراً من جزيئات الملوثات التي تتميز ببقائها فترة طويلة في البيئة تشترك في خاصية انخفاض الذوبانية في الماء. ومن أمثلة ذلك مركب: DDT) dichlorodiphenyltrichloroethane، وهو مبيد ممنوع استخدامه في الولايات المتحدة في الوقت الحاضر؛ ومركبات polychlorinated biphenyls (PCBs) التي تستخدم كمحاليل لتبادل الحرارة، ومركبات هيدروكربونات البترول. إن كلاً من مركبات PCBs ومركبات هيدروكربونات البترول توجد في حالة سائلة عند درجة حرارة الغرفة، لكنها تشكل في الواقع طوراً كارهاً للماء (hydrophobic phase) يكون مفصلاً عن الطور المائي. وعلى الرغم أن الكائنات الدقيقة ليست مستثناة من هذا الطور، إلا أن الأيض النشط يبدو أنه يحدث فقط في الطور المائي أو عند التقاء الماء بجسيمات التربة. أما العامل الثاني الذي يقلل من التيسر البيولوجي فيتمثل في إدمصاص الملوث بواسطة التربة. وتصدر الإشارة إلى أن المركبات التي تتميز بانخفاض ذوبانيتها في الماء مثل DDT, PCBs، والمكونات النفطية، تكون عرضة للإدمصاص أيضاً بواسطة سطوح التربة (انظر الجزء 3.6).

إن الكثير من الملوثات تتميز بتفرع واسع أو مجموعات كيميائية عدة تقوم بغلق أو إعاقه الهيكل الكربوني للملوث من خلال تكوين طبقة أيونية عازلة عند الموقع النشط، أي الموقع الذي تلتقى عنده المادة الغذائية (الركيزة) والإنزيم أثناء خطوة تحول معينة. فمثلاً، باستخدام المنظفات (detergents) المستخدمة حالياً قابلة للتحلل الحيوي، وتحديدًا المنظف

Linear alky lbenzysulfonates (ABSs). إن الفرق الوحيد بين هذه المنظفات سهلة التحلل البيولوجي والمنظفات بطيئة التحلل البيولوجي nonlinear ABSs هو غياب التفرع (الشكل 7-8).



a) *Linear Alkylbenzylsulfonate*



b) *Branched Alkylbenzylsulfonate*

شكل (7-8): مركبات alkylbenzylsulfonate (ABS) الخطية والمتفرعة تستخدم كثيراً كمواد نشطة سطحياً (surfactants). المركب (أ) سهل التحلل حيوياً بينما المركب المتفرع (ب) غير قابل للتحلل، ان كلا المركبين متساويان ويعملان جيداً كمنظفات. لكن مركبات ABS الخطية مفضلة على مركبات ABS المتفرعة في الأسواق التي تهتم بالمحافظة على البيئة.

وكنتيحة لزيادة معرفتنا بتأثير تركيب الملوث على التحلل الحيوي في البيئة، فإن الجهود تتركز على تطوير واستخدام مركبات صديقة للبيئة (environmentally friendly). فمثلاً، تستبدل المبيدات بطيئة التحلل بيولوجيا بأخرى سريعة التحلل، والتي تستخدم كجزء

من أساليب الإدارة المتكاملة للآفات (انظر الجزء 5.17). ويعني هذا الأسلوب أن المبيدات لا تستخدم على أساس سنوي، ولكنها تضاف وفق دورات. وبذلك، فإن الحشرات لا تتأقلم تماماً مع هذه المبيدات سهلة التحلل، وأن الكائنات الدقيقة بالتربة تقوم بتحليلها بسرعة عالية بحيث تصبح نشطة فقط خلال الإطار الزمني المستهدف.

4.7 مسارات التحلل الحيوي

أغلب الكربون العضوي المتاح للكائنات الدقيقة في البيئة هو لمواد تم تثبيتها بواسطة التمثيل الضوئي (مادة نباتية). وقد نتج عن النشاط البشري إضافة مواد كيميائية كثيرة صناعية وزراعية، بما في ذلك منتجات بترولية، ومذيبات مكلورة، ومبيدات. إن العديد من هذه الكيماويات تتميز بأنها سهلة التحلل في البيئة نتيجة لتشابهها مع المواد العضوية المصنعة عن طريق عملية البناء الضوئي. ويسمح هذا للكائنات الحية المحللة باستغلال نواتج مسارات التحلل الحيوي الموجودة أصلاً. لكن، بعض التركيبات الكيميائية تكون فريدة في نوعها، أو أن بها مكونات فريدة، مما يؤدي إلى تحلل حيوي بطيء أو قليل. ولتسهيل الفهم والتنبؤ بالتحلل الحيوي للملوثات العضوية في البيئة، فإننا سنصنف الملوثات العضوية إلى واحد من ثلاث مجموعات تركيبية أساسية. الأليفاتية (aliphatics) والأليفاتية الحلقية (alicyclics) والعطرية (aromatics) (انظر الشكل 6-7). إن أعضاء كل مجموعة من هذه المجموعات الثلاث يمكن أن يوجد في الصور الفيزيائية الثلاثة: الغازية، والصلبة، والسائلة. وسيتم توضيح المسارات العامة لكل من هذه التركيبات في الأجزاء التالية من الكتاب. وتجدر الإشارة إلى

أن هذه المسارات تختلف تحت الظروف الهوائية واللاهوائية، كما يمكن أيضاً أن تتأثر بالتحويلات البنائية للملوث.

1.4.7 التحلل الحيوي تحت الظروف الهوائية

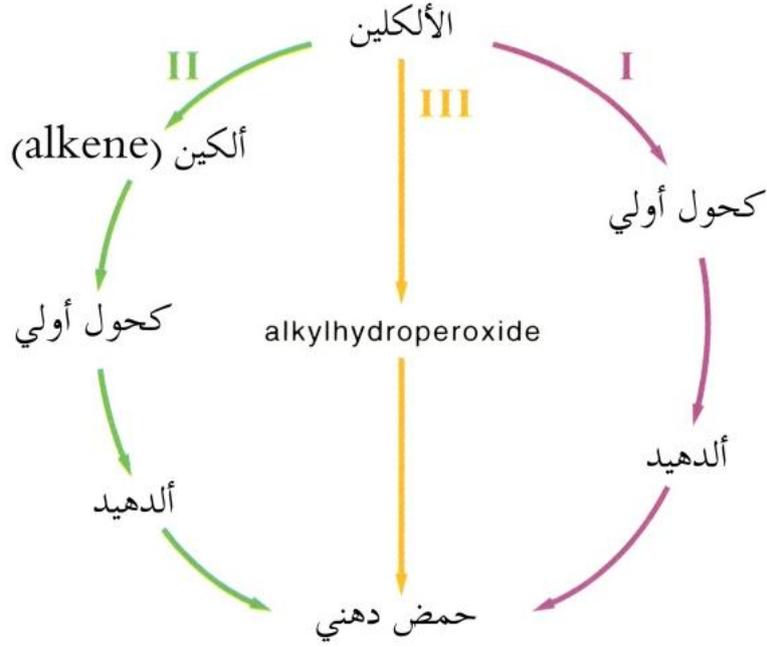
في وجود الأكسجين، تقوم كثير من الكائنات الدقيقة ذاتية التغذية (heterotrophic) بمعدنة المركبات العضوية بسرعة (انظر الباب 4). وأثناء التحلل، يتأكسد تماماً بعض من الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون لتوفير الطاقة للنمو، بينما يستخدم جزء آخر من الكربون كمادة بنائية لتكوين خلايا جديدة (انظر الشكل 7-1). وتنتج الطاقة المستخدمة في النمو من خلال سلسلة تفاعلات أكسدة واختزال يتم فيها استخدام الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات ومن ثم اختزاله إلى ماء.

1.1.4.7 الهيدروكربونات الأليفاتية

الهيدروكربونات الأليفاتية عبارة عن مركبات في سلاسل مستقيمة أو سلاسل متفرعة. إن معظم الهيدروكربونات الأليفاتية التي تضاف للبيئة تأتي من مخلفات لمذيبات صناعية ومن الصناعات البترولية. وتحلل المركبات الأليفاتية السائلة بسهولة تحت الظروف الهوائية، خاصة عندما يتراوح عدد ذرات الكربون فيها ما بين 8 و16 (أنظر الشكل 7-6). وتكون المواد الأليفاتية طويلة السلسلة عادة مواد شمعية. ويتباطأ التحلل الحيوي لهذه السلاسل الطويلة بسبب ذوبانيتها المحدودة في الماء، بينما قد يتعرق التحلل الحيوي للمركبات ذات السلاسل الأقصر نتيجة لتأثيراتها السامة على الكائنات الدقيقة. إضافة لذلك، فإن تحويرات تركيبية شائعة عدة يمكن أن تؤدي أيضاً إلى انخفاض حاد في عمليات

التحلل الحيوي. ومن بين هذه التحويلات التفرع المفرط في السلسلة الهيدروكربونية. وتشكل الهيدروكربونات المتفرعة (التي توجد بكثرة في المركبات البترولية) واحدة من أبطأ المكونات تحللاً. وهناك تحويل شائع آخر يؤدي إلى إبطاء التحلل البيولوجي وهو الاستبدال الهالوجيني، كما تم ملاحظته في مركب TCE. وقد أصبحت المذيبات الكلورية مثل TCE مشكلة تلوث بيئي خطيرة. ومع أن هذه الهيدروكربونات شديدة التفرع وعالية الكلورة تكون بطيئة التحلل، إلا أن هذه المذيبات تمثل مشكلة حادة بسبب سميتها. ولذلك، يتعين أن يؤخذ في الاعتبار كل من معدل التحلل الحيوي والسمية معاً عند تقييم الخطر المحتمل للملوثات في البيئة.

يحدث التحلل الحيوي للمركبات الأليفاتية عادة عن طريق واحد من ثلاثة مسارات موضحة في الشكل (7-9). وأكثر المسارات شيوعاً هو الاتحاد الأنزيمي المباشر بالأكسجين الجزيئي O₂ (المسار I). وتؤدي هذه المسارات الثلاثة إلى تكوين حمض دهني أولي ويكون الحمض الدهني المتكون عن تحلل الألكين (alkane) عرضة لعملية استقلاب خلوية كما هو معتاد في حالة الأحماض الدهنية. ويشمل ذلك أكسدة (B-oxidation)، مما يؤدي إلى فصل قطعتي كربون متتاليين ويتم إزالة كل قطعة مكونة من ذرتي كربون بواسطة إنزيم مساعد A (COA) مثل acetyl-CoA الذي يتحول إلى دورة حمض ثلاثي الكربوكسيل (TCA) ليتحلل بالكامل إلى ثاني أكسيد كربون وماء وإذا كان للألكين (alkane) عدد زوجي من أيونات الكربون، فإن المركب acetyl-CoA يكون آخر ما يتبقى. أما إذا كان للألكين عدد فردي من أيونات الكربون فإن آخر ما يتبقى هو مركب propionyl - CoA، الذي يدفع أيضاً إلى دورة TCA بعد تحوله إلى مركب Succinyl - CoA.



شكل (7-9): مسارات التحلل الهوائي لمركبات أليفاتية.

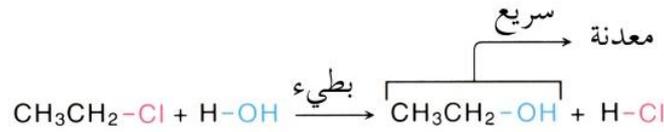
ومن المعروف أن كلاً من التفرع والهلجنة تتسببان في إبطاء التحلل البيولوجي . ففي الحالة الأولى، يمكن ملاحظة أن التفرع المكثف يؤدي إلى حدوث تداخل بين كل من الإنزيم المحلل وموقع ارتباط الإنزيم. أما في الحالة الثانية (الهلجنة)، فإنه يلزم معرفة شيء ما عن الروابط والتفاعلات ذات العلاقة. وبالنسبة للمركبات المهلجنة، فإن القوة النسبية لرابطة الهالوجين بالكربون تتطلب شيئين: (1) الإنزيم الذي يعمل على كسر الرابطة. (2) توفر قدر كبير من الطاقة لكسر الرابطة. وعموماً، تعتبر الألكينات أحادية الهالوجين قابلة للتحلل؛

لكن زيادة أيونات الهالوجينات يؤدي إلى زيادة تثبيط التحلل الحيوي. ويمكن للمركبات الأليفاتية المهلجنة أن تتحلل من خلال نوعين من التفاعلات التي تحدث تحت ظروف هوائية. الأول استبدال، وهو عبارة عن تفاعل nucleophilic (الأنواع المتفاعلة تمنح زوجاً من الإلكترونات) ويتم فيها استبدال الهالوجين بمجموعة هيدروكسيل. أما الثاني فهو تفاعل أكسدة، الذي يتطلب نوعاً خارجياً يقبل الإلكترونات. ويشبه هذان التفاعلات ما هو موضح في الشكل (7-10). وعلى الرغم من أن زيادة الهلجنة تسبب عموماً في تحلل أكثر بطأً، فإن الأكسدة تحت الظروف الهوائية لمركبات أليفاتية عالية الكلورة يمكن أن يحدث (cometabolically).

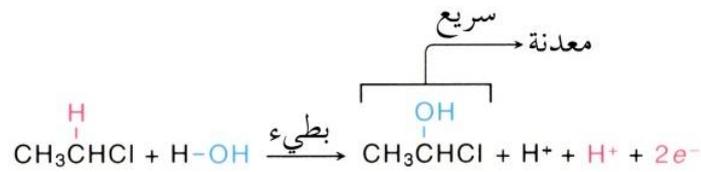
2.1.4.7 الهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية Alicyclic hydrocarbons

الهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية عبارة عن سلاسل كربون مشبعة تشكل مركبات حلقية (الشكل 7-6). ويعتبر وجود هذه المركبات طبيعياً أمراً شائعاً. فمثلاً تعتبر الهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية مكوناً رئيسياً للزيت الخام، إذ تشكل ما بين 20 إلى 67% على أساس الحجم. وهناك أمثلة أخرى لمواد طبيعية معقدة من هذه المركبات ومنها مادة الكامفور (Camphor) وهو عبارة عن زيت نباتي؛ وأحماض الهكسائل الدهنية الحلقية (Cyclohexyl fatty acids) وهي مكونات دهون ميكروبية؛ والبارافينات الناتجة عن شموع أوراق النبات. وتشمل المصادر البشرية للهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية التي تضاف للبيئة ما ينتج عن استعمالات الوقود الأحفوري وتسرب النفط، إضافة لاستخدام المواد الكيميائية الزراعية مثل مبيدات البايثرين (pyrethrin) الحشرية.

من الصعب جداً عزل مزارع نقية من البكتريا تستطيع القيام بتحليل مركبات الهيدروكربونات الأليفاتية الحلقية. ولهذا السبب فإن التحلل الحيوي لهذه المركبات يعتقد بأنه يتم نتيجة لعمل متكاتف تقوم به أعداد كبيرة من كائنات دقيقة متنوعة. وكثيراً ما يشار إلى هذا التجمع بأنه ائتلاف ميكروبي (microbial consortium). فمثلاً، في حالة تحلل مركب الهكسان الحلقي (cyclohexane)، تقوم مجموعة ضمن الائتلاف الميكروبي بالخطوتين الأوليين في التحلل، وهي تحول مركب cyclohexane إلى مركب cyclohexanone من خلال المرور على مركب cyclohexanol، ولكنها غير قادرة على lactonize وفتح الحلقة. ونتيجة لذلك فإن مجموعة ثانية من الكائنات الدقيقة ضمن الكونسورتيوم الميكروبي، التي لا تستطيع أكسدة الهكسان الحلقي إلى الهكسانون الحلقي تقوم بعملية لكتنة lactonization وخطوات فتح الحلقة، ومن ثم تحلل المركب بالكامل (الشكل 7-11).

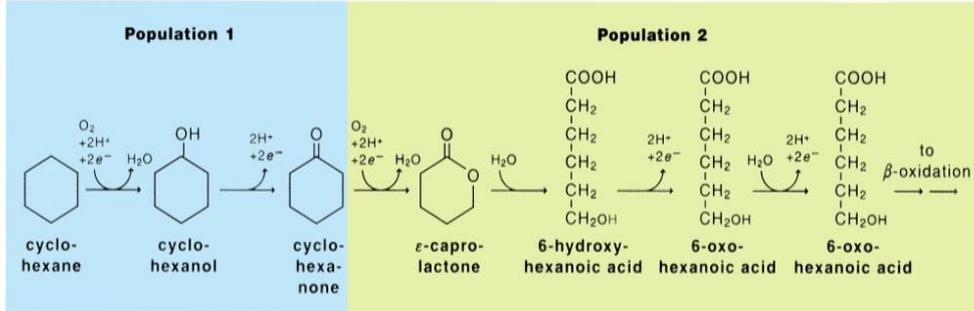


a) الإحلال أو الاستبدال



b) أكسدة

شكل (7-10): تحلل حيوي تحت ظروف هوائية لمركبات أليفاتية مكلورة.



شكل (7-11): تحلل حيوي تحت ظروف هوائية لمركب الهكسان الحلقي (cyclohexane) بواسطة ائتلاف ميكروبي (microbial consortium).

ومما يثير الاهتمام، أن مشتقات مركبات البنتان الحلقي cyclopentane والهكسان الحلقي cyclohexane التي تحتوي على واحدة أو اثنتين من مجموعات الهيدروكسيل أو الكربونيل أو الكربوكسيل تتحلل بسرعة أكبر مقارنة بمركباتها الأم. وفي الحقيقة، فإن الكائنات الدقيقة القادرة على تحليل مركبات cycloalkanols و cycloalkanones متواجدة في جميع العينات البيئية.

3.1.4.7 الهيدروكربونات العطرية Aromatic hydrocarbons

تحتوي الهيدروكربونات العطرية على الأقل حلقة واحدة غير مشبعة ولها بناء عام C_6R_6 حيث أن R تمثل أي مجموعة كيميائية وظيفية (انظر الشكل 7-6). ويعتبر البنزين (C_6H_6) الهيدروكربون الأصل لهذه المجموعة من المركبات الهيدروكربونية، وفيه تتجسد ظاهرة الرنين (resonance)، أو إزالة تموضع الإلكترونات، وهي خاصية نموذجية تتميز بها المركبات الحلقية غير المشبعة. ونظراً لطاقة الرنين، فإن البنزين يعتبر حاملاً بدرجة عالية. (ملاحظة:

كمجموعة، فإن المواد المشابهة للبنزين (العطرية) تتميز بخاصية عطرية - ومن هنا اشتق اسمها).

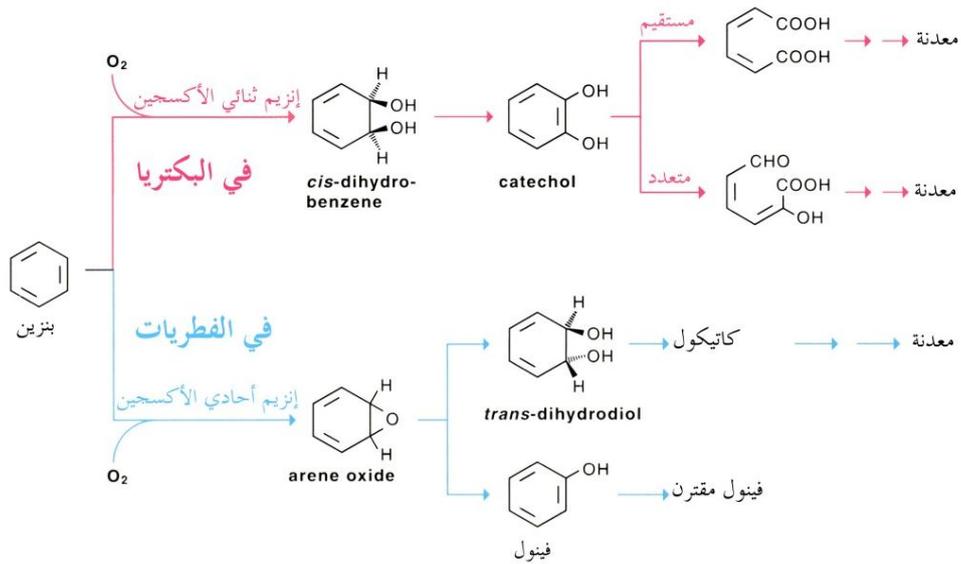
إن المركبات العطرية - بما في ذلك الهيدروكربونات متعددة العطرية الحلقية (polyaromatic hydrocarbons) (PAHs) التي تحتوي على اثنين أو أكثر من حلقات البنزين المندمجة - يتم تخليقها طبيعياً بواسطة النباتات.

فمثلاً، تشكل هذه المركبات مكوناً رئيسياً لبوليمر النبات الشائع، اللجنين. ويحدث تحرر وتراكم للمركبات العطرية في البيئة كنتيجة لتلك العمليات الطبيعية مثل حرائق الغابات والحشائش من ناحية أخرى، فإن المصادر البشرية الرئيسية للمركبات العطرية تتمثل في عمليات تصنيع الوقود الأحفوري واستغلاله بالحرق. فمثلاً، يعتبر البنزين واحداً من مكونات الجازولين الذي يتحرر إلى البيئة المحيطة؛ وهو يمثل هاجساً مهماً لأنه مسبب للسرطان.

وتتميز المركبات العطرية، خاصة الهيدروكربونات متعددة العطرية (PAHs)، بأنها ذات ذوبانية منخفضة في الماء، ولهذا فهي توصف بأنها غير محبة للماء (hydrophobic) بدرجة كبيرة جداً. وكما هو شائع مع المركبات غير المحبة للماء، فإن المركبات العطرية توجد عادة مدمصة على سطوح حبيبات التربة والرسوبيات. إن خاصيتي انخفاض الذوبانية وارتفاع القابلية للإدمصاص معاً أدى إلى أن يصبح التيسر البيولوجي لهذه المواد متدنياً وأن تكون معدلات تحللها حيويًا بطيئاً. ويعتبر هذا صحيحاً بشكل خاص في حالة مركبات PAHs ذات الثلاث حلقات أو أكثر وذلك لأن الذوبانية في الماء تقل مع زيادة عدد الحلقات.

هناك تشكيلة واسعة من البكتريا والفطريات التي يمكن أن تحلل المركبات العطرية. وتحت الظروف الهوائية، تكون مرحلة التحول الأولى الأكثر شيوعاً هي إضافة الهيدروكسيل (hydroxylation)، التي تتمثل في إضافة ودمج الأكسجين الجزيئي (O₂). وتقع الإنزيمات

التي ترتبط بهذه التحولات الأولية ضمن إحدى مجموعتين: إنزيمات ثنائية الأكسجين (dioxygenases) التي تدمج ذرتي الأكسجين الجزئيين ضمن تركيبة PAH، أما المجموعة الثانية فهي إنزيمات أحادية الأكسجين (monooxygenases)، التي تدمج ذرة أكسجين واحدة فقط. وعموماً، فإن البكتريا تحول مركبات PAHs أولاً بمهاجمتها بواسطة إنزيمات ثنائية الأكسجين عند نقطة Cis-dihydrodiol، التي يتم لاحقاً إعادة تركيبها العطري (rearomatized) لتنتج مركباً وسيطاً يسمى كاتيكول (catechol). ويتم عندئذ قطع الحلقة بواسطة انزيم آخر ثنائي الأكسجين كما هو موضح بالشكل (7-12) وذلك إما بسلوك مسار مستقيم (ortho) أو متعدد (meta)، ليتحلل بعدها المركب.



شكل (7-12): مسارات تحلل بيولوجي تحت ظروف هوائية لمركبات عطرية في البكتريا والفطريات.

تقوم الفطريات بتحويل مركبات PAHs أولاً عن طريق هجوم بواسطة إنزيم أحادي الأكسجين. ويقوم هذا الإنزيم بدمج ذرة واحدة من الأكسجين الجزئي ضمن مركب PAH ويختزل ذرة الأكسجين الثانية إلى ماء. ويكون ناتج ذلك تكون مركب أكسيد الأرين (arene oxide)، يعقبه إضافة إنزيمية للماء لإنتاج مركب trans-dihydrodiol (شكل 7-12). أو كبديل عن ذلك فإن مركب أكسيد الأرين يمكن أن يعاد ترتيب ذراته لتكوين فينولات يمكنها أن ترتبط بالكبريتات، وحمض الجلوكيورينك، والجلوكاثانيون. إن هذه المركبات المقترنة تشبه تلك التي تتكون في الكائنات الراقية ويبدو أنها تساعد على منع التسمم وكذلك التخلص من مركبات PAH. وبشكل عام، فإن مركبات PAHs التي لها اثنان أو ثلاث حلقات مشبعة يتم تحويلها بسرعة، حيث أنها كثيراً ما تتمعدن. بينما مركبات PAHs ذات أربع حلقات مشبعة أو أكثر يتم تحويلها بمعدلات أكثر بطئاً وذلك غالباً نتيجة عملية استقلاب مشترك.

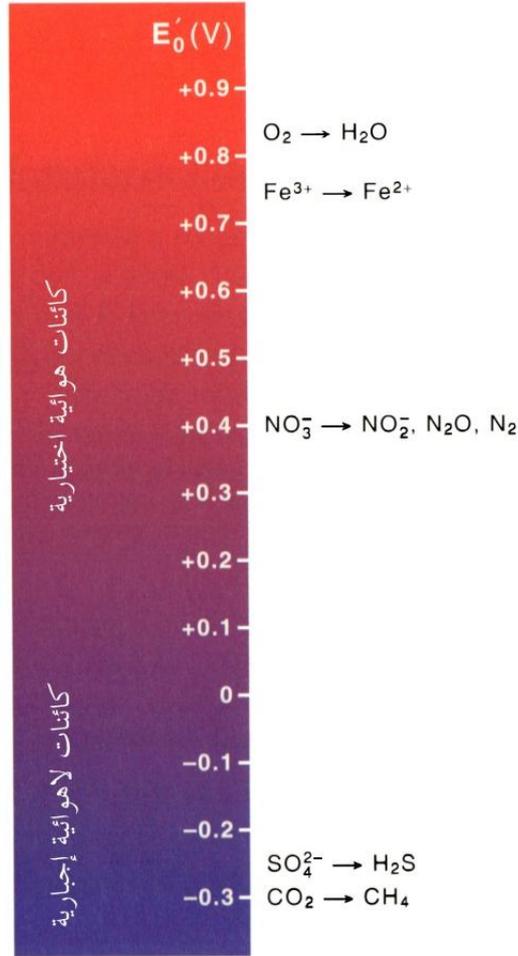
2.4.7 مسارات التحلل الحيوي تحت ظروف لا هوائية

إن الظروف اللاهوائية شائعة في الطبيعة. وعادة ما تتطور هذه الظروف في الماء أو في بيئات رسوبية مشبعة. ولكن حتى في التربة جيدة التهوية توجد بيئات دقيقة (microenvironments) بها قليل من الأكسجين أو لا أكسجين بها إطلاقاً. وفي جميع هذه البيئات تسود حياة لا هوائية (anaerobiosis) عندما يكون معدل استهلاك الأكسجين بواسطة الكائنات الدقيقة أعظم من معدل سريان (diffusion) الأكسجين خلال الهواء أو الماء. وفي غياب الأكسجين، يمكن أن تتمعدن المركبات العضوية من خلال

التنفس اللاهوائي، الذي يتم فيه استخدام مستقبل للإلكترونات بدلاً عن الأكسجين (انظر الجزء 2.1.3.7). وتشمل السلسلة البديلة لمستقبلات الإلكترونات في البيئة كل من الحديد، والنترات، والمنجنيز، والكبريتات، والكربونات التي وردت هنا في ترتيب من الأعلى قدرة على الأكسدة إلى الأعلى قدرة على الاحتزال. إن هذا التسلسل (progression) يعني أن هذه المستقبلات تستخدم عادة حسب هذا الترتيب لأن مقدار الطاقة المتولدة للنمو تعتمد على جهد الأكسدة (oxidation potential) لمستقبل الإلكترونات. ونظراً لأنه ليس من بين مستقبلات الإلكترونات هذه ما تعادل قدرته على الأكسدة قدرة الأكسجين فإن النمو تحت الظروف اللاهوائية لا يكون أبداً بنفس كفاءة النمو تحت الظروف الهوائية (الشكل 7 - 13)، كذلك (انظر جزء التنفس في الباب 4).

إن مسارات التحلل اللاهوائي للمركبات العضوية لم يتم دراستها باستفاضة مثل مسارات التحلل تحت الظروف الهوائية. ومن المثير للاهتمام، أن مركبات كثيرة يتم تحللها بسهولة تحت الظروف الهوائية مثل المركبات الأليفاتية المشبعة، يصبح تحللها أكثر صعوبة تحت ظروف لا هوائية. لكنه، وفي حالة مجموعة واحدة على الأقل من المركبات وهي تلك التي تكون عالية الهلجنة (highly halogenated) فإن المكونات المهلجنة تزال بسرعة أكبر تحت الظروف اللاهوائية. لكنه وبمجرد التخلص من الهالوجينات، فإن الجزيء المتبقي يسلك سلوكاً مثالياً أي أنه يتحلل عادة بسرعة أكبر وبكميات أعلى تحت الظروف الهوائية منه تحت الظروف اللاهوائية. وكنتيجة لهذه العملية المرحلية المتتابعة (sequential) فقد تم تطوير

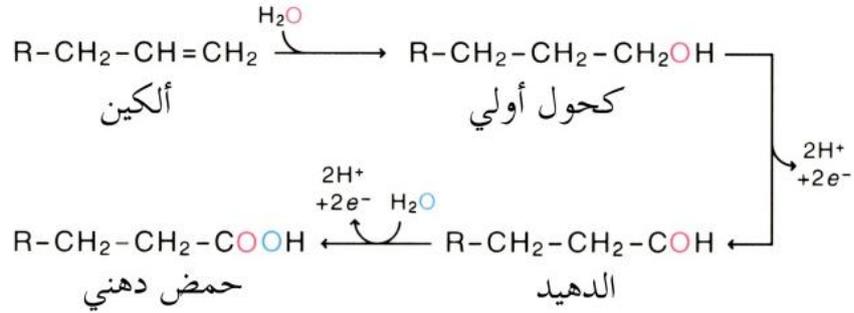
تقنيات تستثمر المعاملات الهوائية-اللاهوائية المتتابعة للوصول إلى الأسلوب المثالي لتحلل وتفكيك المركبات عالية الملوحة.



شكل (7-13): مدى جهود الأكسدة والاختزال التي توجد في البيئات التي تعيش فيها عادة كائنات دقيقة نشطة أيضاً. بينما تشير الظروف الهوائية إلى جهد محدد، فإن الكائنات الاختيارية والإجبارية اللاهوائية تقوم بعمليات الأيض على امتداد جهد أكسدة واختزال واسع.

1.2.4.7 الهيدروكربونات الأليفاتية

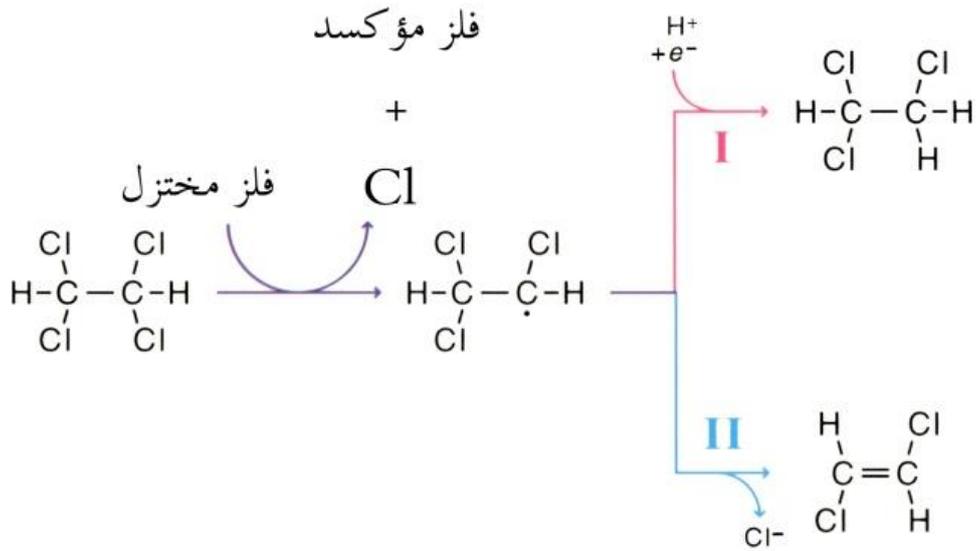
يتم تحلل الهيدروكربونات الأليفاتية المشبعة ببطء وذلك تحت الظروف الهوائية، هذا إذا كانت أساساً قابلة للتحلل. ونرى الدليل على هذا البطء أو عدم حدوث تحلل لهذه المركبات في الطبيعة. فمثلاً، نجد أن الهيدروكربونات في الخزانات الطبيعية الجوفية للنفط (التي توجد تحت ظروف لاهوائية) لا يحدث لها تحلل، على الرغم من وجود كائنات دقيقة. من ناحية أخرى، فإن المركبات الأليفاتية غير المشبعة وتلك التي تحتوي على أكسجين (الكحولات الأليفاتية والكيتونات) تتعرض للتحلل الحيوي بسرعة تحت الظروف اللاهوائية. إن المسار المقترح للتحلل الحيوي للهيدروكربونات غير المشبعة هو هدرته الرابطة المزدوجة وتحول هذه المركبات إلى كحول، ومن ثم أكسدتها إلى كيتون أو ألدهيد، ويعقب ذلك في النهاية تكون حمض دهني (الشكل 7-14).



شكل (7-14): مسار عام لتحلل حيوي لاهوائي لمركب ألكين.

يمكن للمركبات الأليفاتية المهلجنة أن تتحلل جزئياً أو كلياً تحت الظروف اللاهوائية من خلال تفاعل تحول يسمى الإزالة الاختزالية للهالوجينات (reductive dehalogenation).

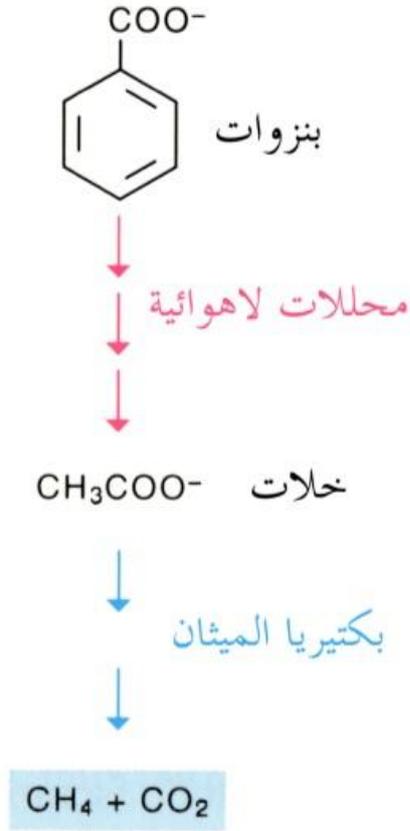
وقد يتم تسهيل عملية إزالة الهالوجينات اختزالياً عن طريق فلز انتقالي أو معقدات فلزية. هذه الخطوات موضحة في الشكل (7-15). ففي الخطوة الأولى، يتم نقل الإلكترونات من الفلز المختزل إلى المركب الأليفاتي المهلجن منتجة شق ألكيل ويتحرر الهالوجين. ويمكن لشق الألكيل بعدها أن يحصل على ذرة هيدروجين (الخطوة I)، أو يفقد ذرة هالوجين ثانية ليكون ألكين (الخطوة II). وعموماً، تجذب الظروف اللاهوائية تحلل المركبات عالية الهلجنة، بينما تجذب الظروف الهوائية تحلل المركبات أحادية الهالوجين وتلك غير المهلجنة.



شكل (7-15) : إزالة الهالوجينات اختزالياً لمركب هيدروكربوني مكلور في وجود فلز ليكون شق ألكيل (alkyl). في الخطوة (I) يحصل شق الألكيل على ذرة هيدروجين. أما في الخطوة (II) يفقد شق الألكيل ذرة هيدروجين ثانية ليكون ألكين (alkene).

2.2.4.7 الهيدروكربونات الأروماتية (العطرية)

كما هو في حالة الهيدروكربونات الأليفاتية، يمكن للمركبات الأروماتية أن تتحلل بالكامل تحت الظروف اللاهوائية إذا ما تم أكسجتها (إضافة الأكسجين إليها). وحديثاً برز أيضاً دليل على أنه حتى المركبات الأروماتية التي لم يحدث فيها إحلال تتحلل ببطء تحت الظروف اللاهوائية. وتتطلب المعدنة اللاهوائية للمركبات الأروماتية عادة مجتمعات ميكروبية مختلطة تعمل عشائرها معاً تحت جهود أكسدة واختزال مختلفة. فمثلاً، يمكن أن تتم معدنة البنزوات (benzoate) عن طريق إكثار كائن محلل للبنزوات (benzoatedegrader) لا هوائي في بيئة يوجد فيها مختزل هوائي لمركب الميثانوجين أو الكبريتات. ضمن هذا الائتلاف، يتم تحويل البنزوات بواسطة كائن لا هوائي أو أكثر لتنتج أحماضاً أروماتية التي تحول بدورها إلى مواد بادئة مثل الخلات وثاني أكسيد الكربون والفورمات، يتشكل منها مركب الميثانوجين. إن هذه الجزيئات الصغيرة يمكن أن تستثمر عندئذ بواسطة بكتريا الميثان (methanogens) (شكل 7-16). ويمكن أن توصف هذه العملية على أنها سلسلة غذاء لا هوائية لان الكائنات التي تقع عند مراتب أعلى للسلسلة الغذائية لا تستطيع الاستفادة من الخلات أو مواد بادئة أخرى تؤدي إلى تكوين الميثان، بينما لا تستطيع هذه الكائنات الاستفادة من الجزيئات الأكبر مثل البنزوات. وتستخدم الكائنات المولدة للميثان ثاني أكسيد الكربون كمستقبل نهائي للإلكترونات، مكونة ميثان. (ملاحظة: يجب عدم الخلط بين الكائنات المنتجة للميثان (methanogens) والبكتريا التي تؤكسد الميثان هوائياً إلى ثاني أكسيد الكربون Methanotrophic).



شكل (7-16): مثال عن سلسلة غذاء لاهوائية يوضح تكون مركبات بسيطة من البنزوات بواسطة عشيرة من بكتيريا لاهوائية وما يتبعه من الاستفادة من المواد الجديدة المتاحة بواسطة مجموعة ثانية، وهي بكتيريا الميثان (Methanogenic).

5.7 تحول الملوثات الفلزية

تشكل الفلزات مجموعة ثانية مهمة من الملوثات. وفي الواقع، فإن مسحاً قامت به وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) عام 1984 لعدد 395 موقعاً تحت الاستصلاح أظهر أن

الفلزات (مثل الرصاص، الكاديوم، الزنك، النحاس) كانت الفئة الأكثر شيوعاً من بين الملوثات الأخرى. وتشكل الفلزات أحد المكونات الجوهرية للخلايا الميكروبية. فمثلاً، يقوم الصوديوم والبوتاسيوم بتنظيم التدرج خلال غشاء الخلية، بينما يوفر النحاس والحديد والمنجنيز إنزيمات فلزية (metalloenzymes) للبناء الضوئي وانتقال الإلكترونات. من ناحية أخرى، فإن الفلزات يمكن أيضاً أن تكون شديدة السمية للكائنات الدقيقة. ومع أن الفلزات الأكثر سمية هي الفلزات غير الضرورية مثل الكاديوم والرصاص والزرنيق، إلا أن الفلزات الضرورية أيضاً يمكن أن تصبح سامة عند تراكيز مرتفعة.

ما هو مصير الفلزات في البيئة؟ إن الملوثات الفلزية والمواد التي تحتوى عليها ضمن تركيبها لا تتحلل بنفس الأسلوب الذي تتحلل به الجزيئات التي يشكل الكربون أساساً في تركيبها وذلك لسببين: (1) خلافاً للكربون، فإن ذرة الفلز لا تشكل وحدة البناء الأساسية للمكونات الخلوية الجديدة. (2) بينما يتم انطلاق كميات معتبرة من الكربون إلى الهواء الجوي في صورة غازية، فإنه من النادر أن تدخل الفلزات للبيئة في صورة متطايرة أو غازية. (توجد بعض الاستثناءات لهذه القاعدة - فالزرنيق والسيلينيوم، يمكن أن يتحولوا بواسطة الكائنات الدقيقة ويتعرضا للتطاير تحت ظروف معينة). لكنه، وبشكل عام، فإن عدم قابلية الفلزات للتحلل يعني أنه من الصعب التخلص من ذرات الفلزات من البيئة. لذلك، فإن وجود مستويات محلية مرتفعة للفلزات هو أمر شائع، خاصة في الدول الصناعية المتطورة. ونتيجة لذلك، فإن هذه الفلزات يمكن أن تتراكم في النظم الحيوية، حيث تشكل سميتها تهديداً لصحة الإنسان والبيئة.

يمكن أن تتعرض جزيئات الفلزات والمواد التي تحتوي عليها لتفاعلات تحول، تقوم بالعديد منها كائنات دقيقة. إن طبيعة هذه التفاعلات جديدة بالاعتبار من ناحية تقييم سمية الفلزات في البيئة، ذلك أن التأثيرات السامة كثيراً ما تتوقف على صيغة الفلز أكثر من اعتمادها على التركيز الكلي للفلز. وعموماً، فإن الصور الأكثر نشاطاً للفلزات المضافة هي الأيونات الحرة للفلزات. وتجدر الإشارة إلى أن الفلزات الأكثر سمية هي كاتيونات الزئبق (Hg^{+2}) والرصاص (Pb^{+2})، وذلك على الرغم من أن كاتيونات لفلزات أخرى (الخاصين، البيريليوم، البورون، الكادميوم، النحاس، النيكل، المنجنيز، السيلينيوم، الفضة، القصدير، الزنك) يمكن أيضاً أن يكون لها تأثيرات سامة: (التأثيرات السامة على الإنسان لعدد مختار من الفلزات تم مناقشتها في الجزء 1.8.21).

1.5.7 تأثيرات الفلزات على الأيض الميكروبي

إن التداخلات بين الفلزات الثقيلة والكائنات الدقيقة ذات طبيعة معقدة. ويتطلب حدوث التسمم الفلزي امتصاص الفلز بواسطة الخلية الحية، وهو ما يعتمد على عوامل كثيرة، مثل الرقم الهيدروجيني، ونوع التربة، ودرجة الحرارة. فمثلاً، يزداد تراكم الفلزات بواسطة الشد على سطح الخلية مع ارتفاع الرقم الهيدروجيني. كما أن انتقال الفلز إلى داخل خلية ما يعتمد على الرقم الهيدروجيني أيضاً، إذ تبلغ معدلات الانتقال أقصاها عند رقم هيدروجيني في المدى 6.0-7.0. وبمجرد امتصاص فلز معين بواسطة خلية، يمكن أن تنتج سمية. وبعد فترة أولية تظهر خلالها التأثيرات السمية للفلزات تكتسب الكائنات الدقيقة عادة آليات تحمل تمكنها من إصلاح العطب الناتج عن التأثير السمي للفلز، لتصبح بعدها قادرة

على بدء العمليات الأيضية والنمو مرة ثانية عند معدل طبيعي تقريباً. إن الفترة الزمنية اللازمة لتطوير آليات تحمل تتأثر بعوامل حيوية (biotic) وعوامل غير حيوية (abiotic). وقد تشمل العوامل الحيوية المهمة الحالة الفسيولوجية للكائن الحي المستهدف، مثل مستوى التغذية، والتكيف الوراثي الذي ينتج عنه مقاومة التأثيرات السلبية للفلزات. أما العوامل غير الحيوية فتضم الخصائص الكيميائية الفيزيائية للبيئة مثل الرقم الهيدروجيني، ودرجة الحرارة، وجهد الأكسدة والاختزال، وهي العوامل التي تؤثر جميعاً على ترسيب أو تعقيد الفلزات. وتنتج التأثيرات السامة الخاصة للعناصر الثقيلة على الكائنات الدقيقة عن طريق شد الفلز على الرابطة (ligands) الخلوية مثل البروتينات والأحماض الأمينية. ويقود شد الفلز بواسطة الرابطة إلى تغيرات شكلية وفقد للنشاط الطبيعي للرابطة (ligand). فمثلاً، يمكن أن تؤدي القابلية المرتفعة جداً لكاتيونات الفلزات لمجموعات السلفهيدرال بالبروتين (protein sulfhydryl groups) إلى حدوث تغيرات في طي البروتين (protein folding). إن كلاً من تركيب الرابطة (ligand) وحجم الفلز يؤثران على نوع الشد. فالأيونات الكبيرة لفلزات مثل النحاس والفضة والذهب والزنك والكاديوم تفضل تكوين روابط تساهمية (Covalent bond) مع المجموعات الكبريتية (sulfhydryl groups) وبالمقابل، فإن الأيونات الصغيرة عالية الشحنة الموجبة مثل الألومنيوم والكروم والكوبالت والحديد والتيتانيوم والزنك والقصدير تفضل تكوين معقدات مع مجموعات الكربوكسيل والهيدروكسيل والفوسفات ومجموعات الأمينو (Amino groups).

التحولات الميكروبية للفلزات

طورت الكائنات الدقيقة آليات مختلفة من المقاومة لمنع سمية الفلزات: ومن بين هذه الآليات سيتم بإيجاز مناقشة أكسدة واختزال الفلزات، تعقيد الفلزات (metal complexation) وألكلة الفلزات.

الأكسدة والاختزال (Oxidation / Reduction)

تستحث الأكسدة حركة الفلزات وتخفّزها بعيداً عن الخلية. فمثلاً يمكن لبكتريا *Bacillus megaterium* بصبغة جرام (gram positive) أكسدة عنصر السلينيوم إلى سيلنيات، وهو التفاعل الذي يزيد حركة السيلينيوم. وبالمقابل، تقوم بعض الكائنات الدقيقة باختزال فلزات مثل الكروم مؤدية إلى ترسبها لتصبح غير متحركة.

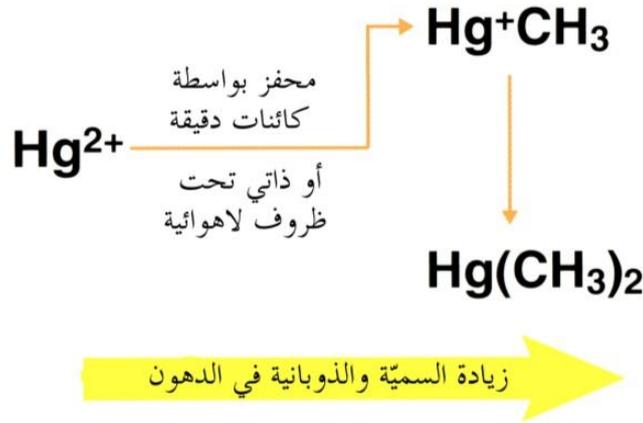
التعقيد (Complexation)

يمكن لكائنات دقيقة أخرى تعقيد فلزات بكفاءة وتحويلها إلى مواد بوليميرية إما خارج الخلية أو داخلها. فمثلاً، وجد أن اليورانيوم يتراكم خارج جدار الخلية على شكل ألياف إبرية مكونة طبقة يبلغ سمكها 2 ميكرومتر تقريباً على سطح خميرة من نوع *Saccharomyces cerevisiae*. وبالمقابل، فإن اليورانيوم يتراكم في صورة ترسبات كثيفة فيما بين خلايا *Pseudomonas aeruginosa*.

الألكلة (Alkylation)

إن بعض الكائنات الدقيقة يمكنها تحويل الفلزات بواسطة الألكلة (alkylation)، التي هي عبارة عن انتقال واحدة أو أكثر من مجموعات الرابطة العضوية (مثلاً: مجموعة

الميثيل) إلى الفلز، مكونة مركبات عضوية فلزية (organo- metallic) مستقرة وثابتة. ومن أمثلة ذلك فلز الزئبق، كما هو موضح في الشكل (7-17). وتختلف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمركبات الفلزية - العضوية (organometals) عن تلك الخاصة بالفلزات النقية. وعلى سبيل المثال تزداد القابلية للتطاير، وهو ما يساعد على حركة المركبات الفلزية - العضوية خلال محلول التربة ليصل في نهاية المطاف إلى الهواء الجوي. وعموماً، تعتمد درجة حركية المركبات الفلزية - العضوية على طبيعة وعدد الرابطة العضوية المتاحة. لكن يكفي وجود مجموعة ميثيل واحدة لكي يرفع بدرجة معنوية من درجة تطاير فلز ما وقابليته للدهون (Lipophilicity). إن التحولات التي تزيد التطاير تسمح للكائنات الدقيقة بالتخلص من فلز سام من بيئتها. من ناحية أخرى، فإن الزيادة المتزامنة لقابلية الفلز للدهون يمكن أن يتسبب في التضخيم الحيوي (biomagnification) للفلز، محدثاً تأثيرات سامة على عناصر أخرى من النظام الحيوي (ecosystem).



شكل (7-17): الألكلة (alkylation) الميكروبية للزئبق.

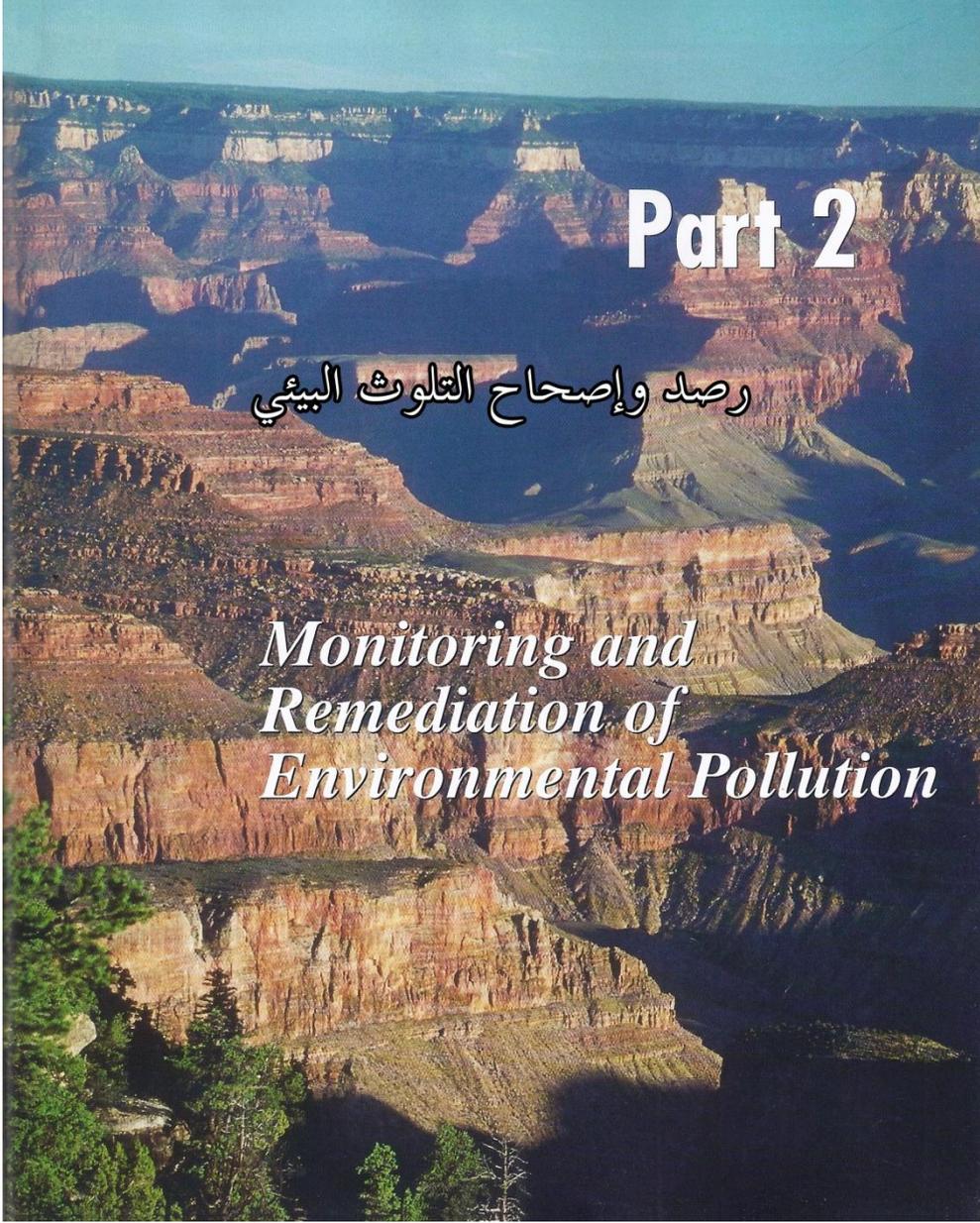
المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Atlas R.M and Bartha, R. (1993) *Microbial Ecology*, 3rd Edition. The Benjamin Cummings, Menlo Park, California.
- Chapelle F.H. (1993) *Ground water Microbiology and Geochemistry*. John Wiley and sons, New York.
- Gibson D.T. and SubramianV. (1984) *Microbial Degradation of organic Compounds*. Marcel Dekker, New York.
- Hughes M.N. and Pook R.K. (1989) *Metal and Microorganisms*, Chapman and Hill, New York.
- Leahy J.G. and Colwell R.R. (1990) Microbial Degradation of hydrocarbons in the environmental. *Microbiological Reviews*. **54**, 305-315.
- Pitter P and Chudoba J. (1990) *Biodegradability of organic Substances in the Aquatic Environment*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

أسئلة ومسابئلة حسابية

1. عرف التحلل الحيوي (biodegradation)، مع التعرض لمعاني كل من التحول (transformation) المعدنية (mineralization) والأيض المساند (cometabolism).
2. (أ) ارسم بناء مركب n-octane وهو مركب أليفاتي، ذو سلسلة مستقيمة ويحتوي على 8 ذرات كربون.
(ب) هل هذا المركب قابل للتحلل البيولوجي؟
(ج) بداية من المركب الذي رسمته في (أ)، بين كيف يمكن تحويله لجعله أقل قابلية للتحلل الحيوي.
(د) قارن المركب في الجزء (أ) من هذا السؤال بالشكل (7-1)، وافترض ما يلي:
تم تلويث موقع بسبب تسرب من خزان جازولين تحت الأرض. وأن الشركة التي تعمل معها قررت تنظيف الموقع من خلال علاج المشكلة حيويًا. وبمعرفة مكونات الجازولين (التي تشمل عادة مركبات أليفاتية بسيطة ومركبات أليفاتية حلقيية alicyclic وأروماتية). ماهي العناصر المغذية الأخرى التي قد تلزم لإكمال العلاج الحيوي.
3. اذكر وشرح العوامل التي تحدد التيسر الحيوي (bioavailability) لمركب عضوي معين.
4. قارن التركيبات التالية:
(أ) تنبأ بترتيب هذه المركبات من حيث التيسر الحيوي.
(ب) تنبأ بترتيب هذه المركبات من حيث قابليتها للتحلل الحيوي.

- (ج) ما الذي تستخلصه من مقارنة (أ) و(ب) حول العلاقة بين التيسر الحيوي والقابلية للتحلل الحيوي؟
- (د) ما هو نوع التحلل الحيوي الأكثر توقعاً (هوائي أو لاهوائي) لكل من المركبات الثلاثة السابقة؟

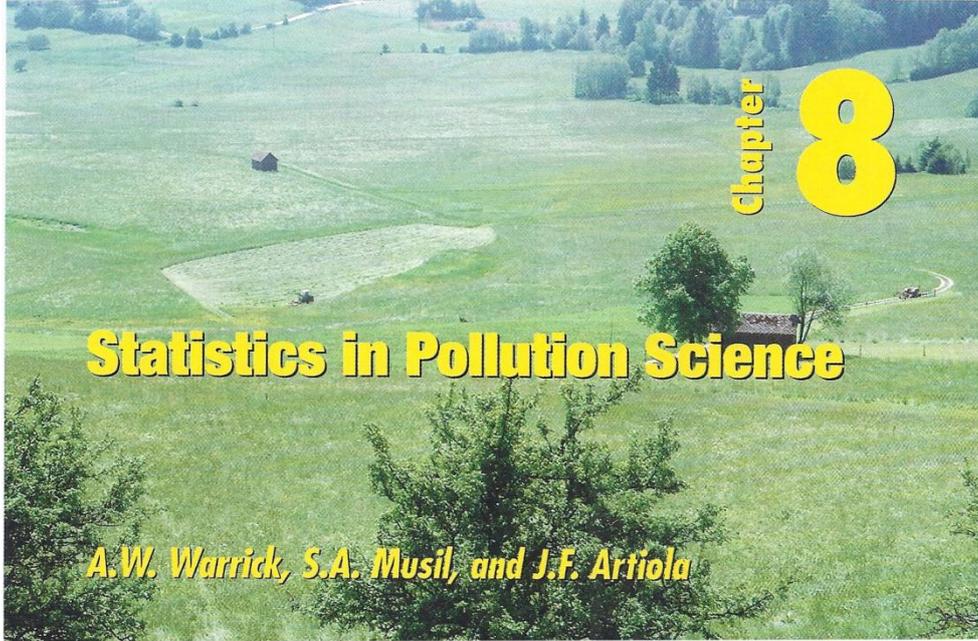


Part 2

رصد وإصحاح التلوث البيئي

*Monitoring and
Remediation of
Environmental Pollution*

الباب الثامن
الإحصاء في علم التلوث



إن أي تحليل إحصائي صادق للبيانات البيئية يكون ممكناً فقط من خلال فهم للأعداد المناسبة للعينات والتباين الموروث في العينة لأنه قد يؤثر على القيمة المقاسة.

1.8 مفاهيم إحصائية

الإحصاء فرع من الرياضيات يتعامل مع جمع وتحليل وعرض المشاهدات المعبر عنها كأرقام. فبعد التحليل، عادة ما نقوم بعرض البيانات العددية في جداول ورسومات بيانية وحتى صور قد تظهر في مجلات علمية متخصصة، وجرائد واسعة الانتشار ومجلات معروفة، أو حتى على برامج تلفزيونية. وفي علم التلوث، كما هو في معظم مناحي الحياة الحديثة،

تطبق الطرق الإحصائية بكثرة للتقييم الكمي لبيانات استخلصت من مشاهدات. وتحديدًا، فإننا نستخدم الإحصاء كإطار للوصول إلى استنتاجات حول عوامل بيئية على أساس مشاهدات حقلية أخذت من مواقع جمع العينات. وفي هذا الباب، سوف نتعرض للمبادئ الأساسية لإقامة خطط القياس وإجراء التحاليل الإحصائية وعرض النتائج.

1.1.8 العينة الإحصائية

نستخدم عادة في علم التلوث تسمية العينة (sample) للإشارة إلى جزء مادي صغير أو لقياس معين. ولذا فإننا قد نتحدث عن قنينة تحوي ماءً على أنها عينة. وكفعل، فإن كلمة يأخذ عينة تعني بشكل عام الحصول على نموذج مادي صغير أو أخذ قياس معين. من ناحية أخرى ففي الإحصاء، تشير تسمية عينة عادة إلى جزء صغير من المجتمع (population) الذي يتم فحصه. وفي هذا السياق، تكون العينة مجموعة كاملة من القناني التي جمعت لدراسة معينة، بدلاً من قنينة واحدة.

إن الأساليب المناسبة لأخذ العينات تمثل الأساس لنتائج التحليل الإحصائي المقبولة. وعموماً، يشمل أخذ العينات جمع بيانات إما عن طريق أخذ عينات مادية (specimens) من موقع دراسة معين أو بإجراء قياسات متعددة عند الموقع. لكنه، وفي بعض الحالات، قد يشمل أخذ العينات الجمع المنتظم للآراء، كما هو في حالة الاقتراع. وفي جميع الأحوال، تتطلب الأساليب المقبولة لأخذ العينات وكذلك البروتوكولات ذات العلاقة أن تعكس العينات التي تم جمعها بشكل كافٍ التجمع المستهدف كله.

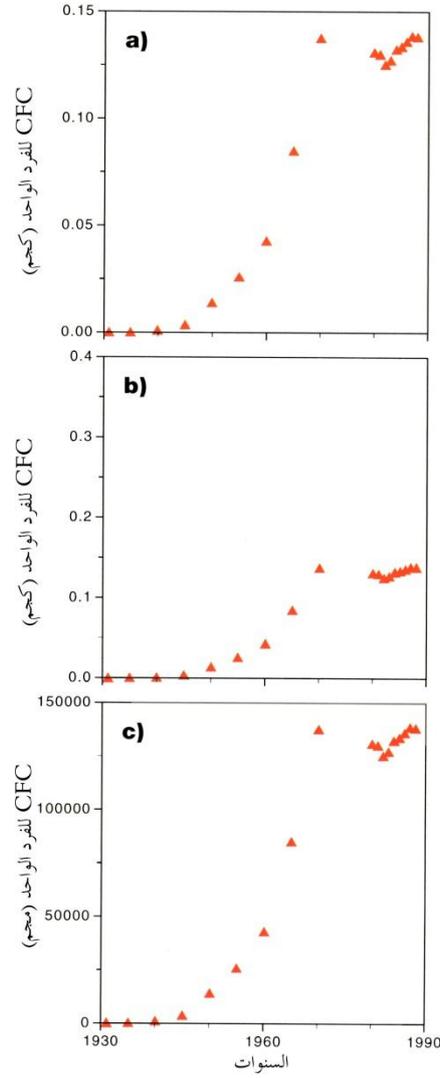
وعلى ذلك، فإن أساليب أخذ العينات التي نستخدمها يجب أن تنتج عينات إحصائية جيدة، بحيث تمثل الأعداد التي نقوم بجمعها ما نحاول قياسه. وحتى نتأكد من تحليل البيانات بشكل صحيح ونستخلص استنتاجات هادفة ومقبولة، فإنه يلزم استخدام أساليب جمع عينات مناسبة والحصول على عينات إحصائية جيدة. (وقد تم وصف أساليب محددة لأخذ عينات لغرض الرصد والمتابعة البيئية بتفصيل أكبر في الباب 9).

2.1.8 العرض المرئي للبيانات

يمكن عرض البيانات العددية بطرق مرئية متنوعة، بما في ذلك الرسومات البيانية الخطية والعمودية (bar) والأشكال العمودية (histograms) والمستديرة (pie chart) والتصويرية (pictogram). إن كل واحدة من هذه الطرق تعطي صورة للبيانات التي يمكنها أن تؤثر على كل من الانطباعات الأولية والتفسير النهائي بالنسبة للشخص الذي يحاول فهمها. وعموماً، فإن عرض البيانات الأسهل فهماً يتمثل في الرسومات، التي يمكن أن يكون لها وحدات ومقاييس ورموز وألوان متنوعة. وفي جميع الأحوال، يتعين أن تكون كل أنواع العروض بسيطة قدر الإمكان وذات عناوين واضحة .

أيضاً، فإن العروض بالرسم يجعلها سهلة من حيث سوء استخدام البيانات. فمثلاً، لاحظ تأثير المقياس على شكل رسم معين (الشكل 8-1) الذي يتناول الانبعاث الكوني السنوي التقديري بالنسبة للفرد الواحد من مواد الكلوروفلوروكربون (CFCs). إن هذه المركبات، التي يشيع استخدامها في البرادات ومكيفات الهواء قد تم ربطها باستنزاف طبقة الأوزون (انظر الجزء 1.3 والجزء 2.5.12). إن جميع المنحنيات في الأشكال [8-1a إلى c]

توضح الانبعاثات السنوية من مواد CFCs من عام 1930 إلى 1990. وفي الشكل (a1-8) يبدأ المحور الرأسي (المحور الصادي) من 0 إلى 0.15 كجم، بينما يبدأ المحور الرأسي في الشكل (b1-8) من 0 إلى 0.4 كجم. إن هذين المنحنيين يظهران اختلافاً في المقياس. إن ميلنا الطبيعي هو التفكير بأن الشكل (a1-8) يظهر زيادة أكبر وأن الشكل (b1-8) يظهر زيادة أصغر لأنه وببساطة (تبدو النتائج أكبر) في الشكل الأول. ولذا فإن البيانات ذاتها التي تبدو في الشكل (a1-8) مرعبة فإنها تظهر في الشكل (b1-8) غير ذلك تماماً. وبالكيفية ذاتها، تم تمثيل بيانات CFCs نفسها مرة ثانية، ولكن تم قياس المحور الرأسي بالملليجرامات بدلاً عن الكيلوجرامات. ولهذا فإن الشكل يظهر اختلافاً في الوحدات مقارنة بالشكلين الآخرين. وهنا مرة أخرى، يؤثر الاختلاف على التفسير. وتبدو الزيادة رقماً هائلاً حيث تغير من 0 إلى 140 ألف، بينما كان أقصى اختلاف قبل ذلك 0.14 فقط!



الشكل (8-1): الانبعاث السنوي من مركبات الكلوروفلوروكربون (CFCs) للفرد الواحد. إن جميع الرسومات هي لنفس البيانات لكن لكل منها مقياس أو وحدة مختلفة على العمود الرأسي، البيانات: Council on Environmental Quality, 1992. us Department of Commerce, 1990.

لا يعتبر أي من الأشكال الواردة بالشكل (1-8) خاطئاً بأي حال - فكل واحد منها قد يكون مفيداً لعدد من الناس لأسباب مختلفة. فكيف إذاً، يتعين علينا عرض بياناتنا؟ وعلى الرغم من أنه لا توجد قواعد ثابتة أو سريعة، فإنه يمكننا استخدام عدد من الخطوط الإرشادية العملية للإجابة على هذا السؤال. وأحد القواعد العامة الخاصة بالتمثيل ثنائي الأبعاد (2-D) للبيانات هو استخدام أرقام مريحة واستخدام معظم المدى العمودي. ونعني بالأرقام المريحة تلك الوحدات شائعة الاستخدام وسهلة القراءة. ففي حالة إنتاج مواد CFC، على سبيل المثال، ربما يكون أفضل مقياس وأنسب وحدات تلك المستخدمة في الشكل (1-8a). أما من ناحية أهمية البيانات والتفاسير، فإن ذلك يتعين تحديده عن طريق الجدول المدعوم، وليس ببساطة عن طريق حجم الأرقام أو طول المحاور.

3.1.8 مسميات رياضية في الإحصاء

إضافة للعروض البيانية، يوجد عدد كبير من الطرق الرياضية لاختبار وتحليل وعرض البيانات. إن هذه المصطلحات الرياضية ورموزها تُستخدم لتعريف الإحصاءات. وفي هذا الباب، فإن المصطلحات والرموز التي سوف نستخدمها مدرجة في الجدول (1-8). وإذا لم تكن على معرفة بهذه المسميات فإنك قد تحتاج للرجوع إلى كتاب إحصاء معين (أنظر المراجع والقراءات الموصى بها في نهاية هذا الباب).

2.8 قياسات وصفية

إن القياسات الوصفية هي عبارة عن أرقام تميز القياسات عموماً. أي أنها تشير إلى مجموعة الأرقام ككل. ومن أمثلة القياسات الوصفية كل من المتوسط (mean) والتباين (variance)، اللذين تم تعريفهما في الجدول (1-8) وسيتم مناقشتها في الأجزاء التالية.

1.2.8 توزيعات تكرار مُقاسة

يمكن أن تكون القيم المقاسة متصلة (discrete) أو مستمرة. فالقيم المتصلة أرقام يمكن عدّها. وبذلك، فإذا ما أحصينا عدد البعوض في فخ معين، تكون النتائج متصلة: بمعنى، أنها تتكون: فقط من أعداد كاملة، 0، 1، 2، ... ولا يكون ممكناً في هذه الحالة إلا أرقام كاملة فقط. وبالكيفية ذاتها، فإذا كانت مشاهداتنا هي ببساطة نعم أو لا، أو شغال وغير شغال، فإنه يمكننا تحويل هذه المشاهدات إلى قيم أرقام من 0 و1. من جهة أخرى، فإن القيم المستمرة يمكن أن تكون أي رقم حقيقي ضمن حدود معقولة، وأن مشاهداتنا ليست مقتصرة على الأرقام الكاملة. فمثلاً، إذا قمنا بقياس طول ضفدعة معينة، أو درجة حرارة مياه بحيرة ما أو تركيز الأوكسجين، فإن القيم تكون مستمرة، بمعنى، أنها تشمل كسوراً، مثل 1.23 أو 0.459 جنباً إلى جنب مع الوحدات المناسبة. وقد تشمل القيم المستمرة مدى مطلقاً أو مدداً متوقعاً. فمثلاً، يكون المدى المطلق 0 إلى 100 إذا ما كنا ننظر إلى نسبة مئوية حجمية مثل المكون الغازي، لكن المدى المتوقع من المحتمل أن يكون أقل اتساعاً. (وفي هذا الباب سوف يتم التركيز على المتغيرات المستمرة، مثل تلك الممكن قياسها بأسلوب تحليلي معين).

افتراض على سبيل المثال، أننا نقيس محتوى التربة من الطين عند مواقع عدة داخل الحقل. (المحتوى من الطين مؤشر هام جداً للطبيعة النشطة للتربة؛ انظر الجزء 2.2). وقد أدرج في الجدول (8-2) عدد 36 قيمة لنسب الطين من عينات تربة تم جمعها من مساحة 90 هكتاراً، كل منها يمثل العمق 30 سم. وتتراوح القيم المقاسة ما بين الحد الأدنى (24.9%)

إلى الحد الأقصى (53.2%). إن المشكلة هي أن القيم الأصلية المدرجة بالجدول لا تعطينا كثيراً من المعلومات. فالأرقام يلزم ترتيبها - عادة بشكل تصاعدي- حتى نتتمكن من استخدامها. وعندما نحصل على البيانات في تتابع منظم، يمكننا أن نستنبط خلاصات منها.

من إحدى طرق ترتيب هذه البيانات بناء شكل تكراري بالأعمدة (frequency histogram)، وهو شكل نرط فيه بيانياً القيم المقاسة مقابل أعداد المشاهدات، ويجعلنا هذا الرسم نرى كم مرة تكرر القيم المقاسة. إن التكرار العمدي شكل متخصص يفسر التوزيع الخاص بالقيم . ويمثل الشكل (8-2) التكرار بطريقة الأعمدة لبيانات الطين في الجدول (8-2). ونقوم أولاً بتقسيم مدى القيم المقاسة من 24.9 إلى 53.2 إلى مجالات محددة صغيرة وغير متقاطعة تسمى المسافات البينية للفئة (class interval). وتبدو المسافات البينية للفئة على الخط الأفقي (المحور السيني)، بينما يبدو عدد المشاهدات على الخط العمودي (المحور الصادي). بعدها نقوم بحصر عدد المشاهدات في كل مسافة بينية للفئة لتتمكن من الربط البياني لهذا الرقم مقابل المسافة البينية للفئة. وفي هذه الحالة، نختار مسافة بينية للفئة ذات عرض يساوي 5. وهنا فإن المسافات البينية التي تبدأ من صفر (ولا تشملها) وتمتد حتى 20، لا تظهر أي مشاهدات، لكن تلك التي تزيد على 20 إلى 25 وتنتهي بالقيم التي هي أكثر من 50 حتى 55 تظهر نتائج يمكننا توقعها بيانياً. ولذا نبين (أكثر من 20-25، 1) على أنه العمود الأول، بحيث يمتد هذا العمود أفقياً من 20 حتى 25 وعلى أي من الجانبين. ويظهر العمود الثاني سبعة مشاهدات في المدى أكثر من 25 إلى 30، وهكذا (أنظر الجدول 8-3).

جدول (8-1): رموز إحصائية وتعريفاتها

المسمى	الرمز	التعريف
متوسط العينة أو المتوسط التقديري	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$	يتم تقدير المتوسط من القيم x_1, x_2, \dots, x_n . (يتم تعريف حالات خاصة عن طريق $\bar{y}, \bar{Y}, \bar{X}$).
المتوسط	μ	متوسط المجتمع (population) أو المتوسط الحقيقي. يساوى قيمة \bar{x} إذا أصبحت قيمة n كبيرة أو إذا ما شملت جميع قيم x_i الممكنة.
تباين العينة	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	تقدير للتباين على أساس العدد n التي تحدها x_1, x_2, \dots, x_n (إذا شملت كل القيم الممكنة للعدد n ، فإنه يتعين استخدام n في المقام بدلاً عن $n - 1$).
التباين	σ^2	التباين الحقيقي للمجتمع.
الانحراف المعياري	S, σ	تم تعريفه أعلاه كما هو في حالة s^2 و σ . في حالات خاصة تستخدم الرموز S_x و S_y .
الاحتمالية	$P(X < x)$	احتمالية أن تكون قيمة تم اختيارها عشوائياً أقل من قيمة محددة x .
دالة الكثافة المحتملة	$f(x)$	دالة تعطى التوزيع التكراري.
دالة احتمالية تراكمية	$F(x)$	تكامل $F(x)$ من $-\infty$ إلى x وتعطى P أعلاه.
معامل الاختلاف	$CV = \frac{\sigma}{\mu} \text{ or } \frac{s}{\bar{x}}$	انحراف معياري نسبي. يمكن تعريفه أيضاً كنسبة مئوية.
الحد الأقصى للخطأ المسموح به	d	خطأ محدد يستخدم في حساب عدد العينات الضروري.

المسمى	الرمز	التعريف
الميل	$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X^2}$	ميل لتراجع مستقيم لعدد n من البيانات الزوجية. البيانات الزوجية هي $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$.
التقاطع	$a = \bar{Y} - b\bar{X}$	التقاطع Y - للتراجع الخطى لعدد n من البيانات الزوجية .
معامل الارتباط	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X s_Y} = \frac{bs_X}{s_Y}$	علاقات خطية بين متغيرين تم أخذ عينات منها لعدد n من المرات. العينات الزوجية هي $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$. يتراوح المدى ما بين -1 و 1 .
معامل التحديد	r^2	مربع قيمة (r) أعلاه وذلك للارتباط الخطى . يتراوح ما بين 0 و 1 .
القيمة المتوقعة	$Y = a + b X$	القيمة المتوقعة للمتغير التابع Y .

جدول (2-8): ستة وثلاثون قيمة للطين (%) أخذت على امتداد مساحة 90 هكتاراً عند عمق 30 سم. يساوى متوسط العينة (\bar{x}) والتغير المعياري (s) 35.3 و 6.38، على التوالي.

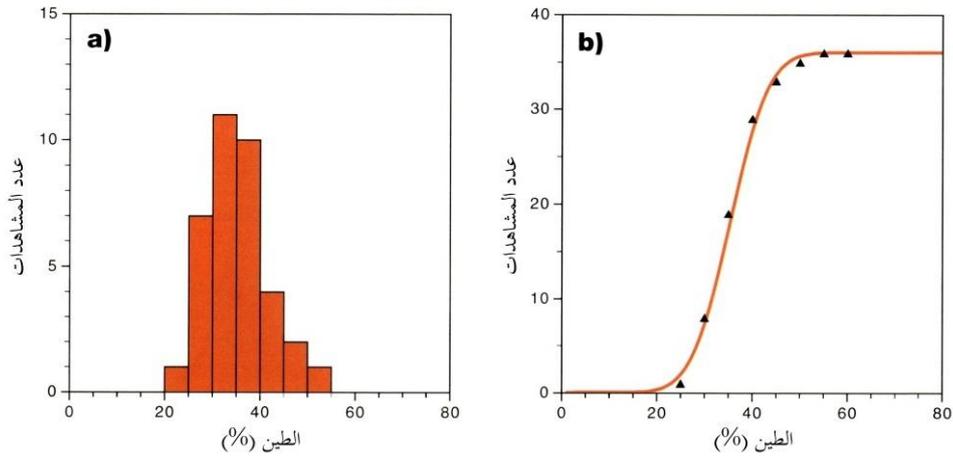
الطين (%)	الطين (%)	الطين (%)	الطين (%)
36.1	45.5	38.8	34.7
40.1	27.0	38.5	29.5
37.4	42.5	42.6	43.8
45.3	27.2	36.3	33.3
28.5	27.2	32.1	37.5
30.2	24.9	53.2	33.3
33.6	33.6	39.9	29.5
39.3	37.4	34.7	36.1
32.3	31.3	30.5	25.4

جدول (3-8): نقاط الربط البياني الخاصة بالشكل (2-8) باستخدام بيانات الطين من الجدول (2-8).

المسافة البينية (x الخاصة بالشكل 2-8)	عدد المشاهدات (y الخاصة بالشكل 2-8 ب)	القيمة القصوى للمسافة البينية (x الخاصة بالشكل 2-8 ب)	العدد التراكمي للملاحظات (y الخاصة بالشكل 2-8 ب)
5 - 0	0	5	0
10 - 5	0	10	0
15 - 10	0	15	0
20 - 15	0	20	0
25 - 20	1	25	1
30 - 25	7	30	8
35 - 30	11	35	19
40 - 35	10	40	29
45 - 40	4	45	33
50 - 45	2	50	35
55 - 50	1	55	36
60 - 55	0	60	36

ويظهر الشكل العمودي (histogram) الناتج أن معظم القيم تميل للتجمع قرب المركز أي عند 30 - 35، وأن طول الأعمدة يقل على كلا الجانبين من المركز. ولذا فمن أين أتى عرض الفئة الذي يساوي (5)؟. في واقع الأمر أننا استخدمنا (5) لأنها كانت ملائمة. إن اختيار المسافة البينية للفئة عند تأسيس الشكل العمودي التكراري (frequency histogram) تكون عادة عشوائية. لكن المشكلة هي إذا اخترنا فئات قليلة جداً (أي أن نجعل المسافة البينية للفئة أكبر)، فإننا نفقد معلومات ولا يكون التكرار واضحاً. من جهة أخرى، فإنه إذا ما اخترنا أعداد فئات كثيرة (أي أننا نجعل المسافة البينية بين الفئات أصغر) فإن (الشكل العمودي) يميل لأن يكون غير مصقول. لذا، فإنه يتعين علينا البحث عن حل وسط بين المعلومات الواردة في المسافة البينية بين الفئات وسلاسة

الشكل العمودي. ويمكننا عادة تحقيق هذا الحل الوسط بانتقاء عدد ملائم من الفئات، مثلاً ما بين 5 إلى 15، ثم تقسيم هذا الرقم فيما بين المدى الذي ينحصر بين الحدين الأقصى والأدنى.



شكل (2-8): (a) الشكل العمودي التكراري المقاس. (b) توزيع التكرار التراكمي للطين من الجدول (2-8). يمثل الخط المتصل منحنى افتراضي مؤسس على توزيع طبيعي له نفس المتوسط (mean) والتباين (variance) كاللذين تم تقديرهما من البيانات.

توجد طريقة ثانية لتوزيع قيم الطين بيانياً . فبدلاً من ترتيب القيم في صورة أعمدة متراصة كما في الشكل (2-8a)، فإن النتائج يمكن أيضاً رسمها كتوزيع تكراري تراكمي (cumulative frequency distribution) كما هو موضح في الشكل (2-8b). وفي حالة الرسم بالتكرار التراكمي، تزداد قيم (y) من الصفر إلى $n = 36$ ويبين المنحنى الرقم الإجمالي لكل مشاهدة، أو ما يسمى بالتكرار التراكمي - أي أن كل رقم على المحور السيني يمثل

مجموع المشاهدات كلها عند هذه القيمة أو تحتها. وبذلك، فإن كل نقطة على الرسم توضح النسبة المئوية للطين التي هي أقل من النسبة المئوية على الإحداثي السيني. وقد تم توضيح نقطة النهاية (endpoint) لكل مسافة بينية لفئة كنقطة متصلة في الشكل (8-2b) (أنظر الجدول 8-3). وعلى ذلك، يمكننا رؤية وجود ثماني قيم أقل من 30% طين في مجموعة البيانات.

إن المعلومات التي توجد في شكل الأعمدة التكراري هي ذاتها التي تستخدم في رسم التكرار التراكمي. لكنه، وعلى الرغم من أن هذين الرسمين هما طريقتان متبادلتان لتمثيل البيانات ذاتها بيانياً، إلا أنهما يوفران لنا أشياء مختلفة. فالرسم بطريقة الأعمدة المتراصة (histograms) يتيح لنا رؤية توزيع أو شكل البيانات، بينما يكون التوزيع التكراري التراكمي مفيداً لحساب تقديرات من البيانات. فعلى سبيل المثال، افترض أننا مهتمون بمعرفة نسبة العينات التي تحتوي على أقل من 40% طين. ويبين لنا الشكل (8-2b) أن 29 من أصل 36 عينة يوجد بها نسبة طين أقل من 40%، ولذا يصبح من السهل تقدير أن النسبة هي 80.6%.

توجد أيضاً طرائق لوصف البيانات الإحصائية باستخدام قيمة عددية مفردة. إحدى هذه الطرائق هي المتوسط التجريبي أو متوسط العينة (\bar{x})، وهو عبارة عن المتوسط الحسابي الذي يمكن تحديده بالمعادلة: (8-1):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

حيث أن x_i هي المشاهدات التي تحمل الرقم (i) (الأول، الثاني، الثالث.... الخ)، أما x_1, x_2, \dots, x_n فهي القيم المشاهدة، وأن العدد (n) يشير للقيم ويساوي 36. وبالنسبة للطين، فإن x يكون حاصل جمع كل القيم المشاهدة (x) مقسومة على n ، لتعطي القيمة $\bar{x} = 35.3$ ولهذا، فإن المتوسط هو قياس للقيمة المركزية، أي أنه قياس للنزعة المركزية (central tendency).

كثيراً ما نكون مهتمين بمعرفة إلى أي مدى تكون العينة موزعة حول المتوسط. بمعنى، الرغبة في معرفة ما إذا كانت معظم القيم قريبة من \bar{x} أو أنها منتشرة على مدى واسع. إن التوزيع أو التفرق (dispersion)، عن المتوسط يمكن تحديده بواسطة التباين التجريبي (experimental variance) أو تباين العينة (sample variance) الذي يعبر عنه بالمعادلة (2-8):

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

وبالنسبة لمثال الطين الذي تمت الإشارة إليه سابقاً، فإن النتيجة تكون:

$$s^2 = \frac{1424}{35} = 40.7$$

وعندما تكون قيمة s^2 عالية فإنها تشير إلى أن القيم المقاسة هي أكثر تفرقاً مقارنة بمتوسطها. وبالعكس، عندما تكون قيمة s^2 صغيرة فإن ذلك يشير إلى أن القياسات تتجمع بشكل لصيق قريباً من المتوسط .

ملحوظة: أحياناً، يستبدل $(n-1)$ بالقيمة (n) وذلك بالنسبة لتعريف s^2 الوارد في المعادلة (2-8). وفي الحقيقة، فإن هذا ما يتم في حالة استخدام الآلات الحاسبة اليدوية والبرامج الشائعة. وطالما أن \bar{x} هو فقط قياس تقديري للمتوسط الحقيقي وأن كل x_i مقاسة يتم اختيارها دون ارتباط بغيرها، فإن التعريف الوارد بالمعادلة (2-8) يكون صحيحاً وأن s^2 هو تقدير غير منحاز للتباين الحقيقي (true variance) ولكنه، وفي حالة تعويض المتوسط الصحيح (وهو متوسط المجتمع μ الذي تمت مناقشته في الجزء 2.2.8) مكان \bar{x} ، فإنه يتعين استخدام (n) . وبالطبع، إذا كانت n كبيرة، فإن الاختلاف سوف يكون طفيفاً بين استخدام n و $(n-1)$ ، ولذا فإن التمييز لا يكون ذو أهمية.

2.2.8 المجتمعات والتوزيعات التكرارية الافتراضية

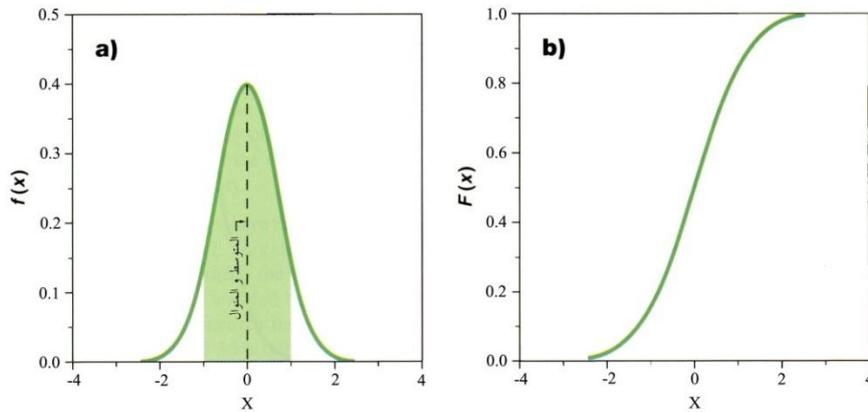
المجتمع (population) هو تجمع لكل القيم الممكنة التي يمكننا قياسها. افترض، على سبيل المثال، أننا مهتمون بعدد السيارات التي تمر عبر تقاطع معين كل يوم من شهر يناير. في هذه الحالة، فإن تحديد المجتمع ذو العلاقة يكون واضحاً ومباشراً - فهو مجموع واحد وثلاثين رقماً غير مجزأ (whole numbers) نظير عدد المركبات المارة خلال التقاطع يومياً. و مما يزيد الأمر دقة، أنه يمكننا فعلياً قياس المجتمع بكامله.

لكنه، وهذا هو الغالب، فإننا لا نستطيع قياس المجتمع كله، ولذا يتعين علينا الحصول على عينة إحصائية تمثل بشكل كافٍ المجتمع. فلنفرض مثلاً، أن اهتمامنا الحقيقي بالنسبة لهذه السيارات جميعاً هو إيجاد متوسط كمية أول أكسيد الكربون (CO) في الهواء الجوي فوق التقاطع نفسه، على أن يكون ذلك أيضاً في شهر يناير. في هذه الحالة يمكننا

جمع سلسلة من عينات الهواء في قنابي (100 مل) خلال الواحد والثلاثين يوماً من شهر يناير. لكن ذلك ليس سهلاً كما قد يبدو. فبداية، تم تحديد المجتمع على امتداد زمن، ولهذا فإن تحديد وقت جمع العينات أثناء اليوم أمر حرج. وبنفس الكيفية، فإن النقاط التي ستقاس في الفراغ هي معقدة أيضاً. فنحن قد نكون راغبين في تراكيز غاز (CO) من مستوى سطح الأرض وحتى مستوى 10 أو 20 متراً فوق سطح الأرض أو أعلى من ذلك أو أقل. ومن الواضح أنه ليس عملياً بل وغير ممكن أخذ كل الهواء كعينة، والذي يمثل المجتمع الحقيقي أو المجتمع كله. ونتيجة لذلك، فإن علينا أخذ قرارات تتعلق بعوامل مثل الأزمنة، والارتفاعات، والموقع داخل التقاطع. بعد أخذ هذه القرارات فقط يمكننا إجراء القياسات التي تضم العينة الإحصائية التي نسعى للحصول عليها، والتي يمكننا منها حساب المتوسط والتباين الخاصين بمستويات أحادي أكسيد الكربون. وعلى ذلك، فإن الحسابات الإحصائية تتأثر بتحديد المجتمع الحقيقي والطريقة التي تتم بها التقديرات المرتبطة بهذا المجتمع. وتجدر الإشارة إلى أن هذه القرارات تتأثر بدرجة كبيرة جداً بالافتراضات التي نتخذها بخصوص المجتمع الذي نحاول قياسه.

ومن ثم، كيف نبدأ بوضع الافتراضات؟ في حالات كثيرة، يكون من الأسهل البدء بافتراض حول شكل البيانات. وعليه، وفي حالة تحليل البيانات، يكون من الأنسب افتراض توزيع تجريبي مماثل للتوزيع النظري الموضح في الشكل (8-3a). [ملحوظة: هذا مماثل لما ورد في الشكل 8-2a]. إن هذا التوزيع الذي يشبه الجرس، وهو التوزيع الافتراضي الأكثر شيوعاً في الاستخدام، يعرف بأنه التوزيع الطبيعي (normal distribution). ويمكن تعريف شكل

التوزيع الطبيعي على أنه دالة $f(x)$. ولكل توزيع طبيعي متوسط مجتمع (μ) وتباين مجتمع σ^2 : ويتوافق المتوسط (μ) مع وسط (مركز) المجتمع الطبيعي كما هو موضح في الشكل (8-3)، بينما يمثل التباين (σ^2) قياساً للانتشار أو التفرق. أما المنوال (mode) فهو قيمة x المناظرة لأعلى قيمة لـ $f(x)$. ويلاحظ أن المنوال والمتوسط يكونان متساويين في حالة التوزيع الطبيعي.



شكل (8-3): دالة توزيع تكراري $f(x)$ لتوزيع طبيعي؛ (b) دالة التوزيع التراكمي المصاحب الخاص بـ $(\mu)=0$ و $(\sigma)=1$. المساحة المظللة في (σ) تساوي $1 \pm$ انحراف معياري عن المتوسط.

يُعرّف شكل التوزيع الطبيعي على أنه دالة $f(x)$ لأن ذلك يسمح لنا بحساب النتائج النظرية لمقارنتها بتوزيعات عينة حقيقية. كما أنها تتيح لنا حساب الاحتمالات المناسبة. وباختصار، فإن هذا التعريف الرياضي يكون مفيداً بشكل عام للتعبير عن المفاهيم كمياً. وتكون المعادلة الخاصة بـ $f(x)$ كما يلي: المعادلة (8-3):

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{0.5}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3-8)$$

وفي المعادلة (3-8) فإن الدالة الأسية (exp) هي اللوغاريتم الطبيعي للأساس e (حيث أن e تساوي تقريباً 2.72) مرفوعاً للأس الوارد في الجدلية (مثلاً، $e^2 = \exp 2$). إن هذا التعريف يشمل أيضاً (μ) التي تمثل الوسط أو القيمة المتوسطة، وكذلك σ الذي هو الانحراف المعياري. ويرتبط الانحراف المعياري بتشتت أو انتشار المنحنى، وفي الحقيقة فهو الجذر التربيعي للتباين (σ^2). وفي الرسم الوارد بالشكل (3-8) اخترنا القيم $\mu=0$ و $\sigma=1$. إن هذا الاختيار يجعلنا نطابق مركز التوزيع الطبيعي الافتراضي عند نقطة الأصل. وفي حالة القيم الأخرى لـ (μ)، فإن المركز سوف ينزاح (يميناً أو يساراً) حسب القيمة، أما بالنسبة لقيم (σ) أخرى فإن الانتشار سوف يتغير أيضاً.

على الرغم من أن (μ) و (σ) الخاصة بالمجتمع تكون تقريباً مساوية لكل من x و s الخاصة بقيم العينات، إلا أنه يوجد فرق مهم. فبالنسبة للتوزيع الافتراضي، يفترض أن يكون المتوسط (μ) والانحراف المعياري (σ) معروفين تماماً. أما في حالة التوزيع الحقيقي، فإن المتوسط (\bar{x}) والانحراف المعياري (s) يكونان معتمدين على العينات المأخوذة ويكونا مقارين للقيمة الافتراضية لكل من (μ) و (σ) (إلا إذا قمنا بقياس المجتمع كله، ففي هذه الحالة $\bar{x} = \mu$ و $s = \sigma$). وهذا يعني أنه كلما زاد عدد العينات، فإن \bar{x} و s يقتربان أكثر فأكثر من μ و σ شرط أن كل عضو في المجتمع له فرصة متساوية ليتم اختياره.

3.2.8 أهمية دالة التوزيع

تمكننا دالة التوزيع $f(x)$ أيضاً من التنبؤ بالأهمية المادية لبعض العينات المستقبلية استناداً إلى المدى العددي للقيم التي تم جمعها. وعندما نختار عينة ما، فإننا لا نعرف قيمتها

مقدماً، لكننا نعرف فعلاً أن مداها، ومتوسطها، وتكرارها سوف تقع ضمن الحدود التي وضعتها دالة التوزيع. ويمكننا التعبير عن هذا التنبؤ على أساس جملة احتمالية تفيد أن قيمة X تم اختيارها عشوائياً تكون أقل من قيمة محددة (x) ، أي أن: المعادلة (4-8):

$$P(X < x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (4-8)$$

ونقرأ الجانب الأيسر لهذا المصطلح على أنه (الاحتمالية أن X أقل من x). وتسمى دالة $F(x)$ بدالة التكرار التراكمي وهي مبينة بالشكل (8-3 ب). وعندما تكون (x) أقل كثيراً من الصفر، فإن احتمالية أن قيمة تم اختيارها عشوائياً سوف تقل عن تلك القيمة تكون صغيرة، وعليه تكون $F(x)$ قريبة من الصفر. ومع اقتراب (x) من المتوسط (الذي يساوي صفرًا هنا)، تكون الاحتمالية قريبة من 0.5 (أي 50%) في أن القيمة سوف تكون أقل من صفر، ولهذا فإن $F(0) = 0.5$. عندما تكون قيمة (x) كبيرة تكون الاحتمالية المناظرة لها قريبة من الحد الأقصى، $F(x) = 1$ (100%). والطريقة الأخرى للتعبير عن ذلك هي أن الاحتمالية تساوي 1 بأن جميع القيم يجب أن تكون ضمن النطاق مع اقتراب x من اللانهاية .

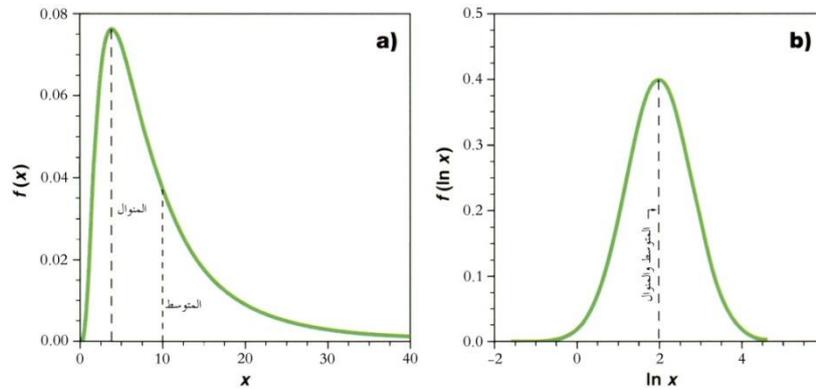
والآن لتتنظر إلى الشكل (8-3) حيث تكون المساحة المظللة لكل من $(x) = (-\sigma) = -1$ إلى $x = \sigma = 1$. وتمثل هذه المساحة المظللة 0.693 وحدة وهي تمثل تماماً احتمالية أن قيمة تم اختيارها عشوائياً سوف تقع بين $(-\sigma)$ و (σ) . وبنفس الكيفية، فإن قيمة المساحة الخاصة بـ (-2σ) و (2σ) تكون 0.954، وأن تلك الخاصة بـ (-3σ) و (3σ) تكون 0.977.

ويمكن مقارنة توزيع تكراري تراكمي نظري من المعادلة (4-8) بالتوزيع التكراري التراكمي التجريبي الخاص بالطين كما في الشكل (8-8b). وللقيام بذلك، نعوض $x \cong \mu$

وأن $s \cong \sigma$ في المعادلة (3-8) وحساب $F(x)$ من المعادلة (4-8). وهذا يعطينا منحنى مصقول الشكل. وللحصول على عدد مطابق لقيم أقل من x ، نضرب $F(x)$ في (n) . إن عملية الضرب هذه تضمن أن العدد الكلي للعينات يتطابق مع قيمة كبيرة ل (x) ، وهو بذلك يضمن أن الاحتمالية تساوي 1 وبأن جميع القيم سوف تتحقق مع ازدياد قيمة x . وبالطبع، فإن التوزيعات المقاسة والمفترضة لن تتطابق تماماً. إن ذلك هو نتيجة لعاملين اثنين: أن جزءاً فقط من المجتمع قد تم قياسه وليس المجتمع بأكمله، وأن التوزيع الأساسي ليس طبيعياً تماماً ولكنه منحرف قليلاً.

4.2.8 توزيعات أخرى

يوجد العديد من دالات التوزيع النظري التي يمكننا أخذها في الاعتبار. وأحد هذه الخيارات الدالة الطبيعية اللوغاريتمية (log normal function)، التي يوزع فيها اللوغاريتم الطبيعي للمتغير العشوائي x بشكل عادي، ويوضح الشكل (8-4) هذا التوزيع وهنا، يساوي المتوسط (mean) والانحراف المعياري (Standard deviation) $\mu=10$ و $\sigma=5$.



الشكل (8-4): توزيع طبيعي لوغاريتمي للمتغير x عندما يكون $\mu=10$ و $\sigma=5$ ؛ (b) تم تحويل التوزيع باستخدام المعادلة $\text{Log } X = y$.

وكما نشاهد، فإن وسط (center) الشكل لم يُعد واضحاً نظراً لوجود ذيل طويل إلى اليمين. لذلك يقال أن هذا التوزيع منحرف إيجابياً (positively skewed)؛ أي أنه لم يعد متماثلاً. إن هذا الانحراف يوضح لنا أن المتوسط (المشار إليه في الشكل 8-1) لم يعد متطابقاً مع القيمة القصوى للدالة؛ وبدلاً عن ذلك فهو يقع إلى يمين المنوال. ولذلك فإن المنوال (وهو قيمة x التي يكون فيها $f(x)$ يساوي الحد الأقصى) يكون أقل من المتوسط.

والسؤال هو لماذا قمنا بتسمية هذا التوزيع توزيعاً طبيعياً لوغاريثياً؟ فما هو الطبيعي بشأنه؟. والحقيقة هي أن هذا التوزيع يكون طبيعياً إذا ما قمنا بتحويله. وللقيام بذلك، نستخدم تحويلاً وهو $(y = \ln x)$ وبذلك فإننا لا نوقع البيانات ذاتها ولكننا نوقع اللوغاريتم الطبيعي للبيانات الخاصة بقيم (x) مقابل دالة $f(\ln x)$. وتكون النتيجة أن القيم توزع طبيعياً كما يظهر في الشكل (8-4b). إن هذا التحويل هو ما يجعل التوزيع الطبيعي اللوغاريتمي يبدو طبيعياً (normal) ويتيح لنا القول بأن (x) لوغاريتم موزع طبيعياً. ويكون المتوسط والانحراف المعياري للبيانات المنقولة $(y = \ln x)$ في الشكل (8-4b) هي $\mu_y = 1.98$ و $\sigma_y = 0.805$. إن العلاقات الخاصة بالمتوسط والتباين المرتبطة بـ (y) معروفة جيداً بالنسبة لمتوسط وتباين (x) . فمثلاً: إن قيمة المتوسط لـ (x) هي μ ويحصل عليها من المعادلة:

$$\mu = \exp\left(\frac{\mu_y + \sigma_y^2}{2}\right) \quad (5-8)$$

حيث أن μ_y و σ_y^2 هي المتوسط والتباين للمتغير المتحول y . والسؤال هو متى يتعين علينا استخدام هذا التحويل؟ والجواب هو أننا نستخدمه عندما يؤدي إلى توزيع

طبيعي (normal distribution). افترض، على سبيل المثال، أن لدينا اختباراً إحصائياً متقدماً، فإنه يكون صحيحاً فقط إذا كانت القيم موزعة توزيعاً طبيعياً، لكن توزيع البيانات الموجودة لدينا غير طبيعي (منحرف). وإذا ما استطعنا إيجاد تحويل (transformation) يمكننا من الحصول على توزيع طبيعي من هذا التوزيع المنحرف، فإن الاختبار سيكون صحيحاً على هذه القيم التي تم تحويلها. ويمكننا تقديم توضيح عن توزيع منحرف تم تحويله من خلال المثال التالي:

أعطت دراسة عن كمية الرصاص في التربة ستين قيمة للرصاص في التربة بالملليجرامات لكل كيلوجرام وهي مدرجة في الجدول (8-4). إن هذه القيم موضحة بنقاط متفرقة في الشكل (8-5a)، حيث نرى الكثير من القيم الصغيرة تقل عن 50 مجم/كجم، إضافة لعدد من القيم التي تتجاوز 100 مجم/كجم وأن هناك قيمتين تفوقان 250 مجم/كجم. ويكون المتوسط التجريبي والانحراف المعياري لهذه البيانات $\bar{x} = 48.9$ و $s = 56.9$. ويظهر التوزيع التكراري في المدرج التكراري (histogram) الموضح في الشكل (8-5b)، الذي تم الحصول عليه بإحصاء أعداد القيم في الفئة البينية (class interval) بين أقل من صفر وحتى 20، وأكثر من 20 حتى 40، وهكذا (كما هو مدرج في الجدول 8-5). وكما نرى فإن الرسم العمودي التكراري (Frequency histogram) منحرف إيجابياً، حيث توجد قيم كثيرة صغيرة متجمعة عند اليسار وذيل به أعمدة أصغر على اليمين .

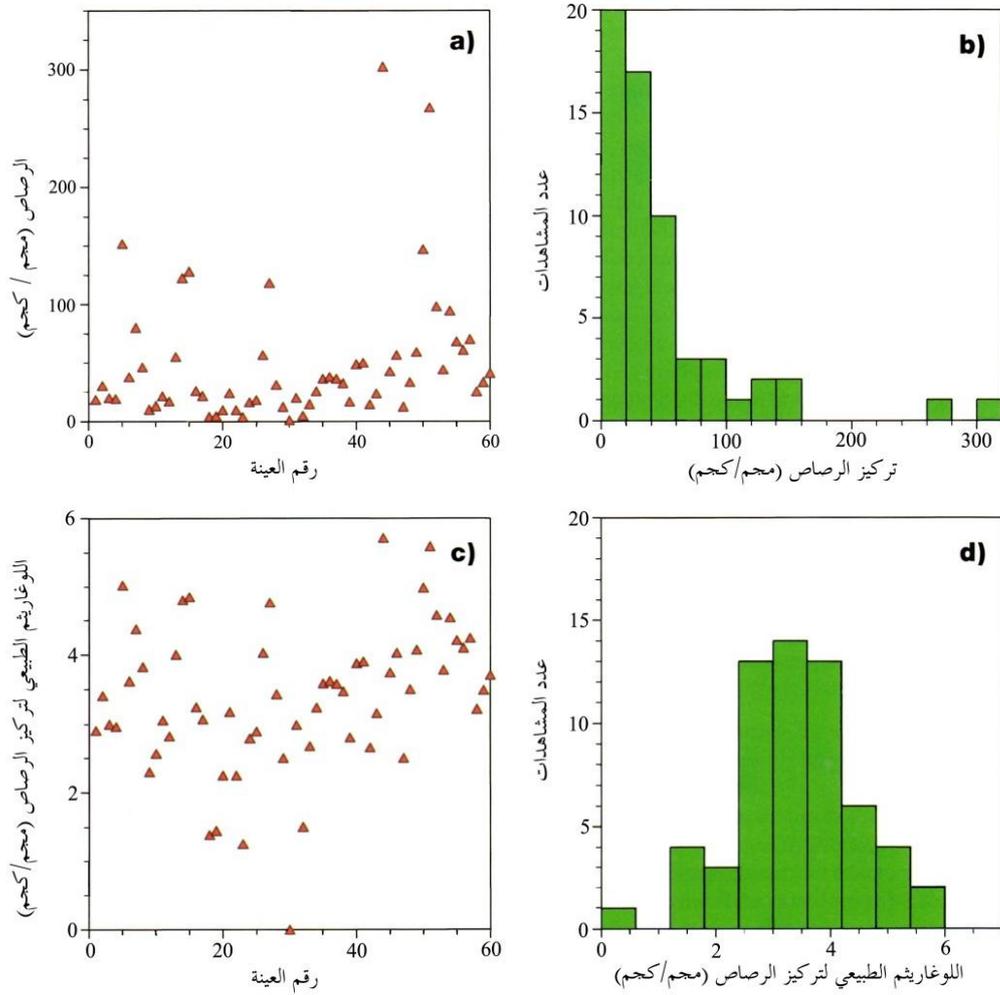
ولكن ماذا سيحدث إذا ما نظرنا إلى تركيز الرصاص معبراً عنه باللوغاريتم؟ باستخدام المحول ($y = \ln x$)، حيث أن x (المحتوى من الرصاص) هو المتغير العشوائي، ونحن

نرى وجود الكثير من قيم (y) بين الرقمين (2) و(5) كما هو مبين بالشكل (8-5c). وقد تم توقع التوزيع التكراري للقيم المحولة باختيار فترات (intervals) يكون عرضها 0.6 كما هو موضح بالشكل (8-5d) (تذكر أن اختيار الفترات يكون نوعاً ما عشوائياً. وقد اخترنا هذه الفترة لأنها تعطينا فئات تكون كبيرة بقدر كافٍ حتى تكون ذات معنى، ولكنها في الوقت ذاته صغيرة بقدر كافٍ لتظهر التوزيع. وكثيراً ما نتمكن من تحقيق هذا التوافق المريح عن طريق اتخاذ قرار لاختيار ما بين 5 و15 فئة)، ويكون التوزيع التكراري الناتج للقيم المحولة أكثر تناسقاً من التوزيع الأصلي.

ما الذي نخلص به من القيمتين المتطرفتين (وهما 268 و302.5 حجم/كجم) اللتين تعتبران بعيدتان جداً من النقاط الأخرى في الشكل (8 - a5) ولكنهما تبدوان أقل بعد التحويل كما هو بالشكل (8-5c)؟ إن هاتين النقطتين قد تبدوان غريبتين أو استثنائيتين، أي أنهما نقطتان تقعان خارج حدود المجتمع المستهدف. إن المشكلة هي عدم معرفتنا في ما إذا كانت هاتان القيمتان المتطرفتان حقيقتين فعلاً. وأحياناً نصادف نتائج تحليل معلمي خاطئ أو قيمة منحازة بشكل واضح، وفي هذه الحالة يتعين إزالة القيم الاستثنائية من التحليل. وتجدد الإشارة إلى أنه لا يتعين التخلص من القيم المتطرفة إلا إذا توفر سبب مقنع (وليس مجرد رأي) لاعتبارها أرقاماً شاردة. أما إذا كان الأمر غير مؤكد، فإنه يتعين ضم القيم المتطرفة ضمن التحليل. وفي حالة المثال الذي تم شرحه، لا يوجد لدينا أي سبب للظن بأن القيم غير صحيحة، ولذا يتعين إدخالها ضمن التحليل.

جدول (4-8): بيانات رصاص التربة تبين قيم غير محولة وقيم تم تحويلها لوغاريثمياً.

رقم العينة	تركيز الرصاص (مجم/كجم)	تركيز الرصاص محول لوغاريثمياً	رقم العينة	تركيز الرصاص (مجم/كجم)	تركيز الرصاص محول لوغاريثمياً
1	18.25	2.904	31	19.75	2.983
2	30.25	3.410	32	4.50	1.504
3	20.00	2.996	33	14.50	2.674
4	19.25	2.958	34	25.50	3.239
5	151.50	5.020	35	36.25	3.590
6	37.50	3.624	36	50.37	3.624
7	80.00	4.382	37	36.00	3.584
8	46.00	3.829	38	32.25	3.474
9	10.00	2.302	39	16.50	2.803
10	13.00	2.565	40	48.50	3.882
11	21.25	3.056	41	49.75	3.907
12	16.75	2.818	42	14.25	2.657
13	55.00	4.007	43	23.50	3.157
14	122.2	4.806	44	302.5	5.712
15	127.7	4.850	45	42.50	3.750
16	25.75	3.248	46	56.50	4.034
17	21.50	3.068	47	12.25	2.506
18	4.00	1.386	48	33.25	3.504
19	4.25	1.447	49	59.00	4.078
20	9.50	2.251	50	147.00	4.988
21	24.00	3.178	51	268.00	5.591
22	9.50	2.251	52	98.00	4.585
23	3.50	1.253	53	44.00	3.784
24	16.25	2.788	54	94.25	4.546
25	18.00	2.890	55	68.00	4.220
26	56.50	4.034	56	60.75	4.107
27	118.00	4.771	57	70.00	4.248
28	31.00	3.434	58	25.00	3.219
29	12.25	2.506	59	33.00	3.496
30	1.00	0.000	60	40.75	3.707



شكل (8-5): (a) رسم بياني للتشتت، (b) التوزيع التكراري، (c) التوزيع المتحول، (d) التوزيع التكراري للتوزيع المتحول للرصاص في التربة كما هو وارد في الجدولين (4-8) و(8-5).

إن الواقع بدون رتوش نادراً ما يكون طبيعياً، إذ أن الكثير من توزيعات الظواهر الطبيعية وغير الطبيعية ستكون منحرفة (skewed) فهي أحياناً تماثل التوزيع النظري المنحرف إيجابياً المبين بالشكل (8-4) أو أنها أحياناً تكون مماثلة للانحراف السلبي المعاكس. ويمكننا أن نعرف بعض العمليات المحددة بتوزيعات معينة، لكن هذه غالباً ما تكون افتراضية. فمثلاً، يكون التوزيع لحاصل جمع أرقام عشوائية طبيعياً ويكون التوزيع لحاصل ضرب أرقام عشوائية طبيعياً لوغاريثمياً. وبالطبع، فإن التوزيع الطبيعي والتوزيع اللوغاريثمي هما نموذجان مناسبان لتوزيعات فعلية ولكنها لا تنسجم تماماً مع أية بيانات حقيقية. وفي الواقع، أن بعض البيانات قد لا تتوافق مع أية توزيع معروف، ولكن افتراض وجود توزيع غير صحيح قد يقود إلى استنتاجات خاطئة. وتفترض الكثير من الاختبارات الإحصائية وجود توزيع طبيعي للمجتمع المستهدف، الذي قد يستخدم إما القيم الأصلية أو القيم المحولة. ومثالاً فإن عملية الاختبار للتحليل سوف لن تعتمد بدرجة كبيرة على شكل التوزيع تماماً.

وفي جميع التوزيعات، فإن قيمة \bar{x} التي يتم الحصول عليها من المعادلة (8-1) والانحراف المعياري $s^2 = s$ يتم الحصول عليه من المعادلة (8-2) هما قيمتان تقديريتان لمتوسط المجتمع (μ) وانحرافه المعياري $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ وعلى ذلك، فإن القيمة $\sqrt{\sigma^2}$ هي التباين النظري (أو تباين المجتمع) وأن s^2 هي القيمة التقديرية للتباين⁽¹⁾.

(1) توجد تقديرات بديلة أخرى تكون (أكثر كفاءة) لتوزيعات متخصصة معروفة فمثلاً، بالنسبة للتوزيع الطبيعي اللوغاريثمي، يمكن استخدام المعادلة (8-5) لتقدير (μ) استناداً إلى تقديرات كل من μ_y و σ_y .

جدول (5-8): جدول تدوين يبين فترات الفئات وعدد المشاهدات المناظرة لها التي استخدمت في الشكل (5-8).

التوزيع الطبيعي اللوغاريتمي		التوزيع الطبيعي	
عدد المشاهدات	فترة الفئة	عدد المشاهدات	فترة الفئة
1	0.6 - 0.0	20	20 - 0
0	1.2 - 0.6	17	40 - 20
4	1.8 - 1.2	10	60 - 40
3	2.4 - 1.8	3	80 - 60
13	3.0 - 2.4	3	100 - 80
14	3.6 - 3.0	1	120 - 100
13	4.2 - 3.6	2	140 - 120
6	4.8 - 4.2	2	160 - 140
4	5.4 - 4.8	0	180 - 160
2	6.0 - 5.4	0	200 - 180
0	6.6 - 6.0	0	220 - 200
		0	240 - 220
		0	260 - 240
		1	280 - 260
		0	300 - 280
		1	320 - 300

يُعرف معامل الاختلاف (CV) بالمعادلة:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cong \frac{s}{\bar{x}} \quad (6-8)$$

من جهة أخرى، يمكننا ضرب العلاقة السابقة بنسبة 100% للحصول على معامل

الاختلاف: [$CV = (\sigma/\mu) \times 100\% \text{ or } (s/\bar{x}) \times 100\%$]. ويعتبر معامل الاختلاف

قياساً للتباين داخل مجموعة من البيانات. ونظراً لأنها نسبة بدون وحدات قياسية، فإنها تكون وسيلة مريحة لمقارنة التباين لخصائص أو قياسات مختلفة. وإذا كانت قيمة معامل الاختلاف منخفضة فإنها تشير إلى تباين منخفضة. فمثلاً، كان معامل الاختلاف لبيانات الطين $6.38/35.3 \cong 0.18$ (أو 18%)، بينما كان الرصاص أكثر تبايناً حيث كان معامل الاختلاف $56.9/48.9 \cong 1.2$ أو 120% .

3.8 تقديرات لأعداد العينات

كم عدد النقاط التي يجب جمعها كعينات لتقدير قيمة متوسط معين يعطي نتيجة صحيحة بدرجة مقبولة؟ إن هذا يعتبر مسألة هامة جداً في أخذ العينات والمتابعة. وعموماً، فنحن نعرف بأنه كلما زادت عدد النقاط التي يتم جمعها، كلما كان تقديرنا أكثر مصداقية، ولذا فإن أخذ عينات بكثافة تبدو فكرة جيدة. لكن، جمع بيانات عند نقاط أكثر يزيد من تكاليف اليد العاملة ومصاريف التحليل. [ملحوظة: نستخدم هنا كلمة نقاط (points) للإشارة إما إلى نقاط في الفراغ يتم منها جمع عينات عند وقت واحد أو إلى نقاط في الزمن يتم فيها جمع عينات عند موقع واحد]. ولهذا، فنحن نحتاج لطريقة للتعامل مع هذه المسألة لنحصل على حل وسط بين عدد النقاط التي نحددها ومقدار الأموال والجهد المتاح لنا .

في الحقيقة، إن مفهوم التوزيعات التكرارية الافتراضية هو ما سيساعدنا على تحديد عدد العينات الضروري لتقدير متوسط المجتمع، بما معناه، إيجاد تقريب مناسب للقيمة المتوسطة لما نحن بصدد قياسه. وعادة، فإننا نبدأ بافتراض توزيع طبيعي.

1.3.8 حدود الثقة للمتوسط

إن إحدى الحلول التقليدية لإيجاد عدد النقاط اللازمة تشمل حدود الثقة (confidence limits)، التي هي نقاط النهاية (endpoints) لمدى القيم المتوقعة لـ (x) وتعتبر حدود الثقة قياسات لأي مدى نتوقع اقتراب متوسط العينة من تقدير متوسط المجتمع (μ) . وللقيام بذلك، نفترض أن متوسط العينة ذاته قد سحب من توزيع طبيعي له متوسط μ وتباين $\frac{\sigma^2}{n}$ ، حيث أن (n) هي عدد النقاط التي تم جمعها كعينات. بمعنى، إذا ما كنا سنعيد عملية جمع مجموعة من القيم مرة بعد أخرى، فإننا وفي كل مرة نقوم بذلك سنتحصل على قيمة \bar{x} إضافية من التوزيع الافتراضي.

(إن هذا يكون دائماً صحيحاً في حالة القيم العشوائية من توزيع طبيعي محدد؛ كما أن ذلك صحيح في حالة توزيعات أخرى عندما تكون (n) كبيرة بدرجة كافية). وفي حالة التوزيع الطبيعي، فإن احتمالية أن قيمة تم اختيارها عشوائياً تقع ضمن ± 2 انحراف معياري تكون 0.954 (أو 95.4%). وباستخدام (μ) وتباين $(\frac{\sigma^2}{n})$ مناسبة لتوزيع x ، فإنه يمكننا التعبير عن ذلك في جملة احتمالية تشبه المعادلة (8-4)، حيث يكون x المتوسط التقديري:

$$P\left(\mu - \frac{2\sigma}{n^{0.5}} < \bar{x} < \mu + \frac{2\sigma}{n^{0.5}}\right) = 0.954 \quad (7-8)$$

إن هذه المعادلة المتساوية الطرفين تقول أن احتمالية وقوع متوسط العينة بين 0.95 (أو 95%) تقريباً. إن جدلية (P) هي حدود الثقة التي تقول أن الحدود هي:

$$\mu - \frac{2\sigma}{n^{0.5}} \quad \text{و} \quad \mu + \frac{2\sigma}{n^{0.5}}$$

وبالطبع، فإنه يمكننا استخدام قيم احتمالية أخرى. فمثلاً، إذا تم اختيار احتمالية تساوى 0.997 فإن الفترة (interval) المناظرة لها ستكون داخل ± 3 انحراف معياري من المتوسط وتصبح المعادلة (7-8):

$$P\left(\mu - \frac{3\sigma}{n^{0.5}} < \bar{x} < \mu + \frac{3\sigma}{n^{0.5}}\right) = 0.997 \quad (8-8)$$

وتسمى القيمة 0.954 في المعادلة (7-8) والقيمة 0.997 في المعادلة (8-8) مستويات الثقة (confidence levels)، التي يتم عادة تطبيقها كنسب مئوية، 95.4% و99.7%. وكلما زاد مستوى الثقة، فإن احتمالية احتواء المتوسط داخل الفترة تزيد أيضاً. والسؤال الآن، لماذا ببساطة لا نزيد مستوى الثقة ليشمل 0.9999 أو حتى رقماً آخر قريباً من الواحد الصحيح؟. ونظراً لأن فترة الثقة (confidence interval) هي دالة لـ (n) ، فإن عدد العينات يمكن أن يخرج عن السيطرة عندما يقترب مستوى الاحتمالية لقيمة الواحد الصحيح. ويصبح عدد العينات كبيراً جداً فيصبح غير منطقي من حيث الزمن والجهد والتكلفة. كما أن العدد الضخم قد لا يضيف شيئاً لفائدة النتائج.

والآن، فإننا سوف نحدد الحد الأقصى للخطأ المسموح به (maximum allowable error) (d). وهذا مطابق للشرط الذي يقول $(d \leq |x - \mu|)$. وباستخدام مستوى ثقة 95%، فإن التسوية في المعادلة (7-8) يكون قد تحقق شريطة أن:

$$d \cong \frac{2\sigma}{n^{0.5}} \quad (9-8)$$

أو

$$n \cong \frac{4\sigma^2}{d^2} \quad (10-8)$$

إلا أن هناك تنبيهاً بخصوص الخطأ الأقصى (d) ويتعلق بالمعادلتين (9-8) و(8-8) -10). فإذا تكرر تقدير قيمة (d) مرة بعد أخرى، فإن التقدير سوف يقع داخل ± 2 انحراف معياري من المتوسط الحقيقي بمقدار 95% من عدد المرات. و أما 5% المتبقية، فإنه سيكون خارج هذا المدى. وبالطبع، فإنه بالنسبة لتقدير مفرد من (n)، فإننا لا نعرف إن كانت القيمة سوف تقع ضمن الحدود المشار إليها مسبقاً. إن ما نعرفه هو أنه كلما زاد مستوى الثقة، فإن احتمالية وجوده داخل المدى المحدد تكون أعلى.

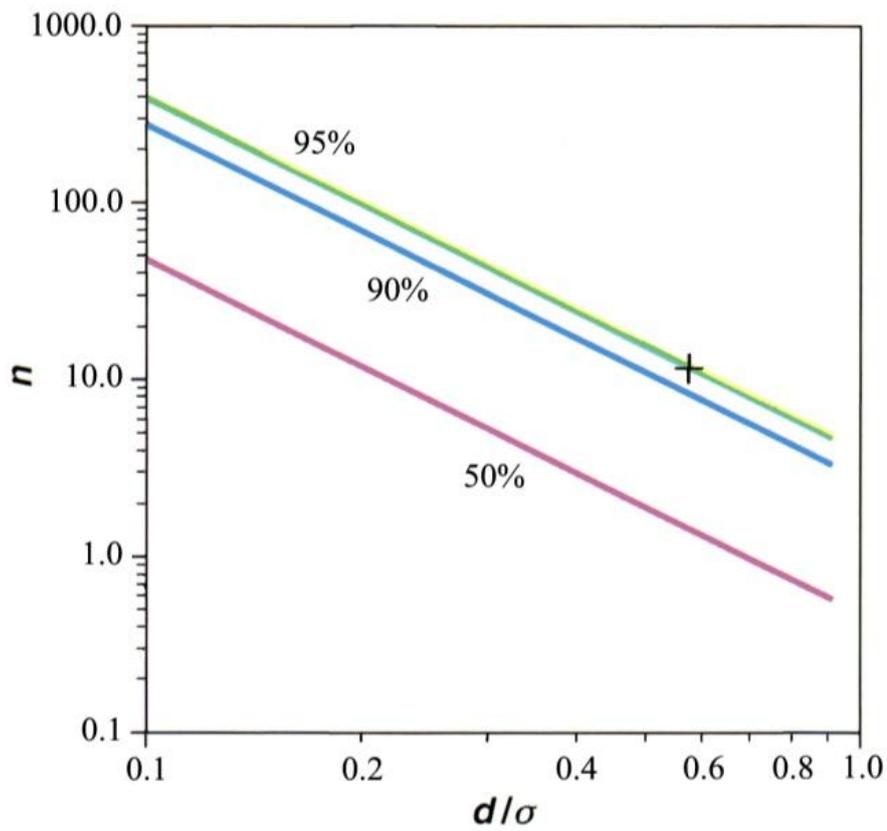
يعرض الشكل (6-8) ملخصاً يربط عدد العينات (n) ب ($\frac{\sigma}{d}$) لمستويات احتمالية تساوى 50% و90% و95% (لاحظ المقياس اللوغاريتمي). ويمكننا رؤية أن عدد العينات الضروري يجب أن يزيد لتصبح قيمة (d) أصغر، وهى بذلك تعطى مدى أضيف للتقدير. وبالمثل، فإنه يكون ضرورياً توفر أعداد أكبر من العينات إذا ما كان (σ) أكبر أو أن احتمالية الوصول إلى الحد يكون أعلى. وهذا موضح في المثال التالي:

بالرجوع إلى النسب المثوية للظين الواردة في الجدول (8 - 2)، وافترض أن:

$$35.3 = \bar{x} = \mu \text{ و } 35.3 = \sigma^2 = s^2 = (6.38)^2 = 40.7 = (n) \text{ و } 36 = n$$

في معرفة المدى الممكن للمتوسطات عند مستوى ثقة 95%. وباستخدام المعادلة (8-7)،

نجد أنه توجد فرصة نحو 95% أن (\bar{x}) سوف تقع بين القيمتين 33.2 و 37.4. كم عدد نقاط العينات التي يلزم جمعها للمتوسط (\bar{x}) المقدر ليكون ضمن 10% من المتوسط الحقيقي بمستوى ثقة تساوي 95%؟.



شكل (8-6): علاقة عدد العينات الضرورية للوصول لدرجة دقة معينة لتقدير المتوسط (لمستويات ثقة تساوي 50 و 90 و 95%).

$$\frac{d}{\sigma} = \frac{0.1\mu}{\sigma} = \frac{3.53}{6.38} = 0.553$$

وبذلك تساوي (d) أعلاه 10% من قيمة المتوسط، أو $d = 0.1\mu$ وهو ما يعطي $=0.553$ ، وتشير علامة (+) في الشكل (8-6) إلى أن $\frac{d}{\sigma} = 0.553$ التي تتوافق مع $n \cong 12$ ، ويمكننا أن نؤكد هذه القيمة باستخدام المعادلة (8-10).

$$n \cong \frac{4\sigma^2}{d^2} = \frac{4}{(0.553)^2} \cong 13.1 \cong 13 \quad (11-8)$$

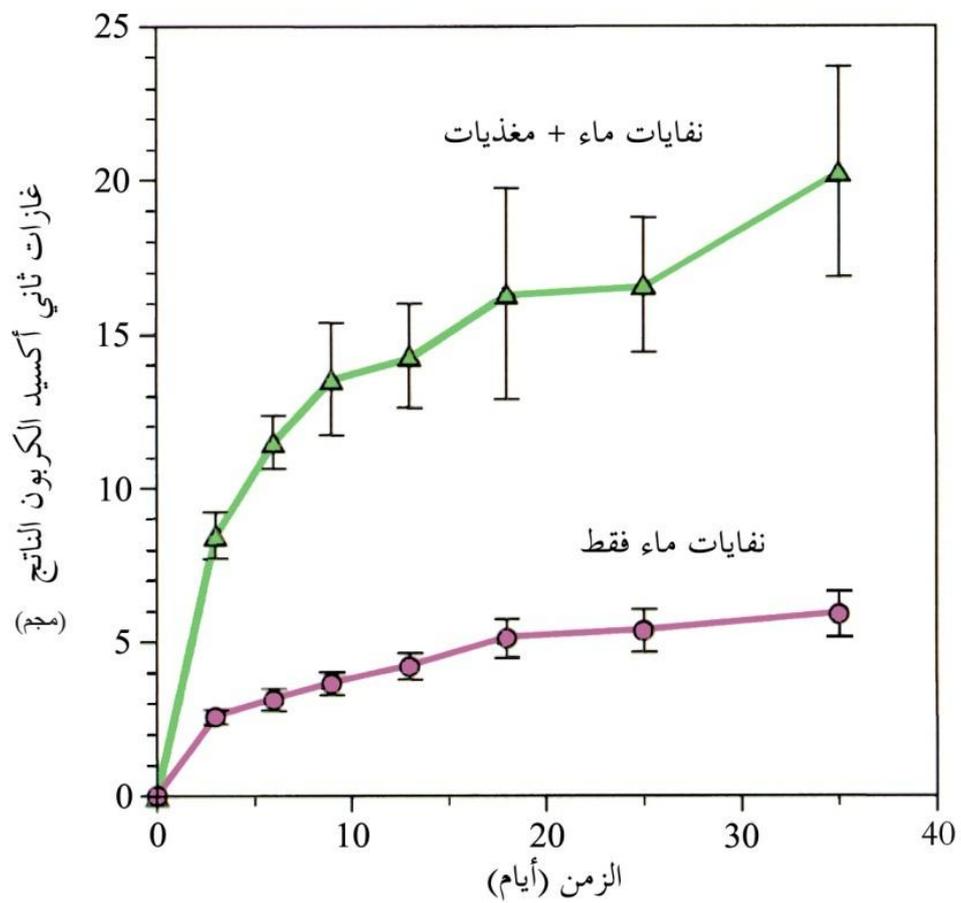
ويمكن الحصول على علاقة أكثر دقة لحساب (n) عن طريق تعويض (1.96)² بدلاً من $2^2 = 4$ في المعادلة (8-11)، وهو ما ينتج $n = 12.6$. وإذا ما كانت قيمة معامل التباين ($CV = \sigma/\mu$) أقل، فإن (n) ستكون أصغر ويلزم في هذه الحالة نقاط أقل. لكن القرار يصبح أكثر صعوبة إذا كان معامل التباين كبيراً جداً. وقد نظرنا سابقاً إلى تراكيز رصاص بمعامل تباين أعلى من 1 وذلك في المثال حول التربة الملوثة بالرصاص. ومن الشائع الحصول على معامل تباين يساوي 1 أو أعلى بالنسبة لهذا النوع من الحالات بما في ذلك خصائص النقل للتربة (مثل التوصيل الهيدروليكي، أو معامل الانتشار الظاهري).

وإذا كان معامل التباين ($CV = 1$) وأن التقدير يتطلب أن يكون ضمن 10% من المتوسط الحقيقي وباحتمالية 95%، فإن $\frac{d}{\sigma}$ سيكون 0.1 وأن قيمة (n) ستكون قريبة من

الرقم 400 وعموماً فإنه يبدو بديهياً ضرورة توفر نقاط أكثر لتقدير قيمة متوسط معينة لخاصية عالية التغير.

وقد يكون عدد العينات المحسوبة غير عملي. لكنه، وفي هذه الحالة، فإن مستوى التحمل أو مستوى الاحتمالية يتعين أن يكون أكثر واقعية. وربما يكون $d = 20\%$ من المتوسط و/أو مستوى احتمالية يساوي 50% أكثر قبولاً والنسبة لمثال الطين فإن معامل التباين $(CV) \cong 6.38/35.3$ ، ومستوى احتمالية بمقدار 50% سوف يؤدي إلى قيمة $n = 3$.

نستطيع القيام بتنقيح إضافي لتقديرنا للثقة الخاصة بقيمة المتوسط بعد أن يكون قد تم تحديدها. إن تقدير قيمة $d = |\bar{x} - \mu|$ ، من المثال السابق كانت بافتراض أن التباين (σ^2) معروف بالضبط؛ ولكن في الحقيقة يمكن فقط تقديره. ولذا فإن القيمة التي تم تقديرها سوف يكون لها مدى أعلى بشكل طفيف من القيمة المحسوبة سابقاً. لكن التقدير يمكن حسابه باستخدام اختبار (t) الذي يأخذ في الاعتبار عدم الجزم (uncertainty) في تقدير (σ) بواسطة (s) بما في ذلك أعداد القيم المستخدمة في حساب قيمة (s) . (إن اختبار t -متاح في كتب الإحصاء الأولية).



شكل (7-8): التوقع البياني لغاز CO_2 المنطلق أثناء التأكسار الميكروبي لمكونات النفط الخام. تظهر أعمدة الخطأ المتوسط $\pm s$ على أساس ثلاثة مكررات. ويتعلق المنحنى العلوي بمخلفات الماء + المغذيات، أما المنحنى السفلي فهو لنفايات الماء فقط.

2.3.8 مصطلحات مصداقية القيم التقديرية

هناك مصطلح آخر شائع للتعبير عن مصداقية قيمة المتوسط التقديرية باستخدام الانحراف المعياري (s) بدلاً عن تعبير احتمالية مثلما ورد في المعادلة (7-8). فمثلاً، يمكننا التعبير عن المتوسط والانحراف المعياري على أنهما ($\bar{x} \pm s$) أو يمكننا كذلك توضيح هذا المصطلح بيانياً كعمود يبين المدى المحسوب كما هو موضح في المثال التالي:

يكون غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) أحد النواتج المنبعثة أثناء التحلل الميكروبي لمخلفات المياه العادمة التي تنتج عندما يتم استخراج النفط الخام من رسوبيات رملية. ويعتبر غاز CO_2 المنبعث قياساً لكمية المادة العضوية المتحللة بواسطة الكائنات الدقيقة، فكما كانت قيم CO_2 أعلى كلما تعاضت كميات المركبات العضوية المتحللة. (وللمزيد من المعلومات حول التحليل الميكروبي للملوثات العضوية، انظر الباب رقم 7 من هذا الكتاب).

وفي دراسة، تم قياس كميات CO_2 الناتج عن مثل عملية التحلل هذه وذلك على امتداد فترة 35 يوماً. وقد تم توقيع القيم المسجلة (بالمليجرامات) بيانياً مقابل الزمن كما يظهر في الشكل (7-8). ونلاحظ هنا، المنحنى السفلى الذي يظهر النشاط الميكروبي في المياه العادمة الخالية من المغذيات، والمنحنى الذي يعلوه وهو يظهر النشاط الميكروبي في المياه العادمة الغنية بالمغذيات. ويشير المنحنى الأعلى إلى زيادة في النشاط الميكروبي عند إضافة المغذيات التي تشمل النيتروجين والفوسفور إضافة لمركب عضوي يشابه في تركيبه لمكون سام ضمن مخلفات الرمل النفطية. أما أعمدة الخطأ (error bars) عند كل نقطة بالشكل (7-8) فهي خاصة بالمتوسط $\pm s$ ، حيث أن (s) قد تم حسابها من ثلاثة مكررات. وتشير الأعمدة

الأكثر اتساعاً إلى تباين أكثر في المكررات، بينما تمثل الأعمدة الأقصر اختلافاً ضيقاً في المكررات.

4.8 تحليل الانحدار (Regression analysis)

في الأمثلة السابقة التي شملت تركيز الكلوروفلوروكربون (CFC)، والنسبة المئوية للطين وتركيز الرصاص في التربة قمنا بفحص متغير واحد فقط في كل مرة. ماذا يحدث إذا ما كان لدينا متغيران اثنان، أحدهما يعتمد على الآخر؟. في هذه الحالة قد نستخدم تحليل الانحدار، الذي هو عبارة عن طريقة لتكييف معادلة معينة لمجموعة من البيانات من أجل وصف العلاقة بين المتغيرات. كما أن هذا الأسلوب يسمح لنا القيام ببعض التنبؤات. ويمكننا معرفة كيف يعمل تحليل الانحدار في المثال التالي:

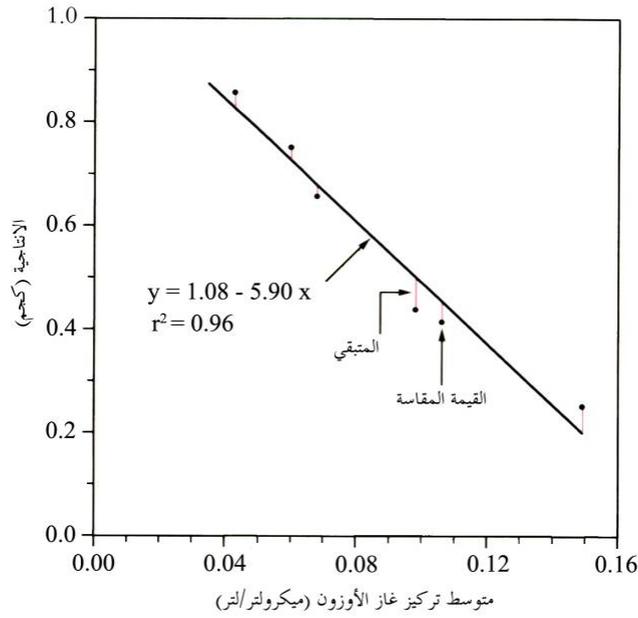
أنظر إلى القياسات المدرجة في الجدول (6-8) الخاصة بإنتاجية الحس المناظر لتراكيز مختلفة من غاز الأوزون (O_3) في الهواء الجوي. وكما نعرف فإن التراكيز المفرطة من الأوزون في الطبقات السفلي من الهواء الجوي يمكن أن تكون مسؤولة عن الانخفاضات في نمو النبات (كما أنها خطيرة على صحة الإنسان؛ انظر الجزء 2.2.12). افترض أننا نود استخدام هذه البيانات للتنبؤ بالإنتاجية عند مستوى أوزون لم يتم قياسه. هل نستطيع تطوير معادلة تربط إنتاجية الحس بتراكيز الأوزون بطريقة معينة تمكننا من القيام بهذا التنبؤ؟.

جدول (8-6): البيانات المستخدمة لاستنباط الرسم البياني وخط الانحدار (regression line) الموضح في الشكل (8-8) . إنتاجية الخس عبارة عن وزن الرأس الطازجة لكل نبات (كجم/ نبات).

إنتاجية الخس (كجم)	متوسط تركيز غاز الأوزون (ميكرو لتر/ لتر)
0.414	0.106
0.857	0.043
0.751	0.060
0.657	0.068
0.437	0.098
0.251	0.149
ملخص إحصائي	
n	6
\bar{X}	0.087
\bar{Y}	0.561
s_x	0.038
s_y	0.231
b	-5.90
a	1.08
r^2	0.96
r	0.98

الخطوة المنطقية الأولى في تحليل البيانات هي القيام بربط أحد المتغيرات بالأخر، أي الإنتاجية مقابل تركيز الأوزون كما هو موضح بالنقاط الواردة بالشكل (8-8). والآن، أصبح لدينا عرض يمكن رؤيته وهو أن إنتاجيات أعلى تحدث عند تراكيز أقل من الأوزون، بينما تسجل إنتاجيات أقل عند مستويات أعلى من الأوزون. ولحسن الحظ، نشاهد أيضاً أنه بإمكاننا رسم خط مستقيم بحيث تكون جميع النقاط قريبة بدرجة مقبولة من هذا الخط.

إن إحدى الطرق لرسم هذا الخط هي ببساطة مد مسطرة على امتداد النقاط واختيار الوضع الذي تبدو فيه أفضل ما يمكن. وكخطوة أولى، فإن هذا التقييم البصري يعتبر جيداً، ولكنها تترك سؤالاً مفتوحاً وهو أين بالضبط يوضع الخط. ولحسن الحظ، توجد طريقة أقل تحيزاً.



شكل (8-8): إنتاجية الخس (وزن الرأس الطازج لكل نبات) مقابل تركيز غاز الأوزون وانحرافات النقاط التجريبية عند خط التراجع.

إن إمكانية رؤية خط مستقيم بين النقاط الموقعة في الشكل تشير إلى أن العلاقة بين البيانات هي خطية، وهو ما يعني أن معادلة خطية بسيطة سوف تفي بالحاجة لمعادلة تتطابق مع البيانات. ولذا، فإننا نعرف من الجبر البسيط أن معادلة الخط المستقيم هي: المعادلة (8-12):

$$Y = a + bX$$

حيث أن $Y =$ الإنتاجية وأن $X =$ تركيز الأوزون. والآن يمكننا ملاحظة أن الانحدار الخطي (linear regression) هو عبارة عن دراسة العلاقة في المعادلة (8-12) بين متغير مستقل (Y) ومتغير تابع (X). أما قيمة a فهي الجزء المقطوع من المحور الصادي (Y -intercept) أي أن قيمة Y المناظرة لـ $X = 0$ ، أما (b) فهو ميل الخط.

بعد ذلك يتعين علينا التعامل مع (a) و (b)، اللتين يجب أن يتم اختيار قيمة كل منهما بحيث تكون المسافات بين النقاط والخط الذي يتم رسمه صغيرة. وقد تم توضيح المسافات في الشكل (8-8) في شكل خطوط عمودية قصيرة عند كل نقطة. ولحسن الحظ فإن حساب قيمتي a و b سهلة ومباشرة.

إن حل القيمتين (a) و (b) يستند إلى التقليل إلى الحد الأدنى مربعات مجموع (sum of squares) المسافات بين كل نقطة والخط المرسوم (تعرف عادة الخطوط العمودية القصيرة بأنها متبقيات (residuals)، ويتم التحليل كما يلي:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X^2} \quad (13-8)$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (14-8)$$

حيث أن s_X هو الانحراف المعياري للمتغير X (تركيز الأوزون). أما قيم الميل والتقاطع فهي $b = -5.90$ كجم لتر / ميكرو لتر، $a = 1.08$ كجم. وتشير العلامة الجبرية السالبة للميل ما لاحظناه أصلاً: وهو أن الإنتاجية تقل مع زيادة تركيز الأوزون.

يمكن التحقق من قيمة التقاطع بتمديد الخط إلى اليسار حتى يصل مستوى الأوزون لما يقابله من إنتاجية تكون عندها $a = 1.08$ كجم. لاحظ، أنه بمجرد تأكيدنا على وجود علاقة خطية، يمكننا التنبؤ بأي قيم أخرى غير مقاسة. توجد طريقة سهلة للتقييم الكمي لمدى اقتراب الخط المستقيم من مطابقته لنقاط البيانات.

ونقوم بذلك عن طريق حساب معامل الربط الخطي (r) الذي يمكن تعريفه بالمعادلة:
المعادلة (8-15):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X s_Y} = \frac{b s_X}{s_Y} \quad (15-8)$$

حيث أن s_X و s_Y الانحراف المعياري لكل من X و Y . ويسمى r^2 معامل التحديد (coefficient of determination)، وهو يعمل تماماً ما يعنيه اسمه، أي أنه إذا كان X و Y تتبعان علاقة خطية نموذجية، فإن r^2 ستكون قيمتها (1) علماً بأن قيمة أكبر تعني توافقاً أفضل. وفي حالة الرسم البياني لإنتاجية الخس فإن $r = 0.98$ - وأن $r^2 = 0.96$ ، وبذلك فإن التطابق جيد جداً.

وتتراوح القيم الحدية للمؤشر (r^2) ما بين (0 و 1) أما (r) فله قيم حدية تتراوح ما بين (-1 و 1). إن الإشارة الجبرية لـ (r) التي هي دائماً مثل تلك الخاصة بالمعامل (b) تشير إلى أنه إما أن يزداد هذان المتغيران معاً أو أنهما يكونا مرتبطين عكسياً كما يظهر في الشكل (8-8). إضافة لذلك، توجد اختبارات لمعنوية a و b و r . وهذه الاختبارات تتعرض

للتساؤلات مثل: هل أن الميل (b) يختلف معنوياً عن الصفر؟ وهو ما يمثل الخطوة المنطقية التالية في تحليل الانحدار. لكن هذه الاختبارات خارج نطاق هذا الباب.

تنبيه: عند تفسير معامل الارتباط، لاحظ جيداً فيما إذا كان (r) أو (r^2) قد تم عرضه، سواء بيانياً أو حسابياً. قد يتبادر إلى الذهن أن (r) بقيمة 0.850 تشير إلى تطابق ممتاز، لكن ذات القيمة تعطى $r^2 = 0.72$ وهو ما يبدو أقل إثارة. إضافة لذلك، فقد تواجه حالات تبدو فيها قيم (r^2) منخفضة لكنها تشير إلى ارتباط معنوي، خاصة إذا ما كانت البيانات كثيرة جداً.

توجد بعض الأخطاء الشائعة وسوء الاستخدام المصاحبة للانحدار الخطي (linear regression). الأول وهو الرغبة المفرطة للاستقراء (extrapolate) بما يتجاوز مدى نقاط البيانات. فمثلاً، افترض أننا نرغب في تقدير تركيز الأوزون الذي يمكن عنده توقع أن الإنتاجية ستكون صفراً. نستطيع استخدام معادلات الانحدار:

$$Y = 1.08 - 5.90 X,$$

أفترض أن قيمة: $0=Y$ ، ويتم إيجاد قيمة X

$$X = 1.08/5.90 = 0.18$$

هل هذا هو تركيز الأوزون الذي عنده ستكون الإنتاجية صفراً؟ قد يكون ذلك صحيحاً، لكن هذا استقراء خطير يتجاوز البيانات الأصلية، وحقيقة فنحن لا نعرف. وعلى الرغم من أننا نقوم عادة ببعض التنبؤات من بياناتنا، فإن الاستقراء لما يتجاوز البيانات المقاسة يمكن أن يقود لمشكلة حقيقية. وهناك استخدام خاطئ آخر وهو التخمين، أو ما هو أسوأ من ذلك وهو التلميح أو الاستنتاج بوجود علاقة بين المسبب والتأثير كمتغيرين.

فمثلاً، من الطبيعي أن تنظر إلى الرسم البياني الذي يربط إنتاجية الخس بتركيز الأوزون (شكل 8-8) وتعلن جازماً أن تركيز الأوزون تسبب في تخفيض الإنتاجية. إن هذا قد يكون صحيحاً، لكن البيانات ذاتها غير كافية لتثبت هذه العبارة. فماذا على سبيل المثال إذا كان يوجد في التجربة مادة سامة غير معروفة، وتوفرت بكميات متزايدة مع المستويات الأعلى من الأوزون؟ إن وجود هذه المادة السامة يمكن أن يفسر انخفاض الإنتاجية، وبهذا فإن الأوزون قد لا يكون هو المسؤول.

إن السبب والتأثير يجب أن تتحدد بواسطة طرق أخرى وليس ببساطة من خلال النظر إلى مجموعة واحدة من البيانات.

وبالطبع فإن هناك بيانات كثيرة لها أكثر من متغيرين تابعين . وحقيقة، فإنه بالنسبة للدراسة التي ذكرت آنفاً في هذا الجزء، تم قياس إنتاجية الخس لخليط من الأوزون وSO₂ وNO₂، ولهذا فإن هذا القيم بالجدول (8-6) تضم فقط جزءاً من البيانات. وبينما يستخدم الانحدار الخطي في حالة متغير تابع واحد، فإن الانحدار المتعدد (multiple regression) يتعامل مع أكثر من متغير تابع، مثل الأوزون وعاملين آخرين. وتجدر الإشارة إلى إن تحليل الانحدار المتعدد سوف يتبع ذات الخطوات العامة التي تستخدم في التحليل الخطي البسيط.

المراجع، ولمزيد الاطلاع:

- Coelho M.A. (1974) *Spatial Variability of Water Related Soil Physical Properties*. Ph.D. Thesis, The University of Arizona.
- Council on Environmental Quality (1992) *Environmental Quality, 22nd Annual Report*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Englund E. and Sparks A. (1988) *Geo-Es (Geostatistical Environmental software) User's Guide*. EPA600/4-88/033. U.S. Environmental Protection agency, Las Vegas, Nevada.
- Gilbert R.O (1987) *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Heck W.W., Talor O.C., Adams R., Bingham G., Miller J., Preston E., and Weinstein L. (1982) Assessment of crop loss from ozone. *Journal of the Air Pollution Control Association*. **32**, 353-361.
- Herman D.C., Fedorak P.M., MacKinnon M.D., and Costerton J.w. (1994) Biodegradation of naphthenic acids by microbial populations indigenous to oil sands tailings. *Canadian Journal of Microbiology*. **40**, 467-477.
- Huff D. (1954) *How to lie with Statistics*. W.W. Norton, New York.
- Huntsberger D.V. and Billingsley P. (1987) *Elements of statistical Inference*. 6th Edition. William C. Brown Publishers, New York.
- Little T.M. and Hills F.J. (1978) *Agricultural Experimentation*. John Wiley and Sons, New York.
- Matthias A.D., Artiola J.F, and Musil S.A. (1993) Priliminary study of N₂O flux over irrigated Bermudagrass in a desert environment. *Agricultural and Forest Meteorology*. **64**, 29-45.

- Ott W.R. (1995) *Environmental Statistics and Data Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Paulos J.A. (1995) *A Mathematician Reads the Newspaper*. Basic Book, New York.
- U.S. Department of Commerce (1990) *Statistical Abstract of the United States: 1990*, 110th Edition. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

مسائل حسابية وأسئلة:

1. خذ في الاعتبار القيم التسعة الأولى للطين الواردة في الجدول (2-8)، ثم: أحسب \bar{x} و s^2 . ماذا سيكون الفرق في قيمة s^2 إذا ما استخدمت (n) بدلاً عن (n-1) في مقام المعادلة (2-8)؟ هل سيكون الفرق أكثر أهمية بالنسبة لعدد أكبر من العينات أو عدد أصغر؟ (إذا كان لديك آلة حاسبة يدوية تحسب \bar{x} و s^2 أي صورة تستخدم في الآلة؟).
2. أدخل القيم الخاصة بنسب الطين الواردة بالجدول (2-8) في ورقة حسابية، ثم أحسب \bar{x} ، s ، CV . ارسم أعمدة تكرارية إذا كان ذلك متاحاً في ورقة الحساب.
3. خذ في الاعتبار القيم الثلاثين الأولى للرصاص الواردة في الجدول (4-8). احسب \bar{x} باستخدام المعادلة (1-8). خذ التحويل $y = \ln(x)$ لكل قيمة ثم أوجد المتوسط والتباين الخاصة بـ (y). كيف تقارن تقدير متوسط المجتمع (μ) حسب المعادلة (5-8) بقيمة (\bar{x})؟ لماذا هما مختلفان؟
4. احسب المتوسط والانحراف المعياري لكل الأوقات الواردة بالجدول (7-8). بين بالرسم المتوسط بما في ذلك أعمدة الخطأ على أساس $s \pm$ لكل واحد منها. جدول (7-8): تراكيز N_2O (nL/L) التي جمعت عند 0.05 متراً فوق سطح عشب برمودا في الفترة من 18 إلى 19 يوليو 1991 .

التوقيت من اليوم	المكرر (1)	المكرر (2)	المكرر (3)
19:37	325	304	308
06:37	307	305	303
08:37	309	323	336
10:37	316	322	331
12:37	321	323	319
16:12	312	309	318

5. يفترض التوزيع الطبيعي للمعادلة (3-8) قيماً تتراوح ما بين $x = \infty -$ إلى $x = \infty$. افترض أن المتغير المستهدف يتراوح ما بين 0 و100. ناقش فيما إذا كان ذلك يعني أوتوماتيكياً أن التوزيع الطبيعي ليس النمط المناسب للبيانات.

6. قدر عدد نقاط أخذ العينات الضروري لتقدير قيمة المتوسط لتراكيز الرصاص حسب الجدول (4-8) والشكل (6-8). افترض أنك تريد أن يكون التقدير داخل 15% من المتوسط وبمستوى احتمالية تساوى 90% كيف ستتغير (n) إذا كان التقدير ضمن 50% من المتوسط وله مستوى احتمالية 50%؟

7. ارسم العلاقة التي تربط إنتاجية الفول السوداني مقابل تركيز الأوزون من البيانات الموضحة بالجدول 8-8. أحسب المتوسط والانحراف المعياري لكل متغير. احسب الميل والجزء المقطوع من الإحداثي (y) لخط تم مطابقته خلال النقاط. ارسم الخط في الرسم البياني الذي أعدده. احسب (r) و (r^2). اكتب معادلة الخط الذي تمت مطابقته للبيانات، وكذلك قيمة (r) و (r^2) على الرسم البياني.

جدول (8-8): إنتاجية الفول السوداني (وزن القرون القابلة للتسويق/ نبات بالجرام) وتركيز الأوزون (ميكرو لتر/ لتر).

تركيز الأوزون (ميكرو لتر/ لتر)	إنتاجية الفول السوداني (جم)
0.056	157.8
0.025	142.3
0.056	122.4
0.076	92.0
0.101	68.9
0.125	40.0

8. ارجع إلى الشكل (7-8). طابق خط معين للبيانات الخاصة بالأيام العشرة الأولى فقط، استخدم البيانات الموضحة بالجدول (8-9). أذكر الميل، التقاطع مع المحور الصادي، ومعامل التحديد. استخدم الخط المتطابق للتنبؤ بكمية غاز CO₂ (مجم) بعد 35 يوماً. ناقش الفرق، إذا كان يوجد، بين القيم المتوقعة والقيم المقاسة هل أن القيمة المتوقعة معقولة؟ لماذا تكون أو لا تكون مقبولة؟

جدول (8-9): مجموعة بيانات جزئية لغاز (CO₂) المنبعث (مجم) والزمن (بالأيام) لمياه مستخدمة في المناجم مضاف لها مغذيات.

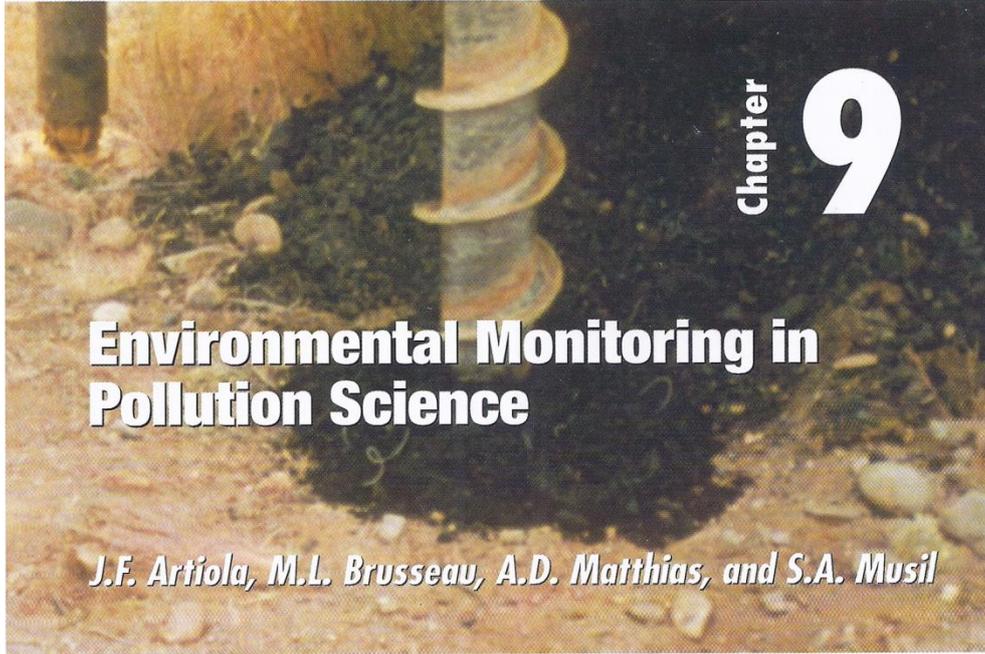
غاز CO ₂ (مجم)	الزمن (أيام)	غاز CO ₂ (مجم)	الزمن (أيام)
8.702	0	14.93	9
7.631	0	12.39	9
9.072	0	15.59	9
11.67	3	17.46	35
10.54	3	24.08	35
12.26	3	19.30	35
11.55	6		
13.96	6		
15.14	6		

9. وضح بالرسم البيانات الواردة في الجدول (8-10). أوجد الانحدار الخطي وارسمه على الشكل. احسب معامل الانحدار. هل هذا يشير إلى أن X متنبئ جيد لـ Y ؟ حيث يساوي X عدد السجائر (بالبلاتين) المستهلكة سنوياً في الولايات المتحدة من العام 1944 حتى عام 1958. وأن Y هو رقم مؤشر للإنتاج لكل ساعة عمل - رجل خاصة بمحاصيل علف من نفس الفترة الزمنية. هل ما زلت تعتقد أن X هو متنبئ معقول للمتغير Y ؟ لم، أو لم لا؟.

جدول (8-10): خمسة عشرة زوجاً لبيانات عالية الارتباط ببعضها.

Y	X
73	295
78	339
85	343
91	344
100	357
109	359
119	368
125	395
129	414
135	406
142	385
139	394
140	404
147	420
156	446

الباب التاسع
الرصد البيئي في علم التلوث



يستخدم هذا المثقاب الحلزوني لحفر آبار، وجمع عينات تربة طبيعية (undisturbed) ويصل الى أعماق محددة قبل أخذ عينات طبيعية باستخدام ثقاب أقل قوة كما هو مبين بالشكل (9-3).

1.9 الرصد البيئي

إن كل ما نعرفه حول النظم البيئية التي تشمل الخصائص الكيميائية والحيوية والفيزيائية، إضافة للكثير من العمليات التي تؤثر على سلوك الملوثات - يعتمد على جمع

البيانات وتحليلها. فمثلاً، تأتي معرفتنا بوجود وسلوكيات نوع معين من البكتريا في تربة ما من جمع عينات تربة وتحليل خصائصها الميكروبية. وبالمثل، فإن كل شيء نحتاج معرفته عن إدارة التلوث البيئي من حيث مصدره، وطرق إزالته وإصدار القوانين في شأنه، يعتمد على قدرتنا في تحديد وجود تلوث عند موقع معين وإمكانية أن يكون ضاراً للإنسان أو البيئة. ولكن يظل السؤال عن كيف يمكن قياس وجود ملوث ما وتحديد مدى انتشاره وكذلك سلوكه؟

في معظم الأحوال، يبدأ كل ذلك بجمع عينات بيئية وتحليلها، وهي العملية التي تسمى بالرصد البيئي (environmental monitoring). وفي هذا الباب سيتم بإيجاز التعرض لبعض المكونات الأساسية للرصد البيئي، بما يشمل تطوير خطط أخذ العينات وطرق جمع هذه البيانات من الهواء الجوي، والتربة والماء. وأثناء القيام بذلك سوف يتم التعامل مع بعض التساؤلات الهامة مثل: ما هو تحديداً الذي يتعين أخذ عينة منه؟ وأين سيتم تحديد النقاط في المكان والزمن وما هي الأساليب الخاصة الضرورية التي يتعين إتباعها عند التعامل مع العينة؟ كما أننا سوف نرى أنه نظراً لأن كل ملوث يؤثر على كل بيئة بشكل مختلف، فإنه يلزم تكييف تقنيات أخذ العينات وأساليبها بحيث تكون ملائمة للخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المميزة للملوثات وبيئات محددة.

2.9 أخذ العينات وطرق جمعها

تشير عبارة أخذ عينة (sampling) إلى جمع أو قياس عينات صغيرة ممثلة أخذت من مجتمع كبير (الأم) توجد في المكان والزمن. فمثلاً، عندما تتذوق حباراً (squid) مطبوخاً، فإنك تحتاج لأكل كمية قليلة فقط - أي تأخذ عينة - مما هو مقدم على صحن لتقرر فيما

إذا كنت تحب هذه الوجبة أم لا تحبها فأنت لا تحتاج لأكل كل أطراف الحبار الموجودة بالطبق - والتي تمثل المجتمع - حتى تتوصل إلى استنتاج، إذ بدلاً عن ذلك، تفترض أن العينات الصغيرة التي أخذت تمثل مذاق ونكهة الطبق كله وأنها تتطابق تماماً مع خصائصه. والمشكلة هنا، أن هذا الافتراض ربما يكون صادقاً أو لا يكون؛ فأسلوب أخذ العينة قد يعطيك معلومات خاطئة أو بيانات منحازة.

على العلماء البيئيين أن يتعاملوا أيضاً مع الافتراضية الأساسية بأن العينات أو الأعداد التي يتم جمعها خلال برنامج أخذ العينات يجب أن تعكس ما نحاول قياسه. ولتحقيق قدر من الموضوعية في جمع العينات، نستخدم أساليب وقواعد مقبولة تسمح لنا بجمع عينات تمثل بحق البيئة أو المجتمع (population) المستهدف. ويتطلب جمع عينات بيئية أن نأخذ في الاعتبار وبجذر القيود والحدود التي تفرضها كل بيئة واستخدام ذلك لتطوير خطة لجمع العينات تكون خالية من التحيز. وعندما نقوم بتطبيق أساليب غير منحازة لجمع العينات نكون عندها فقط قادرين على تحليل البيانات بشكل ملائم والوصول إلى استنتاجات منطقية يمكن الدفاع عنها. وللقيام بذلك، نحتاج لطرق محددة لجمع عينة هواء أو عينة من مياه سطحية أو عينة من مياه جوفية أو عينة من بيئة تربة.

قبل أن نباشر في استخدام طريقة لأخذ العينات، يتعين تحديد الأهداف بوضوح حتى يمكن تطوير خطة واقعية. ويعتبر جمع عينات بيئية أمراً مجهداً ومكلفاً، ويمكن للتخطيط الجيد أن يوفر في الجهد والتكلفة. فبعض المشاريع، مثلاً، قد تكون متعددة الأهداف، والتي يتعين اعتبارها في آن واحد ويتم التخطيط على أساسها. وهناك مشاريع أخرى قد تكون

معقدة، وتتطلب إسهامات تخصصات مختلفة. وفي هذه الحالة، فإن على جميع الباحثين المتميزين المساهمة في التخطيط مثل البيولوجيين والكيميائيين والمهندسين، إضافة إلى استشارة إحصائي يمكنه أن يتأكد من أن المتطلبات الإحصائية لإجراء التحليل قد أخذت في الاعتبار قبل جمع العينات.

إن الاعتبار الأول هو تحديد المجتمع (population) المعني. أي ما هو الشيء الذي ستؤخذ منه عينات، وأين يوجد من حيث الزمان والمكان؟. بعدها يتعين إقرار كيف تؤخذ العينات من هذا المجتمع. وعموماً، من المفضل أن يكون لكل عينة (عضو أو جزء) من المجتمع موضوع الدراسة فرصة مساوية بأن تؤخذ كعينة. فمثلاً، ربما نرغب في أخذ عينات عند فترات متساوية (زمنياً ومكانياً)، أو قد نأخذها عشوائياً اعتماداً على كيف نخطط من حيث استخدام البيانات وتفسيرها. وتشمل الاعتبارات الإضافية الخيارات حول أنواع القياسات التي يتعين أخذها والأساليب التحليلية التي ستستخدم، كذلك التساؤلات حول طرق التعامل مع العينات وتحليل البيانات. وبنفس القدر من الأهمية درجة الدقة المطلوبة لتحقيق الأهداف. وعموماً، فإن مزيداً من الدقة يتطلب عملاً وموارد أكثر - بمعنى أن ذلك يتطلب جمع وتحليل عينات أكثر.

إن التخطيط الجيد يوفر أيضاً معلومات حول توزيع الموارد. فإذا ما تمت بلورة الهدف جيداً، يمكن تقييم الطرق البديلة من حيث كفاءتها واقتصاديتها. مثلاً هل من الأفضل أخذ عينات من خمسين موقعاً بطريقة عشوائية أم بأخذها عند 50 موقعاً بطريقة الشبكة (grid)؟ هل من الأفضل تحليل كل عينة على حدة أم خلطها جميعاً وإجراء تحليل

واحد؟ هل من الأفضل إيجاد قيمة واحدة لكل عينة أم تقسيم العينة إلى مكررات (بمعنى إجراء تحليل على عينات صغيرة لكل عينة)؟ هل من الأفضل أخذ عينة بعد كل 30 ثانية أم يومياً؟ إن كل مخطط يتطلب توزيعاً مختلفاً للموارد، ولذا فإن المخطط يجب تصميمه لتعظيم فرصة تحقيق الأهداف.

عند تطوير مخطط لأخذ عينات وتقييمه، نعتمد على الخبرة السابقة بقياسات مماثلة ومراجعة بيانات موجودة ومتاحة للمنطقة المستهدفة بالدراسة. إن هذه المعلومات تعطي خلفية للمدى المتوقع للقياسات وتباينها. وتجدد الإشارة إلى أنه توجد فرصة لمقارنة النتائج النهائية. إن كثيراً من هذه الوثائق قد طورت لوكالات حكومية مثل الوكالة الأمريكية لحماية البيئة (EPA). وتطلب هذه الوكالات عادة ضمان جودة لخطوة مشروع (QAPP)، الذي كان يعرف سابقاً بخطوة ضمان الجودة/ ضبط الجودة (QA/QC). وكحد أدنى فإن QAPP يجب أن يحدد ما يلي:

1. استراتيجيات أخذ العينات: بما في ذلك عدد ونوع العينات، المواقع، الأعماق، الأوقات، الفترات الزمنية الفاصلة.
2. طرق أخذ العينات: تحديد الأساليب التي سيتم اتباعها والأدوات التي سيتم استخدامها.
3. تخزين العينة: أنواع الحافظات، طرق الحفظ، المدة القصوى للاحتفاظ بالعينة.
4. التحاليل: قائمة بجميع المؤشرات التي سيتم قياسها وحدود الدقة.
5. الطرق التحليلية: قائمة بالخطوات الحقلية و/ أو التحاليل المعملية المقبولة.

ويمكن الحصول على معلومات إضافية حول هذه المواضيع من قائمة المراجع الواردة في نهاية هذا الباب. إن الهدف العام لمخطط جيد الإعداد لأخذ عينات هو إنتاج بيانات تتميز بالخصائص التالية:

1. الجودة العالية: يكون للبيانات درجة معروفة من الدقة accuracy and precision.
2. يمكن الدفاع عن صحتها: يتوفر توثيق يؤكد على صحة مخطط جمع البيانات.
3. قابلة للتكرار: أن البيانات يمكن إنتاجها مرة ثانية باتباع مخطط أخذ العينات.
4. ممثلة: أن البيانات تمثل حقيقة البيئة التي أخذت منها العينة.
5. مفيدة: أن البيانات يمكن أن تستخدم لتحقيق أهداف مخطط الرصد .

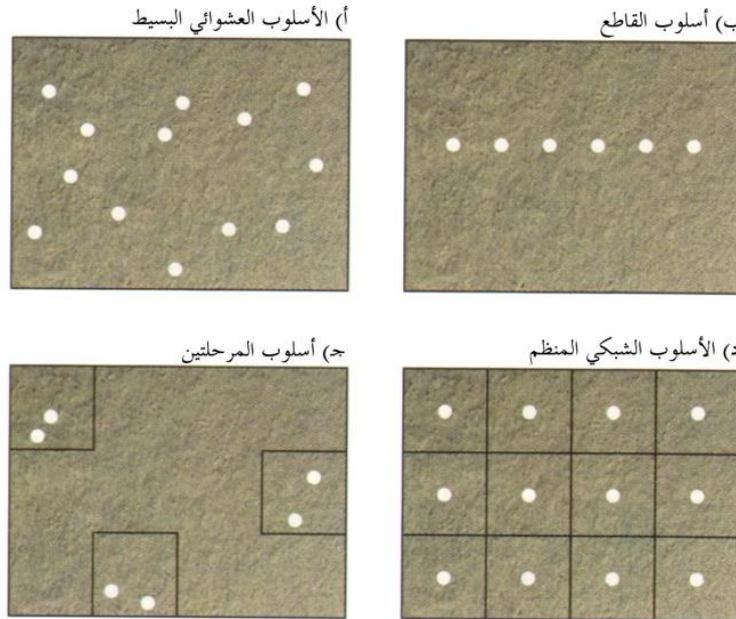
تجدر الإشارة إلى أنه من غير المنطقي توقع أن خطة معينة لأخذ العينات سوف تحقق كل هذه المتطلبات مجتمعة وفي كل الأوقات. لكن الخطوط الإرشادية المنظمة في الوقت الحاضر تشترط أن الخطة الجيدة لأخذ العينات يجب أن تستوفي هذه المعايير بنسبة لا تقل عن 90%.

3.9 أنماط أخذ العينات

عند تطوير مخطط معين لأخذ عينات، يتعين اتخاذ قرار عن أين ومتى تؤخذ العينات. إضافة لذلك، فإن عدد ومكان وتوقيت أخذ العينات يجب أن يكون كافياً للحصول على عينة صالحة إحصائياً دون تجاوز الميزانية المخصصة لهذا الجانب. ويتم ذلك عن طريق تأسيس أنماط لأخذ العينات.

1.3.9 أنماط ثنائية الأبعاد لأخذ العينات

في النمط ثنائي الأبعاد لأخذ العينات يتم التركيز على تحديد مكان أخذ العينات داخل منطقة، أو حقل معين. بمعنى، أنه يتعين اختيار إحداثيات مكانية لنقاط يمكن أن تشكل عينة صالحة إحصائياً داخل الحقل. وعموماً، يمكن أن نختار من بين أنماط أخذ العينات التالية، والموضحة في الشكل (1-9).



شكل (1-9): اختيارات لأنماط أخذ عينات مكانية .

أخذ عينات عشوائياً

في هذه الحالة، يتم أخذ عينة باختيار نقط عشوائياً على امتداد الحقل (الشكل 9 - 1، أ). وهناك طريقة مقبولة لانتقاء هذه المواقع تتمثل في تقسيم المنطقة كلها إلى مساحات

صغيرة بدرجة كافية يتم أخذ عينات منها (مثلاً، قطع بمساحة 1 متر مربع) يتم بعدها اختيار عدد من النقاط عشوائياً. وبالطبع، فإنه يتعين التأكد من أن النقاط العشوائية هي في الحقيقة كذلك. إن معظم أجهزة الحاسوب تتوفر فيها إمكانية توليد أرقام عشوائية يمكن استخدامها لاختيار إحداثيات عشوائية) ويتعين فعلياً تحديد الإحداثيات المختارة بدقة في الحقل. وبذلك، فإنه حسب مساحة الحقل، يمكن استخدام شريط قياس أو جهاز مساحي، أو ربما يتم تحديد المواقع باستخدام جهاز تحديد الموقع عن طريق الأقمار الاصطناعية (GPS) حسب نوع الخرائط أو الأجهزة المتاحة.

أخذ العينات بأسلوب القاطع (Transect Sampling)

يتم اختيار اتجاه معين ونقطة بداية وطول القاطع، يتم بعدها أخذ القياسات على امتداد القاطع (الشكل 9-1، ب). وفي بعض الحالات تؤخذ العينات عند مسافات بينية محددة على امتداد القاطع وفي حالات أخرى، فإن جميع المواقع التي يوجد عندها المؤشر المستهدف يتم استخدامها، مثلاً، عندما يراد إحصاء جميع أفراد نوع نبات معين على امتداد القاطع.

ويوجد مظهر آخر لهذا النمط وهو اختيار عدة مقاطع اعتماداً على وجود اختلافات عند الموقع فمثلاً، في حالة أخذ عينات من ضفتي مجرى مائي، فإن أخذ قاطع على امتداد المجرى المائي وآخر متعامد عليه ويمتد ليصل بيئة بعيدة تختلف عن المجرى سيكون مفيداً. وأحياناً، يمكن أن يوفر قاطع معين المعلومات المطلوبة لاتخاذ القرار بشأن أية أنماط

أخرى يجب اتباعها لأخذ العينات الرئيسية. فمثلاً، قد يشير أخذ عينات مبدئي على امتداد قاطع معين بأن اعتماد أسلوب المرحلتين لجمع العينات هو الخيار الأفضل لدراسة ما.

أسلوب المرحلتين لأخذ العينات

يتم في هذه الحالة تصنيف العينات عن طريق تقسيم الحقل إلى تحت وحدات (subunits) منتظمة، تسمى وحدات أولية (الشكل 9-1، ج). كما يمكن تصنيف العينات على أساس الميل أو نوع التربة أو أية خاصية فيزيائية أخرى). ويتم داخل كل وحدة أولية أخذ عينات صغيرة منها (subsamples)، إما عشوائياً أو بطريقة منتظمة. وعموماً، نفترض وجود تباين بين الوحدات الأولية ومتغير عشوائي عام يكون هو نفسه داخل كل وحدة أولية. فمثلاً قد يتكون موقع بيئي معين من منطقة تلية منحدره وسهل مستوى. إن هاتين الوحدتين الأوليتين يتوقع أن يحتوي كل منهما على تربة تختلف في خصائصها عن الأخرى. إضافة لذلك، فإن كل وحدة أولية لنوع تربة معينة سوف تتميز باختلافات عشوائية داخلية.

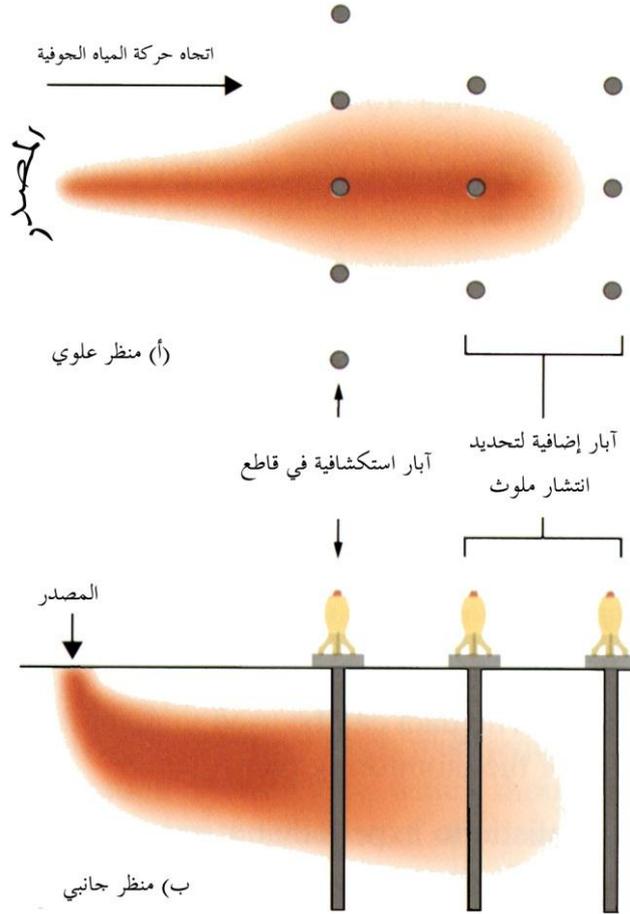
الأسلوب الشبكي لأخذ العينات

يتم هنا جمع العينات على فترات منتظمة وعلى مسافات ثابتة (الشكل 9-1، د). وكما هو موضح في الشكل فإن المسافات تكون أحياناً هي نفسها في الاتجاهين، لكن المسافات في الاتجاه الأفقي ربما تكون مختلفة عنها أيضاً في الاتجاه الرأسي. إن الطريقة الشبكية هذه تكون مفيدة بشكل خاص للحصول على خريطة لمساحة معينة، خاصة إذا كان ما هو معروف حول التباين في القياس من نقطة إلى أخرى قليلاً بالنسبة لإجمالي المساحة.

إن النمط المناسب لأخذ العينات يعتمد على الموقع وأهداف الدراسة، ففي علم التلوث يكون أخذ العينات بأسلوب القطاعات هو الأكثر استخداماً في حالة أخذ عينات مبدئية محدودة للموقع. أما نمط أخذ العينات عشوائياً، الذي يكون عادة الأكثر سهولة، فرمما يكون مناسباً لمساحة يعتقد بأنها خالية من الأنماط أو الدورات التي ترتبط بالمتغير المستهدف بالدراسة. أما أسلوب أخذ العينات على مرحلتين فإنه ينتج مزايا تسمح بتقييم التغير العام، خاصة عندما يكون التغير داخل الوحدات الصغيرة (subunits) أقل كثيراً عما هو للحقل كله. من ناحية أخرى، فإن الأسلوب الشبكي لأخذ العينات يكون مفيداً بدرجة أكبر عند وجود رغبة في معرفة التوزيعات المكانية وهو ما يلزم عند وجود رغبة لإعداد الخرائط.

2.3.9 اعتبارات عند أخذ عينات ثلاثية الأبعاد وعينات زمنية

إن النماذج ثلاثية الأبعاد لأخذ العينات التي تشمل البعد الرأسي، قد تتعلق بالعمق، كما هو في الترب أو البحر على سبيل المثال، أو الارتفاع كما هو في حالة الهواء الجوي. أفترض، على سبيل المثال، أننا نتابع مسار ملوث ما في خزان مياه جوفي يكون اتجاه تدفق مياهه غير محدد جيداً. وقد نبدأ بحفر عدة آبار مراقبة على امتداد قاطع معين يكون متعامداً على الاتجاه المتوقع للتدفق. وبمجرد الحصول على النتائج الأولية، يمكن أن نطور تصميماً محورياً لأخذ العينات للتقليل إلى الحد الأدنى من العدد الكلي للآبار اللازمة. وفي هذا المثال، فإن الشيء المستهدف (وهو الملوث) يجب متابعته أو تقفى آثاره على امتداد ثلاثة أبعاد، كما هو موضح في الشكل (9-2).



شكل (9-2) : آبار تم حفرها لأخذ عينات لتحديد مدى انتشار ملوث في مياه جوفية.

يقدم التوزيع الزمني أيضاً خيارات متعددة لأخذ العينات. وفي هذه الحالة، يتعين وضع خيارات للفترات الفاصلة بين جمع العينات، ومدى تكرار أخذها، ووقت جمع العينة

حتى تكون القيم المسجلة لها معنى. إن معظم الظواهر لها خصائص دورية، مثل التغيرات اليومية والسنوية في درجة الحرارة. إضافة لذلك، فإن أية عينة تتأثر بالنشاط الحيوي قد تظهر تغيرات كبيرة مع الزمن. فمثلاً، تتأثر كمية النترات في التربة بسبب امتصاص النبات للمغذيات والنشاط الحيوي للميكروبات. من ناحية أخرى، فإن كلا من امتصاص المغذيات والنشاط الميكروبي يتأثران بدورهما بدرجة الحرارة والمحتوى الرطوبي والمعرضين للتذبذب. لذلك، فإن جمع عينة تحت ظروف واحدة فقط قد تقود إلى استنتاجات منحازة.

4.9 جمع عينات من بيئة التربة

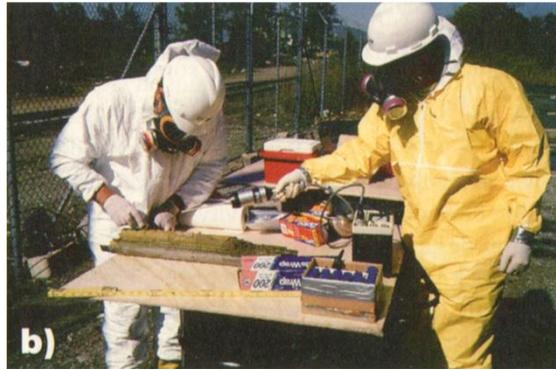
التربة لا يمكن أن تكون متماثلة، وعدم التجانس هذا هو الجانب الأكثر تحدياً لأخذ عينات من هذه البيئة. لذلك، فإن من المعوقات الشائعة لمعاينة تلوث التربة يتمثل في معرفتنا المحدودة لمكونات بيئة التربة. ونظراً لأن كل عينة تربة يتم جمعها هي جزء من كمية ضخمة لمكونات متنوعة توجد في التربة، فإنه يلزم لأي تقدير يكون صحيحاً ويمكن قبوله لتحديد مستويات تلوث تربة ما أن تتوفر له: (1) معرفة سابقة عن عدم تجانس التربة وتفاوت خصائص الملوث في نظام التربة. (2) الاستخدام الحذر لأدوات أخذ العينات، والتطبيق الصحيح لطرق أخذ العينات وتقنيات التحليل. (3) استخدام أسلوب إحصائي دقيق لتحديد النظام المناسب لأخذ عينات التربة وتحليل البيانات.

1.4.9 أخذ عينات تربة بطريقة إتلافية (Destructive soil sampling)

إن الأسلوب الأكثر شيوعاً لقياس تلوث التربة يشمل إزالة عينات تربة من الحقل ثم إجراء تحليل لها. أي أننا، نقوم بقياس تركيزات الملوثات في عينات التربة إما بتحليل التربة

نفسها أو بتحليل مستخلصاتها المائية أو نواتج هضم العينة بالأحماض. وفي كلتا الحالتين، فإنه يتعين استخدام طرق أخذ عينات تُغير من الحالة الطبيعية للتربة واتباع أساليب تحليل تتلف العينة من أجل الحصول على البيانات التي نريدها. لكن أخذ عينات تربة لأغراض بيئية يتطلب أن تجمع بحد أدنى من إحداث أي اضطراب لخصائصها الطبيعية وأن تكون خالية من أي تلوث عرضي في جميع المراحل. ونتيجة لذلك، فقد تم تصميم أدوات خاصة لأخذ العينات للتقليل إلى الحد الأدنى من تلوثها في الحقل أو تغيير خصائصها الطبيعية.

هناك العديد من الطرق لجمع العينات التي يمكن تحليلها لتقدير الملوثات المستهدفة. فمثلاً، يمكن جمع الطور الصلب للتربة باستخدام أدوات تتراوح من البسيطة جداً مثل الجاروف اليدوي إلى الأوجر الميكانيكي المثبت على سيارة حقلية (انظر الشكل 9-3 أ). ويعتبر أوجر البريمة مناسباً لأخذ عينات غير طبيعية للتربة (انظر الصورة)، بينما تعتبر الأنابيب المجزأة وأنابيب الأوجر المجوفة مفيدة بشكل خاص لأنها تسمح بأخذ عينة لعمود تربة دون إحداث اضطراب للحقل المحيط بها. إضافة لذلك فإن أنواعاً من الأوجر اليدوي والميكانيكي قد تم تصميمها لاستخدام أغلفة جديدة لكل عينة يتم جمعها. إن هذه الأغلفة قد تكون بلاستيكية أو معدنية؛ وتستخدم أغلفة بلاستيكية في حالة جمع عينات لتقدير قياسات لخصائص غير عضوية بشكل روتيني، أما الأغلفة المعدنية فتستخدم في حالة تقدير ملوثات عضوية محتملة. وفي الحالتين، فإن الناتج يكون عبارة عن مجموعة من أعمدة تربة مغلفة يمكن تخزينها ونقلها للمعمل للتحليل دون تعرضها لتلوث عرضي.



شكل (9-3): (أ) منصّة حفر متنقلة مزودة بأوهر مجزأ لأخذ عينات تربة حسب العمق. لاحظ ارتداء العاملين لمعدات الحماية عند هذا الموقع للمخلفات الخطرة. (ب) عمال يرتدون بدلا واقية وكمامات يقومون بأخذ عينات من عمود تربة استخلص باستخدام أوهر مجزأ المبين في الصورة (أ) العامل على اليمين يمسك بجهاز كاشف لقياس التأين الضوئي، الذي يقوم بكشف المركبات العضوية المتطايرة. العامل على اليسار لا يلتزم فنياً بالقواعد من جهة اللباس الواقي إذ أن أكمام البدلة لم يتم تثبيتها بشرط لاصق فوق القفازات البلاستيكية.

2.4.9 أخذ عينات تربة بطرق غير إتلافية (Nondestructive soil sampling)

يجري أخذ عينات تربة بطريقة غير إتلافية عند الموقع. إن هذا الاختبار الذي لا

يشمل إزالة للتربة، يركز عادة على المكونات السائلة أو الغازية للتربة.

تحتوي التربة على ماء يمكن أن توجد ضمنه ملوثات ذائبة (انظر الباب 6). وتستخدم أدوات أخذ عينات الماء الذي يوجد في مسام التربة لجمع عينات ملوثات قابلة للذوبان في الماء من بيئة التربة. إن هذه الأجهزة لا تقيس مباشرة مؤشرات أي ملوث، لكنها تسمح بجمع عينات لماء مسام التربة عند الموقع. ويمكن عندئذ تحليل هذه العينات لتقدير المركبات المستهدفة. إن هذه الأجهزة تستلزم أيضاً إحداث اضطراب للتربة لأنه يتعين غرزها بشكل دائم خلال قطاع التربة.

يوجد نوعان رئيسيان لأجهزة جمع ماء مسام التربة: أجهزة غير نشطة (passive devices) أو العاملة بالجاذبية، وأجهزة نشطة (active devices) أو أجهزة الشد (suction). وتشمل الأجهزة غير النشطة ليسيمترات (lysimeters) مجوفة أو صناديق محكمة ضد التسريب. ويتم إدخال هذه الصناديق إلى التربة حيث يرشح الماء خلالها تحت تأثير قوة الجاذبية. بعدها يتم سحب هذا الماء بالشد (suction) عبر أنبوب خاص ويحفظ لإجراء التحليل. وتضم الأجهزة النشطة أنواعاً عدة من الأكواب المسامية المستخدمة في جمع ماء مسام التربة تحت الشد. وهذه الأكواب، التي يمكن أن تصنع من الخزف أو التفلون، أو الفولاذ غير القابل للصدأ، هي عبارة عن أجهزة أسطوانية الشكل تغرز في التربة، ويتم تفريغ الهواء منها لخلق شد خلال المادة المسامية الملامسة لمحلول التربة. وتؤدي هذه العملية إلى سحب سائل مسام التربة إلى داخل الكوب، حيث يتم بعدها سحب السائل عبر أنبوب ويخضع للتحليل. وحيث أن الأجهزة غير النشطة والنشطة تعترض وتزيح فقط جزءاً بسيطاً من ماء مسام التربة، فإنه يمكن اعتبارها أدوات أخذ عينات لا تغير الحالة

الطبيعية للتربة (nondestructive samples). {ملحوظة: انظر توصيف المشدادات (أدوات قياس الشد) في الجزء 3.1.5، والشكل 4-5 وذلك لأنها مشابهة من حيث التركيب ومبادئ العمل}.

في الحقيقة، يستخدم بالدرجة الأولى أسلوب رصد التربة في مكانها أو ما يعرف بغير الإتلافي لمتابعة مؤشري تربة هما: رطوبة التربة، والملوحة. ويرتبط هذان المؤشران بالتغيرات في الخصائص الطبيعية والكيميائية للتربة-وهي التغيرات التي قد تُستحث عن طريق هذه الملوثات مثل الأملاح الذائبة.

إضافة إلى ذلك-فإن التوصيل الهيدروليكي، وهو قدرة بيئة مسامية (مثل التربة) على توصيل الماء (انظر الجزء 2.5) - يعتبر الخاصية الفيزيائية للتربة الأكثر أهمية التي يمكن ربطها بانتقال ومصير الملوثات في بيئة التربة. ولتقدير هذه الخاصية، تستخدم أجهزة قياس الرشح (infiltrimeters)، التي هي عبارة عن أجهزة حقلية توضع فوق سطح التربة حيث تقيس معدلات ارتشاح الماء. ويوجد جهازان يشيع استخدامهما لقياس الرشح: جهاز الحلقات المزدوجة لقياس الرشح (double - ring infiltrator) وجهاز قياس الشد القرصي (tension- disk infiltrator)، وللمزيد من المعلومات انظر المرجع (Wilson et.al.,1995) الوارد بقائمة المراجع لهذا الباب.

تستخدم مجسات تنشيط النيوترونات (Neutron activation probe) وجهاز قياس الانعكاس الزمني (time domain reflectometry, TDR) وجهاز قياس التوصيل الكهربائي للتربة (EC meter) أيضاً لإجراء قياسات رطوبة التربة دون تغيير لخصائصها. كما

يمكن لجهازي EC, TDR أن يستخدموا أيضاً لقياس الملوحة في التربة. من ناحية أخرى، فإن هذه الأجهزة تؤدي إلى إحداث خلخلة لبيئة التربة لأنه يلزم إدخال أنبوب توصيل أو مجس معدني خلال قطاع التربة. كما إن استخدام هذه الأجهزة يعتبر محدوداً بعض الشيء، بسبب تكاليفها العالية بالدرجة الأولى. إضافة لذلك، فإن استخدام هذه الأجهزة كثيراً ما يكون صعباً لأسباب مختلفة. فعلى سبيل المثال، يتطلب استخدام مجس النيوترونات مصدراً مشعاً منخفض الطاقة، بينما يحتاج كل من جهاز TDR ومجس النيوترونات مصادر طاقة وأجهزة قياس متطورة، وكذلك معايرة متكررة. وللمزيد من التفاصيل حول تصميم وتشغيل هذه الأجهزة، أنظر إلى المرجع (Wilson et.al., 1995) الوارد بقائمة المراجع لهذا الباب، كذلك أنظر إلى الجزء 3.1.5 من هذا الكتاب.

إن الطرق غير الإتلافية التي تحافظ على العينة في حالتها الطبيعية متوفرة أيضاً لجمع عينات غاز التربة. إن جمع هذه العينات له أهمية خاصة لرصد ومتابعة مستويات غازات هامة مثل الأوكسجين وثنائي أكسيد الكربون، ولتقدير تراكيز الطور الغازي لملوثات عضوية متطايرة (مثل مكونات الجازولين أو مذيبيات التنظيف). ومن حيث المفهوم فإن الأجهزة النشطة لأخذ عينات غاز تعتبر مشابهة لتلك المستخدمة لأخذ عينات ماء من مسام التربة؛ وبذلك فإن أحجام السائل (في هذه الحالة، الغاز) يتم استخلاصها من التربة ثم تنقل للسطح لإجراء التحليل وتقدير الملوث المستهدف. من ناحية أخرى، فإن الأجهزة غير النشطة لجمع العينات الغازية (passive gas –sampling devices) تكون مختلفة. فهذه الأجهزة تستند عادة إلى فكرة وضع مادة ماصة، مثل كبسولات الفحم المنشط في التربة،

ويتم استخراج الكبسولات بعد أن يُمتص الطور الغازي للملوّث بواسطة الفحم ويتم احتجازه، ويمكن بعد ذلك تطهير الملوّثات حرارياً وتخضع للتحاليل المناسبة.

3.4.9 اعتبارات ومحددات أخرى عند أخذ عينات التربة

توجد جوانب هامة أخرى لأخذ عينات ملوثة تشمل طرق جمع العينة وطرق إعدادها التي قد يصعب تطبيق بعض منها، إن إحدى المشاكل الأساسية هي التساؤل حول كمية العينة التي يتعين جمعها. ونظراً لأن نظم التربة تتميز بعدم التجانس على المستوى الدقيق وكذلك المستوى الكبير، فإن حجم العينة يمكن أن يؤثر على دقة التحاليل، ونظرياً، فإنه كلما زاد حجم العينة كان ذلك أفضل لكن جمع كميات كبيرة من التربة لا يكون عملياً ولا منطقياً - فالتكاليف الضخمة لجمع عينات كبيرة غير مقبولة والاضطراب الهائل المصاحب لذلك سوف يتلف نظام التربة.

وعلى ذلك يتعين الاتفاق على بعض الخطوط الإرشادية المقبولة . وكقاعدة عامة، نفترض إن كتلة عينة التربة يجب ألا تقل عن 200 جرام. ومثالياً فإن كتلة عينة التربة تتراوح ما بين 300 و1000 جرام، حسب نوع الأداة المستخدمة لجمعها، وعمق التربة، وعدد الملوّثات التي يتعين تقديرها في العينة. إضافة لذلك، فإن العينات الحقلية يتعين خلطها جيداً وأخذ عينات صغيرة منها حسب الحاجة قبل إجراء التحاليل. وعندما يكون تجميع العينات (تشكيل عينة مركبة مكونة من عينتين أو أكثر) مناسباً، يجب خلط كميات متساوية من كل عينة جيداً قبل إجراء التحاليل.

وهناك اعتباراً آخر يتمثل في طبيعة الملوثات المستهدفة بالتحليل، الأمر الذي يؤثر على أسلوب جمع العينة. فبعض العينات، مثل تلك التي تحتوي على مكونات مشعة ربما يكون التعامل معها خطيراً. فإذا كانت المادة التي يجمع جمعها خطيرة، فإن الشخص الذي يقوم بالجمع سيحتاج لأدوات خاصة، تتراوح من القفازات البسيطة إلى أجهزة التنفس والملابس الواقية (انظر الشكل 9-3). أيضاً، فإن طبيعة المادة التي سيتم أخذ عينة منها وكذلك الملوث المستهدف يؤثر على طريقة التعامل مع العينات. فمثلاً، يتم وضع عينات التربة عادة في قناني بلاستيكية أو زجاجية، يتم غلقها بإحكام، وتحفظ باردة عند درجة حرارة 4°م إلى حين تحليلها. أما مستخلصات ماء مسام التربة، التي يمكن أن تجمع في قناني بلاستيكية أو زجاجية، فيتم حفظها وتخزينها باتباع الخطوات المستخدمة لعينات المياه (سيتم مناقشتها فيما بعد). ويوضح المثال التالي تطبيقاً لأساسيات أخذ العينات وأساليب جمعها.

نظراً لكونه مغذياً هاماً للنبات، يضاف النيتروجين النتراي ($\text{NO}_3\text{-N}$) عادة للأراضي الزراعية أحياناً في صورة سماد كيميائي وأحياناً أخرى مع مخلفات المجاري الصلبة الغنية بالنترات. ومثالياً، فإن أي نترات تضاف للتربة في حقل معين سيتم استهلاكها بواسطة المحصول. ومما لا يمكن تفاديه، أن بعضاً من النترات ستغسل إلى ما تحت منطقة نمو الجذور، ولذلك فإن النترات تعتبر الملوث الأكثر تواجداً في المياه الجوفية بالولايات المتحدة الأمريكية (انظر الجزء 2.14 والجزء 1.5.16). لهذا فمن المهم رصد ومتابعة وجود النترات ومصيرها في

التربة على امتداد الزمن. ولنأخذ في الاعتبار حالة حقل مروٍ مساحته 28 هكتاراً مزروع بمحصول القطن وتمت معاملته بمخلفات صرف صحي صلبة غنية بالنترات.

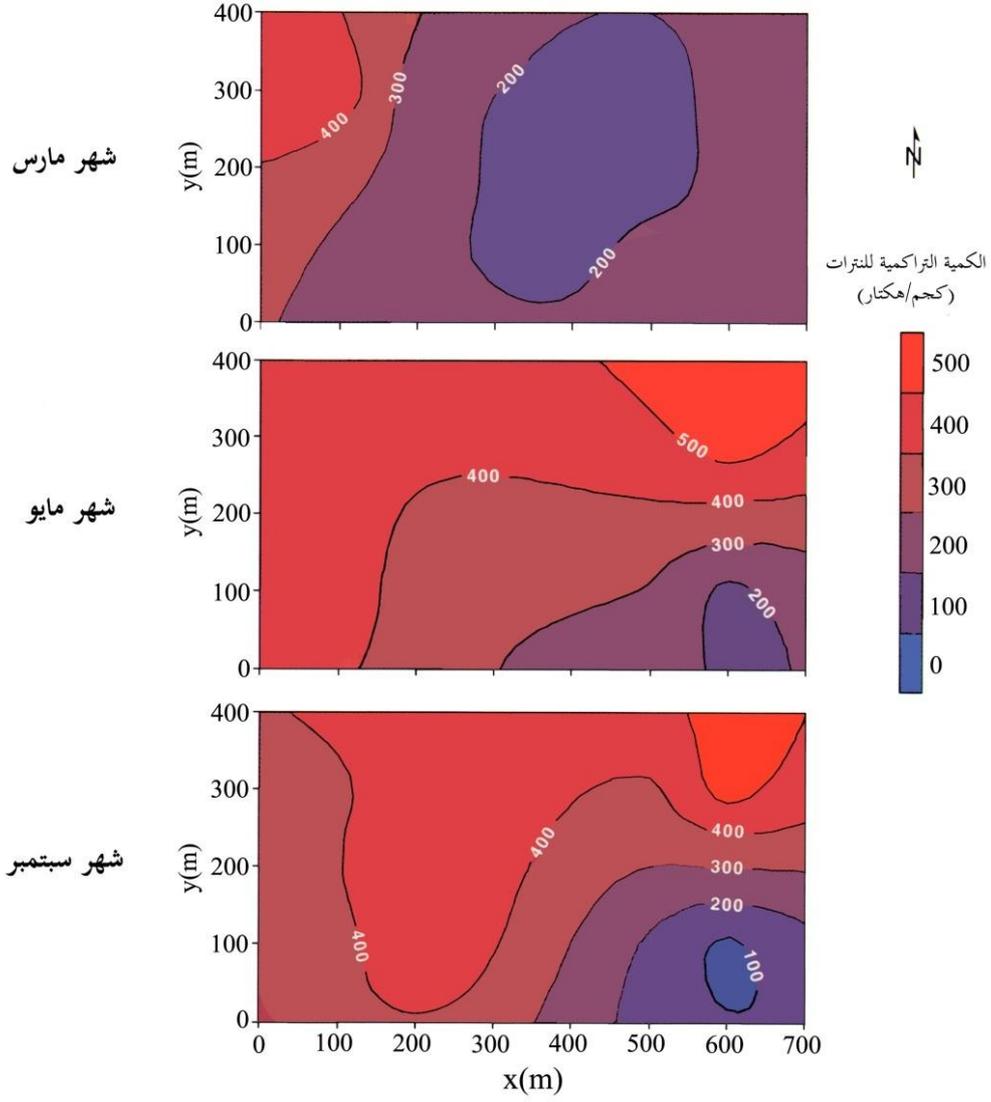
الجمع (Collection)

تم جمع أعمدة تربة باتباع الأسلوب الشبكي (grid pattern) (انظر الشكل 9-1.د)، وبحيث أخذت 9 عينات تربة لكل عمود على مسافات 30سم عمودياً، ثم وضعت هذه العينات في حاويات خاصة، وتم خلط العينة جيداً لكل 30سم عمق وأخذت عينات صغيرة منها. ووضعت عينة صغيرة في إناء معدني يمكن غلقه لتقدير الرطوبة الحقلية. كما تم وضع عينة بوزن 300 حجم تقريباً في كيس بلاستيكي يمكن غلقه بإحكام لإجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية وتم تخزين جميع العينات الصغيرة على الفور في حاوية تبريد معزولة وضعت بالبراد (الثلاجة) حتى موعد إجراء الاستخلاص والتحليل. في المعمل تم تحليل المستخلصات المائية للتربة لتقدير النترات NO_3-N باستخدام جهاز الكروماتوجرافيا الأيوني (ion chromatograph). إن نمط أخذ العينات المكاني الذي وصف أعلاه قد أعيد ثلاث مرات خلال السنة:

1. شهر مارس، بعد إضافة المخلفات الصلبة للصراف الصحي، ولكن قبل زراعة محصول القطن.
2. شهر مايو، بعد عشرة أيام من الري قبل الزراعة وأثناء إنبات القطن المزروع.
3. شهر سبتمبر، عند وصول النباتات إلى مرحلة النضج حيث كانت في مرحلة الإزهار الكامل.

تحليل البيانات

عقب إجراء التحليل الكيميائي لتراكيز النترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) على امتداد قطاع تربة بعمق 2.7 متر، سجلت بيانات التركيز التراكمي بالكيلوجرامات للنترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) في المهكتار لكل موقع. ولتسهيل تقييم البيانات بأسلوب لا إحصائي، استخدم أسلوب التوقعات (interpolation scheme) لتقدير تركيز النترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) للحقل كله. واستخدمت هذه البيانات لرسم خرائط كنتورية ثنائية الأبعاد (2-D) كما هو موضح في الشكل (9-4). {ملحوظة: إن أساليب الاستقراءات (extrapolation schemes) تكون عادة أكثر دقة كلما زادت نقاط البيانات؛ هذه الحالة تمثل ما يقرب من الحد الأدنى المطلوب من البيانات}.



شكل (9-4): التوزيع الموسمي للنترات في الطبقة العلوية (بعمق 2.7 متراً) من تربة حقل مساحته 28 هكتاراً مزروعاً بمحصول القطن.

يمكن أن نرى في الشكل (9-4) أن تراكيز النترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) عموماً في منطقة الجذور لهذا الحقل ازدادت بشكل ملحوظ عقب الري قبل الزراعة (الخريطة الكنتورية لشهر مايو أكثر احمراراً). إن هذه المشاهدة تتمشى مع الزيادة الهامة في معدلات معدنة النترات المرتبطة بالمادة العضوية الصلبة (Sludge-N) عقب إضافة الماء للتربة. ونظراً لأن المادة العضوية الصلبة تسلك كسماد نيتروجيني بطيء التحلل، فإن تركيز النيتروجين في هذا الحقل تحديداً ظلت ثابتة تقريباً حتى موعد الحصاد.

إن الخرائط الكنتورية تمكنا أيضاً من تسجيل مشاهداتنا حول تغيرات قوام التربة في الحقل وهو ما لم يكن واضحاً بسهولة من السطح. فمثلاً، يظهر الجزء الجنوبي الشرقي (الجانب السفلى إلى اليمين) من الحقل تراكيز نيتروجين تقل باستمرار عن تلك التي توجد في بقية الحقل. وقد أظهر لاحقاً تحليل التوزيع الحبيبي لعينات تربة (غير مدرجة هنا) أن قوام التربة في هذا الموقع كان أكثر رملية. وبذلك، فإن النترات قد فقدت بسرعة من هذه المساحة خلال عمليات الري. ومثالياً يتعين إقامة نقاط قياس أكثر لتصبح الخرائط أكثر مصداقية. من جهة أخرى، فإن البيانات المقدمة تمثل ساعات عمل كثيرة، لكنه وعلى الرغم من محدودية عدد النقاط، إلا أن التوضيح العيني (شكل 9-4) ساعد على تفسير التغير الموسمي والمكاني للقياسات.

5.9 جمع عينات لبيئة الماء

نظراً لطبيعتها الديناميكية (كسائل)، فإن بيئة الماء بشكل خاص عرضة لإضافة الملوثات. بمعنى، أن بيئة الماء تتأثر بسرعة وشدة أكبر كثيراً عند حدوث تلوث مقارنة ببيئة

التربة. فمثلاً، عند جنوح قطار محمل بالمبيدات عن مساره مما يؤدي إلى انسياب كميات كبيرة من المبيد فوق سطح الأرض فإن ذلك يعتبر أمراً سيئاً بدرجة كافية، لكن تأثيراته ستكون مقتصرة بشكل واضح داخل رقعة محدودة. إضافة لذلك، فإنه نظراً لأن الترب جسم صلب مسامي، فإن الملوثات سوف لن تنتشر بسرعة، مما يسمح بوقت كاف للاحتواء والتنظيف. لكن حيود قطار عن قنطرة فوق نهر سيكون أكثر خطورة. إن هذا الانسياب سينتج عنه دون شك انتشار سريع للمبيد في الماء، وهذا الانتشار سيؤثر حتماً، بدرجة أو بأخرى، على امتداد مجرى النهر كله بما في ذلك البيئات المصاحبة له.

وتبدو بيئات المياه، التي تضم عموماً المحيطات، والجداول، والبحيرات؛ والخزانات والمياه الجوفية، أكثر تجانساً في تكوينها من الترب. لكن هذا التجانس المظهري يمكن أن يقود إلى أخطاء. فالحقيقة، أن نظم الماء كثيراً ما تكون طبقية، فهي تتميز باختلاف درجات الحرارة والكثافة، وكذلك محتواها من الغازات، والتراكيب الكيميائية. وانطلاقاً من ذلك فإنها تتميز باختلاف في توزيع الملوثات، (أنظر أيضاً الباب 13). وعلى ذلك، ونظراً لأن تراكيز الملوثات نادراً ما تكون ثابتة خلال جسم مائي، فإنه يتعين أخذ العينات من البيئات المائية بعناية كبيرة. وفي الولايات المتحدة الأمريكية انطلق برنامج رصد مكثف للمياه بعد صدور قانون المياه النظيفة (Clean Water Act) عام 1974. انظر الباب 23 الجزء 2.23 للتوضيح.

1.5.9 أخذ عينات من مياه سطحية

عند أخذ عينات من أجسام مائية يتعين الأخذ في الاعتبار السطح، والحجم، وديناميكيات هذه الأنظمة. فمثلاً، يجب أخذ عينات من الأجسام المائية الجارية على امتداد

عرض قناة التدفق لأن الماء يتحرك بسرعة أكبر عند المنتصف منه عند الحواف. كما يتعين عند أخذ عينات في مقطع عرضي، قياس سرعات التدفق وتسجيلها عند كل موقع من مواقع أخذ العينات. وفي حالة الأجسام المائية المحجوزة والراكدة نسبياً، مثل البحيرات و الأهوار أو المستنقعات (Lagoons) يكون من المهم أيضاً أخذ عينات مع العمق، وخاصة عند وجود تغيرات حادة في درجات الحرارة (thermo clines). ويعتبر أخذ عينات من نظم مائية ديناميكية (تدفق غزير) من وقت لآخر لغرض التحليل شائعاً ذلك أن التركيبات الكيميائية (للملوثات) في هذه الأجسام المائية يمكن أن يتغير بسرعة. كذلك، فإن تكرار أخذ عينات في أوقات متقاربة ضروري لاكتشاف أي تدفق للملوثات.

من ناحية أخرى، فإن أخذ عينات بتكرار أقل يتم عادة في نظم مائية لا تتأثر بشكل واضح بمصادر تلوث محددة (point) أو غير محددة أو معروفة (nonpoint sources). تؤثر مصادر التلوث غير المحددة على النظم المائية ببطء وبشكل متساو في العادة. وفي بعض الحالات يتم تقليل التأثيرات الناتجة عن مصادر غير محددة للتلوث (nonpoint pollution) عن طريق آليات طبيعية؛ لكنه وفي حالات أخرى، يمكن أن تقود تأثيراتها المتراكمة إلى تدهم سريع لجزء أو أكثر من النظام المائي. فمثلاً، يمكن معادلة تأثيرات المطر الحمضي بواسطة قاعدية مياه البحيرات التي تحتوى على تركيزات مقاسة من الكربونات والبيكربونات. إن التأثير المقاوم لهذه المعادن قد يحافظ على الرقم الهيدروجيني (pH) ضمن مدى يمكن تحمله (6-8 تقريباً) بعد سقوط أمطار حمضية لفترة زمنية طويلة (سنوات). بعد ذلك، ومع استنزاف قاعدية الماء يهبط الرقم الهيدروجيني بسرعة إلى ما تحت الرقم 6 بعد مطرة فقط أو

مطرتين حمضيتين. إن هذا الهبوط في الرقم الهيدروجيني قد يؤدي إلى سلسلة من التأثيرات البيئية على النظام المائي يكون من الصعب عكسها. وقد تشمل هذه التبعات موت الأسماك، وانخفاض معدلات البناء الضوئي للطحالب البحرية، وانخفاض في الدورات الحيوية الطبيعية التي تتحكم في المغذيات الدقيقة والكبرى، وزيادة تركيزات العناصر السامة. وفي هذه الحالة، فإنه يجب متابعة رصد كل من الكربونات والبيكربونات إضافة للرقم الهيدروجيني للماء.

من ناحية أخرى، فإن مصادر التلوث المحددة (point sources)، التي تشمل المسارات الطبيعية للصرف والمياه مثل الأنهار والجداول، ونقاط الصرف الصناعي والحضري (انظر الجزء 3.13)، تستطيع التأثير بسرعة أكبر وبدون تساؤ على نظم المياه. وفي هذه الحالة، فإن الرصد عند نقطة التفريغ أو بالقرب منها يعتبر الطريقة الأكثر أهمية للحد من التأثيرات السلبية للملوثات على نظم المياه و/ أو لتقدير آثارها كيميائياً. وفي هذه الحالات، يكون من المهم عادة وضع وتطبيق خطة رصد تشمل أخذ عينات عند فترات متقاربة.

لا يوجد في البيئات المائية تمييز بين الطرق غير الإتلافية (nondestructive) والإتلافية (destructive) لأخذ العينات وتحليلها. إن هذا التمييز ليس ضرورياً لأن إزاحة عينة (حجم صغير) من الماء من بحيرة أو نهر مثلاً، لا يسبب انقطاع أو اضطراب هذه البيئات بصورة يمكن قياسها أو استمرارها. ومع ذلك يمكننا تحديد طريقتين لأخذ عينات المياه: تحليل العينة في حينه عند الموقع، وهو يتم عند مكان جمع العينة؛ وأسلوب نقل العينة (مثلاً من الأنهار)، يتبعه تحليل في المعمل.

وسيتم تناول هذان الأسلوبان كل على حدة - الأول مع أخذ عينة مياه سطحية، أما الثاني فسيكون مع أخذ عينة مياه جوفية. وتتقدم صناعة أجهزة التحليل المنقولة في الوقت الحاضر، يمكن كميّاً تقدير عدة قياسات أو مؤشرات لخصائص المياه السطحية عند الموقع وفي حينه. إن بعضاً من القياسات المرتبطة بالتلوث التي يمكن تقديرها بواسطة أجهزة حقلية من خلال غرس مجس (probe) مباشر داخل الماء موضحة في الجدول (9 - 1) .

جدول (9-1): خصائص شائعة تقاس مباشرة في الماء باستخدام جهاز حقلية منقول .

الخاصية	الخصائص المصاحبة	طريقة التحليل المجس (probe)
الرقم الهيدروجيني (pH).	عال/ منخفض [H ⁺].	قطب قياس أيون الهيدروجين.
الملوحة	CL ⁻ , Na ⁺ إضافة لأيونات ذائبة أخرى.	التوصيل الكهربائي.
الأكسجين الذائب.	عدم وجود أكسجين (O ₂).	قطب غشائي حساس للغاز.
درجة الحرارة.	درجات حرارة مرتفعة / منخفضة.	مزودج حراري (Thermocouple).

وعلى الرغم من أن المؤشرات المبينة في الجدول (9-1) ليست ملوثات بالضرورة، إلا أن حدوث عدم اتزان أو انحراف عن مدى قيمتها الطبيعية يدل عادة على أن نظام الماء قد تعرض لضغط ملوث أو أكثر. فمثلاً، يدل انخفاض تراكيز الأكسجين الذائب عادة إلى وجود نشاط بيولوجي مفرط نتيجة إضافات غير عادية للمغذيات أو المادة العضوية للمياه. وعلى ذلك، فإن حدوث تلوث في البحيرات والمجاري المائية بسبب الإثراء في تراكيز المغذيات (eutrophication) يمكن اكتشافها عن طريقة قياس التغيرات في تراكيز الأكسجين.

إضافة لذلك، توجد في الوقت الحاضر اختبارات عديدة أخرى يمكن القيام بها في الحقل، ولكن ليس مباشرة في الماء. إن هذه الاختبارات تسمح لنا بقياس تراكيز أنيونات

محددة (توجد بتركيزات تزيد على 1 مجم / لتر)، مثل NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , CL^- ، و/ أو تقدير قاعدية أو عسر الماء وذلك باستخدام مواد كيميائية مخلوطة سلفاً (كواشف خاصة تتفاعل مع هذه الأيونات وتنتج لوناً) وجداول ملونة و/أو أجهزة قياس اللون (colorimeters). كما تم أيضاً تطوير اختبارات حقلية للملوثات محدودة توجد عادة بتركيزات منخفضة جداً (ميكروجرام / لتر) لكن دقة هذه الاختبارات الحقلية يجب أن تظل دائماً محط تساؤل لأنه من الصعب جداً التخلص من تداخلات الأيونات الأخرى التي توجد في المياه. وتضم قائمة الملوثات الأخرى التي يمكن قياسها باستخدام أجهزة حقلية منقولة عناصر مثل Pb , Ni , Cu , Cr ، وكيمائيات عضوية مثل السيانيد والفينولات والزيوت والتانين واللقنين.

2.5.9 أخذ عينات من مياه جوفية

إن الكثير من الاعتبارات التي تم تناولها عند أخذ عينات من مياه سطحية ملائمة، أيضاً عند جمع عينات من مياه جوفية. لكن الاختلاف الأساسي بينهما هو طريقة جمع العينة. إن معظم عينات المياه الجوفية تجمع من آبار تم حفرها خلال الطبقة تحت السطحية. ويعتبر اختيار المكان المناسب، وأسلوب الحفر وبناء آبار المراقبة والرصد أموراً حيوية جداً لبرنامج أخذ عينات مياه جوفية ناجح. ويجب أن تكون الطريقة المتبعة لحفر البئر والمواد المستخدمة لبنائه ملائمة للبيئة تحت السطحية والملوثات التي صمم المخطط من أجلها (إن مواصفات الحفر وبناء الآبار يمكن العثور عليها في ما تم نشره وقائمة المراجع والقراءات لهذا الباب).

توجد عوامل كثيرة يتعين أخذها في الاعتبار عند تطوير طريقة لجمع عينات من آبار المراقبة وأحد هذه العوامل هو تنظيف أو تشطيف (Well purging) عن طريق سحب أو ضخ حجم محدد من المياه الجوفية قبيل جمع العينة. إن الهدف من تشطيف البئر قبل جمع العينة هو التأكد من أن عينة الماء تمثل حقيقة خصائص وظروف البيئة تحت السطحية، وليس تلك الخاصة بالبئر نفسه. إن المشكلة هي أن خصائص الماء الذي يبقى في بئر معين يمكن أن تكون مختلفة كثيراً عن خصائص الماء الذي يوجد في البيئة المسامية. فالماء الذي يبقى في البئر معرض للهواء الجوي، الذي يمكن أن يؤدي إلى تغيرات في درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني (pH) والمحتوى من الأكسجين. إن هذه التغيرات يمكن أن تحدث تغيرات في خصائص وتراكيز الملوثات. كما يمكن للملوثات أن تتفاعل مع مواد البئر. ولهذا الأسباب وغيرها يكون من المفضل التخلص من الماء الساكن في البئر وأخذ عينات من الماء الذي تم سحبه حديثاً من البيئة المسامية.

أما العامل الرئيسي الآخر الذي يتعين اعتباره عند جمع عينات من مياه جوفية، فهو الأداة التي تستخدم لجمع العينة. وهناك معايير عدة لاختيار الأداة المناسبة لجمع العينات، ومنها المحافظة على سلامة العينة، وسهولة الاستخدام، والجانب الاقتصادي. ومن الواضح، أنه من الضروري جداً أن لا تسمح أداة أخذ العينة بحدوث فقد للملوث، ولا يحدث تغير في خصائصه أثناء الجمع. فمثلاً، يجب ألا تسمح أداة تستخدم لجمع عينات تحتوى على ملوثات متطايرة بتعرضها للتطاير. لذلك فإن أداة مثل المضخة الماصة، التي تُولد فراغاً هوائياً لا تكون مناسبة لجمع عينات ملوثات متطايرة.

3.5.9 تحاليل المياه - اعتبارات ومحددات أخرى عند أخذ العينات

يكمن في جمع عينات المياه والسوائل غير المائية مشاكل محددة. إن عينات المياه التي يزمع تحليلها لتقدير عناصر توجد بتركيزات دقيقة ودقيقة جداً، وملوثات عضوية وميكروبات تنطوي على مشاكل خاصة تتعلق بإمكانية تعرضها للتلوث. ومن المشاكل النموذجية التي يمكن مواجهتها أثناء جمع العينة التلوث الخارجي للعينات وفقد الملوثات عن طريق التطاير في حالة الكيماويات العضوية المتطايرة. وفي هذا الجزء سوف يتم مراجعة طرق جمع خاصة للعينات والتعامل معها، إضافة لأساليب الحفظ التي يجب اتباعها من أجل رصد صحيح للبيئات المائية.

وكقاعدة عامة، فإن التحليل الدقيق والكامل لمستويات منخفضة (آثار) من الملوثات في الماء يمكن فقط القيام بها تحت ظروف عملية باستخدام طرق حديثة لإعداد العينات وأجهزة تحليل تدار بواسطة فنيين مهرة. وهناك سببان هامين جداً لاتباع هذه القاعدة العامة. الأول هو أن الأجهزة التحليلية اللازمة لتحقيق حدود الكشف لكل ملوث على حدة بصورة منتظمة تكون باهظة الثمن وأن هذه الأجهزة حساسة جداً وتحتاج لمعايرة وصيانة مستمرة. أما السبب الثاني فيعود إلى أن الإجراءات العملية تقلل المخاطرة إلى الحد الأدنى من حدوث تلوث أثناء إعداد العينة والتحليل فتقلل من فرص النتائج الموجبة غير الحقيقية. إضافة إلى ذلك، فإن تحاليل المياه لا يمكن القيام بها بسرعة، وبذلك فإن تخزين العينات تحت ظروف عملية محكمة ضرورية لضمان عدم تدهور حالة العينات (تغير في الصور الكيميائية) مما يؤدي نتائج سلبية غير صحيحة.

ولأجل التقليل إلى الحد الأدنى من مشكلة التلوث/ التدهور، نبذل اهتماماً خاصاً بنوع الحافظات المستخدمة لجمع عينات الماء. وتوجد أصناف عديدة لحافظات جمع عينات

المياه، وذلك حسب نوع الخصائص التي سيتم تحليلها. ويضم الجدول (9-2) هذه الأصناف الأساسية مصحوبة بأساليب الحفظ المستخدمة لضمان أن الملوثات في عينة الماء لا تدمص، أو تترسب، أو تتغير صورتها أثناء تخزينها. وتجدر الإشارة إلى أن الجدول (9-2) لا يشمل جميع أساليب الحفظ أو التخزين المستخدمة لجمع عينات المياه. لكن أغلب عينات المياه التي يتم جمعها وتخزينها تنجز باتباع واحدة أو أكثر من الطرق المبينة في هذا الجدول، مع تحويل بسيط لبعض منها. (للحصول على قائمة شاملة لجميع الخصائص - انظر إلى منشورات الوكالة الأمريكية لحماية البيئة لعام 1983).

جدول (9-2): الأنواع الرئيسية لحاويات العينات وطرق الحفظ.

الحفظ / التخزين	حاوية العينة	فئة الملوثات
أضف حمض نتريك (pH النهائي أقل من 2)	قنينة بلاستيكية (HDPE ^a)	كاتيونات فلزية (مثل $Pb^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}$)
احفظ القنينة باردة عند 4°م	قنينة بلاستيكية (HDPE ^a)	الأيونات الأساسية (مثل NO_3^-, F^-, Cl^-)
أضف حمض نتريك / كبريتك (pH النهائي أقل من 2)	زجاجة بلاستيكية (HDPE ^a)	الكاتيونات الأساسية ($Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+, Na^+$)
احفظ العينة باردة عند 4°م أضف مادة مختزلة ^(b)	حاويات زجاجية، شفافة أو معتمة	هيدروكربونات يمكن غسلها (Purgeable hydrocarbons)
أضف مادة مختزلة ^(b)	قنينة زجاجية معتمة	مبيدات آفات، مبيدات حشائش، هيدروكربونات غير متطايرة، داوكسينات، فيورينات.
أحفظ العينة باردة عند 4°م	قنينة زجاجية معتمة	منشطات سطحية (من الصابون)، مواد بلاستيكية (من البلاستيك، PCB (من المواد المحولة)).

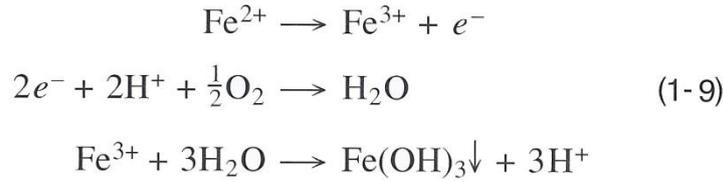
^a HDPE = بلاستيك بولي إيثيلين عالي الكثافة.

^(b) تضاف تركيزات منخفضة من ثايو سولفيت الصوديوم أو حمض الأسكوربيك لعينة الماء للتقليل إلى الحد الأدنى من الأكسدة بواسطة عوامل الأكسدة مثل الكلورين.

هناك اعتبار آخر وهو موضوع المدة الزمنية القصوى للاحتفاظ بالعينة. إن الخطوط الإرشادية الحالية التي طورت بواسطة الوكالة الأمريكية لحماية البيئة تلزم بتحليل عينات المياه خلال فترة زمنية محددة بعد الجمع. وتتوقف المدة الزمنية القصوى على الخاصية المستهدف تقديرها وهي بذلك يمكن أن تتباين كثيراً. فمثلاً، يجب تحليل المواد الكيميائية التي تتدهور أو تتغير صورتها بسرعة ولا يمكن حفظها إلا لفترة تتراوح ما بين 8 و 48 ساعة بعد الجمع: ويشمل ذلك الأكسجين، الفوسفات، السيانيد، والنترات. من ناحية أخرى، فإن معظم الفلزات والأملاح، إذا ما تم حفظها جيداً، يمكن حفظها لمدة تصل إلى 6 أشهر قبل إجراء التحاليل عليها. وعموماً فإن عينات الماء التي تحتوي على ملوثات عضوية يجب استخلاصها (باستخدام مذيبات) خلال 7 أيام، يمكن بعدها الاحتفاظ بمستخلص المذيب الذي يحتوي على الملوثات لمدة تصل 40 يوماً قبل إجراء التحليل الفعلي. (انظر منشورات الوكالة الأمريكية لحماية البيئة 1983 للحصول على قائمة كاملة لفترة الاحتفاظ بالعينة).

تعتبر تهوية عينات المياه أو طرد الغازات منها أمراً غاية في الأهمية عند تطوير خطط جمع عينات لكل نظم المياه الجوفية والسطحية. إن تهوية أو طرد الغازات من عينات المياه يجب منعها لأسباب عدة متداخلة. وفي المقام الأول، فإن كثيراً من المياه الجوفية تحتوي على تركيزات عالية من غاز CO_2 مقارنة بتلك الموجودة في الهواء الجوي. لذا فإن تعرض عينة مياه جوفية للهواء الجوي أثناء أو بعد الجمع ينتج عنه فقد في CO_2 ، وهو ما يقود إلى زيادة في pH إضافة لذلك يمكن لتغير pH أن يؤثر على خصائص عدد كبير من الملوثات. فمثلاً،

تكون ذوبانية كثير من الفلزات أعلى عند قيم أسس هيدروجيني (pH) منخفض. وبذلك، فإن الزيادة في pH الناتج عن فقد CO₂ يمكن أن يحفز ترسيب الفلزات وتكون تراكيز الفلزات في الماء التي يتم الحصول عليها عن طريق التحليل المعلمي أقل من الحقيقية. وفي نهاية المطاف، يمكن لنا أن نتوصل إلى خلاصة خاطئة بأن التلوث الفلزي لم يكن مشكلة بالنسبة لهذا النظام. كما أن تهوية عينات الماء تغير أيضاً وضع الأكسدة والاختزال للنظام ويمكن أن تؤثر التغيرات في الأكسدة والاختزال في العديد من الخصائص والعمليات. فمثلاً، يمكن أن تحفز الزيادة في حالة الأكسدة والاختزال (زيادة تركيز الأكسجين) إلى ترسيب هيدروكسيد الحديد (Fe (OH)₃) بالطريقة التالية:



ويمكن للفلزات مثل Zn, Pb, Cd الإدمصاص على هيدروكسيد الحديد، وهو ما سيخفض تراكيزها في الطور المائي في أنبوب العينة. كما يمكن أيضاً أن تؤثر إضافة الأكسجين على الملوثات العضوية، مثلاً، عن طريق تخفيف التحلل البيولوجي الهوائي. وأخيراً، فإنه يلزم عند تطوير خطط لأخذ عينات لنظم المياه السطحية والجوفية، النظر إلى مسألة ترشيح عينات المياه. ويعتبر قرار (إجراء ترشيح أو عدم إجراء ترشيح للعينة) موضوعاً يتعين التعامل معه عند كل موقع ولكل نوع من الملوثات. إن السبب الرئيسي لترشيح عينات المياه هو إزالة المواد الصلبة المعلقة، وبما يسمح فقط بجمع الملوثات الذائبة.

لكن الترشيح يرفع من إمكانية زيادة التهوية أو طرد الغازات أثناء الترشيح، كما تمت الإشارة إلىه آنفاً.

6.9 رصد تلوث الهواء

يتم رصد تلوث الهواء داخل المناطق الحضرية الكبيرة في الولايات المتحدة الأمريكية وفي معظم المدن الكبيرة حول العالم. إن القيام بالرصد في الولايات المتحدة هو نتيجة مباشرة لبند قانون الهواء النقي (Clear Air Act) لعام 1970 (انظر الجزء 23-6). ويلزم هذا القانون وكالة حماية البيئة (EPA) بوضع، وتنفيذ، ومراجعة (كل فترة خمس سنوات) المعايير الوطنية لجودة الهواء المحيط (NAAQS) الذي ينطبق على ملوثات الهواء الخارجي التي تعرف بأنها الأكثر ضرراً لصحة الإنسان. وتشمل هذه الملوثات التي توجد عادة في هواء المناطق الحضرية، كلا من أول أكسيد الكربون، وأكاسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت، والهيدروكربونات الخالية من الميثان (NMHCs)، والمواد المعلقة في الجو، والأوزون. وقد تمت مناقشة هذه الملوثات وغيرها في الجزء 2.12، ومن أجل مساعدة وكالة حماية البيئة لتوفير متطلبات قانون الهواء النقي، يتم جمع بيانات مكثفة عن طريق شبكات رصد تنتشر في كافة أنحاء البلاد.

إضافة إلى ذلك، فإن الاهتمام بما يترتب عن تلوث الهواء على البيئة العالمية قد حفز البحث الموجه نحو رصد التلوث في الهواء الجوي كله. وحالياً توجد عدة برامج بحثية جارية على المستويين الوطني والعالمي تتعلق بجمع بيانات بيئية من الأبراج وبواسطة الطائرات والمناطيد (شكل 9-5)، والصواريخ الصوتية والأقمار الاصطناعية وتوفر أجهزة التحسس

لقياس الموجات التي تحملها الأقمار الاصطناعية وسيلة لرصد الملوثات على المستوى العالمي. وتوفر هذه الوسائل بيانات مهمة عن تبعات تلوث الهواء الجوي على توازن الإشعاع الأرضي وتغير الطقس واستنزاف الأوزون بطبقة الستراتوسفير. ومن بين هذه المحاولات نظام مراقبة الأرض (EOS)، الذي يستخدم أجهزة محمولة بواسطة الأقمار الاصطناعية قامت بتوفيرها إدارة الفضاء والطيران الوطنية، والإدارة الوطنية للهواء والمحيط إضافة لدول أخرى - إن هذا النظام سوف يوفر بيانات حول مكونات الهواء (وغيرها) لفترة طويلة من القرن الواحد والعشرين.



شكل (9-5): تستخدم بالونات خاصة مثل هذا المبين في الصورة لقياس درجة الحرارة والضغط والرطوبة.

1.6.9 رصد تلوث هواء المناطق الحضرية (المدن) ومصادره

كما هو مشار إليه تحت العنوان رقم 40 الخاص بالتنظيمات الفيدرالية، فإن الأهداف العامة لشبكات رصد تلوث هواء المدن عند الموقع تتمثل في تحديد:

1. أعلى تركيزات متوقعة للملوثات في منطقة حضرية.
 2. تركيزات تلوث ممثلة (نموذجية) في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية.
 3. تأثير المصادر الرئيسية على تراكيز التلوث.
 4. تركيزات التلوث المعتادة.
- توجد كثير من الأمور التي يتعين أخذها في الاعتبار لإقامة والمحافظة على شبكة من محطات رصد جودة الهواء. فمثلاً يلزم تحديد الملوثات التي نريد رصدها، وفي أي مكان يجب رصدها وما هي الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض. من الضروري أيضاً، معرفة طبيعة البيانات المناخية التي يلزم جمعها. وأخيراً، يتعين تحديد عدد المحطات الضرورية لتحقيق الأهداف المشار إليها.
- وتتمثل الإجابة على السؤال الأخير في أن الشبكات يجب أن تضم عدداً كافياً، من المحطات في المناطق الحضرية والمناطق الريفية التي تحيط بها. ونظراً لأن مثل هذه الإجابات العامة لا تساعد كثيراً، فسيتم النظر إلى مدينة كبرى محددة للحصول على إجابات واضحة لهذا التساؤل وغيره من الأسئلة.
- يوجد في مدينة توسان بولاية أريزونا (تعداد السكان نحو 700 ألف نسمة، المساحة نحو 500 كم²) ثلاث وثلاثون محطة يتم تشغيلها وصيانتها بواسطة إدارة جودة البيئة لمقاطعة بيما. وتوجد معظم هذه المحطات داخل المدينة، لكن بعضها يوجد في المناطق الريفية المحيطة مباشرة بالمدينة.

وحسب قوة وقرب مصادرها، فإن الملوثات المختلفة يمكن رصدها عند محطات مختلفة. وبذلك، فإن محطات مدينة توسان الواقعة بالجزء الجنوبي للمدينة تقوم أساساً برصد المواد المعلقة في الهواء الجوي لأنها تستقبل الغبار المتولد عن عمليات المناجم القريبة. أما المحطات الواقعة بالقرب من تقاطعات الطرق المزدهمة وفي المواقع السكنية المجاورة فترصد الملوثات الصادرة عن المركبات الآلية، مثل CO ، NO_x ، (NO_2+NO) . كما توجد عدة محطات ترصد مستويات الأوزون، ولكنها تقوم بذلك بالدرجة الأولى خلال أشهر الصيف عندما يكون إنتاج الأوزون بالتفاعلات الكيميائية الضوئية عند أعلى مستوياته.

وتتكون معظم محطات رصد جودة الهواء هذه من معامل مجهزة جيداً بمعدات داخل مقطورات أو سيارات كبيرة تحت ظروف مناخية محكمة (تبريد أو تدفئة). وقد تحتوي المحطة على أجهزة تحليل ذاتية التشغيل، وسجلات، ومواد معايرة وأجهزة معملية أخرى لضمان مصداقية البيانات وصلاحياتها. ويتم إدخال الهواء الخارجي للمعمل لتحليل الملوثات عبر أنبوب من مادة التيفلون عند مستوى عدة أمتار فوق سطح الأرض، وبذلك يضمن أخذ عينة هواء جيدة الخلط (انظر الجزء 5.2.3).

ويتم تحويل هذا الهواء لجهاز تحليل في ضخات متتالية بمعدل تدفق يتراوح ما بين 0.5-1.0 لتر في الدقيقة. إن أجهزة التحليل هذه، التي يستخدم معظمها خصائص بصرية لتقدير تركيز الملوث، سيتم وصفها فيما يلي، مع ذكر الملوثات التي تقوم بقياسها.

1. يقاس أول أكسيد الكربون (CO) اعتيادياً بواسطة جهاز (تحليل الغاز بالأشعة تحت الحمراء) (infrared gas analyzer). وباستخدام هذا الجهاز فإن امتصاص الأشعة تحت

الحمراء (انظر الجزء 4.2.3) بواسطة CO في عينة الهواء يتم مقارنتها بالامتصاص في حالة غاز مرجعي ذو تركيز معروف من CO. وتسمح هذه الطريقة بالقياس غير الإتلافي المستمر لغاز CO في عينة الهواء.

2. يقاس ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) عموماً بواسطة جهاز قياس انبعاث الطيف فوق البنفسجي (ultraviolet (uv) emission spectrometers). إن هذا الأسلوب مؤسس على مبدأ أن SO_2 يبعث دفقاً مميزاً من الإشعاع عندما يتعرض لأشعة فوق بنفسجية شديدة من مصدر ضوئي في جهاز قياس الطيف.

3. تقاس أكاسيد النيتروجين (NO_x) بواسطة الوميض الكيميائي (chemiluminescence) ويستخدم في ذلك تفاعلات كيميائية متعاقبان يشملان الأوزون. ويتم أولاً قياس NO، يعقبه قياس NO_2 . وتنبعث أشعة تحت حمراء أثناء أكسدة NO إلى NO_2 بواسطة الأوزون الذي يتم إدخاله للجهاز. وتناسب كمية الوميض الكيميائي (chemiluminescence) الناتجة مع تركيز NO في الهواء. ولقياس NO_2 ، تستخدم مادة تفاعل مساعدة (catalyst) لاختزال جميع NO_2 في عينة الهواء إلى NO، الذي يسمح تفاعله اللاحق مع الأوزون بتقدير NO_2 بطريقة غير مباشرة .

4. يتم عموماً قياس تراكيز الأوزون (O_3) باستخدام جهاز المطياف لامتصاص الأشعة فوق البنفسجية (uv absorption spectrophotometer)، لكن يمكن استخدام أجهزة قياس الوميض الكيميائي أيضاً.

5. تقاس الهيدروكربونات المتنوعة الخالية من الميثان باستخدام أجهزة مثل كروماتوجراف الغاز (gas chromatograph). ويعتبر قياس الهيدروكربونات عموماً أكثر صعوبة مقارنة بالملوثات الأخرى، وكثيراً ما تحتاج لفنى يبذل جهداً مباشراً في عملية القياس.

6. تقاس المواد المعلقة التي يقل قطرها عن 10 ميكرومتر (PM₁₀) باستخدام أداة أخذ عينات هواء بأحجام كبيرة (high volume air sampler) توضع خارج المقطورة أو السيارة الكبيرة. ويتم بواسطة هذا النوع من الأدوات السحب بصورة مستمرة حجماً معروفاً من الهواء خلال أوراق ترشيح عدة. وتجمع المرشحات حبيبات بمدى حجمي مختلف حيث تقدر كمية المادة المعلقة في وزن المرشح على امتداد فترة زمنية محددة، مثلاً 24 ساعة. ويمكن أيضاً إجراء تحليل كيميائي كتقدير الرصاص في العينة.

تسجل البيانات من الأجهزة باستمرار على ورقة البيانات بالمحطة . وبحسب عادة متوسط التراكيز لكل ملوث ولكل ساعة من اليوم. وتتم مراجعة البيانات وترسل إلى وكالة حماية البيئة (EPA) لمزيد من المعالجة والتحليل. كذلك، فإن جميع الأجهزة يتم معاينتها ومعايرتها بصورة مستمرة باستخدام مصادر غاز مرجعية ذات تركيز معروف. (يمكن الحصول على معلومات مفصلة عن هذه الأجهزة في: Mead, 1993) الوارد في قائمة المراجع.

تقوم وكالة حماية البيئة بمعاينة البيانات التي قامت بجمعها محطات مدينة توسان وغيرها للتأكد من أن مستويات الملوثات تتوافق مع المعايير الوطنية لجودة الهواء الجوي (NAAQS) ويلخص الجدول (3-9) المعايير التي وضعتها وكالة حماية البيئة لعدد مختار من الملوثات الشائعة تحت الظروف المفتوحة. ويقال عن تراكيز الملوثات التي تفوق هذه القيم

عند أخذ متوسطاتها على امتداد فترة زمنية محددة (مثلاً، ساعة واحدة، 8 ساعات، سنة واحدة) أنها تتجاوز المعيار. فمثلاً، إذا تجاوز متوسط غاز CO المسجل عند أية ساعة زمنية خلال سنة ما عند محطة رصد معينة 35 ميكرو لتر / لتر، فإن المدينة قد تكون مخالفة لمعايير السلامة الفيدرالية الخاصة بجودة الهواء.

جدول (9-3): معايير الرصد لوكالة حماية البيئة الخاصة بملوثات الأماكن المفتوحة.

الملوث	فترة أخذ المتوسط لتحديد التركيزات المتوسطة	المعيار الوطني لجودة الهواء الجوي (الطلق)
CO	8 ساعات	9 ميكرو لتر / لتر
	ساعة واحدة	35 ميكرو لتر / لتر
NO ₂	سنوياً	0.05 ميكرو لتر / لتر
O ₃	ساعة واحدة	0.120 ميكرو لتر / لتر
SO ₂	سنوياً	0.03 ميكرو لتر / لتر
	24 ساعة	0.14 ميكرو لتر / لتر
PM ₁₀	سنوياً	50 ميكرو جرام / متر مكعب
	24 ساعة	150 ميكرو جرام / متر مكعب

يمكن أيضاً جمع بيانات مناخية في محطات رصد الهواء وإرسالها إلى وكالة حماية البيئة. وعموماً، تشمل البيانات المناخية الإشعاع الشمسي الكلي والمتفرق، وسرعة الرياح واتجاهاتها والرطوبة النسبية، ودرجة حرارة الهواء. وتستخدم وكالة حماية البيئة هذه البيانات لتفسير نتائج التلوث. كما يمكن أيضاً أن تستخدم هذه البيانات كمدخلات في نماذج رقمية تربط توزيع التركيز بمعدلات الانبعاث ملوثات هامة. وتعتبر النمذجة أداة تستطيع أن تسهل

تقييم المشاكل المحتملة، مثل التأثيرات المحتملة لمصادر تلوث جديدة أو إضافية على جودة الهواء.

يستخدم علماء البيئة في بعض المناطق الحضرية أدوات قياسية مثل أجهزة قياس سرعة الرياح ذات الثلاثة أكواب (3-cup anemometers)، وكذلك أنظمة صوتية متخصصة لرصد حالات الرياح، والاضطرابات الجوية ودرجات الحرارة داخل كامل الطبقة المتاخمة للمناطق الحضرية. وتعتبر هذه الأنظمة الصوتية مفيدة بشكل خاص لرصد الأوضاع المناخية مثل انقلابات درجة الحرارة (انظر الجزء 2.2.3، والجزء 4.12)، التي تؤثر على تفريق الملوثات.

بالإضافة إلى رصد تلوث الهواء الجوي، فإن عدة ولايات في الوقت الحاضر تلزم مواطنيها بالمراقبة المباشرة سنوياً لانبعاث الملوثات من المركبات الآلية. ويتعين على ملاك المركبات التي تخفق في تحقيق معايير الانبعاث معايير سياراتهم و/ أو القيام بتوصيلات ضرورية لأجهزة ضبط الانبعاث. وقد كانت برامج الكشف على المركبات الآلية ناجحة جداً في المساعدة على تقليل الكميات الكلية لمعظم الملوثات. من ناحية أخرى، يوجد من يجادل على وجود بديل أفضل يتمثل في وضع أجهزة حساسة على جانبي الطريق تقوم بالرصد المباشر للملوثات الصادرة من عوادم السيارات عند مرورها (أنظر Cadle and Stephens, 1994). وفي أنظمة الاستشعار عن بعد هذه، توجه حزمة من الأشعة فوق الحمراء عبر ممر سيارة واحد إلى كاشف (detector) يقوم بحجز الحزمة بعد أن تكون قد خففت نتيجة الملوثات مثل أول أكسيد الكربون أو هيدروكربونات صادرة عن عادم سيارة .

وتستخدم درجة التخفيف في تحديد كمية التلوث المنبعثة بواسطة المركبة. إن هذا الأسلوب الذي تم تطويره عام 1989، يستطيع أن يحدد المركبات التي لا تتوفر فيها معايير الانبعاث، وبذلك فهو يوفر وسيلة واعدة جداً لتقليل الانبعاث الكلي في نهاية المطاف. إن أنظمة تجارية للاستشعار عن بعد لعادم المركبات قد تم تطويرها حديثاً لتحقيق هذا الهدف.

2.6.9 رصد الانبعاثات الغازية من التربة والمكببات (landfills)

تلعب التربة دوراً هاماً في التحكم في التركيزات الموجودة لمعظم ملوثات الهواء. ويمكن للتربة أن تطلق إلى الهواء الجوي أو تسحب منه كثيراً من الغازات ذات التركيزات المنخفضة، التي تشمل CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 , NO_x . وبالمثل فإن مناطق تخزين المخلفات مثل المكبات التي تديرها البلديات تطلق أيضاً وتمتص هذه الغازات، وقد تكون مصادر محليه هامة لغاز CH_4 الجوي.

قد يكون قياس تدفق الغازات من التربة صعباً، إذ يعتمد ذلك على الموقع ونوع الغاز أو الغازات التي يتم رصدها. فمثلاً، يكون من الصعب الحصول على قياسات عالية الدقة للتدفق عندما توجد درجة عالية من عدم التأكد من تركيزات الغاز، وهي الحالة الغالبة. ونظراً لذلك ومشاكل أخرى فإن الطرق المستخدمة لقياس تدفقات الغاز يجب تكييفها لتناسب أوضاعاً عدة. وعموماً تستخدم ثلاثة أساليب مختلفة لقياس تدفقات الغاز بين التربة والهواء الجوي وهي: أساليب الغرفة والأساليب المناخية الدقيقة وأساليب قطاع التربة.

1.2.6.9 أساليب الحجرة أو الغرفة

يعتبر أسلوباً الحجرات المفتوحة والمغلقة شائعاً. ويتطلب كل من هذين الأسلوبين وضع وعاء (enclosure) فوق سطح التربة مباشرة لجمع الغازات المنبعثة من التربة ضمن

الفراغ الهوائي للوعاء المغطى. وفي أسلوب الحجرة المغلقة، يتم تحديد التدفق عن طريق قياس معدل زيادة تركيز الغاز داخل الوعاء المغطى. أما في أسلوب الحجرة المفتوحة، فإن الهواء الخارجي يضخ باستمرار عبر الوعاء المفتوح. يتم بعدها حساب التدفق بقياس الاختلاف بين تركيز الغاز للوعاء (الملوث) في الهواء الداخل للوعاء وتركيزه في الهواء الخارج. وعلى الرغم من أن كلا الأسلوبين بسيط نسبياً من حيث الاستخدام، فإن الحصول على عينات تعكس التركيزات (الحقيقية) أو الفعلية يظل صعباً. تستخدم عموماً الحجرات المغلقة لقياس تدفق الغازات غير المتفاعلة، مثل CO_2 , N_2O (الشكل 9-6)، والحجرات المفتوحة لقياس تدفق الأنواع المتفاعلة، مثل NO_x . وفي حالة الغازات غير المتفاعلة، تجمع عينات هواء من داخل الوعاء في حافظات أو أوانٍ جيدة الغلق مثل محقنة أو قناني مفرغة من الهواء. وتؤخذ عينات الهواء بعدها إلى معمل لتحليلها، وعادة باستخدام جهاز كروماتوجرافيا الغاز. إن المشكلة تتمثل في أنه لا توجد حافظات تمنع تسرب الهواء بالكامل؛ فعلى سبيل المثال يمكن أن تصل معدلات الفقد لغاز N_2O من محقنة زجاجية جيدة الغلق إلى 2% في اليوم الواحد. لذلك فمن المهم إجراء التحليل بأسرع وقت ممكن لتقليل هذا الفقد للغاز الذي لا يمكن تفاديه. أما في حالة الغازات المتفاعلة مثل NO_x فإن فقدها من الحافظات لا يعتبر مشكلة وذلك لأن التراكيز تقاس مباشرة بواسطة الوميض الكيميائي عند موقع أخذ العينات. لكنه يلاحظ أن تراكيز الغاز ضمن الهواء الخارجي يمكن أن تتباين حسب المكان والزمان.



شكل (9-6): وعاء مغلق لقياس تدفق غاز للهواء الجوي. تجمع عينات هواء من داخل الوعاء في محاقن محكمة الغلق لمنع تسرب الغاز.

إن أسلوب الحجرات ينطوي أيضاً على بعض الصعوبات التطبيقية. فالحجرات تحور بيئة التربة، وهو ما يمكن أن يؤثر على إنتاج الغاز وتخلله من التربة إلى الهواء الجوي. ففي الحجرات المغلقة مثلاً، يؤدي التراكم الكبير نسبياً لتركيز الغاز ضمن الوعاء إلى انخفاض ملحوظ في تدرج التركيز بين التربة والهواء الجوي، وهو ما يخفض من التدفق المقاس. إضافة لذلك، تكون تدفقات الغاز من التربة عادة متباينة جداً من مكان إلى مكان ومن وقت إلى آخر، كما أن الحجرات تستطيع فقط قياس التدفق على امتداد مساحات صغيرة نسبياً من التربة. (مثلاً، أقل من متر مربع واحد). لهذا يلزم عادة إجراء قياسات عند مواقع كثيرة من أجل الحصول على قيمة تدفق متوسطة.

2.2.6.9 أساليب إحصائية دقيقة

توجد عدة أساليب إحصائية دقيقة، تتضمن جميعها القياس المستمر لتركيز الغاز في الطبقة السطحية للهواء الجوي (انظر الجزء 5.2.3). وتشمل هذه الأساليب طرقاً لقياس الارتباط للدوامة (eddy – correlation) وقطاع التدفق (Flux – Profile)؛ التي تستخدم لقياس تدفق الغازات التي توجد بتركيزات دقيقة على امتداد مساحات كبيرة نسبياً. وفي أسلوب الارتباط، يلزم أخذ العينات بسرعة (عينة واحدة تقريباً كل ثانية) من تركيز الغاز كما يلزم تسجيل سرعة الرياح عند ارتفاع واحد. ويعتبر أخذ عينات بسرعة لتحديد التركيز أمراً صعب التحقيق لمعظم أنواع الغازات التي توجد بتركيزات دقيقة، على الرغم من أن أجهزة سريعة الاستجابة مثل جهاز قياس الأشعة فوق الحمراء لتحليل الغازات متوفرة تجارياً للاستخدام في حالة غاز CO₂ وغازات أخرى. من جهة أخرى، يتم أخذ قراءات لسرعة الرياح باستخدام أجهزة قياس سريعة الاستجابة. وفي أساليب قطاع التدفق (Flux-profile)، تقاس تدرجات التركيز العمودية في الطبقة السطحية (شكل 9-7). وعادة، تكون متطلبات أخذ عينات باستخدام أسلوب قطاع التدفق أقل منها في حالة أسلوب الارتباط (eddy-correlation). لكنه يكون من الصعب جداً التعامل مع تدرجات التراكيز الصغيرة للغازات، خاصة إذا كان الهواء الجوي جيد الخلط، (انظر، على سبيل المثال، الجدول 8-7، الذى يدرج بيانات عن تركيز غاز N₂O تم جمعه من الطبقة السطحية فوق نبات حشيشة برمودا). وتتميز الأساليب الإحصائية الدقيقة مقارنة بأساليب الحجرات بأنها لا تسبب

اضطراباً لبيئة التربة أثناء عملية القياس وتتيح أيضاً القيام بقياسات تدفق صحيحة على امتداد مساحات كبيرة نسبياً (مثلاً، 100 إلى 1000 متر مربع).



شكل (9-7): أجهزة إحصائية دقيقة (قطاع التدفق) تستخدم لقياس تدفق N_2O على امتداد حقل كبير مزروع بعشب نجيلي.

3.2.6.9 أساليب قطاع التربة

توفر أساليب قطاع التربة بيانات مفيدة حول مصادر وبالوعات الملوثات الغازية في التربة. وفي بعض التطبيقات، يمكن أن يستخدم محتوى الترب من الغازات لتقدير تدفقات الغاز من مواقع مثل المكبات. وتجمع عينات غاز التربة بأساليب مختلفة، بما في ذلك أخذ عينات بصورة مباشرة (active) أو غير مباشرة (passive). وفي حالة أخذ عينات بشكل مباشر، تجمع عينات غاز بغير أنابيب غير قابلة للصدأ عند عدة أعماق داخل التربة. ثم تستخدم مضخة تفريغ أو محقنة لا تسمح بتسرب الغاز وذلك لاستخلاص عينات من غاز

التربة التي تخزن عادة في أكياس عينات الغاز أو محاقن زجاجية أو حافظات مفرغة من الهواء لا جراء التحاليل الكيميائية عليها (شكل 9-8). وفي حالة أخذ عينات بطريقة غير مباشرة، يمكن أن تستخدم مادة ماصة مثل الفحم لجمع غاز التربة. وفي هذه الحالة، توضع المادة الماصة في حاوية داخل التربة بحيث تتحرك الغازات الملوثة دون بذل أي جهد خلال التربة ومنها إلى جهاز التجميع. وحسب إنتاج الغاز أو معدلات الفقد في التربة، فإن تدفق الغازات في اتجاه الهواء الجوي يمكن أن يستدل عليها من قياس تدرجات التركيز العمودية وتقدير معاملات انتشار غاز التربة.



شكل: (9-8): (a) منظر لمكب في مدينة توسان، أريزونا يبين آبار أخذ عينات الغاز. يوجد كيس خاص في المحفف عند أقدام العامل لجمع عينة الغاز. تتميز أكياس أخذ عينات الغاز بنفاذية منخفضة للسوائل والغازات، وتوجد بعض الأكياس التي توفر حماية إضافية لعينة الغاز ضد التحلل الذي تسببه الأشعة فوق البنفسجية. (b) تم استخلاص عينة غاز باستخدام محقنة وفق أسلوب متطور يسمح بتحليل العينة عند الموقع باستخدام جهاز كروموتوجرافيا غاز محمول، أو يخزن بشكل مؤقت في حافظات معدنية قبل نقلها للتحليل في معمل بعيد عن الموقع.

7.9 الدقة وإعادة توليد القراءات للقياسات البيئية

من المهم أن نعي أن نتائج جميع قياساتنا تكون جيدة فقط بقدر ما تكون أدواتنا جيدة، وأن أجهزتنا تعطينا نتائج جيدة فقط عندما تكون قد تم معايرتها بشكل صحيح. وهو ما يعني أننا لا نستطيع إجراء قياسات دون وجود نقطة مرجعية معروفة. وعموماً، فإن المرجع هو عبارة عن قياس، مثل نقطة ثابتة أو طول أو كتلة أو دورة في الزمن أو المكان، نعتقد بأنها لا تتغير. وبذلك، فإنه يتعين تحديداً معايرة أجهزتنا بانتظام مقابل مرجع، أو معيار معروف للتأكيد من صلاحيتها. وعليه فعندما نقوم بقياسات للملوثات في عينات بيئية نستخدم عادة محلولاً قياسياً معتمداً صادراً عن المعهد الوطني للقياسات والتكنولوجيا لمعايرة جهاز معين. فمثلاً، لمعايرة جهاز قياس الطيف لتقدير الألومنيوم، يتعين أولاً القيام بالتخفيف عدة مرات لمحلول قياسي معتمد لتحضير سلسلة من محاليل ذات تراكيز معروفة، كما هو مبين بالجدول (9-4). وعند إدخال هذه المحاليل على جهاز قياس الطيف، نتحصل على قراءة تتطابق مع تركيز الألومنيوم في كل محلول. ويمكن عندئذ وضع قيمة تركيز المحلول على المحور السيني وقراءة الجهاز المقابلة لها على المحور الصادي وبناء علاقة انحدار كما هو مفصل في الجزء (4.8). وتحدد المعادلة المتحصل عليها أحسن علاقة بين النقاط على المحورين السيني والصادي. وبذلك نحصل على منحى معين للقيم الحقيقية لكل تركيز.

جدول (9-4): معايرة جهاز قياس الطيف لقياس الألومنيوم في عينة مجهولة.

قراءة جهاز قياس الطيف (وحدات شدة)	تركيز المحلول في محلول قياسي (مجم/ لتر)
4.142	0.00
17.315	0.500
63.305	2.00
161.486	5.00
320.087	10.00
250.090	العينة المجهولة

التقييم الإحصائي

$$bx + a = y = \text{معادلة الانحدار الخطي}$$

حيث أن:

$$x = \text{قراءة الجهاز.}$$

$$y = \text{تركيز الألومنيوم [Al].}$$

$$a = 0.00$$

$$b = 3.206 \times 10^4$$

$$r^2 = 0.9997$$

تركيز الألومنيوم [Al] في العينة المجهولة = 7.8 مجم / لتر .

بعد خطوة المعايرة هذه، يمكننا الحصول على قراءة للعينة واستخدام معادلة منحنى المعايرة لحساب التركيز الفعلي للألومنيوم في العينة. تكرر هذه العملية مع كل عينة من أجل تحديد تركيز الألومنيوم فيها. وإذا ما أجريت قياسات متكررة لنفس العينة، يمكننا التأكد من

أداء الجهاز من حيث إعطاء نفس القراءة وكذلك دقتها. وقد تم أولاً التعرض لهذه المفاهيم في الجزء (1.2.8)، حيث تم تناول التعريفات الإحصائية لمتوسط العينة والتباين (Variance). لكن يمكننا الآن تعريف الدقة (accuracy) على أنها قياس لمدى القرب من القيمة الفعلية أو المرجعية، وأن التكرار (precision) قياس لمدى توليد نفس النتائج على عينة متجانسة تحت ظروف محكمة. ويتعين ملاحظة أن هذين القياسين غير مرتبطين ببعضهما. فعلى سبيل المثال يمكن لمكررات تحاليل تكون قيمها دقيقة جداً (مقاربة)، ولكنها غير صحيحة (بعيدة عن القيمة الفعلية). ويمكن تقييم تحاليل مكررة لمواد مرجعية على أساس الدقة بحساب النسبة المئوية للانحراف بين القيم المقاسة والقيم الحقيقية، وبحساب حدود الثقة عندما يتم تحليل عينات صغيرة (subsamples) كثيرة تزيد على 30 عينة (انظر الجزء 1.3.8). ومن الطرق المقبولة لتدوين الدقة حساب الانحراف المعياري أو معامل التباين أو الاختلاف (انظر المعادلة 6.8).

تنتج الأجهزة التي تفتقر إلى الدقة وتتسم بعدم القدرة على توليد النتائج قياسات منحازة. وتنتج البيانات المنحازة إما عن أخطاء منتظمة أو عشوائية في الطريقة المتبعة، تؤدي إلى انحراف عن القيمة الحقيقية. ويحدث خطأ منتظم عادة من خلال معايرة سيئة أو نتيجة لوجود شوائب داخل الطريقة. ويعتبر تلوث عينات الكواشف وعدم جودة المواد الكيميائية المستخدمة وتدني كفاءة الاستخلاص أمثلة للظروف التي تسبب هذه الأخطاء. إن تصحيح الأخطاء المنتظمة يعتبر سهلاً نسبياً لأنها تؤثر فقط على دقة القياس. من جهة أخرى يصعب رصد الأخطاء العشوائية، ولذا فإن تصحيحها يكون أكثر صعوبة، إذ تسببها ظروف

أو أحداث عشوائية تطراً أثناء تنفيذ الطريقة. وتؤثر هذه الأخطاء عادة على إمكانية توليد القياسات (تزايد عشوائي في قيمة التباين Variance). إن كلا النوعين من الأخطاء قد تنتج انحيازاً موجباً أو سالباً.

وعمزید من التفصیل یمكن تعريف الأخطاء في القياسات كما يلي: النوع الأول من الأخطاء (موجب غير حقيقي) التي تنتج عن المبالغة في تقدير كمية أحد مكونات في عينة ما؛ أما النوع الثاني من الأخطاء (سالب غير حقيقي) التي تنتج عن التقليل من كمية مكون معين في عينة ما.

ويعتبر كلا الخطأين شائعين في تحاليل عينات التربة والمخلفات. وترتبط هذه الأخطاء عادة لتأثيرات المكونات (تضخيم أو تخفيض إشارة قياس) وسوء إعداد العينة (الاستخلاص/الهضم)، مما ينتج عنها استخلاصات منخفضة للملوثة.

المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Arizona Water Resources Research Center (1995) *Failed Manual for Water Quality Sampling*. The University of Arizona, Tucson.
- Artiola J.F. (1995) Unpublished data. Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona.
- Boulding J.R. (1994) *Description and Sampling of Contaminated Soils: A Field Guide*. 2nd Edition. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Cadle S.H. and Stephens R.D. (1994) Remote sensing of vehicle exhaust emission. *Environmental Science and Technology*. **28**, 258A-26A.
- Carter M.R. (1993) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Csuros M. (1994) *Environmental Sampling and Analysis for Technicians* Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Denmead O.T.(1983) Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of Nitrogen in the field. In *Gaseous Losses of Nitrogen from Plant-Soil Systems* (J.R. Freney and J.R. Simpson, Editors), pp. 133-157. Marinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, Netherlands.
- Gilbert R.O (1987) *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Greensberg A.E., Trussell R.R., and Clesceri L.S. (1992) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Edition. APHA/AW-WA/WPCF. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Keith L.H. (1991) *Environmental Sampling and Analysis: A Practical Guide*. American Chemical Society, Washington, D.C.

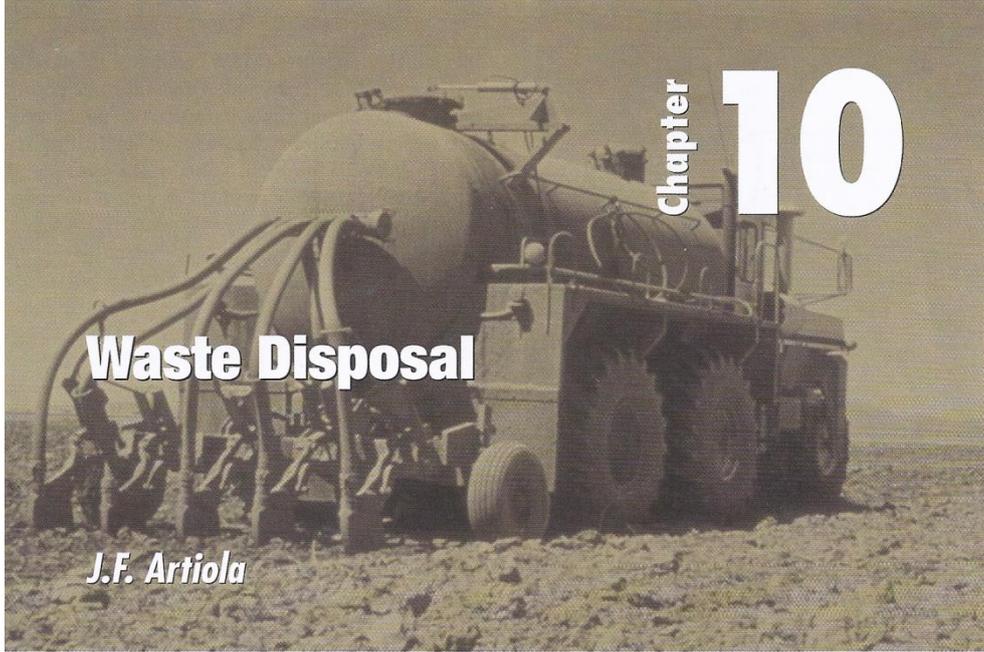
- Mead S.C. (1993) *Annual Data Summary, Air Quality in Tucson, Arizona 1993*. Pima County Department of Environmental Quality, Arizona.
- NASA (1988) *Earth System Science, A Closer View: A Report to the Earth System Sciences Committee, NASA Advisory Council*. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C.
- Nielsen D.M. (1991) *A Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Rolston D.E. (1986) Gas Flux. In *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods* (A. Klute, Editor), 2nd Edition, pp. 1103-1119. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Stedman D.H. (1989) Automobile carbon monoxide emission. *Environmental Science and Technology*. **23**, 147-149.
- Taylor J.K. (1987) *Quality Assurance of chemical Measurements*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Ullom W.L. (1995) Soil gas sampling. In *Handbook of Vadose Zone Characterization and Monitoring* (L.G. Wilson, L.G. Everett, and S.J. Cullen, Editors), pp. 555-567. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- U.S. EPA (1983) *Methods for chemical Analysis of Water and Wastes*. Revised Edition, March 1983. EPA-600/4-79-020. U.S. Environmental Protection agency, *Environmental Monitoring and support Laboratory*. Research and Development. Cincinnati, Ohio.
- U.S. EPA (1986) *Methods of Hazardous Solid Wastes*, 3rd Edition. SW-846. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid waste. Washington, D.C.
- Wilson L.G., Everett L.G., and Cullen S.J., (1995) *Handbook of Vadose Zone Characterization and Monitoring*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

أسئلة ومسائل حسابية

1. افترض أنك ترغب في أخذ عينات عشوائياً من 12 موقعاً من حقل مساحته 100×100 متر (انظر الشكل 9-1(أ)). كيف تؤسس 20 موقعاً عشوائياً؟ (ملحوظة: قسم الحقل إلى شبكة (grid) تحتوي على 15 مربعاً على الأقل. استخدم مولد أرقام عشوائياً باستخدام أي ورقة تحتوي على أرقام).
2. كانت قراءة جهاز قياس الطيف لعينة مياه تحتوي على الألومنيوم 51.003. افترض أن العينة قد تم تخفيفها 5:1 قبل تحليلها. استخدم ثوابت المعادلة الخاصة بمعايرة الألومنيوم المبينة في الجدول (9-4) لحساب التركيز النهائي للألومنيوم.
3. ما هو عدد قنينات العينات وأنواعها التي ستحتاج لأخذها إلى الحقل، إذا رغبت في جمع ست عينات مياه وإجراء تحاليل معملية عليها لتقدير الرصاص والزنك والمبيد D-4,2 (مبيد كيميائي عضوي)، والرقم الهيدروجيني (pH) والملوحة؟
4. إذا كنت تعد محلولاً قياسياً باستخدام ملح NaCl ذي نقاوة تساوي 93%. كم جراماً تحتاجها من هذه المادة الكيميائية لإعداد لتر واحد من محلول قياسي ذو تركيز 2000 مجم/لتر؟
5. إذا قمت بأخذ عينات من حقل وجمعت 50 عينة تربة لتحليلها وتقدير النترات ($\text{NO}_3\text{-N}$)، والملوحة والرقم الهيدروجيني (pH). وإذا ما تم تخفيض ميزانيتك فجأة، وأصبح ما يتوفر لديك يسمح فقط لتحليل 20 عينة. كيف تمضي في عملك؟ هل أنك ستقوم:

- (أ) إعداد عينات مركبة. (ب) تتخلص من بعض العينات وتحلل البعض الآخر؟، اشرح إجابتك. (ملحوظة: تذكر أن هناك ثلاثة مؤشرات يجب تحليلها).
6. ما هي الملوثات الرئيسية التي ترصد في هواء المدن؟ لماذا يتم عادة رصد الملوثات المختلفة عند مواقع مختلفة داخل حدود المدينة؟
7. لماذا يتم جمع بيانات مناخية إلى جانب بيانات تلوث الهواء في مدينة معينة؟ اشرح علاقاتها الهامة ببعضها.
8. استخدم العوامل التالية لتصميم برنامج أخذ عينات يقوم برصد ملوثين: مواد هيدروكربونية غير متطايرة وفلزات مثل الرصاص. ما نوع (أو أنواع) حاويات العينات التي ستقوم باختيارها وما هي طريقة حفظ العينة التي ستستخدمها قبل إجراء التحاليل؟

الباب العاشر
التخلص من المخلفات



إضافة المخلفات الصلبة المنزلية من مدينة توسان لحقول القطن.

1.10 نظرة حول التخلص من المخلفات

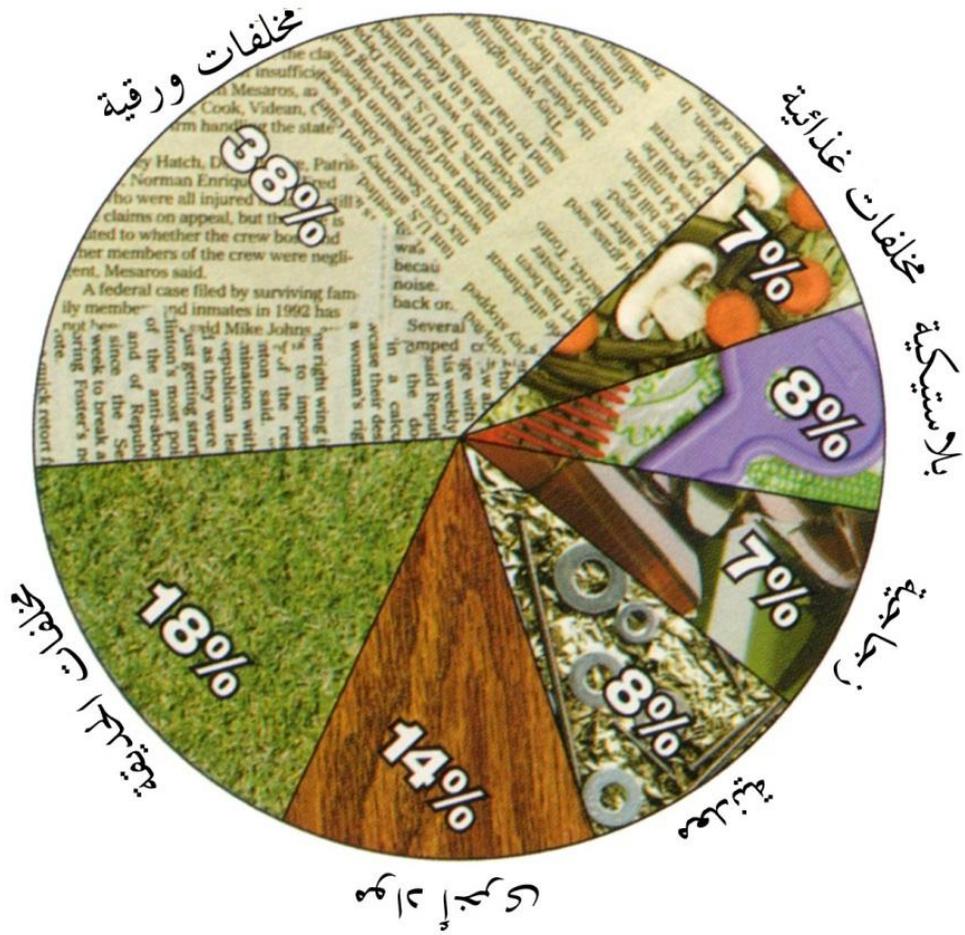
إن النشاط البشري سوف يتولد عنه دون مناص مخلفات يتعين التعامل معها. وبينما يمكن إعادة تدوير بعض المواد مثل البلاستيك والزجاج، فإن مواداً أخرى مثل مخلفات المدن يمكن استخدامها ثانية. من ناحية أخرى، فإن كثيراً من المخلفات لا يمكن الاستفادة

منها ويتعين التخلص منها باتباع تقنيات خاصة لضمان عدم حدوث تلوث. وفي هذا الباب سوف يتم التعرض للتقنيات المستخدمة في معاملة معظم مخلفات المدن والمخلفات الصناعية. وعلى الرغم من أن تقنيات جديدة لمعالجة المخلفات يتم تطويرها يومياً، إلا أن أغلب المخلفات الناتجة بواسطة المجتمعات الصناعية يتم معاملتها و/ أو التخلص منها باستخدام الطرق الموضحة أدناه.

1.1.10 أنواع وفئات المخلفات

يمكن تصنيف المخلفات حسب خصائصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. إن أحد المعايير الهامة لتصنيف هو ثبات خصائصها. وتُعرف المخلفات الصلبة بأنها المواد التي يقل محتواها من الماء عن 70% تقريباً. وبذلك فإن هذه الفئة تشمل المخلفات الصلبة للمدن مثل قمامة المنازل، والمخلفات الصناعية مثل مسحوق الرماد للمحطات والمخلفات الناتجة عن إزالة كبريت غاز المدخنة (Flue gas)، ومخلفات عمليات التعدين وكذلك مخلفات حقول النفط الناتجة عن عمليات الحفر. وتكون المخلفات السائلة عادة مياه عادمة، وتشمل المياه الحضرية والصناعية العادمة التي تحتوي على مواد عالقة صلبة تقل نسبتها عن 1%. وقد تحتوي هذه المخلفات على تركيزات عالية (أكثر من 1%) من أنواع صلبة، مثل الأملاح والفلزات. فمثلاً تحتوي المخلفات السائلة لحقول الزيت عادة على ملح (NaCl) بتركيزات تزيد كثيراً على تلك التي توجد في مياه البحر. أما الحمأة (Sludge) فهي فئة مخلفات تقع ما بين المخلفات الصلبة والسائلة. وتحتوي الحمأة عادة ما بين 3 و5% مواداً صلبة، بينما تضم النسبة الباقية أنواعاً ذائبة في الماء.

إن هذه المواد التي يكون لها قوام لزج يشبه الملاط (Slurry – like consistency) تشمل حمأة المناطق الحضرية البلدية (municipal sludge) الذي ينتج أثناء المعالجة الثانوية للمياه العادمة، والرسوبيات التي توجد في صهاريج التخزين والبحيرات الضحلة (lagoons). وتقسم المخلفات حسب القوانين الفيدرالية الأمريكية إلى ثلاث مجموعات مختلفة؛ حسب معايير الخطورة. فالمخلفات غير الخطرة (nonhazardous wastes) هي تلك التي لا تمثل أي تهديد فوري لصحة الإنسان و/ أو البيئة. وتشمل الأمثلة على ذلك المخلفات الحضرية مثل قمامة المنازل وكثير من المخلفات الصناعية عالية الحجم مثل الدفق المحمل بالملح NaCl (NaCl – laden effluent). أما المخلفات الخطرة (hazardous wastes) فهي أحد نوعين: تلك التي تتميز بخصائص خطيرة (مثل القابلية للاشتعال، والقدرة على إحداث تآكل (corrosivity) أو التفاعلية. وأخرى تحتوي على مكونات سامة قابلة للغسل. وتشمل المخلفات الخطرة الأخرى قائمة مخلفات مسجلة، ترتبط بصناعة معينة أو نشاط صناعي. أما المجموعة الثالثة الناتجة عن الصناعة فإنها تصنف عموماً على أنها مخلفات خاصة حسب مصدرها، وتنظم استناداً لتعليمات إرشادية محددة. ومن أمثلة ذلك مخلفات التعدين، ومخلفات حقول النفط والزيوت المستهلكة (Spent oils)، والمخلفات المشعة، والمخلفات الطبية والمخلفات الصناعية غير الخطرة. ويتم التعامل مع المخلفات الخطرة جميعاً حسب قانون المحافظة على الموارد واسترجاعها (انظر الجدول 23-1).



شكل (10-1): طبيعة مكونات قمامة المنازل في الولايات المتحدة الأمريكية (على أساس الحجم).

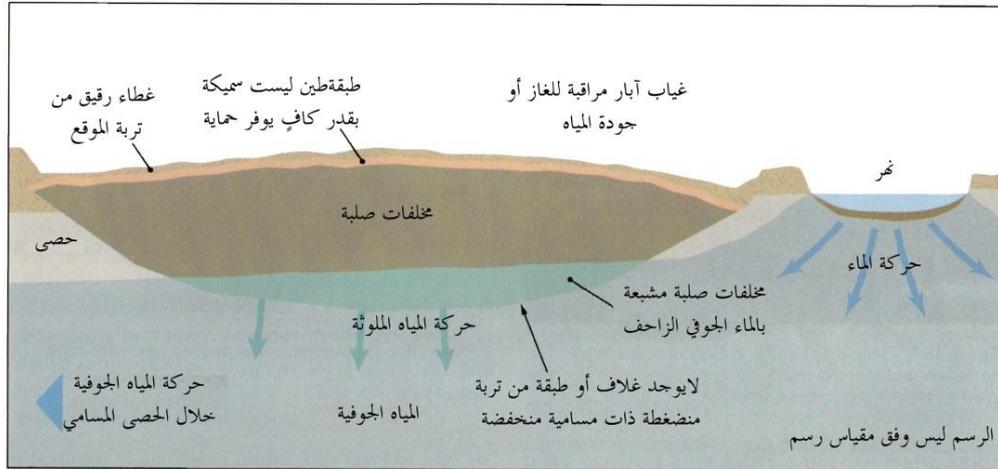
2.10 المكبات (Landfills)

عملية طمر النفايات (Landfilling) هي التخلص من المخلفات عند موقع معين؛ يكون عادة في التربة أو مكان ضحل يتميز بتهوية ونشاط حيوي (Vadose Zone). وقد تكون المخلفات التي يتم التخلص منها مخلفات حضرية صلبة (MSW) أو مخلفات صناعية خطيرة. وتسمح القوانين لمعظم الولايات و/ أو القوانين الفيدرالية بأن تحتوى مطامر النفايات على كل من المخلفات الخطرة وغير الخطرة، لكن أكثر من 95% من المواد التي يتم طمرها هي مخلفات حضرية صلبة. وتتكون المخلفات الحضرية الصلبة من بقايا أغذية حيوانية ونباتية، إضافة لمخلفات منزلية ثانوية غير سامة مثل الورق، والعلب والبلاستيك والمعادن والزجاجات الفارغة (شكل 1-10).

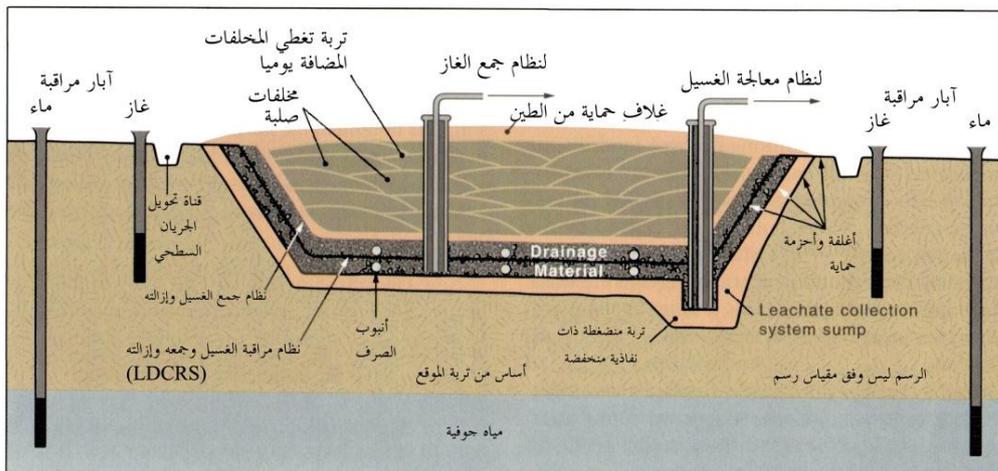
وحتى منتصف الثمانينات من القرن الماضي، كانت هذه المواد تدفن أو يتم التخلص منها عشوائياً داخل التربة أو العمق الحيوي للتربة (Vadose Zone)، ثم تغطي بطبقة من التربة (شكل 2-10 أ) ولم توجد عندئذ قوانين تنظم إدارة هذه المرادم (المكبات) أو آليات تمنع أو تقلل من تحرر الملوثات منها.

وتقدر "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA) أن الولايات المتحدة تنتج سنوياً في الوقت الحاضر أكثر من 200 مليون طن متري من المخلفات الصلبة للمدن، أو ما يعادل نحو 2 كيلوجرام من القمامة للفرد الواحد يومياً. إن الدول المتطورة، مثل الولايات المتحدة وكندا تأتیان في المقدمة عالمياً بالنسبة لإنتاج القمامة حيث يفوق ما تنتجانه إنتاج الدول النامية مجتمعة (شكل 3-10). وحالياً يتم تدوير نحو 17% من المخلفات الصلبة للمدن،

بينما يتم غالباً التخلص من البقية (83%) في مرادم أو يتم حرقها (شكل 10-4). لقد كان الناس يأملون بأن تكون أكثر المواد التي يتم طمرها قابلة للتحلل بيولوجياً. لكن الواقع، أن معظم المخلفات التي تم ردمها ما زالت موجودة في مواقع ردمها بعد مرور 30-40 سنة. وقد أظهر جرد لمرادم النفايات أن ظروف تلك المواقع كثيراً ما تكون غير مناسبة لحدوث تحلل بيولوجي. وتشمل هذه الظروف عوامل مختلفة مثل محتواها المنخفض من الرطوبة وتركيز الأكسجين، وعدم تجانس المواد بدرجة عالية حيث تكون كثير من مكوناتها غير قابلة للتحلل بيولوجياً أو بطيئة التحلل. وبذلك فإن كثيراً من المكبات القديمة تعمل كمستودع لتجميع المخلفات (waste repositories) تضيف الملوثات للمياه الجوفية والهواء الجوي. وعلى الرغم من أن كثيراً من المرادم أصبحت ممتلئة تقريباً، فإن عددها في الولايات المتحدة الأمريكية قد تناقص من 18500 في عام 1979 إلى 6500 في عام 1988. وفي الحقيقة، فإن "وكالة حماية البيئة" الأمريكية تتوقع أنه بحلول عام 2000، سيكون هناك 3250 مرديماً عاملاً فقط. ويعود هذا التناقص جزئياً إلى حقيقة أن كثيراً من المكبات التي امتلأت قد تم إغلاقها، إضافة لذلك، فإن القوانين الجديدة وتصميمات المكبات الحالية ترفع من تكاليف، دفن النفايات في الوقت الذي قلل إعادة التدوير والاستفادة من الطاقة من هذه المخلفات وهو ما أدى إلى انخفاض المعدل العام لإنتاج المخلفات الصلبة للمدن.



(أ) الطراز القديم للمكببات الصحية



(ب) مكب حديث للصرف الصحي

شكل (10-2): مكبات (أ) نظام مكب صحي من طراز قديم تم اختيار موقعه لاعتبارات السهولة أو ما يتوفر من تمويل وليس لاعتبارات بيئية. إن هذه الحفرة الحجرية التي تقع قرب نهر هي مثال شائع جداً لاختيار الموقع. (ب) قطاع عرضي لمكب صحي حديث يظهر آبار مراقبة للملوثات، ونظام معالجة الغسيل ومعوقات الغسيل. مقارنة بالنظام القديم أعلاه، فإن المكب الصحي الحديث يؤكد على الحماية البيئية بعيدة المدى. إضافة لذلك، فبينما كان سابقاً يتم هجر المكبات بعد امتلائها، فإن مراقبة المكب الحديث تستمر بعد غلقه ولمدة طويلة.

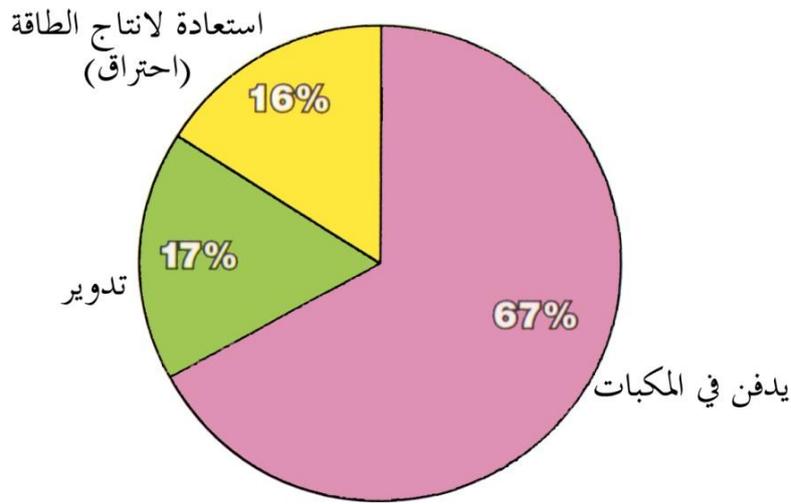


شكل (10-3): مكب (fresh kills) في نيويورك، الموقع الاصطناعي الأضخم في العالم لما ينتجه الإنسان من مخلفات. يتم هنا تحليل القمامة لأغراض بحثية.

1.2.10 المكبات الصحية الحديثة

توجد مواقع المكبات القديمة عادة عند المحاجر (quarries) القديمة، أو المناجم، أو المنخفضات الطبيعية، أو مواقع تم حفرها في أرض مهجورة. وتكون الظروف في هذه المكبات محفزة للتلوث، حيث تكون هذه المواقع عادة متصلة هيدرولوجيا بمجري مياه سطحية أو مصادر مياه جوفية. ويحدث تلوث للمياه بسبب تكون وتحرك الغسيل (leachate)، الذي ينتج عن طريق ارتشاح الماء عبر المخلفات. وتقوم المياه أثناء حركتها

خلال المخلفات بإذابة بعض مكوناتها؛ وبذلك فإن غسيل المكب يتكون من ماء يحتوي على مواد كيميائية ذائبة مثل الأملاح، والعناصر الثقيلة، وغالباً أيضاً على مركبات عضوية مصنعة. وتكون عمليات انتقال الماء الذي يحتوي على هذه الأملاح في العادة بطيئاً، ولهذا فإن آثار التلوث الناتجة عن المكبات القديمة قد تستغرق سنوات حتى تظهر. وبالإضافة لاحتوائها على ماء، فإن المكبات تطلق ملوثات للهواء. ويتولد عن العمليات الميكروبية اللاهوائية غازات الدفيئة (الصوبة): مثل أكسيد النيتروجين (N_2O)، والميثان (CH_4) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) .



شكل (10-4): المسارات الرئيسية للتخلص من القمامة الصلبة للمدن (MSW) في الولايات المتحدة الأمريكية (على أساس الحجم).

يصمم المكب الحديث بحيث يستوفي معايير محددة من ناحية قدرته على حجز جميع المواد، بما في ذلك الغسيل والغازات (شكل 10-2-أ). إن مواصفات التصميم الجديدة

تقوم على أقل قدر من التأثير السلبي على البيئة، على المدى القصير والبعيد معاً، وبتعزيز خاص على حماية المياه الجوفية. ويقوم اختيار موقع المكب على أساس جيولوجي ونوع التربة، إضافة لاعتبارات ترتبط بالمياه الجوفية من حيث العمق والاستخدام. ويوضح الشكل (10-2أ) رسماً تخطيطياً لمكب نموذجي حديث. وفي هذا التصميم، يقع المكب الجديد في منخفض تم حفره، حيث يتم ردم القمامة الحديثة يومياً بطبقة من التربة. كما تم تبطين قاع المكب بأحزمة ذات نفاذية منخفضة مصنوعة من بلاستيك ذو كثافة عالية، أو طين. إضافة لذلك، فإن احتياطات قد اتخذت لجمع وتحليل الغسيل والغازات التي تتصاعد (emanate) من المخلفات الصلبة للمدن (MSW).

ويكلف بناء المكبات الحديثة في الوقت الحاضر ما يصل إلى مليون دولار للمكبات الواحد. إضافة لذلك، فإنها تتطلب مراقبة دائمة عالية التكلفة، لإمكانية تحرر ملوثات للبيئة المحيطة. لهذا، فإن مجتمعات كثيرة تواجه قرارات صعبة تتعلق بالتخلص من المواد الصلبة للمدن وذلك على الرغم من حقيقة أن تصميم المكبات قد حسن الكفاءة من حيث منع التلوث وأن الخطط الخلاقة المبتكرة قد قللت من معدل إنتاج المخلفات الصلبة للمدن.

وتظل هناك مشاكل أخرى أيضاً. ولعل أكثر المشاكل المرتبطة بإنشاء مكبات جديدة صعوبة العثور على موقع لمكب معين. فلا يوجد أحد يريد أن يعيش بجوار مكب حتى وأن توفرت فيه الشروط الصحية. إن المخاوف الحقيقية أو المزمعة لمجتمع محلي حول التأثيرات الصحية الممكنة التي تصاحب العيش قرب مكب ما قد تكون مثاراً للجدل الذي كثيراً ما يؤدي إلى تأجيل تحديد مكان لموقع مكب معين لشهور أو سنوات. لذلك، من

جهة يمكننا أن نتوقع ارتفاعاً في تكاليف التخلص من المخلفات الصلبة للمدن نتيجة لإقامة مكبات جديدة في مواقع نائية. ومن جهة أخرى، قد تدفع هذه التكاليف المجتمعات للبحث عن صور بديلة للتخلص من المواد الصلبة للمدن، مثل استراتيجيات تدوير جديدة تكون أقل تكلفة وتقلل إلى الحد الأدنى من كمية المخلفات.

2.2.10 تخفيض كمية المخلفات الصلبة للمدن

تضم الطرق الأساسية المستخدمة لتقليل المخلفات الصلبة للمدن الحرق (أو الترميد)، والتخفيض من المصدر، والتدوير. وتستخدم هذه الأساليب على مدى واسع في المناطق كثيفة السكان حيث تجد ندرة الأرض من استخدام المكبات. وفي أوروبا واليابان، على سبيل المثال، ترسل أقل من 15% من المخلفات الصلبة في المدن إلى المكبات.

يعمل الحرق أو الترميد اليوم أكثر من حرق للقمامة: فكثير من الحرارة الناتجة عن الحرق يتم تحويلها إلى صور أخرى للطاقة. ويتضمن الترميد حرق المخلفات الصلبة غير المعالجة، لكنه، وفي بعض الحالات يتم قبل الحرق مباشرة تحويل نحو 25% من المخلفات إلى كريات (pellets) تسمى الوقود الناتج عن المخلفات (refuse-derived fuel). ويوجد أسلوب جديد يسمى الحرق الشامل (mass burning) يمكنه حرق المخلفات الصلبة للمدن عند درجات حرارة تصل إلى 1130°م وحجز الحرارة الناتجة لتوليد البخار أو الكهرباء. ويعتبر الترميد طريقة فعالة نسبياً لتقليل المخلفات الصلبة للمدن بمقدار يصل إلى 95% على أساس الحجم و75% على أساس الوزن. وتجدر الإشارة إلى أن هذا الأسلوب لا يخلو من السلبيات. فإحدى المشاكل الرئيسية المصاحبة للترميد تتعلق بالتخلص من الرماد، الذي

يمكن أن يحتوي على فلزات سامة ومواد عضوية مقاومة للحرارة (refractory organics). لذلك فإن الرماد ذاته الناتج عن الترميد كثيراً ما يلزم التعامل معه كمخلفات خطيرة. إضافة لهذا، فإنه حتى أجهزة الترميد الحديثة يمكن أن تسهم في تلويث الهواء. وأخيراً، فإن أجهزة الترميد باهظة الثمن كما أن تكاليف الترميد تزداد عاماً بعد آخر.

ومقارنة بالترميد، فإن تقليل مصادر المخلفات يهدف إلى الوقاية، وبذلك فهي طريقة أساسية لتقليل المخلفات الصلبة للمدن لأنها تؤدي إلى إلغاء الحاجة للمكببات. ويمكن تحقيق تخفيض في مصادر النفايات بطرائق متنوعة، بما في ذلك استخدام مواد أقل في التغليف وممارسة تخمير البقايا النباتية والحيوانية (Composting). فمثلاً، يمكن تقليل حجم الحاويات البلاستيكية أو إلغاء استخدامها تماماً، وإمكانية فصل مخلفات الحديقة المنزلية عن المصادر الأخرى للمخلفات الصلبة للمدن واستخدامها كسماد عضوي. وعادة ما تقوم البلديات ببيع المواد المخمرة لاستخدامها كمحسنات للتربة أو كأسمدة.

التدوير

يشمل إعادة التدوير جمع أنواع معينة من القمامة، وتقسيمها إلى مكوناتها، واستخدام تلك المكونات لصنع منتجات جديدة. وتضم المواد التي يمكن تدويرها الألومنيوم، والبلاستيك، والزجاج، والورق، والورق المقوى (cardboard)، والمعادن. وفي كثير من البلديات يكون إعادة التدوير إجبارياً، حيث يتعين على السكان فرز المواد القابلة للتدوير عن بقية قماماتهم لتفادي زيادة الرسوم التي يدفعونها مقابل جمعها. لكنه، وبالرغم من نمو برامج إعادة التدوير، فإن نسبة صغيرة من إجمالي المخلفات الصلبة للمدن التي يتم توليدها

في الولايات المتحدة يعاد تدويرها (انظر الجدول 10-1). وتبلغ نسبة ما يتم إعادة تدويره من مخلفات المنازل في الولايات المتحدة نحو 17% تقريباً.

جدول (10-1) : نسبة المخلفات (على أساس الحجم) المعاد تدويرها حسب الصنف.

الصنف	المعاد تدويره (%)
البلاستيك	1
المطاط والجلود	2
المعادن	4
الزجاج	8
الورق	23
الألومنيوم	25

3.10 معالجة المياه العادمة

تم معالجة معظم الكم الهائل للمخلفات السائلة في الولايات المتحدة في محطات المياه العادمة قبيل التخلص منها في نهاية المطاف. وتمتلك معظم البلديات في الولايات المتحدة محطة أو أكثر لمعالجة المياه العادمة، كما أن التجمعات الصناعية الكبيرة قد تمتلك أيضاً محطاتها الخاصة إذا كانت غير قادرة على ضخ مياهها العادمة عبر نظم الصرف الصحي للبلدية. وبالإضافة إلى أكثر من 10% من إجمالي المياه الخطرة، تزيد نسبة المياه العادمة للبلديات، والمياه العادمة غير الخطرة الناتجة عن الأنشطة الصناعية في الولايات المتحدة التي تتم معالجتها قبل التخلص منها نهائياً على 90%. وتشمل العمليات الأساسية للمعالجة:

1. المعالجة الأولية، أو فصل المواد الصلبة عن السائلة.

2. المعالجة الثانوية، أو الأكسدة الحيوية للمكونات العضوية الأكثر ذوبانية وتحويلها إلى غاز CO_2 وكتلة حيوية ميكروبية، مكونة الحمأة (الوحل) (sludges).

3. المعالجة الثالثة (Tertiary)، أو التثبيت الكيميائي للمياه العادمة لإعادة الاستخدام الآمن و/ أو التخلص منها عبر الممرات المائية. وتستهدف العملية الأخيرة عادة الأكسدة الكيميائية للسموم الحيوية (البكتيريا والفيروسات) التي تستطيع التسبب في مشاكل صحية للإنسان (انظر الجزء 19-3). ويستخدم في هذه العملية عوامل مؤكسدة قوية مثل غاز الكلور، وأملاح حمض البيركلور، وغاز الأوزون، والأشعة فوق البنفسجية (uv) (لمزيد من التفصيل حول هذه الأنواع الثلاثة من المعالجة، انظر الجزء 3.20). إضافة إلى ذلك، تعامل كيميائياً معظم السوائل الصناعية التي تحتوي على مخلفات غير عضوية خطيرة لأكسدة أو ترسيب أو تحوير التركيبة السامة لمكوناتها قبيل ضخها إلى البيئة. فمثلاً، يمكن معالجة المياه العادمة التي تحتوي على تراكيز عالية من الفلزات بمحاليل قاعدية لترسيبها.

إن عدم القيام بهذه العملية، التي يمكن تسميتها بالمعالجة الكيميائية الثانوية، هي المسؤولة عن احتواء معظم الوحل غير العضوي على تراكيز عالية من الفلزات والأملاح (انظر الجزء 2.3.18). وفي النهاية، فإن محطات معالجة المياه العادمة تنتج مياهًا صالحة، عادة ما يتم ضخها إلى البيئة المحيطة أو استخدامها في ري المحاصيل الزراعية، والحدائق، وملاعب الجولف. وتنتج محطات معالجة المياه العادمة أيضاً أحجاماً كبيرة من المواد الصلبة (sludges)، التي يمثل التخلص منها بأمان في نهاية المطاف تحدياً آخر. وفي بعض المدن، مثل هونولولو بولاية هاواي يتم التخلص من الدفق إلى المحيط بعد المعالجة الأولية فقط (انظر الجزء 1.2.13).

جدول (10-2): المعدلات التراكمية القصوى للإضافات من الفلزات في ولاية أريزونا.

الفلز	التركيز في التربة (كجم/ هكتار)
الزرنيخ	41
الكاديوم	39
الكروميوم	3000
النحاس	280
الرصاص	300
الزئبق	17
المولوبيدينيوم	41
النيكل	110
السيلينيوم	100
الزنك الخارصين	560



شكل (10-5): يوضح وحل الصرف الصحي لمدينة توسان إلى خزان هذه الشاحنة لنقله إلى أرض زراعية حيث يتم حقنه إلى داخل التربة.

4.10 فلاحه الأرض (Land farming)

تعني فلاحه الأرض هنا ممارسة تفريغ (disposing) الحمأة (الوحل) الناتج عن محطات معالجة المياه العادمة فوق الأرض الزراعية. إن هذا الوحل قد يحتوى إما على مخلفات صلبة أو سائلة ناتجة عن معالجة المخلفات البلدية. و إضافة لخصائص التربة، تعتمد كمية المادة التي يمكن إضافتها لمساحة معينة من الأرض على التركيب الكيميائي والفيزيائي للوحل. في عام 1993، تم استصدار لوائح جديدة بواسطة وكالة حماية البيئة (EPA) تلزم فيها رصد بعض الملوثات التي يمكن وجودها في هذه المواد. ومن المكونات التي تكتسب أهمية خاصة الفلزات، مثل الرصاص والزرنيق، التي لا يمكن تدميرها وبذلك فإنها تتراكم في التربة مع الزمن بعد تكرار إضافات الوحل (انظر أيضاً الجزء 5.7). وقد تم تقنين الإضافات الكلية من هذه الفلزات، التي لا يمكن تجاوزها خلال الفترة الزمنية المتوقعة لفلاحه الأرض في منطقة معينة. ويوضح الجدول (10-2) الحدود القصوى المسموح بها من تركيزات الفلزات في التربة بولاية أريزونا 10.

1.4.10 طرق التخلص من الوحل

تتشكل المخلفات البلدية الصلبة عندما ينزع الماء منها لتصبح جافة، أو (في بعض الأحيان) يتم تحويلها إلى كمبوست. ويتم عادة نقل هذه المواد الصلبة من محطات معالجة المياه العادمة باستخدام شاحنات إلى موقع التخلص حيث تخلط عندها مع التربة عن طريق الحرث.

ويمكن أيضاً نقل الوحل السائل، الذي يحتوي ما بين 1 و8% مواد صلبة على أساس الوزن، باستخدام شاحنات مزودة بخزانات إلى موقع التخلص (شكل 10-5). ويتم ضخ الوحل السائل إلى داخل شاحنات ري خاصة terrigators (شكل 10-6) التي تقوم بدورها بحقن الوحل إلى داخل قطاع التربة إلى عمق 30سم. وتعتبر طريقة الإضافة هذه مميزة لأنها تحدد من مشاكل الروائح، إضافة لذلك فإنه يمكن إضافة الوحل بمعدلات معروفة. أما العيب الأساسي لهذا الأسلوب فهو التكلفة المصاحبة لها.



شكل (10-6): تعتبر إضافة الوحل البلدي للأرض من أكثر الطرق نجاحاً في التعامل مع المخلفات كمورد. هنا تظهر شاحنة الري الخاصة terrigator. (أ) يحقن الوحل تحت سطح التربة لدعم نمو محصول القطن المروي بطريقة الأحدود. (ب) حالياً، يتم الاستفادة من كل الوحل لمدينة توسان، أريزونا من خلال إضافته للأراضي.

2.4.10 فوائد إضافة المخلفات للأراضي الزراعية

العناصر المغذية: تحتوي حمأة الصرف الصحي (municipal sludges) على عناصر مغذية للنبات، توجد إما في صور متيسرة غير عضوية أو كمكونات عضوية غير متيسرة. وعادة ما تتمعدن الصور العضوية، وخاصة تلك الخاصة بالنيتروجين، بسرعة إلى صور غير عضوية

(انظر الجزء 2.2.14). وبذلك فإن إضافة الحمأة (الوحد) يمكن أن يقلل من الحاجة لإضافات الأسمدة الكيميائية للمحاصيل. ويوضح الجدول (10-3) التحليل الكيميائي لعينة من حمأة الصرف الصحي. ومن ناحية العناصر المغذية للنبات، فإن هذا الوحد يعتبر عالياً في محتواه من النيتروجين والفوسفور والكالسيوم وعناصر كبرى أخرى. كما أنه يحتوي أيضاً على كميات متفاوتة من العناصر الدقيقة، إضافة لبعض الفلزات الثقيلة.

الماء: يحتوي الوحد السائل على ما يصل إلى 99% ماء. وفي الأراضي الجافة بشكل خاص يكون هذا الوحد أعلى قيمة حيث أنه يمكن أن يساعد على توفير احتياجات الري التي تسبق الاستزراع.

الوحد كمادة محسنة للتربة: نظراً لأن الكثير من الوحد يحتوي على كميات كبيرة من المادة العضوية (تصل إلى 40% على أساس الوزن الجاف)، فإنه يمكن أن يعمل كمحسن مفيد للتربة. كما تساعد إضافات المادة العضوية على تكوين وحدات بناء التربة aggregates وتزيد النشاط الميكروبي بالتربة. وبدوره فإن ذلك سيحسن من نفاذية الهواء والماء خلال التربة (بناء تربة أفضل) ويزيد من تيسر العناصر المغذية للنبات.

التقليل من التلوث: ينتج في أغلب الأحوال، عن إضافة المخلفات البلدية على مساحة واسعة من الأرض وبمعدلات مناسبة تلوث أقل بكثير منه في حالة تركيزها بالتخلص منها عند موقع واحد. وعند التحكم في معدلات الإضافة، سيتاح للتربة تحويل كثير من مكونات المخلفات إلى مغذيات متيسرة للنبات. وبذلك تتمكن النباتات من امتصاص هذه المغذيات وتستكمل دورتها الطبيعية. وتشمل هذه المغذيات كلا من الكربون، والنيتروجين، والكبريت،

والفوسفور. ومن المكونات الهامة للوحل التي يتم تدويرها عناصر صغرى مثل الزنك، والحديد، والنحاس. لكنه يلاحظ أنها يمكن أن تصبح سامة للنباتات عندما توجد بتركيزات عالية. إضافة لذلك، تساعد بيئة التربة على تثبيت ملوثات أخرى توجد في الوحل مثل الرصاص، والكاديوم، والزنك، والزرنيخ وغيرها، وذلك عن طريق حجزها ضمن الأطوار الصلبة. وعندما يحدث ذلك فإن الملوثات لا تغسل إلى المياه الجوفية كما أن امتصاصها بواسطة النباتات يصبح أقل احتمالاً. لكنه، ومن المهم ملاحظة أن العنصر الملوث لا يزال موجوداً بالتربة ويظل مصدراً محتملاً للتلوث.

3.4.10 الأخطار المحتملة لإضافة المخلفات

1.3.4.10 النترات

كثيراً ما يحتوى وحل الصرف الصحي على كميات كبيرة من النيتروجين (N) في صورة نترات (NO_3^-) وأمونيوم (NH_4^+) إضافة لصور عضوية للنيتروجين يمكن تحويلها ميكروبياً بسهولة إلى (NO_3^-) داخل التربة (انظر الجزء 2.2.14). وتعتبر أيونات النترات عالية الذوبانية في الماء وهي تتعرض أيضاً للتناثر مع غرويات التربة سالبة الشحنة. ونتيجة لذلك، فإن هذه الصورة الكيميائية للنيتروجين يمكن أن تغسل بسهولة من قطاع التربة إلى ما تحت منطقة نمو الجذور (انظر الجزء 3.6).

ويمكن أن تقود الإضافات الزائدة جداً من المخلفات التي تحتوى على تركيزات عالية من النيتروجين إلى فقد كبير لأيون (NO_3) من منطقة نمو الجذور ذلك أن النباتات لا تستطيع إزاحة كل النترات NO_3^- قبل أن تحملها المياه المرتشحة إلى ما تحت منطقة نمو

الجدور. وعلى ذلك، فإن معدلات الإضافة من المخلفات يجب أن تقتصر على تلك التي تكون كافية لتوفير كميات كافية من احتياجات النبات من النيتروجين وفي الوقت المناسب من ناحية، وتقليل الفاقد منه بالغسيل إلى الحد الأدنى من ناحية أخرى. وحتى هذا التاريخ، لا توجد تقنية رصد يمكن الاعتماد عليها لتقدير الفاقد كميًا بالغسيل من أيون النترات NO_3^- إلى ما تحت منطقة نمو جذور النبات. لكنه، وفي وجود عوامل مجتمعة تشمل التربة والنبات ورصد المخلفات، إضافة لنظام ري عالي الكفاءة يمكن الحد من فقد NO_3^- إلى ما تحت منطقة الجذور. وفي الوقت الحاضر، فإن الماء الذي يحقن لخزان جوفي لا يمكن أن يتجاوز معايير "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA) لمياه الشرب وهي 10 مجم/ لتر من النيتروجين في صورة نترات ($NO_3 - N$).

2.3.4.10 الفلزات

تحتوي الحمأة على كميات صغيرة من العناصر الفلزية الضرورية اللازمة لنمو النبات، لكنها أيضاً تحتوي على كميات متغيرة من العناصر الثقيلة التي يمكن أن تصبح سامة. إضافة لذلك، فإن العناصر النادرة الضرورية يمكن أن تتواجد بتركيزات عالية تحفز على حدوث سمية للنباتات أو الكائنات الدقيقة. وتشمل العناصر التي لها أهمية خاصة كل من الزنك (Zn) والنحاس (Cu) والكاديوم (Cd) والنيكل (Ni) والرصاص (Pb) والزرنيخ (Hg) والموليبدنوم (Mo)، والزرنيخ (As) (انظر أيضاً الجزء 1.8.21). وتعتمد كمية الملوثات المعدنية في حمأة معينة على كمية ما يضاف من مخلفات صناعية إلى الصرف الصحي للبلدية. لذلك فإن ضخ كميات كبيرة من الفلزات عبر شبكات المياه العادمة للبلدية يعتبر مخالفاً للقانون، وأنه يتعين معالجة هذا النوع من المخلفات عند الموقع قبل التخلص منها (انظر الجزء 3.18).

أيضاً فإن بيئة التربة تؤثر على سمية العناصر المصاحبة للوحل المترسب عن مياه الصرف الصحي.

جدول (10-3) التحليل الكيميائي لوحل مهضوم لا هوائياً من مدينة توسان، أريزونا.

المصدر: (I.L Pepper, 1991)

العنصر	التركيز (على أساس الوزن الجاف)
الفلزات	مجم / كجم ¹⁻
النحاس	520
النيكل	13
الرصاص	59
الكروميوم	29
الكادميوم	3.5
الزنك	1900
الفضة	4.7
الزرنخ	ND ^a
الزئبق	0.51
الموليبدنيوم	12
السيلينيوم	ND ^a
عناصر أخرى	جم / 100 جم ¹⁻
الفوسفور	3.3
الكالسيوم	3.6
المغنيسيوم	0.45
الصوديوم	0.40
الكربون العضوي	16.6
النيتروجين :	
النيتروجين الكلي (N) كيلداهل	3.4
النيتروجين (N) غير العضوي	0.16
إجمالي المواد الصلبة	2.8

ND^a = تحت حدود الكشف.

تحتوي التربة ذات الرقم الهيدروجيني (pH) المرتفع التي أضيف لها وحل بلدي لتحسين خصائصها على تركيزات أقل من العناصر المعدنية في صورة متيسرة للنباتات مقارنة بتربة ذات رقم هيدروجيني أضيفت لها نفس المعاملة، ويعود ذلك إلى أن ذوبان معظم الفلزات في الماء يزداد كلما انخفض الرقم الهيدروجيني. ولهذا فإن واحدة من استراتيجيات الإدارة للتقليل من حركتها وسميتها للنبات، هي إضافة الجير الزراعي للتربة لإيصال رقمها الهيدروجيني للتعاادل أو القاعدية. كذلك، فإن محتوى التربة من المادة العضوية يؤثر على تيسر أو وفرة العناصر. وعموماً، فإن التربة ذات المحتوى المرتفع من المادة العضوية (أكثر من 5%) تتميز بانخفاض ما يمتص من الفلزات بواسطة النباتات، إذ أن هذه العناصر تدمص وتتحول إلى مركبات بواسطة التركيب شبه البوليمري للكربون العضوي للمادة العضوية. من جهة أخرى عندما تشكل الجزيئات العضوية ذات الوزن الجزيئي المنخفض (توجد عادة في المراحل المبكرة من تحلل النسيج النباتي) معقدات مع الفلزات، فإن حركتها وكذلك تيسرها للنبات في بيئة التربة يمكن أن يرتفع بشكل حاد. وبمجرد إدخال الفلزات للتربة، فإن تيسرها الحيوي وحركتها يمكن أن تتحور عن طريق تغيير حالة تكافؤ الفلز أو عن طريق تغيير عوامل التربة التي تؤثر على ذوبانيتها. وبينما يمكن أن تكون التأثيرات قصيرة المدى لإضافة الفلزات للتربة مفيدة، فإن التنبؤ بمصير هذه الفلزات على المدى البعيد يكون أكثر صعوبة. ويعود ذلك إلى أن الملوثات الفلزية لا تتحلل بيولوجياً وبذلك تستمر في التراكم في بيئة التربة (انظر أيضاً الجزء 5.7).

3.3.4.10 كيمائيات عضوية سامة

يمكن أيضاً أن يحتوي وحل الصرف الصحي على مركبات عضوية سامة تنتج عن مخلفات المنازل أو المياه العادمة للمصانع. إن جميع أنواع الحمأة تحتوي على آثار لأكثر الكيمائيات العضوية شيوعاً، مثل المبيدات والهيدروكربونات العطرية متعددة النويات (PAHs)، والملدنات، والمواد العضوية المتطايرة، والمذيبات. واعتماداً على مستوى الإضافات، فإن كثيراً من هذه المركبات العضوية تتحلل خلال المعالجة للمياه العادمة. لكن المركبات المقاومة للحرارة (refractory)، غير القابلة للذوبان، مثل المبيدات الكلورة، يمكن أن تمر عبر محطات معالجة المياه العادمة دون أن تتحلل لأنها مدمصة على سطوح المواد الحيوية الصلبة (انظر الجزء 2.7). إن القوانين الجديدة المرتبطة بالتخلص من المخلفات على اليابسة تتطلب متابعة دورية ليس فقط للفلزات ولكن أيضاً للملوثات العضوية (الجدول 10-4). وحتى هذا التاريخ، لا يوجد دليل على أن التراكيز المتبقية لأي من هذه الكيمائيات بالمخلفات الصلبة للبلديات (MSW) تمثل تلوثاً مؤكداً أو مشكلة صحية. وكما هو متوقع، فإن التحلل، والتيسر الحيوي، وحركة هذه الكيمائيات تتوقف كثيراً على نوع التربة، وخاصة محتواها من المادة العضوية. كما أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة عموماً، مثل التوزيع الحجمي لحبيبات التربة، والرقم الهيدروجيني، ومستويات الأكسجين، ورطوبة التربة، تؤثر أيضاً على تحللها. ولذلك، وكما هو في حالة الفلزات، فإن التنبؤ بالتأثيرات بعيدة المدى لهذه الكيمائيات يكون صعباً خاصة أن كثير منها يمكنها أن تتراكم في بيئة التربة.

4.3.4.10 الكائنات الممرضة

تحتوي المخلفات البلدية جميعها على بكتيريا وفيروسات ممرضة، إضافة إلى طفيليات معوية إن هذا الجانب سوف يتم تغطيته بالتفصيل في الباب (التاسع عشر) من هذا الكتاب.

4.4.10 الاستخدام الزراعي لوحل محطات مصافي النفط (Refinery sludges)

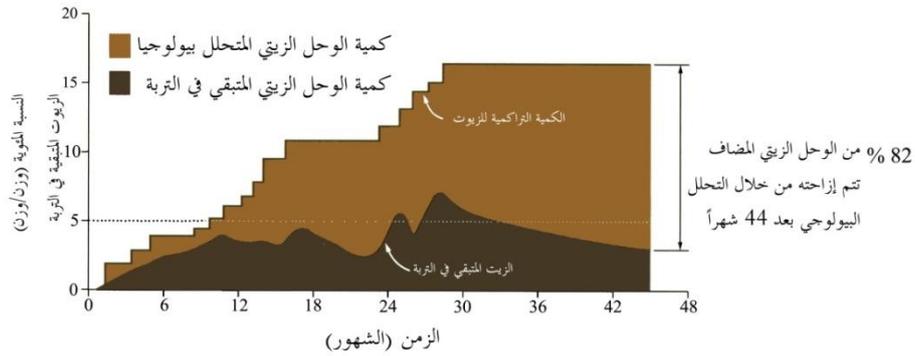
إن أساليب زراعة الأراضي يمكن أيضاً استخدامها في التعامل مع المخلفات، خاصة الوحل الزيتي، الذي تشكل الزيوت، والرسوبيات، والماء مكوناتها الرئيسية. ويتعين تحديد معدلات الإضافة المثالية من هذا الوحل، وهو ما يتوقف على خصائص المادة العضوية المتاحة. ويعني ذلك أن معدلات الإضافة يجب ألا تكون منخفضة جداً حتى لا يلزم توفير مساحات واسعة من الأرض، ولا عالية جداً حتى لا تجهد ميكروبات التربة فتتخفف معدلات التحلل. إن المعدلات السنوية المثالية لا تتجاوز 5% من الزيوت الكلية في طبقة حرث التربة (الشكل 10-7). إضافة لذلك، تضاف عادة أسمدة النيتروجين والفوسفور لتحسين نسب كل من (C:N) و(C:P)، كما يضاف الجير الزراعي لجعل قيم الرقم الهيدروجيني للتربة مثالية. لهذا، فإنه إذا ما تمت إدارة المخلفات بصورة صحيحة فسيكون إضافتها للأراضي الزراعية إجراء مقبولاً جداً من الناحية البيئية، وذلك بغض النظر عما إذا استخدمت المخلفات البلدية أو مخلفات مصانع التكرير.

جدول (4-10): المجموعات الرئيسية للكيمائيات العضوية التي يمكن رصدها في المخلفات البلدية (MSW)

المصادر مع الشرح	الملوثات حسب المجموعات ⁽¹⁾
مبيدات الآفات ومبيدات الحشائش، يوجد بعضها في الكيمائيات المنزلية كثير من المبيدات المكلورة قد تم منع استخدامها .	Aldrin/dieldrin, heptachlor, DDT/DDE/DDD, lindane, toxaphene, malathion, hexachlorobenzene, 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), hexachlorobutadiene
زيت السيارات ووقود الديزل، توجد طبيعياً كناتج ثانوي من حرق الوقود (الزيت، الخشب).	Benzo[a]pyrene, benzo [a] anthracene, phenanthrene
الصناعات الكيميائية والكهربية (تم منع تداول PCBs).	Poly chlorinated biphenyls (PCBs)
نواتج ثانوية عن تصنيع المبيدات التي يمثل الفينول أساس تركيبها، مثل المبيد 2, 4 -D.	Dioxins, furans
المنتجات المستخدمة منزلياً والمطهرات.	Phenol
المواد الحافظة للأخشاب. مركب Pentachlorophenol مقاوم جداً للتحلل في البيئة.	Pentachlorophenol
بعض المنتجات المستخدمة منزلياً، مثل الطلاء. هذه المذيبات المكلورة عالية التطاير.	Benzene, methylene chloride, methylethyl ketone tetra-chloroethylene, trichloroethylene, hexachlorobutadiene
البلاستيك (اللداين) والملدنات.	Vinyl chloride, bis(2-ethylhexyl)phthalate, tricresyl phosphate, dimethylnitrosamine, benzidine, 3-3'-dichlorobenzidine

⁽¹⁾ لم يتم وضع حدود استخدام لهذه الكيمائيات.

في أوائل الثمانينات من القرن الماضي، خضعت إضافة المخلفات الدهنية للأراضي إلى تمحيص شديد من قبل "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA). وبموجب قيود، بدأت في أوائل عام 1992، يمنع معاملة الأراضي بالمخلفات الدهنية الخطرة. إن هذه القيود أجبرت الصناعة البترولية على البحث عن طرق بديلة للتخلص من هذه المخلفات، بما في ذلك الردم أو الدفن (landfilling) والترميد (incineration). ومن الناحية الإيجابية سارعت مصانع تكرير النفط أيضاً لتطوير خطط للتقليل إلى الحد الأدنى من هذه المخلفات والبحث بإصرار على طرق لمعالجة المخلفات تجعل ممكناً تحويل المخلفات الزيتية إلى صور أقل خطراً، وبما يسمح بإضافتها للأراضي الزراعية.



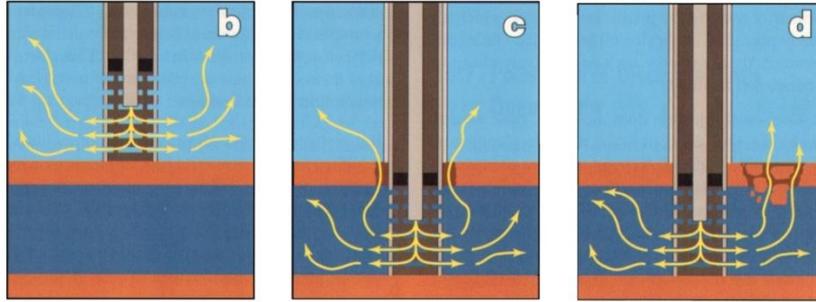
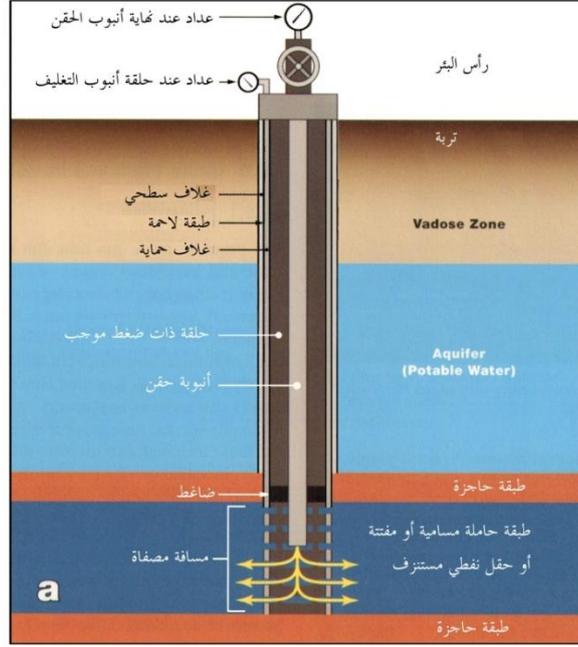
شكل (10-7): إضافة المخلفات الزيتية للأراضي الزراعية. (يوضح الشكل معدلات الإضافة النموذجية ومعدلات التحلل البيولوجي).

5.10 حقن الآبار العميقة بالمخلفات السائلة

يعتبر حقن الآبار العميقة بالمخلفات السائلة خلال الطبقة تحت السطحية طريقة أخرى للتخلص من المخلفات. وتقلص هذه الطريقة كثيراً الخطر المحتمل الذي تمثله المخلفات

وذلك بالتخلص منها في مكان يكون من حيث المبدأ، التلامس المباشر فيه بين المخلفات والبشر عند حده الأدنى. ويستخدم حقن الآبار العميقة بشكل واسع في الجزء الجنوبي الأوسط للولايات المتحدة الأمريكية، وفي الولايات الصناعية الكبرى مثل كاليفورنيا، وميشيجان، ونيويورك. وتشمل الأمثلة على المخلفات السائلة التي تحقن للآبار العميقة مخلفات حقول النفط (المياه شديدة الملوحة)، والمياه العادمة ذات المحتوى المرتفع من الكيماويات العضوية السامة مثل الهيدروكربونات المكثورة، والمبيدات والمخلفات المشعة.

يكون الحقن العميق للآبار أكثر ملاءمة للتعامل مع أحجام كبيرة من المخلفات السائلة أو الملائط (Slurry) ذي القوام الشبيه بالماء (لزوجة منخفضة) . ويتم عادة ضخ السوائل المائية خلال طبقة جيولوجية تتكون من مادة عالية النفاذية للماء، مثل الحجر الرملي أو الحجر الجيري. وبالكيفية نفسها يمكن حقن المخلفات الزيتية للآبار العميقة خلال طبقات تحت سطحية منفذة . ويتراوح عمق الحقن الذي يكون في العادة محصوراً هيدرولوجياً ما بين 200 و 4200 متراً، ويكون عمق أغلبها ما بين 700 و 2500 متراً (الشكل 10 - 18). وقد يكون حفر وبناء آبار عند هذه الأعماق باهظ التكلفة، لذلك، فإن حقن الآبار العميقة يستخدم بالدرجة الأولى من قبل الشركات النفطية، التي تملك أصلاً آبار حقول نفطية صالحة، و إذا ما تم بناؤها، فإن هذه الأنظمة تكون رخيصة التكلفة نسبياً من حيث التشغيل والصيانة.



شكل (8-10): تصميم بئر حقن عميق (a) حالات الفشل الممكنة التي يمكن أن تقود إلى تلوث المياه الجوفية من خلال التسرب (b) الحقن مباشرة إلى داخل طبقة حاملة تستخدم في الحصول على مياه شرب، (c) التسرب، (d) حركة المخلفات إلى العمق الذي يوفر مياه شرب.

وتجدر الإشارة، إلى أن حقن الآبار العميقة يتسبب في حدوث مشاكل عدة. وإحدى الاهتمامات إمكانية انسداد منطقة الحقن نتيجة لتراكم الحبيبات الصلبة أو نمو

البكتيريا. كذلك، فإن المخلفات التي يتم حقنها قد تلوث المياه الجوفية بالموقع. إن هذه الإمكانية تحديداً ذات أهمية كبرى في حالة أن المياه الجوفية تمثل مصدراً لمياه الشرب في الوقت الحاضر أو مستقبلاً. ويمكن أن يسبب حقن المخلفات تلوثاً للمياه الجوفية بعدة طرق: (1) الحقن مباشرة إلى داخل الطبقة الحاملة التي تستغل لمياه الشرب (الشكل 10-b)؛ (2) تسريب الآبار (تسرب المخلفات من البئر إلى داخل الطبقة الحاملة لمياه الشرب) (الشكل 10-c) (3) تحرك المخلفات إلى العمق الذي يوفر مياه الشرب، مثلاً من خلال التصدعات في طبقة حاجزة عليا (شكل 10-d). إن حقن الآبار العميقة ينظم من قبل وكالة حماية البيئة من خلال برنامج يسمى ضبط الحقن تحت السطحي (UIC)، الذي يسمح بخمس فئات من آبار الحقن.

6.10 الترميد ومنع الحركة

1.6.10 الترميد

تختلف عملية الترميد التي تدمر المخلفات العضوية الخطرة والسامة عن ترميد المخلفات البلدية الصلبة (MSW) التي عادة ما ينتج عنها طاقة. وعموماً، تستخدم عمليات الترميد عند درجة حرارة منخفضة (حتى 850°م) ودرجة حرارة مرتفعة (نحو 1200°م) الطاقة لأكسدة الكربون والمخلفات المحتوية على ماء بالكامل إلى غاز CO₂ وبخار ماء. وتجدر الإشارة إلى أن بعض المحارق يمكن أن تعمل كمصادر لطاقة حرارية، خاصة عندما تستخدم مخلفات زيتية (مثل الزيوت المستهلكة) كوقود. لكن هذه المحارق لا بد أن تليي مواصفات

مشددة لمستوى الانبعاثات، كما أن كفاءة المحارق يتم مراقبتها بدقة بحيث يفوق تدمير جميع المركبات العضوية نسبة 99.99%.

لا يمكن استخدام الترميد في حالة المخلفات التي تحتوي على تركيزات عالية من الماء أو مواد صلبة غير قابلة للحرق، كما لا يمكن استخدام في حالة المواد المشعة. إضافة لذلك، فإن بناء وتشغيل المحارق باهظ الثمن فغالباً ما يزيد ثمنها على 500 دولاراً للبرميل الواحد. لهذا فإن هذه التقنية تقتصر غالباً على المخلفات صغيرة الحجم. وأخيراً، تنتج المحارق أحجاماً صغيرة من رماد الفلزات عالية السمية، الذي يتم عادة التخلص منه في المكبات (landfills). وبذلك فإن المحارق لا تزال مشاكل زيادة تركيز الفلزات في البيئة.

وفي الولايات المتحدة، قد يكون السبب الأهم لمحدودية الترميد انخفاض قبوله من عامة الناس. إن فهم عامة الناس، بما في ذلك القائم على أساس جيد وذلك الذي في غير محله، حول التهديدات البيئية الممكنة التي قد تجلبها هذه التقنية، قد أدى إلى الحد كثيراً من تطويرها. وتتراوح التقديرات الخاصة بترميد المخلفات في الوقت الحالي ما بين 15 إلى 20% من إجمالي المخلفات الصلبة المنتجة في الولايات المتحدة الأمريكية وربما تشمل هذه الأرقام المحارق الكبرى المستخدمة في تخفيض حجم المخلفات، والمحارق القادرة على إنتاج طاقة يمكن استثمارها، ومحارق المخلفات الخطرة.

2.6.10 منع الحركة

يتعين منع حركة المخلفات ذات المحتوى المرتفع من الفلزات و المواد المشعة أو تثبيتها فيزيائياً أو كيميائياً قبل التخلص منها. وتعتبر عملية تحويل المخلفات إلى كتلة صلبة فيزيائية

في طبيعتها إذ تشمل حجز أو كبس المخلفات ضمن نسيج مستقر. فمثلاً، عندما يخلط إسمنت رطب مع حمأة تنتج كتلة صلبة بعد بضعة أيام من المعالجة أو التجفيف. إن هذا النوع من التحويل إلى تركيبية صلبة منخفضة النفاذية يربط المخلفات ضمن نسيج أو تركيبية لا يمكن تكسيرها بسهولة أو إحداث تصدع فيها تحت الظروف الاعتيادية من ضغوط التحميل (overburden) المصاحبة لعمليات الردم . ونتيجة لهذا، فإن الماء المرشح لا ينفذ بسهولة خلال هذه التركيبية ويصبح غسيل الفلزات أو الأملاح أقل احتمالاً. ويتعين اختبار المواد المستخدمة في التحويل لمادة صلبة من حيث انسجامها (compatibility) وثباتها عندما تخلط مع المخلفات السائلة، وكذلك مدى احتمالية غسيل المكونات السامة بالموقع تحت ظروف الردم. وتجرى هذه الاختبارات حسب الطريقة المقترحة من قبل وكالة حماية البيئة والخاصة بتقييم السمية والغسيل (Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP) method). وتشمل المواد المستخدمة في تحويل المخلفات إلى صورة صلبة والتي يتعين أن يكون لها قوام سائل بداية ويمكنها التصلب بسرعة، كلاً من الإسمنت الخرساني، الملاط و الجير و الجبس، وراتينجات الايبوكسي epoxyresins، والإسفلت (bitumen). وتضم المخلفات التي تحول روتينياً إلى صورة صلبة قبل ردم المخلفات غير العضوية الخطرة، والمخلفات المشعة، والمخلفات المعدنية، والفلزات الذائبة (أو السائلة)، والترب والرسوبيات الملوثة بالفلزات. وعلى الرغم من أن المخلفات ذات المحتوى المرتفع من الكربون العضوي لا تعتبر عادة مرشحة للتعامل معها بهذا الأسلوب، إلا أن الترب والرسوبيات الملوثة بمادة (PCB) يتم تحويلها أحياناً إلى صورة صلبة.

ويمكن أيضاً إجراء تقييد أو تثبيت المخلفات من خلال عملية عالية الطاقة يستخدم فيها زجاج مذاب (سيليكاً غير متبلرة لا بناء لها). وتسمى هذه العملية بالترجيح (vetrification)، وتؤدي إلى حجز المخلفات داخل نسيج السيليكاً. وبالتبريد، يكون للمادة الناتجة قوام زجاجي وتكون غير منفذة للسوائل لفترة زمنية طويلة. لكنه يلاحظ أن الكتل الزجاجية (glass blocks) يمكن أن تتشقق عندما تتعرض لضغوط حمل غير متساوية التوزيع. لذلك، عندما يتم وضع المواد الناتجة بهذه الطريقة (خاصة المخلفات المشعة) في المكبات، توضع عادة وسادة من مواد رخوة غير صلبة (soft) مثل الطين أو الجبس للتقليل من آثار الضغوط الخارجية غير المتساوية التوزيع. ويمكن أيضاً القيام بعملية الترجيح عند الموقع بغرز (inserting) أقطاب توصيل إلى داخل الترب الملوثة وتمير حجم عال من الكهرباء فتذوب معادن السليكا الموجودة. لكنه يلاحظ أن هذه العملية باهظة التكلفة.

ويوجد شكل آخر لمنع حركة المخلفات تتمثل في ارتباط دائم للملوثات مع طور صلب مستقر من التربة من خلال التثبيت (fixation) الفيزيائي أو الكيميائي. وتحدث آليات التثبيت هذه بشكل طبيعي في الترب، وهي جزء مكمل لعملية التخلص من المخلفات البلدية الصلبة (MSW). وكأسلوب مستهدف فإن التثبيت (fixation) يمثل إمكانية كبيرة وواعدة لأن تكون اقتصادية جداً. من ناحية أخرى، فإن قضايا الاستقرار على المدى البعيد واحتمالية أن تكون التفاعلات عكوسة لم يتم إجراء بحوث حولها، وهو ما يحد من التوسع في استخدامها.

7.10 ضخ المخلفات من مصدر محدد للمياه المفتوحة

(Point – Source Discharges into Open Water)

يمكن ضخ المخلفات السائلة (على افتراض توفير المعايير العامة) عبر أنابيب، أو شبكات المجاري، أو قنوات إلى بيئة المياه المفتوحة (الشكل 10-9 أيضاً انظر الباب 13). في الولايات المتحدة، يتطلب مثل هذا الإجراء الحصول على إذن، حسب النظام القومي الذي يمنع ضخ الملوثات (NPDES). ويتعين أن تكون هذه الملوثات غير خطيرة وتتوفر فيها المعايير القياسية لجودة المياه التي وضعتها وكالة حماية البيئة (الجدول 10-5).



شكل (10-9): مصدر تلوث رئيسي يضخ مخلفاته إلى مجرى مائي.

جدول (5-10) مؤشرات جودة المياه حسب النظام القومي الذي يمنع ضخ الملوثات (NPDES)

مؤشر جودة المياه	الحدود القصوى المسموح بها للضخ على أساس متوسطات 30 يوماً
المتطلبات الكيموحيوية من الأكسجين (BOD)	30 مجم/ لتر ¹⁻
المواد الصلبة المعلقة	30 مجم/ لتر ¹⁻
الرقم الهيدروجيني (pH)	9.0 – 6.5
كيماويات عضوية محددة	متغيرة ^١
الفلزات	متغيرة ^١

^(١) : ترتبط بالمصدر، يمكن أن توضع الحدود لكل ولاية على حدة حسب معايير جودة المياه للأحياء المائية والبرية.

وتجدر الإشارة الى وجود حدود للكمية الكلية المسموح بها من المواد الصلبة الذائبة (TDS)، والكربون العضوي (OC)، والأكسجين الذائب (DO)، والمتطلبات الكيموحيوية من الأكسجين (BOD)، ومستويات الرقم الهيدروجيني (pH). إضافة لذلك تطبق قيود صارمة على بعض الملوثات، مثل الفلزات والمبيدات وتشمل الأمثلة التي تضح تحت هذه الشروط روتينياً المياه العادمة المحسنة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي، والمياه العادمة من حقول النفط، وبعض المياه الناتجة عن العمليات الصناعية. ويمكن الحصول على تصاريحات خاصة لضخ المخلفات السائلة التي تتجاوز واحداً أو أكثر من الحدود الموضوعية المسموح بها. وتقتصر هذه الاستثناءات عادة على المكونات غير الخطرة الشائعة جداً في البيئة. وكمثال على ذلك يمكن ضخ المياه المالحة المستخدمة في حفر آبار النفط مباشرة للمحيط لأن مياه المحيط شديدة الملوحة أصلاً. من ناحية أخرى، فإن المياه المالحة نفسها قد لا يسمح بضخها الى مجرى نهر، نظراً لأن مياه معظم الأنهار تحتوي على 10-500 مرة أقل

من المواد الصلبة الذائبة عن تلك التي توجد في مياه المحيطات. ويعتبر ضخ المياه العادمة إلى المياه السطحية والجداول المائية شائعاً جداً، ويتم بالدرجة الأولى بواسطة المحطات البلدية لمعالجة المياه العادمة والمصانع التي تستهلك أحجاماً كبيرة من الماء في عملياتها. وتشمل هذه الصناعات محطات الطاقة، ومصانع الورق، ومصانع إعداد المنتجات الغذائية.

8.10 مخلفات خاصة وأساليب التخلص منها

ينتج سنوياً مئات الملايين من الأطنان من مخلفات صلبة غير خطرة، مثل مخلفات المناجم وصناعة النفط والغاز، ومحطات توليد الطاقة الكهربائية. وتتكون هذه المخلفات عموماً من مواد خاملة نسبياً، ومواد جيولوجية محورة كيميائياً أو فيزيائياً مثل معادن الكوارتز، والطين، والكربون والكبريتات، والرماد. ونظراً لأن هذه المخلفات تعتبر غير خطرة، فإن معظمها يتم وضعة في أكوام في حقول المناجم، والبرك (lagoons)، والمنخفضات الطبيعية. كما أن بعضاً من مواد هذه المخلفات يتم ردمه في مكبات جافة خاصة، أو قد تستخدم كمواد مبطنة للطرق (embankment construction) (أيضاً أنظر الجزء 4.4.18). وخلافاً للمخلفات الأخرى التي تعامل و/ أو يعاد تدويرها، فإن طرق التخلص بشكل نهائي من هذه المخلفات لن تتغير. وينتج في الوقت الحاضر كميات هائلة من هذه المخلفات، ومن المرجح أن تبقى حتماً حيث تم تجميعها. وتجدد الإشارة إلى أن الاستراتيجيات المساعدة على استقرار المواقع التي توجد فيها هذه المخلفات على المدى البعيد هي قيد الدراسة والعناية المستمرة بما في ذلك التغطية بالتربة (Soil capping) لمنع تسرب الغازات، وإعادة الغطاء النباتي، والتحكم في الجريان السطحي للمياه.

المراجع، ولمزيد الاطلاع

- American Petroleum Institute (1984) *The Land Treatability of Appendix VIII Constituents Present in Petroleum Industry Wastes*. Publication #4379, May 1984.
- Arizona Department of Environmental Quality (1995) Land Application of Biosolids. Rule 15 in *Arizona Administrative Register*, Volume 1, Issue 24, Jun 30, 1995. Arizona Department of Environmental Quality, Phoenix, Arizona.
- Brown K.W., Carlile B.L., Miller R.H., Rutledge E.M., and Runge E.C.A. (1986) *Utilization, Treatment, and Disposal of Waste on Land*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Cope C.B., Fuller W.H., and Willets S.L. (1983) *The Scientific Management of Hazardous Wastes*. Cambridge University Press, Cambridge England.
- Cote P., and Giliam M. (1989) Environmental aspect of stabilization and solidification of hazardous and radioactive wastes. ASTM STP 1033. American Society of testing and Materials, Philadelphia.
- ERT (1984) Land treatability of Appendix VIII constituents present in petroleum industry wastes. Document B-974-220. Environmental Research and Technology, Inc., Houston, Texas.
- Miller G.T (1992) *Environmental Science, 4th Edition*. Wadsworth, Belmont, California.
- Pepper I.L. (1991) *Agricultural Sludge Utilization* In: Annual Report to Pima County Wastewater Management Division. Department of Soil, Water and Environmental Science, The University of Arizona, Tucson, Arizona.

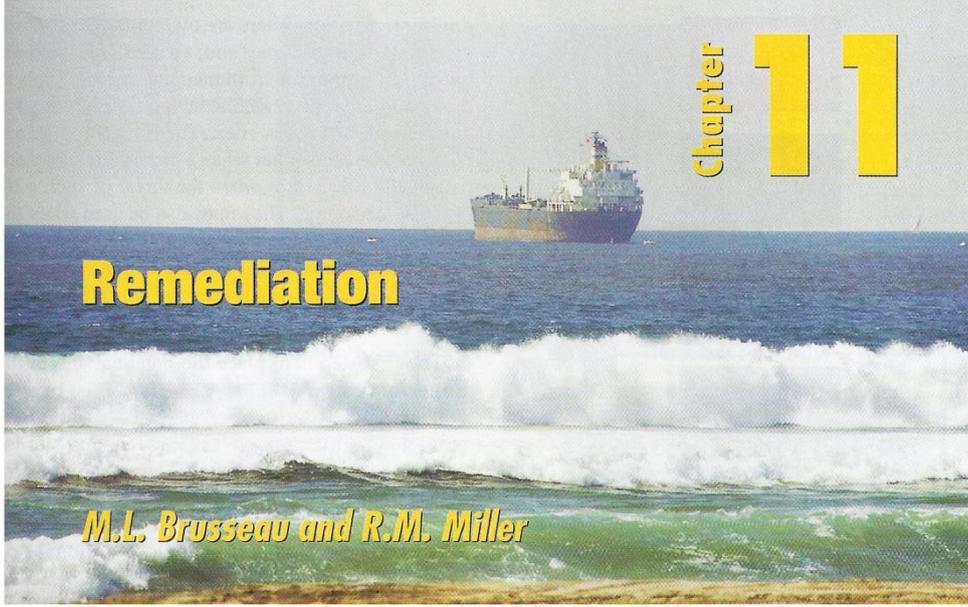
- U.S. EPA (1983) *Land Application of Municipal Sludge: Process Design Manual*. EPA 625/1-83-061. United States Environmental Protection Agency, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.
- U.S. EPA (1994) *MSW Handbook, 1994*. Electronic Handbook version 1.2. United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Wastes, Washington. D.C.
- Warner D.L. and Lehr J.H. (1981) *Subsurface Wastewater Injection: The Technology of Injecting Wastewater into Deep Wells for Disposal*. Premier Press, Berkeley, California.

أسئلة ومسابئلة حسابية

1. يوجد في المكبات الحديثة نظم تهوية. اشرح لماذا .
2. كيف يتم التخلص من معظم المخلفات البلدية الصلبة في الولايات المتحدة؟ وفي الدول الأخرى؟ اشرح إجابتك.
3. اشرح بعضاً من المشاكل المحتملة بعيدة المدى التي يمكن أن تبرز في التربة بسبب التعامل مع المخلفات على الأرض.
4. لماذا لا يمكن إضافة الوحل للحقول إلى ما لا نهاية؟ صف واحد من المخلفات التي يمكن أن تستخدم كسماد إلى ما لا نهاية. أشرح.
5. يبين الجدول (10-3) خصائص الوحل السائل من مدينة توسان بولاية أريزونا، لكن البيانات معبر عنها على أساس الوزن الجاف. كم لتراً من هذا الوحل السائل (الذي يحتوي على 97.2% ماء على أساس الكتلة) ستقوم بإضافتها للهكتار الواحد لتضيف 50 كجم من الفوسفور للتربة؟ (فكرة: تذكر أن التحاليل الكيميائية أجريت بعد إزاحة الماء من الوحل، وعلى ذلك يتعين الأخذ في الاعتبار عامل التخفيف في إجابتك النهائية).
6. يضاف للأرض سنوياً 100 طن متري من الوحل الصحي الذي يحتوي على 4% نيتروجين كلي (الوزن الجاف). تمت إضافة الوحل لمدة 5 سنوات، لكن 80% فقط من النيتروجين قد تم استهلاكه بواسطة النباتات وأن 10% قد تم غسله إلى ما تحت منطقة نمو الجذور كل عام. كم عدد الأطنان من النيتروجين المتبقية في التربة، عند نهاية العام الخامس [ملحوظة: اكتب قائمة لكميات النيتروجين المضافة وقائمة لكميات النيتروجين المتبقية سنوياً ثم أحسب حاصل جمع كمية النيتروجين المتبقي فقط] .

الباب الحادي عشر

المعالجة



إن إصحاح المياه والأرض الملوثة نتيجة لانسكاب النفط بتطبيق المعالجة الحيوية قد أثبت أنه الأسلوب الأكثر نجاحاً حتى الآن، وقد حظى بالقبول من الناس وأثبت جدواه اقتصادياً. إلى أعلى حاملة نפט رأسية قرب شواطئ مدينة لوس أنجلوس، كاليفورنيا.

1.11 مفاهيم أساسية

شجع اهتمام الناس بقضايا تلوث التربة والمياه الجوفية على تطوير البرامج الحكومية المصممة للحماية من التلوث وإزالته. وفي الولايات المتحدة، يعتبر قانون تلوث المياه لعام 1972 أول قانون هام صادر عن الحكومة الفيدرالية يتعلق بتنظيف البيئات الملوثة. وقد حوّل

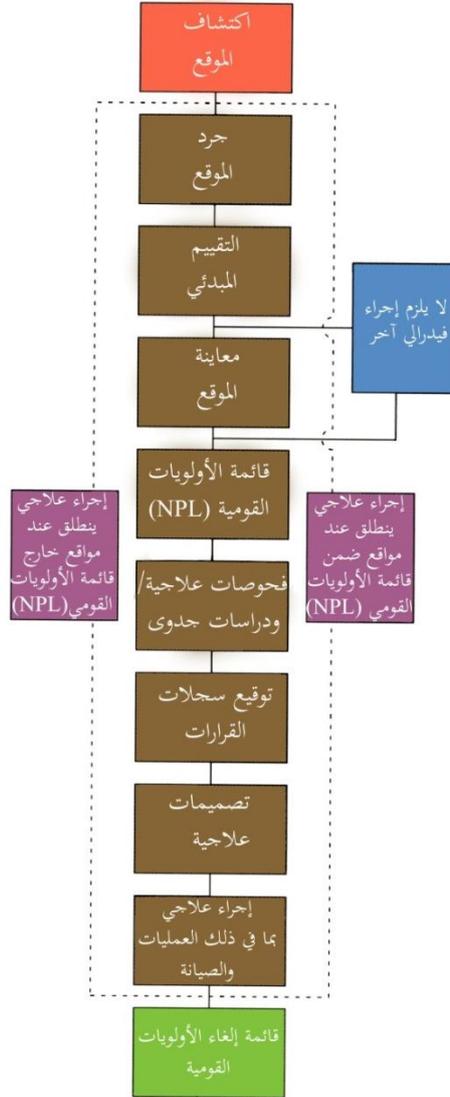
هذا القانون منح التمويل لتنظيف المواد الخطرة المفرغة في المياه العميقة، لكنه لم يمنح دعماً مالياً لتنظيف الأراضي الملوثة. ولاحقاً، تم في عام 1976 تمرير أول قانون يرتبط مباشرة بمشكلة تلوث الأراضي، وهو قانون إصحاح وحماية الموارد (RCRA)، الذي يخول الحكومة الفيدرالية بتكليف مختصين لإزالة المخلفات الخطرة المنبعثة عند الموقع الذي تصدر منه. لكن هذا القانون لم يشمل المواقع الملوثة المهجورة.

وقد تناول القانون الشامل الذي يستجيب للقضايا البيئية والتعويض والمسؤولية (CERCLA) لعام 1980 والذي يعرف ببرنامج التمويل العظيم (The Superfund Program)، بشكل واضح، تنظيف مواقع المخلفات الخطرة (انظر الجزء 4.23). وبموجب هذا البرنامج إضافة إلى بند آخر، المسمى التمويل العظيم وإعادة التحويل (SARA) لعام 1986، أصبح القانون (CERCLA) الإجراء الفيدرالي الأساسي الذي يُسّر النشاطات المصاحبة لتنظيف التلوث البيئي. إضافة لذلك، فإن إدارة الدفاع تملك برنامج تنظيف منفصل يسمى برنامج التأسيس والإصحاح (Installation Restoration Program) للمواقع العسكرية، كما تملك إدارة الطاقة برنامجاً مصمماً خصيصاً لتنظيف مواقع المخلفات المشعة المرتبطة بإنتاج مواد لازمة للأسلحة النووية. كما أن جهات حكومية أخرى، أقل مستوى عن الحكومة الفيدرالية أصدرت قوانين تنظم وتتحكم في التلوث. فمثلاً، أقرت بعض الولايات برامج أصغر مماثلة لبرنامج التمويل العظيم .

ونظراً لأهميته، سيتم بإيجاز مناقشة المكونات الرئيسية لبرنامج التمويل العظيم (Superfund). إن الغرض هذا البرنامج ذو شقين: الاستجابة لانبعاثات المواد الخطرة على

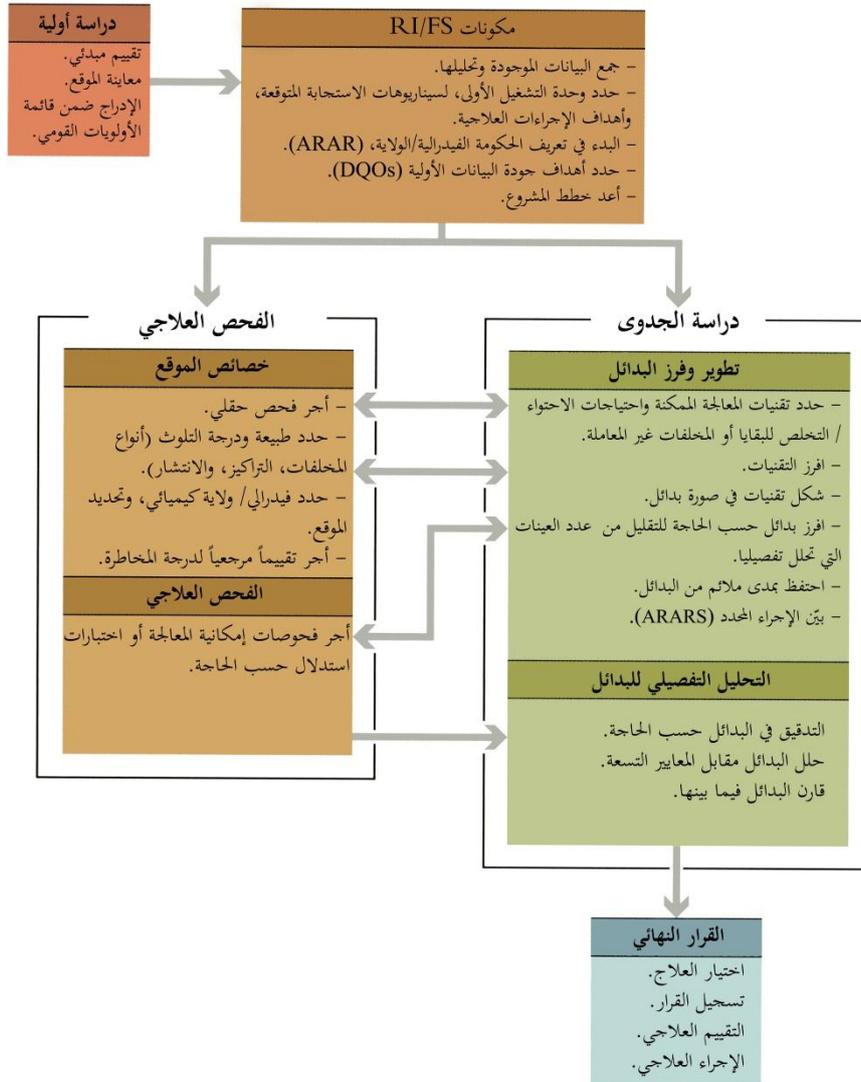
اليابسة والمياه الملاحية وتنظيف المواقع الملوثة. فالجزء الأول يتعامل مع الانبعاثات المستقبلية، بينما يتعامل الجزء الأخير مع المواقع الملوثة حالياً. وهناك نوعان للاستجابة ضمن برنامج التمويل العظيم: (1) إجراءات الإزالة، التي هي استجابات لتهديدات قائمة، مثل التسرب من الخزانات؛ (2) إجراءات علاجية، التي تشمل تنظيف المواقع الملوثة بمواد خطرة. ويمكن أن تستخدم المخصصات مخصصات التمويل العظيم إما في حالة التسرب الفعلي لمادة خطرة أو عندما يكون التهديد نتيجة لتسرب هذه المادة معتبراً. كما يمكن أن تستخدم إذا ما تم انبعاث ملوث معين أو وجود تهديد مؤكد وخطورة معتبرة على صحة عامة الناس أو راحتهم. ويوضح الشكل (1-11) العملية التي يتم بواسطتها تنفيذ برنامج التمويل العظيم على موقع معين.

تتمثل الخطوة الأولى في وضع الموقع المرشح ضمن قائمة مواقع التمويل العظيم التي تم جردها، وهي قائمة المواقع المرشحة للدراسة. ويتعرض الموقع فيما بعد لتقييم مبدئي ومعاينة، يمكن أن تتم بواسطة وكالات متنوعة محلية، أو على مستوى الولاية، أو فيدرالية أو حتى خاصة. وتحدد نتائج هذه الدراسة الأولية فيما إذا كان الموقع مؤهلاً ليكون ضمن قائمة الأولويات القومية (NPL) وهي قائمة للمواقع التي تحتاج لإجراء علاجي بواسطة وكالة حماية البيئة (EPA). وفي الوقت الحاضر، وضعت وكالة حماية البيئة أكثر من 1200 موقع على قائمة الأولويات القومية (ملاحظة: قد تحتاج مواقع ليست ضمن قائمة الأولويات القومية إلى تنظيف، لكن علاجها يتم غالباً بواسطة وكالات غير فيدرالية، بمساعدة وكالة حماية البيئة أو بدونها).



شكل (11-1): عملية تطبيق التمويل العظيم للتعامل مع موقع مخلفات خطر.

إن الخطوة التالية في العملية هما المكونان: الدراسة العلاجية/ ودراسة الجدوى (RI/FS). وتستهدف الدراسة العلاجية ودراسة الجدوى تحديد طبيعة ومدى المخاطرة التي يسببها التلوث من جهة وتقييم البدائل العلاجية الممكنة من جهة أخرى. ويجرى تقييم هذين المكونين بشكل متزامن واحد باتباع أسلوب مرحلي يسمح بالحصول على معلومات حول هذين المكونين. ويوضح الشكل (11-2) إجراءات الدراسة العلاجية ودراسة الجدوى. يعتبر اختيار إجراء علاجي محدد عند موقع معين عملية معقدة جداً. إن أهداف الإجراء العلاجي هو حماية صحة الإنسان والبيئة، والمحافظة على هذه الحماية على امتداد الزمن، والرفع إلى الحد الأقصى من معاملة المخلفات (خلافاً لمبدأ احتواء المخلفات أو إزالتها). ويقر الجزء 121 من قانون CERCLA ثلاث مجموعات من المعايير تستخدم في تقييم واختيار البديل الأفضل وهي: معايير الحد الأدنى الممكن (threshold criteria)، ومعايير الموازنة الأولية (primary balancing criteria) ومعايير التحوير (modifying criteria). وتضمن معايير الحد الأدنى الممكن، أن العلاج يحمي صحة الإنسان والبيئة وأنه ينسجم مع الاحتياجات المناسبة القابلة للتطبيق (ARARs)؛ أما معايير الموازنة فهي تضمن أن عوامل المقايضة مثل التكلفة والجدوى مأخوذة في الاعتبار، من ناحية أخرى تضمن معايير التحوير أن يكون العلاج محققاً لتوقعات الولاية والسكان.



شكل (11-2): عملية الاستقصاء العلاجي / دراسة الجدوى (RI/FS)

ARAR(s) = الاحتياجات المناسبة ذات العلاقة أو القابلة للتطبيق

بعد اختيار إجراء علاجي معين، يتم تصميمه ويوضع للتنفيذ. وقد تحتاج بعض المواقع إلى إجراءات بسيطة نسبياً، مثل إزالة خزانات تخزين المخلفات والتربة المحيطة بها. لكن المواقع التي وضعت ضمن قائمة الأولويات القومية (NPL) تتميز عموماً بمشاكل تلوث معقدة، ولذا فإن تنظيفها يكون أكثر صعوبة. وجدير بالإشارة، أن عدداً قليلاً فقط من مواقع قائمة الأولويات القومية قد تم تنظيفها بالكامل منذ بدء تطبيق برنامج التمويل العظيم.

ومن المكونات الهامة للتمويل العظيم وجميع برامج التنظيف الأخرى مسألة تحديد مستوى التنظيف المستهدف. ومن الأسئلة المرتبطة بهذه المسألة: إلى أي درجة من النظافة يكون التنظيف نظيفاً؟ فمثلاً، إذا كان الهدف هو تخفيض درجة تركيز التلوث، فإلى أي مستوى يتعين أن يصل التركيز حتى يصبح مقبولاً؟ وكما هو متوقع، إذ كلما كان برنامج التنظيف أكثر دقة، تعاظمت تكاليفه. وقد يلزم عشرات إلى مئات الملايين من الدولارات لإعادة مواقع واسعة لنفايات معقدة وخطرة إلى وضع مقبول. وفي الحقيقة، قد يكون تنظيف كثير من المواقع بشكل تام غير ممكن. لكنه، لا يلزم أن يكون موقع ما نظيفاً تماماً ليكون قابلاً للاستخدام لبعض الأغراض. لذلك، فإنه من المهم جداً وزن الإمكانية العملية لإجراء التنظيف ودرجة المخاطرة الممكنة التي يسببها التلوث من ناحية، مقابل التأثير الاقتصادي واستخدام الموقع في المستقبل. إن أخذ المخاطرة التي يمثلها التلوث في الاعتبار واستخدام الموقع مستقبلاً المواقع تسمح بتخصيص الموارد النادرة للمواقع التي تمثل التهديد الأكبر في الحاضر والمستقبل.

توجد ثلاث مجاميع أو أنواع رئيسية للإجراءات العلاجية: (1) الاحتواء (containment)، حيث يُحصر وجود الملوث على امتداد محدد لمنع انتشاره إلى أكثر من ذلك؛ (2) الإزالة، حيث ينقل الملوث من بيئة مفتوحة إلى أخرى محكمة. (3) المعالجة، حيث يُحول الملوث إلى مادة غير خطيرة. وحيث أن السمية الطبيعية للملوث ما يتم إزالتها بواسطة المعالجة فقط، فإن هذا الأسلوب هو المفضل من بين الأساليب الثلاثة. لكن تقنية الاحتواء والإزالة مهمتان جداً، عندما لا تكون معالجة الملوث ممكنة. وعلى الرغم من أنه سيتم التركيز على كل واحد من أنواع إجراءات المعالجة الثلاثة، فإنه من المهم فهم أن الإجراء العلاجي يتكون عادة من تركيبة تشمل الاحتواء، والإزالة، والمعالجة.

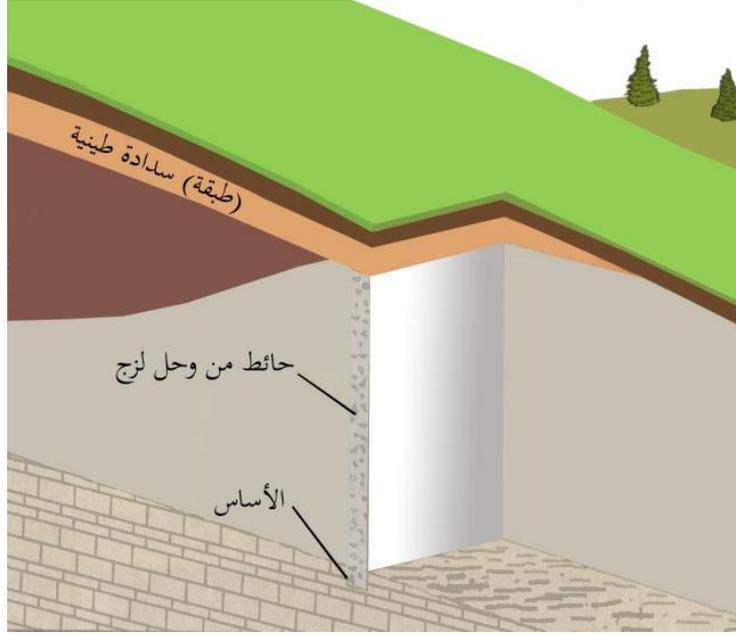
2.11 الاحتواء

يمكن أن يتحقق الاحتواء بالتحكم في تدفق السائل الذي يحمل الملوث أو بتثبيت الملوث مباشرة. وسيتم هنا مناقشة دور العوائق المادية والهيدروليكية في احتواء المياه الملوثة.

1.2.11 العوائق الفيزيائية (الطبيعية)

إن الأساس في العائق الفيزيائي التحكم في تدفق المياه، ومن ثم منع انتشار الملوث. ويوضع العائق عادة (في اتجاه الانحدار) قبل المنطقة الملوثة (انظر الشكل 11-3)، لكنه يلاحظ أن العوائق يمكن أيضاً أن توضع عند أعلى الانحدار (upgradient) أو معاً عند أعلى وأسفل المنحدر من منطقة التلوث. وتستخدم العوائق الفيزيائية بالدرجة الأولى في بيئات مفككة مثل التربة أو الرمل، لكنها أيضاً يمكن أن تستخدم في بيئات صلبة مثل

الصخر إذا ما طبقت تقنيات خاصة. وعموماً، يمكن أن توضع العوائق المادية لأعماق تصل إلى نحو 50 متراً. كما يمكن أن يتباين البعد الأفقي للعوائق كثيراً، وذلك حسب حجم الموقع.



شكل (11-3): الاحتواء الفيزيائي للملوث معين باستخدام حائط وحل لزوج (slurry wall).

هناك اعتبار هام في تركيب الحواجز الفيزيائية وهو وجود منطقة ذات نفاذية منخفضة، يمكن أن يستند أو يقف عليها الحاجز. وبدون وجود هذا الأساس داخل منطقة منخفضة النفاذية فإن المياه الملوثة يمكن أن تتسرب تحت الحاجز. ويوجد معيار آخر يتعلق بالحواجز الفيزيائية وهو نفاذية الحاجز نفسه. ونظرًا لأن الهدف من الحاجز الفيزيائي هو التقليل إلى الحد الأدنى من تدفق السائل خلال المنطقة المستهدفة، فإن نفاذية الحاجز يجب أن تكون منخفضة إلى أقصى حد يمكن. وهناك عامل آخر يتعين أخذه في الاعتبار وهو

إمكانية تفاعل الملوثات مع مكونات الحاجز والتسبب في تدهور أدائها. ويتعين أن تكون خصائص المواد التي يتكون منها الحاجز متوافقة مع خصائص الملوث للتقليل إلى أدنى حد ممكن من عدم فعالية الحاجز.

توجد ثلاثة أنواع أساسية للحواجز الطبيعية: جدران الوحل اللزج (Slurry walls)، والستارات الملاطية (grout curtains)، والركام الصفحي (Sheet piling). وتتكون جدران الوحل من خنادق مملوءة بوحل سائل من مادة الطين أو مزيج من طين وتربة (انظر الشكل (3-11)).

أما الستارات الملاطية فهي عبارة عن ستائر مكونة من مواد كيميائية شبيهة بالإسمنت تحقن إلى داخل الأرض. من ناحية أخرى، فإن الركام الصفحي يتكون من شرائح من الحديد المغروز في الأرض. وتعتبر جدران الوحل الأقل تكلفة والأكثر انتشاراً من بين أنواع الحواجز المادية الأخرى، كما أنها الأسهل من حيث البناء. أما الملاطية فهي مقتصره بالدرجة الأولى على المواقع التي تتميز ببيئات تحت سطحية متصلبة. من جهة أخرى فإن نفاذية الركامات تساوي الصفر عملياً، وأنها بشكل عام ذات تفاعلية منخفضة، لكنها يمكن أن تسرب، لأنه من الصعب الحصول على لحام تام بين الصفائح أو الشرائح. إضافة لذلك، فإن شرائح الركامات تكون عموماً أكثر تكلفة من جدران الوحل، ويكون من الصعب دفع شرائح الركام خلال أرض صخرية.

2.2.11 العوائق الهيدروليكية

إن المبدأ الذي تقوم عليه العوائق الهيدروليكية يشبه ذلك الخاص بالعوائق الفيزيائية، وهو تحويل تدفق الماء والتحكم فيه. لكنه خلافاً للعوائق الفيزيائية، التي تتكون من مادة

صلبة، فإن العوائق الهيدروليكية قائمة على جهد الموائع (Fluid potentials) (انظر الجزء 2.1.5). وتتولد هذه الجهود عن طريق تباين الضغط الناتج عن استخلاص الماء أو حقنه. إن عامل الكفاءة الرئيسي لهذا الأسلوب هو قدرته على حجز جبهة الملوث أو بمعنى آخر دائرة التلوث. ويعتمد حجز جبهة التلوث على عدد ومكان ومعدل تدفق الآبار أو المصارف. وكثيراً ما تجرى محاولات لجعل تصميم نظام الاحتواء وعمله مثالياً لتعظيم حجز جبهة الانتشار والتقليل في الوقت نفسه إلى الحد الأدنى من حجم الماء الملوث الذي تتم إزالته.

تعتبر إقامة نظام صرف معين أبسط صورة لعائق هيدروليكي. ويتم بناء هذا النظام برص أنابيب مثقبة (perforated pipes) أفقياً في خندق (trench) تم حفره تحت سطح الأرض ووضع الأنابيب بحيث تسمح بحجز الماء الملوث. ويمكن بعدها جمع الماء وإزالته عن طريق الجاذبية أو بالضغط. ويتعين الإشارة إلى أن المصارف تمثل آليات احتواء فعالة فقط عندما تكون مناطق وجود الملوثات ضحلة العمق.

تعتبر الآبار أكثر تعقيداً وأكثر تنوعاً مقارنة بأنظمة التصريف. ويمكن أن تستخدم كل من آبار الحقن والاستخلاص في نظام احتواء معين، كما هو موضح في الشكل (11-4). وتزيل آبار الاستخلاص الماء الذي يدخل منطقة التأثير على البئر، مكونة منخفضاً مخروطياً (cone of depression). وعلى العكس من ذلك يخلق بئر الحقن نتوء ضغط (pressure ridge) أو بروز (mound) من الماء تحت ضغط أعلى مقارنة بالمياه المحيطة، وهو ما يمنع تدفق الماء من تجاوز البروز (mound).

ومن المزايا الرئيسية لاستخدام الآبار للتحكم في حركة الملوثات أنها الأسلوب الوحيد الذي يمكن استخدامه في النظم العميقة (أكثر من 50 متراً). وفي الواقع، يمكن ببساطة استخدام الآبار في مناطق التلوث من أي حجم، من خلال زيادة عدد الآبار للتعامل مع المشاكل الكبيرة. ولهذه الأسباب وغيرها، فإن الآبار هي طريقة الاحتواء الأكثر استخداماً، على الرغم من العيوب التي تشمل تكلفة تشغيل المضخات وصيانتها على المدى البعيد، إضافة للحاجة لتخزين ومعالجة والتخلص من الكميات الكبيرة من المياه الملوثة التي يتم ضخها للسطح.

3.11 الإزالة

1.3.11 الحفر و إخراج الحفريات (Excavation)

من الطرق المعروفة منذ القدم للتخلص من الملوثات إخراج التربة التي تحتوي على الملوثات عن طريق الحفر. وقد استخدم هذا الأسلوب في كثير من المواقع وكان ناجحاً جداً. لكنه، يصاحب أسلوب الحفر عدد من العيوب. أولاً: إن الحفر يمكن أن يعرض العمال لمركبات خطيرة. ثانياً: أن التربة الملوثة تحتاج إلى معالجة و/ أو التخلص منها، وهو ما يمكن أن يكون مكلفاً. ثالثاً: أن إزالة الرديم أو القيام بالحفر (excavation) يكون عادة ممكناً فقط للمساحات الصغيرة نسبياً، ويستخدم أكثر ما يمكن عادة في المواقع محدودة المساحة الضحلة وعالية التلوث.

2.3.11 الضخ والمعالجة

تقوم طريقة الضخ والمعالجة، التي تعتبر حالياً الأوسع استخداماً في معالجة المياه الجوفية الملوثة، بالتخلص من المياه الملوثة من الطبقة تحت السطحية عن طريق استخدام بئر

أو أكثر لضخها إلى الخارج. إضافة لذلك، فإن المياه النظيفة التي تجلب إلى المواقع الملوثة تقوم بواسطة فعل الضخ بإزالة أو غسل المزيد من التلوث عن طريق تحفيز إزالة الملوثات المدمصة على سطوح الطور الصلب (انظر الجزأين 3.6 و4.6). وتوجه المياه الملوثة التي يتم ضخها من الطبقة تحت السطحية مباشرة إلى نوع معين من المعاملة التي قد تتكون من إزالة الهواء (air stripping)، أو إدمصاص الكربون أو ربما تعامل كما هو في حالة نظام المعالجة البيولوجية فوق سطح الأرض (انظر الجزأين 1.1.4.11 و2.1.4.11) وتوجد التوضيحات الخاصة بنظام الضخ والمعاملة في الشكل (11-5) والشكل (11-7).

وعلى الرغم من أن طريقة الضخ والمعالجة تناقش من حيث استخدامها في النظم تحت السطحية المشبعة كالطبقات الحاملة للمياه الجوفية (aquifers)، إلا أنها يمكن أن تستخدم أيضاً لإزالة الملوثات من الطبقة غير المشبعة (vadoze zone). وفي هذه الحالة، يشار إليها عموماً على أنها عملية غسيل تربة عند الموقع (in situ soil washing). وحتى يتم تطبيقها، يمكن أن تستخدم مسارات ترشيح (infiltration galleries) وهي عبارة عن شبكة من أنابيب مسامية تحت أرضية وظيفتها توصيل محسنات سائلة لمساحات كبيرة من التربة تحت السطحية، يمكن أن تستخدم بالإضافة إلى الآبار لإيصال الماء إلى المنطقة الملوثة. عندما يستخدم الغسيل بالماء لأجل إزالة ملوث معين (كما هو في طريقة الضخ والمعالجة)، فإن حجز جبهة أنتشار الملوث (contaminant plume capture) وفعالية إزالة الملوث يمثلان المعيارين الأساسيين للأداء. وقد أظهرت دراسات حديثة حول نظم تشغيل الضخ والمعالجة أن هذا الأسلوب ناجح جداً في احتواء جبهة الملوثات (contaminant plume)

كما حقق في بعض الحالات تقليص لها. لكنه يبدو أن الضخ كثيراً ما يكون غير فعال في إزالة الملوثات كلياً من الطبقة تحت السطحية. وتوجد عدة عوامل يمكن أن تحد من فعالية الغسيل بالماء في إزالة الملوثات:

(1) وجود مناطق ذات نفاذية منخفضة:

عندما توجد مناطق ذات نفاذية منخفضة (مثل عدسات من سلت/ طين) ضمن طبقة تحت سطحية رملية، فإنها تخلق بيئات يكون التوصيل والنقل خلالها في مستوياتها الدنيا مقارنة بالرمل المحيط بها. وتختار المياه الجوفية التدفق حول عدسات السلت/ الطين بدلاً من التدفق خلالها. لذلك، فإن الملوث الموجود داخل عدسات السلت/ طين يتحرر إلى الماء المتدفق بالدرجة الأولى عن طريق الانتشار المسامي، الذي يمكن أن يكون عملية بطيئة نسبياً. ولهذا فإن كمية الملوث المزالة تنقل مع كل حجم ماء يتم ضخه، وهو ما يؤدي بالتالي إلى زيادة الوقت اللازم لإزالة الملوث بالكامل.

(2) التحرر من الإدمصاص المحدد بالمعدل (Rate-limited desorption):

كشفت البحوث العلمية أن إدمصاص و/ أو تحرر كثير من الأملاح بواسطة بيئات مسامية يمكن أن يتحدد كثيراً بالمعدل (rate)، (انظر الجزء 3.3.6). وعندما يكون معدل التحرر من الإدمصاص (desorption) بطيئاً بدرجة كافية، فإن تركيز الملوث في المياه الجوفية يكون أقل من التركيزات التي يتم الحصول عليها تحت ظروف تحرر سريعة. لهذا، تتم إزالة كميات أقل من الملوث لوحدة حجم من المياه، وعليه فإن الإزالة بواسطة الغسيل ستأخذ وقتاً أطول.

(3) وجود سائل لا يمتزج بالماء (immiscible liquid):

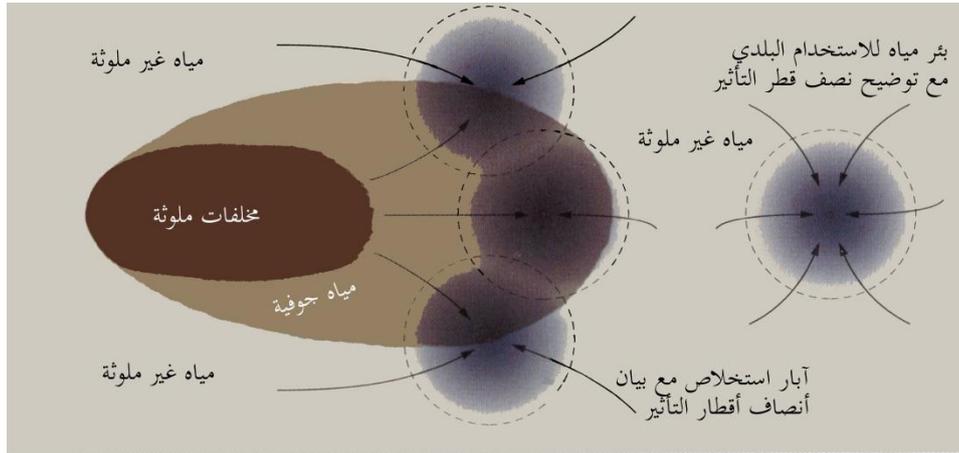
في كثير من الحالات، قد توجد أطوار متبقية لمحاليل عضوية غير قابلة للامتزاج بالماء في أجزاء من الطبقة تحت السطحية الملوثة. ونظراً لأنه من الصعب جداً إزاحة أو دفع مادة متبقية مشبعة بالماء، فإن الوسائل الرئيسية للإزالة يجب أن تكون الإذابة في الماء والتطهير إلى هواء التربة. وقد يستغرق القيام بالتدوير الكامل لمحلول غير قابل للامتزاج بالماء وقتاً طويلاً جداً، وهو ما يؤجل كثيراً التخلص منه. ولذلك فإن المحلول غير القابل للامتزاج بالماء يعمل كمصدر تلوث على مدى طويل.

ونظراً لأن أسلوب الضخ والمعالجة يمثل طريقة إصحاح رئيسية، فإنه يتم اختبار عدة طرق لتحسين فعاليتها. ومن إحدى طرق تحسين فعالية أسلوب الضخ والمعالجة تحوير وضع منطقة مصدر الملوث (contaminant source zone)، وهي المساحة التي تم التخلص من الملوث فيها أو سكبها عندها. فإذا ظلت منطقة المصدر بدون معاملة أو بدون تحكم، فإنها سوف تعمل كمصدر مستمر للملوث الذي يلزم إزالته. لهذا، فإن الفشل في التحكم في موقع المصدر أو معاملته يمكن أن يؤدي إلى إطالة الفترة الزمنية لتحقيق هدف تنظيف الموقع. وعلى ذلك، فإنه من المهم أن تحدد منطقة المصدر عند موقع ما والتعامل معها في المراحل المبكرة لبرنامج الإجراء العلاجي. وتشمل الطرق الأخرى لتحسين هذا الأسلوب الإسراع في الإزالة، كما هو مبين تفصيلاً في الجزء التالي.

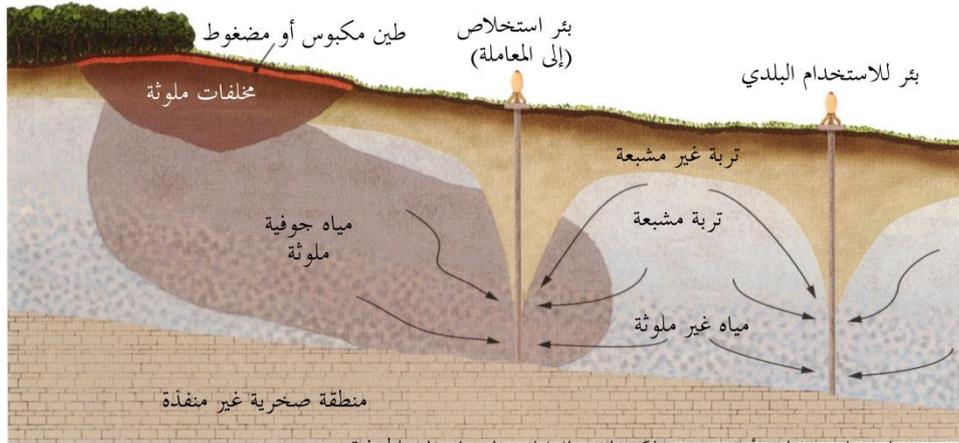
3.3.11 الإزالة المحفزة (enhanced removal)

يمكن أن تكون إزالة الملوث صعبة بسبب عوامل منها الذوبانية المنخفضة، والدرجة العالية للإدمصاص، ووجود أطوار سائلة غير قابلة للامتزاج بالماء، وهي عوامل تؤدي جميعها إلى الحد من كمية الملوث التي يمكن أن تغسل بواسطة حجم معين من الماء. ويتم حالياً تطوير أساليب لتحفيز إزالة الملوثات قليلة الذوبانية وعالية الإدمصاص. ومن هذه الأساليب حقن مواد كيميائية مثل المنشطات السطحية surfactant (مثلاً المنظفات) إلى داخل الطبقة الحاملة للماء، وهو ما يسرع من إذابة الملوث وتحرره مما يقود إلى زيادة فعالية إزالته (انظر أيضاً الجزء 4.1.4.11). وتعمل المنشطات السطحية بنفس طريقة المنظفات المنزلية والصناعية التي تستخدم لإزالة البقايا الدهنية من الآليات والملابس أو الصحون، حيث يتم إذابة جزيئات الملوث داخل ميسيلات المنشطات السطحية التي هي عبارة عن مجموعات من جزيئات المنشطات السطحية تتراوح أقطارها ما بين 5 و10 نانوميتر. كذلك، فإنه يمكن أن تحيط جزيئات المنشطات السطحية قطرات الزيت بغلاف و تجعلها مادة تشبه الصابون وتحولها إلى محلول (انظر الشكل 11-6). وفي اختبارات معملية، استخدمت المنشطات السطحية بنجاح لرفع الذوبانية المائية الظاهرية للملوثات عضوية. لكنه يتعين الإشارة إلى أن الاختبارات الحقلية التي أجريت كانت محدودة، وقد كانت النتائج متضاربة. ويتمثل العامل الرئيسي الذي يتحكم في نجاح هذا الأسلوب حقلياً في القدرة على توصيل المنشط السطحي إلى الأماكن التي تحتوي على الملوث. ويعتمد هذا جزئياً، على التفاعلات المتداخلة

(interactions) بين المنشط السطحي والتربة (مثلاً، الإدمصاص)، وخصائص تدفق الماء في التربة.

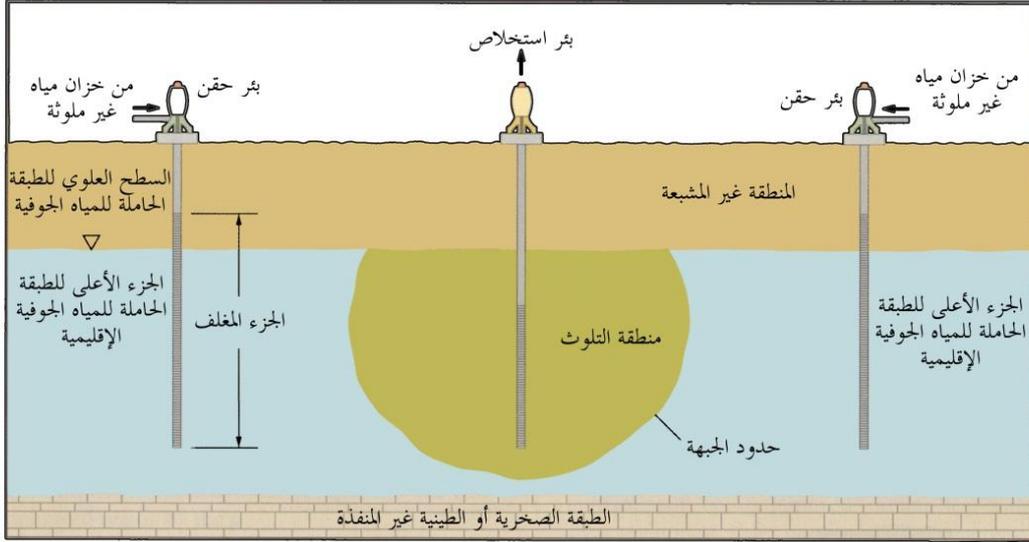


أ) منظر علوي لموقع المعالجة يوضح سطوح المياه الجوفية، واتجاهات التدفق، والمخلفات الملوثة (تمت إزالة التربة)

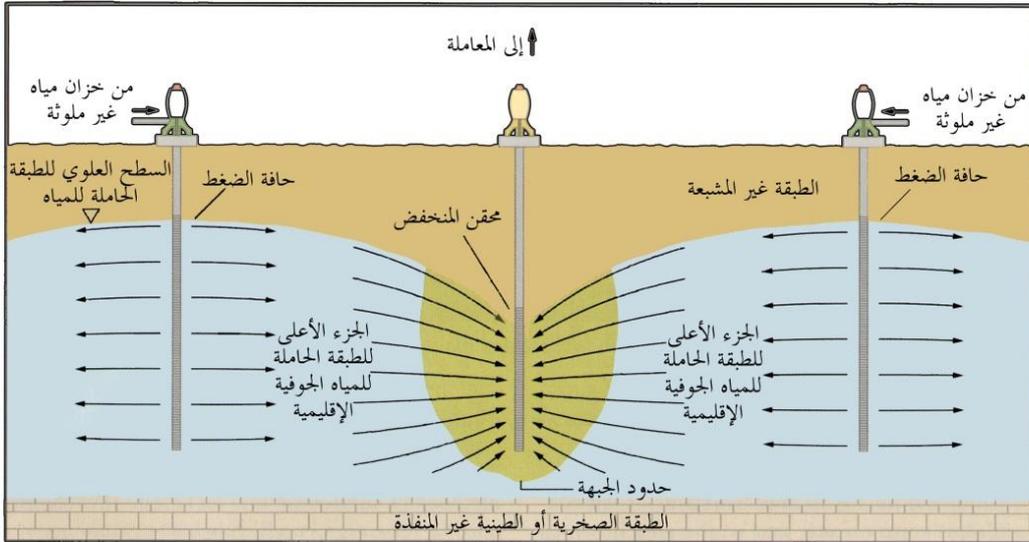


ب) منظر مقطعي في الموقع أعلاه يوضح الحركة الجانبية للملوثات المغسولة والمياه الجوفية.

شكل (4-11): احتواء جبهة انتشار الملوث contaminant plume بواسطة حاجز هيدروليكي.



أ) قبل المعاملة



ب) بعد المعاملة

شكل (11-5) : إزالة ملوث معين بواسطة عمليات الضخ والمعاملة .

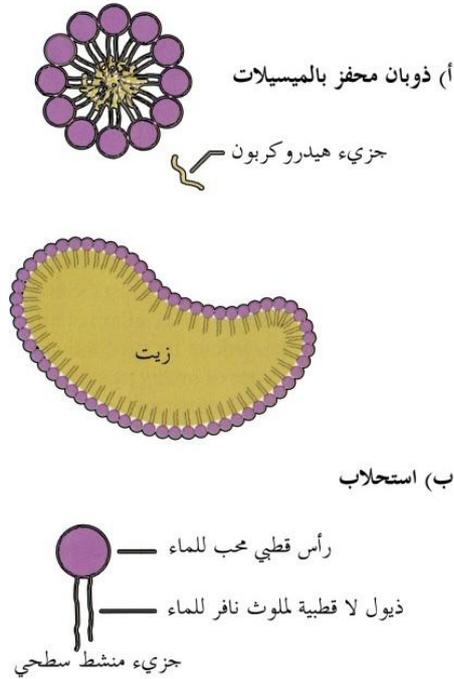
4.3.11 استخلاص بخار التربة

إن المبدأ الذي يقوم عليه استخلاص بخار التربة، أو تهوية التربة، مشابه جداً لأسلوب الضخ والمعالجة: حيث يضخ سائل معين خلال منطقة ملوثة لتسريع الإزالة لكنه، في حالة تهوية التربة، يكون السائل هواءً بدلاً من الماء. ويوجد شرطان لاستخدام التهوية. أولاً: أن التربة يجب أن تحتوي على طور غازي يمكن للهواء الملوث المرور عبره. ويقصر هذا الشرط استخدام أسلوب تهوية التربة فقط على المنطقة غير المشبعة (Vadoze zone). ثانياً: إن الملوثات يجب أن تكون قابلة للانتقال من أطوار أخرى (صلبة، ماء، سائل غير ممتزج بالماء) إلى طور غازي. إن هذا الشرط يجعل أسلوب تهوية التربة مقصوراً على الملوثات المتطايرة.

ونظراً لأن لزوجة الهواء أقل بكثير من لزوجة الماء، فإنه يلزم قدرأً أقل بكثير من الطاقة لضخ الهواء. وعلى ذلك، فإن استخدام أسلوب تهوية التربة لإزالة الملوثات المتطايرة من الطبقة غير المشبعة للتربة يكون عادةً أقل تكلفة. وبمجرد إزالة الملوث من الطبقة غير المشبعة للتربة، فإنه إما أن يطلق إلى الهواء الجوي أو يوضع داخل نظام معاملة معين. وتتمثل معايير الأداء لأسلوب تهوية التربة بمدى فعاليته في حجز الملوث وإزالته. وتجدر الإشارة إلى أن فعالية إزالة ملوث معين بإتباع أسلوب تهوية التربة يمكن أن تحدها العوامل الثلاثة نفسها التي تحد من إزالة الملوثات باستخدام أسلوب الغسيل بالماء، انظر الجزء (2.3.11).

توجد تقنية ترتبط شيئاً ما باستخلاص بخار التربة وهي تزيذ الهواء (air sparging)، الذي يتمثل في حقن هواء غير ملوث إلى داخل الطبقة المشبعة أو الطبقة

الحاملة للمياه الجوفية. إن الغرض الأساسي لهذا الحقن هو جعل الملوثات تتطاير من التربة في صورة فقائيع هوائية. ونظراً لوجود تأثير الطفو (buoyancy effect)، فإن فقائيع الهواء تصعد لأعلى وتأخذ طريقها في نهاية المطاف لتصل إلى الطبقة غير المشبعة من التربة، حيث يتم حجزها بواسطة نظام استخلاص بخار التربة. وفي بعض الحالات، يمكن تحفيز التحلل الحيوي عند الموقع نفسه نتيجة لإضافة الأكسجين إلى الطبقة تحت السطحية عن طريق ضخ رذاذ الهواء (انظر الجزء 1.1.4.11).



الشكل: (6-11): التفاعلات بين المواد المنشطات السطحية (Surfactants) والملوثات العضوية: (أ) الإذابة المحفزة ميسيلياً المتمثلة في تثبيت بعض الجزيئات الملوثة عضوي بواسطة المنشط السطحي. هذه القطرات لها أقطار في مدى بعض النانومترات. (ب) يحدث استحلاب (emulsification) عندما يغلف المنشط السطحي قطرات الملوثة.

4.11 المعاملة عند الموقع

إن تقنيات المعاملة عند الموقع هي عبارة عن طرق تسمح بتنظيف مواقع حقلية ملوثة في مكانها. ويوجد اهتمام عظيم بهذه التقنيات لأنها يمكن أن تستخدم بحد أدنى من التكاليف. وثانياً، يمكن عند استخدام أسلوب المعاملة عند الموقع، في بعض الأحيان، تجنب المخاطرة المصاحبة للصورة الكيميائية الخطرة للملوث. ويتمثل النوعان الرئيسيان لأسلوب المعاملة عند الموقع في المعاملة البيولوجية (الإصحاح البيولوجي الموضوعي) والمعاملة الكيميائية.

1.4.11 الإصحاح الحيوي (Bioremediation) .

إن هدف الإصحاح البيولوجي هو الاستفادة إلى أقصى حد من عمليات التحلل البيولوجي التي تحدث طبيعياً (تمت مناقشتها في الباب 7 من هذا الكتاب)، وذلك لتنظيف المواقع الملوثة. وتوجد عدة أنواع من الإصحاح البيولوجي: الإصحاح البيولوجي عند الموقع (in situ)، وهو عبارة عن معاملة موقع ملوث في ذات المكان؛ والإصحاح البيولوجي خارج الموقع (ex situ) وهو معاملة تربة أو مياه ملوثة تم نقلها من موقع ملوث؛ والإصحاح البيولوجي الضمني (intrinsic) وهو المستوى الطبيعي للتحلل البيولوجي للملوث الذي يحدث دون أي تحفيز أو معاملة خارجية. وتتلقى أنواع الإصحاح البيولوجي جميعاً اهتماماً متنامياً كبدايات إصحاح ناجعة وذلك لعدة أسباب، منها القبول الجيد عموماً ودعم الناس لها، ومعدلات النجاح الجيدة لبعض التطبيقات، والتكلفة المنخفضة نسبياً للإصحاح البيولوجي عندما يكون ناجحاً. وكأية تقنية أخرى، فإن هناك بعض السلبيات أيضاً: أولاً، لا يمكن التنبؤ بالنجاح وذلك لأن النظم البيولوجية نفسها معقدة ويصعب التنبؤ بها. أما

الاعتبار الثاني فهو أن الإصحاح البيولوجي نادراً ما يعيد بيئة ما لحالتها الأصلية. وكثيراً، ما يدمص بقوة ما يتبقى من التلوث بعد المعاملة ولا يصبح متاحاً للكائنات الدقيقة لتقوم بتحليله. وعلى مدى طويل من الزمن (سنوات)، يمكن أن تتحرر هذه الملوثات المتبقية ببطء، مولدة تلوثاً إضافياً. ويوجد قدر قليل من البحث حول مصير هذه المواد المتبقية التي يتم تحررها ومدى سميتها، لذلك فإن كلاً من المواطنين والوكالات المنظمة يظلون مهووسين بالتأثيرات الضارة الممكنة للتلوث المتبقي.

تعتبر معاملة مخلفات الصرف الصحي بيولوجياً، وهو ما أتبع لسنوات عديدة واحداً من النجاحات الكبرى لأسلوب الإصحاح البيولوجي. وانطلاقاً من هذا النجاح، يمكن بسهولة رؤية أن التحلل البيولوجي يعتمد على تركيبة الملوث ومدى تيسره بيولوجياً (انظر الجزء 2.3.7).

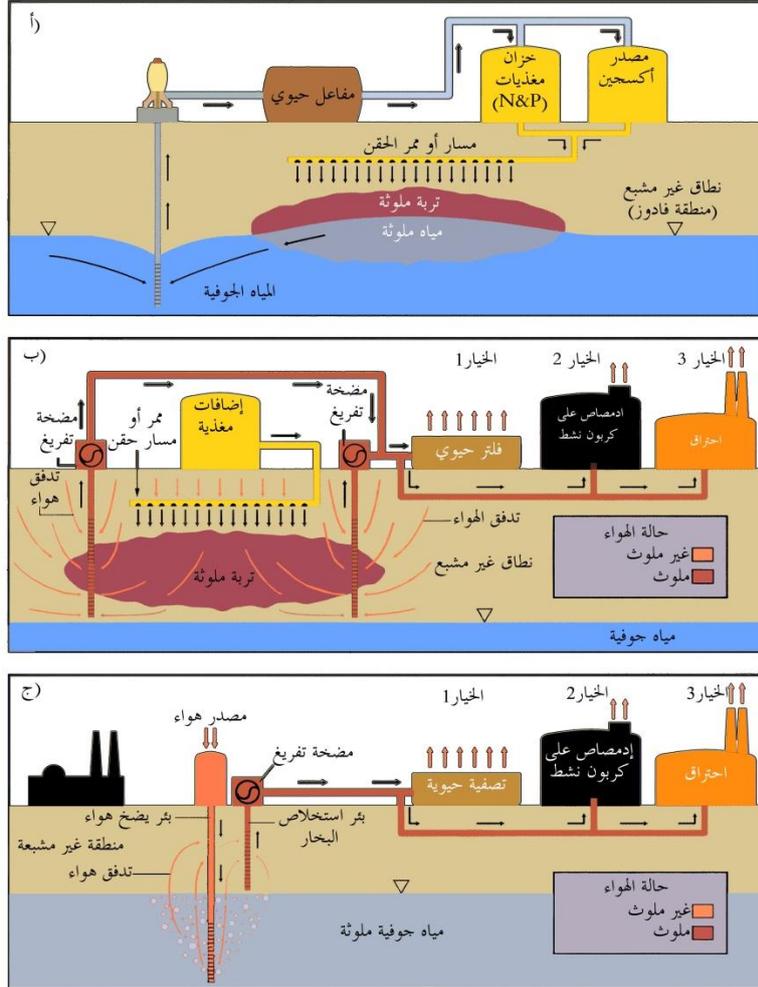
لذلك، فإن تطبيق أسلوب الإصحاح البيولوجي على ملوثات أخرى يعتمد على نوع الملوث أو خليط الملوثات الموجودة، وكذلك أنواع الكائنات الحية الموجودة. ويعتبر أول نجاح لتطبيق الإصحاح البيولوجي خارج محطة معالجة مخلفات البلدية تنظيف إنسكابات النفط (oil spills)، حيث استخدمت بكتيريا هوائية غير ذاتية التغذية لتحليل مركبات هيدروكربونية بيولوجياً. وخلال السنوات القليلة الماضية، برزت الكثير من تقنيات الإصحاح البيولوجي الجديدة التي تُستخدم للتعامل مع أنواع أخرى من الملوثات ويضم الجدول (1-11) قائمة بهذه الملوثات وطرق التعامل معها.

توجد عدة عوامل رئيسية مهمة لتطبيق أسلوب الإصحاح البيولوجي بنجاح، وتشمل: الظروف المناخية، وتيسر المغذيات والملوثات، ووجود كائنات دقيقة قادرة على تحليل هذه المواد. لذلك عندما لا يحدث تحللاً حيويًا، يكون من المهم عزل العوامل المحددة للإصحاح الحيوي. وهي مهمة قد تكون معقدة جداً. ويمكن عادة أن تحدد الاختبارات المعملية الأولية على تربة أو ماء لموقع ملوث معين، وجود أو غياب كائنات دقيقة محللة؛ وقد تكشف هذه الاختبارات أيضاً عاملاً مناخياً معيناً يحد من التحلل الحيوي مثل الرقم الهيدروجيني المرتفع أو المنخفض جداً. وكثيراً ما يكون التعرف على العامل المحدد أمراً صعباً. فعلى سبيل المثال، كثيراً ما توجد الملوثات كمخلوط، وقد يكون لأحد مكونات خليط الملوثات تأثيرات سامة على نمو ونشاط الكائنات الدقيقة المحللة. وبنفس الكيفية، يكون من الصعب تقدير انخفاض التيسر الحيوي، الذي يعتبر عاملاً آخر يمكن أن يحد من الإصحاح الحيوي.

وتقوم معظم تقنيات الإصحاح الحيوي التي تم تطويرها على عمليتين قياسيتين وهما: إضافة الأكسجين وإضافة المغذيات الأخرى.

جدول (1-11): الوضع الحالي لإمكانية تطبيق الإصحاح الحيوي.

الفئة الكيميائية	تكرار الحدوث	وضع الإصحاح البيولوجي	دليل النجاح مستقبلاً	السلبيات
هيدروكربونات ومشتقاتها: جازولين، زيت وقود	شائع جداً	مؤكد معروف	يكون طور سائل لا مائي.	
هيدروكربونات أروماتية متعددة الحلقات	شائع	في بدايته	قابل للتحلل بيولوجياً تحت ظروف هوائية وتحت مدى ضيق مسن السطحية.	تدمص بقوة على المواد الصلبة تحت الظروف.
كربوسوت	غير شائع	في بدايته	سريع التحلل بيولوجياً وتحت ظروف هوائية.	يدمض بقوة على المواد الصلبة تحت السطحية، ويكون طور سائل لا مائي.
كحولات، كيتونات، أسترات	شائع	مؤكد معروف		
أثيرات	شائع	في بدايته	قابل للتحلل بيولوجياً تحت مدى ضيق مسن الظروف باستخدام ميكروبات هوائية أو ميكروبات مختزلة للنترات.	
مركبات أليفاتية مهلجنة: عالية الكلورة	شائع جداً	في بدايته	قابلة للتحلل البيولوجي تحت مدى ضيق مسن الظروف، بواسطة ميكروبات لا هوائية، وبواسطة ميكروبات هوائية في بعض الحالات الخاصة.	يكون طور سائل لا مائي.
مكلورة بدرجة أقل	شائع جداً	في بدايته	قابلة للتحلل البيولوجي هوائياً تحت مدى ضيق من الظروف، بواسطة ميكروبات لاهوائية جزئياً.	يكون طور سائل لا مائي .
مركبات أروماتية مهلجنة : عالية الكلورة	شائع	في بدايته	قابلة للتحلل البيولوجي هوائياً مدى ضيق من الظروف بواسطة ميكروبات لاهوائية جزئياً.	يدمض بقوة على المواد الصلبة تحت السطحية؛ تكون أطوار لا مائية صلبة أو سائلة.
مكلورة بدرجة أقل	شائع	في بدايته	عالية القابلية للتحلل البيولوجي تحت ظروف هوائية.	يكون طور لا مائي – صلب أو سائل.
ثنائية الفينولات متعددة الكلورة: عالية الكلورة.	غير شائع	في بدايته	يتم تحللها جزئياً بواسطة ميكروبات لا هوائية	تدمص بقوة على المواد الصلبة تحت السطحية
مكلورة بدرجة أقل.	غير شائع	في بدايته	قابلة للتحلل البيولوجي هوائياً تحت مدى ضيق من الظروف.	تدمص بقوة على المواد الصلبة تحت السطحية.
مركبات أروماتية تحتوي على نيتروجين.	شائع	في بدايته	قابلة للتحلل البيولوجي هوائياً، تتحول إلى أمحاض عضوية متطايرة تحت ظروف لاهوائية.	
فلزات: Cr, Cu, Ni, Pb, Hg, Cd, Zn	شائع	ممكنة	يمكن أن تتغير الذوبانية والتفاعلية بواسطة عمليات ميكروبية متنوعة.	التيسر متغير جداً ومحكوم بكميائية الطورين الصلب والسائل .



1.1.4.11 إضافة الأكسجين أو غازات أخرى

يعتبر تيسر الأكسجين واحداً من أكثر العوامل الحدية شيوعاً في الإصحاح البيولوجي. ويلزم توفر الأكسجين لحدوث التحلل البيولوجي الهوائي (انظر الجزء 1.1.3.7). إضافة إلى ذلك فإن الأكسجين قليل الذوبانية في الماء، وله معدل انتشار (حركة) منخفض خلال كل من الهواء والماء. إن هذه العوامل الثلاثة مجتمعة تجعل من السهل فهم أن عدم توفر الإمداد من الأكسجين عادة ما يحد من عملية الإصحاح الحيوي.

تم تطوير عدة تقنيات للتغلب على شح الأكسجين، كالنظام النموذجي للإصحاح الحيوي المبين في الشكل (11-17). ويستخدم هذا النظام لمعاملة طبقة معينة حاملة للماء، إضافة للظوق الملوث فوق مستوى الماء الحر. ويضم هذا النظام سلسلة من آبار الحقن أو المسارب (galleries) وسلسلة من آبار الاسترجاع (recovery wells)، وهو بذلك يوفر أسلوباً مزدوجاً للإصحاح الحيوي. أولاً، تزيل آبار الاسترجاع المياه الجوفية الملوثة، التي تعامل فوق سطح الأرض، ويستخدم في هذه الحالة مفاعل بيولوجي يحتوي على كائنات دقيقة متأقلمة مع الملوث. وبعد معاملة المفاعل الحيوي، يزود الماء بالأكسجين والمغذيات (التي قد لا تلزم إذا كان مستوى التلوث منخفضاً جداً). ثم تحقن مرة ثانية خلال الطبقة تحت السطحية. وتوفر المياه التي يعاد حقنها بالأكسجين والعناصر المغذية لتحفز التحلل الحيوي عند الموقع. إضافة إلى ذلك، تقوم المياه المعاد حقنها بغسل الطبقة غير المشبعة للتربة والمساعدة في إزالة الملوث للقيام بمعاملته فوق سطح الأرض باستخدام المفاعل البيولوجي.

ويعتبر أسلوب المعالجة هذا مثلاً ناجحاً جداً للمعاملات الفيزيائية والكيميائية والحيوية التي يمكن أن تستخدم معاً لتعظيم فعالية المعالجة .

التهوية البيولوجية (Bioventing): هي عبارة عن أسلوب يستخدم لإضافة الأكسجين مباشرة لموقع التلوث في الطبقة غير المشبعة من التربة. وتعتبر التهوية الحيوية مزيجاً من تقنية تهوية التربة والإصحاح الحيوي. وتشمل منطقة التهوية الحيوية التي تشير إليها الأسهم (في الشكل 11-7ب) تدفق الهواء لكل من الطبقة غير المشبعة والمناطق الملوثة تحت مستوى سطح الماء الحر مباشرة. وكما هو موضح في هذا الشكل، فقد تم بناء سلسلة من الآبار تحيط بموقع التلوث. ولبدء التهوية الحيوية يتم إجراء عملية تفريغ لهذه الآبار لإجبار حركة الهواء المتسارعة خلال موقع التلوث. ويزيد ذلك بفعالية من كمية الأكسجين في أرجاء الموقع، ومن ثم معدل التحلل البيولوجي للملوث. وفي حالة الملوثات المتطايرة، يتم التخلص من بعضها أثناء ضخ الهواء خلال هذا النظام انظر الجزء (4.3.11). ويمكن لهذا الهواء الملوث أن يعامل أيضاً بيولوجياً بتمريره خلال طبقات تربة كمرشحات بيولوجية فوق سطح الأرض بواسطة عملية تسمى الترشيح البيولوجي (biofiltration)، كما هو مبين في الشكل (11-7ب). ويوضح الشكل (11-8) وحدة تشغيل لتهوية التربة تستخدم الترشيح أو التنقية البيولوجية للتعامل مع أبخرة نفطية تتسرب من خزان تجميع تحت الأرض (LUST).

بالمقابل، يمكن أن يستخدم أسلوب ضخ الهواء لإضافة الأكسجين للمنطقة المشبعة من التربة (شكل 11-7ج). ويستخدم في هذه العملية بئر مزود بألة ضخ هواء (air sparger well) لحقن الهواء تحت ضغط إلى ما تحت طبقة الماء الحر. ويحل الهواء الذي

يحقن محل الماء في بنية التربة مكوناً مسامية ممتلئة بالهواء بصورة مؤقتة . ويؤدي ذلك إلى رفع مستويات الأكسجين، وهو ما يسرع من معدلات التحلل الحيوي . إضافة إلى ذلك، يمكن أن تزال المركبات العضوية المتطايرة، التي تتطاير داخل تيار الهواء عن طريق بئر استخلاص البخار، كما تمت مناقشته في الجزء (4.3.11). ويمكن إضافة غاز آخر هو الميثان مع الأكسجين إلى المياه الجوفية بعد استخلاصها وإعادة حقنها إلى داخل الطبقة المشبعة. ويستخدم الميثان تحديداً لتحفيز الكائنات المحللة للميثان (methanotropic) والتحلل نتيجة الأيض المشترك (cometabolic degradation) للمذيبات الكلورية (chlorinated solvents). وكما تم وصفه بالجزء (2.7) فإن الكائنات المحللة للميثان تنتج أنزيم ميثان أحادي الأكسجيناز (methane monooxygenase) لتحليل الميثان، كما يحلل هذا الأنزيم بالاستقلاب المشترك (cometabolically degrades) عدة مذيبات مكلورة. ويتم حالياً اختبار التحلل نتيجة الأيض المشترك لمذيبات مكلورة في تجارب حقلية لمعرفة مدى فائدة هذه التقنية.

2.1.4.11 إضافة المغذيات

تأتي إضافة المغذيات خاصة النيتروجين والفوسفور؛ في المرتبة الثانية من حيث الأهمية في عملية الإصحاح الحيوي بعد إضافة الأكسجين فقط من حيث الأهمية. إذ أن هناك كثيراً من المواقع الملوثة التي تحتوي على مخلفات عضوية غنية في الكربون لكنها فقيرة في النيتروجين والفوسفور.



أ) وحدة استخلاص بخار التربة



ب) منظر جانبي لمرشح حيوي

شكل (8-11): الإصحاح الحيوي لأبخرة نפט متسربة من خزان تجميع تحت الأرض. (أ) تشير الأسهم الحمراء إلى اتجاه تدفق الهواء من الأرض ومن خلال شبكة الأنابيب (manifolds)، التي تتحكم في تدفق الهواء. يمر الهواء بعدها خلال المرطب (humidifier)، وهو عبارة عن خزان يحتوي على ماء، ومنه إلى داخل المرشح البيولوجي (biofilter). تعمل الأسطوانات العمودية الكبيرة الحمراء اللون كعوائق حماية. (ب) يتدفق الهواء خلال المرشح البيولوجي عبر أنبوب يمتد بطول قاعه ومنه إلى داخل التربة عن طريق فتحات (orifices) بالأنبوب.

وقد تم شرح إضافة المغذيات في نماذج الإصحاح البيولوجي كما هو مبين في الأشكال (11-7 أ و 11-7 ب). ويجري حقن المحاليل المغذية من نظام تغذية فوق سطح الأرض. إن الهدف من حقن المغذيات يتمثل في تحقيق نسب نموذجية من الكربون/ النيتروجين/ الفوسفور (C:N:P) في الموقع لتكون عند (100:10:1) تقريباً. لكن إدمصاص المغذيات المضافة تجعل من الصعب تحقيق النسبة المثالية.

3.1.4.11 تحفيز التحلل اللاهوائي باستخدام قابلات إلكترونا بديلة

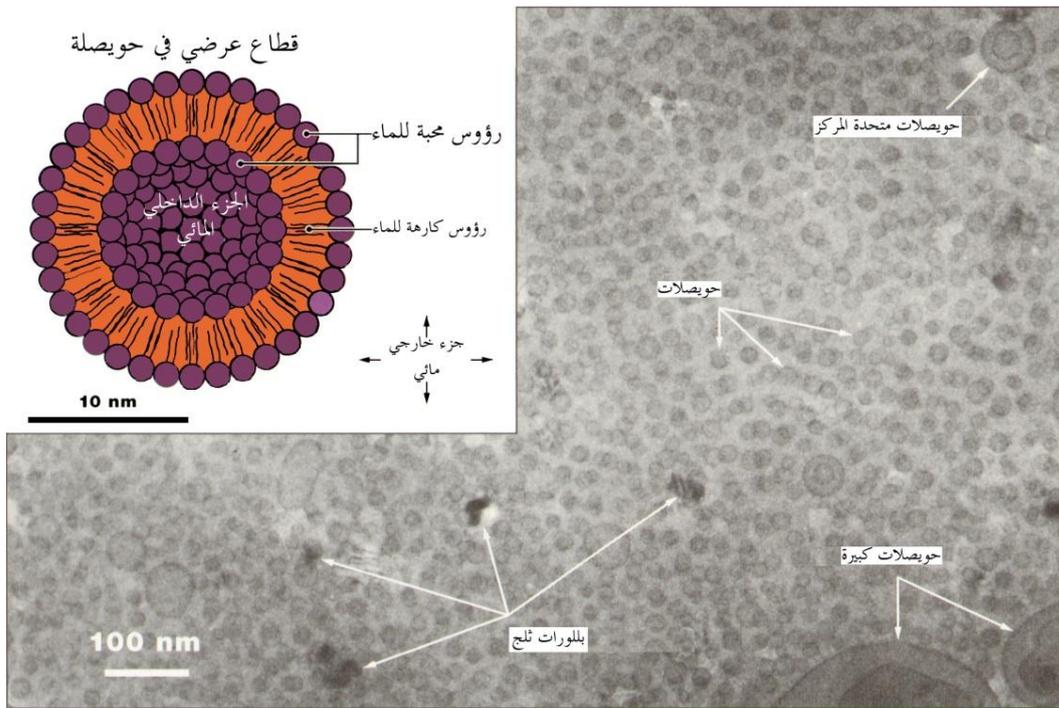
حتى وقت قريب، لم ينظر إلى التحلل اللاهوائي لكثير من المركبات العضوية على أنه ممكناً. أما الآن فقد أقتح أن يكون وسيلة إصحاح بيولوجي بديلة، على الرغم من أن التحلل الهوائي عموماً يعتبر عملية أسرع بكثير. ونظراً لأنه من الصعب تأسيس ظروف هوائية والمحافظة عليها في بعض النظم تحت السطحية المشبعة، فقد اقترحت مستقبلات إلكترونا بديلة عديدة لاستخدامها في التحلل اللاهوائي. وتشمل هذه المستقبلات أيونات النترا، والكبريتات والحديد (Fe^{3+})، إضافة لثاني أكسيد الكربون.

وعلى الرغم من محدودية عددها، فإن التجارب الحقلية أظهرت نتائج واحدة للنترا. إن هذا المجال الجديد نسبياً في الإصحاح الحيوي سيلقى دون شك اهتماماً متزايداً في السنوات القليلة القادمة.

4.1.4.11 إضافة المنشطات السطحية (Surfactants)

في حين أن استخدام المنشطات السطحية قد تم دراسته من زاوية تحسين أسلوب الضخ والمعاملة، كما تم مناقشة ذلك في الجزء (3.3.11)، فقد اقترح إضافتها أيضاً كوسيلة

لتحفيز التحلل البيولوجي للملوثات. ويمكن تصنيع هذه المواد كيميائياً، لكنها تنتج أيضاً بواسطة كثير من الكائنات الدقيقة. وتعرف المواد المنشطة المنتجة ميكروبياً باسم المواد المنشطة الحيوية (biosurfactants) (انظر الشكل 9.11). ومثل المنشطات السطحية المصنعة، فإن الحيوية منها تزيد من ذوبانية الملوثات وتقلل من إدمصاصها، ومن ثم تزيد من تيسرها بيولوجياً وتخفض معدلات التحلل الحيوي.



شكل (9-11): صورة إلكترونية لمادة منشطة سطحية تم إنتاجها ميكروبياً. يعمل هذا المركب كصابون بيولوجي ويساعد على إذابة الملوثات العضوية ذات الذوبانية المنخفضة في الماء.

5.1.4.11 إضافة كائنات دقيقة

إذا ما كانت الكائنات الدقيقة المناسبة غير موجودة في التربة أو أن عدد الميكروبات قد انخفض بسبب سمية الملوثات، يمكن أن تضاف كائنات دقيقة محددة "ككائنات مُدخلة" لتحفيز التجمعات الميكروبية الموجودة. وتعرف هذه العملية بالتحسين البيولوجي (bioaugmentation). ويستطيع العلماء في الوقت الحاضر تخليق كائنات فذة (superbugs)، وهي كائنات تستطيع تحليل الملوثات بمعدلات شديدة السرعة. ويمكن تطوير هذه الكائنات من خلال ألقمة متتالية تحت ظروف معملية، أو يمكن هندستها وراثياً. ومن حيث التحليل البيولوجي، فإن قدرة هذه الكائنات الفذة تتجاوز بكثير الكائنات الموجودة في البيئة. ومن الطرق التي يمكن أن تستثمر الكائنات الفذة هو استخدامها في نظم المفاعلات الحيوية تحت ظروف محكمة. ويمكن تحقيق معدلات تحلل حيوي عالية الكفاءة في المفاعلات الحيوية المستخدمة في نظم المعاملة فوق سطح الأرض.

وتتمثل المشكلة في استخدام الكائنات الفذة في أن إدخال كائن دقيق معين لموقع ملوث قد يفشل لسببين اثنين. أولاً، أن الميكروب المدخل غالباً لا يستطيع توطيد موضع (niche) ملائم في البيئة؛ وفي الواقع إن الكائنات المدخلة نادراً ما تعيش في بيئة جديدة أكثر من بضعة أسابيع (أنظر الجزء 1.2.4). ثانياً: أن الكائنات الدقيقة مثلها مثل الملوثات يمكن أن تدمص بقوة بواسطة سطوح المواد الصلبة، وبذلك توجد صعوبات في توصيل الكائنات المدخلة إلى موقع التلوث. وحالياً لا يعرف إلا القليل جداً عن كيفية ترسيخ مواطن بيئية ملائمة أو عن الانتقال الميكروبي، وتعتبر هذه المواضيع محط بحث نشط. وقد يستطيع

العلماء خلال السنوات القليلة القادمة كسب مزيد من المعرفة عن السلوك الميكروبي في النظم البيئية للتربة. وحتى تكتشف آلية ناجحة لتوصيل كائنات دقيقة مدخلة وتأسيسها، فإن إضافتها لمواقع ملوثة تظل طريقة إصحاح بيولوجي غير مجدية.

6.1.4.11 الملوثات الفلزية

تقوم الأساليب الحالية للإصحاح الحيوي من الملوثات على التعقيد (complexation)، الأكسدة والاختزال وتفاعلات الألكلة (alkylation) التي تمت مناقشتها في الجزء (5.7). وقد تم اقتراح كل من الغسيل الميكروبي (microbial leaching) والمنشطات السطحية الميكروبية (biosurfactants)، والتطابير، والتراكم البيولوجي (bioaccumulation) والتعقيد كخطط لإزالة الفلزات من البيئات الملوثة. ولسوء الحظ فإن الدراسات الحقلية المصاحبة مازالت حتى الآن قليلة.

الغسيل البيولوجي (bioleaching)

يمكن أحياناً إزالة العناصر الفلزية من التربة بواسطة الغسيل الميكروبي. وقد استخدم هذا الأسلوب في المناجم لإزالة فلزات مثل النحاس والرصاص والزنك من خامات ذات جودة متدنية.

ويتم في الغسيل البيولوجي إذابة الفلزات نتيجة لإنتاج حمض بواسطة كائنات دقيقة معينة مثل *Thiobacillus ferrooxidans* و *T.thiobacillus*. وبنفس الطريقة، استخدمت هذه العملية في الإصحاح البيولوجي لغسل اليورانيوم من ترب ملوثة بمخلفات نووية وكذلك لإزالة نفايات النحاس (copper tailings). توجد إمكانية لتطبيق آخر وهو معاملة المواد

الصلبة للصرف الصحي قبل التخلص منها في التربة (انظر أيضاً الجزء 4.10). وتظهر الترب المعاملة بالمخلفات الصلبة (sludge) تحسناً في إنتاجيتها، لكنها تظهر أيضاً زيادة في محتواها من الفلزات. لقد أظهرت الدراسات المعملية فعالية كل من T.ferrooxidans و T.thiooxidans في غسل الفلزات من مخلفات عضوية صلبة قبل إضافته للتربة. ويمكن أيضاً استخدام المنشطات السطحية البكتيرية (bacterial surfactants) لإزالة الفلزات من ترب ومياه ملوثة.

التطاير (Volatilization)

على الرغم من أن الألكلة (alkylation) لا تعتبر تفاعلاً مرغوباً، خاصة في حالة الزرنينخ أو الزئبق، إلا أن الألكلة وما يليها من تطاير قد اقترحت كطريقة لمعالجة ترب ورسوبيات ملوثة بالسيلينيوم. فعلى سبيل المثال، تمت معالجة ترب ملوثة بالسيلينيوم بسان يوكين، كاليفورنيا باستخدام تطاير السيلينيوم المحفز بإضافة البكتين في صورة قشور برتقال. لقد وجد أن إضافة بكتين قد سارع من معدل الألكلة للسيلينيوم بمعدل تراوح ما بين 11.3 إلى 51.4% من السيلينيوم المضاف؛ إن هذه النتيجة تبين أن التطاير أسلوب مجدى لمعاملة الترب الملوثة بالسيلينيوم .

التراكم البيولوجي/ والتعقيد

تستند تقنيات إزالة الفلزات من المحلول إلى عدة تفاعلات محددة بين العنصر والميكروبات من بينها ربط أيونات الفلز على سطوح الخلايا الميكروبية وامتصاص الفلزات لتصبح جزءاً من البناء الخلوي للميكروبات، وترسيب الفلزات من خلال التعقيد بواسطة

روابط (ligands) منتجة ميكروبياً. وتؤدي هذه التفاعلات إلى التراكم البيولوجي للفلزات داخل الخلايا أو على سطح الخلية. وتشمل معاملة جداول المخلفات عموماً استخدام أغشية حيوية (biofilms)، وهي أغشية مركزة من الكائنات الدقيقة التي قد تتكون من بكتيريا أو فطريات أو طحالب. وتستخدم بعض الأنظمة كائنات نشطة، بينما تستخدم أنظمة أخرى خلايا معالجة غير نشطة. وفي أي من الحالتين، تقوم الأغشية الحيوية أساساً بشد الفلزات عند ضخ المياه الملوثة خلالها. وقد استخدم التراكم البيولوجي لمعاملة الصرف الحمضي للمناجم، ومياه الدفق للمناجم وجداول المياه العادمة من التصنيع النووي. وتشمل الفلزات التي يتم إزالتها كل من الزنك والنحاس والحديد والمنجنيز والرصاص والكاديوم والزرنيخ واليورانيوم .

2.4.11 المعاملة الكيميائية عند الموقع

المعالجة الكيميائية عند الموقع هي عملية يتم فيها تفكيك الملوث عن طريق تحفيز تفاعل تحول، مثل التحلل الكهربائي للماء (hydrolysis) أو الأكسدة/الاختزال، داخل التربة أو النطاق غير المشبع من القطاع. وعلى الرغم من أن هذا الأسلوب قد استخدم بدرجة أقل مقارنة بالمعالجة البيولوجية عند الموقع، فقد بدأ يلقي اهتماماً متزايداً. ويمكن إنجاز هذا الأسلوب عن طريق حقن مادة كاشفة (reagent) داخل النطاق الملوث من الطبقة تحت السطحية أو بوضع عائق منفذ تحت مستوى تواجد التلوث. إن العامل الأهم في تحديد كفاءة أسلوب الحقن يتمثل في توصيل المادة المستخدمة في المعالجة إلى الأماكن المستهدفة.

وتعتبر جدران أو حواجز المعالجة عند الموقع ذات أهمية خاصة للمذيبات الكلورية مثل (trichloroethene). ويشمل هذا الأسلوب حفر خندق يمر تحت جبهة الملوث (contaminant plume) وملئه بجدار من مادة منفذة قادرة على تفكيك الملوث وتحويله إلى مكونات غير سامة. ويكون الجدار منفذا بحيث يمكن للماء الذي أزيل منه الملوث المرور خلاله. فمثلاً، يمكن لمادة مائنة تحتوي على الحديد، تفكيك مركبات مثل (trichloroethene) بتفاعلها مع ذرات كلور مع السماح للماء بالمرور بحرية خلال الجدار.

حالة للدراسة: ناقلة النفط (The Exxon Valdez)

في مارس من عام 1989، انسكب 40.9 مليون لتر من الزيت الخام من حاملة النفط الضخمة - (The Exxon Valdez) - في منطقة Prince William Sound بولاية ألاسكا. أنتشر الزيت بواسطة عاصفة، فغطى شواطئ الجزر في هذه المنطقة. وبداية، فإن أكثر من 2200 كيلومتر من سواحل ولاية ألاسكا قد تلوثت. وقد سجلت تسوية قضائية بمبلغ 900 مليون دولار دفعتها شركة إكسون لتغطية تقييم الأضرار وإعادة الموارد الطبيعية إلى حالتها السابقة. وقد أنفق جزء هام من هذا المبلغ على التنظيف الاعتيادي، الذي تم بواسطة طرق يدوية لكن هذه الطرق فشلت في إزالة كل الزيوت على الشواطئ، وخاصة تلك التي توجد تحت الصخور وفي رسوبيات الشاطئ. وفي أواخر شهر مايو من عام 1989، توصلت شركة إكسون إلى اتفاقية تعاون مع وكالة حماية البيئة (EPA) لاختبار المعالجة البيولوجية كاستراتيجية للتنظيف. إن الأسلوب الذي تم اتباعه يعتمد على استثمار الظروف السائدة إلى أقصى حد ممكن، فمثلاً، تبين للعلماء وبسرعة أن الشواطئ من المتوقع أن تحتوي على كائنات متوطنة ومتأقلمة مع المناخ البارد وقادرة على تحليل الزيت. وفي البداية، أظهرت الدراسات أن الشواطئ الملوثة تحتوي فعلياً هذا النوع من الكائنات، مع وفرة لمصدر الكربون (من الزيت المسكوب) وقدر كافٍ من الأكسجين. وفي الواقع، يبدو واضحاً أن التحلل البيولوجي، الذي يسمى أيضاً المعالجة الحيوية الضمنية، قد بدأت فعلياً في الموقع. وكشفت الدراسات اللاحقة أن العوامل المحددة لمعدلات التحلل الضمني قد تمثلت في مدى وفرة المغذيات مثل النيتروجين والفوسفور وبعض العناصر الصغرى. وعند تلك النقطة، كان الوقت مناسباً في معاملة المواقع الملوثة لأن الموسم الدافئ نسبياً بولاية ألاسكا كان يقترب من

نهايته بسرعة. لذلك، تقرر محاولة تحفيز معدلات التحلل البيولوجي الداخلية بمعاملة المناطق الملوثة بالنيتروجين والفوسفور.

وفي بداية شهر يونيه 1989، بدأ العمل الاستكشافي الميداني. فقد تم اختبار عدة تركيبات مختلفة لأسمدة مغذية وطرق إضافة. وكانت إحدى المشاكل التي تمت مواجهتها تأثير المد البحري الذي يؤدي إلى غسل المغذيات المضافة بسرعة. وبذلك أجرى اختبار لسماذ محب للزيت (oleophilic fertilizer) اسمه (Inipol EPA-22) يلتصق على السطوح المغطاة بالزيت، وسماذ قابل للذوبان ببطء في الماء اسمه (Customblen) كمصادر للمغذيات. وخلال أسبوعين تقريباً من إضافة السماذين، أظهرت سطوح الصخور المعاملة بسماذ (Inipol EPA-22) انخفاضاً ملحوظاً في كمية الزيت. ولاحقاً، خلصت دراسات علمية حول فعالية المعالجة البيولوجية في منطقة Prince William Sound إن هذا الأسلوب قد حفز الإزالة بما يعادل ثلاثة إلى 18 مرة مقارنة بمعدل التحلل الحيوي الضمني ودون أية تأثيرات ضارة على البيئة.

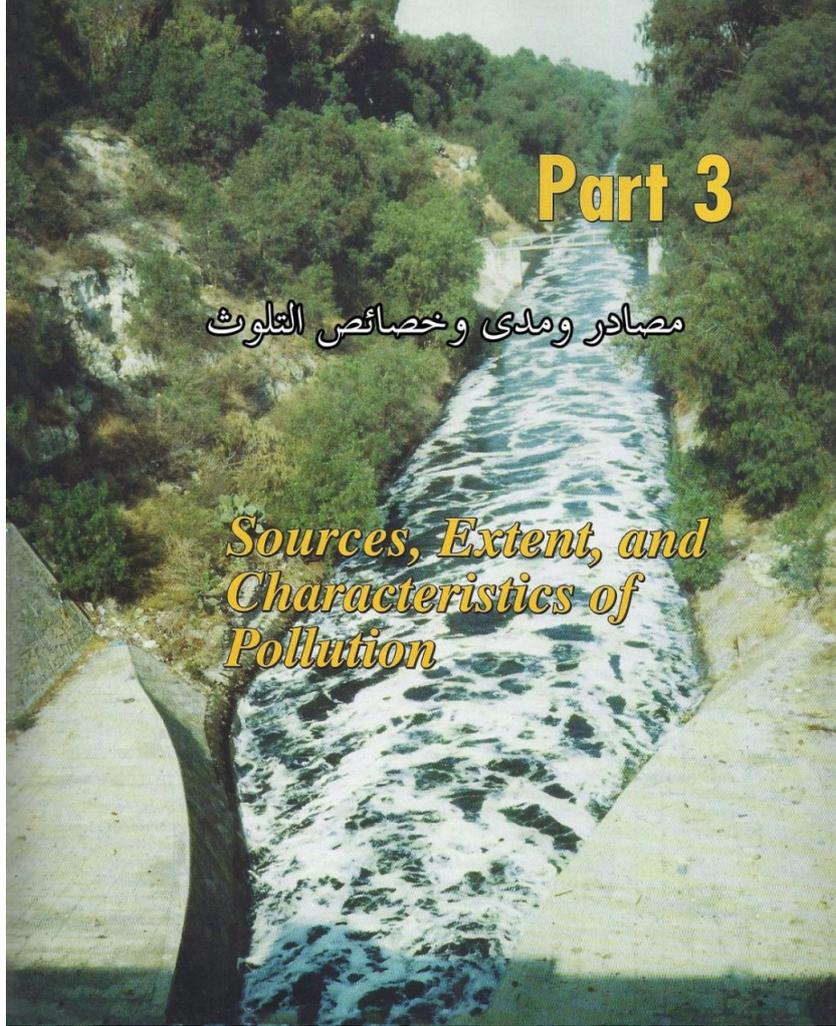
لقد اعتبرت المعالجة الحيوية في المنطقة المذكورة Prince نجاحاً ليس فقط لأن مناطق ملوثة قد تم استعادتها لحالتها الطبيعية، ولكن لأن المعدل السريع لإزالة التلوث النفطي منع انتشار النفط للمناطق غير الملوثة. إن هذه الحالة الموثقة والبادية الوضوح قد ساعدت على لفت الانتباه لإمكانيات المعالجة الحيوية.

المراجع ولمزيد الاطلاع

- Champion J.T., Gilkey J.C., Lamparski H., Retterer J., and Miller R.M. (1995) Electromicroscopy of rhamnolipid (biosurfactant) morphology: Effects of pH, cadmium, and octadecane. *Journal of Colloid and Interface Science*. 170, 569-574.
- National Research Council (1993) *In Situ Bioremediation, When Does It work?* National Academy Press, Washington. D.C.
- National Research Council (1994) *Alternatives for Ground Water Cleanup*. National Academy Press, Washington. D.C.
- Norris R.D. and Matthews J.E. (1994) *Handbook of Bioremediation*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- U.S. EPA (1985) Remedial Action at Waste Disposal Sites. EPA/625/6-85/006. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1988) Guidance for Conducting remedial Investigations and Feasibility Studies under CERCLA. EPA 540/G-89/004. United states Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

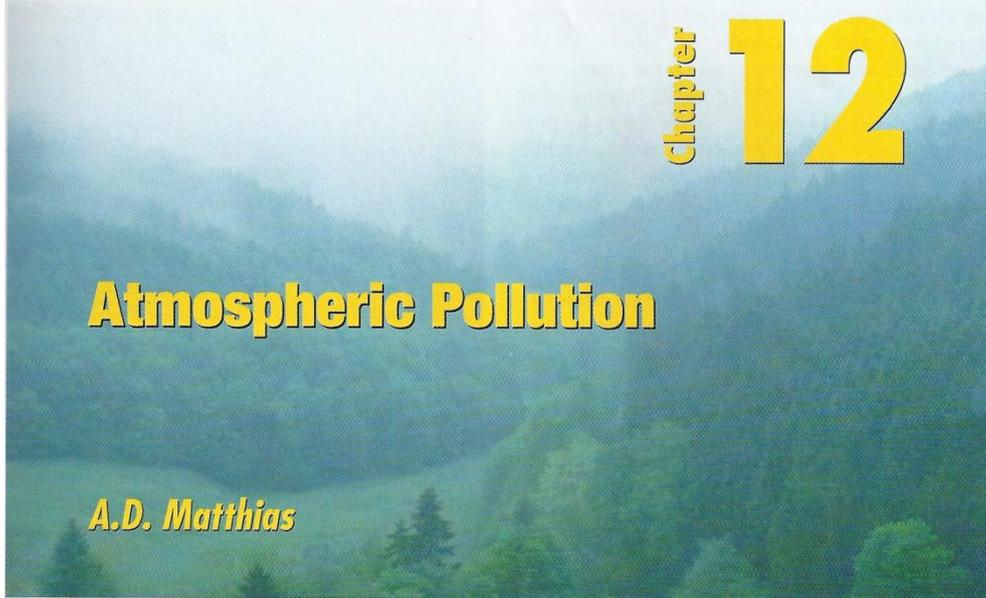
أسئلة ومساائل حسابية

1. حجم صغير من التربة بأبعاد: 10م × 20م × 5م ملوثة بمادة مشعة. ما هو الإجراء العلاجي الذي توصى به؟ اشرح.
2. مياه جوفية ملوثة بمادة (trichloroethene, TCE)، ما هو الإجراء العلاجي الذي ستوصى به: (أ) احتواء جبهة الملوث (contaminant plume)، (ب) تنظيف المياه الملوثة؟
3. اذكر أربعة عوامل يمكن أن تحد من فعالية تهوية التربة كإجراء علاجي.
4. ما هي المعالجة الحيوية المطبقة بنجاح وعلى نطاق واسع بالولايات المتحدة الأمريكية على مدى عقود عديدة ماضية؟ لماذا كانت ناجحة؟
5. ما هي الأشياء الثلاثة التي تضاف روتينياً للمواقع الملوثة لتسريع العلاج الحيوي؟ لماذا؟
6. ما هي العوامل الرئيسة التي يتعين اعتبارها عند تقييم كفاءة عائق مادي؟ عائق هيدروليكي؟ قارن الاثنين.



مصعب مياه صرف صحي يدفع بمياه غير معالجة من مدينة مكسيكو لنهر تولا، الذي ينقلها إلى مناطق زراعية خارج المدينة، لقد استفادت المجتمعات الزراعية التي تستقبل مياه الصرف هذه من المغذيات التي تضيفها للتربة وفي ذات الوقت يتم بدرجة عالية تفادي تلوث موارد المياه الجوفية نتيجة لوجود طبقة تحت سطحية غير منفذة تحمي الطبقة الحاملة للمياه. لكن الإصابات بالديدان المعوية كانت تمثل مشكلة بين العمال الذين يلمسون مياه الصرف.

الباب الثاني عشر
تلوث الهواء الجوي



أظهر بحث حديث أن موت بعض الأشجار التي بدت عليها أعراض أضرار ناتج عن أمطار حمضية، مثل تلك بجبال هارز بألمانيا (الصورة أعلاه)، هي في الواقع تموت نتيجة أسباب أخرى، بما في ذلك تقدم العمر.

1.12 مفاهيم تلوث الهواء

سيتم في هذا الباب مناقشة ملوثات الهواء، بما في ذلك مصادرها وتأثيراتها على نشاط الإنسان، وكذلك انتقالها للهواء الجوي ومصيرها فيه. كما سيتم أيضاً وصف دور تلوث الهواء في القضايا البيئية الرئيسية كالاختلال القائم للاحتباس الحراري واستنزاف الأوزون.

يعرف ملوث الهواء بأنه أي غاز أو مادة معلقة يمكن أن يؤدي وجودها بتركيزات عالية بدرجة كافية، أن تصبح ضارة للحياة و/ أو الممتلكات. وقد يتولد الملوث من مصادر طبيعية أو بشرية، أو الاثنين معاً. توجد ملوثات خلال معظم الطبقة السفلي من الغلاف الجوي (التروبوسفير)؛ لكن التلوث القريب من سطح الأرض داخل الطبقة الفاصلة يعتبر الأكثر أهمية نظراً للتراكيز المرتفعة نسبياً الناتجة عن مصادر عند السطح (انظر الجزء 5.2.3). تعتمد تراكيز ملوثات الهواء الجوي على الكتلة الكلية للتلوث المنبعث إلى الهواء الجوي، إضافة للظروف الجوية التي تؤثر على مصير التلوث ونقله. من الواضح، أن تلوث الهواء له مصادر متعددة ومتنوعة، تشمل السيارات، والمداحن، وإضافات صناعية أخرى تدخل الهواء الجوي إضافة للتعرية الريحية للتربة. وتؤدي الانبعاثات الضخمة من مصادر بشرية وطبيعية على امتداد فترات زمنية طويلة إلى ازدياد تراكيز، وكذلك تغير في الخصائص الكيميائية والطبيعية لهذه الملوثات. فمثلاً تنبعث أكاسيد النيتروجين والهيدروكربونات من عادم السيارة إلى هواء دافئ، وفي وجود هواء وضوء، تتكون على الفور جزيئات أوزون (O_3). وبالمثل، تؤثر ذوبانية ملوث معين على مدى كفاءة إزالته بواسطة الأمطار.

تتميز الظروف الجوية بأن لها تأثيراً أساسياً على الملوثات بمجرد انبعاثاتها (مثل: أكاسيد النيتروجين من عادم سيارة) أو تكونها داخل الهواء الجوي (مثل الأوزون O_3). ويتم التحكم في انتشار التلوث عن طريق حركة الهواء الجوي التي تتأثر بالرياح، والاستقرار، والتباين العمودي في درجة الحرارة داخل الطبقة الفاصلة. ويؤثر الاستقرار بدوره على كل من اضطراب الهواء والعمق الذي عنده يجرى خلط الهواء الملوث.

تحدد الرياح الحركة الأفقية للتلوث في الهواء الجوي. ويتم عموماً أنتشار جبهة تلوث منبعث من مصدر محدد، مثل المداخن، مع اتجاه الرياح على شكل قمع (plume). وتحدد سرعة الرياح معدل انتقال محتويات الجبهة. ويؤدى مرور رياح قوية فوق سطوح أراضي غير مستوية إلى تخفيف خلط الهواء عن طريق خلق شد قصى (خلط ميكانيكي) بما يشبه ما يتولد عندما تقوم مروحة كهربية بتدوير الهواء في حجرة معينة. أيضاً، فإن اتجاه الرياح يحدد المسار الذي يتبعه التلوث.

بمجرد وجوده في الطبقة الفاصلة من الهواء الجوي، فإن الملوث قد يتعرض لسلسلة من التحولات المعقدة ينتج عنها ملوثات جديدة، مثل O_3 . كذلك، فإن إزالة الملوثات من الهواء بواسطة الأمطار والثلوج، والجاذبية الأرضية، أو عن طريق الترسيب السطحي تتأثر بظروف الطبقة الفاصلة. أيضاً، فإن عمليات الإزالة هذه تتأثر أيضاً، بدورها بنوع خشونة الطبقة السطحية للأرض.

إن تراكيز الملوثات، حتى عندما تكون الانبعاثات شبه ثابتة، يمكن أن تتغير بسرعة نظراً للتباينات في أحوال الهواء الجوي. وعندما تكون ظروف الهواء الجوي مستقرة، فإن الانبعاثات المتدنية نسبياً يمكن أن تسبب تراكماً للتلوث إلى مستويات خطيرة - وهي الحالة التي تحدث أثناء انقلاب الإشعاع بالليل. وبالمقابل، فإن الظروف غير المستقرة، مثل الرياح والأمطار، قد تخفف بشكل فعال التلوث إلى تراكيز آمنة نسبياً على الرغم من وجود معدلات انبعاث عالية نوعاً ما. يعتبر تلوث الهواء، الذى يمثل قضية هامة لعامة الناس، موضوع بحث علمي مكثف في الوقت الحاضر. إذ أن تأثيرات تلوث الهواء على الحياة، بما في

ذلك صحة الإنسان، والإنتاجية والممتلكات لم تفهم بشكل كامل حتى الآن، على الرغم من أن التعرض لمستويات تلوث عالٍ مسألة يومية لكثير من الناس. وتعتبر تكلفة مثل هذا التلوث باهظة، بغض النظر فيما عُبِّرَ عن ذلك على أساس ما يترتب عنه من تأثيرات بيولوجية مباشرة أو فيما إذا نُظِرَ إليه على أساس التأثيرات الاقتصادية السلبية. ويؤثر تلوث هواء المدن على ما يقرب من بليون من البشر على مستوى العالم، ويعرضهم لمخاطر صحية محتملة.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية وحدها تصرف سنوياً بلايين الدولارات لمنع، والتحكم وإزالة تلوث الهواء، كما أن دولاً متقدمة أخرى تتعرض لتكاليف مشابهة. وتعتبر الأمم المتحدة تلوث الهواء مشكلة دولية كبرى.

بشكل عام، فإن تلوث الهواء يستطيع أن يضر بالحياة. فهو يضر نظام التنفس للإنسان، حيث يمكن أن تنتج النفاخ الرئوي (Emphysema) والربو (asthma) وأمراض تنفسية أخرى أو تزداد حدتها عن طريق التعرض المزمن للملوثات معينة، مثل الأوزون (O_3). كذلك فإن الغطاء النباتي يمكن أيضاً أن يتعرض للضرر من خلال امتصاصه للملوثات عن طريق مسام الأوراق أو عن طريق تراكم الملوثات على سطوح الأوراق. فمثلاً، يمكن أن تؤدي التركيزات العالية من ثاني أكسيد الكبريت، إلى موت أجزاء من أوراق النباتات الحساسة. كما يؤدي تعرض النباتات لمستويات منخفضة من التلوث ولمدة طويلة إلى تقليل مقاومتها للأمراض والحشرات الضارة.

يمكن لتلوث الهواء أن يؤدي الممتلكات. إذ يستطيع أن يشوه الواجهات الخارجية للمباني، وخاصة تلك المكونة من المواد الجيرية التي تتفاعل مع الأحماض (انظر الشكل 12-1). وهناك دليل آخر يوضح التأثيرات المدمرة لتلوث الهواء على الممتلكات يمكن مشاهدته من خلال الضرر الذي يلحق بطلاء السيارات التي تترك واقفة في مسار هبوب الرياح من مصانع إذابة صهر الخامات (ore smelters).

2.12 مصادر تلوث الهواء

إن تلوث الهواء ليس مشكلة جديدة. ويشير وجود عنصر الرصاص في ترسبات بحيرات بالسويد أن تلوث الهواء الناتج عن تعدين الرصاص والفضة أيام الإغريق والرومان أثر على جودة الهواء عبر أوروبا كلها. وترتبط الكتابات القديمة أساساً بتلوث الهواء إلى حرق الخشب والفحم. فمثلاً، في القرن الثالث عشر، منع الملك إدوارد الأول لبريطانيا استخدام الفحم البحري، لأن حرقه ينتج عنه كميات كبيرة من السناج (soot) وثاني أكسيد الكبريت في الهواء الجوي فوق مدينة لندن (انظر الشكل 23-3 كمثال حديث). وقد زادت الثورة الصناعية التلوث كثيراً مما أدى إلى تدهور جودة الهواء بدرجة عالية في أوروبا و أمريكا الشمالية. ومع منتصف القرن التاسع عشر، فإن كثيراً من المدن في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا قد بدأت تعاني من نتائج تلوث الهواء. ومع بداية القرن العشرين، خصص مصطلح الضباب الدخاني (smog) (الضبخان) لوصف التركيبة الضارة الناتجة عن تجمع الدخان (smoke) والضباب (fog) في مدينة لندن. وفي مدينة لوس أنجلوس الأمريكية

أصبحت كاشفات الضبخان الكيموضوئية (photochemical) شائعة وذلك في منتصف الأربعينيات من القرن الماضي.

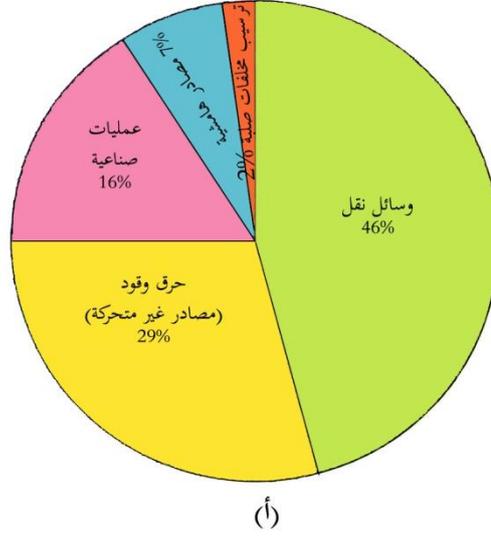
وقد حدثت أول كارثة حقيقية لتلوث الهواء في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1948، عندما فقدت أرواح نحو عشرين شخصاً نتيجة حجز ملوثات صناعية في هواء جوي ساكن جداً فوق دونورا بولاية بنسلفانيا بمنطقة سهل - نهر مونونجراهيلا. وفي عام 1952 وتحت ظروف هواء ساكن، تسبب حرق فحم في تطور حالة حادة من الضبخان في مدينة لندن أدى في النهاية إلى موت نحو 4000 شخص.



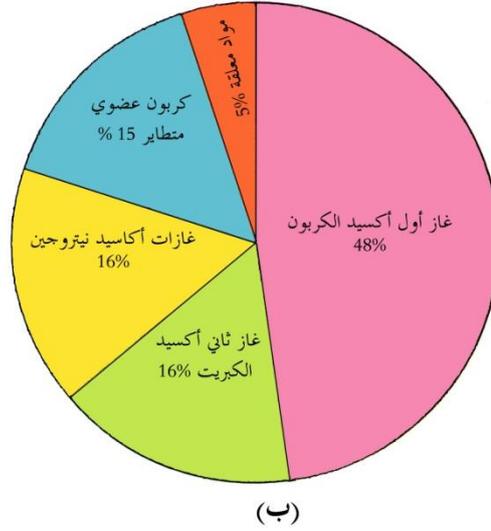
شكل (1-12): تسهم الترسبات الجوية الناتجة عن تلوث هواء المدن على امتداد فترة زمنية طويلة في تدهور النصب الرخامية، مثل هذا المعبد المبين في الصورة الذي يعود للفترة الرومانية في أثينا باليونان.

عملياً، فإن جميع المدن الكبرى تتأثر بتلوث الهواء، خاصة تلك الواقعة في سهول محاطة بالجبال (مثلاً، مدينة مكسيكو) أو على امتداد سلسلة جبلية ساحلية (مثل، مدينة لوس أنجلوس). لكنه، حتى المناطق غير المأهولة بالسكان والبعيدة عن المدن ربما تتأثر بواسطة النقل بعيد المدى للتلوث إما من المناطق الحضرية أو من تلك المصادر الريفية مثل منشآت صهر المعادن أو محطات الطاقة التي تعمل بالفحم. وعلى سبيل المثال، قد يؤدي التلوث الناتج عن محطة توليد الطاقة باستخدام الفحم في منطقة (Four Corners) في ولاية أريزونا إلى تقليل الرؤية في المتنزه القومي المسمى جراند كانيون، الذي يبعد مسافة 400 كيلومتراً غرب هذه المحطة.

إن معظم الهواء الذي نتنفسه يتكون من الأكسجين (O_2) والنيتروجين (N_2). بينما هناك نحو 1% من مكونات طبيعية مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وبخار الماء لكن جزءاً صغيراً من النسبة 1% ربما تكون ملوثات هواء، بما في ذلك غازات ومواد معلقة (بمعنى فيروسولات معلقة مكونة من مواد صلبة وسوائل). وتدخل الملوثات البشرية للهواء من مصادر ثابتة ومتحركة. وتشمل المصادر الثابتة المصانع، ومحطات توليد الطاقة الكهربائية، وصهر المعادن والمزارع. بينما تشمل المصادر المتحركة جميع أنواع وسائل النقل التي تحرق الوقود الأحفوري. وتسهم المصادر المتحركة بنحو 50% من الملوثات التي تدفع للهواء الجوي في الولايات المتحدة الأمريكية (انظر الشكل 12-2). ويسهم حرق الوقود من المصادر غير المتحركة بنحو 33%، بينما تسهم العمليات الصناعية بنحو 16% من الانبعاثات الغازية في الولايات المتحدة. وتضم المصادر الطبيعية لتلوث الهواء كل من الرياح التي تجرف الغبار من الحقول الزراعية المحروثة، والدخان الناتج عن حرائق الغابات (الشكل 12-3) ورماد البراكين الذي يندفع إلى الطبقات العليا من الهواء الجوي ليصل نطاق التروبوسفير والستراتوسفير.



(أ)



(ب)

شكل (12-2): (أ) إسهامات المصادر المختلفة لتلوث الهواء في الولايات المتحدة الأمريكية. (ب) المصادر الأساسية لانبعاث الملوثات في الولايات المتحدة الأمريكية.

توجد أنواع كثيرة لملوثات الهواء. وعلى الرغم من أن بعض الغازات، مثل CO_2 ، تنتج عن احتراق الوقود الأحفوري، إلا أنها لا تعتبر عموماً من الملوثات لأنها ضرورية لحياة النبات. كما توجد الكثير من الملوثات، مثل حبيبات الغبار، طبيعياً في الهواء الجوي وتصبح خطرة فقط عندما تتجاوز تراكيزها معايير جودة الهواء التي وضعتها بعض الوكالات المنظمة مثل وكالة المحافظة على البيئة بالولايات المتحدة (EPA). وتصنف وكالة المحافظة على البيئة ملوثات الهواء إلى قسمين عامين هما: ملوثات رئيسية وملوثات ثانوية.

1.2.12 ملوثات رئيسية

تدخل ملوثات الهواء الرئيسية الهواء الجوي مباشرة من المصادر المختلفة. وتحدد "وكالة حماية البيئة" الأمريكية خمسة أنواع من ملوثات الهواء الرئيسية لغرض التنظيم وهي: أحادي أكسيد الكربون، الهيدروكربونات، مادة معلقة، ثاني أكسيد الكبريت، وأكاسيد النيتروجين. وسيتم فيما بعد وصف كل نوع منها.

1.1.2.12 أحادي أكسيد الكربون

إن أحادي أكسيد الكربون الذي يعتبر الملوث الأساسي في هواء المدن، هو نتاج لحرق غير كامل للوقود الأحفوري. ويتميز هذا الغاز بأن له مصادر طبيعية قليلة. وهو جزء من دخان السجائر، لكن محرك الحرق الداخلي يعتبر المصدر الأساسي، حيث أن نحو 50% من إجمالي انبعاثات غاز CO في الولايات المتحدة الأمريكية مصدرها السيارات وقاطرات النقل. لذلك، فإن الانبعاثات تكون أعلى ما يمكن على امتداد الطرق السريعة والشوارع المكتظة بالمركبات. وتأسيساً على تحديد وكالة المحافظة على البيئة فإن انبعاثات غاز CO

تسهم حالياً بنحو 50% من إجمالي الانبعاثات (انظر الشكل 12-2ب). ولحسن الحظ فإن تراكيز غاز CO تتناقص في الولايات المتحدة نظراً لتحسين كفاءة السيارات في استهلاك الوقود.



شكل (12-3): الحرائق العشوائية مصدر طبيعي لتلوث الهواء الجوي. هذا المنظر لحريق في جبال شرق مدينة توسان، بولاية أريزونا الأمريكية.

يعتبر أحادي أكسيد الكربون ساماً جداً لمعظم الثدييات. وتضع "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA) معايير تحدد أقصى ما يمكن أن يتعرض له الإنسان من هذا الغاز بمقدار متوسط على مدى 24 ساعة بنحو 9 نانوليتر/ اللتر أو ما يساوي 35 نانوليتر/ لتر في الساعة الواحدة [ملاحظة: يشيع أيضاً استخدام الوحدة البديلة وهي: الجزء في البليون (ppb)].

وعندما يستنشق غاز CO فإنه يقلل من قدرة هيموجلوبين الدم لحجز الأكسجين. وعلى الرغم من أن هذا الغاز مستقر نسبياً، إلا أن زمن بقاءه في الهواء الجوي قصير لأنه يتأكسد بسرعة إلى غاز CO₂ عن طريق تفاعله مع شق الهيدروكسيد. وقد يتم إزالة بعض من غاز CO الجوي بواسطة ميكروبات التربة. ولزيادة أكسدة غاز CO إلى CO₂ أثناء احتراق الوقود، فإن بعض المدن تلزم باستخدام بنزين مؤكسد يحتوي على كحول الإيثانول أو أية إضافات أخرى خلال أشهر فصل الشتاء.

2.1.2.12 الهيدروكربونات

الهيدروكربونات (HC_s)، أو المركبات العضوية المتطايرة (VOC_s)، هي مركبات مكونة من هيدروجين و كربون. ويعتبر الميثان (CH₄) وهو الهيدروكربون الأكثر تواجداً في الهواء الجوي، غازاً نشطاً في ظاهرة الاحتباس الحراري. وتشمل المركبات العضوية المتطايرة، الهيدروكربونات الخالية من الميثان (NMHCs) nonmethane hydrocarbons، مثل البنزين ومشتقاته، كالفورمالدهيد، إن بعض هذه المركبات (مثل البنزين) مسببة للسرطان، وإن بعضها الآخر مركبات هيدروكربونية متفاعلة نسبياً وتسهم في إنتاج الأوزون المرتبط بتكون الضبخان الكيميائي - الضوئي (photochemical smog).

يتم إنتاج الهيدروكربونات طبيعياً من تحلل المادة العضوية وبواسطة بعض أنواع النباتات (مثل، أشجار الصنوبر، وشجيرات كريوستو (creostoe bushes)). وحقيقة، فإن الهيدروكربونات المنبعثة من النباتات الخضراء ربما تكون عاملاً رئيساً في تكون الضبخان في بعض المدن، خاصة تلك القريبة من مناطق غابات الجزء الجنوبي الشرقي من الولايات

المتحدة الأمريكية. إن قدرًا كبيراً من الهيدروكربونات والهيدروكربونات الخالية من الميثان تتولد عن طريق نشاطات الإنسان. كما أن بعض الهيدروكربونات الخالية من الميثان، بما في ذلك الفورمالدهيد، تنبعث بسهولة من مصادر داخل المباني، مثل الفرش الأرضي حديث الصنع. كذلك، فإن الهيدروكربونات تنبعث إلى الهواء الجوي عن طريق حرق الوقود الأحفوري وعن طريق تبخر الجازولين أثناء تزويد السيارات بالوقود. وللتقليل من هذا المصدر الأخير، فإن بعض المدن بجنوب ولاية كاليفورنيا تفرض أن تحاط خراطيم المضخات بمحطات الوقود بمصيدة لتجميع أبخرة الهيدروكربونات أثناء تزويد المركبات بالوقود. ونظراً لأن وسائل النقل هي المصدر الرئيسي للهيدروكربونات، فإن التراكيز تكون أعلى ما يمكن بالقرب من الطرق المزدحمة بالمركبات.

3.1.2.12 المواد الجسيمية العالقة

يشمل جزء المواد الجسيمية العالقة حبيبات صلبة أو قطرات سائلة (أيروسول) تكون صغيرة بدرجة كافية لتبقى معلقة في الهواء. إن هذه الحبيبات ليس لها تركيب كيميائي عام، وقد تكون في الحقيقة معقدة جداً. وتشمل الأمثلة السناج (soot)، الدخان، الغبار، ألياف الأسبستوس والمبيدات، إضافة لبعض الفلزات (وتشمل Pb, Cu, Fe, Hg). ويمكن تمييز المواد العالقة على أساس الحجم. فالحبيبات التي تكون أقطارها 10 ميكرومتراً أو أكثر تترسب عموماً من الهواء الجوي في أقل من يوم واحد، بينما تبقى الحبيبات التي تكون أقطارها 1 ميكرو متراً أو أقل معلقة في الهواء لأسابيع. وتُعرّف المواد العالقة التي تكون حبيباتها 10 ميكرومتراً أو أقل بالرمز PM_{10} .

تختلف تأثيرات المواد العالقة في الهواء. فبعض من هذه المواد، خاصة تلك التي تحتوي على مركبات كبريتية، تكون منبعثة من البراكين، ويمكن أن تصل إلى نطاق الستراتوسفير، حيث قد تحور بدرجة كبيرة كلا من الإشعاع وموازانات الحرارة للهواء الجوي فينتج عن ذلك درجات حرارة منخفضة عند سطح الأرض. وقد تسبب الحبيبات المعلقة بطبقة التروبوسفير أمراضاً تنفسية للإنسان. وبشكل خاص فإن الحبيبات متوسطة الحجم (PM_{10}) هي الأكثر ضرراً للجهاز التنفسي في الإنسان. وفي المدن الكبيرة تقلل المواد العالقة أيضاً من الرؤية. وفي الولايات المتحدة يقدر بأن نحو 40% من المواد العالقة تأتي من عمليات صناعية، وأن نحو 17% تأتي من المركبات على الطرق السريعة.

4.1.2.12 ثاني أكسيد الكبريت

يقدر بأن 67% تقريباً من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) تأتي من حرق الوقود الأحفوري المحتوي على الكبريت، مثل الفحم، الذي قد يصل محتواه من الكبريت نسبة 6%. كذلك، فإن مصانع صهر الخامات ومحطات تكرير النفط تسهم أيضاً بكميات معتبرة من غاز SO_2 . وعند تراكيز عالية نسبياً، يسبب غاز SO_2 مشاكل تنفس حادة. أيضاً، يشكل ثاني أكسيد الكبريت مصدراً للأمطار الحمضية، التي تنتج عندما يتحد غاز SO_2 مع قطرات الماء مكوناً حمض كبريتيك (H_2SO_4). وعند تراكيز كافية، يكون التعرض لغاز SO_2 ضاراً لأنسجة النبات الحساسة. ويعتقد أن ثاني أكسيد الكبريت ومركبات الايروسول التي تحتوي على الكبريت في طبقة التروبوسفير تؤثر على توازن الإشعاع في الهواء الجوي، وهو ما قد يسبب انخفاضاً في درجة الحرارة في مناطق معينة.

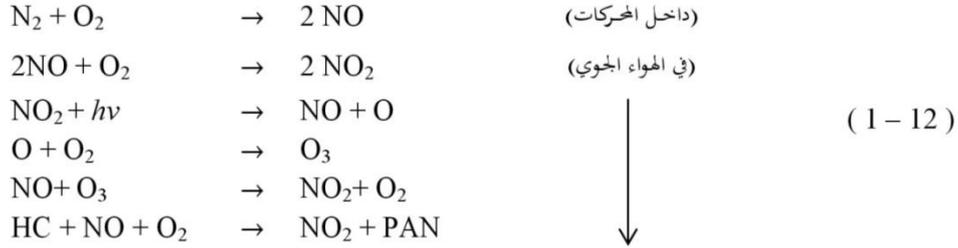
1.2.125. أكاسيد النيتروجين

تتكون أكاسيد النيتروجين (يعني الرمز NO_x خليطاً غير محدد من NO و NO_2) أساساً من N_2 و O_2 أثناء احتراق الوقود في السيارات عند درجة حرارة عالية. وتستخدم المحولات الحفازة خفيفة (Catalytic converters) لتقليل الانبعاثات. مع ذلك، فإن NO_x تتسبب في ضبابية خفيفة ذات لون بني محمر في هواء المدن، وهو ما يسهم في تطور مشاكل القلب والرئة، بل ربما يكون مسرطناً أيضاً. كما تسهم أكاسيد النيتروجين أيضاً في تكوّن الأمطار الحمضية، لأنها ترتبط مع الماء مكونة حمض النيتريك (HNO_3) وأحماضاً أخرى. وتشمل المصادر الطبيعية لأكاسيد النيتروجين أنواعاً معينة من بكتيريا التربة.

2.2.12 ملوثات ثانوية

يطلق على القسم الثاني من ملوثات الهواء حسب تصنيف وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA اسم "ملوثات الهواء الثانوية"، التي تتكون أثناء التفاعلات الكيميائية بين ملوثات هواء رئيسية ومكونات الهواء الجوي الأخرى، مثل بخار الماء. وعموماً، فإنه يجب أن تحدث هذه التفاعلات في ضوء الشمس، حتى ينتج في نهاية الأمر ضبخان كيميائي - ضوئي (photochemical smog). ويعتبر الضبخان الكيموضوئي أكثر شيوعاً في المناطق الحضرية بالمدن حيث يكون الإشعاع الشمسي شديداً جداً.

فيما يلي مجموعة من بعض التفاعلات المبسطة المرتبطة بتكون الضبخان الكيموضوئي:



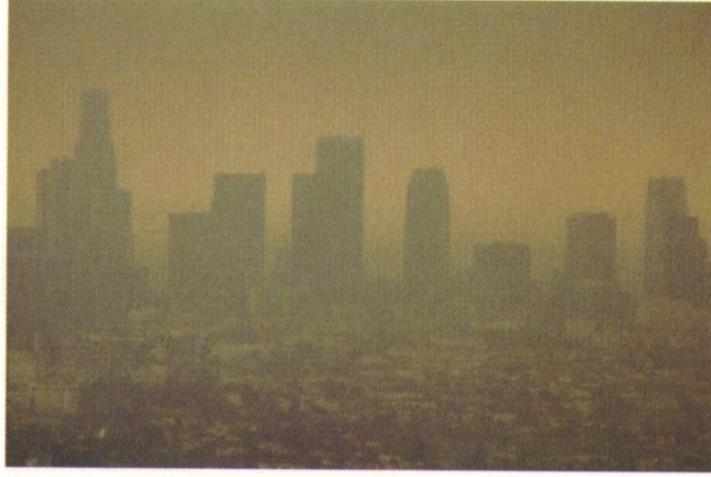
وكما هو موضح بالتفاعلات في المعادلة (1-12)، فإن الضبخان الكيموضوي مكون أساساً من الأوزون (O_3)، ونترات البيروكسي أسيتيل (PAN)، ومؤكسدات أخرى. ويرتبط تكون الأوزون إلى حد كبير بالظروف المناخية، وتشمل الظروف الملائمة لتكون O_3 درجات الحرارة التي تتجاوز $32^\circ C$ ، انخفاض سرعة الرياح، الإشعاع الضوئي الشديد، وانخفاض الهطول. ولسوء الحظ، فإن كثيراً من المدن الأمريكية الكبرى تتجاوز المعايير الحالية لجودة الهواء حسب القوانين الفيدرالية بخصوص الأوزون (متوسط تركيز O_3 يزيد على 120 نانولتر/ لتر/ ساعة/ يوم/ سنة وعلى امتداد 3 سنوات).

وكما تشير التفاعلات، فإن الهيدروكربونات ضرورية لزيادة الأوزون في الهواء الجوي. وفي غياب الهيدروكربونات، تقوم أشعة الشمس فوق البنفسجية (فوتونات) بتكسير غاز NO_2 إلى NO و O . وترتبط فيما بعد ذرة الأكسجين مع O_2 لتكون O_3 ، الذي يرتبط بدوره مع NO ليعيد تكوين NO_2 و O_2 . ولا يحدث تراكم للأوزون في الهواء الجوي لو لم يكن هناك حقيقة عرقلة لسير دورة التفاعل بواسطة الهيدروكربونات من خلال تفاعلها مع NO لتكون المزيد من NO_2 . لذلك، فإن الهيدروكربونات المنبعثة من السيارات ومصادر أخرى، تلعب دوراً هاماً في تكون O_3 في البيئات الحضرية.

وتجدر الإشارة إلى أن الأوزون في الطبقة السفلى من الهواء الجوي ليس كله ناتجاً عن نشاطات الإنسان، بل أيضاً من مصادر طبيعية تشمل البرق وانتشار بعض من O₃ إلى أسفل من طبقات الستراتوسفير العليا.

كثيراً ما يشار في معظم مدن الولايات المتحدة الأمريكية إلى الضبخان الكيمووضوئي بالهواء البني (NO_x + PAN + O₃). وعموماً فإن مدن الولايات المتحدة الأمريكية الصناعية الواقعة بالجزء الشرقي والغرب الأوسط تستقبل أشعة شمس أقل شدة من المدن الواقعة بالجزء الغربي؛ وبذلك، يشار أحياناً إلى الضبخان في هذه المدن بالهواء الرمادي نتيجة للدخان وغاز SO₂ المتصاعد عن حرق الفحم .

قد يكون الأوزون ضاراً أو مفيداً، وذلك يعتمد بدرجة كبيرة على مكان وجوده . فمثلاً، يكون ضاراً كمؤكسد في الضباب الدخاني، لكنه في طبقة الأوزون يكون مفيداً لأنه يمتص الأشعة فوق البنفسجية. إن الأوزون المصاحب للضبخان يقلل من الأداء الطبيعي للرئتين لأنه يتسبب في التهاب الخلايا المبطنة لقناة التنفس. وتشمل التأثيرات الصحية الأخرى زيادة التعرض لمرض الربو أي ضيق التنفس (asthma)، وزيادة خطر حدوث العدوى، وانخفاض في وظائف القلب والجهاز الدوري.



شكل (12-4): تتفاعل الهيدروكربونات مع أكاسيد النيتروجين تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية، لتنتج ضبخان كيموضوي. في مراكز المدن الحضرية، مثل مدينة لوس أنجلوس (الصورة لأعلى)، يمكن للملوثات بالهواء الجوي أن تتركز وتشكل مخاطر صحية حادة.

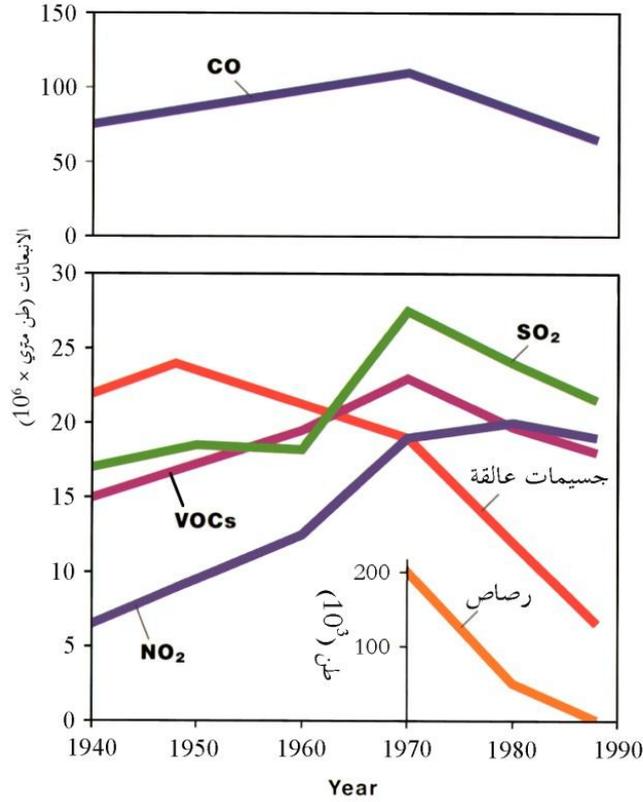
يمكن أن يضر أوزون الضباب الدخاني ب حياة النباتات والحيوانات على السواء. ويحدث الضرر أساساً للنباتات في الجزء الحضري للنباتات، وبدرجة تأثير أقل على عملية النمو وكمية والمحصول. وفي الولايات المتحدة وجدت علاقة بين هذا الغاز وفقد أشجار الصنوبر بالقرب من مدينة لوس أنجلوس، كما يعتقد أنه يحدث ضرراً مماثلاً للأشجار بجبال الأبالاشيا. وربما يكون له تأثير ضار أيضاً على نباتات صبار الساقارو في الصحراء بين مدينتي توسان وفينكس في ولاية أريزونا. وتوجد أيضاً عدة أنواع من النباتات الحساسة جداً لمركب PAN في الضبخان، وخاصة تلك الموجود في منطقة مدينه لوس أنجلوس.

عموماً يكون الضبخان الكيموضوي أكثر حدة في حوض مدينة لوس أنجلوس الواقع بساحل ولاية كاليفورنيا. ويوجد بمدينة لوس أنجلوس الكثير من السيارات، ومن ثم

وجود انبعاثات عالية من NO_x و HC_s . وفي فترات محددة من السنة، خاصة الربيع والخريف، تسود المنطقة ظروف مناخية تتميز بضغط تحت مداري مرتفع يصاحبه هواء هادئ و صاف، وهي الظروف التي تزيد من ركود الهواء. ويمكن تلخيص العوامل التي تؤثر على تكون الضبخان في منطقة حوض مدينة لوس أنجلوس كما يلي:

1. تعدد مصادر الملوثات الأولية.
 2. الانقلابات الهوائية التي تعيق الخلط القوي للهواء.
 3. وجود سحب قليلة، وهو ما يسمح بارتفاع شدة الأشعة فوق البنفسجية.
 4. وجود رياح خفيفة غير قادرة على تفريق الملوثات.
 5. وجود تضاريس من جبال ساحلية معقدة تعمل على تراكم الملوثات.
- لا يقتصر التلوث بالأوزون وغازات NO_x في طبقة التروبوسفير على المناطق الحضرية. ففي منتصف التسعينيات من القرن الماضي أشارت وكالة حماية البيئة (EPA) أن تراكيز O_3 و NO_x تزداد في المناطق الريفية في الجنوب الشرقي والغرب الأوسط من الولايات المتحدة الأمريكية. إن معظم هذه الزيادة يمكن أن يُعزى إلى انتقال الملوثات بواسطة الرياح من مصادر تقع بالمناطق الحضرية، لكن بعض التربة في المناطق الريفية قد تشكل مصدراً أهم لغازات NO_x مقارنة بحرق الوقود الأحفوري. وحقيقة، فإن بعض التقديرات تشير إلى أن التربة قد ينبعث منها ما قد يصل إلى 40% من إجمالي NO_x المنبعث إلى الهواء الجوي. إن هذه النسبة غير مؤكدة تماماً ذلك أن قياسات تدفق NO_x من التربة تعتبر غير دقيقة.

كذلك، فإن تدفقات غازات NO_x من التربة قد تختلف أيضاً من بقعة لأخرى ومن وقت لآخر.



الشكل (5-12): أنماط تلوث الهواء في الولايات المتحدة الأمريكية.

تتحكم غازات NO_x بطبقة التروبوسفير بقوة في تراكيز الغازات المؤكسدة مثل OH و O_3 ، التي قد تؤثر على صحة نحو ربع سكان الولايات المتحدة الأمريكية. وكما هو في

المناطق الحضرية، فإن الأوزون O_3 في الهواء الجوي للمناطق الريفية يتم التحكم فيه بواسطة تفاعلات تشترك فيها غازات NO_x و HC_s و OH ، وأنواع أخرى توجد في طبقة التروبوسفير. إن دراسة عمليات إنتاج وتدمير الأوزون O_3 في الهواء الجوي بالمناطق الريفية يمثل في الوقت الحاضر مجال بحث نشط تقوم به منظمة حماية البيئة (EPA) ومنظمات حكومية أخرى. وتبقى أسئلة كثيرة دون إجابة تتعلق بأسباب استمرار تواجد غاز O_3 بتراكيز عالية في كل من المناطق الحضرية والريفية على الرغم من الجهود المبذولة أخيراً للتقليل من انبعاثات المواد التي ينتج عنها غاز الأوزون وهي غازات NO_x والهيدروكربونات HC_s .

3.12 أنماط التلوث في الولايات المتحدة

إن تراكيز جميع أنواع ملوثات الهواء قد تناقصت عموماً أو ظلت ثابتة في الولايات المتحدة منذ السبعينيات من القرن الماضي (شكل 12-5). ويمكن إرجاع هذا التناقص بشكل كبير إلى تنفيذ التعليمات الفيدرالية لجودة الهواء التي وضعت استجابة لقانون الهواء النقي بالولايات المتحدة الصادر عام 1970. وعلى الرغم من أن نوعية الهواء تتحسن بشكل عام إلا أن العديد من المناطق الحضرية فشلت في تحقيق معايير جودة الهواء الخاصة ببعض الملوثات. ويقدر أن تدني جودة الهواء تؤثر على حياة نحو 100 مليون فرد في الولايات المتحدة الأمريكية وحدها.

على الرغم من حقيقة أن المواصلات تظل المصدر الرئيسي للتلوث في الولايات المتحدة إلا أن نسبة مساهمتها تتناقص. وبينما تزداد أعداد السيارات في معظم المناطق الحضرية، فإن كفاءة استخدام الوقود قد ارتفعت وأن انبعاثات الملوثات للسيارة الواحدة

تتناقص بسبب التحسينات في التقنية مثل إدخال محولات حفازة (catalytic converters) وأجهزة أخرى للتحكم في التلوث. ويمكننا أن نعرش على دليل يؤكد تحسن جودة الهواء في الانخفاض الملحوظ لتركيز الرصاص (Pb) في الهواء الجوي منذ عام 1970. ويأتي الرصاص في الهواء الجوي أساساً من حرق الجازولين الذي يحتوي على الرصاص بواسطة السيارات الصغيرة وسيارات النقل. لهذا يعتبر إدخال الجازولين الحالي من الرصاص عاملاً مهماً في هذا الانخفاض. وقد أصبح استخدام هذا النوع من الوقود للسيارات ملزماً في الولايات المتحدة لأسباب تتعلق بالصحة العامة، إضافة إلى أن الوقود الذي يحتوي على رصاص يؤدي إلى تثبيط عمل المحولات الحفازة (catalytic converters) التي تمنع أو تقلل من انبعاثات الملوثات من السيارات للهواء الجوي.

تبين عموماً أن تقليل تلوث الهواء من خلال التحكم في الانبعاثات عند المصدر يمثل الأسلوب الأفضل وهذا هو هدف وكالة المحافظة على البيئة (EPA) والوكالات المختصة الأخرى. إن التحكم الكلي في انبعاثات الملوثات هو بالتأكيد غير ممكن لأسباب اقتصادية وتقنية متنوعة، لكن الجهود التي تهدف إلى تقليل الانبعاثات تساعد على تحسين جودة الهواء في معظم المناطق.

4.12 المناخ والملوثات

ماذا يحدث للملوثات في الهواء الجوي؟ إن الإجابة تعتمد على عدد من العوامل. تنقل الملوثات بواسطة الرياح والعواصف، وقد تتعرض لتحويلات كيميائية قبل أن يتم ترسيبها فوق سطح الأرض. لذا فإن الظروف المناخية تؤثر بقوة على مصير ملوثات الهواء.

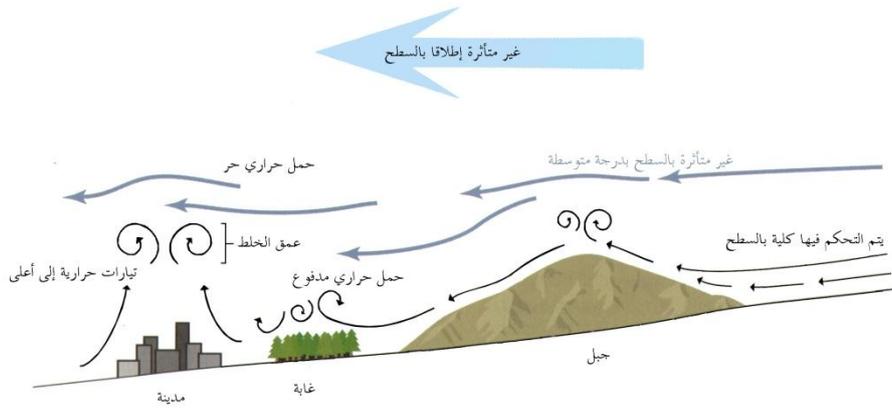
1.4.12 الثبات والانقلابات

يحدد كثيراً ثبات طبقة الهواء الحدودية (انظر الشكل 3-4) مدى سرعة تحريك الملوثات إلى أعلى من مصادرها الأرضية. وترتبط الثباتية بالدرجة الأولى بتدرج درجة حرارة الهواء عمودياً مقارنة بمعدل التفاوت في درجات الحرارة مع الارتفاع بدون تبادل حراري (adiabatic lapse rate) [انظر الجزء 2.2.3]. ويسبب عدم الثبات الشديد المصاحب للقابلية للطفو خلطاً جيداً للهواء (وانتشار التلوث) خلال الطبقة المتاخمة لعمق يمتد من 100 - 1000 متر. ويحدث الخلط الجيد عادة في الأيام الدافئة عندما يسخن سطح الأرض بواسطة ضوء الشمس. وبالمقابل فإن التلوث ينتشر بدرجة ضعيفة في الأيام أو الليالي عندما يكون الهواء الجوي مستقرًا في تلك الأوقات، تكون الحركة المضطربة للتلوث إلى أعلى بطيئة أو غير موجودة تقريباً.

عرفنا من الجزء 2.2.3 أن انقلاب درجة الحرارة يؤثر على استقرار الهواء الجوي؛ لذلك فهو يلعب دوراً هاماً في تحديد تراكيز ملوثات الهواء. وتزداد حدة تأثيرات الانقلابات عن طريق صرف الهواء المحدود خارج السهول المحصورة، كما هو في حالة مدينة لوس أنجلوس (الشكل 4-12) ومدينة مكسيكو (شكل 10-12). وهناك عمليات مختلفة قد ينتج عنها انقلابات، وتشمل التبريد السطحي نتيجة فقد الأشعة فوق الحمراء أو بسبب البحر، أو انخساف الهواء الجوي (atmospheric subsidence) أو بسبب تأثيرات طبوغرافية.

يحدث عموماً تبريد سطح الأرض الناتج أساساً عن انبعاث الأشعة تحت الحمراء من السطح إلى الفضاء أثناء الليالي ساكنه الهواء والصفية مسبباً انقلابات حرارية تمتد

لارتفاعات تبلغ نحو 100 متر فوق سطح الأرض. إن مثل هذه الانقلابات يشيع حدوثها عبر الجزء الغربي من الولايات المتحدة خلال فصل الخريف، وفصلي الشتاء والربيع عندما يكون الهواء جافاً نسبياً والسماء صافية. إن هذه الظروف تساعد على حدوث التبريد بسرعة عن طريق فقد طاقة الموجات الطويلة من سطح الأرض. فمثلاً، يحدث كثيراً في مدينة توسان بولاية أريزونا انقلابات أشعة خلال الأشهر الأكثر برودة، لذا فإن مشاكل التلوث خلال فصل الشتاء تزداد حدة في هذه المنطقة. كذلك، فإن تبريد سطح الأرض نتيجة لبحر الماء من التربة والنباتات ربما يؤدي أيضاً إلى تطور انقلابات حرارية. ويمكن أن يحدث التبريد الناتج عن التبخير أثناء النهار أو الليل، خاصة فوق الحقول المروية. وقد يكون هذا النوع من الانقلاب الحراري هاماً لبعض النشاطات الزراعية، مثل الإضافة الجوية للمبيدات فوق مساحات شاسعة من الحقول المروية. ويكون عادة عمق طبقة الانقلاب الحراري التي يتم تبريدها نتيجة للبحر بضعة أمتار فقط.



شكل (12-6): رسم تخطيطي لتدفق الهواء وخلطه وسرعته النسبية فوق تضاريس مختلفة وتأثرها بالارتفاع.

تتسبب تدفئة الهواء الجوي عن طريق خسوفه انقلاباً حرارياً فوق مناطق تتميز بضغط عال شبه مستديم (تدفق مضاد للتيار الهوائي) مثل جنوب غرب الولايات المتحدة. ومع انخساف (غور) الهواء، فإنه يواجه ضغطاً أعلى فتزداد درجة حرارته (يسخن) (انظر الجزء 2.2.3 والشكل 3-3). وفي داخل مناطق الضغط العالي، قد يبلغ ارتفاع الانقلاب الحراري عدة مئات من الأمتار فوق سطح الأرض؛ وبذلك فإن الهواء قد يكون مستقراً على امتداد عمق كبير من الهواء الجوي. ونظراً لأن انقلابات انخساف الهواء قد تستمر عدة أيام إلى أسابيع، فإن النتيجة تكون ظروفًا عالية التلوث عند مستوى سطح الأرض. فمثلاً تعتبر انقلابات انخساف الهواء عاملاً رئيساً في تدني جودة الهواء في حوض مدينة لوس أنجلوس (انظر الشكل 12-4).

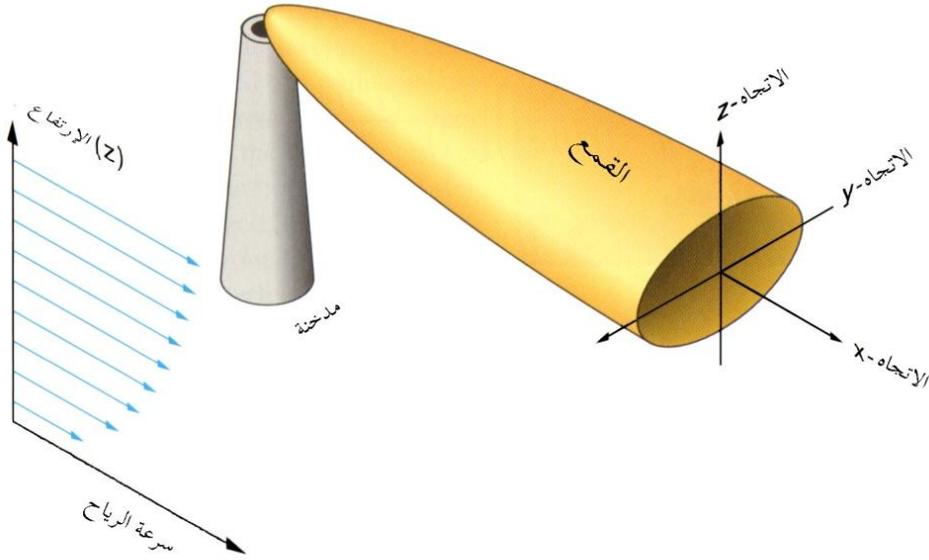
تنتج الانقلابات الحرارية المرتبطة بالطبوغرافيا عن تدفئة الهواء بدون تبادل حراري عند تدفئه أسفل الانحدار فوق مسطح جبلي. وقد تؤدي هذه الانقلابات إلى تفاقم مشاكل تلوث الهواء بدون تبادل حراري في المناطق الجبلية الآهلة بالسكان مثل مدينة دينفر في ولاية كولورادو.

2.4.12 الريح والاضطراب وعلاقتها بتلوث الهواء

تؤثر الريح على اضطراب الهواء قرب سطح الأرض، وهي بذلك تؤثر على تفريق الملوثات التي تتحرر وتدخل ضمن الهواء الجوي. يتولد الاضطراب (أساساً عبارة عن حركة الهواء إلى أعلى وإلى أسفل) جزئياً نتيجة لتدفق الهواء فوق سطح أرض غير مستوية. وكلما

زادت سرعة الريح، ازداد الاضطراب، وهو ما ينتج عنه زيادة في تشتيت الملوثات القريبة من سطح الأرض (أنظر الشكل 6-12).

ويمكن تصور تشتيت الملوثات في الهواء بالنظر إلى سحابة أو قمع (plume) تلوث منبعث باستمرار من مدخنة (انظر الشكل 7-12). فمع حمل محتويات القمع بعيداً عن المدخنة بفعل الرياح، فإن حجم القمع يزداد بسبب التشتت. وبسبب التشتت فإن تركيز الملوثات داخل القمع يقل مع زيادة المسافة عن المصدر.



شكل (7-12): نمط القمع الناتج عن انبعاث مستمر من مدخنة إلى داخل طبقة متاخمة مستقرة ومتعادلة تقريباً تحت ظروف رياح معتدلة .

يتأثر تشتت التلوث في اتجاه حركة الرياح من مدخنة بمدى استواء سطح الأرض. وبسبب الاحتكاك بين الهواء الجوي وسطح الأرض، فإن سرعة الرياح تتباطأ بدرجة ملحوظة بالقرب من سطح الأرض. فإذا ما كان السطح غير مستوي نسبياً، كما هو في حال وجود أشجار ومبانٍ، فإن سرعة الرياح تميل لأن تكون مضطربة وأن الزيادة في سرعة الرياح مع زيادة الارتفاع تكون صغيرة نسبياً. ويؤدي زيادة عدم استواء السطح إلى زيادة الاضطراب، وهو ما يساعد على تشتيت الملوثات. أما في حال تدفق الهواء فوق سطح أملس، مثل مسطح أخضر تم حصاده فإن تدفقه يكون أقل اضطراباً ويكون تباين سرعة الرياح مع الارتفاع كبيراً نسبياً (الشكل 12-6).

يوضح القمع المخروطي الشكل (شكل 12-7) نمط تشتت ملوث في اتجاه حركة الرياح من مصدر رئيسي معين. وتوجد عوامل عدة تؤثر على القمع، بما في ذلك الارتفاع الفعال (H) للانبعاث، الذي هو قياس للارتفاع الذي يتم عنده قذف الملوث في الهواء الجوي فوق المصدر. ويعتمد الارتفاع على خصائص المصدر وظروف الهواء الجوي. وعموماً، فإن المدخنة الطويلة تنتج تراكيز منخفضة من الملوث عند مستوى سطح الأرض، ذلك أن الاضطراب الهوائي يميل إلى تخفيف التلوث قبل وصوله الأرض. ونظراً لقابليتها للطفو (buoyancy) يتم بداية نقل الملوثات سريعة الحركة إلى أعلى حتى الطبقة المتاخمة للهواء الجوي ذلك لأنها أكثر دفئاً من الهواء المحيط. لكنه، ومع تبريد الملوثات واندماجها مع الهواء المحيط، فإن القمع يبدأ في الحركة من الجانبين مع الرياح، ثم وفي وجود هواء مضطرب ناتج

عن حركة الهواء فوق السطح وإمكانية وجود عدم استقرار يتم التحكم في انتشار محتويات القمع.

يؤدي اضطراب الهواء عادة إلى خلط محتويات القمع بشكل متجانس بحيث يتبع التركيز توزيعاً جوسياً الشكل (gaussian distribution) حول المحور المركزي للقمع. ورياضياً، يوصف تركيز ملوث معين (x عند أية نقطة في القمع بالمعادلة (2-12) حيث أن Q هو معدل انبعاث التلوث من المصدر (kg S^{-1})، أما σ_y و σ_z فهما الانحرافان المعياريان الأفقي والعمودي، على التوالي لتوزيع تراكيز الملوثات في الاتجاهين y و z ، ويعبر الرمز \bar{u} على متوسط سرعة الرياح الأفقية داخل القمع (m s^{-1}). ويعتبر هذا النموذج الرياضي قابلاً للتطبيق على مصادر الغازات المستمرة والجسيمات العالقة التي يقل قطرها عن 10 ميكرومتر (الجسيمات الأكبر حجماً تترسب على الأرض بسرعة)، ويمكن استخدام هذا النموذج لحساب تراكيز محتويات القمع على امتداد مسافات تصل 10² و 10⁴ متراً. وقد افترض في نموذج القمع الجاوسي هذا أنه لا يحدث ترسيباً لمحتويات القمع إلى سطح الأرض. وفي الواقع، فقد افترض أن محتويات القمع يتم "إرجاعها" من الأرض إلى الهواء الجوي. وتقدر قيم σ في المعادلة من أي من المعادلات التجريبية العديدة التي تربط بالمسافة في أسفل اتجاه الرياح (x) وظروف الاستقرار. وتشمل هذه الصيغ المعادلات الآتية التي طورت بواسطة المعمل الوطني لبروك هيغن (BNL).

$$\chi_{(x, y, z, H)} = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2-12)$$

$$\sigma_y = ax^b \quad \text{and} \quad \sigma_z = cx^d \quad (3-12)$$

حيث أن d, c, b, a قياسات تعتمد على الاستقرار. [أنظر المرجع Hanna *et al.* (1982) للاطلاع على ملخص معادلات BNL إضافة لأساليب أخرى] وعند مستوى سطح الأرض تكون قيمة $z = 0$ وعلى امتداد الخط المركزي للقمع تكون $y = 0$. عليه يمكن من المعادلة (2-12)، حساب التركيز كما يلي:

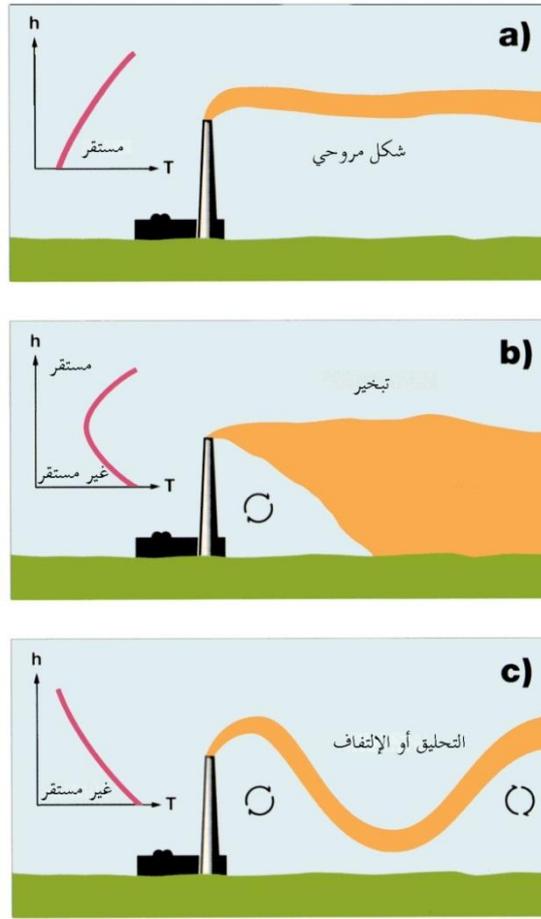
$$\begin{aligned} \chi_{(x,H)} &= \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \\ &= \frac{Q}{\pi a x^b c x^d \bar{u}} \exp\left(-\frac{H^2}{2(c x^d)^2}\right) \end{aligned} \quad (4-12)$$

إن أحد أنواع الأقماع (المبين في الشكل 7-12) يحدث عادة تحت ظروف رياح عاصفة واستقرار عند أو قريب من التعادل. وداخل هذا القمع، يحدث الخلط أساساً عن طريق احتكاك تسببه حركة هواء مضطربة، ويكون انتشار الملوث متساوياً تقريباً في جميع الاتجاهات (تكون قيم σ متساوية تقريباً وينتشر القمع في نمطه المخروطي المألوف). ويمكن أن يتطور الشكل المخروطي في النهار أو الليل ويرى عادة في حالة توفر ظروف غائمة ورياح عاصفة. وحسب الارتفاع الفعال للمصدر وظروف الهواء الجوي، قد يصل القمع الأرض قريباً من المصدر. وباستخدام المعادلتين (3-12) و(4-12) يمكن تقدير تركيز القمع عند مستوى سطح الأرض ($z = 0$) المكون من ملوث واحد، مثلاً SO_2 ، مقذوف إلى الهواء

الجوي عند ارتفاع فعال محدد. افترض أنه لدينا: $Q = 0.5$ كجم/ ثانية، $H = 25$ متر؛ $\bar{u} = 2$ متر/ ثانية⁻¹، استقرار قريب من التعادل، وأن قياسات BNL هي: $a = 0.32$ ، $b = 0.78$ ، $c = 0.22$ ، $d = 0.78$. وبذلك فإن تركيز SO_2 عند مستوى سطح الأرض على امتداد الخط الأوسع للقمع عند مسافة عشوائية $x = 500$ متر من المصدر سيكون 4.7×10^{-5} كجم/ متر مكعب (أو 47 مجم/ متر مكعب).

قد تتغير أشكال الأقماع (plumes) بسبب التغيرات في سرعة الرياح واستقرار الطبقة المتاخمة. وعندما تكون الطبقة المتاخمة للغلاف الجوي عالية الاستقرار، كما هو أثناء حدوث انقلاب إشعاعي في الليل أو أثناء حدوث انقلابات استقرار، قد يشاهد القمع في نمط مروحي كما هو موضح في الشكل (12-8). وتحت هذه الظروف، لا يوجد تقريباً أي حركة رأسية وتكون قيم قياسات BNL كما يلي: $a = 0.31$ ، $b = 0.71$ ، $c = 0.06$ ، $d = 0.71$ وبذلك، فإن عدم وجود حركة رأسية سيحبر القمع بفعالية ليكون في طبقة ضيقة، بينما قد تؤدي التغيرات في اتجاه الرياح إلى انتشار القمع جانبياً، مكوناً نمطاً في شكل حرف (V) أو في شكل مروحة، وهذا ما اشتقت منه التسمية. من ناحية أخرى، فإن ثبات اتجاه الرياح، سيؤدي إلى إجبار القمع ليصبح في نمط مروحي مغلق ومضغوط يتبع في انتشاره مساراً مستقيماً وضيقاً. وفوق مسطح مستوي فإن القمع المبين في الشكل (12-8) قد لا يتغير على امتداد مسافات طويلة جداً. وفي حالة عدم وجود حركة هواء عمودية، فإن تركيز الملوثات المنبعثة من مدخنة طويلة يمكن أن تكون قريبة من الصفر وذلك عند مستوى سطح الأرض. أما إذا كان المصدر قريباً من سطح الأرض (بمعنى أن قيمة H تكون صغيرة)، أو أن

التغيرات الطبوغرافية تسبب تقاطع القمع مع سطح الأرض، فإن التراكيز عند مستوى سطح الأرض يمكن أن يكون عالياً جداً.

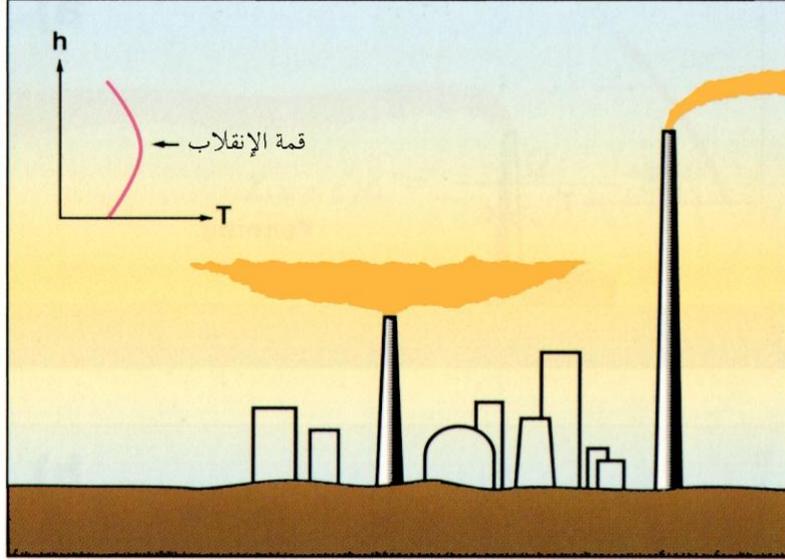


شكل (8-12): تأثير الاستقرار الجوي على نمط القمع المدخني الناتج أثناء: (a) الانقلاب (نمط مروحي)، (b) تلاشي الانقلاب قرب سطح الأرض (نمط التبخير)، (c) ظروف انقطاع أو تأجيل (نمط الإنتفاف).

مع حلول منتصف الصباح، يؤدي عادة تسخين سطح الأرض عادة بواسطة أشعة الشمس إلى تفكيك الانقلاب الذي تطور أثناء الليلة السابقة، كما هو موضح في الشكل (12-8b). وينتج عن تطور ظروف عدم الاستقرار قرب سطح الأرض إلى خلط رأسي للهواء. وتحت ظروف غير مستقرة بدرجة متوسطة فإن، $a = 0.86$ ، $b = 0.86$ ، $c = 0.22$ ، $d = 0.86$. وفي هذه الحالة، ينقل التلوث في اتجاه مستوى سطح الأرض. من جهة أخرى، فإن الظروف المستقرة إلى أعلى، تحد من انتشار الملوثات إلى أعلى. وبذلك فإن ما تبقى من انقلاب يضع بفعالية سقفاً للتلوث فوق مستوى سطح الأرض ويمنع انتشاره إلى أعلى. ويسمى هذا الوضع بالتبخير ويستمر عموماً لفترة زمنية تمتد لساعة أو أقل. ويعتبر التبخر محفزاً جداً لزيادة تراكيز الملوثات عند مستوى سطح الأرض.

في وقت مبكر من فترة ما بعد الظهر تكون ظروف التفاوت الحراري (بمعنى، تدرج حراري سلبي مع الارتفاع) قد تكاملت تماماً داخل الطبقة المتاخمة بسبب التسخين السطحي القوي بواسطة الشمس. وأثناء معظم فترة ما بعد الظهر، تظهر غالباً حركة الهواء بشكل رئيسي دوامات اضطراب معاكس مصاحبة لظاهرة الطفووية (buoyancy). وتكون هذه الدوامات المعاكسة عموماً أكبر من قطر القمع، وبذلك ترفع القمع إلى أعلى وإلى أسفل في نمط التفافي، كما هو موضح في الشكل (12-8ج) ويتم حمل هذه الالتفافات حسب النمط العام للرياح ويزداد حجمها عموماً مع زيادة المسافة عن المصدر وفي اتجاه الرياح. وقد تجعل حركة الرياح محتويات القمع قريبة من مستوى سطح الأرض عند المصدر. ونظراً لوجود اضطراب في الهواء، يتفرق القمع في نهاية الأمر على امتداد مسافات كبيرة نسبياً.

وفي وقت مبكر من المساء، يعاد بناء انقلاب إشعاعي يبدأ عادة من مستوى سطح الأرض إلى أعلى. وتمنع الظروف المستقرة قرب سطح الأرض نقل محتويات القمع إلى أسفل، لكن الهواء غير المستقر (فوق مستوى ارتفاع الانقلاب) يسمح بالانتشار في الاتجاه إلى أعلى. إن النقل في الاتجاه لأعلى، المعروف بالحمل (lofting)، ملائم جداً لتفريق الملوثات. وتجدر الإشارة إلى أن الحمل يكون أكثر فعالية عندما يكون المصدر فوق مستوى ارتفاع الانقلاب. ويوضح الشكل (9-12) كيف أن محتويات القمع التي يجري انبعاثها فوق ارتفاع الانقلاب يتم تشتيتها إلى أعلى. من جهة أخرى، فإن الشكل يبين أيضاً أن محتويات القمع التي يتم انبعاثها تحت مستوى ارتفاع الانقلاب تحجز أساساً في قمع له شكل شبه مروحي. يؤثر شكل سطح الأرض باتجاه حركة الرياح على جودة الهواء، خاصة في المناطق الجبلية. مثلاً، يمكن أن يتسبب تفرغ الهواء في الوديان شبه المغلقة أثناء الشتاء أو ظروف الانقلاب في تراكم الملوثات داخل هذه الوديان. لذلك، فإن المناطق الحضرية الواقعة في وديان ذات تدفق هوائي محدود، تكون عرضة بشكل خاص لمستويات عالية من التلوث. إضافة لذلك، ففي المناطق الساحلية، يمكن لسلسلة جبلية أن تعترض تدفق الهواء من المحيط (نسيم البحر) أو حصره ليتدفق في قنوات. إن هذه الحالة شائعة في حوض مدينة لوس أنجلوس، التي تحاط بجبال تقيد تدفق الهواء في المحيط الباسيفيكي. لذا، فإن تفريق الملوثات من مصادر تقع في الحوض يتم تثبيطها.



شكل (9-12): نمط القمع الناتج عن ابتعاثات من مدخنة فوق مستوى ارتفاع الانقلاب وتحتته .

3.4.12 تحوّل الملوثات وإزالتها

تحدث عادة أثناء تحرك الملوثات مع الرياح تفاعلات كيميائية بينها وأنواع كيميائية أخرى بالهواء الجوي. وعلى الرغم من أن مسارات ومعدلات كثير من هذه التفاعلات ليست مفهومة تماماً، إلا أنها تشكل عاملاً مهماً يؤثر على مصير العديد من ملوثات الهواء. إن معظم الملوثات، مثل غاز CO، تبقى بالهواء الجوي لفترات قصيرة نسبياً لا تتجاوز بضعة أيام أو أسابيع. لهذا، فإنه إذا ما تم منع الابتعاثات تماماً، فإن الهواء الجوي القريب من سطح الأرض سيفقد بسرعة كل ملوثاته تقريباً. من ناحية أخرى، فإن الرماد

البركاني ومركبات الأيروسول المحتوية على كبريت، مثلاً، التي يتم دفعها إلى داخل طبقة الستراتوسفير يمكن أن تبقى هناك لأشهر قبل أن تهبط ثانية فوق سطح الأرض. إن ملوثات الهواء الجوي العلوي التي تبقى لمدة طويلة يمكن أن تحور مناخ الكرة الأرضية، كما يتضح من انخفاض درجات حرارة الهواء بسبب هذه الثورات البركانية مثل بركان جبل بيناتيبو بالفلبين. بالإضافة إلى ذلك، فإن مركبات الكلوروفلوروكربون (CFC) يمكن أن تبقى بالهواء الجوي لسنوات كثيرة قبل أن تتفكك.

يخرج التلوث من الهواء الجوي عن طريق الترسيب بالجاذبية، والترسيب الجاف، والترسيب الرطب.

الترسيب بالجاذبية

يزيل الترسيب بالجاذبية معظم الجسيمات التي تكون أقطارها أكثر من نحو 1.0 ميكرومتر. أما الجسيمات التي تقل أقطارها عن 1.0 ميكرومتر فإنها تبقى عادة في الهواء الجوي لفترات طويلة، بينما تترسب بسرعة الجسيمات التي تزيد أقطارها على نحو 10 ميكرومتر.

الترسيب الجاف

الترسيب الجاف هو عبارة عن عملية انتقال على نطاق واسع ينتج عنها إدمصاص الملوثات الغازية بواسطة النباتات والتربة. ويعتمد الترسيب الجاف على النباتات على امتصاص التلوث عبر فتحات الثغور في أوراق النبات، وكذلك على النقل خلال الهواء المضطرب. ويشمل الترسيب الجاف لتربة غير مغطاة ليس فقط النقل العنيف للملوثات في

الهواء المضطرب فوق التربة، بل يشمل أيضاً الكائنات الدقيقة بالتربة التي تمتص هذا النوع من الملوثات مثل غاز CO.

الترسيب الرطب

يعتبر المطر مزيلاً فعّالاً جداً للغازات والجسيمات العالقة في الهواء الجوي. وتزداد قطرات الماء في الحجم مع تساقطها نحو سطح الأرض، وهي بذلك تزداد قدرة على احتواء المزيد من الملوثات. وعملياً، تقوم قطرات المطر بدور المكنسة حيث تكتسح التلوث بتساقطها خلال الهواء وتتوقف قدرة المطر على إزالة الملوثات على شدة تساقط المطر، و حجم القطرات وخصائصها الكهربائية، ومدى ذوبانية الأنواع الملوثة.

ملاحظة

تكون الأمطار طبيعياً حمضية (6 - 5 = pH) لأنها تمتص غاز ثاني أكسيد الكربون بالهواء الجوي مكونة حمض الكربونيك. عند هبوب رياح قادمة من مصادر مهمة لأكاسيد النيتروجين (NO_x) والكبريت (SO_2)، يصبح المطر أكثر حمضية بسبب امتصاصه لهذه الأكاسيد وتكون حمضي النيتريك والكبريتيك. إن تأثير عملية امتصاص الملوثات تكون واضحة بشكل خاص في الرقم الهيدروجيني المنخفض لمياه الأمطار في اتجاه هبوب الرياح من المراكز الصناعية الرئيسية بأمريكا الشمالية وأوروبا. وقد تم ربط انخفاض الرقم الهيدروجيني (pH) للأمطار كسبب في تناقص الرقم الهيدروجيني في النظم البيئية للبحيرات والغابات.

5.12 قضايا تلوث الهواء الرئيسية

1.5.12 الاحتباس الحراري

إن غاز ثاني أكسيد الكربون لا يعتبر ملوثاً للهواء لأنه لا يشكل خطراً على صحة الإنسان عند تراكيزه في الهواء الجوي المفتوح، إضافة إلى ذلك، فإنه يعتبر ضرورياً لتثبيت الكربون بواسطة النباتات. من جهة أخرى، فهو يعتبر غازاً مهماً فيما يسمى بظاهرة البيت الزجاجي (greenhouse effect)، ونتاجاً أساسياً من حرق الوقود الأحفوري، الذي يرفع بانتظام تركيز ثاني أكسيد الكربون في الهواء الجوي (الشكل 10 - 12).



شكل (10-12): زيادة التصنيع وما يصاحبه من مظاهر الرفاه في الدول المتطورة أدى إلى زيادة حادة في الانبعاثات من غاز ثاني أكسيد الكربون في الهواء الجوي.

تشير نماذج توقعات مناخية رقمية أن زيادة التدفئة (الاحتراق) الذي تسببه غازات البيت الزجاجي (أساساً CO₂) قد تضيف نحو 1.0°م لمتوسط درجة حرارة الأرض مع حلول

عام 2025، وبمقدار 3.0م مع نهاية القرن الواحد والعشرين. وعلى الرغم من وجود الكثير من الشكوك حول التدفئة المتوقعة، فإن كثيراً من العلماء يعتقدون أن زيادة درجة الحرارة أمر لا مناص منه. إن التدفئة الممكنة قد يكون لها عواقب كبرى بعيدة المدى على الحياة بكوكب الأرض.

يعتبر غاز ثاني أكسيد الكربون الأكثر وفرة والأكثر أهمية كغاز ثانوي بالهواء الجوي يسهم في تأثير البيت الزجاجي الطبيعي (أيضاً، انظر الجزء 1.3 والجزء 4.2.3).

وينطلق هذا الغاز للهواء الجوي عن طريق عمليات مختلفة تشمل إزالة الغابات (deforestation) وإزالة الغطاء النباتي عموماً (land clearing)، إضافة لحرق الوقود الأحفوري، والتنفس بواسطة الكائنات الحية. ويمتص غاز ثاني أكسيد الكربون بسهولة بواسطة الماء، وتكون المياه الدافئة أكثر قدرة على الامتصاص مقارنة بالمياه الباردة، لذلك فهو يزال من الهواء الجوي بواسطة المحيطات وغيرها من الأجسام المائية. كذلك، فإن عملية البناء الضوئي (photosynthesis) بواسطة النباتات التي تنمو على اليابسة وفي المياه (phytoplankton) تقوم أيضاً بإزالة كميات معتبرة من غاز CO_2 بالهواء الجوي. إن الإزالة بواسطة النباتات تكون واضحة خصوصاً خلال الصيف عندما ينقص متوسط تراكيز CO_2 . إضافة إلى ذلك، فإن كميات كبيرة من غاز CO_2 قد يتم تثبيتها في نهاية المطاف بواسطة الحجر الجيري. ويحتوى الهواء الجوي في الوقت الحاضر على نحو 720 بليون طن متري من الكربون في صورة غاز CO_2 ، ويدخل للهواء الجوي إضافات زائدة من هذا الغاز تقدر بنحو

3 بليون طن متري سنوياً. وتشير نتائج الأبحاث أن هذا الفائض يؤدي إلى زيادة متوسطة سنوية في تركيز غاز CO₂ على كوكب الأرض بنحو 1.5 ميكرو لتر/ لتر.

إضافة لغاز CO₂ فإن غازات البيت الزجاجي تشمل كلاً من CH₄، N₂O، CFC_s وO₃. كما أن بخار الماء يعتبر نوعاً مهماً أيضاً من غازات البيت الزجاجي لكنه غير ثابت، لكنه يتغير. إن جميع هذه الأنواع من الغازات، كما يدل مصطلح (البيت الزجاجي) ذات كفاءة عالية في امتصاص الأشعة طويلة الموجة. إن هذا الامتصاص يساعد في المحافظة على مناخ دافئ نسبياً على الأرض. لكنه، ونتيجة للزيادة المستمرة في تركيز غازات البيت الزجاجي، فإنه من الممكن أن يتحول مناخ الأرض ويصبح أكثر دفئاً. لذا، فإن كثيراً من البحث العلمي موجه في الوقت الحالي نحو تحسين فهمنا لمدخلات ومخرجات (budget) هذه الغازات الثانوية ودورها في التأثير على ظاهرة البيت الزجاجي.

أيضاً، فإن تراكيز غاز الميثان (CH₄) في الغلاف الجوي ازدادت بانتظام في العقود الأخيرة عند معدل يقدر بنحو 1% سنوياً. إن هذه الزيادة السريعة تعزى عادة إلى الزيادة العالمية في إنتاج الأرز والإنتاج الحيواني. كذلك، فإن الزيادة في نشاطات استخراج الغاز الطبيعي من مصادره لإنتاج الطاقة ربما يكون أيضاً عاملاً هاماً.

وتعتبر مركبات (CFC_s) الكلوروفلوروكربونات الاصطناعية من العوامل المهمة التي تسهم في تأثير البيت الزجاجي. وتستخدم مركبات الكلوروفلوروكربون في الثلاجات ومكيفات الهواء، والمواد العازلة وفي العمليات الصناعية. وتعتبر هذه المركبات ذات كفاءة

عالية في امتصاص الموجات الطويلة، كما أنها تلعب دوراً في استنزاف الأوزون (O_3) بطبقة الستراتوسفير.

يعتبر غاز أكسيد النيتروجين (N_2O) بشكل خاص من الغازات التي تمتص جيداً الأشعة طويلة الموجة؛ إذ أن جزيء واحد من N_2O يكون مكافئاً من حيث قدرته على امتصاص الموجات الطويلة لنحو 200 جزيء من غاز CO_2 . وحالياً فإن غاز N_2O يشكل فقط نحو 5% من تأثير البيت الزجاجي، لكن هذه النسبة يتوقع زيادتها في السنوات القادمة. وحسب نماذج تنبؤات رقمية، فإن زيادة تركيز غاز N_2O بمقدار 25% في الهواء الجوي قد يؤدي إلى زيادة متوسط درجة حرارة الأرض بنحو 0.1 درجة كلفن (K). ومن سوء الحظ، فإن غاز N_2O له فترة بقاء طويلة في الهواء الجوي، تقدر بنحو 150 سنة، وهو ما يفوق بقاء أي أكسيد نيتروجين آخر. لهذا، فإن التراكم الحالي في غاز N_2O يمكن أن يؤثر على مناخ الأرض لفترات تتجاوز كثيراً القرن الواحد والعشرين.

إن الاحتباس الحراري موضوع لم يفهم جيداً، لكنه الأكثر تعرضاً للنقاش. وهناك كثير من التساؤلات العلمية والسياسية والاقتصادية لم تتم الإجابة عليها. وتشمل بعض التساؤلات النقاط التالية:

1. إذا كانت الزيادة المتوقعة في درجة الحرارة تحدث كنتيجة لتراكم غاز CO_2 ، كيف سيتأثر توزيع النباتات ومعدلات نموها؟
2. ما هي السرعة التي سيحدث بها ارتفاع درجة الحرارة؟
3. كيف ستؤثر المحيطات وكيف ستتأثر بزيادة معدلات ارتفاع درجة الحرارة؟

4. كيف ستؤثر السحب ومركبات الأيروسول على زيادة درجة الحرارة؟
5. كيف ستتغير أنماط سقوط الأمطار؟
6. هل أن درجات الحرارة ستتغير بشكل موحد على سطح الأرض؟
7. كيف يمكن تخفيض ابتعاثات غازات البيت الزجاجي عالمياً، مع السماح باستمرار التطور الاقتصادي؟
8. هل أن النماذج الحاسوبية الحالية الخاصة بالاحتباس الحراري دقيقة ويمكن الاعتماد عليها؟

2.5.12 استنزاف الأوزون

يمثل استنزاف O_3 في طبقة الستراتوسفير هاجساً بيئياً عالمياً آخر مرتبطاً بالتلوث. وقد برز الاهتمام حول O_3 أولاً في بداية السبعينيات من القرن الماضي عندما أشارت دراسات نمذجة أن أسطولاً مقترحاً من طائرات تتجاوز سرعتها سرعة الصوت يمكنها أن تبعث قدرأً كافياً من غازات NO_x تضر بطبقة الأوزون. وقد ساعدت نتائج دراسات النمذجة هذه في وضع نهاية لخطط بناء هذا الأسطول، لكن هذه الاعتبارات تظل عوامل رئيسية يؤخذ بها في خطط تطوير الطائرات.

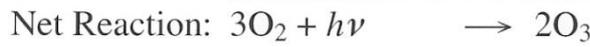
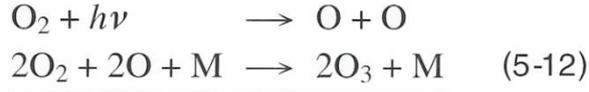
في منتصف السبعينيات من القرن الماضي، تركز الاهتمام على تأثير مركبات CFC_s المستخدمة كمادة مبردة في الثلاجات، والمواد الدافعة (propellant)، ومركبات التنظيف، و مواد العزل الإسفنجية (Foam insulation). وقد قادت دراسة مكثفة حول تأثيرات مواد CFC_s على أوزون الستراتوسفير إلى منع استخدامها كمواد دافعة في علب رش الأيروسول بالولايات المتحدة منذ عام 1979.

إن زيادة استخدام مواد CFC_s عالمياً، مع انخفاض في تراكيز O₃ في طبقة الستراتوسفير فوق منطقة القطب الجنوبي بسبب استخدام هذه المواد أفنعت 24 دولة صناعية بتوقيع بروتوكول مونتريال عام 1987 و1990، الذي يدعو إلى التوقف تماماً عن إنتاج مواد CFC_s بحلول عام 2000 .

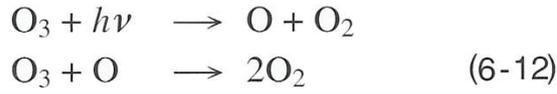
يمتص الأوزون بالغلاف الجوي الأشعة فوق البنفسجية، مما يقلل من كمية هذه الأشعة التي تصطدم بالكائنات الحية فوق سطح الأرض. وقد بينت صور الأقمار الاصطناعية والقياسات الأرضية أنه يوجد نقص مؤقت في تراكيز O₃ فوق منطقة القطب الجنوبي سنوياً. وفي السنوات الأخيرة تولد عن استنزاف O₃ اهتمام جاد حول معرفة الأسباب والنتائج البيئية المحتملة وكذلك مدى تأثير ذلك على صحة الإنسان إذا ما استمر هذا النمط. وبالنسبة للإنسان، فإن زيادة الأشعة فوق البنفسجية يمكن أن يؤدي إلى زيادة الإصابة بسرطان الجلد، بما في ذلك الميلانوما (melanoma). كما أن كائنات أخرى معرضة لتأثيرات هذه الأشعة؛ فمثلاً، انحدرت أعداد النباتات المغمورة بالمياه (phytoplankton) بنسبة تراوحت ما بين 6 - 12% وذلك بمنطقة القطب الجنوبي . إن انخفاض هذه الكائنات وحيدة الخلية يعتقد بأنه ناتج عن زيادة كمية الأشعة فوق البنفسجية التي تصل إلى سطح المياه.

إن المسارات الكيميائية التي تقود إلى تكون O₃ في طبقة الستراتوسفير تبدأ بالتفكك الضوئي للأكسجين الجزيئي (O₂) بواسطة الأشعة فوق البنفسجية الشمسية (فوتونات الطاقة $h\nu$ ، حيث أن $h =$ ثابت بلانك وأن $\nu =$ التردد). وتقود فوتونات الأشعة فوق البنفسجية

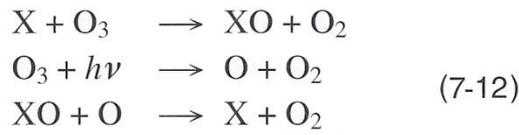
إلى فصل O_2 إلى ذرتي أكسجين (O)، يتحد كل منهما مع جزيء O_2 غير مفكك (في وجود نوع كيميائي آخر، M) لتكوين جزيئين من O_3 . وفيما يلي التفاعلين اللذين ينتج عنهما تكوين الأوزون (O_3):



ويتحول جزيئان من O_3 بسرعة مرة ثانية إلى أكسجين جزيئي من خلال:



تعتبر عملية إنتاج وفقد جزيئات O_3 بواسطة التفكك الضوئي هامة جداً، لأنها تساعد على منع وصول الأشعة فوق البنفسجية الضارة سطح الأرض. وتشير أنماط الإنتاج في مجملها أن كيمياء الأوزون بطبقة الستراتوسفير ستكون في اتجاه محدد ومباشر إذا لم تكن هناك أنواع كيميائية متفاعلة في هذه الطبقة من الهواء الجوي. لكنه يلاحظ أن مواداً كيميائية أخرى مثل مركبات CFC_s و NO_x تكون موجودة وتلعب دوراً تدميراً مهماً. إن ذلك توضحه الدورة العامة التالية:



حيث أن X و XO يمثلان المجموعات الكيميائية الحرة (Free radicals) التي تحفز عملية تدمير جزيئات O_3 . أما NO_x ، وبخار الماء، ومركبات CFC_s فهي أنواع ملخصة في الجدول (1-12).

جدول (1-12): الأنواع الكيميائية التي يعتقد بأنها تحفز تدمير جزيئات O_3 في الهواء الجوي.

XO	X	الدورة
NO_2	NO	NO_x
$HO_2\cdot$	HO.	ماء
CLO.	CL.	CFC

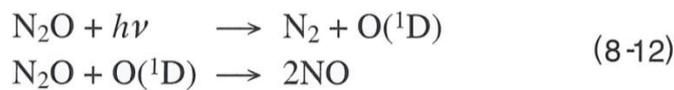
من بين هذه المحفزات، تعتبر مركبات CFC_s من صنع الإنسان بالكامل، بينما تأتي أكاسيد النيتروجين من مصادر طبيعية واصطناعية. أما بخار الماء بطبقة الستراتوسفير فإنه يأتي أساساً من عمليات طبيعية. وإضافة للمحفزات الثلاثة الرئيسية، فإن مواد كيميائية أخرى قد تلعب دوراً في التحكم في مستويات O_3 بطبقة الستراتوسفير. فمثلاً، تشير دلائل حديثة أن بروميد الميثيل، الذي يستخدم كمعقم للتربة، قد يصل لطبقة الستراتوسفير، حيث يمكن أن يتعرض لتفاعل محفز مع O_3 يشبه تلك الخاصة بالأنواع الكيميائية الثلاثة الرئيسية. إن التفاعلات المحفزة لا تدمر كل الأوزون O_3 الموجود في طبقة الستراتوسفير. ويعود السبب في ذلك إلى أن التفاعلات تحدث أيضاً بين المواد المحفزة نفسها وينتج عنها مواداً كيميائية لا تستنزف O_3 . ويعود في نهاية المطاف بعض من هذه المواد الكيميائية إلى سطح الأرض (مثلاً، HNO_3 مع مياه الأمطار).

هناك جوانب أخرى لكل من هذه الدورات المحفزة في المرجع (Graedel and Crutzen, 1993) كما سيتم مناقشتها بإيجاز في الأجزاء التالية.

1.2.5.12 دورة تدمير الأوزون بواسطة أكاسيد النيتروجين (NO_x/O_3)

تأتي أكاسيد النيتروجين في طبقة الستراتوسفير أساساً من تفكك أكسيد النيتروز ضوئياً، الذي غالباً ما ينتج عن عمليات ميكروبية عند سطح الأرض. أيضاً، يعتبر أكسيد النيتروز أحد غازات البيوت الزجاجية الأساسية. ويتكون أساساً داخل الترب الرطبة عن طريق اختزال ميكروبي لأسمدة نتراتية، لكن يمكن أيضاً أن ينتج في المحيطات. ومنذ السبعينيات من القرن الماضي تولد اهتمام من أن زيادة الاستخدام الزراعي لأسمدة النيتروجين يمكن أن يزيد من كمية أكسيد النيتروز الذي يصل لطبقة الستراتوسفير، مسبباً في نهاية الأمر استنزافاً للأوزون. وتشير قياسات N_2O في الهواء الجوي أن تركيزه يرتفع بنحو 0.25% سنوياً. ويمكن لزيادة قدرها 25% في N_2O مع نهاية القرن الواحد والعشرين أن تخفض الكمية الكلية للأوزون في طبقة الستراتوسفير بنسبة تتراوح ما بين 3-4%، وهو ما يؤدي إلى زيادة الإصابة بسرطان الجلد بنسبة تتراوح ما بين 2-10%.

ليس معروفاً أن أكسيد النيتروز يمكن أن يتعرض للفقد داخل طبقة التروبوسفير، لكنه، يتحول أساساً إلى NO في طبقة الستراتوسفير بواسطة التفاعلات التالية:



حيث يبدأ جزيئاً (NO) الناتجان في تفاعلات تدمير O_3 حسب المعادلات المشار إليها سابقاً. لاحظ أن $O(^1D)$ في المعادلة (8-12) يشير إلى أن الأكسجين الذري هنا في حالة إثارة إلكترونية.

2.2.5.12 دورة تدمير الأوزون بواسطة بخار الماء (H₂O/O₃)

تكون طبقة الستراتوسفير عموماً جافة جداً، لكنه يوجد قدر كافٍ من بخار الماء ليتفاعل مع الأكسجين الذري المثار إلكترونياً منتجاً شقاً حراً (HO) من خلال التفاعل:



إن دورة الماء المخفزة لها تأثير أقل على تراكيز O₃ مقارنة بدورات التفاعل الأخرى؛ لكنها قد تكون مهمة في وجود كميات كافية من بخار الماء.

3.2.5.12 دورة تدمير الأوزون بواسطة مركبات الكلوروفلوروكربون (CFC/O₃)

تعتبر مركبات الكلوروفلوروكربون (مثل CF₂CL₂ و CFCL₃) مستقرة نسبياً في طبقة التروبوسفير، لكنها وبمجرد وصولها لطبقة الستراتوسفير يتم تفكيكها ضوئياً بواسطة الأشعة الشمسية فوق البنفسجية. وينتج عن عملية التفكك الضوئي العوامل المساعدة CL وCLO، اللذان يقومان باستنزاف O₃. وهناك دليل يربط استنزاف O₃ في منطقة القطب الجنوبي بمركبات CFC_s وملوثات أخرى تحمل عنصر الكلور والبروم إلى طبقة الستراتوسفير. وقد تم التعرف على أن أحادي أكسيد الكلور (CLO) هو المسبب الرئيسي في استنزاف O₃ في مناطق القطبين. كما قد تلعب الأنماط المناخية وثورات البراكين أيضاً دوراً في هذا الخصوص.

يعتقد أن مركبات الكلوروفلوروكربون تلعب دوراً محتملاً في ظاهرة الاحتباس الحراري، لأن الكثير منها يتميز بكفاءة عالية جداً في امتصاص الأشعة طويلة الموجة، مما يسهم في تأثير البيت الزجاجي.

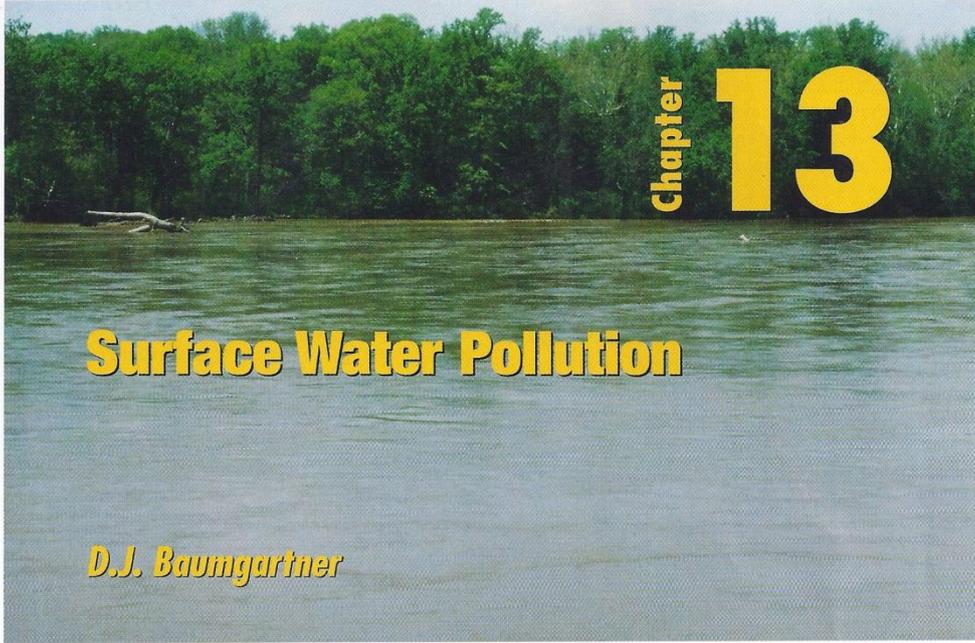
المراجع، ولمزيد إطلاع

- Ahrens C.D. 1993) *Essential o Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Wet Publishing Minneapolis/St. Paul, Minnesota.
- Albritton D.L., Monastersky R., Eddy J.A., Hal J.M., and Shea E. (1992) *Our Ozone Shield: Reports to the Nation on Our Changing Planet*. Fall 1992. University Cooperation for Atmospheric Research, Office for Interdisciplinary Studies, Boulder, Colorado.
- Dickinson R., Monastersky R., Eddy J.A., Bryan K., Matthews S. (1991) *The Climate System: Reports to the Nation on Our Changing Planet*. Winter 1991. University Cooperation for Atmospheric Research, Office for Interdisciplinary Studies, Boulder, Colorado.
- Graedel T.E. and Crutzen P.J. (1993) *Atmospheric Change: An Earth System Perspective*. W.H. Freeman, New York.
- Hanna S.R., Briggs G.A., and Hosker, Jr. R.P. (1982) *Handbook of Atmospheric Diffusion*. U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- Mitchell J.F.B (1989) The "greenhouse" effect and climate change. *Reviews of Geophysics*. 27, 115-139.
- Oke T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. Routledge, New York.
- Schlesinger W.H. (1991) *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego, California.

أسئلة

1. صف كيف تتكون انقلابات حرارة الهواء السطحي. لماذا تكون انقلابات الهواء هامة بالنسبة لتلوث الهواء في المناطق الحضرية؟
2. ما هي العوامل التي تؤثر على استقرار الهواء الجوي؟ اشرح.
3. صف كيف يؤثر استقرار الهواء الجوي على انتشار التلوث بغاز SO_2 المنبعث من مدخنة ما؟
4. صف العمليات التي تزيل تلوث الهواء.
5. ما هو الفرق بين تلوث الهواء الأساسي وتلوث الهواء الثانوي حسب تصنيف وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)؟ أعط مثلاً عن كل نوع من هذه الملوثات.
6. عرف ما هو الضبخان الكيموضوئي؟ اشرح كيف يتكون؟
7. اشرح كيف يكون O_3 مفيداً في طبقة الستراتوسفير، بينما يكون O_3 ضاراً في طبقة التروبوسفير؟
8. اشرح كيف تقوم مركبات الكلوروفلوروكربون الناتجة عن النشاط البشري بتدمير أوزون (O_3) طبقة الستراتوسفير.

الباب الثالث عشر
تلوث المياه السطحية



تمثل مياه النهر العكرة، مثل تلك في نهر بوتاميك في ولاية ميريلاند بالولايات المتحدة تحديات فنية لمحطات المعالجة البلدية التي يتعين عليها إنتاج مياه شرب صافية لريائها.

1.13 موارد المياه السطحية العذبة

تعتبر المياه العذبة نادرة ومورداً ذا قيمة عالية - هي سهلة التلوث. وبمجرد تدهورها لدرجة يمكن اعتبارها ملوثة يكون استعادة جودتها صعباً ومكلفاً. ولذلك، فإن دراسة تلوث المياه ركز بالدرجة الأولى على جداول المياه والبحيرات، وأن معظم الأدوات التي تم تطويرها

بواسطة الوكالات المنظمة مثل "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA) قد تم استخدامها لحماية جودة هذا الجزء من المياه السطحية على الأرض.

تمثل المياه السطحية العذبة فقط 1/10000 من الكمية الكلية المتاحة من المياه على كوكب الأرض، ومع ذلك تبدو هذه الكمية هائلة عندما يعبر عنها حجماً على أنه يساوي 125 ألف كيلومتر مكعب. إن هذا الحجم من المياه يمكنه غمر الولايات المتحدة لعمق نحو 12 متراً. وعلى المستوى العالمي، يكون هذا الحجم ثابتاً تقريباً من عام لآخر، نظراً لأنه يعوض بواسطة هطول المياه التي تبخرت من المحيطات (350 ألف كيلو متر مكعب) ومن اليابسة (70 ألف كيلومتر مكعب). ولسوء الحظ، فإن معظم الهطول يقع ثانية في المحيطات، وأن 110 ألف كيلومتر مكعب فقط تسقط على اليابسة. كما أن أكثر من نصف كمية المياه البالغة 40 ألف كيلومتر مكعب التي لا تتبخر تفقد بالجريان السطحي جراء الفيضانات ولا تكون متاحة للاستخدام خلال العام كله.

وتتضمن البحيرات كل المياه السطحية العذبة تقريباً على كوكب الأرض. وتمثل مياه الأنهار والجداول أقل من واحد في المائة من الحجم الذي تحتويه البحيرات. وهذه الحقيقة لوحدها تشير إلى أن البحيرات تحتاج حماية خاصة ضد التلوث. وهناك حقيقة أخرى يتعين أخذها في الاعتبار وهي أنه يلزم العديد من السنوات لتعويض البحيرات نظراً للكمية الصغيرة نسبياً من الهطول الذي يسقط على البحيرة والكمية الصغيرة أيضاً من مياه الجداول التي تجري مباشرة إلى هذه البحيرات. وفي المتوسط، يستغرق تعويض بحيرة مائة عام، بينما يكون زمن تعويض المياه في الجداول والأنهار 11 يوماً فقط. ولهذا، إذا ما انتشرت الملوثات خلال

بحيرة متوسطة، فإن المياه القادمة لا يمكنها إعادة البحيرة لجودتها الأصلية لفترة طويلة من الزمن.

إن المياه المحفوظة في الخزانات والبحيرات، ومعها المياه التي تجرى في جداول على امتداد السنة، تتعرض لإجهاد كبير جداً؛ نتيجة لاستخدامها في توفير مياه الشرب، والزراعة، والصناعة، والترفيه، ويمكن بسهولة إساءة استخدامها. إن معظم المدن والمصانع في الولايات المتحدة تفرغ المياه العادمة في جداول المياه والأنهار، بدلاً عن البحيرات والخزانات. وعلى الرغم من أن المياه العادمة تتم معالجتها، إلا أن كميات كبيرة من الملوثات تنساب في اتجاه نهاية المجرى في طريقها إلى المحيط حيث يعاد استخدامها مرات ومرات.

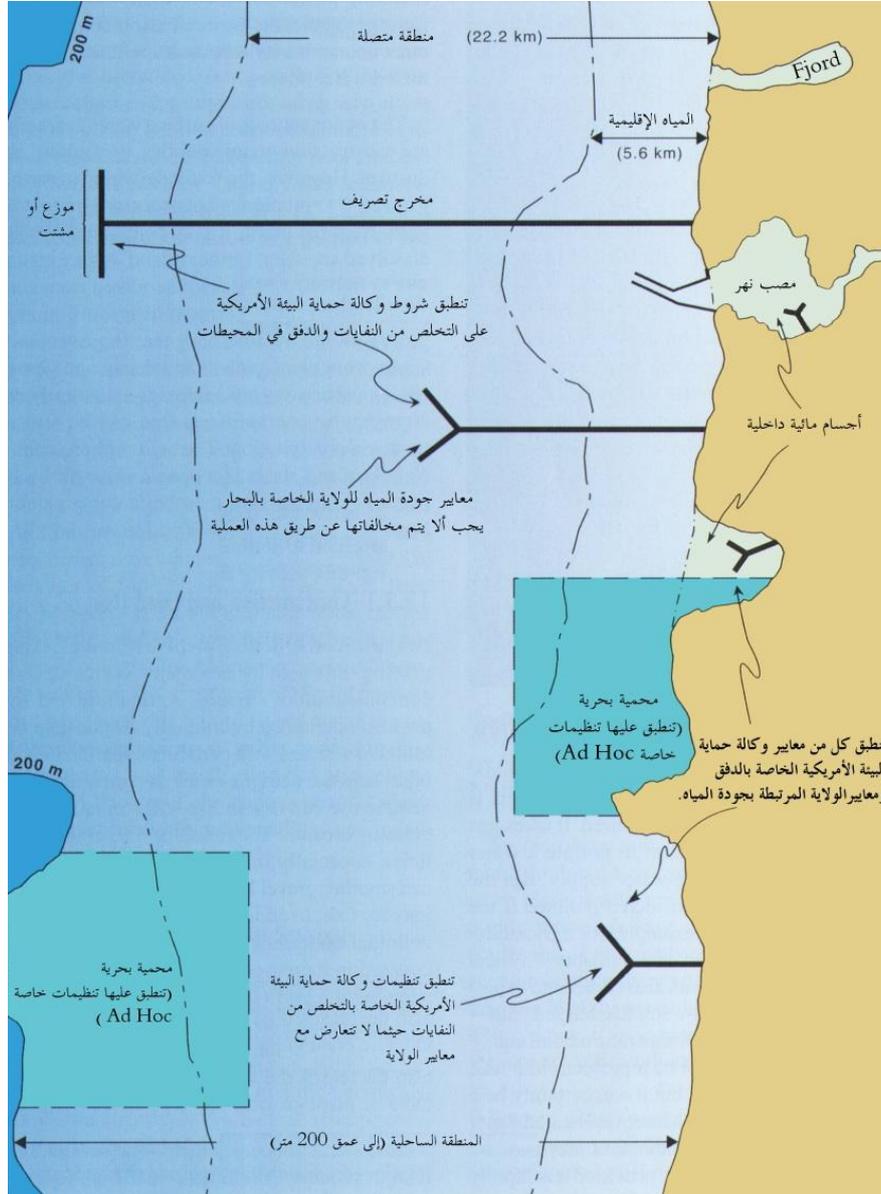
2.13 مصادر المياه البحرية

تضم المحيطات معظم المياه على كوكب الأرض. ومع ذلك، وحتى في وجود الأحجام الهائلة من الماء التي قد تنتشر فيها الملوثات، يمكن للموارد البحرية أن تتلوث. وباستخدام مؤشرات فيزيائية وحيوية مختلفة، يمكننا تصنيف البيئة البحرية على أنها تتشكل من ثلاثة مكونات: المنطقة الساحلية، والطبقة العليا المختلطة، وأعماق المحيط. وتشارك عدة وكالات تنظيمية ومؤسسات دولية في مسؤوليات مختلفة تجاه هذه المكونات. إن المنطقة الساحلية، التي تكون الأكثر عرضة لأنواع التلوث اليومية التي توجد في المياه العذبة للبحيرات والأنهار، تكون عادة مجال عمل الوكالات المنظمة لجودة المياه التي أسست من قبل كل دولة. أما المنظمات الدولية فإنها تتعامل تقليدياً مع قضايا التلوث التي ترتبط بالمحيطات المفتوحة وقيعان البحار، وهو ما يشمل تقريباً المكونين الآخرين. وبالإضافة إلى مكونات البحر التي تم

وصفها فيزيائياً، توجد مناطق محددة قانوناً (وهي محل جدل)، وتتداخل أحياناً، تؤثر على الإجراءات العملية التنظيمية، كما هو موضح في الشكل (1-13).

1.2.13 المنطقة الساحلية

تمتد المنطقة الساحلية من خط المد المنخفض إلى خط العمق الكنتوري البالغ 200 متراً، وهو ما يميل إلى مطابقته الحد الجيوفيزيائي للرصيف القاري. ويمكن أن يصل عرض المنطقة الساحلية إلى 1400 كيلومتر على طول بعض السواحل وأن يقل عن كيلومتر واحد على امتداد سواحل أخرى. ويبلغ متوسط عرض هذه المنطقة عالمياً نحو 50 كيلومتراً، مشكلاً نحو 8% من سطح المحيط. (إن المنطقة الساحلية لولاية ألاسكا أكبر من تلك لبقية الولايات المتحدة الأمريكية).



شكل (1-13): تنظيمات تلوث المياه في المنطقة الساحلية. مخارج التصريف تم توضيحها بالشكلين (Y,T)،
أنظر الجزء (1.6.13).

وضمن تعريف المنطقة الساحلية، يكون الفرق بين مصبات الأنهار والساحل المفتوح مهماً عند تناول موضوع التخلص من المياه العادمة ومدى إمكانية حدوث مشاكل تلوث. إن جل المخلفات المنقولة بواسطة المياه لقارة معينة تدخل المنطقة الساحلية عبر مصبات الأنهار. ومصبات الأنهار (estuaries) هي عبارة عن أجسام من المياه متصلة مباشرة بالبحر الذي تتخفف ملوحته إلى حد كبير بالمياه العذبة، مثل مياه الأنهار. ونظراً لأن مصبات الأنهار توفر بيئات محددة وحيوية للكائنات البحرية لتكاثر فيها وتطعم صغارها، فإن جودة المياه لها أهمية خاصة. إن الأنواع التي تعيش بالمنطقة الساحلية، خاصة مصبات الأنهار، لا بد أن تكون عالية التحمل للإجهادات البيئية الطبيعية التي تشمل تغيرات يومية في الملوحة، والعكارة، ودرجة الحرارة، والإشعاع فوق البنفسجي . وبسبب هذه القدرة الطبيعية على التحمل، فإن الكائنات الساحلية قد تكون قادرة على تحمل الملوثات المصاحبة للمخلفات الصناعية والبلدية بدرجة أعلى من الكائنات التي تعيش بمنطقة الرصيف القاري، حيث تكون البيئة الطبيعية مستقرة جداً. ويتعين المحافظة على بيئة مصبات الأنهار بالدرجة الأولى نتيجة لمحدوديتها، مقارنة ببيئة الرصيف الضخمة. ولهذا السبب فإن دفع المياه العادمة المعالجة يتم عادة ضخها بعيداً عن الشاطئ بدلاً من ضخها بالمصبات في المناطق الساحلية. ويستخدم أنبوب كبير أو نفق يسمى المصب (outfall)، لنقل الدفق إلى موقع التخلص (انظر الشكل 1-13 والشكل 2-13).

يتعين أيضاً أخذ المعالم الطبيعية للمنطقة الساحلية في الاعتبار بخصوص التخلص من المخلفات المعالجة بعيداً عن الشواطئ. فمثلاً، يمكن أن تعيق الألسن الصخرية التي تبرز

داخل البحر كلا من تدوير المياه وتبادل المياه القريبة من الشاطئ بمياه المحيط المفتوح. لهذا فإن تموضع أنابيب الصرف (outfalls) يكون أفضل ما يمكن بعيداً عن الشواطئ بدلاً عن وضعها داخل منطقة تأثير اللسان الصخري. وبالمثل، يتعين ألا يوضع أنبوب الصرف قريباً من الساحل عند المصببات أو الخلجان ذلك أنه يمكن للمد الجزري أن يحمل المخلفات المخففة إلى داخل المصببات، ملغياً لأهم المميزات التي يتم تحقيقها بالتخلص من المخلفات بعيداً عن الشواطئ الساحلية.

2.2.13 مياه المحيط المفتوحة

توجد حالات وظروف متنوعة يمكنها أن تسهم في تلوث مياه المحيط المفتوح تتجاوز المنطقة الساحلية منها الغبار المتساقط من الجو، وانسكاب النفط، ورمي المخلفات الخطرة والحماة (الوحد الصحي) الذي تمارسه بعض دول العالم. وتميل المواد الطافية والذائبة إلى البقاء في الطبقة العليا المختلطة (upper mixed layer) للمحيط، حيث قد تتعرض للتحلل.

وتعتبر هذه الطبقة العليا من المحيط المنطقة الأكثر نشاطاً بالنسبة لعملية البناء الضوئي، حيث يمكن للحياة النباتية - ومن ثم الحيوانية - أن تزدهر. إن عمق هذه الطبقة، الذي يتراوح ما بين 100 و1000 متراً، يتغير حسب الموسم والموقع الجغرافي. وعلى الرغم من أن الخلط بين مياه الطبقات العليا للمحيط وتلك الأكثر عمقاً يعترضه التدرج الكبير في الكثافة، إلا أن الحبيبات المتكونة في الطبقة المختلطة العليا، أو التي يتم تفريغها فيها، قد

ترسب في نهاية المطاف لأعماق كبيرة تحول دون عودتها في صورة معلقة عن طريق ثوران متولد سطحياً، وهي بذلك تصبح جزءاً من الراسب الحثاقي الطبيعي لمياه المحيط العميقة. ونظراً لأن جودة المياه للطبقة المختلطة العليا يمكنها أن تؤثر بدرجة كبيرة على جميع صور الحياة هناك، فإنه من المهم أخذ الاحتياطات في عمليات التخلص من المخلفات. وعندما يوجد تبرير مقبول للتخلص من مواد معينة في مياه المحيط، يمكننا استخدام تقنيات لتفادي تلوث الطبقة المختلطة العليا وتسهيل نقل والاحتفاظ طويل المدى للمواد في المياه العميقة للمحيطات المفتوحة، التي تسمى المحيط العميق (abyssal ocean)، انظر أيضاً الجزء 2.6.13.

وعلى سبيل المثال اقترح استخدام حافظات للتخلص من مواد مثل المواد الكيميائية الحيوية الغريبة (xenobiotic chemicals) أو المخلفات المشعة. ويمكن أيضاً أن تستخدم الأنايب لحمل ثاني أكسيد الكربون السائل إلى قاع البحر، حيث يشد لفترة زمنية طويلة - كافية للمساعدة في تقليل معدل الاحتباس الحرارى (انظر الجزء 1.5.12).

3.13 مصادر تلوث المياه السطحية

التلوث مصطلح وصفي. فهو يصف حالة يبلغ عندها مستوى الملوثات نقطة يجعل من الاستخدام المستهدف للمياه غير ممكن. ويلزم فقط كمية صغيرة من ملوث ما لتلوث جسم مائي مستهدف ليكون مصدراً لمياه الشرب. لكن المياه ذاتها قد لا تعتبر ملوثة إذا ما كان استخدامها، مثلاً، للزراعة. كذلك، فإن التلوث لا يقتصر على الملوثات. فالعوامل الفيزيائية للبيئة قد تسهم أيضاً في التلوث. فمثلاً، يؤدي ضخ مياه ساخنة من محطة توليد

طاقة إلى تغير في درجة الحرارة لبيئة مائية. وقد لا يكون ذلك مشكلة إذا ما حدث ذلك في بحيرة أو نهر خلال فصل الشتاء، لكنه وبالتأكيد سيكون كذلك إذا حدث في فترة الصيف. وزيادة على ذلك، فإن المياه الساخنة أو المياه التي تحتوي على بعض الملوثات قد لا تسبب مشكلة عند أي وقت من السنة، شرط أنها تخلط بسرعة مع المياه السطحية وأن المواد المخففة لا تتراكم مع الزمن. كما أن هناك أنواعاً كثيرة من الملوثات التي يمكن أن تستوعب بواسطة البيئة الطبيعية دون أن تنتج تلوثاً، لكنه وفي حالات كثيرة فإن الملوثات نفسها (أحياناً بارتباطها مع ملوثات أخرى) يمكن أن تسبب تلوثاً حتى في الأجسام المائية جيدة الخلط.

إن المصادر الرئيسية لتلوث المياه السطحية هي بقايا البناء، والبلديات، والزراعة والصناعة. وتجدر الإشارة إلى أن المياه التي تصل الأرض في صورة هطول ليست بالضرورة نقية بداية. وبالقرب من السواحل، قد تحتوي مياه الهطول على أملاح بحرية ذائبة أو محمولة؛ أما بعيداً عن السواحل، فإنها قد تحتوي على مركبات عضوية وأحماض تم غسلها من الملوثات التي أضيفت للهواء الجوي عن طريق كل من العمليات الطبيعية والنشاطات البشرية. وتعتبر الغازات الناتجة عن نمو النبات وتحلله والغازات الناتجة عن نشاط جيولوجي أمثلة للملوثات الجوية الناتجة طبيعياً والتي يمكن أن تعاد للأرض عن طريق الهطول. وتعتبر مشكلة الأمطار الحمضية بولاية نيويورك مثلاً واضحاً ومعروفاً للملوثات الجوية التي تنتج عن نشاط بشري وتسهم في تلوث المياه السطحية.

1.3.13 أعمال البناء واستخدام الأرض

نظراً لأن أعمال البناء تشمل إزالة للأشياء من فوق سطح الأرض وكذلك التسوية، فإن هذا النشاط يعتبر مصدراً رئيساً لتلوث مجاري المياه بالرسوبيات. كذلك، فإن الزراعة والأعمال الغابية تعرف تقليدياً على أنها عمليات مسؤولة عن تلوث مجاري المياه بمواد منقولة. إضافة لهذا، فإن نشاطات استخدام أخرى للأرض مثل المركبات السياحية التي تسير على الطرق غير المعبدة يمكنها أن تتسبب بعدم استقرار مكونات التربة، مما يزيد من انجرافها. إن انجراف حبيبات التربة بواسطة المياه، خاصة بالأراضي ذات التضاريس المنحدرة وتحت ظروف معدلات أمطار عالية، يمكن أن تغلق فجوات المراقد الحصوية التي تعمل كبيئات لوضع بيض الأسماك. وزيادة على ذلك، يمكن للمواد المنقولة المعلقة والمواد الغروية أن توفر ملجأ للكائنات الدقيقة، مما يستوجب زيادة في المعالجة لمرافق توفير المياه للاستهلاك البشري (انظر الجزء 5.20). وتجدر الإشارة إلى أن الضرر المصاحب لتلوث المياه السطحية لا يقتصر على الموارد المائية بل إن التعرية تقلل أيضاً من مورد التربة السطحية اللازمة لتحقيق نمو نبات مستدام.

تعتبر التعرية، بسبب النشاط البشري والطبيعي، عملية مستمرة. وبالأخذ في الاعتبار كل الأمور، فإن عشرات الآلاف من الهكتارات من الأراضي الضفية المحاذية للأهوار بالولايات المتحدة تفقد سنوياً بسبب التعرية، وإن مئات الملايين من الأطنان من التربة السطحية تنقل سنوياً بواسطة الأهوار إلى البحر. وقد تحجب التعرية الطبيعية لضفاف الأهوار في بعض المناطق التلوث الذي تسببه نشاطات الإنسان. فمثلاً، تحمل بعض الأهوار مثل نهر

الميسسي طبيعياً نحو 500 ملليجرام من المواد الصلبة المعلقة في كل لتر ماء، ولهذا فإن إضافة حتى العديد من الأطنان من مواد صلبة فوق جزء من النهر عن طريق نشاط إنشائي قد لا يؤثر سلباً على استخدام المياه. وفي مناطق أخرى، يمكن لانجراف ضفاف النهر أن يتسارع نتيجة لسوء أساليب إدارة الأراضي. وتوجد بعض مجارى المياه خالية طبيعياً من الرسوبيات، ولذا فإن إضافة كمية قليلة لا تتعدى طناً واحداً من التربة في السنة يمكن أن يتسبب في تلوث جزء كبير من المجرى المائي.

مع بداية السبعينيات من القرن الماضي، بدأت وكالات التحكم في التلوث بالولايات المتحدة بتقييد عمليات بناء الطرق وعمليات قطع أشجار الخشب في مناطق الغابات للتقليل من انجراف التربة. وعلى الرغم من أن هذه القيود كانت تستهدف بالدرجة الأولى التقليل من التأثيرات السلبية على بيئات الأسماك، إلا أن نتيجتها غير المبرجة كانت تحسيناً في حفظ التربة السطحية وقد شهدت فترة الثمانينات من القرن الماضي قدراً كبيراً من الاهتمام المخصص لتقليل فقد التربة بواسطة المياه من مواقع بناء المساكن الفردية، إلى مراكز تطوير المساكن الفارهة والمراكز التجارية الكبيرة. وبعد ذلك، وفي التسعينيات من القرن الماضي ساعد تسويق مفهوم اللا حرث (no-till) في مجال الزراعة على تخفيض فقد التربة السطحية الذى تسببه الرياح والمياه، وهذا بدوره ساعد على تخفيض إمكانية حدوث مشاكل تلوث في مياه الأنهار والخزانات (انظر الشكل 14-4). وربما تكون إجراءات التحكم في فقد التربة للأنهار قد خفضت تراكيز ملوثات أخرى، مثل المبيدات والمعادن، التي يمكنها أيضاً تلويث المياه السطحية. وتجدر الإشارة إلى أن المصادر الرئيسة للكثير من هذه الملوثات تتمثل في البلديات والصناعة وكذلك الزراعة.

2.3.13 الصرف البلدي والحضري

يشمل الصرف الحضري المخلفات البشرية وأنواع أخرى من المواد التي تنتج عن المنازل مثل الأغذية، والصابون والدهانات والدهون. ونتيجة لذلك، فإن هذه المخلفات تحتوي على كائنات دقيقة، ومعادن، وبلاستيك ومواد كيميائية عضوية قابلة للتحلل، ومواد كيميائية حيوية غريبة. أما المخلفات البلدية فإنها تشمل خليطاً من كل المواد التي ذكرت زيادة على المخلفات المحمولة بالمياه من المصانع والمدارس والمستشفيات والمطارات المربوطة بنظام المجاري البلدي. وفي كثير من المدن تسهم نواتج الغسيل ومخلفات أخرى التي تسكب في الشوارع في زيادة محتوى المجاري البلدية من الملوثات.



شكل (13-2): نموذج أنبوب صرف قديم (لا يستخدم مُفَرَّق) يوضح تراكم الحبيبات الخشنة فوق قاع البحر مقابل جنوب شرقي فلوريدا. يبدو الدفق الأولى طافحاً عند نهاية الجزء العلوي للأنبوب المفتوح.

وقد ينتج تلوث المياه السطحية بالكثير من الملوثات التي توجد في مجاري البلدية عندما تعالج هذه المخلفات بطريقة سيئة أو حتى عندما يتم تفريغ مخلفات الصرف عالية المعالجة إلى داخل مجرى مائي يكون غير قادر فيزيائياً أو بيولوجياً على استيعاب حمولة المخلفات. وأحياناً أخرى يكون ذلك ناتجاً عن أن ملوثات محددة لم يتم إزالتها بكفاءة عن طريق المعالجة.

تمثل المخلفات البشرية جزءاً معتبراً من الملوثات في الصرف، لذا فإن الكثير من مشاكل تلوث مياه الجداول المسجلة - وكذلك تقنيات التحكم في التلوث التي تم تطويرها - ترتبط بالمخلفات البشرية. وتضم مكونات المخلفات البشرية التي تسبب بشكل واضح مشاكل تلوث للجداول المائية عالمياً كلا من الكائنات الدقيقة المعوية (انظر الجزء 4.2.3.19) والمادة العضوية.

1.2.3.13 الكائنات الدقيقة المعوية

إن الكثير من الكائنات الدقيقة المعوية، التي تستطيع أن تبقى حية في المياه السطحية لفترة زمنية طويلة، يمكنها أن تسبب وعكة، أو مرضاً، أو حتى الموت إذا ما تعرض لها الإنسان. إن الطريقة الأساسية للوقاية التي كان يتبعها مستخدمو المياه عند نهاية المصب ضد الأوبئة المرضية الناشئة بسبب الكائنات المنقولة بالماء (مثل مرضى التيفود والكوليرا)، كان يتمثل تقليدياً في معالجة فيزيائية عالية الجودة لمياه الشرب والتعقيم باستخدام كيماويات مثل الكلور. لكنه يلاحظ، أن المرض والشعور بالتوعك يمكن أن يكون أيضاً مشكلة لمستخدمين آخرين لمصدر الجدول المائي، مثل الاستحمام الترفيهي وصيد محار البحر. وعلى

سبيل المثال، يمكن أن تسبب البكتيريا والفيروسات وكائنات دقيقة أخرى التهابات في الجزء العلوى من الجهاز التنفسي والأذن للمستحمين، إضافة إلى أن حالات مرض كثيرة نسبت لتناول المحار غير جيدة الطهو والتي تم حصادها من مياه شاطئية ملوثة. أيضاً، فإن بعض المصطافين، مخدوعون بصفاء وبرودة الجداول المائية في مناطق نائية، أصبحوا مرضى بعيد شربهم مياه خام أو سيئة التعقيم. إن مياه الجداول الجبلية التي تبدو صافية وغير ملوثة ظاهرياً يمكن أن تتلوث بسهولة بواسطة مخلفات بشرية من مجرى واحد أو اثنين عند بداية المجرى، أو حتى بواسطة تجمع حيوانات من ذوات الدم الدافئ. فمثلاً، يحدث الخلل المعدي المعروف بمرض (giardiasis) الذي يسببه بروتوزوا Giardia، نتيجة تلويث من حيوانات للمياه والتلج (انظر الجزء 1.1.3.19). إنه من الحكمة، إذا لم ضرورياً تماماً. افتراض، وبدون استثناء، أن كل المياه السطحية ملوثة بكائنات دقيقة لها علاقة كبرى بصحة الإنسان.

وبدرجة معينة، فإن جودة المياه المستخدمة في أغراض ترفيهية محمية عن طريق معالجة مياه الصرف البلدية والحضرية عند نقطة التفريغ إلى داخل المجرى المائي، وكذلك عن طريق عمليات التصفية الطبيعية في الماء. ويمكن لعمليات محطات معالجة مياه الصرف عالية الجودة إزالة أكثر من 99.99% من الكائنات الحية الدقيقة في مياه الصرف، لكن هذا المستوى من المعالجة ليس دائماً متاحاً. إضافة إلى ذلك، فإن حوادث الإعصار الكبيرة يمكن أن تزيد بشكل كبير حجم المياه المتدفقة خلال نظم صرف قديمة (الصرف الصحي مضاف إليه مياه الإعصار) مما يزيد من احتمالية وصول مياه صرف غير جيدة المعالجة للمجرى المائي. إن مثل هذه الحوادث تتسبب كثيراً في غلق شواطئ الاستحمام القريبة نتيجة للارتفاع

المؤقت لتراكيز أعداد البكتيريا كمؤشر للتلوث البرازي. وتصدر الإشارة إلى أن الاكتفاء بطريقة معالجة المياه العادمة بمفردها غير كافية على الإطلاق لإيجاد مياه نهر صحية مناسبة كمياه شرب للبلدية.

2.2.3.13 المادة العضوية

من بين الكثير من الكيماويات العضوية في مياه الصرف البلدية، يمكننا تحديد مجموعتين رئيسيتين على أساس أنواع مشاكل التلوث التي تسببها للمياه السطحية. وتضم إحدى المجموعات المركبات العضوية الكلورة المصنعة والمستديمة التي تم إنتاجها بواسطة الصناعة البتروكيماوية وبكميات مضطربة منذ نهاية الحرب العالمية الثانية؛ وتشمل هذه المركبات المبيدات الحشرية والهيدروكربونات الكلورة مثل مركبات ثنائي الفينيل متعددة الكلور (PCBs) والإيثيلين ثلاثي الكلور (TCE) [انظر الجزء 4.7]. وتتميز هذه الكيماويات بتحللها البطيء جداً في البيئة ويمكنها أن تتسبب في سمية لفترة طويلة من الزمن، إما سمية حادة أو مزمنة كنتيجة لتراكمها الحيوي في الأنسجة. وقد استحدث مصطلح (xenobiotics) ليمثل كلا من الطبيعة الغريبة (xeno) لصور هذه الكيماويات وخصائصه نشاطها الحيوي (biotic).

وتنضوي مواد عضوية أخرى في رتبة تسمى مواد عضوية قابلة للتحلل بيولوجياً (biodegradable organic matter)، التي تشمل مركبات عضوية طبيعية توجد في المخلفات، مثل الكربوهيدرات والبروتينات. وتندرج الكثير من الكيماويات الصناعية تحت هذا التصنيف. إن المشكلة المصاحبة لهذه المواد العضوية (مشكلة برزت مبكراً في فترة الحياة

الحضرية الحديثة) وهي انخفاض مستوى الأكسجين الذائب في مياه الجداول المائية نتيجة للتحلل الميكروبي. ويتمثل أهم مظهر لتأثير هذا التلوث في مياه الجداول في أن فقد الأكسجين الذائب يكون ضاراً للكائنات المائية. أما التأثير الثانوي، فإنه في حالة ما أستهلك الأكسجين الذائب كله عن طريق الأكسدة الميكروبية الهوائية للمخلفات، يصبح التحلل اللاهوائي هو السائد مما يتسبب في إطلاق غازات كريهة وضارة بالصحة من الجداول المائي. وقد تم تطوير طرق معالجة للمياه العادمة، تشمل مرشحات تنقيطية مع التهوية النشطة لوحل المجاري، في فترة الخمسين سنة الأولى من القرن الماضي وذلك للتعامل مع هذه المشكلة.

4.13 التقدير الكمي لتلوث المياه السطحية

في الوقت الذي كانت تطور فيه طرق المعالجة تم بالتزامن تطوير أساليب للتقدير الكمي وتقييم كل من التهديد بالمرض ومشكلة الأكسجين الذائب الذي يحدث بسبب تفريغ المخلفات البلدية في الأجسام المائية. وتستخدم الطرق الكمية أيضاً لحساب درجة المعالجة المطلوبة. إن هذه الطرق تقوم على فهم للعمليات الفيزيائية والبيوكيميائية التي تتحكم في تحلل الميكروبات والكيماويات على امتداد الزمن.

1.4.13 موت الكائنات الكاشفة

في بداية تطوير طرق التقييم الكمية الكلية، تبين للعلماء أن كثيراً من الكائنات الدقيقة المتنوعة التي توجد في المخلفات البشرية لا يمكن تنميتها أو تحديد أعدادها بفعالية. ونتيجة لذلك، استقر رأيهم على كائنات المجموعة القولونية (coliform group) لتستخدم

كدليل للتلوث بالبراز ذلك أنه يمكن تنميتها وتحديد عددها بسهولة. ونتيجة لأنه من المعروف وجودها بأعداد كبيرة في معدة جميع الحيوانات ذات الدم الدافئ، فإن المجموعة القولونية تعطى مؤشراً جيداً للتلوث البرازي؛ لكنها لم تكن محددة بدرجة عالية، ولهذا فإن كائنات دالة أخرى مثل البكتيريا القولونية البرازية والبكتيريا العقدية (الستربتوكوكس) قد تستخدم أيضاً كدالات على الجودة الصحية للمياه (أيضاً، انظر الجزء 4.2.3.19).

أظهرت الاختبارات أن 99.99% من البكتيريا الدالة يمكن إزالتها عن طريق معالجة المياه العادمة. لكن الجزء المتبقي (0.01%) يظل مشكلة، ويثير قلقاً حول جودة المياه للاستخدام الترفيهي، على سبيل المثال. والحقيقة أن، عدد البكتيريا في مخلفات الصرف كبيرة جداً (تراوح ما بين 500 مليون إلى 2 بليون في كل 100 مل)، ولذا فإن نسبة الإزالة ليست مفيدة عند تقييم الجودة مقارنة بالتركيز المتبقي منها. إن تراكيز الكائنات الدقيقة المسموح بها للاستخدامات المختلفة للمياه منخفضة نسبياً. ففي حالة استخدام المياه لأغراض الشرب، يتعين بالطبع أن يكون تركيز البكتيريا الواوية البرازية صفراً؛ لكن تركيزاً يقل عن 1 في كل مل يمكن السماح به؛ أما لغرض استخدام الماء في الاستحمام، فإن تركيزاً يصل 1000 في كل 100 مل يكون مقبولاً بشكل عام. وبهدف التوضيح، فإذا ما افترضنا أن مخلفات الصرف غير المعالج تحتوى على أعداد من الكائنات الدقيقة تقدر بليون (10⁹) في كل 100 مل (انظر الجدول 7-19)، فإن إزالة تصل كفاءتها 99.99% ستترك 100 ألف كائن دقيق في كل 100 مل. والأخبار السارة أن تركيز الكائنات يقل مع الزمن والمسافة من نقطة بداية الضخ في اتجاه نهاية المجرى، وذلك بسبب عمليات طبيعية. وحسب الموقع وقرب

المستخدمين للمياه، فإن نقطة الضخ، وأسلوب الضخ يمكن تصميمها لجعل معدل التنقية الطبيعية أكثر مثالية، وهو ما يساعد على تخفيض مشاكل التلوث عند نهاية المجرى. أما الأبخار غير السارة فإنه يتوفر فقط قدر ضئيل جداً من البيانات الخاصة بالعمليات التي تؤثر على الموت الميكروبي.

لوحظ أن التركيز (C) للبكتيريا الكاشفة للتلوث البرازي ينقص مع الزمن (t) حسب تفاعل من الدرجة الأولى، وتكون المعادلة لذلك :

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (1-13)$$

حيث أن K هو ثابت معدل الموت . أحد المؤشرات الذي كثيراً ما يستخدم في تحاليل تلوث المياه ويتم الحصول عليه عن طريق حل معادلة الدرجة الأولى هو (t₉₀)، وهو الزمن اللازم لموت 90% من البكتيريا. وهذا المؤشر هو مماثل لفترة نصف العمر t₅₀ أو t_{1/2} الذي يستخدم في دراسات النشاط الإشعاعي (أنظر المعادلة 6-17)، ويتم تقديره بنفس الأسلوب، وبذلك نحصل على قيمة K من المعادلة:

$$t_{90} = \frac{2.3}{K} \quad (2-13)$$

وتستخدم المعادلة العامة (المعادلة 1.13) للحصول على التركيز (C_t) عند أي زمن

t، بعد تحديد التركيز المبدئي (C₀) عند الزمن t = صفر كما يلي :

$$C_t = C_0 e^{-Kt} \quad (3-13)$$

ويمكن استخدام هذه المعلومات لحساب موت البكتيريا في المياه العذبة أو البحرية. ولإيجاد تركيز البكتيريا بعد أن يكون الدفق قد إنساب في النهر، على سبيل المثال 8 ساعات، يتعين تحديد قيمة K للحالة المحددة تحت الدراسة. وقد أوضحت نتائج دراسات كثيرة في البحيرات وجداول المياه أن قيمة K تتفاوت كثيراً، حسب درجة حرارة الماء، كمية ضوء الشمس، والعمق الذي عنده يسرى فُمع الدفق. ويكون متوسط قيمة K في حالة المياه العذبة نحو 0.038 في الساعة؛ لكن قيماً تراوحت ما بين 0.02 و 0.12 في الساعة قد تم قياسها. وباستخدام المعادلة (3.13) واعتبار قيمة $K = 0.038$ في الساعة، فإن التركيز الأولى (C_0) = 100 ألف في كل 100 مل سيتم تخفيضه إلى 74 ألف لكل 100 مل بعد 8 ساعات (t) نتيجة للموت فقط.

وفي حالات كثيرة، يفضل التنبؤ بالتركيز عند مسافة معينة من نهاية المجرى، بدلاً عن قياسه عند فترات زمنية محددة. وتتميز معظم أنهار الولايات المتحدة بأن لها تيار تدفق منخفض ومنتظم يتراوح ما بين 1.5-2 كيلومتر في الساعة، وهو ما يمكن استخدامه لتحويل انخفاض سرعة التدفق مع الزمن إلى مسافة. وفي مثالنا، فإن المسافة المقطوعة ستكون ما بين 12-16 كيلومتراً. إن الوقت اللازم لقطع مسافة معينة يتفاوت من نهر لآخر، ولذلك قد يلزم إجراء قياسات ميدانية لربط تراكيز البكتيريا لمواقع محددة على امتداد مسار المجرى المائي.

عند تحليل حالات موت البكتيريا الواوية في البيئات البحرية، يستخدم عادة قيمة متوسطة للثابت (K) تساوي 1.2 في الساعة، والذي يزيد تقريباً 30 مرة عن قيمته بالمياه العذبة. ويرجع هذا الموت السريع عادة لملوحة البيئة البحرية، على الرغم من أنه قد يرتبط

أيضاً بالتركيز الأعلى للحيوانات المفترسة في هذه البيئات. إضافة لذلك، فإن تجمع وترسب الحبيبات الذي يتم في مصبات الأنهار قد يعطل إزالة البكتيريا من العمود المائي. وتجدد الإشارة إلى أن هناك عوامل أخرى يمكنها التقليل من معدل الموت. فمثلاً، عندما يتم تفريغ دفق عند أعماق كبيرة، يمكن للموت أن يتباطأ بدرجة معتبرة وذلك لأن ضوء الشمس لا يمكنه الاختراق لأعماق كافية.

يكون حساب الموت في مياه البحر مشابهاً للموت في المياه العذبة. وتتراوح قيمة K للمياه البحرية عادة ما بين 0.3 و 3.8 في الساعة. وحديثاً، وجدت قيم للثابت K تصل إلى 0.02 في الساعة وذلك عندما يضغط الدفق في طبقة لأعماق بعيدة تحت السطح، تصل 40 متراً، وهو ما يشير إلى أن موت البكتيريا قد انخفض بسبب الاختراق المحدود للأشعة فوق البنفسجية عند هذا العمق. ما هو الاختلاف الذي ستسببه قيمة K المنخفضة بالنسبة للتركيز؟

باستخدام المعادلة (3.13) وقيمة متوسطة للثابت $K = 1.2$ في الساعة، فإن التركيز الأصلي، $C_0 = 100$ ألف لكل 100 مل، سوف ينحدر إلى $C_t = 6.7$ لكل 100 مل بعد مضي 8 ساعات. ولكن باستخدام قيمة للثابت K تساوي 0.02 في الساعة بدلا من 1.2 في الساعة، فإننا نحصل على 85 ألف لكل 100 مل. وهكذا فإن انخفاضاً بمقدار 60 مرة في قيمة K ، يزيد التركيز بمعامل يساوي $85000 \div 6.7 = 13$ ألف. ويصبح واضحاً من هذا المثال مدى أهمية الحصول على قيم صحيحة للثابت K وكيف يمكن أن تكون النتائج متباعدة وبنفس الجودة، لكنها مختلفة، حسب تقديرات قيمة K .

إن التفاوت في معدلات موت البكتيريا الدالة ليس المشكلة الوحيدة التي يتعين علينا التعامل معها. فالكائنات الدقيقة الممرضة من غير القولويات قد تتحلل عند معدلات تختلف عن تلك الخاصة بالبكتيريا الواوية الدالة. ولذلك، ومع تغير تقنيات تحليل المياه لتصبح أكثر تطوراً، فإن ذلك يتطلب منا القيام بكثير من المشاهدات الحقلية لتأسيس قيم يمكن استخدامها للتنبؤ بمعدلات الموت لكائن ممرض محدد.

بالإضافة لانخفاض تراكيز البكتيريا في أي من المياه السطحية العذبة أو البحرية بسبب الموت فإن تراكيز البكتيريا تتعرض للانخفاض مع تخفيف المياه بواسطة المياه المندفعة من أعلى المجرى عند نقطة تفريغ الدفق، وكذلك استمرار تخفيفها مع تدفقها في اتجاه نهاية المجرى. وقد يكون أو لا يكون تأثير التخفيف مهماً لاستيفاء متطلبات معايير جودة المياه، اعتماداً على الخلط الأولى وطبيعة أنماط التدفق الناتجة، والمسافة حتى مناطق استخدام المياه. لكن، وقبل مناقشة آليات عملية التخفيف، دعنا نفحص كيف يمكن تطبيق عملية تحلل من الدرجة الأولى التي استخدمت لتقييم موت البكتيريا الدالة لتحليل مصير المواد العضوية القابلة للتحلل الحيوي.

2.4.13 المادة العضوية والأكسجين الذائب :

نعرف أن المركبات العضوية القابلة للتحلل الحيوي يتم تحليلها بواسطة البكتيريا وكائنات أخرى تعيش في المياه السطحية. وبينما تتم معدنة بعض المواد العضوية لتتحول إلى ثاني أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين، فإن مواداً أخرى يتم تصنيعها إلى كتلة حيوية ميكروبية إضافية، يتعرض معظمها إلى التحلل لاحقاً. ويستهلك هذا التحلل الأكسجين

الذائب (DO)، الذي تعتمد عليه الكثير من الأنواع المرغوبة من الأسماك وكائنات مائية أخرى، إضافة للأحياء البرية. ونتيجة لذلك، فإن انخفاض تراكيز الأكسجين الذائب يكون ضاراً لصور الحياة هذه. فمثلاً، تستطيع بعض أنواع الأسماك الحياة عند تراكيز أكسجين تقرب من ملليجرام واحد في اللتر، لكن معظمها يتأثر سلباً عند تراكيز أكسجين ذائب دون 4 ملليجرام في اللتر. إن المشكلة تتمثل في أنه لا يوجد أساساً كثير من الأكسجين الذائب في المياه السطحية. وتعتمد الكمية القصوى من الأكسجين التي يمكن لمياه سطحية نقية الاحتفاظ بها على الملوحة ودرجة الحرارة، ولكن، مقارنة بالكمية القصوى لكثير من المواد الأخرى، فإنها منخفضة بدرجة ملحوظة. وتحتوي المياه العذبة ما بين 8 و 15 ملليجرام من الأكسجين الذائب في اللتر الواحد على مدى درجة حرارة يتراوح ما بين 30 و صفر درجة مئوية، على التوالي، بينما تحتوي مياه البحر ما بين 6-11 ملليجرام في اللتر الواحد على نفس المدى. مع ملاحظة أن ذوبانية الأكسجين (O_2) تنقص مع زيادة درجة الحرارة، وهو عكس العلاقة التي تربط ذوبانية معظم المواد في الماء بدرجة الحرارة.

يمكن أن يحتوي الصرف الحضري ما بين 300 و 400 مجم من المركبات العضوية في اللتر الواحد، يكون 60% منها قابلاً للتحلل بسهولة بواسطة بكتيريا يشيع وجودها في الطبيعة. ويعني مصطلح سهلة التحلل (readily degradable) أن معظم المادة سيتم تحللها خلال أسبوع تقريباً في مجرى مائي أو جسم مائي آخر يكون كبيراً بقدر كافٍ. ويمكن بسهولة وصف التغيير في تركيز المادة العضوية مع الزمن بمعادلة التحلل من الدرجة الأولى التي استخدمت لوصف موت البكتيريا. لكنه يلاحظ، أن قيمة K تعتمد على خصائص المركبات

العضوية في الصرف. فبالنسبة للصرف الحضري، يكون متوسط قيمة $K = 0.4$ لليوم الواحد، وتتراوح ما بين 0.1 و0.7 في اليوم. ومع زيادة مساهمة المخلفات الصناعية لنظام الصرف، فإن ثابت المعدل قد يزيد أو ينقص. وتتوقف كمية المادة العضوية التي تضخ لمياه سطحية على تعداد السكان الذين يستخدمون نظام المجاري البلدي. ويسهم كل فرد بنحو 90 جرام في اليوم الواحد؛ وبذلك فإذا ما كان تعداد السكان 100 ألف، فإن معدل كتلة ما ينتج يكون 9 طن متري في اليوم الواحد. ويعتمد تركيز المواد العضوية في المجاري على كمية المياه المضافة من كل منزل وتلك المضافة نتيجة لاستخدامات أخرى في المجتمع. فإذا ما كان متوسط استهلاك الماء 300 لتر للفرد الواحد يومياً، فإن تركيز المادة العضوية في المجاري يكون 300 ملليجرام في اللتر الواحد.

3.4.13 قياس المتطلبات المحتملة للمواد العضوية في الصرف من الأكسجين

1.3.4.13 الاحتياج للأكسجين الكيميائي

أحد المؤشرات المستخدمة بكثرة بالنسبة للمخلفات الصناعية، خاصة عندما تسهم المخلفات الصناعية بكثافة لنظام المجاري، وهو ما يعرف بالطلب الكيميائي على الأكسجين (COD)، الذي يعتبر قياساً لكمية الأكسجين المطلوب لأكسدة المادة العضوية - وربما أيضاً بعض المواد غير العضوية - في عينة معينة. ويتعين ملاحظة أن الطريقة المستخدمة للحصول على هذا المؤشر، التي تشمل إعادة غسل عينة ما بحمض قوى في وجود فائض من ثنائي كرومات البوتاسيوم، لا يقيس تحديداً المادة العضوية في العينة، ولكن يقيس كمية الأكسجين اللازمة للأكسدة. وبذلك، فإن هذا الأسلوب يعطي قياساً مباشراً للتأثير الممكن لاستهلاك الأكسجين على محتوى الجسم المائي من الأكسجين.

2.3.4.13 الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين

يعتبر الطلب البيوكيميائي على الأكسجين (BOD) المؤشر المستخدم الأكثر شيوعاً في تحليل موارد الأكسجين في المياه. ويعرف الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين على أنه كمية الأكسجين المستخدمة على مدى زمني، عادة 5 - 25 يوماً، أثناء أكسدة المادة العضوية ميكروبياً وكيميائياً.

5.13 تحديد الاحتياجات البيوكيميائية للأكسجين (BOD)

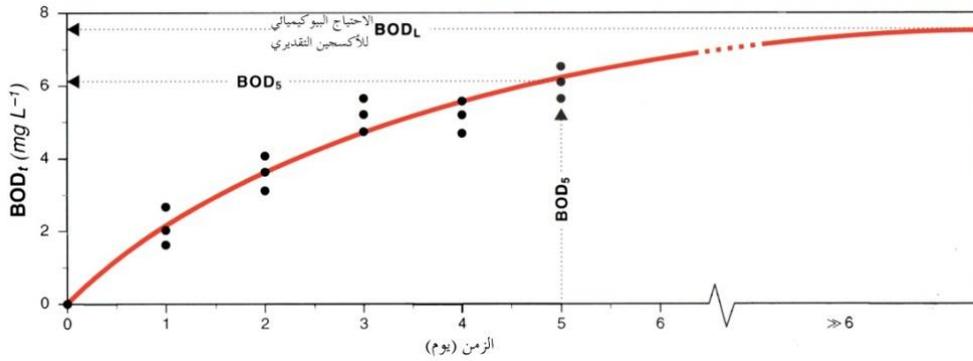
تغيرت الطريقة المعملية المستخدمة لتقدير (BOD) قليلاً جداً منذ استحداثها في الثلاثينيات من القرن الماضي. وتبدأ طريقة التقدير بوضع عدد كافٍ من القناني التي يوضع في داخلها عينة من المخلفات، إما مخلوطة مع ماء تم جمعه من موقع التخلص من المخلفات أو مع ماء من مصدر معلمي قياسي. تستخدم بعدها طرق قياسية لمعرفة تركيز الأكسجين الذائب عند البدء، تحضن بعدها القناني في حمام مائي مظلم عند درجة حرارة محددة، عادة 20°م. ويتم كل يوم وعلى مدى خمسة أيام أو أكثر، فتح بعض القناني وقياس الأكسجين الذائب المتبقي. ويتم تمثيل الفرق بين القيمة المبدئية والقيمة عند كل فترة زمنية (وهي تمثل الاحتياج) بياناً على أنها تساوي احتياج الأكسجين البيوكيميائي (BOD_t) عند زمن معين (t) وذلك لسلسلة من الأيام.

واستناداً إلى البيانات التي تم الحصول عليها في المعمل، يمكننا رسم منحنى واضح يمكننا من قياس معامل معدل التفاعل (K) بطرق بيانية أو تحليلية. إن المنحنى الذي تم تأسيسه، ومعادلته هي:

$$BOD_t = BOD_L (1 - e^{-Kt}) \quad (4-13)$$

يصبح أفقياً أكثر فأكثر مع مضي الوقت (انظر الشكل 13-3). وبتعميد المنحني أفقياً، يمكننا وضع تقدير للكمية النهائية، التي تسمى القيمة الحدية لاحتياج الأكسجين الكيميائي أو (BOD_L).

يمكننا استخدام المنحني في الشكل (13-3) المستنبط من بيانات BOD للعينة وذلك لحساب قيمة K لعينة المياه العادمة في هذا الاختبار المعلمي⁽¹⁾. ويتم ذلك أولاً، بتعميد هذا المنحني أفقياً، فنلاحظ أن القيمة التقديرية ل(BOD_L) تساوي تقريباً 7.6 ملليجرام في اللتر، وأن قيمة BOD عند اليوم الخامس (BOD_5) تساوي 6.1 ملليجرام في اللتر. يلي ذلك، حل المعادلة (13.4) لتقدير قيمة K ومن ثم تعويض هذه القيم وكذلك $t = 5$ ، نتحصل على قيمة K وهي تساوي 0.32 في اليوم.



الشكل (13-3): نتائج نموذجية لاختبار احتياج الأكسجين البيوكيميائي توضح الطريقة البيانية لتحديد BOD_5 و BOD_L لاستخدامها في حل المعادلة (13-4) لإيجاد قيمة K كما تم وصفها في النص. لاحظ أنه، في الحقيقة، أن المنحني الممتد يكون مقارباً للقيمة $BOD_L = y$.

⁽¹⁾ تتوفر أساليب رياضية في كتب مرجعية متقدمة تمكننا من تقدير K و BOD_L في آن واحد.

1.5.13 تأثير الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين على الأكسجين الذائب في المياه الداخلة

يتم نمطياً بالدول النامية من العالم معالجة مخلفات المجاري البلدية بدرجة ما لإزالة المواد العضوية، ومن ذلك تخفيض متطلبات الأكسجين الحيوية (BOD)، وذلك قبل ضخها للمياه السطحية. ويمكن أن تتراوح نسبة متطلبات الأكسجين الحيوية بعد المعالجة ما بين 10 و70% من الكمية الأصلية في مخلفات المجاري. ويعتمد تأثير ذلك على المياه الداخلة على كثير من الخصائص البيئية وخصائص المخلفات، التي سيتم ذكر معظمها باختصار فيما بعد في هذا الباب. وبعد أن تم شرح مؤشرات متطلبات الأكسجين الحيوية، فإن الاعتبار التالي الأكثر أهمية هي كمية الأكسجين الذائب (DO) في الجسم المائي قبل إضافة مخلفات المجاري عند الزمن $(t) = 0$ صفر، الذي يسمى الأكسجين الذائب المبدئي (DO_0) والمعدل الذي يتم به نقل الأكسجين المضاف من الهواء الجوي للمياه الداخلة التي يتم استقبالها .

إن الكثير من الأنهار وحدول المياه تعاني من نقص في تراكيز الأكسجين الذائب، أي أنها تعاني من عجز في الأكسجين الذائب، وذلك بسبب الاحتياج الحيوي للأكسجين (BOD) المضاف عن طريق مجارى المدن. ويتعين الإشارة إلى حقيقة تم ذكرها وهي أن الأنهار يمكنها أن تحتفظ فقط بكمية صغيرة من الأكسجين الذائب تتراوح ما بين 8 - 15 ملليجرام في اللتر حسب درجة الحرارة، ويسمى ذلك قيمة التشبع بالأكسجين الذائب (DO_s) .

ويتعين ضم ما يسمى بالعجز الموضعي (local deficit)، وهو عبارة عن الفرق بين قيمة التشبع والقيمة التي لوحظت عند البداية، في حساب العجز في تركيز الأكسجين

الذائب عند نهاية المصب الناتج عن دفع جديد تم ضخه للمجرى. ولكن قبل تقديم مثال عن كيفية إجراء الحسابات، دعنا أولاً نفحص كيف تتعامل الطبيعة مع وجود حالة عجز في الأكسجين الذائب.

يتم تعويض العجز عن طريق غاز الأكسجين من الهواء الجوي. ويحدث التعويض عن طريق عملية نقل كتلى بين الغاز- السائل وذلك عند السطح ثم يتبع هذا خلط خلال عمق الماء كله. ويمكن وصف مجمل هذه العملية بطريقة تقريبية بواسطة معادلة من الدرجة الأولى، يمكن حلها رياضياً لتصبح في الصورة:

$$D_t = D_0 e^{-Rt} \quad (5-13)$$

حيث أن D_t = العجز عند الزمن (t) ، D_0 = العجز المبدئي (أي، $(D_0 - D_s)$)، R = معامل إعادة التهوية.

وتجدر ملاحظة أنه كلما زادت قيمة R ، كلما أزيل عجز معين في وقت أسرع. وتعتمد قيمة R في جسم مائي معين على درجة الخلط الرأسي، وكذلك متوسط عمقه. وتتراوح قيمته ما بين 0.1 في اليوم في البحيرات الصغيرة و1.0 في الجداول التي تتحرك بسرعة.

تتطلب معظم الحالات التي يشكل فيها الأكسجين الذائب (D_0) معضلة، تحديد العجز في الأكسجين الناتج عن التأثيرات المتزامنة لطلب الأكسجين التي تحتاجها مخلقات معينة من جهة والمنافسة لتعويض الأكسجين عن طريق الهواء الجوي. وتسمى المحصلة

قدرة التنقية الذاتية (self – purification capacity) لجسم مائي. ويسمى العجز الموضح بيانياً كدالة للزمن (أو المسافة) على أنه المنحني الغائر للأكسجين بسبب مظهره المميز الذى يشبه الملعقة. وتكون معادلة المنحني كالآتي:

$$D_t = \frac{K(\text{BOD}_L)}{R - K} (e^{-Kt} - e^{-Rt}) + D_0 e^{-Rt} \quad (6-13)$$

حيث أن الرموز كما سبق تعريفها.

ويوضح الشكل (13- 4) منحنى تم إنتاجه باستخدام هذه المعادلة. وقد تم أخذ قيمتي K و BOD_L من الشكل (13 - 3)، أما قيمة D_0 (العجز المبدئي)، فقد كانت 3 مجم في اللتر نتيجة للتدفق من أعلى المجرى المائي، وتم اختيار معامل إعادة التهوية R الذى يساوى 0.5 في اليوم لمجرى مائي واسع بطيء التدفق. وربما يمثل هذا المثال حالة لمجري تمت معالجتها لدرجة عالية، وهو نموذج قمع دفع بعد تخفيف أولى يساوى 4، أو مياه مجارى متدنية المعالجة تم نشرها من موزع (انظر الجزء 1.6.13) يوفر عامل تخفيف أولى يعادل 25 مرة.

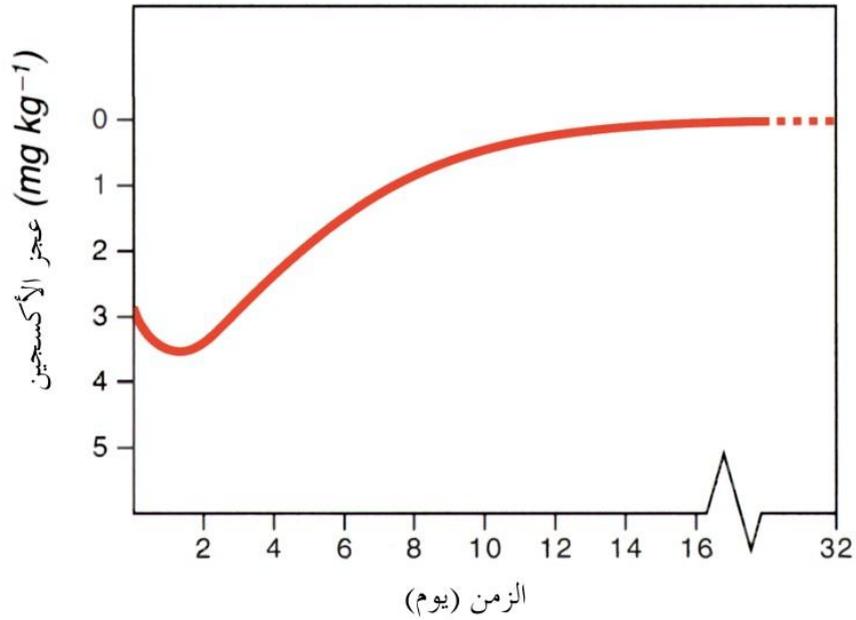
إن إحدى النتائج المثيرة لحل معادلة ملعقة الأكسجين رياضياً أن العجز، وبغض النظر عن قيمة التشبع للأكسجين الذائب، تظل هي نفسها طالما ظل العجز الأولى هو نفسه. وأحياناً، تفرض معايير جودة المياه حدوداً على مقدار العجز في حد ذاته وكذلك على قيمة الأكسجين الذائب الناتجة. فمثلاً، قد يتطلب قانوناً معيناً أن التخلص من

المخلفات يجب ألا يتسبب في زيادة العجز بمقدار أكثر من 10% ولا يخفض من تركيز الأكسجين الذائب الناتج إلى أقل من 5 ملليجرام في اللتر.

عندما تستخدم نظم المياه بكثافة عالية أو عندما تحدد موارد المياه ذات القيمة العالية، فإن عوامل إضافية أخرى يتعين أخذها في الاعتبار:

(1) الاحتياجات اليومية وما هو متاح من الأكسجين من الكائنات القادرة على القيام بعملية البناء الضوئي.

(2) الاحتياجات من الأكسجين للمواد العضوية المتراكمة في طبقة الترسيب.



الشكل (4-13) منحنى انبعاث الأكسجين الذائب باستخدام قيم k وقيم الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين من الشكل (3-13). معادلة هذا المنحنى تعطى بواسطة المعادلة (6-13)

(3) الاحتياجات من الأكسجين للمركبات النيتروجينية التي تضح مع الدفق.
(4) التباين في معامل إعادة التهوية (R) مع زمن حركة الماء نتيجة لظروف التدفق في الجسم المائي.

(5) المدى الواسع لتدفقات مياه المجاري التي يتم مواجهتها على امتداد عمر نهر معين.
تتوفر برامج حاسوب شاملة لوصف تركيز الأكسجين في المستجمعات المائية الكبيرة التي تتكون من أعداد كثيرة من الجداول المائية المتداخلة ونقاط ضخ مياه عادمة عديدة؛ لكنه يلاحظ أن الحصول على البيانات حول حركة القمع، وقيم K و R يتطلب دراسات معملية مطولة ودراسات حقلية مضمينة. ويعتبر تخفيف تركيز المخلفات واحداً من أهم العوامل التي يتعين اعتبارها عند تقييم ما يمكن أن تحدثه إضافة المخلفات من تغيرات. إن الطرق المستخدمة في تقييم التأثيرات على مورد الأكسجين الذائب لجسم مائي معين والتلوث البكتيري يمكن تطبيقها على أنواع واسعة من المشاكل الكيماوية السامة.

6.13 تخفيف تركيز الدفق

يمكن أن يكون التخفيف (ولكن ليس بالضرورة) وسيلة فعالة لمنع تلوث المياه السطحية. إن المختصين البيئيين لا يقبلون بالكامل القول القديم (التخفيف يكون حلاً للتلوث). وبدلاً عن ذلك، يمكننا من خلال العملية التحليلية لتقييم المخاطر أن نتحقق من أن مبادئ معينة تشكل أساس الاستفادة من التخفيف في إدارة دفق المخلفات. ويتعلق المبدأ الأول بآلية استحابة الملوث ومدى اعتمادها على التركيز. وهنا نريد أن نعرف فيما إذا كان

تأثير الملوث مرتبط مباشرة بتركيزه. بمعنى إذا ما تم تخفيض التركيز بدرجة كافية، فهل أن درجة التأثير ستنخفض طردياً؟

زيادة على ذلك، بمجرد تخفيض تركيز الملوث، هل يمكن نتيجة لذلك أن يصبح الملوث أكثر تركيزاً؟ إن عودة التركيز ظاهرة كثيراً ما تصاحب الرسوبيات والكيماويات العضوية المقاومة للتحلل مثل مواد PCBs. إن تخفيف المخلفات في الجداول المائية التي تحتوي على تراكيز مرتفعة من المواد الصلبة المعلقة قد يمنع حدوث تلوث ملحوظ عند موقع التفريغ، لكن هذا النوع من الرسوبيات قد يتسبب في نهاية المطاف من عمود الماء ويتركز في المنخفضات التي توجد في قاع الجرى المائي. وهناك يمكن لهذه الرسوبيات أن تتسبب في مشاكل عدة.

وحتى في المحيط، يمكن أن يؤدي التخلص من المخلفات إلى تراكم الترسبات في قاع البحر. وفي حالة الكيماويات العضوية المقاومة للتحلل، والتي تكون ذوبانيتها في الماء منخفضة وتكون قابليتها للإدمصاص بأنسجة الحيوان عالية، يمكن أن يحدث تراكم حيوي ضار من خليط عالي التخفيف. ولهذا فإن التخفيف قد يكون أو لا يكون حلاً لمشكلة محتملة مرتبطة بالتركيز .

1.6.13 تخفيف التركيز في الجداول المائية والأنهار

بغض النظر عن اعتبارات السمية- التركيز، فإن الاعتبارات الاقتصادية والاجتماعية تلعب دوراً في اتخاذ قرار استخدام تخفيف التركيز. إضافة إلى ذلك، فإن استخدام التخفيف يتوقف أيضاً على وفرة كميات كافية من مياه التخفيف. ففي الجزء الجنوبي الغربي الجاف من

الولايات المتحدة، على سبيل المثال، فإن الكثير من الجداول المائية موسمية، بمعنى أنها تحتوي على مياه فقط عقب هطول كميات كبيرة من الأمطار. وفي مجارى مائية أخرى بيئات جافة يشكل التدفق من محطات معالجة الصرف البلدي التدفق السائد لفترة تزيد على ستة أشهر من السنة، بمعنى، أن هذه الجداول المائية تسودها مياه المجاري المعالجة. وفي هذه الحالات، فإن التخفيف يتراوح ما بين قليل إلى منعدم تماماً، باستثناء فترات الجريان السطحي المصاحب للعواصف المطيرة. فمثلاً، إذا كان تدفق الجرى يساوي 10 مليون لتر في اليوم، وأن دفع المجاري يساوي 30 مليون لتر في اليوم^(*)، وفي هذه الحالة سينخفض تركيز الملوثات الذائبة في دفع المجاري بنسبة 25% فقط، بافتراض أن تركيز كل ملوث يساوي صفراً عند أعلى الجرى. (وعموماً، فإن التخفيف الفعلي سيكون أقل من ذلك إذ أنه غالباً ما يوجد تركيز مقاس من الملوثات عند أعلى الجرى.

وتكتب المعادلة التي تستخدم في تحديد التركيز بعد التخفيف كما يلي:

$$C_f = \frac{C_e v_e + C_a v_a}{v_e + v_a} \quad (7-13)$$

حيث أن:

$$C_f = \text{المتوسط المقطعي للتركيز النهائي في الجرى المائي.}$$

$$C_e = \text{التركيز في دفع المجاري.}$$

$$v_e = \text{حجم التدفق.}$$

(*) تستخدم وحدة مليون جالون في اليوم (MGD) بشكل شائع في محطات معالجة المياه العادمة بالولايات المتحدة، $3.78 = \text{MGD } 1.0$ مليون لتر في اليوم أو 3.78×10^3 متر مكعب في اليوم.

$c_a =$ التركيز في مياه التخفيف عند أعلى الجرى .

$v_a =$ حجم مياه التخفيف .

وفي الأنهار الكبيرة يعتمد مقدار التخفيف الذي يتم تحقيقه على الطريقة المستخدمة في تفريغ مياه الصرف في النهر. ولتعظيم التخفيف، يتعين استخدام مشتت أو موزع (diffuser)، يتكون من أنبوب له العديد من الثقوب على امتداد عرض النهر. فمثلاً، إذا كان تدفق النهر يساوي 120 مليون لتر في اليوم، فإن ضخ دفق مجاري بمعدل 30 مليون لتر في اليوم ينتج عنه انخفاض بنسبة 80% في تركيز الملوثات إذا استخدم مشتت أو موزع لنشر الدفق على امتداد النهر. لكنه، وفي حالة عدم استخدام مشتت، فإن التخفيف المباشر سيكون أقل من ذلك بكثير.

في كثير من المجاري المائية يكون بناء مشتتات أو موزعات (diffusers) إما غير مناسب أو ممنوعاً. ونتيجة لذلك، فإن مقدار التخفيف يعتمد على عمليات الخلط الطبيعي التي تحدث أثناء تدفق المياه. لكنه، وفي حالة المجاري المائية الكبيرة قد تلامس أقماع دفق المجاري الضفاف بطول أميال كثيرة، ولهذا فإنها لا تخفف بشكل فعال بواسطة الجرى المائي الرئيسي. ولا يكون ممكناً في مثل هذه الحالات تقدير مدى من القيم لمعدل التخفيف. ويكون من المعقول افتراض أنه في غياب وجود بناء مادي، مثل المشتت، لخلط دفق المجاري مع مياه النهر، أخذ عملية التناقص الطبيعي فقط في الاعتبار عند تقييم تأثير التلوث البكتيري على استخدامات المياه عند المصب. وبنفس الكيفية، إذا لم يكن هناك تخفيف

للمتطلبات الحيوية للأكسجين (BOD)، يمكننا فقط الاعتماد على تحلل المواد العضوية وإعادة التهوية لاسترجاع أو المحافظة على مورد الأكسجين الذائب في مياه النهر.

2.6.13 تخفيف التركيز في الأجسام المائية الكبيرة

توفر الأجسام المائية الكبيرة، خاصة المياه الساحلية المفتوحة، فرصة أعظم للتخفيف الفعال لجداول مياه المخلفات. ويتحقق تخفيف مبدئي فعال بواسطة مشتت متعدد المنافذ عند نهاية أنبوب التفريغ. ونظراً لأن كثافة معظم المياه العادمة تكون قريبة جداً من المياه العذبة، فإن تفريغ الدفق السائل لمياه البحر العميقة يخلق قوة طفو قوية. ولهذا، فإن سائل الدفق، بغض النظر عن عمق التفريغ، سيطفو على سطح البحر إذا لم يتم حجزه عن طريق وجود تدرج كثافة تحت السطح. ومع صعوده نحو السطح، يختلط الدفق بفعالية مع المياه المحيطة، مما ينتج المزيد من التخفيف. ويمكن مضاهاة ذلك بمثال في زيادة عرض قمع الدخان مع صعوده في الهواء الجوي حيث يتناسب مقدار التخفيف مع مربع عرض القمع.

تجدر الإشارة إلى أنه عند تعيين أماكن ملائمة لمصبات المحيط لا يكون العمق هو العامل المحدد فقط. فعندما تكون الأمور الأخرى متساوية، فإنه كلما تعاضم مدى الحركة العمودية كلما ازداد طردياً مقدار التخفيف المبدئي. لكن (الأمور الأخرى) لا بد أن تكون حقيقة متساوية فعلاً. فإذا كان مثلاً، الموقع الذي تم اختياره بسبب عمقه يتميز بدوران سيء، فإن المحصلة النهائية قد يكون تخفيفاً أقل فعالية للمخلفات مقارنة بتلك التي يمكن تحقيقها عند وضع هذه المخلفات في مياه أقل عمقاً لكنها أكثر انفتاحاً. إن هذه الاعتبارات

تمثل هاجساً رئيسياً عند وضع المصببات في المجاري المائية الضيقة والخلجان، وأحياناً، مصاب الأنهار والأودية (انظر الشكل 13-1) .

لا يوفر العمق دائماً نفس الفرصة لتخفيف أولى أكبر في البحيرات والخزانات ذلك أن الاختلاف في الكثافة بين المياه العادمة والمياه القادمة قد يكون صغيراً جداً. وفي الحقيقة، ليس من غير المعهود أن يكون للمخلفات الصناعية كثافة أعلى من تلك الخاصة بمياه البحيرة ولذلك فإن هذه المخلفات تميل للترسب على امتداد القاع بدل أن تصعد إلى السطح. من ناحية أخرى، فإن مياه التبريد من المحطات الضخمة لتوليد الطاقة الكهروحرارية لها كثافة أقل من تلك الخاصة بمياه معظم البحيرات نظراً لارتفاع درجة حرارتها. وعليه، فإن موقع تفريغ عميق معين يكون ميزة لتحقيق انخفاض فعال في التأثيرات الحرارية.

لا تزال الكثير من الدول تسمح بممارسات رمي وحل المجاري البلدية المعالجة جزئياً إلى داخل المحيط. وللعديد من السنوات قبل حظر هذه الممارسة في الولايات المتحدة في الثمانينات من القرن الماضي، فإن مثل هذا الوحل من مجارى نيويورك و فيلادلفيا كان يرمى في المحيط الأطلسي. ونظيماً فإن جزءاً من الوحل يكون على هيئة مادة دقيقة معلقة لها كثافة عالية بدرجة كافية لترسب عند قاع البحر، على الرغم من أن التيارات والاضطرابات توزع هذه المادة على مدى منطقة الرمي. وهناك مواد أخرى تلقى في المحيط، مثل الرواسب الصلبة من الموانئ البحرية ومجارى المياه وبعض المخلفات الصناعية التي تسلك مسلكاً يشبه وحل المجاري .

قد أخذ الشكل (13-6) من دراسة لتحديد ما إذا كان تلوث الطبقة العلوية المخلوطة التي تطورت بسبب رمى مخلفات من مراكب مارة يمكن تخفيضها عن طريق إيقاف الناقلات قبل أن تفرغ محتوياتها. إن ذلك سوف يساعد على تراكم أكثر فعالية لحبيبات الوحل عند قاع البحر (الذي يعاني ذاته من جملة مشاكل) ويساعد في الوقت نفسه على تفريق أقل للمواد العالقة في المياه السطحية.

ينقسم تشتت وحل الصرف إلى ثلاثة أطوار: هبوط حمل، هدم حركي، وتشتت طويل المدى. ويحدث هبوط الحمل الحراري (convective descent) أولاً (الشكل 13 - 6 إلى أعلى) ويمثل عكسيا صعود الطفو للدفق البلدي الذي يضخ من مصب مشتت بحري متعدد الفتحات عند قاع البحر، أي أن التشتت مدفوع بواسطة الاختلاف في الكثافة بين الوحل ومياه البحر الأقل كثافة (لاحظ السرعة التي يهبط بها القمع نحو قاع البحر في نظام المحاكاة المبين في الشكل (13-6)). وكما يلاحظ من الشكل، مازال يوجد بعض المواد ذات الكثافة المنخفضة نسبياً، وحتى بعض المواد الطافية، التي سوف تنقل في نهاية المطاف بعيداً عن موقع التفريغ وتشتت بواسطة التيارات السطحية. إضافة لذلك، تكون المواد عالية الكثافة، مثل المواد المعدنية والحبيبات الخشنة قد هبطت تماماً لأعماق أكبر في اتجاه قاع البحر.

وبعد هبوط الحمل الحراري الأولى، تبدأ عملية الهدم الحركي (dynamic collapse) كما بالشكل 13-6، في الوسط). وهنا، تبدأ السحابة في الوضوح بصرياً إلى ثلاثة أجزاء، تحيط بوسط السحابة (أنظر الشكل 13-5 وهو يمثل منظرًا أكثر وضوحاً للشكل 13-6

عند دقيقة واحدة و25 ثانية)، الذى يعتبر نقطة توازن الطفو مع المياه المحيطة. وفوق الوسط، يؤدي التأثير التخثيري للأملاح في مياه البحر إلى تجمع المواد الغروية فتصبح أكثر كثافة وتتفتت نحو الوسط. وبالمقابل تكون حبيبات أخرى قد هبطت إلى ما تحت نطاق توازن الطفو لأعماق حيث تكون فعلياً كثافة الماء أعلى من الحبيبات؛ وبعد فقدانها للعجلة الأولية التي اكتسبتها من قوة تفريغ المخلفات، فإن هذه الحبيبات تصعد نحو توازن الطفو في وسط السحابة. وتكون النتيجة سحابة تتفتت إلى طبقة رقيقة تتفرق ببطء جانبياً (long - term dispersion) كما هو موضح في الشكل 13-6، عند القاع). وفي الطبيعة يتطابق نطاق توازن الطفو هذا مع تدرج الكثافة القوي الذي يفصل طبقة الخلط العليا عن المياه العميقة للمحيط (أنظر الجزء 2.2.13). ويجبر استمرار التجمع جزئياً من المخلفات على الترسيب من سحابة التشتت لتتهبط في اتجاه قاع البحر (الشكل 13-6 عند 00:50-20:00 والشكل 13-5). وتحدث هذه الظاهرة المتمثلة في الهدم الحركي أيضاً مع أقماع دفع المجاري المحصور بتدرجات الكثافة تحت السطح كما نوقش بتفصيل في الجزء (1.2.6.13).



شكل (13-5): منظر عن قرب لصورة في سلسلة زمنية (شكل 6.13) أخذت عند دقيقة واحدة و25 ثانية. تشير الأسهم البيضاء إلى اتجاهات عامة لحركة الحبيبات أثناء التفتت الحركي، مع بعض الحبيبات التي تتجمع وتثبت في اتجاه قاع خزان الترسيب.

1.2.6.13 التخفيف الأولي والنقل

يشير مصطلح التخفيف الأولي (initial dilution) تحديداً إلى مقدار التخفيف الذي يتحقق في قمع معين نتيجة للتأثيرات المجتمعة للخلط المحفز بالطفو والزخم الذي يتعرض له الدفق المنطلق من الفتحة. ويستخدم هذا المصطلح في كل من التنظيم العملي وهيدروديناميكا القمع. ويكون معدل التخفيف الذي تسببه هذه القوى سريعاً جداً في الدقائق الأولى بعد خروج الدفق من الفتحة، ليتناقص بعدها بدرجة ملحوظة بعد تلاشي الطفو والزخم. كما تؤثر أيضاً التيارات المحيطة على معدل التخفيف أثناء الطفو الصاعد للقمع بغض النظر عن الزخم وقوى الطفو. وكلما ازدادت سرعة التيار زاد التخفيف الأولي. وفي حالات كثيرة عادة ما يستهدف تخفيف أولى يصل 1:100 عند تصميم مصب، ليكون

كافياً في تخفيض سمية ملوثات كيميائية إلى مستوى مقبول [ملحوظة: عندما يكون الموت البكتيري عاملاً مهماً، تكون المسافة من منطقة استخدام محددة عادةً عاملاً أكثر أهمية من التخفيف الأولي في حد ذاته. ففي هذه الحالة يؤدي الوقت اللازم للميكروبات لترحل مسافة طويلة إلى زيادة إمكانية إلغاء نشاطها أو حيويتها].

بعد التخفيف الأولي، تمر مجارى المخلفات بتخفيف إضافي، أو تشتتت حالما تنقل بواسطة التيارات الموجودة وتخلط مع المياه التي تحيط بها عن طريق الاضطرابات. وتمثل هذه العملية التشتت الذي يجرى عندما تتلاشى أقماع الدخان في الهواء الجوي بعد أن يصعد الدخان لمستوى نقطة التعادل. لكنه، وفي بعض النظم المائية، لا يشاهد قمع الدفق بنفس الدرجة من السهولة.



شكل (13- 6): مونتاج صور فوتوغرافية لسلسلة زمنية لاختبار نموذج هيدروليكي للتشتت والترسيب لوحل مجارى خاص بمدينة نيويورك لنظام محاكاة للمحيط. وقد سجلت الأزمنة بالدقائق: ثواني.

تستخدم معظم المدن الساحلية الحديثة نقاط متعددة للمصببات على المحيط تكون بعيدة عن الساحل لحماية الشواطئ والمناطق السياحية القريبة من الساحل من تأثيرات التلوث البكتيري. وتصمم هذه المصببات عادة لحفظ مجاري المخلفات المخففة تحت سطح البحر. إن مثل هذه الأنظمة تكون مفيدة بشكل خاص خلال موسم الترفيه الصيفي لأنها تحفظ المنطقة الملاصقة لموقع ضخ المخلفات خالية من الأوساخ سيئة المنظر. إضافة لذلك، فإنها تخفض من نقل المخلفات المخففة في اتجاه اليابسة بواسطة تيارات الرياح خلال الفترة التي تكون فيها النشاطات الشاطئية في ذروتها. ويكمن عيب الحجز تحت السطحي في حقيقة أن التخفيف الأولي يتم تخفيفه مقارنة بالأقماع الصاعدة إلى السطح، لكن هذا العيب يتم إغاؤه عن طريق تقليل مخاطرة النقل الساحلي للمخلفات.

2.2.6.13 القياسات والحسابات

يمكن وصف التخفيف الذي يتم تحقيقه في حالة النقل الحر لأقماع مياه جريان المخلفات في أجسام مائية كبيرة بواسطة قوانين فيزيائية - وهي القوانين نفسها المستخدمة في وصف تدفق ملوث معين في المياه الجوفية (الجزء 1.3.5) والتدفق الغازي في الهواء الجوي (الجزء 2.4.12). لكننا لا نستطيع حل المعادلات تماماً للحالة العامة ذلك أننا نفتقر لوجود بيانات. بمعنى، أن البيانات التي تم الحصول عليها من دراسات حقلية أو من تقارير لدراسات سابقة مطلوبة لتحديد المعاملات التجريبية في المعادلات. وتجدد الإشارة إلى أنه أصبح متاحاً الكثير من برامج الحاسوب للحصول على حلول تقريبية للمعادلات التي تخص حالات معقدة تشمل إضافات مخلفات متعددة وسرعة تيارات متغيرة. إضافة لذلك، يمكننا

أحياناً استخدام تبسيطات للمعادلات المتحركة الخاصة بمشاكل تقييم تلوث كثيرة للحصول على تقديرات مقبولة لتركيز ملوث معين كدالة لزمن رحلته أو مسافتها.

إن واحدة من المعادلات المبسطة التي استخدمت بنجاح على مدى ثلاثين عاماً

مضت خاصة بأجسام مائية كبيرة وتعطينا التركيز الأقصى عند مسافة (X) هي :

$$c_{\max} = c_{pi} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{Ub^2}{16 \varepsilon_0 X}} \quad (8-13)$$

حيث أن:

c_{\max} = تركيز الخط الوسط (الأقصى) عند مسافة (X).

c_{pi} = تركيز القمع عند نهاية التخفيف الأولى.

$\operatorname{erf}(\arg)$ = دالة الخطأ القياسي للحالة المطروحة.

U = السرعة الحالية في الاتجاه -X.

b = العرض في الاتجاه -Y (متعامد على X) عند نهاية التخفيف الأولى .

ε_0 = ثابت انتشار إدي (eddy) في الاتجاه الأفقي (الاتجاه -Y).

X = المسافة المقطوعة [لاحظ أن: U/X يمكن استبداله بالقيمة (الزمن) $1/t$].

من المهم عند تطبيق هذه المعادلة استخدام قيم مُعبر عنها بوحدات متجانسة.

فمثلاً، تحتوي المؤشرات U و b و ε_0 تحتوى و حدة طول يجب أن يعبر عنها بالتجانس.

وبنفس الكيفية، فإن المؤشرات U و ε_0 تحتوى أيضاً على وحدة زمن. وهناك طريقة أخرى

لمعرفة أهمية هذا المطلب هو تمييز أن الحالة المطروحة (arg) لدالة الخطأ يجب أن تكون دون وحدات. وتفيد دالة الخطأ القياسي (erf) هنا كتمثيل رياضي للطريقة التي تشاهد بها الملوثات وهي تتباين أفقياً (الاتجاه - Y) مع انتقال القمع في الاتجاه X. فهي تصف منحنى التوزيع الطبيعي الذي يستخدم في تقدير التباين (variance) حول قيمة متوسطة (انظر الجزء 2.8). ويمكن الحصول على القيم من قائمة جداول في كتيبات خاصة، أو باستخدام دالة الخطأ القياسي في برنامج حاسوب. ويساوي عامل تخفيف النقل (transport dilution factor) مقلوب قيمة erf(arg).

وفي حالة مشكلة نمطية تتعلق بإيجاد عامل تخفيف النقل، يمكننا تقدير التركيز الأعلى الذي سيحدث بالقرب من الشاطئ من مصب يبعد 8 كيلومترات (أي 8×10^5 سم) بعيداً عن خط الشاطئ عندما تكون سرعة التيار عند الشاطئ U تساوي 15 سم في الثانية. ويحتمل أن يكون عرض القمع (b) بعد التخفيف الأولى، الذي يتم الحصول عليه من المشاهدات المحلية، نحو 1000 متراً (أي 10^5 سم). ويمكننا استخدام قيمة منشورة شائعة لمعامل انتشار إدي (ϵ_0) = 10^4 سم² على الثانية. وبتعويض هذه القيم في المعادلة (13-8) نحصل على:

$$c_{\max} = c_{p_i} \operatorname{erf} \sqrt{1.17} = 0.87 c_{p_i} \quad (9-13)$$

وتكون النتيجة مفاجئة بشكل خاص: فهي تبين أنه حتى عندما كانت مسافة النقل تساوي 8 كم وفي جسم مائي مفتوح، فإن التركيز قد تم تخفيفه بنسبة 87% فقط، معطية

معامل تخفيف نقل يساوي 1.2 (قارن هذا العامل الذي يساوي 1.2 بعامل التخفيف الأولي الذي يساوي نحو 100 وهو الذى نتوقعه في حالة مصب في جسم مائي كبير مثل المحيط).
يوضح هذا المثال أن التخفيف الأولي يكون عادة أكثر أهمية في تخفيض المستويات الضارة مقارنة بالتخفيف الناتج عن النقل. إن هذا ليس صحيحاً فقط بالنسبة لمشاكل الاحتياج البيولوجي للأكسجين (BOD) والأكسجين الذائب (DO)، ولكن أيضاً بالنسبة لمعظم الملوثات، بما في ذلك العناصر الثقيلة، والأمونيا والمواد العضوية السامة التي توجد في أنواع الدفق المعالج جزئياً. من ناحية أخرى، ففي حالة البكتيريا الدالة، يلاحظ قيمة مسافة النقل، وذلك كما يتضح في المثال التالي:

افترض أن مصباً معالجاً بدرجة فعالية 90% فقط، وبذلك فإنه بدلاً من وجود 100 ألف بكتيريا قولونية في كل 100 مل كما استخدم في المثال الخاص بموت الكائنات الدالة بالمياه العذبة (الجزء 1.4.13)، يكون العدد الأولي للبكتيريا القولونية 100 مليون في كل 100 مل. إن التخفيف الأولي الذي يساوي 1:100 سوف يخفف التركيز إلى 1% من التعداد المبدئي، أو إلى مليون واحد. بعدها، وباستخدام مقلوب عامل تخفيف النقل المشار إليه سابقاً (0.87) يمكننا حساب أن النقل إلى الشاطئ سوف يؤدي إلى مزيد من التخفيف للعدد ليصل $C_0 = 870$ ألف لكل 100 مل. وسوف تُقطع مسافة 8 كيلومترات في زمن $t = 14.8$ ساعة عند سرعة تساوى 15 سم في الثانية. وإذا ما وجد أن ثابت معدل الموت (K) يزيد على 0.46 في الساعة وهو ما يقع في المدى الأقل من القيم المعتادة،

فسيكون تركيز البكتيريا في الشاطئ ($C_t=14.8$) وبعد تعويض قيم C_0 و K و t في المعادلة (13-3) نحو 960 في كل 100 مل.

وتجدر الإشارة إلى أنه حتى في حالة توفر نوع من المعالجة الثانوية (انظر الجزء 2.2.3.20)، فإن بعض الوكالات المنظمة تضع تعليمات تعقيم إضافية لتقليل التراكيز البكتيرية لتصل معايير مياه السباحة. وتبين النتيجة في المثال السابق أن كلورة الدفق قد لا تكون ضرورية عند نسبة إزالة تصل 90%، وهو المستوى الذي عادة ما يتحقق في المعالجة الثانوية.

نظراً لأن مصبات المحيط تتيح عادة مسافة نقل كبيرة جداً، فإن المجتمعات الساحلية قد لا يتعين عليها التعقيم بالكلور في منشآت معالجة المجاري لتقليل التلوث الميكروبي في مناطق البيئات البحرية التي يستخدمها الإنسان. ويعتبر هذا مهماً لأن استخدام الكلور يمكن أن يشكل خطراً. كذلك، فإن الكلور قد يرتبط مع المواد العضوية في مياه المجاري لينتج مركبات ضارة للكائنات البحرية والبشر الذين يستهلكون هذه الكائنات (انظر الجزء 5.20). وتعتمد المسافة اللازمة لموت الكائنات الدالة لتصل لمستوى منخفض بدرجة مقبولة على سرعة التيار، والاتجاه، إضافة للتركيز البكتيري عند نهاية عملية التخفيف الأولى السريعة.

7.13 تتبع الأقماع باستخدام الأصباغ

كثيراً ما يكون إجراء دراسة خاصة بعلم المحيطات ضرورية لقياس التركيز البكتيري في الجراف قمع مياه عادمة عندما يحمل التيار الماء نحو الشاطئ. إن مثل هذه الدراسات تستخدم عادة صبغة أو مادة لاقتفاء الأثر، التي تضاف لمياه المجاري حتى يمكن تتبع القمع لعدة كيلومترات. ومن ثم يمكن أن تستخدم البيانات المتحصل عليها لحساب ثابت معدل

موت البكتيريا، الذي قد يكون مفيداً للتنبؤ بالتراكيز البكتيرية عند مسافات مختلفة تحت ظروف متنوعة من التيار.

ويعتبر تتبع الصبغة (شكل 13- 17) تقنية معروفة جداً وتستخدم بكثرة في النماذج الرياضية الهيدروليكية، و التجهيزات الحقلية النمطية، على الرغم من أنه في حالات المصببات العميقة يمكن أن تصبح هذه المواد الاتقائية مكلفة جداً بسبب معدلات التدفق الحجمية العالية والتخفيفات الكبيرة التي تتحقق عادة خلال إطار زمني قصير. إن معدل إضافة الصبغة (Q_d) لسريان الدفع (V_e) اللازم لتوفير تركيز صبغة معينة يساوي (C_d) بعد تخفيف يساوي (S_a) هو:

$$Q_d = \frac{V_e C_d \alpha_a S_a}{W \alpha_d} \quad (10-13)$$

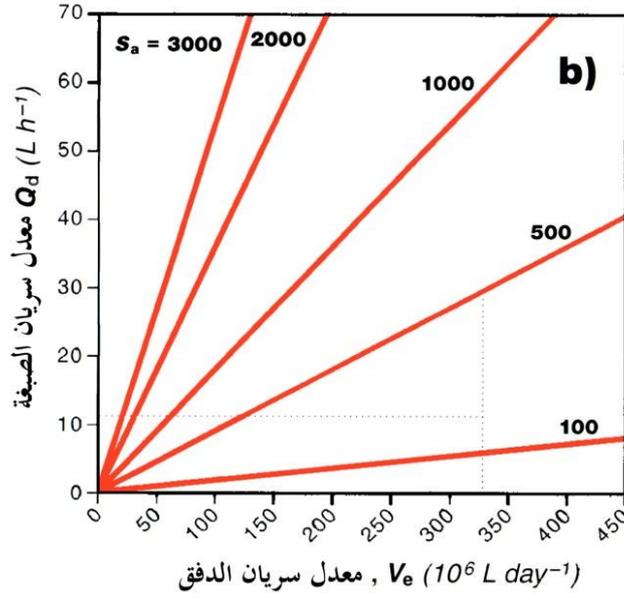
حيث أن :

a_a = الجاذبية النوعية للقمع المخفف.

a_d = الجاذبية النوعية لمحلول الصبغة.

W = جزيء وزن الصبغة في المحلول المستخدم .

ويشير الشكل (13-7ب) إلى معدل الصبغة اللازم باللتر في الساعة لعوامل تخفيف مختلفة وسريان الدفع بالمليون لتر في اليوم، وذلك لتحقيق تركيز صبغة في البيئة المحيطة يساوي 1.0 ميكروجرام في اللتر الواحد من مياه البحر. وتستخدم في دراسات الصبغة عادة مادة الرودامين (Rhodamine WT)، وهي متوفرة في صورة محلول 20% ($a_d = 1.19$) في براميل صغيرة (57 لتراً). ويمكن لجهاز الفلوروميتر (Fluorometer) الذي يستخدم في أخذ عينات حقلية أن يكشف هذه الصبغة عند تراكيزات تتراوح ما بين 0.5 و 1 ميكروجرام في اللتر. معدل سريان الدفع، V_e (10⁶ لتر في اليوم).



شكل (7-13) (أ) قمع سطحي تم صبغه بمادة الرودامين WT لمياه مجارى معالجة جزئياً بعيداً عن ساحل مدينة سان فرانسيسكو، بولاية كاليفورنيا. تستخدم الصبغة كدليل لرصد الأعداد البكتيرية في أعماق مياه المجارى المنجرفة. ويلاحظ في الصورة وجود وعائين للرصد. (ب) رسم بياني يستخدم لتحديد مقدار الصبغة اللازم لتوفير 1.0 ميكروجرام في اللتر من دفق مخفف كما هو مستخدم في الدراسة الموضحة في (أ). تشرح الخطوط المنقطعة استخدام الرسم البياني لحل المسألة التي توجد في المتن.

يمكننا استخدام الشكل (13-7ب) لتقدير كمية الصبغة اللازمة لتتبع سريان دفق معين في جسم مائي، أو أي مسألة خلط مائي مماثلة. و إذا لم يتوافق تماماً السريان الموضح على المحور الأفقي للرسم البياني، وكذلك الخطوط المائلة الممثلة لعوامل التخفيف مع المسألة التي نتناولها، يمكن عندها استخدام المعادلة (13-10) لتدقيق التقدير. دعونا نستخدم كليهما في مثال محدد.

افترض أن لدينا دفقاً معيناً بمعدل 330 مليون لتر في اليوم، وأن التصريح التنظيمي يتطلب تخفيف الدفق بمعامل يساوي 200 مرة عند نهاية منطقة الخلط. افترض أننا وضعنا قارب أخذ العينات عند حدود منطقة الخلط وأنا نسعى لقياس 1 ميكروجرام في اللتر من الصبغة عند مرور القمع تحت القارب. والسؤال هو كم هي كمية الصبغة التي يلزم إضافتها للدفق؟. باستخدام الرسم البياني، حدد الرقم 330 على امتداد الخط الأفقي (المحور الصادي) وارسم خطاً حتى يتقاطع مع عامل التخفيف $(S_a) = 500$. الآن حدد أين تقع النقطة $S_a = 200$ على هذا الخط. من هذه النقطة ارسم خطاً أفقياً ليتقاطع مع المحور الرأسي (المحور السيني) وقدر الاحتياج من الصبغة التي تساوي 12 لتراً في الساعة .

ولإيجاد تقدير أكثر دقة، سوف نستخدم المعادلة (13-10). أولاً: حوّل العامل V_e الذي يساوي 330 مليون لتر في اليوم (أي، 330×10^6 لتر في اليوم) إلى 13.7×10^6 لتر في الساعة (لتر/ ساعة). وبالنسبة للعامل C_d استخدم الرقم 10^{-9} جم من الصبغة لكل جرام من مياه البحر (يساوي هذا تقريباً 1.0 ميكروجرام لكل لتر، بافتراض كثافة نوعية تساوي 1.0). وتكون الكثافة النوعية لدفق المجاري المخفف 200:1 بمياه البحر

$a_a = 1.023$. (في حالة استخدام مياه عذبة، تكون الكثافة النوعية 1.0). وباستخدام $S_a = 200$ و $W = 0.2$ و $a_d = 1.19$ الخاصة بالصبغة رودامين WT كما تم الإشارة إلى ذلك سابقاً، وبالتعويض في المعادلة (10.13)، نحصل على: $Q_d = 12$ لتراً في الساعة (تم تقريبها من 11.8)، وهو ما يؤكد على تقديرنا عند استخدام الرسم البياني (13-7 ب).

8.13 التفاوت الزمني والمكاني لتراكيز القمع

إن تراكيز مؤشرات جودة المياه، مثل البكتيريا، ليست متجانسة ولا هي مستقرة وثابتة من ناحية قياسات الزمن والفراغ التي تنظم التراكيز عند نهاية منطقة الخلط. وبشكل عام، فنحن نفترض أن تراكيز المكونات في المدى الأفقي لقمع معين صادر عن مصب مشتت يكون متجانساً. لكننا لا نستطيع أخذ افتراض كهذا بالنسبة للاتجاه العمودي. فعدم التجانس العمودي مشكلة كثيراً ما تواجه أثناء التصميم، وتحليل الأداء، ومتابعة تنفيذ التعليمات، وذلك على الرغم من أن المشكلة في حالة الأنهار ليست بنفس القدر منها في حالة المصببات ومياه الشواطئ وكذلك بعض البحيرات والخزانات. وعموماً فإن عدم التجانس العمودي الذي يرتبط بالتفاوت الطبقي للكثافة في المياه المستقبل للصرف، يرتبط أيضاً بانتقال قمع معين في عدسة رقيقة نسبياً مقارنة بعمق عمود من الماء. فعلى سبيل المثال، إذا ما انتقل القمع فوق السطح، فإن مكوناته سوف تتفرق في الاتجاه إلى أسفل، ومع تشتت هذه المكونات خلال عمود الماء، فإن تركيز الملوثات قريباً من حافة القاع يصبح تدريجياً أقل من ذلك عند السطح. (وبذلك، إذا ما كان شرط التصريح يتطلب إدراج القيمة القصوى، فإن أخذ العينة يجب أن يتم عند السطح، وليس عند منتصف العمق). وبنفس

الكيفية، فإن مياه التخفيف المختلطة مع دفق الصرف التي يتم ضخها تكون أيضاً متغيرة مع العمق نتيجة لعمليات فيزيائية تؤثر على الحركة الأفقية للمياه المحيطة إلى داخل منطقة التفريغ. ويعتبر الأكسجين الذائب (DO) مثلاً لأخذ مؤشرات جودة المياه التي تظهر انعدام التحانس العمود في كثير من المجمعات المائية المحاذية للأنهار (خزانات) والبحيرات، والمصببات النهرية، والمواقع الساحلية.

تنتج بعض النماذج الرياضية للنقل والتفريق تقديرات على أسس التركيز الوسطى، الذى هو عبارة عن التركيز الأقصى لمقطع عرضي للقمع عند مسافة معينة في اتجاه أدنى المجرى من الفوهة (Orifice). ومع تمدد عرض القمع بزيادة المسافة، فإن التركيز الأقصى يبدأ في الانخفاض باضطراد. فمثلاً، قد يكون التركيز عند خط الوسط (التركيز الأقصى) عند مسافة 60 متراً من المشتت 100 ملليجرام في اللتر، بينما قد يكون التركيز الأقصى عند 120 متراً من الفتحة التي يخرج منها الدفق قريباً من 70 ملليجرام في اللتر. وهناك أنماط رياضية أخرى تحسب التركيز المتوسط للمقطع العرضي للقمع، وهذا بالطبع يتناقض أيضاً في الاتجاه الأدنى للمجرى: ويكون التركيز المتوسط دائماً أصغر من التركيز الأقصى. ويتعين أن تؤخذ القيمتان في الاعتبار في دراسات التحقق العملية والحقلية، وأن كلتا القيمتين قد تكون مفيدة في الأغراض التنظيمية.

9.13 مراقبة تنفيذ التعليمات

إن إجراءات التنظيم الخاص بتلوث المياه في الولايات المتحدة مبنية على نظام تصاريح الضخ. المعروف باسم تصاريح النظام القومي للقضاء على ضخ التلوث

(NPDES). إن الحائزين على هذه الأذونات، مثل، سلطات معالجة الصرف البلدي والصناعي يتعين عليهم تطبيق واحترام القيود والمتطلبات الخاصة بتصاريحهم، مثل حدود التراكيز ومعدلات انبعاث الكتلة المكونة من مواد محددة. كما أن عليهم أن يطبقوا معايير جودة المياه التي تم تحديدها للجسم المائي الذي سيقومون بضخ الدفق الخاص بهم خلاله. وقد تتطلب بعض التصاريح، خاصة في حالة تفريغ الدفق في المياه الساحلية، مشاريع مراقبة بيئية مفصلة. ويتعين على الحاصل على التصريح القيام بنشاطات مراقبة وتقديم نتائجه ليثبت تطبيقه لشروط التصريح. وفي بعض المناسبات، تقوم الوكالات التنظيمية بدراسات خاصة للتأكد ومراجعة برامج الرصد والمراقبة. وتعكس بيانات المراقبة التفاوت الواسع للظروف التي توجد في البيئة الطبيعية، وكثيراً ما يواجه القائمون على ضخ المخلفات وكذلك المنظمون تحديات تستدعي التوفيق بين نتائج المراقبة من جهة والتوقعات المستخدمة في وضع شروط التصريح من جهة أخرى.

1.9.13 مواقع الخلط

تسمح عادة شروط التصاريح الصادرة عن الوكالات التنظيمية ببعض الاستثناءات لواحد أو أكثر من معايير جودة المياه داخل موقع خلط معين ملاصق لنقطة التفريغ. ويمكن أن تؤسس منطقة خلط معينة استناداً إلى اعتبارات عشوائية محضّة أو عن طريق استخدام بيانات ومحاكاة بنماذج رياضية. إن الكثير من تحديدات مواقع الخلط تتم على أساس معدل التخفيف المتوقع الذي سيتوفر عن طريق التصميم الجيد لمشتت يهدف للوصول إلى تخفيف مبدئي مثالي. وبالنسبة للأجسام المائية الكبيرة، يوجد أسلوب شائع يتمثل في وصف عرض

الموقع على أنه عمق الماء عند موقع التفريغ، وأن الطول هو طول مشتت (diffuser). وفي حالة الأنهار الكبيرة، يكون من الشائع أن يقتصر موقع الخلط بحيث لا يمتد بالكامل بعرض النهر، وبذلك يُترك (ممر آمن) حتى تتفادى أنواع الكائنات المائية التراكيز العالية من مكونات المياه العادمة. لكنه، أحياناً يكون شكل موقع الخلط عشوائياً تماماً، فمثلاً قد يكون الموقع مستطيل الشكل في اتجاه نهاية النهر من أنبوب تفريغ يساوي ربع عرض المجرى ويمتد في اتجاه نهاية المجرى لمسافة كيلومتر واحد. وكثيراً ما يوجد أنثان أو ثلاثة مواقع خلط لمجموعات مختلفة من الملوثات ودرجات السمية.

2.9.13 تنظيم الاستخدام

قد يوجه اهتمام الإجراءات التنظيمية بشكل مناسب نحو كل من القيم المتوسطة والقيم غير المتصلة للملوثات. فمثلاً، تحدد ولاية كاليفورنيا والوكالة الأمريكية لحماية البيئة الحد الأقصى المسموح به للقيم اللحظية لبعض القياسات إضافة للقيم المتوسطة المختلفة المؤقتة (مثلاً: قيم المتوسطات الحسابية لفترة ثلاثين يوماً وستة شهور). وفي بعض الحالات، تستند هذه النظم على المعلومات الخاصة بالتأثيرات على الأحياء المائية، وفي حالات أخرى يتم تحديد هذه القيم للحصول على إحصاءات فيما يخص أداء محطة معالجة المياه العادمة. وتقتصر المعايير التي يعبر عنها على أساس متوسطات مؤقتة (يومية إلى شبه موسمية) أن يتم تقييم تراكيز القمع بشكل مكثف في اتجاهات ثلاثة، عند كل من حدود منطقة الخلط، وفي بعض الحالات، عند مواقع موارد بيولوجية حساسة بنهاية التيار.

وتلعب سرعة التيار واتجاهه دوراً هاماً عند تقييم التراكيز عند الحدود. وعند دمج البيانات عن التباين الدوراني لتركيب الدفق، وقطاعات الكثافة وكذلك اتجاه التيار، يكون ممكناً تأسيس متوسط لسته أشهر (أو وسيط) لعدد من النقاط على حدود منطقة الخلط. ويتوقع أن يكون متوسط الستة أشهر متفاوتاً جداً عند هذه النقاط، كما أن النقطة التي تملك أعلى تكرار للتعرض قد لا تملك المتوسط الأعلى من التركيز.

وبعيداً عن موقع الخلط، قد توجد مناطق حيث تكون تيارات المجرى من الدفق المخفف، كل منها يغادر الموقع عند وقت مختلف وفي اتجاه مغاير لتتجمع فوق سلسلة صخرية أو تجمع كبير من الطحالب البحرية أو منطقة سباحة. وفي هذه الحالة، قد يكون تكرار التعرض واستمراره أكثر أهمية من أعلى تركيز مشاهد وذلك عند تقييم التأثير الكلي على هذه الموارد.

3.9.13 أخذ عينات للتحقق

بغض النظر عن السؤال فيما إذا كانت القيم غير المتصلة أو متوسطات القطاع العرضي ستستخدم لاختبار احترام وتنفيذ المعايير، فإن الطريقة التي يتم بها استخدام عينات حقلية للتحقق من أو المقارنة مع نتائج نموذج ما يمثل اعتباراً هاماً.

وفي دراسات التحقق الحقلية أو العملية لأداء القمع، قد تقاس القيمة المتوسطة أو يتم الحصول عليها صدفة من عينة في قنينة. وعادة ما تكون القيمة الحقلية المقاسة من منطقة موضعية صغيرة جداً وتمثل إشارة على امتداد فترة زمنية محددة. ويتم جمع عينات كثيرة من نفس المقطع العرضي حتى يمكن حساب متوسط عددي. وفي المعمل، فإن استخدام

أنماط هيدروليكية، يكون سهلاً نسبياً. لكنه في حالة الحقل، حيث تشمل عادة أقماع عديدة، يكون أخذ عينة أكثر تعقيداً. ونحاول عادة أخذ عينات من مجرى متحرك وعند أعماق كبيرة تحت السطح بعيدة عن الرؤية، وذلك باستخدام أدوات أخذ عينات مثبتة على قارب متحرك. ولذلك فإنه من المقبول افتراض بعض الشك حول أي جزء من المقطع العرضي تمثله القيمة.

ولهذه الأسباب، فإن دراسات التحقق الحقلية للأقماع المغمورة في الأنهار العميقة والبحيرات والمياه الشاطئية يمكن إجراؤها أفضل ما يمكن لمقطع عرضي يكون أبعد ما يمكن عملياً من المصب، طالما كانت المنطقة واقعة ضمن المدى حيث يكون القمع متصلاً. وبالقرب من المصب، تتغير القيم بسرعة أكبر وتكون أبعاد القمع أصغر بكثير، مما يجعل من وضع أداة أخذ العينة في المكان المناسب أو حتى في القمع أكثر صعوبة، إضافة لذلك، فإنه من الأفضل إجراء الدراسة عندما تكون التيارات منخفضة فيصعد القمع لأقرب ما يمكن من السطح. وبذلك فإن وضع جهاز أخذ العينات قد يتحسن لأنه ربما يصبح ممكناً رؤية القمع. وبغض النظر عن سهولة جمع العينة، فإن العينات التي تؤخذ أثناء فترة التيارات المنخفضة قد تكون مفيدة بشكل خاص للتحقق من تنفيذ التنظيمات.

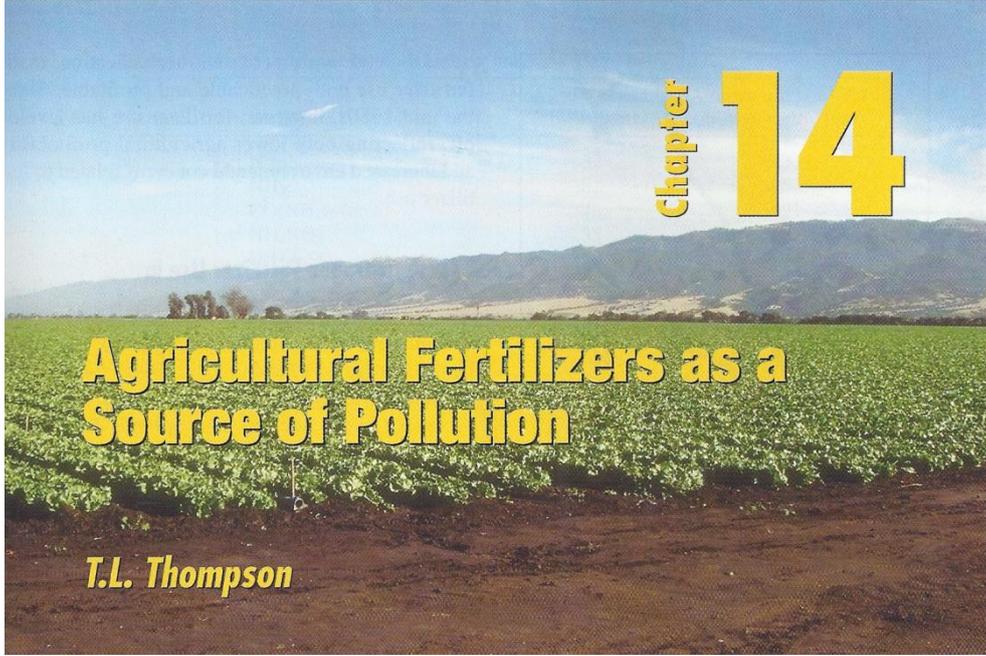
المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Bacow L.S. and Wheeler M. (1984) *Environmental Dispute Resolution*. Plenum Press, New York.
- Baumgartner D.J., Frick W.E., and Roberts P.J.W. (1994) *Dilution Models for Effluent Discharge*, 3rd Edition. Report 600/R-94/066. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Expert Panel on the Role of Science at EPA (U.S.) (1992), *Safeguarding the Future; Credible Science, Credible Decision: The report of the Expert Panel on the Role of Science at EPA to William K. Reilly, Administrator*. Report 600/9-91/050. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- National Research Council (1990) *Managing Troubled waters: Te Role of Marine Environmental Monitoring*. National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council (1990) *Managing Wastewater in Coastal Urban Areas* . National Academy Press, Washington, D.C.
- Relative Risk Reduction Strategies Committee, United states Environmental Protection Agency. Science Advisory Board (1990) *Reducing Risk: Setting Priorities and Strategies for Environmental Protection*. Report SAB-EC-90-021. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

أسئلة ومسابئلة حسابية

1. احسب الوقت اللازم حتى يتناقص عدد البكتيريا القولونية إلى 1000 في كل 100 مل (وهو معيار مياه الاستحمام) من مياه مجارى تحتوي على 10^7 في كل 100 مل. ويتوقع أن يكون معامل موت البكتيريا 1.5 في اليوم الواحد.
2. افترض أن متوسط سرعة التيارات في جسم مستقبل من الماء تساوي 0.8 كيلومتر في الساعة. كم هي المسافة التي يتعين اختيار موقع تفريغ المياه العادمة عندها بعيداً عن منطقة سباحة؟
3. يوضح منحنى الاحتياج الحيوي للأكسجين (BOD) بالمثل في هذا الباب (شكل 13-3) أن قيمة BOD تساوى 6.1 مجم في اللتر عند اليوم الخامس. ويبدو أن القيمة الحدية للاحتياج الحيوي للأكسجين (BOD_L) تساوي حوالي 7.6 مجم في اللتر. وقد تم حل معادلة BOD باستخدام هذه القيم لنجد أن قيمة K كانت نحو 0.32 في اليوم. افترض أن القيمة الحدية كانت 15.0 ماذا ستكون القيمة في اليوم الخامس؟
4. افترض أن مخلفات أخرى لها قيمة حدية تساوي 15، لكن المخلفات كانت أكثر سهولة للتحلل. هل ستكون القيمة عند اليوم الخامس أقل أو أعلى؟ لماذا؟
5. أحسب تركيز الأكسجين لجسم مستقبل من الماء عند اليوم 1، 2، 4، و8 نتيجة لتفريغ مياه مجاري معالجة جزئياً ولها BOD يساوى 30 مجم في اللتر ومعامل تحلل يساوي 0.1 في اليوم، ويساوي معامل إعادة التهوية 0.3 في اليوم. هذا جسم مائي غير ملوث ولا يعاني من نقص بداية عن منطقة التفريغ. ونتيجة لذلك فإن الماء المحيط يكون مشبعاً تقريباً عند 10 مجم في اللتر من الأكسجين الذائب.

الباب الرابع عشر
الأسمدة الزراعية كمصدر للتلوث



تتطلب المحاصيل ذات المردود الاقتصادي العالي، مثل الحنّس، إضافات متكررة من سماد نيتروجيني، الذي يمكن أن يتسبب مع الري في تلوث نتراتى لخزانات المياه الجوفية.

1.14 التربة كمصدر لتغذية النبات

تحتاج النباتات لعدد من العناصر الكيميائية لتستكمل دورات حياتها. وتشمل الستة عشر عنصراً اللازمة لنمو جميع النباتات كلا من C، H، O، N، P، K، Ca، Mg، S، Fe، Mn، Zn، Cu، Mo، B، و Cl. ومن المثير أن ميكروبات التربة تحتاج لنفس العناصر.

إن هذه العناصر، التي توجد عادة في صورة أيونية، يتعين امتصاصها بواسطة النباتات من محلول التربة. وفي النظم البيئية غير المضطربة، تتحصل النباتات على هذه المغذيات من محلول التربة من خلال تجوية المعادن، والإضافات الجوية، وإضافات الترسيب للمجري المائية، أو عن طريق تدوير المغذيات بسبب موت الغطاء النباتي الخضري وتحلله. ويعتمد تيسر المغذيات على عوامل تربة لا حيوية (الباب الثاني) وخصائص كيميائية وبيولوجية (الباب السادس والباب السابع). وعبر أغلب مراحل التاريخ، فإن الإنتاج الزراعي قد اعتمد على مصادر المغذيات ذاتها، باستثناء بعض الحالات حيث يتم تحسين مستوى المغذيات باستخدام مخلفات حيوانية وبشرية.

عندما تحصد المحاصيل فإنه يزاح معها المغذيات من التربة. لذلك، فعلى مدى وقت طويل قد يتسبب الإنتاج الزراعي في إزاحة كميات كبيرة من المغذيات، مما يترتب عنه تدني في الإنتاجية. وبالإضافة لإزاحة المغذيات، فإن الإنتاج الزراعي على المدى البعيد قد يتسبب في فقد للمادة العضوية من التربة وعلى سبيل المثال، فإن استزراع أراضي الأعشاب في محطة التجارب الزراعية بمنطقة روثاماستد بمحاصيل موسمية أدى إلى تدني محتوى التربة من المادة العضوية بنسبة تراوحت ما بين 30 - 50% خلال 30 سنة.

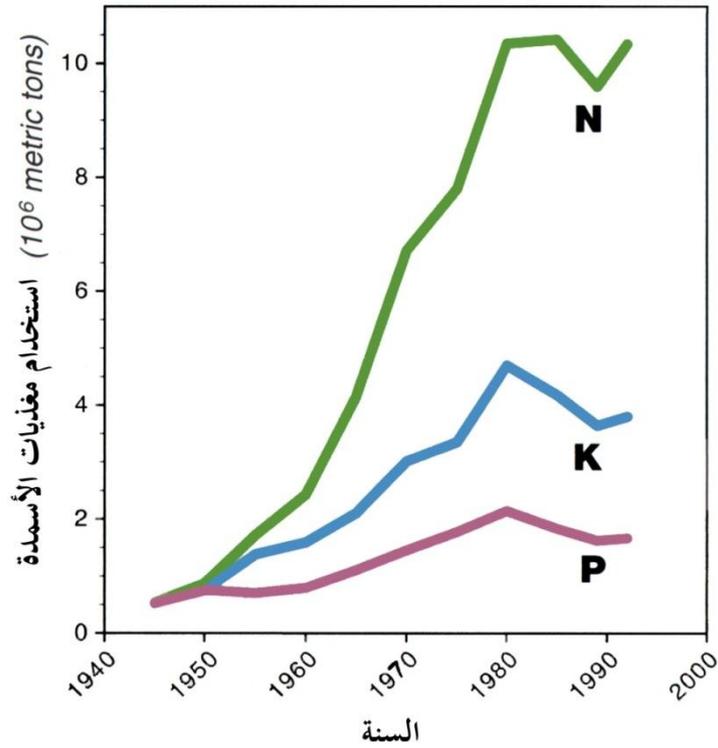
الأسمدة هي عبارة عن مواد تحتوي على مغذيات ضرورية للنبات يمكن استخدامها لاستكمال، أو حتى الإحلال الكلي للمغذيات التي تتوفر بواسطة عمليات طبيعية. وتكون الأسمدة عادة مركبات غير عضوية قابلة للذوبان لتعطي مغذيات في صور أيونية في محلول التربة، لكن مواداً عضوية مثل الكمبوست والمخلفات العضوية الصلبة للمجري قد

تستخدم أيضاً كأسمدة (انظر الجزء 4.10). ونظراً لأن النباتات تمتص المغذيات في صورة أيونية، فإن مصدر هذه الأيونات غير ذي أهمية: فالاحتياجات الغذائية للنبات يمكن سدها بنفس القدر عن طريق الأسمدة أو المغذيات الناتجة بواسطة العمليات الطبيعية بالتربة. إن ما يهم فقط هو توفير هذه الأيونات. إن التأثير الفعال للأسمدة على إنتاجية المحاصيل أمر قد حسنته البحوث العلمية. فمثلاً شرائح مورو التجريبية في جامعة إلينوي، التي تم تأسيسها عام 1876 بغرض دراسة تأثيرات الزراعة على المدى البعيد على إنتاجية التربة، قد أظهرت أن كمية الغلة من محصول الذرة المزروعة في شرائح لم يتم تسميدها في الفترة من عام 1876 و1954 قد انخفض بشدة، لكنه وعند إضافة الأسمدة عام 1955، فإن النتيجة كانت زيادة فورية في كمية الغلة بمقدار أربعة أضعاف.

2.14 النيتروجين كمصدر للتلوث

قد تحتوي الأسمدة على أي من المغذيات الضرورية، لكن جلّ الأسمدة المضافة للتربة الزراعية تحتوي على النيتروجين (N) والفوسفور (P) والبوتاسيوم (K)، أو خليط منها، وتسمى هذه العناصر بالمغذيات الكبرى لأن النباتات تمتصها بكميات أكبر مقارنة بالمغذيات الأخرى. ونظراً لأن التربة الزراعية كثيراً ما تفتقر لكميات كافية من واحد أو أكثر من هذه المغذيات لتحقيق أقصى إنتاجية محسولة، فإنها عادة ما تضاف في صورة أسمدة. ويوضح الشكل (1.14) أنماط استخدام المغذيات الكبرى في الولايات المتحدة، لقد ارتفع استخدام الأسمدة دراماتيكياً (بشدة) خلال فترة الحرب العالمية الثانية، تزامناً مع تحسن أصناف المحاصيل وأساليب الإدارة، إضافة لزيادة الميكنة مما جعل استخدام الأسمدة عملياً

ومرجحاً، ولكنه ومنذ منتصف الثمانينيات من القرن الماضي، ثبتت كميات الأسمدة المستخدمة، عاكسة بذلك انخفاضاً في الربحية الزراعية وزيادة في الاهتمامات البيئية المرتبطة باستخدام الأسمدة.



شكل (1-14): أنماط تاريخية لاستخدام المغذيات التسميدية في الولايات المتحدة (بيانات عن: Berry 1992)

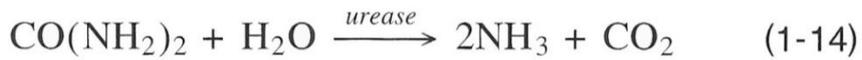
1.2.14 استخدام الأسمدة النيتروجينية في إنتاج المحاصيل

يعتبر النيتروجين أكثر المغذيات الشائعة التي تضاف للأراضي الزراعية في الولايات المتحدة. فمثلاً، تم في عام 1992 إضافة ما إجماله 10.3 مليون طن متري من النيتروجين (N)

- وهو ما يعنى متوسطاً مقداره 83 كيلوجرام لكل هكتار من الأراضي الزراعية. ويوضح الجدول (14 - 1) المواد التسميدية المستخدمة والأكثر شيوعاً. وحديثاً ازداد استخدام غازات وسوائل ذات محتوى مرتفع من النيتروجين (N)، مثل الأمونيا (NH₃) واليوريا ونواتر الأمونيوم، بينما تناقص استخدام الأسمدة الصلبة ذات المحتوى المنخفض من النيتروجين. ويمكن إضافة الأسمدة النيتروجينية بعدة طرق، مثل النثر فوق سطح التربة (يتبعه أو لا يتبعه خلط مع التربة)، والحقن تحت سطح التربة، أو الحقن مع مياه الري لتوفير احتياجات المحاصيل من هذا المغذي، ويشاع إضافة الأسمدة النيتروجينية قبل الزراعة، كما قد تضاف على جانبي النباتات النامية (Side-dressing) عندما تسمح بذلك ظروف إدارة المحصول.

2.2.14 دوران النيتروجين في الترب

يتعرض النيتروجين لأنواع كثيرة من التفاعلات الكيميائية والكيموحيوية داخل التربة. فعندما يضاف للتربة في صورة أسمدة، يكون النيتروجين عادة في صورة يوريا [CO(NH₂)₂] أو أمونيا (NH₃)، أو كأملح أمونيوم (NH₄⁺) أو نترات (NO₃⁻). لكنه، وبغض النظر عن صورة السماد النيتروجيني المضاف للتربة، تحدث نفس أنواع التفاعلات. وتمتص عادة النباتات عنصر النيتروجين في صورة أيون NH₄⁺ أو NO₃⁻. ويمكن توفر هذين الأيونين مباشرة نتيجة لتحلل الأملاح أو بشكل غير مباشر عن طريق عمليات أخرى. فمثلاً، تتعرض اليوريا لتحلل المائي (hydrolysis) في الترب:



حيث أن اليوريز (urease) عبارة عن إنزيم ميكروبي. ويمكن أن يتسبب هذا التفاعل في فقد للنيتروجين (N) للهواء الجوي في صورة غازية (NH_3) عندما تضاف اليوريا عند سطح التربة أو قريباً منه. ويتفاقم الفقد عندما يكون الرقم الهيدروجيني للتربة السطحية 7.0 أو أعلى.

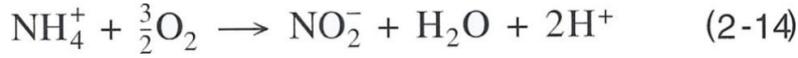
جدول (1-14): مواد التسميد بعنصري النيتروجين والفوسفور شائعة الاستخدام

(بيانات عن: Berry, 1992)

المغذي	السماذ	المحتوى الغذائي (% على أساس الوزن)	الكمية المستخدمة في عام 1992 (بالمليون طن متري)
N	محاليل نيتروجين (N)	32	7.31
	أمونيا (NH_3)	82	4.64
	يوريا [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$]	46	3.21
	نترات أمونيوم [NH_4NO_3]	35	1.72
	كبريتات أمونيوم ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	21	0.74
P	سوبر فوسفات	10.5	0.03
	سوبر فوسفات ثلاثي	21.0	0.45
P و N	فوسفات الأمونيوم	(N) – 18 (P) – 20	3 . 11

ويمكن أن يؤول مصير أيون الأمونيوم إما إلى:

- (1) التثبيت فيما بين الطبقات البينية لمعادن الطين، أو (2) التحول إلى NH_3 يفقد في صورة غازية، أو (3) الامتصاص بواسطة النباتات أو الكائنات الدقيقة، أو (4) النترية:



وتحفز عملية النترة بواسطة بكتيريا هوائية ذاتية التغذية-الكيميائية (chemoautotrophic) التي تستخدم أكسدة النيتروجين كمصدر للطاقة. ويحفز النفاعل المبين بالمعادلة (2.14) بواسطة نوع بكتيريا تسمى النيتروسوموناس (*nitrosomonas*)، أما النفاعل (3.14) فيحفز بواسطة نوع بكتيريا أخرى تسمى النيتروباكتير (*nitrobacter*) [أيضاً، أنظر المعادلتين T 4 - 9 و T 4 - 10].

تتأثر معدلات النترة بقوة بدرجة حرارة التربة ورقمها الهيدروجيني. وتحقق أقصى معدلات نترة عندما تكون التربة جيدة التهوية، ورقمها الهيدروجيني يتراوح ما بين 6 و8، ودرجة حرارة التربة ما بين 25 و35م°. وتكون النترات عرضة لكل من الامتصاص بواسطة النباتات أو الكائنات الدقيقة والذنترة في حالة الترب المشبعة سيئة التهوية التي تتميز بجهود أكسدة واختزال منخفضة (انظر المعادلة T4-14).



ويوضح هذا التفاعل الكيميائي نصف تفاعل اختزال، حيث استخدمت النترات كمحطة نهائية لقبول الإلكترونات بواسطة بكتيريا اختيارية لا هوائية. ويمكن للعديد من أنواع البكتيريا أن تستخدم النترات كمستقبل للإلكترونات.

إن التفاعلات الحيوية وغير الحيوية التي تتحكم في تحولات نيتروجين التربة ينظر إليها عادة على أنها تمثل دورة النيتروجين (nitrogen cycle) [انظر الشكل 2.14]. وفي معظم النظم البيئية على اليابسة، تعتبر المادة العضوية الخزان الأكبر للنيتروجين. وقد تتكون هذه المادة العضوية من بقايا نباتية أو حيوانية عند مراحل مختلفة من التحلل إضافة إلى مركبات عضوية معقدة ناتجة عن التحلل الميكروبي، ويسمى ناتج التحلل هذا بالدبال (humus). إن الدبال الذي يعتبر تكوينه الكيميائي غير محدد بل ومتغير، مقاوم جداً لأي تأثير ميكروبي آخر (انظر الجزء 2.2.7)، وعند إضافتها للتربة، فإن المادة العضوية الحديثة قد تستخدم بواسطة كائنات دقيقة غير ذاتية التغذية كمصدر للكربون والطاقة. ويتم تحويل النيتروجين العضوي في المادة إلى NH_4^+ عن طريق العملية التالية:

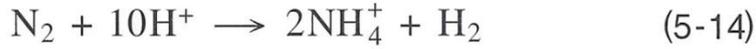
التحول الأميني (Aminization): وهي عملية يتحول فيها النيتروجين العضوي إلى أحماض أمينية وسكريات أمينية.

النشدر (Ammonification): وفيها تتحول الأحماض الأمينية والسكريات الأمينية إلى NH_4^+ ، وتشكل عمليتي التحول الأميني والنشدر ما يسمى بالمعدنة (mineralization). وعلى العكس، فإن نيتروجين التربة غير العضوي (NH_4^+ , NO_3^-) قد يستفاد منه بواسطة الكائنات الدقيقة في عملية تسمى بالتثبيت الحيوي (immobilization). وتتطلب الكائنات الدقيقة بالتربة إلى نسب C:N محددة في أنسجتها، عادة ما تتراوح، بين 5:1 إلى 10:1. إن المقادير النسبية لكل من المعدنة والتثبيت الحيوي تتحدد بواسطة نسبة C:N للمادة المضافة

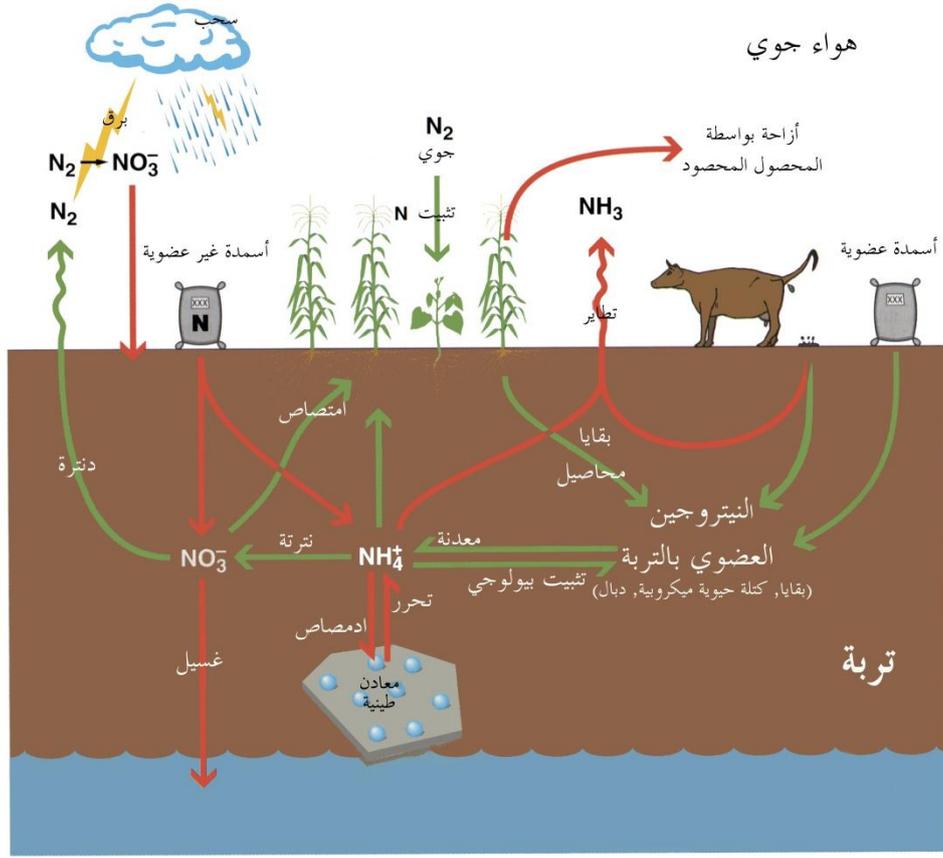
للترب. وعموماً فإن إضافة مادة ذات نسبة C:N أقل من 30 تحفز على حدوث معدنة، أما عندما تكون هذه النسبة أعلى من 30 فإنها تحفز حدوث تثبيت بيولوجي للنيتروجين.

تثبيت النيتروجين (Nitrogen Fixation)

هو تحول نيتروجين الهواء الجوي (N_2) إلى صور مفيدة للنباتات والكائنات الدقيقة. وقد يتم تثبيت النيتروجين بيولوجياً. وتوجد بعض أنواع البكتيريا التي لها القدرة على تحويل N_2 إلى NH_3 من خلال تحفيز التفاعل بواسطة أنزيم النيتروجيناز (nitrogenase):



تعيش بعض أنواع البكتيريا المثبتة للنيتروجين تكافلياً مع النباتات (مثل، الرايزوبيا مع البقوليات: أنظر الشكل 4 - 2)، بينما تعيش أخرى مستقلة عن النباتات ولكن داخل نطاق منطقة نمو الجذور (rhizosphere)، ويعتبر التثبيت البيولوجي للنيتروجين، الذي يسهم في النظم البيئية الأرضية بما مقداره 1.4×10^{11} كيلوجرام من إضافات النيتروجين سنوياً مهماً للإنتاج العالمي من الغذاء، ويمثل وسيلة غير ملوثة تقريباً للتسميد النيتروجيني. ولسوء الحظ، فإن كثيراً من المحاصيل المهمة، مثل الحبوب، لا يوجد لها ارتباطات ميكروبية تسمح بتثبيت النيتروجين. من ناحية أخرى، قد يحدث تثبيت للنيتروجين أيضاً بواسطة عمليات صناعية مثل تقنية هابر - بوش (Harber- Bosch) ومن خلال عمليات لاهيوية مثل البرق في الهواء الجوي (الشكل 14 - 2).



شكل (14-2): تحولات نيتروجين التربة.

تشمل دورة نيتروجين التربة تفاعلات حيوية ولاحيوية، ومن بين هذه التفاعلات تعتبر التفاعلات البيولوجية أكثر أهمية (من ناحيتي الشدة وحجم المصادر التي تضمها) في التحكم بمصير نيتروجين التربة وصوره. وتجدر الإشارة إلى أن المعدنة والتثبيت الحيوي يتم

التحكم فيهما بواسطة تراكم الكتلة الحيوية ذاتية التغذية بالتربة وتحللها، وتحدد تفاعلات تثبيت النيتروجين (N) حيويًا والذنترة العلاقات بين مخزون النيتروجين في الهواء الجوي والتربة. إن واحد من التفاعلات الهامة غير الحيوية في دورة النيتروجين هو غسيل النترات (nitrate leaching)، ونظراً لشحنته السالبة، فإن أيون النترات لا يدمص بقوة على سطوح المواد الغروية بالتربة، وهو متحرك جداً داخل الطور السائل بالتربة (انظر الجزء 1.3.6)، ومع سريان الماء خلال التربة تكون النترات داخل مسام التربة عرضة بدرجة عالية للغسيل إلى ما تحت منطقة نمو الجذور لتصل إلى نطاق التربة غير المشبعة (vadoze zone)، وبمجرد وصولها إلى هذا النطاق، تدخل النترات إلى المياه الجوفية وتصبح ملوثاً لها (الشكل 2.14)، وفي الحقيقة تعتبر النترات أكثر الملوثات انتشاراً في المياه الجوفية.

ومنذ منتصف السبعينيات من القرن الماضي، تزايد الاهتمام بتلوث المياه الجوفية بالنترات، ويعود هذا إلى ثبوت العلاقة بين النترات ومرض الميثيموجلوبين في الدم (methemoglobinemia) أو ما يسمى بمرض الرضيع الأزرق (blue – baby disease): وهو مرض كثيراً ما يكون مميتاً للرضع الذين تقل أعمارهم عن 6 أشهر، إضافة لإمكانية علاقته بأمراض أخرى. وحتى الآن؛ فإنه ليس واضحاً كم من التلوث بالنترات ينتج عن الإنتاج الزراعي وكم هو ناتج عن عمليات تربية الحيوانات أو العمليات الجيولوجية الطبيعية.

وقد حاول بعض الباحثين عن طريق استخدام نسب نظائر النيتروجين ($^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$) في المياه الجوفية تحديد مصدر النترات في هذه المياه، لكن مصداقية هذه الأسلوب هو محط تساؤل، نظراً للاختلافات البسيطة جداً في نسب هذه النظائر إلى بعضها إضافة للفهم

المحدود للهيدرولوجيا تحت السطحية. إن المحاولات المتكررة منذ منتصف السبعينيات من القرن الماضي لاستخدام هذه الطريقة قد فشلت في إنتاج طريقة يمكن الاعتماد عليها في تحديد مصدر النترات بالمياه الجوفية.

3.2.14 تلوث المياه الجوفية بالنترات

قد تلوث النترات كلا من المياه الجوفية والمياه السطحية. وينطوي تلوث المياه الجوفية على مخاطر ترتبط باستهلاك مياه ذات محتوى عالٍ من النترات، بينما يمكن أن يقود تلوث المياه السطحية إلى إثرائها بهذا العنصر (eutrophication)، مما يؤدي إلى زيادة نمو الطحالب واستنزاف الأكسجين. إن جل الاهتمام حول التلوث بالنترات قد تركز على تلوث المياه الجوفية. وتوفر المياه الجوفية نحو 20% من الاستهلاك الكلي للمياه بالولايات المتحدة الأمريكية حيث تستهلك كمية كبيرة من هذه النسبة للشرب، خاصة في الأرياف. وقد حددت "وكالة حماية البيئة" الأمريكية المستوى الأعلى لهذا الملوث عند 10 مجم نترات معبراً عنه بالنيتروجين النتراتي ($\text{NO}_3 - \text{N}$) في اللتر الواحد، واعتبرته المستوى الأعلى الآمن لمياه الشرب، كما حددت منظمة الصحة العالمية (WHO) المستوى الأقصى الآمن لهذا الملوث في مياه الشرب عند 11.3 مجم نترات معبر عنه بالنيتروجين ($\text{NO}_3 - \text{N}$) في اللتر الواحد، إن هذه التراكيز تمثل خطراً بالدرجة الأولى على الأطفال الرضع، أما المستوى الآمن للبالغين فمن المحتمل أن يكون أعلى من ذلك، لكنه يبقى غير معروف.

لا يمكن إنكار أن كميات معتبرة من تلوث المياه الجوفية بالنترات ينتج عن الإنتاج الزراعي وربما تسهم الأسمدة في تطور هذه المشكلة، لكن تحديد مصادر النترات بدقة وكذلك

مدى مساهمة كل منها لم يتم تحديده بعد: بمعنى أن المصادر المتغيرة للنترات في المياه الجوفية تجعل من التحديد المؤكد لمصدر هذا الملوث مشكلة يصعب التعامل معها، وبجانب الإنتاج الزراعي فإن عمليات تربية الحيوانات في أماكن مغلقة، والمخلفات الحضرية والصناعية والتكوينات الجيولوجية تعتبر جميعاً مصادر ممكنة للنترات (NO_3^-) في المياه الجوفية. إلى ذلك، فإنه من الصعب تعميم فكرة خطورة تلوث المياه الجوفية المصاحبة لنشاط معين لأن عوامل عديدة أخرى بما في ذلك عمق المياه الجوفية. وموقع البئر، وخصائص التربة والنطاق شبه المشبع بالماء تؤثر جميعاً على التلوث بالنترات الناتج عن نشاط محدد.

نشرت وكالة حماية البيئة (EPA) عام 1991 حصراً لآبار المياه الجوفية بالولايات المتحدة التي تمت متابعة تراكيز النترات في مياهها. وبشكل عام، فإن معظم المياه الجوفية بالولايات المتحدة قد وجدت غير ملوثة بالنترات. وإن كانت هناك مناطق محددة ذات تلوث عالٍ. وتشير بيانات عن إدارة الحصر الجيولوجي بالولايات المتحدة (USGS) أن 20 ولاية تتميز بأعلى نسبة من التسوق الزراعي كانت بها نسبة (7.1%) من الآبار تحتوى مياهها على أكثر من 10 مجم في اللتر الواحد من النترات معبر عنها في صورة نيتروجين ($\text{NO}_3\text{-N}$) مقارنة بالولايات الثلاثين الأخرى حيث كانت النسبة (3%) فقط. وتشمل المناطق الواضحة الملوثة بالنترات أجزاءً من السهول العظمى التي تغطي (حوض أوجالالا) الحامل للمياه الجوفية (Ogallala aquifer) ووسط ولايتي أريزونا وكاليفورنيا، التي تتميز بمناطق زراعية تروى بكثافة؛ وأجزاء من الشمال الشرقي وسهل نهر بلات بولاية نبراسكا، التي تتميز بالزراعة المكثفة وعمق ضحل للمياه الجوفية (الشكل 3.14). وعموماً، يبدو أن هذه المواقع الملوثة

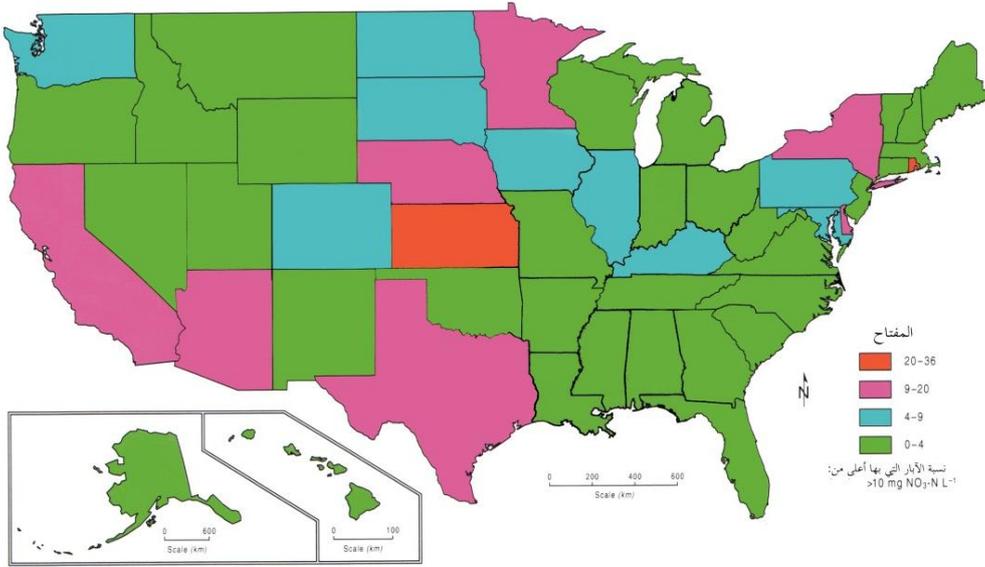
مرتبطة بمناطق تعتبر حالياً أو أنها كانت في الماضي القريب مناطق زراعية هامة، إن التلوث بالنترات في ولاية نبراسكا متلازم مع كل من إنتاج الذرة وعمق المياه الجوفية الضحل. أما في وسط ولاية أريزونا فإن التلوث بالمناطق المحيطة بمدينة فينكس يبدو مرتبطاً بالزراعة المروية في الوقت الحاضر أو في الماضي.

إن الاستثناءات لهذا النمط العام تشمل المناطق التي يرتبط فيها التلوث بالنترات بالترسبات الجيولوجية بدلاً عن النشاطات الزراعية. وتشمل هذه المناطق أجزاءً من الطبقة الحاملة للمياه لمدينة لاس فيجاس بولاية نيفادا، إضافة للطبقات الحاملة للمياه في أجزاء من داكوتا الشمالية، ومونتانا، وولاية وايومنغ، ويحتمل أن تكون النترات في خزانات المياه الجوفية هذه قد نتجت عن أيون الأمونيوم المتبادل (NH_4^+) الذي تعرض للنترتة والغسل إلى أسفل من الرسوبيات التي توجد فوق مستوى الماء الحر (Water table).

4.2.14 العوامل التي تؤثر على التلوث بالأسمدة النيتروجينية

إن التربة والظروف المناخية لها تأثير هام على مدى كفاءة استخدام الأسمدة. وعموماً فإن الصورة الأيونية للنترات (NO_3^-) تكون أكثر عرضة للفقد مقارنة بأيون الأمونيوم (NH_4^+)، ونظراً لأن (NO_3^-) يحمل شحنة سالبة، فإنه أكثر عرضة للغسيل، كما يمكنه أيضاً أن يفقد بسهولة عن طريق الدنترتة (denitrification). لذلك، يمكن ملاحظة أن معدلات النترتة في الترب تؤثر كثيراً على إمكانية فقد النترات. وكما هو معروف فإن ظروف الرقم الهيدروجيني المتعادل (pH 6-8) ودرجات الحرارة الدافئة (25-35°C) تحفز على النترتة السريعة. إضافة لذلك، فإن فقد النترات يتعاظم في الترب ذات القوام الخشن وفي الترب ذات

المسام المتصلة الكبيرة مثل تلك التي توجد تحت ظروف الحرارة المنخفضة أو الدنيا (انظر الشكل 4-14).



شكل (3-14): توزيع مساحي لتراكيز النترات في المياه الجوفية بالولايات المتحدة

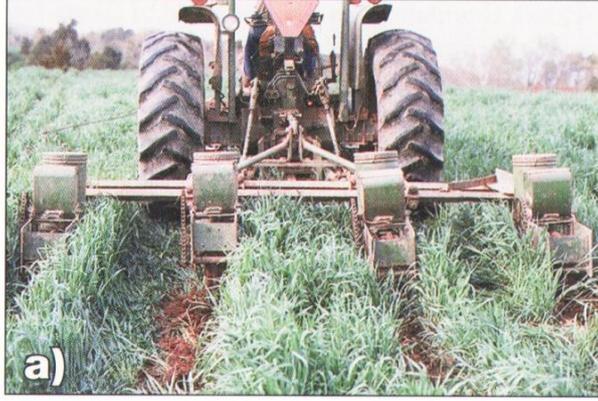
كما أن قدرًا كبيراً من النترات يمكن أن يفقد أثناء هطول الأمطار الشديدة عندما يتحرك الماء بسرعة خلال المسام الكبيرة، إن فقد النترات عن طريق الدنترة هو عملية لاهوائية، لذا فإنها تحفز بظروف التربة المشبعة بالماء حيث يكون الأكسجين قد استنزف، كما تحفز هذه العملية بدرجات الحرارة الدافئة ووجود مصدر للكربون سهل التأكسد، مثل البقايا الطرية للنباتات (انظر أيضاً إلى الجزء الخاص: النظرية التطبيقية: توليد الطاقة حيويًا، الباب 4).

يمثل استخدام الأسمدة النيتروجينية المكثف مشكلة اجتماعية محيرة، كما هو الحال مع الكثير من مظاهر التقنية الحديثة. فمن ناحية، ليس ثمة شك أن استخدام الأسمدة النيتروجينية قد ساهم بقوة في الإنتاج الزراعي العالمي في العقود الأخيرة. فعلى سبيل المثال، يقدر أن حوالي 25% من إجمالي الإنتاج الزراعي للولايات المتحدة الأمريكية يعود مباشرة للأسمدة النيتروجينية. إن المستويات العالية للإنتاج الزراعي قد أعطت المستهلك الأمريكي واحدة من أوفر مناطق إنتاج الغذاء وأقلها تكلفة في العالم كله، إضافة لذلك فإن التسميد النيتروجيني حيوي لتحقيق الربحية. وفي معظم المناطق بالولايات المتحدة، تكون تكلفة الأسمدة النيتروجينية منخفضة مقارنة بقيمة المحاصيل، مما يعطي منتجي المحاصيل حافزاً لإضافة كميات مفرطة من النيتروجين كضمان ضد تحقيق إنتاج منخفض وغير مربح. من جهة أخرى وعلى الرغم من كل هذه الفوائد، يمكن أن تمثل الإضافة المفرطة من أسمدة النيتروجين تهديداً لموارد المياه الجوفية، لذا فإن السؤال هو كيف يمكن لنا أن نوازن بين الفوائد والمخاطر المصاحبة للإنتاج الزراعي الحديث؟، إن هذه المشكلة تظل تحدياً حقيقياً ومهماً.

5.2.14 تطبيقات الإدارة الأفضل

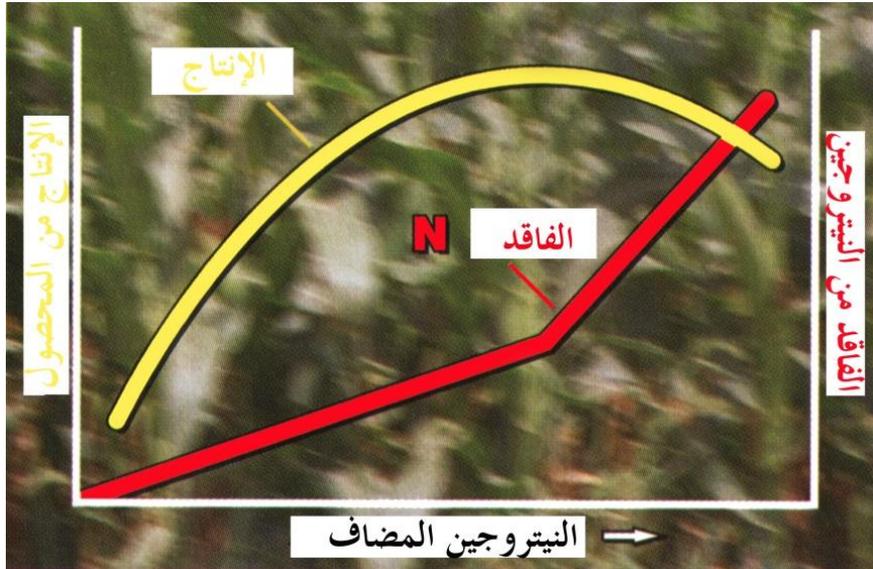
إن هدف أي برنامج تسميد هو إضافة كميات كافية من المغذيات لزيادة إنتاجية المحصول إلى أقصى مدى دون فقد للمغذيات. وتمثل المغذيات المفقودة خسارة اقتصادية للمزارعين، وعندما يكون الفقد مفرطاً، يمكن أن يسبب ضرراً للبيئة. ويستطيع المزارعون تخوير عدة متغيرات ترتبط بإضافة الأسمدة والماء لتعظيم قدرة النبات على امتصاصها مع

التقليل إلى الحد الأدنى من الفقد الضار للمغذيات من الناحيتين الاقتصادية والبيئية. ويمكن لطرق وتوقيت الإضافة أن تتباين، كما هو الحال أيضاً بالنسبة لاختيار المادة السمادية. تستهدف ممارسات الإدارة المثلى استخدام الأسمدة المناسبة بكفاءة وفي الوقت المناسب. وهو ما يجري تطويره حالياً مدى واسع من المحاصيل بواسطة الباحثين في أنحاء عدة من الولايات المتحدة الأمريكية. لكنه، ومهما كانت كفاءة إنتاج محصول ما أو مهما كانت وسائل الإدارة متطورة، فإن قدرًا معيناً من عدم الكفاءة يظل ملازماً لأي نظام إنتاج زراعي. وفي الحقيقة، إن هناك بعض القصور الذي يبدو أصيلاً بسبب العديد من التفاعلات الكيميائية والتفاعلات البيوكيميائية التي تتنافس مع امتصاص النبات لمغذيات الأسمدة. فمثلاً، تؤكد كثير من التقارير من أنحاء الولايات المتحدة أن نسبة النيتروجين (N) التي يتم امتصاصها بواسطة المحاصيل خلال السنة الأولى لا تتجاوز 30-70% من الكمية المضافة، لذلك فإن السماد الذي لا تتم الاستفادة منه بواسطة النباتات يبقى في التربة أو يفقد من خلال آليات مختلفة.



شكل (14-4) الحد الأدنى للحرق لمحصول الذرة (ولاية فيرجينيا، الولايات المتحدة): (a) تبذر آلة الزرع مباشرة في حقل مزروع بمحصول الشيلم (rye) الذي تمت معاملته بمبيد حشائش لقتله مع بداية محصول الذرة بالنمو. ويساعد هذا الأسلوب على التحكم في تعرية التربة (انظر أيضاً الجزء 4.15). (b) لكنه، عندما لا يتم حرث التربة أو تقليبيها فإن المسام الكبيرة المتصلة تظل على حالتها مما يسمح بتدفق سريع للمياه والمواد الذائبة، مثل النترات، إلى أعماق أكبر (انظر الجزء 3.3.5).

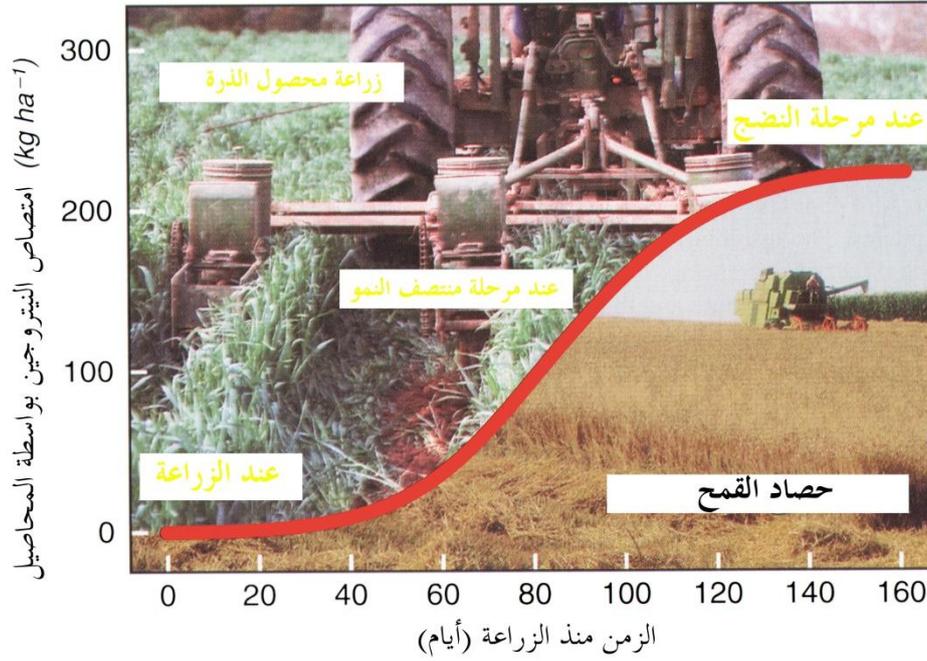
يبين الشكل (5-14) منحنى مثالي لإنتاج محصول ما، ومع الاستمرار في إضافة المزيد من السماد، نبدأ بالمقابل في ملاحظة تناقص العائدات (diminishing returns)؛ بمعنى أن استجابة المحصول لكل وحدة مضافة من السماد تكون أقل من الاستجابة للوحدة السابقة، وعند معدلات الاستعمال المنخفضة، قد يكون الإنتاج متديناً، لكن نسبة النيتروجين (N) المفقود تكون قليلة، لكنه ومع زيادة الإضافة من الأسمدة، يرتفع أيضاً الفاقد من النيتروجين نتيجة للغسيل، أو الدنترة، أو أي آليات أخرى، وتجدد الإشارة إلى أنه يمكن التقليل إلى الحد الأدنى من فقد النيتروجين من خلال الإدارة الكفؤة للماء وإضافات النيتروجين، من ناحية أخرى، يزداد فقد النيتروجين بحدّة عندما يضاف السماد بكميات تزيد عن حاجة النبات.



شكل (5-14): منحنى مثالي لإنتاج محصول ما والفاقد المصاحب من النيتروجين.

إن أحد تطبيقات الإدارة المثلى التي ترفع من كفاءة السماد النيتروجيني يتمثل في استخدام مواد تسميد بطيئة التحرر (Slow – release fertilizer materials)، تقوم بتحرير النيتروجين على مدى فترة من الزمن تمتد لأيام أو أسابيع . وتتوفر ثلاثة أنواع من أسمدة النيتروجين بطيئة التحرر: (1) مواد منخفضة الذوبانية تحتاج للتحلل، مثل مشتقات اليوريا. (2) أسمدة قابلة للذوبان مغلقة بمواد غير قابلة للذوبان. (3) مواد شحيحة الذوبانية. وفي الوقت الحاضر، فإن التكلفة المرتفعة تجعل استخدام الأسمدة بطيئة التحرر مقصورة بالدرجة الأولى على المسطحات الخضراء والمحاصيل ذات المردود الاقتصادي المرتفع مثل الحمضيات. تضم تطبيقات الإدارة المثلى التحكم في كمية وتوقيت إضافات الأسمدة النيتروجينية. فمن الممكن إضافة سماد النيتروجين في الوقت والمكان اللذين يحتاجهما النبات، ويوضح الشكل (6-14) الامتصاص التراكمي من النيتروجين لمحصول نموذجي تم حصاده عند مرحلة النضج الفسيولوجي، مثل الذرة أو القمح أو القطن. ومن الواضح، أن النباتات تحتاج لقليل من النيتروجين عند المرحلة المبكرة من النمو، لذا فإن النيتروجين المضاف قبل أو أثناء الزراعة تكون إمكانية فقده عالية. ومثالياً يتعين على المزارع إضافة النيتروجين بالضبط عندما يحتاجه النبات، وهو ما يمكن تحديده عن طريق استخدام أدوات إدارة أخرى مثل اختبار الأنسجة النباتية لتقييم الوضع الغذائي الفعلي للنبات. إن هذا الأجراء وإن كان مقبولاً من حيث المبدأ؛ لكنه ولسوء الحظ، فإنه عملياً يكون عادة من الصعب على المنتجين إضافة النيتروجين تماماً عند الحاجة، وذلك بسبب المعدات أو بسبب وجود أي معوقات أخرى. إن إضافة

النيتروجين عند الوقت الذي يحتاجه فيه النبات يمكن تحقيقه بسهولة كبيرة في نظم الإنتاج الزراعي المروي، حيث يمكن إضافة الأسمدة النيتروجينية مع مياه الري.



شكل (14-6): النمط الموسمي لامتنصاص (N) بواسطة محصول حولي نموذجي.

تظل هناك تطبيقات عملية أخرى لتحقيق هدف الإدارة المثلى ومنها تحسين إدارة المياه، فمثلاً تعتبر إدارة مياه الري مكوناً مهماً لتطبيقات الإدارة المثالية. إن أساليب الري التي ينتج عنها إضافات كبيرة وغير متجانسة من المياه للتربة، وهو الوضع الشائع جداً في مناطق كثيرة، سيؤدي بدرجة كبيرة إلى زيادة مخاطر فقد النترات المتحركة من نطاق نمو جذور النبات. إن التقنيات التي تجعل إضافات المياه موزعة بشكل متجانس وبكفاءة تساعد على

التقليل إلى الحد الأدنى من فقد النترات. فعلى سبيل المثال، تسمح تسوية الأرض باستخدام أشعة الليزر بتوزيع المياه بشكل متجانس على امتداد الحقل كله، كما أن التدفق المتقطع بدلاً عن التدفق المستمر للمياه عبر الأحود قد نتج عنه توزيع أكثر تجانساً لإضافات المياه والأسمدة. إضافة لذلك، تتميز نظم الري بالتنقيط سواء فوق سطح الأرض أو تحتها بإمكانيات تساعد على زيادة كفاءة المياه والمغذيات، إن هذه النظم يمكن لها وبكفاءة عالية جداً إضافة المغذيات والماء مباشرة لمنطقة نمو جذور المحصول دون هدر يُذكر.

حتى عام 1996، لم تكن معظم الولايات بالولايات المتحدة الأمريكية تنظم الأسمدة أو إضافاتها للترب. من ناحية أخرى، ففي ولاية أريزونا الأمريكية حيث حدث تلوث واسع النطاق بالنترات، يتعين على المزارعين إثبات تطبيقهم لأساليب الإدارة المثلى أو أنهم يتعرضون لعقوبات تشمل غرامات مالية. إن مثل هذه الضوابط يمكن توقع زيادتها مع زيادة اهتمام عامة الناس بالتلوث.

3.14 الفوسفور كمصدر للتلوث

1.3.14 استخدام أسمدة الفوسفور في الإنتاج الزراعي

يضاف نحو 1.68 مليون طن متري من الفوسفور (P) في صورة أسمدة للأراضي الزراعية بالولايات المتحدة الأمريكية سنوياً (الشكل 1-14). ويضاف الفوسفور عادة كمواد صلبة، مثل السوبرفوسفات الثلاثي، الذي يتكون أساساً من $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ، أو في صور مركبات مختلفة من فوسفات الأمونيوم (الجدول 1-14). وهذه مركبات قابلة للذوبان وتمثل مصدراً متيسراً للفوسفور للنباتات النامية والكائنات الدقيقة، التي تمتص عادة الفوسفور من

محلول التربة في صورة أيون $H_2PO_4^-$ أو HPO_4^{2-} . وتختلف كثيراً كيميائية الفوسفور في الترب عن تلك الخاصة بالنروجين لعدة أسباب، فالفوسفور لا يستخدم بواسطة الكائنات الدقيقة كمصدر مباشر للطاقة ولا كمستقبل للإلكترونات. زيادة على ذلك، فإن أنيونات الفوسفات، خلافاً للنترات، تشد بقوة بواسطة غرويات التربة نتيجة لتفاعلات روابط تبادلية (Ligand exchange reactions)، لذلك فهي لا تغسل أو تتحرك بسهولة في الترب. إضافة لهذا، فإن عدم ذوبانية معظم المركبات التي تحتوي على فوسفات ينتج عنها انخفاض في تركيز الفوسفات داخل محلول التربة. وتمثل التفاعلات السائدة التي تحدث بعد إضافة الأسمدة الفوسفاتية للترب في تفاعلات الفوسفور (P) مع أيونات الألومنيوم (Al) أو الحديد (Fe) أو الكالسيوم (Ca) في الترب مكونة ترسبات غير ذائبة. إن عدم ذوبانية هذه المركبات يقود إلى نقص تيسر أسمدة الفوسفور للنباتات مع الوقت، وهو ما يستلزم القيام بإضافات منتظمة للفوسفور لمعظم المحاصيل.

2.3.14 تلوث المياه بالفوسفور

يمكن أن تسبب الأسمدة الفوسفاتية تحت بعض الظروف خطر تلوث. ففي المناطق التي تتميز بارتفاع مستوى الماء الحر فيها تحت ترب عضوية، مثلاً، قد يصبح غسيل الفوسفور معتبراً؛ إضافة إلى ذلك، فإن الأسمدة الفوسفاتية المحمولة بواسطة مياه الجريان السطحي يمكن أن تهدد المياه السطحية، وفي كثير من المياه السطحية، يكون الفوسفور P عاملاً حدياً لنمو الطحالب والنباتات، وربما يؤدي إدخال كميات كبيرة من الفوسفور في مياه الغسيل أو الجريان السطحي إلى التغلب على هذا النقص ويحفز على زيادة نمو

الطحالب والنباتات. وعندما تموت هذه الطحالب أو النباتات، فإن تحللها بواسطة ميكروبات غير ذاتية التغذية ينتج عنه استنزاف للأكسجين داخل الجسم المائي، ويمكن لهذه العملية التي تعرف بالإثراء الغذائي (eutrophication)، أن يكون لها نتائج تدميرية للنظام البيئي للماء. ويمكن تحفيز الإثراء الغذائي عن طريق إضافات النيتروجين (N) أو إضافة الفوسفور (P) للنظم البيئية التي تفتقر إليها. وقد وجد أن تراكيز عنصر الفوسفور (P) بتركيز منخفض قد يصل إلى 10مجم/لتر أدى إلى نمو مفرط للطحالب (ظاهرة الإثراء الغذائي).

تشمل المواقع المعروفة جداً من حيث التلوث بالفوسفور كل من بحيرة أوكيتشوبي (Okechobee) ومناطق المستنقعات (Everglades) جنوبي ولاية فلوريدا الأمريكية، وكذلك خليج تشيزابيك (Chesapeake) على الساحل الأمريكي، وقد قاد التلوث بالفوسفور في ولاية فلوريدا إلى بروز ظاهرة الإثراء وتغير المجموعات النباتية من الأنواع المحلية ذات الاحتياجات المنخفضة من الفوسفور، مثل العشب المنشاري (*Cladium jamaicense*)، إلى أنواع دخيلة ذات احتياجات أعلى من هذا العنصر. ويعود جزء مهم من التلوث بالفوسفور في ولاية فلوريدا إلى الزراعة المروية بكثافة على الترب العضوية المجاورة. وفي هذه النظم تضاف بانتظام كميات كبيرة من الأسمدة الفوسفاتية. إضافة لذلك، فإن كثيراً من مياه الصرف لهذه المساحات الزراعية يتم دفعها إما إلى بحيرة أوكيتشوبي أو منطقة المستنقعات. وتحت الظروف الطبيعية عادة ما يكون الفوسفور العنصر المغذي الحدي في هذه النظم البيئية. لكنه، وبإدخال الفوسفور الزراعي تغير ميزان هذا المغذى بدرجة معتبرة.

إن خليج تشيزابيك هو عبارة عن مصب حيث تختلط مياه الأنهار العذبة مع مياه البحر، وتاريخياً كان هذا الموقع نظاماً بيئياً غنياً ومتنوعاً ومنطقة صيد أسماك هامة تجارياً. ويحتمل أن يأتي التلوث بالفوسفور داخل الخليج من الإضافات البلدية أو الحضرية والزراعية للأنهار التي تصب في الخليج . وخلافاً للوضع في فلوريدا، حيث يُؤلّد الري المكثف فوسفوراً منقولاً بالغسيل، فإن الإضافات الزراعية من الفوسفور هنا يتم نقلها بالجريان السطحي إلى الأنهار. وفي خليج تشيزابيك، فإن كلاً من النيتروجين والفوسفور يعتبران مغذيين حديين، ويتحكمان في الإنتاج الكلي من الكتلة الحيوية داخل المصب كله. واليوم، فإن إضافات كل من N و P قد سرّعت من نمو الطحالب، مُسببة في تطور ظاهرة النمو المفرط للطحالب.

3.3.14 العوامل المؤثر على التلوث بالأسمدة الفوسفاتية

في كثير من المناطق بالولايات المتحدة الأمريكية لا يمثل التلوث بالفوسفور من مصادر زراعية اهتماماً حقيقياً وذلك لانخفاض ذوبانية الفوسفور وحركته البطيئة في التربة. لكن الحالات التي أُشير إليها سابقاً تعتبر فريدة لأنها ترتبط بمناطق زراعية متاخمة لمصبات الأنهار (مثل خليج تشيزابيك) أو في مناطق توجد فيها تربة عضوية تمت إضافة الأسمدة إليها بكثافة ويوجد تحتها مستوى ماء أرضي حر ضحل (كما هو في مناطق المستنقعات بجنوبي فلوريدا). وعلى الرغم من انخفاض الفاقد من الفوسفور في الجزء الجنوبي من ولاية فلوريدا إذ يقدر بنحو 0.5-2.4 كجم (P) للهكتار - سنوياً، إلا أن له تأثيراً سلبياً كبيراً جداً نظراً لحساسية النظم البيئية المحيطة. ويبدو أن السبب الرئيسي لحدوث تلوث بالفوسفور

الزراعي في هذه المناطق يعود إلى التوقيت غير المناسب لإضافة الأسمدة، إضافة إلى التعرية المفرطة للتربة السطحية في حالة منطقة خليج تشيزابيك.

يعتبر منع التلوث بالفوسفور أيضاً ضمن تطبيقات الإدارة المثلى، ففي خليج تشيزابيك، أدى اتباع أساليب تسميد أكثر كفاءة بالمناطق الزراعية مثل تقسيم الإضافات من الأسمدة على دفعات، إلى تقليل كميات النيتروجين والفوسفور التي تصل للخليج. وقد استخدم أسلوب تقسيم الإضافات من أسمدة الفوسفور أيضاً في المناطق الزراعية مستنقعات جنوب فلوريدا للتقليل إلى الحد الأدنى من غسيل الفوسفور (P) ودخوله إلى المياه الجوفية التي توجد عند مستوى ضحل من سطح الأرض.

دراسة حالة (Case Study)

خليج تشيزابيك

ازدادت تراكيز المغذيات الداخلة لخليج تشيزابيك لسببين رئيسيين، أولاً: تغير استخدام الأرض: فقد انتقل من منطقة غابات إلى إنتاج محاصيل وتطور عمراني. ثانياً: أن التطور الزراعي والعمراني زاد من إضافات المغذيات. ونظراً لأن الإضافات من المغذيات قد ارتفعت وأن المساحات التي يمكن أن تمتص تأثيراتها قد تناقصت بشكل عام، فإن كميات أكبر من المغذيات قد تراكمت في الخليج، محفزة لنمو الطحالب وتطور ظاهرة الإثراء الغذائي، ومن بين هذه المغذيات فقد وجد أن النيتروجين والفوسفور هما الأكثر إضراراً.

في عامي 1983 و1987، وقّعت ثلاث ولايات تحد بخليج تشيزابيك (هي ولايات ماريلاند وبنسلفانيا وفيرجينيا) اتفاقيات تهدف إلى التقليل من إضافة المغذيات، وقد كان الهدف الرئيسي لهذه الاتفاقيات تخفيض الإضافات من المغذيات في الخليج بنسبة 40% مع حلول عام 2000. وتتحكم الاتفاقيات في مصادر الملوثات من المصادر المركزية (point) والمصادر الفرعية (nonpoint)، وبذلك فإنهم قد انقطعوا عن استخدام المنظفات الفوسفاتية ووضعوا ضوابط للمخلفات الحيوانية وادخلوا تطبيقات زراعية أخرى للإدارة المثلى.

وفي عام 1991 انخفضت مستويات الفوسفور (P) بمقدار 20%، نتيجة للتوقف عن استخدام المصادر المركزية أساساً مثل المنظفات الفوسفاتية، من ناحية أخرى، بحلول عام 1997 فإن مستويات النيتروجين لم تتناقص. إن هذه الاختلافات هي نتيجة لمصادر هذه المغذيات - إضافات معظم النيتروجين تأتي من مصادر غير مركزة (nonpoint sources)،

مثل المخلفات الحيوانية - كذلك، فهي نتيجة لحركة النيتروجين وتفاعليته في الترب بدرجة أعلى مقارنة بالفوسفور (P). إضافة لذلك، فقد اكتشف أن التلوث الهوائي قد يسهم بكميات كبيرة من النيتروجين المضاف للخليج. لهذا فإن التحكم في مستويات N قد تكون صعبة دون التحكم في تلوث الهواء.

تحقق تقدم في تنقية خليج تشيزابيك فقد انخفضت مستويات الفوسفور (P)، وظلت مستويات النيتروجين (N) مستقرة، وذلك على الرغم من زيادة تعداد السكان في المنطقة، لكن مشاكل عديدة هامة ظلت موجودة. أولاً: أن هدف تخفيض الإضافة من المغذيات بنسبة 40% قد استندت إلى نتائج نماذج رياضية، قد تكون غير صحيحة، فمن غير الواضح كم هو التخفيض اللازم فعلياً في إضافات المغذيات لإبعاد الخطر عن الخليج. ثانياً: أن التحكم في الإضافات من النيتروجين N ربما يكون مستحيلاً دون تحكم شديد في استخدام أسمدة النيتروجين والإنتاج الحيواني في المناطق المحيطة. ثالثاً: تظل إضافات النيتروجين من الهواء الجوي غير معروفة كمصدر للتلوث بالنيتروجين، لكنها يحتمل أن تكون مهمة، وهناك حاجة لاستمرار الجهود الإقليمية للتحكم في التلوث إذا كانت هناك رغبة في إعادة تأهيل خليج تشيزابيك.

تقييم مخاطر الأسمدة الزراعية

يتمثل تقييم المخاطرة في محاولة تقدير مستوى المخاطرة الناتج عن ملوث بيئي معين، وذلك كما تم مناقشته في الباب الثاني والعشرون. ويمكن أن يساعد تقييم المخاطرة في تحديد الأولوية المقررة لإزالة خطر التلوث أو التقليل من حدته.

وفي حالة التلوث بالفوسفور، يبدو واضحاً ارتباط المخاطرة بإحداث اضطراب للتجمعات النباتية والحيوانية الحساسة. إضافة إلى ذلك، فإن مخاطر التلوث بالفوسفور يمكن ملاحظتها والاستجابة لها. فمثلاً أصبح التلوث بالفوسفور في منطقة خليج تشيزايبك هدفاً لإجراءات إقليمية جادة منذ الثمانينات من القرن الماضي. وبنفس الكيفية، خلال عام 1993، فإن مجموعات قانونية وبيئية وزراعية كانت قادرة على الوصول إلى اتفاقية تتناول جزئياً مشكلة إضافات الفوسفور الزراعي في النظم البيئية بمنطقة المستنقعات بولاية فلوريدا.

أما المخاطر الأكثر تعقيداً والمرتبطة بتلوث المياه الجوفية بالنترات فقد ثبت أن تقييمها أكثر صعوبة. ونظراً لأنها تتعلق بمخاطر مباشرة لصحة الإنسان، فإن التلوث بالنترات قد استحوذ على اهتمام كبير من قبل وسائل الإعلام في بعض المناطق التي يوجد فيها تلوث في مياهها الجوفية. لكن المخاطر الحقيقية لصحة الإنسان الناتجة عن تناول النترات يظل بدرجة عالية غير معروف. ومن المعروف أن تناول مستويات عالية من النترات بواسطة الأطفال حديثي الولادة يمكن أن يتسبب في وجود الميثيموجلوبين بالدم (methemoglobinemia)، لكن هذا المرض نادر ويمكن الوقاية منه بسهولة عن طريق التوعية الكافية. وهناك تقارير أخرى تقترح وجود ارتباط ممكن بين تناول النترات في الماء

وأنواع مختلفة من أمراض السرطان، لكنه لم يوجد حتى الآن ارتباط مباشر في هذا الخصوص. وحالياً، يبدو أن تلوث المياه الجوفية بالنترات يستحق الاهتمام لكنه لا يبدو أنه يمثل مخاطرة عالية مثل تلك التي تنطوي عليها بعض المركبات العضوية، ومن الجدير بالاهتمام، أن النترات تمثل الملوث الأكثر شيوعاً في المياه الجوفية.

إزالة وتقليل الآثار السلبية للتلوث بالأسمدة

اقترحت استراتيجيات كثيرة لإزالة الملوثات من المياه الجوفية، وقد أجريت محاولات قليلة لتنقية المياه الملوثة بالنترات أو الفوسفات. وعموماً، فإن ذلك يعود إلى: (1) الأحجام الهائلة للأجسام المائية الملوثة. (2) الخطورة المنخفضة نسبياً لهذه الملوثات مقارنة ببعض المركبات العضوية، (3) عدم توفر تقنيات منخفضة التكاليف، إن النترات لا يمكن إزالتها بسهولة من المياه، لذلك فإن طرق الضخ والمعالجة تتطلب إزالة النترات عن طريق التقطير، أو التناضح العكسي، أو باستخدام راتينجات التبادل الأنيوني، الذي سيكون مكلفاً جداً. وقد اقترحت طريقة تجرى عند الموقع لإزالة النترات وذلك من خلال تحفيز الدنترة (denitrification)، وفي النطاق غير المشبع من قطاع التربة (vadoze zone) تكون الدنترة محدودة بسبب عدم توفر مصادر للكربون القابل للأكسدة كمصدر للطاقة.

وتؤدي إضافة الكربون (C) للمياه الجوفية تحت ظروف لاهوائية إلى تحفيز اختزال النترات NO_3^- إلى N_2 . لكنه لا يتوقع أن تحظى هذه الأساليب باستخدام واسع لأنها تشمل إدخال مادة كيميائية أخرى (مثل الإيثانول أو السكريات) للمياه الجوفية، كما أن هناك سبباً

آخر وهو الأحجام الهائلة من المياه التي يتعين التعامل معها مما يجعل هذا الأسلوب غير عملي.

على الرغم من أن النتراة هي الملوثة الأكثر شيوعاً في المياه الجوفية، إلا أنه من غير المتوقع بذل جهود جادة لتنقية المياه الجوفية الملوثة بها. وفي بعض الأجزاء من الولايات المتحدة توجد كميات هامة من المياه الجوفية ملوثة بالنتراة، ويحتمل أن تبقى على هذه الحال لعقود. إن الإجابة العملية الوحيدة لمشكلة النتراة هي منع المزيد من التلوث بالنتراة. ونظراً لأن كثيراً من النتراة التي توجد في المياه الجوفية تأتي من الزراعة، فإن العديد من الإجابات لمشكلة النتراة تتوقف على زيادة كفاءة الإنتاج الزراعي، وإتباع تطبيقات الإدارة المثلى.

المراجع

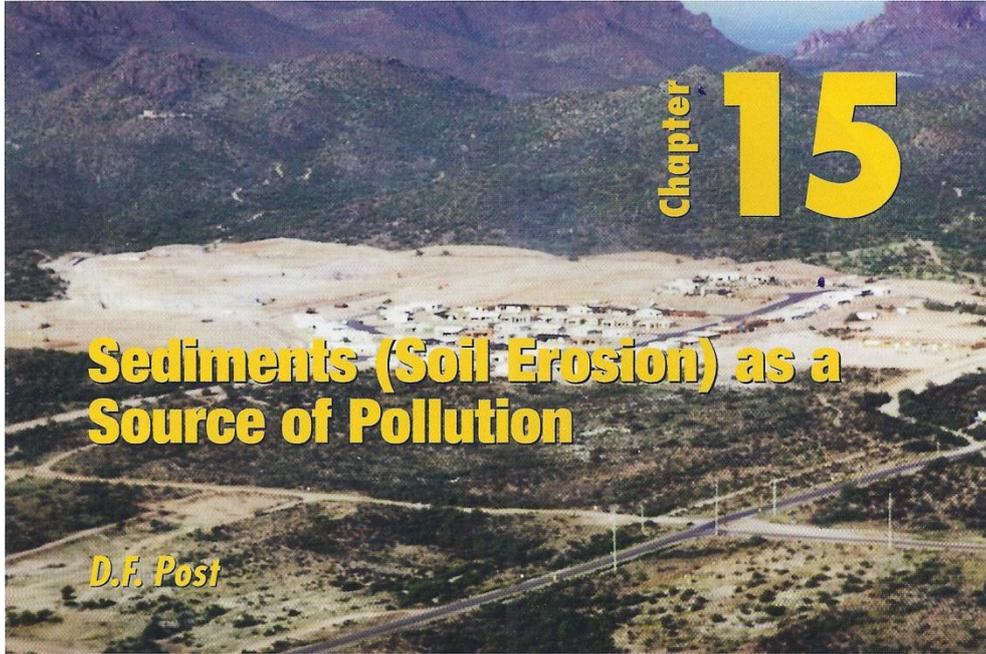
- Berry J.T. (1992) *Summary Data, 1992*. Tennessee Valley Authority National Fertilizer and Environmental Research Center, Muscle Shoals, Alabama.
- Doerge T.A., Roth R.L., and Gardner, B.R. (1991) *Nitrogen Fertilizer Management in Arizona*. Publication 191025. The university Of Arizona College of Agriculture, Tucson, Arizona.
- Fedkiw J. (1991) *Nitrate Occurrence in U.S. Waters (and Related Question)*. USDA Working Group on Water Quality, United states Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Madison R.J. And Burnett J.O. (1985) Overview of the Occurrence of Nitrate in ground water of the United States. *Water Supply Paper 2275*. U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- Splading R.F. and Exner M.E. (1993) Occurrence of nitrate in groundwater: A review. *Journal of Environmental Quality*. **22**, 392-402.
- Stevenson F.J., Editor (1982) *Nitrogen in Agriculture Soils*. Agronomy Monograph No. 22. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D., and Halin J.L. (1993) *Soil Fertility and Fertilizers*. Macmillan, New York.

أسئلة

1. مَيِّز بين التفاعلات الحيوية وغير الحيوية المكونة لدورة النيتروجين.
2. تحت أي ظروف يكون غسيل النترا من الإنتاج الزراعي أمراً محتملاً؟
3. بالإضافة للإنتاج الزراعي، ما هي بعض المصادر الأخرى المحتملة للنترا في المياه الجوفية؟
4. صف بعض عمليات إدارة التربة والمحصول التي يمكن أن تساعد في التقليل إلى الحد الأدنى من فواقد النيتروجين.
5. لماذا كان التلوث بالفوسفور مشكلة في خليج تشيزابيك ومناطق المستنقعات بفلوريدا؟ لماذا لا يكون التلوث بالفوسفور مشكلة في معظم المناطق الأخرى؟
6. ما هو الملوث الأكثر وجوداً في المياه الجوفية؟ اشرح لماذا هو شائع، ثم ناقش دلالات كثرة انتشاره بالنسبة لصحة الإنسان.
7. لماذا يكون تقليل تلوث المياه الجوفية بالنترا مستقبلاً أكثر جدوى من الناحية العملية من إزالة التلوث القائم؟

الباب الخامس عشر

الرسوبيات (تعرية التربة) كمصدر للتلوث



بمجرد فقدانها الغطاء النباتي الذي يحميها، تصبح التربة عرضة لعوامل عدة قد تؤدي إلى حدوث تعرية شديدة حاملة معها ملوثات مدمصة على التربة، الصورة لأعلى: إزالة للغطاء النباتي لإقامة تطوير عمراني قرب مدينة توسان، بولاية أريزونا.

1.15 التلوث بالرسوبيات

تعتبر التقنية الزراعية واحدة من عناصر القوة الحقيقية للولايات المتحدة الأمريكية. وعلى الرغم من أن تعداد السكان يزداد بثبات وأن مساحة الأراضي الزراعية قد تغيرت قليلاً على مدى الـ 50 عاماً الماضية، إلا أن إنتاج الغذاء والكساء قد حقق باستفاضة

الاحتياجات المحلية من هذه السلع ووفر كميات معتبرة منها للتصدير الذي يعتبر عاملاً حاسماً بالنسبة للميزان التجاري للولايات المتحدة . وقد لعبت الأسمدة والمبيدات دوراً رئيسياً في تحقيق هذا الإنجاز. لكنه يلاحظ أن النجاح نفسه للزراعة في الولايات المتحدة قد نتج عنه تأثيرات سلبية، بما في ذلك الملوثات مثل الرسوبيات، والأسمدة الكيماوية، والمبيدات في المياه السطحية (انظر أيضاً الباب 14 والباب 17). وقد تأتي هذه الملوثات من المصدر الأولي (point source) أو من مصادر ثانوية (nonpoint source). وفي الوقت الذي تكون فيه المصادر الأولية (التي عادة ما تغطي بنظام تصريح) محددة بشكل مقبول، فإن المصادر الثانوية (مثل مناطق المناجم والنشاطات الإنشائية، والجريان السطحي الناتج عن عاصفة مطرية من مناطق حضرية) غير واضحة في طبيعتها وتؤدي إلى تفريع ملوثات بالمياه عبر مسارات متفرقة (انظر أيضاً الجزء 2.16).

هناك مصدر ثانوي هام هو الجريان السطحي الزراعي، الذي يمكن أن ينتج رسوبيات تم جرفها من أراض زراعية. فمثلاً كانت سحابة الغبار (Dust Bowl) في ولاية أوكلاهوما في الثلاثينيات من القرن الماضي ناتجة أساساً عن مشكلة تعرية، وكانت المشكلة من الخطورة تم بسببها استحداث وكالات فيدرالية للتعامل معها. لكنه، لم تكن الرسوبيات المشكلة الوحيدة المرتبطة بالتعرية، بل أيضاً الكيماويات المدمصة على حبيبات التربة المنقولة التي يمكن أن تصل إلى المسالك المائية والبحيرات بواسطة مياه الجريان السطحي.

في هذا الباب سوف يتم التركيز على التعرية. وسوف يتم معاينة العمليات الرئيسية التي تنقل الرسوبيات إلى الأجسام المائية. كما سيتم استعراض الطرق الرئيسية التي يمكن عن

طريقها التحكم في التعرية. وسيكون التركيز هنا على التعرية بواسطة المياه، لكنه يلاحظ أن التعرية بالرياح تحت الظروف المحلية الجافة تكون مهمة أيضاً.

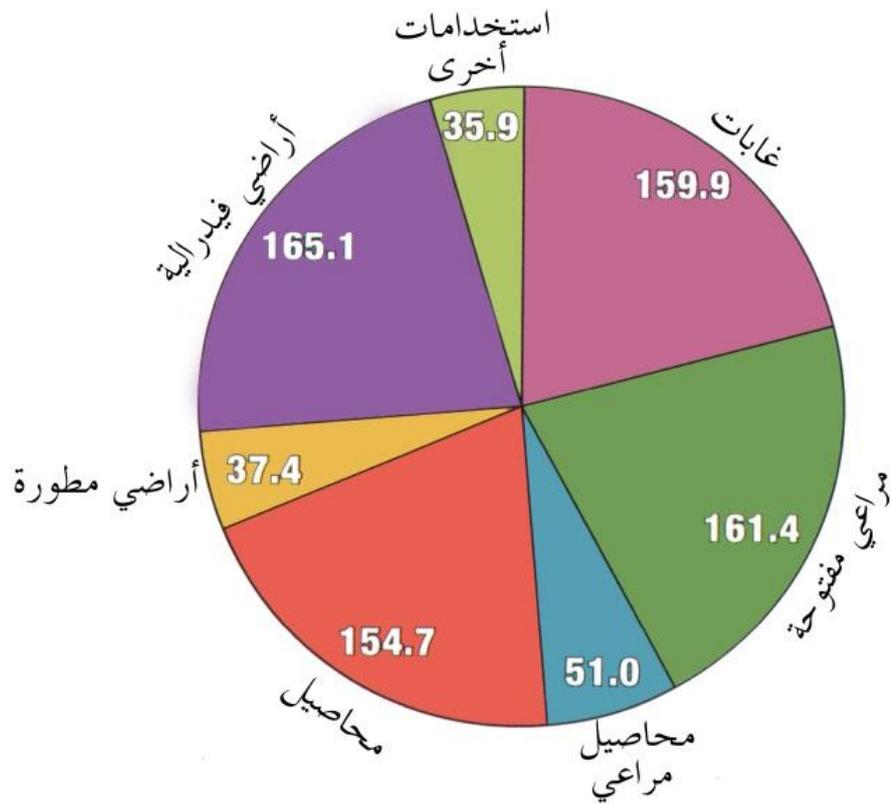
2.15 مدى انتشار التلوث الناتج عن الرسوبيات

إن المواقع الجغرافية إلى يحتمل أن تتعرض للجريان السطحي المباشر والتعرية في الولايات المتحدة الأمريكية تم تحديدها أفضل ما يمكن عن طريق ما يعرف بمناطق الموارد (Land Resource Areas) التي تم فرزها وفق نظام تصنيف وضع بواسطة جهاز المحافظة على التربة (الذي يسمى الآن: جهاز المحافظة على الموارد الطبيعية) التابعة لإدارة الزراعة الأمريكية. إن هذه المناطق قد تم وصفها تفصيلاً في الكتيب الزراعي رقم 296، بعنوان: (Land Resource Regions and Major Land Resource Areas of the United States).

ويمكن تعريف منطقة الموارد على أنها منطقة جغرافية تتميز بنمط معين يشمل نوع التربة، والطبوغرافيا، والمناخ، وموارد المياه، واستخدام الأراضي، ونوع الفلاحة.

إن نوع المورد الأرضي (Land resource) له تأثير هام على مقدار التعرية الممكنة من منطقة معينة، وكذلك استخدام الكيماويات الزراعية فيها. إن أحدث جرد لهذه الموارد تم عام 1992 قام به جهاز المحافظة على التربة بوزارة الزراعة الأمريكية. ويوفر هذا الجرد معلومات حديثة عن وضع، وحالة وأنماط الأراضي، والتربة، والمياه، والموارد ذات العلاقة وذلك للأراضي غير الفيدرالية. ويغطي جرد عام 1992 عدد 48 ولاية متجاورة، بالإضافة إلى هاواي وبورتوريكو وجزر فيرجين. وتبلغ مساحة الأراضي التي تم رصدها 780 مليون هكتاراً. وتبلغ نسبة الأراضي غير الفيدرالية فيها نحو 78% (ما يعادل 605 مليون هكتاراً)

معظمها أراضي ملكية خاصة. وقد تم جمع بيانات عن خصائص التربة، والغطاء النباتي، والتعرية من أكثر من 800 ألف موقع وأجريت عليها تحاليل إحصائية. إن استخدام هذه الأراضي ملخص في الشكل (1-15)، تجدر ملاحظة أن الأرض قد تم تقسيمها بالتساوي تقريباً فيما بين أراضي زراعية (cropland) ومراعي (pasture or rangeland) و غابات.



الشكل (1-15) استخدام الأراضي بالولايات المتحدة (هذه البيانات لعام 1992) معبر عنها بالمليون هكتار؛ وتشتق ولاية ألاسكا)

إن معظم التعرية تحدث في المناطق المزروعة بالمحاصيل. لذلك، فإن إدارة الزراعة الأمريكية طورت نظام تصنيف حسب قدرة الأرض⁽¹⁾ (Land-Capability Classification System) الذي يوفر طريقة مفيدة وسريعة وموحدة لتقييم قدرة الأرض على إنتاج المحاصيل. وفي هذا النظام تقسم الترب إلى ثمان فئات، I إلى VIII، وتعتبر فئات التربة من I إلى IV هي الأكثر استثماراً للأغراض الزراعية.

ترب الفئة I: تتميز بدرجة خطر تعرية منخفضة، وتلائم أنواعاً واسعة من النباتات، وتكون هذه الترب مستوية تقريباً، عميقة، وجيدة الصرف؛ كما أن لها درجة رشح عالية وقدرة مرتفعة على الاحتفاظ بالماء، وهي إما أن تحتوي على قدر كاف من العناصر المغذية أو أن تكون عالية الاستجابة للأسمدة المضافة.

ترب الفئة II: تكون متوسطة التعرض للتعرية بالرياح والمياه. هذه الترب لها عادة ميل خفيف ولها بعض القصور التي قد تقلل من أنواع النباتات التي تستطيع النمو فيها. إضافة لذلك، فإنها عادة تحتاج لنظم زراعية خاصة تحفظ التربة، وإجراءات للمحافظة على التربة، وأجهزة للتحكم في المياه، أو طرق حرث محددة عندما تستخدم لزراعة المحاصيل.

ترب الفئة III: تكون أكثر عرضة للتعرية بالمياه والرياح مقارنة بترب الفئة II. توجد عادة على منحدرات متوسطة الميل، ويمكن لهذه الترب أن تستخدم في زراعة المحاصيل، لكنها تتطلب إجراءات حفظ للتربة عالية الفعالية لمنع التعرية. إضافة إلى ذلك فإن هذه الإجراءات قد تكون صعبة التطبيق والصيانة حتى يتحقق منع التعرية.

(1) المرجع:

ترب الفئة IV: توجد هذه الترب عادة على ميول شديدة الانحدار، وتكون عالية التعرض للتعرية بالرياح والماء (انظر الشكل (15 - 2)). وعلى الرغم من أنها تكون ملائمة للزراعة، إلا أنها تحتاج إلى إدارة حذرة وقد تدعم نمو نوعين فقط أو ثلاثة من المحاصيل. إن الترب الواقعة ضمن الفئات V إلى VIII محدودة في استخدامها وتعتبر عموماً غير ملائمة للزراعة.



شكل (2-15) أراضي زراعية سيئة الصرف تضم ترب الفئة III و IV في مناطق منخفضة.

ترب الفئة V: لا تعاني من أي خطر تعرية، لكنها تعاني من قصور يكون التغلب عليه غير عملي. من الأمثلة، أراضي منخفضة تتعرض لفيضان متكرر، ترب حجرية، ترب مغمورة بالمياه حيث لا يكون الصرف ممكناً.

ترب الفئة VI: مقتصرة عادة على المراعي، الغابات، أو بيئة أحياء برية. لكن بعضاً من ترب هذه الفئة يمكن أن تستخدم لزراعة المحاصيل الشائعة مع اتباع إدارة حذرة. كما أن بعضاً من هذه الترب قد تُهَيَأ أيضاً لأغراض خاصة مثل أشجار الفاكهة أو لزراعة عنب الأحرار أو محاصيل مشابهة.

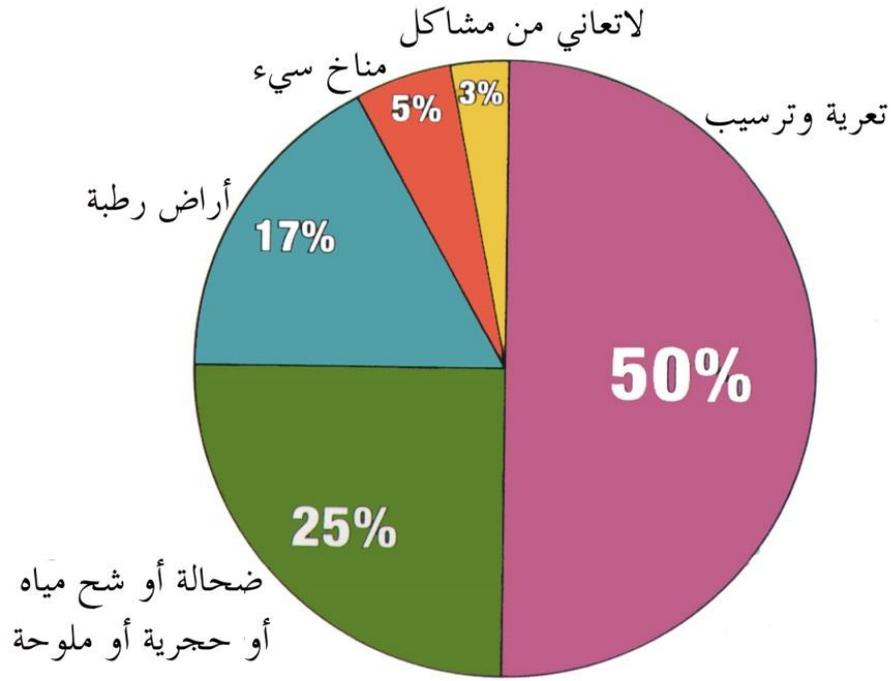
ترب الفئة VII: ترب ليست ملائمة لزراعة المحاصيل ولا يمكن تهيئتها لهذا الغرض.

ترب الفئة VIII: ترب ليست فقط غير ملائمة لزراعة المحاصيل، بل أيضاً تعاني من قيود حادة جداً تجعلها مقتصرة أساساً للترفيه، وكبيئة للأحياء البرية، وتوفير مصدر للمياه واستخدامات جمالية.

تزداد بحدة خطورة التعرية لأراضي المحاصيل من فئة الترب I إلى فئة الترب IV. لذلك، فإنه كلما ازدادت مساحة أراضي المحاصيل التي تزرع في ترب الفئة III و IV، تعاطمت خطورة التعرية. كذلك فإنه، نظراً لأن الرسوبيات تمثل آلية أساسية لنقل الكيماويات الزراعية فإن إمكانية فقد هذه الكيماويات من هذه الترب يكون أعظم. لهذا، فإن هذه الترب غير مرغوبة ليس فقط لأنها أكثر عرضة للتعرية، بل لأنها أيضاً منخفضة الخصوبة وتنتج غلة أقل من فئة الترب I و II خاصة عندما لا تضاف أي أسمدة.

وكما يوضح الشكل (15-3)، فإن أعظم قيد يحد من استخدام الأراضي لزراعة المحاصيل هو مدى تعرضها للتعرية والترسيب. لكن 3% فقط من ترب الولايات المتحدة - التي تصنف ضمن ترب الفئة I - لا تتعرض كلياً أو تتعرض قليلاً لمثل هذه المشاكل. إضافة إلى ذلك، فإن نسبة كبيرة من أراضي المحاصيل بالولايات المتحدة تحتاج لمحسنات كيماوية من

نوع ما. مثلاً يقدر بأن ثلث إلى نصف الإنتاج الزراعي للولايات المتحدة يعتمد على استخدام الأسمدة. وهذا يعني أنه إذا ما تم إقصاء استخدام الأسمدة، فإن مساحة الأراضي الزراعية يتعين توسيعها بشكل كبير لتقابل مستويات الإنتاج الحالية، وحسب جرد الموارد الوطنية، فإن الزيادة الكبيرة في الأراضي الزراعية يتعين أن تأتي من ترب الفئتين III و IV، وبهذا فإنه بدون الأسمدة، ستزيد مشاكل التعرية والترسيب بدرجة دراماتيكية.

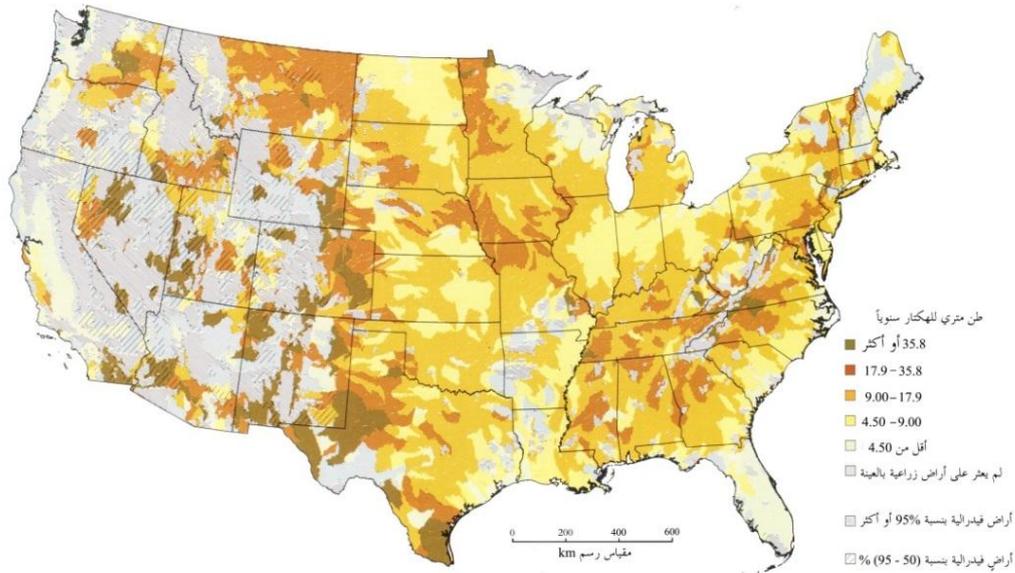


شكل (15-3): القيود السائدة (تحت فئات subclasses) التي تحد من ملائمة ترب الولايات المتحدة الأمريكية لزراعة المحاصيل معبر عنها كنسب مئوية من إجمالي الأراضي غير الفيدرالية (600.3 مليون هكتار). لاحظ أن التعرية هي المشكلة المحتملة الأعظم.

نظراً لزيادة فقد الرسوبيات مع زيادة رقم فئة التربة، فإن أحد أساليب التحكم في تلوث المياه من الأراضي الزراعية يكون بتركيز زراعة المحاصيل إلى أقصى قدر ممكن في فئتي تربة I و II، إذ أن هذه التربة طبيعياً هي أكثر إنتاجية واستجابة للأسمدة بسبب ارتفاع قدرتها على الاحتفاظ بالماء؛ إضافة إلى ذلك فإن التحكم في فقد الرسوبيات منها أكثر سهولة. ومن المحتمل إمكانية تحقيق مستوى أعلى من إنتاج الغذاء والكساء بأقل قدر من التأثير السلبي على البيئة عن طريق استخدام الأسمدة والمبيدات على الأراضي الأفضل، حيث تكون فعاليتها عالية وفقدتها أقل.

يمثل استخدام المواد الكيماوية على التربة الأكثر عرضه للتعرية مصدر تهديد أكبر للبيئة. لكنه، من الممكن استخدام الكيماويات بأمان على الأراضي الفقيرة إذا تم تطبيق مستوى أعلى من الإدارة للتحكم في الرسوبيات والفاقد من الكيماويات المصاحبة لها، على الرغم من أن درجة تأثير الملوثات الزراعية على البيئة يظل غير مؤكد، إلا أنه يظهر أن فقد الرسوبيات والمغذيات والمبيدات يمكن التحكم لمستوى مقبول عن طريق اختيار نظم إدارة صحيحة. لذلك، فإن التحدي يتمثل في تطوير أساليب نظم تقييم عام وآليات مؤسسية يمكن أن تستخدم للتحكم في التعرية. أيضاً، فإن من المهم تطوير إجراءات تحكم عملية تناسب الموقع نفسه. ونظراً لأن التوصية بإجراءات تحكم عملية لمساحات شاسعة يعتبر شديداً الصعوبة بل كثيراً ما يكون غير عملي - فإن التوصيات بشأن مواقع محددة يتعين تطويرها بواسطة مختصين داخل المنطقة.

يقدم الشكل (15 - 4) خريطة توضح متوسط معدلات تعرية التربة السنوي بواسطة الماء والرياح. وعلى الرغم من أن مقدار التعرية من الأراضي بالولايات المتحدة قد انخفض فعلياً في السنوات العشر الأخيرة، إلا أن الترسيب يظل مشكلة رئيسية. وتعتبر الرسوبيات وهي ناتج نهائي لتعرية التربة، الملوثة الأكبر حجماً للمياه السطحية، كما انها أيضاً الحامل الأساسي لعدد من الملوثات الكيميائية. وفي مناطق تجمع المياه (watersheds)، تفوق الرسوبيات من مصادر غير زراعية تلك من الأراضي الزراعية. أما في المناطق التي تتميز بأمطار منخفضة نسبياً أو بترب رملية، فإن التعرية بالرياح تفوق تلك الناتجة عن المياه. ويصنف الجدول (1-15) حالة الأرض حيث يتوقع كميات عالية من الرسوبيات.



شكل (15-4): خريطة الولايات المتحدة توضح متوسط معدلات تعرية التربة السنوية بواسطة الرياح والماء على الأراضي الزراعية. (المصدر USDA Soil Conservation Service, 1994)

جدول (15 - 1) حالات تشير إلى إمكانية حدوث فقد كبير للرسوبيات

الأراضي الزراعية
1. ميول طويلة يتم فلاحتها دون وجود مساطب أو إنشاءات تحويل الجريان السطحي
2. خطوط مزروعة في الاتجاه من أعلى لأسفل ميول متوسطة أو حادة
3. لا يوجد بقايا محاصيل فوق سطح التربة بعد بذر محصول جديد
4. لا يوجد غطاء نباتي بين محصول تم حصاده ومحصول يجري تأسيسه
5. أرض مجاورة لمجرى مائي يتم فلاحتها بكثافة دون وجود شريط نباتي أخضر فاصل
6. جريان سطحي بدأ من أعلى ميول لأراضي مراعي ويمر خلال أراضي زراعية
7. غطاء نباتي ضعيف النمو أو الجودة
مصادر أخرى
1. الأخاديد
2. إنشاءات سكنية أو تجارية
3. بناء طرق سريعة
4. مراعي سيئة الإدارة، أراضي بور، أو مساحات مشجرة
5. ضفاف مجارى مائية غير مستقرة
6. مناطق مناخم سطحية
7. جوانب طرق غير مستقرة
8. أراضي عارية غير ملائمة للزراعة

3.15 التنبؤ بالفاقد من الرسوبيات

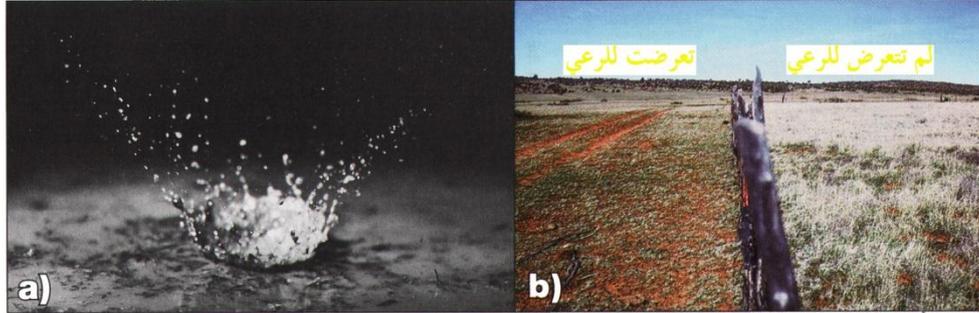
تعريف التربة عبارة عن عملية من ثلاث خطوات:

(1) فصل حبيبات التربة عن كتلة التربة.

(2) نقل حبيبات التربة المفصولة عبر نظام مستجمع للمياه (watershed).

(3) ترسيب الحبيبات المنقولة.

أثناء عملية التعرية الناتجة عن سقوط الأمطار، يكون فصل الحبيبات هو المتغير المستقل، لذلك فإن صدمة قطرة المطر الهابطة على سطح التربة تعتبر العامل الأكثر أهمية من حيث التسبب في فصل حبيبات التربة. وتبين الصورة (a5-15) قطرة مطر إثر اصطدام بسطح تربة، وكما يلاحظ فإن الصدمة التي لا يوجد ما يعيقها تكون عالية الطاقة. إن أي غطاء أو حماية فوق سطح التربة تكون قادرة على امتصاص أو تبديد هذه الطاقة سوف يؤدي إلى تخفيض التعرية بدرجة مهمة، ويوفر عادة غطاء الأرض عادة هذه الحماية. وفي الصورة (b5-15) يمكن مشاهدة خط فاصل يوضح التباين، حيث يمثل أحد الجوانب أرض مرعى جيدة الإدارة تتميز بغطاء عشبي جيد، بينما يبدو الجانب الثاني وقد تعرض لرعى جائر وغير محمي. ومن الواضح أن المساحة التي تعرضت لرعى جائر سوف تكون تعريتها أكثر سهولة مقارنة بالمساحة التي تلقت إدارة جيدة.



شكل (5-15): (a) قطرة مطر إثر اصطدامها بسطح التربة؛ (b) تأثيرات إدارة الأراضي على التعرية: هنا يقوم الغطاء النباتي بامتصاص طاقة قطرة المطر ويخفض من تعرية التربة.

على مدى أكثر من 50 عاماً من الأبحاث حول التعرية قامت بها وزارة الزراعة الأمريكية بالتعاون مع محطات التجارب الزراعية الحكومية نتج عنها معرفة عوامل التعرية الرئيسية وتحديد علاقات عددية لهذه العوامل مع معدلات فقد التربة. إن المعادلة الشاملة لفقد التربة (USLE) تجمع هذه العوامل والعلاقات التي يمكن استخدامها للتنبؤ بمتوسط الفقد السنوي من التربة من خلال التعرية الصفائحية (Sheet erosion) والجدولية (rill erosion) بواسطة الأمطار والجريان السطحي المصاحب لها على منحدرات حقلية محددة (انظر المرجع: Wischmeir and Smith, 1978). وعلى الرغم من أن المعادلة الشاملة لفقد التربة USLE ليس لها حدود جغرافية، إلا أن تطبيقها يتطلب معرفة بالقيم المحلية لكل عامل فيها. لذلك، فإن إمكانية تطبيقها في بعض المناطق محدود في الوقت الحاضر بسبب نقص بيانات بحثية يتم عن طريقها الحصول على التقييمات التي تكون ممثلة للمناخ والظروف الطبيعية والزراعية المحلية.

تعتبر معادلة USLE صيغة تجريبية ويعبر عنها:

$$A = 2.24 R . K . LS . C . P \quad (1.15)$$

حيث أن:

A = متوسط الفاقد السنوي من التربة بالطن المتري للهكتار في السنة.

R = مؤشر الانجرافية لكل من المطر والجريان السطحي. يمكن عموماً الحصول على القيمة

المحلية للعامل (R) من الشكل (15 - 6).

[ملحوظة: تحدث أكثر العواصف المطرية تسبباً في الانجراف في الجزء الجنوبي الشرقي من الولايات المتحدة، حيث تتحرك الأعاصير إلى عمق اليابسة منطلقاً من المحيط الأطلسي أو خليج المكسيك].

K = عامل انجرافية التربة. متوسط فقد التربة لوحدة العامل R تحت ظروف مختارة عشوائياً كخط قاعدي (base line) [مثل التبوير المستمر]، تعتمد قيمة K على خصائص التربة. تشمل خواص التربة التي تحدد مدى عرضة التربة للتعرية كل من: (1) قوام التربة، خاصة محتواها من السلت والرمل الناعم جداً. (2) محتوى التربة من المادة العضوية. (3) خصائص بناء التربة. (4) نفاذية التربة.

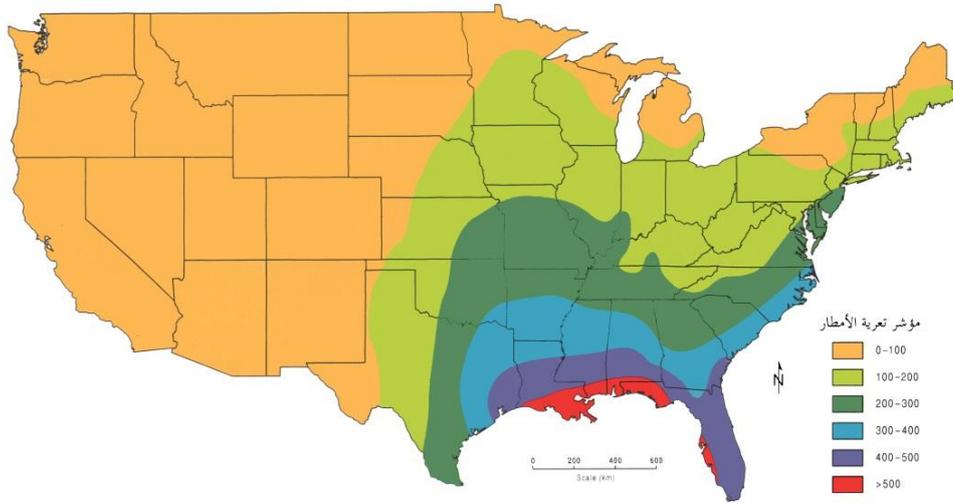
ويضم الجدول (15 - 2) خصائص التربة وقيمة المعامل K لترب الولايات المتحدة المختلفة، التي يمكن الحصول عليها من خرائط حصر التربة أو من وكالة المحافظة على الموارد الطبيعية، التابعة لوزارة الزراعة الأمريكية.

LS = عامل طبوغرافي بدون وحدات قياس يمثل التأثيرات المجتمعة لكل من طول الميل ودرجة الانحدار. ويوضح الجدول (15 - 3) قيم LS لميول متجانسة.

C = عامل الغطاء والإدارة. يمثل العامل C نسبة فقد التربة من مناطق لها غطاء واقٍ إلى فقد مناظر من مناطق تحت نظام تبوير مستمر (تربة عارية ليس لها غطاء حيث تكون النباتات في خطوط تمتد لأعلى و أسفل الميل).

وتتراوح قيمة C من 0.001 لأرض مشجرة وتمتع بإدارة جيدة، إلى 1.0 لأرض محروثة وتوجد تحت نظام تبوير مستمر. وتتفاوت قيمة C تحت نظام زراعة وإدارة معينة

حسب توزيع الأمطار وتاريخ الزراعة. ويعرض الجدول (4 - 15) قيم عامة للعامل C لغرض التوضيح.



الشكل (6-15): خارطة الولايات المتحدة موضح عليها خطوط قابلية التربة للتعرية

$P =$ العامل الخاص بالإجراءات أو العمليات الداعمة. يساوي المعامل P نسبة التعرية الناتجة عن الأسلوب الذي يدور حوله التساؤل إلى التعرية التي يمكن أن تحدث عند الزراعة في اتجاه الميل لأعلى وإلى أسفل. إن قيم المعامل P مدرجة بالجدول (5-15). عندما لا تكون هناك أي عمليات أو إجراءات داعمة تكون $P = 1.0$.

الجدول (2-15) مؤشرات المدى العام لعامل قابلية التربة للتعرية (K) باستخدام فئات قوام التربة لإدارة الزراعة الأمريكية (انظر الشكل 2 - 2)

K ^(a)			فئة التربة
%4 ^(b)	2 % ^(b)	<0.5% ^(b)	
0.02	0.03	0.05	رمل
0.10	0.14	0.16	رمل ناعم
0.28	0.36	0.42	رمل ناعم جداً
0.08	0.10	0.12	رمل طمي
0.16	0.20	0.24	رمل ناعم طمي
0.30	0.38	0.44	رمل ناعم جداً طمي
0.19	0.24	0.27	طمي رمل
0.24	0.30	0.35	طمي رمل ناعم
0.33	0.41	0.47	طمي رمل ناعم جداً
0.29	0.34	0.38	طمي
0.33	0.42	0.48	طمي سلتي
0.43	0.52	0.60	سلت
0.21	0.25	0.27	طمي طيني رمل
0.21	0.25	0.28	طمي طيني
0.26	0.32	0.37	طمي طيني سلتي
0.12	0.13	0.14	طيني رمل
0.19	0.23	0.25	طمي سلتي
0.29 – 0.13	0.29 – 0.13	0.29 – 0.13	طيني

a = هذا تقريب عام لقيم K اعتماداً على قوام التربة في الأساس، b = محتوى التربة من المادة العضوية

الجدول (3-15) قيم العامل الطبوغرافي (LS) بمعادلة التعرية لمجاميع محددة من طول الميل والانحدار

طول الميل (متر)												الميل (أ)
(a)305	(a) 244	(a)183	(a)152	(a)122	91.4	61.0	45.7	30.5	22.9	15.2	7.60	%
0.26	0.24	0.22	0.21	0.20	0.18	0.16	0.15	0.13	0.12	0.10	0.09	1
0.57	0.54	0.49	0.47	0.44	0.40	0.35	0.33	0.29	0.26	0.23	0.19	3
1.70	1.50	1.30	1.20	1.10	0.93	1.40	0.66	0.54	0.46	0.38	0.27	5
3.10	2.80	2.40	2.20	2.00	1.70	2.60	1.20	0.99	0.86	0.70	0.50	8
5.70	5.10	4.40	4.0	3.60	3.10	5.80	2.20	1.80	1.60	1.30	0.90	12
13.0	12.0	10.0	9.1	8.20	7.1	11.0	5.00	4.10	3.50	2.90	2.00	20
25.0	23.0	20.0	18.0	16.0	14.1	25.0	9.7	8.00	6.90	5.60	4.00	30

(أ) القيم الخاصة بالميل الأطول من 91.4 متراً أو الأكثر انحداراً عن 18% هي توصيل لنقاط تتجاوز مدى بيانات البحث

الجدول (4 - 15) العامل (C)

قيمة (C)	حالة الغطاء النباتي
0.60	* محصول قطن بعد محصول قطن. يكون غطاء التربة أثناء فترة إعداد مرقد البذور 80 %
0.21	* بقايا قش محصول الذرة، تكون النسبة الفعلية للتربة المغطاة 40 %، زراعة دون حرث
0.05	* بقايا قش محصول الذرة، تكون النسبة الفعلية للتربة المغطاة 90 %، زراعة دون حرث
0.0001 - 0.001	* غابة في حالتها الطبيعية (لم تتعرض لاضطراب)، يكون الغطاء من بقايا النباتات 90 - 100 %، تتراوح المساحة الواقعة في ظل الأشجار ما بين 75 - 100 %
0.10	* أراضي مزروعة بمحاصيل علف، أو أراضي مراعي تصل نسبة الغطاء بالأعشاب 40 %
0.003	* مزروعة بمحاصيل علف بشكل مستمر، تصل نسبة الغطاء بالأعشاب 95 %
0.12	* شجيرات بنسبة 75% إضافة لمساحة مغطاة بأعشاب ونباتات عريضة الأوراق بنسبة 40 %
0.20	* 75 % مغطاة بالأشجار إضافة إلى 20 % مغطاة بالأعشاب ونباتات عريضة الأوراق.
0.42	* 25 % أشجار دون وجود أي غطاء أرضي

الجدول (15-5) العامل P

حالة الغطاء النباتي		
قيمة (P)	الطول الأقصى للكتنور (متر)	الميل (%)
0.60	122	2 - 1
0.50	91.4	5 - 3
0.50	61.0	8 - 6
0.60	36.6	12 - 9
0.70	24.4	16 - 13
0.90	15.2	25 - 21

تكون قيم العوامل R و K و LS ثابتة نسبياً لمنطقة معينة. ويساوى حاصل ضرب هذه العوامل مؤشر التعرية الممكنة (erosion- potential index) لتوليفة معينة من أنماط هطول الأمطار، وخصائص التربة والمعالم الطبوغرافية. وبأسلوب آخر فإن ناتج عملية الضرب يساوى متوسط فقد التربة السنوي الذي يمكن أن يحدث في حالة غياب أي غطاء نباتي أو استخدام أي إجراءات مخفضة للتعرية. وعندما يتم ضرب هذا الرقم الممكن في القيم المناسبة للعوامل C و P فإن الناتج يكون رقماً يمثل تأثيرات نظام الزراعة المحدد، والإدارة الزراعية، والإجراءات الداعمة للتحكم في التعرية. وبذلك، فإن المعادلة الكاملة تتنبأ بمتوسط الفاقد السنوي من التربة لأوضاع أراضي زراعية محددة. وباستخدام معادلة فقد التربة، يمكن تقدير معدلات فقد التربة السنوية عند موقع معين، ويتم اختيار القيم الخاصة بالعوامل R و K و LS و C و P من الجداول المناسبة. ويعطى حاصل ضرب هذه العوامل الخمسة تقديراً للفاقد من التربة تحت نظام الزراعة والإدارة المتبعة.

يمكن أن تكون معادلة USLE مفيدة جداً كدليل تخطيط، وحتى فترة قريبة، كانت أفضل طريقة متاحة لحساب التعرية من مساحات أراضي محددة في معظم الولايات المتحدة. لكنه يجدر الإشارة إلى أن الفاقد من التربة التي يتم حسابها بواسطة هذه المعادلة يجب أن تقبل كتقديرات وليست كقيم مطلقة. إن الاشتقاقات لقيم الموقع الخاصة بالعوامل الخمسة للمعادلة تستند إلى علاقات تم استخدامها من بحوث التعرية التي أجريت في الخمسين عاماً الماضية. إن هذه العلاقات يمكن، تحت ظروف معينة، أن تتأثر بالتداخلات مع متغيرات أخرى.

إن معادلة فقد التربة وجداول البيانات المساندة قد تم تصميمها للتنبؤ بمتوسطات فقد التربة على مدى فترات زمنية طويلة تحت ظروف محددة. ويمكن أن تكون الفواقد لسنة معينة أكثر بدرجة عالية من المتوسطات السنوية أو أقل منها، وذلك بسبب الاختلافات في عدد وحجم وتوقيت العواصف الممطرة وفي عوامل المناخ الأخرى. ويمكن لحادثة واحدة من الجريان السطحي الشديد بعد بذر المحصول بوقت قصير بمقدور بذور تم إزالة أي غطاء نباتي عنه أن تتسبب في تعرية كمية من التربة تعادل المتوسط السنوي للدورة الزراعية، لكن احتمالية حدوث ذلك تعتبر قليلة.

وكمثال لحساب معدل التعرية بالمياه، لنفترض أن التربة طميية سلتية بوسط ولاية إنديانا؛ بالولايات المتحدة الأمريكية، وتحتوى على 2% مادة عضوية ويبلغ طول الميل 91.4 متراً، والميل 5% وتمت زراعتها على خطوط كنتورية بدرجة جيدة، بشكل مستمر بمحصول

الذرة (تبلغ الغلة 5.0 طن متري للهكتار) باتباع أسلوب اللا حرث، وترك 40% من التربة مغطاة، إن العوامل اللازمة هي:

$$R = 180 \text{ (شكل 15-6)}$$

$$K = 0.42 \text{ (جدول 15-2)}$$

$$LS = 0.93 \text{ (جدول 15-3)}$$

$$C = 0.21 \text{ (جدول 15-4)}$$

$$P = 0.5 \text{ (جدول 15-5)}$$

باستخدام المعادلة (15-1) وتعويض قيم العوامل نحصل على قيمة للفاقد السنوي من

$$\text{التربة: } A = 17 \text{ طن متري.}$$

لاحظ أنه إذا ما كانت الأرض مزروعة بشكل دائم بمحصول مراعي و أن 95% من التربة مغطاة بالأعشاب فإن $C = 0.003$ ، انظر الجدول (15-4). وبالتعويض في المعادلة فإن الفاقد المحسوب سيتم تخفيضه من 17 إلى 0.24 طن متري في السنة.

تم اقتراح المعادلة USLE أصلاً عام 1965 لتقدير الفاقد من الرسوبيات بسبب التعرية الصفائحية والجدولية من حقول مزروعة في الولايات المتحدة شرق جبال الروكي. ومنذ ذلك الوقت، تم تكييف المعادلة للاستخدام في مناطق زراعية أخرى بالولايات المتحدة، وأوروبا، وأفريقيا. كما أنها استخدمت أيضاً في أراضي رعوية وأرض غابات.

في عام 1993 تم نشر معادلة مطورة للمعادلة السابقة تسمى RUSLE (معادلة USLE المعدلة). وفي هذا الإصدار الجديد طورت أساليب رياضية لأجراء الحسابات بواسطة

الحاسوب؛ كما تم حساب قيم جديدة للعامل R للولايات الواقعة بالجزء الغربي من الولايات المتحدة. كما اقترح أسلوب تحت عاملي (Sub factor approach) لحساب قيم C، يأخذ في الاعتبار منها الاستخدام السابق للأرض والظلة التي توفرها النباتات (plant canopy). وتستخدم حالياً المعادلة RUSLE بشكل واسع في الولايات المتحدة، خاصة في الأغراض التنظيمية. كذلك فإن العلماء التابعين لوكالة البحوث الزراعية في مرحلة تطوير جيل جديد من تقنيات التنبؤ بالتعرية. إن مشروع التنبؤ بالتعرية بالمياه (WEPP) ونظام التنبؤ بالتعرية بالرياح (WEPS) يعتبران نمطان رياضيان متطوران سوف يساعدان على زيادة تحسين قدراتنا للتنبؤ بتعرية التربة ومن ثم التحكم فيها.

4.15 الإجراءات العملية للتحكم في التعرية

إن حدوث بعض التعرية أمر غير ممكن تفاديه وذلك حيثما يكون متوسط الأمطار كافياً لإنتاج المحاصيل، ويعود ذلك كثيراً إلى أن العواصف الممطرة التي تسهم في المتوسط هي عبارة عن حوادث متباعدة وتكون متباينة كثيراً من حيث الشدة، وحتى تحت أفضل الظروف، فإن المطر يمكن أن يسقط بمعدلات تفوق المعدل الذي يمكن للتربة امتصاصه منها، ولذا فإن الزائد لا بد أن يسيل في شكل جريان سطحي. لكن هذه الزيادات يمكن التحكم فيها عن طريق التقليل إلى الحد الأدنى من صدمة قطرة المطر لسطح التربة، وبهذا يتم تخفيض سرعة الجريان وقنواته ومن ثم قوته في إحداث التعرية.

إن الهدف من الإجراءات العملية للتحكم في التعرية (ECP) هو المحافظة على معدلات التعرية ضمن حدود التحمل التي تتمشى مع نوعية المياه الجيدة، والبيئة الصحية،

وحماية القدرة الإنتاجية للأرض، وقد نشرت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) عدداً من إجراءات التحكم في التعرية تم إدراج عدد كبير منها في الجدول (15 - 6) إلى جانب خصائصها المقبولة وغير المقبولة. إن هذه الإجراءات تشمل ممارسات زراعية تحسن من إدارة بقايا المحصول، وتعاقب المحاصيل، وطرق البذر، ومعاملات التربة، وطرق الحراثة، وتوقيت العمليات الحقلية.

إن أحد أكثر الطرق أهمية في تخفيض التعرية هو ممارسة الفلاحة بحيث تكون موازية للخطوط الكنتورية في الحقل، ويعرف هذا الإجراء بالزراعة الكنتورية (contouring)، وتنتج الحراثة الكنتورية سلسلة تلال (ridges) تشكل حواجز صغيرة تبطئ أو توقف حركة الماء إلى قاع المنحدر. لكنه يلاحظ، أن هذا الإجراء وبعض عمليات التحكم الزراعية الأخرى لا تكون فعالة عندما تكون زاوية الميل شديدة الانحدار أو في حالة أن الجريان السطحي المتراكم في مساحة معينة كبير جداً. وفي هذه الحالة يتعين دعم هذه الإجراءات أو استبدالها بطرق أخرى تشمل إقامة المساطب، وقنوات التحويل، والأحاديث الكنتورية، والحراثة الكنتورية وزراعة المحاصيل في شكل شرائط على امتداد الخطوط الكنتورية، ومجاري للمياه وإنشاءات تحكم.

المساطب (terraces) هي عبارة عن شرائط مستوية تم بناؤها من التراب تقام على خط كنتوري من الأرض بغرض جعل تلال منحدره ملائمة للحراثة، أما قنوات التحويل (diversions) فهي ركام من تراب تبنى على منحدرات تلال لتوجيه المياه بعيداً عن الأراضي التي تحتها. أما الأحاديث الكنتورية (contour furrows)، والحراثة الكنتورية (contour listing) والزراعة في شكل شريط كنتوري (contour strip cropping) فهي جميعاً ممارسات زراعية حيث يقوم المزارع بزراعة المحاصيل على امتداد نفس مستوى الارتفاع (contour)

لحصاد المزيد من الماء وتقليل الجريان. ويعبر مصطلح (listing) على طريقة حراثة التربة بحيث تترك كميات أكبر من بقايا المحصول فوق سطح التربة لحماية التربة من الأمطار الساقطة. من ناحية أخرى، فإن مصطلح الزراعة الشريطية (strip cropping) فإنه يعني أن المزارع يقوم بالزراعة في شرائط متعاقبة من محاصيل خطية (row crops) وحشائش (grasses) أو بقوليات (legumes) لتقليل الجريان. أما مجاري المياه (waterway) فهي إنشاءات مصممة لإزالة أو تحويل اتجاه كميات كبيرة من المياه بعيداً عن الأراضي التي قد تتعرض للتعرية. تحت ظروف كثيرة، قد يكون ضرورياً تطبيق حزم مختلفة من هذه الإجراءات. وتؤثر تحويرات ممارسات محددة ضمن هذه الأنواع العامة على ملاءمتها وكذلك فعاليتها، فهذه الإجراءات تستخدم مجتمعة، مثل الجمع بين استخدام أساليب الحراثة الكنتورية إضافة لمجاري المياه وإقامة الإنشاءات لحماية الأرض من التعرية.

إن التقنية المناسبة للتقليل إلى الحد الأدنى من التلوث الزراعي متاحة، لكن الجانب الاقتصادي لتطبيق هذه الإجراءات على الأراضي الزراعية يتطلب استثمارات طويلة الأجل. فمالك الأرض يدير عملياته على أسس قصيرة الأجل، حتى يوفى بالتزاماته المالية وهذا ما يجعله يتحرك بحذر، فمثلاً تكون إقامة مساطب ومجاري مائية مكلفاً، كما أن مساحة الحقل وشكله تتغير وعلى المزارع أيضاً أن يتحور آلياته الزراعية لفلاحة هذه الأراضي. ومع ذلك فإن أن كمية الغلة قد تنخفض لأن كمية أقل من المحاصيل الخطية مثل الذرة وفول الصويا (محاصيل ذات مردود اقتصادي مرتفع) يمكن زراعتها؛ لذا فإن دخل المزارع سوف ينخفض. إن إجراءات المحافظة (conservation) لها فوائد بعيدة المدى، لكن الدخل الصافي يقل عادة على المدى القصير.

جدول (15-6) الأنواع الرئيسية من إجراءات التحكم في التعرية بالأراضي الزراعية (ECP)

إجراء التحكم في التعرية	توضيحات حول الإجراء
ECP1	لا حرثة، زراعة في بقايا النبات السابق
ECP2	حرثة صيانة (تحفظية)
ECP3	دورات زراعية تعتمد على التربة
ECP4	محاصيل غطاء شتوي
ECP5	تحسين خصوبة التربة.
ESP6	توقيت العمليات الحقلية.
ESP7	إقامة كتور (contouring).
ESP8	الزراعة في شكل شريط كتوري

توضيحات حول الإجراء	إجراء التحكم في التعرية
تدعم الكنتورات والإجراءات الزراعية عن طريق تقليل طول الميل الفعال وتراكم مياه الجريان؛ تخفض التعرية وتحافظ على رطوبة التربة؛ تسهل إقامة زراعة أكثر كثافة؛ تدرج المساطب الشائع لا يتلاءم عادة مع استخدام الآليات الكبيرة، لكن التصميمات الجديدة خفضت هذه المشكلة، تكاليف مبدئية معتبرة وبعض التكاليف للصيانة.	مساطب ESP9
تسهل الصرف من خطوط وقنوات مساطب مدرجة بأدنى قدر من التعرية، تتطلب تكاليف تأسيس وصيانة وقد تتداخل مع استخدام آليات كبيرة.	مخارج مزروعة بالنجيليات ESP10
أحياناً هذا هو الحل الوحيد. تكون زراعة نبات نجيلي دائم أو أشجار تحت إدارة جيدة فعالة عندما تكون إجراءات التحكم الأخرى غير كافية؛ يمكن تعويض المساحات المفقودة عن طريق الاستخدام الأكثر كثافة للأراضي الأقل عرضة للتعرية.	تغيير في استخدام الأرض ESP11
الأخاديد الكنتورية، قنوات التحويل؛ الصرف تحت السطحي، تشكيل الأرض، مسافات متقاربة بين الخطوط... إلخ.	ممارسات أخرى ESP12

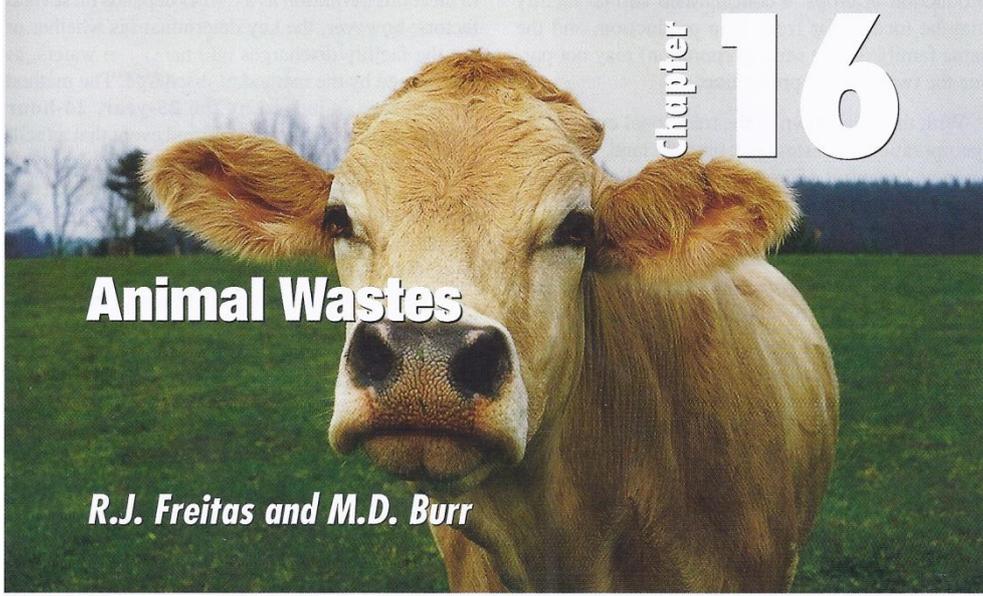
المراجع ولمزيد الاطلاع

- El-Swaify S.A., Moldenhauer W.C., and Lo A. (1985) *Erosion and Conservation*. Soil and Water Conservation Society of America , Ankeny, Iowa.
- Lal R, Editor (1995) *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society of America , Ankeny, Iowa.
- National Research Council (1995). *Soil and water Quality*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Schwab G.O., Fangmeier D.D., Elliot W.J., and Frevert R.K. (1993) *Soil and Water Conservation Engineering*, 4th Edition. John Wiley and sons. New York.
- Troeh F.R., Hobbs J.A., and Donahue R.L. (1992) *Soil and Water Conservation*. 2nd Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- USDA Soil Conservation Service (1961) *Land-Capability Classification*, Agriculture Handbook No. 210. United states Department of Agriculture, Washington, D.C.
- USDA Soil Conservation Service (1992) *1992 Summary Report: National Resources Inventory*. United states Department of Agriculture, Washington, D.C.
- USDA Soil Conservation Service (1994) *National Resources Inventory*, United states Department of Agriculture, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1975) *Control of Water Pollution from Cropland*.EPA-600/2-75-026a. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D (1978) *Predicting Rainfall- Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook No. 537. United states Department of Agriculture, Washington, D.C.

مسائل وأسئلة

1. أشرح كيف يمكن أن تكون الزراعة سبباً في تلوث أو إدخال ملوثات إلى البيئة في منطقة معينة. اذكر الملوثات الزراعية الأساسية التي نهتم بها.
2. تصنف وزارة الزراعة الأمريكية استخدام الأرض حسب نظام تصنيف القدرة للأراضي (Land - Capability Classification System)، صف هذا النظام من أجل تصنيف الأرض للاستخدام الزراعي.
3. تستخدم المعادلة USLE للتنبؤ بمتوسط فقد التربة السنوي، أذكر ثم أشرح العوامل السبعة في هذه المعادلة.
4. صف ستة إجراءات إدارة عملية يمكن تطبيقها لتخفيض فواقد التعرية من أرض زراعية.

الباب السادس عشر
المخلفات الحيوانية



يمكن فقط إدارة المخلفات الحيوانية بكفاءة من خلال فهم التفاعلات المتبادلة لهذه المخلفات مع العوامل البيولوجية وآليات النقل، مثل المياه.

1.16 المنظور التاريخي

تعتبر المخلفات الحيوانية ملوثات تلقى اهتماماً متنامياً من العامة والإدارات المنظمة المختصة لأنها تمثل مصدراً محتملاً لتلويث كل من المياه السطحية والجوفية، ونتيجة لذلك فإن المخلفات الحيوانية الآن يجب أن تضم كجزء من دورة الإنتاج الزراعي وتوضع لها قيمة ضمن تكاليف تشغيل حقل معين أو منشأة لتربية الحيوانات، و يمكن تقسيم مخلفات الحيوانات

الزراعية إلى نوعين: مخلفات المراعي المفتوحة، ومخلفات الإنتاج المغلقة أو المركزة. يكون تركيز مخلفات الحيوانات عموماً في نظم المراعي المفتوحة أكثر تشتتاً وانتشاراً عنه عندما يتم حجز أعداد كبيرة من الحيوانات في مساحات صغيرة نسبياً. يوجد لنظم المراعي المفتوحة تأثيران أساسيان على جودة المياه السطحية يمكن قياسهما:

1. زيادة العكارة من خلال دخول حبيبات التربة إلى داخل الجداول المائية، والأنهار والبحيرات.
2. زيادة أعداد البكتيريا القولونية (coliform) في المناطق التي تتميز باستخدام كثيف من قبل الحيوانات. وعلى الرغم من معرفة أن نظم الرعي قد تؤثر سلباً على بعض خصائص جودة المياه، فإنه سيتم التركيز هنا على وحدات الإنتاج الحيواني المركزة جداً وطرق التحكم ومنع حدوث التلوث من هذه الوحدات المركزة.

في الماضي كانت التربية المركزة للحيوانات تتم بشكل متقطع حيث تشكل فترة الحجز طوراً انتقالياً يتبعه عودة إلى المرعى، بعد إتمام بعض النشاطات الإدارية كالحلب أو جز الصوف، أما في الوقت الحاضر فإن الإنتاج الحيواني يجري بشكل مضطرب تحت ظروف محكمة نتيجة لنجاح الجهود في رفع الإنتاجية وتقليل تأثيرات المتغيرات المناخية وتغذية الحيوان والنفوق بين الحيوانات. ويتم حالياً تربية أعداد متزايدة في مواقع تغذية مركزة للحيوانات (CAFOs) - وبشكل خاص أماكن تسمين الحيوانات (Feedlots)، وأماكن تربية ماشية اللبن والخنازير، والدواجن وأماكن التربية المائية المكثفة.

إن هذا التحول في طرق الإنتاج قد غير الطريقة القديمة التي تتضمن خلط المخلفات

الحيوانية كسماد عضوي في الدورة التالية لإنتاج الغذاء، فبعد نهاية الحرب العالمية الثانية، استبدل السماد العضوي كسماد أساسي بأسمدة كيميائية تنتج من الوقود الأحفوري وذلك نتيجة لتحول المزارع باضطراد نحو الزراعة المتخصصة، وقد أدى هذا التخصص إلى انفصال الإنتاج الحيواني عن إنتاج المحاصيل: إذ قد يكون موقع تربية مكثفة للحيوانات بعيداً جداً من مكان إنتاج المحاصيل، كما أن القائمين على الإنتاج سواء كانت عائلة أو مؤسسة قد لا يكونون راغبين في ممارسة كلا النشاطين.

وبانتهاء الدورة التقليدية الخاصة بإعادة خلط المخلفات وإعادةها مرة ثانية للأرض، وهو ما كان في السابق مصدراً للمغذيات أصبح في الوقت الحاضر ملوثاً محتملاً، لذلك فإن القيام بإنتاج أعداد كبيرة من الحيوانات فوق رقعة صغيرة من الأرض قد أدى إلى تراكم المخلفات، وإنشاء برك كبيرة لتخزينها، وفي آحيان كثيرة إلى إضافة المخلفات للأرض بكميات تفوق احتياجات المحاصيل الزراعية.

2.16 مصادر التلوث الأولية المباشرة (Point pollution) ومصادر التلوث الثانوية غير المباشرة (nonpoint pollution)

عند مناقشة مصادر المخلفات الحيوانية، يكون من المهم فهم مصطلحات المصادر الأولية (المباشرة) والثانوية غير المباشرة للملوثات، يعتبر مصطلح التلوث الثانوي (nonpoint pollution) مضللاً، وكثيراً ما يستخدم خطأً. وفي الأنظمة الزراعية الحيوانية، فإن المصادر الثانوية هي تلك التي لا تتركز فيها الملوثات المحتملة أثناء الإنتاج، ولا تمر خلال أنبوب توصيل واحد أو عدة أنابيب صغيرة للتخلص منها. وتشمل المصادر الثانوية (غير

المباشرة) زرائب الحيوانات، وأماكن التغذية، وأنظمة المراعي الواسعة والكثيفة.

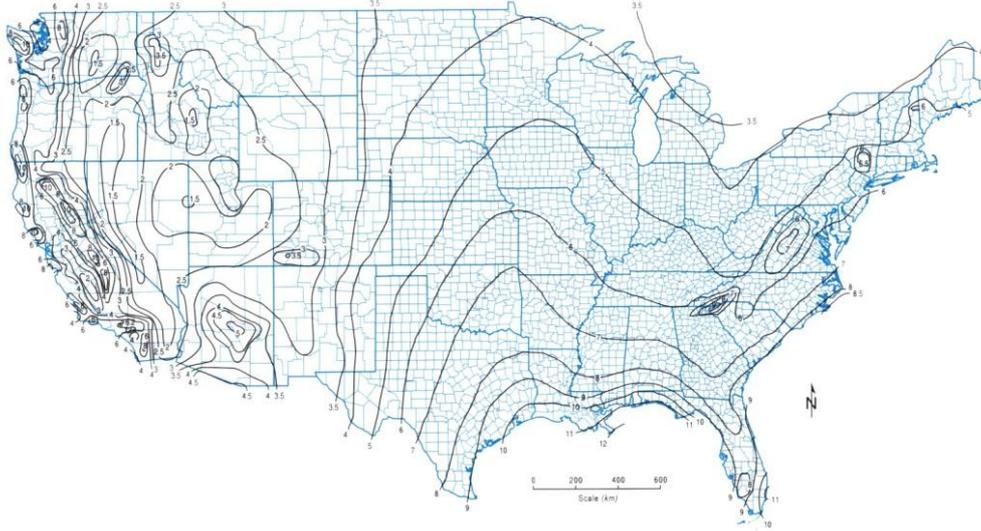
المصادر الأولية المباشرة (point sources)

هي تلك المنشآت التي تتركز الملوثات (pollutants) بدرجة عالية وتمررها عبر أنبوب، أو خندق أو قناة لغرض التخلص منها. ومن أكثر المصادر الأولية الشائعة مبانى الحلب وحظائر الحيوانات، ومنشآت إعداد ومعالجة الألبان والأغذية، ومبانى التربية المكثفة للخنزير، والبحيرات الضحلة اللاهوائية والهوائية، وبرك البخر. بالإضافة إلى ذلك، فإن بعض أنواع الزراعات المائية المكثفة قد تكون أيضاً مصدراً أولياً للملوثات من خلال التدفقات الراجعة من إفرازات الأسماك المشبعة بالعناصر المغذية. وحسب تنظيمات وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) فإن بعض العمليات المركزة لتغذية الحيوانات قد تصنف على أنها مصادر أولية للتلوث وتحتاج إلى تصريح خاص يسمى النظام القومي نظام لمنع ضخ الملوثات (National Pollution Discharge Elimination System (NPDES)).

وفي هذه الحالة، تعرف عملية التغذية المركزة للحيوانات على أنها مساحة أو منشأة لا يوجد بها غطاء نباتي خضري وتعيش فيها حيوانات داخل حيز محدد لمدة 45 يوماً أو أكثر من السنة. ويعتمد عدد الحيوانات اللازمة لاستيفاء متطلبات هذا التعريف (CAFO) على عدة عوامل؛ لكن العامل المحدد هو فيما إذا كان الموقع يفرغ مخلفاته إلى داخل المياه الصالحة للملاحة أم لا، كما حدد له وفق طريقة التخلص منها. ويتم تحديد طريقة التخلص من المخلفات استناداً على عاصفة مطرية محتملة تستمر مدة 24 ساعة وتحدث مرة واحدة كل 25 سنة، وهو الحدث الذى يتعين أن تصمم المنشأة على أساسه. إن هذا المعيار

التصميمي عبارة عن عاصفة مطرية تستمر لفترة 24 ساعة وأن احتمال حدوثها يكون مرة واحدة كل 25 عاماً. فإذا كانت منشأة معينة لا تفرز دفقاً من عواصف أقل من عاصفة مطرية واحدة وتستمر مدة 24 ساعة كل 25 عاماً، فإنها قد تصنف على أنها مصدر ثانوي (غير مباشر) (nonpoint source) وهي بذلك لا تحتاج لتصريح. أما إذا كانت المنشأة تفرز دفقاً من عواصف أقل من عاصفة مطرية تستمر مدة 24 ساعة تحدث مرة كل 25 سنة فيمكن معاملتها على أنها مصدر أولي مباشر (Point source). إن هذا المعيار المزدوج يأخذ في الاعتبار حقيقة أن ما يبدو مصادر تلوث زراعي أولية يمكن معاملتها بأمان كما لو أنها مصادر ثانوية ذلك أن الملوثات التي يتم ضخها إما أنها غير مركزة بدرجة كافية تبرر إجراءات تحكم محددة عند الأنبوب أو أنها غير محملة بمواد خطيرة.

إن معيار العاصفة المطرية لمدة 24 ساعة كل 25 عاماً لا يعني يقيناً أن عاصفة مطرية ذات حجم واستمرارية معينة ستحدث كل 25 عاماً. وهناك طريقة أخرى قد تكون أكثر وضوحاً للنظر إلى هذا المعيار وهو أنه خلال 100 عام من الممكن حدوث أربعة عواصف مطرية ينطبق عليها معيار الاستمرارية والحجم على امتداد 24 ساعة كل 25 عاماً. لكن هذه العواصف المطرية الأربع قد تحدث في زمن متقارب أو تتوزع على مدى فترة أطول من 25 عاماً. لذلك فإن السجل الهيدرولوجي يمثل فترة متوسط العائد لعاصفة مطرية معينة بهذا الحجم والاستمرارية كل 25 عاماً. ويوضح الشكل (16-1) شدة الأمطار خلال 25 عاماً، وحدوث عاصفة مطرية تستمر 24 ساعة متواصلة وذلك بجميع أنحاء الولايات المتحدة. إن خرائط كهذه تستخدم في تصميم نظم التعامل مع المخلفات.



الشكل (1-16): الأمطار المتواصلة مدة 24 ساعة خلال 25 عاماً بالولايات المتحدة (بأجراء عشر البوصة، حيث أن البوصة = 2.54 سم).

إن التطبيق العملي لعاصفة التصميم (design storm) هذه يتمثل في ضرورة أن تكون منشأة معينة مصممة بحيث لا تضخ إلى المياه السطحية الصالحة للملاحة (navigable waters) في أي حدث يقل عن عاصفة التصميم من حيث الحجم والطول. وقد قامت المحاكم بتعريف عام لما يسمى المياه الصالحة للملاحة (navigable waters) على أنه يشمل تقريباً جميع مسارات المياه، حتى تلك التي تكون جافة معظم السنة، إضافة لقنوات الري التي تفرغ مياهها في نهاية المطاف داخل أي نوع من مجاري المياه المستمرة.

تحتاج المصادر الثانوية (nonpoint sources) مثل محطات التغذية المركزة للحيوانات التي لا تطرد مخلفاتها لأسلوب مختلف لمنع وتخفيف الملوثات مقارنة بتلك المتبعة للتخلص من المخلفات عبر أنبوب أو قناة توصيل في حالة المصادر الأولية للتلوث (point sources). واعتباراً من عام 1996 طبقت إجراءات الإدارة الأفضل (Best management practices, BMPs) لتخفيف الآثار الناتجة عن المصادر الثانوية كما تم تعريفها بالتعديلات الواردة بالقانون الفيدرالي للتحكم في تلوث المياه. وبالمقابل فإنه بالنسبة لمصادر التلوث الأولية تطبق طرق تسمى بأفضل تقنية تحكم متاحة (Best Available Control Technology) .

وتعكس هذه المجموعة من المصطلحات مدى الوعي بأن الإجراءات السريعة والبسيطة ليست ملائمة في حالة مصادر الملوثات المنتشرة؛ لذلك فمن الضروري إتباع أسلوب ينظر إلى نظام الإنتاج لتحديد الإجراءات الإدارية التي ستؤدي إلى تخفيض أو القضاء على إمكانية حدوث تلوث، (انظر أيضاً إلى الجزء 5.2.14 للمزيد من المعلومات حول أساليب الإدارة الأفضل BMPs وتطبيقها على إنتاج المحاصيل).

3.16 ملوثات محددة

تنتج المواقع المركزة لتربية الحيوانات الملوثات المحددة التالية في المخلفات الناتجة عن النشاط الأيضي للحيوانات:

1. نيتروجين نتراتى ($\text{NO}_3\text{-N}$)

ينتج عن نشرة النيتروجين العضوي بالمادة النباتية التي تستهلكها الحيوانات. وتفرز الحيوانات مركبات النيتروجين العضوي في الروث على شكل بروتينات وأحماض أمينية.

وتتحول هذه المركبات جزئياً في بداية الأمر بواسطة كائنات دقيقة إلى أيون أمونيوم (NH_4^+) الذى ينتج بسرعة نسبياً أيونات النيتريت (NO_2^-) التي تتفاعل بسرعة لتكون أيونات نترات (NO_3^-). ويحتوى بول الحيوان السائل على يوريا، يمكنها أن تتحلل بسرعة إلى أمونيا (NH_3) و ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، ويمكن للأمونيا إما أن تتطاير في صورة غاز (NH_3) أو أن تتحول إلى NH_4^+ و NO_3^- . وتعرض النترات للغسيل للمياه السطحية أو الجوفية.

2. الفوسفور في صورة (P) أو فوسفات PO_4^{3-}

يوجد في روث الحيوانات بتركيز تتراوح ما بين 0.1 - 0.4% في صورته العضوية وغير العضوية. ويتعين معدنة الصور العضوية إلى صور غير عضوية ليصبح الفوسفور متاحاً للنبات. وبمجرد معدنته، فإن الفوسفور يكون مستقراً وغير متحرك، إلا في حالة حملة كجزء من ترسبات تربة تمت تعريتها (انظر الباب 15).

عند وجود فوسفور من حيوانات المزرعة في المياه السطحية، فإن ذلك يكون عادة نتيجة للنقل المباشر للمخلفات السائلة والصلبة الحيوانية إلى الأجسام المائية. ومن النادر غسل مركبات الفوسفور من التربة بعد إضافتها، إلا إذا نقلت حبيبات التربة ذاتها. تعتبر الزيادة في تركيز الفوسفور في الأساس مشكلة بالنسبة للمياه السطحية. وتسبب تراكيز الفوسفور المنخفضة حتى عند 0.0001 مجم في اللتر تلوثاً للمياه من خلال إثرائها بهذا العنصر (eutrophication). لكن زيادة تركيز الفوسفور يمكن أن تؤثر على خصائص المياه الجوفية أيضاً عندما يكون عمق هذه المياه ضحلاً جداً أو يعلوها طبقة تربة رملية (أيضاً أنظر الباب 14).

3. البكتريا القولونية البرازية (fecal coliform bacteria)

تقاس أعدادها في 100 مليلتر من الماء، وقد تم توثيق وجودها بكميات عالية جداً في الجريان السطحي الناتج عن وحدات الإنتاج الحيواني المركزة. إن هذه الأعداد المرتفعة لها دلالاتها على الصحة العامة وكذلك على الأسماك والأحياء البرية. وشمل معيار جودة المياه حسب وكالة حماية البيئة الأمريكية القواعد التالية، أنه بالنسبة للاستحمام، والسباحة، والنشاطات الأخرى التي تتضمن تلامساً لكامل الجسم، لا يسمح للبكتيريا القولونية البرازية أن تتجاوز أعدادها 200 في 100 مليلتر في خمس عينات مياه تؤخذ على امتداد 30 يوماً، وبحيث لا تتجاوز أعدادها 400 في أي من العينات عند أي وقت من الأوقات. ولاستهلاك المحار (Shellfish) الذي يميل إلى تركيز البكتريا القولونية البرازية، يتعين ألا يزيد متوسط أعدادها على 14، مع إمكانية وجود أقل من 10% من العينات بها أعداد من هذه البكتريا تزيد على 43. أما مياه الشرب فيتعين أن تكون خالية تماماً من البكتريا القولونية. وتشكل البكتريا القولونية البرازية عادة قلقاً بالنسبة للمياه السطحية؛ وهي نادراً ما تؤثر على المياه الجوفية. لذلك، فإنه ما لم تكن الآبار ضحلة جداً ولم يتم تغليفها جيداً، فإن معظم مياه الشرب تكون خالية من هذه الكائنات الدقيقة.

4. المبيدات

قد تشكل المبيدات التي تستخدم في مواقع التربية المركزة للحيوانات مصدر قلق نظراً لإمكانية تسببها في تلوث كل من المياه السطحية والجوفية (انظر الجزء 4.17). فمثلاً، يشيع استخدام المبيد الفوسفوري العضوي كومافوس (Coumaphos) في تغطيس الحيوانات

الداخلة للولايات المتحدة عبر حدودها الجنوبية. وبينما يعتبر مبيد Coumaphos بأنه غير متحرك نسبياً، إلا أنه يتميز ببقائته إذ وجد عند أعماق مختلفة بالتربة عندما لم يتم التخلص منه بشكل صحيح. وهناك مبيدات أخرى، مثل التوكسافين (toxaphene)، لم تعد تستخدم في تغطية الحيوانات.

5. الاحتياجات الكيموحيوية من الأكسجين (BOD)

هو قياس لكمية الأكسجين (تقاس عادة بالكيلوجرامات من O_2) اللازمة للقيام بالأكسدة الكيموحيوية للمادة العضوية في عينة مخلفات لمدة خمسة أيام عند 20 م°. ومع أن الاحتياج الكيموحيوي للأكسجين (BOD) لا يعتبر ملوثاً نوعياً، إلا أنه أحد المؤشرات العامة المهمة لمعرفة مدى إمكانية مادة معينة إحداث تلوث بيئي للمياه السطحية.

ويعتبر هذا المقياس لمدى القدرة على إحداث التلوث مهماً نظراً لأن المخلفات الحيوانية تحتوي عادة على مستوى عالٍ من هذه الاحتياجات (BODs)، تتراوح ما بين 0.45-3.6 كجم لكل 454 كجم من المواد التي تفرزها الحيوانات (أيضاً أنظر إلى الجزء 5.13).

4.16 جودة الهواء

استخدم منتجو الحيوانات تقليدياً قطع أراضي مفتوحة أو حظائر كمواقع رئيسية لاحتجاز الحيوانات، لكن الأساليب الصناعية تتطور نحو إدارة أكثر كثافة، وهو ما قد يتطلب أن تقضى الحيوانات نسبة أعلى بكثير من الوقت داخل منشآت مغلقة. ويحتاج المنتجون أن يعوا أن هذا التغير في النسبة بين الوقت الذي تقضيه الحيوانات في أراضٍ شبه

مفتوحة مقابل الوقت الذي تقضيه داخل منشآت مغلقة له تأثيرات صحية محتملة. فالمواقع التي لا تتوفر فيها تهوية وتحتوى على غازات صادرة عن المخلفات العضوية الصلبة (manures) للحيوانات يمكن أن تكون غير صحية بل وخطيرة. وعند مستويات عالية لغازات المخلفات العضوية، فإن هذه الغازات يمكن أن تصبح سامة على الفور كغازات خانقة (asphyxiants) أو سموم (toxins). إضافة لذلك، فإن نسبة الغازات الصادرة عن المخلفات الصلبة العضوية مقارنة بالهواء الطبيعي لا يشترط أن تكون عالية حتى تلاحظ التأثيرات الصحية على كل من الحيوانات والعاملين. إن الغازات الأربعة ذات الأهمية الأساسية هي كما يلي:

1. ثاني أكسيد الكربون (CO₂)

يوجد تحت ظروف لا هوائية، وهو غاز غير سام لكنه يصبح خانقاً عند مستويات متوسطة، وهو غاز عديم الرائحة ولا يمكن كشفه دون جهاز أخذ عينات؛ لكن بعض المظاهر مثل الصداع والتهتان أو الضيق في التنفس قد تشير إلى ارتفاع مستويات غاز CO₂ وانخفاض مستويات O₂.

2. كبريتيد الهيدروجين (H₂S)

وهو غاز سام وقابل للانفجار ويصبح غازاً خانقاً عند مستويات منخفضة نسبياً، ويوجد تحت ظروف لا هوائية وبمستويات أعلى نسبياً في مخلفات الخنازير مقارنة بمخلفات الأبقار والدواجن. وتعمل رائحته المميزة التي تشبه رائحة البيض الفاسد كإنذار لارتفاع مستوى H₂S - وهي إشارة يتعين أخذها بجدية. وعندما تكون مستويات الرطوبة مرتفعة بقدر كاف،

يمكن لغاز H_2S أن يرتبط بالماء لينتج حمض الكبريتيك (H_2SO_4)، الذي يمكن أن يتسبب في تآكل المعادن إضافة لتأثيراته على ممرات التنفس وأنسجة الرئة. من الدلائل الأخرى على وجود H_2S اسوداد المواد النحاسية، وتكون راسباً أبيض على الفولاذ المجلفن، ناهيك عن الضيق في التنفس.

3. الأمونيا (NH_3)

هذا الغاز سام ويصبح خانقاً عند مستويات منخفضة نسبياً، ويتطاير بسهولة ويمكن أن يتراكم في المباني المغلقة. ويعتبر تآكل المنشآت المعدنية علامة على وجود تراكيز فائضة من غاز (NH_3)، كما أن للأمونيا أيضاً رائحة لاذعة مميزة. ويؤثر هذا الغاز على ممرات الأنف وجهاز التنفس، ويمكن أن يضر بنسيج الرئة في كل من الحيوانات والعاملين.

4. الميثان (CH_4)

يكون هذا الغاز خانقاً عند مستويات عالية جداً، لكنه شديد الاشتعال على مدى واسع من التراكيز ويمكن أن ينفجر تحت ظروف معينة.

يجب افتراض أن أي مبنى مغلق تتراكم به مخلفات عضوية حيوانية صلبة وسائلة سيتولد عنها غازات. لذلك فإن حفر التجميع، والبحيرات الضحلة المغطاة والمواقع المستقبلية للدفق الذي تحمله الخطوط، إضافة لأي مبنى يوجد به أرضية مقسمة إلى شرائح يتعين التعامل معها جميعاً بحذر أو القيام بتهويتها قبل دخولها. كذلك، فإن أية مادة عضوية صلبة (سماد عضوي) لم يتم تحريكها لفترة من الوقت تميل إلى وجود تراكيم غازات فيها ستنتقل عندما يتم تحريكها أو هزها. وعموماً، فإن الحل المقبول لمشكلة تأمين صحة الحيوان

والعاملين هو توفير تهوية كافية أو دفع الهواء بقوة لتوفير هذه الظروف. إضافة إلى ذلك، فإن العمال الذين يتعين دخولهم في حفر التجميع العميقة أو أية منشأة أخرى يتراكم في داخلها غازات تزيد تراكيزها عن تلك التي في الهواء الجوي يجب أن يستخدموا كمادات تنفس.

5.16 مصير الملوثات

1.5.16 النترات

كصورة أيونية للنيتروجين، فإن ($\text{NO}_3\text{-N}$) تتميز بدرجة ذوبانية عالية في الماء وهي متحركة جداً، إذ تتحرك مع تدفق الماء. ويحمل وجود النترات في المياه السطحية والمياه الجوفية مضامين مختلفة.

فالمياه السطحية التي تحتوي على مستويات متزايدة من (NO_3^-) تتعرض عادة للإثراء الغذائي (eutrophication) الذي يتسبب في تدنى جودة الماء لأغراض الشرب. من جهة أخرى، فإن المياه الجوفية يمكن أن تتلوث مباشرة عن طريق مياه مرتشحة (leachate) محملة بالنترات. كذلك، فإن وجود نترات بمياه الارتشاح يقلل أيضاً من جودة مياه الشرب. وبالنسبة للاستهلاك البشري، تعتبر المستويات التي تزيد على 10 مجم في اللتر (في صورة $\text{NO}_3\text{-N}$) غير مقبولة بينما ينظر إلى المستويات التي تزيد على 100 مجم في اللتر على أنها غير مناسبة لاستهلاك الماشية. (للاطلاع على مزيد من المناقشات حول NO_3^- ، انظر إلى الجزء 2.14).

في المياه السطحية التي تتعرض للإثراء (زيادة في نمو النباتات المائية)، يتناقص محتواها من الأوكسجين (O_2) الذائب بمجرد أن يصبح نمو النبات في حالة من التحلل، مما ينتج عنه

انخفاض في حياة الحيوانات المائية. أما إذا تناقص مصدر NO_3^- أو انعدم تماماً، فإن تركيز NO_3^- يتناقص نتيجة للتخفيف والتحول إلى صورة أخرى عن طريق عملية الدنترة التي تقوم بها كائنات دقيقة غير ذاتية التغذية والتطابير في صورة N_2 .

بمجرد غسل NO_3^- من الطبقات العليا للتربة التي تحتوي على مستويات أعلى من المادة العضوية إلى نطاق التربة غير المشبع (vadoze zone) الذي يحتوي على قليل من المادة العضوية، فإن القليل من الدنترة NO_3^- يمكن حدوثها. لذلك وبمجرد اختراق NO_3^- النطاق الفعال لنمو جذور النبات، يمكنها في نهاية المطاف أن تنقل إلى الطبقات الحاملة للمياه (aquifer) من خلال التدفق المشبع أو غير المشبع. وتباين كثيراً فترة الانتقال للوصول إلى المياه الجوفية وأيضاً درجة التلوث إذ يعتمد ذلك على خصائص التربة والطبقة الحاملة للمياه. وتسهم التربة خشنة القوام والضخالة في منسوب الماء الحر في جعل زمن الرحلة قصير، وهي بذلك تزيد من احتمالية تلوث المياه الجوفية، وإذا ما وصلت النترات إلى المياه الجوفية، يصبح من الصعب جداً تخليص الخزان المائي من التلوث. ويوضح الشكل (16 - 2) الحركة الممكنة للنترات (NO_3^-) خلال تربة مسامية.

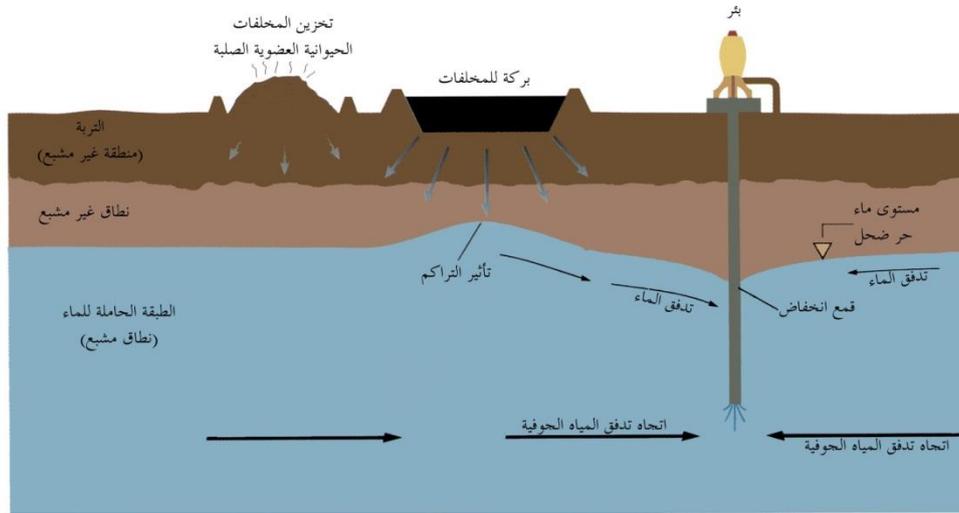
2.5.16 الفوسفور

الفوسفور الناتج عن المخلفات الحيوانية غير متحرك نسبياً ويميل إلى الإدمصاص السريع على حبيبات التربة، ونتيجة لذلك، فإن الفوسفور (P) عموماً لا يرحل إلى المياه الجوفية إلا إذا كانت طبقة المياه قريبة من السطح (أقل من 3 أمتار)، وأن نوع التربة رملي بدرجة كبيرة. لكن مصير وتأثير الفوسفور (P) الناتج عن المخلفات الحيوانية في المياه

السطحية متباين جداً. وكمغذ ضروري للنبات، فإن الفوسفور المضاف للمياه السطحية يمكن أن يحور بصورة دراماتيكية البيئة الخاصة بالأسمك وكائنات أخرى من خلال تخفيض نمو الطحالب. وكما هو في حالة النترات (NO_3^-) فإنه عند موت الطحالب وتحللها، ينخفض محتوى الماء من الأكسجين الذائب بشدة. وبحدوث تحلل للكتلة الحيوية بدرجة كافية، فإن الجرى المائي أو البحيرة قد تتحول إلى بيئة غير ملائمة للكائنات الهوائية. إضافة لذلك، فإن الفوسفور (P) يميل إلى البقاء ضمن رسوبيات البحيرة لفترة طويلة ولذا فمن الصعب التخلص منه. (لمزيد من المناقشات حول الفوسفات كملوث، أنظر الجزء 3.14).

3.5.16 البكتيريا القولونية البرازية

تشكل البكتيريا القولونية البرازية مصدر قلق لموارد المياه السطحية (انظر الجزء 1.4.13 والجزء 2.3.19). وبينما توجد البكتيريا القولونية طبيعياً في مصادر مثل الأحياء البرية فإن وجود تجمعات كبيرة من الحيوانات يمكن أن يسبب زيادة أعداد البكتيريا القولونية بشكل كبير. وعادة لا تعيش البكتيريا القولونية البرازية لفترات طويلة من الزمن في التربة أو الماء، إذ يمكن أن تمتد فترة حياتها عدة أيام أو عدة أسابيع، حسب الظروف البيئية. وفي مياه الشرب، قد يؤدي التعقيم عن طريق الكلورة إلى تكوين مركبات ثلاثي الهالوميثان (trihalomethane, THMs) (التي يجب ألا يزيد تركيزها في مياه الشرب على 0.10 مجم في المليلتر). وتتكون هذه المركبات في وجود مادة عضوية تلازم عادة البكتيريا القولونية البرازية. ويعتقد أن هناك ارتباطاً لمركبات ثلاثي الهالوميثان كمسبب للسرطان في حيوانات المعامل ولذا يتعين تفادي وجودها في مياه الشرب (انظر الجزء 5.20).



الشكل (16-2): الارتشاح المحتمل للملوثات في الترب المسامية.

6.16 رصد وكشف الملوثات

يجري اختبار المياه لتحديد فيما إذا كانت المياه السطحية أو الجوفية قد تلوثت بواسطة الجريان السطحي أو مياه الغسيل الصادرة عن عمليات تغذية مركزة للحيوانات (CAFO). ويتعين أن تكون P , NO_3 , والبكتيريا القولونية، pH ، والأملاح الذائبة الكلية عند الحد الأدنى. وقد يلزم أيضاً إجراء تحاليل إضافية للمركبات العضوية المتطايرة، والعناصر الفلزية، والمبيدات.

ويؤسس الاختبار أولاً نقطة مرجعية تستخدم لمقارنة جودة المياه. وبذلك يمكن أن يحدد المالك أو الفني أو الوكالة المختصة متى، أو فيما إذا تغيرت جودة المياه مع الزمن. ونظراً لإمكانية تأثير صحة الإنسان والحيوان نتيجة لتدني جودة المياه، فإن الاختبار يعتبر قياساً

مهماً لتحديد وجود ومدى أي تدهور في جودة المياه. وتؤخذ عينات من البئر الواقع داخل حدود المنشأة بصورة دورية، وإذا ما أمكن من آبار مجاورة تماماً للمنشأة. ويكون عادة أخذ العينات سنوياً كافيًا؛ لكنه يتعين إجراء اختبارات إضافية إذا ما تم اكتشاف أي مشكلة.

7.16 المنع و الإصحاح

إن التقليل من الآثار السلبية للتلوث، الذي تم تحديده في قانون السياسة البيئية القومية لعام 1969 يشمل الطرق التالية:

1. تفادي إحداث تلوث تماماً من خلال منع أي فعل أو أفعال محددة.
 2. التقليل إلى الحد الأدنى من التأثير عن طريق تحديد مستوى تطبيق الفعل أو شدته.
 3. معالجة تأثير الفعل عن طريق الترميم أو التأهيل أو استرجاع البيئة المتضررة.
 4. تخفيض أو إزالة الآثار السلبية مع الزمن عن طريق عمليات المحافظة أثناء فترة نشاط المسبب.
 5. التعويض عما ترتب عن الفعل عن طريق الاستبدال أو توفير موارد أو بيعات بديلة.
- ويتم عادة تلخيص طرق التحسين الخمسة هذه على أنها: المنع (prevention)، والتقليل إلى الحد الأدنى (minimization)، والترميم (repair)، والمحافظة (preservation) والتعويض (compensation).
- إن ممارسات الإدارة المثلى (BMPs)، التي تكون فعالة في تلطيف آثار التلوث الناتج عن المخلفات الحيوانية، هي الطرق أو الاحتياطات أو الإجراءات المصممة لمنع ضخ المخلفات أو تقليلها، وتشمل هذه الإجراءات خطوات تحكم وتشغيل وصيانة إنشائية وغير إنشائية.

1.7.16 اختيار موقع المنشأة

إن الوقاية من مشكلة معينة من البداية يكون عادة أكثر فعالية وأقل تكلفة من تصحيحها. وعلى سبيل المثال، فإن تحديد موقع منشأة لحجز حيوانات مثل حيوانات إنتاج اللبن، أو محطة تغذية، أو مكان لتربية الخنازير، أو مزرعة للزراعات المائية، في منطقة تتميز بأنها مقاومة هيدروجيولوجيا للفيضان أو الغسيل يكون سهلاً نسبياً وعموماً غير مكلف. وعند اختيار موقع لمنشأة من هذا النوع، تكون المواقع المفضلة هي تلك التي يتوفر فيها:

1. موقع المنشأة بكاملها خارج نطاق أرض تتعرض للفيضان خلال 100 عام.
2. تكون التربة ذات محتوى مرتفع نسبياً من الطين (غير منفذ) - على الأقل في المناطق حيث ستوضع برك المخلفات (الحظائر، مثلاً يجب أن تكون فوق ترب لا يقل قوامها عن طمي رملي).
3. يجب أن تكون المنشأة بعيدة بقدر كاف عن المناطق السكنية أو المباني العامة لتفادي أي احتياجات بسبب المضايقة.

2.7.16 خطة إدارة المخلفات

من المهم لمالك المنشأة ليس فقط إتباع أساليب الإدارة المثلى (BMPs)، ولكن أيضاً أن يكون قادراً على توثيق كيف وأين اتخذت هذه الإجراءات. إن توثيق وتقييم نظام المخلفات يجب أن يتم ترتيبه في وثيقة واحدة تسمى خطة إدارة المخلفات (waste management plan). ولا تحتاج خطة إدارة المخلفات أن تكون معقدة جداً، بل يتعين أن تضم بعض العناصر الأساسية:

1. رسم المباني الرئيسية للمنشأة موضحاً فيها مستويات الارتفاعات المحيطة بها، وأي قنوات مياه، جافة أو غير ذلك.

2. موقع السهل الذي يتعرض لفيضان كل 100 عام بالنسبة للمنشأة.

3. أي حسابات أجريت لكميات مياه الجريان السطحي التي يجب احتواؤها من مطر مستمر مدة 24 ساعة متواصلة كل 25 عام.

4. أي حسابات أجريت عن كميات المخلفات السائلة والصلبة التي تفرزها الحيوانات ويتعين إدارتها معاً مصحوبة بأي زيادة متوقعة في أعداد الحيوانات.

5. أحجام المنشآت الأساسية لنظام إدارة المخلفات (حظائر الحيوانات، أنابيب أو قنوات التحويل أدوات عزل المواد الصلبة، البرك والبحيرات الضحلة، الأرض الزراعية المخصصة لإضافات المياه العادمة المخصبة بالمغذيات) وكميات المخلفات المتوقع التعامل معها.

6. الطرق التي يمكن استخدامها للتقليل إلى الحد الأدنى من حركة النترات إذا تقرر قفل المنشأة أو بيعها.

7. أية معلومات حول حصر التربة، جودة مياه الآبار، أو أي بيانات أخرى ذات علاقة.

1.6 8 عناصر نظام المخلفات

تنقسم عناصر نظام المخلفات إلى أربعة أنواع عامة: الجمع (collection)، والتوصيل (conveyance) والتخزين (storage) وإعادة الاستخدام (reuse)، وهذه العناصر موضحة في الشكل (16-3).

1.8.16 الجمع (المواد الصلبة)

تعتبر إزالة المواد الصلبة الجافة نسبياً، أو روث الحيوانات من أماكن حجز الحيوانات

مسألة مباشرة وبسيطة جداً، تحتاج لعمالة ومعدات. ويتعين إزالة الروث من حظائر الحيوانات إلى عمق يتراوح ما بين 2-5 سم، ويمكن القيام بذلك باستخدام آليات ثقيلة عندما تكون الحظائر خالية. وحسب الأدلة المتوافرة فإن هناك طبقة بيولوجية خاتمة تتكون تحت الروث، وإذا ظلت دون أي اضطراب، فإن هذه الطبقة الخاتمة يمكن أن تخفض من احتمالية حدوث غسيل (Leaching).

2.8.16 التوصيل (المواد السائلة وشبه السائلة)

ينقل نظام من الأنابيب أو القنوات المياه العادمة الناتجة عن العمليات اليومية - مثل ردهات الحلب، وحظائر الحجز، وفي حالة بعض المنشآت، الممرات - إلى نقطة مركزية حتى يمكن تخزين المخلفات السائلة ومعاملتها أو إضافتها للأراضي الزراعية. ويجب أن تصمم الردهات والحظائر و الممرات بحيث يتم بسهولة جمع المخلفات السائلة وتوجيهها إلى داخل قنوات مبطنة أو حفر أو أنابيب. وبشكل متزايد تتضمن تصاميم المرافق الحيوانية الحديثة لعمليات الحلب وتربية الخنازير إدخال نظام غسل (Flush system) ضمن نظم التخلص من المخلفات. وحيث أن نظم الغسل تولد أحجاماً أعظم من المياه العادمة مقارنة بنظم الكشط العتيقة، فإن استخدام قنوات توصيل لهذه المياه ذات أحجام مناسبة يصبح أكثر أهمية.

3.8.16 مياه الجريان السطحي الناتجة عن عاصفة مطرية

يختلف جمع وتوصيل مياه الجريان السطحي لعاصفة مطرية من عدة جوانب عن الجمع الروتيني للمخلفات السائلة المتولدة، مثلاً، بواسطة العمليات المصاحبة للحلب. ويعتبر استيعاب مياه الجريان السطحي لعاصفة أكثر صعوبة نظراً لأن تكرار حدوثه وأمدّه، وحجمه

تتحكم فيه بدرجة أساسية الأمطار الطبيعية (الشكل 4-16). لهذا فإن العامل الرئيسي المحدد لأغراض التخطيط والتصميم يتوقف على طبيعة الأمطار. إن جميع أنظمة الصرف يجب أن تصمم لتحمل مياه الجريان السطحي الناتج عن عاصفة مطرية تستمر مدة 24 ساعة متواصلة، وتحدث مرة كل 25 عاماً.

4.8.16 التخزين

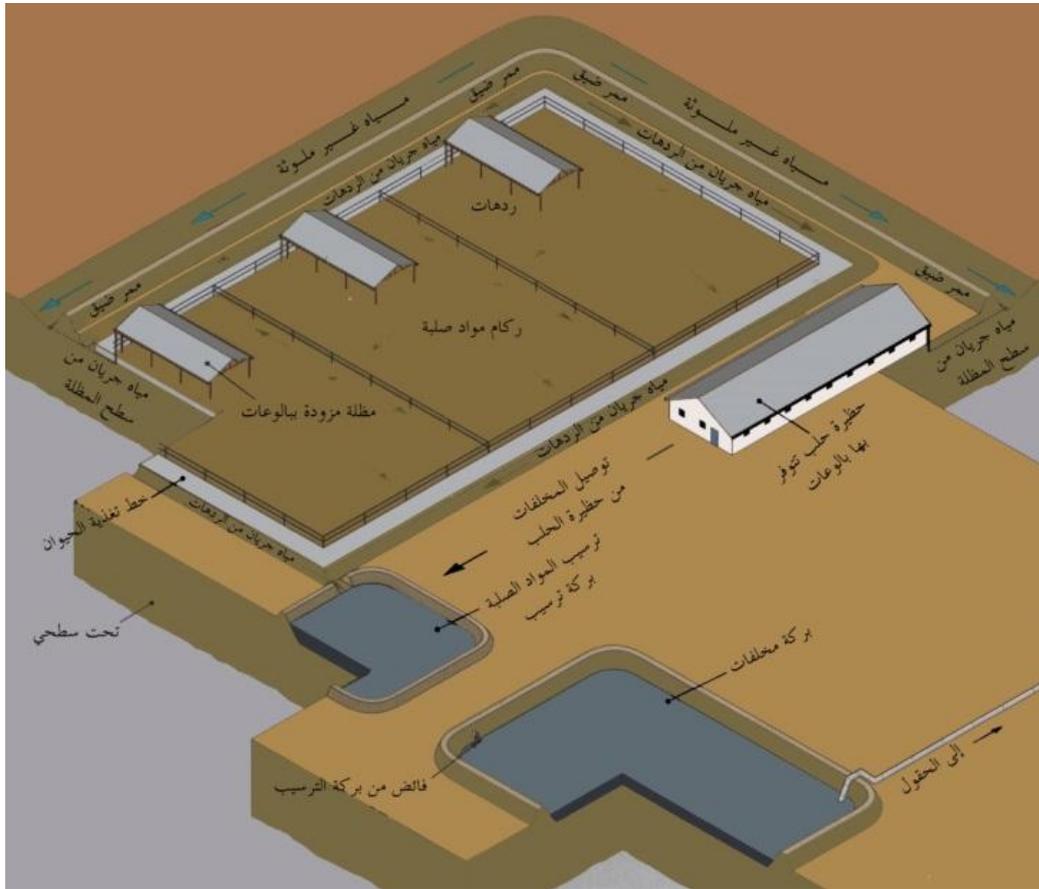
تستخدم برك التبخير أو برك التخزين لاحتواء مياه الجريان الملوثة بالنيتروجين التي يمكن أن تكون خليطاً من مخلفات صلبة وسائلة ناتجة من حظيرة معينة. وتسمح مدة الاحتفاظ بهذا الخليط وقتاً للتأثير الميكروبي لتكسير مواد المخلفات وتسمح بحدوث تطاير غاز NH_3 ، ودنترتة NO_3^- وتبخر السوائل.

يتعين فرز المواد الصلبة عن المواد السائلة بواسطة شبكات الترشيح أو الترسيب قبيل دخولها إلى بركة التخزين، وبذلك تخفف مما تحمله من مغذيات وتقلل إلى الحد الأدنى من تكرار عمليات التنظيف. ويمكن أن يكون تصميم البركة إما هوائياً أو لا هوائياً. ويكون بالبركة الهوائية مستوى عال من الأكسجين كاف لدعم الميكروبات التي تحتاج للأكسجين، بينما تدعم البرك اللاهوائية (عملياً تكون خالية من الأكسجين) بالدرجة الأولى التحلل الميكروبي الذي لا يعتمد على الأكسجين. كما يمكن أيضاً أن تصمم البرك الهوائية لتكون برك تبخير لا يخزن فيها الماء، لكنه يحجز فقط حتى يتبخر. ويوضح الشكل (5-16) قطاعات لبرك هوائية ولا هوائية.

5.8.16 غلق المرفق لأسباب بيئية

عند الغلق، تزال المخلفات من حظائر الحيوانات وبرك التخزين حتى لا تبقى أي

إمكانية لحدوث مزيد من التلوث. ويجب كشط الروث من حظائر الحيوانات حتى تتكشف التربة المعدنية ومن ثم يضاف الروث المزال للأراضي الزراعية أو يتم التخلص منها بطريقة مناسبة. كما يتعين وبنفس الكيفية إزالة أي مخزون من روث الحيوانات. كذلك فإنه يجب تجفيف برك التبخير أو التخزين عن طريق البحر، أو أن يتم ضخ محتوياتها السائلة فوق الأراضي الزراعية.



شكل (16-3): تدفق عام للمخلفات من مرفق لتربية الأبقار الحلوب.



شكل (16-4): تكويم الروث في ردهات حلب الأبقار (كما هو موضح في الشكل 16-3) يسهل تدفق مياه الجريان الملوثة إلى داخل البرك المحددة للتخزين أو المعالجة. أما في الردهة الموضحة أعلاه، أدى وجود منخفض في الردهة إلى تجمع المياه، وهو ما ساهم ليس فقط في خلق مشاكل لأقدام الأبقار التي تمشي في الوحل، بل حفزت أيضاً غسل الملوّثات وانبعث الروائح الكريهة.

9.16 الإضافة للأرض والتخلص من المخلفات

تعتبر إضافة المخلفات للأرض واحدة من أحسن الطرق للتخلص من روث الحيوانات أو وحل روث الحيوانات الزائد (انظر الجزء 4.10 لمزيد من المناقشة حول الإضافة للأرض كما هي مطبقة في حالة المخلفات الصلبة للصرف الصحي الحضري). وهذه الطريقة تعمل في ثلاثة نطاقات: (1) أن المحاصيل سوف تمتص المغذيات التي توجد بوفرة في وحل الروث، (2) أن الفعل الميكروبي سوف ينتج عنه دنترتة جزئية (3) أن معدلات الإضافة

سوف تكون منخفضة نسبياً لأن المغذيات الزائدة توزع فوق مساحة واسعة. ومع توفيرها لبعض من العناصر المغذية الضرورية للإنتاج الزراعي، فإن الروث يعتبر أيضاً مادة محسنة للتربة ومفيدة لتسهيل حرارة الأرض، وزيادة التهوية، ورفع قدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة، وزيادة المادة العضوية وزيادة معدل الارتشاح والنشاط الميكروبي. لكنه يتعين الإشارة إلى أن الإضافات للأرض لها بعض العيوب، منها انتشار الأعشاب الضارة، وإمكانية تراكم الأملاح والتسبب في إضافة تراكيز عالية من المغذيات التي قد تغسل من التربة وتصبح ملوثات مرة أخرى .

وقبل إضافة كميات كبيرة من الروث و / أو وحل الروث، يتعين معرفة ما يلي:

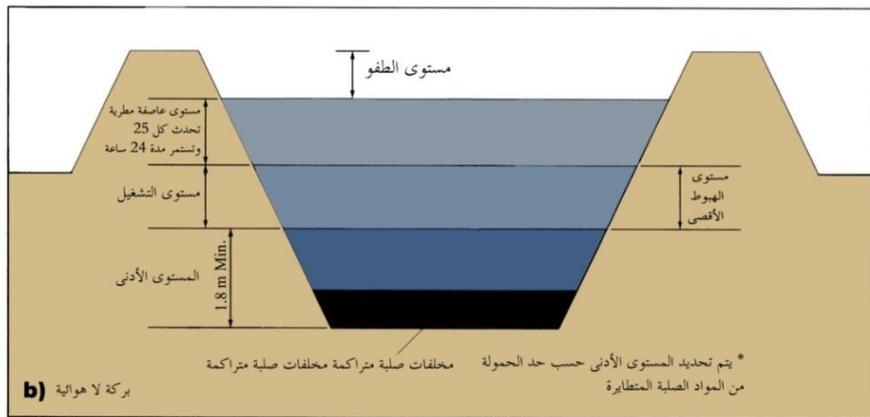
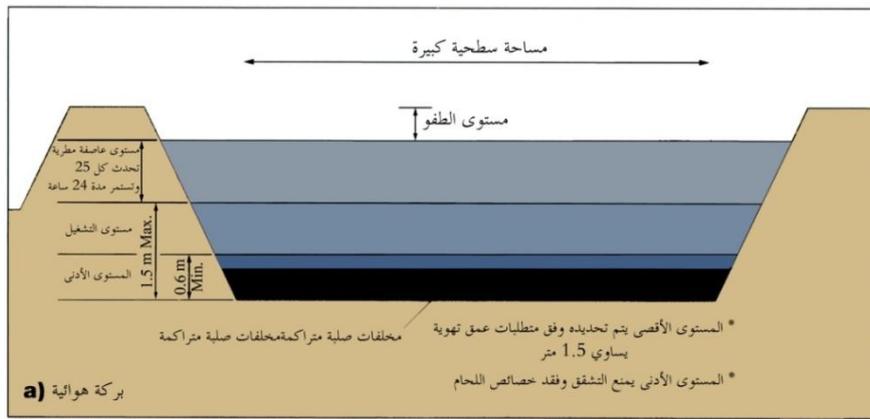
- (1) المحتوى النسبي من المغذيات. (2) معدل المعدنة (معدل التحلل). (3) تركيز الأملاح.
- (4) تركيز ونوع العناصر السامة. (5) التوقيت وطريقة الإضافة المناسبة. (6) كمية ونوع بذور الحشائش.

يمكن أن يتباين محتوى الروث من المغذيات بدرجة كبيرة، حسب عمر الحيوان المستهدف ومعدل استهلاك العلف، ونوع العليقة، وأساليب التعامل مع الروث وطرق تخزينه قبل إضافته للأرض.

وهناك حقيقتان مهمتان بشكل خاص عند تحديد معدل الإضافة من الروث: (1) المحتوى الرطوبي للروث الذي يؤثر مباشرة على النسبة المثوية للمغذيات. (2) فقدان النيتروجين (N) في صورة (NH₃) عندما يجف الروث. ويوضح الجدول (16 - 1) محتوى روث طازج لأبقار حلوب من المغذيات.

جدول (16 - 1) محتوى روث طازج من المغذيات (مرفق حلب متوسط الحجم)

المغذيات (كجم طن مٲري ⁻¹)				المصدر
البوتاسيوم (K ₂ O)	الفوسفور (P ₂ O ₅)	النيتروجين (N)	الرطوبة (%)	
6.00	2.30	5.60	79	مرفق ألبان
2.30	0.05	2.40	91	مرفق ألبان سائلة



شكل (16 - 5) مقاطعات في البرك (a) قطاع في بركة مخلفات هوائية (b) قطاع في بركة مخلفات لا هوائية.

توضح البيانات بالجدول (16-2) معدلات الإضافة لتوفير قدر محدد من (N). ويساوي معدل معدنة الروث النسبة المئوية المتيسرة لامتناس النبات سنوياً. وقد تم توضيح هذا المعدل كسلسلة تحلل من ثلاثة مستويات للنتروجين وذلك عند وقت الإضافة. إن الكمية المضافة كل عام هي كمية الروث التي يتعين إضافتها للمحافظة على معدل معدنة سنوية تساوي 220 كجم من النتروجين للهكتار في السنة عند معدل تحلل ونسبة نتروجين (N%) محددتين. وقد تدفع الظروف المناخية المحلية مثل الحرارة المفرطة أو المقاومة، معدل التحلل للتغير بدرجة كبيرة، وهو ما يؤثر أيضاً على معدل الإضافة. ويتعين ملاحظة أن كمية الروث التي يلزم إضافتها تتناقص كل عام، ويعود هذا الانخفاض إلى النتروجين المتبقي من الإضافات السابقة.

كما يتعين أيضاً ملاحظة أن معدل التحلل يكون أقصى ما يمكن خلال عام الإضافة الأولى، لكنه ينقص بحدّة في السنوات التالية. إن أكثر الطرق فعالية للمحافظة على قيمة المغذيات بالروث الحيواني تعتمد على الطريقة التي تضاف بها هذه المواد للأراضي الزراعية، فإذا ما أضيفت في صورة وحل، يتعين حقنها بالطبقة تحت السطحية من التربة؛ لكن إذا أضيف الروث في صورة صلبة فوق سطح التربة، فإن التربة المعاملة يتعين حرثها وتقليبها على الفور. إن ذلك يقلل من الروائح الكريهة، وفقد المغذيات بالتطاير، وكذلك تقليل إمكانية تلويث المياه الجوفية عن طريق الجريان.

جدول (2-16) متوسط تحليل روث الحيوانات ومعدلات الإضافة للمحافظة على مستوى
220 كجم (N)/هكتار

نوع الروث	معدل التحلل كل عام (%) سنة							
	السنة الأولى	السنة الثانية	السنة الثالثة	السنة الرابعة	السنة الأولى	السنة الثانية	السنة الثالثة	السنة الرابعة
بقري حديث (N) %3.5	75	15	10	7.5	8.5	8.1	7.9	7.9
من موقع الحلب (جاف) %2.5 (N)	40	25	6.0	3.0	22.5	15.7	14.8	13.9
من موقع الحلب (جاف) %1.5 (N)	35	15	10.0	7.5	42.7	30.8	27.4	25.6
من موقع الحلب جاف (N) %1.0	20	10	7.5	5.0	112.3	67.4	55.0	53.2

10.16 ميكروبيولوجيا تحليل المخلفات الحيوانية

في الطبيعة، تستهلك الحيوانات المواد النباتية في المكان الذي تنمو فيه وتتنوع فضلاتها فوق الأرض، وبذلك فإن الإنتاج والاستهلاك والتحلل متصلة ببعضها. لكن، وفي الإنتاج الحيواني الحديث، تستهلك الحيوانات العليقة المزروعة في حقول تكون عادة على مسافات بعيدة جداً من محطات التسمين وإنتاج الحليب حيث يتراكم الروث كمخلفات حيوانية. لذلك فإن الصلة بين مواقع الإنتاج والاستهلاك والتحلل لم تعد موجودة. إن المخلفات الحيوانية، بما في ذلك الروث ومادة الفراش، تعمل كمادة غذائية أولية (substrate) للكائنات الدقيقة، خاصة البكتيريا والأكتينوميثاسيتات والفطريات (انظر الباب 4). ويؤدي تحلل المخلفات في نهاية الأمر إلى معدنة الصور العضوية لكل من P, S, N, C إلى صور غير عضوية. وعكس المعدنة، يحدث التخليق (assimilation) أو التثبيت البيولوجي

(immobilization) لهذه العناصر ضمن الكتلة الحيوية. وينتج عن المعدنة طاقة ومركبات مؤكسدة، بينما يحتاج التخليق طاقة وينتج عنه مركبات مختزلة، ويحدث تراكم للأيونات غير العضوية فقط عندما تفوق المعدنة التثبيت البيولوجي.

تتباين مرافق تربية الحيوانات، ومخلفاتها ونظم التعامل مع هذه المخلفات، لكن هناك معالم مشتركة فيما بينها كما هو موضح في الشكل (16-3). تنتج مرافق تسمين الحيوانات وإنتاج الألبان روثاً، يشمل البراز والبول. وقد يشمل ذلك أيضاً مواد فراش كربونية مثل القش ونشارة الخشب. ويتم التعامل عادة مع مخلفات مرافق التسمين كمواد صلبة بآلات خاصة وتضاف للأراضي الزراعية، أو يتم تخميرها (أنظر الشكل 20-9)، أو يتم تخزينها. أما مخلفات مرافق الألبان فيتم عادة التعامل معها بواسطة نظم غسل بماء دافق ويتم التخلص منها في برك ضحلة (Lagoons)، إما أن تكون مهوأة أو غير مهوأة (anaerobic). ويمكن تهوية النظم المهوأة عن طريق ضخ الهواء عبر أنابيب، أو بواسطة الفطريات، أو بالانتشار السلبي من الهواء الجوي. وعلى الرغم من أن المسارات الكيموحيوية الهوائية واللاهوائية مميزة إلا أن مواقع صغرى هوائية ولا هوائية تحدث دائماً ف كلا النظامين. فحتى مع دفع الهواء، مثلاً، في البرك المهوأة (aerobic) تكون الظروف لاهوائية (anaerobic) عند القاع حيث تتراكم المواد العضوية الصلبة (sludge).

وبغض النظر عن طبيعة مخلفات الحيوان أو نظام التعامل مع هذه المخلفات، فإن التخلص منها بغرض التحكم في التلوث يجب أن يشمل الأهداف التالية:

1. تخفيض الكتلة الكلية وحجم المخلفات، أساساً بتكوين غاز CO_2 من خلال عمليات

الأيض للمركبات العضوية.

2. إنتاج مركبات عضوية مستقرة، خاصة الدبال بنسبة C:N متزنة واحتياج لأكسجين بيولوجي (BOD) منخفض.

3. التقليل إلى الحد الأدنى من فواقد (N) في صورة (NO_3^-) للمياه السطحية والجوفية.

4. التقليل إلى الحد الأدنى من فواقد (N) في صورة (NH_3) للهواء الجوي.

5. التقليل إلى الحد الأدنى من فقد (P) للمياه السطحية.

6. التقليل إلى الحد الأدنى من الفواقد الغازية للمركبات المختزلة، مثل CH_4 و H_2S .

7. التخلص من الناتج النهائي فوق سطح الأرض للأغراض الزراعية.

لننظر إلى كيفية التعامل مع مخلفات في موقع نموذجي لتسمين الحيوانات ولنفترض أن المخلفات تتكون من براز، وبول وفرشة القش. لنفترض أيضاً أن الفضلات قد تم كشطها ميكانيكياً ونقلت إلى مكان للتخزين أو تم غسلها ودفعها إلى بركة هوائية أو لا هوائية. ويتعين الإشارة هنا إلى أن الجزء البرازي يحتوي على علبقه غير مهضومة وخلايا ميكروبية حية وميتة، إضافة إلى خلايا منسلخة من القنوات الهضمية للحيوان، حيث يكون بعض من هذه المواد رطباً وتعتبر اليوريا مكوناً أساسياً للبول، بينما تكون الفرشة غالباً من مادتي السليلوز واللجنين. كذلك، فإن الماء أيضاً يشكل مكوناً كبيراً ومتغيراً.

تمثل المخلفات وليمة متنوعة للكائنات الحية الدقيقة مكونة من جزيئات صغيرة وكبيرة، في صورة متيسرة أو غير متيسرة، وتشمل الجزيئات الكبيرة المواد عديدة التسكر (polysaccharides) والبروتينات والدهون والأحماض النووية وبوليمرات عضوية أخرى. وقد

تكون هذه الجزئيات حرة في الخليط، لكنها على الأرجح تكون مازالت مرتبطة داخل تركيبات خلايا النبات والخلايا الميكروبية والحيوانية، ومن أمثلة المواد عديدة التسكر السليولوز والنشا و(peptidoglycan) المكونة لخلايا الجدران البكتيرية والكيتين Chitin المكون لجدران الخلايا الفطرية وحمض التايكويك (teichoic acid) أحد مكونات جدران خلايا البكتيريا موجبة الصبغة (Gram-positive)، ومركب عديد التسكر الدهني Lipopolysaccharide أحد مكونات الغلاف الخارجي للبكتيريا سالبة الصبغة جرام (gram-negative). وتشمل البروتينات أنزيمات من أصل نباتي أو حيواني أو ميكروبي، أما الدهون فهي مكونات للأغشية، والأحماض النووية تنشأ عن مادة وراثية. وتعتبر الجزئيات الصغيرة، التي تشمل السكريات، والسكريات الأمينية والأحماض الأمينية والأحماض العضوية، والكحولات والنيوكليوتيدات مكونات قابلة للذوبان وهي جزء من سيتوبلازم الخلايا أو نواتج التحلل المائي للجزئيات الكبرى.

تعتبر البكتيريا غير ذاتية التغذية (heterotrophic) المحلل الرئيسي للمخلفات الحيوانية، لكن البكتيريا ذاتية التغذية الكيميائية (Chemautotrophs) تلعب دوراً أيضاً. ويكون التحلل في البداية استمراراً لهضم بدأ فعلياً في معدة الحيوان، لذا فإن الأنواع البكتيرية التي يفرزها الحيوان هي التي تسود أثناء المراحل المبكرة للتحلل. ويستمر التحلل بواسطة البكتيريا والأكتينومايسيتات والفطريات التي تعتبر، كمجموعة، قادرة على تفكيك جميع المركبات الموجودة في المخلفات عبر مسارات متنوعة.

ولاستخدام مادة أولية محددة، قد يحتاج الكائن الدقيق إنزيمات تحليل مائي من

خارج الخلية، ونقل بروتينات لنواتج التحلل المائي، وإنزيمات مسارات الأيض الهدمي المركزية إلى داخل الخلية.

يفقد بعض من الكربون في صورة CO_2 و CH_4 ، بينما يتم امتصاص معظم النيتروجين. لذلك فمن المعالم الهامة في مسار تحلل المخلفات أن النسبة (C:N) تتناقص مع الزمن. وإذا ما تذكرنا أن هدف التخلص من المخلفات هو تخفيض الفواقد من P, S, N, C في صور ضارة أو ملوثة. لذلك، عندما يتم تثبيت هذه العناصر ضمن الكتلة الحيوية الميكروبية، فإنها تكون محمية مؤقتاً من هذا الفقد. ومن بين هذه المركبات يعتبر P, N العنصرين الأكثر احتمالاً في إحداث تلوث.

يحدث التحلل الميكروبي لمركبات النيتروجين مثل البروتينات، والأحماض النووية وعديدة التسكر الأمينية خارج الخلية من خلال التحلل المائي إلى أحماض أمينية و Nucleotides وسكريات أمينية. إن بعضاً من هذه المركبات يتعرض لعمليات أيضية لتوليد الطاقة، بينما يستخدم البعض الآخر في التخليق الحيوي. وتتكون مخلفات الناتج الأيضي للنيتروجين من NH_3 أو NH_4^+ . وتتميز أنواع واسعة من الكائنات غير ذاتية التغذية، بما في ذلك الهوائية واللاهوائية، بأنها منتجة للأمونيا (ammonifiers)، ويعتبر ظهور (NH_4^+) مؤشراً لزيادة (N) مقارنة بالكربون المتاح. وفي حالة وجود الكربون بكثرة، فإن مزيداً من الكتلة الحيوية سيتم تخليقها وأن النيتروجين سيتم شده في صورة عضوية. ونظراً لأن الخلايا الميكروبية تتكون من 50% كربون (C) و 5% نيتروجين (N) على أساس الوزن الجاف فإن حدوث معدنة النيتروجين (N) من مواد أولية ذات نسب C:N أكبر من 25:1 لا يمكن حدوثه.

يمكن لأيونات الأمونيوم المتحررة بواسطة كائنات النشطرة (ammonifiers) أن يتم امتصاصها بواسطة الكائنات الدقيقة، وتعتبر النترة، وهي عبارة عن أكسدة أيون الأمونيوم إلى النيتريت ومن ثم النترات بواسطة الكائنات ذاتية التغذية الكيميائية (Chemoautotrophs). نهاية هامة لأيون NH_4^+ . وتتميز النترات الناتجة بأنها شديد الذوبانية، وهو ما يجعلها ملوثاً محتملاً للمياه ويتسبب في وجود الميثيموجلوبين بالدم (methemoglobinemia)، وتعرض النترات لمصائر مختلفة، إذ يمكن أن تغسل إلى المياه الجوفية، أو تمتص بواسطة الكائنات الدقيقة أو النباتات أو تتعرض للذنترة (انظر أيضاً الجزء 2.14).

يعتبر اللجنين المتراكب مع السليلوز مكوناً رئيساً للروث الحيواني، ويشق من المادة النباتية في عليقه الحيوان أو مرقده. ويتميز اللجنين بأنه مقاوم جداً للتحلل. وبذلك، فبمجرد تعرض المواد سهلة التحلل للعمليات الأيضية، تصبح المخلفات غنية بمادة اللجنين. واللجنين مركب متعدد الفينولات (polyphenol)، وهو بوليمر مكون من وحدات معقدة تضم حلقات أروماتية. ويعتبر تركيبه شديد التعقيد لدرجة أن تحلله يتطلب مجموعة متنوعة من الإنزيمات. وتتأكسد المركبات مستقلة الجزئيات (غير المتباعدة) (monomers) الناتجة أثناء تحلل اللجنين إلى كوينونات (quinones) يتم تجميعها مكونة مواد دبالية وهي مادة عضوية مستقرة.

ويكون الدبال مقاوماً لمزيد من التحلل، وله احتياح أكسجين حيوي (BOD) منخفض جداً، ويمكن إضافته للأراضي الزراعية دون أي خطر من التلوث. ويتمعدن الدبال في التربة بمعدل بضعة أجزاء من المائة سنوياً، وتكون معدنته وتخليق دبال جديد متزنة في

الطبيعة. ونظراً لأن نشدرة الدبال بطيئة، فإن نترته (NH_4^+) من الدبال تكون بطيئة أيضاً، ولهذا فهي تمثل حداً أدنى من مخاطرة الغسيل إلى المياه الجوفية.

وباستخدام المبادئ التي تم مناقشتها سلفاً، دعنا نلخص النظام المثالي للتخلص من

المخلفات لموقع تغذية حيوانات محصور:

1. تتم إزالة الروث على فترات متقاربة ومعه مكونات المرقد أو مادة حشو كربونية مثل نشارة الخشب لإنتاج الكمبوست. وتدفع نسبة (C:N) العالية في اتجاه تقييد النيتروجين حيويًا.
2. يتم هضم المخلفات السائلة تحت ظروف لاهوائية في حجرة مغلقة، وينتج عن ذلك غاز الميثان، الذي يجمع، ويحرق لتوليد حرارة أو كهرباء. ويعتبر الوحل (sludge) بأن له BOD أقل من الروث الحديث. ويتم حجز الأمونيا الناتجة في صورة أيونات أمونيوم عند الرقم الهيدروجيني للهضم. ويلاحظ أن النترات لا يتم إنتاجها تحت ظروف لاهوائية.
3. تتم إضافة الوحل الناتج من الهضم تحت ظروف لاهوائية إلى الكمبوست ويتم تخميره تحت ظروف هوائية. إن معظم النيتروجين N المتبقي يتم تثبيته ضمن الكتلة الحيوية الميكروبية. كما تظهر كميات صغيرة من NH_4^+ و NO_3^- مع نضوج الكمبوست.
4. تتم تهوية الدفق الناتج عن عملية الهضم اللاهوائي ويحفظ لفترة كافية لتخفيض BOD.
5. تتم إضافة الكمبوست الناضج للأراضي الزراعية.
6. يستخدم الدفق لري الأراضي الزراعية، أو يُعرض لمعالجة إضافية لإعادة استخدامه داخل منشأة تربية الحيوانات.

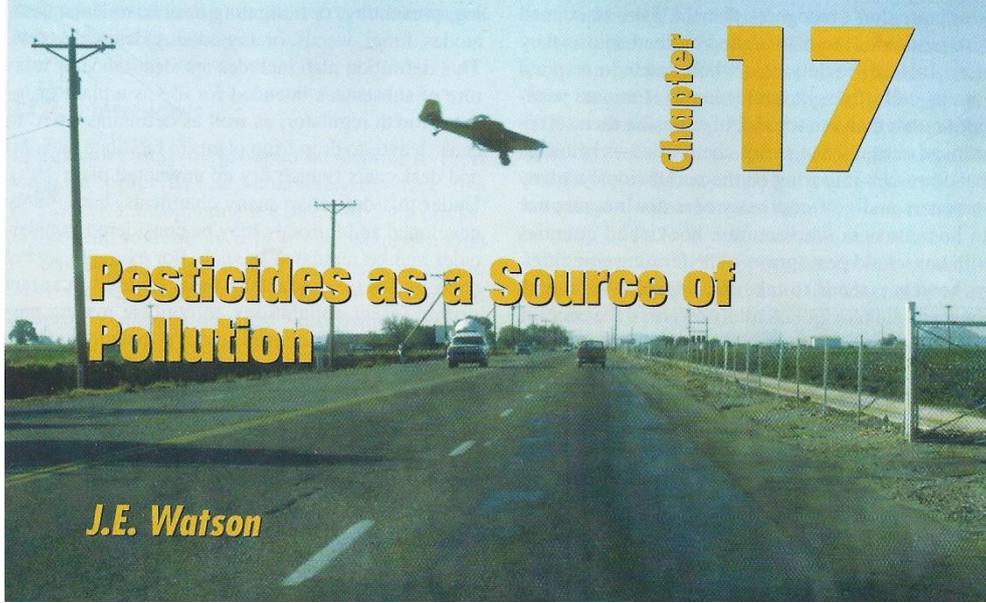
المراجع ولمزيد الاطلاع

- Blake J., Donald J., and Magette, W., Editors (1992) *National Livestock, Poultry and Aquaculture Waste Management: Proceeding f the National Workshop*. July 1991. American Society of Agricultural Engineers, St, Joseph, Michigan.
- Bucklin R., Editor (1994) *Dairy Systems for the 21st Century: Proceedings of the 3rd International Dairy Housing Conference*. February 1994. American Society of Agricultural Engineers, St, Joseph, Michigan.
- Doerge T.A., Roth R.L., and Gardner, B.R. (1991) *Nitrogen Fertilizer Management in Arizona*. Publication 191025. The University Of Arizona College of Agriculture, Tucson, Arizona.
- Follett R.F., Keeney D.R., and Gardner, B.R. (1991) *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability: Proceeding of a Symposium, 1988*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Freitas R.J. and Doerge T.A. (1996) *The Guidebook: Nitrogen Best Management Practices for Concentrated Animal Feeding Operation in Arizona*. Publication 194032. The University Of Arizona College of Agriculture, Tucson, Arizona.
- Hammer D.A. (1989) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan.
- Merkel J.A. (1981) *Managing Livestock Wastes*. Avi Publishing Company, Westport, Connecticut.
- USDA Soil Conservation Service (1992), *Agricultural Waste Management Field Handbook*. April, 1992. United States Department of Agriculture, Washington, D.C.

مسائل وأسئلة

1. يمكن تقسيم أنظمة المخلفات إلى عناصر مرجعية، أذكر ثلاثة من هذه العناصر.
2. أعط ثلاث خصائص أساسية يجب التحقق منها عند اختيار موقع منشأة ضخمة محصورة لتربية الحيوانات وذلك لمنع التلوث.
3. اذكر الملوثات الثلاثة الأساسية المحتملة لموقع إنتاج للألبان أو تسمين الحيوانات. ما هي تأثيرات كل واحد من الملوثات على المياه وصحة الإنسان؟
4. يمثل اللجنين جزءاً كبيراً من روث الحيوانات، ما هو اللجنين؟ ولماذا يتميز بمقاومته للتحلل الميكروبي؟
5. لماذا تساعد صناعة الكمبوست على منع التلوث؟

الباب السابع عشر
المبيدات كمصدر للتلوث



تسمح الإضافات الجوية، مثل رش مبيد على محصول القطن عند ساعات الصباح الباكر في ولاية أريزونا، بإضافات المبيد ضمن مساحات محددة وهو ما يعتبر حرجاً لتحقيق إدارة مبيدات ناجحة ومتكاملة في أوقات لا تستطيع التربة تحمل مرور حرار فوقها بسبب الابتلال.

1.17 النظرة الاجتماعية للمبيدات

يثير استخدام المبيدات ردود فعل عاطفية قوية، من مؤيدة ومعارضة. وتظهر الحقيقة في أن كثيراً من الناس ينظر إلى المبيدات على أنها كيماويات خطيرة يمثل وجودها في البيئة تهديداً وضراً مؤكداً للحياة على كوكب الأرض، بما في ذلك الإنسان وكل ما سواه. أما

الآخرون، خاصة في المجتمعات الزراعية - فينظرون إلى المبيدات على أنها أدوات إدارة مفيدة ويميلون إلى التفاعل بنوع من القلق إلى إمكانية وضع أي قيود حول المبيدات. وبذلك يبدو أن كل فرد يأخذ مسألة المبيدات بصورة شخصية.

على الرغم من أن الخوض في الجوانب النفسية أو الاجتماعية لن يكون جزءاً من النقاش التالي، إلا أنه من المهم إدراك الدور الرئيسي الذي تلعبه العواطف في الجدل الدائر حول استخدام المبيدات، خاصة في تقييم المخاطرة. وعلينا أن نعي أن المبيدات تُفزع الناس بالدرجة الأولى لأنهم يعتقدون بأن وجودهم سوف يتأثر سلباً إذا ما استخدمت المبيدات دون مبالاة أو في حالة عدم استخدامها، وذلك حسب وجهات نظر المهتمين. ويمكننا ملاحظة أن هذا الخوف يرتبط مباشرة بمسألة التحكم. أي أن مستوى استجابة الفرد لتهديد معين يرتبط غالباً بقدرته على التحكم في ما يتمخض من نتائج أكثر منه تقييماً علمياً موضوعياً للمخاطر الحقيقية.

مثلاً، يعرف معظمنا أناساً أصيبوا بدرجة خطيرة في حوادث، لكننا وبمحض إرادتنا نستمر في قيادة المركبات. فعلى الرغم من الوقائع الموضوعية التي تقدمها التقارير الإخبارية أو من خلال التجربة الشخصية، فإن معظمنا اختاروا أن يقبلوا المخاطرة لأننا نشعر "أننا مسيطرون". ولهذا فعلى مستوى غير منطقي، يتغلب الشعور بالسيطرة إلى الشعور بالخوف. إضافة إلى ذلك، وعلى مستوى منطقي أعلى، ندرك أن المخاطرة في عدم السفر بواسطة مركبة يفوق المخاطرة بأن نكون طرفاً في حادث خطير. وبكلمات أخرى، يقبل الأفراد بأخذ الفرص لأنهم يعتقدون أنهم يستطيعون التأثير على النتائج ولأنهم يعتقدون أن الأرباح

تفوق المخاطر .

يقدم أسلوب المنطق واللا منطق هذا فيما يتعلق بركوب المخاطر بعض التوضيح لمسألة الجدل العاطفي المشحون حول المبيدات. فعلى الرغم من أن كلا من الفوائد والمخاطر حقيقية إلا أن غالبية أفراد المجتمع لا يدركون أن المخاطر المصاحبة للمبيدات تضاهيها الفوائد التي تقدمها. وبدلاً عن ذلك يميل المجتمع كافة إلى الاستجابة برؤية جماعية، مفضلاً التخلص من المبيدات عوضاً عن تعريض أنفسهم أو من يحبونهم "لكيماويات خطيرة" - الكيماويات التي يفرضها عليهم آخرون. من الواضح أن كثيراً من البستانيين وأصحاب ملاعب الجولف لا يتفقدون مع ذلك، كما لا يتفق معهم ملاك العقارات الذين يشجعون الزوايا والشقوق بمبيدات رش منزلية). ويميل المجتمع الزراعي لأخذ رؤية معاكسة وبنفس الدرجة من الاندفاع العاطفي، ونظراً لمعرفتهم الشديدة بفوائد المبيدات، فإنهم يقللون عادة من المخاطر لأنهم يشعرون أن القيود القانونية سوف تحد من قدرتهم على السيطرة. وهم في ذلك مثل سائقي الدراجات النارية الذين يمتنعون عن استخدام خوذة الرأس، ويردون بانفعال ضد أي قيود حتى التي قد تفيدهم.

لذلك، فإن تقييم المخاطر بالنسبة لاستخدام المبيدات يعتبر مشكلة معقدة يتعين النظر إليها بموضوعية بعيداً عن العواطف. وفي هذا الباب، سيتم أولاً النظر إلى الأنواع المختلفة المتاحة من المبيدات، ثم معاينة مدى استخدام المبيد والطرق التي يمكن أن تستخدم للتخفيف من مشكلة التلوث بالمبيدات.

2.17 أصناف المبيدات

يجب ألا تؤخذ أي من المعلومات التي يضمها هذا الباب توصية لاستخدام مادة كيميائية معينة لمقاومة آفة محددة. إن جميع التوصيات يجب أن تتم بواسطة مشرفي مقاومة آفات معتمدين، ومطلعين على الظروف المحلية. إضافة لذلك، فإن كثيراً من الكيماويات المذكورة في هذه المناقشة قد تم التوقف عن إنتاجها. إن ضمها في هذا الباب هو لأغراض التوضيح فقط.

عموماً نستخدم مصطلح مبيد بشكل عام للإشارة إلى مدى واسع من الكيماويات التي تقتل حياة غير مرغوب فيها - مثل الحشائش الضارة والحشرات، والقوارض وما في حكمها. ونضيف المبيدات لنحر أنفسنا من مخلوقات يؤدي وجودها إلى التأثير سلباً علينا وعلى بيوتنا ومكونات إنتاج النبات وتخزينه وتصنيعه. وينص التعريف الفني المشار إليه في القانون الفيدرالي الخاص بالمبيدات الحشرية والفطرية ومبيدات القوارض (FIFRA)، انظر الجزء 5.23)، أن المبيد هو أي مادة أو خليط من المواد مخصص لغرض تدمير، أو منع أو تخفيف الضرر الذي تسببه الحشرات أو القوارض أو النيماطودا أو الفطريات أو الحشائش الضارة، أو أي آفات غير مرغوبة. ويشمل هذا التعريف أيضاً أي مادة أو خليط من المواد التي أعدت للاستخدام كمادة منظمة لنمو نبات أو حشرة، وكذلك مزيلات الأوراق (defoliants) (تستخدم لتسبب تساقط الأوراق من النباتات لتسهيل الحصاد)، وكمادة مجففة (desiccants) (التي تجفف أجزاء النبات العليا غير المرغوبة). وتحت هذا التعريف فإن الكثير من المواد الكيماوية، بما في ذلك المطورة حديثاً منها والمألوفة، يمكن اعتبارها كمبيدات

ويتم تنظيمها على هذا الأساس. فمثلاً يمكن استخدام فيرمونات (pheromones) الحشرات (جاذبات جنسية) لجذب أنواع محددة من الحشرات، لإرباك أو إفساد أنماط التزاوج، وبذلك يتم التحكم في أعداد الحشرات. ويمكن استخدام الصابون المستخدم في غسل الأواني لقتل الذباب الأبيض أو النحل كما يستخدم ملح الطعام الشائع (كلوريد الصوديوم) لمقاومة الحشائش في حقول البنجر بالمناطق الرطبة. فهل يمكن اعتبار الكيماويات مبيدات، و إذا كانت كذلك فكيف يمكن تصنيفها؟

يعتبر تصنيف المبيدات حسب الغرض منها إحدى طرق تبويبها. وبذلك فإن المبيدات الحشرية (insecticides) يتم تركيبها لمكافحة نوع معين من الحشرات، أما مبيدات الحشائش (herbicides) ومبيدات الفطريات (fungicides) فيتم تصنيعها لمقاومة الحشائش والفطريات على التوالي، كما يمكن أيضاً تصنيف المبيدات حسب طريقة دخولها إلى الآفة المستهدفة، فالمبيدات التلامسية (contact pesticides) تدخل الآفة المستهدفة عند إضافتها مباشرة، بينما يتعين على المبيدات الجهازية (systemic pesticides) أن تمر خلال كائن عائل قبل دخولها إلى الآفات المستهدفة. فمثلاً يقتل مبيد التلامس أو بقايا الحشرات المستهدفة بمجرد مباشرة الإضافة، بينما يقتل المبيد الحشري الجهازية systemic insecticide الحشرات فقط بعد تحركه خلال نظام النبات الذي يعول الحشرة المستهدفة. ولهذا فإن أية حشرة لا تتغذى على النبات، فإنها لن تتضرر. إن كلا من المجففات (desiccants) ومزيلات الأوراق (defoliants) يمكن استخدامها في إزالة الغطاء النباتي. ويعتبر كلاً من كلورات الصوديوم ومركب (tribufos)، مثلاً مركبان شائعان يستخدمان كمزيلان لأوراق

محصول القطن قبل الحصاد حتى لا يتم تلطيخ أنسجة القطن بمادة الكلوروفيل. وأخيراً، يمكن تصنيف المبيدات حسب الصور التي تستخدم فيها فالمدخنات (fumigants) على سبيل المثال، مبيدات تضاف كغازات. وقد تستخدم المدخنات بانتقائية لمقاومة حشرة الأرضة (termite) في الأخشاب الجافة في البيوت، أو لمقاومة تجمعات الآفات في المنتجات المخزونة مثل الفواكه والخضروات والحبوب. كما يمكن أيضاً إضافتها فوق مساحات واسعة للتخلص من العديد من آفات التربة. ويعتبر dichloropropene و (Metam - sodium) من المدخنات الشائعة التي تضاف للتربة لمقاومة النيماطودا وفطريات التربة.

1.2.17 المبيدات الحشرية

يمكن تصنيف المبيدات حسب خصائصها الكيميائية وصفاتها (انظر أيضاً الجزء 3.8.21 بخصوص مناقشة سمية هذه المواد). إن إحدى فئات المبيدات الشائعة تتكون من مواد غير عضوية، تفتقر إلى عنصر الكربون، ولذا لا يمكن الحصول عليها من كائنات حية. وعموماً، فإن المبيدات غير العضوية بطيئة الفعالية، لكنها تتميز بنشاط متبقى يستمر لفترة طويلة. وتشمل أمثلة المبيدات غير العضوية الكبريت، الذي يمكن أن يستخدم لمقاومة حشرة التريس (thrips) التي تسبب ضرراً للحمضيات، وكذلك حمض البوريك الذي عادة ما يكون فعالاً في مقاومة آفات الحديقة ويستخدم كثيراً في طعم الصراصير وسموم النمل. إن بعضاً من المبيدات الأولى المستخدمة كانت مواد كيميائية توجد طبيعياً مثل الكبريت والزرنيخ. وأحياناً يمكن أن تستخدم مواد غير عضوية في حالتها الطبيعية، أو ربما يتم تحويلها كيميائياً حتى

تصبح أكثر فعالية أو أماناً للاستخدام.

توجد مبيدات حشرية أخرى تصنف بشكل عام على أنها مواد عضوية. هذه المبيدات الحشرية العضوية لا تختلف عن المبيدات الحشرية غير العضوية في كونها طبيعية ولكن لأنها تحتوي على عنصر الكربون. وهذا يعني أن المبيدات العضوية يمكن الحصول عليها من كائنات حية أو أن تستخلص من مركبات طبيعية. كما يمكن أيضاً تصنيعها من مواد أولية . أي أن التركيب الكيميائي للمبيدات الحشرية العضوية المصنعة إما أن يتم تحويلها من مصادر حيوية أصلية، كما هو الحال بالنسبة البايثرويدات الاصطناعية (pyrethroids) الناتجة عن المركب الطبيعي البايثرم، أو تكون مادة مصنعة جديدة (novel)، كما هو في حالة مركبات الفوسفات العضوية (Organophosphates)، التي طورت خلال فترة الحرب العالمية الثانية بواسطة كيميائيين ألمان كانوا يبحثون عن بديل لمادة النيكوتين (nicotine).

الهيدروكربونات الكلورة (Chlorinated hydrocarbons)

تسمى أيضاً مركبات الكلور العضوية وتتركب من كربون وهيدروجين وكلور وهي تمثل أول مجموعة مبيدات حشرية مصنعة تم استخدامها على نطاق واسع، ومن بين الهيدروكربونات الكلورة مركب: (1,1,1-trichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethane) الذي يشتهر باسم (DDT). وعلى الرغم من أن هذا المركب قد استخدم بكثافة في العالم كله لعدة سنين، فقد تم منع تداوله واستخدامه في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1971 لعدة أسباب، وبالدرجة الأولى لتأثيراته المدمرة على تكاثر الطيور. وقد كانت ولاية أريزونا الأولى في الولايات المتحدة التي تحد من استخداماته بسبب مشاكل ترتبط بتلوث منتجات

الألبان بمركب DDT. وتشمل مركبات الهيدروكربونات الكلورة الحديثة كل من lindane، methoxychlor، ومركب dicofof. ويتميز مركب methoxychlor بأن له سمية منخفضة جداً للبشر والحيوانات دافئة الدم. وحتى قبل منع تداول المبيد DDT فإن Methoxychlor قد استخدم كبديل له عندما كانت إضافة DDT تشكل خطراً على الحيوانات دافئة الدم. إن معظم مبيدات الهيدروكربونات الكلورة، بما في ذلك DDT، لها سمية منخفضة على البشر.

الفوسفات العضوية (Organophosphate)

تحتوي هذه المركبات على عنصر الفوسفور المرتبط بالأوكسجين مكونة مجموعة الفوسفات. وتضم مركبات الفوسفات العضوية التي تم تطويرها لتستبدل بعضاً من مركبات الهيدروكربونات الكلورة، مركبات مثل diazinon و chlorpyrifos و acephate. وتعتبر مركبات الفوسفور العضوية مواد كيميائية تثبط عمل أنزيم (cholinesterase)، وهو الإنزيم الضروري لعمل الجهاز العصبي في جسم الحيوان. ويلزم عند التعامل به أخذ الحذر لمنع أي مشاكل صحية خطيرة للشخص الذي يقوم بإضافته، ذلك أن سميته للإنسان تكون عادة عالية.

الكربامات (Carbamates)

تحتوي هذه المركبات على ذرات كربون مرتبطة مع نيتروجين وأوكسجين. وتضم الكربامات التي تم تطويرها لأول مرة بداية الخمسينيات من القرن الماضي مبيدات حشرية مثل: carbaryl و propoxur و bendicarb. ومثل مركبات الفوسفات العضوية تعمل

مركبات الكربمات كمواداً كيميائية مثبطة لعمل أنزيم cholinesterase.

المبيدات الحشرية الميكروبية (Microbial insecticides)

وهي عبارة عن كائنات دقيقة - أو السموم (toxins) التي تصنعها ويمكن استخدامها لمكافحة الحشرات. فمثلاً، تنتج بكتيريا *Bacillus thuringiensis* سمّاً ذا منشأً داخلي (endotoxin) أثناء التخمر. وتوجد أنماط سيرولوجية مختلفة من هذه الكائنات الدقيقة مثل:

(*israelensis* , Serotype H-14; *kurstaki* , Serotype H-3a 3b ; *morrisoni* , Serotype 8a 8b).

التي تنتج سموماً ذات منشأً داخلي تستخدم في القضاء على حشرات متنوعة. فمثلاً، يعتبر الكائن الدقيق:

(*Bacillus thuringiensis berliner var. israelensis* , Serotype H-14

تحت النوع من بكتيريا (*Bacillus thuringiensis*) الأكثر فعالية في مقاومة

الناموس ويرقات الذبابة السوداء، كما أن بكتيريا:

(*Bacillus thuringiensis var. Kurstaki serotype H- 3a 3b*) تعمل كمبيد يرقي ضد

الحشرات حرشفية الأجنحة ولها رقم هيدروجيني مرتفع يتسبب في تدمير أمعاء اليرقات.

وعندما يتم رش هذه البكتيريا على النباتات التي تتغذى عليها اليرقات، فإن اليرقة تلتهم

البكتيريا والسم وكذلك النبات، وبالمقابل، يمكن استخلاص السموم التي تنتجها البكتيريا

وإضافتها مباشرة. وفي بعض الحالات يمكن إدخال الجين (gene) الذي يتحكم في إنتاج

سم معين داخل النبات نفسه - فمثلاً، تم تحوير بعض أصناف القطن وراثياً لتنتج سمّاً من

(*B. thuringiensis*) ذاته دون وجود للبكتيريا.

ويعتبر Abamectin المشتق من كائن تربة دقيق (*streptomyces avermitilis*) مبيد حشرات ميكروبي آخر يستخدم للقضاء على الحلم (*miticide*). والحلم كائنات صغيرة جداً ترتبط كثيراً بالقراد (*ticks*). وتكون بعض أنواع الحلم، مثل القُذذ (*chiggers*) التي تتطفل على الحيوانات الراقية. (إذا قمت بالمشي عبر أراضي المراعي بالجنوب الغربي من الولايات المتحدة فمن المحتمل أن تصبح عائلاً لبعض أنواع القُذذ). وتوجد عائلة كبيرة من الحلم، تعرف الحلم العنكبوتي، الذي اشتق اسمه من عادة لف نسيج عنكبوتي على الجزء السفلي من أوراق النباتات حيث تلتهم غذاءها. ويكون الحلم العنكبوتي عادة آفة محاصيل زراعية. وتستخدم مواد *avermectins* المشتقة من *Streptomyces avermitilis* للقضاء على هذا الحلم، كما تستخدم مواد *Avermectins* أيضاً كطعومات للقضاء على بعض أنواع النمل.

تحتوي نباتات كثيرة على مواد تحول دون تغذي الحشرات عليها، وبذلك فإنها تعمل كمبيدات حشرية نباتية (*botanical insecticides*). ولقد تم استخلاص بعض من هذه المركبات واستخدمت كأساس لتطوير مبيدات حشرات جديدة. فمثلاً، تم تطوير مركبات (*Pyrethroids*) بواسطة كيميائيين كانوا يطمحون إلى تحويل التركيب الكيميائي الأساسي لمبيد الحشرات ذي الأصل النباتي المسمى (*Pyrethrum*)، وقد استخلص هذا المركب من أحد أنواع نبات الأقحوان (*Chrysanthemum cinerariaefolium*)، حيث كانت الزهور هي مصدر مادة البيرينثوين (*Pyrethrins*). ويتميز مركب *Pyrethrum* بأن له مستوى منخفضاً من السمية للحيوانات ذوات الدم الدافئ، حيث أنه أقل سمية من المبيد الحشري

(methyl Parathion) بثلاثين مرة. إن البيرثرويدات pyrethroids، التي تعرف أيضاً بقدرتها على قتل الحشرات بسرعة، تضم مبيدات حشرية شائعة مثل Fenvalerate, Permethrin. وتعتبر Pyrethroids، وغيرها، مركبات مصنعة يعتمد بناؤها على كيميائية (Pyrethrum) [ملحوظة: إن مجرد أن تكون المواد الكيميائية مشتقة من نباتات لا يعني أنها أقل سمية للإنسان أو الحيوان. فمركب Retenone يشتق من نبات معين، لكنه عالي السمية للأسماك. والنيكوتين (Nicotine) هو أيضاً مشتق من النبات، لكن تضاهى نظيره الاصطناعي وهو مركب methyl parathion، الذي يكون أكثر سمية للحيوانات ذوات الدم الدافئ بنحو 20 مرة مقارنة بمركب Pyrethrum. ويعتبر مركب Allethrin المركب المصنع الأول من Pyrethroids، وقد تم تداوله عام 1949، وله سمية تشبه مركب Pyrethrum. من جهة أخرى، فإن مركب Fenvalerate يكون أكثر سمية بعض الشيء من Pyrethrum.

بعض المبيدات العضوية لا تقتل أي شيء مباشرة. فمثلاً تعتبر منظمات نمو الحشرات (Insect growth regulators) مبيدات لأنها تحفز أو تعيق النمو و/أو التطور في الحشرات. ومن بين هذه المنظمات نظائر هرمون الحداثة (Juvenile hormone analogs)، وهي مركبات مصنعة أو مشتقة تحاكي الهرمونات الطبيعية للحشرات المعروفة باسم هرمون الحداثة (Juvenile hormone)، الذي يلعب دوراً في التحكم في عملية الانسلاخ وعمليات أخرى في الحشرات. ومن أمثلة نظائر هرمون الحداثة مركب الميثوبرين (methoprene). وتتوافر المنتجات المحتوية على الميثوبرين لغرض مقاومة يرقات البعوض في المياه،

إضافة إلى ذباب مزارع عيش الغراب (الفقاع)، والنمل الفرعوني (pharaohsants) داخل المباني. كما يعتبر مركب (fenoxycarb) أيضاً منظم نمو ويستخدم لمقاومة النمل الناري (Fire ant) وبعد التهام الملكة لمركب (fenoxycarb)، يمكن لملكة النمل أن تضع بيضها كالعادة، لكن البيض لا يتطور أبداً إلى شغالات نمل. إن مركب Hydoprene هو المكون الفعال في منتج تجارى يثبط عمليات الانسلاخ الطبيعي، مسبباً موت أو عقم الحشرة عند أو قبل الانسلاخ. ويستخدم هذا المركب عادة لقتل الآفات التي تصيب المنتجات المخزونة بما في ذلك الصراصير.

2.2.17 مبيدات القوارض (Rodenticides)

مبيد القوارض (rodenticide) هو عبارة عن مادة تستخدم بالدرجة الأولى لمكافحة القوارض (الجرذان، الفئران، الخ...) والحيوانات المشابهة لها. وتستخدم أنواع متعددة من المركبات الكيميائية، بما في ذلك: coumarins, indandiones, organochlorines, organophosphates, pyriminilureas, botonicals.

3.2.17 مبيدات الحشائش (Herbicides)

مثل مبيدات الحشرات، فقد تكون مبيدات الحشائش عضوية أو غير عضوية أو مشتقة أو مصنعة (انظر الجزء 4.8.21 لمزيد من المعلومات حول سمية هذه المواد). وكانت مبيدات الحشائش الأولى مواد غير عضوية مثل ملح NaCl أو الرماد. ويذكر التاريخ، مثلاً، أن الرومان بعد معركتهم الأخيرة مع قرطاجنة عام 146 قبل الميلاد، قاموا بنشر ملح فوق موقع المدينة المدمرة وبذلك أفسدوا المحاصيل الموجودة ومنعوا إعادة استزراع هذه الأراضي.

وهناك أملاح أخرى أيضاً تعتبر مبيدات حشائش جيدة، مثل كبريتات النحاس، الذي هو سام للطحالب، وملح كلورات الصوديوم الذي يستخدم كمجفف.

الزيوت البترولية (Petroleum oils)

هذه المواد تحتوي على كربون وهيدروجين فقط، وتعتبر أول مبيدات حشائش عضوية. ففي أواخر القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، استخدمت مواد هيدروكربونية مثل زيت المحركات المستهلك، والكيروسين ووقود الديزل للمحافظة على مساحات خالية من الأعشاب. إن هذه المنتجات البترولية لم يعد يوصى بها: فهي تستطيع تلويث المياه السطحية والجوفية، كما أنها تمثل خطورة إذ تسبب الحرائق.

مركبات الكربامات (Carbamate compounds)

مركبات تحتوي على أكسجين إضافة للكربون والهيدروجين. وهي مواد عضوية لها خصائص إبادية ضد الحشائش، والآفات والفطريات. ويشيع استخدام الكربامات كمبيدات للحشائش قبل الإنبات (preemergence)، على الرغم من أن بعضاً منها له تأثير حتى بعد مرحلة الإنبات (postemergence). ومن أمثلة مبيدات الحشائش الكرباماتية كل من chlorpropham، وهو منظم نمو نبات يقتل عدة أنواع من الحشائش بعد الإنبات، ومبيد asulam الذي يستخدم في حالات كثيرة لمقاومة أنواع مختلفة من الحشائش بعد الإنبات مثل goosegrass, foxtail, crabgrass, johnsongrass.

الترايازينات (Triazines)

تتكون من ذرات كربون ونيروجين تشكل حلقة ذات ستة أوجه، وتتوفر الترايازينات

بكثره كمبيدات حشائش وتشمل الأمثلة المعروفة جيداً لمبيد الترايزينات كالا من cyanazine و prometryn. وتميل هذه المركبات لأن تكون أكثر ذوباناً في الماء مقارنة بمبيدات الحشائش ومبيدات الحشرات الكرياماتية أو مبيدات الحشرات الهيدروكربونية المكلورة، لذلك فمن المرجح أن تلوث المياه الجوفية أو السطحية. وتوجد أنواع مختلفة من الحشائش التي يتم مكافحتها بواسطة هذه المركبات.

مبيدات الحشائش الفينوكسية (Phenoxy herbicides)

هي مركبات حلقيه تحتوي على أكسجين، وقد تم تطويرها في الأربعينيات من القرن الماضي. وقد تكون هذه المركبات أيضاً حلقيه مستبدلة، مثل المبيدات الكلورفينوكسية (Chlorphenoxy herbicides) التي تحتوي على عنصر الكلور. وتمثل المبيدات الفينوكسية الأوكسينات التي هي عبارة عن هرمونات نباتية طبيعية تستخدم كمنظمات للنمو. ومن أمثلتها: (2,4-dichlorophenoxy acetic acid (2,4-D) الذي يستخدم لمقاومة عدد من الحشائش بعد الإنبات (post-emergent) تشمل كل من Canada thistle, ragweed , dandelion annual mustard وغيرها. ويعمل هذا المركب كمبيد حشائش انتقائي شبيه بالهرمون. ويوجد كثير من المحاصيل عرضة للأوراق، مثل القطن والعنب التي تكون شديدة الحساسية للمبيد 2,4-D.

مبيدات الحشائش الأميدية (Amide herbicides)

هذه مركبات تحتوي على عنصر النيتروجين، وهي بشكل عام عبارة عن جزيئات بسيطة تتكسر بسهولة ولا تبقى كثيراً في التربة. وتنشط بعض مبيدات الأعشاب الأميدية

استطالة جذور البادرات، بينما تقوم أخرى بمنع مواصلة عملية البناء الضوئي، وتشمل الأمثلة لهذه المبيدات propanil (الموضح تركيبه في الشكل 4.7) و cypromid. كما توجد مبيدات حشائش أخرى تحتوي على عنصر النيتروجين وهي شائعة أيضاً. ومثل الأميدات، فإن dinitroaniline ومركبات الأنيلين مستبدلة (substituted anilines) تحتوي على عنصر النيتروجين، لكن ذرات النيتروجين مرتبطة بالأوكسجين. وتتداخل مبيدات الحشائش هذه مع إنزيمات ينتجها النبات وتثبيط نمو الجذور أو السيقان. ومن أمثلة ذلك المبيد trifluralin. كذلك، تقوم مركبات اليوريا المستبدلة substituted ureas التي تحتوي أيضاً على نيتروجين، على إيقاف البناء الضوئي، وتشمل مركبات اليوريا المستبدلة substituted ureas كل من fenuron و diuron.

4.2.17 منظمات نمو النبات ومبيدات الفطريات والمطهرات

تستخدم منظمات نمو النبات (Plant Growth Regulators) أيضاً لمكافحة الحشائش، وتشمل هذه المنظمات كل من الأوكسينات، الجبريلينات، والساييتوكاينينات وكذلك مولدات الإثيلين (ethylene generators) ومثبطات النمو، وهذه المواد جميعاً تؤثر إما على نمو النبات أو نضج الثمار.

كثيراً ما تكون النباتات معرضة لنفس العوامل المسببة للأمراض التي تصيب الحيوانات، وتشمل هذه العوامل الممرضة الفطريات و rickettsia والكائنات الشبيهة بالميكوبلازما (mycoplasma-like)، إضافة للفيروسات والبكتيريا. وزيادة على ذلك، يكون عادة من الصعب مكافحة هذه الأمراض في النباتات ذلك أنه ليس يسيراً القضاء على

مسبب المرض دون إلحاق أذى بالعائل. وبذلك فإن استخدام المبيدات الفطرية (fungicides) والمطهرات (disinfectants) يعتبر جزءاً هاماً للحصول على محاصيل خالية من الأمراض. وتقوم بعض من المبيدات الفطرية والمطهرات بمعالجة مشكلة معينة بعد ظهورها، بينما تكون أخرى فعالة فقط كوقائيات.

يستخدم كثيراً الكبريت أو النحاس كمبيدات للفطريات، فمثلاً، يعتبر النحاس مشبب إنزيمات، بينما يكون الكبريت مشبباً لعملية الأيض. إن أملاح هذه العناصر، مثل كبريتات النحاس وكبريتات الزنك هي أمثلة للمبيدات الفطرية غير العضوية التي استخدمت في الماضي. وكما هو في حالة المبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب، فإن عدداً من أنواع مختلفة من المركبات العضوية يمكن أيضاً أن تعمل كمبيدات للفطريات. وتشمل هذه المركبات dithiocarbamates مثل (maneb, thiram) و(thiazoles) (مثل terrazole و(triazines) (مثل anilazine)، والمركبات الحلقية المستبدلة (مثل chlorothalonil) وPCNB و(dicarboximides) (مثل captan و folpet و captafol) و benzimidales و (مثل thiophanate و benomyl) و dinitrophenols (مثل dinocap) و quinines (مثل dichlone و organotins) (مثل fentin hydroxide).

3.17 مدى استعمال المبيدات

تعتبر جميع المبيدات سموماً - أي أنها تقتل أو تؤثر سلباً على الكائنات المستهدفة، لكن هذا لا يعني أن جميع المبيدات ملوثات، إذ حتى المواد الكيميائية الأكثر خطورة (للإنسان وصور الحياة المرغوبة الأخرى) لا تعتبر ملوثات إلى أن تظهر حيث لا يراد لها

الظهور، مثلاً في المياه الجوفية، أو أن تتراكم في السلسلة الغذائية، أو أن تتواجد كمتبقيات في المواد الغذائية. وفي المحاولات التي تستهدف منع المبيدات من أن تكون ملوثات يتعين أولاً معرفة كمية المبيدات المستعملة وأين استخدمت مع ضرورة وجود شخص ما يقوم بمتابعة هذه المعلومات.

1.3.17 معايير الإفصاح عن بيانات المبيدات (Reporting criteria)

قبل أن يباع أي مبيد تجارى أو يوزع داخل الولاية الواحدة أو فيما بين الولايات في الولايات المتحدة الأمريكية، يتعين تسجيله بواسطة وكالة حماية البيئة (EPA). وقد قامت وكالة حماية البيئة بتجميع قوائم مهمة لمكونات المبيد التي يتعين توضيحها. (تقدر وكالة حماية البيئة أن متوسط التكلفة لمادة مسجلة حتى تتطابق مع البيانات التي تشترطها الوكالة من أجل التسجيل تتراوح ما بين 2.4-4.0 مليون دولار للمكون الواحد). كما أن وكالة حماية البيئة مخولة بموجب القانون الفيدرالي للأغذية والأدوية ومواد التجميل (FFDCA)، لتحديد المستويات التي يمكن تحملها من بقايا المبيدات في الأغذية الخام والمصنعة. إن إدارة الأغذية والأدوية (FDA) التابعة لإدارة الصحة والخدمات البشرية تتابع وتدعم حدود التحمل التي تم تأسيسها. وعندما يتم تسجيل مبيد للاستخدام على غذاء معين أو محصول علف، فإن مستوى التحمل، أو الإعفاء من هذا المطلب يجب أن يؤسس. إن الغرض من تأسيس مستويات التحمل هذه هو لضمان عدم تعرض المستهلكين في الولايات المتحدة لمستويات غير آمنة من بقايا المبيدات. إن أي بضائع بها مستويات بقايا تفوق مستوى التحمل تتعرض للحجز الفوري. وعموماً، فإن نسبة صغيرة من المنتجات التي تستوردها

الولايات المتحدة يتم فعلياً أخذ عينة منها للتحقق من مطابقتها للمواصفات.

إضافة لذلك أسست الكثير من الولايات بالولايات المتحدة الأمريكية وكالات تنظيمية أخرى للتحكم في استخدامات المبيدات لحماية الأحياء البرية وموارد المياه. مثلاً، وضعت ولاية أريزونا قائمة لكيمواويات (قائمة حماية المياه الجوفية) يتعين عند استخدامها إبلاغ السلطات المختصة. كما توجد متطلبات مماثلة لبيع هذه المبيدات، حتى لا يحدث تراخي في الكشف عن استعمال المبيدات دون إخطار الوكالة المنظمة.

كيف إذاً تتم صناعة القرار ليشمل كيمواويات توجد على قوائم الحكومة الفيدرالية وحكومة الولايات من أجل إخضاعها للتنظيم؟ أحد المعايير المهمة هو مدى إمكانية تسرب مادة كيمائية معينة للمياه الجوفية أو المياه السطحية. وتشمل المعايير الإضافية الأخرى شدة السمية (للإنسان) وسرطنتها (carcinogenicity)، وفيما إذا اكتشف وجود المادة الكيمائية في المياه الجوفية أو المياه السطحية في أماكن أخرى.

تجدر الإشارة إلى أن كلا من القوائم الفيدرالية أو الخاصة بالولاية لا تعتبر محددة المعالم. مثلاً، تهتم هذه القوائم عادة بالمادة الفعالة فقط لمنتجات المبيدات التجارية، ولا تأخذ في الاعتبار المكونات الحاملة. ويسمى المركب الذي يتحكم فعلياً في الآفة المستهدفة بالمادة الفعالة (active ingredient)، بينما تشكل المكونات غير النشطة ضد الآفات المستهدفة بالمكونات الحاملة (inert ingredients). وتشمل المكونات الحاملة عادة، مذيبيات، ومنشطات سطحية (surfactants). ومواد حاملة (carriers)، ومواد مغذية (substrates)، إن المشكلة تتمثل في أن جميع المكونات الحاملة ليست بالضرورة ضارة. وعلى الرغم من أن بعضاً من هذه المكونات قد تخضع للتحكم والتنظيم نظراً لاعتبارات بيئية

أو صحية، فإن البعض الآخر قد لا تخضع للتنظيم، على الرغم من أنها قد تحدث تأثيرات ثانوية غير مرغوبة. (إن هذا التأثير الثانوي غير المرغوب قد ينتج مثلاً بسبب رش مبيد لمكافحة دبور؛ فبينما تقضى المادة الفعالة على الدبور، يقضى المذيب (المادة الحاملة) على أحد النباتات الطبيعية الحساسة).

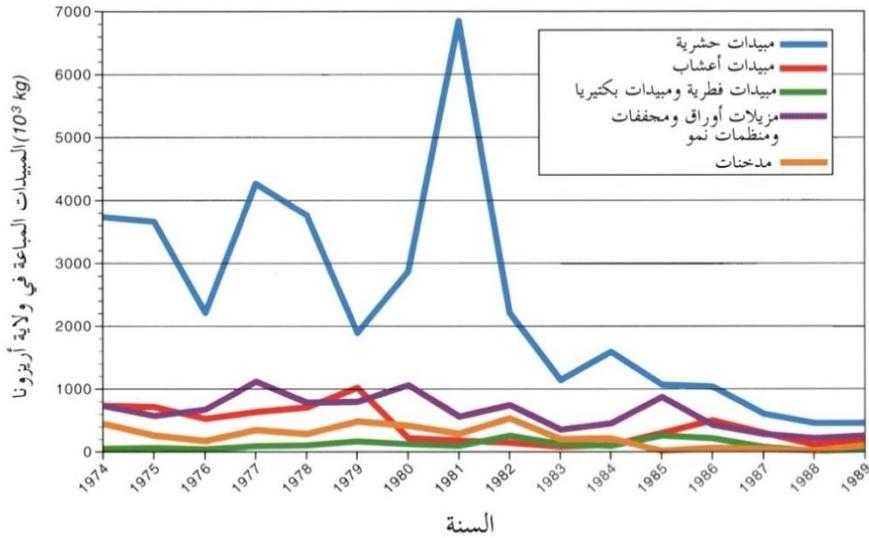
2.3.17 مدى استعمال المبيدات

يتم تسويق نحو 45 ألف مبيد في الولايات المتحدة، بما يعادل 0.55 بليون كيلوجرام من المبيدات سنوياً وبقيمة تزيد على 6 بليون دولار. إن معظم هذه المنتجات كيميائيات عضوية، إذ أن استخدام المبيدات غير العضوية، مثل المركبات التي تحتوي على الزرنيخ قد تناقص مع الزمن. وتقدر وكالة حماية البيئة الأمريكية أنه في عام 1986، قد استخدم نحو 70% من هذه المنتجات في الإنتاج الزراعي، و 7% في البيوت والحدائق المنزلية، بينما استخدم الباقي في الغابات والصناعة، والبرامج الحكومية. إن السبب في التباين الملحوظ بين الكمية المضافة من خلال الزراعة وتلك المضافة في الاستخدامات الأخرى واضح - فالزراعة تغطي مساحات أكبر من تلك التي تغطيها المناطق السكنية والمصانع. إن هذه النسب المتغيرة غير مؤكدة، وذلك بسبب الافتقار للسجلات.

ولسوء الحظ، فإن مدى استعمال المبيدات - وإمكانية أن تصبح المبيدات ملوثات أمرين غير معروفين تماماً وغير موثقين في الولايات المتحدة. مثلاً، لم تبدأ الولايات المختلفة في متابعة مثل هذه المعلومات إلا منذ منتصف السبعينيات من القرن الماضي، وخاصة بالنسبة لمحاصيل محددة. إن هذا النقص في البيانات قد تفاقم أكثر نتيجة لأن إجراءات التسجيل متباينة ومعرضة للتغيير. إضافة لذلك، فعلى الرغم أن استخدام المبيدات الزراعية

جيد التوثيق نسبياً، فإن استعمالاتها بواسطة مالكي البيوت لا يتم توثيقها إطلاقاً. ولجعل الأمور أكثر سوءاً فإن الكثير من المبيدات يمكن استخدامها دون تسجيل إذا كانت موادها الفعالة لم تظهر على قائمة وكالة حماية البيئة (EPA) الخاصة بالكيمائيات تحت المراقبة، أو قوائم مشاهمة، مثل قائمة حماية المياه الجوفية بولاية أريزونا.

يعرض الشكل (1.17) تقديراً لحجم المبيعات من المبيدات في ولاية أريزونا وحدها بداية من عام 1974. إن هذه الأرقام تقديرية فقط لأن المبيعات واستعمالات من المواد لم يتم تسجيلها في السنوات السابقة. ويتعين ملاحظة أن المبيعات تتباين بشكل كبير، وإن هذا التباين كثيراً ما يكون بسبب التغير في كمية الكبريت (وهو مبيد حشري) وكلورات الصوديوم (مزيل أوراق/ ومجفف) اللذين تم بيعهما.



شكل (1-17): المبيعات المسجلة من المبيدات المختلفة (بالألف كجم من المادة الفعالة) في ولاية أريزونا من 1976 إلى 1989.

4.17 مصير المبيدات

اعتماداً على خصائصها الكيميائية - الفيزيائية، ونمط الاستخدام، والظروف المحلية، قد تغسل بعض المبيدات خلال منطقة جذور النبات وتلوث في نهاية الأمر المياه الجوفية عند بعض المواقع. إن أكثر خاصيتين مهمتين لأي مادة كيميائية تحدد فيما إذا كان مبيد ما يشكل تهديداً للمياه الجوفية هما بقائته (persistence) وحركته (mobility) في التربة. وتستخدم أثناء تسجيل مبيدات جديدة، برامج حاسوب لتقدير مدى إمكانية تلوث المياه الجوفية حسب استخدام محدد لمادة كيميائية معينة في مواقع مختلفة بالولايات المتحدة. إن عدة ولايات، بما في ذلك ولايتي أريزونا وكاليفورنيا، تعتبران إمكانية مركب معين للغسيل خلال التربة ليصل للمياه الجوفية معياراً للضم في قوائم الكيماويات تحت المراقبة. تعتمد بقائية مبيد معين على ما إذا كان عرضة للتحلل الكيميائي أو البيولوجي. ومن بين هذه العوامل، يعتبر التحلل البيولوجي (biodegradation)، الأكثر أهمية (أنظر الباب 7)، والجزء 1.4.11. وفي الوقت الذي تعتمد فيه سهولة التحلل البيولوجي على عدة عوامل (كما تمت مناقشته في الجزء 3.7) فإنه عموماً، كلما كانت المادة الكيميائية مشابهة لمادة أيضية ميكروبية معينة، كلما كان تحللها أكثر سهولة. أما العامل الأساسي الآخر الذي يحدد الخطورة المحتملة للمبيدات في تلويث المياه الجوفية فهو حركة المبيد. وتشمل العوامل التي تؤثر على الحركة كلا من الكثافة الظاهرية للتربة، والمحتوى الحجمي لماء التربة، ومحتوى التربة من المادة العضوية، ومقدار الفائض منه مياه الري والأمطار، ومقدار الجذب للمبيد بواسطة المادة العضوية بالتربة وسطوح معادن

التربة (كما تمت مناقشته في البابين الخامس والسادس). وكما تمت الإشارة في هذين البابين، فإن آلية الإدمصاص التي تتحكم في المواد الكيماوية العضوية غير القطبية تختلف كثيراً عن الآليات التي تتحكم في إدمصاص الكيماويات غير العضوية.

إن كثيراً من المبيدات المستخدمة في المجالات الزراعية لها بقائية منخفضة وهي بذلك لا تشكل خطراً لجودة المياه الجوفية. وأحد الأمثلة هو مبيد أسيفيت acephate، الذي يعتبر متحركاً في معظم الترب، لكن له فترة نصف عمر ($T_{1/2}$ انظر المعادلة 6 - 17) أقل من 3 أيام في الترب جيدة التهوية. ويبدو أن معظم نواتج تحلله تعتبر غير متحركة، حتى في الترب الرملية. وهناك كيماويات أخرى، مثل trifluralin تدمص بشدة عالية على حبيبات التربة لدرجة أن الري الزائد لا يستطيع تحريكها إلى ما تحت نطاق نمو الجذور قبل أن تتحلل. وبالمقابل، فإن مواد كيماوية مثل مبيد الحشائش triazine لا يدمص بقوة كافية على حبيبات التربة ويمكن أن يغسل إلى ما تحت نطاق نمو الجذور قبل أن يتحلل وذلك إذا ما تمت إضافة كميات زائدة من مياه الري للترب.

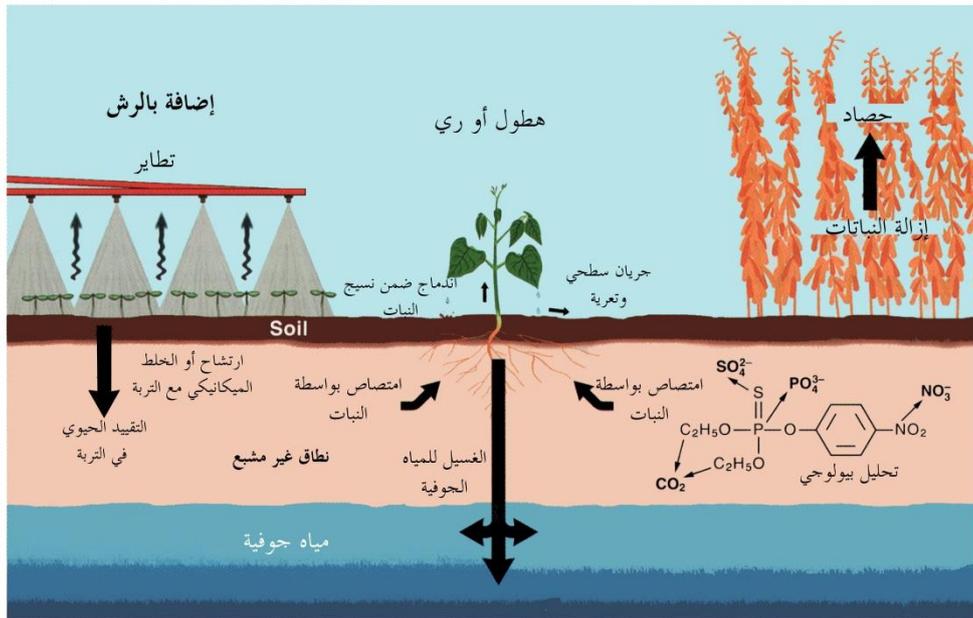
عُثر على بقايا اثنين من المبيدات النيماطودية اللذين كانا شائعين، وهما EDB (ethylene dibromide) و DBCP (dibromochloropropane) في عدد من آبار المياه، وفي إحدى الحالات (في ولاية أريزونا)، تقع المياه الجوفية الملوثة تحت أرض كانت في السابق مزروعة بأشجار حمضيات؛ حيث استخدم هذان المركبان مع مياه الري. ولا يعرف فيما إذا كان هذا التلوث ناتجاً عن مصدر مباشر (point source) (مثل التدفق الرجعي للمبيد إلى داخل البئر بعد حقنه في نظام الري أو ناتجاً عن غسل أدوات الرش عند فتحة

البعثر) أو ناتجاً عن مصدر تلوث غير مباشر (nonpoint source) (مثل غسيل المادة الكيماوية إلى ما تحت نطاق نمو جذور المحصول). لكنه يلاحظ، أن هذين المركبين يبقيان في التربة لفترة طويلة ويتحركان بدرجة كافية ليغسلا إلى ما تحت نطاق نمو جذور المحصول تحت ظروف أساليب الإدارة الزراعية السائدة في السبعينيات من القرن الماضي.

من بين المبيدات التي تتميز بإمكانية منخفضة لتلويث المياه الجوفية بعض من الهيدروكربونات الكلورة، التي تدمص بقوة على التربة (مثل DDT و toxaphene). لكن هذه المركبات لم تعد متاحة للاستعمال في الولايات المتحدة لأنها يمكن أن تتحرك للمياه السطحية عندما تزرع التربة التي تدمص عليها هذه المبيدات لتستقر في البحيرات وجداول المياه أثناء حوادث عواصف ممطرة تسبب انجراف التربة (انظر الجزء 2.15). إن هذه المركبات لا تتحلل بسهولة، ونتيجة لذلك فإنها تميل للتراكم في السلسلة الغذائية، مسببة مشاكل بيئية طويلة المدى. وقد تم تطوير مجموعة جديدة من مبيدات الحشائش وهي مجموعة (pyridines) التي تتميز بانخفاض حركتها في التربة وهو ما يوفر حماية للمياه الجوفية.

بعد إضافة مبيد معين لحقل ما، فإنه قد يتعرض لمصائر متنوعة، كما هو موضح في الشكل (2.17). إذ أن بعضاً منها قد يفقد للهواء الجوي من خلال التطاير، أو يحمل إلى مياه سطحية بواسطة الجريان والتعرية، أو يتم تكسيرها ضوئياً (photo degraded) بواسطة ضوء الشمس. إن المبيدات التي تكون قد دخلت التربة قد تمتص بواسطة النباتات (وبذلك تتم ازاحتها)، أو يتم تحليلها بيولوجياً إلى صور كيميائية أخرى، أو تغسل لأسفل بواسطة الماء إلى ما تحت منطقة جذور النبات. إن كمية أي مادة كيماوية معينة يتم فقدها عن طريق

التطهير أو الغسيل أو التحلل أو الجريان السطحي تعتمد على حالة الموقع، والظروف المناخية وأساليب الإدارة وخصائص التربة وخصائص المبيد (كما تم وصفه في عدة أبواب سابقة). وعموماً، فإن المبيدات الحشرية المستخدمة حالياً في العمليات الزراعية لها أنصاف أعمار (half-lives) تحلل قصيرة ونتيجة لذلك فإن المدة الزمنية التي تكون فيها متاحة لتسبب تلوثاً بيئياً تكون قصيرة نسبياً.



شكل (17-2) مصير المبيدات في التربة

إن شد أو إدمصاص مركب معين في التربة يمكن قياسه حسابياً باستخدام معامل إدمصاصه (انظر الجزء 4.6). وحيث أن معظم المبيدات هي مركبات عضوية، فإنه كثيراً ما

يستخدم معامل إدمصاص الكربون العضوي (K_{oc}) لتحديد شد المركب في التربة:

$$K_{oc} = \frac{K}{C_{oc}} \quad (1-17)$$

حيث أن K هو معامل إدمصاص المركب لتربة معينة، وأن C_{oc} هو محتوى التربة من الكربون العضوي (على أساس جرامات الكربون العضوي لكل جرام من التربة). ومع أن هذا المصطلح غير مناسب للمبيدات غير العضوية أو المبيدات العضوية عالية القطبية (التي تتأين في محلول التربة)، إلا أنه مفيد جداً في حالات معظم المبيدات العضوية. ونظراً لأن إدمصاص مبيد ما يرتبط بمحتوى التربة من الكربون العضوي، فإنه يمكننا تقدير الإدمصاص لأنواع عدة من الترب ذات محتوى معروف من الكربون العضوي حتى بدون القيام بقياسات ميدانية محددة للشد عن طريق القيام أولاً بتحويل K_{oc} إلى K باستخدام المعادلة (1-17) وقيمة C_{oc} للتربة المعنية، ثم تطبيق المعادلة (6 - 3).

وكما لوحظ في الجزء 4.6 (انظر المعادلة 5-6) فإن الكثافة الظاهرية للتربة ومحتواها الحجمي من الماء عاملين مهمين أيضاً في تقدير الشد بالنسبة لمبيد ما بواسطة التربة. وكقاعدة عامة، يمكننا القول أنه في حالة تربة معينة، كلما زادت قيمة معامل إدمصاص الكربون العضوي المقاس لمبيد ما، فإن المبيد يتحرك ببطء أكبر في الاتجاه لأسفل خلال التربة، ويقل احتمال تلويثه للمياه الجوفية. وبنفس المنطق، كلما زادت قيمة معامل إدمصاص الكربون العضوي لمبيد معين، زاد احتمال تسببه في تلويث المياه السطحية، بمعنى أنه يصبح أكثر عرضة لانجراف التربة، نظراً لأنه سوف يظل قريباً من سطح التربة لفترة طويلة من

الزمن. وبذلك، فإنه من الواضح أن نصف عمر المبيد عامل مهم أيضاً في تقدير إمكانية حدوث تلوث.

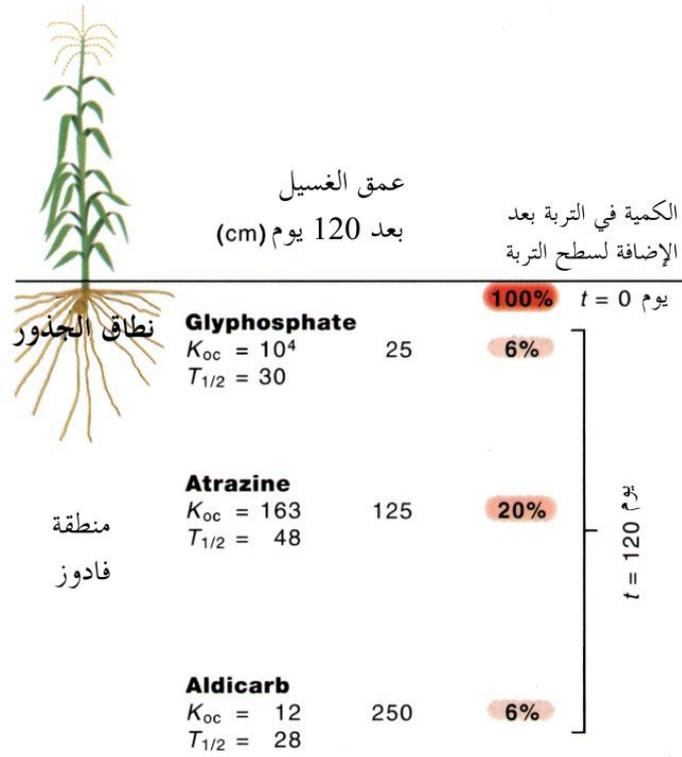
إن استخدام معاملات الإدمصاص وأنصاف الأعمار يسمح بالحصول على تقريبات فقط لأي حالة عامة، نظراً لأن هذه الثوابت معرضة لظروف بيئية خاصة قد تكون صالحة للتطبيق حقيقياً أو غير قابلة لذلك، فإن المستخدمين لهذه البيانات يجب أن يميزوا الأخطاء المحتملة المتضمنة فيها. ويشمل الجدول (1-17) قائمة مبيدات، ومدة بقائها كما هو محدد بواسطة نصف عمر تفككها، وتقديراً لإمكانية شدها بواسطة التربة. إن كثيراً من المبيدات المدونة في هذا الباب لا توجد بيانات متاحة خاصة بها، وهذا صحيح بشكل خاص بالنسبة للمبيدات التي لم تعد متاحة للتداول في الوقت الحاضر.

عند تقييم القدرة الكامنة لمبيد معين من حيث تسببه في التلوث، يكون ضرورياً الأخذ في الاعتبار معامل إدمصاصه ونصف عمره معاً. فمثلاً، لو أن مبيداً ما له معامل إدمصاص صغير للكربون العضوي (مثلاً، أقل من 100 ملليلتر/جم) ونصف عمر طويل (مثلاً أكثر من 100 يوم) فإنه سيمثل تهديداً مهماً للمياه الجوفية من خلال الغسيل، خاصة في الترب ذات المحتوى المنخفض من المادة العضوية. من ناحية أخرى، فإن مبيداً له معامل إدمصاص كربون عضوي كبير (مثلاً، أكثر من 100 ملليلتر/جم) ونصف عمر طويل من المرجح أن يبقى فوق أو قريباً من سطح الترب ذات المحتوى المتوسط من مادة الكربون العضوي، وهو ما يزيد من فرص نقله لبحيرة أو مجرى مائي بواسطة مياه الجريان السطحي. أما بالنسبة للمبيدات التي لها أنصاف أعمار قصيرة (أقل من 30 يوماً)، فإن

إمكانية تلوث المياه السطحية أو الجوفية يتوقف بالدرجة الأولى على حدوث سقوط أمطار غزيرة أو ري بعد الإضافة بوقت قصير. وبدون ماء لنقلها، فإن المبيدات ذات فترة نصف عمرية قصيرة تبقى في نطاق الجذور النشطة بيولوجياً من التربة وقد تتحلل بسرعة. أما من حيث حماية جودة المياه، فإن المبيدات التي تتميز بمعامل إدمصاص متوسط وأنصاف أعمار قصيرة فإنها تعتبر الأكثر (أماناً). وعلى الرغم من أنها ليست عرضة للغسل بسهولة، إلا أنها تتحرك خلال التربة مع الماء، وهو ما يقلل من إمكانية فقدانها بالتعرية، وتتحلل بسرعة مقبولة، فتقل فرص فقدانها إلى ما تحت نطاق الجذور. ويعرض الشكل (3.17) تمثيلاً تخطيطياً لعمق حركة مبيد الحشائش (glyphosate) القوي الإدمصاص ومبيد الحشائش (atrazine) المتوسط الإدمصاص ومركب (aldicarb) الضعيف الإدمصاص. وقد أفترض أن كميات الأمطار والري فاقت استهلاك المحصول من الماء بمقدار ضعف كمية الماء المخزنة في نطاق نمو الجذور عند محتوى ماء مثالي عمل على تحريك هذه المواد الكيماوية في الاتجاه إلى أسفل.

كما هو موضح بالشكل، فإن مبيد glyphosate سوف يتركز في نطاق نمو الجذور لعمق نحو 25سم، أما مبيد Atrazine فسيتركز قريباً من قاع نطاق نمو الجذور (نحو 125سم)، بينما سيتركز مبيد aldicarb عند عمق 250 سم تقريباً. إن نسبة أعلى من مبيد atrazine سوف تبقى في النظام، مقارنة بالمبيدين الآخرين، نظراً لأن له فترة نصف عمر أطول قليلاً. وبالنسبة لموسم نمو مستمر نحو 120 يوماً، سيبقى في التربة نحو 6% من مبيدي aldicarb و glyphosate المضافين، بينما سيبقى نحو 20% من مبيد atrazine. إن

هذا المثال لا يأخذ في الاعتبار الاختلافات العديدة في عمليات الإدارة التي تؤثر على بقاء هذه المبيدات وانتشارها في التربة.



شكل (17-3): الحركة والبقاء النسبي للمبيدات في التربة، يتأثر بقوة نقل مبيد ما بمعامل إدمصاص كربونه العضوي. يزيد الإدمصاص هنا حسب الترتيب: $aldicarb < atrazine < glyphosate$ ، تم توضيح كمية المبيد المتبقية في التربة بعد 120 يوماً من الإضافة بواسطة شدة اللون.

5.17 تخفيف التلوث بالمبيدات

عندما يكون وارداً حدوث فقد للمبيدات نتيجة ابتعادها عن الهدف، ومن ثم

وصولها للمياه السطحية والجوفية، فإنه يتعين على المستخدمين تطبيق إجراءات إدارة تقلل من إمكانية حدوث هذا الفقد، وكمثال افتراض وجود مساحات مروية. في هذه الحالة يأتي معظم الماء المضاف لحقل معين بعد إضافة المبيد من الري بدلاً عن الأمطار. لذا، فإن طريقة إضافة المبيد، وتوقيت الإضافة، والتحكم في الري هي جميعاً عوامل يتعين أخذها في الاعتبار.

تعتبر هذه العوامل هامة بشكل خاص في حالة مبيدات الحشائش، التي يتميز بعض منها بتعرضه لغسيل متوسط إلى المياه الجوفية. وبالمحافظة على كفاءة ري عالية عقب إضافة مبيد الحشائش، فإن مياه الري، ومن ثم المبيد سوف يظل ضمن نطاق نمو جذور المحصول، حيث يكون متاحاً للامتصاص بواسطة النباتات الطفيلية. إضافة لذلك فإن إضافة مبيد الحشائش لجانب خط مرقد النبات - بدلاً عن إضافته على امتداد الأحدود والمرقد كله - سوف يحفظ قدرًا أكبر من المبيد في الجزء الأعلى من سطح التربة. أيضاً، يقلل حث التربة أو يلغى تماماً المسامات الكبيرة عند سطح التربة، وبذلك يزيد من إدمصاص مبيد الحشائش المضاف على حبيبات التربة ويقلل من إمكانية فقده.

إن التركيز الفعلي لمبيد معين الذي يأخذ طريقة إلى الماء له أهميته أيضاً. فقد أصدرت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) خطوطاً إرشادية للمستويات المهددة للصحة (HALs) الخاصة ببعض المبيدات، التي تشمل عامل السلامة بالنسبة لصحة الإنسان عند عدة مستويات من التراكم. فالمياه التي تحتوي على مبيدات بتركيزات عند المستويات التي اقترحتها وكالة حماية البيئة أو تحتها (HAL) تصنف على أنها مقبولة للشرب يومياً على مدى

الحياة. لكن عوامل السلامة هذه لا تعبر اهتماماً للمشكلة النفسية التي تتركز في أن معظم الناس لا يريدون أي شيء في موارد مياههم. (مثلاً حتى إضافة عنصر الفلور للتحكم في تسوس الأسنان عادة ما يثير جدلاً قوياً على المستوى المحلي ضد الجهات التي توفر المياه). كما أن مستويات السلامة المشار إليها لا تأخذ في الاعتبار أيضاً حقيقة أن بعض الأحياء البرية قد تتعرض للمبيدات التي تصل للجداول المائية، وتميل السمية للإنسان والسمية للحيوانات الأخرى إلى الاختلاف كثيراً، لكن مستويات السلامة (HALs) توفر تبريراً قوياً لتأسيس أولويات للتنظيف والتقنين.

كثيراً ما يطبق مفهوم الإدارة المتكاملة للآفات (Integrated Pest Management IPM) للتعامل من أجل التقليل من مشكلة التأثيرات السلبية للتلوث البيئي الناتج عن سوء استخدام المبيدات. إن المبدأ وراء الإدارة المتكاملة للآفات هو الرغبة في تخفيض استخدام المبيدات إلى الحد الأدنى الضروري للمحافظة على جودة الغذاء الذي سيقوم المستهلكون بشراؤه وفي الوقت نفسه الرفع إلى الحد الأقصى من جودة البيئة وصحة الإنسان. إن أحد أساليب الإدارة المتكاملة للآفات (IPM) استخدام وحدات الحرارة (heat units) لمتابعة نمو محصول القطن والآفات وتخطيط مكافحة الحشرة أثناء أوقات تتزامن مع المراحل الحرجة في نمو الحشرة. وتعتبر وحدات الحرارة قياساً لمقدار الزمن الإجمالي الذي تحتاجه آفة أو محصول معين حتى تتطور. وهي ترتبط بكل من الفترة الزمنية اللازمة للتطور ودرجة الحرارة أثناء التطور، وبدراسة نتائج أبحاث سابقة، تمكن العلماء من التنبؤ بالفترات (periods). التي تصل فيها تجمعات آفة معينة الحد الأقصى اعتماداً على إجمالي وحدات الحرارة التراكمية

خلال العام. وبذلك، فقد طوروا مواعيد للزراعة ومواعيد لإضافة المبيدات تتيح للمزارع الاستفادة منهما لإدارة الآفات، وتتيح متابعة مواعيد الزراعة فرصة للمزارعين لتأسيس محصول معين قبل أن تصبح آفة معينة مشكلة بينما يسمح اختيار مواعيد إضافة المبيد بمكافحة مثالية للآفة مع تخفيض مهم في عدد المعاملات اللازمة لتحقيق ذلك، وتكون النتيجة إبادة أكثر فعالية للآفة، وكمية أقل من الملوثات المحتملة، مع محافظة أكثر كفاءة للحشرات النافعة في حقول المحاصيل.

وعموماً ينشأ التلوث بالمبيدات من المصادر المباشرة عن عدم السيطرة الكافية عند مواقع الخلط والشحن، خاصة عندما تكون هذه المواقع قريبة من آبار مياه. إن الفشل في منع وصول المبيدات إلى موارد المياه عندما تخلط أو تضاف مع مياه الري (chemigation) يزيد كثيراً من إمكانية تلويث مصدر المياه. كذلك، فإن الاندلاقيات (spills). تعتبر أيضاً مصدراً مباشراً (point – source) للتلوث بالمبيدات. ويشمل الإجراء التصحيحي لمثل هذه الحالات، الذي يعتبر واضح المعالم إلى حد كبير، يتلخص في بناء وصيانة مساحات مبطنه غير منفذة (مثلاً، خرسانة) في مواقع الخلط والتحميل، وتركيب أدوات تمنع الإرجاع إلى المصدر (antisiphon) على امتداد خطوط توصيل المياه، مع ضرورة تحديث المعلومات والمراجعة المتكررة لمخطط الاستجابة في حالة حدوث اندلاق (spill). ويمكن أن يحدث تلوث نتيجة الفشل في إتباع التعليمات الواردة في ملصق المبيد أثناء المعاملة. لكن هذه الأنواع من القصور نادراً ما توثق كأسباب للتلوث الحاصل.

بمجرد أن تصبح تربة ما أو مياه سطحية أو جوفية ملوثة بمبيد معين، تصبح المعالجة

ضرورية أحياناً. ويشمل العلاج عموماً (الذي تمت مناقشته بتفصيل أكبر في الباب 11) إزالة المادة الكيميائية المؤذية من الموقع و/ أو تسريع عملية تفككها. إن كلا من هاتين العمليتين يمكن أن تكونا صعبة ومكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً. فمثلاً، إذا ما كان ضرورياً إزالة الملوث بعيداً عن الموقع، فإن تكاليف النقل و/ أو الضخ قد تفوق كثيراً جداً تكاليف أي إدارة أو صيانة تلزم لمنع التلوث أصلاً. ويجري الكثير من البحث في الوقت الحاضر من أجل اكتشاف طرق فعالة لتفكيك أنواع محددة من الكيماويات حيويًا. ومن الأساليب ما يسمى العلاج بواسطة النباتات (phytoremediation) للملوثات العضوية والمغذيات الذي يشمل استخدام نبات حشري من أجل معالجة تربة ملوثة عند الموقع. وبالنسبة للعلاج النباتي، تتم زراعة التربة الملوثة أو حتى التربة فوق مستوى ماء أرضي حر وضحل وملوث بأنواع من النباتات تمتص المبيد الملوث. ومع حصادها عند مرحلة نمو مناسبة، فإن تركيز الملوث في التربة أو الماء الجوفي تكون قد تناقصت. ويبدو أن العلاج النباتي هو الأفضل لملاءمة للاستخدام في المواقع التي تتميز بتلوث ضحل (ضمن 5 أمتار من سطح التربة)، وفي حالة الملوثات الكارهة للماء بدرجة متوسطة، و/أو في وجود كميات مفرطة من المغذيات.

References and Recommended reading

- Alford H.G. and Ferguson M.P. (1982) *Pesticides in Soil and Groundwater: Proceeding of a Conference at University of California*. Davis Special Publication No. 3300. Agricultural Sciences Publications, University of California, Berkeley , California.

- Sine, C. (1993) *Farm Chemicals Handbook*. Meister Publishing Company, Willoughby, Ohio.

- Parsons D. W. and Witt J.M. (1988) *Pesticides in Groundwater in the United States of America: A Report of 1988 Survey of State Lead Agencies*. Department of Agricultural Chemistry, Oregon State University, Corvallis, Oregon.

- Sherman W., Erwin W., Short D., DeWalt D, and Hayes T. (1993) 1993 Arizona Agricultural Statistics. Arizona Agriculture Statistics Service, Phoenix, Arizona.

- Smith E.G., Knuston R.D., Taylor C.R., and Penson J.B. (1990) *Impact of Chemical Use Reduction on Crop Yields and Costs*. Agriculture and Food Policy Center, Department of Agriculture Economics, Texas A & M University, College Station, Texas.

- van Es H.M. and Trautmann N.M. (1990) *Pesticide Management or Water Quality*. Extension Series No. 1. Distribution Center, Cornell University, Ithaca, New York.

- Watson J. and Baker P. (1990) *Pesticide Transport through Soils*. Bulletin No. 9030. Arizona Cooperative Extension, College of Agriculture, The University Of Arizona, Tucson.

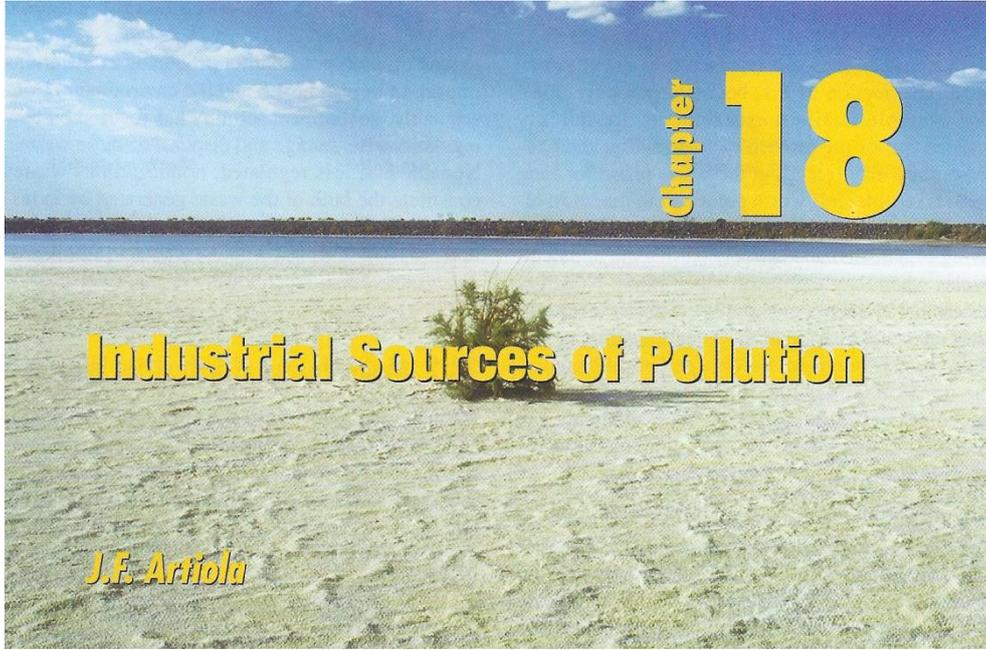
- Williams W.M., Holden P.W., Parsons D.W., and Lorber M.W. (1988) *Pesticides in Groundwater Data Base: 1988 Interim Report*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticide Programs, Washington, D.C.

مسائل وأسئلة

1. اشرح لابن عمك ذي العشرة أعوام الذي يعيش في مدينة عريقة، لماذا تكون بعض المركبات الطبيعية (سيئة لنا) بينما تكون بعض الكيماويات المصنعة (جيدة لنا)؟
2. ضع في قائمة بعض المعايير المستخدمة لتحديد فيما إذا كان مبيد معين يتعين ضمه لقائمة وكالة حماية البيئة (EPA) للكيماويات المحظورة، اشرح لماذا تم منع تداول بعض المبيدات العضوية مثل DDT للاستخدام في الولايات المتحدة، اشرح إجابتك لابن عمك الريفي ذي العشرة أعوام.
3. ما هو المبيد، وكيف يتم تصنيف المبيدات المختلفة؟ ما هو الفرق بين مبيد تلامسي (contact pesticide) ومبيد جهازى (systemic pesticide)؟ اشرح لماذا يمكن اعتبار منظم نمو (growth regulator) مبيداً؟
4. ما هو المكون النشط (active ingredient)؟ والمكون الخامل؟ لماذا تعتبر بعض المكونات خاملة على الرغم أنها قد تكون سامة؟
5. اشرح لماذا يكون من الصعب جداً القيام بتقديرات صحيحة لاستخدام المبيدات. اقترح بعض السبل التي يمكن أن تحسن الوضع.
6. ما هما الخاصيتان الأكثر أهمية لمادة كيميائية معينة التي تحدد ما إذا كان تضمينها في مبيد معين يمثل تهديداً للمياه الجوفية؟
7. ما هو معامل إدمصاص الكربون العضوي وكيف يستخدم؟ لماذا لا يكون هذا المعامل مفيداً عندما يكون الملوث مركباً عضوياً عالي القطبية؟

8. إذا كان مركب له معامل إدمصاص عضوي عالٍ، ماذا يعني ذلك لك من حيث إمكانية تعرضه للغسيل ليصل المياه الجوفية؟ المياه السطحية؟
9. ماذا تعني (الإدارة المتكاملة للآفات)؟ اشرح لماذا هي مفيدة لتخفيف التلوث بالمبيدات؟
10. ما هي العوامل الثلاثة التي يمكن أخذها في الاعتبار للتقليل إلى الحد الأدنى من فواقد المبيدات للمياه الجوفية أو المياه السطحية؟

الباب الثامن عشر
مصادر التلوث الصناعي



غالباً ما يترتب عن معالجة الدفق الصناعي لمخلفات سائلة، التي في حد ذاتها يتعين التخلص منها، في الصورة أعلاه تسببت مخلفات ملحية من محطة لإزالة غاز الكبريت إلى تكون مساحة (playa) قاحلة قادرة فقط على دعم غطاء نباتي ضئيل يتحمل الظروف الملحية.

1.18 المخلفات الصناعية

كان القرن التاسع عشر فترة نمو سريعة بالولايات المتحدة الأمريكية، قامت خلالها وبانتظام كثير من الصناعات الجديدة والمتطورة القائمة بتحويل مواد خام إلى سلع في صورة نهائية. وقد ركزت تلك الصناعات خلال ذلك القرن وجزء هام من القرن العشرين على

جودة المنتج النهائي، وفي الوقت نفسه تُلقى بالمخلفات التي تولدت أثناء العمليات الصناعية المتزايدة في التعقيد. ومثل الثورة الإنجليزية (التي سبقت بقرن مضى)، كانت الثورة الصناعية الأمريكية فترة إنتاجية غير مسبوقة، لكنها كانت أيضاً فترة منتجات ثانوية غير منضبطة تم خلالها ضخ كميات غير مسبوقة من المخلفات الصناعية الخام للبيئة.

كان التعدين أحد المجالات المبكرة التي ساهمت في الثورة الصناعية، حيث بدأت بالفحم وخامات المعادن. وبعد تحويلها أصبحت هذه المعادن تشكل الوقود وطوب البناء للمجتمع الغربي الصناعي. وباكتشاف مخزونات النفط والغاز الطبيعي تبعتها سريعاً الصناعات الكيميائية، ومنذ بداية القرن العشرين (1900) إلى أواخر الستينيات (1960)، قامت الصناعات الكيميائية بتحسين، وإنتاج، وتطوير مئات الآلاف من الكيماويات المصنعة المشتقة من النفط التي استخدمت في إنتاج السلع.

على الرغم من أن المواد البلاستيكية التي تحتوى في تركيبها على الكربون، بجانب الكيماويات العضوية مثل المبيدات والمذيبات، سيطرت على الإنتاج الصناعي منذ أوائل الخمسينيات من القرن الماضي (1950)، فقد ظلت السلع ذات الأساس المعدني أساسية بالنسبة للصناعة الحديثة. إن العديد من السلع الحديثة - ابتداءً بالسيارات إلى الطلاء - تتطلب استخدام معادن شائعة مثل الحديد والألومنيوم والنحاس. وبالإضافة لهذه المعادن الثلاثة - فإن فلزات وأشباه أخرى أقل شيوعاً مثل الرصاص والكاديوم والنيكل والزئبق والخاصين والسليسيوم تعتبر ضرورية لصناعة هذه السلع وغيرها. لذا، يشيع وجود المعادن الفلزية التي لها تأثيرات معقدة وغير مفهومة تماماً على البيئة.

وعلى الرغم من معرفة أن إضافات المعادن للبيئة بصورة مركزة وبطرق غير محكمة تمثل مخاطر قصيرة وبعيدة المدى على صحة الإنسان، إلا أنه يعرف القليل عن المصير النهائي لهذه العناصر بمجرد انطلاقتها في البيئة (انظر الجزء 1.8.21). فمثلاً، بينما تغسل معظم العناصر بسرعة من الهواء الجوي بُعيد تحررها، فإنها قد تبقى في الطور المائي لفترات طويلة من الزمن. وتجدر الإشارة إلى أن معظم العناصر نشطة بيولوجياً (بمعنى أنها تمتص بواسطة الكائنات الحية) وتساهم بنشاط في الدورات الطبيعية عندما تكون في الطور المائي. ومع ذلك، فإن معظم العناصر تتجزأ في نهاية الأمر (تتراكم) إلى أطوار صلبة مثل ترسيبات مائية وترب، وعندما تصبح هذه العناصر جزءاً من الأطوار الصلبة، تنخفض التحولات التي تمت الإشارة إليها دراماتيكيًا، لكن معظم العناصر يمكن أن تصبح ذائبة مرة ثانية، عندما تحدث تغيرات مناخية، وتعود من جديد في صورة نشطة حيويًا.

أيضاً تحرر الصناعات التي تقوم بتعدين المواد الخام ومعالجتها، وتلك التي تقوم بالحفر بحثاً عن النفط والغاز، أو تقوم بحرق الفحم أحجاماً كبيرة من المخلفات التي تحتوي على الأملاح. وبالنسبة لهذه الصناعات فإن الأنواع الكيميائية السائدة تضم أيونات الصوديوم والكالسيوم والكبريتات والكلور والكربونات، وهي أيضاً موجودة بكميات وفيرة جداً في البيئة الطبيعية، ونظراً لأن هذه المخلفات لا تكون في حد ذاتها خطيرة أو شديدة السمية، فإنها لا تمثل مصدر مخاطرة مباشرة للصحة والبيئة. ومع ذلك فإن حجوم هذه المخلفات التي تتولد كل عام كبيرة بقدر كاف لتصبح مسألة تثير الاهتمام. وفي هذا الباب سيتم التركيز على إنتاج المخلفات التي تحتوي على العناصر الفلزية وتلك التي تحتوي في

تركيبها أملاحاً كمصادر للتلوث.

تصنف المخلفات الصناعية على أنها خطرة (hazardous) أو غير خطرة (nonhazardous) حسب معيار التنظيمات الفيدرالي (Code of Federal Regulations, CFR 40, Part 261). إن معظم المواد المصنفة على أنها خطرة يتم تنظيمها تحت هذه التقسيمات المحددة مثل المخلفات الناتجة عن التعدين وحقول النفط. ومن بين جميع المخلفات المنتجة في الولايات المتحدة، يصنف أكثر من 95% منها على أنها مخلفات بلدية، وصناعية وتعدينية ومنتجات نفطية وغازية غير خطرة. وقد تمت مناقشة المخلفات البلدية في الباب العاشر والعشرين من هذا الكتاب. وعلى الرغم من أن المخلفات الصناعية ومخلفات التعدين ومخلفات حقول الغاز والنفط يتم التعامل معها بشكل منفصل، إلا أنه سوف يتم وصفها جملة في هذا الباب على أنها "مخلفات صناعية" ومناقشتها معاً.

حظيت المخلفات الصناعية المصنفة على أنها خطرة اهتمام ملحوظ في السنوات الأخيرة نظراً للإمكانية الواضحة لإحداثها تأثيراً مدمراً لصحة الإنسان والبيئة. ونتيجة لذلك، فإن التدقيق الحكومي قد تركز على وضع تنظيمات جديدة تخص تخزين هذه المخلفات والتخلص منها. ومع ذلك فإن المخلفات غير الخطرة التي يتم مراقبتها بدرجة أقل، تمثل القدر الأكبر من المخلفات التي تولدها الصناعة. إضافة لذلك، فإن هذه المخلفات تحتوي عادة على نفس المكونات الملوثة الموجودة في المخلفات الخطرة، ولكن بتركيزات أقل كثيراً.

2.18 الصور الرئيسية للمخلفات الصناعية

بغض النظر عن الكيفية الفنية لوضع المخلفات في مجاميع بواسطة وكالات التنظيم

المختصة، فإن قدرات هذه المخلفات على تحرير الملوثات تعتمد على خصائصها الفيزيائية، التي تحدد طريقة انتقالها بيئياً. إن أنواع المخلفات الأساسية الأربع حسب الخصائص الفيزيائية التي تشمل: مخلفات قابلة للاحتراق (Combustible wastes) ومخلفات صلبة، ومخلفات عضوية صلبة ووحل، ومياه عادمة، كما هو موضح في الشكل (1-18)، الذي يبين كيف يمكن لكل نوع منها في نهاية الأمر تحرير ملوثات إلى بيئات الهواء الجوي واليابسة والمائية. ويمكن للمخلفات القابلة للاحتراق أن تطلق مباشرة منتجات ثانوية للهواء الجوي في صورة غازات و/ أو ملوثات جسيمية عالقة عندما لا يتم ترشيحها بشكل صحيح، أما المخلفات الصلبة فيمكنها أن تطلق ملوثات للهواء الجوي من خلال نقل الغبار أو المواد الجسيمية العالقة، أو أنه عندما تتلامس هذه المخلفات مع الماء، فإن مكوناتها القابلة للذوبان يمكن أن تغسل خلال التربة أو إلى ما تحتها. ويمكن للوحل الصلب (sludge) والوحل السائل (slurry) أن يطلقوا ملوثات من كلا الطورين الصلب والسائل إلى داخل المياه الجوفية. أما بالنسبة للمياه العادمة، ونظراً لحالتها السائلة فإنها تكون دائماً مصدراً محتملاً للتلوث إذا ما تم ضخها مباشرة للبيئات المائية أو اليابسة دون معالجة مناسبة. وعموماً، يمكن ملاحظة أن الملوثات التي يكون لها التأثير الأكثر حدة على البيئة هي تلك التي توجد عادة في أحد الطورين السائل أو الغازي. ونظراً لطبيعتها السائلة، فإن هذه الملوثات يمكن أن تنقل لمسافات بعيدة وهي بذلك تؤثر على قطاعات واسعة من البيئة، (إن الطرق الفيزيائية المختلفة التي يتم بواسطتها انتقال الملوثات داخل البيئات ومن بيئة لأخرى قد تمت مناقشتها في البابين الخامس والسادس).

باستثناء بعض صور النظائر، فإن أياً من الأربعين عنصراً المهمة اقتصادياً للمجتمع الصناعي الحديث لا يمكن تحضيرها اصطناعياً. لذلك، فإن هذه العناصر يتعين استخراجها أو تعدينها، واستخلاصها من حالتها الطبيعية، ومن ثم تنقيتها. ونتيجة لهذه العمليات، إضافة لعمليات أخرى تستخدم في التصنيع، فإن هذه العناصر - بما في ذلك كثير من المعادن الاستراتيجية غالية الثمن مثل الذهب (Au) والبلاتين (Pt) والكوبالت (Co) والأنتيمون (Sb) والتنجستن (W) - يمكن أن توجد بكميات معتبرة في بعض المخلفات الصناعية. وأن بعض العناصر، مثل الزئبق (Hg) والزرنيخ (As)، يمكن أن توجد في المخلفات الغازية والسائلة والصلبة. كما أن عناصر أخرى مثل الرصاص (Pb) والكروم (Cr) يمكن أن تضخ للهواء الجوي كمواد عالقة مرتبطة بعناصر أخرى مثل الكبريت (S) والكربون (C) .

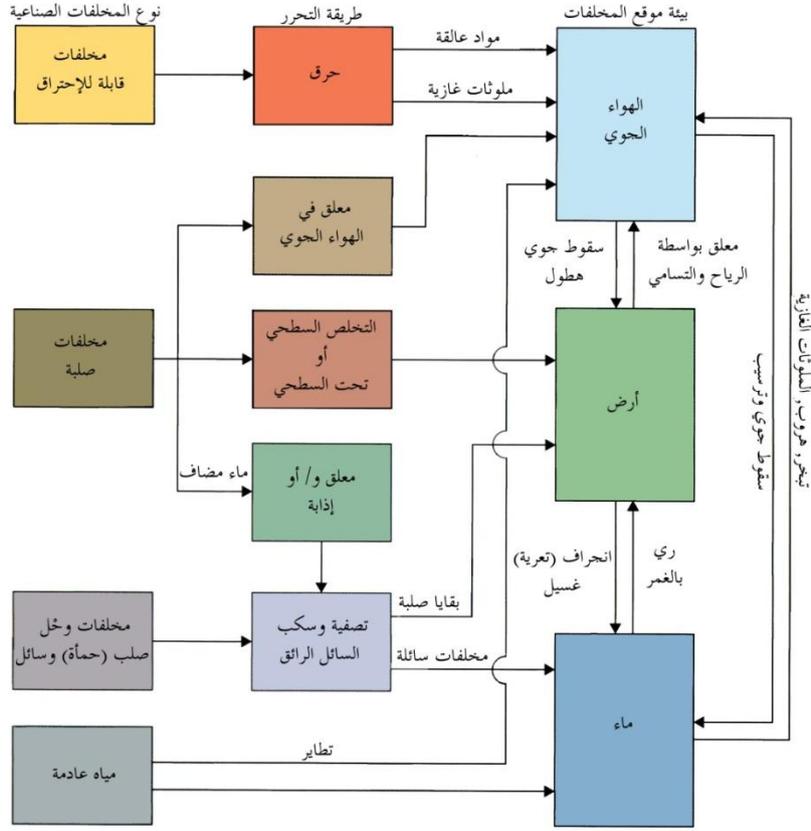
وعلى كل حال، فإن معظم العناصر المدرجة في الجدول (18 - 1) بما في ذلك الفلزات (metal) وشبه الفلزات (metalloids) والأملاح يمكن أن تذوب في السوائل (عادة الطور المائي) الذي يوجد في المياه العادمة وفي المخلفات العضوية الصلبة (sludges) والمخلفات الصناعية الصلبة. أي أنه، ومع وجود بعض الاستثناءات، فإن معظم السائل الصناعي والمخلفات من الوحل (slurry) والمواد العضوية الصلبة لها طور مائي يمكن أن يتراوح من 99% إلى أقل من 10% على أساس الوزن. وعلى هذا يمكن استخدام إزالة الماء (dewatering) لتخفيض الكثير من كتلة هذه المخلفات. إضافة لذلك فإن صوراً عدة من الملوثات العضوية وغير العضوية هي أيضاً قابلة للذوبان في الماء لدرجات متفاوتة، وهي

بذلك توجد في الطور المائي لهذه المخلفات. إن هذه الأطوار المائية بمجرد فصلها عن المواد الصلبة يتعين معالجتها كميها عادمة قبل ضخها للبيئة المفتوحة.

1.2.8 المياه العادمة (Wastewaters)

تستخدم كثير من الصناعات، مثل مناشر الخشب ومطاحن الورق ومواقع تصنيع الأغذية أحجاماً كبيرة من المياه كجزء أساسي في عملية معينة أو كوسيلة لتنظيف ونقل البقايا بعيداً. ومن الصناعات الأخرى التي تستخدم كميات كبيرة من المياه إما ضمناً أو كوسيلة تنظيف ونقل كل من مصانع تنقية المعادن والكثير من المصانع الكيماوية التي تُصنع منتجات متنوعة مثل البلاستيك والمواد الصيدلانية والأقمشة والمنظفات والطلاء. لذا، فإن العمليات الصناعية هي عادة مصادر أولية (مباشرة) للتلوث لأنها تولد أحجام كبيرة من المياه العادمة التي يتعين معالجتها أو ضخها مباشرة للبيئة.

فعلى سبيل المثال، يمكن لمصانع تنقية المعادن توليد كميات كبيرة من المياه العادمة التي تحوي كميات معتبرة من الفلزات، حيث تصل تراكيزها، في المياه العادمة الخام وغير المعالجة إلى 1000 مجم في اللتر الواحد من Cr و Ni و Cu و Zn و Fe و Cd. من ناحية أخرى فإن مواقع تصنيع الأغذية ومطاحن الورق تولد عادة مياهاً عادمة ذات محتوى منخفض من المعادن لكنها ذات محتوى عال من المكونات العضوية والأملاح التي تضم في تركيبها من أيونات Na^+ ، Ca^{2+} ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، CO_3^{2-} .



شكل (1-18) مصادر وطرق تحرر الملوثات في البيئة.

تمثل العواصف الممطرة بالمواقع الصناعية مصدراً ثانوياً مهماً للتلوث من الصناعة. إن مياه الجريان السطحي من المواقع الصناعية يمكن أن تتعرض للتلوث عندما تأتي مياه الأمطار في تلامس مباشر مع مواد مخزنة مثل الوقود، والمواد الكيماوية ونواتج التعدين وكذلك الغبار والرسوبيات أو حتى انبعاثات المداخن. لقد تم في الوقت الحاضر تنظيم المياه

الناجمة عن العواصف الممطرة، وبذلك فإن تركيز الملوثات التي تنتج عنها قد تم تخفيضها. ومع ذلك فإن تأثيرها التراكمي على البيئة المحيطة كثيراً ما تكون واضحة . إن هذه التأثيرات بعيدة المدى تكون واضحة بشكل خاص في حالة النشاطات الصناعية التي تقع تقليدياً قريباً من مجارى المياه حيث يمكن قراءة السجل التاريخي لانبعاثات التلوث في الطبقات الرسوبية الموجودة هناك .

جدول (1-18): عناصر ذات أهمية اقتصادية والصور التي توجد عليها عادة في المخلفات

العنصر	الصور الشائعة في المخلفات
الألومنيوم	أكاسيد Al^{3+} ، عنصر Al
الأنثيمون	Sb^{3+} ، Sb^{5+} (أكاسيد وهاليدات)
الزرنيخ	أكاسيد As^{III} (في صورة أنيونية)
الباريوم	$BaSO_4$
البورون	أكاسيد B^{3+} (في صورة أنيونية)
البروم	أيون Br^-
الكاديوم	Cd^{2+} وهاليدات وأكاسيد Cd^{2+}
الكالسيوم	$CaCO_3$ ، $CaCO_4$ ، أكاسيد Ca^{2+}
الكربون	CO_3^{2-} ، مركبات عضوية
الكلور	أيون Cl^-
الكروم	أكاسيد Cr^{III} ، عنصر Cr
الكوبالت	Co^{2+} (أمينات وأكاسيد)
النحاس	أكاسيد Cu^{2+} ، عنصر Cu
الفلور	أيون F^-
الذهب	Au^{3+} (هاليدات، أكاسيد، سيانيدات)
الحديد	أكاسيد Fe^{II} ، عنصر Fe
الرصاص	أكاسيد و كربونات Pb^{2+} ، عنصر Pb

العنصر	الصور الشائعة في المخلفات
المغنيسيوم	Mg^{2+} في صورة $MgCO_3$ ، $MgSO_4$ ، أكاسيد Mg، أسبستوس
الزئبق	أكاسيد وهاليدات Hg^{2+} ، معقدات زئبق عضوية
المولبيدينوم	أكاسيد Mo^{n+} (في صورة أنيونية)
النيكل	أيون Ni^{2+} ، عنصر Ni، أمينات
النيتروجين	أيونات NO_3^- و NH_4^+ ، مركبات عضوية
الفوسفور	أيون PO_4^{3-}
البلاتين	Pt^{2+} (هاليدات، سيانيدات، مركبات عضوية)
البوتاسيوم	أيون K^+ ، معقدات عديدة مع الأكسجين والهاليدات.
السليتيوم	أكاسيد Se^{n+} (في صورة أنيونية)
السليكون	أكاسيد Si^{n+} ، أسبستوس
الفضة	عنصر Ag، AgCl
الصوديوم	أيون Na^+
الكبريت	أيون SO_4^{2-} ، مركبات عضوية.
التيتانيوم	أكاسيد Ti^{4+}
التنجستون	أكاسيد W^{6+}
اليورانيوم	معقدات عديدة مع الأكسجين والهاليدات
الفاناديوم	أكاسيد V^{n+}
الزنك	أكاسيد Zn^{2+} وعنصر Zn

2.2.18 المخلفات الصلبة والوحل

عملياً وفي جميع العمليات الصناعية التي تنتج مخلفات صلبة تتواجد نواتج المخلفات في المياه في صورة معلمات غروية أو مختلطة مع الماء في صورة صلبة (sludge) أو وحل (slurry). لذلك، فإن كثير من المتبقيات الصلبة الصناعية ربما تحتوي على فلزات وأشباه فلزات وعناصر أخرى في صورة معقدة أو مختلطة في طور صلب/سائل مما يجعل التخلص منها

معقدًا. فمثلاً، تنتج النشاطات الصناعية المرتبطة بالطلاء الكهربى للمعادن (metal plating) وتلميعها كميات كبيرة من الحمأة التي عادة ما تكون حمضية ($\text{pH} < 2$) وتحتوي على أكثر من 1% (10,000 مجم/كجم) من واحد أو أكثر من الفلزات مثل Cr و Ni و Cu و Zn و Cd. ونظراً لأن لهذه المخلفات خصائص سامة خطيرة ودائمة، فإنه يتعين معادلتها و/أو أكسدتها وتثبيتها فيزيائياً قبل التخلص منها (انظر الجزء 2.4.11).

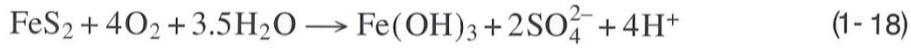
يتولد أيضاً عن الصناعات الكيميائية كميات كبيرة من المخلفات الصلبة، لكن هذه المخلفات تميل إلى أن يكون محتواها عالياً من المكونات العضوية مثل الزيوت، والراتينجات (resins) والبقايا البيولوجية التي لا تذوب ولا تختلط بسهولة مع الماء. وفي العادة تحتوي المخلفات الصلبة الناتجة عن محطات معالجة المياه العادمة الصناعية، مثلاً على تراكيز منخفضة من الملوثات، حسب عمليات المعالجة التي تتعرض لها. وفي حالة أن المخلفات الصلبة المتبقية تحتوي على مكونات عضوية غير قابلة للذوبان وتراكيز معدنية منخفضة، فإن الردم والحرق وحتى إضافتها للأرض تمثل بدائل آمنة للتخلص النهائي منها (انظر الباب 10).

3.2.18 مخلفات صناعية ذات محتوى عالٍ من الفلزات

1.3.2.18 التعدين

ينتج التعدين السطحي بالكشط والتعدين تحت السطحي لخامات المعادن كميات هائلة من بقايا أو مخلفات المناجم التي تحتوي على تراكيز عالية من الفلزات، ويتم عادة التخلص من هذه المخلفات في المساطب، والبرك والمنخفضات الطبيعية. لذلك، فإن هذه المخلفات التي تتكون عادة من معادن أولية يمكنها أن تحور البيئة فيزيائياً وكيميائياً. فمثلاً،

ينتج عن التعدين السطحي (strip mining) لفلز النحاس كميات كبيرة من المخلفات التي كثيراً ما تحتوي تركيزات تتراوح ما بين 100-1000 مجم/كجم من فلزات مثل الكاديوم والرصاص. وبنفس الكيفية يمكن لمعدن بيريت الحديد (FeS_2) الذي يرتبط وجوده عادة بخامات النحاس والفضة والرصاص أن يحدث تأثيراً مدمراً على البيئة المائية ذلك أن أكسدته تؤدي إلى تكون حمض الكبريتيك في هذه البيئات بالمعادلة:



إضافة لذلك فإن عمليات التعدين التي تعامل أو يتم خلالها غسل الخامات و/أو تخزين الكيماويات الحمضية لاستخلاص الفلزات يمكن أن ينتج عنها كميات كبيرة من مياه عادمة حمضية تحتوي على فلزات، وكذلك غسيل يحتوي معقدات من فلز - سيانيد - (metal cyanide complexes).

2.3.2.18 انبعاثات الهواء

تولد عمليات صهر المعادن وتنقيتها مخلفات قد تحتوي على عشرة أو أكثر من الفلزات وشبه الفلزات الخطرة المدرجة في الجدول (1-18)، مثل Pb و Zn و Ni و Cu و Cd و Cr و Hg و Se و As و Co. إن هذه العناصر قد توجد في الخامات المستخدمة، أو قد تضاف كفلزات مختلطة إلى الصهارة لإنتاج سبائك فلزية. لذلك، فإن مخلفات الصهارة التي تحتوي على فلزات يتعين التعامل معها والتخلص منها كمخلفات خطرة. ويتطلب الصهر والتنقية درجات حرارة عالية جداً لاختزال الخامات المعدنية (مثل البيريت واليوكسيت لإنتاج الحديد والألومنيوم) إلى فلز نقي ولتنقية الفلزات والسبائك. فعلى سبيل المثال، ينصهر الحديد

عند 1536م°، والنحاس عند 1083م°، والألومنيوم عند 660م°. وعند هذا المستوى من درجات الحرارة، تتطاير كثير من الفلزات ومركبات الفلزات؛ مثلاً تكون درجات غليان الزئبق والكاديوم والزنك والزرنيخ 357 و765 و906 و613 م°، على التوالي. لذلك، فإن مداخن المصاهر وتلميع المعادن التي لا توجد بها وحدات لامتصاص الغاز يمكن أن تطلق كميات كبيرة من الفلزات السامة المتطايرة نسبياً إلى الهواء الجوي.

من ناحية أخرى، يستخدم الترميد (incineration) عادة لتدمير المخلفات العضوية السامة (انظر الجزء 1.6.10)، وتؤدي درجات حرارة الترميد المنخفضة (حتى 850م°) ودرجات حرارة الترميد العالية (نحو 1200م°) إلى أكسدة معظم المخلفات التي تحتوي في تركيبها على كربون إلى ثاني أكسيد الكربون وبخار ماء. ويتم تنظيم كفاءة الترميد بدقة يتعين أن تتجاوز نسبة 99.99% من حيث تدميرها لجميع المركبات العضوية. لكنه يلاحظ أن الفلزات والأملاح الموجودة في هذه المخلفات لا يمكن تدميرها وتنتهي عادة في بقايا الرماد. لذلك فإن بقايا الترميد تميل لأن تكون عالية في محتواها من الفلزات والأملاح. وفي نهاية المطاف يتعين التخلص من بقايا المخلفات التي تحتوي على الفلزات والأملاح كما هو الحال مع أي مخلفات صناعية أخرى تحتوى على فلزات. إن هذه المخلفات يتم التخلص منها عادة بالردم بعد تثبيتها فيزيائياً (تحويلها إلى صور صلبة، انظر الجزء 4.3.18). وتجدر الإشارة، إلى أن المحارق ذات الكفاءة المتدنية أو التي يتم تشغيلها بطريقة غير صحيحة أو المحارق التي تحرق مخلفات ذات محتوى عال من فلزات متطايرة (مثل Hg، Cd، Zn، As) يمكنها أن تطلق كميات كبيرة من الفلزات إلى الهواء الجوي. إضافة لذلك،

فإن فلزات أخرى قد تنحدر أيضاً إلى الهواء كمادة جسيمية معلقة (particulate matter) أثناء عملية الترميد إذا لم تتم تصفية الغاز المنبعث من جهاز الترميد. يمكن أن تأتي ملوثات الهواء الجوي أيضاً من مصادر أخرى كثيرة إلى جانب المداخن؛ وتشمل هذه المصادر الانبعاثات الغازية عند درجات حرارة منخفضة والهباء (particulates) مثل الأيروسولات والغبار الناتج عن العمليات الصناعية ومن النشاطات عند المواقع. وتتحرك الملوثات المنقولة بالهواء وترسب على امتداد مسافات بعيدة ومساحات كبيرة من الأرض (انظر الجزء 4.12 لمزيد من المعلومات حول انتشار الملوثات في الهواء الجوي). ويمكن أن تتراوح معدلات الترسب في المناطق الحضرية سنوياً ما بين 40 و400 طن في الكيلومتر مربع أو أكثر، حسب الموقع. ويمكن أن تتكون هذه المواد المنقولة بواسطة الهواء من مواد كيميائية قليلة الضرر مثل الفوسفور والكبريت، أو قد تحتوى مواد سامة مثل عناصر ثقيلة أو مبيدات عضوية معقدة.

4.2.18 مخلفات صناعية ذات محتوى عال من الأملاح

1.4.2.18 حفر آبار النفط والتكرير

تتطلب عملية الحفر للوصول إلى الزيت الخام حفارات قوية تستخدم كميات كبيرة من سوائل الحفر. وتحتوى هذه السوائل على مواد عالية الكثافة مثل كبريتات الباريوم (الباريت). وتتكون سوائل حفر أخرى من محاليل كلوريد الصوديوم، التي تستخدم لدفع الزيت الخام للتحرك لأعلى نحو سطح الأرض.

وبمجرد استهلاكها، يتعين التخلص من هذه السوائل، قبل عام 1985، كانت هذه

السوائل تخزن في برك قرب مواقع الحفر وعادة ما يتم ببساطة ردمها عندما ينجز بئر النفط. ونتيجة لذلك، فإن الكثير من حقول النفط القديمة بها مساحات كبيرة من الأرض ملوثة بمخلفات الحفر المستهلكة. ولا تعتبر هذه المخلفات خطرة لأنها لا تحتوي على كميات كبيرة من الفلزات. وعلى الرغم من أن عنصر الباريوم الحر سام جداً، إلا أن البارييت المعدني ($BaSO_4$) يعتبر خاملاً جداً في البيئة (انظر الجدول 2.18). من ناحية أخرى، يعتبر ملح $NaCl$ عالي الذوبانية في الماء ويمكنه رفع ملحية المياه السطحية، ويحولها إلى مياه غير صالحة للشرب.

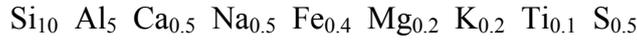
تولد مصافي النفط كميات كبيرة من المياه العادمة والوحل الزيتي التي قد تحتوي على كميات هامة من الفلزات والأملاح. لكنه وبشكل عام، فإن معظم الفلزات المصاحبة لمخلفات المصفاة تأتي من عمليات تصفية الزيت الخام التي تستفيد من الفلزات. فمثلاً، يولد إنتاج وتخزين الجازولين الخالي من الرصاص وحلاً قد يحتوي على أكثر من 10000 مجم/كجم من الرصاص. كما قد يحتوي وحل مصافي أخرى على بقايا فلزات تستخدم كمحفزات (catalysts) في عمليات تصفية النفط، مثل Co و Mo و Ni .

جدول (2-18) ذوبانية المعادن التي توجد في المخلفات

الذوبانية في الماء (مجم/لتر ⁻¹)	أسماء المعادن وتركيبها الكيميائي
14	الكالسييت ($CaCO_3$)
2400	الجيس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
370000	ملح الطعام ($NaCl$)
2	الباريت ($BaSO_4$)

5.2.18 محطات توليد الكهرباء بحرق الفحم

تنتج محطات توليد الكهرباء ملايين الأطنان من الرماد والمخلفات الغازية الناتجة عن نزع الكبريت سنوياً. ونظراً لأن هذه البقايا لا تعتبر خطيرة، فيمكن تخزينها إما في برك أو مكبات؛ وفي حالة الرماد، يمكن أيضاً أن يستخدم كمادة مالئة. ويتم استعادة الرماد من المرسبات التي تزيل المواد الجسيمية العالقة بحجم السلت من غازات المداخن الناتجة عن حرق الفحم. وتنتج هذه الحبيبات عموماً من السلت والطين غير القابل للحرق الموجود في رسوبيات الفحم. وعند التعرض لدرجات الحرارة العالية، يتحد السلت والطين (الذي يتكون أساساً من السيليكا والألومينا) لتنتج كريات معادن غير متبلرة أساسها السيليكون والألومنيوم قد تتكشف فوقها عناصر أخرى. ونموذجياً، فإن كرات الرماد تضم أيضاً Ca و Na و Fe و Mg و K و Ti و كميات صغيرة من عناصر أخرى مدمصة فوقها، مثل As و B و Ba و Cd و Cr و Cu و F و Mo و Ni و Pb و S و Zn، وغيرها. وتفاوتت كثيراً تراكيز هذه العناصر في الرماد، حسب مصدر الفحم، ويمكن أن يكون التركيب الكيميائي المثالي للرماد:



مع كميات ضئيلة جداً لأكثر من 15 عنصر آخر. إن إزالة أو غسل (scrubbing) غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) من غازات المداخن ينتج عنه كميات كبيرة من مخلفات غازية خالية من الكبريت، تتكون أساساً من كربونات الكالسيوم، والكبريتات والكبريتيدات. وقد تحتوي هذه المخلفات أيضاً على كميات ضئيلة جداً من بعض العناصر الموجودة في الرماد، لكن تركيز هذه العناصر يعتمد على مصدر الفحم ونوع نظام إزالة

الغازات المستخدم. ونظراً لأن منتجات عملية إزالة الكبريت تكون عادة مكونة من أكثر من 70% ماء، فإن هذه المخلفات يتم التخلص منها في بحيرات جافة وتعالج عادة جنباً إلى جنب مع المياه العادمة لمحطات الطاقة. إن خلط هذه المخلفات قد يضيف كميات معتبرة من الأملاح الذائبة (مثلاً، NaCl) الذي يرفع ملحية الوحل (انظر الجدول 2.18).

6.2.18 مخلفات صناعية ذات محتوى عالٍ من الكيماويات العضوية

إن معظم المخلفات الصناعية تحتوي على كميات متفاوتة من الكيماويات العضوية. وفي ما عدا بعض الاستثناءات، تستخدم بكثافة الكيماويات التي أساسها عنصر الكربون وكذلك الكواشف، والمذيبات، وأعلاف الحيوانات، والمواد الخام في معظم مراحل التصنيع. وقد تشمل استثناءات هذه القاعدة نفايات التعدين ومخلفات طلاء المعادن. وتضم المخلفات عالية المحتوى من الكيماويات العضوية تلك الناتجة من مصافي النفط إضافة لتلك الناتجة عن الصناعات الصيدلانية والكيميائية وتصنيع الأغذية.

3.18 معالجة المخلفات الصناعية والتخلص منها

تتفاوت كثيراً التقنيات والإجراءات المستخدمة في المعالجة والتخلص من المخلفات التي تحتوي على فلزات وأملاح. فالطرق التي تفصل الفلزات عن المكونات الأخرى للمخلفات دافعها الحاجة لتقليل تكاليف التخلص من المخلفات، ومن ثم التكاليف المرتبطة بالمسؤولية القانونية. إن المخلفات العضوية التي تحتوي على تراكيز منخفضة من الفلزات والأملاح يمكن التخلص منها باستخدام عمليات تدمير حرارية أو بيولوجية تُحوّل هذه المخلفات بالكامل إلى ثاني أكسيد كربون وماء (انظر الباب 7). من جهة أخرى، فإن

المخلفات التي تحتوي على كميات معتبرة من الفلزات والأملاح تترك وراءها دائماً بقايا غير قابلة للتدمير، قد تكون أحياناً قابلة لإعادة تدويرها اقتصادياً أو لا تكون. لذلك، فإن هذه المخلفات التي لا يمكن القضاء عليها تماماً يتعين التخلص منها بأسلوب يقلل إلى الحد الأدنى من تأثيراتها السلبية على البيئة.

1.3.18 انبعاثات الغاز والمواد العالقة

إن الغازات والحبيبات العالقة للغبار (dust particulates) التي تتولد عن التدمير الحرارى للمخلفات وصهر المعادن يمكن منع تسربها للهواء الجوي باستخدام واحدة أو أكثر من العمليات التالية: أجهزة ترسيب اليكتروستاتيكية (كهربية ساكنة)، أجهزة فصل هوائية، أجهزة فصل رطبة (wet scrubbers). وتعتبر هذه التقنية مكلفة ويصعب تشغيلها بكفاءة. ولكن بدون هذه الأجهزة فإن المصهرات وأجهزة الترميد سوف تفرز كميات كبيرة من الفلزات السامة التي تجدد طريقها إلى الهواء الجوي، ومن ثم تلويث مساحات شاسعة من الأراضي. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، يلزم قانون الهواء النظيف التحكم في الانبعاثات الخطرة للمصانع. وقد تم إقرار هذا القانون عام 1970، وبحلول عام 1990 تم التوسع فيه ليشمل 189 نوعاً من المصانع الكيميائية التي يتعين عليها تركيب جهاز تحكم في تلوث الهواء على جميع المصادر الصناعية الرئيسية. وتشمل هذه اللوائح أيضاً متطلبات إزالة المواد العالقة التي تحتوي على فلزات (PM-10) من انبعاثات الهواء.

2.3.18 الترسيب الكيميائي

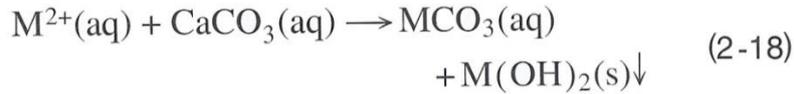
يمكن معالجة المياه العادمة والوحل السائل باستخدام مواد كيميائية لترسيب وإزالة

الفلزات عن باقي مكونات المخلفات. مثلاً، تستخدم كثيراً محاليل تحتوي على مواد قاعدية، مثل كربونات الكالسيوم أو هيدروكسيد الصوديوم أو أكسيد الألومنيوم أو كبريتيد الصوديوم لترسيب الفلزات من مجاري المخلفات. وتساعد هذه الكيماويات على تكوين مركبات غير ذائبة من هيدروكسيدات وكربونات وكبريتيد الفلز. وبنفس الكيفية، تدمص أكاسيد الألومنيوم والحديد فلزات مثل الكادميوم وأشباه فلزات مثل الزرنيخ، وبذلك تقوم بإزالتها من المحلول.

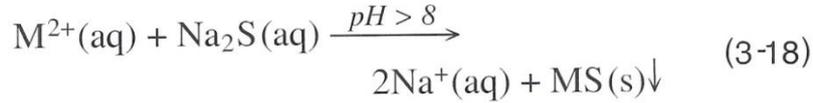
يمكن تمثيل تفاعلات الترسيب عموماً بما يلي، حيث أن $M = \text{Cu}$ أو Zn أو Cd

أو Pb :

- ترسيب الكربونات: بالمعادلة:



- ترسيب الكبريتيد: بالمعادلة:



3.3.18 التلييد (Flocculation) والتخثير (Coagulation)

يمكن جعل الملوثات المعلقة في المياه العادمة ترسب بسرعة باستخدام كيماويات تعرف بأنها مُلَبِّدَة (flocculants) ومُخَثِّرَة (coagulants). فالملبدات التي تتفاعل مع الكيماويات الذائبة، تسهل من تكوين تجمعات أو كتل يمكن فصلها أو ترسيحها عن المحلول. من جهة أخرى، فإن المخثرات تفكك الغرويات، وهي بذلك تسمح بأن تشكل

الحبيبات وحدات ثانوية يمكنها الترسب عن المحلول. ويمكن أن تصبح هذه الكيماويات مفيدة في إزالة جميع أنواع الملوثات من المياه العادمة، بما في ذلك الفلزات والمكونات العضوية. وتشمل الملبدات والمخثرات كبريتات الحديد وكبريتات النحاس والكلوريدات، إضافة لبوليمرات عضوية مصنعة ومعقدة.

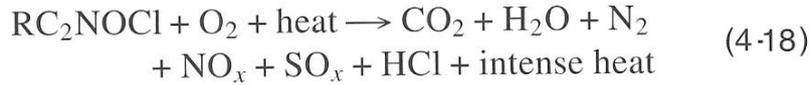
4.3.18 التصلب (solidification) أو التثبيت (stabilization)

إن مواد الحمأة (Sludge) التي تحتوي على فلزات يتعين تثبيتها في صورة مستقرة كيميائياً وفيزيائياً قبل التخلص منها نهائياً. وحيث أن الفلزات تكون أكثر ذوبانية في الماء عند رقم هيدروجيني منخفض، فإن المخلفات الحمضية يتعين معادلتها بمركبات قاعدية مثل الكلس (CaCO_3) لتكوين معقدات فلزات ذات ذوبانية منخفضة جداً في الماء. وتضم عملية تصلب المخلفات عادة اصطياد أو تغليف المخلفات ضمن مادة مستقرة فيزيائياً. فعلى سبيل المثال، عندما يخلط أسمنت مبلل مع الحمأة (sludge)، فإنه يكون طوباً مستقراً بعد بضعة أيام من التجفيف. إن طريقة التصلب هذه تغلف المخلفات في مادة ذات مسامية منخفضة نسبياً ولا يمكن تفتيتها أو إحداث شقوق فيها بسهولة تحت ضغوط الردم الاعتيادية. ونتيجة لذلك، فإن الماء النافذ لا يرتشح إلى داخل هذه المادة وتكون احتمالات غسيل الفلزات والأملاح ضعيفة (أيضاً، انظر الجزء 2.6.10).

5.3.18 الأكسدة

يمكن أكسدة المخلفات التي تحتوي في تركيبها على كربون لإزالة المواد السامة والقضاء على الملوثات العضوية تماماً، وهناك نوعان أساسيان من عمليات المعالجة: حرارية

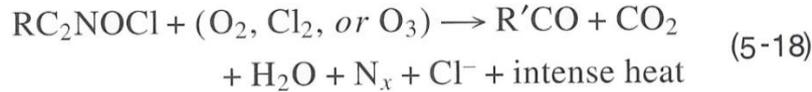
وكيميائية. وتكون الأهداف العامة هي نفسها في كلتا العمليتين. ويمكن وصف تفاعلات الأكسدة الحرارية كما يلي:



حيث أن RC_2NOCl مركب ممثل للمخلفات العضوية. وتشمل عمليات الأكسدة الحرارية الترميد باستخدام مواد تستخدم الوقود الاعتيادي. وتعتبر المخلفات العضوية الصلبة أو السائلة ذات المحتوى المنخفض من الماء والقيم الحرارية العالية مُرشّحات مناسبة للأكسدة الحرارية لأنها تحترق مولدة حرارة عالية بدرجة كافية توفر الطاقة اللازمة لهذه العمليات، ومن بين عيوب هذه العملية التكلفة العالية (عادة أكثر من 200 دولار للبرميل الواحد)، والمصدقية المحدودة، والإحساس السلبي لدى العامة حول الأمان. إضافة إلى ذلك، فإن قدرًا كبيرًا من انبعاث الملوثات يمكن أن يحدث عند عدم تشغيل النظم وصيانتها بشكل صحيح. وتعمل المرمدات بأعلى كفاءة عندما تصمم لتلائم خصائص مخلفات محددة. لذلك، فإن المرمدات لا تكون ملائمة للأكسدة بكفاءة عالية في حالة المخلفات المختلطة (أيضاً، انظر الجزء 1.6.10).

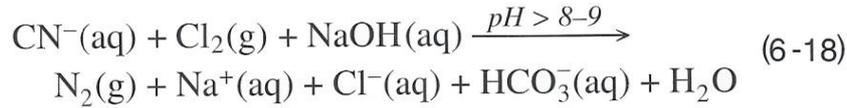
تسير الأكسدة الكيميائية عموماً عبر مسار التفاعل التالي، ويستخدم هنا المركب

العضوي الممثل RC_2NOCl :



حيث أن R الجزء المتبقي من الجزيء العضوي، وأن $\text{R}'\text{CO}$ هو الناتج المزال سميته.

فمثلاً، تستخدم الأكسدة الكيميائية بشكل واسع في القضاء على المياه العادمة التي تحتوي على السيانيد. وتضم هذه العملية الكلورة، التي يتم تلخيصها كما يلي:



وتستخدم العديد من صور الأكسدة الكيميائية منفردة ومجمعة الكلور (Cl_2)، وثنائي أكسيد الكلور (ClO_2) والأوزون (O_3)، أو الأشعة فوق البنفسجية (uv) لإزالة التراكيز المنخفضة العضوية من المياه العادمة الصناعية. وتشمل المواد الكيميائية التي تتأكسد باستخدام هذه العمليات كلاً من الأحماض والكحولات والالدهيدات (مثل أحماض الأوكسالات والفينولات)، وكذلك المبيدات الكلورة الأكثر ثباتية مثل DDT وبعض المذيبات المشتقة من النفط مثل: البنزين أو الزيلين.

6.3.18 الردم (landfilling)

إن المخلفات ذات التراكيز العالية من الفلزات التي لا يمكن تدويرها أو استخلاصها اقتصادياً تشكل عادة مادة مناسبة للتخلص منها بالردم. لكنه يتعين الإشارة إلى أن الحمأة ذات المحتوى المرتفع من الفلزات يتعين معادلتها وتصلبها قبل التخلص منها بالردم فقط في المكبات المصرح بها للتخلص من هذه المخلفات الصلبة الخطرة. وبنفس الكيفية، يمكن دفن المخلفات ذات المحتوى المرتفع من الأملاح في مكبات خاصة، أو تستخدم كمواد مالئة لبناء الطرق والسدود. وعلى الرغم من أن هذه المواد لا تعتبر سامة، إلا أنها عالية الذوبانية في الماء، ولذا فإنه من المهم التقليل إلى الحد الأدنى من وصول الماء إليها لمنع غسل الأملاح

ودخولها البيئة (أيضاً، انظر الجزء 2.6.10).

7.3.18 تكديس (stockpiling) نفايات التعدين (Tailing) والأوحال (Muds)

يتولد عن نشاطات التعدين كميات هائلة من النفايات، التي عادة ما يتم تكديسها في شكل مساطب على أو بالقرب من مصانع معالجة الخام. إن التأثيرات البيئية السلبية لنشاطات التعدين، التي تتباين كثيراً من موقع لآخر، يصاحبها عادة جريان سطحي أو ارتشاح لمياه ملوثة بالرسوبيات. كما أنها ترتبط أيضاً بالرقم الهيدروجيني، وذوبان الفلزات، وتراكيز الأملاح، والجسيمات العالقة الملوثة بالفلزات التي تدفعها الرياح.

تنتج حقول النفط والغاز كميات كبيرة من الوحل (mud). ويتم عادة تكديس هذا الوحل الذي يحتوي على كبريتات باريوم، وأملاح وبنفط خام. إن إمكانية تحرر هذه الملوثات بعيداً عن هذه المواقع يرتبط عادة بضغط مياه عادية أو مياه عادمة تحتوي على تراكيز متفاوتة من هذه الكيماويات.

4.18 معالجة وإعادة استخدام المخلفات الصناعية

نظراً لأنه لا يمكن القضاء تماماً على المخلفات التي تحتوي على أملاح أو فلزات، فقد تصبح خطراً على الإنسان والبيئة عندما يتم التخلص منها. وفي ذات الوقت فإن هذه المخلفات لها قيمة اقتصادية ممكنة - وهي قيمة أصبحت أكثر وضوحاً مع نزوب مصادرها الطبيعية. إن الفلزات الاستراتيجية مثل الذهب والبلاطين والكوبالت والأنتيمون والتنجستن يتم استخلاصها روتينياً من المخلفات التي تحتوي على تراكيز هامة من هذه العناصر. من ناحية أخرى، فإن المخلفات التي تحتوي على فلزات أقل قيمة، مثل الألومنيوم والحديد، نادراً

ما يتم معالجتها لإزالة هذه العناصر. وما هو أقل احتمالاً استخلاص الأملاح ذات الذوبانية المنخفضة، مثل كبريتات و كربونات المغنيسيوم والكالسيوم، التي توجد في معظم المخلفات الصناعية (أيضاً، انظر الجزء 10.8).

1.4.18 استرجاع الفلزات

يمكن استرجاع تلك العناصر التي لها قيمة اقتصادية مثل المعادن الثمينة من مجارى المخلفات عن طريق تفاعلات كيميائية معقدة، بما في ذلك الفصل أو الترسيب الكيميائي (قارن الجزء 2.5.7). فمثلاً، يمكن استرجاع الفضة من مخلفات التصوير بإضافة أحماض إلى المخلفات السائلة وفصل وحل الفضة الذى يتعرض للترسيب. يمكن بعدها معادلة السائل الرائق والتخلص منه بأمان، بينما ينقل وحل الفضة (Ag sludge) إلى مصهر للتنقية.

يمكن أيضاً جعل الفلزات تتفاعل بانتقائية مع كيماويات عضوية مصنعة تعرف بالمخلبيات (chelates) (تعني مجازاً مخالب). وفي هذه التفاعلات تقتنص ذرات الفلز عن طريق التركيب المخلبي، بينما تنساب الفلزات غير المرغوب فيها. وبمجرد تفاعله فإن الفلز المستهدف إما أن يترسب منفصلاً عن محلول المخلفات أو تتم إزالته مع المادة التي إدمص على سطحها. ويمكن صهر وحل الفلز المسترجع وإذابته ليتحول إلى صورة فلز صلب ونقي. أما بالنسبة للبقايا التي تحتوى على فلزات والناجحة عن صهر وتنقية الخامات فيمكن أن تتعرض لمزيد من التنقية باستخدام تقنيات فصل كيميائية وفيزيائية، ثم تُنقى مرة أخرى عن طريق أفران عالية الحرارة. إن هذه العمليات عديدة جداً ليوصف كل منها على حدة، كما أنها مصممة بشكل عام لتلائم مصادر مخلفات محددة.

2.4.18 استرجاع الطاقة

إن أغلب المخلفات التي تحتوي على صور كربون عضوي يوجد بها قدر كبير من الطاقة المخزونة. لذلك، فإن المخلفات المحتوية على تراكيز عالية من الكربون المختزل (عادة كربون عضوي)، مثل السوائل العضوية، أو المواد الخشبية أو الزيوت أو الراتينجات أو الإسفلت يمكن أن تستخدم في المرممات والمولدات الكهربائية كمصادر للطاقة. فمثلاً، يمتلك الكيروسين والغاز الطبيعي نحو 4.4×10^7 إلى 4.9×10^7 جول/كجم من الطاقة، كما تمتلك كثير من المذيبات مثل الهكسان والزايلينات والبرافينات، التي توجد في الزيوت والكحولات قدرًا مماثلاً من الطاقة (4.2×10^7 إلى 5.8×10^7 جول/كجم). وبذلك، فإن كثيراً من مخاليط الكيماويات العضوية تمتلك قيم طاقة تقترب من تلك الخاصة بأنواع الوقود التجاري.

إن ما يحد من هذه التقنية، عندما تطبق على المخلفات، يتمثل في المعايير الصارمة المتعلقة بالحد من الانبعاثات التي تدخل الهواء الجوي، الواردة في القانون الخاص باسترجاع والمحافظة على الموارد (Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) الصادر بالولايات المتحدة الأمريكية عام 1976.

3.4.18 استرجاع المذيبات

تم بنجاح إعادة تدوير المخلفات الصناعية ذات المحتوى العالي من المذيبات باستخدام نظم استرجاع تشمل تقنيات التقطير وعمليات التجزئة الكيميائية والفيزيائية. فمثلاً، يمكن للمذيبات المستهلكة التي استخدمت في تنظيف وطلاء القطع المعدنية أن يعاد

تقطيرها كوسيلة لفصل الشوائب الثقيلة عن المذيبات المتطايرة. ومن أمثلة المذيبات التي يمكن عندئذ إعادة استخدامها عن طريق استعادة المذيب بواسطة المقطرات الكلوروفورم والأسيتون والزايلين والهكسان وكلوريد الميثيلين.

4.4.18 إعادة استخدام المخلفات

يمكن أن تستخدم بعض نفايات المناجم كمواد مألثة في أعمال الحفريات، لكن الجوانب الاقتصادية المرتبطة بتكاليف النقل تحد من إعادة استخدامها. ونتيجة لذلك، فإن نفايات التعدين كثيراً ما تترك في مكانها. إن القوانين الجديدة سوف تلزم بتطبيق بعض الإجراءات الخاصة بالتثبيت الفعلي للنفايات وإعادة استزراع هذه المواقع.

إن مخلفات حقول النفط ذات المحتوى المرتفع من الأملاح يمكن غسلها بالماء لإزالة الأملاح الذائبة. ويتم بعد ذلك تجفيف الوحل الخالي من الأملاح وتكديسه للاستعمال كمادة مألثة. إن المخلفات الصلبة المعالجة لحقول النفط التي ثبت أن استخدامها في الأعمال الترابية آمن، تفرز كميات لا تذكر من الأملاح المتبقية للبيئة المحيطة.

ولقد استخدمت مخلفات حرق الفحم مثل الرماد والوحل الخالي من الكبريت بنجاح كمحسنات للتربة. كما أن رماد الفحم قد استخدم أيضاً كمادة مألثة في الأعمال الترابية (أيضاً، انظر الجزء 10.8). إن هذه المواد يمكن أن تصبح مصادر جيدة للجبس والكالسيت، التي يمكنها معادلة الحمضية في الترب، وتعويض المغذيات الكبرى مثل Ca و Mg و S، وكذلك بعض العناصر الصغرى، مثل Zn و Cu و Fe و Mn. كما تبين أن إضافة رماد الفحم للترب الزراعية قد حسّن مسامية وبناء التربة عموماً.

المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Bunce N. (1991) *Environmental Chemistry*, Wuerz Publishing Ltd., Winnipeg, Canada.
- Cope C.B., Fuller W.H., and Willets S.L. (1983) *The Scientific Management of Hazardous Wastes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dohlido J.R., and Best G.A. (1993) *Chemistry of Water and Water Pollution*. Ellis Horwood, New York.
- Fuller W.H. and Warrick A.W (1985) *Soils in Waste Treatment and Utilization*, Volume II. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Jacman A.P. and Powell R.L. (1991) *Hazardous Waste Treatment Technologies: Biological Treatment, Wet air Oxidation, Chemical Fixation, Chemical Oxidation*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey.
- LaGrega M.D., Buckingham P.L., and Evans J.C. (1994) *Hazardous Waste Management*. McGraw-Hill, New York.
- U.S. EPA (1980) *Hazardous Waste Land Treatment*, United States Environmental Protection Agency, Office of Water and waste Management. Washington, D.C.
- Wang L.K. and Wang M.H.S. (1992) *Handbook of Industrial Waste Treatment*. Marcel Dekker, Inc., New York.

مسائل حسابية وأسئلة

1. باستخدام الجدول 1-18، أختَر 10 عناصر الأكثر شيوعاً في المخلفات الصناعية. أعط أمثلة عن الصور الكيميائية لهذه العناصر. مثلاً: الأكسجين (O_2) يوجد في الطور السائل من المخلفات، [تلميح: ما هو التركيب العام لمعظم المخلفات الصلبة والسائلة؟].
2. ما هو الفرق الأكثر أهمية بين المخلفات العضوية [تحتوي في تركيبها كربوناً] وغير العضوية؟
3. ما أنواع وصور الملوثات التي يشيع إطلاقها إلى الهواء الجوي كنتيجة للنشاطات الصناعية؟ أعط أربعة أمثلة.
4. مائة لتر من مياه عادمة صناعية تحتوي على المواد التالية:
 - (أ) 4.5 كجم من ملح الطعام.
 - (ب) 5.0 كجم من الجبس.
 - (ج) 1.0 كجم من صدأ الحديد [$Fe(OH)_3$] [ذوبانية ≈ 0.1 مجم/لتر].
 - (د) 100 جم من مبيد DDT (ذوبانية 1.0 مجم/لتر تقريباً).
 - (هـ) باستخدام البيانات بالجدول (18-2)، ما هي كميات كل من هذه المواد الأربعة التي توجد ذائبة في المياه العادمة، وما هي الكميات التي توجد في صور صلبة؟ [تلميح: افترض أن 1.0 لتر من الماء يزن 1.0 كجم].
5. ما هي العناصر و/أو الكيماويات التي توجد ذائبة في المياه العادمة الواردة بالسؤال رقم (4) أذكر أربعة مرتبة حسب الأهمية؟.
6. هل ستفكر في ترميد المياه العادمة الواردة بالسؤال 4؟ أشرح إجابتك.

الباب التاسع عشر
الكائنات الممرضة في البيئة



حويصلة للكائن Giardia lamblia، وهو كائن حيواني أولي مسؤول عن داء الجبارديات، يُرى عند أدنى الزاوية اليمنى للصورة وسط بقايا من مخلفات صرف وقد استخدم في إظهاره صبغة مضاد حيوي ومبضي (immune fluorescent) (التكبير = 1900 ضعف).

1.19 أمراض ميكروبية مرتبطة بالماء

كان الدكتور (جون سنو 1813-1958) بمدينة لندن واحداً من الأوائل الذين قاموا بربط بعض الأمراض المعدية ومياه شرب ملوثة بمياه المجاري. ففي دراسته الشهيرة عن مضخة برود ستريت بلندن، التي نشرت عام 1854، أشار إلى أن الناس المصابين بمرض الكوليرا

يتركزون في منطقة واحدة حول مضخة برود ستريت، التي عزلها كمصدر للعدوى. وعندما قام الموظفون الرسميون ببناء على إصراره بإزالة مقبض المضخة، أُجبر المقيمون بشوارع برود على الحصول على مياههم من أماكن أخرى. ونتيجة لذلك تراجع وباء الكوليرا في المنطقة. وعلى الرغم من نجاح هذا الإجراء، إلا أن تفسير الدكتور سنو للسبب لم يقبل عموماً ذلك أن الجراثيم المسببة للمرض لم تكن قد اكتشفت في ذلك الوقت.

وفي الولايات المتحدة، كان مفهوم الأمراض المنقولة بالمياه أيضاً غير مفهوم بشكل جيد. وأثناء الحرب الأهلية (1860 - 1865)، كثيراً ما كان الجنود المخيمون يقومون بالتخلص من مخلفاتهم عند أعلى النهر (upriver)، لكنهم يسحبون مياه الشرب عند أسفل النهر (downriver). وقد أدت هذه الممارسة إلى انتشار مرض الدسنتاريا. والحقيقة، أن الدسنتاريا كانت جنباً إلى جنب مع المرض المصاحب لها وهو التيفود، السبب الرئيسي في الوفاة بين جنود جميع الجيوش حتى القرن العشرين. وقد ظل الحال على ذلك حتى نهاية القرن التاسع عشر عندما بدأت هذه الأمور في التغير. فعند ذلك الوقت، تم قبول نظرية الجراثيم بشكل عام، واتخذت خطوات للتعامل مع المخلفات ولحماية موارد مياه الشرب بأسلوب صحيح.

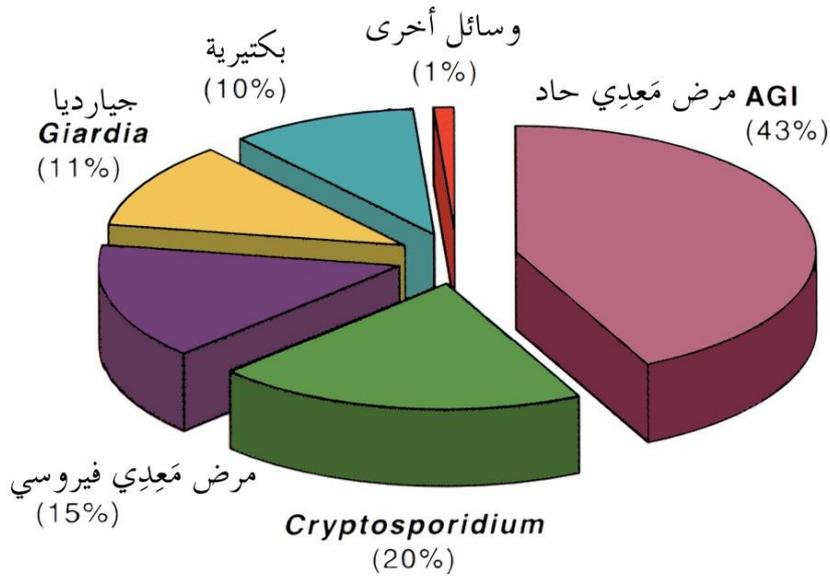
في عام 1890 كانت حالات الوفاة تصل إلى أكثر من 30 شخصاً من كل (100000) نسمة في الولايات المتحدة بسبب مرض التيفود. لكنه وبحلول عام 1907 أصبح ترشيح المياه شائعاً في معظم المدن بالولايات المتحدة، وفي عام 1914 أدخلت عملية الكلورة. ونتيجة لهذه الممارسات الجديدة، فإن معدل الموت بسبب مرض التيفود في

الولايات المتحدة بين الأعوام 1900 و1928 تراجع من 36 حالة إلى 5 حالات لكل (100,000) نسمة. ويعود السبب الرئيسي لانخفاض عدد الوفيات إلى انخفاض تفشي الأمراض المنقولة بالمياه. ففي مدينة سينسيناتي بولاية أوهايو، على سبيل المثال انخفض المعدل السنوي لمرض التيفود من 379 لكل (100,000) نسمة في السنوات الممتدة ما بين 1905 - 1907 إلى 60 حالة فقط لكل (100,000) نسمة فيما بين عام 1908 وعام 1910 وذلك بعد إدخال عمليتي الترسيب (sedimentation) والترشيح (filtration). وأدى إدخال الكلورة بعد عام 1910 إلى انخفاض معدل الإصابة بهذا المرض لمستويات أقل من ذلك.

لكنه، وعلى المستوى العالمي، يظل عدم توفر مياه شرب آمنة، ومعالجة مناسبة للمخلفات، عاملين رئيسيين في تعرض البشر للمرض والموت. فبالنظر للإحصائيات التالية، مثلاً: يقدر أن 25 ألف شخص يموتون يومياً في عام 1980 نتيجة لشربهم مياهاً ملوثة؛ وأن ربع عدد الأسرّة تقريباً في مستشفيات العالم مازال مشغولاً بشخص ما أصبح مريضاً نتيجة شرب ماءٍ ملوث؛ وأن ما يقرب من خمسة بلايين إصابة منقولة بالمياه تحدث في أفريقيا وآسيا وأمريكا اللاتينية سنوياً. إضافة لذلك، فإن الإسهال الناتج عن كائنات دقيقة توجد في المياه مازال واحداً من أهم أسباب الوفاة في الدول النامية. ويتعرض الأطفال بالدول النامية لما بين 10-12 إصابة بالإسهال في السنة الواحدة. وفي الغالب، فإن هذه الإحصائيات تنطبق على الدول النامية، حيث لا تكون جودة مياه الشرب ولا كيميائها مساوية لتلك المتاحة في الدول المتطورة بالعالم الصناعي. إن مسببات الأمراض المنقولة بالمياه المسؤولة عن أمراض التيفود والكوليرا والوباء الكبدية المعدي، أصبحت الآن غير شائعة نسبياً، أو أقل انتشاراً، في الولايات المتحدة مقارنة بالدول النامية.

على الرغم من أن كثيراً من الأمراض قد تم القضاء عليها أو التحكم فيها في الدول

المتطورة، تظل الكائنات الدقيقة السبب الرئيسي للأمراض المنقولة بالمياه في الوقت الحاضر. إن معظم حالات تفشي مثل هذه الأمراض يمكن إرجاعها لاستخدام مياه غير معالجة أو مياه معالجة بدرجة غير كافية أو خاطئة (مثلاً دون ترشيح أو تطهير)، أو أنها تعرضت للتلوث بعد المعالجة. بالإضافة إلى ذلك، فإن بعض الكائنات المرضية مثل، cryptosporidium، تكون مقاومة جداً للإزالة بواسطة وسائل المعالجة والتطهير الاعتيادية لمياه الشرب. وزيادة على ذلك، فإن نسباً متزايدة من تفشى الأمراض المنقولة بالمياه ترتبط بكائنات دقيقة غير بكتيرية مثل الفيروسات المعوية والبروتوزوا المتطفلة نتيجة لمقاومتها الناجحة لعمليات معالجة المياه (أنظر الشكل 1-19).



شكل (1-19): العوامل المرضية المرتبطة بالحالات المرضية المنقولة بالمياه

إن الحدوث الحقيقي للأمراض المنقولة بالمياه في الولايات المتحدة غير معروف ذلك أنه ليس مطلوباً التحري أو التوثيق لحالات تفشى الأمراض المنقولة بالمياه. وتكون التحريات

صعبة لأن الأمراض المنقولة بالمياه يصعب التعرف عليها في التجمعات السكانية الكبيرة، وإن إجراء دراسات وبائية مكلف. ومع ذلك، فإن ما بين 12 و20 حالة تفشى لأمرض منقولة بالمياه قد تم توثيقها في الولايات المتحدة سنوياً، ويُحتمل أن الإصابات الفعلية قد تكون أعلى من ذلك بما يتراوح ما بين 10 إلى 100 مرة. كما يبدو أيضاً أن مياه الشرب التي تعالج بالطرق الاعتيادية وتستوفي جميع معايير وكالة حماية البيئة (EPA) قد تحتوي مع ذلك على كائنات دقيقة غير معروفة مسؤولة على نسبة 35% من التهابات المعدة والأمعاء (gastroenteritis). وعلى الرغم من أن هذا المرض لا يهدد عادة حياة المصاب في الدول المتقدمة، إلا أن له تأثيراً اقتصادياً كبيراً حيث يقدر أن الولايات المتحدة تفقد ما يصل إلى 20 بليون دولار سنوياً بسبب الالتهاب المعدي المعوي.

2.19 فئات الأمراض وأنواع المُمْرضات

يمكن تصنيف الكائنات المسببة للأمراض، أو المُمْرضات، التي ترتبط بالمياه إلى أربع مجموعات (كما هو موضح في الجدول 1-19).

جدول (1-19) تصنيف الأمراض المرتبطة بالمياه والناجمة عن كائنات دقيقة

الفترة	المسبب	أمثلة
منقولة بالمياه (waterborne)	كائنات ممرضة مصدرها مادة برازية وتنتقل بتناول المياه الملوثة	الكوليرا، التيفود
تغسل بالمياه Water- washed	كائنات مصدرها براز وتنتقل بالتلامس نتيجة لعدم كفاية النظافة أو الإجراءات الصحية	التراكوما
أصلاً بالمياه Water-based	كائنات تنشأ في الماء أو تقضى جزءاً من دورة حياتها في أحياء مائية وتصبح في تلامس مباشر مع البشر في الماء أو عن طريق الاستنشاق	(schistosomiasis) البلهارسيا
مرتبطة بالمياه Water- related	كائنات دقيقة لها دورات حياة مصاحبة لحشرات تعيش أو تتكاثر في الماء	الحمى الصفراء

أمراض منقولة بواسطة المياه (waterborne diseases)

هي تلك التي تنتقل من خلال تناول مياه ملوثة التي تعمل كحامل سلبي للعامل الممرض أو الكيميائي، إن الأمراض الكلاسيكية المنقولة بالمياه، مثل الكوليرا والحمى التيفودية، التي طالما اجتاحت المناطق الآهلة بالسكان عبر التاريخ البشري، قد تم التحكم فيها بكفاءة عن طريق حماية مصادر المياه وكذلك معالجة موارد المياه الملوثة. وفي الحقيقة، إن التحكم في هذه الأمراض الكلاسيكية هو الذي أكسب معالجة موارد المياه سمعتها، ولعب دوراً هاماً في تخفيض الأمراض المعدية. وتوجد أيضاً أمراض أخرى تسببها بكتيريا أو فيروسات أو بروتوزا وديدان معوية قد تنقل عن طريق مياه شرب ملوثة. لكن من المهم أن نتذكر أن الأمراض المنقولة بواسطة المياه تمر عبر مسار البراز - الفم، من إنسان لإنسان أو حيوان لإنسان، لذلك فإن مياه الشرب تمثل واحداً فقط من بين مصادر أخرى ممكنة للإصابة.

أمراض تغسل بالمياه water – washed diseases

هي تلك التي ترتبط بسوء نظافة الفرد وعدم القيام بالتنظيف بشكل صحيح، وفي هذه الحالة، فإن توفر كمية كافية من المياه يعتبر عموماً أكثر أهمية من جودة المياه، إن شح المياه اللازمة للغسل والاستحمام تسهم في تطور أمراض تؤثر على العيون والجلد، بما في ذلك أمراض معدية مثل التهاب الملتحمة المعدي (conjunctivitis) والتراكوما، بالإضافة لأمراض الإسهال، التي تعتبر سبباً رئيسياً لموت الرضع، وسوء أحوالهم الصحية في الدول النامية. وقد تنتقل أمراض الإسهال مباشرة من خلال ملامسة شخص لآخر، أو بشكل

غير مباشر من خلال ملامسة أغذية ملوثة وأدوات استخدمت بواسطة أفراد تكون أيديهم ملوثة ببقايا البراز. وعندما توجد وفرة من المياه لغسل اليدين، وجد بأن الإصابة بأمراض الإسهال قد نقصت، وكذلك انتشار الكائنات المعوية الممرضة مثل الشيغلا (shigella).

أمراض منشؤها الماء (water – based diseases)

هي أمراض تسببها كائنات ممرضة إما تقضى كل (أو فترات مهمة) من حياتها في الماء أو تعتمد على كائنات مائية لاستكمال دورات حياتها. ومن أمثلة هذه الكائنات الديدان الطفيلية (Schistosoma) وبكتيريا (Legionella) التي تسبب مرض البلهارسيا (Schistosomiasis) ومرض المخارين القدامى (Legionnaires)، على التوالي.

وتتمثل أنواع Schistosome الثلاثة الأساسية التي تتطور إلى مرحلة البلوغ في داخل جسم الإنسان في S.mamsoni و Schistosoma japonicum و S.haematobium ولكل من هذه الأنواع توقع عائل خاص به وانتشار جغرافي مختلف. ويقدر بأن ما يزيد على 200 مليون شخص في آسيا وأفريقيا وأمريكا الجنوبية والدول الكاريبية مصابون حالياً بواحد أو ربما اثنين، من أنواع schistosome. وعلى الرغم من أن مرض البلهارسيا غير مستوطن في أمريكا الشمالية، إلا أن Schistosomiasis dermtis قد تم توثيقه في الولايات المتحدة، إذ أن بعض المهاجرين للولايات المتحدة قد وجدوا مصابين بهذا المرض، إضافة لنحو 300 ألف شخص ربما يكونون مصابين في بورتوريكو. وقد قدرت الأثار الاقتصادية لمرض البلهارسيا بنحو 642 مليون دولاراً سنوياً - ويشمل هذا الرقم فقط فقدان في الموارد يعود إلى انخفاض الإنتاجية، ولا يشمل تكاليف برامج الصحة العامة، والرعاية الصحية، أو التعويض

عن المرض.

تم وصف (*Legionella pneumophila*) المسبب لمرض المحارين القدامى أول مرة عام 1976 في مدينة فيلادلفيا، بولاية بنسلفانيا. وتنتشر هذه البكتيريا في البيئات المائية وهي قادرة على النمو عند درجات حرارة تزيد على 40°م، وتستطيع أن تتكاثر في أبراج التبريد، سخانات المياه، ونافورات المياه. وإذا ما حدث نمو عند درجات حرارة عالية، تصبح هذه البكتيريا قادرة على احداث التهاب رئوي (pneumonia) في الإنسان إذا ما تم استنشاقها على هيئة قطرات مائية أو في رذاذ الايروسول.

أمراض مرتبطة بالماء **Water – related diseases**

إن أمراضاً مثل الحمى الصفراء، وحمى الضنك (أبوالركب) (dengue) وداء الخيطيات (filariasis) والملاريا وداء كلابية الذنب (Onchocerciasis) ومرض النوم تنقل بواسطة حشرات تتكاثر في المياه (مثل البعوض الذي يحمل الملاريا) أو تعيش بالقرب من المياه (مثل الذباب الذي ينقل عدوى كلابية الذنب وتعرف هذه الحشرات بناقلات العدوى (Vectors)).

3.19 أنواع الكائنات الممرضة

تضم الكائنات الممرضة المعروفة بقدرتها على التسبب في مرض عندما توجد في المياه كائنات دقيقة مثل الفيروسات والبكتيريا والبروتوزوا المتطفلة، والطحالب الخضراء المزرققة، إضافة لكائنات كبيرة مثل الديدان المعوية أو الدود، التي يمكنها أن تنمو بأحجام كبيرة. إن بعض خصائص هذه الكائنات مدونة في الجدول (19-2).

جدول (19-2): خصائص بعض الكائنات الممرضة المنقولة بالمياه (waterborne) وتلك

ذات المنشأ المائي (water-based).

المرحلة المقاومة للمناخ	الشكل	الحجم (mm)	الكائن
فيروس (virion)	متباين	0.1 – 0.01	الفيروسات
(spores) أو خلايا ساكنة (oocysts)	عصوية، كروية، حلزونية، واوية	10 – 0.1	البكتريا
حويصلات (cysts) حويصلات مبيضية	متباين	100 – 1	بروتوزوا
بيض	متباين	10 – 1 ⁹	ديدان
حويصلات (cysts)	كروية، خيطية	100 – 1	طحالب خضراء مزرقة

ويبين الجدول (19-3) الكائنات الممرضة المنقولة بالماء والمرتبطة به وكذلك الأمراض

التي تسببها.

جدول (19-3): كائنات ممرضة محمولة بالمياه أو منشؤها مائي تصيب الإنسان

المجموعة	الكائن الممرض	المرض أو الحالة
الفيروسات	<i>Enteroviruses (polio, echo, coxsackie)</i>	التهابات السحايا، الشلل، طفح جلدي، التهاب العضلة القلبية أمراض تنفس، إسهال
	<i>Hepatitis and E</i>	الوباء الكبدي
	<i>Norwalk virus</i>	إسهال
	<i>Rotavirus</i>	إسهال
	<i>Astrovirus</i>	إسهال
	<i>Calicivirus</i>	إسهال
	<i>Adenovirus</i>	إسهال، التهابات العين، أمراض تنفس
	<i>Reovirus</i>	أمراض تنفس، التهاب الأمعاء
البكتيريا	<i>Salmonella</i>	التيفود، الإسهال
	<i>Shigella</i>	إسهال
	<i>Campylobacter</i>	إسهال

المجموعة	الكائن الممرض	المرض أو الحالة
	<i>Vibrio cholerae</i>	إسهال
	<i>Yersinia enterocolitica</i>	إسهال
	<i>Escherichia coli</i> (سلالات معينه)	إسهال
	<i>Legionella</i>	إصابة الرئة، التهابات تنفسية أخرى
البروتوزوا	<i>Naegleria</i>	التهابات السحايا؟ Meningoencephalitis
	<i>Entamoeba histolytica</i>	دستاريا أميبية
	<i>Giardia lamblia</i>	إسهال
	<i>Cryptosporidium</i>	إسهال
الطحالب الخضراء	<i>Microcystis</i> <i>Giardia lamblia</i> <i>Anabaena</i> <i>Aphanitomenon</i>	إسهال وإمكانية إنتاج مواد مسببة للسرطان
الديدان	<i>Ascaris lumbricoides</i>	الاسكارس
	<i>Trichuris trichiura</i>	مرض أمعاء الديدان (trichuriasis- whipworm)
	<i>Necuter americanus</i>	الدودة الخطافية (الانكلوستومات)
	<i>Taenia saginata</i>	الدودة الشريطية للأبقار
	<i>Schistosoma mansoni</i>	تعقيدات تؤثر على الكبد، والمثانة، والأمعاء الغليظة

1.3.19 الفيروسات

يعرف أكثر من 140 نوعاً من الفيروسات التي تصيب القناة المعوية للإنسان لتخرج منها لاحقاً مع البراز. وتسمى الفيروسات التي تصيب الأمعاء وتتكاثر فيها الفيروسات المعوية (enteric viruses). وتستطيع بعض الفيروسات المعوية التكاثر في أعضاء أخرى مثل الكبد والقلب، وكذلك في العين والجلد والأنسجة العصبية. فمثلاً، يصيب فيروس التهاب الكبد A (hepatitis A) الكبد، مسبباً مرض التهاب الكبد. وتتميز الفيروسات

المعوية بأن لها عموماً عائل محدد جداً؛ لذلك، فإن الفيروسات المعوية للإنسان تسبب فقط مرضاً للبشر وفي بعض الأحيان لثدييات أخرى. وقد تفرز مع البراز أثناء فترة الإصابة، أعداداً كبيرة من الفيروسات تصل إلى ما بين $10^8 - 10^{12}$ جسيمة فيروسية في الجرام الواحد، حيث تحمل لشبكات المجاري.

إن الفيروسات المعوية (Enteroviruses) التي تعتبر أول فيروسات تم عزلها من مياه الصرف والمياه العادية، قد تم دراستها بكثافة أكثر من أي فيروس آخر. وتضم أكثر الفيروسات المعوية شيوعاً كل من polioviruses (3 أنماط) و coxsackieviruses (30 نمطاً)، و echoviruses (34 نمطاً). وعلى الرغم من أن هذه الكائنات الممرضة قادرة على التسبب في مدى واسع من الأمراض الخطيرة، إلا أن معظم العدوى تكون خفيفة. وعادة، فإن نحو 50% فقط من الذين يتعرضون للعدوى تصل حالتهم فعلاً لدرجة الإيواء السريري. لكن الفيروسات الكوكسائية coxsackieviruses يمكنها أن تسبب أمراضاً مهددة للحياة، بما في ذلك مرض القلب، والالتهاب السحائي والشلل؛ كما أنها أيضاً قد تلعب دوراً في التسبب في مرض السكري.

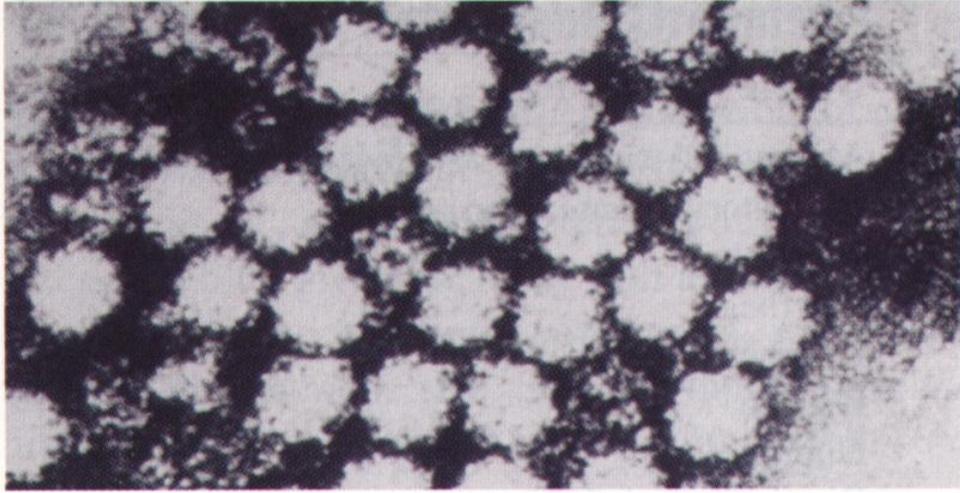
ينتج مرض الالتهاب الكبدي الفيروسي المعدي عن فيروس: hepatitis A (HAV) وفيروس: hepatitis E (HEV). إن هذين النوعين من مرض الالتهاب الكبدي الفيروسي ينتشران عن طريق الماء والغذاء الملوثين بالبراز، بينما تنتشر أنواع أخرى من هذا المرض الفيروسي، مثل فيروس: hepatitis B (HBV)، نتيجة للتعرض لدم ملوث. وتعتبر العدوى بمرض: Hepatitis A and B شائعة جداً في العالم النامي، حيث قد يظهر نحو 98% من

السكان أجساماً مضادة ضد فيروس HAV. إن فيروس HAV لا يرتبط فقط بتفشي المرض الذي يكون مصدره المياه، لكنه كثيراً ما يرتبط أيضاً بحالات تفشي المرض التي يكون مصدرها الغذاء، خاصة الأصداف أو المحار (shellfish). وقد ارتبط الفيروس E المسبب للالتهاب الكبدي HEV في كل من آسيا وأفريقيا بحالات وباء واسعة منقولة بواسطة المياه (waterborne outbreaks)، لكنه لم توثق حالات انتشار لهذا المرض في الدول المتقدمة. ويعتبر الفيروس HAV واحداً من الفيروسات المعوية المقاومة جداً للتعقيم بالحرارة.

تم التعرف على فيروسات الروتا Rotaviruses وهي خمسة أنماط كمسبب رئيسي لمرض التهاب المعدة والأمعاء في الأطفال الذين يقل عمرهم عن سنتين. إن هذا المرض هو السبب الأول في موت الأطفال وهو المسؤول عن ملايين الوفيات من الأطفال سنوياً في أفريقيا وآسيا وأمريكا اللاتينية. كما أن هذه الفيروسات مسؤولة عن تفشي الالتهاب المعدي المعوي بين السكان البالغين، خاصة بين كبار السن، كما يمكنها أيضاً أن تحدث حالات الإسهال عند المسافرين. إن العديد من الأوبئة المنقولة بالمياه ترتبط مع فيروسات Rotaviruses.

اكتشف فيروس نوروك (Norwalk virus) للمرة الأولى عام 1968 بعد أنتشار التهاب المعدة والأمعاء بشكل وبائي في مدينة نوروك بولاية أوهايو، مما نتج عنه مرض تميز بالتقيؤ والإسهال اللذان يستمران لبضعة أيام. إن هذا الفيروس هو العامل الأكثر تواجداً أثناء حدوث أوبئة التهاب المعدة الفيروسي الناتج عن المياه والغذاء بالولايات المتحدة (انظر الشكل 19-2). وعلى الرغم من أنه لم يتم تنميته في المعمل، فإن فيروس نوروك يبدو أنه

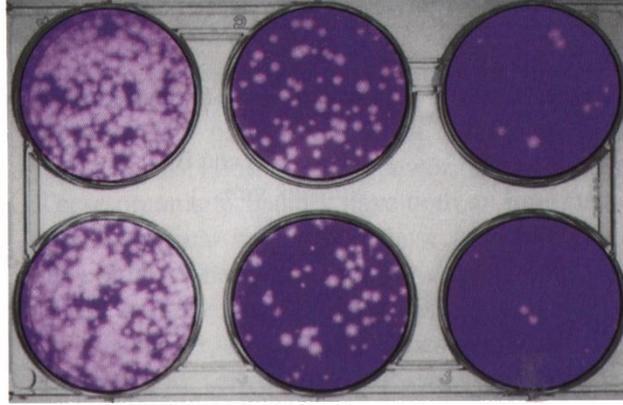
ينتمي لمجموعة فيروسية أخرى (Calicivirus). إضافة لذلك، يبدو أن عدداً كبيراً من الفيروسات المعوية التي تشبه في الحجم فيروس نوروك يمكن أن تسبب مرض الالتهاب المعدي المعوي، ويطلق على هذه الفيروسات عادة اسم الفيروسات الشبيهة بالنوروك (Norwalk – like viruses).



شكل (19-2): فيروس نوروك أحد الأسباب الرئيسية لمرض الالتهاب المعدي المعوي المنقول بواسطة الماء (التكبير = 175 ألف مرة).

إن ابتلاع عدد قليل من الفيروسات كافٍ ليشبب عدوى (انظر الجزء 4.22). لكن، ولأن هذه الفيروسات المعوية توجد في البيئة عادة بأعداد منخفضة نسبياً، فإنه يتعين جمع أحجام كبيرة من العينات البيئية قبل التمكن من اكتشاف وجود هذه الفيروسات. فمثلاً، يتعين جمع ما بين 10-1000 لتر من الماء حتى يمكن معاينة هذه الكائنات الممرضة

في عينة مياه سطحية أو مياه الشرب. ويلزم أولاً تخفيض حجم العينة من أجل تركيز أعداد الكائن المرض. لذلك، تمرر عينة الماء خلال مرشحات ذات مسام دقيقة تدمص عليها الفيروسات؛ يتم بعدها غسل الفيروسات المدمصة من المرشح. ويتبع هذه العملية مزيد من التركيز، حتى يصبح حجم العينة بضعة ملليمترات، تاركة تركيزاً مرتفعاً من أعداد الكائن المرض، بعد ذلك يتم فحص العينة المركزة إما باستخدام أسلوب المزرعة الخلوية أو التقنيات الجزيئية الحديثة. وتعتبر أساليب المزرعة الخلوية التي تتضمن استخدام خلايا حيوانية من الأساليب الفعالة (انظر الشكل 19-3a)، لكنها قد تحتاج إلى عدة أسابيع قبل الحصول على نتائج، لذلك، قد تستخدم ملتهمات البكتيريا (bacteriophages) كبديل فعال أحياناً لتوفير الوقت والتكلفة (شكل 19-4). فعلى سبيل المثال، تستخدم ملتهمات البكتيريا القولونية (coliphages) كثيراً كنماذج لدراسة مصير فيروس أثناء معالجة المياه والمياه العادمة وفي المياه الطبيعية.



تحديد عدد الفيروسات (a)



تحديد عدد البكتيريا (b)

شكل (19-3) تقييم كمي للفيروسات والبكتيريا: (a) يمكن حصر أعداد الفيروسات عن طريق نقل العدوى لخلايا كلية قرد (BGMK). تؤدي الإصابة إلى تحلل خلايا الحيوان العائل مما ينتج عنه مساحات شفافة (لويحات) على الوسط. ويوفر ذلك قياساً للفيروس المعدي على أساس وحدات اللويحات المتكونة (PFUs)، (b) بكتيريا قولونية برازية يمكن تحديد أعدادها عن طريق تنميتها فوق بيئة انتقائية مثل تلك الموضحة أعلاه المكونة من أجار خاص (mEndo agar). تحسب المستعمرات البكتيرية الناتجة على أنها وحدات مكونة للمستعمرات (CFUs) لاحظ أن: في كل من (a) و (b) ربما يكون أكثر من فيروس أصلي واحد أو بكتيريا قد ساهم في كيانات أكبر من مجهرية

2.3.19 البكتيريا

1.2.3.19 البكتيريا المعوية

عرف وجود بعض الكائنات الممرضة البكتيرية المعوية منذ أكثر من مائة عام. وقد تبين عند بداية القرن العشرين، أن المعالجة الاعتيادية الحديثة لمياه الشرب التي تشمل الترشيح والتعقيم كانت فعالة جداً في التحكم في الأمراض البكتيرية المعوية مثل حمى التيفود والكوليرا. واليوم فإن الأوبئة الناتجة عن أمراض بكتيرية ترتبط بالمياه أصبحت نادرة نسبياً في الولايات المتحدة: وتحدث فقط عندما تتعطل عملية معالجة المياه، أو عندما تتلوث المياه بعد المعالجة، أو عندما تستهلك مياه شرب غير معقمة. إن أنواع البكتيريا التي تلقى الاهتمام الأكبر التي تتبع أجناس: *Salmonella* و *Shigella* و *Campylobacter* و *Escherichia* و *Vibrio*.

السالمونيلا (*Salmonella*)

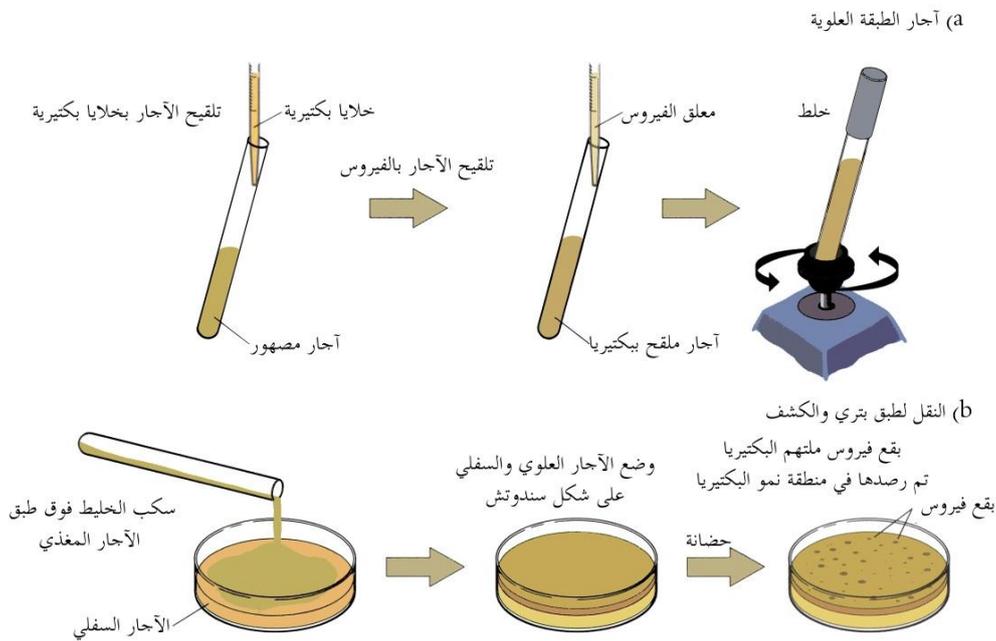
تشمل السالمونيلا مجموعة كبيرة من البكتيريا تزيد على 2000 نمط سيروولوجي معروف. إن جميع هذه الأنماط السيروولوجية ممرضة للإنسان ويمكنها أن تسبب مجموعة من الأعراض تتراوح من التهاب معدي معوي خفيف إلى مرض شديد أو حتى الموت. وتستطيع السالمونيلا أن تصيب أنواعاً عديدة من ذوات الدم الحار والبارد. إن كلاً من حمى التيفود (typhoid fever)، التي تسببها *S.typhi*، وحمى الباراتفود (paratyphoid - fever)، التي يسببها *S.typhoid* هي من أنواع الحمى المعوية التي تصيب الإنسان والثدييات دون غيرها. وفي الولايات المتحدة، يعود مرض السالمونيلا (*Salmonellosis*) بالدرجة الأولى إلى الانتقال عن طريق الأغذية الملوثة بهذه البكتيريا، إذ أن البكتيريا تصيب لحوم البقر والدواجن

وتكون قادرة على التكاثر في الغذاء. وينتج الكائن الممرض سمّاً (toxin) يسبب الحمى والغثيان والإسهال، وقد يكون مميتاً إذا لم تتم معالجته بطريقة صحيحة.

الشيقيلاً (*Shigella spp.*)

تصيب الشاقيلاً البشر فقط، مسببة له التهابات معوية وحمى. ولا يبدو أنها تعيش طويلاً في البيئة، لكن حدوث إصابات في الولايات المتحدة نتيجة للشرب أو السباحة في مياه غير معالجة مازال مستمراً. أما بكتيريا *Campylobacter spp.* و *Yersina ssp.* فإنها توجد في المياه والأغذية الملوثة بالبراز، ويعتقد بأنها تنتج بالدرجة الأولى من براز حيوانات. إن بكتيريا *Campylobacter*، التي تصيب الدواجن وتلوث الأغذية، كثيراً ما تلام على أنها مصدر للأوبئة المحمولة بالأغذية؛ وفي الولايات المتحدة فإنها ترتبط أيضاً باستهلاك مياه شرب غير معالجة. وتوجد بكتيريا إيشيريشيا كولاي (*Escherichia coli*) في القناة المعوية المعوية للحيوانات ذات الدم الحار، وتعتبر عادة كائناً غير ضار. لكن سلالات عدة منها تكون قادرة على التسبب في مرض الالتهاب المعوي (gastroenteritis)؛ ويشار إليها على أنها أنواع سامة من الايشيريشيا كولاي enterotoxigenic أو ممرضة enteropathogenic (EPEC) أو مسببة للنزيف (EHEC) enterohemorrhagic وتسبب البكتيريا المعوية السامة من الايشيريشيا كولاي (Enterotoxigenic E.coli) مرض التهاب المعدة الأمعاء مصحوباً بإسهال حاد جداً وغثيان ومغص في البطن وتقيؤ. وتعتبر هذه البكتيريا سبباً شائعاً للإسهال الذي يتعرض له المسافرون. إن النوع EPEC يشبه عزلات ETEC لكنه يحتوي على توكسينات تشبه تلك الموجودة في الشيقيلاً من ناحية أخرى، فإن نوع البكتيريا المعوية

المسببة للنزيف من الايشيريشيا كولاي (Enterohemorrhagic E.coli) فإنها غالباً ما تنتمي لنمط سيروولوجي واحد هو (O157:H7)، وتكوّن هذه السلالة مجموعة توكسينات قوية تتسبب في إسهال مصحوب بالدم، يمكن أن يكون مميتاً في حالة الرضع والمسنين، إن مثل هذا الكائن يمكن أن يلوث كلا من الغذاء والماء.



شكل (19-4) طريقة القيام باختبار الفيروس الملتهم للبكتيريا (bacteriophage).

يضم الجنس *Vibrio* عدداً كبيراً من الأنواع، لكن قليلاً منها فقط يصيب البشر. أحد هذه الأنواع هو *V.cholera*، الذي يسبب الكوليرا للإنسان دون غيره. ويمكن أن

تسبب الكوليرا إسهالاً حاداً جداً مع فقد سريع للسوائل والأملاح. وتفوق نسبة الموت من هذا المرض 60% في الحالات التي لا تتلقى علاجاً، لكنه يمكن تفادي الوفاة عن طريق تعويض السوائل. ولم يعرف وباء للكوليرا في العالم الغربي في القرن المنصرم حتى عام 1990، عندما انتشر وباء في البيرو ومنه لجنوب ووسط أمريكا. وتنحصر الحالات التي سجلت في الولايات المتحدة في كونها إما وافدة أو نتيجة لاستهلاك سرطان بحري غير مطهى بشكل جيد أو جمبري (shrimp) تم صيده في مياه شواطئ خليج المكسيك. إن بكتيريا *Vibrio cholera* كائناً دقيقاً بحرياً مستوطناً يتواجد في تراكيزات منخفضة في مياه الشواطئ الدافئة.

يكون معدل مقاومة البكتريا المعوية للمرضة للحياة في البيئة بضعة أيام فقط، وهو ما يعتبر أقل من معدلات بقائية الفيروسات المعوية والبروتوزوا المتطفلة. كما أنه يمكن القضاء على البكتيريا المعوية بسهولة أيضاً بواسطة المطهرات التي يشيع استخدامها في معالجة مياه الشرب. إن تحليل عينات بيئية للكشف عن البكتريا المعوية لا يجري في العادة وذلك بسبب صعوبة عزلها وبدلاً عن ذلك، تستخدم بكتريا دليلية (indicator bacteria) لتشير إلى إمكانية وجودها (انظر الجزء 4.2.3.19).

2.2.3.19 الليجنيللا (*Legionella*)

إن الكائن المرض *Legionella pneumophila* لم يكن معروفاً حتى عام 1976، عندما توفي 34 شخصاً بعد وباء حدث في المؤتمر السنوي لرابطة ولاية بنسلفانيا للمحاربين الأمريكيين القدامى الذي عقد بمدينة فيلادلفيا. وينتج مرض Legionellosis. وهي عدوى

حادثة عن الكائن الممرض *L.pneumophila*، الذي يرتبط حالياً بمرضين مختلفين هما: حمى بونتياك Pontiac fever ومرض المحارين القدامى Legionnaire. ومنذ عام 1976 سجلت العديد من الوفيات نتيجة مرض Legionnaire. وتعتبر حمى بونتياك نوعاً معتدلاً من مرض المحارين القدامى. إن كلا المرضين ليسا من الأمراض السارية (no communicable)، أي أنهما لا ينتقلان من شخص إلى آخر. ويقدر مركز التحكم في الأمراض أن ما بين 50 ألف و100 ألف حالة من مرض Legionellosis. تحدث سنوياً في الولايات المتحدة، وأن عدداً غير محدد من بينها ناتج عن مياه شرب ملوثة.

قام العلماء بلفت النظر إلى الخطأ في الإشارة إلى الكائن الممرض *L.pneumophila* كأنه ملوث تقليدي. فعلى الرغم من أن هذا الكائن يشغل موقعاً بيئياً محدداً (كما هو حال المئات من الكائنات الدقيقة الأخرى في بيئة المياه) إلا أنه لم يتم ربط أي وباء لمرض Legionellosis مباشرة مع مجرى مائي طبيعي مثل بحيرة أو جدول أو بركة. إن البيئات الوحيدة التي تم توثيقها علمياً الخاصة بالكائن *Legionella pneumophila* هي البيئات الندية أو الرطبة. ومن الواضح، أنه يلزم وجود نشاط بشري - وأنظمة معينة مثل أبراج التبريد أو مكونات السباكة، أو حتى خطوط مياه طيبب الأسنان - وذلك لإيواء هذه الكائنات أو تكاثرها. ولذلك، فإنه بينما قد يكون الكائن *L.pneumophila* شائعاً في المياه الطبيعية، إلا أنه يمكنه التكاثر فقط عندما ينقل إلى نظم التوزيع حيث يسمح للماء ليكون راكداً وتكون درجات الحرارة ملائمة.

يستطيع الكائن *Legionella pneumophila* النمو إلى مستوى قد يسبب مرضاً

في المناطق التي يحدث فيها إعاقة لتدفق المياه، مما يسبب تراكمًا للمادة العضوية. إضافة لذلك، فإن درجة الحرارة المثالية لنمو الكائن *L.pneumophila* هي 37م°، لذلك، فقد اكتشف وجوده في خزانات المياه الساخنة للمستشفيات والفنادق و المصانع ونوادي ملاعب الجولف والمنازل. ومن المؤسف، أن تحفظ بعض المستشفيات والفنادق درجات حرارة سخانات المياه منخفضة لتوفير المال وتفادي الدعاوى القضائية، وهم بذلك يجعلون أنفسهم عرضة لنمو الكائن *Legionella*. وإذا ما ترسّخ وجودها، فإن *Legionella* تكون قادرة على البقاء . وقد أظهر مسح لنظام مياه أحد المستشفيات أن *L. pneumophila* يمكنها أن تتواجد في النظام لفترات طويلة تحت هذه الظروف، متجمعة في دش الحمام (Showerheads) والحنفيات (faucets). ويعتقد أن دش الحمامات والحنفيات يمكنها إطلاق رذاذ (aerosols) مكون من حبيبات صغيرة جداً تأوي الكائن *L.pneumophila* إن هذا الرذاذ، وبسبب صغر حجمه، يمكنه الوصول إلى قناة تنفس الإنسان الدنيا. إن وجود ربط بين وجود الكائن *L.pneumophila* في شبكة المياه وداء المحاربيين القدامى Legionnaire في مرضي المستشفى المعرضين للإصابة قد تم ترسيخه بواسطة المجتمع الطبي.

يعزى تفشي المرض بشكل خاص في المستشفيات إلى تواجد العديد من الأشخاص القابلين للإصابة، وكذلك طبيعة شبكة المياه في هذه الأماكن. إن معظم الأشخاص الذين أصيبوا بمرض Legionnaire يعانون من نظام مناعي غير نشط أو ضعيف بسبب المرض أو التقدم في السن أو إدمان الكحول أو التدخين الشديد. وعلى الرغم من أن بعض

الأشخاص الأصحاء قد أصيبوا بمرض Legionnaire، إلا أن تفشى المرض الذي يشمل الأفراد الأصحاء قد نتج عنه عادة مرض حمى بونتياك Pontiacfever الأقل حدة. إن ثبوت وجود الكائن *L.pneumophila* في نظام مياه لا يعني بالضرورة أن الإصابة بالمرض حتمية. فقد عثر على بكتيريا Legionella في نظم حيث لم يعثر على المرض تماماً أو أنه اقتصر فقط على بضعة حالات عشوائية. لذلك، فإن حالة أو مدى عرضة العائل أو المريض تعتبر العامل الأكثر أهمية في تحديد مدى إمكانية تطور العدوى.

يتميز الكائن Legionella بقدرته على مقاومة عمليات المعالجة التقليدية للمياه. ويبدو أنه أكثر مقاومة للكورة مقارنة بالبكتريا القولونية (Coliform bacteria)، ويمكنه العيش لفترة طويلة في مياه ذات مستويات منخفضة من الكلور. إضافة لذلك، فإن هذا الكائن يمكنه أن يدخل لنظم المياه البلدية من خلال الأنابيب المكسورة أو الصدئة، وأعمال صيانة الأنابيب الرئيسية وعبر نقاط التوصيلات.

3.2.3.19 الممرضات البكتيرية الانتهازية

تشمل هذه المجموعة بكتيريا موجبة لصبغة جرام، ذاتية التغذية *heterotrophic* تنتمي إلى الأجناس: *Pseudomonas* و *Aeromonas* و *Klebsiella* و *Flavobacterium* و *Enterobacter* و *Citrobacter* و *Serratia* و *Acinetbacter* و *Proteus* و *Providencia*. وتضم شرائح السكان المعرضين بشكل خاص للكائنات الممرضة الانتهازية كلا من حديثي الولادة وكبار السن، والمرضى. وقد تم توثيق وجود هذه الكائنات بأعداد كبيرة في مياه الشرب بالمستشفيات، حيث قد تلتصق بأنابيب توزيع المياه أو تتكاثر في المياه المعالجة. وتجدر

الإشارة إلى أن أهمية تأثيرها على الصحة العامة للبشر عموماً غير مفهوم بشكل جيد. ومن الممرضات الانتهازية الأخرى البكتيريا اللا درنية (nontubercular mycobacteria) التي تسبب أمراضاً رئوية بالإضافة إلى أمراض أخرى. إن أكثر أنواع البكتيريا اللا درنية التي تم عزلها تنتمي إلى نوع (Mycobacterium avium intercellular) وتعتبر مياه الشرب. خاصة تلك الموجودة في خزانات مياه المستشفى، ملائمة لدعم تكاثر هذا النوع من البكتيريا، وهو ما يمكن ربطه بحالات العدوى التي يتعرض لها مرضى المستشفيات.

4.2.3.19 البكتيريا الدالة (Indicator bacteria)

يعتبر الاختبار الروتيني الحالي للمياه الخاص بوجود الكائنات الممرضة المعوية عملاً مضنياً وصعباً ويستغرق وقتاً طويلاً. لذلك، فإن المختصين يقومون بهذه الاختبارات عادة بالبحث أولاً عن البكتيريا الدالة التي يشير وجودها أيضاً إلى احتمال وجود بكتيريا أخرى. ويعتمد مفهوم الدليل (الكاشف) الذي تم تطويره عند بداية القرن التاسع عشر على حقيقة أن بكتيريا غير ممرضة معينة توجد في براز جميع الحيوانات ذوات الدم الحار. ويمكن عزل هذه البكتيريا بسهولة وتحديد أعدادها بطرق بكتريولوجية سهلة. إن العثور على هذه البكتيريا يعني أن تلوثاً بالبراز قد حدث ومن ثم فإن كائنات معوية ممرضة ربما تكون موجودة أيضاً.

وعلى سبيل المثال، فإن البكتيريا القولونية (Coliform bacteria) التي توجد طبيعياً في أمعاء جميع الحيوانات ذوات الدم الحار، يتم إفرازها بأعداد هائلة في البراز. ويعثر على البكتيريا القولونية في المياه الملوثة بكثافات تتناسب تقريباً مع درجة التلوث بالبراز. ونظراً لأن البكتيريا القولونية تكون بشكل عام أكثر تحملاً من البكتيريا المسببة للمرض، فإن عدم

وجودها في الماء يعتبر مؤشراً على أن الماء آمن بكتيريا للاستهلاك البشري. وعلى العكس، فإن وجود مجموعة البكتيريا القولونية يعتبر مؤشراً أن كائنات دقيقة أخرى قادرة على التسبب في مرض معين قد تكون موجودة أيضاً، وأن الماء غير آمن للشرب.

ويعتبر الكشف عن مجموعة البكتيريا القولونية، التي تشمل الأنواع: *Escherichia* و *Citrobacter* و *Enterobacter* و *Klebsiella* سهلاً نسبياً: وتحديدًا، فإن هذه المجموعة تضم أنواع بكتيريا هوائية ولا هوائية اختيارية (Facultatively anaerobic)، سالبة لصبغة جرام (Gram-negative)، غير متحركة، عصوية الشكل وتنتج غازاً عند تخمر اللاكتوز في بيئة نمو خاصة خلال 48 ساعة عند درجة حرارة 35°C. وباختصار، فإنه يسهل جداً ملاحظة وجودها.

ويستخدم الباحثون عادة ثلاث طرق للتعرف على العدد الإجمالي للبكتيريا القولونية في المياه وهي اختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPN) most probable number، واختبار غشاء الترشيح (MF) (membrane filter) واختبار وجود أو عدم وجود (presence – absence; PA).

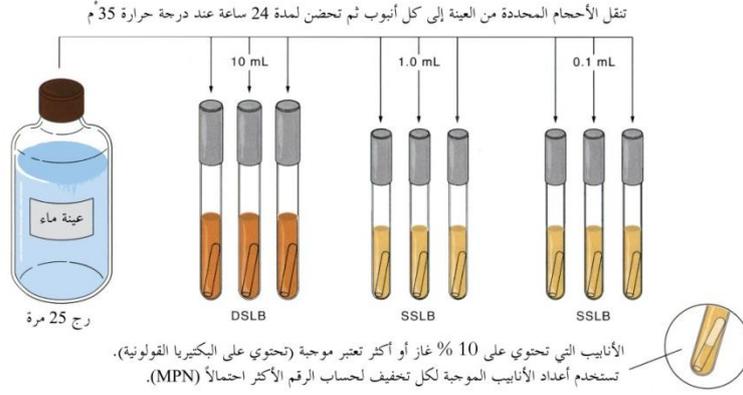
5.2.3.19 اختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPN)

يسمح اختبار العدد الأكثر احتمالاً للباحثين بتأكيد وجود البكتيريا القولونية في عينة معينة وتقدير عددها. ويتكون هذا الاختبار من ثلاث خطوات: اختبار افتراضي أو احتمالي، واختبار مؤكد، واختبار كامل. ففي الاختبار الافتراضي (الشكل 5-19a)، يضاف وسط غذائي سائل (مرق) يعرف باسم (Lauryl sulfate tryptose lactose) (l.s.t.l)

لمجموعة من أنابيب الاختبار تحتوي على تخفيفات مختلفة من الماء الذي سيتم اختباره. ويتم عادة إعداد ثلاثة إلى خمسة أنابيب اختبار لكل تخفيف. وتُحضّن أنابيب الاختبار هذه عند درجة حرارة 35°م لمدة 24 - 48 ساعة، ثم تفحص للبحث عن البكتيريا القولونية، التي يستدل على وجودها عن طريق إنتاج غاز وحمض. وبمجرد تحديد الأنابيب التي تحتوي على هذه البكتيريا وتسجيلها يصبح ممكناً تقدير العدد الإجمالي للبكتيريا القولونية في العينة الأصلية باستخدام جدول العدد الأكثر احتمالاً (MPN) الذي يعطى عدد البكتيريا القولونية في حجم 100 مل. وفي اختبار التأكيد (confirmation test) كما هو مبين في الشكل (19-5b)، يتم التحقق من وجود البكتيريا القولونية عن طريق تلقيح أنواع آجار خاصة مثل آجار إندو (Levine's Eosin Methylene Blue (EMB) أو آجار Endo agar بإضافة قليل من المزرعة بالأنابيب التي تحتوي على البكتيريا القولونية.

ويستدل على وجود البكتيريا المخمرة لمادة اللاكتوز (Lactose – Fermenting bacteria) في البيئات عن طريق إنتاج مستعمرات خضراء لامعة أو مستعمرات ذات مركز غامق. ويجرى في بعض الحالات اختبار كامل (غير مبين في الشكل 19-5) يتم فيه تحضين مستعمرات من الآجار مرة ثانية في البيئة الغذائية السائلة من أجل استعراض تكون حمض و غاز.

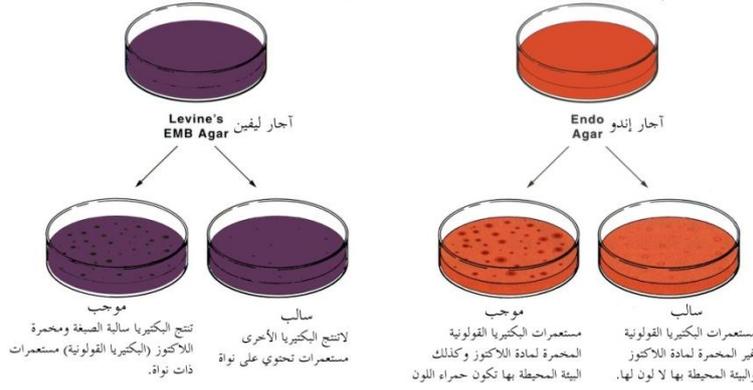
(a) الاختبار الافتراضي



(b) اختبار التأكيد

يتم اختيار إحدى الأنابيب الموجبة، كما يتبين من وجود غاز محبوس في الأنبوب الداخلي، ويستخدم لتلقيح طبق محتوي على آجار Levine EMB وآجار Endo.

يتم تحضين الأطباق مدة 24 ساعة عند درجة حرارة 35°م وتراقب لرصد مستعمرات نموذجية للبكتيريا القولونية.



(أ) الاختبار الافتراضي: تنقل الأحجام المحددة من العينة إلى كل أنبوب، ثم تحضن لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة 35°م الأنابيب التي تحتوي على 10% غاز أو أكثر تعتبر موجبة (تحتوي على البكتيريا القولونية)، تستخدم أعداد الأنابيب الموجبة لكل تخفيف لحساب الرقم الأكثر احتمالاً (MPN).

(ب) اختبار التأكيد: يتم اختيار إحدى من الأنابيب الموجبة، كما يتبين من وجود غاز محبوس في الأنبوب الداخلي ويستخدم لتلقيح طبق محتوي على آجار Levine EMB وآجار Endo. يتم تحضين الأطباق مدة 24 ساعة عند درجة حرارة 35°م وتراقب لرصد مستعمرات نموذجية للبكتيريا القولونية.

شكل (5-19) خطوات القيام باختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPN) للبكتيريا القولونية في عينات مياه: (a)

الاختبار الافتراضي، (b) اختبار التأكيد

6.2.3.19 اختبار المرشح الغشائي

يسمح اختبار المرشح الغشائي (MF) أيضاً للأخصائيين تأكيد وجود البكتيريا القولونية وتقدير عددها في عينة معينة، لكنها أسهل في القيام بذلك مقارنة باختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPN) لأنها تتطلب عدداً أقل من أنابيب الاختبار وخطوات العمل (انظر الشكل 19-6). وفي هذه الطريقة يمرر مقداراً مقاساً من الماء (عادة 100 مل في حالة مياه الشرب) خلال غشاء ترشيح (حجم مسامه 0.45 ميكرومتر) يقوم بحجز البكتيريا فوق السطح. يتم بعدها وضع هذا الغشاء فوق وسادة رقيقة ماصة تم تشبييعها بمادة محددة معدة لتسمح بنمو وتمايز الكائنات المستهدفة. فمثلاً، إذا ما كان العدد الكلي للبكتيريا القولونية هو المستهدف، تستخدم بيئة محورة من آجار Endo.

وفي حالة البكتيريا القولونية، يتم تحضين غشاء الترشيح عند درجة حرارة 35°م مدة 18 - 24 ساعة. ويعتمد نجاح الطريقة على استخدام بيئات تمييزية فعّالة أو انتقائية يمكنها تسهيل التعرف على المستعمرات البكتيرية التي تنمو فوق سطح غشاء الترشيح (أنظر الشكل 19-6g). ولتحديد أعداد البكتيريا القولونية في عينة مياه معينة، يتم إحصاء المستعمرات ذات اللون الأخضر اللامع.

7.2.3.19 اختبار وجود أو عدم وجود البكتيريا القولونية

إن اختبارات وجود أو عدم وجود كائن معين ليست اختبارات كمية، بل إنها تجيب على سؤال بسيط يتمثل فيما إذا كان الكائن المستهدف موجوداً في عينة معينة أم لا. ويستخدم في هذا الاختبار أنبوب واحد يحتوي مرق Lauryl sulfate tryptose lactose

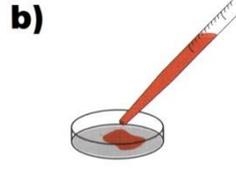
مثلما يتم في اختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPN)، ولكن دون تخفيفات. وفي السنوات الأخيرة، تم تطوير اختبار أنزيمي يسمح باكتشاف البكتيريا القولونية الكلية وبكتيريا E. coli معاً في المياه والمياه العادمة في ذات الوقت. ويمكن أن تكون هذه الاختبارات إما اختبار وجود - عدم وجود (P-A) أو اختبار العدد الأكثر احتمالاً (MPA). إن أحد الاختبارات شائعة الاستخدام هو اختبار Colilert، الذي يسمى أيضاً اختبار ONPG-MUG، التي تعني:

(O- nitrophenyl -β-D-galactopyranoside 4-methylumbelliferyl -β-D-glucuronide)

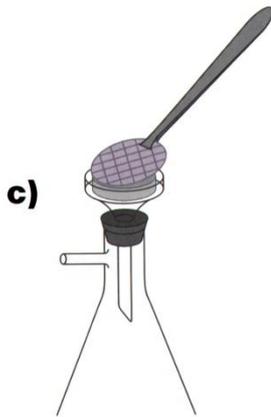
ويجري الاختبار عن طريق إضافة العينة لأنبوب واحد من أنابيب اختبار وجود - عدم وجود (P-A test) أو أنابيب اختبار (MPN) التي تحتوي على مواد في صورة مساحيق تشمل أملاحاً ومواداً تعمل كركائز غذائية لإنزيمات معينة وتمثل مصدراً وحيداً للكربون الذي تحتاجه الكائنات (أنظر الشكل 19-7أ). إن ركيزة الأنزيم المستخدم لكشف إجمالي البكتيريا القولونية هي ONPG، أما التي تستخدم لكشف البكتيريا E.coli فهي MUG. وبعد مضي 24 ساعة من التحضين يتحول لون العينات الموجبة لإجمالي البكتيريا القولونية إلى الأصفر (شكل 19-7ب) بينما تومض العينات التي تحتوي على E.coli تحت الأشعة فوق البنفسجية طويلة الموجة (شكل 19-7ج).



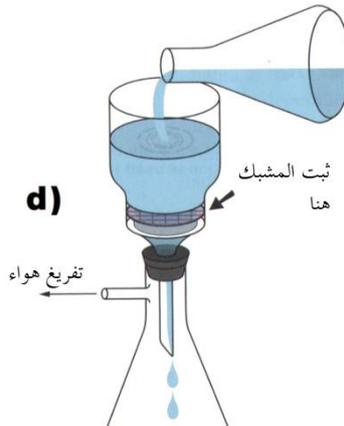
باستخدام ملقط معقم، ضع وسادة من ورق نشاف في قاع ثلاثة أطباق بتري خاصة لاستقبال مرق إندو (Endo) الخاص باختبار المرشح الغشائي (MF).



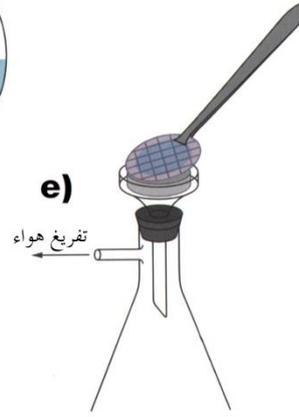
باستخدام الماصة، أضف 2 مل من مرق (Endo) الخاص باختبار (MF) على كل وسادة من الورق النشاف، ثم غط الأطباق بغطائها. إضافة لذلك، حضر ثلاث من أطباق الآجار (mFC).



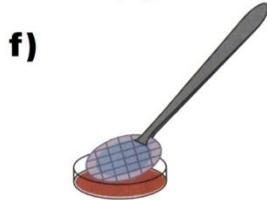
ركب قمع الترشيح فوق الدورق. ضع المرشح الغشائي معقماً باستخدام ملقط مع جعل الجهة المخططة لأعلى. ضع ورقة الترشيح في الوسط.



أضف محلول منظم (buffer) إذا كان ذلك ضرورياً، ثم أضف الحجم المحدد من العينة. قم بالترشيح باستخدام سحب خفيف.

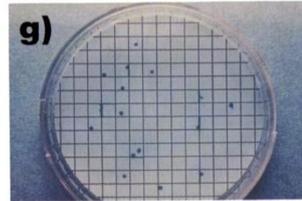


انزع ورقة الترشيح باستخدام ملقط معقم دون توقف لتفريغ الهواء.



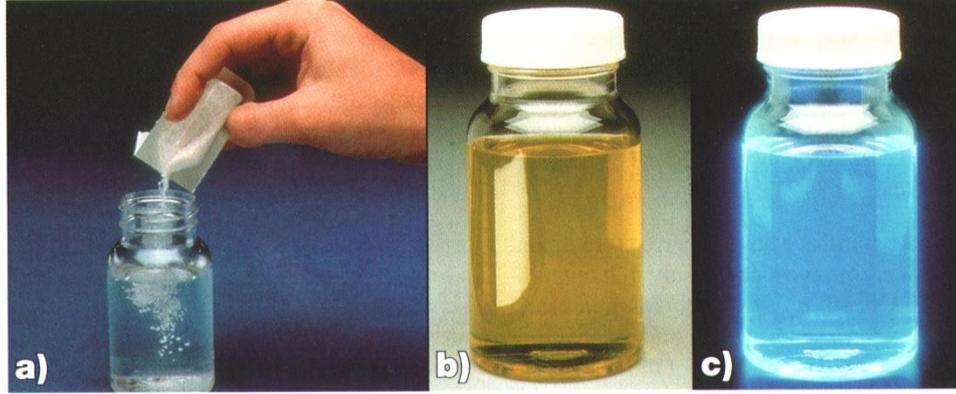
ضع ورقة الترشيح فوق البيئة المناسبة التي تم إعدادها في الخطوات (أ) و (ب).

تحضين



بعد التحضين، أحصى عدد المستعمرات لتحديد تركيز الكائنات في عينة الماء الأصلية.

شكل (19-6): طريقة الترشيح الغشائي لتحديد أعداد البكتيريا القولونية في عينة مياه.



شكل (7-19) الكشف عن البكتيريا الدالة باستخدام الكاشف Colilert. (أ) إضافة الأملاح والركيزة الغذائية للأنزيم لعينة الماء؛ (ب) يشير اللون الأصفر لوجود البكتيريا القولونية؛ (ج) وميض تحت الضوء فوق البنفسجي طويل الموجه يشير لوجود بكتيريا *E. coli*.

على الرغم من أن مجمل مجموعة البكتيريا القولونية قد استخدم كمؤشر رئيسي لتلوث المياه لسنوات كثيرة، إلا أن الكثير من الكائنات في هذه المجموعة غير مقتصر على المصادر البرازية، لذلك فإن طرقاً قد تم تطويرها ليقصر العد فقط على تلك البكتيريا القولونية التي تكون من مصدر برازي بشكل واضح-أي البكتيريا القولونية البرازية (Fecal coliforms)، (انظر الشكل 19-3ب). إن هذه الكائنات، التي تضم الجنس *Escherichia*, *lebsiella* يتم تمييزها في المعمل بقدرتهما على تخمير اللاكتوز مع إنتاج حمض وغاز عند درجة حرارة 44.5°م خلال 24 ساعة. وعموماً، فإن هذا الاختبار يشير إلى وجود بكتيريا قولونية، لكنه لا يفرق بين التلوث البشري والحيواني.

وعلى الرغم من أن البكتيريا القولونية والبكتيريا القولونية البرازية استخدمتا بنجاح

لتقييم الجودة الصحية لمياه الشرب، إلا أنها لم تكن تعمل كمؤشرات مفيدة لوجود الفيروسات والبروتوزوا المعوية. وبينما تم تقريباً القضاء على الأوبئة البكتيرية الناشئة عن المياه في الولايات المتحدة الأمريكية، إلا أنه سجل حديثاً نوعاً ما، مرض ناشئ عن مياه لم يعثر فيها على البكتيريا القولونية. ومن الحقائق المعروفة أن الكائنات الممرضة الفيروسية والبروتوزوا المعوية أكثر مقاومة لفقد نشاطها بمبيدات الجراثيم والترشيح مقارنة بالبكتيريا البرازية الدالة. ولهذا السبب تم اختبار والبحث عن مؤشرات أخرى ممكنة. ويشمل ذلك ما يسمى ملتهمات البكتيريا bacteriophages (أي فيروسات بكتيرية) للبكتيريا القولونية (تعرف باسم coliphages) ومنها streptococcus أو enterococci أو Clostridium perfringens البرازية. إن المعيار لاختبار كائن يستخدم كدليل مثالي موضحة بالجدول (19-4). إن أي من هذه الكائنات الكاشفة الممكنة لم يتم حتى الآن إثبات مثاليته.

جدول (19-4) معايير كائن يمكن استخدامه ككاشف مثالي.

-
- يجب أن يكون الكائن صالحاً أو ملائماً لجميع أنواع المياه
 - يجب أن يكون الكائن موجوداً عندما توجد كائنات ممرضة معوية
 - يجب أن يكون للكائن قدرة مقاومة على الحياة لفترة أطول مقارنة بأقدر كائن معوي ممرض
 - يجب ألا ينمو أو يتكاثر الكائن في الماء
 - يجب أن تكون طريقة الاختبار سهلة التطبيق
 - يجب أن يكون لكثافة الكائن الدليل علاقة مباشرة بمستوى التلوث البرازي
-

3.3.19 البروتوزوا

1.3.3.19 الجيارديا (Giardia)

كان العالم أنتون فان ليفنهوك (Anton van Leeuwenhoek, 1632–1723) مخترع الميكروسكوب هو الشخص الأول الذي تعرف على الجيارديا البروتوزوية عام 1681. من ناحية أخرى، فإن *Giardia lamblia* الكائن الدقيق النوعي والمسؤول عن داء الجيارديات (giardiasis) لم يكن معروفاً في الولايات المتحدة حتى عام 1965، عندما أبلغ عن أول حالة لهذا المرض في مدينة أسبن بولاية كولورادو. ويعتبر داء الجيارديات خطيراً بشكل خاص إذ تشمل أعراضه الحادة غازات بالمعدة وانتفاخ البطن وإسهال مائي كريه، إضافة للتقيؤ وفقد للوزن وتستمر هذه الأعراض عند معظم الناس من أسبوع واحد إلى أربعة أسابيع، لكنها تعرف أيضاً باستمرارها فترة قصيرة لا تزيد على ثلاثة أو أربعة أيام أو لمدة طويلة قد تصل بضعة أشهر. وتتفاوت فترة الحضانة للكائن المسبب لهذا المرض ما بين واحد إلى ثلاثة أسابيع.

يوجد الكائن *Giardia Lamblia* في البيئة - عادة المياه - على شكل حويصلة (cyst)، تستطيع الحياة في مياه شديدة البرودة لعدة أشهر كما أنها تتميز بدرجة عالية من المقاومة للتعقيم بالكلور. وعندما يتم ابتلاعها، يستطيع هذا الكائن أن يدخل طوره التكاثري ويصبح معدياً. إن نصف إجمالي تفشى الأمراض التي يكون مصدرها المياه في نظم توزيعها بالمناطق السكنية يعود للكائن *Giardia lamblia*، مما يجعله الكائن الممرض المعروف الأكثر انتشاراً في الولايات المتحدة. إضافة لذلك، فإن عدد الحالات الموثقة من

المحتمل أن تمثل فقط جزءاً من الرقم الفعلي من الإصابات.

حدث تفشى لداء الجيارديات في أنحاء الولايات المتحدة، لكن انتشاره كان أكثر شيوعاً في المناطق الجبلية في جبال الروكي، والولايات الشمالية الغربية الباسيفيكية، حيث يتوقع عادة توفر مياه عالية الجودة. وقد كان يعتقد خطأً أن هذه المناطق خالية من التلوث بمياه الصرف الصحي والميكروبي. وتميل المجتمعات في هذه المناطق لاستخدام محطات معالجة صغيرة غير متكاملة. إن معظم حوادث تفشى هذا الداء كان نتيجة لاستهلاك أو الاحتكاك بمياه سطحية تكون إما غير معالجة كلية أو تمت معاملتها فقط بالكلور. وفي الحقيقة، فإن تفشى هذا الداء عن طريق أحواض السباحة التي يستخدمها أطفال صغار السن قد تم توثيقها أيضاً. ونظراً لأن بعض التجمعات السكانية تستخدم الكلورة كوسيلة وحيدة لمعاملة المياه السطحية، فقد يصبحون عرضة لتفشى داء الجيارديات الذي يعتبر مقاوماً للكلورة. وعلى سبيل المثال فإن واحدة من حالات التفشى كانت في مدينة روما بولاية نيويورك عام 1941، نتج عنها 4800 حالة مرضية. كما سجل أيضاً تفشى لهذا المرض في شهر أغسطس 1983 في مدينة ريد لودج بولاية مونتانا حيث تعرض للعدوى به نحو 780 شخصاً.

حدد الباحث ثلاثة عوامل تسهم بدرجة كبيرة في التعرض للجيارديا وهي: شرب مياه غير معالجة؛ ملامسة مياه سطحية ملوثة، وترك الأطفال في دور الرعاية اليومية. وتشير الإحصائيات الحالية أن 60% من حالات العدوى بالجيارديا بالولايات المتحدة تأتي عن طريق شرب مياه أو ملامسة مياه سطحية. من ناحية أخرى، فإن أصل الجيارديا الذي يوجد بالمياه في معظم حالات تفشى المرض تظل غير معروفة. وقد خلصت إحدى الدراسات

الحديثة أنه خلافاً للنظريات السابقة، فإن حويصلات الجيارديا ربما توجد باستمرار بتراكيز منخفضة، حتى في مستجمعات المياه المعزولة والنقية. إضافة لذلك، فإن الحيوانات البرية قد تم اعتبارها سبباً في تفشى داء الجيارديات، فمثلاً يلام حيوان القندس على أنه المصدر الذى نقل هذا المرض أصلاً للإنسان. وقد أظهرت دراسة أخرى، أنه على الرغم من أن تفشى داء الجيارديات يحدث غالباً في نظم المياه السطحية، إلا أن حويصلات الجيارديا قد توجد أيضاً في موارد المياه الجوفية، لكن محصلة مؤكدة لم يتم التوصل إليها بعد. فمثلاً، تتعرض المياه الجوفية عادة للتلوث عن طريق المياه السطحية كالعيون والآبار. وفي حالات تفشى فيها هذا المرض في ولايتي واشنطن ونيوهامبشاير، وجد أن المخلفات البشرية والمخلفات الصحية لنظم التخلص من الصرف الصحي في بعض الأحيان هي التي أدت إلى نقل العدوى أولاً لحيوان القندس، بمعنى أن القندس قد اكتسب الكائن الممرض الجيارديا من البشر وعمل هذا الحيوان فقط كمستودع أو عائل لانتشار المرض.

ومهما كان المصدر الأصلي، فإننا نعرف ازدياد الحالات شبه الوبائية لهذا الداء تحدث في أشهر الصيف، وبشكل خاص بين زوار المناطق الترفيهية. وقد يعود ذلك إما لزيادة التلوث عند هذا الوقت، أو أن المصدر يكون دائماً ملوثاً، وأن مدى اتساع تفشى المرض يتحدد بواسطة الأعداد الكبيرة من الأفراد الذين يستخدمون المصدر.

2.3.3.19 الكريبتوسبورديوم (Cryptosporidium)

الكريبتوسبورديوم هو حيوان أولى معوي وصف أول مرة في عام 1907، وقد عرف كمسبب لمرض معوي في الإنسان ونقل بواسطة الماء منذ عام 1980. وخلال خمس سنوات

من اكتشافه ككائن ممرض للإنسان، تم وصف أول حادثة وباء للمرض مرتبطة بالكريبتوسبورديوم في الولايات المتحدة. ومنذ ذلك الوقت، تم التبليغ عن الكثير من الحالات الوبائية بهذا المرض. كما أكدت عدة دراسات أن *Cryptosporidium parvum* واسع الانتشار في المياه السطحية بالولايات المتحدة. إضافة لذلك، فإن هذا النوع مسؤول عن العدوى لكل من البشر والحيوانات الأليفة، فمثلاً يصيب هذا النوع الأبقار، التي تعمل بدورها كمصدر رئيسي لهذا الكائن الممرض بالمياه السطحية.

إن تفشى عدوى الكريبتوسبورديوم تعود أساساً لطبيعة دورة حياته، إذ ينتج هذا الكائن حويصلات بيضية مقاومة للظروف البيئية يطلقها مع براز الأفراد المصابين. ويتراوح قطر الحويصلات البيضية الكروية الشكل للكائن كريبتوسبورديوم بارفوم *Cryptosporidium parvum* من 3-6 ميكرومتر، وبعد بلع الطعام تبدأ الحويصلات البيضية في الانفجار (excystation) محررة أبواغ متحركة (sporozoites)، التي تسبب عدوى للغشاء الخلوي داخل الخلايا الإبيثيلية (epithelial cells) للقناة المعدية المعوية وبمجرد وصولها للقناة المعدية المعوية، يسبب الكريبتوسبورديوم في الإنسان داء *Cryptosporidiosis* الذي يتميز بإسهال مائي حاد، يقود إلى فقد للسوائل بمتوسط ثلاثة لترات أو أكثر يومياً. وقد تشمل الأعراض الأخرى لمرض *Cryptosporidiosis* آلاماً في المعدة وغثيان وتقيؤ وحمى. إن هذه الأعراض التي تبدأ في الظهور عادة خلال ثلاثة إلى ستة أيام بعد التعرض للعدوى، يمكن أن تصبح حادة بدرجة كافية تؤدي للوفاة.

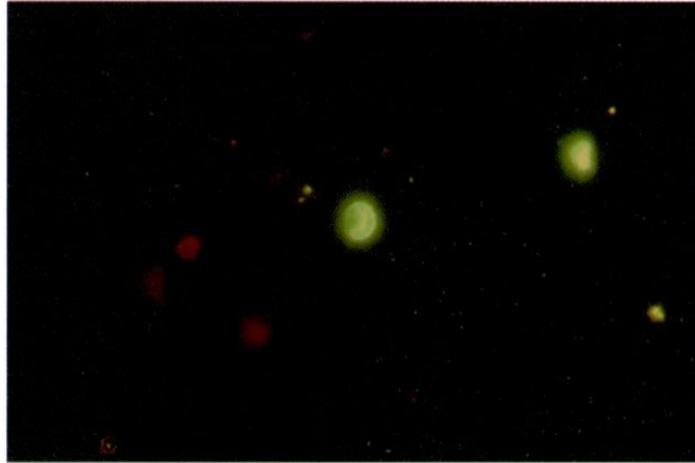
أشارت دراسات أن الحويصلات البيضية الكريبتوسبورديوم توجد في 55 إلى 87% من المياه السطحية بالعالم. وبذلك فإن الحويصلات البيضية للكريبتوسبورديوم تكون عموماً

أكثر انتشاراً في المياه السطحية من حويصلات (Cysts) الجيارديا. لكن، ومثل حويصلات الجيارديا فإن حويصلاتها البيضية تكون مقاومة جداً للظروف المناخية، خاصة درجات الحرارة المنخفضة، وقد تعيش لأسابيع كثيرة. وتكون المستويات أقل ما يمكن في المياه المحتفظة بنقاوتها ومستجمعات المياه المحمية، حيث يكون النشاط البشرى عند حدة الأدنى وتكون الحيوانات الأليفة نادرة.

إن حدوث تفشي للكريبتوسبورديوم بمياه الشرب المعاملة بالطرق الاعتيادية يشير إلى أن الكائن مقاوم بدرجة غير عادية للإزالة بواسطة هذه العملية. وحتى الآن، ثبت أن الحويصلات البيضية للكريبتوسبورديوم هي الأكثر مقاومة من بين الممرضات المعوية لتثبيط نشاطها بواسطة مطهرات المياه الشائعة.

إن تراكيز الكلور المستخدمة عادة في معاملة مياه الشرب (1-2 مجم/لتر) غير كافية لقتل هذا الكائن. ونتيجة لذلك، فإن ترشيح الماء هي الخطوة الأساسية المستخدمة لحماية موارد المياه من التلوث بهذا الكائن. لكنه، وفي دراسة أجريت بالولايات المتحدة عشر على الحويصلات البيضية للكريبتوسبورديوم في 27% من موارد مياه الشرب التي تم ترشيحها. إضافة لذلك فإن التفشي المتكرر والواسع لهذا المرض المرتبط بالمياه في كل من الولايات المتحدة وأوروبا يؤكد حقيقة أن المعالجات التقليدية لمياه الشرب والتي تشمل الترشيح والتطهير قد لا تكون كافية لمنع تفشي المرض عندما توجد تراكيز عالية من هذا الكائن في المياه السطحية. وعلى سبيل المثال، شملت حادثة وباء واحدة في كارولتن، بولاية جورجيا بالولايات المتحدة مرض 13 ألف شخص - وهو ما يعادل ثُمس سكان المقاطعة. وفي هذه الحالة، عشر على الحويصلات البيضية في مياه الشرب والجري المائي الذي تسحب منه المحطة التقليدية لمعالجة مياه الشرب وهناك تفشي آخر للكريبتوسبورديوم، حدث في مالواكي بولاية

ويسكانسن والذي يعتبر أكبر حالة وباء لمرض مرتبط بالمياه تم توثيقه بالولايات المتحدة (انظر حالة للدراسة: مرض Cryptosporidiosis في مدينة ملواكي). وفي حالات أخرى انتقلت عدوى الكريبتوسبورديوم عن طريق الملامسة مع، أو السباحة في مياه ملوثة. ويظل هناك الكثير الذي يجب معرفته حول قدرة هذا الكائن على الحياة، والتواجد، ومدى قدرة عمليات معالجة المياه على إزالته. وكما هو الحال مع الكائنات المعوية الأخرى، فإنه يلزم فقط بلع أعداد قليلة من حويصلات الجيارديا والحويصلات البيضية للكريبتوسبورديوم لتسبب عدوى، لذلك فإن عينات بأحجام كبيرة من المياه يتم جمعها (100 إلى 1000 لتر) لإجراء التحاليل عليها. ويتم حجز الكائنات على مرشحات ذات مسام أصغر من قطر الحويصلات (cysts) و الحويصلات البيضية oocysts. وبعد استخلاصها من المرشح يمكن تركيزها والكشف عنها باستخدام المجهر. وتستخدم أجسام مضادة حاملة (tagged) لمادة تصدر وميضاً يساعد على التعرف على الكائنات (انظر الشكل 19-8).



شكل (19-8) الحويصلات البيضية (oocysts) للكريبتوسبورديوم (لون أخضر) تشاهد تحت ضوء فوق بنفسجي بعد صبغتها بمضادات حيوية وميضة مناعية (التكبير 800 مرة).

حالة للدراسة: مرض Cryptosporidiosis في ملواكي

في بداية ربيع عام 1993 غمرت أمطار غزيرة السهول الزراعية الخصبة بولاية ويسكانسن، وقد أنتجت هذه الأمطار جرياناً سطحياً غير معتاد وصل أحد الأنهار التي تصّرف مياهها في بحيرة ميشجان، التي تزود مدينة ملواكي بمياه الشرب. وقد بدا أن محطة المدينة لمعالجة المياه قادرة على التعامل مع زيادة الحمل: فهي لم تفشل من قبل، وأن جميع معايير جودة المياه والخاصة تحديداً بمياه الشرب تم استيفاؤها. ومع ذلك، وبحلول الأول من شهر أبريل، أصيب الآلاف من سكان مدينة ملواكي بإسهال مائي حاد، مصحوب غالباً بآلام في المعدة، وغثيان وقيء وحمى. وفي فترة زمنية قصيرة، أصيب أكثر من 400 ألف شخص بمرض معوي (gastroenteritis)، وأن أكثر من 100 شخص هم غالباً من المسنين وأفراداً غير معافين قد ماتوا في نهاية المطاف، على الرغم من بذل أفضل الجهود من الرعاية الطبية الحديثة: وأخيراً، وبعد إجراء الكثير من الاختبارات، أكتشف أن الحويصلات البيضية للكريبتوسبورديوم كانت موجودة في مياه الشرب بعد المعالجة. إن هذه الحقائق أشارت إلى أن مورد المياه هو المصدر الأكثر احتمالاً للعدوى؛ وفي مساء يوم 7 أبريل، أصدرت المدينة بلاغاً مستعجلاً لسكان المدينة بغلي مياههم. وقد أدى هذا الإجراء بإنهاء تفشي هذا المرض بفعالية. ويعتقد أن التكاليف المباشرة وفقد الأرواح قد فاقت (150) مليون دولاراً.

إن حادثة مدينة ملواكي كانت تمثل الحالة الأكبر تفشياً لمرض ينتقل بواسطة الماء تم توثيقه بالولايات المتحدة الأمريكية. ولكن ما الذي حدث؟ كيف يمكن أن يحدث تفشياً لمرض على نطاق واسع في مدينة حديثة بالولايات المتحدة الأمريكية في التسعينيات من

القرن الماضي؟ وكيف يمكن أن يحدث هذا العدد الكبير من الوفيات؟ ويبدو أن التراكيز العالية من المواد العالقة والحويصلات البيضية (oocysts) في المياه قبل معالجتها أدت إلى فشل عملية معالجة المياه - وهو الفشل الذي أدى إلى مرور حويصلات الكريبتوسبورديوم مباشرة خلال نظام الترشيح في واحدة من محطات المدينة لمعالجة المياه، مما أدى إلى إصابة شريحة كبيرة من السكان ومن بين عموم السكان كان هناك الكثير ممن لم تتحمل أنظمتهم المناعية المرض. وفي حالة الأفراد من ذوى المناعة الجيدة، يعتبر Cryptosporidiosis مرضاً محدوداً؛ صحيح أنه غير مريح، ولكنه ينتهي بعد فترة وجيزة. من ناحية أخرى، فإن مرض Cryptosporidiosis، بالنسبة للأفراد من ذوى المناعة الضعيفة يمكن أن يكون قاسياً ومميتاً.

3.3.3.19 الديدان المعوية (Helminths)

إضافة للحيوانات الأولية (البروتوزوا) وحيدة الخلية، فإن بعض الحيوانات متعددة الخلايا (الديدان المعوية) تكون قادرة على التطفل على الانسان. ويشمل ذلك النيماطودا (الديدان المدورة) والديدان المعوية المسطحة (platyhelminthes)، التي تقسم إلى تحت مجموعتين: السيستودا (Cestoda)، أو الديدان الشريطية (tapeworms)، والتريماتودا أو المثقوبات أو الديدان المثقوبة (Flukes). وبالنسبة لهذه الديدان الطفيلية، فإن البويضات أو البيض المجهرى الحجم، يمثل المرحلة المعدية. إن هذه البويضات التي تفرز مع براز الأشخاص المصابين وتنتشر بواسطة المياه العادمة، أو التربة أو الغذاء تكون شديدة المقاومة للضغوطات البيئية ولعمليات التطهير. ويبين الجدول (19 - 4) أهم الديدان المعوية الطفيلية.

جدول (5-19) الديدان المعوية الطفيلية الرئيسية

المرض (الجزء الرئيسي المصاب)	الكائن
النيماطودا (الديدان المدورة)	
داء الاسكارس (Ascariasis): انسداد معوي في الاطفال (الأمعاء الدقيقة)	<i>Ascaris lumbricoides</i>
الديدان السوطية (Whipworms) تسبب داء (trichuriasis) في الأمعاء	<i>Trichuris trichiura</i>
Hookworms (الديدان الخطافية)	
داء الإنكليستوما (بالأمعاء).	<i>Necator americanus</i>
داء الإنكليستوما (بالأمعاء).	<i>Ancylostoma duodenale</i>
Cestodes (الديدان الشريطية)	
الدودة الشريطية للأبقار: تسبب آلام في المعدة، شعور بالجوع، عسر هضم مزمن.	<i>Taenia saginata</i>
الديدان الشريطية للخنازير.	<i>Taenia solium</i>
Trematodes (الديدان المثقوبة)	
تسبب مرض البلهارسيا Schistosomiasis الذي يصيب الكبد والمثانة والأمعاء الغليظة.	<i>Schistosoma mansoni</i>

الأسكارس (Ascaris)

تعتبر الديدان المدورة (roundworm) سبباً رئيسياً لعدوى النيماطودا التي تصيب الإنسان. ويمكن أن يكتسب هذا المرض من خلال ابتلاع عدد قليل فقط من البيض المعدني. وحيث أن أنثى إسكارس واحدة يمكنها إنتاج نحو 200 ألف بيضة يومياً، وأن كل شخص مصاب يمكنه إفراز عدد كبير من البيض، فإن هذا النوع من النيماطودا شائع جداً. وتشير الإحصائيات العالمية أن ما بين 800-1000 مليون شخص قد تعرضوا للعدوى، مع ملاحظة أن معظم الإصابات تنحصر في المناطق المدارية وتحت المدارية. وفي الولايات المتحدة، يغلب حدوث العدوى في المناطق الواقعة على ساحل الخليج. وتشمل دورة حياة

هذا الطفيل طوراً تتحرك فيه اليرقات عبر الرئتين وتسبب التهاب الرئة pneumonitis (المعروف باسم متلازمة لوفلر: Loefflers syndrome) وعلى الرغم من أن البيض كثيف، وهو بذلك يمكن إزالته بسهولة عن طريق الترسيب في محطات معالجة المياه العادمة، إلا أنها مقاومة جداً لتأثير الكلور. إضافة لذلك، يمكنها أن تظل حية لفترات طويلة من الزمن في وحل المجاري بعد إضافته للأرض إلا إذا تم التخلص من البيض عن طريق معالجة الوحل (انظر الجزء 3.20).

على الرغم من أن *Taenia saginata* (الدودة الشريطية للأبقار) و *aenia solium* (الدودة الشريطية للخنزير) تعتبران حالياً نادرتين نسبياً في الولايات المتحدة، إلا أنه يمكن العثور عليهما حتى الآن في الدول النامية حول العالم. إن هذه الطفيليات تتطور داخل عائل حيواني وسيط، حيث تصل إلى الطور اليرقي مثنائية الشكل *Cysticercus*. ثم تمر هذه اليرقات عن طريق منتجات اللحوم، إلى الإنسان، الذي يعمل كعائل أخير. مثلاً، الأبقار التي تلتهم بويضة معدية أثناء الرعي تعمل كعوائل وسيطة للدودة *Taenia saginata*، بينما تكون الخنازير عوائل وسيطة للدودة *Taenia solium*. وتخترق اليرقات المثنائية *cysticerci* نسيج عضلة وعين ومخ العائل الوسط ويمكنها أن تسبب في اضطرابات معوية حادة، مثل آلام المعدة وفقد الوزن في عوائلها النهائية.

ويعتبر *Taxocara canis* طفيلياً نيماتودياً آخر يصيب الإنسان، وهو يوجد بالدرجة الأولى في الكلاب (أما النوع *T.cati* فهو يوجد في القطط). إن هذه الدودة المدورة تصيب أساساً الأطفال الذين يتلعون التراب. وإضافة لتسببها في اضطرابات معوية، فإن يرقات هذا

الطفيل يمكنها أن تتحرك في اتجاه العيون، مسببة تلفاً بصرياً شديداً للعدسة ينتج عنه أحياناً فقد للعين.

4.3.3.19 الطحالب الخضراء المزرقمة (Blue – Green Algae)

يشيع وجود الطحالب الخضراء المزرقمة، أو البكتيريا الزرقاء (cyanobacteria)، في كل المياه الطبيعية، حيث تلعب دوراً هاماً في التدوير الطبيعي للمغذيات في البيئة والسلسلة الغذائية. لكن بعض أنواع الطحالب الخضراء المزرقمة، مثل *Aphanitomenon Microcystis* و *Anabaena* تنتج سموماً قادرة على التسبب في إحداث المرض للإنسان والحيوان. إن هذه السموم يمكنها أن تتسبب في التهاب الأمعاء والاضطرابات العصبية، وربما السرطان. وفي هذه الحالة، ينتج المرض عن طريق ابتلاع السم المنتج بواسطة هذه الكائنات، بدلاً عن ابتلاع الكائنات ذاتها، كما هو في حالة الديدان المعوية (Helminths). وقد تم التبليغ عن العديد من حالات تسمم حيوانات المزرعة، والحيوانات الأليفة والبرية نتيجة لتناولها النموات الغزيرة للطحالب الخضراء المزرقمة على سطح الماء، وهناك أدلة متزايدة على أن البشر يتأثرون أيضاً ويمكن أن يحدث نمو كثيف لهذه الطحالب في المياه السطحية عندما تكون المغذيات متوفرة، مسببة تلوثاً في موارد المياه. وقد نسب حدوث وباء واسع بمرض الالتهاب المعوي عام 1975 في مدينة سيويكلي بولاية بنسلفانيا بالولايات المتحدة إلى وجود مستويات عالية من السموم الطحلبية في المياه المعالجة بالطرق الاعتيادية.

4.19 مصادر الكائنات الممرضة في البيئة

يتم إفراز الكائنات الممرضة المعوية المنقولة بالماء عادة بأعداد كبيرة في براز البشر والحيوانات المصابة، بغض النظر عما إذا كان الأفراد المصابون تظهر عليهم علامات المرض أم لا. وفي بعض الحالات، قد يفرز الأفراد المصابون كائنات ممرضة دون أن تتطور عندهم

أي مظاهر للمرض؛ وفي حالات أخرى قد يفرز الأفراد المصابون كائنات ممرضة لعدة شهور بعد انتهاء علامات المرض بفترة طويلة. ويعرف هؤلاء الأفراد المصابون الذين لا تظهر عليهم علامات المرض بأنهم حاملون له (carriers)، وقد يشكلون مصدراً محتملاً للعدوى في المجتمع (انظر الشكل 19-9). وبسبب هذه المصادر، فإن الكائنات الممرضة تكون غالباً موجودة في مجارى أي تجمع سكاني. لكن، التركيز الفعلي للكائنات الممرضة في مياه صرف تجمع سكاني معين يعتمد على الكثير من العوامل منها: حالات الإصابة بمرض معوي (بمعنى، عدد الأفراد المصابين بالمرض في تجمع سكاني معين)، عدد الحاملين للمرض في التجمع السكاني، الفترة من السنة، الحالة الصحية والنظافة ومعدل استهلاك الفرد من المياه.



شكل (19-9) يمكن أن يصبح المستحمون مصدراً شائعاً للكائنات الممرضة. في بعض الأحيان، وجد أن هناك علاقة ارتباط بين أعداد البكتيريا القولونية وكثافة المستحمين في هونولولو، هاواي

تعتبر ذروة الإصابة بالعديد من الأمراض المعوية موسمية في المناخات الدافئة . لذلك، فإن أعلى نسبة إصابة بالفيروسات المعوية تكون خلال أواخر الصيف وبداية الخريف، بينما العدوى بالروتافيروس (rotavirus) تميل للوصول إلى الذروة في بداية الشتاء، بينما تصل العدوى بالكريبتوسبورديوم الذروة في بداية الربيع والخريف. إن سبب الموسمية للعدوى المعوية غير معروف تماماً، لكن عوامل عدة قد تلعب دوراً، فقد يرتبط ذلك بمدى قدرة الوسائل الناقلة المختلفة على العيش في البيئة خلال المواسم المختلفة: مثلاً، يمكن للجيارديا (Giardia) أن تقاوم درجات الحرارة المنخفضة في فصل الشتاء بشكل جيد. وبالمقابل، فإن اختلاف الإفرازات فيما بين الكائنات الحيوانية الخازنة للكائن الممرض قد تلعب دوراً، كما هو في حالة الكريبتوسبورديوم. أو قد يكون التعرض الكبير لمياه ملوثة، كما هو عند السباحة، سبباً في زيادة معدلات حدوث الإصابات في شهور فصل الصيف.

أيضاً، تكون بعض التجمعات البشرية وشرائح معينة منها أكثر عرضة للعدوى. فمثلاً، تكون العدوى المعوية أكثر شيوعاً بين الأطفال لأنهم يفتقرون عادة لمناعة واقية مسبقة. وبذلك تكون عادة حالات العدوى بالفيروسات والبرتوزوا المعوية في مراكز رعاية الأطفال اليومية، حيث يكون الأطفال الصغار في حيز محدود ومتقاربون جداً، أعلى كثيراً عن تلك بين عموم التجمعات السكانية (انظر الجدول 19-6). كما تزايد حدوث الإصابات المعوية تكون واضحة أيضاً بين المجموعات الاجتماعية - الاقتصادية المتدنية، وبشكل خاص حيث تسود ظروف صحية ونظافة بمستويات منخفضة. إن تراكيز الكائنات المعوية الممرضة تكون أعلى بكثير في مخلفات الصرف الصحي بالعالم النامي مقارنة بالعالم

الصناعي. فمثلاً، يقدر متوسط تركيز الفيروسات المعوية في مياه الصرف الصحي في الولايات المتحدة عند 10^3 لتر (جدول 7-19)، بينما سجلت تراكيز تصل إلى 10^5 لتر) في أفريقيا وآسيا.

جدول (6-19) الإصابة وتركيز الفيروسات المعوية والبروتوزوا في البراز بالولايات المتحدة

الكائن المرض	الإصابة (%)	التركيز في البراز (بالجرام)
Enterovirus	40 – 10	$10^3 - 10^8$
Hepatitis A	0.1	10^8
Rotavirus	29 – 10	$10^{10} - 10^{12}$
Giardia	3.8	10^6
	*54 – 18	10^6
Cryptosporidium	20 – 0.6	$10^6 - 10^7$
	*50 – 27	$10^6 - 10^7$

* الأطفال في مراكز الرعاية اليومية.

جدول (7-19) المستويات التقديرية للكائنات المعوية في الصرف الصحي ومياه سطحية ملوثة بالولايات المتحدة.

الكائن	التركيز لكل 100 مللي لتر	
	الصرف الصحي الخام	مياه جارية ملوثة
Coliforms	10^9	10^5
Enteric viruses	10^2	10 – 1
Giardia	10	1 – 0.1
Cryptosporidium	$10^3 - 10^4$	$10^{-1} - 10^{-2}$

1.4.19 الحمأة (Sludge)

ينتج أثناء معالجة الصرف الصحي للمدن مواد حيوية صلبة (biosolids) أو حمأة (وحل). وتعتبر المواد الحيوية الصلبة ناتجاً ثانوياً لعمليات معالجة فيزيائية (المعالجة الأولية)، وحيوية (تنشيط الحمأة) وكيميائية - فيزيائية (ترسيب المواد الصلبة المعلقة باستخدام كيماويات).

إن عملية إنتاج الحمأة تم وصفها بالتفصيل في الجزء 3.20، وعلى الرغم من أن المعالجة باستخدام المضمم الهوائي واللاهوائي و/أو إزالة الماء يخفض من أعداد الكائنات الناقلة للأمراض في هذه المواد الحيوية الصلبة، فإن أعداداً كبيرة من الكائنات الممرضة التي توجد في الصرف الصحي الخام تبقى عادة في المواد الحيوية الصلبة للصرف الصحي. وعلى أساس الحجم، يمكن أن يكون تركيز الكائنات الممرضة في المواد الحيوية الصلبة للصرف الصحي عالياً نوعاً ما نتيجة الترسيب (الكائنات الكبيرة، خاصة الديدان) والإدمصاص (خاصة للفيروسات). وزيادة على ذلك، فإن معظم الأنواع الميكروبية الموجودة في الصرف الصحي الخام تتركز في الوحل أثناء الترسيب الأولي. وعلى الرغم من أن الفيروسات المعوية ذات وزن منخفض جداً لترسب بذاتها؛ إلا أنها أيضاً تتركز في المواد الصلبة للحمأة بسبب قابليتها القوية للشد على سطوح المواد الجسيمية العالقة.

إن كثافات الكائنات الممرضة والكائنات الدالة (indicator) في الوحل الأولي (primary sludge) مبينة في الجدول (19 - 8) وهي تمثل قيمةً متوسطة نموذجية اكتشفت بواسطة عدد من الباحثين. وتجدر الإشارة، إلى ضرورة ملاحظة أن الكائنات الدالة توجد

عادة بكميات ثابتة بشكل عام. لكنه يتعين تذكر أن احتواء أنواع الحمأة المختلفة لأعداد ضخمة جداً أو قليلة جداً من أي كائن يعتمد على نوعية الصرف الصحي الذي اشتقت منه الحمأة. وبنفس الكيفية، فإن كميات الأنواع المختلفة للكائنات الممرضة متباينة بشكل خاص، لأن الأرقام تعتمد على الأنواع الموجودة في مجتمع معين في وقت محدد. وأخيراً، يتعين ملاحظة أن التراكيز التي تم تحديدها في أي دراسة تعتمد على الاختبارات التي أجريت على كل نوع ميكروبي؛ وبذلك فإن هذه التراكيز تكون دقيقة بنفس دقة التحاليل نفسها؛ التي قد تتأثر سلباً نتيجة لعوامل مثل عدم الكفاءة في استخلاص الكائنات الممرضة من عينات بيئية.

يتم إنتاج الحمأة الثانوية (secondary sludge) بعد المعالجة البيولوجية للمياه العادمة. وتعتمد التجمعات الميكروبية في الحمأة بعد هذه المعالجات على التراكيز بداية في المياه العادمة، والموت أو النمو أثناء المعالجات، وارتباط هذه الكائنات بالحمأة. إن بعض عمليات المعالجة، مثل عملية تنشيط الحمأة، قد تحد أو تدمر بعض الأنواع الميكروبية المعوية. إن الكائنات الممرضة الفيروسية والبكتيرية، مثلاً، يقل تركيزها عن طريق معاملة تنشيط الحمأة (انظر الجزء 2.2.3.20)، وعلى الرغم من ذلك فإن مدى تركيز الكائنات الممرضة في الحمأة الثانوية التي يتم الحصول عليها من هذه المعالجة الثانوية وأغلب المعالجات الأخرى تكون عادة غير مختلفة بدرجة معنوية عن تلك الموجودة في الوحل الأولى، كما هو مبين في الجدول (9-19).

جدول (8-19): كثافات الكائنات الممرضة الميكروبية والميكروبات الدالة في الحمأة الأولية

النوع	الكائن	الكثافة (العدد في الجرام من الوزن الجاف)
الفيروس	الأنواع المختلفة من الفيروسات المعوية الفيروسات الملتصقة للبكتريا (bacteriophages)	$10^2 - 10^4$ 10^5
البكتريا	البكتريا القولونية الكلية البكتريا القولونية البرازية البكتريا العقدية البرازية السالمونيللا الكلوستريديوم بكتريا السل	$10^8 - 10^9$ $10^7 - 10^8$ $10^6 - 10^7$ $10^2 - 10^3$ 10^6 10^6
البروتوزوا	الجيارديا	$10^2 - 10^3$
الديدان المعوية	الاسكارس Trichuris vulpis Taxocara SP.	$10^2 - 10^3$ 10^2 $10^1 - 10^2$

جدول (9 - 19) كثافة الكائنات الممرضة الميكروبية والميكروبات الدليلية في المواد الحيوية الصلبة للحمأة الثانوية

النوع	الكائن	الكثافة (العدد في الجرام من الوزن الجاف)
الفيروس	الأنواع المختلفة من الفيروسات المعوية	3×10^2
البكتريا	البكتريا القولونية الكلية البكتريا الواوية البرازية البكتريا العقدية البرازية السالمونيللا	7×10^8 8×10^6 2×10^2 9×10^2
البروتوزوا	الجيارديا	$10^2 \times 10^3$
الديدان المعوية	الإسكارس Trichuris vulpis Taxocara SP.	1×10^3 أقل من 10^2 3×10^2

2.4.19 المخلفات الصلبة

قد تحتوي المخلفات البلدية الصلبة أنواعاً مختلفة من الكائنات الممرضة التي عادة ما يكون أحد مصادرها حفاظات أو شمالات الرُّضَع (diapers). فقد وجد أن ما يصل إلى 10% من حفاظات الأطفال الملوثة بالبراز التي يتم التخلص منها في أماكن جمع ورم النفايات (Landfills) تحتوي على فيروسات معوية. وهناك مصدر رئيسي آخر للكائنات الممرضة يتمثل في المواد الحيوية الصلبة للصرف الصحي، حيث تمارس عملية التخلص المشترك. كما قد توجد الممرضات أيضاً في مخلفات الحيوانات الأليفة (مثل مخلفات القطط) والمخلفات الغذائية.

وقد وجد أن متوسط محتوى المخلفات الصلبة البلدية 7.7×10^8 بكتيريا واوية 4.7×10^8 بكتيريا قولونية برازية في الجرام الواحد. أيضاً تم العثور على السالمونيلا في المخلفات الصلبة الحضرية. وفي مواقع المكبات غير المبطنة، فإن هذه الكائنات الممرضة قد ترشح مع السوائل (Leachate) وتتراكم في الطبقات التحتية للمكبات (انظر الشكل 10-2).

5.19 مصير الكائنات الممرضة وانتقالها في البيئة

توجد عدة مسارات ممكنة لنقل الكائنات المعوية الممرضة التي يتم إفرازها، وتعتمد بالدرجة الأولى قابلية كائن معوي ممرض على النقل بواسطة أي من هذه المسارات على مدى مقاومته للعوامل البيئية، التي تتحكم في بقائه حياً، وقدرته على الحمل بواسطة المياه عند تدفقها في البيئة. ويمكن اعتبار بعض المسارات على أنها طبيعية لنقل الأمراض المحمولة بالماء، لكن مسارات أخرى، مثل استخدام المياه العادمة للمدن في تغذية المياه الجوفية، ومشاريع

الزراعة المائية (aquaculture) الكبرى، أو التخلص العشوائي من حفاظات الأطفال فإنها تعتبر في الواقع مسارات جديدة خلقها الإنسان الحديث.

إن إفرازات الإنسان والحيوان مصادر للكائنات الممرضة. وقد أصيب الإنسان بعدوى الكائنات الممرضة من خلال استهلاك غذاء ملوث مثل المحار (shellfish) من مياه ملوثة، أو محاصيل مروية بمياه عادمة؛ ومن شرب مياه ملوثة؛ ومن خلال التعرض لمياه سطحية ملوثة مثلما قد يحدث أثناء الاستحمام أو السباحة بأماكن الترفيه والاستحمام. زيادة على هذا، فإن الأفراد الذين اكتسبوا العدوى عن طريق العمليات المشار إليها يصبحون مصادر للعدوى من خلال إفرازاتهم، وهم بذلك يستكملون الدورة.

وعموماً فإن الكائنات الفيروسية الممرضة والبروتوزوا تعيش لفترة أطول في البيئة مقارنة بالمرضات المعوية البكتيرية، وتعتمد فترة استمرارية بقاء كائن ممرض ما تحت ظروف بيئية محددة على عدد من العوامل المعقدة مدرجة في الجدول (19 - 10). ومن بين هذه العوامل جميعاً يحتمل أن تكون درجة الحرارة العامل الأكثر أهمية. إن درجة الحرارة عامل محدد بوضوح ولها تأثير ثابت يمكن توقعه على حياة الكائنات المعوية الممرضة في البيئة. وعادة، كلما قلت درجة الحرارة، طالت فترة بقائية الكائن الممرض. ومن ناحية أخرى، تتسبب درجات الحرارة المنخفضة جداً في موت البكتيريا المعوية والبروتوزا الطفيلية، لكن الفيروسات يمكنها البقاء معدية لعدة أشهر أو سنوات عند درجات التجمد.

يمكن أن يسبب الجفاف أو الرطوبة انخفاضاً في استمرار بقاء البكتيريا حية كما تعتبر الأشعة فوق البنفسجية من الشمس عاملاً مثبطاً رئيسياً للبكتيريا الدالة

(indicator bacteria) في المياه السطحية، وبذلك يمكن التنبؤ بموتها في المياه البحرية حسب فترة التعرض لضوء النهار. إن الفيروسات أكثر مقاومة للتشبيط بالأشعة فوق البنفسجية. أظهرت الكثير من الدراسات أن الأحياء النباتية الدقيقة (microflora) للمياه الطبيعية والصرف الصحي تعمل كعوامل مضادة لبقاء الكائنات المعوية الممرضة. فقد تبين، على سبيل المثال، أن الكائنات المعوية الممرضة تعيش لفترة أطول في المياه المعقمة مقارنة بمياه من بحيرات وأنهار ومحيطات. ويمكن للبكتيريا في المياه الطبيعية أن تتغذى على البكتيريا الدالة (الكاشفة) مثل البكتيريا القولونية البرازية، ولقد تبين أن إدمصاص البكتيريا المعوية على سطوح المواد المعلقة (الطين، بقايا عضوية، وما شابه) ومواد رسوبية بحرية يُطيل فترة حياتها. إن مدى فترة حياة الكائنات الممرضة الفيروسية موضح في الجدول (19 - 11).

جدول (19 - 10) العوامل البيئية المؤثرة على حياة الكائنات المعوية الممرضة في المياه الطبيعية

العامل	ملاحظات
درجة الحرارة	يحتمل أن تكون العامل الأكثر أهمية؛ فترة بقائية أطول عند درجات الحرارة المنخفضة، التجمد يقتل البكتيريا والبروتوزوا المتطفلة، لكنه يطيل من حياة الفيروسات.
الرطوبة	يمكن لمحتوى التربة المنخفض من الرطوبة أن يقلل من التجمعات البكتيرية
الضوء	تكون الأشعة فوق البنفسجية ضارة
الرقم الهيدروجيني (pH)	معظمها تكون مستقرة عند قيم الرقم الهيدروجيني للمياه الطبيعية. تكون البكتيريا المعوية أقل استقراراً عند pH أعلى من 9 وأقل من 6.
الأملاح	بعض الفيروسات تكون محمية ضد التشبيط الحراري نتيجة لوجود بعض الكاتيونات.
المادة العضوية	وجود مخلفات المجاري ينتج عنه عادة حياة أطول.
المواد الصلبة المعلقة أو الرسوبيات	الارتباط بالمواد الصلبة يطيل من حياة البكتيريا والفيروسات المعوية.
عوامل حيوية	وجود حياة نباتية دقيقة يكون له عادة تأثير مضاد.

جدول (19 - 11) : فترات بقاءية الفيروسات المعوية في بيئات مختلفة .

فترة البقاءية (أيام)	البيئة
130 - 2	مياه بحر أو مصبات
188 - 2	مياه نهر
168 - 5	مياه صنوبر
90 - 6	المحارات
436 - 8	الرسوبيات البحرية

المراجع، ولمزيد الاطلاع

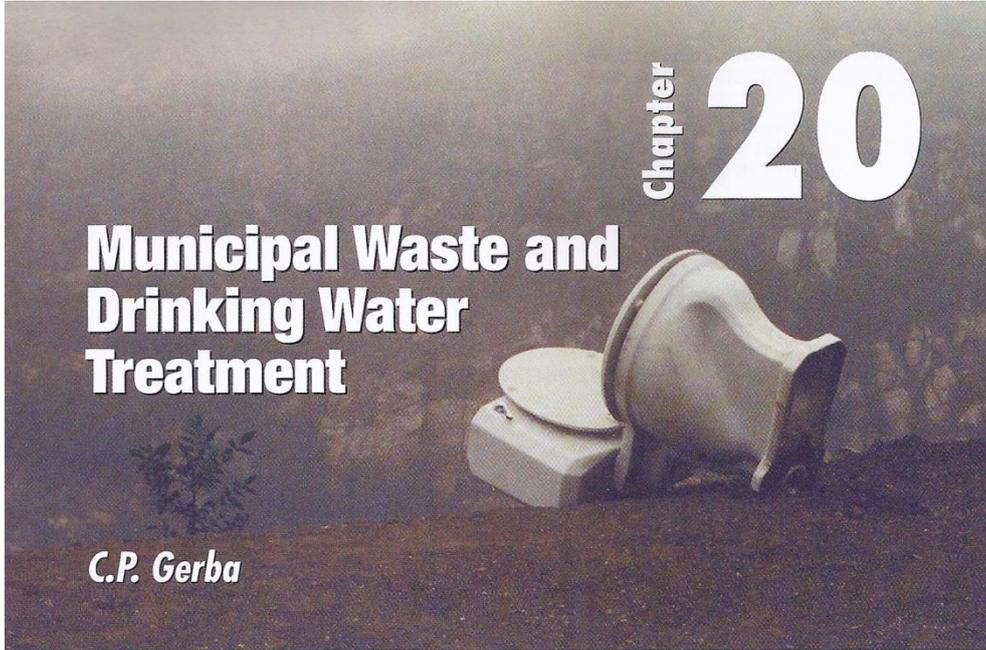
- Bennett J.V., Homberg S.D., Rogers M.F., and Solomon S.L. (1987) Infectious and Parasitic diseases. American Journal Preventative Medicine. 55, 102-114.
- Bitton G. (1994) *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss, New York.
- Craun G.F. (1986) *Waterborne Diseases in the United States*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Jeffrey, H.C. and Leach R.M. (1972) *Atlas of medical Helminthology and Protozoology*. Churchill Livingstone, Edinburgh.
- LeChevallier M.W., Norton W.D., and Lee R.G. (1991) *Giardia and Cryptosporidium* spp. in filtered drinking water supplies. *Applied and Environmental Microbiology*, **57**, 2617-2626.
- Lin S.D. (1985) *Giardia lamblia* and water supply. Journal of the American Water Works Association. **77**, 40-47.
- McFeters G.A. (1990) *Drinking Water Microbiology*. Springer-Verlag, New York.
- Pepper I.L., Gerba C.P., and Bredecker J.W. (1995) *Environmental Microbiology: A Laboratory Manual*. Academic Press, San Diego, California.
- Straub T.M., Pepper I.L., and Gerba C.P. (1993) Hazards of pathogenic microorganisms in land-disposed sewage sludge. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. **132**, 55-91.
- U.S. EPA (1988) *Comparative Health Effects Assessment of Drinking Water*. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- White G.F. and Bradley D.J (1972) *Drawers of Water*. University of Chicago Press, Chicago.

مسائل وأسئلة

1. ما هي الكائنات الممرضة؟ ما هو الكائن المعوي الممرض؟
2. ما هو الفرق بين كائن ممرض منقول بالماء (Waterborne) وآخر منشأ الماء (Water based)؟
3. أي مجموعة من الكائنات الممرضة المعوية يعيش لفترة أطول في البيئة، ولماذا؟
4. صف بعض الطرق التي يمكن استخدامها للكشف عن البكتيريا الدليلية في الماء.
5. ما هي بعض المواصفات القياسية الخاصة بالبكتيريا الدليلية؟
6. تعتبر البروتوزوا المتطفلة السبب الرئيسي في تفشى الأمراض المنقولة بالماء بالولايات المتحدة الأمريكية عندما يكون ممكناً التعرف على الناقل. لماذا؟
7. ما هي بعض العوامل التي تتحكم في حياة الكائنات المعوية الممرضة في البيئة؟
8. لماذا تظل الأمراض المنقولة بالماء مشكلة في الولايات المتحدة الأمريكية؟
9. ما هي بعض البيئات التي يمكن للبكتيريا Legionella التكاثر فيها بأعداد عالية؟
10. ما هي العوامل التي تحدد تركيز الكائنات المعوية الممرضة في الصرف الصحي؟
11. بواسطة أي من المسارات الأخرى، إضافة لمياه الشرب، يمكن أن تنقل الكائنات المعوية الممرضة.

الباب العشرون

معالجة المخلفات البلدية ومياه الشرب



إن كثيراً مما يتم طرده من خلال المراحيض يمكن إعادة إدخاله ضمن الدورات الطبيعية للمغذيات التي تمت مناقشتها في الأبواب السابقة. مع ذلك يتعين الإشارة إلى أن المغذيات الهامة يصاحبها العديد من المخاطر من بينها الكائنات الحية المرضية، وهو ما يستدعي معالجة كافية للصرف.

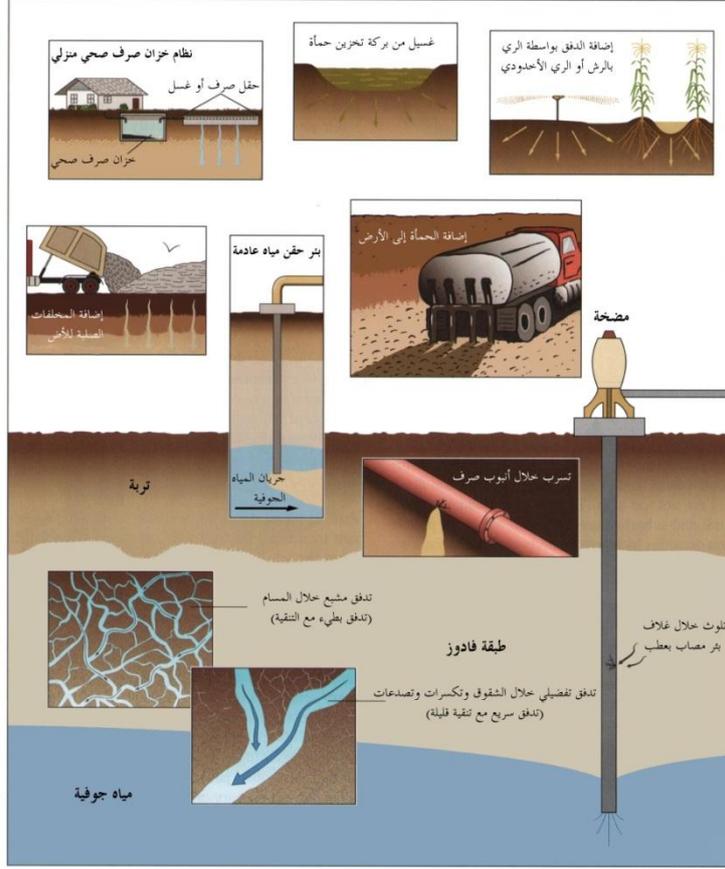
1.20 الماء والحضارة

قامت الحضارة (التي تعني مجازاً العيش في مدن أو التمددين) على الماء. وتاريخياً بعدما أصبحت التجمعات السكانية الصغيرة مدناً، فإن حاجتها لموارد مائية آمنة يمكن الاعتماد عليها، وكذلك حاجتها لنظم تخلص من المخلفات جيدة أصبحت ضرورية. فمثلاً،

منذ أكثر من ألفي عام مضت وفر الرومان هذه الضرورة عن طريق بناء نظام متطور من القنوات المائية والمصارف، مازال بعضها يستخدم حتى الآن. لكن المدن الحديثة تحتاج لكميات هائلة من مياه الشرب ويتولد عنها كميات أكبر من المخلفات مقارنة بتلك في العهد الروماني القديم. إضافة لذلك، فقد أصبحنا أكثر معرفة بالارتباط القوي بين الأمراض والصرف الصحي، وكذلك العلاقات بين معالجة المخلفات والبيئة الصحية (انظر الشكل 1-20 الذي يوضح بالصورة وصفاً للمسارات المتعددة التي يمكن من خلالها أن تلوث المخلفات البلدية المياه الجوفية). لهذا، فإننا نواجه تحدياً رئيسياً في البحث عن حلول اقتصادية وفعالة لمشاكل توفير المياه والتخلص من المخلفات التي لا تحمي فقط صحة الإنسان ولكن أيضاً جودة البيئة.

2.20 طبيعة المياه العادمة (الصرف الصحي)

تميز أنبوب الصرف الأكبر المسمى (The cloaca maxima) في روما، بقدرته كافية لخدمة مدينة من مليون نسمة. إن أنبوب الصرف هذا، وأمثاله، كانت ببساطة تجمع المخلفات وتفرغها في أقرب بحيرة، أو نهر أو محيط. ومع أن هذه الوسيلة جعلت المدن أكثر ملاءمة للعيش، لكن نجاحها اعتمد على نقل مشكلة التلوث من مكان إلى آخر.



شكل (20-1): المسارات التي يمكن للمخلفات البلدية عن طريقها تلوين المياه الجوفية.

إن ما عمل بشكل جيد ومقبول للرومان لا يصلح الآن. فالكثافات السكانية الحالية عالية جداً لتسمح بالاعتماد فقط على نقل التلوث من مكان إلى آخر. لذلك، فإن الصرف الصحي اليوم تتم معالجته قبل أن يضر البيئة. وفي الجزء الأخير من القرن التاسع عشر، سمح تصميم نظم الصرف بالتجميع مع المعالجة وذلك لتقليل الضرر على المياه

الطبيعية. واليوم، فإن أكثر من 15 ألف محطة معالجة للمياه العادمة في الولايات المتحدة وحدها تعالج نحو 150 بليون لتر من المياه العادمة يومياً. إضافة لذلك، فإن خزانات الصرف الصحي، التي أدخلت أيضاً عند نهاية القرن التاسع عشر، تخدم 25% تقريباً من سكان الولايات المتحدة، غالباً في المناطق الريفية.

تضم المياه العادمة البلدية برازاً وبولاً بشرياً، إضافة لمياه رمادية تنتج عن الغسل والاستحمام وإعداد الوجبات. كما قد تدخل النظام أيضاً مياه من مختلف النشاطات الصناعية والتجارية. وتُحدر الإشارة إلى أن كمية المادة العضوية في المخلفات البلدية هي التي تحدد مستوى المعالجة البيولوجية اللازمة.

وتستخدم ثلاثة اختبارات لتقييم كمية المادة العضوية: الكربون العضوي الكلي (TOC)، الاحتياج البيوكيميائي للأكسجين (BOD)، والاحتياج الكيميائي للأكسجين (COD)، وقد تم مناقشة الاختبارين الأخيرين في الجزئين 4.13 و 5.13.

تتمثل الملوثات الرئيسية في المياه العادمة البلدية في مركبات عضوية قابلة للتحلل بيولوجياً، ومواد عضوية شديدة المقاومة للتحلل، وعناصر فلزية سامة، ومواد عالقة، وكائنات دقيقة ممرضة. إن بعضاً من مكونات الصرف الصحي البلدي مدونة في الجدول (20-1)، إضافة لخصائصها الكيميائية - الفيزيائية وتراكيزها. كما أن عدة أنواع من البكتيريا الدالة (indicator bacteria) والمرضات تتواجد أيضاً في المياه العادمة بتراكيز مختلفة كما هو موضح في الجدول (20-2).

جدول (20-1): المكونات الاعتيادية لمياه عادمة بلدية غير معالجة.

الملوثات	التركيز (مجم / لتر)		
	منخفض	متوسط	عالٍ
- المواد الصلبة الكلية	350	720	1200
المواد الذائبة، الكلية	250	500	850
مواد متطايرة	105	200	325
- مواد صلبة عالقة	100	220	350
مواد متطايرة	80	165	275
- مواد صلبة قابلة للترسب	5	10	20
- الاحتياج البيو كيميائي للأكسجين (*)	110	220	400
- الكربون العضوي الكلي	80	160	290
- احتياج الأكسجين الكيميائي	250	500	1000
- النيتروجين (الكلي معبر عنه في صورة N)	20	40	85
العضوي	8	15	35
الأمونيا الحرة	12	25	50
نيتريت	0	0	0
نترات	0	0	0
الفوسفور (الكلي معبر عنه في صورة P)	4	8	15
العضوي	1	3	5
غير العضوي	3	5	10

(*) مدة 5 أيام عند 20م³ (BOD, 20° C)

جدول (20-2): أنواع وأعداد الكائنات الدقيقة الموجودة اعتيادياً في مياه عادمة بلدية غير معالجة.

التركيز (مجم/ لتر)	الكائن الدقيق
$10^5 - 10^6$	البكتيريا القولونية الكلية (Total coliform)
$10^4 - 10^5$	القولونية البرازية (Fecal coliform)
$10^3 - 10^4$	العقدية البرازية (Fecal streptococci)
$10^2 - 10^3$	عصوية معوية (Enterococci)
توجد	شيغيلا (Shigella)
$10^0 - 10^2$	سالمونيلا (Salmonella)
$10^1 - 10^3$	كلوستريديوم بيرفرنجينز (Clostridium perfringens)
$10^{-1} - 10^2$	حويصلات جيارديا (Giardia cysts)
$10^{-1} - 10^1$	حويصلات بيضية للكريبتوسبورديس (Cryptosporidium oocysts)
$10^{-2} - 10^1$	بيض وديدان معوية (Helminth ova)
$10^{-1} - 10^2$	فيروس معوي (Enteric virus)

3.20 معالجة المياه العادمة (الصرف الصحي)

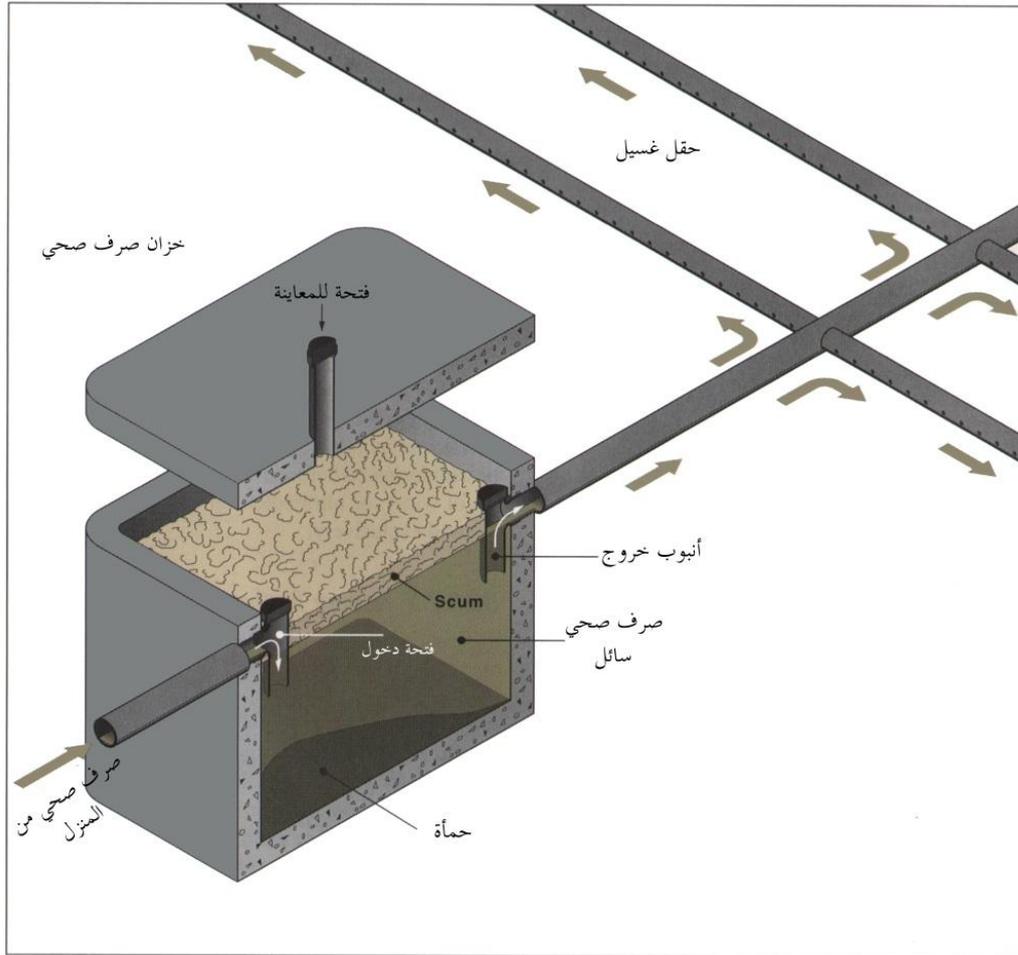
1.3.20 خزانات الصرف الصحي (Septic tanks)

حتى منتصف القرن العشرين اعتمدت كثير من الأسر الريفية وعدد ليس بالقليل من سكان المدن الصغيرة في الولايات المتحدة على استخدام الحفر الصحية خارج المنازل للتخلص من مخلفاتهم. وكثيراً ما تسمح هذه الحفر الصحية بانسياب المخلفات غير المعالجة لتصل إلى المياه الجوفية مما يلوث موارد مياه الشرب بالكائنات الممرضة. إن هذا التهديد للصحة العامة قاد إلى تطوير خزانات الصرف الصحي وحقول صرف (drainfields)

مصممة بشكل جيد. وتعمل خزانات الصرف الصحي بالدرجة الأولى كمكان تجميع (repositories) حيث تفصل المواد الصلبة عن المياه العادمة الداخلة، ويمكن أن يتم فيها أيضاً هضم المخلفات العضوية بيولوجياً تحت ظروف لا هوائية. وفي نظام خزان صرف صحي نمطي (انظر الشكل 20-2) تدخل المياه العادمة ومياه الصرف لخزان مصنوع من الخرسانة أو المعدن أو ألياف الزجاج. وهناك تطفح الدهون والزيوت فوق السطح في شكل غشاء (scum)، وتترسب المواد الصلبة بالقاع. وتعرض المياه العادمة والصرف لتحلل بكتيري لا هوائي، منتجة حمأة (sludge). وتبقى عادة المياه العادمة عادة في خزان الصرف الصحي لمدة تتراوح ما بين 24-72 ساعة فقط، يتم بعدها تمريرها في قنوات إلى حقل الصرف. ويتكون حقل الصرف أو حقل الغسيل (leachfield) من أنابيب مثقبة صغيرة مدفونة في الحصى تحت سطح التربة. ويتم من فترة لآخرى ضخ المخلفات المتبقية في خزان الصرف الصحي خارجاً إلى شاحنة مزودة بصهريج لنقلها إلى محطة معالجة للتخلص منها.

على الرغم من أن تركيز الملوثات في المخلفات بخزان الصرف الصحي تكون عادة أعلى بكثير من تلك التي توجد في المياه العادمة البلدية (انظر الجدول 20-3)، تظل خزانات الصرف الصحي طريقة فعالة للتخلص من المخلفات عندما تكون الأراضي متوفرة وكثافة السكان ليست عالية جداً. لذلك، فإنها تستخدم بكثرة في المناطق الريفية وضواحي المدن. لكنه، ومع تزايد كثافة السكان بالضواحي فإن إمكانية تلوث المياه الجوفية والسطحية قد ترتفع أيضاً، وهو ما يشير إلى الحاجة للانتقال إلى نظام صرف بلدي تجاري. وفي واقع الأمر، فإن أنظمة الخزانات الصحية الخاصة يتم التخلص منها أحياناً في كثير من ضواحي المدن.

إضافة لذلك، فإن خزانات الصرف الصحي ليست ملائمة لجميع المناطق. فهي على سبيل المثال، لا تعمل جيداً تحت ظروف المناطق الباردة كثيرة الأمطار حيث قد تكون حقول الصرف مشبعة جداً.



شكل (20-2): نظام خزان الصرف الصحي.

لحدوث تبخر جيد، كما أنها غير ملائمة في المناطق التي يكون فيها مستوى الماء الحر ضحلاً. ويمكن أيضاً أن تكون زيادة كثافة خزانات الصرف الصحي مسؤولة عن تلوث المياه الجوفية بالنترات. وأخيراً، فإنه يعتقد بأن معظم أوبئة الأمراض المنقولة بالمياه والمرتبطة بالمياه الجوفية في الولايات المتحدة تنتج عن التلوث عن طريق خزانات الصرف الصحي.

جدول (20-3): الخصائص النمطية لمواد الصرف الصحي

التركيز (مجم/ لتر)		المكوّن
التركيز النموذجي	المدى	
40000	100000 - 5000	المواد الصلبة الكلية
15000	100000 - 4000	مواد صلبة معلقة
7000	14000 - 1200	مواد صلبة متطايرة
6000	30000 - 2000	الاحتياج البيولوجي للأكسجين (5 أيام، عند 20 م هـ)
30000	80000 - 5000	الاحتياج الكيميائي للأكسجين
700	1600 - 100	النيتروجين الكلي (N)
400	800 - 100	الأمونيا (N)
250	800 - 50	الفوسفور الكلي - P
300	1000 - 100	العناصر الثقيلة *

* بالدرجة الأولى: الحديد (Fe)، والزنك (Zn) والألومنيوم (Al).

2.3.20 العملية الإجمالية لمعالجة المياه العادمة

بدأت المحطات الحديثة لمعالجة الصرف الصحي مع نهاية القرن التاسع عشر عندما جرت محاولات لتطوير عمليات تؤدي إلى تخفيض المادة العضوية القابلة للتحلل البيولوجي في الصرف الصحي قبل ضخها لأجسام مائية طبيعية. إن وجود مادة عضوية في المخلفات التي

يتم ضخها يخفز نمواً ميكروبياً سريعاً، ينتج عنه استهلاك ميكروبي للأكسجين المتاح في المياه. كما يمكن أن يترتب عن الظروف اللاهوائية موت الأسماك والصور الأخرى للأحياء المائية، وتتولد عنها في الوقت ذاته روائح كريهة .

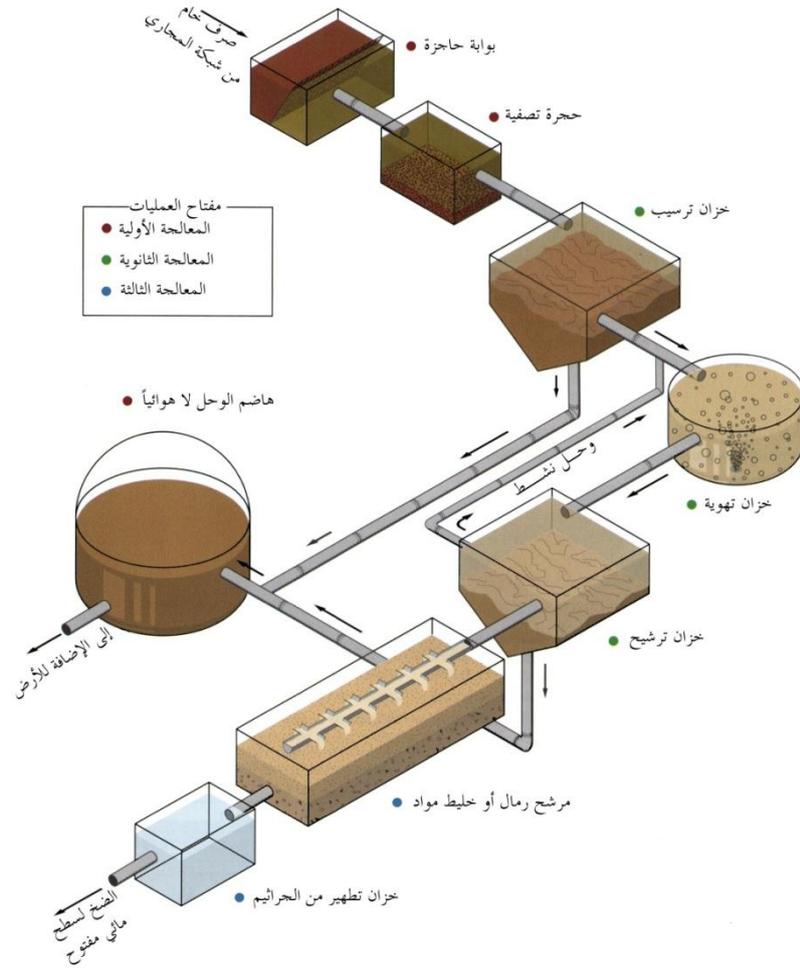
ومن أجل تخفيض كمية المواد العضوية القابلة للتحلل البيولوجي عن طريق إجراء هذه العمليات تحت ظروف محكمة، فإن المعالجة الكاملة للصرف الصحي تتكون من ثلاثة خطوات رئيسية، كما هو موضح في الشكل (20-3).

- المعالجة الأولية: وهي عملية فيزيائية تشمل فصل البقايا الكبيرة، يعقبها الترسيب.
- المعالجة الثانوية: وهي عملية بيولوجية تقوم بها الكائنات الدقيقة.
- المعالجة الثالثة: تكون عادة عملية فيزيائية - كيميائية تؤدي إلى إزالة العكارة الناتجة عن وجود مغذيات (مثلاً، النيتروجين)، أو مادة عضوية ذائبة، أو معادن فلزية، أو كائنات ممرضة.

1.2.3.20 المعالجة الأولية

تكون المعالجة الأولية الخطوة الأولى في معالجة الصرف الصحي البلدي. وتقوم بفصل المواد الصلبة الكبيرة فيزيائياً من مجرى المخلفات. فعندما يدخل الصرف الخام محطة المعالجة، يمر خلال بوابات معدنية تزيل المواد كبيرة الحجم، مثل فروع الأشجار والإطارات وما شابه ذلك. بعدها تقوم مناخل متحركة بحجز المواد الأصغر حجماً مثل الحافظات والقنينات، حيث تستقر مياه الصرف لفترة قصيرة في خزانات تصفية تسمح بترسب الرمل والحصى. يتم بعدها ضخ دفع المخلفات إلى داخل خزان ترسيب أولى (يعرف أيضاً بخزان الترسيب أو المنقى (clarifier) حيث ترسب نحو نصف المواد العضوية الصلبة العالقة للقاع

في صورة وحل (حمأة) (sludge) أو مواد صلبة حيوية (biosolids). ويشار إلى الوحل الناتج بأنه وحل أولى وفي العملية الأولية هذه لا تتم إزالة الميكروبات الممرضة بكفاءة.



شكل (20-3): رسم تخطيطي لعمليات معالجة نمطية في المحطات الحديثة لمعالجة المياه العادمة التي تستخدم خزانات هضم هوائية. لاحظ أنه مع اختلاف معالجة المياه العادمة حسب نوع المدخلات وكذلك الظروف المناخية المحلية والعوامل التنظيمية، فإن أنواع المعالجة المستخدمة تتباين بشكل واسع.

2.2.3.20 المعالجة الثانوية

تتكون المعالجة الثانوية من انحلال بيولوجي، حيث يتم تحليل ما تبقى من مواد صلبة معلقة وتخفيض عدد الكائنات الممرضة. وفي هذه المرحلة، قد يتم ضخ الدفق من المعالجة الأولية عبر طبقة ترشيح بالتنقيط، أو خزان تهوية، أو بركة صرف. وعادة ما تشمل العملية خطوة تعقيم عند نهاية المعالجة.

طبقة الترشيح بالتنقيط (**trickling filter bed**) عبارة عن مرقد أو مهد مكون من حصى أو شرائح بلاستيكية مثقبة يتقاطر الماء خلالها (انظر الشكل 20-4). ويتم ضخ الدفق خلال نظام من أنابيب مثقبة أو خلال رشاش متحرك فوق هذا المرقد، حيث تتواجد بكتيريا وكائنات دقيقة أخرى. وتقوم هذه الكائنات الدقيقة باعتراض المادة العضوية عند تدفقها من الثقوب وتحللها هوائياً.

الهضم في الخزان تحت ظروف هوائية (**Aeration – tank digestion**)، ويعرف أيضاً بعملية الوحل المنشط. يشيع بكثرة في الولايات المتحدة معالجة المياه العادمة عن طريق هذه العملية (العملية الموضحة في الشكل 20-3). ويتم ضخ الدفق من المعالجة الأولية إلى داخل الخزان ويخلط مع الوحل السائل (**slurry**) الغني بالبكتيريا، الذي يعرف بالوحل المنشط (**activated sludge**). يحفز الهواء أو الأكسجين النقي الذي يضخ خلال المخلوط نمو البكتيريا وتحلل المادة العضوية. يندفع بعدها هذا المخلوط إلى خزان ترسيب ثانوي، حيث يتم إزالة الماء الطافح عند قمة الخزان ويزال الوحل من القاع. ويستخدم بعض من الوحل كخميرة للدفق الأولى الجديد. أما بقية الوحل، الذي يسمى وحلاً ثانوياً، فتتم إزالته.

ويخفض تركيز الكائنات الممرضة في عملية الوحل المنشط عن طريق كائنات دقيقة مضادة وكذلك الإدمصاص (adsorption) بواسطة الوحل الثانوي أو أن تصبح ضمن مكوناته التركيبية.

تعتبر برك الصرف (Sewage lagoons)، ويشار إليها عادة برك الأكسدة أو الشيت، الأقدم من بين أنظمة معالجة المياه العادمة. وتعمل برك الأكسدة التي لا تزيد مساحتها عن هكتار واحد وعمقها عن بضعة أمتار فقط كبوتقة طبخ طبيعية، حيث تجبس المياه العادمة بينما تتحلل المادة العضوية. وتكون هذه الفترة الزمنية، التي تتراوح ما بين 1 إلى 4 أسابيع (وأحياناً أطول من ذلك)، ضرورية لإتمام تحلل المادة العضوية. إن الضوء، والحرارة، وترسب المواد الصلبة يمكن أيضاً أن يخفض بفعالية من عدد الكائنات الممرضة التي توجد في المياه العادمة.

توجد ثلاثة أصناف لبرك الأكسدة، التي عادة ما تستخدم على التوالي: برك

هوائية، برك مُهواة، وبرك لاهوائية.

البرك الهوائية: (انظر الشكل 16-5 أ)، وهي برك يتم فيها خلط الهواء طبيعياً، ويتعين أن تكون ضحلة لأنها تعتمد على احتراق الضوء لتحفيز النمو الطحلبي، الذي يزيد من توليد الأكسجين. وتتراوح عموماً فترة احتجاز المياه العادمة ما بين 3-5 أيام.

البرك المهواة:

ويتم تهويتها ميكانيكياً، ويبلغ عمقها ما بين 1-2 متر، مع فترة احتجاز أقل من

عشرة أيام.

وعموماً، فإن المعالجة تتوقف على مقدار زمن التهوية ودرجة الحرارة، إضافة لنوع المياه العادمة. مثلاً، عند 20°م ينتج عن تهوية لمدة 5 أيام إزالة ما نسبته 85% من الاحتياجات البيولوجية للأكسجين (BOD).

البرك اللاهوائية :

وهي برك يتراوح عمقها ما بين 1-10 أمتار (أنظر الشكل 16-5ب)، وتتطلب فترة احتجاز طويلة نسبياً تتراوح ما بين 20-50 يوماً. إن هذه البرك، التي لا تحتاج إلى تهوية ميكانيكية مكلفة، تولد كميات قليلة من الوحل. وعادة، ما تستخدم البرك اللاهوائية كخطوة تسبق معالجة المخلفات العضوية الغنية بالبروتين والدهون (مثلاً، مخلفات اللحوم ذات التركيز العالي من المخلفات الصلبة المعلقة التي تتميز باحتياجات بيولوجية عالية من الأكسجين).

نظراً لأن بحيرات الصرف الضحلة تتطلب حداً أدنى من التقنية وذات تكلفة منخفضة نسبياً، فإنها أكثر شيوعاً في الدول النامية وفي التجمعات السكانية الصغيرة بالولايات المتحدة، حيث تكون الأراضي متاحة بأسعار معقولة. لكنه يلاحظ أن المواد العضوية القابلة للتحلل وكذلك العكارة لا يتم تخفيضها بكفاءة كما هو في حالة معالجة الوحل المنشط.

ويتلقى الدفق الناتج عن عمليات المعالجة الثانوية هذه عادة معاملة تطهير للتخلص من الممرضات البكتيرية المتبقية. تعتبر الكلورة أكثر أشكال التطهير شيوعاً لكن استعمال الأشعة فوق البنفسجية بدأت تصبح أكثر شيوعاً. وتجدر الإشارة، إلى أن الفيروسات المعوية

والبروتوزوا الممرضة لا تتأثر بعملية التطهير، كما أن الكلورة يمكن أن تنتج مواد تكون سامة للحيوانات المائية بما في ذلك الأسماك. لذلك، فإنه يتعين إزالة الكلور من المياه العادمة قبل ضخها لأجسام مائية حساسة، أو الاقتصار على تعقيمها بأشعة فوق بنفسجية دون غيرها.

3.2.3.20 المعالجة الثالثة

تشمل المعالجة الثالثة سلسلة من الخطوات الإضافية بعد المعالجة الثانوية لمزيد من تقليل المواد العضوية، والعكارة، والنيتروجين، والفوسفور، والعناصر الفلزية، والكائنات الممرضة. إن معظم العمليات تضم نوعاً من المعالجة الفيزيائية - الكيميائية مثل التخثر (coagulation)، والترشيح، وإدمصاص المواد العضوية، والتعقيم الإضافي. وتجري المعالجة الثالثة لتوفير حماية إضافية للأحياء البرية بعد ضخ هذه المياه للأنهار أو البحيرات. ومن الشائع، القيام بالمعالجة الثالثة عندما يستهدف إعادة استخدام المياه العادمة لأغراض الري (مثلاً، محاصيل غذائية، ملاعب الجولف)، وفي الأغراض الترفيهية (مثلاً، البحيرات، خلجان مصبات الأنهار) أو لاستخدامها للشرب.

3.3.20 معالجة الحمأة (الوحل)

يتطلب الوحل الناتج من المراحل المختلفة للتعامل مع مخلفات المجاري (بما في ذلك كل من الوحل الأولي، والوحل المنشط المتولد بواسطة العمليات الثانوية) معالجة، وذلك للمحافظة على محتواها من المادة العضوية، وتخفيض محتواها من الماء. وتمنع معاملة المادة العضوية تكون روائح وتقلل من أعداد الكائنات الممرضة، مثل الطفيليات والفيروسات المعوية

التي تكون عادة مركزة في الوحل. ويؤدي تخفيض المحتوى من الماء إلى تقليل وزن الوحل، وهو ما يجعل نقله إلى الموقع النهائي للتخلص منه أقل تكلفة.

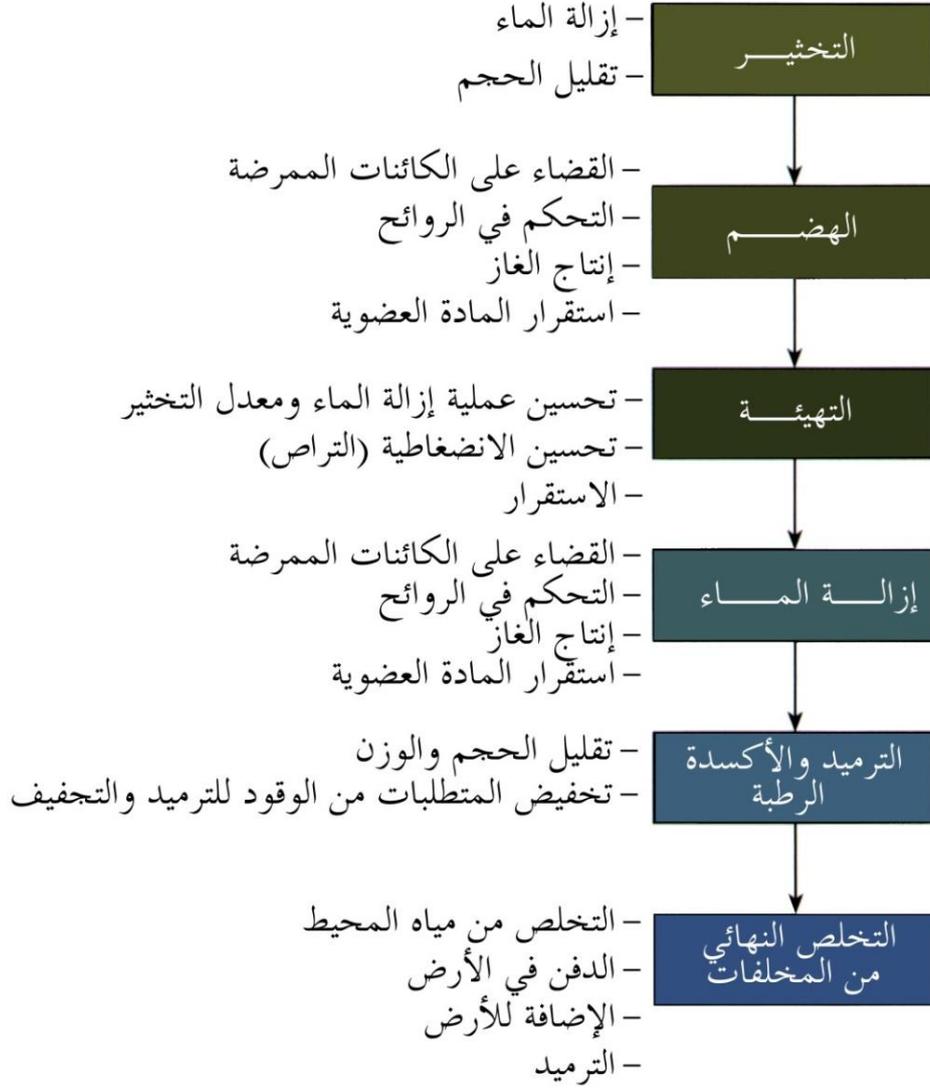


شكل (20-4): طبقة ترشيح بالتنقيط، مثل هذا في بورتوريكو يمكن أن يمثل طريقة بسيطة لمعالجة ثانوية. هنا، توفر الصخور مادة تدعم نمو غشاء حيوي ميكروبي يحلل بفعالية المادة العضوية في المياه العادمة تحت ظروف هوائية.

تشمل معالجة الحمأة أو الوحل عادة عدة خطوات، كما يتضح في الشكل (20-5) وهي: التكتيف أو التثخين (thickening) الذي يقلص حجم الوحل. ويمكن إجراؤه عن طريق السماح للمواد الصلبة بالترسب في خزان أو عن طريق الطرد المركزي. والهضم (digestion) وهي عملية ميكروبية تؤدي إلى استقرار المادة العضوية والقضاء على بعض الكائنات المرضية بسبب الحرارة المرتفعة الناتجة. ويمكن هضم الوحل لاهوائياً وهوائياً.

ويجرى الهضم اللاهوائي في خزانات كبيرة مغطاة وذلك بمحطة معالجة الصرف الصحي على مدى 2-3 أسابيع. وتتميز هذه العملية بإنتاج غاز الميثان، الذي يمكن استعادته كمصدر للطاقة. كما يؤدي الهضم الهوائي أيضاً إلى استقرار الوحل. وفي هذه العملية يمرر الهواء أو الأكسجين خلال الوحل في خزانات مفتوحة. ومن مميزات الهضم الهوائي انخفاض تكاليف رأس المال، وسهولة التشغيل، وإنتاج وحل مستقر وخالٍ من الروائح. لكنه، ينتج عن هذه العملية كميات أكبر من مخلفات الوحل التي يتعين التخلص منها. وقد يتم التخلص من الوحل بعد هضمه، لكنه يعرض عادة لمزيد من المعالجة لتقليل محتواه من الماء. ويتم ذلك بواسطة عمليات تسمى بالتهيئة (conditioning)، التي يتم فيها إضافة مواد كيميائية مثل الشب (alum) أو كلوريد الحديد، أو الجير لتجميع الحبيبات المعلقة. ويتبع ذلك نزع الماء (dewatering) الذي يمكن أن يجرى بطرائق متعددة، مثل التجفيف الهوائي في أحواض نشر، أو عن طريق الطرد المركزي أو الترشيح بالتفريغ.

ويعتبر التخثير أو التكتيف (coagulation) بواسطة الشب أو الجير أو المركبات الإلكتروليتية المتعددة (انظر الجزء 5.20) فعالاً في إزالة المواد العالقة والفوسفور من الوحل. كما أنه فعال أيضاً في إزالة الفيروسات. ويتم إزاحة الراسب الذي يتكون ويمرر الدفق عادة خلال مرشحات رمل أو بيئات من مواد مختلطة. وتتكون البيئات المختلطة من فحم محبب وجارنيت ورمل التي تقوم مجتمعة بتحفيز عملية الترشيح. ويكون التعقيم عادة أكثر فعالية في قتل الكائنات الفيروسية الممرضة بعد التخثير والترشيح لأنهما يزيلان المواد الصلبة الدخيلة والمادة العضوية القابلة للذوبان.



شكل (20-5): عمليات معالجة الحمأة ووظائفها. هذه العمليات لم يعد مسموحاً بها في الولايات المتحدة الأمريكية .

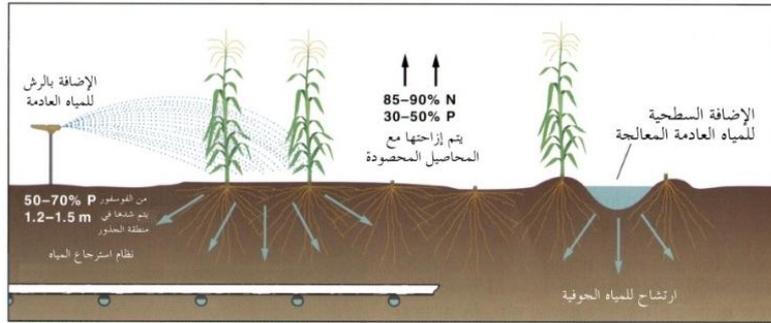
جدول (20-4): الخصائص العامة للطرائق الثلاثة المستخدمة لإضافة دفق الصرف الصحي.

طريقة الإضافة			العامل
الارتشاح بمعدل عالٍ	الجريان فوق سطح الأرض	الري بمعدل منخفض	
معالجة المياه العادمة حقن المياه الجوفية سريعة (ترب رملية) اختياري	معالجة المياه العادمة بطيئة (ترب طينية) مطلوب	إعادة استخدام المغذيات والماء معالجة المياه العادمة متوسطة (ترب رملية إلى طينية) مطلوب	الأهداف الرئيسية. نفاذية التربة. الحاجة لغطاء تباتي. معدل الإضافة.
أكثر من 50 سم أسبوعياً	5-14 سم أسبوعياً	1.3-10 سم أسبوعياً	أسلوب الإضافة. مساحة الأرض اللازمة لتدفق بمعدل 10^6 لتر في اليوم. العمق المطلوب للمياه الجوفية. الاحتياج البيولوجي من الأكسجين (BOD) وإزالة المواد الصلبة المعلقة.
عادة بالرش 0.25-7 هكتار	عادة بالرش 5-16 هكتار	بالرش، سطحي 8-66 هكتار	إزالة النيتروجين (N). إزالة الفوسفور (P).
نحو 5 أمتار 90-99 %	غير محددة 90-99 %	نحو 2 متر 90-99 %	
0-80 %	70-90 %	85-90 %	
75-90 %	50-60 %	80-90 %	

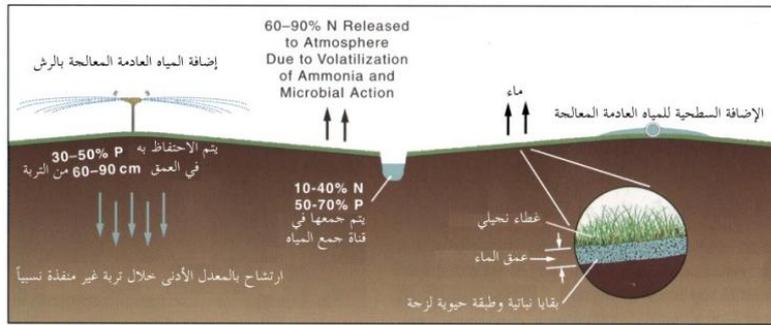
4.3.20 إضافة المياه العادمة للأرض

بينما يتم عادة ضخ المياه العادمة الحضرية لأجسام مائية، فإنه يمكن أيضاً التخلص منها عن طريق إضافتها للأراضي - حيث تستخدم أحياناً لري المحاصيل وأحياناً كوسيلة لمعالجة إضافية أو للتخلص منها (انظر الجزء 4.10). وتشمل الطرائق الأساسية المستخدمة في إضافة دفق المجاري للأرض كلا من الري بمعدلات منخفضة (Low-rate irrigation)، والجريان فوق سطح الأرض (overland flow) وطريقة الارتشاح بمعدل عالٍ (high-rate infiltration) (انظر الشكل 20-6)، وكذلك أهم خصائص كل منها بالجدول

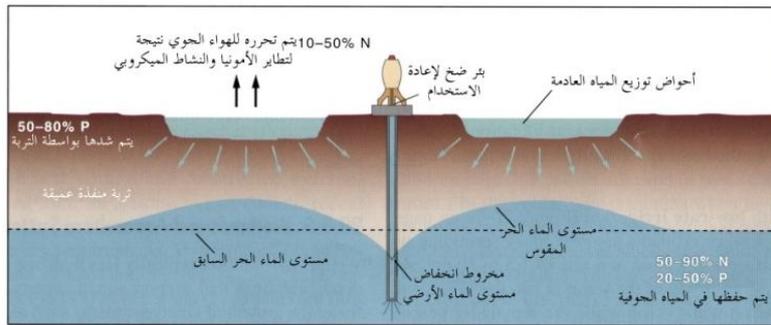
(4-20). ويعتمد اختيار طريقة معينة على الحالة السائدة بالموقع المستهدف والتي تشمل (معدلات الإضافة، طريقة الري، المحاصيل، والمعالجة المتوقعة).



أ. الري بمعدل منخفض.



ب. جريان فوق سطح الأرض.



ج. الارتشاح بمعدل عالٍ.

شكل (20-6): ثلاث طرق رئيسية لإضافة المياه العادمة للأرض.

وفي حالة الري بمعدل منخفض (شكل 20-6a)، تتم إضافة دفع المجاري عن طريق الرش أو الري السطحي بمعدل يتراوح ما بين 1.5 إلى 10 سم أسبوعياً. ويتم استهلاك ثلثي هذه الكمية من المياه بواسطة المحاصيل أو تفقد عن طريق البحر، بينما ترتشح الكمية المتبقية خلال مادة التربة. ويتعين تصميم النظام لتعظيم الدنترتة (denitrification) لتفادي تلوث المياه الجوفية بالنترات. أما الفوسفور فيتم منعه عن الحركة خلال التربة عن طريق التثبيت أو الترسيب. إن طريقة الري هذه تستخدم بالدرجة الأولى بواسطة التجمعات السكانية الصغيرة وتتطلب مساحات كبيرة، تصل عادة ما بين 5-6 هكتارات لكل 1000 شخص.

أما بالنسبة لطريقة الجريان فوق سطح الأرض (شكل 20-6b)، يسمح لدفق المياه العادمة بالجريان لمسافة 50-100 متر على امتداد أرض مغطاة بالنبات ولها ميل يتراوح ما بين 2-8% ويتم تجميع المياه في خندق (ditch). ويتراوح معدل إضافة المياه العادمة ما بين 5-14 سم أسبوعياً. ويرتشح فقط نحو 10% من الماء خلال التربة مقارنة بنحو 60% تندفع في شكل جريان لتتجمع في الخندق. أما الباقي فإنه يفقد في صورة بحر- نتح. ويتطلب هذا النظام تربة طينية ذات نفاذية (permeability) ومعدل رشح (infiltration) منخفضين.

إن الهدف الرئيسي لطريقة الارتشاح بمعدل عالٍ (high - rate infiltration) المبين بالشكل (20-6c). والذي يشار إليه أيضاً على أنه معالجة المياه بالتربة Soil aquifer treatment (SAT) أو الاستخلاص بالارتشاح السريع (RIX) - يتمثل في معالجة المياه العادمة عند معدلات إضافة تفوق 50 سم في الأسبوع الواحد. إن المياه المعالجة، التي تكون قد مرت خلال تربة خشنة القوام، تستخدم لتغذية المياه الجوفية التي

يمكن أن تستعاد ثانية لأغراض الري. ويتطلب هذا النظام مساحات أقل من الأراضي مقارنة بطرق الري أو الجريان فوق سطح الأرض. وعادة ما يلزم توفر فترات للتجفيف من أجل تهوية نظام التربة وتفادي المشاكل التي تنتج عن الانسدادات.

ويستند اختيار موقع معين لإضافة المياه العادمة للأرض إلى كثير من العوامل التي تشمل أنواع الترب، وخصائصها من حيث الصرف والعمق، والمسافة حتى المياه الجوفية، وحركة المياه الجوفية، والميل، وطبيعة التكوينات تحت السطحية. ومدى بعد الموقع عن تواجد الأشخاص. ومن ناحية التخلص من الفيروسات، فإن نوع التربة وعمقها، والمسافة حتى المياه الجوفية تعتبر عوامل هامة يتعين أخذها في الاعتبار. ومن الضروري توفر عدة أمتار من تربة ذات قوام متوسط النعومة، وطبقة تربة متصلة للتخلص من الفيروسات، خاصة إذا ما وجدت المياه الجوفية تحت التربة مباشرة.

5.3.20 الأراضي الرطبة ونظم الزراعة المائية

تتميز الأراضي الرطبة عادة بأن عمقها يكون أقل من متر واحد، وهي مواقع تدعم النباتات المائية وتوفر ظروف ملائمة لنمو بادرات نباتات مثل (cat tails) و (bulrushes) و (reeds) و (sedges) والأشجار. كما أنها توفر أيضاً بيئة رطبة هامة لكثير من أنواع الحيوانات. وحديثاً، تلقى الأراضي الرطبة اهتماماً متزايداً كوسيلة للمعالجة الإضافية للدفق الثانوي. ويوفر الغطاء الخضري سطوحاً لشد البكتيريا، كما أنه يساعد في ترشيح وإزالة الملوثات التي توجد في المياه العادمة مثل الأكسجين الحيوي و فائض الكربون . وعلى الرغم من أن كلا من الأراضي الرطبة الطبيعية والصناعية قد استخدمت لمعالجة المياه العادمة، فإن

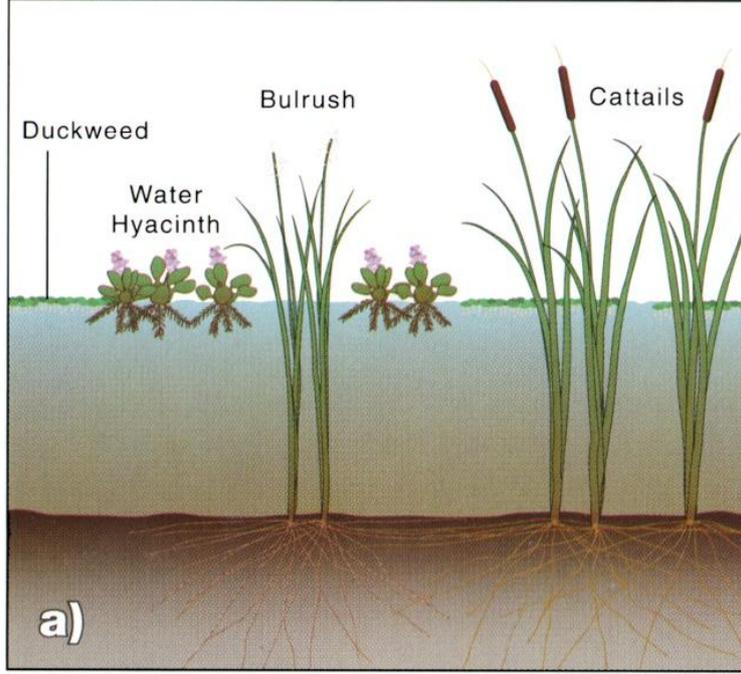
التركيز في الوقت الحاضر أصبح يتجه نحو الأراضي الرطبة المبنية لاستيفاء الشروط التنظيمية. وهناك نوعان من نظم الأراضي الرطبة الصناعية المستخدمة وهي:

(1) نظم الماء السطحي الحر (FWS).

(2) نظم التدفق تحت السطحي (SFS).

وتشبه نظم الماء السطحي الحر بالأراضي الرطبة الأراضي السبخية الطبيعية (natural marsh) إذ أن سطح الماء معرض للهواء الجوي وقد توجد في هذه النظم نباتات طافية وأخرى مغمورة، مثل تلك الموضحة بالشكل (a7-20) أما نظم التدفق تحت السطحي فتتكون من قنوات أو خنادق (trenches) ذات قاع غير منفذ مملوء بالرمل أو الصخر لدعم النباتات النامية.

وأثناء المعالجة في الأراضي الرطبة، تكون المياه العادمة ملائمة للاستخدام. فمثلاً، يمكن أن تستخدم لتنمية النباتات المائية مثل نبات الياسنت hyacinths المائي (شكل b7-20) و/ أو تربية الأسماك لاستهلاك الإنسان. إن نمو هذه الأنواع من النباتات المائية لا يوفر فقط معالجة إضافية للمياه ولكنها تمثل مصدر غذاء للأسماك وحيوانات أخرى أيضاً. لكن نظم الزراعة المائية هذه تتطلب عادة مساحة أراضٍ كبيرة، إضافة لذلك، فإن المخاطر الصحية المصاحبة لإنتاج أحياء مائية بهذا الأسلوب لغرض الاستهلاك البشري يتعين تحديدها بشكل أفضل.



شكل (7-20): (a) نباتات مائية شائعة تستخدم في الأراضي الرطبة الصناعية. (b) نظام أراضي رطبة صناعية في مدينة سان دييجو، بولاية كاليفورنيا تستخدم نبات الياسنت *hyacinths* المائي.

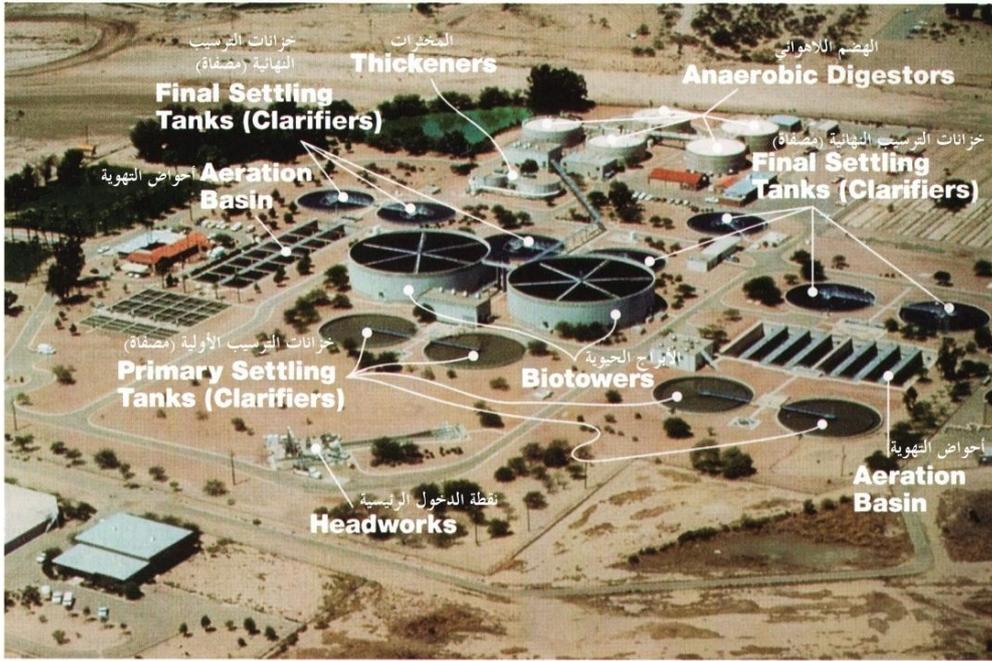
6.3.20 نموذج محطة حديثة لمعالجة الصرف الصحي

تعتبر محطة معالجة المياه العادمة بطريق روجر، التي تخدم محافظة بيما ومدينة توسان واحدة من محطات معالجة الصرف الصحي الرئيسة العديدة التي تم التعرض لها في الجزء (3.20). ويظهر الشكل (8-20) صورة جوية لهذه المحطة وملحقاتها.

ويدخل الصرف الصحي غير المعالج المحطة عند نقطة الدخول الرئيسية التي تضم ستارة معدنية مثقبة (bar screen) وحجرة الحصباء المكونة من حصى ورمل (grit chamber)، قارن مع الشكل (3-20). وبمجرد خروجه من النقطة الرئيسية، يتدفق الصرف الصحي الخام إلى داخل خزانات الترسيب الأولية (primary settling tanks)، التي تقوم بفصل مبدئي للمواد الصلبة من المياه العادمة. ويتدفق الصرف الأول في اتجاه الأبراج الحيوية (biotowers)، كوسيلة للمعالجة الهوائية حيث يتم رش الدفق فوق شبكة بلاستيكية تتميز بنسبة مساحة سطحية كبيرة مقارنة بالحجم، كما تدعم هذه الشبكة غشاءً حيويًا نشطاً - وتقوم الكائنات الدقيقة بالغشاء الحيوي بتحليل المواد العضوية التي توجد في المياه العادمة. (وتحل الأبراج الحيوية بدلاً عن مرشحات التنقيط المبسطة المبينة في الشكل (4-20)، والتي تستخدم في بعض التجمعات السكانية). وفي أشهر الشتاء الباردة عندما تنخفض مستويات النشاط الميكروبي، تجرى معالجة إضافية للدفق في أحواض التهوية الملحقة باستخدام تهوية اصطناعية. ويمضي الدفق المعالج هوائياً في اتجاه خزانات الترسيب النهائية أو الثانوية، حيث تتم إزالة المزيد من المواد الصلبة المعلقة من الدفق. ويتم عندئذ كلورة الصرف الصحي الثانوي قبل ضخه لجداول جافة. لكن جزءاً من المياه العادمة يتلقى معالجة ثالثة حيث يمرر من خلال مرشحات من بيئات مختلطة لتقليل العكارة، ويتم تعقيمها مرة ثانية قبل أن تستخدم لري مسطحات ملاعب الجولف أو يتم معالجتها إضافياً عن طريق الترشيح

السريع والاستخلاص (RIX) كما هو مبين بالشكل (20-6ج) بضخها لأحواض جافة معدة لهذا الغرض.

يتم تجميع الحمأة من خزانات الترسيب الأولية والنهائية وتعريضها لمزيد من المعالجة في خزانات المهضم اللاهوائي. ويضخ الوحل (الحمأة) المعالج لاهوائياً عبر أنابيب إلى محطة مجاورة لمعالجة الصرف الصحي حيث يتم تعريض المخرجات من كلتا المحطتين لطرد مركزي ويُجمّع الوحل المعالج (يحتوي الآن ما بين 8-9% مواد صلبة) في بحيرة تجميع انتظاراً لإضافته للحقول الزراعية المحلية بواسطة شركة متخصصة (انظر الشكل 10-6). وحالياً، فإن كل الحمأة الناتجة عن الصرف الصحي لمدينة توسان تتم إضافتها للأراضي.



شكل (20-8): محطة معالجة المياه العادمة بطريق روجر بمدينة توسان، ولاية أريزونا.

4.20 المخلفات الصلبة

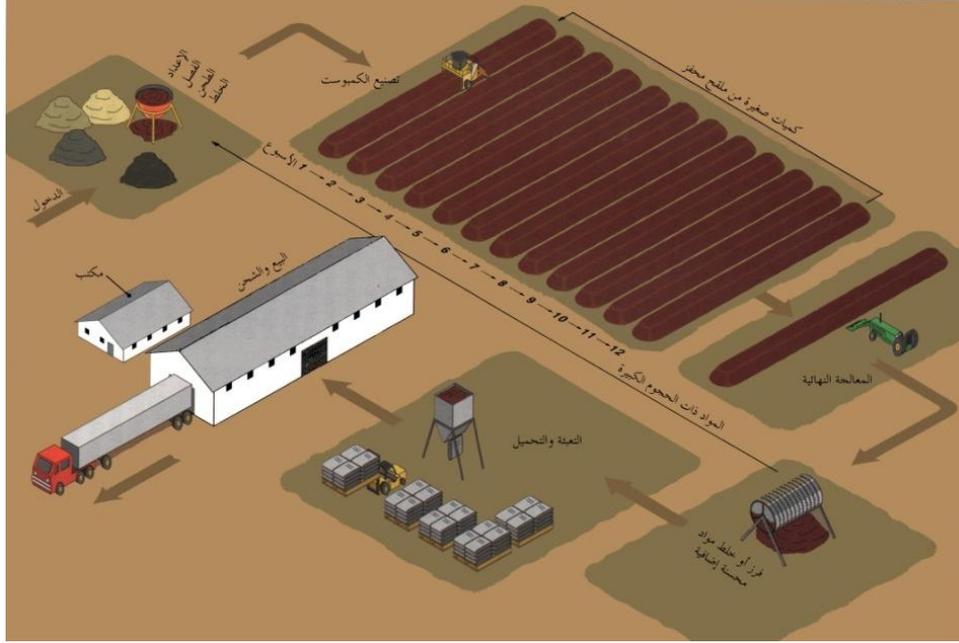
تُولد جميع المدن الكبرى في الولايات المتحدة الأمريكية نوعين من المخلفات الصلبة التي يتعين إما التخلص منها أو معالجتها من أجل إعادة استخدامها وهما: المخلفات الصلبة البلدية (MSW) ومواد صلبة حيوية (biosolids). وتنتج المخلفات البلدية الصلبة في المنازل على شكل قمامة أو فضلات، أو في المنشآت التجارية، أو في مواقع التشييد والهدم. أما المواد الصلبة الحيوية (الوحل) فإنه يأتي من محطات معالجة الصرف الصحي البلدية، إما في صورة وحل منشط أو في صورة مخلفات صناعية غير خطيرة. إن طرق التخلص من المخلفات البلدية الصلبة والوحل (الحمأة) قد تم مناقشتها في الباب العاشر.

توجد طريقة أخرى للتعامل مع المخلفات الصلبة وهي صنع الكومبوست (composting)، الذي يتم فيه تحليل المكونات العضوية للمخلفات الصلبة بيولوجياً تحت ظروف هوائية محكمة. إن الحرارة المتولدة أثناء التحلل تقضى على الكائنات الممرضة للإنسان، بما في ذلك أنواع كثيرة تقاوم طرق المعالجة الأخرى. وتكون النتيجة منتجاً يمكن التعامل معه بأمان، ويكون تخزينه سهلاً، ويمكن إضافته مباشرة للأرض دون إحداث أي تأثير سلبي للبيئة. ومعنى آخر، فإن صنع الكومبوست هو نظام حيوي جيد التخطيط.

تقسم نظم صنع الكومبوست عموماً إلى ثلاث مجموعات: نظام السطور (windrow)، ونظام الكومة الثابتة (static pile)، والنظام المغلق (in-vessel). وفي أسلوب الخطوط يتم تصنيع الكومبوست من مخلوط المخلفات البلدية الصلبة في سطور طويلة تسمى خطوط الريح (windrows) وتهويتها بواسطة حركة الهواء و تيارات الحمل والانتشار. وفي

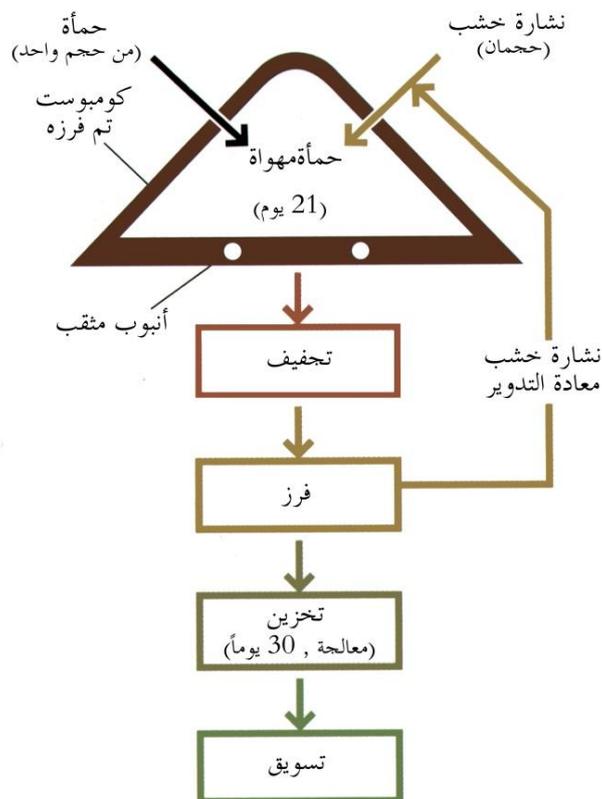
هذه الحالة يتم تقليب الخليط آلياً بانتظام لتعريض المادة العضوية للأكسجين الجوي. ويوضح الشكل (9.20) صورة لمركز تصنيع الكومبوست باستخدام أسلوب السطور الطويلة. أما في أسلوب الكومة الثابتة (أو التهوية الدفعية)، فتتم تهوية أكوام من المخلفات البلدية الصلبة باستخدام نظام تهوية دفعي (forced - aeration system)، يوضع تحت الأكوام ليحافظ على مستوى حد أدنى من الأكسجين خلال كتلة الكومبوست كلها (انظر الشكل 10-20). وفي أسلوب صنع الكومبوست في بيئة مغلقة (In - vessel) وتعرف أيضاً على أنها (تصنيع الكومبوست آلياً، أو تصنيع الكومبوست في مفاعل مغلق) فيجري ذلك في حاويات مغلقة جزئياً أو كلياً يمكن التحكم في الظروف المناخية داخلها. وفي النظام المغلق يمكن دمج ميزات طريقتي السطور أو الأكوام الثابتة لصنع الكومبوست.

يعدد الجدول (5-20) مزايا كل واحد من أنظمة صنع الكومبوست. وفي الوقت الحاضر يقدر بأن 90% من المنشآت العاملة بالولايات المتحدة تستخدم أسلوب الأكوام الثابتة لتصنيع الكومبوست؛ أما الباقي فتستخدم طرق السطور. وكما هو موضح بالجدول (5-20) فإن كلتا الطريقتين تعطى منتوجاً مستقرًا، وأنها منخفضة التكلفة نسبياً. لكن النظم المغلقة الأكثر تكلفة يتم الآن تقييمها في أوروبا والولايات المتحدة لمعالجة المخلفات البلدية الصلبة الكبيرة والتي تستوفي شروط القوانين الصارمة فيما يتعلق بالكائنات المرضية والفلزات.



شكل: (20-9): منظر علوي لمنشأة تصنيع الكومبوست تستخدم طريقة السطور. هذا النظام مناسب لكل من المخلفات البلدية والزراعية. أنظر الجزء (10.16).

الكومبوست: المنتج النهائي لعملية تصنيع الكومبوست، وهو عبارة عن مادة مستقرة تشبه **الدبال**، ذات خصائص قيمة لتحسين خصائص التربة. كما أنها تحتوي أيضاً على عدة مغذيات كبرى وصغرى مهمة لنمو النبات، لكنها لا تحتوي على قدر كافٍ من النيتروجين يجعلها سماداً. وعلى الرغم من أنها تكون عادة خالية من الكائنات الممرضة، إلا أن هذا المنتج لا يكون مستقراً تماماً، بمعنى أن المادة العضوية لا تتحلل 100%. بل إن الكومبوست يكون مستقراً بدرجة تقلل من إمكانية تولد روائح، مما يسمح بإمكانية تخزين المنتج وتسويقه.



شكل (20-10): صنع الكومبوست بطريقة الكومة المهواة الثابتة .

وللقيام بعملية تصنيع الكومبوست يتعين التخلص أولاً من البقايا كبيرة الحجم وكذلك المواد التي يمكن إعادة تدويرها بسهولة، مثل المعادن (مثلاً: علب الألومنيوم، والبطاريات) والبلاستيك وما شابه. ويعقب ذلك طحن ما تبقى من مواد صلبة وخلطها. ويتم أثناء التصنيع الفعلي للكومبوست، تهوية الخليط بينما تقوم العمليات البيولوجية بتحليل المادة العضوية، فتتولد حرارة (أعلى من 55°م) كافية للقضاء على أي كائن دقيق ممرض قد يوجد. ويمكن توفير الأكسجين اللازم لإطلاق العمليات البيولوجية بطريقتين:

- عن طريق تقليب الخليط ميكانيكياً بحيث يتم تعريض الكومبوست دورياً للأكسجين الموجود بالهواء الجوي. (في أسلوب السطور، مثلاً، فإن حركة الهواء بالحمل أو الانتشار تنقل الأكسجين: لذا فإن التقليل ضروري لزيادة المسامية، التي بدورها تسهل حركة الهواء وتوزع المناطق اللاهوائية للمناطق التي تتوفر فيها تهوية).
- باستخدام مروحة تدفع بالهواء خلال الخليط أو تسحبه، كما يجرى في أسلوب الكومة الثابتة.

ويستغرق صنع الكومبوست ما بين 3-4 أسابيع، بعدها يتم عادة معالجة المادة نحو 30 يوماً. وأثناء هذه المرحلة يحدث المزيد من التحلل والاستقرار والتخلص من الغازات. وتجدر الإشارة إلى أن هناك نظماً تشمل مرحلة تجفيف إضافية، قد تتفاوت مدتها من بضعة أيام لعدة شهور.

5.20 معالجة مياه الشرب

تعتبر الأنهار والجداول والبحيرات والمياه الجوفية جميعها مصادر ممكنة لمياه الشرب . وفي الولايات المتحدة، فإن المياه التي يتم الحصول عليها من مصادر سطحية يتعين ترشيحها وتعقيمها حماية ضد تهديد الملوثات الميكروبية (انظر الباب 19). [ملحوظة: تؤدي هذه المعالجة للمياه السطحية أيضاً إلى تحسين قيمتها النوعية مثل المذاق واللون والرائحة]. إضافة لذلك، فإن المياه الجوفية تقع تحت التأثير المباشر للمياه السطحية (مثلاً، قريباً من الأنهار) ولذا يجب التعامل معها كما لو كانت مصدراً سطحياً . لكنه، وفي أحوال كثيرة، فإن المياه الجوفية إما أنها لا تحتاج إلى معالجة أو تحتاج فقط لتعقيم قبل الاستخدام كمياه شرب -

ذلك أن التربة نفسها تعمل كمرشح لإزالة الكائنات الدقيقة الممرضة، مما يقلل من فرص تلويثها لموارد مياه الشرب.

جدول (20-5): مزايا ثلاثة أنظمة لتصنيع الكومبوست .

نظم السطور الطويلة (المعرضة للرياح):

- تخفيف سريع للكومبوست لأن الرطوبة تتحرر مع تقلب الأكوام.
- مادة كومبوست أكثر جفافاً، مما ينتج عنه سهولة فصل المواد المضافة (bulking materials) عن الكومبوست أثناء الفصل، ومعدلات عالية لاسترجاع المواد المضافة.
- يمكن الاستفادة من حجم كبير من المادة.
- تكون المادة المنتجة على درجة جيدة من الثبات.
- استثمار رأس مال منخفض نسبياً: فالمواد اللازمة توافرها: أرضية (pad) لوضع الأكوام فوقها، آلة خطوط (windrow machine)، وآلة رفع.

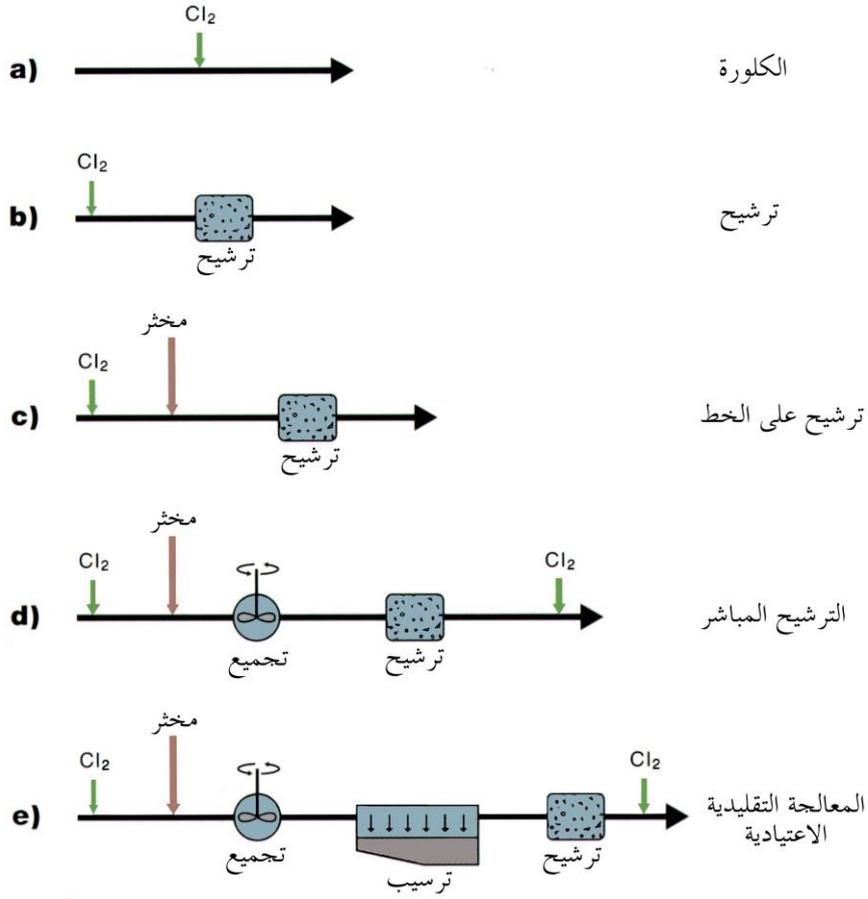
نظم الأكوام الثابتة:

- تكاليف رأس مال منخفضة. تتكون الأدوات الأساسية اللازمة من سطح مرصوف، آلات رفع، حجاب فرز، مراوح غير مكلفة نسبياً ومصيدة مائية.
- القضاء على الكائنات الممرضة بدرجة عالية. إن عزل الكومبوست والتهوية المتجانسة خلال الكومبوست كله يساعدان على المحافظة على درجة حرارة الكومبوست التي تقضي على الكائنات الممرضة.

النظم المغلقة:

- تحكم أفضل للروائح مقارنة بتصنيع الكومبوست بطريقة السطور الطويلة. يحفظ الكومبوست تحت ظروف هوائية طول الوقت. كذلك، فإنه بوجود المراوح في وضع سحب للهواء يتم معالجة انبعاث الروائح في مكانها.
- ثبات جيد للمادة المنتجة. يمكن المحافظة على الأكسجين ودرجة الحرارة عند مستويات مثالية.
- كفاءة أعلى في استغلال المساحات.
- التحكم بشكل أفضل في العمليات مقارنة بالظروف الخارجية المفتوحة .
- محافظة أفضل ضد الظروف المناخية السيئة.
- يكون ممكناً التحكم في الروائح بشكل جيد.
- إمكانية استرجاع الحرارة حسب تصميم النظام.

توفر عمليات معالجة المياه الحديثة حواجز، أو خطوط دفاع، بين المستهلك والأمراض التي تنقل بواسطة المياه. إن هذه الحواجز، عندما تنفذ كعمليات معالجة متتالية، تعرف مجتمعة على أنها قطار عمليات معالجة (شكل 20-11). إن قطار عمليات المعالجة الأبسط يعرف بالكلورة (chlorination) ويتكون من عملية معالجة واحدة، وهي التعقيم عن طريق الكلورة (شكل 20-11a). أما قطار عملية المعالجة المعروف بالترشيح (filtration) فيشمل الكلورة يليها الترشيح خلال رمل أو فحم، وهو ما يزيل المواد العالقة من الماء ويخفض من العكارة (شكل 20-11b). وعند المستوى التالي للمعالجة، المسمى بالترشيح داخل الخط (in-line filtration) فإن مادة مخثرة (coagulant) تتم إضافتها قبل الترشيح (20-11c). ويؤدي التثخير إلى تغيير الحالة الفيزيائية والكيميائية للمواد الصلبة الذائبة والعالقة ويسهل إزالتها بالترشيح. وفي محطات المعالجة التقليدية للمياه تضاف خطوة أخرى تتمثل في الخلط قبل الترشيح مما يحفز على تجمع الحبيبات ويزيد من كفاءة الإزالة في عملية معالجة تسمى الترشيح المباشر (direct filtration) كما هو موضح بالشكل (20-11d). وفي عملية الترشيح المباشر، يمكن تعزيز التعقيم عن طريق إضافة الكلور (أو معقم بديل أخرى، مثل ثاني أكسيد الكلور، أو الأوزون) عند بداية عملية القطار ونهايته.



شكل (20-11): قطارات عمليات معالجة المياه النمطية .

يتكون قطار عملية معالجة موارد المياه السطحية الأكثر شيوعاً، الذي يعرف بالمعالجة التقليدية من التعقيم والتخثير والتجميع والترسيب والترشيح والتعقيم (شكل 20-11e). وتضم عملية التخثير إضافة كيماويات لتحويل الحالة الفيزيائية للمواد

الصلبة الذائبة والمعلقة، مما يسهل إزالتها عن طريق الترسيب والترشيح. وتشمل المخثرات الأولية الأكثر شيوعاً كلا من أملاح فلزات محللة للماء من أهمها الشب (alum) $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$ وكبريتات الحديد $[Fe(SO_4)_3]$ ، وكلوريد الحديد $(Fe Cl_3)$. كما أن هناك كيماويات أخرى يمكن إضافتها لتحفيز التخرير وتشمل جزيئات عضوية مشحونة تسمى متعددة الألكتروليتات (polyelectrolytes)؛ وتشمل مركبات ذات وزن جزيئي عالٍ مثل عديدات الأكريلاميد، polyacrylamides dimethyldiallyammonium Chloride و starch و polyamines. إن هذه الكيماويات تضمن تجمع المواد الصلبة المعلقة أثناء الخطوة التالية وهي التجميع (Flocculation). وأحياناً تتم إضافة polyelectrolytes (عادةً polyacrylamides) بعد التجميع والترسيب لتسهيل خطوة الترشيح.

ويمكن أيضاً للتخثير أن يزيل المركبات العضوية وغير العضوية الذائبة. فالأملاح الفلزية المحللة للماء المضافة للماء قد تتفاعل مع المادة العضوية لتكون راسباً، أو أنها قد تكون حبيبات رقيقة من هيدروكسيد الألومنيوم أو هيدروكسيد الحديد تدمص عليها الجزيئات العضوية. وتزال المواد العضوية بعدها بالترسيب والترشيح، أو الترشيح فقط إذا ما استخدم أسلوب الترشيح المباشر أو الترسيب داخل الخط. كما أن الإدمصاص والترسيب أيضاً يزيلان المواد غير العضوية.

التجميع (Flocculation): هي عملية فيزيائية بحتة، يتم فيها خلط المياه المعالجة باعتدال لزيادة التصدمات بين الحبيبات، وهو ما يحفز تكوين حبيبات كبيرة. وبعد حدوث تجميع

كافٍ، فإن معظم الحبيبات الثانوية ستبدأ في الهبوط خلال ساعة إلى ساعتين من الترسيب. كما تحجز الكائنات الدقيقة أو تدمص بواسطة الحبيبات المعلقة وتزال أثناء عملية الترسيب. الترسيب (Sedimentation): وهو أيضاً عملية فيزيائية بحتة، تشمل هبوط الحبيبات المعلقة الأكثر كثافة من الماء بواسطة الجاذبية، وعندها يتم تعريض الدفق (effluent) لترشيح سريع لفصل المواد الصلبة التي لازالت معلقة في الماء. وتتكون المرشحات السريعة عادة من 50-75 سم رمل و/ أو فحم الأنثراسايت ذو قطر يتراوح ما بين 0.5 إلى 1.0 مم. وتزال الحبيبات أثناء ترشيح الماء خلال هذه البيئات عند معدلات تتراوح ما بين 4-24 لترًا في الدقيقة. ويستخدم الترشيح السريع بكثرة في الولايات المتحدة. كما تستخدم طريقة أخرى هي الترشيح البطيء بالرمل (slow sand filtration). وتستخدم هذه الطريقة بالدرجة الأولى في المملكة المتحدة وأوروبا وهي تعمل بمعدلات ترشيح بطيئة دون استخدام مواد تختيار.

إن القيام بعمليات التختيار (coagulation)، والتجميع (Flocculation)، والترسيب (Sedimentation)، والترشيح (Filtration) بكفاءة يزيل الكثير من الملوثات، كما هو موضح بالجدول (20-6). وبنفس الدرجة من الأهمية، فإنها تقلل من العكارة، وتنتج مياه صافية بشكل جيد وبذلك فهي تزيد من كفاءة التعقيم. وإذا لم يتم إزالتها بهذه الطرق، فإن الحبيبات الصلبة قد توفر ملاذاً للكائنات الدقيقة وتجعل التعقيم النهائي أكثر صعوبة. ويعتبر الترشيح عائقاً هاماً بشكل خاص في إزالة طفيليات الجيارديا Giardia lamblia والكريبتوسبورديوم Cryptosporidium. إن الحويصلات (cysts) والحويصلات البيضية (oocysts) لهذه الكائنات مقاومة جداً للمعقمات، لذلك فإن التعقيم

وحده لا يمكن الاعتماد عليه لمنع الأمراض الناتجة عن المياه الملوثة. لكنه يلاحظ أنه نتيجة لصغر أحجامها، فإن الفيروسات والبكتيريا يمكن أن تمر خلال عملية الترشيح. لذا، فإن التعقيم يظل العائق الجوهرى لهذه الكائنات الدقيقة.

جدول (20-6): التخثير والترسيب، والترشيح: قيم نمطية لكفاءة الإزالة وجودة الدفع.

التركيز بالماء المرشح	الترشيح	التخثير والترسيب	
	(الإزالة %)	(الإزالة %)	
أقل من 1 في 100 مل (بعد التطهير)	98 – 50	97 – 74	العدد الكلي للبكتيريا القولونية (coliform)
أقل من 1 في 100 مل (بعد التطهير)	98 – 50	83 – 76	البكتيريا القولونية
لا تتوفر أي بيانات	98 – 10	95 – 88	الفيروسات المعوية
لا تتوفر أي بيانات	99.9 – 97	99 – 58	جيارديا لامبليا (Giardia lamblia)
لا تتوفر أي بيانات	لا تتوفر أي بيانات	لا تتوفر أي بيانات	جيارديا ميورس (Giardia muris)
أقل من 1 (وحدة عكارة)	لا تتوفر أي بيانات	96 – 40	العكارة

يتم التعقيم عموماً من خلال إضافة مادة مؤكسدة . ويعتبر الكلور، حتى الآن، المطهر المستخدم الأكثر شيوعاً لمعالجة مياه الشرب، لكن مؤكسدات أخرى مثل أمينات الكلور (chloramines) وثاني أكسيد الكلور (chlorine dioxide)، وحتى الأوزون تستخدم أيضاً (انظر الجدول 20-7). لكنه يلاحظ أن كلا من هذه المطهرات هذه يمكنها أيضاً أن تنتج مواد ثانوية مطهرة، قد تكون مسرطنة أو ضارة بالصحة. ويظهر الجدول (20-8) ملخصاً لأنواع النواتج الثانوية للمطهرات.

جدول (20-7) طرائق تطهير المياه

نظم مياه شرب لخدمة تجمع سكاني أكثر من 10 آلاف نسمة		
الكلورة	(chlorination)	%70
إضافة أمينات الكلور	(chloramination)	%25
ثاني أكسيد الكلور	(chlorine dioxide)	%5
الأوزون	(Ozonation)	%1

تشمل نواتج الكلورة الأكثر شيوعاً كلا من: bromodichloromethane, chloroform، وتعرف هذه المركبات مجتمعة باسم trihalomethanes، ويشير مصطلح total trihalomethane (TTHM) لتراكيزها مجتمعة. وتتكون هذه المركبات عن طريق تفاعل الكلور مع المادة العضوية - أساساً أحماض الهيوميك التي توجد في الماء طبيعياً. ومعروف أن الكلور أمين (chloramine) ينتج مركبات كثيرة من نفس النوع، إضافة لمركب كلوريد السيانوجين (cyanogen chloride).

من ناحية أخرى، فإن النواتج الثانوية للأوزون لم يتم دراستها جيداً، بينما يؤدي وجود كميات قليلة من البروم في المياه إلى تكوين البرومات (bromate) كمركب ثانوي غير عضوي. وتصنف كثير من هذه المركبات الثانوية كمسرطنات محتملة. ففقد وجد أن البرومات (Bromate) مثلاً، لها تأثير مسرطن في الجرذان والفئران. لكن نتائج دراسات وبائية عديدة على تجمعات سكانية بالولايات المتحدة تستهلك مياه شرب مكلورة أظهرت أن مخاطر السرطان تبدو منخفضة (Craun,1993). وقد اقترحت مستويات قصوى للملوثات

(MCL) لبعض من هذه النواتج الثانوية، ويتوقع صدور تنظيمات أخرى في المستقبل. وفي الوقت ذاته، فإنه من الإنصاف القول أن مخاطر المرض والموت التي تسببها الكائنات الدقيقة المنقولة بالمياه تفوق بكثير المخاطر الناتجة عن مستويات منخفضة لمركبات كيميائية يمكن أن تكون سامة تتكون أثناء معالجة المياه (Craun,1993).

جدول (20-8): فئات النواتج الثانوية للمطهرات.

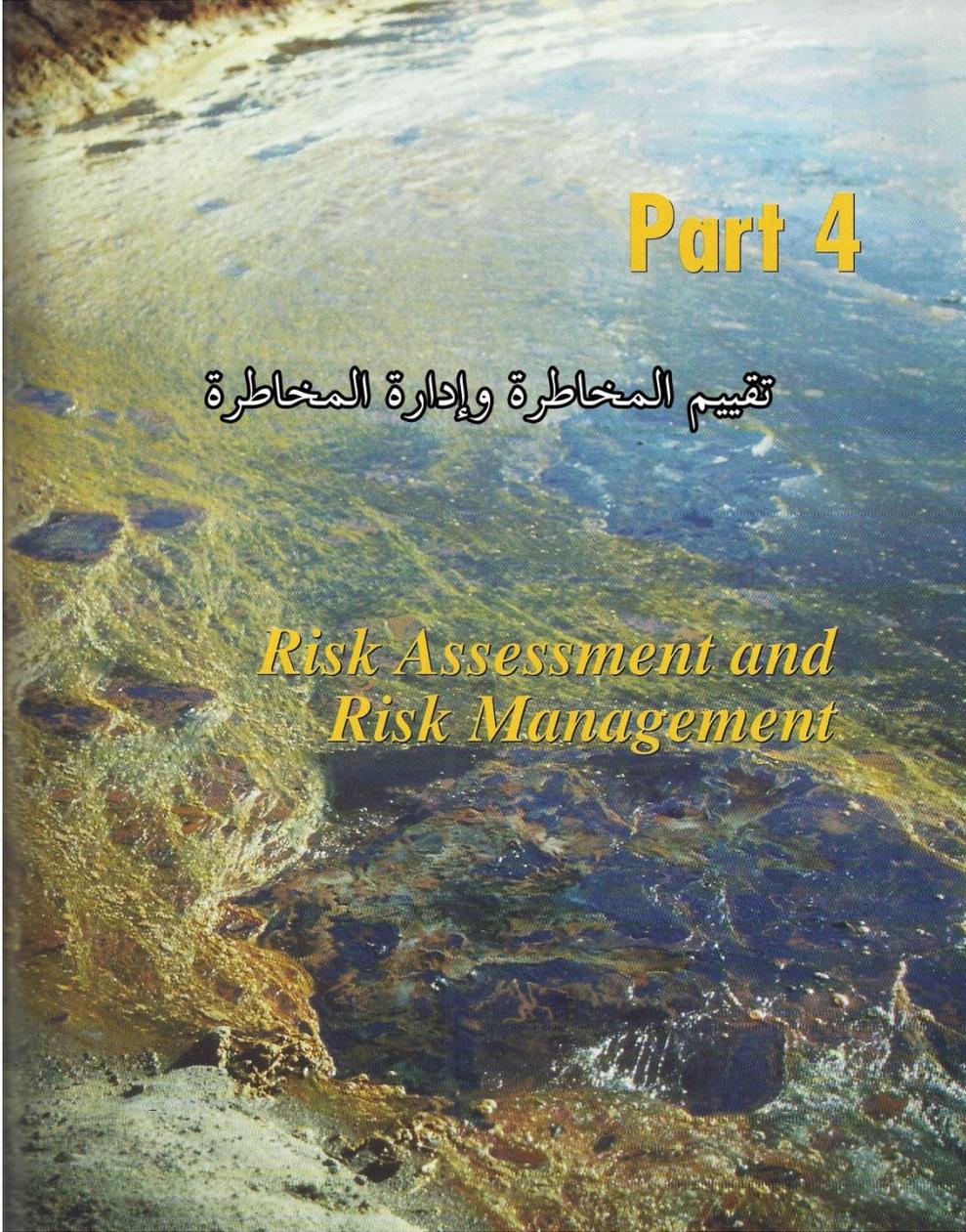
النواتج الثانوية العضوية		النواتج الثانوية غير العضوية	المطهر
غير مهلجنة	مهلجنة		
Nohalogenated	Halogenated		
aldehydes	Trihalomethanes	الكلورات (chlorate)	الكلور (chlorine)
carboxylic acids	Haloacetates		
	Haloacetonitriles		
	Haloaldehydes		
	Haloketones		
	Halofuranones		
	Chloropicrin		
	Cyanogen chloride		الكلور أمينات (chloramines)
	مركبات أخرى يعتقد بأنها مثل الكلور، لكنها أقل تركيزاً		
	غير محددة	الكلوريت (chlorite) الكلورات (chlorate)	ثاني أكسيد الكلور (chlorine dioxide)
aldehydes	Bromomethanes	البرومات (Bromate)	الأوزون (ozone)
carboxylic acids	Bromoacetates		
	Bromoaldehydes	بيروكسيد الهيدروجين	
	Bromoketones	(Hydrogen peroxide)	
	Iodinated analogs		

المراجع ولمزيد الاطلاع

- Bitton G. (1980) *Introduction to Environmental Virology*. Wiley-Interscience, New York.
- Bitton G. (1994) *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss, New York.
- Craun G.F. (1993) *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemicals and Microbial Risks*. ILS1 Press, Washington, D.C.
- Freitas R.J. and Doerge T.A. (1996) *The Guidebook: Nitrogen Best Management Practices for Concentrated Animal Feeding Operations in Arizona*. The University Of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Metcalf and Eddy, Inc. (1991) *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, and Reuse* (Revised by G. Tchobanaglou and F.L. Burton), 3rd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Montgomery J.M. (1985) *Water treatments Principles and Design*. John Wiley and sons, New York.
- Reed S.C., Crites R.W., and Midllebrooks E.J. (1995) *Natural system for Waste Management and Treatment*, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York.
- U.S. EPA (1974) *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. EPA 625/1-74-006. United States Environmental Protection Agency Technology Transfer, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1985) *Composing of Municipal Wastewater Sludges*. EPA 625/4-85-014. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1988) *Comparative Health Effects Assessment of Drinking Water Treatment Technologies*. Office of Drinking Water, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

أسئلة

1. ما هي الخطوات الثلاثة الأساسية الحديثة في معالجة المياه العادمة ؟
2. لماذا يكون من المهم تخفيض كمية المادة العضوية القابلة للتحلل البيولوجي وكذلك المغذيات أثناء معالجة الصرف الصحي ؟
3. متى يكون ضرورياً القيام بمعالجة ثالثة (tertiary treatment) للمياه العادمة ؟
4. ما هي بعض أنواع المعالجة الثالثة ؟
5. ما هي بعض طرق إعادة استخدام الوحل الحيوي (bio solids) ؟
6. ما هو المكون الرئيسي للمواد الحيوية الصلبة ؟
7. أذكر الفئتين الرئيسيتين للملوثتين في المواد الصلبة الحيوية ؟
8. صف الخطوات الرئيسية في الطريقة التقليدية لمعالجة مياه الشرب.
9. ما هي النواتج الثانوية للمعقمات ؟ ما أنواع المخاطر التي تسببها، وكيف يمكن تقييم هذه المخاطر؟

An aerial photograph of a rugged, mountainous landscape. The terrain is characterized by steep, rocky slopes and a deep, winding river valley. The colors range from dark blues and greys in the shadows to bright yellows and oranges on the sunlit slopes. The overall scene conveys a sense of natural grandeur and potential risk.

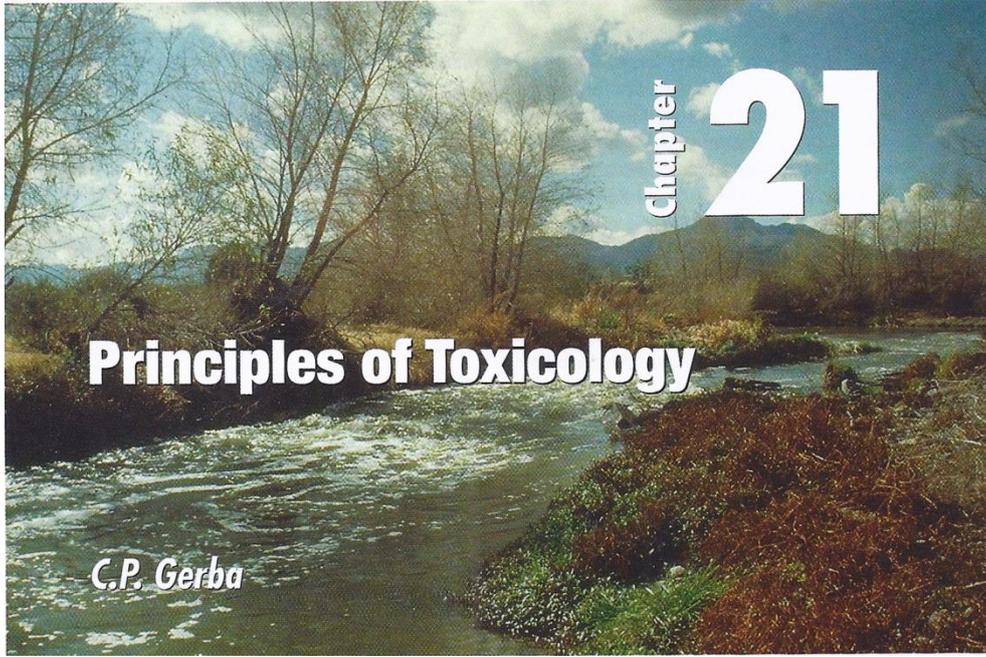
Part 4

تقييم المخاطرة وإدارة المخاطرة

*Risk Assessment and
Risk Management*

الباب الحادي والعشرون

مبادئ علم السموم



مبادئ علم السموم ذات قيمة لتحديد سمية المستويات المنخفضة جداً للملوثات، مثل تلك التي قد توجد في دفع الصرف الصحي المعالج المستخدم في حقن المياه الجوفية.

1.21 التاريخ الحديث لعلم السموم في الولايات المتحدة الأمريكية

يتم في علم السموم دراسة كلا من التأثيرات السلبية للكيمائيات على الصحة من جهة والظروف التي تحدث تحتها هذه التأثيرات من جهة أخرى. وكامتداد طبيعي لعلوم الأحياء والكيمياء، فقد بدأ هذا العلم يأخذ شكلاً محدد المعالم فقط في الأربعة أو الخمسة

عقود الماضية. وحديثاً، فإن علم السموم البيئي يهتم بتأثيرات الملوثات الكيميائية على النظم البيئية المختلفة، الكبير منها والصغير. وهنا، سيتم التركيز على بعض المبادئ الأساسية لعلم السموم من حيث علاقته بملوثات البيئة.

إن القانون الفيدرالي الأول المنظم للمواد التي يمكن أن تكون سامة هو قانون الغذاء والدواء النقي، الصادر عن الكونجرس عام 1906. وقد أتى مصدر الدعم الأساسي لهذا القانون من عمل هارفي وايلي (Harvey Wiley)، الذي كان رئيس الكيمائيين في إدارة الزراعة في عهد الرئيس الأمريكي ثيودور روزفلت (Theodore Roosevelt). وقد كان لوايلي وفرقة السموم التابعة له اهتمام شخصي بعملهم - فقد قام ومعه فريقه من الكيمائيين في أكثر من مناسبة بتناول الكيماويات المشتبه فيها لاختبار تأثيراتها الضارة على الصحة (Rodricks,1992).

بدأت الدراسة المنظمة للتأثيرات السامة في حيوانات المعمل (بجانب الكيمائيين) في العشرينيات من القرن الماضي مدفوعة بالقلق المتزايد من التأثيرات غير المرغوبة للمواد المضافة (additives) للأغذية، والأدوية، والمبيدات (مبيد DDT والمبيدات المرتبطة به التي أصبحت متاحة خلال تلك الحقبة). وقد شهدت الثلاثينيات من القرن الماضي بروز قضايا حول أمراض السرطان المرتبطة بالمهنة وأمراض مزمنة أخرى ناتجة عن التعرض لتأثيرات كيميائية. وقد ساهمت هذه الاهتمامات والقضايا في زيادة النشاط القانوني الذي توج بالصيغة الحديثة لقانون الغذاء، والدواء ومواد التجميل. وقد سن هذا القانون بواسطة الكونجرس عام 1938، وتم تمريره استجابة لحدث مأساوي تسبب في موت أكثر من 100 شخص نتيجة لفشل

كلوى حاد بعد تناولهم لمادة Sulfanilamide ملوثة - وكان ذلك ناتجاً عن تصنيع هذا المضاد الحيوي في محلول (diethylene glycol) كما ورد في (Rodricks,1992) .

لكن النمو الحقيقي لعلم السموم قد تزامن أساساً مع تطور الصناعات الكيميائية، خاصة بعد الحرب العالمية الثانية. إن إنتاج آلاف المركبات الجديدة بواسطة المصنعين الكيميائيين أوجد حاجة ماسة إلى معلومات حول تأثيراتها الضارة الممكنة. وقد اكتسب هذا النمو استجابة هامة من الرأي العام. وتم بطريقة متقطعة ومتباعدة خلال فترة الأربعينيات والخمسينيات من القرن الماضي تقديم سلسلة إعلانات للعامة كانت تبدو غير مترابطة عن مبيدات سامة في غذائهم، ومضافات (additives) أغذية مشكوك فيها، وكوارث كيميائية في مواقع العمل وما تلاها من تلوث للهواء تسبب في قتل آلاف الضحايا بمراكز حضرية عبر العالم كله . عقب ذلك وفي عام 1962، جمعت عالمة الحياة البحرية راشيل كارسون قصص الرعب البيئي المختلفة هذه في كتابها الربيع الصامت. وخوفاً من وجود مواد كيميائية مصنعة قاتلة في الهواء الجوي، استجاب الناس كما هو متوقع بغضب شديد، وهو ما ساهم، من بين عوامل أخرى في تحديد الاهتمام بعلم السموم. كما ساعد ذلك أيضاً على تمهيد الطريق لإدخال العديد من القوانين الكبرى في أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات من القرن الماضي وإنشاء وكالة حماية البيئة (EPA) في عام 1970.

إن الحداثة النسبية لعلم السموم تعكسها حقيقة أنه وحتى اليوم، لدينا القليل من المعلومات المؤكدة حول سمية عدد كبير من الكيماويات. هناك ستة ملايين من المواد الكيميائية المعروفة؛ منها نحو 50 ألف شائعة الاستخدام. وإن الاختبارات التفصيلية الدقيقة

للسمية قد أجريت فقط على بضعة مئات منها. وحتى بالنسبة لتلك التي تم اختبارها، تبقى أسئلة كثيرة حول تفسير النتائج التي تم الحصول عليها، بما في ذلك تحفظات خطيرة، حول مدى صلاحية تطبيق نتائج الاختبارات المعملية على التجمعات البشرية في كل الحالات والمواقف اليومية. وفي حالات كثيرة تفتقر إلى فهم أساسي لكيفية عمل المواد السامة.

2.21 السام مقابل غير السام

يعني المصطلح آمن عادة (خالٍ من المخاطرة). لكن هذا التعريف الشائع ليس له معنى في الدراسة العلمية. فالعلماء لا يستطيعون تماماً تحديد الظروف التي يكون تحتها التعرض لمادة كيميائية معينة خالياً وبشكل مطلق من أي نوع من المخاطرة. من جانب آخر، فإنهم يستطيعون توصيف الظروف التي تكون تحتها المخاطر منخفضة جداً بحيث لا يكون لها أية تبعات عملية على تجمع سكاني معين. وبعبارة فنية متخصصة، فإن أمان المواد الكيميائية - سواء في مواد غذائية، أو مياه شرب، أو هواء أو مكان العمل - قد تم تعريفه على أنه يصف حالة تعرض يكون عندها (يقين عملي) بعدم حدوث ضرر للأفراد المعرضين لهذه المواد. وحسب مفهوم حدوث وفاة واحدة فإن حالة واحدة من مليون تكون عادة مخاطرة مقبولة خلال فترة حياة الإنسان (انظر الجزء 1.22).

هناك مفهوم أساسي وهو تصنيف المواد الكيميائية على أنها إما آمنة (safe) أو غير آمنة (unsafe) أو سامة (toxic) وغير سامة (nontoxic). ويمكن أن يكون هذا التصنيف إشكالية. إذ يمكن أن نجعل جميع المواد، حتى تلك التي نستهلكها بكميات كبيرة يومياً، مسببة لأثر سام تحت بعض ظروف التعرض. ومن هذا المنطلق، فإن جميع المواد يمكن

اعتبارها سامة. لذلك، فإن الأمان لا يشمل فقط درجة سمية مادة معينة، ولكنه يشمل درجة المخاطرة تحت ظروف محددة. وبعبارة أخرى، فإننا نسأل (ما هي احتمالية بروز الخصائص السامة لمادة كيميائية معينة تحت ظروف فعلية أو متوقعة عند تعرض إنسان أو حيوان لتأثيرها؟ ويسعى علم تقييم المخاطرة (risk assessment) إلى ربط معلومات علم السموم حول التأثيرات الضارة باحتمالية التأثيرات السامة خلال سيناريوهات تعرض محتملة (انظر الجزء 1.22).

3.21 التعرض (exposure) والجرعة (Dose)

يمكن أن يتعرض الإنسان أو كائنات أخرى لمواد تحت ظروف بيئية مختلفة مثل: الهواء، أو الماء أو التربة أو الغذاء - أو قد يتعرضون لتلامس مباشر مع عينة من المادة. ويعرف تركيز التعرض (exposure concentration) بأنه كمية مادة معينة موجودة في البيئة ويكون للكائن تلامس معها. أما الجرعة فهي كمية المادة الكيميائية التي يتلقاها الهدف (العضو). وقد يختلف تركيز التعرض عن الجرعة بسبب التحولات البيوكيميائية في الكائنات الحية.

فعلى سبيل المثال، أفترض أن مادة معينة توجد في ماء الشرب. وبذلك تكون كمية هذه المادة في الماء عبارة عن تركيز التعرض. وبالنسبة لمواد بيئية كثيرة، تتفاوت هذه الكمية ما بين أقل من 1 ميكروجرام إلى أكثر من ملليجرام واحد، ويشار إليها عادة بوحدة ملليجرام أو ميكروجرام من المادة الموجودة في لتر واحد من الماء (أي، مجم/لتر أو ميكروجرام/لتر)*.

(* هاتان الوجدتان يتم أحياناً التعبير عنهما بوحدة أكثر غموضاً وهي الجزء بالمليون (ppm) أو جزء في البليون (ppb)، على التوالي.

وتعتمد جرعة الفرد من هذه المادة على الكمية الموجودة منها في حجم معين من الماء، وعلى الكمية المستهلكة خلال فترة محددة من الزمن. وبمعرفة تركيز المادة في الماء (مثلاً، بالمليجرام/ لتر) واستهلاك الانسان من الماء في وحدة الزمن، يمكن تقدير الكمية الكلية من المادة التي سيقوم الفرد باستهلاكها عن طريق استخدام مياه ملوثة. فمثلاً، يفترض أن الانسان البالغ يستهلك لترين من الماء كل يوم في جميع استخداماته (انظر الجدول 22-3). وعلى ذلك، فإذا وجدت مادة معينة بالماء بتركيز 10 ملليجرام/ لتر، فإن الاستهلاك المتوسط اليومي للفرد من هذه المادة يكون:

$$\frac{10 \text{ ملليجرام}}{\text{لتر}} \cdot \frac{2 \text{ لتر}}{\text{يوم}} = \frac{20 \text{ ملليجرام}}{\text{يوم}}$$

كما يجب أيضاً أن تأخذ السمية الاختلافات في وزن الجسم في الاعتبار، وذلك عادة عن طريق قسمة الكمية المستهلكة من المادة على وزن الفرد. بمعنى، أن سمية مادة معينة تعتمد عادة على التركيز لكل وحدة وزن للجسم. لذلك، فبالنسبة لرجل ذو وزن متوسط (يفترض عادة على أنه 70 كيلوجرام)، تكون الجرعة اليومية من هذه المادة:

$$\frac{20 \text{ ملليجرام}}{\text{يوم}} \cdot \frac{1}{70 \text{ كيلو جرام}} = \frac{0.28 \text{ ملليجرام}}{\text{كيلو جرام . يوم}}$$

وفي حالة شخص أقل وزناً، مثلاً أنثى أو طفل، فإن الجرعة اليومية عند نفس معدل الاستهلاك ستكون أكبر. فمثلاً، في حالة امرأة وزنها 50 كيلوجراماً تبتلع هذه المادة ستتلقى جرعة تساوي:

$$\frac{0.40 \text{ ملليجرام}}{\text{كيلو جرام. يوم}} = \frac{1}{50 \text{ كيلو جرام}} \cdot \frac{20 \text{ ملليجرام}}{\text{يوم}}$$

و باستخدام المعادلة نفسها، فإن طفلاً يزن 10 كيلوجرام سيتلقى جرعة تعادل 2.0 ملليجرام/ كيلوجرام/ يوم. لكن الأطفال يستهلكون كميات أقل من الماء يومياً مقارنة بالأفراد الناضجين (مثلاً لتراً واحداً)، لذلك فإن جرعة طفل ما ستكون:

$$\frac{1.0 \text{ ملليجرام}}{\text{كيلو جرام . يوم}} = \frac{1}{10 \text{ كيلو جرام}} \cdot \frac{1 \text{ لتر}}{\text{يوم}} \cdot \frac{10 \text{ ملليجرام}}{\text{يوم}}$$

وعموماً، فإنه كلما قل وزن الجسم، ازدادت الجرعة (بالمليجرام/ كيلوجرام/ يوم) التي يتم الحصول عليها من مياه الشرب. ويكون هذا صحيحاً أيضاً بالنسبة لحيوانات التجارب. فالجرذان والفئران تتلقى عادة جرعة أعلى بكثير من ملوثات مياه الشرب مقارنة بالإنسان وذلك نظراً لصغر وزنها الشديد.

ونظراً لأن كل بيئة تعرض (هواء، تربة، ماء) يتعين التعامل معها منفردة، فإن بعض الحسابات تكون أكثر تعقيداً من تلك الخاصة بالجرعة في لتر واحد من الماء. وقد تكون كثير من الحسابات تراكمية (additive). مثلاً، قد يتعرض إنسان ما في ذات الوقت لتأثير المادة نفسها عن طريق بيئات متعددة (مثلاً، من خلال الاستنشاق، البلع، التلامس بالجلد). لذا فإنه إذا كان لشخص أن يبلع ويستنشق (وهو يأخذ حماماً) مركباً متطابقاً في ماء الصنبور، فإن الجرعة الكلية التي يكون قد أخذها هذا الشخص ستساوي حاصل جمع الجرعات التي استقبلها عن طريق كل واحد من هذه المسارات. لكنه وفي بعض الحالات لا يكون صحيحاً

إضافة الجرعات بهذا الأسلوب ذلك أن التأثيرات السامة لمادة ما ربما تعتمد على مسار التعرض لها. فمثلاً، يكون استنشاق الكروميوم مسرطناً للرئة، لكنه يبدو أن بلع الكروميوم غير ذلك. وعموماً فإنه طالما أن مادة معينة تؤثر عند نقطة معينة من أجزاء الجسم الداخلية (أي أنها تعمل بشكل جهازي وليس موضعياً عند نقطة التلامس الأولى)، فإن أخذ حاصل جمع الجرعات التي تلقاها الكائن من المسارات المختلفة يعتبر أسلوباً مقبولاً.

يعتبر الامتصاص (absorption) أو الجرعة الممتصة (absorbed dose) عاملاً آخرًا يتطلب عناية خاصة عند النظر إلى الجرعة (dose) والتعرض (exposure). فعند ابتلاع مادة معينة مع الغذاء أو ماء الشرب، فإنها تدخل القناة المعوية المعوية. وعندما تكون هذه المادة في الهواء (على شكل غاز أو أيروسول، أو حبيبات، أو غبار أو دخان إلخ) فإنها تدخل الجزء العلوي من المسارات الهوائية والرئتين. وقد تتلامس مادة معينة أيضاً مع الجلد وسطوح الجسم الأخرى في صورة غاز، أو سائل أو صلب. وربما تتسبب بعض المواد في إحداث تسمم عند نقطة التلامس الأولى (الجلد، القناة الهضمية، مسالك الهواء العليا، الرئتين، أو العيون). وحقيقة، فإن معظم المواد عند تراكيز عالية، تتسبب على الأقل في إحداث تهيج عند نقاط التلامس هذه. لكنه يلاحظ أنه بالنسبة لكثير من المواد، فإن التسمم يحدث بعد أن يتم امتصاصها - أي بعد أن تمر خلال موانع معينة (مثلاً، جدار القناة المعوية، أو الجلد نفسه)، لتدخل الدم أو السائل الليمفاوي، وتصل إلى أعضاء وأجهزة الجسم المختلفة. وقد تتوزع بعض المواد الكيماوية في الجسم بطرق متنوعة ثم يتم إفرازها. لكن بعض أنواع

الكيمائيات— عادة مواد ذائبة في الدهون مثل مبيد (DDT) dichlorodiphenyltrichloroethane
— يمكن تخزينه لفترات طويلة من الزمن عادة ضمن دهون الجسم (انظر الجزء 3.8.21).
تتباين المواد كثيراً في مدى امتصاصها. فقد يكون جزء الجرعة الذى يمر خلال
جدار القناة المعوية صغير جداً (1 إلى 10% في حالة بعض الفلزات) أو قد يكون بكمية
وافرة (قريباً من 100% في حالة بعض أنواع الحزيمات العضوية). كما تعتمد معدلات
الامتصاص على الوسط الذى توجد به المادة الكيميائية: فقد تمتص مادة توجد في الماء
بشكل مختلف مقارنة بنفس المادة عندما تكون في وجبة دهنية، مثلاً. كما أن معدلات
الامتصاص تختلف أيضاً فيما بين أنواع الحيوانات وبين الأفراد داخل النوع الواحد. ومثالياً،
يتطلب تقدير جرعة منتظمة أخذ معدلات الامتصاص في الاعتبار. ولسوء الحظ فإن
البيانات حول الامتصاص لمعظم المواد تعتبر محدودة، خاصة بالنسبة للإنسان، ولذلك فإن
الامتصاص لا يكون دائماً مشمولاً في تقدير الجرعة. وفي بعض الحالات، قد يتم تعديل
الجرعة تقريباً على أساس الخصائص الحزيمية لمادة معينة و/ أو المبادئ العامة للامتصاص. وفي
حالات كثيرة، يفترض ضمناً أن الامتصاص ببساطة كان كاملاً.

يمكن أيضاً أن يصبح أسلوب الاستقراء (extrapolation)، أو الاستنتاج بناء على
نتائج موثقة عاملاً رئيسياً في التنبؤ بإمكانية حدوث تسمم، مثلاً من خلال مسار تعرض
معين إلى مسارات تعرض أخرى، أو من كائن معين إلى آخر. وتشمل تجارب دراسة السمية
عادة استهداف حيوانات التجارب (عادة فئران أو جردان) بمعاملتها بمواد من خلال الغذاء
أو الهواء المستنشق أو الإضافة المباشرة للجلد؛ أو قد تشمل مسارات أخرى للمعاملة، مثل

الحقن تحت الجلد، أو للدم (عادة داخل الوريد)، أو إلى داخل فجوات الجسم. وتكون دراسات السمية على حيوانات التجارب ذات أهمية كبرى عندما تحاكي كيفية تعرض الانسان. لذا، إذا ما تعرض كل من الحيوانات والبشر لملوث معين عن طريق مياه الشرب فيفترض عموماً أن البيانات عن الحيوانات يمكن تطبيقها مباشرة على الإنسان. لكنه، عندما تختلف المسارات التجريبية عن مسارات البشر (مثلاً، تكون جرعة الحيوان عن طريق الحقن؛ وتعرض الانسان عن طريق مياه الشرب)، يتعين إدخال عامل تصحيح أو أمان لتطبيق هذه البيانات بخصوص تعرض البشر (انظر الجزء 3.2.22).

4.21 تقييم السمية

يتم الحصول على معلومات عن الخصائص السامة لمواد كيميائية من خلال دراسات تجرى على نباتات أو بكتيريا أو حيوان، ومن خلال بحوث وبائية محكمة لتجمعات بشرية أو عوالم صغرى، ودراسات سريرية (إكلينيكية) أو تقارير نموذجية على أشخاص تعرضوا لتأثيرات سمية أو دراسات عن نظم بيئية (مثلاً، بقع الزيت). كما تأتي معلومات أخرى عن السمية من دراسات تجريبية في نظم غير الحيوانات الكاملة (مثلاً، تراكيب عضوية معزولة من الخلايا أو مكونات تحت خلوية) ومن تحليل التركيبات الجزئية للمواد المستهدفة. وعموماً يعتبر المصدران الأخيران للمعلومات مؤشرات غير مؤكدة لإمكانية حدوث تسمم.

يمكن أن تجرى الكثير من أنواع دراسات السمية لتحديد طبيعة الضرر للصحة الناتج عن مادة معينة ونطاق الجرعات التي يمكن أن تحدث هذا الضرر. إن كل واحدة من الانواع الكثيرة والمختلفة من دراسات السمية لها غرض مختلف. وتكون نقطة البداية عادة

لمثل هذه البحوث إجراء دراسة على السمية الحادة (جرعة واحدة) لمادة كيميائية معينة في حيوانات تجريبية، أو نباتات أو بكتيريا. وتستخدم دراسات السمية الحادة لحساب الجرعات غير المميتة لأي كائن ويمكن أن تستخدم في دراسات السمية التي تستغرق فترات طويلة. إضافة لذلك، توفر هذه الدراسات تقديراً لسمية المركب مقارنة بالمركبات الأخرى وقد تشير إلى نظام العضو المستهدف (مثلاً: الكلى أو الرئة، أو القلب) الذي تأثر في حيوان معين. وبمجرد معرفة السمية الحادة فإنه يمكن تعريض الكائنات الحية على فترات متكررة أو باستمرار لعدة أسابيع أو شهور في دراسات سمية غير مزمنة، أو قريباً من فترة حياتها الكاملة في دراسات السمية المزمنة.

عندما يختبر إحصائيو السمية الخصائص المميتة لمادة معينة، فإنهم يختبرون قيمة LD_{50} الخاصة بها وهو ما يعرف بالجرعة القاتلة لنسبة 50% من مجموعة تم تعريضها لتأثيرها. وقد تم إدراج مجموعة من المواد المعروفة جيداً، وكذلك قيم LD_{50} الخاصة بها في الجدول (1-21). وقد أظهرت دراسات LD_{50} واحداً من المبادئ الرئيسية لعلم السموم وهي:

* ليس كل الأفراد الذين يتعرضون لنفس الجرعة من مادة معينة سوف يستجيبون بنفس الطريقة. لذلك، فإن نفس الجرعة من مادة معينة التي تقود إلى موت بعض أفراد التجارب سوف تسبب إعاقة لبعض الكائنات بينما لا تؤثر مطلقاً على الكائنات الأخرى.

جدول (1-21): قيمة الجرعة LD₅₀ بالفم على نوع من الجرذان لمجموعة من الكيماويات المألوفة.

المادة الكيميائية	LD ₅₀ (مجم/كجم)
السكروز (سكر المائدة)	29700
الكحول الإيثيلي	14000
كلوريد الصوديوم (ملح الطعام)	3000
فيتامين (A)	2000
فانيلين	1580
الأسبرين	1000
الكلوروفورم	800
كبريتات النحاس	300
الكافيين	192
بريتال الفينول	162
د . د . ت	113
نتريت الصوديوم	85
النيكوتين	53
الأفلاتوكسين B1	7
سيانيد الصوديوم	6.4
الستريكنين	2.5

ويستند المنطق الخاص بدراسات السمية للحيوانات إلى الافتراضية القديمة في أن التأثيرات على الإنسان يمكن استنباطها من التأثيرات التي تشاهد في الحيوانات. وقد حظى مبدأ استقرار البيانات الخاصة عن الحيوانات وإسقاطها على البشر بقبول واسع من قبل الجمعيات العلمية والتشريعية. وعلى سبيل المثال، فإن جميع الكيماويات التي وجد بأنها

مسرطنة في البشر هي مسرطنة في بعض، وليس جميع، أنواع الحيوانات المستخدمة عادة في دراسات السمية. إضافة لذلك، فإن الجرعات السامة جداً لبعض الكيماويات ينظر على أن لها تأثيراً مماثلاً على الإنسان وأنواع من الحيوانات التجريبية. إن أساس هذا الاستنتاج يعود لعلاقات التطور بين أنواع الحيوانات. ذلك يعني أنه، على الأقل بالنسبة للشدييات يتوقع أن تكون الخصائص التشريحية، والفسيولوجية، والكيموحيوية متشابهة تقريباً لكل الأنواع. وبشكل عام، فإن القاعدة العامة للقيام بإسقاطات فيما بين الأنواع قد أسست جيداً. لكن بعض الاستثناءات قد لوحظت، فمثلاً، تكون خنازير غينيا أكثر حساسية لمادة الداايوكسين (2, 3, 7-8 tetrachloro- diobenzo - p - dioxin) مقارنة بحيوانات معملية أخرى. وتبرز كثير من هذه الاستثناءات بسبب الاختلافات في الطرائق التي تتعامل بها الأنواع المختلفة في حالة التعرض لمادة كيماوية معينة والاختلافات في حركة العقاقير التي تشمل معدلات توزع مادة كيماوية معينة داخل الأنسجة، والطريقة التي يتم بها إفرازها، وأنواع التغيرات الأيضية التي تتعرض لها وبسبب هذه الاختلافات الممكنة، يكون من الضروري تقييم الاختلافات فيما بين الأنواع بشكل دقيق عند استنباط السمية للإنسان من دراسات السمية للحيوانات.

وفي حالة دراسات الحيوانات طويلة المدى تحديداً، والخاصة بتقييم قدرة مركب معين التسبب في مرض السرطان، فإن بعض المشاهدات العامة تزيد من قوة الدليل أن المركب مسرطن. وعلى هذا فإن زيادة عدد مواقع الأنسجة المتأثرة بالعامل المسبب تعتبر مؤشراً قوياً

على قدرة المادة على السرطنة، مثلها في ذلك مثل زيادة عدد أنواع الحيوانات، والسلالات، والأجناس التي تظهر استجابة مسرطنة.

وهناك مشاهدات أخرى تؤثر على قوة الدليل قد تشمل مستوى معنوياً إحصائياً عالياً لتطور أورام سرطانية في الحيوانات المعاملة مقارنة بتلك غير المعاملة، إضافة لوجود علاقات واضحة فيما بين الاستجابة والجرعة اعتماداً على البيانات التي تم تقييمها، كتقليل الزمن حتى ظهور الورم المرتبط بالجرعة أو الزمن حتى الموت نتيجة الورم، وزيادة نسبة الأورام الخبيثة المرتبطة بالجرعة.

1.4.21 مظاهر السمية

قد تأخذ تأثيرات السمية مظاهر متنوعة. ويمكن أن يكون التأثير السام فورياً، مثل التسمم بمادة الستراكنين (strychnine)، أو مؤجلاً، مثلما في حالة سرطان الرئة. وحقيقة، فإن السرطان عادة ما يؤثر على شخص ما لكثير من السنوات بعد تعرضه بشكل مستمر أو متقطع لمادة مسرطنة. وقد يكون التأثير موضعياً (بمعنى، عند موقع الإضافة) أو جهازياً systemic (بمعنى، ينقل بواسطة الدم أو السائل الليمفاوي للأجزاء المختلفة من الجسم). وتوجد عوامل متعددة هامة يتعين اعتبارها عند اختبار التأثيرات السامة، ويكون بعض منها مرتبطاً بالجرعة:

1. إن حدة الضرر يمكن أن تزيد مع زيادة الجرعة والعكس صحيح. فمثلاً، من المعروف أن بعض الكيماويات العضوية تؤثر على الكبد وفي هذه الحالة فإن الجرعات العالية من مادة كيماوية من هذا النوع (مثلاً، carbon tetrachloride) ستؤدي إلى قتل خلايا الكبد –

وربما تؤدي إلى قتل الكثير من الخلايا بحيث يقود ذلك إلى تدمير الكبد كله وموت معظم أو كل الحيوانات التجريبية. ومع تخفيض الجرعة، تموت خلايا أقل، لكن تبدو على الكبد صور أخرى من الضرر تشير إلى حدوث خلل في وظيفة الخلية و/ أو تركيبها. وعند جرعات أقل من ذلك، قد لا يحدث موت للخلايا، ويلاحظ فقط تغيرات طفيفة في وظيفة الخلية أو بنائها. وأخيراً، قد تكون الجرعة منخفضة جداً فلا يشاهد أي تأثير، أو أن التحورات البيوكيميائية الموجودة لا يعرف لها تأثيرات ضارة على صحة الحيوان. إن واحداً من أهداف دراسات السمية هو تحديد مستوى هذه الجرعة، الذي يعرف بمستوى انعدام التأثير الضار (NOAEL) no- observed- adverse- effect level أنظر الجزء 3.2.22 .

2. قد ترتفع إمكانية وقوع تأثير معين، وليس حدته، مع زيادة الجرعة. في مثل هذه الحالات، ومع زيادة الجرعة، ترتفع نسبة الكائنات التجريبية التي تتعرض لتأثيرات سلبية (بمعنى، مرض أو ضرر). وعند جرعات عالية بدرجة كافية، فإن جميع الكائنات التجريبية سوف تعاني من هذا التأثير. لهذا فإن زيادة الجرعة تزيد من احتمالية (أي المخاطرة) تطور شيء غير طبيعي في مجموع الأفراد الذين تعرضوا لهذه المادة الكيماوية.

3. قد يزداد كل من حدة تأثير سام أو وقوعه مع زيادة مستوى التعرض لمادة كيماوية معينة. وتكون زيادة الحدة ناتجة عن زيادة الضرر عند جرعات أعلى، بينما يكون زيادة وقوع الضرر ناتجاً عن الاختلافات في الحساسية بين الأفراد. إضافة لذلك، فإن الموقع الذي تعمل عنده مادة معينة (مثلاً، الكبد، الكلية) قد يتغير مع تغير الجرعة. إن كثيراً من التأثيرات السامة، بما فيها ظهور الأورام، تقع ضمن هذا التصنيف. وعموماً، كلما زادت فترة التعرض، نقص

مقدار الجرعة الحرجة لانعدام التأثير الضار (NOAEL)، وتجدد الإشارة إلى أنه في بعض الحالات، لا تلاحظ آثار جديدة عند التعرض لفترة قصيرة عقب التعرض لفترة طويلة. يتعين الأخذ في الاعتبار أيضاً مدى خطورة التأثير السام. فبعض أنواع الضرر، مثل داء الأسبست (asbestosis) الناتج عن استنشاق ألياف مادة الاسبستوس، تبدو واضحة التأثير السلبي وتعتبر تهديداً مؤكداً للصحة. من ناحية أخرى، فإن أهمية الأنواع الأخرى من التأثيرات التي تشاهد خلال دراسات السمية على الصحة قد تكون غامضة. وعلى سبيل المثال، قد تسبب مادة كيميائية عند جرعة معينة ارتفاعاً طفيفاً في درجة حرارة الجسم. و إذا لم تشاهد تأثيرات أخرى عند مستوى الجرعة هذا، فإن الباحثين لا يستطيعون التأكد من أن استجابة سلبية حقيقية قد حدثت. ويعتبر الجزم فيما إذا كانت مثل هذه التأثيرات الطفيفة ذات أهمية بالنسبة للصحة واحدة من القضايا الحرجة في تقييم درجة الأمان. تتفاوت أيضاً التأثيرات السامة من حيث استمراريتها. ففي بعض الحالات يكاد يختفى التأثير الصحي السلبي فوراً بعد توقف التعرض لمادة معينة. وفي حالات متطرفة أخرى، يتسبب التعرض لبعض المواد في ضرر دائم - مثلاً، نشوء خلل ولادة حاد نتيجة التعرض لتأثير مادة معينة تضر بشكل غير عكوس بالجنين عند فترة حرجة من تطوره. إضافة إلى ذلك، فإن بعض الأنسجة، مثل الكبد، يمكنها أن تصلح ذاتها بسرعة نسبياً، بينما لا تملك أنسجة أخرى مثل الخلايا العصبية القدرة على اصلاح الضرر الذي قد يلحق بها. إن معظم التأثيرات السمية تقع عند نقطة معينة بين هاتين النقطتين المتطرفتين.

2.4.21 اختبار السمية

يمكن استخدام أي كائن لتقييم سمية مادة معينة. ويعتمد اختيار كائن اختبار على عوامل عدة، بما في ذلك الميزانية، والوقت، ووجود الكائن في بيئة ما. إن أبسط الاختبارات وأقلها كلفة تجرى على حيوانات أو نباتات وحيدة الخلية وقد تستغرق فقط بضع ساعات أو أيام. ففي بيئة مائية، مثلاً، يمكن استخدام برغوث الماء الدافنيا (*Daphnia*) أو الطحالب في اختبار إمكانية وجود ملوثات مائية: وقد تركزت الاختبارات قصيرة المدى على موت أو عدم تحرك الدافنيا السابحة، بينما قد تنظر الاختبارات بعيدة المدى إلى نمو الكائنات (زيادة في الكتلة الحيوية) أو زيادة عدد المواليد. وتعتبر الحيوانات المتقدمة في السلسلة الغذائية هامة في اختبارات السمية المائية، إضافة إلى أن التجارب التي تشمل الأسماك، والبرمائيات، ولافقاريات دقيقة أخرى خيارات مألوفة (الجدول 21-2). أما بالنسبة لاختبارات السمية على الكائنات الأرضية، فإنه يمكن استخدام نبات راقٍ، أو قوارض أو طيور. وتستخدم عادة أنواع محددة وراثياً من الجرذان والفئران مثلاً، في هذه الدراسات. كما طورت أيضاً اختبارات سمية للطيور، فعلى سبيل المثال، كثيراً ما تستخدم الطيور في تقييم تأثيرات المبيدات على الأنواع غير المستهدفة بالمعاملة.

وفي علم السموم البيئي، عادة ما يجري الباحثون اختبارات السمية في تجمعات اصطناعية محدودة لتقييم التأثيرات البيئية لمواد سامة بعد إضافتها للبيئة. إن هذه التجمعات الاصطناعية، التي تعمل كنماذج مختبرية للنظم البيئية الطبيعية، يشار إليها باسم عوالم صغيرة (*microcosms*). وفي الوقت الذي تكون فيه الكثير من هذه العوالم الصغيرة نظماً متقنة

وتقوم بفعالية بمحاكاة نظم بيئية كاملة، فإن بعض العوالم الدقيقة قد لا تكون أكثر من مجموعة من برطمانات زجاجية تحتوى على تربة أو ماء مع رواسب عند القاع. لكن حتى البرطمانات الزجاجية البسيطة تتيح للباحثين معاينة تأثير مواد على أنواع متعددة من الكائنات، مثل الطحالب والبكتيريا، واللافقاريات الدقيقة.

جدول (21-2): كائنات شائعة الاستخدام في اختبارات السمية.

نوع الكائن	الكائن
لافقاريات	Daphnia magna Crayfish
	Mayflies ذبابة مايو
	Midges ذبابة صغيرة
	Plandria
فقاريات مائية	Rainbow Trout Goldfish Fathead minnow
سلور	Catfish
طحالب	Charnydomonas reinhard (طحالب خضراء) Microcystis aeruginosa (طحالب خضراء مزرققة)
ثدييات	جرذان فئران
أنواع طيور	Bobwhite Ring – necked pheasant

تتباين كثيراً تجارب السمية من حيث التصميم والتنفيذ. فبعض الاختبارات والمتابعات البحثية تجرى بإتباع تصاميم دراسة معدة مسبقاً، مثلما هو في حالة الفحص عن

إمكانية التسرطن في الأسماك. وتمشياً مع متطلبات الاختبار قبل السماح بالتداول لمجموعات معينة محددة من الكيماويات، فإنه تجدر الإشارة إلى أن وكالات عامة قد طورت بعض الاختبارات القياسية لأنواع مختلفة من السمية.

تعتبر الجرذان والفئران الحيوانات المعملية الأكثر شيوعاً بالنسبة لاختبارات السمية شيوياً. هذه القوارض غير مكلفة، ويمكن التعامل معها بسهولة نسبياً؛ وزيادة على ذلك فإن المعرفة الوراثية لهذه الأنواع وقابليتها للإصابة بالمرض معروفة بشكل جيد. كذلك، فإن عمر هذه القوارض الصغيرة ينتهي خلال عامين إلى ثلاثة أعوام، وبذلك، فإن تأثيرات التعرض على مدى الحياة لمادة معينة يمكن قياسها بسرعة نسبياً. كما أن قوارض أخرى مثل الممستر (hamsters) وخنازير غينيا (guinea pigs) تعتبر أيضاً حيوانات شائعة الاستعمال للتجارب المعملية، إضافة للأرانب والكلاب وغيرها. ويعتمد عادة اختيار حيوان تجارب معين على النظام المدرس. فدراسات التكاثر، مثلاً، تستخدم عادة أعضاء من مجموعة الرئيسات (primates) كالقرد أو البابون (baboon) ذلك أن أنظمة تكاثرها شبيهة بالإنسان. وبنفس الكيفية، فإن الأرانب تستخدم عادة لاختبارات السمية الجلدية لأن جلدها بعد حلقه أكثر حساسية مقارنة بالحيوانات الأخرى.

يتم تعريض الحيوانات عادة بطريقة تشبه ما أمكن تلك التي سيتعرض لها البشر. لكنه وفي بعض الحالات، قد يكون ضرورياً استخدام طرق أو ظروف أخرى لإعطاء الجرعة من أجل بلوغ الجرعة التحريمية المستهدفة. فمثلاً، قد تعطى بعض المواد بواسطة أنبوب

يدخل المعدة (gavage) لأنها شديدة التطاير أو غير مستساغة لتوضع مع عليقة الحيوان بالمستويات العالية اللازمة في دراسات السمية.

إن تجربة سمية ما تكون ذات قيمة محدودة إلا إذا وجد الباحثون جرعة ذات قدر كافٍ لتحداث تأثيراً سلبياً معيناً خلال فترة القيام بالتجربة. وإذا لم تشاهد أي تأثيرات عند أية جرعة تم إعطاؤها، فإن خصائص السمية للمادة لا يمكن تحديدها؛ وبذلك فإن التجارب قد يتم تكرارها عند مستويات جرعة أعلى أو لفترة زمنية أطول حتى يتم مشاهدة تأثيرات سلبية مميزة. إن أكثر التأثيرات السلبية وضوحاً هو، بالطبع، الموت. ولهذا فإن البحوث كثيراً ما يبدوون تجاربهم بتحديد ما يسمى بالجرعة الوسيطة المميتة (LD_{50}) نظراً لأن نقطة نهاية هذه التجربة (الموت) يمكن قياسها بسهولة. بعدها، ينظر الباحث عادة إلى تأثيرات الجرعات الأقل التي يتم إعطاؤها. على فترات أطول من الزمن ليحددوا مدى الجرعات التي يحدث عندها تأثيرات سلبية، وكذلك تمييز الجرعة الحرجة لانعدام التأثير الضار (NOAEL).

ربما تصنف الدراسات حسب فترة استمرار التعرض (duration of exposure) لتأثير مادة معينة. وتشمل دراسات السمية الحادة، جرعة واحدة، أو التعرض لفترة زمنية قصيرة جداً (مثلاً، 8 ساعات من الاستنشاق). أما الدراسات المزمنة فإنها تقتضى تعرضاً على امتداد عمر حيوانات التجارب تقريباً، بينما تتباين الدراسات تحت المزمنة من حيث الاستمرارية بين هذين المستويين المتطرفين. وعلى الرغم من أنه يلزم العديد من المستويات المختلفة للجرعة لتطوير علاقة جيدة ومحددة بين الجرعة والاستجابة (response)، إلا أن الاعتبارات العملية عادة ما تحدد العدد إلى اثنين أو ثلاثة، خاصة في الدراسات المزمنة التي

تستغرق وقتاً طويلاً. وكثيراً ما تنشر نتائج دراسات عن الجرعة الواحدة، لكنها تترك قدراً كبيراً من عدم اليقين حول المدى الكامل للجرعات التي يتوقع عندها حدوث تأثيرات.

3.4.21 اختبارات السمية المتعلقة بالتسرطن

يعتبر الاختبار الحيوي للتسرطن (Carcinogenesis bioassay) واحداً من أكثر الاختبارات المتخصصة تعقيداً وأهمية. ويستخدم هذا النوع من التجارب لاختبار فرضية تسرطن - بمعنى قدرة مادة معينة على إنتاج أورام خبيثة .

وعادة ما يتم إعطاء مادة اختبار على امتداد معظم طور البلوغ لحيوان المختبر: بعدها تتم مراقبة الحيوان من حيث تطور أورام خبيثة. وفي هذا النوع من الاختبارات يقوم الباحث عموماً بإعطاء جرعات عالية من المادة الكيماوية التي يتم اختبارها وبشكل خاص الجرعة القصوى التي يمكن تحملها (MTD)، وهي الجرعة القصوى التي يمكن لحيوان تحملها لفترة رئيسية من حياته دون حدوث إعاقة معتبرة للنمو أو تأثير سام ملحوظ باستثناء التسرطن. إن الجرعة القصوى التي يمكن تحملها (MTD)، ونصف هذه الجرعة أو (MTD₅₀)، هي الجرعات المعتادة المستخدمة بواسطة المعهد القومي للسرطان (NCI) الخاص بالاختبار الحيوي للتسرطن بحيث تعيش الحيوانات في صحة جيدة نسبياً على امتداد فترة حياتها الطبيعية. ويعود السبب الرئيسي لاستخدام الجرعة القصوى التي يمكن تحملها كأعلى جرعة في الاختبار الحيوي إلى أن هذه الجرعات العالية تساعد في التغلب على انعدام الحساسية الاحصائية التي تلازم الدراسات الاختبارية غير الموسعة.

ولأسباب ارتفاع التكلفة بدرجة أساسية، تجرى التجارب على مجموعات صغيرة نسبياً من الحيوانات - عادة، 50 إلى 60 حيواناً من كل نوع وجنس عند كل مستوى جرعة معينة، بما في ذلك مجموعة الشاهد. وعند الانتهاء من تجربة كهذه، يدرج حدوث سرطان (بما في ذلك حدوث أورام في حيوانات المشاهدة) في جداول وربط ذلك بيانياً بالجرعة. يتم بعدها تحليل البيانات لتحديد فيما إذا كان هناك أي اختلافات في حدوث أورام (نسبة معينة من الحيوانات يوجد بها أورام سرطانية من نوع معين) نتيجة لتعرضها للمادة تحت الدراسة أو نتيجة لاختلافات عشوائية. وفي تجربة بهذا الحجم، وبافتراض أن أيّاً من الحيوانات في معاملة الشاهد لا يتطور فيها أي أورام خبيثة، فإن الحد الأدنى للإصابة بالسرطان التي يمكن رصدها إحصائياً بدقة مقبولة تقع في مدى 5%، وهو ما يعادل (3) حيوانات تطورت فيها أورام سرطانية من بين (60) حيواناً. وإذا ما طورت حيوانات الشاهد أوراماً خبيثة (كما يحدث غالباً) فإن المدى الأدنى للحساسية الإحصائية في هذه الحالة يصبح أعلى. إن حدوث سرطان بمعدل 5% عالٍ جداً، لكن الدراسات التجريبية الاعتيادية لا تكون قادرة على رصد معدلات أقل، بل أن بعضها أقل حساسية من ذلك.

4.4.21 الدراسات الوبائية

يتم الحصول على معلومات حول التأثيرات الصحية السلبية في التجمعات البشرية من أربعة مصادر أساسية: (1) ملخصات لتقارير شخصية عن أعراض تظهر على أفراد تعرضوا لتأثير مادة ما، (2) تقارير عن حالات أعدت بواسطة جهات طبية؛ (3) دراسات ارتباط تكون فيها الاختلافات في معدلات المرض في تجمعات بشرية ذات علاقة

بالاختلاف في الظروف البيئية؛ (4) دراسات وبائية. وتتميز الثلاثة الأولى من بين هذه المصادر بأنها من النوع الوبائي الوصفي، بينما يقتصر المصدر الرابع (الدراسات الوبائية) عموماً على الدراسات التي تقارن الحالة الصحية لمجموعة من الأفراد الذين تعرضوا لعامل موضع شك فيه بمجموعة الشاهد من أفراد لم يتعرضوا لتأثير هذا العامل. [ملحوظة: هذا النوع من الدراسات لا يمكن عن طريقه التعرف على علاقات المسبب - و - التأثير أي بين التعرض لمادة معينة ومرض أو ظروف محددة؛ لكن يمكنها أن تجلب الانتباه لمشاكل غير مربية سابقاً وتُؤلّد افتراضيات يمكن إجراء المزيد من الاختبارات حولها].

إن معظم الدراسات الوبائية إما أن تكون دراسات لحالات مرجعية (case-control studies) أو دراسات جماعية. وتحدد دراسات الحالات المرجعية أولاً مجموعة معينة من الأفراد يعانون من مرض محدد، يلي ذلك محاولة التحقق من التشابه في التعرض لتأثير مادة معينة يمكن أن تكون المجموعة قد مرت بها. فمثلاً، اكتشفت الخصائص المسرطنة لمادة (DES) diethylstilbestrol، وهو دواء استخدم سابقاً لمنع الاجهاض عند النساء، من خلال دراسات على نساء ابتلين بأنواع محددة من سرطانات المهبل أو عنق الرحم. من جهة أخرى، فإن الدراسات الجماعية (cohort studies)، تبدأ بفحص الحالة الصحية لأفراد عرفوا بأنهم قد تعرضوا لتأثير نفس المصدر. تحاول بعدها هذه الدراسات تحديد فيما إذا كانت أية حالة معينة مرتبطة بحادثة التعرض وذلك عن طريق مقارنة الحالة الصحية للمجموعة التي تعرضت للتأثير بالحالة الصحية بمجموعة شاهد تشبهها بدرجة مناسبة. فعلى سبيل المثال، كشفت دراسات جماعية لعمال يشتغلون في معمل تعرضوا لتأثير البنزين،

حدوث حالات ابيضاض الدم بينهم بنسبة عالية جداً، وهو ما يعطى دليلاً قوياً يدعم فرضية أن البنزين مسبب لمرض سرطان أو ابيضاض الدم (leukemogenesis). عموماً، فإن أخصائي الأوبئة قد استخدموا أفراداً ينتمون لمجموعة معروفة، مثل أولئك الذين يعملون تحت ظروف وظيفية معينة، أو مرضى تمت معاملتهم بأدوية محددة، لإجراء هذا النوع من الدراسات - ومن هنا أتى الاسم جماعي (cohort).

يمكن أن تكون النتائج المقنعة من استقصاء حالات وبائية ذات فائدة كبيرة جداً، ذلك أن البيانات توفر معلومات عن الانسان تحت ظروف تعرض فعلية لعامل محدد. ولهذا السبب، فإن الدراسات جيدة التصميم التي تجرى تحت ظروف محكمة بشكل صحيح تعطى عادة نتائج ذات وزن وأهمية أكبر من النتائج التي يتم الحصول عليها من دراسات عن الحيوانات. وعلى الرغم من أنه لا توجد دراسة يمكنها أن تعطى تأكيداً تاماً بأن مادة كيميائية معينة لا ضرر منها، فإن الحصول على بيانات سلبية من دراسات وبائية ذات حجم كافٍ يمكن أن تساعد على تحديد المستوى الأقصى للمخاطرة الناتجة عن التعرض لعامل معين.

وتجدر الإشارة إلى أن الحصول على نتائج لحالات وبائية وتفسيرها يمكن أن يكون صعباً جداً فالتعرف على مجموعات مرجعية متطابقة بدرجة مناسبة أمر غير يسير، وذلك لأن العوامل التي تؤدي إلى تعرض المجموعة تحت الدراسة لتأثير عامل معين (مثلاً، الحرفة أو مكان الإقامة) عادة ما تكون مرتبطة بشكل كبير بالعوامل التي تؤثر على الوضعية الصحية (مثلاً، نمط الحياة، والحالة الاجتماعية الاقتصادية). ولذلك، فإن التحكم في عوامل مخاطرة

(مثلاً، تدخين السجائر) لها تأثيرات قوية على الصحة يكون صعباً. إضافة إلى ذلك، فإن قوة الكشف الإحصائي للدراسات الوبائية تعتمد على استخدام دراسات وبائية لأعداد كبيرة جداً من الأفراد (انظر الجزء 1.2.22)، كما أن الحصول على بيانات قد يكون صعب المنال أو أن تكون هذه البيانات غير كاملة. وتوجد أنواع قليلة لتأثيرات صحية – باستثناء الوفيات – يتم توثيقها بشكل منظم للتجمعات البشرية، بل وحتى المعلومات عن سبب الوفاة تكون ذات مصداقية محدودة. فمثلاً حالات العقم والإجهاض، والمرض العقلي، كقاعدة عامة، لا يتم تسجيلها بشكل منتظم بواسطة منظمات الصحة العامة، بينما يعزى سبب الوفاة عادة لفشل القلب بغض النظر عن السبب المباشر .

إضافة إلى ذلك، فإن توفر بيانات صحيحة حول درجة التعرض لمواد خطيرة يكون نادراً، خاصة عندما يكون التعرض قد حدث منذ سنوات أو عقود خلت. ولهذا فإن تأسيس علاقات تربط الجرعة بالاستجابة (dose-response) كثيراً ما يكون مستحيلاً. إن توفر بيانات صحيحة ومهما كان الحرص في الحصول عليها لن تساعد بشكل فوري الباحثين الذين يتحرون عن أمراض بطيئة التطور مثل السرطان، بل وحتى أخصائيو الأمراض الوبائية الذين يتعين عليهم الانتظار لسنوات عدة لتحديد غياب مؤثر معين. في الوقت ذاته، فإن التعرض لعوامل مشبوهة يمكن أن يستمر خلال هذه الفترات الزمنية الممتدة، وهو ما يزيد من عامل المخاطرة .

لهذه الأسباب وغيرها، فإن تفسيرات الدراسات الوبائية تكون أحياناً عرضة بدرجة عالية لعدم المصداقية. وعادة ما يلزم وجود دليل تأكيد مستقل، بما في ذلك نتائج داعمة

من دراسة وبائية ثانية، أو بيانات داعمة من دراسات تجريبية على الحيوانات. إن هذا الدليل المؤكد يكون بشكل خاص ضرورياً في حالة الحصول على نتائج سلبية، وهي ما يستلزم عند تفسيرها أخذ الحيطة والحذر الشديدين (EPA, 1989).

فمثلاً، لنفترض وجود ملوث معين في ماء الشرب يعرف بأنه يتسبب في مرض السرطان في واحد من بين كل 100 فرد تعرضوا لتركيز 10 مجم/ لتر. زيادة على ذلك، لنفترض أن متوسط الزمن اللازم لتطور سرطان من تعرض لتركيز 10 مجم/لتر هو 30 عاماً (هذا شائع بالنسبة للمواد المسرطنة). وبعد تعرض سكان المدينة لملوث مياه الشرب مدة 15 سنة، أجريت دراسة. ولغرض هذه الدراسة، جمعت شهادات وفاة لعدد 20 فرداً تعرضوا للملوث، ولكن المعلومات عن التعرض الفعلي كانت قليلة. ونحن نعرف أن بعض المتوفين قد تعرضوا عند بداية وصول الملوث لمصدر المياه، وأن آخرين قد تعرضوا للملوث لاحقاً عدة سنوات. وعند الرجوع إلى السجلات الصحية، وجد أنها غير كاملة. وأخيراً، كشفت نتائج الدراسة أن 20 حالة وفاة بمرض السرطان لا يبدو رقماً كبيراً عند مقارنته بمجموعة أفراد مرجعية مناسبة. فهل من الصواب عندئذ استنتاج أن المادة المسرطنة التي نعرفها ليست مسرطنة؟

5.4.21 اختبارات سمية قصيرة المدى

تعتبر دراسة الحيوان على امتداد فترة حياته الطريقة الأساسية المستخدمة لاكتشاف الخصائص المسرطنة والسمية العامة لمادة معينة. لكن اختبارات قصيرة المدى على السمية تستخدم لقياس التأثيرات التي يبدو ارتباطها بتأثيرات سامة محددة. فمثلاً، تشمل

الاختبارات الخاصة بالتسرطن فحوصات عن الطفرات الجينية في البكتيريا، والخميرة، والفطريات، والحشرات، وخلايا الثدييات، واختبارات التحول في خلايا الثدييات؛ واختبارات إعطاب DNA وترميمه، والاختبارات التي تجرى خارج الحيوان (in vitro) أو داخله (in vivo) الخاصة بالطفرات الكروموسومية في خلايا الحيوان. كما يوجد أيضاً عدد من الدراسات قصيرة المدى لاختبارات السمية التي تستند إلى كبح وظائف إنزيمات ضرورية في الكائنات الحية، مثل إنزيمات (ATP) وphosphatases وdehydrogenase. فمثلاً، يمكن استخدام قياسات إنزيم phosphatase، لتقييم نشاطات مواد محددة، مثل سمية العناصر الثقيلة في الترب. إضافة إلى ذلك، تستخدم الاختبارات قصيرة المدى إنزيمات أو كائنات دقيقة لتقييم السمية العامة لعينات بيئية (Bitton , 1994).

كما يوجد أيضاً اختبارات عدة تشمل حيوانات كاملة. وهذه الاختبارات، التي تكون عادة لفترات متوسطة، تشمل إحداث تورمات سرطانية في الجلد والرئة لأنثى الفئران، وسرطان الثدي في إناث بعض أنواع الجرذان، وتغيرات تشريحية في كبد القوارض. إن كثيراً من العوامل المسرطنة (carcinogenic)، ومسببات الطفرات (mutagenic)، والماسخة (ومسببات العلل) (teratogenic) تعمل بنفس الطريقة: فهي تحدث تغيرات في جزيء DNA الذى يؤثر في نهاية المطاف على تطور الخلية. ونتيجة لهذه العلاقة، فإن الفرز المبدئي لهذه المواد يمكن غالباً أنجازها بسرعة عن طريق اختبار قدرتها على إحداث طفرات في سلالة معينة من البكتيريا (Salmonella typhimurium). إن هذه السلالة الفريدة من البكتيريا يحتاج إلى الحمض الأميني الأساسي (histidine) حتى تنمو، ولذلك لا يمكنها أن

تنمو في بيئة خالية من الهستيدين إلا إذا تمكنت هذه السلالة من التطفر. وعلى ذلك، فإنه إذا ما شاهدنا نمو هذه البكتريا على بيئة خالية من الهستيدين بعد تعرضها لمادة كيميائية اختبارية، فإنه من الممكن افتراض أن المادة الكيميائية قد تسببت في حدوث طفرة للبكتيريا. ولهذا فإن مادة الاختبار الكيميائية من المرجح أن تكون إما مسرطنة (carcinogen)، أو مطفرة (تحدث طفرة) (mutogen)، أو ماسخة (teratogen). ويطلق على هذا الاختبار قصير المدى اسم (Ames test) إشارة إلى من قام بتطويره وهو الدكتور بروس أيمز (Bruce Ames) من جامعة كاليفورنيا في بيركلي.

يوجد اختبار أحيائي آخر قصير المدى يستند إلى المنتج الضوئي لبكتريا تتسم بالوميض الحيوي (*Photobacterium phosphorecum*). وقد استخدم هذا الاختبار الإحيائي لتقييم السمية العامة، لدفق المياه العادمة، ومخلفات المصانع، ومستخلصات الترسبات، ورواشح المخلفات الخطرة. ومع تناقص المواد السامة تتناقص حيوية البكتيريا المضئية، حيث يمكن قياس مقدار الضوء الناتج كميًا باستخدام جهاز مناسب.

6.4.21 التأثيرات الحدية (Threshold Effects)

هناك مفهوم شائع القبول بأن معظم التأثيرات الحيوية للمواد الكيماوية غير المسرطنة تحدث فقط بعد وصولها إلى تركيز أو مستوى محدد. إن هذا المستوى الذي يعرف بالجرعة الحدية (threshold dose)، يتم تقديره بواسطة ما يسمى بالمستوى الذي لا ينتج عنه تأثير سلبي (NOAEL). وهناك طرح آخر واسع القبول، على الأقل حسب معطيات معايير الصحة العامة، من أنه يرجح أن يكون للمجتمع البشري استجابة متباينة إلى حد كبير

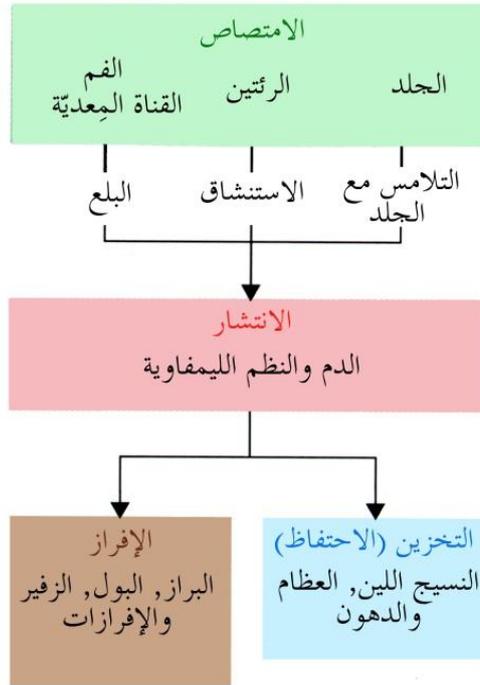
للمؤثرات السامة مقارنة بمجموعات صغيرة من الحيوانات التي تستخدم عادة في التجارب تحت ظروف محكمة وتكون متجانسة جينياً.

إن مفهوم المستوى الذي لا ينتج عنه تأثير سلبي (NOAEL) نفسه عرضة لبعض الشك بسبب عدم ثبات البيانات التي تم تحديده على أساسها. ولهذا السبب، فإن وكالات الصحة تقسم المستوى الذي لا ينتج عنه تأثير سلبي باستخدام عوامل عدم ثقة كثيرة، تعرف بعوامل الأمان، وذلك عندما تجرى معاينة لمواد تبرز تأثيرات حدية (انظر الجزء 3.2.22). وتباين شدة عوامل الأمان هذه حسب ما يلي: طبيعة وجودة البيانات التي استنبط منها مؤشر NOAEL؛ مدى خطورة التأثيرات السامة؛ نوع الحماية المستهدفة (مثلاً، الحماية ضد تعرض حاد، تحت مزمن، أو مزمن)؛ وطبيعة التجمع الذي يزعم حمايته (بمعنى، عامة التجمع مقابل عناصر محددة من التجمع يتوقع أن تظهر مدى أضييق لقابلية الإصابة). وقد استخدمت عوامل أمان تساوي 10، 100، 1000، 10000 في ظروف مختلفة.

والياً، يتم فقط التعامل مع المواد التي تمتلك خصائص مسرطنة على أساس أنها لا تظهر مستوى حدى (انظر الجزء 3.2.22). وعلى ذلك، يشير المنحنى الذي يربط العلاقة بين الجرعة والاستجابة (dose – response) للمواد المسرطنة في البشر إلى أن انعدام المخاطرة (zero risk) يتحقق فقط عندما تكون الجرعة صفراً؛ ومع تزايد الجرعة فوق الصفر، تصبح المخاطرة فوراً محدودة، لكنها تزداد كدالة للجرعة. وتكون المخاطرة في هذه الحالة احتمال تطور سرطان، وأنه عند الجرعات المنخفضة جداً يمكن أن تكون المخاطرة قليلة جداً.

5.21 الاستجابات للمواد السامة

عموماً، تعتمد استجابة كائن معين لمادة كيميائية سامة على الجرعة التي تعطى له. لكنه، وبمجرد دخول المادة السامة إلى الجسم، فإن التداخلات بين أربع عمليات هي: الامتصاص، الانتشار، الإفراز، والأيض - تحدد التأثير الفعلي لمادة كيميائية على العضو المستهدف، وهو العضو الذي يمكن أن يتضرر بواسطة هذه المادة الكيميائية تحديداً. فعلى سبيل المثال، تؤثر مادة رباعي كلوريد الكربون (carbon tetrachloride) على الكبد والكلى، بينما يؤثر البنزين على نظام تكوين خلايا الدم. ويلخص الشكل (1.21) مسارات الامتصاص والانتشار والإفراز.



شكل: (1-21): المسارات الرئيسية لامتصاص وانتشار وإفراز مادة كيميائية.

1.5.21 الامتصاص

يمكن أن يحدث امتصاص السموم عبر أغشية الجسم ومنه إلى الدم من خلال القناة المعدية المعوية والرئتين والجلد. فالملوثات التي توجد في مياه الشرب مثلاً، تدخل الجسم بالدرجة الأولى من خلال القناة المعدية المعوية. وبمجرد دخولها القناة المعدية المعوية، فإن معظم المواد الكيماوية يتعين امتصاصها ليظهر تأثيرها السام. ونظراً للاختلاف أساساً في الذوبانية، فإن بعض المركبات تمتص بسرعة أكبر مقارنة بغيرها. فمركبات الدهون العضوية غير المتأينة والقابلة للذوبان، مثل مركب DDT ومركبات ثنائي الفينيل - متعدد الكلور (polychlorinated biphenyls , PCBs) يتم امتصاصها بسهولة أكبر عن طريق الانتشار في القناة المعدية المعوية مقارنة بمركبات الدهون المتأينة غير القابلة للذوبان مثل أملاح الرصاص والكاديوم. كما توظف القناة المعدية المعوية أيضاً نظم نقل متخصصة ونشطة، للمركبات المختلفة مثل السكريات، الأحماض الأمينية، والبيريميدينيات، والكالسيوم، والصدويوم. وعلى الرغم من أن نظم النقل النشطة هذه لا تلعب عموماً دوراً كبيراً في امتصاص السموم، إلا أنها قد تسهم في امتصاصها في بعض الحالات؛ فمثلاً، يمكن أن يمتص عنصر الرصاص خلال نظام نقل عنصر الكالسيوم.

إن سلوك المواد السامة في القناة المعدية المعوية يعتمد أيضاً على تأثير السوائل الهاضمة. فهذه السوائل قد تكون مفيدة أو ضارة. فمثلاً، سم الثعبان (snake venom)، هو بروتين لكنه سام جداً عندما يتم حقنه، وغير سام عندما يؤخذ عن طريق الفم لأن إنزيمات المعدة تهاجم بناء البروتين، وتكسره إلى أحماض أمينية. إضافة لذلك، فإن هذه

الانزيمات يمكن أيضاً أن تسهم في تحويل النترات في القناة المعدية المعوية إلى مركبات مسرطنة تعرف باسم أمينات النيتروز (nitrosamines) .

وتعتبر المرحلة العمرية عاملاً هاماً يؤثر على قدرة الأمعاء في العمل كعائق لبعض السموم . فالقناة المعدية المعوية للأطفال حديثي الولادة، على سبيل المثال، لها رقم هيدروجيني أعلى وأعداد أكبر من البكتيريا القولونية (E. coli) مقارنة بالأفراد البالغين. إن هذه الظروف تحفز تحول النترات (وهي ملوث شائع في مياه الشرب ناتج عن الجريان السطحي القادم من مناطق زراعية) إلى ملوث كيميائي أكثر سمية وهو النيتريت. ويتداخل النيتريت مع قدرة الدم على حمل الأكسجين، مسبباً مرض (methemoglobinemia) في الدم أو أعراض الوليد الأزرق (blue- baby syndrome) [انظر أيضاً الجزء 2.14]. كما يمتص عنصر الرصاص أيضاً بسهولة أكبر في حالة حديثي الولادة من الأطفال مقارنة بالأفراد البالغين.

[ملحوظة: على الرغم من أن مادة كيميائية قد تمتص خلال القناة المعدية المعوية، إلا أنها يمكن أن تفرز أو تتعرض لعمليات أيضية بواسطة الأمعاء أو الكبد قبل أن تصل للنظام الدوري].

إن الرئتين مصممتان تشريحياً لتمتصا وتفرزا المواد الكيميائية كما يتضح من امتصاصهما المستمر للأكسجين وإفرازهما لغاز ثاني أكسيد الكربون. وتمتلك الحويصلات الهوائية مساحة سطحية كبيرة (50 - 100 متر مربع) وهي مزودة جيداً بالدم الذي هو قريب جداً من الفراغ الهوائي داخل هذه الحويصلات. إن هذه الخصائص تجعل الرئتين وسيلة نقل

متميزة لامتصاص السموم. فالسموم يلزمها أن تمر عبر مسافة محدودة لا تتجاوز خليتين لتنتقل من الهواء إلى داخل مجرى الدم.

ويعتبر الجلد غير منفذ نسبياً للسموم. لكنه يلاحظ أن بعض السموم مثل رابع كلوريد الكربون، يمكن أن تمتص خلال الجلد بكميات كافية لتسبب ضرراً للكبد. إضافة إلى ذلك، فإن بعض الكيماويات، مثل (DMSO) dimethyl sulfoxide، قد وجد بأنها تخترق الجلد بسهولة ملحوظة. ويكون الامتصاص خلال الجلد ممكناً عن طريق حويصلات الشعر، ومن خلايا الغدد العرقية والغدد الدهنية، وكذلك من خلال الجروح أو الخدوش، التي تزيد من معدل تسارع الامتصاص. يبدو أن الوسيلة الوحيدة للامتصاص من خلال الجلد هي الانتشار السلبي.

2.5.21 التوزع

يعتمد توزع سم معين إلى الأعضاء المختلفة على سهولة عبوره أغشية الخلية، وقابليته للأنسجة المختلفة، وتدفق الدم خلال العضو المحدد. إن تركز سم معين عند موقع معين لا يعنى بالضرورة أن هذا الموقع هو العضو المستهدف بالسمية. فمثلاً، يمكن أن يخزن عنصر الرصاص في العظام دون إحداث أي ضرر، كما أن العديد من السموم لمواد دهنية قابلة للذوبان (مثل مبيدات الحشرات من الهيدروكربونات الكلورة) يتم تخزينها في الدهن، حيث تتسبب في ضرر بسيط نسبياً. على أنه يلاحظ، أن الملوث المخزن يمكن أن يجرر ثانية إلى مجرى الدم تحت ظروف مختلفة. وبذلك فإن المبيدات الكلورة المخزنة في الدهن، يمكن أن تتحرر خلال فترات الجماعة، أو الريجيم الغذائي، أو المرض عندما يستهلك الدهن.

ويعتقد أن عدداً من العوائق التشريحية في الجسم تقوم بمنع أو إعاقة دخول بعض السموم إلى داخل الكائن الحي. لكن هذه الموانع ليست جدران غير منفذة. إذ أن ما يسمى بعائق الدم / الدماغ، مثلاً، لا يمنع دخول سموم إلى النظام العصبي المركزي (CNS)، بل إن الظروف الفسيولوجية عند نقطة التقاء الدم/ الدماغ تزيد من صعوبة مغادرة بعض السموم الدم فتدخل النظام العصبي المركزي. وعموماً، فإن السموم القابلة للدوبان في الدهن يمكنها عبور حاجز الدم/ الدماغ، لكن بعض السموم القابلة للدوبان في الماء لا تتمكن من ذلك. كما أن هناك العائق المشيمي (placental barrier) الذي لا يمكن اعتباره حاجزاً فعلياً: فالحقيقة هي أن أية مادة كيميائية يتم امتصاصها لتدخل مجرى دم الأم يمكنها بل إنها تستعبر المشيمة وتدخل المجرى الدموي للجنين بدرجة ما.

3.5.21 الإفراز

يمكن أن يتم إفراز المواد الكيميائية من الجسم بعدة طرق . فالكلىة تزيل السموم من الدم بنفس الطريقة التي تزال بها النواتج النهائية عن طريق الأيض، أي بالترشيح الكبيبي (من خلال خصلة من الأوعية الدقيقة بالكلىة)، والانتشار الأنبوبي السلبي، والافراز الإيجابي. وببساطة فإن الترشيح الكبيبي (Glomerular Filtration) هو عبارة عن عملية ترشيح يتم عن طريقها مرور مركبات يكون وزنها الجزيئي أقل (ومن ثم كتلتها) خلال مسامات في جزء من الكلىة يعرف باسم الكبيبات (glomeruli). إن جميع المركبات التي يكون وزنها الجزيئي أقل من 60000 يمكنها الارتشاح خلال هذه الكبيبات إلا إذا ارتبطت بروتينات البلازما (القليل فقط يفعل ذلك). ويتراوح الوزن الجزيئي لمعظم السموم في مياه الشرب ما بين 100 و500 وبذلك فإن هذه المركبات تمر بسهولة خلال هذه الكبيبات. وتمر السموم بعد ذلك خلال القنوات (ducts) والنيبيات الصغيرة (tubules) التي يتم عن طريقها

إفراز السموم القابلة للذوبان في الماء مع البول. من ناحية أخرى، فإن السموم القابلة للذوبان في الدهون يمكنها أن تتغلب على عملية الإفراز عند هذه النقطة من خلال تحركها (عن طريق الانتشار السليبي) خلال جدران النيببات الصغيرة (tubules) لتعود مرة أخرى إلى مجرى الدم.

تزيح الكبد السموم من خلال العصارة الصفراء (bile)، التي تصل إلى الأمعاء عبر المرارة والقناة الصفراوية، لتخرج أخيراً من الجسم عن طريق البراز. وكما هو في حالة الكلية، فإن آليات النقل المستخدمة هي الانتشار السليبي والنقل بواسطة عوامل ناقلة (Carrier – mediated transport). ويمكن للسموم التي تم إفرازها داخل الأمعاء من خلال العصارة الصفراء أن تمتص مرة أخرى (خاصة إذا كانت السموم قابلة للذوبان في الدهون) لتدخل مجرى الدم أثناء وجودها في الأمعاء.

تفرز السموم أيضاً عبر مسارات عدة أخرى، بما في ذلك الرئتين، والقناة المعدية المعوية، والسائل النخاعي، والحليب، والعرق واللعاب. فالحليب مثلاً به تركيز مرتفع نسبياً من الدهن (3.5%)، ولذا فإن المركبات القابلة للذوبان في الدهن مثل DDT وPCBs يمكن أن تتركز في الحليب. ونظراً لأن الحليب حمضي نوعاً ما (الرقم الهيدروجيني 6.5)، فإن المركبات القاعدية يمكنها أن تتركز فيه أيضاً. وبهذه الطريقة يمكن أن تمرر السموم من الأم إلى الطفل أو من الأبقار إلى الإنسان.

يوجد مفهوم هام في الإفراز وهو ما يعرف بالعمر النصف للمادة السامة (toxics half- life) أنظر المعادلة (6-17)، الذي يساوي الوقت اللازم للتخلص من نصف المادة الكيماوية من الجسم. وعلى ذلك، إذا كان لمادة كيماوية معينة نصف عمر يساوي يوماً واحداً، فإن 50% من هذه المادة سيظل بالجسم بعد مضي يوم على

الامتصاص، وأن 25% ستظل في الجسم بعد يومين، وأن 12.5% بعد ثلاثة أيام، وهكذا. ويعتبر مفهوم نصف العمر مهماً نظراً لأنه يشير إلى المدة التي يبقى فيها مركب معين داخل الجسم. وعموماً، فإن أي مركب معين يعتبر قد انتهى مفعوله بعد فترة تعادل 5 مرات نصف عمر المركب.

جدول (21-3): حالات السرطان سنوياً في الولايات المتحدة، حسب مكان الإصابة وجنس المصاب باستثناء سرطان الجلد غير الميلاني، (non-melanoma) و Carcinoma الموضعية.

الذكور		الإناث	
حدوثه	نوع السرطان	حدوثه	نوع السرطان
122000	البروستاتا	175000	الثدي
101000	الرئة	78500	القولون والمستقيم
79000	القولون والمستقيم	60000	الرئة
37000	المثانة	46000	الرحم
23800	الأورام الليمفية	20800	الأورام الليمفية
20600	الفم	20700	المبيض
17000	الجلد	15000	الجلد
15800	الكلى	14500	البنكرياس
15800	ابيضاض الدم	13200	المثانة
14500	المعدة	12200	ابيضاض الدم
13700	البنكرياس	10200	الفم
10000	الحنجرة	9500	الكلى
74800	أخرى	79400	أخرى
545000	الإجمالي	555000	الإجمالي

جدول (21-4): حالات الوفاة بسبب السرطان سنويا في الولايات المتحدة من بين 514 ألف حسب مكان الإصابة والجنس باستثناء سرطان الجلد غير الميلاني (non-melanoma) و Carcinoma الموضعية والسرطان عند الموقع.

الذكور		الإناث	
حدوث الموت	نوع السرطان	حدوث الموت	نوع السرطان
92000	الرئة	51000	الرئة
32000	البروستاتا	44500	الثدي
30000	القولون والمستقيم	30500	القولون والمستقيم
12000	البنكرياس	13200	البنكرياس
10600	الأورام الليمفية	12500	المبيض
9800	ابيضاض الدم	10000	الرحم
8100	المعدة	9700	الأورام الليمفية
7300	القضبة الهوائية	8300	ابيضاض الدم
6400	المتانة	5800	الكبد
6300	الكلية	5300	المخ
-	-	5300	المعدة
6300	الكبد	4500	ورم نقوى متعدد (multiple myeloma)
6200	المخ	-	-
45000	أخرى	41400	أخرى
272000	المجموع	242000	المجموع

4.5.21 الأيض

نظراً لأن المركبات القابلة للذوبان في الدهون يمكن أن تخترق أغشية الخلية لتمتص ثانية في الكلى والأمعاء، فإنها تتعرض لعمليات أيضية، هي عبارة عن تفاعلات بيوكيميائية تحول خلالها الخلية الغذاء إلى طاقة ونسيج حي. وفي حالات كثيرة يقوم الجسم بتحويل هذه

السموم إلى مركبات قابلة للذوبان في الماء، التي يمكن أن تفرز بسهولة. لكنه، وفي بعض الحالات، يؤدي أيض مادة كيميائية معينة إلى خلق مادة كيميائية أكثر سمية أو أنها لا تؤدي إلى تغيير سمية المادة الكيميائية.

يحدث نوعان من التفاعلات في عملية الأيض: (1) تفاعلات بسيطة نسبياً تشمل الأكسدة والاختزال والهدرتة والحلمهة، (2) تفاعلات أكثر تعقيداً تشمل الاقتران (conjugation) والتخليق (synthesis). إن جميع هذه التفاعلات بالدرجة الأولى تحدث في الكبد. وتعتبر الأكسدة آلية الأيض لكثير من المركبات. وعند تناول الأيض، فإن الباحثين ينظرون أيضاً إلى الاختلافات بين النوع (species)، والسلالة (strain) والجنس (gender). كذلك، فإن السن يعتبر عاملاً مهماً بالنسبة لكل من الإنسان وحيوانات المعمل: إذ أن كلا من صغار السن والكبار جداً هم أكثر عرضة لتأثير بعض المواد الكيميائية.

6.21 مسببات السرطان

المسرطنات (Carcinogens) والمطفرات (Mutagens) والماسخات (Teratogens)

المسرطنات هي عوامل تؤدي إلى حدوث مرض السرطان، الذي هو عبارة عن نمو خلايا غير مسيطر عليها. ويتكون كل واحد منها من نحو 100 تريليون خلية، وأن أية واحدة من هذه الخلايا يمكن أن تتحول إلى خلية سرطانية بتأثير عوامل متنوعة، قد تكون كيميائية (مثلاً: نواتج تطهير ثانوية)، أو حيوية (مثلاً: فيروسات مسببة للسرطان)، أو فيزيائية (مثلاً: أشعة فوق بنفسجية، أشعة جاما). ويقدر بأنه يوجد مائة نوع مختلف من السرطنات، يمكن

أن توجد في كل عضو أو نظام بالجسم قد تم التعرف عليها. ويوضح الجدول (21-3) حدوث مرض السرطان عند مواقع مختلفة في جسم الانسان .

وحتى التسعينيات من القرن الماضي، كان السرطان بالولايات المتحدة ثانياً فقط لأمراض القلب كمسبب للوفاة. ويبين الجدول (21-4) تقدير حالات الوفاة سنوياً بالولايات المتحدة، حسب مكان الإصابة وجنس المصاب. وكما يلاحظ، فإن أكثر من 500 ألف فرد يموتون بسبب هذا المرض سنوياً، وأن سرطان الرئة يمثل حتى الآن المسبب الأهم للوفاة. وحقيقة، فإن سرطان الرئة قد ارتفع بنسبة أكبر من 200 في المائة خلال 35 سنة الأخيرة. وفي نهاية المطاف، فإن مرض السرطان يقتل واحداً من كل أربعة أمريكيين تقريباً . وتجدر الإشارة، إلى أنه باستثناء زيادة نسبة حدوث سرطان الرئة، فإن حدوث جميع أنواع السرطان الأخرى قد تراجع عموماً بنحو 13% على امتداد 30 سنة الماضية.

تؤدي مسببات التسرطن إلى نمو خلايا غير مسيطر عليه بطرق مختلفة كثيرة. وعموماً، يمكننا النظر إلى مسببات التسرطن على أنها عوامل بادئة أو محفزة، حسب مرحلة التسرطن التي تكون فيها هذه العوامل نشطة.

البدء (Initiation)

إن أول مرحلة في التسرطن، أو تحول خلية طبيعية إلى خلية سرطانية - تتمثل في تغير سريع غالباً غير عكوس ناتج عن تداخل مسرطن معين مع DNA الخلية. وتشمل هذه الخطوة من تطور السرطان ما يعرف بالبادئ (initiator)، وهو نوع من المسرطنات يتسبب في تحوير مؤثر (جين) معين يتحكم عادة في نمو الخلية. والجين (gene) هو عبارة عن جزء من جزيء DNA، ولذلك تسمى هذه الجينات التي تتحكم في النمو وتم تحويرها مكونات

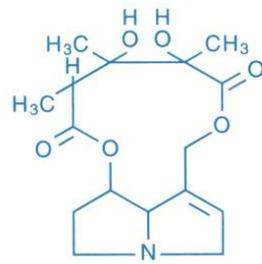
الورم oncogenes (حيث أن onco تعني ورم، أي الجينات الورمية). ويلزم حتى تبدأ خلية معينة النمو دون سيطرة، تحور جينين مختلفين - على الأقل - من جينات التحكم في النمو. إن هذه التغيرات تعدّ الخلية للنمو الورمي لاحقاً (neoplastic) حيث أن neo تعني جديد، وكلمة plastic تشير إلى شيء ما قد تشكل (أي نمو جديداً) .

وتعتبر بعض الكيماويات بادئات (initiators) بطبيعتها. فمثلاً، يعتقد أن الفورمالدهيد، وهي مادة كيماوية واسعة الاستعمال في الأصماغ الصناعية أنها مادة بادئة . ومعروف أن بخار الفورمالدهيد يحفز على تطور أورام سرطانية في الجهاز التنفسي للجرذان، على الرغم من أنه لم يثبت أن هذا المركب يسبب سرطاناً للإنسان. وفي حالات أخرى، قد يكون البادئ مادة ناتجة أيضاً. وعلى ذلك، فإن مادة (benzo (a) pyrene) وهي ناتج طبيعي لاحتراق غير كامل لمواد عضوية (بما في ذلك التبغ)، لا تمثل في حد ذاتها مادة بادئة، لكن الجسم يحولها أيضاً لمادة كيماوية مشابهة تسمى (benzopyrene-7,8-diol-9,10-epoxide) وهي مادة بادئة لمرض السرطان.

تطلق عملية التحفيز تزايداً مضطرباً لأعداد الخلايا غير الطبيعية الذي يعرف بالتطور الورمي (neoplastic). وعلى ذلك فإن المحفزات (promoters) هي عوامل مسرطنة تنشط الجينات الورمية، التي بدون ذلك تظل ساكنة. وقد تعمل هذه المسرطنات بعدة طرق. فمثلاً، يبدو أن الخلايا الطبيعية تمنع تنشيط الجينات الورمية التي توجد في خلية مجاورة على أهبة الاصابة. وأن مادة معينة قد تعمل كمحفز من خلال قتل خلايا طبيعية تحيط بخلية مستحثة. وبالمقابل، قد تنشّط المحفزات جينات ورمية بتثبيط فعل الجينات المثبطة، التي تمنع الجينات الورمية من بدء نمو غير منضبط للخلايا. وإذا ما تم إخماد نشاط الجينات المثبطة، فإن الجينات الورمية تستطيع عندئذ تحفيز تكون ورم .

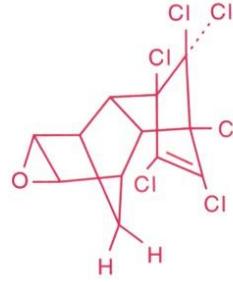
يمكن لكثير من المركبات أن تعمل كمحفزات، ويبدو أن بعضاً منها غير ضار. فمثلاً، تعمل عوامل غذائية مثل ملح الطعام والدهون كمحفزات بقضائها على الخلايا الطبيعية. إن ابتلاع هذه الأنواع من المحفزات ليس ضاراً بشكل فوري، لكن التعرض لها على مدى عمر الانسان يزيد بدرجة كبيرة من خطورة الإصابة بالسرطان. وعلى ذلك، فإن الأفراد الذين تكون وجباتهم عالية المحتوى من الملح والدهون هم أكثر عرضة للإصابة بسرطان المعدة والقولون، على التوالي. ولحسن الحظ، فإن إزالة المحفزات من محيط خلية مؤهبة لم تتم بعد مرحلة التحفيز يمنع تطور خلية سرطانية. وعليه، فإذا ما قمنا بتقليل الملح والدهون التي نستهلكها، يمكننا التقليل من الإصابة بالسرطان بدرجة كبيرة جداً.

مركب يوجد طبيعياً

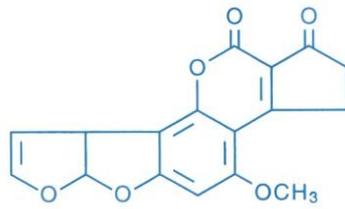


Monocrotalin

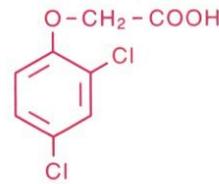
مركب مصنع



Dieldrin



Aflatoxin B₁



2,4-D

شكل (21-2): تركيب مواد كيميائية سامة مصنعة وطبيعية موجودة في البيئة .

تختلف السموم والمواد المسرطنة فيما بينها في جانب واحد مهم وهو أن الإصابة بالسرطان (عدد الحالات في كل مليون شخص) تعتمد على الجرعة، لكن حدة الاستجابة (السرطان) لا تعتمد على الجرعة. وهذا يعني أنه يتوقع تطور حالات أكثر من الإصابة بالسرطان مع زيادة تعرض تجمع بشري لمستويات أعلى من مسرطن معين، مثلما هو متوقع تماماً من تطور حالات تسمم أكثر في تجمع سكاني ما تعرض أفراده لمستويات أعلى من سم معين. لكنه يلاحظ بأنه بينما تعتمد حدة الاستجابة للسمية أيضاً على الجرعة، فإن ارتباط مقدار الجرعة من عامل مسرطن ما بحدّة المرض قليل جداً بمجرد إصابة فرد معين بالسرطان. إن هذا التمييز بين السموم والمسرطنات يوضح السبب في أن القوانين الخاصة بالمواد المصنفة على أنها مسرطنة هي أكثر صرامة منها في حالة السموم.

ومثل المواد المسرطنة، فإن مسببات المطفرات (mutagens) والماسخات (teratogens) تؤثر على DNA. فالمطفرات تسبب تغيرات موروثية في تتابعات DNA للصبغيات (الكروموسومات) وتشمل التغيرات التي تصاحب الطفرات تغيراً عشوائياً في الوظائف الطبيعية للكروموسومات أو الجينات المكونة لها. أما المواد الماسخة المسببة للتشوهات فإنها تؤثر على المادة الوراثية DNA للجنين، مسببة عادة في حدوث أشياء غير طبيعية كبيرة أو تشوهات حادة مثل قصر الذراعين أو الرجلين أو غيابها تماماً. وربما تكون المادة الماسخة الأكثر شهرة (أو سيئة السمعة) هي الثاليدومايد (thalidomide) وهو العقار المسكن الذي استخدم بواسطة آلاف النساء الحوامل خلال الستينيات من القرن الماضي. وتجدر الإشارة إلى أنه أحياناً لا يظهر التأثير الضار بالصحة إلا بعد سنوات عديدة من

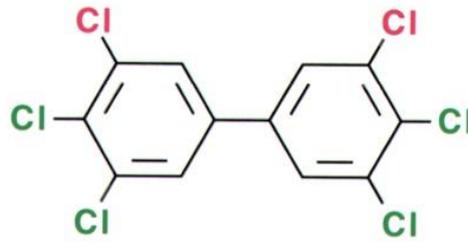
تعرض الأم. ومثل هذه الحالة تجسدها مادة DES (diethylstilbestrol) وهو العقار الذى وصف للنساء الحوامل في الولايات المتحدة لأكثر من ثلاثين عاماً. وهذا العقار (DES) الذى تم تطويره لمنع الاجهاض، وجد بأنه تسبب في حدوث تشوهات في عنق الرحم والمهبل. ومن المهم الاشارة إلى أن العقاقير ليست المواد المشوهة الوحيدة. فمثلاً، فيروس الروبيللا (rubella virus)، الذي يسبب عدوى فيروسية غير حادة (الحصبة الألمانية) يعتبر مسبباً للتشوه (teratogen) خلال الفترة الأولى من الحمل. إن هذا الفيروس يستطيع عبور حاجز المشيمة مسبباً خللاً في قلب المولود وفقداناً لسمعه.

7.21 السمية الكيميائية: اعتبارات عامة

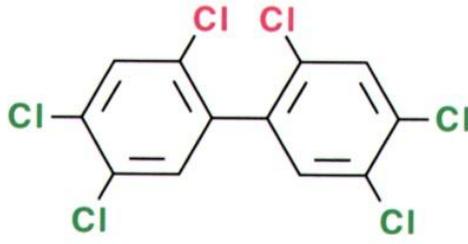
تعتمد التأثيرات السامة لمادة ما على شخص معين على كل من المادة الكيماوية والشخص نفسه. لكنه يلاحظ أن التباين في القدرة السمية بين المركبات المختلفة يفوق كثيراً التباين في الاستجابة للسمية من فرد لآخر. بمعنى أنه إذا ما تعرض شخص ما لسلسلة كاملة من الكيماويات المختلفة، فإن بعض المواد تسبب تأثيرات سامة عند كميات ضئيلة بينما يتعين على أخرى أن توجد بكميات هائلة. وقد يشكل الفرق بين الكميات مدى واسعاً: إذ يمكن أن تكون سمية مادة كيماوية معينة أكثر بملايين أو بلايين المرات من سمية مادة كيماوية أخرى. ولهذا، فإنه قد يلزم كميات تزيد بملايين أو بلايين المرات من مادة كيماوية معينة لتسبب نفس التأثير الذى تحدثه مادة كيماوية أخرى. إن مدى التباين في الانسان ليس بهذا القدر. فإذا تسببت مادة كيماوية معينة تأثيراً على شخص ما عندما أعطي قدرًا معينًا منها، فإنه ليس متوقعًا أن قدرًا يقل بليون مرة سوف يسبب تأثيرًا سامًا

لشخص آخر. إن المدى الدقيق للتباين بين البشر غير محدد بشكل جيد، لكنه يرجح أن يكون أقرب لعشرة أضعاف وليس لبلون ضعف .

عند اعتبار السمية، لا يمكننا إجراء تمييز بين تلك الكيماويات المصنعة بواسطة الانسان والموجودة طبيعياً - من منطلق أن كل شيء كيميائي في بنيته. فليس مصدر المادة الكيماوية هو المهم، بل خصائصه. فمثلاً، يوضح الشكل (2-21) البناء التركيبي لمركبين أحدهما طبيعي والآخر مصنع، وأن كل واحد منهما يعتبر سماً عند جرعات محددة. وتُحذر الإشارة إلى أن معظم الكيماويات، مصنعة كانت أو طبيعية، ليست سامة جداً.



سمية عالية



سمية منخفضة

الشكل (2-3): مثال عن مواد كيماوية متشابهة تركيبياً ولها قوة سمية مختلفة.

يعتبر الشكل الجزيئي أو بناء مادة كيميائية معينة أحد أهم الخصائص التي يتعين اعتبارها في تحديد سميتها. وتقتصر نظرية حالية أن الكائن الحي (يُميز) ومن ثم يتفاعل مع معظم الكيماويات التي تدخل الجسم على أساس شكلها. أن استجابات التمييز هذه يمكن أن تكون عالية الحساسية للاختلافات الدقيقة في الشكل أو البنية. فمثلاً، قد يكون جزيئان متشابهين بدرجة كبيرة في البناء لكنهما يختلفان قليلاً في الشكل، أو أن مركبين متشابهين في التركيب (isomers) ومختلفان في الخصائص قد يسبب أحدهما تأثيراً ساماً في الجسم بينما لا يتسبب الآخر في أي تأثير سام (انظر الشكل 21-3). وحقيقة، إن كثيراً من السمية هي نتاج للخلل في التمييز. بمعنى، أن الجسم عند مستوى خلوي أو كيميائي، يفضل المادة السامة على ما يقابلها تركيباً من مادة أخرى. توجد خاصية هامة أخرى تستخدم في تحديد درجة سمية مادة كيميائية معينة وهي ذوبانيتها في مذيبات مختلفة. وبشكل خاص، تقسم المركبات إلى تلك التي تذوب في الماء أو المحبة للماء (مذيبات قطبية)، وتلك التي تذوب في الدهون أو المحبة للدهون (وهي مذيبات غير قطبية). ويعتبر هذا الاختلاف مهماً جداً في تحديد مدى سهولة دخول مادة كيميائية معينة إلى الجسم، وكيف تتوزع داخله، ومدى سهولة إفرازها. وتكون الحيوانات الأكثر كفاءة في إفراز المركبات القطبية، ولهذا فإن مركباً أيونياً مثل كلوريد الصوديوم، الذي يتميز بأنه عالي الذوبانية في الماء، يفرز بسهولة. لكن مركباً غير قطبي مثل المبيد DDT، الذي يذوب في الدهون، لا يتم التخلص منه بسهولة. وفي بعض الحالات، يكون الجسم قادراً على تحويل مركبات لا قطبية إلى مقابل لها

قطبياً، وهو ما يسهل إزالتها من الجسم. ولسوء الحظ فإن ذلك ليس صحيحاً في حالة المبيد DDT، ولهذا فيمكنه البقاء في الجسم لفترات طويلة من الزمن.

8.21 السمية الكيميائية: مواد مختارة

1.8.21 العناصر الثقيلة

تشكل العناصر الثقيلة، مثل الرصاص والزرنيخ والكاديوم والكروميوم والزرنيخ والسيلينيوم وغيرها فئة رئيسية من الملوثات غير العضوية. وعادة ما يتولد التلوث بالعناصر الثقيلة عن التصنيع واستخدام المنتجات المصنعة المختلفة (مثل: المبيدات، والطلاء، والبطاريات: انظر الجزء 2.18)، لكن هذه الكيماويات قد تنتج طبيعياً أيضاً. وتميل العناصر الثقيلة التي يكون الكثير منها ساماً للنباتات والحيوانات، بأنها متحركة في سلسلة الغذاء، وهو ما يعني أنها يمكن أن تتركز حيويًا في الحيوانات - بما في ذلك الإنسان، الذي هو على رأس قائمة سلسلة الغذاء. وقد عرفت سمية بعض العناصر الثقيلة مثل الرصاص والزرنيخ منذ قرون، لكنها لم تفهم تماماً إلا منذ فترة حديثة. ونظراً لاستخدامها الواسع و/أو وجودها في الطبيعة، فإن بعض العناصر الثقيلة لها أهمية خاصة.

الرصاص

يكاد يكون موجوداً في كل مكان. فيمكن أن يوجد الرصاص في مياه الشرب، حيث يأتي من عدة مصادر. ويعتبر أهم مصدر من بين هذه المصادر لحام الرصاص وأنايب انظمة توزيع المياه، خاصة إذا تعرضت لمياه آكلة (corrosive water). وعلى الرغم من أن استخدام اللحام بالرصاص للأنايب وبناء نظم توزيع المياه قد تم منعه، إلا أن الكثير من

أنظمة توزيع المياه لا زالت تحتوي على رصاص. كما يوجد عنصر الرصاص أيضاً في الغذاء، وفي البنزين (مادة tetraethyl lead) حيث يصل إلى الهواء والترية والماء، وفي الطلاءات المؤسسة على عنصر الرصاص والصحون الحجرية سيئة الطلاء. إضافة إلى ذلك، يمكن أن يأتي عنصر الرصاص من مصادر صناعية، مثل المحارق، ومن صناعة بطاريات الرصاص الحمضية. وحيث أن التأثيرات السامة للرصاص تعتمد على التعرض الكلي، فإن التقييم البيئي يتعين أن يأخذ في الاعتبار جميع هذه المصادر.

ومقارنة بالمواد القابلة للذوبان في الدهون، فإن الرصاص يمتص قليلاً نسبياً. ففي حالة الأفراد البالغين، يمتص فقط نحو 10% من الرصاص الذي يتم بلعه عبر قناة البلعوم ويدخل مجرى الدم. وبداية يتوزع الرصاص إلى الكليتين والكبد ثم يعاد توزيعه ليصل معظمه للعظام (نحو 95%). إضافة لذلك، لا يدخل الرصاص بسهولة إلى نظام الجهاز العصبي للبالغين وذلك لأن الفاصل بين الدم/ والدماغ يمكنه منع ذلك. من ناحية أخرى، فإنه في حالة الأطفال يكون العازل بين الدم/ الدماغ لم يتطور بشكل كامل بعد، ولهذا فإن تعرض الأطفال للرصاص يمكن أن يؤثر على تطورهم الذهني.

وتجدر الإشارة إلى أن التسمم الحاد بالرصاص نادر؛ لكن حدوث تسمم مزمن بالرصاص أمر شائع. وفي البالغين، ينتج أحياناً عن التسمم المزمن بالرصاص مظاهر معدية معوية مؤلمة تعرف باسم مغص الرصاص. وبسبب الألم، كثيراً ما يجبر الأفراد الذين يعانون مغص الرصاص على البحث عن مساعدة طبية، حيث يؤدي التشخيص الصحيح للتعرض للرصاص إلى منع تطور مشاكل أكثر خطورة. كما يمكن للرصاص أن يؤثر على الجهاز

العصبي العضلي مما يقلل من صحة ونشاط عضلة المعصم والقدم. أيضاً، يؤثر التعرض للرصاص نظام تكوين الدم في الجسم . ويمكن للرصاص أن يتداخل مع عملية تصنيع مادة الهيم (heme)، وهي جزء من مركب الهيموجلوبين الناقل للأكسجين، وهو ما يؤدي إلى مرض في فقر الدم كما أن هذا العنصر يمكنه إتلاف خلايا الدم الحمراء في حالة تسمى (basophilic stripping). إن أعظم التأثيرات المرتبطة بالرصاص خطورة هي حالة تفسخ المخ والتي تعرف بمرض الرصاص الدماغي (lead encephalopathy). ويمكن أن يحدث ذلك في البالغين. فمثلاً، يعتقد المؤرخون المعاصرون أن كاليجولا (Caligula) أكثر أباطرة الرومان جنوناً، قد عانى من مرض الرصاص الدماغي نتيجة تناول أكل من أطباق قصديرية تحتوي على رصاص. وفي الوقت الحاضر، تعتبر هذه الحالة أكثر شيوعاً بين الأطفال ويمكن أن تكون غاية في الخطورة، ويقدر بأن نحو 25% من الأطفال الذين يعانون من مرض الرصاص الدماغي يموتون، وأن نحو 40% من الذين يعيشون يعانون من تأثيرات عصبية لاحقاً. وأخيراً، فقد ثبت أن الرصاص يؤثر على كلى حيوانات المختبر، ويقود إلى تعطيل وظائفها والتسبب في مرض السرطان.

الكادميوم

مثل الرصاص له مصادر كثيرة. ويعتبر الكادميوم أحد نواتج تعدين الرصاص والزنك. ويستخدم كصبغة، وكذلك ضمن المواد العازلة المقاومة للتآكل وبطاريات الكادميوم - النيكل. كما يتحرر هذا العنصر عند حرق الوقود الأحفوري. ويمكن للكادميوم أن يدخل لمياه الشرب عندما تلامس مياه أكالة أنواعاً معينة من أنابيب المياه. أو يمكنه دخول سلسلة

الغذاء عن طريق إضافة وحل الصرف الصحي للأرض، حيث يمتص هذا العنصر بواسطة النباتات ويخزن في الأوراق والبذور. وقد أصبح التأثير السلبي للكاديوم على الصحة معروفاً بعد حادثة في اليابان حيث تلوثت أراضي زراعة الأرز بمياه صرف عالية المحتوى من الكاديوم ناتجة عن مناجم الزنك. وقد ركزت نباتات الأرز المزروعة في هذه الأراضي عنصر الكاديوم داخلها وتعرض الأفراد الذين تناولوا هذا الأرز لأعراض مميزة مثل هشاشة العظام وألم حاد في المفاصل؛ وبذلك يعرف التسمم بالكاديوم باسم (itai-tai) أي مرض الأنين. نظراً لأن عنصر الكاديوم قابل للذوبان في الماء فإن 1-5% فقط من جرعة معينة يمكن أن تمتص في القناة المعدية المعوية (على الرغم من أن 10-40% يمكن أن يمتص عبر الرئتين)، ويوزع الكاديوم إلى الكليتين والكبد.

ويتسبب تسمم الكاديوم الحاد في اضطرابات معدية معوية. أما تسمم الكاديوم المزمن فتكون تأثيراته أكثر خطورة على الكليتين. وقد أظهرت دراسات على الحيوانات أن عنصر الكاديوم مسرطن، وأشار بعض الباحثين أنه قد يزيد من حدوث سرطان البروستاتا في الرجال كبار السن.

الزرنِيخ:

يوجد طبيعياً في صخر الأديم والتربة، وكفضلات لعمليات الصهر وصناعة بعض المواد مثل مبيدات الآفات ومبيدات الحشائش. وقد تنقل حبيبات الزرنِيخ المحمولة بواسطة الهواء لمسافات طويلة وتخترق بعمق إلى داخل الرئتين بعد استنشاقها. كما يمتص الزرنِيخ بسهولة بواسطة النباتات التي تستخدم كغذاء، لكن الكمية الممتصة من هذا العنصر تعتمد

على الرقم الهيدروجيني (pH) للتربة. ويعتبر الزرنيخ عنصراً مغذياً ضرورياً، ولكن بكميات صغيرة جداً ويوجد أربعة أنواع من الزرنيخ: الزرنيخات العضوية (organoarsenics)، والزرنيخ الخماسي (pentavalent arsenic)، والزرنيخ ثلاثي التكافؤ (trivalent arsenic)، وغاز الزرنيخ (arsine gas).

يمكن أن يفرز الزرنيخ بسرعة نسبياً، إذ أن الفترة النصف عمرية لا تتعدى يومين. وعلى الرغم من أن التأثيرات الحادة للتسمم بالزرنيخ يُسلط عليها الضوء بالدرجة الأولى في الروايات البوليسية، إلا أن التسمم المزمن بالزرنيخ يتجلى في أنواع عدة من التأثيرات المزمنة السامة. وتبرز الكثير من هذه التأثيرات نتيجة لقدرة الزرنيخ على رفع نفاذية الشعيرات الدموية بالمناطق المختلفة في الجسم. وقد تم استغلال هذه القدرة لقرون، من الأزمنة القديمة وحتى الحقبة الحديثة فعلى سبيل المثال، تناولت الإمبراطورة ثيودورا الزرنيخ لتحسين مظهرها؛ فأدى الزرنيخ إلى تكسير الشعيرات الدموية في خديها، مولداً بشرة وردية جميلة. ولكن هذه الزيادة في النفاذية ضارة؛ فهي تسمح للبلازما بالتسرب إلى داخل الأنسجة، مما يؤدي أحياناً إلى إسهال حاد وضرر للكليتين. كما يتلف الزرنيخ كلاً من النظام العصبي المركزي، ويتسبب في التهاب الأعصاب المحيطية مما ينتج عنه تلف للمخ، والكبد، واختراق الترسبات الدهنية مسبباً موت الأنسجة. إضافة لذلك، فقد صنفت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) عنصر الزرنيخ على أنه مسرطن في الإنسان من نوع A (Type A) أي مسرطن للإنسان استناداً إلى دراسات وبائية وأن سرطان الجلد والرئتين هما النوعان الرئيسيان من السرطان الناتج عن التعرض للزرنيخ.

2.8.21 النويات المشعة غير العضوية (Inorganic Radionuclides)

تتحلل بعض العناصر غير المستقرة ذاتياً إلى تشكيلات ذرية مختلفة، وخلال هذه العملية تطلق إشعاعاً يتكون من جسيمات ألفا وبيتا، أو أشعة جاما. ويمكن لهذه الجسيمات والأشعة أن تتلف أنسجة حية و/ أو تتسبب في تطور سرطان، حيث تعتمد درجة الضرر على نوع الإشعاع وطرق التعرض (بمعنى، من خلال الاستنشاق، أو البلع، أو إشعاع خارجي). وبعد بدء عنصر معين في التحلل، فإنه يمر خلال سلسلة من التشكلات، تعرف بالنظائر. والنظائر هي ببساطة ذرات يمكن التعرف عليها بواسطة الوزن الذري، وهو رقم يشير إلى عدد الجسيمات المتعادلة والجسيمات ذات الشحنة داخل النواة. فاليورانيوم طبيعياً، على سبيل المثال، مخلوط من ثلاثة نظائر لها أوزان ذرية هي 234 و 235 و 238.

والنويات المشعة (Radionuclides) هي ذرات (نويات) تتعرض للتحلل التلقائي، وتطلق إشعاعاً مصاحباً لتفككها لتكوين نظائر ذات أوزان ذرية أقل. ويعبر عن النشاط الإشعاعي لنظير معين بوحدات تسمى البيكوكوري (pCi) التي تمثل عدد تفككات النظير في الثانية الواحدة: حيث يساوي البيكوكوري (pCi) 3.7×10^{-2} تفككاً في الثانية. [ملحوظة: تستمر النويات المشعة في التحلل حتى تحقق شكلاً مستقرًا، يكون في العادة تشكيلاً لعنصر آخر مختلف تماماً].

(*) هناك وحدة أخرى شائعة الاستعمال للتعبير عن النشاط الإشعاعي وهي البيكوبيل (B) التي تعرف بأنها عدد التفككات في الثانية (S^{-1}).
بيكوبيل (B) = 10×3.7^2 بيكوكوري.

يعتبر التحلل الإشعاعي عملية طبيعية. وحقيقة، فإن كل شخص يكون قد تعرض لبعض الإشعاع الصادر من الأشعة الكونية ومن التربة المشعة والصخور. وتنتج سلسلة النظائر الثلاثة الموجودة طبيعياً عن تحلل نظائر اليورانيوم 238، واليورانيوم 235، واليورانيوم 232. وبذلك فإن النويات المشعة التي توجد طبيعياً في مياه الشرب سلسلة اليورانيوم 238 (التي يؤدي تحللها إلى تكوين النظائر: اليورانيوم 234، والراديوم 226، والرادون 222 وسلسلة الثوريوم (التي تشمل نواتج تحللها الراديوم 228) هي الأكثر أهمية على الإطلاق. وتشكل النظائر المشعة المصنعة، مثل السترانشيوم 90 مخاطر صحية أيضاً، لكن هذه النظائر عموماً توجد في البيئة بتركيزات منخفضة مقارنة بالنويات المشعة الموجودة طبيعياً. لكنه يلاحظ في حالة تلوث موقع محدد، كما في حالة مواقع التخلص من المخلفات النووية وحوادث المحطات النووية لتوليد الطاقة (مثل تشرنوبل)، قد تطلق تركيزات كافية من النويات المشعة تهدد صحة الانسان والبيئة.

إن الاهتمام بالنويات المشعة يركز كثيراً على مدى قدرتها على التسبب بمرض السرطان. وقد يكون الراديوم 226، الذي له فترة نصف عمر تساوي 1622 سنة، هو النظير المشع الأكثر أهمية الذي يمكن أن يعثر عليه بمياه الشرب. ويترسب هذا العنصر في العظام ويمكنه أن يتسبب في سرطان العظام. وأحد نواتج تحلل الراديوم 226 هو غاز الرادون، الذي يعرف بالنظير رادون 222، وله فترة نصف عمرية تساوي 3.85 يوم. ويمكن أن يؤدي استنشاق نواتج التحلل للعنصر رادون 222 الذي له فترة حياة قصيرة في سرطان الرئتين، لكنه لا يعرف إلا القليل عن مخاطر بلع الرادون. وحديثاً أصبح هذا النظير موضوعاً جديراً

بالاهتمام بالنسبة للعامة لاكتشاف وجوده في المنازل ومبان أخرى. إن معظم إجمالي الرادون 222 الذي يدخل المنازل يأتي عن طريق التربة، لكنه قد يدخل أيضاً على شكل غاز في صورته القابلة للذوبان في مياه الشرب ومياه الغسيل. ويحدث طرد الغاز عندما يسخن الماء و/أو يتم تهويته، كما يحدث أثناء غسيل الملابس والأواني، والاستحمام بأنواعه.

3.8.21 المبيدات الحشرية

يمكن تقسيم المبيدات الحشرية إلى المركبات الكلورية العضوية (Organochlorine) والمركبات الفوسفورية العضوية (Organophosphorus) والكربامات (carbamate)، إضافة لمبيدات حشرية نباتية (botanical) [انظر أيضاً الجزء 1.2.17]. وتمتلك المبيدات الحشرية داخل كل مجموعة خصائص متشابهة.

المبيدات الحشرية المكلورة العضوية Organochlorine Insecticides

تشمل هذه الفئة التي طورت في الثلاثينيات والأربعينيات من القرن الماضي مركبات الايثانات المكلورة (chlorinated ethanes)، والسيكلوداين المكلورة (chlorinated cyclodienes) ومركبات مكلورة أخرى. ويعتبر مركب د.د.ت (Dichlorodiphenyltrichloroethane) الأكثر شهرة من بين المبيدات الحشرية المكلورة. ومنذ تم تصنيعه في عام 1943، استخدم بكثافة عالمياً في الزراعة من نهاية الحرب العالمية الثانية وحتى عام 1972، عندما منع استخدامه في الولايات المتحدة. إن هذا المركب القابل للذوبان في الدهون يتم تخزينه في الدهن. وفي الحقيقة، يحتوى الدهن لمعظم المقيمين في الولايات المتحدة د.د.ت بتركيزات

تتراوح ما بين 5-7 مجم لكل كجم^(*) ويستمر بقاء مركب د.د.ت مدة طويلة جداً في البيئة ويتضخم حيويًا في سلسلة الغذاء. بمعنى، أن الكائنات الصغيرة التي تمتص المركب، تُلتهم بواسطة الكائنات الأكبر، ويستمر ذلك حتى يصل د.د.ت إلى تراكيز عالية نسبياً في الفقاريات الكبيرة، مثل الأسماك، التي تُؤكل بواسطة الإنسان وحيوانات كبيرة أخرى.

وعموماً، فإن مركب د.د.ت سام للإنسان ومعظم الأحياء الحيوانية الأخرى فقط عند أخذ جرعات عالية جداً. وبسبب سميته المنخفضة، فقد أضيف بكميات أكبر بكثير مما هو ضروري. بعد ذلك، وفي الستينيات من القرن الماضي أصبحت تأثيرات الاستعمال بكميات كبيرة أكثر وضوحاً. فعلى سبيل المثال، بعض أنواع الطيور (مثل الصقور) أصبحت تنتج بيضاً ذا قشرة قابلة للكسر بسهولة قبل أن تفقس، وهو ما يهدد بقاءها كنوع. كذلك، فإن الأسماك أيضاً عرضة بدرجة عالية جداً لتأثير د.د.ت فقد أدى وصول المبيد إلى الجداول والأنهار بعد أمطار غزيرة إلى هلاك أسماك كثيرة.

تشكل مركبات السايكلوداين المكلورة شعبة هامة من مركبات الكلورين العضوية. وتضم هذه المبيدات الكيماوية التي طورت في الأربعينيات من القرن الماضي الألدرين (aldrin)، والداي إدرين (dieldrin)، والإندرين (endrin)، والهيتاكلور (heptachlor)، والكلوردين (chlordan). وتعتبر مركبات السايكلوداين مشابهة لمركب د.د.ت لكنها أكثر سمية وتسببت في الكثير من الوفيات للبشر (غالباً من بين عمال المزارع الذين يتعاملون مع

(*) هذه الوحدات تعادل الجزء في المليون.

المبيد مباشرة). وتكون سمية هذه المركبات أعلى بكثير للإنسان لأنها تمتص بسهولة من خلال الجلد. ومثل د.د.ت فهي قابلة للذوبان في الدهون وتخزن فيه، وهي بذلك تضخم حيويًا في البيئة. كما أنها أيضاً سببت مرض السرطان في حيوانات المعمل. وبذلك فإن تسجيل هذه المبيدات للاستخدام على المحاصيل الزراعية قد تم تعليقه في منتصف السبعينيات من القرن الماضي. وتشبه مركبات الهيدروكربونات الكلورية، مثل الليندين (lindane)، والتوكسافين (toxaphene)، والميركس (mirex)، والكيبون (kepone) مركب د.د.ت. وعلى ذلك، يمكننا القول بشكل عام أن جميع المبيدات الحشرية التابعة للكلورين العضوي تسبب تحفيزاً للجهاز العصبي المركزي، وتزيد من إمكانية الإصابة بالسرطان بين حيوانات المعمل (مركب الليندين هو أقل خطورة)، وأنها تبقى في البيئة إلى درجة ما.

المبيدات الحشرية الفوسفورية العضوية

إن المركبات الفوسفورية العضوية لا تبقى لمدة طويلة في البيئة وتتميز بأن لها قدرة منخفضة على إحداث السرطان، ولهذا، فإن المبيدات الحشرية التي أسست على هذه المركبات قد حلت بدرجة كبيرة محل مبيدات الحشرات الهيدروكربونية الكلورية. لكنه يلاحظ أن المركبات التي تحتوي على الفوسفور لها سمية أكثر حدة على الإنسان مقارنة بالمركبات الكلورية العضوية وهي المسبب الأكثر لتسمم البشر بالمبيدات الحشرية. ولحسن الحظ فإن الاختبارات المعملية والترياق المضاد متاحة لمعالجة حالات التسمم الحادة بالمبيدات الفوسفورية العضوية.

يعتبر الباراثاين (parathion) نموذجاً للمبيدات الحشرية الفوسفورية العضوية، الذي يتعين تحويله أيضاً إلى مركب الباراكسون (paraxon) ليحدث تأثيره السام. وينبع هذا التأثير السام من قدرة هذا المركب على تثبيط الانزيم (cholinesterase)، وهي مادة كيميائية حاسمة لتنظيم الناقل العصبي الذي يسمى (acetylcholine). ولذلك فإن تأثيرات التسمم الحادة بالمبيدات الحشرية الفوسفورية العضوية تشمل انقباض العضلات، ومعدلات نبض قلب منخفضة، وشلل عضلات التنفس، والتوتر، والتشنج، وأخيراً الموت. وتوجد مبيدات حشرية من المركبات الفوسفورية العضوية، مثل المالمثيون (malathion)، التي هي أقل سمية في الجرعات الحادة مقارنة بالباراثاين.

وعموماً، فإن المبيدات الحشرية الفوسفورية العضوية المتاحة بشكل واسع في الوقت الحاضر لا تسبب سمية عصبية لاحقاً. لكن، بعض المبيدات المتاحة سابقاً وجد أنها تسبب مشاكل عصبية لاحقاً، مثل الضعف العام، وفقدان تناسق حركة العضلات، والاضطرابات الحسية.

الكربامات (Carbamats)

تتميز مبيدات الحشرات من الكربامات، التي تضم المبيد كارباريل (Carbaryl) والألديكارب (aldicarb)، بأن لها سمية تشبه كثيراً تلك الخاصة بمبيدات الحشرات الفوسفورية العضوية. ومثل المبيدات الفوسفورية العضوية فإن مبيدات الكربامات الواسعة الاستعمال تعمل أيضاً كمثبط لأنزيم (Cholinesterase)، لكن التأثيرات السامة للكربامات يمكن أن تلغى بسهولة أكبر مقارنة بالمركبات الفوسفورية العضوية. إضافة إلى

ذلك، فإنه يبدو أن الأدلة الحالية تشير إلى أن التسرطن هو أحد التأثيرات السامة للكاربامات.

وعلى الرغم من أن معظم هذه الكيماويات لا تبقى في البيئة لمدة طويلة، فإن الألديكارب (aldicarb) قد تكون استثناءً. فعند استخدام مبيد الالديكارب في لونغ آيلند، بولاية نيويورك على محصول البطاطس، فإنه أدى إلى تلوث الطبقة الحاملة للمياه الجوفية هناك. ويقدر أن مستويات من هذا المبيد بمقدار 6 ميكروجرام في اللتر الواحد قد تبقى لمدة تصل إلى 20 عاماً .

4.8.21 مبيدات الحشائش

في الولايات المتحدة الأمريكية تستخدم مبيدات الحشائش (وهي مواد كيماوية تقتل النباتات)، بكميات أكبر كثيراً من المبيدات الحشرية. وتضاف مبيدات الحشائش مباشرة للتربة، ولهذا يمكنها، في بعض الحالات، الوصول بسهولة للمياه الجوفية. وتشمل مركبات الكلوروفينوكسي (Chlorophenoxy) كل من مبيدات الحشائش (2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid -T) و(2,4-D:dichlorophenoxy acetic acid). و(2,4,5-TP) trichlorophenoxypropionic acid or silvex). وتعمل مبيدات الحشائش هذه كهرمونات نمو، وتدفع نمو النبات بدرجة تفوق قدرته على توفير المغذيات الضرورية. وعلى الرغم من أن هذه المركبات قد يكون لها تأثيرات سامة على الكبد، والكليتين، والنظام العصبي المركزي، إلا أن التقارير الكلينيكية بالتسمم منها نادرة. وهذه المركبات، التي لها فترة نصف عمرية تبلغ نحو 24 ساعة، يتم إفرازها بسرعة مع بول الإنسان.

إن واحداً من أكثر مركبات الكلوروفينوكسي شهرة وإثارة للجدل هو المبيد 2,4,5-T الذي دمج مع المبيد 2,4-D لتكوين مركب مزيل للأوراق أشير إليه باسم العامل البرتقالي (Agent Orange) الذي استخدم في حرب فيتنام. لكنه، وأثناء التحليق الاصطناعي للمركب 2,4,5-T و 2,4,5-TP تكون ناتج ثانوي خطير جداً دون قصد وهو مركب تيتراكلورو داايوكسين (TCDD) أو اختصاراً داايوكسين (dioxin). ويعتبر الداايوكسين (الذي يمكن أيضاً أن ينتج أثناء حرق مواد معينة) المادة الكيماوية المصنعة الأكثر سمية على الإطلاق، فعند وجوده بجرعات كافية، يصبح الداايوكسين مشوهاً ومسرطناً قوياً جداً لحيوانات المعمل، ويتسبب في إتلاف الكبد وضرراً عاماً للأنسجة. أما عند توفره بجرعات منخفضة، فإنه يتسبب في شكل من حب الشباب المميز يسمى (chloracne) يتركز بين العينين وخط الشعر.

إن التقارير الكلينيكية عن تسمم حاد نتيجة لمادة الداايوكسين نادرة، وبذلك فإنه يبدو حتى الآن أن حب الشباب المميز هو أسوأ تأثيراً على الإنسان. وتوجد اختلافات كبيرة جداً بين الأنواع من حيث تأثير مادة الداايوكسين عليها: فمثلاً LD_{50} لخنزير غينيا تبلغ نحو $10000/1$ من LD_{50} الخاصة بحيوانات الهمستر (الشبيه بالجرذان). ولحسن الحظ فإن الشواهد الحالية تشير إلى أن تفاعل الإنسان تجاه مادة الداايوكسين تميل لأن تكون مثل تلك الخاصة بجرذان التجارب وليس مثل خنازير غينيا. وتجدد الإشارة إلى أنه يتعين اعتبار أن التلوث بمادة الداايوكسين مشكلة بيئية خطيرة. وفي مدينة (Times Beach) بولاية ميزوري أجبث تلوث بمادة الداايوكسين هجر 800 أسرة لمنازلهم عام 1984.

5.8.21 الهيدروكربونات المهلجنة

الهيدروكربونات المهلجنة شائعة نظراً لاستخدامها بشكل موسع كمذيبات فعالة، وفي ذات الوقت هي غير قابلة للاشتعال بخلاف الكيروسين أو الجازولين. وتتكون أيضاً الهيدروكربونات المهلجنة أثناء كلورة مياه الشرب عندما يتحد الكلور مع المادة العضوية في الماء.

إن واحداً من أقدم وأبسط هذه المركبات هو الكربون رباعي الكلور (CCL_4)، الذي استخدم بكثرة كمذيب ومادة تنظيف جاف؛ إضافة لذلك فهو مركب غير قابل للاشتعال أيضاً مما جعله يستخدم كمادة لإطفاء الحرائق. (إن استخدام الكربون رباعي الكلور كمادة للتنظيف الجاف قد أوقف بعد أن تبين أنه يتسبب في إتلاف الكبد).

وتقيل الهيدروكربونات المهلجنة *trichloroethene* و *halothane* و *chloroform*، وغيرها لتكون شبيهة بالكربون رباعي الكلور من ناحية تأثيراتها على الصحة. ويتسبب الكربون رباعي الكلور عند جرعات عالية في تشييط الجهاز العصبي المركزي CNS - لدرجة أنه استخدم مرة كمادة مخدرة. كما يمكنه أن يحسس عضلة القلب للكاتيكولامينات وهي هرمونات مثل (epinephrine) مسبباً حدوث السكتة القلبية، إضافة لتلف الكليتين والكبد والسرطان لحيوانات التجارب. ويمكن أن يؤدي ارتفاع مستويات الكحول في الدم إلى تقوية التأثيرات المدمرة لمادة الكربون رباعي الكلور على المواد العضوية الداخلية. وتكتسب هذه المادة سميتها نظراً لتحويلها في الكبد إلى كربون ثلاثي الكلور (CCL_3)، الذي هو عبارة عن

شق كيميائي حر قادر على تخفيز زيادة نسبة الأوكسجين (peroxidation) للروابط الثنائية في الدهون وتسميم إنزيمات تصنيع البروتين.

ويلخص الجدول (5.21) التأثيرات الصحية للهيدروكربونات المهلجنة المختلفة. وتشير العلامة (+) إلى تأثير ضار، بينما تشير العلامة (-) إلى انعدام أي تأثير، بينما تشير العلامتان الموجبة والسالبة معاً إلى تأثير أقل معنوية. ومن بين مجموعة الميثينات (methanes) مركب الكلوروفورم، وهو تراي هالوميثان (trihalomethane) الذي يتكون أثناء كلورة مياه الشرب. أما مركب الكلورو إيثيلين (chloroethylene) الذي يسمى أيضاً (vinyl chloride) فيعطى ثلاثة علامات موجبة تحت عمود السرطان لأن قدرته المسرطنة للإنسان مؤكدة. بينما تأكد أن المركبات الأخرى مسرطنة محتملة للإنسان تأسيساً على نتائج دراسات أجريت على حيوانات. وبهذا الصدد، لا يجب أن نغفل مركبي التراي كلوروايثيلين (trichloroethylene) وتيتراكلوروايثيلين (tetrachloroethylene) الذي يسمى أيضاً (perchloroethylene). فهذه المركبات جميعاً ملوثات شائعة في مياه الشرب؛ على الرغم من أنها أدرجت بالجدول على أنها مسرطنات محتملة، فهي تسبب السرطان في حيوانات المعامل فقط عند جرعات عالية جداً. وقد لوحظ أيضاً أنه عندما يتحلل كل من مركبي البركلوروايثيلين والتيتراكلوروايثيلين طبيعياً في المياه الجوفية يتكون مركب الكلوروايثيلين أو vinyl chloride كنتاج لهذا التحلل.

جدول (5-21): التأثيرات الصحية لبعض مركبات الهيدروكربونات المهلجنة المكورة.

(+) = تأثير ضار، (-) = لا تأثير، (+) = تأثير قليل الأهمية.

السرطان	إتلاف الكليتين	إتلاف الكبد	إيقاف القلب	CNS Depression	
: (Methanes) الميثينات					
+	++	++++	+	+	Carbon tetrachloride
+	+++	+++	+	+	Chloroform
+	-	+	-	+	Dichloromethane (methylene chloride)
: (Ethanes) ايثنات					
NDA ^a	NDA ^a	+	+	+	1,1-Dichloroethane
+	-	+	NDA ^a	+	2,2-Dichloroethane
	++	+ -	+	+	1,1,1-Trichloroethane
+	-	++	NDA ^a	+	1,1,2-Trichloroethane
NDA ^a	++	++	NDA ^a	+	1,1,2,2-Tetrachloroethane
+	+	NDA ^a	NDA ^a	+	Hexachloroethane
: (Ethylenes) الايثيلينات					
+++	-	++	NDA ^a	+	Chloroethylene (vinyl chloride)
+	-	+++	NDA ^a	+	1,1-Dichloroethylene (vinylidene chloride)
NDA ^a	NDA ^a	++	NDA ^a	+	1,2-trans -Dichloroethylene
+	+ -	+	+	+	Trichloroethylene
+	+ -	+ -	-	+	Tetrachloroethylene (perchloroethylene)

NDA^a = لا تتوفر بيانات.

المراجع، ولمزيد الاطلاع

- Bitton G. (1994) *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss, New York.
- Chiras D.D. (1985) *Environmental Science*. Benjamin/Cummings, Menlo Park, California.
- Cockerham L.G. and Sane B.S., Editors (1994) *Basic Environmental Toxicology*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Hodgson E. and Levi P.E. (1987) *A Textbook of Modern Toxicology*. Appleton and Lange, Norwalk, Connecticut.
- Kolluru R.V. and Kamrin M.A. (1993) *Environmental Strategies Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Landis W.G., and Yu M.H. (1995) *Introduction to Environmental Toxicology*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Philip R.B. (1995) *Environmental Hazards and Human Health*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Rodricks J.V. (1992) *Calculated Risk: The Toxicity and Human Health Risks of Chemicals in Our Environment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- U.S. EPA (1989) *Management and Communication of Drinking Water Contamination*. EPA 625/4-89-024. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

مسائل حسابية وأسئلة

1. ماهي الحادثة في عام 1962 التي كان لها وقع وصدى في خلق اهتمام بالبيئة؟ لماذا؟
2. لماذا تستخدم الحيوانات الصغيرة في اختبارات المعامل التي تتعلق بالمواد السامة؟
3. كيف تحدد درجة أمان المواد الكيماوية حسب التعرض لها؟
4. ما هو تركيز التعرض؟ جرعة التعرض؟ كيف يرتبط هذان المفهومان معاً؟
5. يفترض أن الأفراد البالغين يستهلكون 2 لتر من الماء يومياً. إذا كانت مادة معينة توجد بتركيز قدرة 10 مجم في اللتر، ما هو متوسط ما يستهلكه الفرد من هذه المادة.
6. اشرح أوجه التشابه والاختلافات بين العوامل المسرطنة carcinogens، والمسببة للتطفر (mutagens) والماسخة (teratogens).
7. ما هو مفهوم LD₅₀؟ وكيف يستخدم؟
8. ما هي مزايا اختبارات السمية على المدى القصير؟
9. ما هو الدور الذي تلعبه الجينات البادئات (initiators) والمحفزات (promoters) والمثبطات (suppressors) في تكون السرطان؟
10. لماذا تكون بعض المركبات سامة جداً عندما تحقن، لكنها غير ضارة عندما تبتلع؟
11. هل يمكن التنبؤ إذا ما كان مركب كيماوي جديد مسرطناً عن طريق تركيبته الكيميائية؟ كيف ستقوم بذلك؟
12. ما هي بعض مصادر العناصر الثقيلة في البيئة؟

13. اعطِ مثالاً عن مادة كيميائية تتحول إلى مادة أكثر سمية من خلال التحولات الحيوية داخل الجسم.

14. عرّف السمية.

15. ما هي بعض المحددات في استخدام الدراسات الوبائية لتقييم سمية أو قدرة مادة كيميائية معينة على التسبب في السرطان؟ هل النتائج السالبة تشير إلى أن المادة غير مسرطنة؟ لماذا ولم لا؟

16. ما هي بعض الاختبارات الإحصائية التي يمكن أن استخدامها لتقييم سمية الدفق الصادر عن محطات معالجة المياه العادمة؟

الباب الثاني والعشرون
تقييم المخاطرة أو المجازفة



يمكن أن يستخدم تقييم المجازفة لتحديد المخاطر التي يتعرض لها السباحون المصطافون من الكائنات الدقيقة
المرضية في الماء.

1.22 مفهوم تقييم المجازفة

المخاطرة، التي هي تكتنف جميع أشكال الحياة، خاصة ملازمة للوجود الإنساني
على الدوام. ولهذا فهي إحدى المدخلات في كل حالات صنع القرار. لكن تقييم المجازفة أو
التحليل، يعني أشياء مختلفة لمختلف الناس: فالمحللون في شارع المال بنيويورك يقيمون

المجازفات المالية، وشركات التأمين تضع في الحسبان المجازفات الفعلية، بينما تقدر الوكالات التنظيمية مخاطر الموت نتيجة الحوادث بالمنشآت النووية، أو حدوث سرطان من الانبعاثات الصناعية، أو فقدان النظم البيئية المصاحبة لزيادة أعداد السكان. إن هذه النشاطات التي تبدو متباعدة تشترك جميعها في مفهوم ظاهرة ويمكن قياسها تسمى المخاطرة ويمكن التعبير عنها على أساس الاحتمالية. وعليه، يمكن تعريف تقييم المجازفة على أنها العملية التي يتم من خلالها تقدير كل من احتمالية حدوث أمر ما والقوة المحتملة لتأثيراته الضارة مثلاً: اقتصادية، أو مرتبطة بالصحة والأمان، أو بيئية - على مدى فترة زمنية محددة. مثلاً، يمكننا تحديد احتمالية أن مفاعلاً كيميائياً سوف يتعرض لخلل وما هو التأثير المحتمل لانبعاث مفاجئ لمحتوياته على المنطقة القريبة منه على أساس الضرر للأفراد والخسارة في الممتلكات على امتداد فترة من الأيام. إضافة لذلك، يمكننا تقدير احتمالية حدوث سرطان في التجمع السكاني حيث سكبت المادة الكيماوية على مدى سنوات. أو، بالنسبة لنوع آخر من تقييم المخاطرة، يمكننا حساب المخاطرة الصحية المصاحبة لوجود كائنات ممرضة في المياه أو وجود المبيدات في الغذاء.

وبالطبع، توجد عدة أنواع لتقييم المخاطرة. فقد برز مفهوم تقييم المخاطرة كمجال علمي رسمي في الأربعينيات والخمسينيات من القرن الماضي، بالتوازي مع تقدم الصناعة النووية. واستخدمت تحاليل المخاطرة - الأمان منذ الخمسينيات من القرن الماضي على أقل تقدير، في مجالات تكرير النفط، والصناعات الكيماوية، وكذلك في علوم الفضاء.

لكن بدايات تقييم المخاطر الصحية نشأت في عام 1986 بالتزامن مع نشر الدليل الإرشادي لتقييم المخاطر للمواد المسرطنة (Guidelines For Carcinogenic Risk Assessment) بواسطة "وكالة حماية البيئة" الأمريكية (EPA).
ونهتم في هذا الباب بنوعين من تقييم المخاطرة:

المخاطر المرتبطة بالصحة

يكون التركيز في هذا النوع من المخاطر على الصحة العامة للبشر، وأساساً خارج مكان العمل. وتشمل المخاطر المرتبطة بالصحة عادة الاحتمالية العالية، والتبعات المنخفضة، والتعرضات المزمدة مع فترات كمون طويلة وتأثيرات آجلة مما يجعل تأسيس علاقات ارتباط بين السبب والأثر مهمة صعبة. [ملحوظة: هذا الشق يشمل أيضاً المخاطر الميكروبية، التي عادة ما يكون لها تأثيرات حادة قصيرة المدى. لكنه يلاحظ أن تبعات الإصابة الميكروبية يمكنها أن تستمر على امتداد فترة حياة الفرد].

المخاطر البيئية

يكون التركيز في هذا النوع من المخاطر على التداخلات التي يصعب حصرها بين السكان، والتجمعات السكانية، والنظم الحيوية (بما في ذلك السلاسل الغذائية) عند كل من مستوياتها الدقيقة والكبيرة. وتضم المخاطر البيئية عادة كلا من الكوارث قصيرة الأمد، مثل انسكاب الزيت، والتعرضات طويلة الأمد لمواد خطيرة.

ولكن بغض النظر عن موضوع الاهتمام، فإن عملية تقييم المخاطرة تتكون من أربع خطوات أساسية:

التعرف على الخطر

أي تحديد الخطر وطبيعة الضرر: مثلاً: التعرف على ملوث كيميائي، مثل الرصاص أو رباعي كلوريد الكربون (carbon tetrachloride)، وتوثيق تأثيراته السامة على البشر.

تقييم التعرض

تحديد تركيز ملوث معين في البيئة وتقدير معدل امتصاصه بواسطة كائنات حية محددة؛ مثلاً: إيجاد تركيز مادة سامة معينة (aflatoxin) في زبدة الفول السوداني وتحديد الجرعة التي يمكن أن يأخذها الفرد العادي.

تقييم الجرعة - الاستجابة

وهو التقدير الكمي للتأثيرات الناتجة عن التعرض لعامل خطر على أساس درجة التعرض. ويعبر عادة على هذا التقييم رياضياً في شكل بياني يوضح الاستجابة في كائنات حية لجرعات متزايدة من العامل الخطر.

تحديد خصائص المخاطرة

وذلك بتقدير الأثر الممكن لخطر معين استناداً إلى حدة تأثيراته ومقدار التعرض. وحالما تصنف المخاطر يتم تقييم الخيارات التنظيمية المختلفة في عملية تسمى إدارة المخاطر (risk management)، التي تضم اعتبارات لقضايا اجتماعية، وسياسية واقتصادية إضافة للمشاكل الهندسية المصاحبة لحل معين تم اقتراحه. إن أحد مكونات إدارة المخاطر المهمة هي مخاطر التواصل (risk communication)، التي هي عبارة عن العملية التفاعلية للمعلومات وتبادل الآراء فيما بين الأفراد، والجماعات، والمؤسسات. وتشمل مخاطر التواصل نقل معلومات عن المخاطرة من الخبير إلى الحضور من غير الخبراء. وحتى تكون فعالة، فإن

مخاطر التواصل يجب أن توفر ساحة لمناقشات متوازنة لطبيعة المخاطرة، يتمخض عنها فهم يسمح بتقييم الاستفادة من تقليل المخاطر مقارنة بالتكاليف .

وفي الولايات المتحدة، أدى إقرار القوانين الفيدرالية وتلك الصادرة عن الولايات من أجل حماية الصحة العامة والبيئة إلى التوسع في تطبيق مبدأ تقييم المخاطرة. وتشمل الوكالات الكبرى التي تقوم بشكل روتيني بتقييم المخاطر كل من إدارة الأدوية والغذاء (FDA)، ووكالة حماية البيئة (EPA)، وإدارة الصحة والأمان الوظيفي (OSHA). ومع الوكالات التابعة للولاية تستخدم هذه الوكالات التنظيمية المختصة بتقييم المخاطر في عدد من الحالات:

- وضع المعايير لتراكيز الكيماويات السامة أو الكائنات الدقيقة الممرضة في المياه والغذاء.
- القيام بتحليل الأساسية للمواقع الملوثة لتحديد مدى الحاجة لإجراء تصحيحي ومستوى التنظيف اللازم.
- القيام بتحليل الفائدة/ التكلفة لتنظيف موقع ملوث أو خيارات المعالجة (بما في ذلك عمليات المعالجة لتقليل التعرض للكائنات الممرضة).
- تطوير أهداف التنظيف للملوثات التي لا يوجد لها معايير رقمية منشورة عن السلطات الفيدرالية أو الولاية، وتقييم معايير قياسية منشورة ودلائل إرشادية مقبولة (مثلاً: إقرار حدود تركيز بديلة).
- تأسيس سيناريوهات تقوم على السؤال (ماذا لو؟) لمقارنة تأثير بدائل المعاملة أو المعالجة لوضع أولويات العمل من أجل التصحيح.
- تقييم التقنيات الموجودة والجديدة من أجل الوقاية، أو السيطرة أو تخفيف المخاطر بفعالية.

• خلق اهتمام بالصحة العامة بين الناس وتطوير تطلعات ثابتة حول الصحة العامة بين المناطق المختلفة.

يوفر تقييم المخاطر إطاراً فعالاً لتحديد الاستعجال النسبي للمشاكل وتخصيص الموارد لتقليل المخاطر. وباستخدام نتائج تحاليل المخاطرة، يمكن توجيه جهود الوقاية، أو العلاج أو السيطرة تجاه المناطق أو المواقف التي يمكن فيها تحقيق أعظم تخفيض للمخاطرة بالموارد المتاحة. لكنه يلاحظ أن تقييم المخاطر ليست إجراءً مطلقاً يتم إجراؤه في فراغ؛ بل هو عملية تقييمية ومقارنة متعددة الجوانب. وبذلك، لتقييم المخاطرة، من الضروري مقارنة مخاطرة ما بعدد آخر من المخاطر. وفي الحقيقة، فإن مقارنة مخاطرات محتملة مصاحبة لعدد من المسائل أو القضايا قد تم تطويرها إلى موضوع فرعي لتقييم المخاطر يسمى تقييم المخاطر المقارن (comparative risk assessment). ويوضح الجدول (1-22) بعض مصادر المخاطر الشائعة فهنا مثلاً، نلاحظ أن المخاطر من التعرض الكيميائي صغيرة نسبياً مقارنة بتلك المصاحبة لقيادة سيارة أو تدخين سجائر.

جدول (1-22): أمثلة لبعض مصادر المخاطر الشائعة في الولايات المتحدة.

المخاطرة	خطر الوفاة طوال عمر الانسان
سرطان نتيجة لتدخين السجائر (علبة يومياً)	4:1
الموت في حادث سيارة	100:2
الانتحار	100:1
موت نتيجة حادث في البيت	100:1
سرطان نتيجة التعرض للرادون في البيت	1000:3
التعرض لسموم الفطريات في زبدة الفول السوداني	10000:6
الإسهال نتيجة لإصابة فيروسية	10000:1
التعرض لأقصى مستويات التلوث الكيميائي المعتمدة لدى وكالة حماية البيئة (EPA)	10000:1 - 10000000:1

تتيح لنا مقارنة المخاطر المختلفة استيعاب المقادير غير الشائعة ذات العلاقة وفهم مستوى أو حجم المخاطرة المصاحبة لمجازفة معينة. لكن المقارنة بمخاطر أخرى لا يمكنها بحد ذاتها تأسيس القابلية لمخاطرة ما. وعليه، فإذا كانت احتمالية الموت نتيجة مجازفة غير معروفة سابقاً تساوي تقريباً تلك نتيجة مجازفة معروفة لا يعني بالضرورة أن المجازفتين مقبولتان بنفس القدر. وعموماً، فإن مقارنة المخاطر من منظور واحد غير مجد عندما ينظر إلى المخاطر بشكل واسع على أنها مختلفة نوعياً. بل يجب علينا أن نأخذ في الاعتبار عوامل نوعية محددة تؤثر على الكيفية التي ينظر بها إلى المخاطرة وتقييمها وذلك عند اختيار المخاطر التي ستتم مقارنتها. إن بعض العوامل المؤهلة مدرجة في الجدول (22-2). كما يتعين أيضاً فهم الفرضية الأساسية بأن (المخاطرة الطوعية هي دائماً أكثر قبولاً من المخاطرة اللا طوعية). فعلى سبيل المثال، إن الأشخاص ذاتهم الذين يقودون سياراتهم بغبطة كل يوم - يتعرضون لخطر الموت بالسيارة بمعدل 100:2 خلال حياتهم - يرفضون تماماً قبول مخاطرة لاطوعية بمعدل 10000:6 عند تناول زبدة الفول السوداني الملوثة بالسموم الفطرية (aflatoxin).

وبناء على ذلك، فعند النظر إلى المخاطرة، يجب علينا أيضاً فهم مبدأ آخر وهو (de minimis principle)، الذي يعني أن هناك بعضاً من مستويات المخاطرة المتدنية جداً إلى درجة يمكن التغاضي عنها. لكنه، ومهما كان هذا المفهوم جذاباً، إلا أن هذا المفهوم يصعب تحديده، خاصة إذا ما كنا نحاول إيجاد مستوى متدنٍ يكون مقبولاً للمجتمع بكامله. وانطلاقاً من ذلك فإن موقف السلطات التنظيمية الممانع لأن يكون موقفها صريحاً حول ماهية المخاطرة (المقبولة) يكون مفهوماً، فقد تثار بعض الأسئلة مثل (كم من السموم التي توجد في ساندوتش معين يمكن اعتباره مقبولاً؟ أو كم عدد أجزاء الحشرات الميتة؟). وعموماً فقد اتفق أن مخاطرة معينة على امتداد فترة حياة الإنسان بمعدل واحد في

المليون (أو في المدى 10^{-5} إلى 10^{-6}) تافه بدرجة كافية وتجعل من هذه المخاطرة شيئاً مقبولاً لدى عامة الناس. وعلى الرغم من أن المعنى الأصلي لمفهوم الجزء في المليون مخاطرة وكذلك دقته تظل غامضة إلا أن تأثيره في اختيارات المنتجات، والعمليات، والتكاليف حقيقي جداً - فهو يؤدي وحده على سبيل المثال إلى اتخاذ قرارات تنظيف موقع معين من مخلفات طرق تكلف مئات البلايين من الدولارات. لكنه يلاحظ، أن مستويات المخاطرة المقبولة قد تتفاوت. فقد تكون مستويات أعلى من المخاطرة (10^{-4} بدلاً عن 10^{-6}) مقبولة لعدد قليل من الناس يكونون عرضة لها بإرادتهم.

جدول (2-22): العوامل المؤثرة على كيفية فهم المخاطرة وتحليلها .

العامل	الحالات المصاحبة لزيادة اهتمام العامة	الحالات المصاحبة لقص اهتمام العامة
إمكانية تدميرية.	قتلى وجرحي مرتبطون زمانياً ومكانياً.	قتلى وجرحي موزعون عشوائياً .
درجة الألفة.	غير مألوف.	مألوف.
درجة الفهم.	الآليات أو العملية غير مفهومة.	الآليات أو العملية مفهومة.
السيطرة (فردية).	غير قابلة للسيطرة.	يمكن السيطرة عليها.
الطوعية للتعرض.	غير طوعي (لا إرادي).	طوعي (إرادي).
التأثير على الأطفال.	الأطفال خاصة عرضة للخطر.	الأطفال ليسوا عرضة للخطر بشكل خاص.
ظهور التأثيرات .	تأثيرات آجلة.	تأثيرات عاجلة.
التأثيرات على الأجيال اللاحقة.	خطرة على أجيال المستقبل.	لا يوجد خطر على الأجيال اللاحقة.
هوية الضحية.	يمكن التعرف على الضحايا.	ضحايا حسب الإحصائيات.
درجة الفزع.	التأثيرات مفزعة.	التأثيرات غير مفزعة.
الثقة بالمؤسسات.	انعدام الثقة بالمؤسسات المسؤولة.	ثقة بالمؤسسات.
الاهتمام الإعلامي.	كثير من الاهتمام الإعلامي.	قليل من الاهتمام الإعلامي.
تاريخ الحوادث.	حوادث كبرى وأخرى هامشية أحياناً.	لا حوادث كبرى أو هامشية.
الإنصاف والمساواة.	توزيع غير عادل للمخاطرة والفوائد.	توزيع عادل للمخاطر والفوائد.
الفوائد.	فوائد غير واضحة.	فوائد واضحة.
المعكوسة.	التأثيرات غير عكوسة.	التأثيرات عكوسة.
المصادر.	نتيجة لفعل الإنسان أو فشله.	نتيجة لعمل الطبيعة.

مقابل عموم الناس الذين يتعرضون لنفس المخاطرة، لكن ضد إرادتهم أو حتى سراً. فمثلاً، العمال الذين يتعاملون مع مذيبيات الدهانات عادة ما يقبلون مستويات أعلى من المخاطرة مقارنة بعموم الناس. إن هذه المستويات العالية تكون مقبولة، لأن العاملين عادة ما يشكلون مجموعة متجانسة نسبياً، ولا تعاني من مشاكل صحية وأن قبولهم العمل كان بإرادتهم؛ لكن مجمل مستويات المخاطرة التي تمثلها نفس مذيبيات الدهانات لن تكون مقبولة لدى عامة الناس.

2.22 عملية تقييم الخطر

1.2.22 التعرف على الخطر

إن الخطوة الأولى في تقييم المخاطرة هي تحديد طبيعة الخطر. ففي حالة المشاكل المرتبطة بالتلوث، يكون الخطر المستهدف في العادة مادة كيميائية محددة، أو عاملاً فيزيائياً (مثل الإشعاع) أو كائناً حياً دقيقاً مرتبطاً بمرض معين (الشكل 22-1). لذلك، فإن جزئية التعرف على الخطر في حالة تقييم مخاطرة يسببها ملوث معين تتكون من مراجعة جميع المعلومات البيولوجية والكيميائية ذات العلاقة آخذين في الاعتبار فيما إذا كان عامل ما يشكل تهديداً محدداً أو لا. فمثلاً، في الدلائل الإرشادية لتقييم المخاطرة من المواد المسرطنة (U.S.EPA, 1986) يتم تقييم المعلومات التالية من حيث قدرتها على التسبب في مرض السرطان :

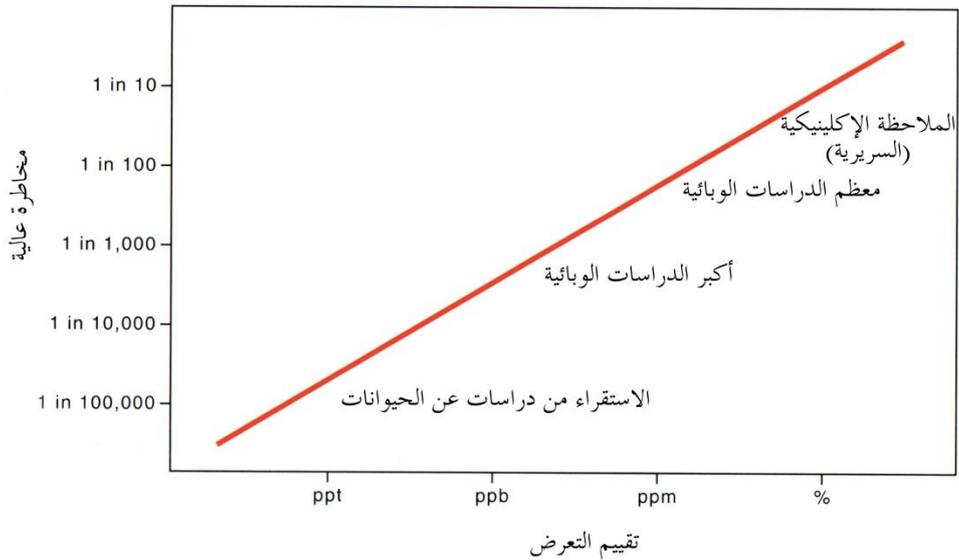
- الخصائص الفيزيائية/ الكيميائية، المسارات وأنماط التعرض.
- العلاقات بين تركيب/ نشاط المادة .
- خصائص المادة داخل الجسم من حيث الامتصاص، والانتشار، والأبيض والإفراز.
- مدى تأثير مواد سامة أخرى على التأثيرات التي تسببها المواد المسرطنة.

- بيانات من اختبارات قصيرة الأجل على كائنات حية.
- بيانات من دراسات طويلة المدى على الحيوانات.
- بيانات من دراسات على البشر.

وبمجرد مراجعة هذه البيانات، يتم فصل كل من البيانات عن الإنسان والحيوان إلى

مجموعات تختلف حسب درجة الدلالة :

- دليل كافٍ على قدرتها المسرطنة.
- دليل محدود على قدرتها المسرطنة.
- دليل غير كافٍ.
- عدم توفر بيانات.
- لا يوجد دليل على قدرتها المسرطنة.



شكل (22-1): حساسية علم الأوبئة على كشف المخاطر ذات الاهتمام التنظيمي. استخدمت الوحدات العامة التي شملت ppt (جزء في الترليون)، ppb (جزء في البليون)، ppm (جزء في المليون)، والنسبة المئوية لغرض المقارنات.

يتم بعد ذلك جمع المعلومات عن الدراسات التي أجريت على الإنسان والحيوان في نموذج تصنيف حسب وزن أو قيمة الدليل لتقييم احتمالية التسبب في السرطان. إن هذا النموذج - الذى يشبه ما تم تطويره بواسطة وكالة حماية البيئة - يعطى وزناً أكثر للأدلة الخاصة بالإنسان مقارنة بالحيوان (عندما يكون الدليل متاحاً) ويشمل المجموعات التالية :

- المجموعة A: وهى مسرطنة في الإنسان.
- المجموعة B: وهى مسرطنة محتملة في الإنسان.
- المجموعة C: وهى مسرطنة ممكنة في الإنسان.
- المجموعة D: غير قابلة للتصنيف كمسرطنة في الإنسان.
- المجموعة E: يوجد دليل بأنها غير مسرطنة في الإنسان.

يُظهر الشكل (1-22)، أنه يمكن استخدام الدراسات الإكلينيكية (السريية) للمرض للتعرف على المخاطر الكبرى (بين 10:1 و 100:1)، بينما يمكن للدراسات الوبائية أن ترصد المخاطر إلى حد 1:1000، وأن بإمكان الدراسات الوبائية الكبرى أن تلاحظ المخاطر في المدى 1:10000. وتجدد الإشارة إلى أن المخاطر التي تقل عن 1:10000 لا يمكن دراستها بدرجة عالية من الثقة باستخدام الأسلوب الوبائي. ونظراً لأن أهداف السياسات التنظيمية عموماً تسعى للحد من المخاطرة إلى ما دون 1:100000 في حالة الأمراض المهددة للحياة مثل السرطان، فإن هذه المخاطر المنخفضة يتم تقديرها عادة بالاستقراء من نتائج تأثير الجرعات العالية التي أعطيت لحيوانات التجارب .

2.2.22 تقييم التعرض

تقييم التعرض هو عملية قياس، أو تقدير شدة، وتكرارية، ومدة تعرض الإنسان لعامل بيئي. ويمكن أن يحدث التعرض للملوثات عبر التنفس، وتناول الماء أو الغذاء، أو الامتصاص خلال الجلد عند ملامسة البشرة. وتعتبر مصادر الملوث، وآليات انبعائه، ونقله وخصائص تحولاته جميعاً مهمة لتقييم التعرض، كما هو الحال بالنسبة لطبيعة ومكان وأنماط نشاط التجمع البشري الذي تعرض لعامل بيئي معين (الشكل 22-2).

إن ذلك يفسر سبب الأهمية القصوى لفهم العوامل والعمليات المؤثرة على نقل ملوث معين ومصيره كما تم مناقشته في الأبواب 2 إلى 7.



شكل (22-2) : يتطلب تقييم المخاطرة تحديد مستويات الملوث في عينات بيئية. هنا، تُؤخذ عينات من البحر بعيداً عن شواطئ جزيرة هونولولو بماواي، الولايات المتحدة لتقدير محتواها من الفيروسات المعوية (enteroviruses).

يوصف مسار التعرض (exposure pathway) بأنه المسار الذي يسلكه عامل خطر من مصدر معين إلى مستقبل له (مثلاً، إنسان أو حيوان) من خلال وسيلة حمل بيئية أو وسط معين- بشكل عام، الهواء (المركبات المتطايرة، والمعلقة في الهواء) أو الماء (المركبات

القابلة للذوبان). ويعتبر الإشعاع الالكترومغناطيسي استثناءً، فهو لا يحتاج إلى وسط. أما طريق التعرض (exposure route) أو مسار الإدخال (intake pathway)، فهو الآلية التي يحدث بواسطتها الانتقال - عادة ما يكون عن طريق الاستنشاق، والبلع، و/ أو التلامس بالجلد. ويمكن أن يؤدي التلامس المباشر بالجلد إلى تأثير موضعي عند نقطة الدخول و/ أو تأثير جهازى (systemic).

يمكن أن يشمل التقدير الكمي للتعرض أو الامتصاص أو الجرعة الممكنة معادلات تضم ثلاث مجاميع من المتغيرات هي:

- تراكيز الكيماويات أو الميكروبات في الأوساط البيئية.
- معدلات التعرض (الشدة، التكرار، والفترة الزمنية).
- الخصائص الكمية البيولوجية للمستقبل (مثل، وزن الجسم، القدرة على امتصاص الكيماويات مستوى المناعة ضد الكائنات الميكروبية الممرضة).

ويتم استنباط تراكيز التعرض من بيانات مقاسة أو مرصودة أو حسب أنماط رياضية. ومثالياً، يتعين قياس تراكيز التعرض عند نقاط التلامس بين الأوساط البيئية والمستقبلات الحالية أو الممكنة. ويكون ممكناً في العادة التعرف على المستقبلات المحتملة ونقاط التعرض باستخدام المشاهدات الحقلية ومعلومات أخرى. ويتعين الإشارة إلى أنه من النادر توقع معرفة جميع نقاط التعرض أو قياس جميع التراكيز البيئية تحت جميع الظروف. وعملياً، فإنه يلزم لتقدير تراكيز التعرض دمج كل من بيانات المتابعة والرصد إلى جانب بيانات النمذجة الرياضية (modeling) معاً، مع توفر قدر كبير من التقييم الاحترافي.

عند تقييم معدلات التعرض من خلال مسارات تعرض مختلفة، فإنه يتعين اعتبار ووزن عوامل كثيرة. مثلاً، عند تقدير التعرض لمادة معينة بمياه الشرب، يتعين أولاً تحديد

متوسط الاستهلاك اليومي من هذه المياه. لكن هذا ليس سهلاً كما قد يبدو. فقد أظهرت بعض الدراسات أن الاستهلاك اليومي من السوائل يتفاوت كثيراً من شخص لآخر. إضافة إلى ذلك، فإن استهلاك مياه الصنبور يعتمد على كمية السوائل المستهلكة كماء من الصنبور، وكم هي كمية ما يتم استهلاكه في صورة مشروبات أو مصادر أخرى غير مياه الصنبور. كذلك، فإن استهلاك مياه الصنبور يتغير كثيراً مع العمر، ووزن الجسم، ونوع الأكل، والمناخ. ونتيجة لأن هذه العوامل متغيرة جداً، فإن "وكالة حماية البيئة" الأمريكية اقترحت عدداً من قيم التعرض المتحفظة جداً والتي يمكن استخدامها عند تقييم الملوثات في مياه الصنبور، والخضروات، والتربة وغيرها (انظر الجدول 22-3).

الجدول (22-3): عوامل التعرض القياسية المرجعية المقترحة بواسطة وكالة حماية البيئة الأمريكية.

استخدام الأرض	مسار التعرض	الاستهلاك اليومي	تكرار التعرض (أيام / سنة)	زمن التعرض (سنوات)
سكنية	استهلاك مياه الشرب	2 لتر يومياً	350	30
	ابتلاع التربة والغبار	200 مجم (الطفل)	350	6
		100 مجم (البالغ)		24
	استنشاق الملوثات	20 م ³ (الإجمالي) 15 م ³ (داخل المبنى)	350	30
صناعية وتجارية	استهلاك مياه الشرب	1 لتر	250	25
	ابتلاع تربة وغبار	50 مجم	250	25
	استنشاق ملوثات	20 م ³ (أيام العمل)	250	25
زراعية	استهلاك منتجات محلية	2 جم (فاكهة) 80 جم (خضروات)	350	30
ترفيهية	استهلاك نوع معين من الأسماك المحلية	54 جم	350	30

جدول (22-4): عوامل التركيز الحيوي (BCFs) لمركبات عضوية وغير عضوية مختلفة.

المادة الكيميائية	عامل التركيز الحيوي (لتر/ كجم ⁻¹)
ألدرين (Aldrin)	28
بنزين (Benzene)	44
كادميوم	81
كلوردين (Chlordane)	14,000
الكلوروفورم	3.75
النحاس	200
د. د. ت	54,000
الفورمالدهيد	0
النيكل	47
PCBs	100,000
الكلورواثيلين الثلاثي (Trichloroethylene)	10.6
كلوريد الفينيل (Vinyl chloride)	1.17

إن أحد مداخل التعرض هو الغذاء. وتتراكم المواد السامة أو تتركز حيويًا (bioaccumulated) عادة، في أنسجة النبات والحيوان، معرضة بذلك البشر الذين يتناولون هذه الأنسجة كغذاء لهذه السموم. إضافة لذلك، فإن الكثير من المواد السامة تميل للتضخم حيويًا (biomagnified) في سلسلة الغذاء، وعليه فإن أنسجة الحيوان مثلاً، الأسماك، تحتوي

على تراكيز عالية نسبياً من السموم. ويعتبر تقدير تراكيز الملوثات في المياه معروفاً وغير صعب نسبياً. وبذلك، يمكن استخدام عامل التركيز الحيوي (bioconcentration factor, BCF) لتقدير ميل مادة معينة في الماء للتراكم في نسيج الأسماك. ويمكن تقدير تركيز مادة كيميائية معينة في الأسماك عن طريق ضرب تركيزه في الماء في عامل التركيز الحيوي (BCF). وكلما زادت قيمة BCF، زادت كمية المادة الكيميائية التي تتراكم في الأسماك، وارتفعت مخاطر التعرض على الإنسان.

اختيرت وحدة عامل التركيز الحيوي لتكون لتراً لكل كجم (لتر/كجم) لتسمح بالتعبير عن تركيز مادة كيميائية معينة بالمليجرامات في اللتر (مجم/لتر) من الماء على أن يكون التركيز في الأسماك ليعبر عنها بالمليجرامات في الكيلوجرام (مجم/كجم) من وزن الأسماك. ويوضح الجدول (22-4) قيم عامل التركيز الحيوي (BCF) لعدد من الكيماويات العضوية وغير العضوية الشائعة. وتجدر ملاحظة القيم المرتفعة لعامل التركيز الحيوي للمبيدات الهيدروكربونية الكلورة مثل DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane) ومركبات (polychlorinated biphenyls) PCBs.

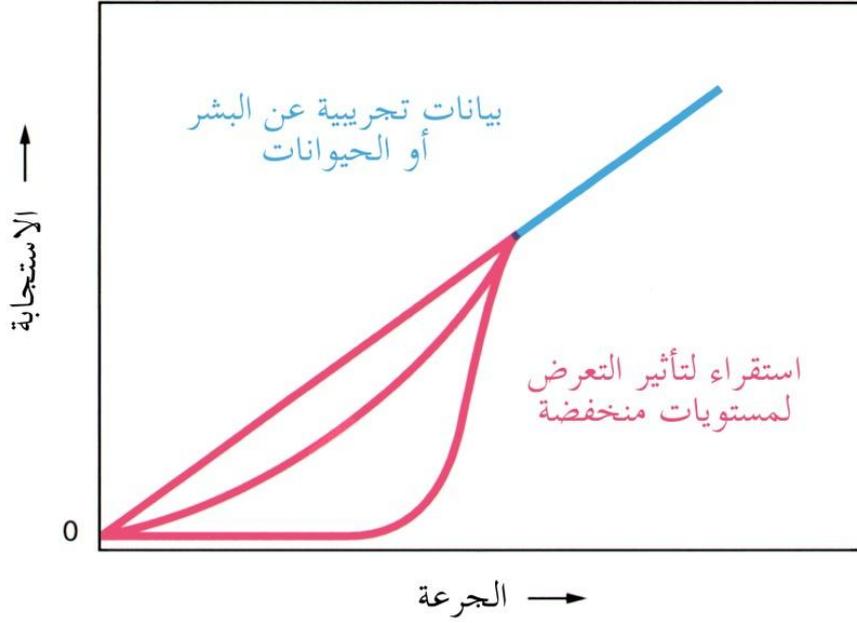
3.2.22 تقييم علاقة الجرعة - الاستجابة

إن الكيماويات أو الملوثات الأخرى ليست متساوية في قدرتها على إحداث تأثيرات ضارة. ولتحديد قدرة العوامل على إحداث ضرر نحتاج لبيانات كمية عن السمية. وتستخلص بعض بيانات السمية من دراسات وظيفية وكلينيكية ووبائية (انظر الجزء 4.21). لكن معظم بيانات السمية تأتي من تجارب يقوم فيها الباحثون بتعريض حيوانات المختبر،

غالباً ما تكون من الفئران أو الجرذان، لتراكيز أو جرعات متصاعدة ومشاهدة تأثيراتها. وتكون نتيجة هذه التجارب تطوير بين علاقة الجرعة والاستجابة (dose – response relationship) - وهي علاقة كمية تشير إلى درجة سمية العامل للأنواع التي تم تعريضها له. ويتم التعبير عن الجرعة بالميلليجرامات من المادة، المستنشقة أو الممتصة (كما هو في حالة الكيماويات).

من خلال الجلد للكيلوجرام من وزن الجسم في اليوم الواحد (مجم/كجم. يوم). ويمكن أن تتفاوت كثيراً الاستجابات أو التأثيرات من: لا تأثيرات مشاهدة، إلى تأثيرات مؤقتة وعكوسة (مثلاً، تثبيط الإنزيمات بسبب بعض المبيدات، أو إسهال بسبب الفيروسات)، إلى إتلاف دائم لعضو معين (مثلاً، إتلاف الكبد والكليتين بسبب المذيبات المكثورة، أو العناصر الثقيلة أو الفيروسات)، إلى إعاقة وظيفية مزمنة (مثلاً، التهاب الشعب الهوائية (bronchitis) أو النفاخ (emphysema) الناتج عن ضرر التدخين)، إلى الموت.

إن الهدف من تقييم الجرعة - الاستجابة هو الحصول على علاقة رياضية بين كمية (تركيز) مادة سامة أو كائن حي دقيق تعرض له الإنسان وخطر تطور تأثير سلبي من تلك الجرعة. ويتم تمثيل البيانات الناتجة عن دراسات تجريبية في شكل منحني للعلاقة بين الجرعة - الاستجابة (الشكل 22-3). ويصف الخط الأفقي الجرعة بينما يقيس الخط العمودي المخاطرة من حدوث بعض التأثيرات السلبية على الصحة. وفي حالة كائن ممرض، على سبيل المثال، فقد يمثل الخط العمودي الخطر من حدوث إصابة ولكن ليس بالضرورة حدوث مرض.



شكل (22-3): استنتاجات لمنحنيات الجرعة - الاستجابة.

وتجدر الإشارة إلى أن منحنيات الجرعة - الاستجابة المشتقة من دراسات على الحيوانات يجب تفسيرها بحذر وعناية. إن البيانات المستخدمة في تطوير هذه المنحنيات هي بالضرورة حصيلة معاينة تأثيرات جرعات عالية جداً على حيوانات الاختبار. ونظراً للتكاليف المصاحبة لذلك، فإن هذا يجد من عدد حيوانات الاختبار التي يمكن للبحاث استخدامها، كما أن استخدام آلاف (أو حتى ملايين) من الحيوانات فقط من أجل مشاهدة بعض الأفراد الذين يظهرون تأثيرات سلبية عند جرعات منخفضة (مثلاً، مخاطرة تتراوح ما

بين 1:1000 أو 1:10000) ليس عملياً وكذلك فهو مكلف جداً. وعلى ذلك يتعين على الباحث استقراء الاستجابات للجرعات المنخفضة من بياناتهم المرتبطة بالجرعات العالية. ونتيجة لذلك، فإن منحنيات الجرعة - الاستجابة تكون عرضة للجدل، ذلك أن نتائجها تتغير حسب الطريقة المختارة للاستنتاج أو الاستقراء من الجرعات العالية التي تم إعطاؤها فعلياً لأفراد الاختبار المعملية وربطها بالجرعات المنخفضة التي يحتمل أن يتعرض لها البشر يومياً أثناء حياتهم.

إن هذا التضارب يدور حول خيار النماذج الرياضية العديدة المقترحة لاستقراء الجرعات المنخفضة. ولسوء الحظ فإنه لا يمكن إثبات صلاحية نموذج رياضي معين أو عدم ملاءمته من البيانات، لذلك لا توجد طريقة لمعرفة أي النماذج هو الأكثر دقة. لهذه الأسباب فإن اختيار الأنماط الرياضية قرار سياسات تماماً، يستند بالضرورة على افتراضات متحفظة. وعليه، فإنه بالنسبة للاستجابات للمواد الكيماوية غير المسرطنة تكون الافتراضية بوجود مستوى أقصى (threshold) لا يحدث تحته استجابة سامة للمادة؛ بمعنى أنه، لن تحدث تأثيرات ضارة تحت بعض المستويات المنخفضة للجرعة (مثلاً، واحد في المليون). من ناحية أخرى، فإن المواد المسرطنة لا يوجد لها درجة تحمل (nonthreshold) - بمعنى، أن الافتراض المتحفظ (conservative) في هذه الحالة يعني أن التعرض لأي كمية من مادة مسرطنة يخلق إمكانية للإصابة بالسرطان. ويعني هذا أن الكمية الآمنة من مادة مسرطنة تساوى صفرًا فقط، ولهذا فإن منحنى الجرعة - الاستجابة يتطلب مروره خلال نقطة الصفر، كما هو موضح في الشكل (22-3).

توجد الكثير من الأنماط الرياضية للاختبار من بينها، ومنها نموذج المحاولة الواحدة (one-hit model)، والنموذج متعدد المراحل (multistage model)، والنموذج متعدد المحاولة (multihit – model)، والنموذج اللوغاريتمي (probit model). إن خصائص هذه الأنماط الرياضية لتأثيرات المواد التي غير المحتملة (nonthreshold) مدرجة في الجدول (5-22).

(1) نموذج المحاولة الواحدة (One-hit model)

هو النموذج العملي الأبسط للسرطن، ويفترض هذا النموذج:

(أ) أن ضربة واحدة أو تعرض واحد لمادة كيميائية، قادرة على تحفيز تغير مسرطن، بمعنى، أن ضربة واحدة يؤدي إلى تغير غير عكوس في جزئ DNA، وهو ما يقود إلى تطور ورم (بمجرد إصابة الهدف البيولوجي، فإن العملية التي تقود إلى تطور ورم تستمر دون اعتماد على الجرعة). (ب) أن هذا التغير يحدث في مرحلة واحدة فقط وفي هذا النموذج الرياضي شائع الاستخدام، تكون العلاقة بين الجرعة (d) والمخاطرة على امتداد حياة الفرد (الاحتمالية) للإصابة بالسرطان P (d) حسب المعادلة:

$$P(d) = 1 - \exp[-(q_0 - q_1 d)] \quad (1-22)$$

حيث أن: q_0 و q_1 قياسان اختيرا لتوقيع البيانات التجريبية. وعند جرعات منخفضة تكون الدالة مستقيمة.

جدول (5-22): النماذج الرياضية الأساسية المستخدمة لتقييم التأثيرات غير المتحتملة (nonthreshold)

تعليقات	النموذج الرياضي ^(أ)
يفترض أن: (1) مرحلة واحدة فقط للسرطان. (2) التغيير المسرطن محفز بواسطة تفاعل جزئي أو إشعاع واحد فقط. هذا النموذج متحفظ جداً .	نموذج المحاولة الناجحة الواحدة (One – hit)
تفترض مراحل متعددة للسرطان. يقوم بمواءمة أو تكييف المنحني للبيانات التجريبية.	النموذج الخطي متعدد المراحل (Linear multistage)
يفترض ضرورة حدوث عدة تفاعلات مشتركة قبل أن تصبح الخلية متحولة. هذا النموذج الرياضي هو الأقل تحفظاً.	النموذج متعدد المحاولات الناجحة (Multihit)
يفترض وجود توزيع لوغاريتمي متوازن (log- normal) لتحمولات مجموعة معينة تعرضت لتأثير عامل ما. هذا النموذج ملائم للتسمم الحاد، لكنه محط تساؤل في حالة السرطان.	النموذج اللوغاريتمي (Probit)

(أ) إن هذه النماذج الرياضية جميعاً تفترض أن التعرض للملوث سوف ينتج دائماً تأثيراً ما، بغض النظر عن الجرعة .

(2) النموذج الرياضي متعدد المراحل (multistage model)

يفترض هذا النموذج أن الأورام تكون نتيجة لأحداث بيولوجية متتالية، أو مراحل. وبعبارة مبسطة، فإن التفسير البيولوجي لهذا النموذج الرياضي هو وجود مراحل متتالية يتعين على مادة كيميائية معينة المرور خلالها (مثلاً، الأيض، الرابطة التساهمية، إصلاح جزيء

DNA.. الخ) دون أن يتم تفقد نشاطها، قبل أن يكون ظهور الورم ممكناً. وفي هذا النموذج الرياضي يعبر عن العلاقة بين المخاطرة والجرعة بالمعادلة التالية :

$$P(d) = 1 - \exp \left[- \sum_{i=1}^n q_i d^i \right] \quad (2-22)$$

حيث أن: العامل (q_i) ذو قيمة موجبة ويستخدم لتحقيق أحسن مطابقة (best fit) للبيانات الخاصة بالمنحنى الذي يربط العلاقة بين الجرعة - الاستجابة. ويكون المعدل الذي تمر الخلية خلاله بمرحلة أو أكثر من هذه المراحل دالة لمعدل الجرعة. ويتميز النموذج متعدد المراحل أيضاً بأن له الخاصية المرغوبة والمتمثلة في إنتاج علاقة خطية بين المخاطرة والجرعة.

(3) النموذج الرياضي متعدد المحاولات الناجحة (Multihit model)

يفترض هذا النموذج أنه يلزم حدوث عدد من الضربات المرتبطة بالجرعة قبل أن تصبح الخلية متسرطنة. إن أهم اختلاف بين النموذجين الرياضييين متعدد المراحل ومتعدد المحاولات الناجحة في أنه في حالة النموذج متعدد المحاولات يتعين أن تكون جميع الضربات ناتجة عن الجرعة، بينما في حالة النموذج متعدد المراحل فإن المرور خلال بعض المراحل يمكن أن يحدث تلقائياً. إن الدلالة العملية لذلك أن النماذج متعددة المحاولة تكون عموماً قليلة الميول (أكثر انبساطاً) عند الجرعات المنخفضة، وهي بذلك تستطيع التنبؤ بالمخاطرة المنخفضة مقارنة بالنموذج الرياضي متعدد المراحل.

(4) النموذج الرياضي اللوغاريتمي (probit model)

غير مشتق من افتراضات آلية حول عملية تطور مرض السرطان . ويمكن النظر إلى هذا النموذج على أنه يمثل توزيعات للتحمل ضد العوامل المسرطنة في التجمعات الكبيرة. ويفترض النموذج أن احتمالية الاستجابة (الإصابة بالسرطان) تكون دالة خطية للوغاريتم كمية الجرعة (log normal، انظر الجزء 4.2.8). وبينما قد تكون هذه النماذج الرياضية ملائمة لحالات السمية الحادة، فإنها محط تساؤل بالنسبة للمسرطنات. إن هذه النماذج سوف تتنبأ بأدنى مستوى مخاطرة مقارنة بالنماذج الرياضية الأخرى.

ويوضح الجدول (6-22) تأثير النماذج الرياضية على تقدير المخاطرة لمادة كيميائية معينة. وكما يلاحظ، فإن اختيار الأنماط الرياضية تنتج عنه اختلافات كبيرة في تقدير المخاطرة عند مستويات منخفضة من التعرض.

جدول (6-22): مخاطر السرطان على امتداد حياة الفرد استناداً إلى أنماط استقراء رياضية.

مخاطر مادة كيميائية معينة على امتداد حياة الفرد	النموذج الرياضي المطبق
(1.0 مجم/كجم . يوم) ⁽¹⁾	
$5^{-10} \times 6.0$ (1 في 17,000)	نموذج المحاولة الواحدة (One-hit)
$6^{-10} \times 6.0$ (1 في 167,000)	النموذج متعدد المراحل (multistage)
$7^{-10} \times 4.4$ (1 في 2.3 مليون)	النموذج متعدد المحاولات (multihit)
$10^{-10} \times 1.9$ (1 في 5.3 بليون)	النموذج اللوغاريتمي (probit)

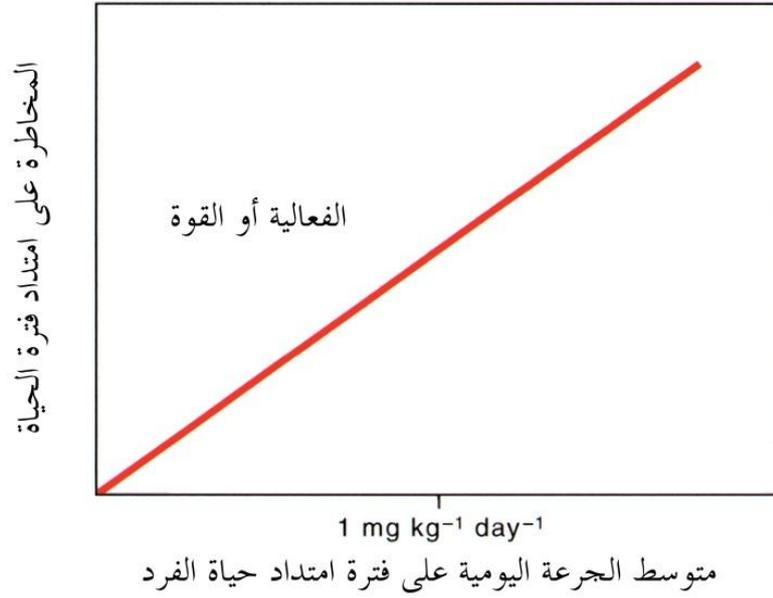
⁽¹⁾ إن جميع المخاطر هي للتعرض على امتداد فترة الحياة الكاملة. واستخدمت فترة الحياة كاملة كوحدة قياس للمخاطرة لأن البيانات التجريبية تعكس المخاطر التي تتعرض لها الحيوانات على امتداد فترات حياتها كاملة. وتساوى القيم الموضحة الحدود العليا للثقة الخاصة بالمخاطرة.

(5) النموذج الرياضي الخطي متعدد المراحل (The linear multistage model)

وهي نسخة محورة للنموذج متعدد المراحل، وهي خيار "وكالة حماية البيئة" الأمريكية لأن الوكالة تختار التقليل من أهمية جانب الأمان وتركز بقوة على المخاطرة. ويفترض هذا النموذج الرياضي أنه توجد مراحل متعددة للسرطان (بمعنى، أنه توجد سلسلة من الطفرات أو التحولات الحيوية) ترتبط بعدد كبير من المسرطنات، وعوامل مسرطنة مساعدة (cocarcinogens) والمحفزات (promoters)، (انظر الجزء 6.21) التي يمكن نمذجتها بشكل أفضل عن طريق سلسلة من الدالات الرياضية. وعند جرعات منخفضة، يسمى ميل منحنى الجرعة - الاستجابة الذي يتم إنتاجه عن طريق معادلة الخط المستقيم متعدد المراحل (الشكل 4-22) عامل القوة (potency factor, PF)، أو عامل الميل (slope factor)، الذي يساوي مقلوب التركيز المقاس للمادة الكيماوية بالملليجرامات لكل كيلوجرام من وزن الحيوان في اليوم الواحد، أي، $1 / \text{مجم كجم}^{-1} \text{ يوم}^{-1} = \text{مجم}^{-1} \text{ كجم} \cdot \text{يوم}$. أو المخاطرة الناتجة عن متوسط الجرعة اليومية (AD) على امتداد فترة حياة الكائن الحي بالملليجرام كجم⁻¹ يوم⁻¹ وبذلك، فإن معادلة الجرعة - الاستجابة لمادة مسرطنة هي:

$$\text{PF} \times \text{AD} = \text{المخاطرة على امتداد فترة الحياة} \quad (3-22)$$

إن احتمالية الإصابة بالسرطان (وليس احتمالية الموت بسبب السرطان) والجرعة المقابلة لذلك تشكل متوسطاً محسوباً على افتراضية أن فترة حياة الإنسان تساوي 70 عاماً. وتسمى هذه الجرعة متوسط الجرعة اليومية على امتداد فترة الحياة أو التناول اليومي المزمّن (chronic daily intake).



شكل (22-4): عامل الفعالية أو القوة هو ميل منحنى الجرعة - الاستجابة عند جرعات منخفضة. عند جرعات منخفضة، يسمى منحنى الجرعة - الاستجابة الناتج بواسطة النموذج متعدد المراحل عامل القوة أو الفعالية. ويساوي المخاطرة الناتجة عن جرعة متوسطة بمقدار 1 مجم كجم⁻¹ يوم⁻¹ على مدى الحياة.

وتسمح علاقة الجرعة - الاستجابة التي توضح تأثيرات العوامل غير المسرطنة بوجود حدود تحمّل قصوى، وهو ما يعني عدم حدوث تأثير ضار إذا كانت كمية المادة أو الجرعة أقل من مستوى التحمل القصوى، (NOAEL؛ انظر الجزء 1.4.21) وذلك نتيجة القدرة الطبيعية للجسم على الترميم وإبطال التسمم. ومن أمثلة المواد السامة التي لها حدود تحمل، العناصر الثقيلة ومركبات ثنائية الفينيل متعددة الكلورة (polychlorinated biphenyls, PCBs). ويتم تمثيل مستويات التحمل القصوى هذه بواسطة الجرعة المرجعية (reference dose, RFD)،

لمادة معينة، وهي تساوي كمية الجرعة من المادة لوحدة وزن الجسم في اليوم الواحد (مجم كجم⁻¹ يوم⁻¹) التي لا يتوقع تسببها في قدر هام من المخاطرة للتجمعات البشرية، بما في ذلك المجموعات الحساسة مثل الأطفال. لذلك، فإن التوقيع البياني الذي يربط الجرعة بالاستجابة لبعض العوامل المسرطنة يمر خلال هذه النقطة المرجعية.

وعموماً، فإن المواد التي لها عوامل ميل عالية نسبياً وجرعات مرجعية منخفضة تميل لأن يصاحبها تسمم عالٍ. وتقدر قيمة الجرعة المرجعية بتقسيم كمية المادة أو الجرعة التي لا يحدث عند مستوى أقل منها أي تأثير ضار؛ NOAEL (انظر الجزء 1.4.21) على قيمة عامل شك (uncertainty factor) مناسب يسمى أحياناً عامل أمان. ويستخدم عامل أمان يصل إلى عشرة أضعاف قيمته لمراعاة الاختلافات في الحساسية بين الأفراد الأكثر حساسية لتجمع بشرى معين تعرض لعامل مسرطن ما. وتشمل هذه المجموعات النساء الحوامل، والأطفال الصغار، وكبار السن الذين هم أكثر حساسية من الأفراد العاديين. وتضاف قيمة أخرى تساوي 10 عندما تكون قيمة NOAEL قد تأسست على بيانات مأخوذة من حيوانات مختبرية، ثم أسقطت على بنى الإنسان. وزيادة على ذلك، فإن قيمة أخرى تساوي 10 تضاف أحياناً في حالة توفر بيانات محدودة عن البشر أو الحيوانات. والمعادلة العامة المستخدمة لاستنباط قيمة الجرعة المرجعية (RFD) هي:

$$RfD = \frac{NOAEL}{VF_1 \times VF_2 \times \dots \times VF_n} \quad (4 - 22)$$

حيث أن VF_i هي عوامل الأمان. وكلما كانت البيانات غير موثوق بها، تستخدم قيم أعلى لعوامل الأمان. فمثلاً، إذا كانت البيانات المتاحة ناتجة عن دراسة وبائية عالية

الجودة، يمكن استخدام عامل ضمان بسيط يساوي 10 ومجرد القيام بقسمة القيمة الأصلية للجرعة المرجعية (*Rfd*) على القيمة 10 للحصول على قيمة جديدة للجرعة المرجعية التي تعكس الاهتمام بالأمان ويوضح الجدول (7-22) قيم الجرعات المرجعية لعدة مواد كيميائية غير مسرطنة.

جدول (7-22): الجرعات المرجعية لمواد كيميائية مختارة مسببة لتأثيرات مزمنة غير مسرطنة.

الجرعة المرجعية (<i>Rfd</i>) (مجم كجم ⁻¹ يوم ⁻¹)	المادة الكيميائية
0.1	الأسيتون
0.0005	الكادميوم
0.01	الكلوروفورم
0.06	كلوريد الميثيلين
0.04	الفينول
0.0001	ثنائي الفينيل متعدد الكلور
0.3	التولوين
2.0	الزايلين

ويمكن استخدام الجرعة المرجعية في التقييم الكمي للمخاطرة عن طريق العلاقة

التالية :

$$\text{المخاطرة (Risk)} = \text{PF (CDI - Rfd)} \quad (5 - 22)$$

حيث أن CDI تمثل الجرعة المزمدة اليومية وأن عامل الفعالية أو القوة يساوي ميل

المنحنى الذي يربط بين الجرعة - الاستجابة. لكنه يلاحظ أن هذا النوع من الحسابات نادراً

ما يجري. وفي معظم الحالات، تستخدم قيمة الجرعة المرجعية (*Rfd*) كمؤشر بسيط لخطر

يمكن عملياً. بمعنى، أن الجرعة اليومية المزمّنة يتم ببساطة مقارنتها بالجرعة المرجعية، فإذا كانت قيمة CDI أقل من قيمة الجرعة المرجعية (*RfD*) فإنه يفترض أن التعاضّي عن المخاطرة (يمكن إهمالها) بالنسبة لجميع الأفراد تقريباً الذين تعرضوا لتأثير هذا العامل.

4.2.22 تحديد خصائص المخاطرة

1.4.2.22 تحليل عدم الثقة

إن عدم الثقة صفة ملازمة لكل خطوة من عملية تقييم المخاطرة. وبذلك، فإنه قبل التمكن من البدء في تحديد خصائص أية مخاطرة نحتاج إلى بعض الأفكار عن طبيعة ودرجة عدم الثقة في تقدير المخاطرة. وتشمل مصادر عدم الثقة:

- أسلوب الاستقراء (*extrapolation*) من قيم الجرعات العالية للمنخفضة.
- أسلوب الاستقراء لاستجابات إنسانية من استجابات فعلية على الحيوان.
- أسلوب الاستقراء من مسار تعرض معين إلى مسار آخر.
- القصور في طرق التحليل.
- تقديرات التعرض لعامل معين.

وعلى الرغم من أن عدم الثقة يكون عموماً أعلى في تقديرات التعرض لعامل معين والعلاقات بين الجرعة والاستجابة (مثلاً، النسبة المئوية للوفيات)، فإنه من المهم ضم عناصر عدم الثقة الناتجة من جميع خطوات تقييم المخاطرة في تحديد خصائص المخاطرة.

من الشائع استخدام أسلوبين لتحديد خصائص عدم الثقة وهما أسلوب تحاليل الحساسية (*sensitivity analyses*) وأسلوب محاكاة مونت كارلو (*Monte Carlo Simulations*).

وفي حالة تحاليل الحساسية نغير ببساطة مقادير عدم الثقة لكل مؤشر (مثلاً، القيم المتوسطة، التقديرات المنخفضة والعالية)، واحداً بعد الآخر، لنعرف كيف تؤثر التغيرات في المقادير على التقدير النهائي للمخاطرة. إن هذه الخطوة توفر لنا مدى من القيم الممكنة للمخاطرة الكلية وتبين لنا أي المؤشرات هو الأكثر أهمية في تحديد حجم المخاطرة. من ناحية أخرى، فإنه في حالة أسلوب مونت كارلو يفترض أن جميع المؤشرات تكون عشوائية أو غير أكيدة. وعليه، فإنه بدلاً عن تغيير مؤشر واحد في كل مرة، نستخدم برنامج حاسوب لاختيار التوزيعات عشوائياً في كل مرة يتم فيها حل النماذج الرياضية، وتعاد الخطوات عدة مرات. ويمكن استخدام ناتج هذه العملية للتعرف على قيم التعرض لعامل معين أو المخاطرة المطابقة لاحتمالية محددة، مثلاً الخمسين في المائة أو الخمسة والتسعين في المائة.

2.4.2.22 توقعات المخاطر والإدارة

إن الطور النهائي في عملية تقييم المخاطر هو تحديد خصائص المخاطرة. وفي هذه المرحلة يتم إدماج تقديرات التعرض لعامل معين (exposure) والاستجابة مقابل الجرعة لتعطي مجموعة احتمالات للتأثير على الإنسان تحت ظروف تعرض محددة. وتحسب المخاطر الكمية لأوساط ومسارات ملائمة. فمثلاً، تقدر أخطار الرصاص في الماء على امتداد فترة عمرية بافتراض (1) أن التعرض يتمثل في استهلاك لترين من الماء يومياً وعلى امتداد فترة عمرية التي تقدر بسبعين عاماً. (2) وجود تراكيز مختلفة من الرصاص في مياه الشرب. وهذه المعلومات يمكن عندئذ استخدامها بواسطة اختصاصيي مخاطرة لتطوير معايير أو دلائل

إرشادية لمواد كيميائية سامة محددة أو كائنات دقيقة ممرضة في بيئات مختلفة، مثل مياه الشرب أو الغذاء.

3.22 تقييم المخاطرة الأيكولوجية

تقييم المخاطرة الأيكولوجية هي عملية تقدير لاحتمالية حدوث تأثيرات أيكولوجية نتيجة التعرض لعامل ضغط واحد أو أكثر. والعامل الضاغط (stressor) هو عبارة عن مادة، أو ظرف، أو مجال طاقة الذي يمتلك قدرة ملازمة لإحداث تأثيرات ضارة على نظام حيوي معين. إن البيئة عرضة لكثير من عوامل الضغط المختلفة، بما في ذلك الكيماويات، والكائنات الدقيقة المهندسة وراثياً، والأشعة المسببة للتأين، والتغيرات السريعة في درجات الحرارة. وقد يقدر تقييم المخاطرة الأيكولوجية تأثيراً واحداً أو أكثر من عوامل الضغط أو المكونات الأيكولوجية (كائنات محدودة، أو أعداد، أو تجمعات، أو نظم بيئية). وقد يعبر عن المخاطر الأيكولوجية على أنها تقديرات محتملة حقيقية للتأثيرات الضارة (كما تم مع المواد المسرطنة عند تقييم المخاطرة لصحة الإنسان)، أو قد يعبر عنها نوعياً.

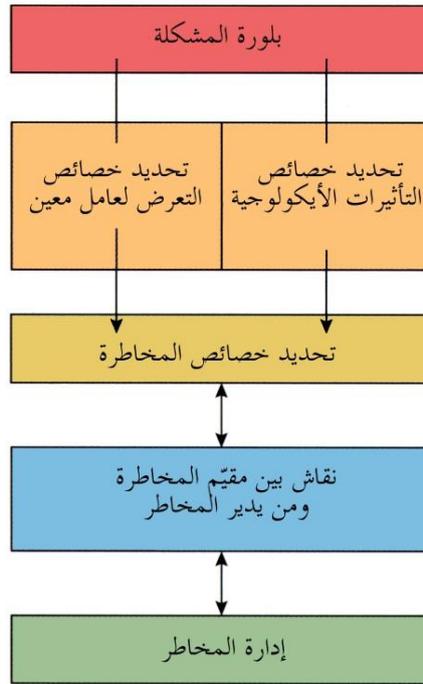
وفي الولايات المتحدة الأمريكية، فإن قانون البيئة الشامل للتعويض والمسؤولية القانونية (CERCLA) والذي يعرف أيضاً بالتمويل العظيم (Superfund)، وقانون المحافظة على الموارد واستردادها (RCRA)، وقوانين تنظيمية تتطلب توفير تقييم إيكولوجي كجزء من التحريات العلاجية ودراسات الجدوى (أيضاً، انظر الجزء 1.11). كذلك، فإن تسجيل المبيدات، وهو أمر مطلوب حسب القانون الفيدرالي لمبيدات الحشرات والفطريات والقوارض (FIFRA)، لا بد أن يضم تقييماً إيكولوجياً (انظر الجزء 5.23).

وضمن سياق القانونين، (CERCLA /RCRA) فقد يوضع هدف نموذجي عن طريق تحديد وتوثيق التأثيرات الفعلية أو الممكنة للملوثات على الأنظمة الإيكولوجية المتأثرة بها وكذلك السكان كأساس لتقييم بدائل علاجية بأسلوب علمي مقبول. إن الأطوار أو الخطوات الأربع في التقييم الإيكولوجي (الشكل 22-5) هي كما يلي:

- بلورة المشكلة والتعرف على المخاطرة أو الخطر.
- تقييم تأثير التعرض لعامل معين.
- تقييم التأثيرات الإيكولوجية/ السمية.
- تحديد خصائص المخاطرة .

يمكن بدء تقييم مخاطرة إيكولوجي تحت ظروف كثيرة - مثلاً، عند صناعة مادة كيميائية جديدة، أو تقييم خيارات أو بدائل لتنظيف موقع ملوث، أو ردم مستنقع وغيرها. وتبدأ عملية صياغة المشكلة بتقييم خصائص العامل الضاغط، والنظام البيئي المهدد والتأثيرات البيئية المحتملة، حيث يتم بعدها اختيار نقطة النهاية. وتكون نقطة النهاية (endpoint) خاصية لمكون إيكولوجي (مثلاً، موت الأسماك) الذي قد يتأثر بعامل ضاغط معين. ويستخدم عموماً نوعان من نقاط النهاية: نقاط نهاية تقييمية (Assessment endpoints) وهي قيم بيئية خاصة تتطلب حماية. إن نقاط نهاية كهذه، والتي تحترم وتقدر بواسطة عامة الناس، توجه القرارات التي يتخذها مديرو المخاطرة الرسميون. أما النوع الثاني فهي نقاط نهاية قياسية (Measurement endpoints) وتكون عوامل وصفية أو كمية يمكن قياسها. افترض، على

سبيل المثال، مجتمعاً سكانياً يقدر قيمة رياضات صيد الأسماك في المنطقة لكنه منزوع من الدفق الناتج عن مصنع ورق قريب. في هذه الحالة، فإن انخفاضاً في تعداد سمك السلمون المنقط يشكل نقطة نهاية التقييم (assessment endpoint)، بينما قد تكون الزيادة في موت سمك المينو (minnows)، الذي تم تقديره بواسطة دراسات معملية، نقطة نهاية القياس. وبذلك، فإن مديري المخاطرة سوف يستخدمون البيانات الكمية التي تم تجميعها حول سمك المينو المماثلة لتطوير استراتيجيات إدارة مصممة لحماية تجمعات سمك السلمون المنقط.



شكل (22-5): إطار تقييم مخاطرة إيكولوجي.

يُعرّف تقييم التعرض (exposure assessment) بأنه تقدير المدى (range) من التركيز البيئي الخاص لعامل ضغط محدد والجرعة الفعلية التي استقبلت بواسطة أي حيوان أو نبات (biota) في منطقة معينة. إن الأسلوب الأكثر شيوعاً لتحليل التعرض هو قياس التراكيز الفعلية لعامل ضاغط (stressor) معين وجمع هذه القياسات في وجود افتراضات حول التلامس والامتصاص بواسطة الكائنات النباتية والحيوانية. فمثلاً، يمكن عادة قياس تعرض الكائنات المائية البسيطة للكيمائيات على أساس تركيز المادة الكيماوية في الماء باعتبار أن أنظمة هذه الكائنات في اتزان مع المياه المحيطة بها. كما يمكن أيضاً ضم قياسات العامل الضاغط مع المؤشرات الكمية التي تصف تكرار ودرجة التلامس. مثلاً، يمكن ضم تراكيز الكيمائيات، أو الكائنات الدقيقة في المواد الغذائية مع معدلات تناولها لتقدير التعرض لمشكلة ترتبط بالتغذية. إن مهمة التعرض نادراً ما تكون واضحة بشكل جيد. فقد تحدث تحولات حيوية، خاصة في حالة العناصر الثقيلة مثل الزئبق (أنظر الجزء 2.5.7). إن مثل هذه التحولات قد ينتج عنها تكون صور أكثر سمية للعامل الضاغط. لذا يجب على الباحث استخدام نماذج رياضية للتنبؤ بمصير العامل الضاغط والتعرض الناتج بسببه وتحديد سيناريوهات عدة لما يمكن أن يحدث.

إن الغرض من تقييم التأثيرات الإيكولوجية هو التعرف والتقدير الكمي للتأثيرات الضارة التي يسببها عامل ضاغط معين، إلى أقصى درجة ممكنة، وذلك لتحديد العلاقات بين المسبب والتأثير (cause – and – effect relationships). وخلال هذه المرحلة، يتم عادة تجميع بيانات السمية وتتم مقارنتها. وعموماً، توجد بيانات حادة ومزمنة للعامل

الضاغط على نوع واحد أو عدة أنواع. ويمكن للمشاهدات الميدانية، وكذلك الاختبارات التي تجرى تحت ظروف محكمة وواسعة أن توفر بيانات إضافية. وينتج عن الجمع بين بيانات تحليل التعرض مع بيانات التأثيرات الإيكولوجية ما يسمى بمظهر الاستجابة بالعامل الضاغط (stressor-response profile). ويمثل هذا القطاع محاولة لمواءمة الضغوطات على النظام البيئي لمستويات مختلفة من تركيز العامل الضاغط تحت الدراسة.

تجدر الإشارة إلى أن تطوير صيغة توضح العلاقة بين الاستجابة والعامل الضاغط (stressor-response profile) معقد لأنه يتطلب بالضرورة نماذج رياضية، وافتراضات، واستقرارات. فمثلاً، العلاقة بين القياس والتقييم عند نقطة النهاية افتراض: فهذه العلاقة يعبر عنها بوضوح في النموذج الرياضي المستخدم؛ لكنه عندما لا تذكر تحديداً، فإن ذلك يتم تقديره من واقع الخبرة. إضافة إلى ذلك، فإن مظهر العلاقة بين الاستجابة - العامل الضاغط تكون مشابهاً لمنحنى الاستجابة - الجرعة بمعنى أنها تشمل استقرارات؛ على الرغم من أنه في هذه الحالة تؤخذ نتائج اختبار تسمم على نوع واحد لتنسحب على المجتمع أو النظام البيئي بأكمله. إن إحدى صعوبات التعبير الكمي عن علاقة الاستجابة - العامل الضاغط تتمثل في أن الكثير من الاستقرارات الكمية تُستنتج من معلومات وصفية في طبيعتها. فمثلاً، عندما نستخدم استقراءً نوعياً phylogenetic extrapolation لنقل بيانات سمية من كائن من نوع ما لآخر - أو حتى لفئة كاملة من الكائنات - فإننا نفترض درجة من التشابه استناداً إلى خصائص وصفية. وبذلك، عندما نستخدم بيانات اختبار سمية الطحالب الخضراء (وهو ما نقوم به عادة) لتمثيل جميع الكائنات حقيقية النواة eukaryotes

التي تقوم بعملية البناء الضوئي، فإنه يتعين علينا تذكر أن جميع حقيقيات النواة القادرة على القيام بعملية التمثيل الضوئي ليست في الحقيقة طحالب خضراء ونظراً لأن الكثير من الاستجابات (responses) هي استقرارات تركز على نماذج رياضية تتفاوت من المستوى الجزئي إلى النظام البيئي، فإنه من المهم جداً أن يكون عدم التيقن والافتراضات محددة بوضوح.

يتكون تقييم المخاطرة من مقارنة التعرض (exposure) ومظاهر الاستجابة مقابل العامل الضاغط لتقدير احتمالية حدوث التأثيرات، شريطة توزيع العامل الضاغط داخل النظام. وكما يمكن توقعه، فإن القيام بهذه العملية صعب بدرجة استثنائية. وفي الحقيقة، فإن جهودنا للتنبؤ بالتأثيرات الضارة يشبه التنبؤ بمطول الأمطار. وعليه، فإن عملية التنبؤ في منظومة تقييم المخاطرة الإيكولوجية تظل بدرجة كبيرة نوعاً من الفن، فهي تعتمد على الحكم المبني على الخبرة (أنظر الحالة الخاصة في الصفحات التالية حول: تقييم المخاطرة الإيكولوجية لمذيب كيميائي جديد).

4.22 تقييم المخاطرة الميكروبية

يحدث تفشى لمرض ما تسببه كائنات دقيقة محمولة بواسطة الماء وذلك عندما يتلوث مصدر المياه بشكل واضح وإلى درجة كبيرة. وفي مثل هذه الحالات، حيث يحدث مستوى عالٍ من التلوث، يكون التعرض جلياً وواضحاً، ويمكن تحديد المسبب والتأثير بسهولة نسبياً. من ناحية أخرى، فإن التعرض لتلوث ميكروبي بمستوى منخفض يكون من الصعب تحديده وباتياً. ونحن نعرف، على سبيل المثال، أن التعرض طويل المدى للميكروبات

قد يكون له وقع مهم على صحة الأفراد داخل مجتمع معين، لكننا نحتاج إلى طريقة ما لقياس هذا التأثير .

ومنذ زمن، توفرت طرائق لاكتشاف وجود مستويات منخفضة (كائن واحد في 1000 لتر) من الكائنات الممرضة في الماء، بما في ذلك الفيروسات المعوية، والبكتيريا، والحيوانات الأولية (انظر الشكل 22 - 6 والباب 19). إن المشكلة تتمثل في أن المخاطر التي تهدد المجتمع بسبب هذه المستويات المنخفضة من الممرضات في مصدر ماء على امتداد فترة من الوقت ليست مثل تلك التي تنتج عن مستويات منخفضة من سموم كيميائية أو مواد مسرطنة.

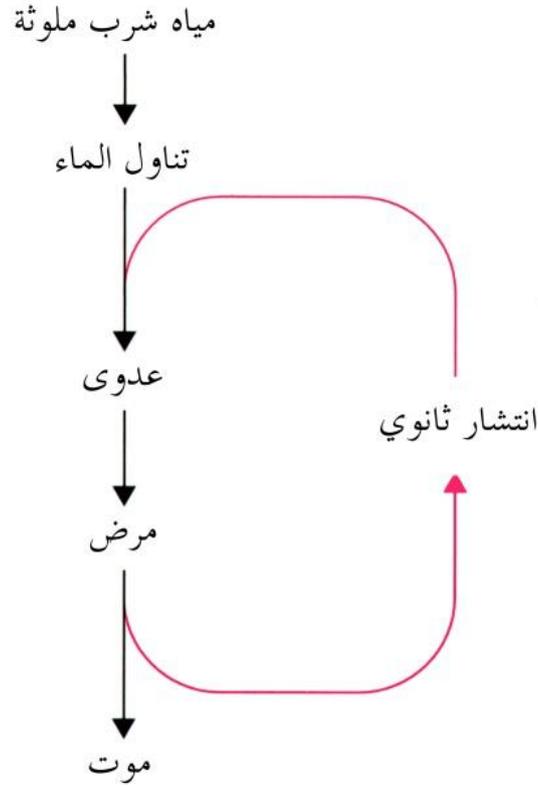
فمثلاً، يتطلب الأمر وجود أميبا واحدة فقط في المكان الخطأ والتوقيت الخطأ لتسبب في عدوى لشخص ما، بينما يتعين على الشخص نفسه أن يتناول كمية معتبرة من مادة كيميائية سامة ليتأذى لنفس الدرجة. وعلى ذلك فإن تقييم المخاطرة الميكروبية هي عملية تسمح لنا بتقدير الاستجابات معبراً عنها بخطر الإصابة في أسلوب كمي. وعلى الرغم من أنه لا يوجد إطار منهجي لتقييم المخاطرة الميكروبية، إلا أنه عموماً يتم إتباع الخطوات المستخدمة في تقييم المخاطرة الأخرى المتعلقة بالصحة - والتي تشمل التعرف على المخاطرة، وتقييم العلاقة بين الاستجابة مقابل الجرعة، وتقييم التعرض لعامل معين، وتحديد خصائص المخاطرة. وتكون الاختلافات في الفرضيات الخاصة، والنماذج الرياضية، وطرق الاستقراء المستخدمة.



شكل (22-6): يتطلب تقييم المخاطر تقنيات متطورة تساعد على تحليل ملوثات توجد بكميات صغيرة جداً.

ويكون التعرف على المخاطرة في حالة الكائنات الممرضة معقداً نظراً لتعدد المخرجات الممكنة التي تتراوح ما بين إصابة بدون ظهور أعراض إلى حدوث وفاة (انظر الشكل (22-7)) وتعتمد هذه المخرجات على التفاعلات المعقدة فيما بين العامل الممرض

(infectee) والمصاب (infectee). وهذا التفاعل يعتمد بدوره على خصائص المصاب وكذلك طبيعة الكائن الممرض. وتشمل العوامل الخاصة بالمصاب، مثلاً، وجود مناعة مسبقة، والعمر، والتغذية، والقدرة على إظهار استجابة مناعية، وعوامل أخرى للمصاب غير محددة. أما العوامل الخاصة بالكائن الممرض فتشمل نوع وسلالة الكائن، إضافة لقدرته على إظهار استجابة مناعية.



شكل (7-22) : نتائج التعرض لفيروسات معوية.

من بين نتائج الإصابة بعدوى إمكانية حدوث مرض دون سريري (subclinical illness). وتتميز الإصابة دون السريرية (لا أعراض لها) بأنها تلك التي تسبب فيها الإصابة (نحو كائنات دقيقة داخل جسم الإنسان) مرضاً غير واضح مثل الحمى، أو صداع الرأس أو الإسهال بمعنى، أنه يمكن للأفراد لعب دور العائل لكائن دقيق ممرض - ونقله لآخرين - دون أن يقعوا فريسة للمرض. وتتفاوت نسبة الإصابة السريرية إلى الإصابة دون السريرية من كائن ممرض لآخر، وخاصة في حالة الفيروسات كما يتبين من الجدول (22-8). وعلى سبيل المثال، فإن الفيروس المسبب لشلل الأطفال، نادراً ما ينتج عنه مظاهر سريرية واضحة؛ وفي الواقع، فإن نسبة الأفراد الذين تظهر عليهم إصابة سريرية قد يقل عن 1%. من ناحية أخرى، فإن الفيروسات المعوية الأخرى، مثل فيروسات (coxsackie viruses)، قد تظهر نسبة أعلى.

وفي حالات كثيرة، مثلما في حالة فيروسات الروتا (rotaviruses)، فإن تطور إصابة سريرية يبدو أنه غير مرتبط تماماً بالجرعة التي يأخذها الفرد عن طريق البلع. بل يبدو أن احتمالية تطور إصابة سريرية تعتمد على نوع وسلالة (strain) الفيروس وكذلك عمر العائل، أي عوامل عائل غير محددة، ويعتمد بدرجة معينة على وجود مناعة مسبقاً. كما يمكن أيضاً تفاوت وقوع إصابة سريرية بالفيروس نفسه من سنة لأخرى، حسب بروز سلالات أخرى.

جدول (22-8): نسبة الإصابة السريرية إلى الإصابة دون السريرية بفيروسات معوية .

تكرار المرض السريري ^١ (%)	الفيروس
1 - 0.1	فيروس شلل الأطفال (poliovirus 1)
	فيروس (coxsackie)
50	A16
50 - 11	B2
96 - 29	B3
70 - 30	B4
40 - 5	B5
	Echovirus
50	المتوسط
60 - 15	9
نادراً - 20	18
33	20
30	25
50	30
75	الوباء الكبدي A (البالغون)
60 - 28	Rotavirus
12.5	Astrovirus (البالغون)

^١ النسبة المتوية للأفراد المصابين الذين طورا مرضاً سريرياً.

النتيجة الأخرى للتعرض للإصابة وهي تطور مرض سريري . وقد تلعب مجموعة عوامل عدة دوراً رئيسياً في حدوث هذه النتيجة. ويكون عادة عمر العائل عادة عاملاً محددًا. ففي حالة مرض الوباء الكبدي A، يمكن أن يتفاوت المرض السريري من حوالي 5% في حالة الأطفال الأقل من خمس سنوات إلى 75% في حالة البالغين. وبنفس الكيفية، فإن الأطفال أكثر عرضة للإصابة بمرض معوي فيروسي مقارنة بالبالغين. كذلك، فإن المناعة عامل مهم، وإن كانت متغيرة. بمعنى، أن المناعة قد توفر أو لا توفر حماية طويلة المدى من تكرار الإصابة، حسب نوع الكائن الممرض. فمثلاً، لا توفر المناعة حماية طويلة المدى ضد تطور مرض سريري في حالة الإصابة بفيروس نورواك (Norwalk virus) أو الجيارديا

(Giardia). لكنه يعتقد بأن المناعة ضد الإصابة مرة ثانية في حالة معظم الفيروسات المعوية وكذلك في حالة فيروس الوباء الكبدي A تستمر على امتداد حياة الفرد. أيضاً، فإن مجموعة غير محددة من العوامل قد تتحكم في احتمالات حدوث مرض. فعلى سبيل المثال، في تجارب على فيروس نوروك، فإن الذين لم يصابوا من المتطوعين من البشر بعدوى عند تعرضهم للمرة الأولى للفيروس لم يستجيبوا أيضاً عندما تعرضوا لهذا الفيروس للمرة الثانية. وبالمقابل، فإن المتطوعين الذين أصيبوا بمرض معدى معوي عند التعرض لهذا الفيروس في المرة الأولى، مرضوا أيضاً بعد أن تعرضوا له في المرة الثانية.

إن النتيجة النهائية للإصابة وهي الموت يمكن أن تحدث بسبب جميع الكائنات المعوية تقريباً. وغالباً ما تكون العوامل التي تتحكم في إمكانية حدوث وفاة هي ذاتها التي تتحكم في تطور مرض سريري. ويعتبر عمر العائل، مثلاً، غاية في الأهمية. وبذلك، فإن الموت عند الإصابة بمرض الوباء الكبدي A وفيروس شلل الأطفال أكثر حدوثاً في حالة البالغين مقارنة بالأطفال. وعموماً، يمكن القول أن الصغار جداً وكبار السن وضعيفي المناعة هم من يكونون في خطر أكبر من الوفاة كنتيجة حتمية لمعظم الأمراض. فمثلاً، يكون معدل الوفيات (%) بالنسبة للسالمونيللا بين عامة الناس 0.1%، بينما لوحظ أن هذه النسبة قد تصل إلى 8.3% في دور رعاية المسنين. وفي أمريكا الشمالية وأوروبا تتراوح نسبة عدد المصابين بمرض معوي إلى عدد الوفيات ما بين أقل من 0.1% إلى 0.94% كما هو موضح بالجدول (9-22). أما في حالة الإصابة بالبكتيريا المعوية الشائعة فإن معدل عدد الحالات إلى عدد الوفيات تتراوح ما بين 0.1 إلى 0.2% بين عامة الناس. ويمكن معالجة الأمراض المعدية البكتيرية بمضادات حيوية بينما لا يوجد علاج متاح للفيروسات المعوية.

جدول (22-9): معدلات عدد الحالات إلى عدد الوفيات في حالة الإصابة بالفيروسات والبكتريا المعوية.

الكائن	معدل الإصابات : الوفيات (%)
فيروس	
فيروس شلل الأطفال (poliovirus 1)	0.90
فيروس كوكسكافي (coxsackie)	
A2	0.50
A4	0.50
A9	0.26
A16	0.12
فيروس كوكسكافي (Coxsackie B)	0.94 – 0.59
Echovirus	
6	0.29
9	0.27
الوباء الكبدي A	0.0.60
Rotavirus	
(الإجمالي)	0.01
(المدخلون للمستشفيات)	0.12
النوروك (Norwalk)	0.0001
Adenovirus (الفيروس الغدي)	0.01
بكتيريا	
سيجيلا	0.2
سالونيلا	0.1
إيشيريشيا كولاي (0157:H7)	0.2
(Campylobacter jejuni)	0.1

مع الإدراك بأن المخاطرة الميكروبية تشمل أعداداً كبيرة جداً من الكائنات الممرضة التي يمكنها إحداث نتائج متنوعة تعتمد على عدد من العوامل – يكون الكثير منها غير

محدد - فإنه يتعين علينا الآن مواجهة مشكلة تقييم التعرض لها، الأمر الذي يتميز بتعقيدات خاصة به. وخلافاً للمياه الملوثة كيميائياً، فإن الأمر لا يستدعى استهلاك المياه الملوثة بالكائنات لكي يحدث الضرر. بمعنى، أن الأفراد الذين لا يشربون فعلياً، أو حتى يلمسون، مياهاً ملوثة يتعرضون لخطر العدوى ذلك أن الكائنات الممرضة - خاصة الفيروسات، قد تنتشر عن طريق التماس بين شخص وآخر أو ملامسة أشياء غير حية ملوثة (مثل الألعاب). وتسمى هذه الظاهرة معدل الإصابة الثانوية (Secondary attack rate)، الذي يعبر عنه كنسبة مئوية. فمثلاً، يمكن لشخص واحد مصاب بفيروس شلل الأطفال أن ينقله إلى 90% من الناس الآخرين الذين يرتبط بهم. إن الانتشار الثانوي للفيروسات موثق جيداً بالنسبة لتفشي الأمراض المنقولة بواسطة المياه بما في ذلك المرض الذي يسببه فيروس نورواك، الذي يبلغ معدل هجومه الثانوي نحو 30%. يمثل السؤال حول الجرعة مشكلة أخرى في تقييم التعرض. وكيف تُعرّف (الجرعة) في إطار هذا المضمون؟ وللإجابة على هذا السؤال، قام الباحثون بإجراء عدد من الدراسات لتحديد الجرعة المسببة للإصابة بالكائنات الدقيقة المعوية وذلك في عدد من المتطوعين. إن إجراء الاختبارات على الإنسان ضروري لأن تحديد قيمة الجرعة المسببة للإصابة في حالة الحيوانات والتوسع في ذلك لاستقراء ما يمكن أن يحدث للإنسان يكون عادة غير ممكن. ففي بعض الحالات، مثلاً، يكون الإنسان العائل الرئيسي أو العائل الوحيد المعروف. وفي حالات أخرى، مثل تلك الخاصة بالسيجيلا و/ أو فيروس النورواك، فإن الإصابة يمكن تحفيزها في حيوانات ثديية معملية، لكنه من غير المعروف ما إذا كان ممكناً سحب بيانات الجرعة المسببة للإصابة على البشر. إن كثيراً من البيانات الموجودة

ترتبط بفيروسات الأمصال الضعيفة أو سلالات لفيروسات غير نشطة تمت تنميتها معملياً، وذلك لغرض التقليل إلى الحد الأدنى من إمكانية الإصابة بمرض خطير.

في ما بعد، لابد من اختيار نموذج رياضي معين يربط بين الجرعة والاستجابة، يكون محوره الأفقي الجرعة ومحوره العمودي خطر الإصابة (انظر الشكل 22-3). إن اختيار النموذج الرياضي أمر حرج بحيث لا تكون هناك مبالغة شديدة ولا تقليل من شأن المخاطرة. ويمكن أن يستخدم نمط أسّي (exponential) محور يسمى (beta-poisson distribution) أو التوزيع الرياضي اللوغاريتمي البسيط (log - probit) أو توزيع أسّي لوصف هذه العلاقة لكثير من الكائنات الدقيقة المعوية (Hass,1983). وبالنسبة للنموذج بيتا (beta model) يمكن وصف احتمالية العدوى نتيجة لتعرض واحد (P) كما يلي:

$$P_A = 1 - \left(1 + \frac{N}{\beta}\right)^{-a} \quad (6 - 22)$$

حيث أن N تمثل عدد الكائنات التي ابتعلت في التعرض الواحد، أما a و β فهي قياسات تخص التفاعلات بين الفيروس والعائل (Hass, 1983). ويوضح الجدول (22 - 10) بعض القيم لكل من a و β لعدد من الكائنات الممرضة المنقولة بالمياه، وقد تم تحديد هذه القيم من دراسات على البشر. أما في حالة الكائنات الدقيقة، فإن النموذج الأسّي (exponential model) قد يكون أكثر ملاءمة لتمثيل الإصابة.

$$P_A = 1 - \text{EXP}(-rN) \quad (7 - 22)$$

ويكون (r) في هذه المعادلة عبارة عن كسر من أعداد الكائنات الدقيقة التي دخلت عن طريق الفم وعاشت لتحدث عدوى وهو ما يسمى احتمالية التفاعلات بين الكائنات الدقيقة والعائل (host-microorganism interaction probability).

عندما نستخدم هذه النماذج الرياضية، فإننا نقدر احتمالية أن نصاب مصابين بعد ابتلاع تراكيز متباينة من الكائنات الدقيقة. إن المخاطرة في اكتساب إصابة فيروسية نتيجة لتناولنا مياه شرب ملوثة تحتوي على تراكيز متفاوتة من الفيروسات المعوية يتم تحديده أولاً عن طريق استخدام المعادلة (6-22) أو المعادلة (7-22). يمكن أيضاً تحديد المخاطر السنوية والمخاطر على مدى الحياة بافتراض توزيع بويسون (Poisson distribution) للفيروس الموجود في المياه المستهلكة.

جدول (10-22): قياسات علاقات الجرعة-الاستجابة الأكثر مطابقة لدراسات الكائنات الممرضة المعوية.

قياسات النموذج الرياضي	النموذج الرياضي الأفضل	الكائن الدقيق
$0.374 = a$	Beta – Poisson	Echovirus 12
$186.69 = \beta$		
$0.26 = a$	Beta- Poisson	Rotavirus
$0.42 = \beta$		
$0.009102 = r$	Exponential	Poliovirus 1
$0.1097 = a$	Beta- Poisson	Poliovirus 1
$1524 = \beta$		
$0.409 = a$	Beta- Poisson	Poliovirus 3
$0.788 = \beta$		
$0.004191 = r$	Exponential	Cryptosporidium
$0.02 = r$	Exponential	Giardia lamblia
$0.00752 = r$	Exponential	Salmonella
$0.1705 = a$	Beta- Poisson	Escherichia coli
$10^6 \times 1.61 = \beta$		

على افتراض التعرض اليومي لتكيز ثابت من التلوث الفيروسي وذلك على النحو

التالي:

$$P_A = 1 - (1 - P)^{365} \quad (8 - 22)$$

حيث أن P_A المخاطرة السنوية (365 يوماً) للإصابة بالوباء مرة واحدة أو أكثر.

$$P_L = 1 - (1 - P)^{25.220} \quad (9 - 22)$$

حيث أن P_L تعنى خطر الإصابة بالوباء مرة واحدة أو أكثر على امتداد فترة الحياة

(بافتراض أن العمر يساوي 70 سنة = 25550 يوماً).

يمكن تحديد أخطار المرض السريري والوفاة عن طريق دمج المسميات الخاصة

بالنسبة المئوية للمرض السريري والوفاة المصاحبة لكل فيروس محدد:

$$PI = \text{مخاطرة المرض السريري} \quad (10-22)$$

$$PIM = \text{مخاطرة الوفاة} \quad (11-22)$$

حيث أن I النسبة المئوية للإصابة التي ينتج عنها مرض سريري، وأن M هي النسبة

المئوية للحالات السريرية التي ينتج عنها وفاة.

إن تطبيق هذه النماذج الرياضية يسمح لنا بتقدير المخاطر في التعرض للعدوى،

وتطور مرض سريري وحدوث وفاة لمستويات مختلفة من التعرض. وكما هو موضح في

الجدول (11-22)، مثلاً، فإن المخاطرة المقدرة للعدوى من فيروس واحد (rotavirus) في

100 لتر من مياه الشرب (بافتراض استهلاك 2 لتر من الماء يومياً) باستخدام النموذج بيتا

(beta - Poisson) يساوي 1.2×10^{-3} أو واحد في ألف ليوم واحد فقط من التعرض

وهذه المخاطرة سوف تزداد لتصبح 3.6×10^{-1} ، أو نحو واحد في ثلاثة، على أساس سنوي.

إن تطور مرض سريري وحدوث وفاة أيضاً يبدو أمراً ذا أهمية في حالة التعرض لمستويات منخفضة من فيروس (rotavirus) في مياه الشرب .

جدول (11-22): مخاطرة العدوى والمرض والوفاة بفيروس (rotavirus).

المخاطرة		تركيز الفيروس لكل 100 لتر
اليومية	السنوية	
الإصابة		
$2^{-10} \times 9.6$	1.0	100
$3^{-10} \times 1.2$	$1^{-10} \times 3.6$	1
$4^{-10} \times 1.2$	$2^{-10} \times 4.4$	0.1
المرض		
$2^{-10} \times 5.3$	$1^{-10} \times 5.3$	100
$4^{-10} \times 6.6$	$1^{-10} \times 2.0$	1
$5^{-10} \times 6.6$	$2^{-10} \times 2.5$	0.1
الوفاة		
$6^{-10} \times 5.3$	$5^{-10} \times 5.3$	100
$8^{-10} \times 6.6$	$5^{-10} \times 5.3$	1
$9^{-10} \times 6.6$	$6^{-10} \times 2.5$	0.1

أوصت وكالة حماية البيئة الأمريكية حديثاً بأن أية عملية معالجة لمياه الشرب يجب أن تصمم لضمان أن أي تجمع بشري لا يكون عرضة لخطر عدوى يزيد على 1:10000 لسنة كاملة من التعرض. ولتحقيق هذا الهدف، فإنه سوف يتضح من البيانات الواردة بالجدول (11-22) أن تركيز الفيروسات في مياه الشرب يتعين أن يكون أقل من واحد في ألف لتر من الماء. وعلى ذلك، فإنه إذا كان متوسط تركيز الفيروسات المعوية في المياه غير

المعالجة 1400 في 1000 لتر من الماء، فإن محطات المعالجة يجب أن تصمم لإزالة 99.99% على الأقل من الفيروسات الموجودة في هذه المياه قبل المعالجة (أيضاً، أنظر إلى الجزء 5.20).

وتلخيصاً لذلك كله، فإنه يمكننا ملاحظة أن تقييم المخاطرة أداة رئيسة لصنع القرار في دائرة التنظيم. ويستخدم هذا الأسلوب لشرح المخاطر الكيماوية والميكروبية إضافة للتأثيرات على النظام البيئي. ويمكن أن تستخدم نتائج مثل هذه التقييمات لاطلاع مديري المخاطر لاحتمالية ومدى التأثير البيئي الناتج عن التعرض لمستويات مختلفة من الإجهاد (الملوثات). وزيادة على ذلك، فإن هذه العملية، التي تسمح بالتحديد الكمي ومقارنة المخاطر المختلفة، مما يتيح لمديري المخاطر استثمار أقصى قدر من المعلومات المعقدة في عملية صنع القرار. إن هذه المعلومات يمكن استخدامها أيضاً لوزن التكلفة مقابل الفوائد للبدائل ولتطوير معايير قياسية أو بدائل معالجة.

دراسة حالة: تقييم المخاطرة الإيكولوجية لمذيب كيماوي جديد

طورت منذ فترة وجيزة شركة (Coat O'Many Colors) وهي مُصنع كبيرة للطلاءات مديماً جديداً صديقاً للبيئة لاستخدامه في صناعة مجموعة جديدة من طلاء المنازل. إن معظم مباني التصنيع التابعة لهذه الشركة تقع على أنهار أو قريباً منها، حيث يتم ضخ بقايا المذيب في هذه الأنهار. وبذلك، فإن كلا من الشركة والسكان مهتمون بخطر التلوث البيئي - خاصة خطر إتلاف جودة رياضة صيد الأسماك في المنطقة: لكنه وبنفس القدر فإن الأطراف المشاركة متحمسون لانطلاق نمو اقتصادي .

وتحت قانون التحكم في المواد السامة (TSCA)، فإن المذيب الجديد يجب أن يقيّم لتحديد فيما إذا كان يمثل أية مخاطر ملموسة للبيئة. ومراعاة لاحتياجات المجتمع الذي تأثر، فإن نقطة نهاية التقييم التي تم اختيارها هي حماية كل الأحياء المائية في الأنهار ضد أية مخاطر معتبرة. ولتحقيق نقطة نهاية هذا التقييم، أخذ قرار لقياس موت نوع واحد من الأسماك، وواحد من الأحياء المائية اللاقارية ونوع من الطحالب وسميت نقاط نهاية القياس (measurement endpoints) بمعنى، أن هذه الأنواع تم اختيارها لتكون أنواعاً بديلة أو ممثلة لأنواع الأحياء المائية في الأنهار. وأخيراً، فقد تم الاتفاق على أن هذه الأنواع سيتم اختبارها لمدة أسبوع واحد.

كانت النتائج مخيبة للآمال، فإنه عند نهاية فترة الاختبار، وجد أن المذيب الجديد سام جداً لجميع الأنواع المختارة (أنتج تأثيرات ضارة عند تركيزات تساوي 1.0 مجم في اللتر أو حتى أقل). ويتعين على الشركة أن تبلغ هذه النتيجة لجهات الاختصاص، متضمنة في توصيفها للمخاطر مناقشة لسمية هذه المادة الكيماوية لمختلف الأنواع الممثلة. إن مثل هذه النتيجة من المحتمل أن تدعم الاستنتاج بأن المركب سيكون ساماً لأنواع كثيرة من الأحياء المائية، بما فيها الكائنات المنتجة الأولية (Primary Producers) مثل الطحالب، والمستهلكين الأساسيين (Primary Consumers) مثل اللاقاريات المائية، وآكلات اللحوم مثل (الأسماك). لكن هذه النتيجة قد لا تكون مؤكدة وأن عدم اليقين موجود لأن الاختبارات لم تشمل مدى واسعاً من تراكيز المركب. إضافة لذلك، إن بيانات الاختبار هي بيانات مدى قصير كانت نقطة نهايته الموت، وبذلك فهي لا تعطي أية معلومات عن

التأثيرات في مرحلة ما قبل الموت على النمو والتكاثر التي يمكن أن تحدث عند تراكيز أقل من تلك التي تم اختبارها.

إن مثل هذه النتائج تشير إلى أن المذيب الجديد الذي أنتجته شركة (Coat O'Many) يشكل خطراً على الأحياء المائية في بعض الأنهار (نقطة نهاية التقييم). لكن هذه الخلاصة تستند على عدد من الافتراضات: (1) إن الأنواع التي تم اختبارها تكون حساسة بنفس القدر مثل كائنات أخرى توجد في الأنهار؛ (2) إن المذيب سوف يتواجد لفترة وعند تراكيز كافية ليتسبب في التأثيرات الضارة المقاسة؛ (3) إن الكائنات المائية ستتلامس مع المذيب. وليست هذه نهاية الأمر. فعلى الرغم من أن المذيب قد يمثل خطراً محددًا لبعض أنواع الأحياء المائية، فإن مدير مخاطر معين عليه أن يزن الفوائد الاقتصادية و/أو الاجتماعية لاستخدام المادة الكيماوية مقابل المخاطرة. لذلك، فإن قرارات إدارة المخاطر قد تضع متطلبات للتخلص من هذه المادة عبر عملية لمعالجة المخلفات، وتمنع تصريف المادة الكيماوية أو أنها قد تطلب اختبارات إضافية.

المراجع والاطلاع الموصى به

- Cockerham L.G. and Shane B.S. (1994) *Basic Environmental Toxicology*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Covello V., von Winterfeldt D., and Solvic P.(1988) Risk Communication: A Review of the Literature. *Risk Analyses*. **3**, 171- 182.
- Gerba C.P., and Rose J.B. (1993) Estimating viral disease risk from drinking water . In *Comparative Environmental Risks* (C.R. Cothorn, Editor), pp. 117-135. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Gerba C.P., Rose J.B, and Haas C.N. (1995) Waterborne disease- Who is at risk? In *Water Quality Technology Proceedings*, PP.231-254. American Water Works Association, Denver, Colorado.
- Haas C.N. (1983) Estimation of risk due to low levels of microorganism: A comparison of alternative methodologies. *American Journal of Epidemiology*. **118**, 573-582.
- Kolluru R.V. (1993) *Environmental Strategies Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Landis W.G. and Yu M.H. (1995) *Introduction to Environmental Toxicology*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- National Research Council (1983) *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. National Academy Press. Washington, D.C.
- National Research Council (1989) *Improving Risk Communication*. National Academy Press. Washington, D.C.
- National Research Council (1991) *Frontiers n Assessing Human Exposure*. National Academy Press. Washington, D.C.

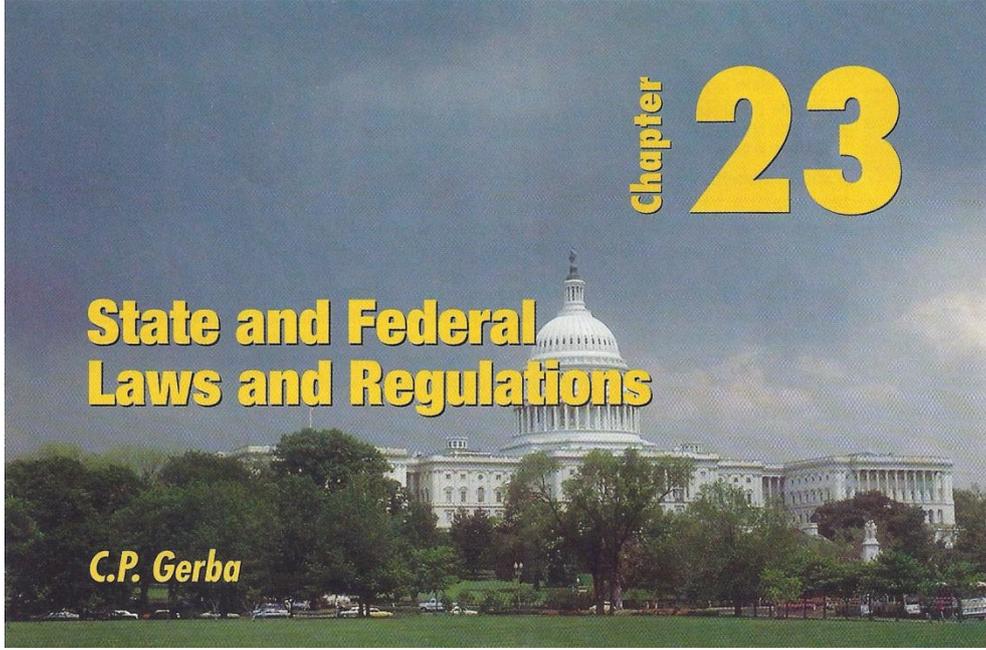
- National Research Council (1993) *Managing Wastewater in Coastal Urban Areas*. National Academy Press. Washington, D.C.
- Regli S., Rose J.B., Haas C.N., and Gerba C.P. (1991) *Modeling the risk from Giardia and viruses in drinking water*. Journal of the American Water Works Association. **83**, 76-84.
- Ricci P.F. and Molton L.S (1985) *Regulating cancer risks*. *Environmental Science and Technology*. **19**, 473-479.
- Rodricks J.V. (1992) *Calculated Risk: Understanding The Toxicity and Human Health Risks of Chemicals in Our Environment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- U.S. EPA (1990) *Risk Assessment Management and Communication of Drinking Water Contamination*. EPA 625/4-89-024. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1992a) *Dermal Exposure Assessment:Principles and Applications*. EPA 600/8-91/011B. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1992b) *Framework for Ecological Risk Assessment*. EPA 1630/R-92/001. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1986) *Guidelines for Carcinogen Risk Assessment*. Federal Register, September 24. 1986.
- Wilson R., and Crouch E.A.C. (1987) Risk assessment and comparison: An introduction. *Science*. **236**, 267-270.

أسئلة:

1. ما هي بعض الاختلافات بين المخاطر التي تسببها الكيماويات وتلك التي تسببها الكائنات الدقيقة؟
2. ما هي بعض التطبيقات الممكنة لتقييم المخاطر؟
3. ما هو الفرق بين تقييم المخاطر وإدارة المخاطر؟
4. لماذا يكون اختبار منحنى الجرعة - الاستجابة مهماً جداً في تقييم المخاطر؟
5. ما هو المنحنى الذي يربط الجرعة - الاستجابة الأكثر تحفظاً؟
6. ما المقصود بمنحنى الجرعة الاستجابة الأقصى؟
7. ما هي أنواع السموم التي لها منحنى جرعة - استجابة قصوى؟
8. لماذا نستخدم عوامل أمان في تقييم المخاطر؟
9. ما الفرق بين المخاطر الإرادية وغير الإرادية؟ أعط بعض الأمثلة لكل منهما.
10. أدرج الخطوات الأربع في تقييم مخاطرة صحي رسمي.
11. ما هي بعض مسارات التعرض الأكثر شيوعاً؟ متى يتعين علينا الأخذ في الاعتبار التراكم الحيوي في حالة التعرض؟
12. لماذا تكون بعض الكيماويات أكثر احتمالاً للتراكم الحيوي من أخرى؟ أعط بعض الأمثلة.
13. ما هي الأنواع المختلفة للإجهادات التي يمكن أن يتعرض لها نظام حيوي معين؟

14. هل التعرض للعدوى يقود دائماً إلى المرض بكائنات ممرضه معوية؟
15. ما هي العوامل التي تحدد التعرض للمرض والوفاة نتيجة لعدوى ميكروبية؟
16. ما هي أنواع منحنى الجرعة - الاستجابة التي تعكس أفضل ما يمكن التعرض لكائن ممرض؟
17. ما هي بعض التطبيقات المحتملة لتقييم المخاطرة الميكروبية؟

الباب الثالث والعشرون
القوانين والتنظيمات الفيدرالية والولاية



تفرض التنظيمات روتينياً على المستوى الفيدرالي والولاية. ويعتمد مجلس النواب والشيوخ (الكونجرس) بالولايات المتحدة على نتائج البحث المسؤول الذي يوفره علماء البيئة لتصميم هذه التنظيمات.

1.23 مراجعة تنظيمية

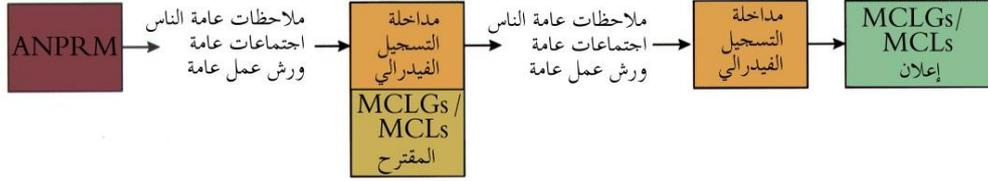
في الولايات المتحدة الأمريكية معظم التشريعات البيئية فيدرالية وقد تم سنها منذ منتصف الستينيات من القرن الماضي. إضافة إلى ذلك، توجد كثير من القوانين البيئية والتنظيمات الخاصة بالولاية التي تم تصميمها لتتماشى مع البرامج الفيدرالية. لكن التشريع

الفيدرالي يكون هو الأساس في تطوير التنظيمات الهادفة لحماية الهواء، والمياه ومصادر الغذاء وللتحكم أيضاً في انبعاث الملوثات. إن سن تشريع جديد يمنح سلطة للجهات التنفيذية للقيام بتطوير تنظيمات بيئية محددة وتطبيقها فعلياً. ومن بين أمور أخرى، قد تشمل التنظيمات تطوير معايير ضخ المخلفات أو متطلبات تنظيف مواقع ملوثة، أو وضع إرشادات للتخلص من المخلفات. وتعتبر وكالة حماية البيئة (EPA) الوكالة الفيدرالية المسؤولة على تطوير التنظيمات البيئية وتطبيقها.

وفي سعيها لوضع مقاييس لنظم مياه الشرب قامت السلطة الفيدرالية بوضع قانون الحجر بين الولايات لعام 1893. ونتج عن هذا التدبير التنظيم الأول المرتبط بالمياه وكان ذلك في عام 1912 الذي ينص على: إن استخدام الأفراد لنفس كوب الشرب على وسائل النقل بين الولايات ممنوع. وبعد ذلك بفترة قصيرة، تم التعرف، على أنه مهما كان الكوب نظيفاً وصحياً فإن نظافته لا قيمة لها إذا ما كان الماء الذي يوضع فيه غير آمن. ولذلك، وفي عام 1914 تم اعتماد المعيار الرسمي الأول لمياه الشرب وهو معيار بكتريولوجي. ومنذ عام 1914 حتى 1975 استخدمت سلطات الصحة الفيدرالية والولائية والمحلية، وبالتنسيق مع العاملين الرسميين في المياه هذا المعيار من أجل تحسين نظم المياه للتجمعات السكانية ولحماية العامة ضد الأمراض المنقولة بالمياه .

وقد تم تقديم رسم تخطيطي لصنع تشريع فيدرالي (الشكل 23-1) ولخص في

الجدول (23-1).



شكل (1-23): عمليات تطور تنظيم معين حسب قانون مياه الشرب الآمنة. يتم إتباع سلسلة من الخطوات في تطوير تنظيمات جديدة للملوثات في مياه الشرب أو العمليات التي تتبع حمايتها، وتشمل هذه الخطوات عادة جملة من مداخلات عامة الناس في الدعوى، والتسجيل الفيدرالي، والاجتماعات للسماح بتعليقات العامة والجموعات البيئية والصناعة المنظمة، قبل تطوير التنظيم أو القانون في صورته النهائية.

2.23 قانون مياه الشرب الآمنة

في عام 1974، أعطى تمرير قانون مياه الشرب الآمنة (SDWA) الحكومة الفيدرالية السلطة العليا لحماية مياه الشرب. وقبل هذا الوقت، كانت كل ولاية تملك سلطة عليا تقوم بتطوير وفرض المعايير. وبموجب هذه السلطة، فإن معايير محددة قد تم الإعلان عنها تخص تراكيز الملوثات والحد الأدنى لمعالجة المياه. وقد وضعت مستويات الملوثات القصوى (MCL) أو المستوى الأقصى المستهدف للملوثات (MCLG) للملوثات محددة في مياه الشرب. وبينما يكون MCL الذي يمثل المستوى المطلوب، قابلاً للتحقيق، فإن MCLG الذي يمثل المستوى المرغوب، قد يكون أو لا يكون قابلاً للتحقيق. فمثلاً، يكون MCLG للفيروسات المعوية بمياه الشرب صفراً نظراً لأن ابتلاع فيروس واحد فقط قد يسبب مرضاً. ولا يمكننا دائماً الوصول إلى الصفر، ولكننا مضطرون للمحاولة. ومن ضمن التدابير في قانون مياه الشرب الآمنة (SDWA)، يوجد عدد من القواعد المحددة مثل قاعدة المعالجة السطحية

(Surface Treatment Rule)، التي تلزم جميع إدارات المياه في الولايات المتحدة بتوفير ترشيح وتعقيم للتحكم في الأمراض المنقولة بواسطة المياه والتي تسببها الجيارديا Giardia والفيروسات المعوية. إن هذه القواعد قد تم تطويرها من خلال عملية تسمح بمساهمات من التجمعات السكانية والمجموعات ذات الاهتمام الخاص، وعمامة الناس، وكذلك المجتمع العلمي. إن هذه العملية موضحة في الشكل (1-23).

ولمساعدة الجهات القائمة على مياه الشرب، أصدرت وكالة حماية البيئة (EPA) كتيبات إرشادية لأنواع المعالجة التي تم تطويرها. وتتيح أجزاء أخرى مهمة لقانون مياه الشرب الآمنة تأسيس برامج خاصة بالولاية لفرض التشريعات. وتكون كل ولاية مسؤولة عن تطوير برامجها التنظيمية الخاصة، تقدم بعدها لوكالة حماية البيئة للموافقة عليها. وهنا يتعين على برامج الولاية الخاصة أن تضع معايير لمياه الشرب تكون مساوية، أو أكثر صرامة من المعايير الفيدرالية. كما يجب أيضاً، أن تصدر هذه البرامج تصاريح للمراكز التي تعالج موارد مياه الشرب وتقوم بتطوير مناطق حماية للآبار التي توفر موارد مياه شرب جوفية.

3.23 قانون المياه النظيفة

بدأ قانون المياه النظيفة مع قانون حماية المياه من التلوث عام 1948، وكان القانون الأول الذي يتناول التحكم الشامل لتلوث المياه. ونظراً لأنه صمم للتحكم في تفرغ الدفق (effluents) الذي يصل المياه السطحية، فإن هذا التشريع يركز في الأساس على مصادر التلوث الأولية (point sources).

وحسب بنود هذا القانون فإنه يتم وضع معايير الدفق وإصدار التصاريح حسب هذه المعايير وذلك بالنسبة لمصادر تلوث المياه الجديد منها والقديم. وهذه المعايير تمثل المحددات لمصدر معين. كذلك، فإن القانون يدرج تصنيفات لهذه المصادر الأولية مثل محطات معالجة مياه الصرف الصحي، التي يتعين أن تحدد لها وكالة حماية البيئة معايير الأداء التي تلتزم بها. وقد توفر وكالة حماية البيئة قائمة للملوثات سامة وتضع حدوداً للدفق حسب أفضل تقنية اقتصادية متاحة لمصادر تلوث أولية محددة. إضافة لذلك، فإن وكالة حماية البيئة قد تصدر معايير ما قبل المعالجة (بمعنى، معالجة تسبق تفريغ أو ضخ المخلفات لشبكة المجاري) خاصة بالملوثات السامة.

إن أداة التطبيق الرئيسة لقانون المياه النظيفة هو التصريح. فأى شخص - عام أو خاص منحرف في بناء أو تشغيل مرفق معين قد يضخ أي شيء - حيواني، أو نباتي، أو معدني (أو حتى طاقة مثلما في حالة الحرارة) - لتدخل في مياه عذبة قابلة للملاحة يتعين عليه أولاً أن يتحصل على تصريح (أنظر الجزء 2.16). ويجب أن تشمل طلبات التصريح شهادة عن أن المادة التي تضخ تتفق مع بنود قابلة للتطبيق بالقانون الخاص بنظام منع ضخ التلوث القومي (NPDES)، بينما تصدر التصاريح الخاصة بضخ مادة معينة لمياه المحيط حسب دلائل إرشادية خاصة عن طريق وكالة حماية البيئة.

جدول (1-23): مجال التنظيمات الفيدرالية التي تتحكم في التلوث البيئي بالولايات المتحدة.

التنظيم أو التشريع الفيدرالي	الغرض / المجال
السياسات: القانون القومي للسياسات البيئية (NEPA). صدر هذا القانون عام 1970.	يعلن هذا القانون سياسة وطنية لتحفيز الجهود لمنع أو استئصال الأضرار بالبيئة. وتتطلب هذه السياسات وكالات فيدرالية لتقييم التأثير البيئي لتطبيق البرامج الكبرى واتخاذ الإجراءات في وقت مبكر من مرحلة التخطيط.
قانون منع التلوث لسنة 1990.	إن الهدف الأساسي هو منع أو تخفيض التلوث عند المصدر بدلاً عن أسلوب التحكم عند نهاية الأنبوب .
الماء : قانون المياه النظيفة. صدر هذا القانون عام 1948.	يسأصل تفرغ أو ضخ الملوثات بالمياه المتحركة. يمثل السلطة العليا لبرامج التحكم في تلوث المياه.
تعديل عام 1977.	يغطي التنظيمات الفيدرالية والصادرة عن حكومات الولايات الخاصة بإضافة الوحل الصحي (Sludge).
قانون مياه الشرب الآمنة (SDWA). صدر القانون عام 1974.	يحمي مصادر مياه الشرب وينظم تقنيات معالجة المياه الصحية باستخدام معايير مياه الشرب على أساس أقصى مستويات الملوث (MCLS) .
الهواء النظيف: قانون الهواء النظيف. صدر هذا القانون عام 1970.	هذا القانون، الذي عدّل قانون جودة الهواء لعام 1967، يهدف لحماية وتحسين جودة مصادر الهواء. ويضع هدفاً يتمشى مع معايير جودة الهواء الطلق .
تعديلات عام 1977.	لتحديد قضايا تمنع الصناعة من الاستفادة اقتصادياً من عدم احترام القوانين .
تعديلات عام 1990.	تتناول الأهداف الرئيسية الأمطار الحمضية والانبعاثات محطات الطاقة .
المخلفات الخطرة : القانون الشامل للمسئولية والتعويض والاستجابة (CERCLA). صدر عام 1980. تم تعديله عام 1986 يشمل التمويل العظيم.	هذا القانون الذي يعرف بالتمويل العظيم أو CERCLA ، يعطى لوكالة تنفيذ السلطة للاستجابة لانبعاثات المخلفات الخطرة. ويدعم هذا القانون قانون التخلص من المخلفات الصلبة.
قانون تعديل وإعادة الصلاحيات للتمويل العظيم (SARA). صدر عام 1986.	هذا القانون يراجع ويمدد قانون التمويل العظيم عن طريق إضافة صلاحيات جديدة تعرف باسم التخطيط الاستعمالي وحق الناس للمعرفة وصدر عام 1986. يشمل الإعلان سحب المواد الكيماوية السامة.
قانون التحكم في المواد السامة. صدر عام 1976.	ينظم هذا القانون برنامج المواد السامة الذي يتم تطبيقه بواسطة وكالة حماية البيئة (EPA) ينظم هذا القانون أيضاً تصنيف والتخلص من مواد PCBs .
تعديل عام 1986.	يتناول قضايا الكشف عن مادة الاسبستوس وإزالتها.
قانون المحافظة على الموارد واسترجاعها (RCRA). صدر في عام 1976. وتم تعديله في عام 1984.	هذا القانون راجع بالكامل قانون التخلص من المواد الصلبة. وفي وضعه الحالي يمثل هذا القانون تراكمًا لتشريعات يعود تاريخها لإقرار قانون التخلص من المواد الصلبة لعام 1965. وهو يحدد المخلفات الخطرة، ويلزم بضرورة رصد ومتابعة المخلفات الخطرة، وينظم المرافق التي تقوم بحرق هذه المخلفات والزيوت في الغلايات والمحارق الصناعية. وتتطلب وجود قوائم جرد تحدد مواقع المخلفات الخطرة .
القانون الفيدرالي للمبيدات الحشرية والفظرية ومبيدات القوارض (FIFRA). صدر عام 1947.	ينظم هذا القانون استخدام وأمان منتجات المبيدات.
تعديلات عام 1972 .	استهدفت التأكيد على أن الضرر البيئي لا تعادله المكاسب.

وكما هو بالنسبة لقانون مياه الشرب الآمنة، فإن الولايات مسؤولة عن تطبيق قانون المياه النظيفة؛ أي أنه يتعين عليها تطوير وتسليم طريقة لوكالة حماية البيئة حول تطبيق وتفعيل هذه المعايير. وأخيراً فإن قانون المياه النظيفة يسمح بتوفير منح للولايات لمساعدتها على ممارسة برامج منع التلوث. كما أنها توفر أيضاً منحاً للمساعدة في تطوير وتطبيق برامج إدارة ومعالجة المخلفات، بما في ذلك تشييد مرافق لمعالجة المخلفات.

4.23 القانون الشامل للمسؤولية والتعويض والاستجابة

في أواخر السبعينيات من القرن الماضي، عندما تكتشف أن مكان الردم الذي تديره شركة (Love Canal) في ولاية نيويورك تمثل كارثة بيئية كبرى. فإن ذلك دفع الكونجرس لإصدار القانون الشامل للمسؤولية والتعويض والاستجابة (CERCLA) عام 1980. ويجعل هذا القانون الملاك والقائمين على مواقع التخلص من المخلفات الخطرة مسؤولين عن تكاليف التنظيف والأضرار التي تلحق بالمتلكات. كذلك، فإن القائمين على النقل والمنتجين يجب أن يتحملوا أيضاً بعض الأعباء المالية. كما أسس هذا التشريع أيضاً لتوفير تمويل تنظيف بمبلغ 1.6 بليون دولار أمريكي (يعرف بقانون التمويل العظيم) يتم توفيره على مدى فترة خمس سنوات. ويأتي 90% من إجمالي هذا المبلغ من الضرائب التي تفرض على إنتاج النفط والكيماويات الذي تنتجه الصناعة في الولايات المتحدة، أما الباقي فيأتي عن طريق دافعي الضرائب. وقد تم فيما بعد رفع هذا المستوى ليصبح 8.5 بليون دولار أمريكي. ويضع قانون التمويل العظيم شروطاً صارمة للمحاسبة والمسؤولية (المسؤولية دون إثبات لارتكاب خطأ) على الأطراف المسؤولة عن تنظيف المرافق. وقد وجدت المحاكم أنه

حسب قانون التمويل العظيم فإن هذه الأطراف مجتمعة ومنفردة مسؤولة قانوناً، بمعنى أن كل طرف يمكن التحقق منه يكون مسؤولاً قانوناً عن التكلفة الكلية للإزالة أو الإصحاح، بغض النظر عن مستوى الذنب الذي يكون قد تسبب فيه طرف ما في خلق موقع ملوث معين.

إن التمويل العظيم مسخر بالكامل لتنظيف المواقع التي تشكل تهديدات كافية لصحة الإنسان والبيئة، بمعنى، أنها مخاطرة مؤكدة. إضافة إلى ذلك، يوفر التمويل العظيم فقط دعماً لتنظيف الأماكن الملوثة والتعويض عن الأملاك التي أتلقت. ولا يمكن استخدام هذا التمويل لتعويض ضحايا التخلص غير القانوني لمخلفات خطرة التي تسبب ضرراً شخصياً أو وفاة. وعلى الضحايا أن يأخذوا شكواهم إلى المحاكم (شكل 23 - 2).

5.23 قانون المبيدات الحشرية والقوارض الفيدرالي

نظراً للتأثيرات الضارة الكامنة للمبيدات الحشرية على الأحياء البرية والبشر، قام الكونجرس بإصدار القانون الفيدرالي الخاص بالمبيدات الحشرية ومبيدات القوارض (FIFRA) عام 1947. ويلزم هذا القانون، الذي كان يعدل من وقت لآخر، بأن تتم الموافقة على تسجيل جميع المبيدات التجارية (بما في ذلك المطهرات ضد الكائنات الدقيقة) بواسطة وكالة حماية البيئة.

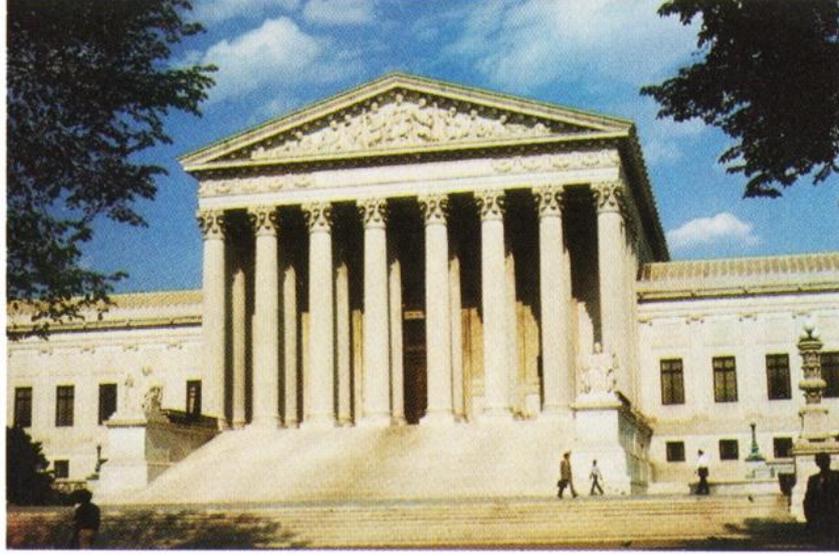
ويضم قانون المبيدات والقوارض عدة بنود: (1) دراسات يقوم بها الصانع حول المخاطر التي تسببها المبيدات (يحتاج تسجيل)؛ (2) تصنيف وإفادة على المبيدات حسب الاستخدام المحدد (كوسيلة للتحكم في التعرض)؛ (3) منع (أو تعليق) استخدام المبيدات التي تكون ضارة للبيئة؛ (4) تفعيل المتطلبات السابقة من خلال المعاينة، وضع الإرشادات،

والملاحظات وتنظيمات الولاية. فمثلاً يتعين أن تضم كل عبوة مبيد ملصقاً يشار فيه إلى أن محتوياتها قد تم تسجيلها مع وكالة حماية البيئة.

6.23 قانون الهواء النظيف

يلزم قانون الهواء النظيف الذي أقر بداية عام 1970 وكالة حماية البيئة بتأسيس معايير جودة الهواء الطلق القومي (NAAQS) لعدد من الملوثات، مثل المادة الجسيمية المعلقة، ثاني أكسيد الكبريت، والأوزون، وأول أكسيد الكربون، وأكاسيد النيتروجين، والهيدروكربونات، والرصاص (ومن بين هذه المواد، يعتبر الأوزون الأكثر صعوبة والأقل احتمالاً لاستيفاء المعايير (انظر أيضاً الجزء 2.2.12)؛ ويحدد كل معيار المستوى الأعلى المسموح به، كمتوسط لفترة زمنية محددة. إن معايير جودة الهواء الطلق الأولية قد تم تصميمها لحماية صحة الإنسان. أما معايير جودة الهواء الطلق الثانوية فقد تم تصميمها للمحافظة على الرؤية وحماية المحاصيل، والمباني وموارد المياه (الشكل 23-3).

وهذا القانون الذي يحدد متطلبات التحكم في تلوث الهواء لمختلف المناطق الجغرافية للولايات المتحدة، يتعامل أيضاً مع التحكم في الانبعاثات الصادرة عن عوادم السيارات. وتجبر هذه المتطلبات صناع السيارات على تحسين تصاميمهم للحد من انبعاثات أول أكسيد الكربون، والهيدروكربونات، وأكاسيد النيتروجين. وفي المدن أو المناطق حيث تكون تراكيز الأوزون وأحادي أكسيد الكربون عالية يلزم توفر وقود أعيد تركيبه أو تمت معاملته بالأكسجين. ويتعرض هذا القانون أيضاً لانبعاثات محطات الطاقة من ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين التي يمكن أن تولد أمطاراً حمضية (انظر الجزء 2.12).



شكل (2-23): قانون التمويل العظيم لا يتعرض لمسألة التعويض المالي للمعانة الناتجة عن المخلفات الخطرة التي تم التخلص منها بصورة غير قانونية. هذه المسائل، وحتى دستورية التمويل العظيم وقوانين بيئية أخرى، تركت للمحاكم مثل المحكمة العليا بالولايات المتحدة (الصورة أعلاه) لاتخاذ القرار.

7.23 قانون منع التلوث

أسس قانون منع التلوث لعام 1990 كسياسة وطنية استناداً إلى سياسات السلطة العليا لإدارة المخلفات، والمصممة لمنع التلوث وتشجيع إعادة التدوير من خلال:

1. المنع: وذلك لاستئصال أو تقليل التلوث عند المصدر كلما كان ذلك ممكناً.
2. التدوير: وذلك لإعادة تدوير المخلفات التي لا يمكن منعها بأسلوب آمن بيئياً كلما كان ذلك ممكناً.



شكل (23-3): أدى تشريع الهواء النظيف إلى تحسين في جودة الهواء عالمياً. سوف يحتفظ هذا المبنى (Westminster Abbey) في لندن، بريطانيا الذي كان لونه أسوداً لقرون بسبب حرق الفحم، بعد تنظيفه في أوائل الثمانينات من القرن الماضي (الصورة أعلاه) وذلك نتيجة للقوانين التي تمنع حرق الفحم في لندن وأجزاء كثيرة من بريطانيا.

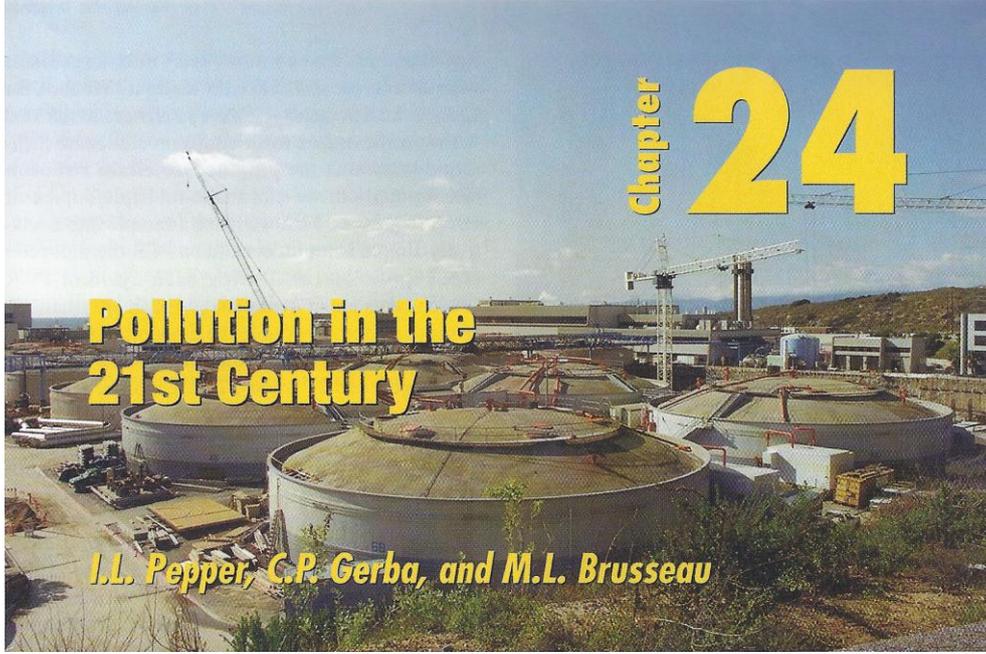
3. المعالجة: لمعالجة المخلفات التي لا يمكن منعها وإعادة تدويرها حسب المعايير المناسبة قبل تحريرها أو نقلها.

4. التخلص: وذلك بالتخلص بأسلوب آمن من المخلفات التي لا يمكن منعها أو تدويرها أو معالجتها. وقد طورت وكالة حماية البيئة التي تستوعب منع التلوث في جميع برامجها ونشاطاتها برامج تخفيض تطوعي فريدة مع القطاعات العامة والخاصة.

المراجع ولمزيد الاطلاع

- Calabrese E.J., Gilbert C.E., and Pastides H. (1989) Safe Drinking Water Act Lewis Publishers, Ann Arbor, Michigan.
- Jain R.K. *et al.* (1994) Regulatory framework: United States, Canada, and Mexico. In *Environmental Strategies Handbook* (R.V. Kolluru, Editor), pp. 67-117. McGraw-Hill, New York.
- Outwater A.B. (1994) Reuse of Sludge and Minor Wastewater Residual. Lewis Publishers, Ann Arbor, Michigan.

الباب الرابع والعشرون
التلوث في القرن الواحد والعشرين



يتعين على محطة المعالجة (Hyperion Treatment Plant) بمدينة لوس انجلوس، ولاية كاليفورنيا التي تعالج 1.4 بليون لتر من المياه العامة في اليوم الواحد تطبيق التقنية عند أعلى مستوى متقدم للتعامل مع الأحجام المتزايدة من المياه العادمة تحت قوانين أكثر صرامة.

1.24 قياس الجودة البيئية: إلى أي مدى يكون النظيف نظيفاً؟

نحن نعرف أن المشاكل البيئية (بعضها حاد جداً) توجد عند كل المستويات: محلية ووطنية وكونية. لكن وكما رأينا، فإن تقنيات وأساليب لتخفيف تأثيرات التلوث متاحة أيضاً وبوفرة متزايدة. وعموماً، فإننا نمتلك المعرفة والتقنية لحل كثير من مشاكل التلوث. فإذاً، ما

الذي يمنعنا من جعل الأرض منطقة خالية من التلوث؟. الإجابة معقدة، بالطبع، وتعتمد على عدد من العوامل المختلفة، بما في ذلك مؤشرات مالية وسياسية واجتماعية. لكنه، وفي نهاية المطاف، نستطيع القول أن مستوى التلوث حولنا هو مؤشر على مدى جدبتنا في إدراك المشكلة، وإلى أي حد نحن مستعدين لدفع فاتورة هواء وماء وأرض نظيفة.

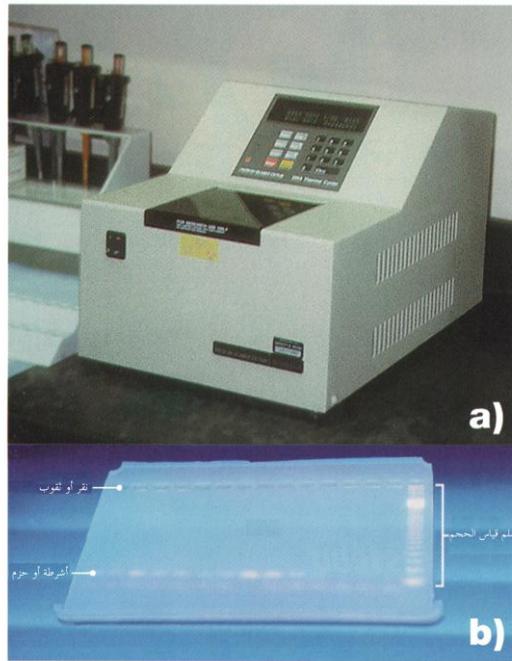
ومع تحسين تقنياتنا، فإننا باستمرار نعيد تعريف فهمنا لمصطلح (نظيف). وباستخدام أجهزة جديدة وطرق مبتكرة، فإننا أصبحنا أكثر قدرة على قياس مؤشرات بيئية بدرجة أكثر حساسية ودقة. فمثلاً، استخدم الباحث جهاز الامتصاص الذري الطيفي (AA) لتحديد تراكيز العناصر في الماء، والذي يعطي قياسات عند مستوى المليجرام في اللتر. ثم دخلت طرق الامتصاص الذري بدون لهب باستخدام فرن الجرافيت، مما أدى إلى تحسن حدود الكشف ليصل مستوى الميكروجرام في اللتر. وفي الوقت الحاضر يمكن للباحث استخدام جهاز الطيف البلازمي (inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy) الذي يمكنه قياس تراكيز بعض العناصر بالنانوجرام في اللتر.

وهناك جهاز آخر تعرض لتعديلات مهمة وهو كروماتوجرافيا الغاز (GC)، الذي يستخدم أساساً لتحليل المركبات العضوية. وكان جهاز الكشف الأول لكروماتوجرافيا الغاز هو كاشف التوصيل الحراري الذي كانت حدود كشفه تتراوح ما بين 10-100 ملليجرام في اللتر. أما الكواشف الأحدث التي تشمل كاشف التأين اللهب الذي يمتلك حداً للكشف يصل إلى 100 ميكروجرام في اللتر تقريباً، وكاشف لاقط الإلكترون الذي يصل حد كشفه إلى مدى النانوجرام.

كما يوجد لدينا أجهزة جديدة واعدة، مثل المجهر الذري atomic force microscope (AFM) وما يماثله. وباستخدام جهاز AFM، يمكن في الوقت الحاضر الحصول على صور لجزيئات من المادة. فمثلاً، يستخدم حالياً جهاز AFM ومجاهر ماسحة (scanning tunneling microscopes) في علم المواد للكشف عن العيوب على سطوح المواد المستخدمة في الصناعات الالكترونية. واليوم، بدأ استخدام هذه الأجهزة لتحديد الخصائص عند المستوى الجزيئي للسطوح البيئية، مثل معادن الطين. ومستقبلاً قد نصبح قادرين على استخدام AFM لمعرفة الملوثات وقياسها عند المستوى الجزيئي.

ومع التغيرات والتحسين في التقنية (التي تسمح لنا بقياس مؤشرات لم يعرف عنها شيء منذ عشر سنوات مضت فقط، جاءت مجموعة من التقنيات الجديدة والمثيرة من جميع حقول العلم. فمثلاً، يمكننا الآن (رؤية) الكائنات الدقيقة دون الحاجة إلى مجهر. كيف نقوم بذلك؟. نحن نبحث عن أحماض أمينية محددة، أو تتابع DNA الملازم لكائنات محددة. وباستخدام التقنية التي احدثت ثورة كبيرة وهى ما يعرف بطريقة تفاعل البوليميريز التسلسلي polymerase chain reaction (PCR)، يمكننا صنع نسخ متعددة لتتابع جزيئي DNA. ونضع بداية عينة داخل جهاز بسيط نسبياً يسمى PCR الحراري (انظر الشكل a1-24). وأثناء كل دورة لجهاز PCR (التي تستغرق نحو 4 دقائق)، يمكننا عمل نسخة انزيمياً، أو مضاعفة كمية DNA في عينة معينة. ولذلك، فإنه بعد تكرار العملية 25 مرة، يمكننا توليد 2^{25} نسخة. إن هذه التقنية تسمح لنا بالكشف عن DNA الخاص بكائن ما عند مستوى الأتوجرام - أي أنه يمكننا الكشف عن كمية تساوي 10^{-18} من الجرام، أو واحد من مليون

من واحد من المليون من المليون من الجرام. وبعد التكبير بواسطة جهاز PCR، يتم تحليل DNA باستخدام طريقة الهجرة الكهربائية باستخدام الجل (gel electrophoresis). ويظهر DNA الذي يتم صبغه بمادة بروميد الايثيديوم (ethidium bromide) كأشرطة وردية اللون عندما ينظر إليها تحت الأشعة فوق البنفسجية (الشكل 24-1b).



الشكل (24-1): أصبحت التقنيات الحديثة في كثير من المجالات مقبولة بشكل واسع من قبل الوكالات التنظيمية لتحل بدلاً عن صور التحليل القديمة. (a) جهاز الدوران الحراري (thermo cycler) الصورة العليا، يمكنه المساعدة في الكشف على الكائنات الممرضة في عينات المياه عن طريق تكبير كميات صغيرة تقاس بالأنوجرام (10^{-18}) لجزيء DNA ميكروبي إلى مستويات يمكن كشفها في عملية تسمى بتفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR) (b) جهاز الرحلان الكهربائي في الجل (Gel electrophoresis) التي تفصل DNA إلى أشرطة أو حزم واضحة يمكن تمييزها بسهولة بعد صبغها بصبغة مضيئة، مثل مادة بروميد الايثيديوم، وهو ما يجعل من طريقة PCR أسرع وأكثر حساسية مقارنة بطرق الاستنبات التقليدية.

إن ظهور هذه التقنيات الحساسة جداً والدقيقة بشكل كبير لا يشير إلى الحاجة لإعادة معاينة تعريف نظيف فحسب، ولكن أيضاً لمنظومة تساؤلاتنا البيئية. خذ مثلاً، العناصر الثقيلة في التربة. منذ أكثر من ربع قرن، كنا سنعتبر أن أية تربة لا يوجد بها مستويات مقاسة من الرصاص مثلاً، هي تربة نقية وعلى حالتها الأصلية. لكنه، وفي الوقت الحاضر، يمكننا قياس مستويات أثرية من الرصاص في نفس التربة. والسؤال هو، هل أن هذه التربة مازالت تعتبر نقية؟ هل كانت كذلك عند أي وقت من الأوقات؟. والآن علينا أن نسأل سؤالاً جديداً: هل أن هذه التربة نقية بدرجة كافية؟ وهذا السؤال يغير الجدل. وبذلك، فإن الحلول الحالية يجب صياغتها بحيث تساعدنا على تحديد ما هو مستوى الملوث الذي نستطيع أن نقله وما هي الحدود التي يتعين علينا وضعها على تنظيف مواقع ملوثة معينة.

2.24 دور الحكومة

من هو المسؤول؟

بينما يستطيع علم التلوث أن يوفر لنا إجابة للسؤال: إلى أي درجة يكون التنظيف نظيفاً، فإنه أيضاً يقدم لنا القدرة التقنية للتقليل من التأثيرات السلبية للتلوث البيئي، إلا أنه لا يستطيع إيضاح الأسئلة الكبرى. بمعنى، أي من الزبائن نحاول إرضاءه؟ ومن سيوفر هذه الترضية؟. وحالياً فإن السؤال الأول يدور حول احتياجات عامة الناس، والشركات، والمجموعات البيئية. وفي الوقت الذي لا يكون فيه أي من هذه المجموعات محددًا بشكل جيد، فإنه من العدل القول أن عامة الناس يتورطون في الصراع بين المجموعتين الأخريين.

فمن جهة تميل الشركات إلى التركيز على الرفاهية الاقتصادية لعامة الناس، ومن جهة أخرى تميل المجموعات البيئية، مثل حركة السلام الأخضر (Greenpeace) ونادي سيررا (Sierra Club) إلى التركيز على الاهتمامات المرتبطة بالصحة والبيئة. إن كلا الاهتمامين شرعي بذات الدرجة وكليهما معترف به من الطرف الآخر.

إضافة إلى ذلك، فإن الإعلام، الذي يسمى بالسلطة الرابعة - يلعب دوراً هاماً جداً في تحديد كل من احتياجات ورغبات عامة الناس. وبمساعدة الإعلام، فإن الكثير من المجموعات البيئية بكل أطرافها نجحت في جعل عامة الناس أكثر وعياً بيئياً. وزيادة على ذلك، فإن الإعلام كان محورياً في الترويج لسلوك بيئي مسؤول من قبل الشركات والحكومات لكن الإعلام، الذي يميل إلى التركيز على العناوين البارزة لشدة الانتباه، ساعد أيضاً على تفاقم الصراع بين المجموعات البيئية والشركات الاعتبارية (وأحياناً على مستوى الولايات والدولة).

ومنطقياً، فإن هذه الحساسية بين النشطاء البيئيين ومجموعات الشركات، التي رشحت عبر عدسات الإعلام الواسعة، ستشكل جدول أعمال السياسيين الذين يتعين عليهم التعامل مع المشاكل البيئية.

وعموماً، فإن الحكومة، هي المعبر الأخير عن الرأي العام، هي التي يجب عليها التحكم في مستوى التلوث في كل دولة. إن هذه السيطرة يمكن أن تأخذ أشكالاً عدة، تتراوح ما بين الإلزام والضرائب إلى الحوافز الاقتصادية. ففي الولايات المتحدة، مثلاً، تقوم الحكومة الفيدرالية بخيارات صعبة بين التشدد في المعايير البيئية والتساهل فيها. ومن بين

أدوات صنع القرار التي تستخدم مفهوم التكلفة بالنسبة للفائدة، الذي استخدم للعديد من السنوات لتأطير قرارات الشركات. فكما طبق في الإصحاح البيئي، على سبيل المثال، يحاول صناع القرار وضع قيمة مالية على تكلفة إجراء تنظيف معين، وبالمثل وضع قيمة مالية للمنافع التي تصاحبه. ونظرياً، فإن هذه الطريقة ستؤدي إلى اتخاذ إجراءات سيؤدي تطبيقها إلى محصلة فائدة إيجابية. وبقدر جاذبية هذا المفهوم نظرياً، إلا أنه محدد عملياً لأنه يتطلب وضع قيمة كمية لعوامل نوعية. فمثلاً كيف ستقوم بإعطاء قيمة مالية لتنفس هواء نظيف، وشرب ماء نظيف، وأكل غذاء نظيف؟ ومن جانب آخر هل نستطيع تبرير دفع الكثير من أجل هذه المنافع التي لا يستطيع أحد دفعها من أجل التمتع بها؟.

وفي الوقت الحالي، لدينا القليل جداً من الإجابات لهذا اللغز المحير، فيما عدا القول بضرورة حل هذا اللغز، وأن الحكومة يجب أن تكون أول من يقوم بذلك. ويبدو جلياً أننا جميعاً نريد بيئة نظيفة. وعلى ذلك فقد يختار السياسيون تمويل الإصحاح البيئي والتحكم في التلوث مباشرة من خلال الإيرادات الضريبية العامة والضرائب على الشركات، أو بشكل غير مباشر من خلال التشريعات وإجبار الشركات. ولكن بقيام الحكومة بذلك فإنها تقرر فقط كيف يجب أن ندفع، وليس إذا ما كنا سندفع. ويبقى اتخاذ القرار كم سندفع.

3.24 أنماط من التشريعات/ والنشاطات البيئية

ما الذي يتم تنفيذه؟

1.3.24 الهواء النقي

ينص دليل نشر حديثاً بواسطة وكالة حماية البيئة عن قانون الهواء النقي (أن القانون الصادر عام 1990 يشمل قائمة مكونة من (189) ملوث هواء خطيرة تم اختيارها بواسطة

الكونجرس على أساس إمكانية خطورتها على الصحة و/ أو البيئة). وتستمر هذه الوثيقة لتقول: إن مستويات الانبعاث لهذه الملوثات يتعين تقليصها بصرامة على امتداد فترة 5 إلى 10 سنوات. وفي عام 1994 جابهت الصناعة هذه الحملة في الصحافة الشعبية بتريديها القول: (لسوء الحظ فإن التشريع نفسه لا يوفر حلاً تقنياً أو علمياً لكيفية تحقيق هذه المتطلبات). وبكلمات أخرى فإن وكالة حماية البيئة تضع هذه الأهداف، ولكن على الصناعة إيجاد كيفية استيفائها (Glanz, 1994).

إن هذا الموقف البسيط يفسر سبب المشكلة التي يواجهها المشرعون البيئيون وهو الحاجة للمحافظة على المرونة وفي ذات الوقت التأكد من الالتزام بالتشريعات وحماية مصالح الناس. وتقوم المجمعات الصناعية الكبرى بتشغيل العديد من المصانع عند مواقع مختلفة، وكل من هذه المنشآت يمتلك الكثير من مصادر التلوث الممكنة، بما في ذلك المداخن، عمليات الإنتاج، والأنابيب التي تنقل منتجات سائلة وغازية. وفي وقت ما، كانت التشريعات البيئية تنص بأن يلتزم كل واحد من مصادر التلوث هذه مع معايير إجبارية معينة. هذه المتطلبات جعلت تطبيقها غاية في الصعوبة والالتزام بها ضرباً من المستحيل. ومن أجل حل هذه المعضلة، قام المشرعون بتقديم مخططات الانبعاثات المجمعة (aggregated emission plans)، مثل مفهوم الفقاعة (bubble concept).

وتحت مفهوم الفقاعة، يتعامل المنظمون مع منشأة معينة كما لو كانت محطة بفقاعة غير مرئية، ويقومون بقياس التلوث الذي يظهر من الفقاعة كلها. ويعني هذا المفهوم، بأنه حتى بالرغم من أن الانبعاث من واحد أو أكثر من المداخن أو أنابيب التفريغ قد

تتجاوز فعليا المعايير القانونية، فإنه مسموح به، ذلك أن الانبعاثات من نقاط التفريغ الأخرى تكون منخفضة بدرجة كافية لتجعل إجمالي الانبعاثات أقل من المعيار الكلي المقبول. وينطبق نفس المبدأ على ما يسمى بنظام الحصص (credits) حيث يتم وضع معيار عام لمنطقة معينة. ويتعين على الصناعات القائمة مجتمعة في حدود هذه المنطقة عدم تجاوز هذا المعيار، وهو ما يسمح لبعض الشركات شراء أو بيع (حصصها) طالما أن إجمالي الانبعاثات لا يتجاوز المستوى المفروض.

وكما هو متوقع، عبرت الجماعات البيئية عن هواجسها من أن خطط الفقائيع والانبعاثات المجمعة تعطى النشاطات التجارية مرونة وحرية تصرف زائدة. ويجادلون بأن على الحكومات ألا تسلم سلطة اتخاذ القرار لنفس الأطراف التي تسعى هي من أجل تنظيمها وضبطها.

وعموماً، فإن هذه الجدلية قد فشلت في مواجهة حسابات التكلفة مقابل الفائدة، التي أظهرت المزايا المالية لكل من الشركة والمهتمين من عامة الناس. فمثلاً، يعطى هذا المفهوم المرن للتشريع الشركات فرصة اتخاذ الاجراءات لضبط التلوث مرحلياً، مثل تنظيف المداخن على أسس تم وضعها على مدى فترة من الزمن (Post, 1994). ومع توفر الوقت للشركات حتى تخطط، تتمكن هذه الشركات من التطبيق وتدفع تكاليف التغييرات الضرورية دون التسبب في صعوبات اقتصادية غير مبررة لهم أو للتجمعات السكانية.

2.3.24 مياه شرب آمنة

في الوقت الحالي، يحدد قانون مياه الشرب الآمنة (SDWA) عدداً معيناً من الملوثات التي يتعين مراقبتها وتنظيمها، وأن على وكالة حماية البيئة أن تأتي بتنظيمات تلي

هذه الكميات المحددة. وحسب العاملين في مجال المياه وعدد كبير من المسؤولين العاملين، فإن هذه الطريقة هي أكبر من لعبة أرقام ضخمة. ويقولون إن الأولوية لتنظيم الملوثات يتعين بدلاً من ذلك أن تستند على مدى الضرر الذي تحدثه مادة معينة وما هو تكرار حدوث هذا الضرر في البيئة. كما يتعين عليهم أيضاً الأخذ في الاعتبار تكاليف الحصول على بيانات تكرار حدوث ذلك إضافة لتكاليف إزالتها. وعلى الرغم من أن معظم الجهات المزودة للمياه في الولايات المتحدة تتوفر فيها جميع المعايير الفيدرالية الحالية لأمان المياه، إلا أنها تواجه مشاكل عدة. فإن تكاليف الكشف الحديثة عن الملوثات ليست بالأمر الهين. إضافة لذلك فإن التأجيل الطويل (خمسة سنوات أو أكثر) قد يحدث بين اكتشاف مادة ملوثة في المياه وبناء أو تركيب نظم جديدة لمعالجة ذلك الملوث. وتعتقد منظمة أعمال المياه الأمريكية (AWWA) أن الوباء الأخير بالكائنات الدقيقة الجيارديا (*Giardia*) وكذلك (*Cryptosporidium*) في مدينتي ملواكي وواشنطن مؤشرات لمشاكل خطيرة.

ومع أنه سبق لهذه المنظمة إصدار دعوة لأعضائها في مرافق المياه (4000 مرفق في الولايات المتحدة وكندا) للاختبار الطوعي على الكائن *Cryptosporidium*، إلا أنها تحث أعضائها حالياً لأخذ احتياطات إضافية في عمليات المعالجة ولبذل اهتمام خاص بمظاهر زيادة العكارة - وهي حالة قد تشير إلى وجود كائنات ممرضة ولذا فإنه يلزم إدخال تعديلات على المعالجة. ولسوء الحظ فإن المعلومات غير متاحة حول تواجد كل من *Giardia* و *Cryptosporidium* والفيروسات المعوية (*enteric viruses*) في مصادر المياه

غير المعالجة بالولايات المتحدة. إن هذه المعلومات مطلوبة لتحديد مدى كفاية المتطلبات الحالية والمقترحة لمعالجة مياه الشرب.

وهناك مشكلة أخرى أثارها الهواجس بإمكانية وجود مخاطرة نتيجة الكيماويات المستخدمة في تعقيم مياه الشرب. وهكذا، فإنه في الوقت الذي تعطي فيه هذه الكيماويات حماية مؤكدة ضد العدوى الميكروبية، إلا أن بعضها قد تكون أيضاً مواداً ثانوية مسرطنة أو سامة (انظر الجزء 5.20).

إن الحاجة لموازنة التهديدين (الميكروبات مقابل الكيماويات) قاد إلى الدعوة لفهم أفضل، والتقييم الكمي للمخاطر الممكنة. وفي عام 1996، أخذت صناعة المياه بالولايات المتحدة على عاتقها مسؤولية تأسيس قاعدة تجميع المعلومات (Information Collection Rule)، يتم بموجبها جمع بيانات حول وجود كائنات ممرضة منقولة - بالمياه بدرجة كبيرة من جهة، والنواتج الثانوية للمواد المعقمة. إن نتائج هذا الجهد قد يكون لها تأثير معتبر على التشريعات المستقبلية بالولايات المتحدة الخاصة بمصادر المياه والمعالجة في القرن القادم.

3.3.24 الأرض والهواء والماء

الطرح متعدد البيئات أو الأوساط

عند معاينة التلوث الناتج عن نشاط معين أو عند موقع محدد، هناك ميل للتركيز على بيئة وسط واحد. فمثلاً، عند تقييم مواقع المخلفات الخطرة، فإن التركيز غالباً ما يكون على تلوث المياه الجوفية. ومهما كانت الخطط المرسومة، إلا أن هذا الفصل بين الأوساط الثلاثة الأرض والماء والهواء واسع الانتشار وبشكل خاص في الساحة التنظيمية. وتوجد

قوانين بيئية للتحكم في التلوث في كل بيئة (انظر الجدول 23-1). وفي بعض الحالات فإن تبويب هذه الأنظمة، الذي سهل النمو التنظيمي الموجود من جهة، إلا أنه تسبب في إيجاد جملة من قواعد مجزأة وأحياناً متداخلة و/ أو متناقضة (انظر على سبيل المثال الجزء 2.13). هناك أسلوب بديل (أسلوب يستطيع أن يدمج عدة بيئات معاً) أصبح يجد قبولاً متزايداً في المجتمع الاقتصادي والعلمي. إن هذا الأسلوب المتكامل الذي هو متعدد البيئات أو الأوساط (multimedia) يعتبر كل وسط جزءاً من الكل ويسمح لنا بتقييم التداخلات المتناسقة والمتضادة التي يمكن أن تحدث أو التي تحدث فعلياً في النظم الواقعية. إن هذا الأسلوب الذي هو أساساً متعدد ومتداخل التخصصات في طبيعته، يتطلب التعاون النشط لكثير من الأفراد المتدرين في عدد من التخصصات مثل العلوم والهندسة والاقتصاد والسياسات العامة. وعلى الرغم من صعوبة هذا الأسلوب، إلا أنه سيكون مهماً في المستقبل للتعامل مع إدارة التلوث وتنظيمه.

4.3.24 منع التلوث

في هذا الكتاب، رأينا أن كثيراً من النشاطات البشرية في البيئة يمكن أن تخلق مشاكل تلوث يكون حلها بالغ الصعوبة وتكون تغطية تكاليفها أكثر صعوبة. لذلك، فإنه يبدو واضحاً أن أفضل أسلوب للتحكم في التلوث والأكثر جدوى اقتصادياً هو منعه قبل أن يبدأ. ولهذا فقد أصبح منع التلوث هدفاً واسع القبول - وهو الهدف الذي يطبق بدرجة متزايدة. ويمكن أن يأخذ منع التلوث صوراً كثيرة. فمثلاً، طوّرت أساليب الإدارة المثلى (انظر الجزء 5.2.14) لتحديد الكميات المثالية اللازمة من الأسمدة والمبيدات لإنتاج المحاصيل، بمعنى استخدام الكميات الضرورية فقط لدعم النمو. كذلك في مجال الصناعة طوّرت إجراءات

لاستخدام الكيماويات بكفاءة والتقليل إلى الحد الأدنى من توليد مخلفات. ومع استمرار ارتفاع التعداد السكاني عالمياً وشح الموارد الطبيعية فإن استراتيجيات المنع ستصبح أكثر أهمية في المحافظة على اقتصاد وبيئة ومجتمع معافى.

4.24 التخطيط للقرن الواحد والعشرين

ماذا بعد؟

مع أن أية حكومة في بلد ما يمكنها أن تنظم وتتحكم في الإنتاج، إلا أنها نادراً ما تكون المنتج الأساسي للبضائع. وبدلاً عن ذلك، فإن الصناعة، هي التي تبادر وتطور وتصنع المنتجات التي يعتمد عليها المجتمع الحديث. كما أنها أيضاً تتحكم بدرجة كبيرة في إنتاج المنتجات الزراعية، من حبوب ومواشي إلى الفواكه والزهور. لهذا، فإن الصناعة ستلعب دوراً محورياً في حماية البيئة في القرن القادم. إذاً، ما الذي تستطيع الصناعة فعله لضمان أن يكون هذا الدور مفيداً؟ دعونا ننظر إلى بعض الاحتمالات الرئيسية:

تحمل المسؤولية

وذلك بوضع برامج مفصلة لتحسين الثقافة البيئية لجميع أفراد القوى العاملة، وبناء ثقافة تعاون تشمل الأخلاق البيئية؛ ونقل المسؤوليات البيئية من إدارات متخصصة إلى جميع الأفراد في جميع الإدارات.

المطالبة بالمحاسبة

انطلاقاً من أن منع التلوث يتطلب دعماً مستداماً من إدارة عليا بما يحقق: تصميم نظم دقيقة وصحيحة تقيس الأداء وتوفر بيانات ذات مصداقية للملاك والمستهلكين؛ والأخذ في الاعتبار التغيرات في نظم الإنتاج التي تحفز الأداء البيئي.

الابتكار

تحسين دورة حياة الأداء البيئي للمنتجات المتاحة والعمليات؛ وتقييم المنتجات الجديدة على أساس قدرتها على إرضاء كل من متطلبات السوق والعامّة من أجل إيجاد حلول بيئية فعالة؛ وتشجيع البحث والسعي من أجل تسويق الابتكارات التقنية ذات الميزات البيئية التنافسية.

التواصل

بالمشاركة النشطة في نقاشات السياسات العامة؛ وتحاشي المواجهات التصادية مع الوكالات الحكومية والجماعات البيئية والانحياز للمساهمة النشطة والتعاون، والعمل على ضمان أن السياسات والبرامج الحكومية تعكس بشكل كافٍ احتياجات العمل وتوفير الفرص.

التفكير من منطلق عالمي شامل

البحث عن فرص للمشاركة في برامج القطاعين الخاص والعام التي تركز على منع التلوث وإدخال التقنية النظيفة في الدول النامية؛ وأن يكون هناك إحساس بالمشاكل البيئية المختلفة والأولويات في الدول الأخرى.

إظهار قيادة إيجابية

الترويج لفكرة أن ما هو جيد للبيئة يكون جيداً للأنشطة الصناعية والتجارية، والاستعداد لإقناع الآخرين أن ما هو جيد للعمل يكون أيضاً جيداً للبيئة (Hirschorn, 1994).

وأخيراً، فإنه من المهم أن يترسخ في الأذهان أن الحكومات والصناعات والمجموعات البيئية وكذلك المجموعة العلمية والإعلام العام - منفردون ومجتمعون هم جزء من المجتمع العام. وزيادة على ذلك، فإنه من صميم اهتمام عموم الناس صيانة الموارد الطبيعية، وإصحاح المناطق الملوثة، والتحرز ضد المخاطر البيئية على الصحة. وعلى ذلك، فإنه بينما يكون لكل مكون اجتماعي من هذه المكونات دور حيوي يلعبه لتحقيق هذه الأهداف، فإن كل واحد من هذه المكونات يعتمد على المكونات الأخرى للنجاح. فالصناعة، مثلاً، يمكنها أن تعفي الحكومة من مسؤوليتها التنظيمية عن طريق تقديم حلول عملية للمشاكل البيئية قائمة على مبادئ علمية مقبولة والمجموعات البيئية قد تعمل مع الصناعة لتحديد الموارد النادرة على أساس الصحة العامة ومخاطر الأمان.

والحكومة قد تتعاون مع كل من الجماعات الصناعية والبيئية من أجل إيجاد حلول مرنة ويمكن تحملها. وأن الإعلام قد يعمل مع المجتمع العلمي لتوفير منتدَى ومنبراً من أجل حوار متوازن عن المخاطر المؤكدة بدلاً عن أخطار خيالية أو مستبعدة.

الخاتمة:

في عام 1996 أعلنت وكالة حماية البيئة أن 40% من البحيرات والأنهار في الولايات المتحدة غير مناسبة للسباحة أو كمصادر لمياه الشرب. هذه الأربعة في المائة تساوي تقريباً النصف. هل وصلنا إلى منتصف الطريق؟ أم أننا سنتجاوزها؟ وإذا كان كذلك، متى؟

إن الاجابات عن هذه الأسئلة متروكة الآن لأولئك الذين يعملون من بيننا في مجال علم التلوث، ولأولئك الذين سوف يقومون بذلك مستقبلاً. إن المشاكل الكبرى التي تواجه هذا الكوكب تبدو أحياناً فوق طاقتنا، ولكن بتوفر المعرفة الصحيحة، بجانب التفكير السوي والقادر، فإنه يمكن أخذ القرارات الصائبة التي سوف تفيد العالم الطبيعي وكذلك البشر الذين يتعين عليهم العيش فيه ويحققون رفايتهم منه.

إن القيودات العلمية والسياسية والاجتماعية والمالية جميعها تؤثر على مصير الملوثات والتقليل من أضرارها، ولكنه من الصعوبة بمكان مزج كل هذه العوامل المقيدة بنجاح وكل واحد منها ينافس ليكون الأكثر بروزاً. لكن دمج هذه الإيديولوجيات والاحتياجات لا يبدو مختلفاً كثيراً عن النظم البيئية المعقدة التي بدأنا أخيراً نتعلم الكثير عنها؛ إذ أن كل قطعة من اللغز هامة جداً لحلّه وتحقيق النجاح.

المراجع ولمزيد الاطلاع

-Glanz J. (1994) *Researches Scramble to Meet Clean Air Act Goals*. R & D Magazine. 44, 121-122.

-Hirschorn J.S. (1994) Business and the Environmental. In *Environmental Strategies Handbook* (R.V.Kolluru, Editor), pp. 67-117. McGraw-Hill, New.

-Post J.E. (1994) Business, environment, and stewardship. In *Environmental Strategies Handbook* (R.V. Kolluru, Editor), pp. 11-30. McGraw-Hill, New.

Periodic Table of the Elements*

1 H 1.0079																	2 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305			13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948								
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.62	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.90	56 Ba 137.33	57 † La 138.90	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 ‡ Ac (227)	104 Rf (261)	105 Ha (262)													

† Lanthanides	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
‡ Actinides	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lw (262)

* Data adapted from Lide, D.R., Editor (1995) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 76th Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida.
 ** Atomic mass values in parentheses denote the atomic mass of the most stable isotope of those elements too unstable for the determination of a standard atomic mass.



Ac Actinium	89	Co Cobalt	27	I Iodine	53	O Oxygen	8	Se Selenium	34
Ag Silver	47	Cr Chromium	24	In Indium	49	Os Osmium	76	Si Silicon	14
Al Aluminum	13	Cs Cesium	55	Ir Iridium	77	P Phosphorus	15	Sm Samarium	62
Am Americium	95	Cu Copper	29	K Potassium	19	Pa Protactinium	91	Sn Tin	50
Ar Argon	18	Dy Dysprosium	66	Kr Krypton	36	Pb Lead	82	Sr Strontium	38
As Arsenic	33	Er Erbium	68	La Lanthanum	57	Pd Palladium	46	Ta Tantalum	73
At Astatine	85	Es Einsteinium	99	Li Lithium	3	Pm Promethium	61	Tb Terbium	65
Au Gold	79	Eu Europium	63	Lr Lawrencium	103	Po Polonium	84	Tc Technetium	43
B Boron	5	F Fluorine	9	Lu Lutetium	71	Pr Praseodymium	59	Te Tellurium	52
Ba Barium	56	Fe Iron	26	Md Mendelevium	101	Pt Platinum	78	Th Thorium	90
Be Beryllium	4	Fm Fermium	100	Mg Magnesium	12	Pu Plutonium	94	Ti Titanium	22
Bi Bismuth	83	Fr Francium	87	Mn Manganese	25	Ra Radium	88	Tl Thallium	81
Bk Berkelium	97	Ga Gallium	31	Mo Molybdenum	42	Rb Rubidium	37	Tm Thulium	69
Br Bromine	35	Gd Gadolinium	64	N Nitrogen	7	Re Rhenium	75	U Uranium	92
C Carbon	6	Ge Germanium	32	Na Sodium	11	Rf Rutherfordium	104	V Vanadium	23
Ca Calcium	20	H Hydrogen	1	Nb Niobium	41	Rh Rhodium	45	W Tungsten	74
Cd Cadmium	48	Ha Hahnium	105	Nd Neodymium	60	Rn Radon	86	Xe Xenon	54
Ce Cerium	58	He Helium	2	Ne Neon	10	Ru Ruthenium	44	Y Yttrium	39
Cf Californium	98	Hf Hafnium	72	Ni Nickel	28	S Sulfur	16	Yb Ytterbium	70
Cl Chlorine	17	Hg Mercury	80	No Nobelium	102	Sb Antimony	51	Zn Zinc	30
Cm Curium	96	Ho Holmium	67	Np Neptunium	93	Sc Scandium	21	Zr Zirconium	40

POLLUTION SCIENCE

