



تقييم تسع نماذج لتقدير البخر-نتح المرجعي في منطقة تراغن جنوب غرب ليبيا

علي عثمان الغصني

قسم التربة والمياه، كلية الزراعة، جامعة عمر المختار، البيضاء، ليبيا

تاريخ الاستلام: 25 أكتوبر 2020 / تاريخ القبول: 18 ديسمبر 2020

<https://doi.org/10.54172/mjsc.v35i3.299>:Doi

المستخلص: أجريت هذه الدراسة لغرض تقييم أداء تسع نماذج لحساب البخر-نتح المرجعي وإيجاد أفضل بديل لنموذج الفاو بنمان-موننتيث (المرجعي في هذه الدراسة) في منطقة تراغن بجنوب غرب ليبيا. النماذج المستخدمة تشمل الفاو بنمان-موننتيث والفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل وهارقريفز-سماني وبريستلي-تايلور وماكينك وتورك وثورنثويت وخروفة وماككلود. تم مقارنة النماذج باستخدام المعايير الإحصائية التالية: الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ، متوسط خطأ التحيز، ومعامل التحديد، ومؤشر التوافق المحسّن، وكفاءة النموذج، واختبار تي. بيّنت النتائج أن نموذجي الفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل أظهرتا زيادة في قيم البخر-نتح المرجعي المقدّرة في جميع أشهر السنة وتتراوح نسبة الزيادة من 0.64% إلى 16.06%. أظهر نموذجا خروفة وماككلود زيادة في تقدير البخر-نتح المرجعي خلال أشهر وتقليل خلال أشهر أخرى. قللت بقية النماذج في تقدير البخر-نتح المرجعي بنسب متفاوتة يتراوح مداها من -86.69% إلى -6.02%. أظهر نموذج الفاو الإشعاعي أعلى قيم لمؤشر التوافق المحسّن (0.892) وكفاءة النموذج (0.951) وأدنى قيمة للجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (0.534 م/يوم)، إضافة الى ذلك أعطى نموذج الفاو الإشعاعي ثاني أفضل القيم لمعامل التحديد (0.993) ومتوسط خطأ التحيز (0.473)، وهذا يضعه في المرتبة الأولى والبديل الأفضل لنموذج الفاو بنمان-موننتيث القياسي في منطقة الدراسة. يلي نموذج الفاو الإشعاعي في الترتيب نموذج الفاو بلاني-كريدل حيث أعطى ثاني أفضل القيم في مؤشر التوافق المحسّن بمقدار 0.851 وكفاءة النموذج بمقدار 0.878 والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ بمقدار 0.845 م/يوم، وثالث أعلى قيمة لمعامل التحديد بمقدار 0.989، ولذلك صُنّف في المرتبة الثانية. وفقا للمعايير السابقة، حاز نموذج تورك على المرتبة الثالثة، ونموذج خروفة على المرتبة الرابعة، وحلّت نماذج هارقريفز-سماني، وماكينك، وبريستلي-تايلور، وثورنثويت، وماككلود في المراتب الخامسة والسادسة والسابعة والثامنة والتاسعة، على التوالي. أظهر اختبار تي عند مستوي معنوية 5% وجود فروق معنوية بين نموذج الفاو بنمان-موننتيث وجميع النماذج ما عدا نموذجي خروفة وماككلود.

الكلمات المفتاحية: البخر-نتح المرجعي، الفاو بنمان-موننتيث، الفاو الإشعاعي، الفاو بلاني-كريدل، تورك، هارقريفز-سماني، ثورنثويت، بريستلي-تايلور، ماككلود.

(Sentelhas وآخرون، 2010). التحديد الكمي للبخر-نتح

غالبا ما يتطلب تقدير قيم البخر-نتح المرجعي (ET_0) التي تستعمل بشكل واسع في هندسة الري لتحديد الاحتياجات المائية للمحاصيل التي تعتبر من البيانات الأساسية المطلوبة في عمليات تخطيط وتصميم أنظمة الري الجديدة وكذلك إدارة مياه الري في أنظمة الري العاملة (Allen و Droogers،

المقدمة

البخر-نتح (ET) هو مصطلح يصف انتقال الماء إلى الهواء الجوي بواسطة عمليتي البخر والنتح وهما عمليتان تحدثان معاً بشكل مترامن في نظام التربة والنبات. البخر-نتح من العوامل المهمة في الدراسات المناخية والهيدرولوجية وكذلك في الأعمال المتعلقة بإدارة الموارد المائية والدراسات البيئية

* علي عثمان الغصني aalghusni@yahoo.com قسم التربة والمياه، كلية الزراعة، جامعة عمر المختار، البيضاء، ليبيا.

البحوث والدراسات ضعف نماذج الفاو الأربعة المقترحة، وظهر جلياً أنها لا تسلك نفس النهج في المواقع المختلفة من العالم (Allen وآخرون، 1998؛ Pereira وآخرون، 2015). طوّر خبراء الفاو منهجية الطرق المستخدمة في إيجاد الاحتياجات المائية للمحاصيل، وأوصوا بتقدير البخر-نتح المرجعي باستخدام الصورة المعدلة من نموذج بنمان-مونثيث (Allen وآخرون، 1998). قدم ماكينك (Makkink، 1957) نموذجاً يعتمد على بيانات الإشعاع لتقدير البخر-نتح المرجعي، ويهمل النموذج العوامل الإيروديناميكية. قدّم تورك (Turc، 1961) نموذجاً لحساب البخر-نتح المرجعي باستعمال درجة الحرارة والإشعاع الشمسي فقط، كذلك قدّم بريستلي وتايلور (Priestley و Taylor، 1972) نموذجاً يتطلب بيانات محدودة (Liu و Erda، 2005). طوّر هارقريفز وسماني (Hargreaves و Samani، 1985) نموذجاً تجريبياً لحساب البخر-نتح المرجعي في المناطق الجافة يتطلب تطبيقه توفّر درجة الحرارة فقط. أجريت دراسة موسعة تحت ظروف مناخية متباينة، برعاية الجمعية الأمريكية للمهندسين المدنيين (ASCE)، لتقييم عشرين طريقة لتقدير البخر-نتح المرجعي قياساً بمجموعة بيانات مسجلة من لايسيمترات في أحد عشر موقعاً موزعاً حول العالم. أكدت الدراسة وجود تباين واسع في أداء هذه الطرق تحت ظروف مناخية مختلفة (Jensen وآخرون، 1990).

ذكر كزايستراكس وماتزاراكس (Xystrakis و Matzarakis، 2011) أن نموذجي هانسن، وتورك أظهر أفضل نتائج من بين 13 نموذجاً تم تقييمها في جزيرة كريت بجنوب اليونان. بيّن العديد من الباحثين أن نموذج تورك أظهر أداءً جيداً في المناطق الرطبة، والدافئة مثل: شمال كارولينا (Amatya وآخرون، 1995) وفلوريدا بالولايات المتحدة الأمريكية (Irmak وآخرون، 2003b) والهند (George وآخرون، 2002) وفي شرق الأمريزون بالبرازيل (Junior وآخرون، 2017). كما بيّن جاكوبس وساتي (Jacobs و Satti، 2001) في فلوريدا بالولايات المتحدة الأمريكية أن نموذج

(2002). يُعرّف البخر-نتح المرجعي على أنه معدل البخر-نتح من محصول عشبي افتراضي له طول يبلغ 0.12 متر ومقاومة سطحية ثابتة مقدارها 70 ثانية/متر وانعكاسية 0.23 متر ويشبه إلى حد كبير البخر-نتح من سطح عشبي أخضر شاسع المساحة وبارتفاع منتظم وينمو بشكل فعّال ويظل التربة بشكل كامل ولا يعاني من نقص في الماء (Allen وآخرون، 1998).

يستخدم مصطلح البخر-نتح للمحصول (ET_c) في تقدير الاحتياجات المائية للمحاصيل ويُعبّر هذا المصطلح عن البخر-نتح من محصول خالي من الأمراض وجيد التسميد وينمو في حقل شاسع تحت ظروف ماء تربة مثالي ويعطي إنتاجية كاملة تحت ظروف مناخية معينة (Allen و وآخرون، 1998). يمكن قياس البخر-نتح للمحصول باستخدام اللايسيمترات ولكنها محدودة الاستخدام بسبب كلفتها العالية وحاجتها إلى الخبرة (Allen و وآخرون، 1998). يمكن حساب البخر-نتح للمحصول (ET_c) بدلاً من قياسه وذلك بضرب البخر-نتح المرجعي (ET_o) في معامل نوعي (k_c) يخص المحصول (Jensen، 1968). طوّرت في العقود الخمسة الماضية العديد من النماذج (معادلات رياضية) لتقدير البخر-نتح المرجعي في أنحاء مختلفة من العالم وتتباين دقة هذه النماذج الرياضية مع اختلاف الظروف المناخية، وتبيّن أن صلاحية استخدامها على المستوى العالمي محدود (Allen و وآخرون، 1998). طوّر بنمان (Penman، 1948) نموذج نظري لحساب البخر من سطح ماء مفتوح وتربة غير مغطاة بواسطة دمج معادلة ميزان الطاقة مع معادلة انتقال الكتلة. دمج مونثيث (Monteith، 1965) عوامل المقاومة الهوائية والمقاومة السطحية في نموذج بنمان للوصول إلى ما يُعرف الآن بنموذج بنمان-مونثيث (Monteith model - Penman). أوصت منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) خلال سبعينات القرن الماضي بتقدير البخر-نتح المرجعي باستخدام نماذج الفاو بلاني-كريدل، والفاو الإشعاعية، والفاو بنمان، وحوض البخر (Doorenbos و Pruitt، 1977). أثبتت

(Penman-Kimberly 1996) ثم ثالثاً نموذج الفاو بنمان-موننتيث، بينما أظهرت نماذج الفاو بلاني-كريدل وهارقريفز-سماني وماكينك أداءً رديئاً (Bakhtiari وآخرون، 2011). دعمت نتائج دراسة رزاقى وسيباسخا (Razzaghi و Sepaskhah، 2010) تفوق نموذج الفاو الإشعاعي عندما تتوفر قياسات درجة الحرارة والإشعاع بينما يتفوق نموذج هارقريفز-سماني عندما تتوفر قياسات درجة الحرارة فقط. في شمال شرق الهند، أظهر النموذج الإشعاعي إيرماك3 (Irmak3) ونموذج تورك أداءً متساوياً وجيداً وهما الأفضل من بين ثمانية عشر نموذجاً لتقدير البخر-نتح المرجعي (Pandey وآخرون، 2016).

أعطى نموذج هارقريفز نتائج أعلى بمقدار 18.9 % مقارنة بنموذج الفاو بنمان-موننتيث في مناطق رطبة بشمال شرق إيطاليا (Berti وآخرون، 2014). بيّنت نتائج تشن وآخرون (Chen وآخرون، 2005b) أن أداء نماذج كل من بلاني-كريدل وهارقريفز-سماني وخروفة وماكينك، وبريستلي-تايلور وهارقريفز كان بعيداً عن أداء النموذج المرجعي. أعطى نموذجاً بريستلي-تايلور وهارقريفز-سماني أفضل النتائج في المناطق الجافة وشبه الجافة في الصين، بينما كان نموذج ماكينك هو الأفضل في المناطق الرطبة من الولايات المتحدة الأمريكية (Gao وآخرون، 2017). دلّت نتائج كوردوفا وآخرون (Córdova وآخرون، 2015) أن حساب البخر-نتح المرجعي باستخدام نموذج الفاو بنمان-موننتيث في ظروف بيانات مفقودة يؤدي إلى أخطاء تصل إلى 24 % في مناطق جافة ورطبة في شمال إيران، بيّنت نتائج جوشاني وآخرون (Joshani وآخرون، 2015) إن أفضل نماذج الأداء قياساً بحوض البخر كان لنماذج الفاو بلاني-كريدل، والفاو الإشعاعي، وهارقريفز-سماني، وتورك. بيّنت نتائج تشن وآخرون (Chen وآخرون، 2005a) أن طريقة حوض البخر أفضل قياساً (بالفاو بنمان-موننتيث) من نتائج نموذج ثورنثويت. أعطى نموذج تورك، في ظروف رطبة، نتائج أفضل من نموذج هارقريفز بصورة مختزلة من نموذج الفاو

تورك كان الأفضل أداءً على المقياس الشهري والسنوي، أما على المدى القصير فهو غير دقيق. بيّنت نتائج دوقلاص وآخرون (Douglas وآخرون، 2009) وفي نفس المنطقة (فلوريدا) أن نموذج بريستلي-تايلور أعطى أفضل النتائج مقارنةً بالنماذج الأخرى التي كان من ضمنها نموذج تورك. بيّنت دراسات عديدة أن نموذج تورك ملائم لحساب البخر-نتح المرجعي في المناطق الرطبة وتحت الرطوبة (Nandagiri و Kovoov، 2006؛ Trajkovic و Kolakovic، 2009؛ Fisher و Pringle، 2013). كما بيّن طباري (Tabari، 2010) أن نموذج تورك هو الأفضل في المناخات الرطبة الباردة والجافة بينما نموذج هارقريفز-سماني هو الأفضل في المناخات الرطبة الدافئة وشبه الجافة. عزّزت بعض الدراسات استعمال طريقة هارقريفز كبديل في المناطق الجافة وشبه الجافة (Allen و Hargreaves، 2003؛ Tabari، 2010؛ Raziei و Pereira، 2013؛ Sheikh و Mohammadi، 2013؛ Sabziparvar و Tabari، 2010) والمناطق الرطبة (Alkaeed وآخرون، 2006)، بينما لم تدعم بعض الدراسات استعمال نموذج هارقريفز-سماني في المناطق الجافة وشبه الجافة (Djaman وآخرون، 2015) والمناطق الرطبة (Rojas و Sheffield، 2013).

في شمال البرازيل، أظهرت نتائج كابوروسو ورولم (Caporusso و Rolim، 2015) أن نموذج بريستلي-تايلور هو الأفضل، بينما في منطقة الوسط الغربي من البرازيل تحسّل اوليفيرا وآخرون (Oliveira وآخرون، 2011) على دقة مقبولة باستخدام طريقة هارقريفز-سماني. أكّدت دراسات عديدة أن نموذج تورك أعطى نتائج واعدة منها دراسة إيرماك وآخرون (Irmak وآخرون، 2008) ومارتينيز وثيبيديا (Martinez و Thepadia، 2010) ويودير وآخرون (Yoder وآخرون، 2005). أعطى نموذج الفاو الإشعاعي مقارنةً ببيانات لايسيمتر أفضل النتائج في منطقة شبه جافة بجنوب شرق إيران، ويليه ثانياً نموذج بنمان-كيمبرلي

تايلور، وماكينك، وتورك، وثورنثويت، وخوروفة، وماككلود.

المواد وطرق البحث

موقع الدراسة والبيانات المناخية:

أجريت هذه الدراسة على بيانات مناخية لمنطقة تراغن بالجنوب الغربي من ليبيا، تم الحصول على البيانات المناخية من المركز الوطني للأرصاد الجوية وتغطي الفترة الممتدة من عام 1993 إلى عام 2016 م. تقع المنطقة على خط طول 27° 14' شرقاً ودائرة عرض 56° 25' شمالاً وترتفع عن مستوى سطح البحر بمقدار 421 متر ويسود فيها المناخ الصحراوي الجاف. سجّلت المحطة أكثر الأشهر برودةً في شهر يناير حيث انخفض متوسط درجة الحرارة إلى 13.12° م بينما شهر أغسطس الأكثر ارتفاعاً في درجة الحرارة حيث وصل متوسط درجة الحرارة إلى 32.77° م. وصل متوسط أعلى قيمة للرطوبة النسبية إلى 42.45% خلال شهر ديسمبر بينما انخفض متوسط أدنى قيمة للرطوبة النسبية إلى 19.09% في شهر مايو. سجّلت في شهر يناير أعلى قيمة لمتوسط هطول الأمطار فكانت 128.2 مم بينما سجل في شهر يوليو أقل قيمة لمتوسط هطول الأمطار فكانت 0.6 مم. سجّلت أعلى قيمة لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 2 متر في شهر إبريل فكانت 7.81 م/ث، ومتوسط أدنى قيمة لسرعة الرياح على ارتفاع 2 متر سجّلت في شهر ديسمبر فكانت 4.8 م/ث. سجّل متوسط أعلى عدد ساعات السطوع الشمسي في شهر يوليو فكان 12.3 ساعة/يوم بينما سجل متوسط أدنى قيمة لعدد ساعات السطوع الشمسي في شهر يناير بمعدل 8.47 ساعة/يوم. تشمل البيانات المناخية درجات الحرارة العظمى (T_{max})، ودرجات الحرارة الصغرى (T_{min})، ودرجات الحرارة عند نقطة الندى (T_{dew})، ودرجات حرارة الترمومتر الجاف (T_{dry})، ودرجات حرارة الترمومتر المبلل (T_{wet})، والرطوبة النسبية (RH)، وسرعة الرياح (U) وعدد ساعات السطوع الشمسي (n).

الطرق المستخدمة في تقدير البحر-نتج المرجعي : إن أدق

بنمان- مونتيت (Fisher و Pringle، 2013). بينت نتائج دجامان وآخرون (Djaman، 2017) في تزانبا وكينيا أن نماذج بنمان (Penman، 1948) ومهرينقر (Mahringer، 1970) وترايبرت (Trabert، 1896) ورومانينكو (Romanenko، 1961) أظهرت أداءً جيداً في مناطق الدراسة. أظهرت نتائج الرجبو وآخرون (2008) في عدة مواقع من العراق أن حوض البحر كان الأفضل في الموصل بينما كان نموذج هارقريفز-سماني الأفضل في ربيعة والبعاج وكان نموذج الفاو بلاني-كريدل الأفضل في تلعفر. تحسّن أداء نموذج بلاني-كريدل مقارنةً بنموذج الفاو بنمان-مونتيت بعد تعديله لملاءمة مناطق جافة بجنوب غرب ليبيا (Abd El-Wahed و Abd El-Mageed، 2014).

أظهر نموذج الفاو بلاني-كريدل قياساً بنموذج بنمان-مونتيت، في منطقة شحات بشمال شرق ليبيا، أداءً أفضل من نماذج الفاو الإشعاعي وماكينك وهارقريفز-سماني وتورك وثورنثويت وبريستلي-تايلور، وكان الأسوأ أداءً نموذج ثورنثويت (مؤمن وعبد العاطي، 2016). كذلك أظهر نموذج الفاو بلاني-كريدل، قياساً بنموذج بنمان-مونتيت في مناطق جبلية وساحلية من ليبيا، أداءً أفضل من نماذج الفاو الإشعاعي، وماكينك وهارقريفز-سماني، وتورك، وثورنثويت، وبريستلي-تايلور وخوروفة، وخوسلا بينما كان الأسوأ أداءً نموذجي ثورنثويت وخوسلا (عبد السميع وإخنيفر، 2020). يتطلب تطبيق نموذج الفاو بنمان-مونتيت توفر بيانات مناخية عديدة قد يتعذر الحصول عليها (Smith وآخرون، 1991؛ Allen وآخرون، 1998) ولذلك ظهرت الحاجة إلى نموذج بديل يتميز بالبساطة ولا يتطلب تطبيقه بيانات مناخية عديدة قد لا يكون بعضها متوفراً في جميع محطات الأرصاد الجوي. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء تسعة نماذج لحساب البحر-نتج المرجعي وتحديد أدقها وأبسطها وذلك للحصول على بدائل مناسبة لنموذج الفاو بنمان-مونتيت في منطقة تراغن بجنوب غرب ليبيا. النماذج التسعة المستخدمة تتضمن الفاو الإشعاعي، والفاو بلاني-كريدل وهارقريفز-سماني، وبريستلي-

طريقة لتحديد البخر-نتج المرجعي هي قياسه بأحد الطرق المعتمدة مثل أجهزة اللايسيمترات، ولكن لا تتوفر مثل هذه الأجهزة في ليبيا، ويكلف إنشاؤها الكثير من الأموال، ويستغرق وقتاً وجهداً كبيرين. لذلك تم تقدير البخر-نتج المرجعي بطرق غير مباشرة وذلك باستخدام صيغ لنماذج رياضية عديدة تختلف في تعقيدها ومتطلبات مدخلاتها ودقة حساباتها. يعتبر نموذج الفاو بنمان-مونثيث من أدق النماذج لحساب البخر-نتج المرجعي (Smith وآخرون، 1991؛ Allen وآخرون، 1998)، وأثبتت العديد من الدراسات في أنحاء مختلفة من العالم وفي ظروف مناخية مختلفة أن نموذج الفاو بنمان-مونثيث يعطي نتائج دقيقة يعتمد عليها مقارنة بقيم مقاسة من لايسيمترات (Mendonça وآخرون، 2003؛ DehghaniSanij وآخرون، 2004؛ Yoder وآخرون، 2005؛ Xu و Chen، 2005؛ López-Urrea وآخرون، 2006؛ Xavier وآخرون، 2015؛ Ghamarnia وآخرون، 2015).

يُتبع برنامج Ref-ET حساب البخر-نتج المرجعي بطريقة الفاو بنمان-مونثيث القياسية وفقاً للخطوات الواردة في ورقة الفاو للري والصرف رقم 56 (Allen وآخرون، 1998)، وهي الطريقة المعتمدة في هذه الدراسة، ويتبع برنامج Ref-ET حساب البخر-نتج المرجعي بطريقة بنمان-مونثيث القياسية للجمعية الأمريكية للمهندسين المدنيين (ASCE-EWRI، 2005) وفقاً للخطوات والإرشادات المدونة في دليل الجمعية الأمريكية للمهندسين المدنيين وتقارير الممارسة الهندسية رقم 70 (Jensen وآخرون، 1990). يمكن الحصول على تفاصيل وافية عن خصائص البرنامج وكيفية استخدامه في دليل المستخدم الخاص بالبرنامج (Allen و Li، 2016). فيما يلي عرض لصيغ النماذج المستخدمة:

نموذج الفاو بنمان-مونثيث (Allen وآخرون، 1998):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{av} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

حيث أن: ET_o = البخر-نتج المرجعي (مم/يوم).

R_n = صافي الإشعاع الشمسي عند سطح المحصول (ميغا جول /م² /يوم). G = شدة تدفق حرارة التربة (ميغا جول /م² /يوم). T_{av} = متوسط درجة حرارة الهواء اليومية عند ارتفاع 2 متر (م °). γ = ثابت جهاز قياس الرطوبة السايكرومتر

استخدم نموذج الفاو بنمان-مونثيث في الدراسات والبحوث بشكل واسع كطريقة قياسية لتقييم نماذج البخر-نتج المرجعي (Itenfisu وآخرون، 2003؛ Xu وآخرون، 2013؛ Tabari وآخرون، 2013؛ Berti وآخرون، 2014؛ Djaman وآخرون، 2015؛ Pereira وآخرون، 2015؛ Pandey وآخرون، 2016).

لذلك تم في هذه الدراسة استخدام نموذج الفاو بنمان-مونثيث كمييار أو مقياس لتقييم نتائج البخر-نتج المرجعي المقدر بتسع نماذج مختلفة. تعتمد بعض النماذج التي تم اختيارها على بيانات الإشعاع فقط، وتشمل كل من نموذج الفاو الإشعاعي (FAO-24 Radiation) ونموذج بريستلي-تايلور (Taylor و Priestley، 1972) ونموذج ماكينك (Makkink، 1957) ونموذج تورك (Turc، 1961) وبعضها الآخر يعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط وتشمل كل من نموذج الفاو بلاني-كريدل (Blaney-Criddle) ونموذج هارغريفز-سماني (FAO-24 و Hargreaves).

© المؤلف (المؤلفون)، يخضع هذا المقال لسياسة الوصول المفتوح ويتم توزيعه بموجب شروط ترخيص إنداع المشاع الإبداعي CC BY-NC 4.0
ISSN: online 2617-2186 print 2617-2178

$$ET_o = 0.34pT_m^{1.34}$$

حيث إن p = النسبة المئوية لعدد الساعات المضيئة خلال شهر إلى عدد الساعات المضيئة خلال عام.

نموذج ماكينك (Yoder وآخرون، 2005؛ Pandey وآخرون، 2016):

$$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$$

حيث إن: λ = الحرارة الكامنة للبخار (ميغا جول/كجم).
 R_s = الإشعاع الشمسي قصير الموجة (ميغا جول/م²/اليوم).

نموذج الفاو الإشعاعي (Pruitt و Doorenbos، 1977):

$$ET_o = c (w \cdot R_s)$$

حيث: W = معامل وزني يعتمد على درجة الحرارة والإشعاع. C = معامل تعديل يعتمد على متوسط الرطوبة والرياح في النهار.

نموذج ماككلاود (Satti و Jacobs، 2001):

$$ET_p = KW^{(T-32)}$$

حيث: ET_p = جهد البخر-نتح المرجعي (بوصة/اليوم).
 $K = 0.01$ ، $W = 1.07$ ، T = متوسط درجة الحرارة (F).

نموذج بريستلي-تايلور (Pandey وآخرون، 2016):

$$ET_o = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \frac{1}{\lambda}$$

نموذج تورك (Allen و Li، 2016):

يكتب نموذج تورك في الصيغة الرياضية التالية:

$$ET_o = a_T 0.0133 \frac{T_m}{T_m + 15} \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda}$$

حيث: $a_T = 1$ إذا كان متوسط الرطوبة النسبية (RH_m) أكبر من أو يساوي 50% وإذا كان متوسط الرطوبة النسبية (RH_m) أقل من 50% فتحسب a_T كالتالي:

$$a_T = 1 + \left(\frac{50 - RH_m}{70} \right)$$

المعايير الإحصائية المستخدمة في تحليل النتائج: تم تقييم جودة نماذج حساب البخر-نتح المرجعي المختارة بتطبيق عدة

(كيلو باسكال/م²). U_2 = سرعة الرياح عند ارتفاع 2 متر (م/ث).
 e_s = ضغط البخار المشبع (كيلو باسكال).
 e_a = ضغط البخار الفعلي (كيلو باسكال).

Δ = ميل منحني ضغط البخار المشبع (كيلو باسكال/م²).

نموذج الفاو بلاني-كريدل (Pruitt و Doorenbos، 1977):

$$ET_o = c [P(0.46 T_m + 8)]$$

حيث أن: T_m = متوسط درجة حرارة الهواء (م²).
 P = المتوسط اليومي للنسبة المئوية لإجمالي ساعات النهار السنوية للشهر المحدد وخط العرض المحدد. c = معامل يعتمد على أدنى نسبة رطوبة للجو، ساعات الإضاءة في اليوم وسرعة الرياح في النهار وتستخدم منحنيات خاصة لتقدير قيم ET_o وذلك حسب نسبة الرطوبة الجوية الدنيا، ونسبة ساعات السطوح الشمسي، وسرعة الرياح في النهار.

نموذج ثورنثويت (Satti و Jacobs، 2001):

$$ET_o = 1.6 \left(\frac{10 T_m}{I} \right)^a$$

حيث إن: I = معامل (دليل) الحرارة heat index لفترة 12 شهراً من العام ويحسب كالتالي:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514}$$

حيث: i = تدل على كل شهر من أشهر السنة. a = معامل يعتمد على قيمة دليل الحرارة (I) ويحسب كالتالي:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

نموذج هارقريرف-سماني (Yoder وآخرون، 2005):

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T_m - 17.8)R_a$$

حيث إن: T_{max} = درجة الحرارة العظمى (م²).
 T_{min} = درجة الحرارة الصغرى (م²).
 R_a = الإشعاع الشمسي الواصل إلى الغلاف الجوي (ميغا جول/م²/يوم).

نموذج خروفة (Chen وآخرون، 2005):

النموذج بدرجة من الدقة مساوية لمتوسط البيانات المقاسة، بينما كفاءة أقل من الصفر ($E_f < 0$) تحدث عندما يكون متوسط البيانات المقاسة يعطي تقديراً أفضل من النموذج. مؤشر أو دليل التوافق المُحسَّن (d_f) وهو معيار إحصائي يستخدم للدلالة على جودة أداء النماذج الرياضية وهو معيار بدون أبعاد تتراوح قيمته بين موجب واحد وسالب واحد (1 إلى -1) (Willmott وآخرون، 2012). مؤشر التوافق المُحسَّن هو صورة معدّلة من مؤشر التوافق المحوَّر (modified index of agreement, d_{mod}) التوافق المحوَّر هو تعديل لمؤشر التوافق الأصلي لويلموت (Willmott original index of agreement, d_{org}) المطور في ثمانينات القرن الماضي (Willmott، 1981، 1982).

مؤشر التوافق المُحسَّن معيار قياسي لدرجة خطأ تقدير النماذج الرياضية وذلك للتغلب على عدم حساسية كل من معامل الكفاءة (E_f) ومعامل التحديد (R^2) للفروق بين المتوسطات القياسية والمتوسطات المقدرّة بالنماذج. يستخدم معامل التحديد (R^2) بشكل واسع لتقييم مدى جودة تطابق نماذج البخر-نتح (goodness-of-fit) ولكنه شديد الحساسية للقيم المتطرفة (outliers) وغير حساس للفروق المضافة والتناسبية (additive and proportional differences) بين القيم المقدرّة والمقاسة (Legates و McCabe، 1999). الارتباط (بين البيانات المقدرّة بواسطة النموذج والبيانات المقاسة) الذي يصفه معامل التحديد غير كافي وعادةً ما يؤدي إلى مقاييس للدقة غير صحيحة (Willmott، 1982). لذلك عندما يستخدم معامل التحديد (R^2) بمفرده يمكن أن يعطي دلالة خاطئة بأن نموذج معين هو أفضل مُقدِّر للبخر-نتح وفي الواقع هو غير ذلك (Yoder وآخرون، 2005). للحصول على فرز حقيقي وتحليل صحيح للنتائج تستخدم معايير متعددة لتقييم أداء نماذج البخر-نتح (Gao وآخرون، 2017). لا يُنصح باستخدام الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) ومتوسط خطأ التحيز (MBE) بمفردهما؛ لأنه قد يتسبب في

معايير إحصائية شائع استخدامها في العديد من دراسات البخر-نتح (Pandey وآخرون، 2016؛ Djaman وآخرون، 2015؛ Popova، 2006؛ Joshani وآخرون، 2011). المعايير الإحصائية المستخدمة هي: كفاءة النموذج (Modeling Efficiency, E_f) واختبار تي (t-test) والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (Root Mean Square Error, RMSE) ومتوسط خطأ التحيز (Mean Bias Error, MBE) ومعامل التحديد (R^2) ومعامل التوافق المُحسَّن (Refined index of agreement). معامل التحديد (R^2) هو مقياس يستخدم في التحليلات الإحصائية لتقييم مدى جودة نموذج ما في شرح النتائج المستقبلية والتنبؤ بها كما يدل معامل التحديد أيضاً على مستوى التباين الموضح في مجموعة البيانات. يستخدم معامل التحديد كدليل توجيهي لقياس دقة النموذج، كما يستخدم لشرح مقدار أو كم التباين في عامل واحد الذي ينتج عن علاقته بعامل آخر. ويتم تمثيله كقيمة بين صفر والواحد (0-1) فكلما كانت القيمة أقرب إلى الواحد كان التناسب أفضل، أو العلاقة بين العاملين تكون أفضل. يستخدم اختبار تي (t-test) لقياس الفرق المعنوي بين متوسطي عينتين مستقلتين.

معامل كفاءة النموذج (E_f) ويسمى أيضاً معامل كفاءة ناش-سوتكليف (Nash و Sutcliffe، 1970)، استخدم أساساً لتقييم القدرة التقديرية للنماذج الهيدرولوجية ولكن امتد استخدامه لوصف الدقة التنبؤية لنماذج مختلفة شرط وجود قيم مقاسة للمقارنة. يستخدم معامل كفاءة النموذج لفحص ما إذا كان الفرق بين البيانات المقاسة والمقدرة بقدر تباين البيانات المقاسة ويتراوح مدى معامل كفاءة النموذج من $-\infty$ إلى 1.0، فكلما اقتربت كفاءة النموذج من الواحد كلما كان النموذج دقيقاً في تقديراته، عندما تكون الكفاءة تساوي الواحد ($E_f = 1$) هذا يعني تطابق تام بين نتائج النموذج والقيم المقاسة، وكفاءة تساوي صفر ($E_f = 0$) تدل على أن البيانات المقدرّة باستخدام

النموذج الرياضي المستخدم لإيجاد اختبار (t) كالاتي (مؤمن وعبد العاطي، 2016؛ Joshani وآخرون، 2015):

$$t = \frac{(n-1)(MBE)^2}{(RMSE)^2 - (MBE)^2}$$

حيث إن:

$ET_{Prdict i}$ = البخر-نتج المرجعي المحسوب بواسطة إحدى النماذج المستخدمة في الدراسة للشهر i.

$ET_{Stndrd i}$ = البخر-نتج المرجعي المحسوب بواسطة نموذج الفاو بنمان-مونتيث القياسي للشهر i.

\overline{ET}_{Stndrd} = متوسط البخر-نتج المرجعي المحسوب بواسطة نموذج الفاو بنمان-مونتيث القياسي للشهر i.

$\overline{ET}_{Prdict i}$ = متوسط البخر-نتج المرجعي المحسوب بواسطة إحدى النماذج المستخدمة في الدراسة للشهر i.

n = العدد الكلي للبيانات. i = تدل على شهر من أشهر السنة. E_f = كفاءة النموذج.

RMSE = الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ.

MBE = متوسط خطأ التحيز. t = اختبار تي.

R^2 = معامل التحديد. d_f = دليل أو مؤشر التوافق المُحسَّن .

النتائج

تم تقييم أداء النماذج المستهدفة في هذه الدراسة قياساً بنموذج الفاو بنمان-مونتيث (المرجعية في هذه الدراسة). تم إدخال البيانات المناخية في الصيغ الرياضية للنماذج المستهدفة، ومن مخرجاتها تم الحصول على قيم المتوسطات الشهرية للبخر-نتج المرجعي اليومي بالمليمتراً بالطرق العشرة. تم تمثيل نتائج البخر-نتج المرجعي اليومية المتحصل عليها من جميع النماذج في منحنيات مبينة في شكل (1).

يلاحظ بشكل عام من المنحنيات الموضحة في شكل (1) أن قيم البخر-نتج المرجعي الناتجة من جميع النماذج منخفضة خلال أشهر الشتاء ديسمبر ويناير، وفبراير، وقد يُعزى ذلك إلى هبوط درجات الحرارة والإشعاع الشمسي مع ارتفاع الرطوبة النسبية، مقارنة بفصل الصيف الذي تكون فيه درجات الحرارة والإشعاع الشمسي مرتفعة وقيم منخفضة لأدنى رطوبة

خطأ عند اختيار أفضل النماذج الرياضية وينصح باستخدام اختبار تي (t-test) معهم (Jacovides و Kontoyiannis، 1995؛ Najafi وآخرون، 2019). أوصى ليقاتس وماككيب (Legates و McCabe، 1999) باستخدام مؤشر التوافق وكفاءة النموذج المستخدم من قبل لوقيو وقرين (Loague و Green، 1991) وكذلك الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ لتقييم الطرق البديلة لنموذج بنمان-مونتيث. فيما يلي عرض للصيغ الرياضية المستخدمة في حساب المعايير الإحصائية: الصيغة الرياضية المستخدمة لإيجاد معامل التحديد كالاتي (مؤمن وعبد العاطي، 2016؛ Chen وآخرون، 2005):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (ET_{Prdict i} - \overline{ET}_{Prdict i})(ET_{Stndrd i} - \overline{ET}_{Stndrd i})]^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{Prdict i} - \overline{ET}_{Prdict i})^2 \sum_{i=1}^n (ET_{Stndrd i} - \overline{ET}_{Stndrd i})^2}$$

الصيغة الرياضية المستخدمة لحساب مؤشر التوافق المُحسَّن كالتالي (Willmott وآخرون، 2012):

$$d_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{Prdict i} - ET_{Stndrd i}|}{2 \sum_{i=1}^n |ET_{Stndrd i} - \overline{ET}_{Stndrd i}|}$$

أما كفاءة النموذج فتم حسابها وفقاً للصيغة التالية (Willmott وآخرون، 2012؛ Yoder وآخرون، 2005؛ Gao وآخرون، 2017):

$$E_f = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Prdict i} - ET_{Stndrd i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{Stndrd i} - \overline{ET}_{Stndrd i})^2}$$

تم حساب متوسط خطأ التحيز حسب الصيغة الآتية (Córdova وآخرون، 2015؛ Joshani وآخرون، 2015):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{Prdict i} - ET_{Stndrd i})$$

استخدمت الصورة التالية لحساب الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (Gao وآخرون، 2017؛ Djaman وآخرون، 2015):

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Prdict i} - ET_{Stndrd i})^2}{n}}$$

البخر-نتح المرجعي والنماذج هي نموذج تورك، ونموذج ماكينك، ونموذج هارقريفز-سماني، ونموذج ثورنثويت ونموذج بريستلي-تايلور. تقليل النماذج السابق ذكرها في تقديرات البخر-نتح المرجعي كان بنسب متفاوتة تتراوح بين -86.69% ناتجة من نموذج ثورنثويت في شهر يناير و-4.71% ناتجة من نموذج ماككلود في شهر أكتوبر. تبعد منخفضة كثيراً تقديرات نموذج ثورنثويت عن القيم المرجعية لنموذج الفاو بنمان-مونتيث خلال كل أشهر السنة، حيث تتراوح نسبة الانخفاض في تقديراته من -34.07% إلى -86.69%. نتج أكبر انخفاضاً في تقديرات الطرق المختلفة للبخر-نتح المرجعي من نموذج ثورنثويت خلال الأشهر من يناير حتى أبريل إضافة إلى أشهر أكتوبر ونوفمبر وديسمبر، بينما نتج أكبر انخفاضاً في تقديرات البخر-نتح المرجعي خلال الأشهر من مايو إلى سبتمبر من نموذج ماكينك، ويتراوح مقدار الانخفاض من -41.73% إلى -45.41%.

يتبين من جدول (1) أن كلا من نموذج بريستلي-تايلور ونموذج هارقريفز-سماني ونموذج ماكينك ونموذج تورك أظهرت انخفاضات متباينة في تقديرات البخر-نتح المرجعي، بعضها انخفاضات كبيرة مثل مخرجات نمودجي بريستلي-تايلور وماكينك حيث تتراوح نسبة الانخفاض في تقديراتهما ابتعاداً عن القيم المرجعية من -36.88% إلى -46.65% في حالة نموذج بريستلي-تايلور وفي حالة نموذج ماكينك من -45.41% إلى -29.24%. أما انخفاض تقديرات نموذج تورك فكانت انخفاضات صغيرة قريبة من القيم المرجعية لنموذج الفاو بنمان-مونتيث خصوصاً خلال الأشهر من يونيو إلى ديسمبر، حيث تتراوح نسبة الانخفاض بين -7.25% و-6.02%، وهذه مشابهة لتقديرات نموذج الفاو الإشعاعية خلال الأشهر نفسها.

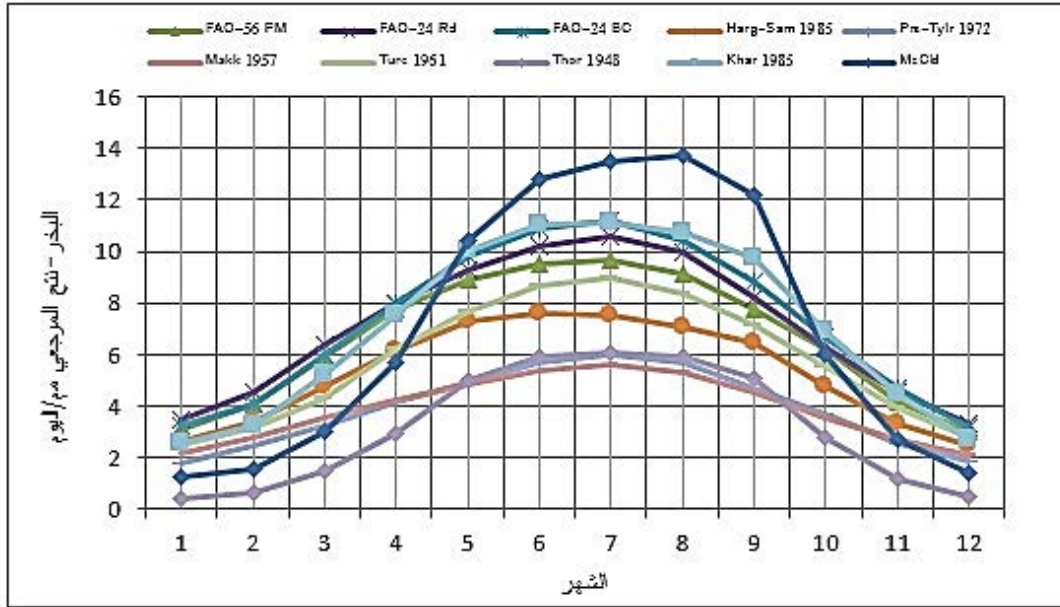
يتضح من جدول (1) أن أعلى نسبة مبالغة أو زيادة ناتجة من نموذج الفاو الإشعاعية بلغت 12.32% في شهر فبراير، بينما أعلى نسبة زيادة ناتجة من نموذج الفاو بلاني-كريدل

نسبية الأمر الذي قد يؤدي إلى زيادة قيم البخر-نتح المرجعي. تزداد قيم البخر-نتح المرجعي تدريجياً إلى أن تصل إلى الذروة في شهر يوليو ثم تعود للهبوط تدريجياً إلى أن تقترب من قيمة أدنى معدلات البخر-نتح المرجعي في شهري ديسمبر ويناير. يتبين من شكل (1) أن سبعا من النماذج المطبقة في هذه الدراسة أظهرت أن قيمة أعلى متوسط يومي للبخر-نتح مرجعي كانت في شهر يوليو بينما أعطى أحد النماذج المتبقيتين وهو نموذج هارقريفز-سماني أعلى متوسط بخر-نتح مرجعي يومي في شهر يونيو، أما النموذج الآخر، وهو نموذج ماككلود فأظهر أن قيمة أعلى متوسط بخر-نتح مرجعي يومي في شهر أغسطس.

أظهر نموذج ماككلود في يناير أدنى قيمة لمتوسط البخر-نتح المرجعي اليومي (1.25 مم) في منطقة الدراسة كما أظهر نموذج ماككلود أيضاً أعلى قيمة لمتوسط البخر-نتح المرجعي اليومي في منطقة الدراسة (13.74 مم) في شهر يوليو. يلاحظ بشكل عام من النتائج المبينة في شكل (1) أن النماذج المستخدمة أظهرت أداءً مختلفاً من حيث توافق نتائجها مع النموذج المرجعي (الفاو بنمان-مونتيث) في هذه الدراسة. مقارنة بنموذج بنمان-مونتيث للفاو، بالغ (أي أعطى قيماً أعلى من القيم المرجعية) نمودجي الفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل في تقدير البخر-نتح المرجعي في جميع أشهر السنة وتتراوح نسبة الزيادة الناتجة من نموذج الفاو الإشعاعية من 0.64% إلى 12.32% بينما تتراوح نسبة الزيادة الناتجة من نموذج الفاو بلاني-كريدل من 1.23% إلى 16.06%. أظهر نمودجا خروفة، وماككلود مبالغة (زيادة) في التقدير خلال أشهر وتقليل خلال أشهر أخرى. بالغ نموذج خروفة في تقدير البخر-نتح المرجعي خلال الأشهر من مايو إلى نوفمبر وبالعكس نموذج ماككلود في تقدير البخر-نتح المرجعي خلال الأشهر من مايو إلى سبتمبر وقلل نموذج خروفة خلال أشهر من يناير إلى إبريل وشهر ديسمبر بينما قلل نموذج ماككلود خلال أشهر من يناير إلى إبريل بالإضافة إلى أشهر أكتوبر ونوفمبر وديسمبر. قللت بقية النماذج في تقدير

خلال شهر فبراير. إن أكبر نسبة زيادة في تقديرات البحر- نتح المرجعي ناتجة من نموذج ماككلاود كانت خلال شهر سبتمبر بمقدار 57.57%.

بلغت 16.06 % في شهر يوليو. و قيمة أقل نسبة زيادة في تقديرات البحر-نتح المرجعي ناتجة من نموذجي الفاو الإشعاعية، والفاو بلاني-كريدل فكانت بمقدار 0.64% للفاو الإشعاعية خلال شهر أكتوبر، وبمقدار 1.23% لبلاني-كريدل



شكل (1): منحنيات البحر-نتح المرجعي (مم/يوم) في منطقة تراغن محسوبة بعشر طرق.

جدول (1): النسبة المئوية للاختلافات في قيم البحر-نتح المرجعي الناتجة من جميع النماذج قياساً بنموذج بنمان-مونتيث

الشهر	الإشعاع للفاو	بريستلي-تابلور	ماكيناك	تورك	الفاو بلاني-كريدل	هارقريفز-سماني	ثورنثويت	خروفة	ماككلاود
يناير	11.25	42.12-	29.58-	19.29-	03.54	16.40-	86.69-	17.14-	59.66-
فبراير	12.32	39.41-	32.02-	22.17-	01.23	16.01-	84.65-	20.02-	61.19-
مارس	07.58	45.79-	40.40-	27.61-	01.52	20.20-	74.60-	12.31-	48.88-
أبريل	02.96	46.65-	45.36-	20.23-	02.45	20.75-	62.20-	03.28-	27.11-
مايو	04.03	44.85-	45.41-	13.87-	10.07	18.79-	44.03-	12.45	16.95
يونيو	07.59	39.87-	43.25-	08.54-	14.98	19.41-	37.53-	16.85	35.28
يوليو	09.84	37.72-	41.87-	07.25-	16.06	21.76-	37.12-	15.60	39.86
أغسطس	09.41	37.96-	41.79-	08.10-	13.79	22.54-	35.61-	17.67	50.28
سبتمبر	06.46	39.15-	41.73-	08.01-	14.21	16.54-	34.07-	25.47	57.57
أكتوبر	00.64	40.42-	42.97-	11.02-	06.87	24.28-	55.82-	10.51	04.71-
نوفمبر	09.64	39.04-	34.22-	06.02-	12.53	19.28-	70.64-	07.32	34.02-
ديسمبر	10.30	36.88-	29.24-	07.97-	05.65	16.94-	84.13-	08.71-	54.04-

معايير إحصائية حيث أعطى أقل قيمة للجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) بمقدار 0.534 م/يوم وأعلى قيمة لمؤشر التوافق المُحسَّن (d_r) بمقدار 0.892 وأعلى قيمة لكفاءة النموذج (E_f) بمقدار 0.951. إضافة إلى ذلك أعطى نموذج الفاو الإشعاعي ثاني أعلى قيمة في المعايير التالية: معامل التحديد (R^2) بمقدار 0.993 متوسط خطأ التحيز (MBE) بمقدار 0.473. كما يتضح من جدول (2) أن نموذج الفاو بلاني-كريدل يلي نموذج الفاو الإشعاعي من حيث جودة الأداء حيث صنف نموذج الفاو بلاني-كريدل في الترتيب الثاني نتيجة تفوقه بثاني أفضل القيم في ثلاثة معايير إحصائية وهي الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) بمقدار 0.845 ومؤشر التوافق المُحسَّن (d_r) بمقدار 0.865 وكفاءة النموذج (E_f) بمقدار 0.878 كما تحسَّن نموذج الفاو بلاني-كريدل على ثالث أفضل القيم في معامل التحديد (0.989).

كذلك تُبين نتائج التحليل الإحصائي (جداول 2) أن نموذج تورك حاز على الترتيب الثالث بفضل حصوله على ثالث أفضل القيم في ثلاثة معايير إحصائية وهي الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (0.937) ومؤشر التوافق المُحسَّن (0.809) كفاءة النموذج (0.850). أما الترتيب الرابع فكان لنموذج خروفة حيث حاز على رابع أفضل القيم في ثلاثة معايير إحصائية وهي الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (1.106) ومؤشر التوافق المُحسَّن (0.783) كفاءة النموذج (0.791). حازت نماذج هارقريفز-سماني وماكينك وبريستلي-تايلور على الترتيب الخامس والسادس والسابع على التوالي. وفقاً للمعايير الإحصائية تمركز نموذج ماككلود في المرتبة ما قبل الأخيرة ونموذج ثورنثويت في المرتبة الأخيرة بسبب حصوله على أسوأ القيم في جميع المعايير الإحصائية باستثناء قيمة معامل التحديد. أظهر اختبار تي (t) عند مستوى معنوية 5% وجود فروق معنوية بين نتائج نموذج الفاو بنمان-مونتيث ونتائج جميع النماذج ما عدا نموذجي خروفة وماكلود. تم معايرة نماذج الفاو الإشعاعي والفاو

التحليل الإحصائي للاختلافات بين النماذج المختلفة ونموذج الفاو بنمان-مونتيث: لتحقيق الهدف من الدراسة تم إجراء اختبارات إحصائية باستخدام ستة معايير إحصائية شائعة التطبيق لتحديد أي النماذج المختبرة يمكنها أن تكون بديلاً مناسباً لنموذج الفاو بنمان-مونتيث القياسي. المعايير الإحصائية المستخدمة هي الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)، متوسط خطأ التحيز (MBE)، ومعامل التحديد (R^2)، ومؤشر التوافق المُحسَّن (d_r)، وكفاءة النموذج (E_f)، واختبار تي (t-test).

أجريت هذه الاختبارات الإحصائية بناءً على توصيات من عدة مصادر بعدم الاعتماد على بعض المعايير الإحصائية بمفردها لأنها قد تؤدي إلى استنتاج خاطئ (Legates و McCabe، 1999؛ Yoder و آخرون، 2005؛ Gao و آخرون، 2017؛ Najafi و آخرون، 2019). أخذ في الاعتبار عند تصنيف النماذج من حيث قربها من النموذج المرجعي أعلى قيم لمؤشر التوافق المُحسَّن (d_r) وكفاءة النموذج (E_f) ومعامل التحديد (R^2) وأقل قيم للجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) ومتوسط خطأ التحيز (MBE). تم الاعتماد أساساً على نتائج الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ ومؤشر التوافق المُحسَّن وكفاءة النموذج وهذا ما أوصى به ليقيتس وماكيب (Legates و McCabe، 1999) واتَّبهما يودير و آخرون (Yoder و آخرون، 2005)، مع اعتماد مؤشر التوافق المُحسَّن بدلاً من مؤشر التوافق الأصلي الذي اعتمده ليقيتس وماكيب.

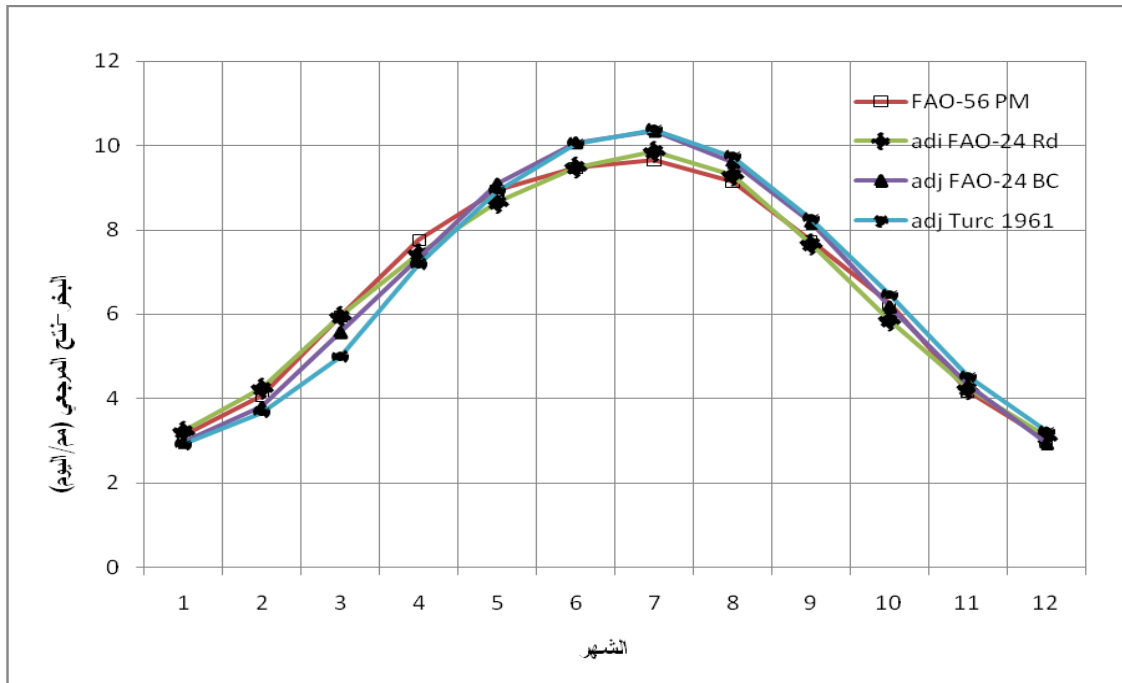
تم إهمال معامل التحديد (R^2) بسبب حساسيته المفرطة للقيم المتطرفة وتقارب قيمه الكبير في نتائج جميع النماذج ما عدا ماككلود. يبين جدول (2) نتائج التحليل الإحصائي لمخرجات الطرق المستخدمة قياساً بنموذج الفاو بنمان-مونتيث في حساب البحر-نتج المرجعي في منطقة الدراسة. يتضح من الجدول أن نموذج الفاو الإشعاعي كان الأفضل في الأداء وتحصل على الترتيب الأول بسبب تفوقه في ثلاثة

كريدل باستخدام معامل قيمته 0.923 وتصحيح نموذج تورك باستخدام معامل قيمته 1.16. أظهر اختبار تي (t) للنتائج المتحصل عليها بعد معايرة النماذج الثلاثة عدم وجود فروق معنوية مقارنةً بنتائج نموذج الفاو بنمان-مونثيث. يبين شكل (2) نتائج النماذج المعايرة مقارنة بنتائج النموذج المرجعي.

بلاني-كريدل وتورك للحصول على معاملات (ثابت تجريبية) تؤدي إلى تقريب نتائجها من النتائج المرجعية ومن تم تقليل الفروق المعنوية. تم الحصول على نتائج قريبة جدا من النموذج المرجعي عند تصحيح نموذج الفاو الإشعاعي باستخدام معامل قيمته 0.93 وتصحيح نموذج الفاو بلاني-

جدول رقم (2) : ملخص التحليل الإحصائي لنتائج المعدلات المستخدمة في الدراسة.

الطريقة	RMSE	MBE	R ²	d _r	E _f	t	P-Value
الإشعاع للفاو	0.534	0.473	0.993	0.892	0.951	06.283	0.6×10 ⁻⁴
الفاو بلاني-كريدل	0.845	0.649	0.989	0.851	0.878	03.980	2.16×10 ⁻³
تورك	0.937	0.833-	0.97	0.809	0.850	06.450-	0.5×10 ⁻⁴
خروفة	1.106	0.514	0.964	0.783	0.791	01.744	0.109
هارقريفز-سماني	1.427	1.313-	0.994	0.699	0.652	07.816-	<0.1×10 ⁻⁴
ماكيناك	2.963	2.698-	0.989	0.382	0.500-	07.311-	0.2×10 ⁻⁴
بريستلي-تايلور	2.885	2.703-	0.975	0.380	0.422-	08.899-	< 0.1×10 ⁻⁴
ماكلاود	2.835	0.423	0.872	0.419	0.373-	00.503	0.625
ثورنثويت	3.509	3.443-	0.924	0.211	1.104-	16.853-	<0.1×10 ⁻⁴



شكل (2): قيم البخر-نتج المرجعي (مم/يوم) مقدرة باستخدام نماذج الفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل وتورك بعد المعايرة.

المناقشة

الدراسة الحالية مع نتائج دراسة باختيارى وآخرون (Bakhtiari وآخرون، 2011) الذين استنتجوا أن نموذج الفاو الإشعاعي من أدق الطرق لحساب البخر-نتح المرجعي.

استنتاج

أظهرت نتائج هذه الدراسة تباين أداء النماذج المستخدمة من حيث توافق نتائجها مع النموذج القياسي (المرجعي). أعطى نمودجا الفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل قيماً للبخر-نتح المرجعي أعلى من القيم المرجعية في جميع أشهر السنة وتتراوح نسبة الزيادة الناتجة من نموذج الفاو الإشعاعي من 0.64 % إلى 12.32 % بينما تتراوح نسبة الزيادة الناتجة من نموذج الفاو بلاني-كريدل من 1.23 % إلى 16.06 %. خُصّصت نماذج كل من تورك، وماكينك، وهارقريفز-سماني، وثورنثويت، وبريستلي-تايلور من قيم البخر-نتح المرجعي، وكانت نسبة الخفض تتراوح من 86.69 % ناتجة من نمودج ثورنثويت في شهر يناير إلى 6.02 % ناتجة من نمودج تورك في شهر نوفمبر. أظهر نمودجا خروفة، وماككلود زيادة في تقدير البخر-نتح المرجعي خلال أشهر وتقليل خلال أشهرٍ أخرى. تتباعد تقديرات نمودج ثورنثويت ونمودج ماككلود كثيراً عن القيم المرجعية لنمودج الفاو بنمان-مونتيث خلال كل أشهر السنة وبالتالي لا ينصح باستخدامهما في مثل الظروف المناخية لمنطقة الدراسة.

كما يتبين من النتائج أن نمودجي الفاو الإشعاعي، والفاو بلاني-كريدل هما الأقرب من تقديرات نمودج الفاو بنمان-مونتيث القياسي، ثم يليهما نمودج تورك الذي أعطى قيماً أقل ولكنها قريبة جداً من القيم المرجعية خصوصاً في الفترة من شهر يونيو إلى شهر ديسمبر. بناء على المعايير الإحصائية المستخدمة (باستثناء اختبار تي حيث كانت الفروق معنوية)، يمكن تصنيف نمودج الفاو الإشعاعي في المرتبة الأولى من حيث جودة الأداء مقارنة بالنمودج المرجعي، ثم يليه ثانياً في جودة الأداء نمودج الفاو بلاني-كريدل، ثم ثالثاً نمودج تورك. أظهرت نتائج معايرة نماذج الفاو الإشعاعي والفاو بلاني-كريدل وتورك أن قيم البخر-نتح المرجعي المتحصل عليها بعد

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن نمودج الفاو الإشعاعي هو أفضل النماذج المقيّمة وهذا يخالف نتائج دراسة مؤمن وعبد العاطي (2016) في شحات شمال شرق ليبيا (منطقة شبه جافة) ودراسة عبد السميع واخنيفر (2020) في مناطق ساحلية وجبلية من ليبيا ودراسة حيدري وآخرون (Heydari، 2013) في وسط إيران حيث كان نمودج الفاو بلاني-كريدل الأفضل وصُنّف من حيث قربه من النموذج القياسي في الدرستين في المرتبة الأولى بينما صنّف في هذه الدراسة في المرتبة الثانية. كما لا تتوافق نتائج الدراسة الحالية والدرستين المشار إليهما أعلاه مع نتائج دراسة رازيى و بيريرا (Raziei و Pereira، 2013) ودراسة قاو وآخرون (Gao وآخرون، 2017) حيث أنهما أظهرتا أن نمودج هارقريفز هو البديل المناسب لنمودج الفاو بنمان-مونتيث القياسي لتقدير البخر-نتح المرجعي في المناطق الجافة وشبه الجافة، بينما كان نمودج هارقريفز-سماني الخيار الخامس في الدراسة الحالية. كما دلّت نتائج الدراسة الحالية أن نمودج تورك أظهر أداءً جيداً وحاز على المرتبة الثالثة ولكنه كان الأفضل في دراسات بالمناطق الرطبة (Amatya وآخرون، 1995؛ George وآخرون، 2002؛ Irmak وآخرون، 2003b؛ Nandagiri و Kovoov، 2006).

كان أداء نمودج هارقريفز-سماني رديئاً نسبياً في هذه الدراسة وهذا يتوافق مع دراسة في اليابان (مناخ رطب) أجراها الكايد وآخرون (Alkaeed وآخرون، 2006)، وكذلك تتفق مع نتائج دراسة جاكوبس وساتي (Jacobs و Satti، 2001) اللذان أكدا على عدم دقة نمودج هارقريفز-سماني على المدى القصير. بينما تتعارض نتائج هذه الدراسة والدراسات المذكورة أعلاه مع دراسة جورج وآخرون (George وآخرون، 2002) حيث كان فيها أداء نمودج هارقريفز-سماني جيداً وقريباً جداً من نمودج الفاو بنمان-مونتيث. كما أظهر نمودج هارقريفز-سماني في دراسة اوليفيرا وآخرون (Oliveira وآخرون، 2011) دقة مقبولة. تتوافق نتائج

Allen, R. G. and G. Z. Li (2016). Ref-ET user's guide. Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations; version 4.1 for Windows: University of Idaho, Kimberly Research and Extension Center ID, USA.

Allen, R. G.; L. S. Pereira; D. Raes and M. Smith (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, United Nation Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 300 pp.

Allen, R. G.; M. E. Jensen; J. L. Wright and R. D. Burman (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4):650-662.

Amatya, D. M; R. W. Skaggs and J. D. Gregory (1995). Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(6):427-435.

American Society of Civil Engineering-Environmental and Water Resources Institute (ASCE-EWRI) (2005). ASCE Standardised Reference Evapotranspiration Equation. Task Committee on Standardization of calculation of Reference Evapotranspiration. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers, Final Report. Reston, VA, 213pp.

Bakhtiari, B.; N. Ghahreman; A. M. Liaghat and G. Hoogenboom (2011). Evaluation of reference evapotranspiration methods for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13:223-237.

Berti, A.; G. Tardivo; A. Chiaudani; F. Rech and M. Borin (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 140: 20-25.

المعايرة قريبة جدا من القيم المرجعية لنموذج الفاو بنمان-مونتيث. كما أظهرت النماذج بعد معايرتها جودة عالية حسب المعايير الإحصائية المستخدمة مع عدم وجود فروق معنوية طبقا لاختبار تي. مما سبق يمكن الاستنتاج بأن نماذج الفاو الإشعاعي، والفاو بلاني-كريدل، وتورك هي بدائل جيدة ونتائجها قريبة جدا من النموذج القياسي خصوصا عند تصحيح نتائجها باستخدام المعاملات المحلية المشتقة في هذه الدراسة وهي 0.93 و 0.923 و 1.16 لنماذج الفاو الإشعاعي، والفاو بلاني-كريدل، وتورك على التوالي.

المراجع

الرجبو، وليد أسمر وخضر جاسم ومخلف شلال (2008). دراسة التبخر-نتح المرجعي في محافظة نينوى باستخدام عدة نماذج رياضية. كلية التربية، جامعة الموصل. مجلة علوم الرافدين 19(3):154-173.

عبد السميع، نوال بالقاسم وعلي العقاب اخنifer (2020). تقييم أداء بعض نماذج التبخر-نتح المرجعي في مناطق جبلية وساحلية من ليبيا. مجلة العلوم البحتة والتطبيقية، 19(1):66-78.

مؤمن، محمد عبد الكريم وأسامة عبد الحميد عبد العاطي (2016). مقارنة لبعض الطرق الحسابية للتبخّر-النتح المرجعي بمنطقة شحات بالجبل الأخضر-ليبيا. جامعة عمر المختار، البيضاء، ليبيا. مجلة المختار للعلوم. 1(1): 1-16.

Abd El-Wahed, M. H. and T. A. Abd El-Mageed (2014). Estimating reference evapotranspiration using modified Blaney-Criddle equation in arid region. *Bothalia Journal*, 44(7):183-195.

ALkaeed, O.; C. Flores; K. Jinno and A. Tsutsumi (2006). Comparison of several reference evapotranspiration methods for Ito-shima Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 66(1): 1-14.

- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome. pp.156.
- Douglas, E. M.; J. M. Jacobs; D. M. Sumner and R. L. Ray (2009). A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373(3-4):366-376.
- Droogers, P. and R. G. Allen (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16(1):33-45.
- Fisher, D. K. and H. C. Pringle III (2013). Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 4(8A): 51-60.
- Gao, F.; G. Feng; Y. Ouyang; H. Wang; D. Fisher; A. Adeli and J. Jenkins (2017). Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semiarid and humid regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(4):791-808.
- George, B. A.; B. R. S. Reddy; N. S. Raghuvanshi and W. W. Wallender (2002). Decision support system for estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(1):1-10.
- Ghamarnia, H.; F. Mousabeyg; S. Amiri and D. Amirkhani (2015). Evaluation of a few evapotranspiration models using lysimetric measurements in a semi-arid climate region. *International Journal of Plant and Soil Science* 5(2): 100-109.
- Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 87(HY3):107-120.
- Hargreaves, G. H. and R. G. Allen (2003). History and evaluation of Hargreaves
- Caporusso, N. B. and G. S. Rolim (2015). Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. [Acta Scientiarum Agronomy](#), 37(1):1-9.
- Chen, D.; G. Gao; C. Y. Xu; J. Guo and G. Ren (2005a). Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman–Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 28:123–132.
- Chen, J.; H. Yeh; C. Lee and W. Lo (2005b). Optimal comparison of empirical equation for estimating potential evapotranspiration in Taiwan. IN: XXXI IAHR Congress. September 11-16, Seoul, Korea.
- Córdova, M.; G. Carrillo-Rojas; P. Crespo; B. Wilcox and R. Céleri (2015). Evaluation of the Penman–Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. *Mountain Research and Development*, 35(3):230-239.
- DehghaniSanij, H.; T. Yamamoto and V. Rasiah (2004). Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management*, 64: 91-106.
- Djaman, K.; A. B. Balde; A. Sow; B. Muller; S. Irmak; M. K. N’Diaye; B. Manneh and K. Saito (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3: 139-159.
- Djaman, K.; K. Koudahe; M. Sall; I. Kabenge; D. Rudnick and S. Irmak (2017). Performance of twelve mass transfer based reference evapotranspiration models under humid climate. *Journal of Water Resource and Protection*, 9:1347-1363.

- Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, For John M. Fitzgerald, Water Use Data Manager Division of Water Supply Management, St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida, USA.
- Jacovides, C. P. and H. Kontoyiannis (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27(3-4):365-371.
- Jensen, M. E., 1968. Water Consumption by Agricultural Plants. IN: Water deficits and plant growth, T.T. Kozlowski (Editor). Academic Press, New York, pp. 1-22.
- Jensen, M. E.; R. D. Burman and R. G. Allen (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 70. New York.
- Joshani, A.; J. K. Dastjerdi and H. Z. Abyaneh (2015). Evaluating different estimation methods of reference evapotranspiration with FAO evaporation pan in both dry and humid climate of Caspian sea basin. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 4 (2) : 190-200.
- Junior, R. O.; E. B. De Souza; A. L. Tavares; J. A. Mota; D. B. S. Ferreira; P. W. M. Souza-Filho and E. J. P. Da Rocha (2017). Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 89(3):1985-2002.
- Kharrufa, N. S. (1985). Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beitr Hydrol*, 5:39-47.
- Kwon, H. and M. Choi (2011). Error assessment of climate variables for FAO-56 reference evapotranspiration. *Meteorology and Atmospheric Physics* 112(1-2):81-90.
- evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (1): 53-63.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96-99.
- Heydari, M. M.; R. N. Noushabadi; M. Vahedi; A. Abbasi and M. Heydari (2013). Comparison of evapotranspiration models for estimating reference evapotranspiration in arid environment. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15: 1331-1337.
- Irmak, S.; A. Irmak; R. G. Allen and J. W. Jones (2003a). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5):336-347.
- Irmak, S.; R. G. Allen and E. B. Whitty (2003b). Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5):360-370.
- Irmak, S. ; A. Irmak; T. .A. Howell; D. L. Martin; J. O. Payero and K. S. Copeland (2008). Variability analyzes of alfalfa-reference to grass reference evapotranspiration ratios in growing and dormant seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2): 147-159.
- Itenfisu, D.; R. L. Elliott; R. G. Allen and I. A. Walter (2003). Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6): 440-448.
- Jacobs, J. M. and S. R. Satti (2001). Evaluation of reference evapotranspiration methodology and AFSIRS crop water use simulation model. Final report, Department of

- Mendonça, J. C.; E. F. Sousa; S. Bernardo; G. P. Dias and S. Grippa (2003). Comparison of different methods for estimating reference evapotranspiration (ET_o) in North Fluminense RJ region. (in Portuguese) Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering, 7(2):275-279.
- Microsoft Office Excel (2007). Microsoft Corporation. Redmond, Washington.
- Mohawesh, O. E. (2011). Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. Plant Soil and Environment, 57 (4):145–152.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, 19:205-234. University Press: Cambridge.
- Najafi, M; M. Salarian; S. Eslamian; K. Ostad-Ali-Askari; V. P. Singh and N. R. Dalezios (2019). Evaluation of radiation methods for calculating the water requirement of grass in two different climates using REF-ET software. International Journal of Constructive Research in Civil Engineering, 5(1): 1-7
- Nandagiri, L. and G. R. Kovoov (2006). Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(3): 238-249.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10:282–290.
- Oliveira, G. Q.; A. S. Lopes; L. H. Jung; P. L. Nagel and D. M. Bertioli (2011). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseadas na temperatura do ar, em Aquidauana-MS. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada 5(3):224-234.
- Legates, D. R. and G. J. McCabe (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35(1): 233–241.
- Liu, X. Y. and L. Erda (2005). Performance of the Priestley-Taylor equation in the semi-arid climate of north China. Agricultural Water Management, 71(1):1-17.
- Loague, K. and R. E. Green (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and Application. Journal of Contaminant Hydrology, 7(1-2):51-73.
- López-Urrea, R.; F. M. S. Olalla; C. Fabeiro and A. Moratalla (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agricultural Water Management, 85: 15-26.
- Mahringer, W. (1970). Verdunstungsstudien am Neusiedler See. [Evaporation Studies at Lake Neusiedl.] Arch Met Geoph BiokSer , B, 18:1-20.
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. Journal of the Institution of Water Engineering, 11(3):277-288.
- Malek, E. and G. E. Bingham (1993). Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the Measurement of Evapotranspiration. Journal of Hydrology, 146(1):209-220.
- Martinez, C.J. and M. Thepadia (2010). Estimating Reference Evapotranspiration with Minimum Data in Florida, USA. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136: 494-501.
- McCloud, D. E. (1955). Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate. Proceedings Soil Science Society Florida, 15:165-172.

- relationship for a large area. Proceedings Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, No. 3 (Kiev).
- Sabziparvar, A. A. and H. Tabari (2010). Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE 136 (10), 724–731.
- Sentelhas, P. C.; T. J. Gillespie and E. A. Santos (2010). Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5):635–644.
- Sheikh, V. and M. Mohammadi (2013). Evaluation of reference evapotranspiration equations in semi-arid regions of northeast of Iran. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5 (5): 450-456.
- Smith, M.; R. G. Allen; J. L. Monteith; L. S. Pereira; A. Perrier and W. O. Pruitt (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Land and Water Development Division, United Nations Food and Agriculture Service: Rome.
- Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24(10):2311–2337.
- Tabari, H.; M. E. Grismer and S. Trajkovic (2013). Comparative analysis of 31 references evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31: 107-117.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.
- Pandey, P. K.; P. P. Dabral and V. Pandey (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1):52-63.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, A193:120-146.
- Pereira, L. S.; R. G. Allen; M. Smith and D. Raes (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147: 4-20.
- Popova, Z.; M. Kercheva and L. S. Pereira (2006). Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to south Bulgaria. *Irrigation and Drainage*, 215:201–215.
- Priestley, C. H. B and R. J. Taylor (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81-92.
- Raziei, T. and L. S. Pereira (2013). Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121:1-18.
- Razzaghi, F. and A. R. Sepaskhah (2010). Assessment of nine different equations for ETo estimation using lysimeter data in a semiarid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(1):1-12.
- Rojas, J. P. and R. E. Sheffield (2013). Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman–Monteith equation using limited weather data in northeast Louisiana. *Irrigation and Drainage Engineering* 139:285–292.
- Romanenko, V. A. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal re-

- ple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(6): 845-858.
- Xystrakis, F. and A. Matzarakis (2011). Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of Crete in southern Greece. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(4):211–222.
- Yoder, R. E.; L. O. Odhiambo and W. C. Wright (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2):197–202.
- Trabert, W. (1896). Neue Beobachtungen über Verdampfungsgeschwindigkeiten. [New Observations on Evaporation Rates.] *Meteorologische Zeitschrift*, 13, 261-263
- Trajkovic, S. and S. Kolakovic (2009). Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*, 23(14):3057-3067.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12(1): 13-49.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography* 2 : 184-194.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11):1309-1313.
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. IN: *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile and C. J. Willmott (eds.). D. Reidel: Boston; 443–460.
- Willmott, C. J.; S. M. Robeson and K. Matsuura (2012). A refined index of model performance. *Short Communication. International Journal of Climatology*, 32:2088–2094.
- Xavier, A. C.; C. W. King and B. R. Scanlon (2015). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal Climatology*, 36: 2644-2659.
- Xu, C. Y. and D. Chen (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, 19: 3717-3734.
- Xu, J.; S. Peng; J. Ding; Q. Wei and Y. Yu (2013). Evaluation and calibration of sim-

Evaluation of nine reference evapotranspiration models in Traghan region, Southwest of Libya

Ali Othman Alghusni

Department of Soil and water, Faculty of Agriculture, Omar Al-Mukhtar University, Al-Bayda, Libya.

Received: 25 October 2020/ Accepted: 18 December 2020

Doi: <https://doi.org/10.54172/mjsc.v35i3.299>

Abstract: This research was carried out to evaluate nine reference evapotranspiration, and find out an alternative models to the standard FAO Penman-Monteith model in Traghan region southwest of Libya. The models applied were standard FAO Penman-Monteith, FAO Radiation, FAO Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, Makkink, Turc, Thornthwaite, Kharrufa and McCloud. The models were compared with the FAO Penman-Monteith model using root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), Pearson type goodness of fit index (R^2), refined index of agreement (d_r), modeling efficiency (E_f) and t-test. Results showed that FAO Radiation and FAO Blaney-Criddle models overestimated ET_o by values ranged from 0.64% to 16.06%. However, Kharrufa and McCloud models overestimated ET_o in some months and underestimated ET_o in some other months. Whereas, the other models underestimated ET_o by values ranged from -86.69 % to -6.02%. The FAO radiation model gave the highest d_r (0.892) and E_f (0.951) values, and the lowest RMSE (0.534 mm/day), indicating that this model was the best alternative to the FAO Penman-Monteith model in the study region, followed by FAO Blaney-Criddle model with d_r value of 0.851, E_f value of 0.878, and RMSE value of 0.845 mm/day. In addition, FAO radiation model showed the second best R^2 and MBE values at 0.993 and 0.473, respectively. Also, FAO Blaney-Criddle model showed the third best R^2 value at 0.989. Therefore, FAO radiation model is ranked the first and FAO Blaney-Criddle model is ranked the second. According to the statistical measures stated above, Turc model ranked the third, Kharrufa model ranked fourth. Models of Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor, McCloud and Thornthwaite ranked fifth, sixth, seventh, eighth and ninth, respectively. T-test analysis at 5% level of significance indicated that there is a significant difference between the FAO Penman-Monteith model and all models except Kharrufa and McCloud models.

Keywords: reference evapotranspiration, FAO Penman-Monteith, FAO Radiation, FAO Blaney-Criddle, Turc, Kharrufa.