Journal of Libyan Academy Bani Walid 2026
مجلة الأكاديمية الليبية بني وليد
e-ISSN: 3104-3860
Volume 2, Issue 3, 2026, Pages: 145-161
Website: https://journals.labjournal.ly/index.php/Jlabw/index

Analysis of Evapotranspiration in Arid and Semi-Arid Soils in Libya and Its Impact on Agricultural Water Resource Management

Asma Younes Abdul Salam Badr *
Agricultural and Animal Research Center – Libya
*Email: Asma.younes.badr73@gmail.com

تحليل التبخر–النتح في الترب الجافة وشبه الجافة في ليبيا وأثره في إدارة الموارد المائية الزراعية

أسماء يونس عبد السلام بدر *
مركز البحوث الزراعية والحيوانية – ليبيا

Received: 12-03-2026	**Accepted:** 17-05-2026	**Published**: 01-06-2026

Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract

Evapotranspiration is a central component of the hydrological cycle and a key indicator of atmospheric water demand, crop water requirements, and irrigation scheduling. Its importance is particularly high in Libya, where arid and semi-arid conditions dominate, precipitation is limited and irregular, solar radiation and temperature are high, and irrigated agriculture depends heavily on groundwater. This integrative review analyzes the concepts and controls of evapotranspiration in Libya, evaluates its spatial and temporal variability, compares the main estimation tools, and discusses implications for irrigation management under climate change.

The study synthesizes evidence from FAO-56, NASA POWER-based national mapping, GIS and Omu-ET applications, an Ajdabiya case study for 1991–2021, FAO WaPOR products, and climate-scenario analysis for the Sofuljeen region. Annual reference evapotranspiration ranges from approximately 1,680 mm yr−1 in northern Libya to 3,529 mm yr−1 in the far south. In Ajdabiya, annual potential evapotranspiration reached 2,390.2 mm, with a monthly maximum of 284.9 mm in June and a minimum of 96.6 mm in January. Future projections for Sofuljeen indicate that mean ETo may increase from 6.78 mm day−1 at the baseline to 7.68 mm day−1 under SSP2-4.5 and 8.37 mm day−1 under SSP5-8.5 by 2100, corresponding to increases of 13.27% and 23.45%, respectively.

The paper concludes that operational evapotranspiration assessment in Libya should integrate ground observations, satellite products, FAO Penman–Monteith calculations, CROPWAT, Omu-ET, WaPOR, and locally calibrated crop coefficients. Priority actions include expanding agrometeorological networks, updating national ETo maps, applying precision irrigation, reducing soil evaporation, improving irrigation scheduling, and adopting drought- and heat-tolerant crop varieties.

Keywords: Evapotranspiration, arid soils, Libya, FAO Penman-Monteith, CROPWAT, water resource management, climate change.

الملخص

يمثل التبخر–النتح أحد المكونات الأساسية للدورة الهيدرولوجية، كما يعد المؤشر الأكثر ارتباطًا بتقدير الطلب الجوي على الماء، وتحديد الاحتياجات المائية للمحاصيل، وتصميم برامج الري في البيئات الجافة وشبه الجافة. وتزداد أهمية هذا الموضوع في ليبيا بسبب سيادة المناخ الجاف على معظم مساحتها، ومحدودية الهطول المطري، وارتفاع الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة، واعتماد النشاط الزراعي بدرجة كبيرة على الموارد الجوفية. تهدف هذه الدراسة المرجعية التحليلية إلى إعادة تنظيم المعرفة المتاحة حول التبخر–النتح في ليبيا، وبيان مفاهيمه وأنواعه والعوامل المتحكمة فيه، وتحليل التباين المكاني والزمني لقيم التبخر–النتح المرجعي والممكن، وتقييم دور النماذج الحسابية ونظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في دعم إدارة مياه الري، فضلًا عن مناقشة الآثار المتوقعة لتغير المناخ.

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي ومنهج المراجعة التكاملية، من خلال تجميع وتحليل بيانات منشورة في مصادر دولية وليبية، من أهمها دليل منظمة الأغذية والزراعة FAO-56، ودراسة خرائط التبخر–النتح المرجعي في ليبيا المعتمدة على بيانات NASA POWER للفترة 1990–2020، ودراسة التبخر–النتح الممكن في أجدابيا للفترة 1991–2021، ودراسة سيناريوهات الاحتياجات المائية المستقبلية في منطقة سوف الجين. وأظهرت النتائج أن التبخر–النتح المرجعي السنوي يتدرج مكانيًا من نحو 1680 ملم/سنة في الشمال إلى 3529 ملم/سنة في أقصى الجنوب. وفي أجدابيا بلغ المجموع السنوي للتبخر–النتح الممكن 2390.2 ملم، مع أعلى قيمة شهرية في يونيو بلغت 284.9 ملم وأدنى قيمة في يناير بلغت 96.6 ملم. كما تشير سيناريوهات سوف الجين إلى ارتفاع متوسط ETo من 6.78 ملم/يوم في خط الأساس إلى 7.68 ملم/يوم تحت SSP2-4.5 و8.37 ملم/يوم تحت SSP5-8.5 بحلول عام 2100، بما يعادل زيادة قدرها 13.27% و23.45% على التوالي.

تخلص الدراسة إلى أن التعامل مع التبخر–النتح في ليبيا ينبغي أن ينتقل من التقديرات العامة إلى منظومة تشغيلية تجمع بين محطات الرصد الأرضية، وبيانات الأقمار الصناعية، ومعادلة FAO Penman–Monteith، ونماذج CROPWAT وOmu-ET، ومنصات WaPOR، مع معايرة محلية دورية. وتوصي الدراسة بتحديث خرائط ETo، وتوسيع شبكات الأرصاد الزراعية، وجدولة الري وفق المراحل الفينولوجية للمحصول، وتطبيق الري بالتنقيط والري تحت السطحي، والتغطية العضوية أو البلاستيكية للتربة، واختيار الأصناف المتحملة للجفاف والحرارة.

الكلمات المفتاحية: التبخر–النتح، الترب الجافة، ليبيا، معادلة بنمان–مونتيث، CROPWAT، إدارة الموارد المائية، تغير المناخ.

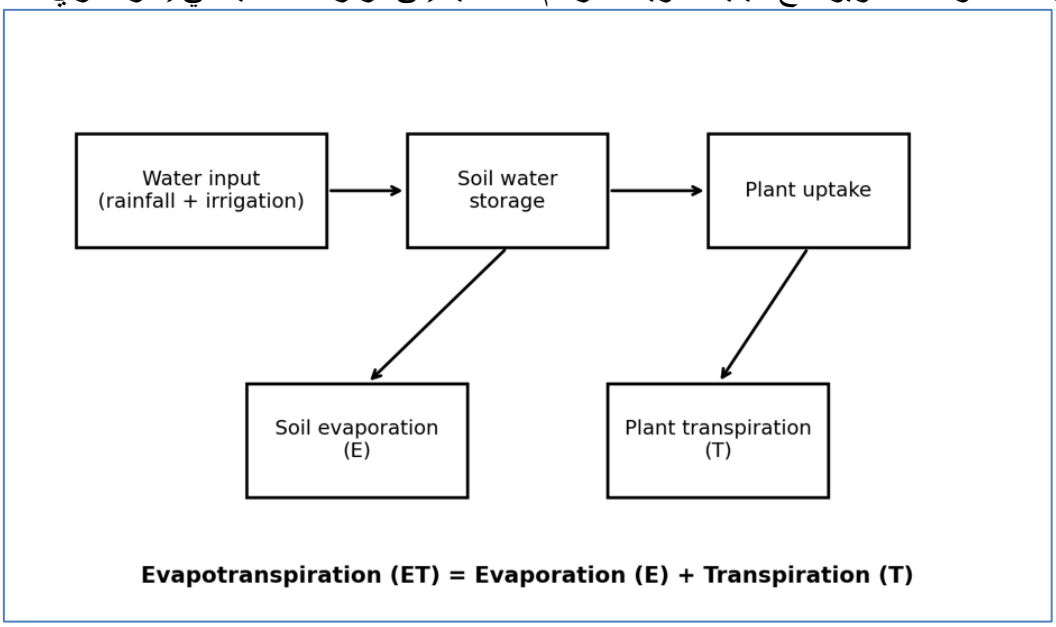
المقدمة:

يشكل الماء العامل المحدد الرئيس للإنتاج الزراعي في البيئات الجافة، ولا تكمن المشكلة في قلة الموارد المائية فقط، بل في ارتفاع الفاقد منها إلى الغلاف الجوي عبر عمليتي التبخر من سطح التربة والنتح من النباتات. ويجمع مفهوم التبخر–النتح بين هاتين العمليتين لأن الفصل الميداني الدقيق بينهما صعب، بينما يمثل مجموعهما كمية الماء التي تنتقل من النظام الأرضي–النباتي إلى الغلاف الجوي. ومن ثم فإن تقدير التبخر–النتح لا يعد مسألة مناخية نظرية فحسب، بل هو أساس لتخطيط الري، وتقييم الجفاف، وحساب الموازنة المائية، وتحديد كفاءة استخدام الماء، ومقارنة الأنظمة الزراعية.

تتميز ليبيا بتدرج مناخي واضح من السواحل المتوسطية في الشمال إلى الصحراء شديدة الجفاف في الوسط والجنوب. ويؤدي هذا التدرج إلى تباين كبير في الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح، وهي العناصر الأربعة الرئيسة الداخلة في حساب التبخر–النتح المرجعي وفق

معادلة FAO Penman–Monteith. وفي الوقت نفسه، فإن انخفاض الأمطار وعدم انتظامها يحدان من التبخر–النتح الفعلي في الأراضي غير المروية، لأن توفر الطاقة الجوية لا يعني بالضرورة وجود ماء كاف في التربة. ولهذا يجب التمييز بين الطلب المناخي المحتمل على الماء وبين الاستهلاك الفعلي المقيد برطوبة التربة.

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا في تقدير التبخر–النتح في ليبيا من خلال استخدام بيانات الأقمار الصناعية وإعادة التحليل المناخي، ونظم المعلومات الجغرافية، وبرامج CROPWAT، ونموذج جامعة عمر المختار Omu-ET، وتطبيق ETo Libya، ومنتجات WaPOR التابعة لمنظمة الأغذية والزراعة. غير أن هذه الأدوات تختلف في نوع المتغير المقاس، وفي الدقة المكانية والزمنية، وفي الافتراضات والمعادلات المستخدمة. لذلك فإن جمع نتائجها في إطار تحليلي واحد يساعد على تجنب الخلط بين ETo وPET وAET وETc، ويوضح كيفية تحويل الأرقام المناخية إلى قرارات عملية في إدارة الري.



الشكل (1): *مخطط مبسط لمكونات التبخر–النتح في النظام الزراعي.*
المصدر: إعداد الدراسة استنادًا إلى المفاهيم الواردة في Allen et al. (1998).

2. مشكلة الدراسة وأسئلتها

تتمثل مشكلة الدراسة في أن ارتفاع الطلب الجوي على الماء في ليبيا يتزامن مع محدودية الموارد المائية وتفاوت البيانات المناخية بين المناطق، بينما تستند كثير من قرارات الري إلى تقديرات عامة أو جداول ثابتة لا تعكس الاختلافات المكانية والموسمية ولا التغيرات المناخية المتسارعة. كما أن استخدام مصطلحات التبخر–النتح بصورة مترادفة قد يؤدي إلى أخطاء عند مقارنة نتائج نموذج مناخي لقيمة ETo بنتائج استشعار عن بعد لقيمة AET أو نتائج معادلة تجريبية لقيمة PET.

وعليه تسعى الدراسة للإجابة عن الأسئلة الآتية:

1- ما المفاهيم الأساسية للتبخر–النتح، وما الفروق بين التبخر–النتح المرجعي والممكن والفعلي وتبخر–نتح المحصول؟

2- كيف تتباين قيم التبخر–النتح مكانيًا وزمنيًا بين شمال ليبيا وجنوبها وبين أشهر السنة؟

3- ما مدى ملاءمة النماذج والأدوات المتاحة، مثل FAO Penman–Monteith وCROPWAT وOmu-ET وWaPOR، للاستخدام في الظروف الليبية؟

4- كيف يمكن أن يؤثر تغير المناخ في قيم ETo والاحتياجات المائية للري حتى نهاية القرن الحادي والعشرين؟
5- ما الإجراءات الفنية والمؤسسية اللازمة لتحويل تقديرات التبخر–النتح إلى سياسات وبرامج ري أكثر كفاءة؟

3. أهداف الدراسة

1- تأصيل المفاهيم العلمية المرتبطة بالتبخر–النتح وبيان العلاقات الحسابية بينها.
2- تحليل التباين المكاني والزماني لقيم التبخر–النتح في ليبيا بالاستناد إلى الدراسات المنشورة.
3- عرض القيم الشهرية والفصلية في أجدابيا، والمدى السنوي الوطني، والسيناريوهات المستقبلية لمنطقة سوف الجين.
4- مقارنة أدوات التقدير المباشر وغير المباشر والاستشعار عن بعد من حيث البيانات المطلوبة والاستخدامات والقيود.
5- صياغة إطار تطبيقي لإدارة مياه الري يعتمد على ETo ومعاملات المحاصيل والرصد المستمر.
6- اقتراح توصيات قابلة للتنفيذ للبحث الزراعي والجهات المسؤولة عن المياه والأرصاد والإرشاد الزراعي.

4. أهمية الدراسة

تنبع الأهمية العلمية للدراسة من دمجها بين علم المناخ الزراعي، وعلوم التربة والمياه، والاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، وإدارة الري. أما أهميتها التطبيقية فتتمثل في توفير أساس منظم لتقدير الاحتياجات المائية للمحاصيل في مختلف البيئات الليبية، وتحديد الفترات الحرجة التي يرتفع فيها الفقد المائي، وتوجيه الاستثمارات نحو تقنيات الري الأكثر ملاءمة. كما تسهم الدراسة في توضيح حدود استخدام القيم المنشورة؛ فالقيمة المستخرجة من نموذج مناخي مرجعي لا تمثل تلقائيًا كمية الماء التي استهلكها الحقل، والقيمة الفعلية المشتقة من الأقمار الصناعية لا يمكن تحويلها مباشرة إلى جدول ري من دون معرفة نوع المحصول ومرحلة النمو وكفاءة النظام.

5. منهجية الدراسة ومصادر البيانات

اعتمدت الدراسة منهج المراجعة التكاملية والمنهج الوصفي التحليلي. وتمت مراجعة المصادر الأساسية التي تحدد الإطار النظري والحسابي للتبخر–النتح، ثم تجميع النتائج الرقمية المنشورة الخاصة بليبيا، وإعادة تنظيمها في جداول ومخططات. ولا تمثل هذه الورقة تجربة حقلية جديدة، بل تحليلًا تركيبيًا لبيانات منشورة؛ لذلك فإن نتائجها تتأثر بدقة المصادر الأصلية واختلاف طرق الحساب والفترات المرجعية.

جدول (1): مصادر البيانات والأدوات المستخدمة في الدراسة والفترات الزمنية المغطاة.

المصدر	النطاق/الفترة	الأداة أو المنهج	نوع البيانات المستفادة
Allen et al. (1998)	مرجع دولي	FAO Penman–Monteith وKc	التعريفات والمعادلات القياسية
Ikhneifir et al. (2023)	288 موقعًا في ليبيا، 1990–2020	NASA POWER + Omu-ET + GIS	المدى المكاني السنوي وخرائط ETo
Sasi (2026)	أجدابيا، 1991–2021	معادلة إيفانوف	القيم الشهرية والفصلية لـPET

Meftah & Salama (2024)	منطقة سوف الجين، 2022–2100	CROPWAT 8.0 + SSP2-4.5/SSP5-8.5	ETo سيناريوهات المستقبلية
FAO WaPOR (n.d.)	تغطيات مكانية وزمنية متعددة	الاستشعار عن بعد	التبخر–النتح الفعلي والتداخل AETI
Al-Ajjur & Ghamdi (2021)	الشرق الأوسط وشمال أفريقيا حتى 2100	CMIP6 + Penman/Budyko	اتجاهات PET وAET وإتاحة المياه

أعيد حساب المتوسطات اليومية المكافئة للقيم السنوية بقسمة القيمة السنوية على 365 يومًا لأغراض المقارنة فقط، بينما احتُفظ بالقيم الأصلية الشهرية والفصلية والسيناريوهات كما وردت في المصادر. ولم يتم دمج القيم المحسوبة بمعادلة إيفانوف مع قيم FAO Penman–Monteith في سلسلة واحدة، لأن اختلاف المنهج والسطح المرجعي يجعل المقارنة المباشرة بينهما محدودة.

6. الإطار المفاهيمي والنظري

6.1 التبخر والنتح والتبخر–النتح

التبخر هو تحول الماء من الحالة السائلة إلى بخار من أسطح التربة والمياه والسطوح النباتية المبتلة. ويتحكم فيه أساسًا توفر الطاقة، وعجز ضغط البخار، وحركة الهواء، ودرجة رطوبة السطح. أما النتح فهو انتقال الماء الذي امتصته الجذور عبر النبات وخروجه من الثغور على هيئة بخار. ويتأثر النتح بنوع النبات ومساحة الأوراق ومرحلة النمو وفتح الثغور وحالة الإجهاد المائي. ولأن العمليتين تتزامنان وتتداخلان داخل الحقل، يستخدم مصطلح التبخر–النتح ET للتعبير عن مجموعهما.

6.2 التبخر–النتح المرجعي ETo

يعرف ETo بأنه معدل التبخر–النتح من سطح مرجعي افتراضي مغطى بعشب أخضر منتظم النمو، غير محدود بالماء، بارتفاع 0.12 متر ومقاومة سطحية 70 ثانية/متر وبياض سطحي 0.23. والغرض من السطح المرجعي هو فصل أثر المناخ عن أثر نوع المحصول، بحيث تعبر ETo عن الطلب الجوي، ثم يضاف أثر المحصول باستخدام معامل المحصول Kc. وتوصي منظمة الأغذية والزراعة بمعادلة FAO Penman–Monteith باعتبارها الطريقة القياسية لحساب ETo من بيانات الإشعاع ودرجة الحرارة والرطوبة والرياح (Allen et al., 1998).

$$ETo = [0.408\Delta(Rn - G) + \gamma(900/(T + 273))u_2(es - ea)] / [\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]$$

حيث تمثل Δ ميل منحنى ضغط البخار المشبع، وRn صافي الإشعاع، وG تدفق الحرارة في التربة، وγ الثابت السيكرومتري، وT متوسط درجة حرارة الهواء، وu₂ سرعة الرياح عند ارتفاع مترين، و(es−ea) عجز ضغط البخار. وتبين المعادلة أن ETo ليست دالة في الحرارة وحدها، بل نتيجة تفاعل الطاقة والرطوبة والرياح.

6.3 التبخر–النتح الممكن والفعلي وتبخر–نتح المحصول

جدول (2): مقارنة مفاهيم التبخر–النتح المرجعي والممكن والفعلي وتبخر نتح المحصول واستخداماتها.

المفهوم	الرمز	المعنى العلمي	الاستخدام الرئيس

التبخر–النتح المرجعي	ETo	طلب جوي من سطح عشبي مرجعي جيد الإمداد بالماء	المقارنة المناخية وحساب احتياجات المحاصيل
التبخر–النتح الممكن	PET أو ETp	الفقد المتوقع إذا لم يكن الماء عاملًا محددًا؛ يتغير تعريفه باختلاف الطريقة	الموازنة المناخية ودراسات الجفاف
التبخر–النتح الفعلي	AET أو ETa	الفقد الحقيقي تحت ظروف رطوبة التربة والغطاء النباتي والإدارة	تقييم الاستهلاك الفعلي والإجهاد المائي
تبخر–نتح المحصول القياسي	ETc	استهلاك محصول محدد تحت ظروف نمو مثالية	تحديد صافي الاحتياج المائي للمحصول
تبخر–نتح المحصول المعدل	ETc adj	استهلاك المحصول عند وجود إجهاد مائي أو ملوحة أو ضعف إدارة	جدولة الري في الظروف غير المثالية

$$ETc = Kc \times ETo$$

تمثل هذه العلاقة الجسر بين البيانات المناخية وإدارة الري. فمعامل المحصول Kc يتغير مع نوع المحصول ومرحلة النمو، ولذلك لا يكفي استخدام ETo وحدها لتحديد كمية الري. كما ينبغي تحويل صافي الاحتياج إلى احتياج إجمالي يأخذ في الحسبان كفاءة نظام الري، والتسرب العميق، وغسيل الأملاح عند الضرورة.

7. العوامل المؤثرة في التبخر–النتح في البيئات الليبية

جدول (3): العوامل المؤثرة في التبخر–النتح في البيئات الليبية وآليات تأثيرها.

العامل	آلية التأثير	السلوك المتوقع في ليبيا	ملاحظة تطبيقية
الإشعاع الشمسي وصافي الإشعاع	يوفران الطاقة اللازمة لتحويل الماء إلى بخار	مرتفعان في الداخل والجنوب ومعظم أشهر السنة	تزداد أهمية التظليل والتغطية وتقليل السطح المكشوف
درجة حرارة الهواء	ترفع ضغط البخار المشبع والطلب الجوي	قيم مرتفعة صيفًا وتزداد جنوبًا	تتطلب جدولة ري أكثر تقاربًا في موجات الحر
الرطوبة النسبية	انخفاضها يرفع عجز ضغط البخار	أقل في المناطق الداخلية والصحراوية	ينبغي عدم الاعتماد على الحرارة وحدها في الحساب
سرعة الرياح	تزيل طبقة الهواء الرطب فوق السطح	قد ترفع الفقد في المناطق المكشوفة والساحلية	تساعد مصدات الرياح على تقليل الطلب التبخري محليًا
رطوبة التربة	تحدد قدرة السطح على تلبية الطلب الجوي	محدودة في الأراضي البعلية والجافة	قد تكون AET أقل كثيرًا من ETo رغم ارتفاع الطلب المناخي
الغطاء النباتي ومرحلة النمو	يحددان مساحة النتح ومعامل المحصول	تختلف باختلاف المحصول والموسم والكثافة	تستخدم معاملات Kc المرحلية بدل معامل ثابت

الملوحة وبنية التربة	تحدان امتصاص الماء وتغيران التوصيل الهيدروليكي	مهمتان في البيئات المروية والمياه الجوفية المالحة	يجب دمج إدارة الملوحة مع برامج الري

8. الخلفية المناخية والجغرافية لليبيا

تقع ليبيا بين الساحل الجنوبي للبحر المتوسط والنطاق الصحراوي الأفريقي، ويؤدي امتدادها العرضي الكبير إلى وجود تدرج مناخي ملحوظ. تتلقى المناطق الساحلية والمرتفعات الشمالية كميات مطر أكبر نسبيًا خلال الشتاء، وتنخفض الحرارة ويرتفع متوسط الرطوبة مقارنة بالمناطق الداخلية. أما الوسط والجنوب فيسودهما مناخ صحراوي شديد الجفاف، مع أمطار قليلة ومتذبذبة وإشعاع قوي ودرجات حرارة مرتفعة ورطوبة منخفضة. وتنعكس هذه الخصائص في تزايد ETo باتجاه الجنوب.

ينبغي مع ذلك تجنب وصف جميع الأراضي الليبية بالمناخ نفسه؛ فالجبل الأخضر والسهل الساحلي وبعض المرتفعات تختلف بوضوح عن فزان والكفرة وغدامس. كما أن القيم اليومية والشهرية قد تتغير بصورة كبيرة داخل الإقليم الواحد تبعًا للارتفاع والقرب من البحر واتجاه الرياح والخصائص المحلية للسطح. ولهذا كانت الخرائط الرقمية عالية الدقة أكثر فائدة من المتوسط الوطني الواحد.

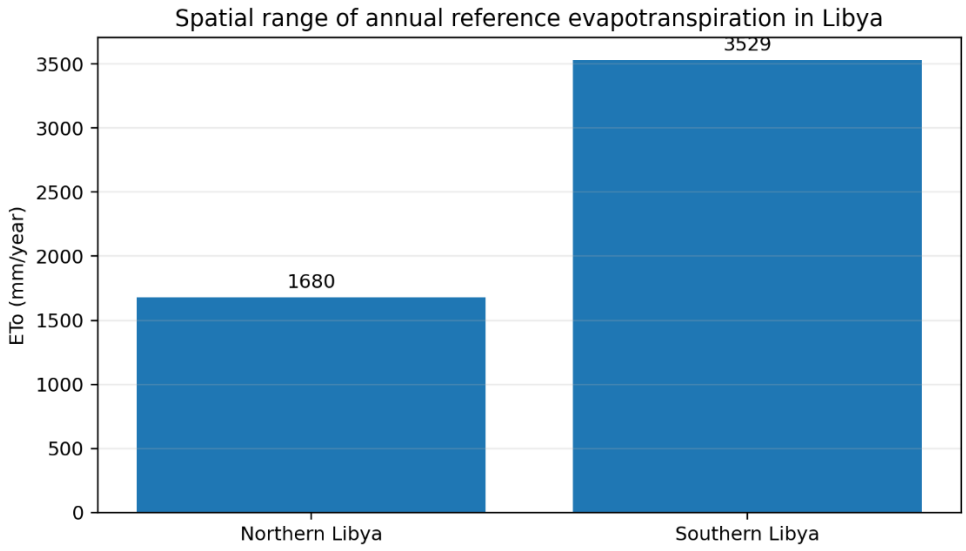
9. التباين المكاني للتبخر–النتح المرجعي في ليبيا

اعتمدت دراسة Ikhneifir et al. (2023) على بيانات مناخية للفترة 1990–2020 شملت درجة الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح والإشعاع الشمسي قصير الموجة المستخرجة من NASA POWER لعدد 288 موقعًا. وقد حُسبت ETo باستخدام نموذج Omu-ET، ثم قورنت طرق الاستيفاء المكاني IDW وKriging وSpline، واختيرت طريقة Spline لإنتاج الخرائط بسبب أدائها الإحصائي الأفضل في الدراسة. وأظهرت النتائج تدرجًا من 1680 ملم/سنة في شمال ليبيا إلى 3529 ملم/سنة في أقصى الجنوب.

جدول (4): التباين المكاني السنوي للتبخر–النتح المرجعي (ETo) بين شمال ليبيا وجنوبها.

النطاق المكاني	ETo السنوي (ملم/سنة)	المتوسط اليومي المكافئ (ملم/يوم)*	التفسير العام
شمال ليبيا	1680	4.6	اعتدال نسبي في الحرارة وارتفاع الرطوبة وتأثير البحر والمرتفعات
أقصى جنوب ليبيا	3529	9.67	حرارة وإشعاع أعلى ورطوبة أقل وطلب جوي شديد
الفرق جنوب–شمال	1849	5.07	زيادة تقارب 110% بين طرفي المدى المكاني

* المتوسط اليومي المكافئ قيمة حسابية توضيحية ناتجة عن قسمة المجموع السنوي على 365 يومًا، ولا تمثل التوزيع اليومي الفعلي.



الشكل (2): المدى المكاني السنوي للتبخر–النتح المرجعي بين شمال ليبيا وجنوبها.
المصدر: إعداد الدراسة اعتمادًا على Ikhneifir et al. (2023).

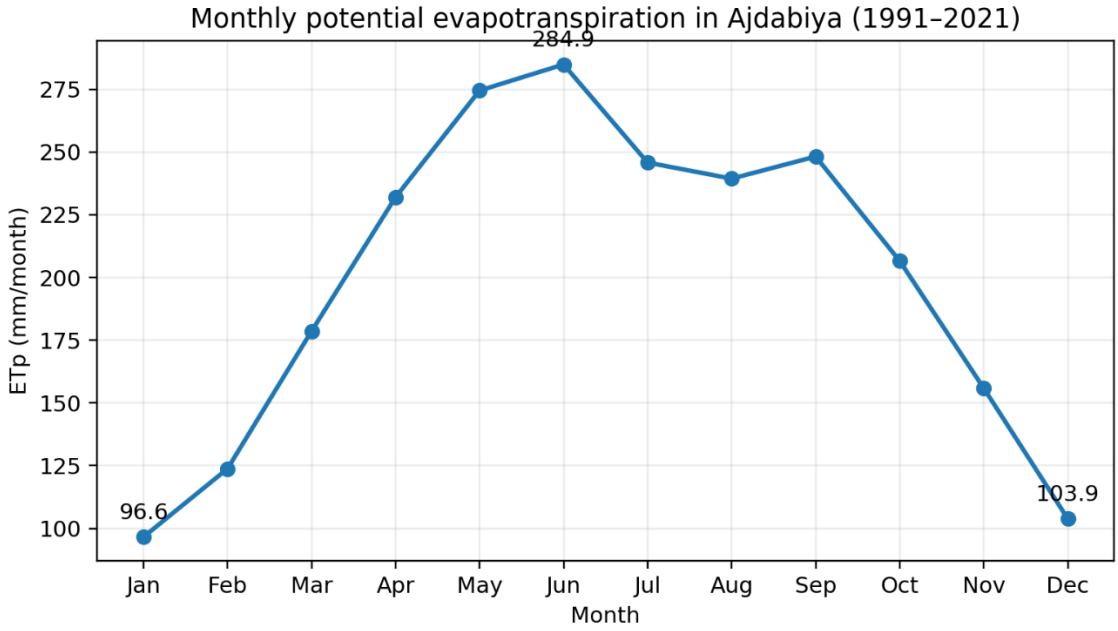
تؤكد هذه النتيجة أن استخدام جدول ري موحد على المستوى الوطني غير مناسب. فالمحصول نفسه، إذا زرع في موقعين متباعدين، قد يواجه طلبًا جويًا مختلفًا جدًا، حتى لو كانت خصائص التربة متقاربة. كما أن زيادة ETo جنوبًا لا تعني بالضرورة زيادة AET في الأراضي غير المروية؛ إذ قد يكون التبخر–النتح الفعلي منخفضًا بسبب غياب الماء، بينما يصبح الطلب المرتفع عاملًا حاسمًا عند توفير الري.

10. التباين الزمني: دراسة حالة مدينة أجدابيا

تقدم دراسة Sasi (2026) سلسلة شهرية للتبخر–النتح الممكن في أجدابيا للفترة 1991–2021 باستخدام معادلة إيفانوف. بلغت القيمة السنوية 2390.2 ملم، وارتفعت من 96.6 ملم في يناير إلى ذروة مقدارها 284.9 ملم في يونيو، ثم بدأت في الانخفاض التدريجي مع بقاء قيم أواخر الصيف وبداية الخريف مرتفعة. وترتبط هذه الدورة بارتفاع الحرارة وانخفاض الرطوبة في الفصل الدافئ، والعكس خلال الشتاء.

جدول (5): القيم الشهرية للتبخر–النتح الممكن (ETp) في مدينة أجدابيا خلال الفترة (1991–2021).

الشهر	ETp (ملم/شهر)	الشهر	ETp (ملم/شهر)
يناير	96.6	يوليو	245.8
فبراير	123.8	أغسطس	239.4
مارس	178.6	سبتمبر	248.2
أبريل	232.0	أكتوبر	206.6
مايو	274.5	نوفمبر	155.9
يونيو	284.9	ديسمبر	103.9

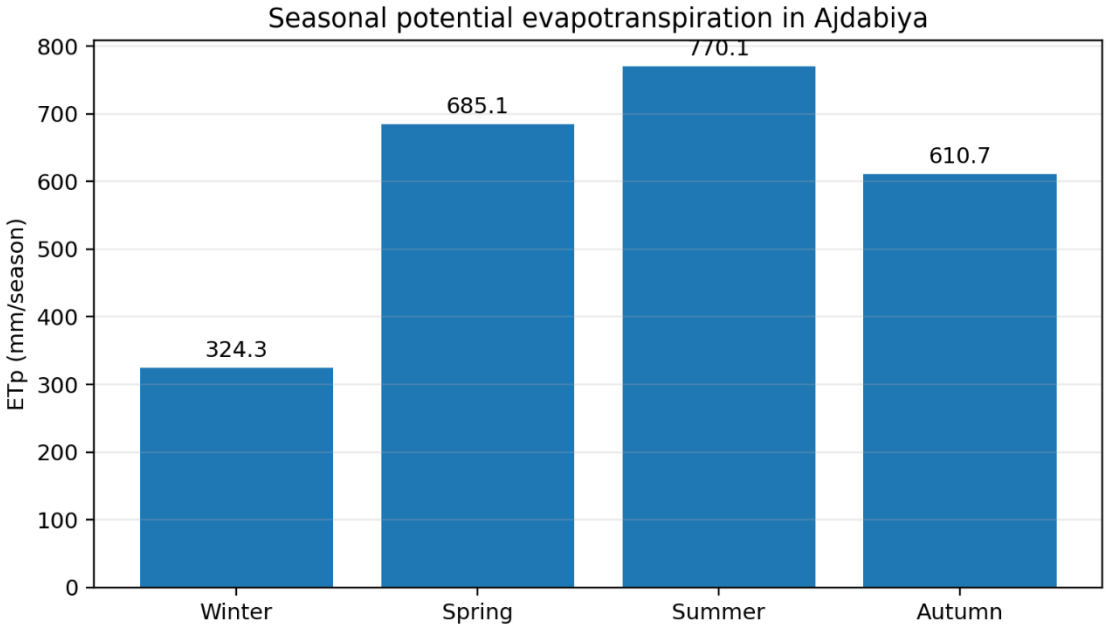


الشكل (3): التغير الشهري للتبخر–النتح الممكن في مدينة أجدابيا خلال الفترة 1991–2021.

المصدر: إعداد الدراسة من بيانات Sasi (2026).

جدول :(6) التوزيع الفصلي للتبخر–النتح الممكن (ETp) في مدينة أجدابيا.

الفصل	ETp (ملم/فصل)	النسبة من المجموع السنوي (%)
الشتاء	324.3	13.6
الربيع	685.1	28.7
الصيف	770.1	32.2
الخريف	610.7	25.6
المجموع السنوي	2390.2	100.0



الشكل (4): التوزيع الفصلي للتبخر–النتح الممكن في مدينة أجدابيا.
المصدر: إعداد الدراسة من بيانات Sasi (2026).

تظهر القيم الفصلية أن الصيف وحده يمثل نحو ثلث المجموع السنوي، بينما يمثل الشتاء أقل من 14%. وتفيد هذه النتيجة في تصميم السعة التشغيلية لشبكات الري والخزانات؛ إذ ينبغي أن تكون المنظومة قادرة على تلبية الذروة الصيفية لا المتوسط السنوي فقط. ومع ذلك، فإن قيم إيفانوف تمثل تبخرًا–نتحًا ممكنًا يعتمد أساسًا على الحرارة والرطوبة، ولذلك لا ينبغي مساواتها مباشرة بقيم FAO Penman–Monteith دون اختبار ومعايرة محلية.

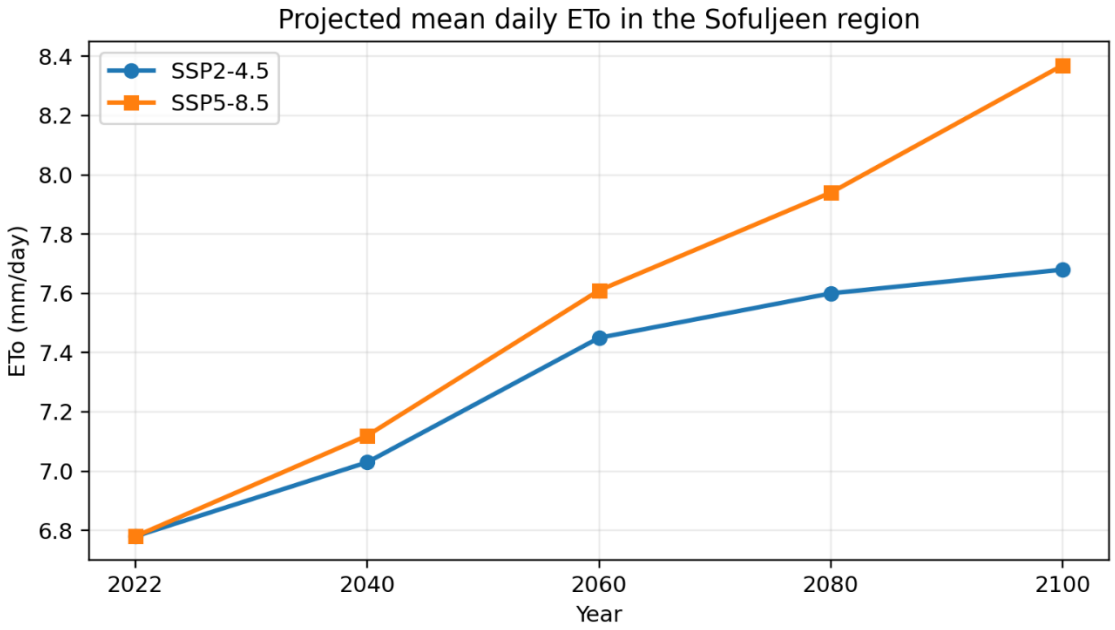
11. أثر تغير المناخ في التبخر–النتح واحتياجات الري

تشير الأدبيات الإقليمية إلى أن ارتفاع درجة الحرارة يزيد الطلب الجوي على الماء ويضغط على إتاحة الموارد في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، مع بقاء عدم يقين أكبر في توقعات المطر مقارنة بالحرارة. وقد بين Ajjur and Al-Ghamdi (2021) أن PET يميل إلى الزيادة في معظم المنطقة خلال القرن الحادي والعشرين، وأن الانخفاض المتوقع في إتاحة المياه يصبح أشد تحت سيناريو الانبعاثات المرتفع. ولا ينبغي تفسير الزيادة المتوقعة في المطر في بعض خلايا النماذج على أنها تحسن مضمون في الموارد، لأن التوزيع الزمني وشدة العواصف وارتفاع PET وAET قد تحد من الفائدة الفعلية.

على المستوى المحلي، حللت دراسة Salama and Meftah (2024) منطقة سوف الجين باستخدام CROPWAT 8.0 وسيناريوهَي SSP2-4.5 وSSP5-8.5. وارتفع متوسط ETo اليومي في السيناريو المتوسط من 6.78 ملم/يوم في خط الأساس إلى 7.03 في 2040 و7.45 في 2060 و7.60 في 2080 و7.68 في 2100. وفي السيناريو مرتفع الانبعاثات ارتفع إلى 7.12 و7.61 و7.94 و8.37 ملم/يوم على التوالي.

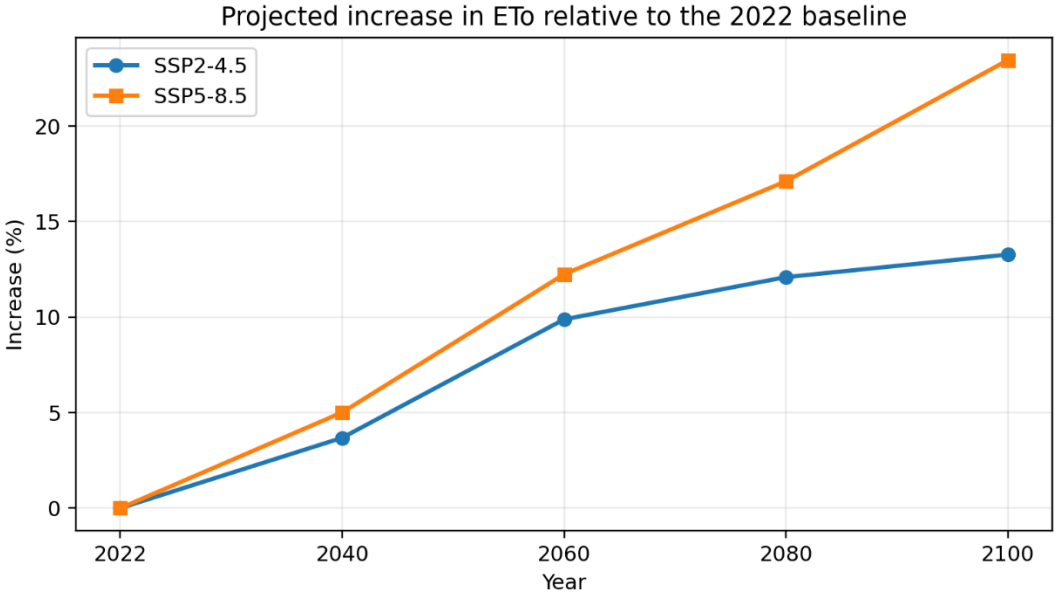
جدول (7): سيناريوهات التغير المستقبلي للتبخر–النتح المرجعي (ETo) في منطقة سوف الجين حتى عام 2100.

الزيادة (%)	SSP5-8.5: ETo (ملم/يوم)	الزيادة (%)	SSP2-4.5: ETo (ملم/يوم)	السنة
0.00	6.78	0.00	6.78	2022
5.01	7.12	3.68	7.03	2040
12.24	7.61	9.88	7.45	2060
17.11	7.94	12.09	7.60	2080
23.45	8.37	13.27	7.68	2100



الشكل (5): المسار المتوقع لمتوسط ETo اليومي في منطقة سوف الجين حتى عام 2100.

المصدر: إعداد الدراسة اعتمادًا على Salama and Meftah (2024).



الشكل (6): الزيادة النسبية المتوقعة في ETo مقارنة بخط أساس 2022.

المصدر: إعداد الدراسة اعتمادًا على Salama and Meftah (2024).

تعني زيادة ETo أن المحصول المرجعي سيفقد ماء أكثر إذا توفر الماء، وأن ETc للمحاصيل سيرتفع ما لم تتغير معاملات المحصول أو مواعيد الزراعة أو الظروف الزراعية. فعلى سبيل المثال، عند ثبات Kc، تؤدي زيادة ETo بنسبة 23.45% إلى زيادة مماثلة تقريبًا في ETc القياسي. لكن الاحتياج الإجمالي للري قد يزداد بنسبة مختلفة بسبب المطر الفعال وكفاءة الري والملوحة والتغير في طول الموسم. ولهذا ينبغي التعامل مع النسب بوصفها إشارة تخطيطية لا كمية ري جاهزة للتطبيق في كل مزرعة.

12. النماذج والأدوات المستخدمة في تقدير التبخر–النتح

جدول :(8) مقارنة النماذج والأدوات المستخدمة في تقدير التبخر–النتح من حيث المدخلات والمخرجات والمزايا والقيود.

الأداة/الطريقة	المدخلات الرئيسة	المخرجات	نقاط القوة	القيود
FAO Penman–Monteith	إشعاع، حرارة، رطوبة، رياح	ETo يومية أو شهرية	طريقة معيارية فيزيائيًا وقابلة للمقارنة	تحتاج بيانات مناخية جيدة وضبطًا للارتفاع والوحدات
معادلة إيفانوف	حرارة ورطوبة نسبية	PET/ETp	بسيطة عند نقص البيانات	أقل تمثيلًا للإشعاع والرياح؛ تحتاج معايرة
CROPWAT 8.0	مناخ + محصول + تربة + مطر	ETo وETc وجدول الري	يربط المناخ بالمحصول والإدارة	حساسية لجودة CLIMWAT وKc والمطر الفعال
Omu-ET / ETo Libya	بيانات مناخية وإحداثيات	ETo وخرائط وقيم نقطية	مطور للبيئة الليبية وسهل الاستخدام	يحتاج تحققًا مستمرًا بمحطات أرضية وتحديث قواعد البيانات

الدقة تعتمد على كثافة النقاط وطريقة الاستيفاء	يكشف التدرج المكاني ويدعم التخطيط	خرائط مستمرة	نقاط مناخية/قيم ETo	GIS والاستيفاء المكاني
تحتاج تحققًا أرضيًا وفهمًا للفروق بين AETI وETo	تغطية مكانية وتكرار زمني وإمكانية الرصد التشغيلي	AETI ومؤشرات إنتاجية الماء	صور أقمار صناعية ومدخلات طاقة ونبات	FAO WaPOR

12.1 نموذج Omu-ET وتطبيق ETo Libya

أنتجت الدراسة الوطنية خرائط ETo من نتائج نموذج Omu-ET، ثم طورت تطبيقًا ثنائي اللغة في بيئة Excel وVisual Basic باسم ETo Libya، يتيح الحصول على قيم شهرية وسنوية لنقطة داخل ليبيا بإدخال الإحداثيات. وتكمن أهمية هذا النوع من الأدوات في تسهيل وصول المرشد الزراعي والمخطط إلى تقدير أولي سريع، لكن الاستخدام الحقلي ينبغي أن يرافقه تحقق من بيانات المحطة الأقرب ومقارنة مع استهلاك الحقل الفعلي.

12.2 منصة WaPOR والاستشعار عن بعد

توفر منصة WaPOR منتجات التبخر–النتح الفعلي والتداخل AETI على ترددات سنوية وشهرية وعشرية، مع طبقات مختلفة الدقة. وهذه المنتجات مفيدة لمراقبة الاستهلاك المائي الفعلي للمناطق المزروعة، وتحديد الحقول التي يظهر فيها استهلاك مرتفع أو انخفاض قد يدل على إجهاد مائي أو ضعف نمو. ويختلف AETI عن ETo لأنه يعكس حالة السطح والغطاء النباتي وتوفر الماء، وليس الطلب الجوي المرجعي فقط (FAO, n.d.).

يمكن بناء نظام وطني يجمع بين ETo المناخية وAETI الفضائية. فعندما تكون AETI أقل كثيرًا من ETc المتوقع، قد يشير ذلك إلى إجهاد مائي أو انخفاض الغطاء النباتي. وعندما تكون مرتفعة مع إنتاجية منخفضة، فقد يدل ذلك على ري زائد أو تبخر غير منتج. وتتيح هذه المقارنة الانتقال من مراقبة كمية الماء إلى مراقبة إنتاجية الماء.

13. تطبيقات التبخر–النتح في إدارة مياه الري

13.1 حساب الاحتياجات المائية وجدولة الري

تبدأ جدولة الري بحساب ETo اليومية أو العشرية، ثم ضربها في Kc المناسب لمرحلة نمو المحصول. وبعد طرح المطر الفعال وتعديل الإجهاد والملوحة، يحسب صافي عمق الري. ويقسم الصافي على كفاءة النظام للحصول على العمق الإجمالي. ويجب ألا تعتمد الجدولة على التقويم وحده؛ فموجة حر أو رياح جافة قد ترفع الطلب خلال أيام قليلة، بينما قد تخفضه أيام الغيوم وارتفاع الرطوبة.

صافي الاحتياج للري = تبخر-نتح المحصول - (ETc) المطر الفعال + أو - التغير في خزن رطوبة التربة

الاحتياج الإجمالي للري = صافي الاحتياج ÷ كفاءة نظام الري

13.2 الحد من التبخر غير المنتج

يمثل التبخر من سطح التربة جزءًا غير منتج من ET، خاصة في المراحل الأولى قبل اكتمال الغطاء النباتي وبعد الري المتكرر بكميات صغيرة. ويمكن تقليله بالتغطية العضوية أو البلاستيكية، وتسوية الأرض، وتقليل المساحة المبتلة باستخدام التنقيط، والري في الأوقات الأقل حرارة ورياحًا، وتحسين المادة

العضوية وبنية التربة. أما النتح فليس فاقدًا بالكامل، لأنه مرتبط بالتمثيل الضوئي وتكوين المحصول؛ لذلك يجب أن يستهدف التحسين خفض التبخر والتسرب غير الضروري مع الحفاظ على نتح منتج.

13.3 اختيار المحاصيل والأصناف ومواعيد الزراعة

يمكن خفض الاحتياجات المائية الموسمية بتحريك موسم النمو بعيدًا عن أشهر الذروة التبخرية، بشرط عدم تعريض المحصول للصقيع أو الحرارة في المراحل الحساسة. كما تساعد الأصناف قصيرة الموسم والمتحملة للجفاف والحرارة والملوحة على تحسين الإنتاج لكل متر مكعب. ويجب أن يستند اختيار المحصول إلى توافق الطلب المائي مع المورد المتاح، لا إلى الجدوى السوقية وحدها.

13.4 إطار تشغيلي مقترح للمزارع والجهات المختصة

جدول :(9) الإطار التشغيلي المقترح لتطبيقات التبخر–النتح في إدارة مياه الري على المستويات المختلفة.

المستوى	الإجراء	البيانات المطلوبة	المخرج المتوقع
وطني	تحديث خرائط ETo كل 5 سنوات	محطات أرضية + NASA POWER/ERA5 + GIS	أطلس مناخي زراعي وقيم مرجعية موحدة
إقليمي	تحديد مناطق إدارة الري	ETo + تربة + مياه + محاصيل	معاملات محلية وبرامج موسمية
مشروع/واحة	مقارنة ETo وAETI	WaPOR + خرائط الحقول	كشف الري الزائد والإجهاد ومؤشرات إنتاجية الماء
مزرعة	جدولة الري اليومية/العشرية	ETo + Kc + رطوبة التربة + كفاءة النظام	كمية وتوقيت الري لكل حقل
بحثي	التحقق والمعايرة	ليزيمترات/أجهزة تدفق/محطات طقس	معاملات تصحيح وعدم يقين موثقة

14. مناقشة النتائج

تكشف النتائج عن ثلاثة أنماط رئيسة. أولًا، هناك تدرج مكاني قوي في الطلب الجوي من الشمال إلى الجنوب؛ إذ يزيد الطرف الأعلى من المدى الوطني على الطرف الأدنى بأكثر من الضعف. ثانيًا، هناك موسمية حادة داخل الموقع الواحد، كما ظهر في أجدابيا حيث قاربت قيمة يونيو ثلاثة أمثال قيمة يناير. ثالثًا، تشير السيناريوهات إلى أن خط الأساس نفسه ليس ثابتًا، وأن قيم نهاية القرن قد تكون أعلى بوضوح، خاصة تحت SSP5-8.5.

هذه الأنماط مترابطة، لكنها لا تعني أن كل منطقة جنوبية أو كل شهر صيفي يحتاج كمية الري نفسها. فالتربة الرملية ذات السعة التخزينية المنخفضة تتطلب تكرارًا أكبر للري مقارنة بتربة أعمق، وقد يقل ETc لمحصول يغطي السطح جزئيًا رغم ارتفاع ETo. كما أن ملوحة الماء قد تفرض احتياجًا إضافيًا للغسيل، بينما يرفع ضعف كفاءة الشبكة الاحتياج الإجمالي دون أن يرفع احتياج المحصول نفسه.

توضح المقارنة بين أجدابيا والدراسة الوطنية ضرورة عدم جمع قيم PET المحسوبة بإيفانوف مع ETo المحسوبة بطريقة FAO-56 دون توحيد المنهج. فمعادلة إيفانوف تعتمد على متغيرات أقل وقد تعطي مستوى مختلفًا من التقدير. لذلك يفضل استخدام دراسة أجدابيا لوصف الدورة الشهرية المحلية، واستخدام خريطة Omu-ET لوصف التدرج الوطني، واستخدام WaPOR لتقدير الاستهلاك الفعلي. إن قيمة كل أداة تأتي من وضعها في المكان الصحيح داخل منظومة القرار.

أما توقعات سوف الجين فتقدم مؤشرًا مهمًا على حساسية الري للاحترار، لكنها تخص منطقة ونموذجًا وسيناريوهات محددة. ويجب عدم تعميم نسبة 23.45% على جميع ليبيا من دون نمذجة مكانية. ومع ذلك، فإن اتجاه الزيادة يتسق مع الأدلة الإقليمية حول ارتفاع PET وانخفاض إتاحة المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا تحت الاحترار، ما يبرر إدماج سيناريوهات المناخ في تصميم شبكات الري الجديدة.

15. القيود العلمية وعدم اليقين

اختلاف تعريف المتغير بين ETo وPET وAETI وETc، واختلاف السطح المرجعي والمعادلات.
اعتماد بعض الدراسات على بيانات شبكية أو إعادة تحليل بدل المحطات الأرضية، وما قد يصاحبها من انحياز محلي.
قلة محطات الأرصاد الزراعية المتكاملة واستمرار الفجوات الزمنية في السجلات.
عدم اليقين في سيناريوهات الانبعاثات والنماذج المناخية، ولا سيما توقعات الأمطار المحلية.
حساسية نتائج CROPWAT لمعاملات المحصول والمطر الفعال وكفاءة الري وتواريخ الزراعة.
حاجة منتجات الاستشعار عن بعد إلى تحقق ميداني في البيئات الصحراوية والحقول الصغيرة والغطاء النباتي المتناثر.
كون الدراسة الحالية مراجعة تحليلية وليست قياسًا حقليًا، ولذلك لا ينبغي استخدامها بدل تصميم ميداني لمشروع ري محدد.

16. الاستنتاجات

1- التبخر–النتح متغير مركزي في الموازنة المائية والزراعة الليبية، ويجب إدراجه في جميع خطط الري وتقييمات الموارد.
2- تتباين ETo السنوية في ليبيا بدرجة كبيرة، من نحو 1680 ملم في الشمال إلى 3529 ملم في أقصى الجنوب.
3- تظهر أجدابيا موسمية واضحة؛ إذ بلغ ETp السنوي 2390.2 ملم، وبلغت الذروة الشهرية 284.9 ملم في يونيو.
4- تشير سيناريوهات سوف الجين إلى احتمال زيادة ETo بحلول 2100 بنحو 13.27% تحت SSP2-4.5 و23.45% تحت SSP5-8.5.
5- معادلة FAO Penman–Monteith هي الأساس المعياري لحساب ETo، لكن فعاليتها المحلية تعتمد على جودة البيانات والمعايرة.
6- يوفر الجمع بين Omu-ET وCROPWAT وGIS وWaPOR إطارًا قويًا للانتقال من التقدير المناخي إلى الرصد وإدارة الري.
7- الهدف الإداري ليس خفض كل التبخر–النتح، بل تقليل التبخر غير المنتج وزيادة إنتاجية النتح والماء المستخدم.

17. التوصيات

1- إنشاء شبكة وطنية مترابطة لمحطات الأرصاد الزراعية تقيس الإشعاع والحرارة والرطوبة والرياح والمطر ورطوبة التربة.
2- تحديث أطلس التبخر–النتح المرجعي في ليبيا بصورة دورية، ونشر البيانات في منصة مفتوحة بصيغ مكانية وجدولية.
3- اعتماد FAO Penman–Monteith كطريقة مرجعية موحدة، مع مقارنة الطرق المبسطة بها وتطوير معاملات تصحيح محلية.

4- دمج تطبيق ETo Libya ونموذج Omu-ET مع قواعد بيانات أحدث ومع واجهات ويب وهواتف ذكية تخدم الإرشاد الزراعي.
5- استخدام CROPWAT ببيانات محلية أو شبكية مصححة، وعدم الاعتماد الآلي على بيانات CLIMWAT الافتراضية دون تحقق.
6- تشغيل WaPOR لرصد AETI وإنتاجية الماء، وربط النتائج بحدود الحقول وأنواع المحاصيل وسجلات الضخ.
7- التوسع في الري بالتنقيط والري تحت السطحي، وتحسين الصيانة والضغط والتجانس، وقياس التصريف فعليًا.
8- تطبيق التغطية وتقليل الحراثة المكشوفة واستخدام مصدات الرياح وتحسين المادة العضوية لخفض التبخر من سطح التربة.
9- إعادة تقييم مواعيد الزراعة والأصناف على أساس ذروة ETo وموجات الحر، وتطوير أصناف متحملة للجفاف والحرارة والملوحة.
10- إجراء تجارب ليزيمترية ودراسات تدفق الطاقة في مناطق الساحل والجبل والواحات وفزان للتحقق من النماذج.
11- إدراج تغير المناخ في تصميم المشروعات الجديدة، واختبار الشبكات تحت سيناريو طلب أعلى بدل الاعتماد على المتوسط التاريخي فقط.
12- تدريب مهندسي الري والمرشدين والمزارعين على تفسير الفرق بين ETo وETc وAETI وربط الأرقام بقرار الري الفعلي.

المراجع

Ajjur, S. B., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Evapotranspiration and water availability response to climate change in the Middle East and North Africa. Climatic Change, 166, Article 28. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03122-z

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). WaPOR data: Remote sensing for water productivity. Retrieved July 16, 2026, from https://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/wapor-data/en

Ikhneifir, A. A., Bubareek, H. M. Y., & Balomi, F. M. H. (2023). Reference evapotranspiration mapping of Libya. Al-Mukhtar Journal of Sciences, 38(2), 201–214. https://doi.org/10.54172/mjsc.v38i2.672

Salama, A. E., & Meftah, M. A. (2024). Effects climatic changes on crops irrigation in future for Libya: A case study of Sofuljeen region. Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences, 9(5), 35–63.

ساسي، حمد محمد أحمد. (2026). تقدير التبخر–النتح الممكن في مدينة أجدابيا للفترة (1991–2021). مجلة العلوم والدراسات الإنسانية، (85). https://doi.org/10.37376/jsh.vi85.7597

Abdulsalam Mohammed Abdulsalam. (2026). Water resources in the Ajilat region and the extent of their exploitation in the western coastal region. Journal of Libyan Academy Bani Walid, 2(1), 18–28. https://doi.org/10.61952/jlabw.v2i1.399

Omran Mansour, & Mohammed Muftah. (2025). Impacts of Feed Nutritional Quality on Growth, Immunity, and Environmental Outcomes of European Seabass (Dicentrarchus labrax). *Journal of Libyan Academy Bani Walid*, *1*(3), 107–115. https://doi.org/10.61952/jlabw.v1i3.184

Fadwa Ibrahim Salem Elagori. (2026). The Relationship between Land Surface Temperature and Soil Moisture in the Ecosystem of the Region – An Applied Study Based on Data from Shahat Station for the Period 1981–2024. *Journal of Libyan Academy Bani Walid*, *2*(1), 961–977. https://doi.org/10.61952/jlabw.v2i1.484

Nada N. Abd El Latief, & Aisha Moftah. (2025). Decolorizing of Malachite Green Dye and Methyl Orange Dye by Adsorption Using Seagrass as Adsorbent Material. *Journal of Libyan Academy Bani Walid*, *1*(3), 134–143. https://doi.org/10.61952/jlabw.v1i3.198

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JLABW** and/or the editor(s). **JLABW** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.