Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (5) (Nov, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 5 نوفمبر 2026
عدد خاص بالمؤتمر العلمي الرابع للعلوم والتقنية
28–29 نوفمبر 2026 مصراتة – ليبيا
إدارة المعاهد العليا – وزارة التعليم التقني

الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة كمدخل لتعزيز كفاءة استخدام المياه وتحقيق الاستدامة الزراعية في المناطق الجافة (دراسة تحليلية استشرافية للحالة الليبية)

عثمان سالم الدخلي[1]، ماجد عياد زائد الزحاف[2]

قسم الإنتاج النباتي، المعهد العالي للتقنية الزراعية بالغيران، طرابلس، ليبيا[1]، قسم الميكنة الزراعية، المعهد العالي للتقنية الزراعية، بالغيران، طرابلس، ليبيا[2].

Smart irrigation powered by renewable energy as an approach to enhancing water use efficiency and achieving agricultural sustainability in arid regions (An analytical and forward-looking study of the Libyan situation)

Othman Salem dakhli[1*],MAJID AYAD ZAED ALZAHAF [2]

Department of Plant Production, Higher Institute of Agricultural Technology in Ghiran, Tripoli, Libya[1], Department of Agricultural Mechanization, Higher Institute of Agricultural Technology, Al-Gheran, Tripoli, Libya [2].

Othman504@yahoo.co.uk.

تاريخ الاستلام: 2026/7/30 تاريخ المراجعة 2026/8/20 تاريخ القبول:2026/8/28- تاريخ النشر: 2026/11/28

الملخص:

تتناول هذه الورقة البحثية إشكالية جوهرية تواجه القطاع الزراعي في ليبيا والمناطق الجافة بصفة عامة، وهي الترابط الحرج بين شح الموارد المائية، ومحدودية الإمدادات الكهربائية التقليدية، والحاجة الملحّة إلى تعزيز الأمن الغذائي في ظل تغيّر المناخ، وتطرح الورقة الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة – بوصفه منظومة متكاملة تجمع بين تقنيات الاستشعار عن بُعد، وإنترنت الأشياء (IoT)، والذكاء الاصطناعي، ومنظومات الضخ الكهروضوئي– كمدخل استراتيجي لتحقيق كفاءة أعلى في استخدام المياه وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري في تشغيل شبكات الري، وتعتمد الدراسة منهجية تحليلية وصفية قائمة على مراجعة الأدبيات العلمية والتقارير المؤسسية الدولية والمحلية، مدعّمة بتحليل إحصائي وصفي للمؤشرات المتاحة حول الإشعاع الشمسي والموارد المائية في ليبيا، إلى جانب تحليل SWOT لفرص وتحديات التطبيق، وتُخصص الورقة قسماً تحليلياً لمشروع النهر الصناعي العظيم بوصفه أكبر منظومة نقل مياه في العالم ومحوراً رئيساً لأي استراتيجية مائية – زراعية في ليبيا، وتستعرض تجارب دولية مقارنة من المغرب والإمارات ومصر وباكستان ومنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، وتخلص الورقة إلى أن ليبيا تمتلك مقومات طبيعية استثنائية – معدلات إشعاع شمسي تتراوح بين 5.4 و8.1 كيلوواط/ساعة/م²/يوم– تؤهلها لتبني الري الذكي الشمسي على نطاق واسع، إلا أن تفعيل هذا المسار يستلزم إصلاحاً مؤسسياً وتشريعياً، وبناء قدرات فنية محلية، وتمويلاً موجهاً، وربط هذه المنظومة بإدارة مستدامة للمياه الجوفية غير المتجددة.

الكلمات المفتاحية: الري الذكي، الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية، الاستدامة الزراعية، النهر الصناعي العظيم، ليبيا، ترابط الماء والطاقة والغذاء.

Abstract: This research paper addresses a fundamental problem facing the agricultural sector in Libya and arid regions in general: the critical interrelationship between water scarcity, limited conventional electricity supplies, and the urgent need to enhance food security in the face of climate change. The paper proposes smart irrigation powered by renewable energy—an integrated system combining remote sensing technologies, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and photovoltaic pumping systems—as a strategic approach to achieving greater water use efficiency and reducing reliance on fossil fuels for operating irrigation networks. The study employs a descriptive analytical methodology based on a review of scientific literature and international and local institutional reports, supported by descriptive statistical analysis of available indicators on solar radiation and water resources in Libya, along with a SWOT analysis of the opportunities and challenges of implementation. The paper dedicates an analytical section to the Great Man-Made River Project, the world's largest water conveyance system and a central pillar of any water-agricultural strategy in Libya. It also reviews comparative international experiences from Morocco, the UAE, Egypt, Pakistan, and the MENA region. The paper concludes that Libya possesses Exceptional natural advantages –

solar irradiance rates ranging from 5.4 to 8.1 kWh/m²/day – make Libya well-suited for large-scale adoption of solar-powered smart irrigation. However, realizing this potential requires institutional and legislative reforms, building local technical capacity, targeted funding, and integrating this system with sustainable management of non-renewable groundwater.

Keywords: Smart irrigation, renewable energy, solar energy, agricultural sustainability, Great Man-Made River, Libya, water-energy-food nexus.

المقدمة

تُعد المياه أحد أكثر الموارد الطبيعية ندرةً وحساسيةً في المناطق الجافة وشبه الجافة التي تمثل نحو 41% من مساحة اليابسة عالمياً، وتؤوي أكثر من ثلث سكان العالم (UNCCD, 2022). وتزداد هذه الإشكالية تعقيداً في دول شمال إفريقيا والشرق الأوسط، حيث يتقاطع الشح المائي الهيكلي مع النمو السكاني المتسارع، والتوسع الزراعي، وتغيّر المناخ، وضعف كفاءة أنظمة الري التقليدية التي لا تزال تستهلك ما يزيد على 70% من الموارد المائية المتاحة في هذه المناطق (منظمة الأغذية والزراعة، 2020). وتحتل ليبيا موقعاً حرجاً ضمن هذه الخارطة، إذ تُصنف من بين أكثر ست دول في العالم تعرضاً لإجهاد مائي (شديد الارتفاع) وفق معهد الموارد العالمية، وتقدَّر حصة الفرد من الموارد المائية المتجددة فيها بنحو 700 متر مكعب سنوياً فقط، وهو رقم أدنى بكثير من عتبة الشح المائي المعترف بها دولياً والبالغة 1700 متر مكعب للفرد سنوياً The Middle East Observer (2024).

في المقابل، تمتلك ليبيا مقومات طبيعية استثنائية في مجال الطاقة المتجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية؛ إذ تتجاوز معدلات الإشعاع الشمسي الأفقي فيها 5.4 كيلوواط/ساعة/م² يومياً على السواحل، لترتفع إلى ما يقارب 8.1 كيلوواط/ساعة/م² يومياً في المناطق الجنوبية الداخلية، مع أكثر من 3200 ساعة سطوع شمسي سنوياً (الهيئة الليبية للطاقات المتجددة، 2024؛ Alnaas & Altraiki, 2025). هذا التناقض الصارخ بين ندرة المياه ووفرة الطاقة الشمسية يجعل من الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة – الذي يدمج تقنيات الاستشعار الدقيق للتربة والمناخ، وخوارزميات الذكاء الاصطناعي في جدولة الري، ومنظومات الضخ الكهروضوئي بديلاً عن المولدات التي تعمل بالديزل– خياراً استراتيجياً لا غنى عنه لتحقيق الأمن المائي والغذائي في آن واحد.

وتنبع أهمية هذه الورقة من كونها تتناول موضوعاً يقع عند تقاطع ثلاثة محاور استراتيجية بالغة الأهمية لمستقبل ليبيا: إدارة الموارد المائية غير المتجددة (وفي مقدمتها مياه الحقب الجوفي المنقولة عبر مشروع النهر الصناعي العظيم)، وتحول قطاع الطاقة نحو مصادر متجددة ومستدامة، وتعزيز القدرة التنافسية للقطاع الزراعي في ظل التغيرات المناخية المتسارعة، وتسعى الدراسة إلى تقديم إطار تحليلي متكامل يجمع بين المراجعة النظرية، والتحليل الكمي الوصفي، والمقارنة الدولية، وصولاً إلى توصيات عملية قابلة للتطبيق في السياق الليبي.



شكل 1: الموقع الجغرافي

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى (REAOL, 2024؛ Alnaas & Altraiki, 2025).

مشكلة الدراسة

تكمن مشكلة الدراسة في التساؤل الرئيس التالي: إلى أي مدى يمكن أن يسهم تبني منظومات الري الذكي المدعومة بالطاقة المتجددة في تعزيز كفاءة استخدام المياه وتحقيق الاستدامة الزراعية في ليبيا، في ظل محدودية الموارد المائية المتجددة، وتذبذب إمدادات الكهرباء التقليدية، وضعف الأطر المؤسسية والتشريعية الداعمة للطاقة المتجددة؟ **ويتفرع عن هذا التساؤل الرئيس عدد من الأسئلة الفرعية:**

1. ما واقع الموارد المائية والزراعية في ليبيا، وما الدور الذي يؤديه مشروع النهر الصناعي العظيم في منظومة الأمن المائي الوطني؟
2. ما القدرات الفنية والاقتصادية لتقنيات الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة، وما مدى ملاءمتها للبيئة الليبية؟
3. ما الدروس المستفادة من التجارب الدولية المقارنة في دول ذات خصائص بيئية ومناخية مشابهة؟

4. ما نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات التي تحيط بتبني هذه المنظومات في ليبيا؟
5. ما ملامح خارطة طريق استراتيجية ممكنة لتعميم هذه التقنيات على المستوى الوطني؟

أهداف الدراسة

1. تحليل واقع الموارد المائية في ليبيا مع التركيز على دور مشروع النهر الصناعي العظيم ومستقبله.
2. تقييم إمكانات الطاقة المتجددة، وبخاصة الطاقة الشمسية، بوصفها رافعة لتشغيل منظومات الري الذكي.
3. استعراض المكونات التقنية لأنظمة الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة (الاستشعار، إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، الضخ الكهروضوئي).
4. مقارنة تجارب دولية رائدة (المغرب، الإمارات، مصر، باكستان) لاستخلاص الدروس القابلة للتطبيق في ليبيا.
5. إجراء تحليل SWOT لفرص وتحديات التبني في السياق الليبي.
6. صياغة توصيات ومسار تنفيذي مرحلي لدعم صناع القرار والباحثين.

أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من طبيعة الموضوع المتعدد الأبعاد الذي يربط بين الأمن المائي والأمن الغذائي وأمن الطاقة ضمن إطار ترابط الماء والطاقة والغذاء (Water-Energy-Food Nexus)، وهو إطار تحليلي متكامل أصبح ركيزة أساسية في أدبيات التنمية المستدامة منذ مؤتمر بون حول الأمن المائي والغذائي والطاقي عام 2011 (Hoff, 2011). كما تنبع أهميتها العملية من ندرة الدراسات الأكاديمية العربية المتخصصة التي تتناول الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة في السياق الليبي تحديداً، رغم الحاجة الملحة لمثل هذه الدراسات في ظل جهود إعادة الإعمار وتنويع الاقتصاد بعيدًا عن الاعتماد شبه الكلي على النفط والغاز.

منهجية الدراسة ومصادر البيانات

تعتمد الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي القائم على المراجعة المنهجية للأدبيات العلمية المحكّمة والتقارير الصادرة عن المؤسسات الدولية (منظمة الأغذية والزراعة، الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، البنك الدولي، وكالة الطاقة الدولية) والمحلية (الهيئة الليبية للطاقات المتجددة، سلطة النهر الصناعي العظيم)، إلى جانب تحليل إحصائي وصفي للمؤشرات الكمية المتاحة حول الإشعاع الشمسي وحصة الفرد من المياه ومعدلات الفاقد المائي، كما تستخدم الدراسة أسلوب تحليل SWOT لتقييم فرص وتحديات التطبيق، وأسلوب المقارنة الدولية (Benchmarking) لاستخلاص أفضل الممارسات من تجارب دول ذات خصائص بيئية مشابهة، وتُقر الدراسة بمحدودية توفر بيانات ميدانية حديثة وموثوقة خاصة بليبيا بسبب الظروف السياسية والأمنية التي مرت بها البلاد خلال العقد الأخير، وهو ما يفرض الاعتماد على تقديرات تقريبية في بعض المؤشرات الكمية مع الإشارة الصريحة إلى ذلك عند الاقتضاء.

الإطار النظري

مدخل ترابط الماء والطاقة والغذاء (WEF Nexus)

يقوم إطار ترابط الماء والطاقة والغذاء على فكرة مؤداها أن هذه الموارد الثلاثة مترابطة بصورة عضوية بحيث لا يمكن معالجة أي منها بمعزل عن الآخرين: فإنتاج الغذاء يتطلب مياه وطاقة، وضخ المياه ومعالجتها يستهلك طاقة، وإنتاج بعض أشكال الطاقة (كالوقود الحيوي والطاقة الكهرومائية) يستهلك مياه (FAO, 2014 ؛Hoff, 2011). ويكتسب هذا الإطار أهمية خاصة في المناطق الجافة حيث تُستخدم كميات كبيرة من الطاقة الأحفورية، غالباً عبر مضخات الديزل– لرفع المياه الجوفية من أعماق كبيرة، مما يخلق حلقة مفرغة من الانبعاثات الكربونية وارتفاع تكاليف الإنتاج الزراعي، ويوفر الري الذكي المدعوم بالطاقة الشمسية مخرجاً من هذه الحلقة عبر إحلال الطاقة النظيفة محل الوقود الأحفوري وترشيد استهلاك المياه في آن واحد، بما يحقق تآزراً إيجابياً (Synergy) بين ضلعي الماء والطاقة دون الإضرار بضلع الغذاء (Yadav et al., 2024).

مفهوم الري الذكي ومكوناته

يُعرَّف الري الذكي بأنه منظومة ري تعتمد على تقنيات الاستشعار الآلي، ومعالجة البيانات، واتخاذ القرار الآلي أو شبه الآلي، لتوصيل الكمية المثلى من المياه إلى النبات في الوقت المناسب، استناداً إلى القياس اللحظي لرطوبة التربة ودرجة الحرارة والرطوبة الجوية والاحتياج المائي الفعلي للمحصول، بدلاً من الاعتماد على جداول ري ثابتة مسبقاً (Daraz et al., 2025).
وتتكون منظومة الري الذكي النموذجية من أربعة مكونات رئيسة متكاملة:

1. **طبقة الاستشعار:** أجهزة استشعار رطوبة التربة والحرارة والرطوبة، ومحطات الأرصاد الجوية الصغيرة، وأجهزة التوتّر الأرضي (Tensiometers) منخفضة التكلفة مثل جهاز WaziSense المطوَّر حديثاً للبيئات شبه الجافة (Ben Abdallah et al., 2026).
2. **طبقة الاتصال ونقل البيانات:** شبكات إنترنت الأشياء (IoT) القائمة على بروتوكولات منخفضة الطاقة مثل LoRa وZigbee وWi−Fi، لنقل البيانات إلى منصات الحوسبة السحابية.

3. **طبقة التحليل واتخاذ القرار:** خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، ونماذج التنبؤ بالطقس والهطول المطري، ومحركات التحسين الفوقي (Metaheuristic Optimization) لجدولة تشغيل المضخات وتقليل التكاليف التشغيلية.
4. **طبقة التنفيذ:** صمامات وأنظمة ري بالتنقيط أو الرش منخفضة الضغط، ومضخات مياه تعمل بالطاقة الكهروضوئية المباشرة أو عبر بطاريات تخزين.

وقد أظهرت دراسات ميدانية حديثة أن دمج هذه الطبقات الأربع يحقق تخفيضاً في استهلاك المياه يصل إلى 30% مقارنة بأساليب الري التقليدية، مع الحفاظ على مستويات رطوبة تربة مثلى تتراوح بين 35% و50%، وبدقة تنبؤ تتجاوز 95% في جدولة الري (منظومة مشروع DARY، ScienceDirect, 2025).



شكل 2: المكونات الأربعة الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى (Daraz et al., 2025؛ Ben Abdallah et al., 2026).

منظومات الضخ الكهروضوئي للمياه (Solar Water Pumping)

تُعد أنظمة الضخ الكهروضوئي (PVWP) العمود الفقري لأي منظومة ري ذكي مدعومة بالطاقة المتجددة في المناطق النائية غير المرتبطة بالشبكة الكهربائية الوطنية، أو تلك التي تعاني من انقطاعات متكررة كما هو الحال في ليبيا، وتعمل هذه الأنظمة إما بالربط المباشر بين الألواح الشمسية والمضخة، أو عبر منظمات شحن وتفريغ الجهد الأقصى (MPPT) التي تحسّن من كفاءة استغلال الطاقة المولّدة، خصوصًا في ظروف الإشعاع المتغير (Kolhe et al., 2004؛ Elgendy et al., 2010). وتشير الدراسات المقارنة إلى أن تكلفة ضخ المتر المكعب الواحد من المياه الجوفية باستخدام الطاقة الشمسية أقل بنسبة تتراوح بين 33% و61% مقارنة بالضخ باستخدام غاز البترول المسال أو الديزل، وهو ما يجعل الجدوى الاقتصادية لهذه الأنظمة إيجابية على المدى المتوسط والطويل رغم ارتفاع كلفة الاستثمار الأولي (دراسة ميدانية في المغرب شملت 112 مزارعاً، Asian Journal of Agriculture and Food Sciences، 2020).

الأدبيات ذات الصلة والفجوة البحثية

تناولت أدبيات غزيرة موضوع الري الذكي والطاقة المتجددة في سياقات دولية متعددة، من باكستان (Daraz et al., 2025) إلى مصر (Abdelhamid et al., 2025) وتونس (Ben Abdallah et al., 2026) والهند ومنطقة راجستان (Frontiers in Sustainable Food Systems, 2026)، كما تناولت دراسات أخرى تجربة النهر الصناعي العظيم من الزاوية الهندسية والسياسية (EPCM Holdings, 2025؛ Middle East Institute, 2025). غير أن مراجعة الأدبيات المتاحة تكشف عن فجوة بحثية واضحة تتمثل في محدودية الدراسات التي تُدمج بين هذين المحورين تحديداً – الري الذكي بالطاقة المتجددة من جهة، والنهر الصناعي العظيم بوصفه مصدر المياه الرئيس من جهة أخرى– ضمن إطار تحليلي واحد يخص الحالة الليبية، وتسعى هذه الورقة إلى سد جزء من هذه الفجوة عبر تقديم تحليل متكامل يربط بين البنية التحتية المائية القائمة والفرص التقنية الحديثة المتاحة لتطوير كفاءة استخدامها.

واقع الموارد المائية في ليبيا: مشروع النهر الصناعي العظيم محوراً تحليلياً

الوضع المائي العام في ليبيا

تفتقر ليبيا إلى أي مجارٍ مائية سطحية دائمة، ولا تتوفر لديها سوى أودية موسمية جافة معظم أيام السنة، مما يجعل المياه الجوفية المصدر شبه الوحيد لتلبية الاحتياجات المنزلية والزراعية والصناعية، حيث تشكل نحو 97% من إجمالي الاستهلاك المائي في البلاد (Springer Nature, 2025). ووفق تصنيف معهد الموارد العالمية، تحتل ليبيا المرتبة السادسة عالمياً من حيث شدة الإجهاد المائي (الأساسي المرتفع جداً)، ويعزى ذلك إلى مناخها القاحل، وارتفاع معدلات التبخر، والنمو السكاني، إلى جانب اعتمادها شبه الكلي على مخزون مائي جوفي أحفوري غير متجدد (Middle East Institute, 2025). ويُقدَّر نصيب الفرد من الموارد المائية المتجددة سنوياً بنحو 700 متر مكعب فقط، مقارنة بعتبة الشح المائي الدولية البالغة 1700 متر مكعب للفرد سنويًا وفق تصنيفات البنك الدولي (The Middle East Observer, 2024).

ويستحوذ القطاع الزراعي على النصيب الأكبر من الاستهلاك المائي في ليبيا، حيث تشير بيانات سلطة النهر الصناعي العظيم (MMRA) إلى أن غالبية المياه المنقولة عبر المشروع تُخصص للأغراض الزراعية والري، يليها الاستخدام المنزلي، ثم الاستخدام الصناعي في المرتبة الأخيرة من حيث الحجم (Osservatorio Strategico Mediterraneo Allargato, 2025). وقد أدى نمط الزراعة المروية المكثفة، إلى جانب ضعف كفاءة أساليب الري التقليدية بالغمر، إلى استنزاف متسارع لطبقات المياه الجوفية الساحلية وتداخل مياه البحر معها في بعض المناطق، وهو ما يفرض تحولاً عاجلاً نحو تقنيات ري أكثر كفاءة في استخدام المياه.

مشروع النهر الصناعي العظيم: النشأة والبنية والوظيفة

يُعد مشروع النهر الصناعي العظيم أضخم شبكة نقل مياه اصطناعية في العالم، وقد وُصف بأنه (أعجوبة العالم الثامنة) وهو يهدف إلى نقل المياه الجوفية العذبة من طبقة الحجر الرملي النوبي الواقعة في الأحواض الجنوبية (الكفرة وسرت) إلى المناطق الساحلية الشمالية الأكثر كثافة سكانية وأنشطة زراعية، عبر شبكة من الأنابيب المدفونة يصل قطرها الداخلي إلى أربعة أمتار، وبطول إجمالي يقارب 4000 إلى 4500 كيلومتر عند اكتمال جميع مراحله (EPCM Holdings, 2025؛ The Middle East Observer, 2024). وقد اكتملت المرحلتان الأولى والثانية من المشروع في عامي 1991 و1996 على التوالي، فيما لا تزال المراحل اللاحقة (الثالثة والرابعة والخامسة) في طور الإنجاز الجزئي، إذ تشير التقديرات المتاحة حتى مطلع عام 2025 إلى أن نحو ثلاثة أخماس المشروع فقط باتت مكتملة وقيد التشغيل الفعلي (Osservatorio Strategico Mediterraneo Allargato, 2025).



شكل 3: مسار شبكة مشروع النهر الصناعي من الحقول الجنوبية إلي المناطق الساحلية

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى (EPCM Holdings, 2025؛ Middle East Institute, 2025).

وتُقدَّر التكلفة الإجمالية للمشروع منذ انطلاقه بما يتراوح بين 7 و25 مليار دولار أمريكي بحسب المصادر ومراحل التقييم المختلفة، ويوفر المشروع في وضعه الحالي أكثر من 70% من إمدادات المياه العذبة في المناطق الحضرية الليبية (The Middle East Observer, 2024؛ Construction Review Online, 2024). وتكمن أهمية هذا المشروع الاستراتيجية في كونه لا يمثل مجرد بنية تحتية هندسية، بل يشكل – بحسب مختصين محليين– (رمزاً للصمود) ومدخلاً للتنمية الزراعية والاقتصادية طويلة الأمد، شريطة استكمال المراحل المتبقية وتأمين التمويل والصيانة اللازمين (The Middle East Observer, 2024).

التحديات التي تواجه استدامة النهر الصناعي العظيم

1. **النضوب طويل الأمد:** تُصنَّف مياه الحقب الجوفي النوبي بأنها مياه أحفورية غير متجددة، بمعنى أن معدلات استخراجها الحالية تفوق بكثير معدلات تغذيتها الطبيعية، مما يجعل استدامة المشروع على المدى الجيولوجي البعيد (قرون) موضع تساؤل علمي جاد. (Construction Review Online, 2024).
2. **فاقد المياه:** تشير التقديرات الهندسية إلى أن فاقد التبخر من الخزانات المكشوفة قد يصل إلى نحو 35% في حال عدم استخدام مثبطات تبخر أو ألواح شمسية عائمة، فيما قد يتجاوز الفاقد عبر شبكات التوزيع البلدية 20% نتيجة تقادم البنية التحتية. (EPCM Holdings, 2025).
3. **عدم الاستقرار السياسي والأمني:** أدت سنوات النزاع منذ 2011 إلى تعطّل أعمال الصيانة والتوسع في بعض المراحل، وتعرّض أجزاء من الشبكة لأضرار مباشرة أو غير مباشرة.
4. **غياب مصادر مائية بديلة كافية:** لا تزال محطات تحلية مياه البحر ومعالجة المياه العادمة لإعادة الاستخدام الزراعي تعمل بطاقة محدودة مقارنة بحجم الاعتماد على مياه النهر الصناعي، رغم أن كليهما يمثل مكملاً ضرورياً وليس بديلاً كاملاً (Middle East Institute, 2025).

لماذا يمثل الري الذكي مكملاً ضرورياً للنهر الصناعي العظيم

بالنظر إلى الطبيعة غير المتجددة لمياه النهر الصناعي العظيم، فإن أي استراتيجية للأمن المائي الليبي طويل الأمد يجب أن تنطلق من مبدأ (ترشيد الاستخدام قبل التوسع في الاستخراج)، وهنا يبرز الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة كأداة تكاملية وليست بديلة لمشروع النهر الصناعي العظيم، إذ يمكن لتقنيات الاستشعار وجدولة الري الدقيقة أن تقلص كميات المياه المستهلكة في القطاع الزراعي – وهو المستهلك الأكبر لمياه المشروع – بنسب تتراوح بين 20% و40% دون أي تأثير سلبي على الإنتاجية الزراعية، بل مع تحسّنها في كثير من الحالات المدروسة (Daraz et al., 2025؛ ScienceDirect DARY Project, 2025). وبعبارة أخرى، فإن كل متر مكعب من المياه يتم توفيره عبر الري الذكي هو إطالة فعلية لعمر مخزون الحقب الجوفي النوبي وتأجيل لحظة نضوبه المحتملة.

واقع الطاقة المتجددة في ليبيا

مؤشرات الإشعاع الشمسي

تُصنَّف ليبيا من بين أفضل دول العالم من حيث معدلات الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي (GHI)، حيث تتراوح المعدلات طويلة الأمد (1994–2018) بين 5.4 و7.0 كيلوواط/ساعة/م² يومياً، مع ارتفاع ملحوظ في المناطق الداخلية والجنوبية نتيجة قلة الغطاء السحابي (ScienceDirect, 2026). (وتشير بيانات الهيئة الليبية للطاقات المتجددة) إلى أن معدل الإشعاع الشمسي في المناطق الساحلية يبلغ نحو 7.1 كيلوواط/ساعة/م² يومياً، ليصل إلى 8.1 كيلوواط/ساعة/م² يومياً في المناطق الجنوبية، إلى جانب سرعات رياح مناسبة تصل إلى 6.5 متر/ثانية في بعض المواقع المؤهلة لمشاريع طاقة الرياح (REAOL, 2024). وتُظهر دراسة حديثة شملت 23 منطقة حضرية ليبية أن مناطق الكفرة ومرزق وغات في الجنوب تسجل أعلى معدلات إشعاع شمسي على مستوى البلاد، ما يرشحها لتكون مواقع مثالية لمشاريع الطاقة الشمسية واسعة النطاق (Alnaas & Altraiki, 2025).

ويلاحظ أن الأرقام المنشورة تختلف باختلاف الفترة الزمنية والمنهج والمنطقة المقاسة، لذا تعتمد هذه الورقة على مدى الإشعاع الأفقي الكلي (GHI) في جميع المقارنات، وتعرض الجدول (1) القيم حسب المنطقة، ولا تعتمد الورقة على تقديرات إجمالية للطاقة الكهربائية القابلة للتوليد على مستوى البلاد، لأن الأرقام المتداولة في هذا الشأن تعتبر عن الإشعاع الساقط نظرياً على المساحة الكلية للدولة، ولا تعكس القابل للتوليد الفعلي بعد احتساب الكفاءة والفاقد والقيود المكانية.



شكل 4: الأهداف الوطنية للطاقة المتجددة في ليبيا (2013–2035)

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى (IEA, 2023؛ REAOL, 2024).

الأطر الاستراتيجية والسياسية

أطلقت الحكومة الليبية عام 2013 (الخطة الاستراتيجية للطاقة المتجددة 2013–2025) التي استهدفت رفع مساهمة الطاقة المتجددة إلى 7% من مزيج الكهرباء بحلول 2020 و10% بحلول 2025، موزعة بين طاقة الرياح (1000 ميجاواط)، والطاقة الشمسية المركزة (400 ميجاواط)، والخلايا الكهروضوئية (800 ميجاواط)، وتسخين المياه بالطاقة الشمسية (450 ميجاواط) (IEA, 2023؛ PVKnowHow, 2025). غير أن عدم الاستقرار السياسي والصراع المسلح حال دون تنفيذ هذه الخطة على أرض الواقع (ScienceDirect, 2021)، إذ لا تتجاوز مساهمة الطاقة المتجددة الفعلية في مزيج الطاقة الليبي حاليًا نسبة 3% وفق تقديرات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) (The Energy Pioneer, 2026). وفي محاولة لتصحيح المسار، أطلقت الهيئة الليبية للطاقات المتجددة (الاستراتيجية الوطنية لكفاءة الطاقة والطاقة المتجددة 2023–2035) التي تستهدف رفع حصة الطاقة المتجددة إلى 17% بحلول 2025 و20% بحلول 2035، مع خطط لتطوير مشاريع كبرى من بينها محطة سعة 500 ميجاواط في منطقة سدادة (REAOL, 2024؛ Middle East Journal of Pure and Applied Sciences, 2026).

واقع التنفيذ والفجوة بين الطموح والتطبيق

رغم وفرة الموارد الشمسية وامتلاك ليبيا لواحدة من أفضل البيئات الاستثمارية الطبيعية للطاقة الشمسية عالمياً، لا يزال الاستخدام الفعلي لهذه التقنيات محدوداً إلى حد كبير في المؤسسات الحكومية والمنشآت التجارية الخاصة، وشريحة ضيقة من الأسر الميسورة، وذلك بسبب ارتفاع تكلفة التركيب الأولية وغياب آليات تمويل ميسّرة (The Energy Pioneer, 2026). ومن أبرز المشاريع القائمة محطة الطاقة الشمسية جنوب مدينة سبها بقدرة 20 ميجاواط التي دُشنت عام 2013

(The Energy Pioneer, 2026). وتكشف هذه الفجوة بين الإمكانات الفنية الهائلة والتطبيق الفعلي المحدود عن حاجة ماسة إلى إصلاح تشريعي ومؤسسي يشمل تسهيل تراخيص الربط بالشبكة، وتوفير حوافز ضريبية وتمويلية، وبناء قدرات فنية وطنية متخصصة في تركيب وصيانة هذه الأنظمة – وهي جميعها عوامل تمهيدية ضرورية قبل أي توسع في تطبيقات الري الذكي الشمسي على نطاق وطني.

جدول 1: مؤشرات الإشعاع الشمسي في ليبيا حسب المنطقة

المنطقة	معدل الإشعاع الشمسي (كيلوواط/ساعة/م²/يوم)	ملاحظات
المناطق الساحلية (طرابلس، بنغازي)	5.4 – 7.1	كثافة سكانية وزراعية عالية، أقرب إلى مراكز الاستهلاك.
المناطق الداخلية والجنوبية (سبها، الكفرة، مرزق، غات)	7.0 – 8.1	أعلى معدلات إشعاع على المستوى الوطني، ملائمة للمزارع الشمسية الكبرى.
المعدل الوطني العام	5.4 – 7.0 طويل الأمد (1994–2018)	من بين أفضل 10 دول عالمياً من حيث الإشعاع الأفقي الكلي.
ساعات السطوع الشمسي السنوية	أكثر من 3200 ساعة/سنة	يفوق المعدل العالمي بصورة ملحوظة.

المصدر: إعداد الباحث اعتماداً على (REAOL, 2024؛ ScienceDirect, 2026؛ The Energy Pioneer, 2026؛ Alnaas & Altraiki, 2025).

البنية التقنية لمنظومات الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة وآليات عملها

المكونات الفنية التفصيلية

تتشكل المنظومة المتكاملة للري الذكي الشمسي من مجموعة عناصر هندسية وبرمجية متفاعلة، **يمكن تفصيلها على النحو التالي:**

وحدة التوليد الكهروضوئي

تتكون من ألواح شمسية بلورية (Mono/Poly-crystalline) بقدرات تتراوح عادة بين 200 و300 واط للوحة الواحدة، مع خصائص كهربائية نموذجية تشمل جهد دائرة مفتوحة يقارب 37.5 فولت وتيار دائرة قصر يبلغ نحو 8.5 أمبير لكل وحدة (Frontiers in Sustainable Food Systems, 2026). وتفقد هذه الألواح نحو 0.5% من كفاءتها مقابل كل درجة مئوية ترتفع بها حرارة الخلية فوق 25 درجة مئوية، وهو عامل حرج في بيئة ليبيا شديدة الحرارة صيفاً، مما يستوجب تصميماً هندسياً يراعي التهوية وزوايا التركيب المثلى (Middle East Journal of Pure and Applied Sciences, 2026). كما يؤدي تراكم الغبار على الألواح، وهو سمة شاسعة في البيانات الصحراوية، إلى خفض إضافي في الكفاءة يستلزم برامج تنظيف دورية.

وحدة الضخ والتحكم

تشمل منظمات الشحن التي تعمل وفق تقنية تتبع نقطة الاستطاعة القصوى (MPPT) لضمان أقصى استفادة من الطاقة المولدة تحت ظروف الإشعاع المتغيرة، ومضخات غاطسة أو سطحية تعمل بالتيار المستمر أو المتردد حسب حجم المشروع، مع إمكانية إضافة بطاريات تخزين أو خزانات مياه مرتفعة (Gravity Tanks) لضمان استمرارية الري خلال ساعات انعدام الإشعاع الشمسي.

وحدة الاستشعار وجمع البيانات

تضم حساسات رطوبة التربة على أعماق متعددة، وحساسات درجة حرارة ورطوبة الهواء، ومحطات أرصاد جوية مصغّرة، وأجهزة استشعار توتر أرضي منخفضة التكلفة مثل جهاز WaziSense الذي أثبت فعاليته الميدانية في البيئات شبه الجافة بتكلفة تركيب منخفضة نسبياً تلائم صغار المزارعين. (Ben Abdallah et al., 2026).

وحدة التحليل الذكي واتخاذ القرار

تستخدم خوارزميات التعلم الآلي ونماذج تحسين فوقية (مثل خوارزمية تحسين توازن المياه WBO) لجدولة تشغيل المضخات بما يقلل التشغيل الزائد ويخفض تكاليف الطاقة، وهو نهج أثبت جدواه في دراسات مماثلة لجدولة الطاقة العشوائية في الشبكات الصغرى الريفية ذات أحمال الري (Frontiers in Sustainable Food System s, 2026؛ Li et al., 2024).

نتائج الأداء الميداني الموثقة في الأدبيات

- انخفاض استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 30% مقارنة بالري التقليدي، مع الحفاظ على رطوبة تربة مثلى بين 35% و50% (ScienceDirect DARY Project, 2025).
- استهلاك طاقة منخفض جداً يبلغ في المتوسط نحو 13 واطاً فقط للمعالجة والتحكم في بعض التطبيقات التجريبية، مع دقة تنبؤ برطوبة التربة تفوق 95% (ScienceDirect DARY Project, 2025).
- ارتفاع الإنتاجية الزراعية من 3.0 إلى 4.8 طن/هكتار في تجربة ميدانية شملت 384 مزارعاً في صحراء تشوليستان الباكستانية بعد تبني الري الذكي الشمسي (Daraz et al., 2025).
- خفض استهلاك طاقة الضخ بنسبة تصل إلى 50% عبر أنظمة الري بالتنقيط فائقة الانخفاض في الضغط (ULED) التي طورها المركز الدولي للبحوث الزراعية في المناطق الجافة (ICARDA) واختُبرت ميدانياً في المغرب والأردن والإمارات والكويت وقطر (ICARDA, 2021, 2024).
- خفض ذروة الطلب على الطاقة الكهربائية بنسبة تقارب 40% في مجتمعات ري تقليدية غير مزوّدة بحساسات نتيجة تحسين إدارة استهلاك المياه في ظل ظروف الجفاف (ScienceDirect, 2025).

المحاصيل الاستراتيجية الملائمة للتطبيق في السياق الليبي

تشير تجارب دول الخليج المجاورة بيئياً لليبيا، وعلى رأسها الإمارات، إلى أن أشجار النخيل – وهي من أهم المحاصيل الاستراتيجية في الواحات والمناطق الجنوبية الليبية – تُزرع بصورة متزايدة باستخدام أنظمة الري بالتنقيط المقترنة بمراقبة رطوبة التربة عبر منصات ذكية (Medium/Nahvi, 2026)، وهو نموذج قابل للتكييف المباشر مع واحات الكفرة والجفرة وسبها، كما تُظهر التجارب الدولية أن المحاصيل الحقلية الاستراتيجية كالقمح والشعير، إلى جانب الزراعات المحمية للخضروات، تستفيد بصورة كبيرة من دمج الري بالتنقيط والتسميد المائي (Fertigation) مع التحكم المناخي داخل الصوبات الزراعية على غرار التجارب الرائدة في هولندا وإسبانيا وإسرائيل (Medium/Nahvi, 2026)، وهو نمط يمكن تبنيه تدريجياً في المشاريع الزراعية الساحلية الليبية.

تجارب دولية مقارنة في الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة

تجربة المغرب

تُعد المغرب من الدول الرائدة إقليمياً في تبني أنظمة الضخ الكهروضوئي للمياه الزراعية، حيث تشير مسوح ميدانية شملت 112 مزارعاً في منطقتي سيدي العايدي والفقيه بن صالح إلى أن ضخ المتر المكعب الواحد من المياه الجوفية بالطاقة الشمسية أرخص بنسبة 33.3% في المنطقة الأولى و60.6% في المنطقة الثانية مقارنة بالضخ بغاز البترول المسال، مع قيمة حالية صافية إيجابية تؤكد الجدوى الاقتصادية للاستثمار (Asian Journal of Agriculture and Food Sciences, 2020). كما اعتمدت السياسة المغربية آلية دعم مشروط تربط الحصول على إعانات الطاقة الشمسية بشراء أنظمة ري دقيق (بالتنقيط)، بما يضمن ألا يؤدي انخفاض تكلفة الطاقة إلى الإفراط في ضخ المياه واستنزاف الخزان الجوفي (Frontiers in Water, 2026؛ Kingdom of Morocco, 2014)، وهو درس سياساتي بالغ الأهمية لأي تجربة ليبية مماثلة.

تجربة الإمارات العربية المتحدة

تمثل دبي والإمارات عموماً حالة اختبار متقدمة للري الذكي في البيئة الصحراوية القاحلة، حيث تُستخدم أنظمة الري بالتنقيط المقترنة بالتسميد المائي ومراقبة رطوبة التربة عبر حساسات دقيقة لزراعة النخيل، بينما تعتمد بلدية دبي حساسات رطوبة تربة ومحطات أرصاد جوية لإدارة ري الحدائق والمساحات الخضراء العامة في المدينة (Medium/Nahvi, 2026). وتوضح هذه التجربة أن الري الذكي ليس مقتصراً على القطاع الزراعي التجاري فحسب، بل يمتد إلى إدارة المساحات الخضراء الحضرية، وهو نموذج قابل للتكرار في المدن الليبية الساحلية ضمن استراتيجيات التشجير الحضري المستدام.

تجربة مصر

طوّر باحثون مصريون بالتعاون مع مؤسسات صينية نظام ري ذكي يعمل بالطاقة الشمسية للزراعة الحضرية على أسطح المباني، بهدف معالجة نقص المساحات الخضراء وندرة المياه في البيئات الحضرية سريعة النمو (Abdelhamid et al., 2025). وهو نموذج ذو صلة مباشرة بالمدن الليبية الكبرى كطرابلس وبنغازي التي تواجه ضغطًا متزايدًا على مساحاتها الخضراء المتاحة.

تجربة باكستان: صحراء تشوليستان

في بيئة صحراوية قاسية تُعد من أشد المناطق جفافاً في جنوب آسيا، أظهرت دراسة مسحية شملت 384 مزارعًا في صحراء تشوليستان الباكستانية – حيث تسهم الزراعة بنحو 19% من الناتج المحلي الإجمالي وتوظف 40% من القوى العاملة – أن تبني الري الذكي الشمسي أدى إلى ارتفاع الإنتاجية الزراعية من 3.0 إلى 4.8 طن للهكتار الواحد، إلى جانب تحسّن ملموس في كفاءة استخدام المياه والطاقة وانخفاض الأثر البيئي والتكاليف التشغيلية، مما دفع الباحثين إلى التوصية بحوافز مالية حكومية واستثمار في البنية التحتية للطاقة المتجددة وبرامج تدريبية للمزارعين (Daraz et al., 2025).

مبادرة إقليمية: الري بالتنقيط فائق الانخفاض في الضغط (ICARDA)

طوّر المركز الدولي للبحوث الزراعية في المناطق الجافة (ICARDA) بالتعاون مع معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا تقنية ري بالتنقيط تعمل بضغط منخفض للغاية (ULED)، صُممت خصيصًا لمنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا بهدف خفض طاقة الضخ بنسبة 50%، وتمكين العمل على ضغط مياه بلدية منخفض، وتسهيل انتشار حلول الري بالتنقيط العاملة بالطاقة الشمسية منخفضة التكلفة، وقد جرى اختبار هذه التقنية ميدانيًا في المغرب والأردن، ومقارنتها بأنظمة الري التقليدية (كنظام الفقاعة Bubbler) في الإمارات والكويت وقطر خلال عامي 2021 و2022، حيث أثبتت كفاءة عالية في استخدام المياه بأقل استهلاك ممكن للطاقة (ICARDA, 2021, 2024). ويمثل هذا البرنامج الإقليمي منصة تعاون مباشرة يمكن لليبيا الانضمام إليها للاستفادة من التقنيات المختبرة والمكيّفة أصلاً مع الظروف المناخية والمائية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.

جدول 2: مقارنة التجارب الدولية في الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة

الدولة/التجربة	التقنية المعتمدة	أبرز النتائج	الدرس المستفاد لليبيا
المغرب	ضخ كهروضوئي مقترن بدعم مشروط بالري بالتنقيط.	خفض تكلفة ضخ المياه 33%–61%	ربط حوافز الطاقة الشمسية بإلزامية الري الدقيق لمنع استنزاف الخزان الجوفي.
الإمارات	ري بالتنقيط ذكي للنخيل والمساحات الحضرية الخضراء.	إدارة متكاملة للمياه الزراعية والحضرية.	تعميم النموذج على واحات النخيل الجنوبية والتشجير الحضري الساحلي.
مصر	زراعة سطحية حضرية بري شمسي ذكي.	معالجة ندرة المساحات الخضراء الحضرية.	تطبيق مشابه فى المدن الليبية الكبرى ذات الكثافة السكانية العالية.
باكستان (تشوليستان)	ري شمسي ذكي فى بيئة صحراوية قاسية.	ارتفاع الإنتاجية من 3.0 إلى 4.8 طن/هكتار.	جدوى التطبيق فى المناطق الصحراوية الجنوبية الليبية المماثلة مناخياً.
إقليمي(ICARDA)	ري بالتنقيط فائق الانخفاض بالضغط.(ULED)	خفض طاقة الضخ 50%	الانضمام إلى شبكة التعاون الإقليمى والاستفادة من تقنيات مكيّفة مع بيئة الشرق الأوسط.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على المصادر المذكورة أعلاه.

تحليل SWOT لتبني الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة في ليبيا

يقدّم هذا القسم تحليلاً منهجياً لنقاط القوة والضعف الداخلية، والفرص والتهديدات الخارجية المحيطة بتبني منظومات الري الذكي الشمسي في السياق الليبي، استناداً إلى المعطيات الواردة في الأقسام السابقة، ويعرض الشكل (5) الإطار المفاهيمي للأثار المتوقعة.

جدول 3: مصفوفة SWOT الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة في ليبيا

المحور	العناصر الرئيسية
نقاط القوة(Strengths)	• معدلات إشعاع شمسي استثنائية (5.4–8.1 كيلوواط/ساعة/م²/يوم) وأكثر من 3200 ساعة سطوع سنويًا. • بنية تحتية مائية قائمة ممثلة بمشروع النهر الصناعي العظيم يمكن البناء عليها. مساحات صحراوية شاسعة صالحة لإقامة مزارع شمسية كبرى دون منافسة على الأراضي الزراعية. • وجود أطر استراتيجية وطنية معلنة (2013 – 2025 و2023 – 2035) توفر أساساً سياسياً يمكن البناء عليه.
نقاط الضعف(Weaknesses)	• ضعف التنفيذ الفعلي للاستراتيجيات المعلنة، إذ لا تتجاوز مساهمة الطاقة المتجددة الفعلية 3% من المزيج الكهربائي. • محدودية القدرات الفنية الوطنية المتخصصة في تركيب وصيانة أنظمة الري الذكي والطاقة الشمسية. • ارتفاع تكلفة الاستثمار الأولي وغياب آليات تمويل ميسّرة لصغار المزارعين. • اعتماد شبه كلي على مياه جوفية أحفورية غير متجددة كمصدر رئيس للري.
الفرص(Opportunities)	• انخفاض متسارع عالمياً في تكاليف الألواح الشمسية وأنظمة الاستشعار وإنترنت الأشياء. • وجود شبكات تعاون إقليمي جاهزة (مثل ICARDA) يمكن الانضمام إليها للاستفادة من تقنيات مكيفة إقليمياً. • إمكانية جذب تمويل مناخي دولي (صناديق المناخ الأخضر، مؤسسات التمويل التنموي) بوصف المشروع مساهماً في التكيف مع تغير المناخ. • فرصة لتنويع الاقتصاد الليبي بعيداً عن الاعتماد الكلي على النفط والغاز عبر قطاع زراعي – طاقي مستدام.
التهديدات(Threats)	• استمرار عدم الاستقرار السياسي والأمني وتأثيره على الاستثمار طويل الأمد والصيانة. • تسارع وتيرة تغير المناخ وارتفاع درجات الحرارة الذي قد يفوق قدرة التكيف التقنية الحالية.

	• مخاطر استنزاف إضافي للخزان الجوفي في حال لم تقترن كفاءة الطاقة بترشيد فعلي لاستهلاك المياه. • منافسة إقليمية متسارعة على الاستثمارات والخبرات الفنية في مجال الطاقة المتجددة من دول الجوار.

المصدر: إعداد الباحث استنادًا إلى التحليل المقدَّم في الأقسام 3 و4 و6 من هذه الورقة.



شكل 5: الإطار المفاهيمي للأثار الاقتصادية والبيئية والاجتماعية للري الذكي الشمسي

المصدر: إعداد الباحث

الأثر الاقتصادي والبيئي والاجتماعي المتوقع

الأثر الاقتصادي

يُتوقع أن يحقق التوسع في الري الذكي الشمسي وفورات مباشرة في تكاليف الطاقة التشغيلية للمزارعين، بالنظر إلى أن تكلفة ضخ المتر المكعب بالطاقة الشمسية أقل بنسبة تتراوح بين 33% و61% مقارنة بالوقود الأحفوري وفق التجربة المغربية المقارنة (Asian Journal of Agriculture and Food Sciences, 2020). إلى جانب تحسّن الإنتاجية الزراعية الذي وثّقته التجربة الباكستانية بارتفاع يصل إلى 60% في غلة الهكتار الواحد (Daraz et al., 2025). كما يسهم ترشيد استهلاك المياه في تمديد العمر الافتراضي لمخزون الحقب الجوفي النوبي، وهو ما يحمل قيمة اقتصادية غير مباشرة هائلة باعتباره أصلاً وطنياً استراتيجياً غير متجدد.

الأثر البيئي

يحقق إحلال الطاقة الشمسية محل مولدات الديزل في تشغيل مضخات الري خفضاً مباشراً في الانبعاثات الكربونية وملوثات الهواء المحلية، فضلاً عن تقليص معدلات استنزاف المياه الجوفية غير المتجددة والحد من مخاطر تداخل مياه البحر مع الخزانات الساحلية، كما يمكن لاستخدام الألواح الشمسية العائمة فوق خزانات النهر الصناعي العظيم أن يقلص فاقد التبخر بنسبة تصل إلى 35%، مع تحقيق فائدة إضافية تتمثل في توليد كهرباء نظيفة من المساحة ذاتها (EPCM Holdings, 2025)، وهو ما يمثل نموذجاً مزدوج العائد يستحق دراسات جدوى تفصيلية لتطبيقه على خزانات المشروع الرئيسة.

الأثر الاجتماعي

يسهم تمكين المزارعين من الوصول إلى طاقة نظيفة وموثوقة في تحسين استقرار الدخل الزراعي والحد من الهجرة من الأرياف إلى المدن، كما تشير الأدبيات إلى أن تعزيز الوصول إلى المياه عبر حلول مستدامة يحسّن الصحة العامة والإنتاجية والاستقرار الاجتماعي عمومًا في المجتمعات الريفية (Sharma et al., 2025؛ Frontiers in Water, 2026). ويمكن لهذه المشاريع أيضاً أن تخلق فرص عمل جديدة في مجالات التركيب والصيانة والدعم الفني، بما يسهم في تنويع سوق العمل الليبي بعيداً عن الاعتماد الكلي على القطاع النفطي.

التحديات والمعوقات الرئيسة أمام التبني الواسع

1. **التحدي المؤسسي والتشريعي:** غياب أطر تنظيمية واضحة لربط أنظمة الطاقة الشمسية الزراعية بالشبكة الوطنية، وضعف آليات إنفاذ الاستراتيجيات المعلنة رغم وجودها على الورق (ScienceDirect, 2021؛ REAOL, 2024).
2. **التحدي التمويلي:** ارتفاع تكلفة الاستثمار الأولي في الألواح الشمسية وأنظمة الاستشعار والمضخات، وغياب قروض ميسّرة أو برامج دعم موجهة لصغار ومتوسطي المزارعين.
3. **التحدي الفني والمعرفي:** محدودية الكفاءات الوطنية المتخصصة في هندسة الأنظمة الكهروضوئية الزراعية وبرمجيات إنترنت الأشياء، وضعف برامج التدريب والإرشاد الزراعي الموجهة لهذه التقنيات.
4. **تحدي البنية التحتية للاتصالات:** تفاوت جودة تغطية الإنترنت وشبكات الاتصال في المناطق الزراعية النائية، وهو ما يؤثر مباشرة على موثوقية أنظمة إنترنت الأشياء القائمة على النقل السحابي للبيانات.
5. **تحدي الحوكمة المائية:** خطر أن يؤدي انخفاض تكلفة الطاقة عبر التحول الشمسي إلى تحفيز مفارقة زيادة الاستخراج بدلًا من ترشيده (لعنة الري الشمسي) ما لم تقترن هذه التقنيات بسياسات صارمة لإدارة الطلب على المياه، وهي مفارقة وثّقتها دراسات حديثة في أحواض مائية هشة مشابهة (Frontiers in Water, 2026).

6. **عدم الاستقرار السياسي والأمني:** استمرار الانقسام المؤسسي وتأثيره السلبي على استمرارية المشاريع الكبرى وجذب الاستثمار الأجنبي المباشر في قطاعي الطاقة والزراعة.

رؤية استراتيجية ومسار تنفيذي مرحلي (2026–2035)

استنادًا إلى التحليل السابق والتجارب الدولية المقارنة، تقترح الورقة مساراً تنفيذياً من ثلاث مراحل متدرجة لتعميم الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة في ليبيا، بما يراعي محدودية الموارد المالية والفنية الحالية وضرورة البدء بمشاريع رائدة قابلة للقياس والتوسع.

جدول 4: المسار التنفيذي المرحلي للري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة (2026 – 2035)

المرحلة	الإطار الزمني	المحاور الرئيسة	المستهدفات المؤشرة
المرحلة الأولى: التأسيس والتجريب	2026–2028	إصلاح تشريعي لربط الشبكة، مشاريع ريادياً فى واحات الكفرة وسبها والجفرة، بناء قدرات فنية أولية بالشراكة مع ICARDA ومؤسسات دولية.	10–15 مشروعاً ريدياً مموّلاً، تدريب أول دفعة من الفنيين المحليين.
المرحلة الثانية: التوسع الموجَّه	2029–2032	توسيع التمويل الميسّر لصغار المزارعين، ربط الري الذكى بخطة إدارة الطلب على مياه النهر الصناعى العظيم، تجربة الألواح الشمسية العائمة على خزانات مختارة.	خفض استهلاك المياه الزراعية 15%–20% فى مناطق التجربة، رفع حصة الطاقة المتجددة في الري إلى 25%
المرحلة الثالثة: التعميم الوطني	2033–2035	تعميم النموذج على مستوى وطنى، دمج البيانات ضمن منصة وطنية لإدارة الموارد المائية والزراعية، مراجعة استراتيجية شاملة لمواءمة أهداف 2035.	بلوغ نسبة 20% من الطاقة المتجددة فى المزيج الوطنى (متسق مع استراتيجية 2023–2035)، وخفض تراكمى بنسبة 30% فى استهلاك المياه الزراعية بالمناطق المستهدفة.

المصدر: تصور مقترح من إعداد الباحث بناءً على تحليل الفجوات والتجارب الدولية الواردة في هذه الورقة.

التوصيات

توصيات على المستوى المؤسسي والتشريعي

1. سنّ تشريعات واضحة لتنظيم الربط الشبكي لأنظمة الطاقة الشمسية الزراعية (Net Metering) وتبسيط إجراءات التراخيص.
2. تفعيل آليات إنفاذ فعلية للاستراتيجية الوطنية لكفاءة الطاقة والطاقة المتجددة 2023–2035 بمؤشرات أداء قابلة للقياس والمساءلة (REAOL, 2024).
3. إنشاء وحدة تنسيق وطنية مشتركة بين سلطة النهر الصناعي العظيم والهيئة الليبية للطاقات المتجددة ووزارة الزراعة لضمان تكامل السياسات المائية والطاقية والزراعية.

توصيات على المستوى التمويلي

1. إطلاق برامج قروض ميسّرة وصناديق دعم موجهة لصغار ومتوسطي المزارعين لتغطية تكلفة الاستثمار الأولي في أنظمة الري الذكي الشمسي.
2. السعي للحصول على تمويل مناخي دولي من صناديق مثل الصندوق الأخضر للمناخ بوصف هذه المشاريع مساهمة مباشرة في التكيف مع تغير المناخ.
3. تشجيع نماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص لتمويل المشاريع الريادية الكبرى، خصوصاً مشاريع الألواح الشمسية العائمة على خزانات النهر الصناعي العظيم.

توصيات على المستوى الفني والتقني

1. إطلاق برامج تدريب وطنية متخصصة في هندسة الأنظمة الكهروضوئية الزراعية وإنترنت الأشياء بالشراكة مع جامعات ومراكز بحثية محلية ودولية.
2. الانضمام إلى شبكات التعاون الإقليمي القائمة (مثل ICARDA) للاستفادة من تقنيات الري بالتنقيط فائقة الانخفاض في الضغط المكيّفة أصلاً مع بيئة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.
3. البدء بمشاريع ريادية محدودة النطاق في واحات الكفرة وسبها والجفرة كنماذج قابلة للقياس قبل التوسع الوطني.

توصيات على مستوى إدارة الطلب على المياه

1. ربط أي توسع في الري الشمسي بسياسات صارمة لإدارة الطلب على المياه لتفادي مفارقة زيادة الاستخراج نتيجة انخفاض تكلفة الطاقة (Frontiers in Water, 2026).
2. إجراء دراسة جدوى تفصيلية لتركيب ألواح شمسية عائمة فوق خزانات مختارة من مشروع النهر الصناعي العظيم للحد من فاقد التبخر وتوليد طاقة نظيفة في آن واحد (EPCM Holdings, 2025).
3. الاستثمار الموازي في مصادر مياه بديلة (تحلية مياه البحر بالطاقة الشمسية، إعادة استخدام المياه المعالجة زراعياً) لتخفيف الضغط على الخزان الجوفي غير المتجدد.

محددات الدراسة وآفاق البحث المستقبلي

أولاً: ندرة البيانات الميدانية المحلية الحديثة والموثقة رسمياً حول الأداء الفعلي لمشاريع الري الذكي في ليبيا تحديداً، بسبب الظروف السياسية والأمنية التي حالت دون إجراء مسوح ميدانية واسعة النطاق خلال العقد الأخير، مما استوجب الاعتماد على بيانات مؤسسية وتقديرات إقليمية ودولية قابلة للمقارنة.

ثانياً: أن التحليل الاقتصادي المقدَّم يظل مؤشرياً واستدلالياً وليس نموذجاً مالياً تفصيلياً قائماً على بيانات تكاليف محلية فعلية، نظراً لتغير أسعار المعدات والطاقة بصورة متسارعة.

ثالثاً: أن الورقة تركز بصورة أساسية على البعد التقني والاقتصادي والبيئي، فيما تستحق الأبعاد الاجتماعية والثقافية المرتبطة بقبول المزارعين لهذه التقنيات دراسات ميدانية مستقلة متعمقة.

وتقترح الورقة عدداً من مسارات البحث المستقبلي، **من أبرزها:** إجراء دراسات جدوى اقتصادية تفصيلية قائمة على بيانات ميدانية أولية لمشاريع ريادية محددة في مناطق ليبية بعينها، وإجراء تقييم هندسي معمّق لجدوى الألواح الشمسية العائمة على خزانات النهر الصناعي العظيم، وإجراء مسوح اجتماعية لقياس مدى استعداد المزارعين الليبيين لتبني هذه التقنيات والعوامل المؤثرة في قرارهم، فضلاً عن دراسات تقييم الأثر البيئي طويل الأمد لأي تحول واسع النطاق في أنماط استخدام الطاقة والمياه الزراعية.

الخلاصة

تخلص هذه الورقة إلى أن ليبيا تقف عند مفترق طرق استراتيجي بين إرث هندسي ضخم يتمثل في مشروع النهر الصناعي العظيم – الذي وفّر لعقود أمناً مائياً نسبياً لكنه يعتمد على مخزون جوفي غير متجدد آخذ في النضوب التدريجي– وبين مستقبل واعد تفتحه إمكانات الطاقة الشمسية الاستثنائية التي تضع البلاد من بين الأفضل عالمياً من حيث الإشعاع الشمسي، وقد بيّنت الورقة، عبر مراجعة الأدبيات والتجارب الدولية المقارنة من المغرب والإمارات ومصر وباكستان والمنطقة العربية عموماً، أن الري الذكي المدعوم بالطاقة المتجددة ليس مجرد ترف تقني، بل ضرورة استراتيجية لإطالة عمر الموارد المائية غير المتجددة، وخفض تكاليف الإنتاج الزراعي، وتقليص الأثر البيئي، وتعزيز صمود المجتمعات الريفية في مواجهة تغير المناخ.

غير أن تحويل هذه الإمكانات الطبيعية الهائلة إلى واقع تطبيقي ملموس يستلزم إرادة سياسية حقيقية تتجاوز الاستراتيجيات المعلنة على الورق نحو إصلاح تشريعي ومؤسسي فعلي، وتمويلاً موجهاً يراعي احتياجات صغار المزارعين، وبناء قدرات فنية وطنية متخصصة، وربط أي توسع في استخدام الطاقة الشمسية بحوكمة رشيدة للطلب على المياه تحول دون الوقوع في مفارقة زيادة الاستخراج، وتأمل هذه الورقة أن تشكل إسهاماً متواضعاً في مسار بحثي أوسع يخدم صناع القرار والباحثين والممارسين المعنيين برسم مستقبل مستدام للأمن المائي والغذائي والطاقي في ليبيا.

المراجع

أولاً: مراجع باللغة العربية

1. الهيئة الليبية للطاقات المتجددة، (REAOL، 2024)، تعزيز الطاقة المتجددة في ليبيا: استراتيجية 2023–2035. https://www.reaol.gov.ly.
2. منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، (FAO، 2020)، حالة الأغذية والزراعة في المناطق الجافة: تحديات ندرة المياه، روما: منظمة الأغذية والزراعة.
3. The Middle East Observer. (2024) مشروع النهر الصناعي العظيم في ليبيا يقترب من الاكتمال حل بقيمة 7 مليارات دولار لندرة المياه. https://meobserver.org,

ثانياً: مراجع باللغة الإنجليزية

1. Abdelhamid, M. A., Abdelkader, T. K., Sayed, H. A. A., Zhang, Z., Zhao, X., & Atia, M. F. (2025). Design and evaluation of a solar powered smart irrigation system for sustainable urban agriculture. Scientific Reports, 15, 11761. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94251-3.

2. Alnaas, J. F., Sharif, A., & Altraiki, M. S. (2025). Sustainable energy future for Libya: Assessing the solar energy potential of twenty-three urban areas. Journal of the Academic Forum.

3. Asian Journal of Agriculture and Food Sciences. (2020). The economic and environmental benefits of solar energy in the agricultural sector: The case of Morocco. Asian Journal of Agriculture and Food Sciences, 8(3). https://doi.org/10.24203/AJAFS.V8I3.6232.

4. Ben Abdallah, H., Naui, L., Bakri, M., Markwordt, F., Rahim, M. A., Dupont, C., Ben Abdallah, M. A., & Rezig, M. (2026). Development and field validation of WaziSense, a low-cost solar-powered IoT smart tensiometer for soil–water monitoring and irrigation scheduling in semi-arid agriculture. Sensors, 26(17), 5348. https://doi.org/10.3390/s26175348.

5. Construction Review Online. (2024, September 13). World's biggest man-made river: The mega $25 billion Great Man-Made River project in Libya. https://constructionreviewonline.com.

6. Daraz, U., Bojnec, Š., & Khan, Y. (2025). Energy-efficient smart irrigation technologies: A pathway to water and energy sustainability in agriculture. Agriculture, 15(5), 554. https://doi.org/10.3390/agriculture15050554.

7. Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2010). Comparison of directly connected and constant voltage controlled photovoltaic pumping systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 1(3), 184–192.

8. EPCM Holdings. (2025, February 24). History and long-term fate of the Great Man-Made River in Libya. https://epcmholdings.com.

9. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2014). The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture. FAO.

10. Amirthalakshmi, T. M., Rahul, S. G., Gnanasekar, A. K., Jayamani, K., Rajkumar, R., & Bhuvaneswari, R. (2026). Cloud-enabled IoT smart irrigation with big data analytics and renewable energy for sustainable agriculture in arid regions. Frontiers in Sustainable Food Systems, 10, 1849075. https://doi.org/10.3389/fsufs.2026.1849075.

11. Aklan, M., Lackner, H., & Al-Saidi, M. (2025). Solar-powered irrigation as a curse for vulnerable water basins? A community case study using the water–energy–food security nexus. Frontiers in Water, 7, 1612938. https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1612938.

12. Hoff, H. (2011). Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Conference — The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute.

13. ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas). (2021). Ultra-low energy drip irrigation for MENA countries. https://icarda.org.

14. ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas). (2024). Ultra-low energy drip irrigation for MENA countries [Project update]. https://mel.cgiar.org/projects/322.

15. International Energy Agency (IEA). (2023). Libya renewable energy strategic plan 2013–2025 — Policies. https://www.iea.org/policies/5908-libya-renewable-energy-strategic-plan-2013-2025.

16. International Energy Agency (IEA). (2024). Libya — Countries & regions. https://www.iea.org/countries/libya

17. Kolhe, M., Joshi, J. C., & Kothari, D. P. (2004). Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system. IEEE Transactions on Energy Conversion, 19(3), 613–618.

18. Middle East Institute. (2025, November 20). What's next for Libya's Great Man-Made River Project? https://mei.edu.

19. Middle East Journal of Pure and Applied Sciences (MEJPAS). (2026). Weather variability, irradiance forecasting, and implications for solar planning and energy security in Libya. MEJPAS.

20. Nahvi, S. (2026, June). Watering the desert with algorithms: How smart irrigation is rewriting agriculture and why Dubai is the ultimate test case. Medium.
21. Osservatorio Strategico Mediterraneo Allargato. (2025, March 3). The Great Man-Made River: Quenching Libya's millennia-long thirst. https://osservatoriostrategicomediterraneoallargato.com
22. PVKnowHow. (2025, December 2). Libya solar panel manufacturing report: Market analysis and insights. https://www.pvknowhow.com/solar-report/libya.
23. Maka, A. O. M., Salem, S., & Mehmood, M. (2021). Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: Challenges, potential, opportunities and future perspectives. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100267. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100267.
24. Gupta, S., Chowdhury, S., Govindaraj, R., Amesho, K. T. T., Shangdiar, S., & others. (2025). Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency. Smart Agricultural Technology, 12, 101081.
25. Mohammed, M., Nassar, Y., El-Khozondar, H., & Al Bari, M. A. (2026). Renewable energy in Libya: A systematic review of resources, costs, and implementability. Energy 360, 100066. https://doi.org/10.1016/j.energ.2026.100066.
26. The Energy Pioneer. (2026, May 14). Libya has 3,200 hours of sunshine and still no solar. https://theenergypioneer.com.
27. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). (2022). The global land outlook (2nd ed.). UNCCD.
28. Yadav, N., Pattabiraman, B., Tummuru, N. R., Soundharajan, B. S., Kasiviswanathan, K. S., Adeloye, A. J., Sen, S., Maurya, M., & Vijayalakshmanan, S. (2024). Toward improving water-energy-food nexus through dynamic energy management of solar powered automated irrigation system. Heliyon, 10(4), e25359. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25359.