الزراعة الذكية ومدى إمكانية تطبيقها في دلتا أبين

وحيد عبد الكريم سفيان الفودعي
كلية الاقتصاد والعلوم السياسية-جامعة عدن

الملخص

هدفت هذه الدراســـة إلى تقويم جدوى الزراعة الذكية في دلتا أبين بوصـــفها مدخلاً عمليًا لتعزيز الاستدامة المائية والأمن الغذائي، عبر تأطيرها ضـمن نهج الزراعة الذكية مناخيًا (CSA) الذي يوازن بين الإنتاجية، والمرونة المناخية، وخفض الانبعاثات، واعتمدت على منهج وصـــفي-تحليلي مدعوم ببيانات كمية ونوعية من تقارير FAO والبنك الدولي ودراســات ميدانية ومحلية حول موارد المياه، والبنية التحتية للري، وأثر النزاع والتقلبات المناخية على منظومة الإنتاج.

وتوصلت إلى أن دلتا أبين تجمع بين خصوبةٍ عالية وهشاشةٍ مؤسسية-مائية؛ وأن دمج تقنيات الري الموضعي الذكي (IoT + Drip) ونُظم الإنذار المبكر للسيول (FEWS) والزراعة الدقيقة بالدرونز قادرٌ— ضـــمن إطار حوكمي مُلزم—على تحقيق توفير مائي يقارب 45 %وزيادة في الغلة بنحو 25%، مع تقليص الهدر في المدخلات وتحسين قرارات المزارعين عبر الإرشاد الرقمي(SMS/WhatsApp) ، كما أثبتت أن الطاقة الشمسية سلاحٌ ذو حدّين؛ وتتحول إلى رافعة للاستدامة فقط إذا رُبط ترخيص الضخّ بإلزامية التقنيات الموفِّرة للمياه.

الكلمات المفتاحية: الزراعة الذكية-دلتا أبين.

Abstract

*This paper aimed to assess the feasibility of **smart agriculture** in the Abyan Delta as a practical pathway to water sustainability and food security, by framing interventions within **Climate-Smart Agriculture (CSA)** that balances productivity, climate resilience, and emission mitigation. The study relied on a descriptive-analytical approach using quantitative and qualitative evidence from FAO and World Bank reports, complemented by local field insights on water resources, flood-based irrigation infrastructure, and the impacts of conflict and climate variability on production systems.*

*The analysis found that the Abyan Delta combines **high agro-ecological potential with institutional and water-management fragility**. When embedded in enforceable governance, integrating **smart drip irrigation (IoT + Drip)**, **flood early-warning systems (FEWS)**, and **drone-enabled precision farming** can deliver **~45% water savings** and **~25% yield gains**, while reducing input waste and improving farm decisions via **SMS/WhatsApp digital extension**. Solar pumping is a **double-edged sword**: it contributes to over-abstraction unless licensing is tied to water-saving controls.*

الإطار العام:

يُعدّ القطاع الزراعي في دلتا أبين أحد الركائز الاستراتيجية للاقتصاد الزراعي في اليمن، إذ تمثل هذه الدلتا—الواقعة عند مصب وادي بَنا وحَسّان على البحر العربي—منطقة إنتاجية عالية الخصوبة، تغذّي أسواق عدن ولحج وأبين والضالع بالحبوب والخضروات والفواكه، وكانت تاريخيًا من أهم مناطق الإمداد الغذائي للمدن الساحلية الجنوبية، وبذلك تتجاوز أهمية دلتا أبين بعدها المحلي، لتغدو عنصراً محورياً في منظومة الأمن الغذائي الوطني، ورافداً حيوياً للتنمية الريفية المستدامة في جنوب البلاد.

غير أنّ هذا القطاع الحيوي يواجه في الوقت الراهن تحدياتٍ هيكليةً وجودية تهدّد استدامته وتضعف مساهمته في الإنتاج الغذائي الوطني.

وتتمثل أبرز هذه التحديات في ثلاثة محاور رئيسة:

أولاً، شحّ المياه وعدم انتظام تدفقها نتيجة التقلبات المناخية الحادة التي أدت إلى انخفاض التصريف المائي في الأودية، وتزايد موجات الجفاف والسيول المفاجئة.

ثانياً، تدهور البنية التحتية لنظام الريّ التقليدي، إذ تعاني القنوات والسدود التحويلية في وادي بَنا (مثل سدّي باتيس والدِّيو) من انتهاء عمرها الافتراضي وغياب الصيانة المنتظمة، مما يعيق التوزيع العادل للمياه ويُذكي النزاعات المائية بين المزارعين.

ثالثاً، تداعيات الصراع المسلح التي خلّفت دماراً واسعاً في المنشآت الزراعية وتراجعاً في المساحات المحصولية بنسبة 38% خلال الفترة 2010–2022، فضلاً عن تعطّل خدمات الإرشاد الزراعي وغياب الاستثمارات الإنتاجية.

وتتمثل المشكلة المحورية التي تتناولها هذه الدراسة في هشاشة المنظومة الزراعية والمائية في دلتا أبين، الناجمة عن ضعف الإدارة المؤسسية واستنزاف الموارد المائية وغياب التحول التكنولوجي المنظم، مما جعل الإنتاج الزراعي رهينًا لعوامل مناخية متقلبة وغير قابلة للضبط، فبينما تمتلك الدلتا مقومات إنتاجية وخصوبة عالية، إلا أن غياب التقنيات الذكية ونظم الري الحديثة حوّل هذا المورد الغني إلى نظام هشّ مهدد بالانكماش الزراعي ونضوب المياه الجوفية، ومن هنا تبرز الحاجة إلى إطار علمي تطبيقي لتقييم مدى قابلية تبنّي الزراعة الذكية كنهج تكاملي يوازن بين الكفاءة المائية، والإنتاجية الاقتصادية، والاستدامة البيئية.

وتتجلّى أهمية هذه الدراسة في طرح مفهوم الزراعة الذكية (Smart Agriculture) في إطار الزراعة الذكية مناخيًا (Climate-Smart Agriculture – CSA) كخيارٍ استراتيجيٍ للتكيّف مع التغيرات المناخية وضمان استدامة الموارد الزراعية في دلتا أبين، فالتحول التكنولوجي في الزراعة لم يعد ترفاً أو خياراً تجريبياً، بل ضرورةً وجوديةً لكسر ما يُعرف بـ"فخّ الاستدامة" المزدوج، المتمثل في الاستنزاف المفرط للمياه الجوفية بفعل التوسع العشوائي في الضخّ بالطاقة الشمسية، والاعتماد غير الرشيد على الريّ بالغمر في محاصيل مرتفعة الاستهلاك المائي كالموز.

وتسعى الزراعة الذكية إلى رفع كفاءة استخدام الموارد المحدودة—وخاصة المياه والأسمدة—وتعزيز الإنتاجية الزراعية بما يرسّخ الأمن الغذائي المحلي والوطني ويزيد مرونة النظام الزراعي أمام التغيرات المناخية.

وانطلاقاً من ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحقيق جملة من الأهداف، أهمها:

1. تحليل الإطار المفاهيمي والتقني للزراعة الذكية وتحديد مكوّناتها الأساسية.
2. تقييم الواقع الزراعي والمائي في دلتا أبين وتشخيص أوجه الضعف البنيوي والمؤسسي.
3. دراسة جدوى تطبيق التقنيات الزراعية الذكية الأنسب للبيئة الهشّة في أبين، مع التركيز على الإدارة المائية المستدامة.

4. تقديم حزمة من التوصيات العملية والسياساتية للجهات الحكومية والمانحين والمزارعين لتمكين التحول التكنولوجي والتمويلي المنشود.

وتستند الدراسة إلى المنهج الوصفي التحليلي، مع توظيف بياناتٍ كمية ونوعية مستمدة من تقارير منظمة الأغذية والزراعة (FAO) والبنك الدولي، إضافة إلى دراساتٍ ميدانية ووطنية تناولت إدارة المياه الجوفية وتأثير التغير المناخي والنزاع المسلح على القطاع الزراعي في اليمن، لبناء تحليل علمي شامل يؤسس لرؤية تطبيقية حول إمكانية تبنّي الزراعة الذكية في دلتا أبين كخيارٍ استراتيجيٍ لتحقيق الاستدامة المائية والأمن الغذائي.

1. الإطار المفاهيمي والتقني للزراعة الذكية:

1.1. مفهوم الزراعة الذكية (Smart Agriculture):

تُعدّ الزراعة الذكية من المفاهيم الحديثة في الفكر الزراعي والتنمية المستدامة، وقد برزت استجابةً للتحديات المتزايدة التي تواجه الإنتاج الزراعي في ظل تغير المناخ وشح الموارد الطبيعية وتزايد الطلب الغذائي العالمي[1]، ووفقاً لتعريف منظمة الأغذية والزراعة (FAO, 2013)، تُعرَّف الزراعة الذكية بأنها "نهج متكامل يهدف إلى تحويل وتطوير النظم الزراعية لضمان تحقيق الأمن الغذائي والتنمية المستدامة في مواجهة تغير المناخ، من خلال زيادة الإنتاجية والدخل، وتعزيز القدرة على التكيّف، وتقليل الانبعاثات الكربونية"[2]. وتقوم فكرة الزراعة الذكية على دمج التكنولوجيا الرقمية بالممارسات الزراعية التقليدية لتحويل الزراعة من نشاط يعتمد على الخبرة الحدسية إلى نظام قائم على البيانات والتحليل والتنبؤ، إنها انتقال من "الزراعة الكمية" إلى "الزراعة النوعية" التي توازن بين الإنتاجية والكفاءة والاستدامة.

وفي السياق الأكاديمي، يمكن النظر إلى الزراعة الذكية بوصفها إطاراً تقاطعياً يجمع بين علوم الزراعة والبيئة وتكنولوجيا المعلومات والاقتصاد السلوكي، إذ تستهدف بناء "نظام زراعي ذكي" قادر على اتخاذ قرارات ذاتية استناداً إلى بيانات دقيقة آنية، وهذا النظام لا يقتصر على زيادة الغلة، بل يسعى إلى تعظيم العائد لكل وحدة من الموارد النادرة – سواء أكانت مياهاً أو طاقةً أو أسمدة – مع الحد من الأثر البيئي.

المكونات الجوهرية للزراعة الذكية:

يمكن اختزال بنية الزراعة الذكية في ثلاثة مكونات رئيسة متكاملة تشكّل منظومة تكنولوجية – مؤسسية مترابطة[3]:

1. **البيانات (Data):** تمثّل قاعدة النظام الذكي، وتُجمع من مصادر متعددة تشمل أجهزة الاستشعار الميدانية (لرطوبة التربة، ونسبة الملوحة، ودرجة الحرارة، وشدة الإضاءة)، وأنظمة الاستشعار عن بُعد مثل الأقمار الصناعية والطائرات المسيّرة (الدرونز)، إلى جانب محطات الطقس الذكية التي تتابع التغيرات المناخية اللحظية، هذه البيانات تمثل ما يُعرف بـ "الذهب الرقمي" في الزراعة الحديثة، إذ تُستخدم لبناء مؤشرات دقيقة للاحتياجات الفعلية للنباتات.

2. **التقنية (Technology):** تُعنى بتحليل البيانات وتحويلها إلى معرفة قابلة للتطبيق من خلال استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي وأنظمة إدارة المزارع (Farm Management Systems)، وتطبيقات تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics) التي تُمكّن من التنبؤ بالاحتياجات المستقبلية للمحاصيل أو اكتشاف بوادر الأمراض النباتية قبل تفاقمها.

---

(1) Farmer's Pride International. Smart Farming. 2024. Available at: https://www.farmerspride international.org/ar/smart-farming [Accessed 1 Nov 2025].

(2) Food and Agriculture Organization of the United Nations. Overview | Climate-Smart Agriculture. 2024. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/overview/en/?utm_source=chatgpt.com [Accessed 1 Nov 2025].

(3) Kabato, W. (2025). Towards Climate-Smart Agriculture: Strategies for Sustainable Food Systems. MDPI, Agronomy, Vol. 15, No. 3, Article 565. Available at: https://www.mdpi.com/2073-4395/15/3/565 [Accessed 2 Nov 2025].

3. **القرار (Decision):** وهو العنصر البشري أو الآلي الذي يستخدم المخرجات التقنية لاتخاذ قرارات زراعية دقيقة على مستوى الحقل، مثل تحديد مواعيد الريّ، أو كميات الأسمدة المثلى، أو توقيت الحصاد، هذه المرحلة تمثل جوهر ما يُعرف بـــ "الزراعة الدقيقة(Precision Agriculture) "، أي الانتقال من المعالجة الجماعية للمزرعة إلى الإدارة الموضعية القائمة على اختلاف ظروف كل منطقة داخل الحقل.

وبذلك، تُعد الزراعة الذكية منظومة متكاملة تتجاوز الجانب التقني إلى جانب حوكمي وإداري ومعرفي، إذ تتطلب بيئة تنظيمية داعمة، ونظم تمويل مرنة، وقدرات بشـرية قادرة على قراءة البيانات وتوظيفها في القرارات الميدانية.

1.2.الزراعة الذكية مناخياً (Climate-Smart Agriculture – CSA) كنموذج تكيّفي

1.2.1. المفهوم والأبعاد النظرية:

في البيئات الهشّة المعرضة للتقلبات المناخية الشديدة – كما هو الحال في دلتا أبين – لا يمكن تناول الزراعة الذكية بمعزل عن إطارها الأشـمل، أي الزراعة الذكية مناخياً (CSA)، التي طورتها منظمة الأغذية والزراعة (FAO) عام 2010 كإستراتيجية عالمية لتكييف النظم الزراعية مع تحديات التغير المناخي، ويرتكز هذا النهج على ثلاثة أهداف مترابطة تشكّل مثلث الاستدامة الزراعية:

1. زيادة الإنتاجية والدخل الزراعي بصورة مستدامة من خلال رفع كفاءة استخدام الموارد.
2. تعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ عبر بناء مرونة النظم البيئية والمجتمعية في مواجهة الجفاف والسيول والفيضانات.
3. الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن الأنشـطة الزراعية، وخاصـة من أنظمة الري والطاقة والأسمدة.

وتبرز أهمية هذا النهج في كونه لا يتعامل مع الزراعة بوصفها نشاطاً إنتاجياً فحسب، بل باعتبارها منظومة بيئية –اقتصادية– اجتماعية مترابطة، فالزراعة الذكية مناخيًا ليست تقنية بقدر ما هي إستراتيجية تكيف متكاملة تجمع بين الحلول التقنية والسياسات المؤسسية والإدارة المستدامة للموارد.

1.2.2. أهمية النموذج لدلتا أبين:

تُعدّ دلتا أبين مثالاً نموذجياً لتطبيق منهج الزراعة الذكية مناخيًا (CSA)، نظرًا لخصائصها البيئية الهشّة واعتمادها التاريخي على نظام الريّ السيلي غير المنتظم، إذ تواجه المنطقة نقصاً هيكلياً في المياه وتدهوراً في التربة نتيجة التملّح والجفاف، إلى جانب تزايد حدة السـيول المفاجئة، وفي مثل هذه البيئات، لا تكون الأولوية لزيادة الإنتاج فحسب، بل لـ ضمان استدامة قاعدة الموارد المائية والتربة، ومن هنا، تصبح الزراعة الذكية مناخيًا أداة إدارة للمخاطر الطبيعية، إذ يمكن لتقنياتها أن تُسهم في التنبؤ بالسيول أو موجات الجفاف عبر نظم الإنذار المبكر، وفي ترشيد توزيع المياه باستخدام الحساسات والذكاء الاصطناعي، بما يضمن مرونة النظام الزراعي وبقاءه في المدى الطويل، كما أنّ نموذج CSA يوفّر إطارًا مؤسسيًا لتنسيق الأدوار بين المزارعين والسـلطات المحلية والمنظمات الداعمة، مما يمكّن من بناء "حوكمة مائية–زراعية" قادرة على المواءمة بين الإنتاج والاستدامة، فالمسألة في دلتا أبين ليست فقط إنتاج الغذاء، بل إنتاجه دون تدمير القاعدة المائية التي يقوم عليها.

1.2.3. العلاقة بين الزراعة الذكية والتنمية المستدامة:

يرتبط مفهوم الزراعة الذكية ارتباطًا وثيقًا بأهداف التنمية المستدامة (SDGs)، ولا سيما الهدف الثاني (القضاء على الجوع)، والهدف السادس (الإدارة المستدامة للمياه)، والهدف الثالث عشر (العمل المناخي)، وتُعدّ الزراعة الذكية مناخيًا التطبيق العملي لتكامل هذه الأهداف، إذ تُترجمها إلى سياسات زراعية محلية قائمة على الكفاءة، والمرونة، والاستدامة.

إن الزراعة الذكية، في إطارها المناخي، ليست مجرد إدخال للتكنولوجيا في الحقول، بل هي تحوّل بنيوي في فلسفة إدارة الزراعة من التركيز على الإنتاج الكمي إلى الإنتاج الذكي المستدام، الذي يُعلي من شأن الكفاءة المائية، وحماية البيئة، وتعزيز القدرة التكيفية للمزارعين، وفي بيئة مثل دلتا أبين، فإنّ تبنّي هذا النموذج لم يعد خياراً نظرياً، بل ضرورة إستراتيجية لضمان بقاء النظام الزراعي وتحقيق الأمن الغذائي الوطني في مواجهة التغيرات المناخية المتسارعة.

1.3.أبرز تقنيات الزراعة الذكية الملائمة لدلتا أبين:

تُعدّ التقنيات الزراعية الذكية حجر الأساس في التحول نحو الزراعة المستدامة في البيئات الهشّة، مثل دلتا أبين التي تتسم بندرة المياه وتذبذب مواردها الطبيعية، وقد أظهرت التجارب الدولية أن دمج الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) والاستشعار عن بُعد في منظومات الإنتاج الزراعي يعزّز الكفاءة المائية ويقلّص التكاليف التشغيلية ويحدّ من الأثر البيئي السلبي[4]، وفي هذا السياق، يمكن تصنيف التقنيات الأكثر ملاءمة لأبين ضمن ثلاث مجموعات رئيسة مترابطة: تقنيات الاستشعار والمراقبة، وتقنيات إدارة الموارد والزراعة الدقيقة، والتقنيات الزراعية اللاتقليدية.

1.3.1. تقنيات الاستشعار والمراقبة:

يمثّل الاستشعار الميداني والرقمي الركيزة التقنية الأولى للزراعة الذكية، إذ يقوم بجمع بيانات آنية عالية الدقة حول خصائص التربة والنبات والمناخ، بما يتيح للمزارع اتخاذ قرارات مبنية على معلومات لا على الحدس.

(أ) حساسات إنترنت الأشياء (IoT Sensors):

تُعد حساسات رطوبة التربة من أكثر التطبيقات شيوعًا وفاعلية في البيئات الجافة وشبه الجافة، إذ توفّر بيانات مستمرة حول الحالة المائية لجذور النباتات، ما يمكّن من تحديد الاحتياج المائي الفعلي لكل محصول بدقة، هذه التقنية تزيل عنصر التخمين في الريّ وتمنع الإفراط أو النقص، وهو ما يحقق وفراً مائياً يتراوح بين 45–30% وفقاً لتقديرات FAO (2020)[5]، وتعد هذه الحساسات مناسبة جدًا لدلتا أبين نظرًا لعدم انتظام الريّ السّيلي واعتماد المزارعين على الغمر العشوائي، يمكن ربطها بأنظمة تنقيط مؤتمتة تعمل بالطاقة الشمسية، لتتحول المزرعة إلى نظام ذكي مغلق يضبط تدفق المياه بناءً على بيانات الرطوبة في الوقت الحقيقي.

(ب) الطائرات بدون طيار (Drones / UAVs):

تمثل الدرونز الزراعية أحد أبرز التحولات في الرصد الحقلي، إذ توفّر صورًا عالية الدقة بتردد زمني يمكن أن يكون يومياً، ما يتيح تحليل مؤشرات صحة النبات مثل مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI)، هذه المؤشرات تُظهر الاختلافات في كثافة الغطاء النباتي، مما يساعد على تحديد مناطق الإجهاد الناتج عن نقص المياه أو المغذيات أو الإصابات المرضية، وتتميز هذه التقنية بأنها منخفضة الكلفة التشغيلية مقارنة بالمسوحات الميدانية، كما يمكن تشغيلها محليًا دون حاجة إلى خبرة تقنية متقدمة، في بيئة أبين، يمكن للدرونز أن تعوّض غياب الإرشاد الزراعي التقليدي عبر توفير مراقبة مرئية دورية تسهم في توجيه قرارات الريّ والتسميد بدقة أكبر.

---

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging digital technologies for agriculture and rural areas. 2022. Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6fa56152-c232-4bc6-8eee-7d413261ad64/content [Accessed 2 Nov 2025].

[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Realizing the Potential of Digital Agriculture: Harnessing the Internet of Things for Smarter Irrigation Management. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/ca7485en/CA7485EN.pdf [Accessed 3 Nov 2025].

(ج) الاستشعار عن بُعد بالأقمار الصناعية:

يُعدّ الاستشعار بالأقمار الصناعية (Satellite Remote Sensing) أداةً استراتيجية للمراقبة على المستوى الكلي للدلتا، إذ تتيح بيانات شاملة عن عجز المياه الزراعية، وتغيرات الغطاء النباتي، ومعدلات التصحر، وتعتمد مؤسسات كالبنك الدولي والـــFAO على هذه البيانات لتقييم الكفاءة المائية في الأحواض المائية الكبرى، وفي حالة أبين، يمكن دمج بيانات الأقمار الصناعية مع المعلومات المحلية لتطوير نظام إنذار مبكر للسيول والجفاف (FEWS)، وهو ما يشكل ركيزة لبرامج التنبؤ المناخي الزراعي وإدارة الريّ السيلي بفعالية أكبر.

1.3.2. تقنيات إدارة الموارد والزراعة الدقيقة:

تمثل الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) التطور العملي للزراعة الذكية، إذ تجمع بين التحليل الرقمي واتخاذ القرار الميداني الفوري، وهي تقوم على إدارة المدخلات الزراعية – من مياه وأسمدة ومبيدات – وفق احتياجات فعلية محددة مكانيًا وزمانيًا، وفي دلتا أبين، حيث يتسم الريّ بالغمر بالهدر الكبير للمياه، يمكن لتقنيات الريّ الموضعي الذكي الموجّه بالحساسات أن تُحدث تحولًا نوعيًا في كفاءة استخدام المياه، وتُظهر الدراسات الميدانية في بلدان مشابهة بيئياً (مثل السودان وإثيوبيا) أن أنظمة الريّ بالتنقيط المؤتمتة يمكن أن ترفع الغلة بنسبة 20–30% وتقلل استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 45%[6].

كما تُتيح الطائرات المسيّرة في الزراعة الدقيقة التطبيق الموضعي للمدخلات (الأسمدة والمبيدات) في المناطق التي تُظهر مؤشرات الإجهاد النباتي فقط، استنادًا إلى خرائط حرارية ناتجة عن تحليل صور NDVI، هذا الانتقال من التطبيق الجماعي إلى التطبيق الانتقائي لا يحقق فقط وفراً اقتصادياً وبيئياً، بل يعوّض أيضاً ضعف الإرشاد الزراعي وغياب التقييم الموقعي للمحاصيل في أبين، وتكمن ميزة هذه التقنيات في إمكانية توطينها تدريجياً عبر برامج تدريبية قصيرة، حيث يمكن للمزارعين استخدام تطبيقات الهاتف المحمول المرتبطة بأنظمة الاستشعار للتحكم في الريّ أو مراقبة الحقول عن بُعد.

1.3.3. التقنيات الزراعية اللاتقليدية:

في ظل ندرة المياه الجوفية وتراجع الأمطار، أصبحت التقنيات اللاأرضية أو اللاتقليدية خياراً ضرورياً لتأمين الأعلاف والمنتجات الزراعية الأساسية في دلتا أبين، وتمثل الزراعة المائية – التي تعتمد على تغذية النباتات بمحاليل مغذية دون تربة – حلاً ابتكارياً لتجاوز القيود المائية والتربة المتدهورة، وقد أثبتت الدراسات الميدانية في الأردن والمغرب والإمارات أن أنظمة الهيدروبونيك توفر ما يقارب 90% من استهلاك المياه مقارنة بالزراعة التقليدية[7]، وفي بيئة أبين، يمكن تطبيق هذه التقنية على نطاقٍ صغير ومتوسط لإنتاج الأعلاف الخضراء للحيوانات (مثل الشعير المستنبت) خلال فترات الجفاف، بما يقلل الضغط على المراعي الطبيعية ويضمن استقرار سلاسل الإمداد الغذائي الحيواني، كما يمكن تطوير وحدات إنتاجية مجتمعية تُدار بالطاقة الشمسية ضمن مزارع نموذجية تشرف عليها الجمعيات الزراعية أو مكاتب الزراعة المحلية، بحيث تصبح نواة لمشاريع استثمارية خضراء تدعم الأمن الغذائي الريفي.

إن دمج هذه التقنيات الثلاث – الاستشعار، والإدارة الدقيقة، والزراعة اللاتقليدية – يمثل المسار الأكثر ملاءمةً للبيئة المائية والاقتصادية في دلتا أبين، فالتقنيات الذكية لا تُقدَّم هنا كترفٍ تكنولوجي، بل كأدوات إنقاذٍ زراعي تسهم في إعادة هيكلة منظومة الإنتاج على أسس من الكفاءة والمرونة والاستدامة.

---

(6) World Bank. (2021). Transforming Agriculture through Digital Technologies: Insights from Sub-Saharan Africa. Washington, D.C.: The World Bank Group. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099535503082133059/p1714100b3efdb0d608f20a61e0ae4b90a4 [Accessed 3 Nov 2025].

(7) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Hydroponics and Other Soilless Systems for Sustainable Agriculture in Arid Regions. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb9721en/cb9721en.pdf [Accessed 3 Nov 2025].

ومن ثم، فإن أي برنامج وطني أو دولي لدعم الزراعة في أبين يجب أن يركّز على توطين هذه التقنيات تدريجياً ضمن إطار الزراعة الذكية مناخياً (CSA)، وبما يضمن الاستخدام الرشيد للمياه وتحقيق الأمن الغذائي المحلي والوطني معاً.

1.4. متطلبات وشروط نجاح تطبيق الزراعة الذكية في دلتا أبين:

يتطلب نجاح تبني الزراعة الذكية في بيئة اليمن الهشة ثلاثة شروط رئيسية :

- التركيز على الكفاءة المائية كأولوية قصوى: في ظل العجز المائي الهيكلي الذي يعاني منه اليمن ، يجب أن يكون الهدف الأساسي للتقنيات المطبقة هو الحد من الهدر المائي (الذي يصل إلى 45% على الأقل) وليس فقط زيادة الإنتاج.
- التوطين والملائمة للبيئة الهشة: يجب اختيار تقنيات منخفضة التعقيد، وقابلة للصيانة محليًا، وتستخدم أجهزة استشعار متينة تتحمل الظروف البيئية القاسية.
- التمويل الميسر والدعم المؤسسي: تتطلب التقنيات الذكية تكلفة استثمارية أولية مرتفعة نسبياً ، مما يستوجب توفير قروض وتسهيلات من البنوك والمنظمات، وضرورة وجود إرشاد وبناء قدرات لتدريب المزارعين على استخدام الأدوات الرقمية.

وعليه، يتضح مما سبق أن إنّ نجاح تجربة الزراعة الذكية في دلتا أبين لن يكون نتاجاً لتوافر التكنولوجيا بحد ذاتها، بل نتيجة لتكامل ثلاثة أبعاد جوهرية:

- بعد فني–بيئي: يتمحور حول كفاءة استخدام المياه وتبنّي التقنيات الملائمة.
- بعد اجتماعي–ثقافي: يتعلق بتوطين التكنولوجيا وضمان قبولها من قِبل المزارعين.
- بعد مؤسسي–مالي: يرتبط بوجود بيئة تمويل ودعم قادرة على تحويل المبادرات التقنية إلى ممارسات إنتاجية مستدامة.

فمن دون هذا التكامل، ستظل الزراعة الذكية في أبين مشروعًا تجريبيًا محدود الأثر، بينما يُفترض أن تكون إستراتيجية وطنية طويلة المدى لتحقيق الأمن الغذائي والاستدامة المائية في اليمن.

2. القطاع الزراعي والتحديات الهيكلية في دلتا أبين:

2.1. الخصائص الجغرافية والمحاصيل الرئيسة:

تُعد دلتا أبين من أهم المناطق الزراعية في اليمن من حيث خصوبة التربة واتساع الرقعة القابلة للزراعة، وتقع في موقع استراتيجي عند مصب وادي بَنا وحَسّان على الساحل الجنوبي للبحر العربي، وتشكل مركز الثقل الزراعي لمحافظة أبين، كما تمثل أحد الأحواض المنتجة التي تغذّي أسواق عدن ولحج والضالع بالحبوب والخضروات والفواكه، وتبلغ المساحة الصالحة للزراعة نحو 39,463 هكتارًا، تُروى منها 34,954 هكتارًا بواسطة نظام الريّ السّيلي التاريخي الذي يعتمد على مياه السيول الموسمية القادمة من مرتفعات إب والضالع، وهو نظام زراعي عريق تشكل عبر قرون من الخبرة المحلية في إدارة مياه الأودية[8]. تتنوع المحاصيل في دلتا أبين بين محاصيل نقدية وأخرى غذائية أساسية، وتشمل القطن (المحصول النقدي التاريخي للمنطقة)، القمح، الذرة الرفيعة، السمسم، الفول السوداني، إلى جانب محاصيل الخضروات الموسمية، كما تشتهر المنطقة بإنتاج الفواكه المدارية، وعلى رأسها الموز في مناطق باتيس والدِّيو، غير أن هذا المحصول النقدي، على الرغم من قيمته الاقتصادية، أصبح مؤشراً على سوء إدارة

[8] الإرياني، محمد لطف، وآخرون. (2000م) .دراسة تحليلية لتقدير تكاليف التشغيل والصيانة لمنظومات الريّ السيلي في دلتا أبين وتبن بمحافظتي أبين ولحج – وزارة الزراعة والريّ، مجلة العلوم الاجتماعية والإنسانية – جامعة عدن، المجلد (3)، العدد (6)، اليمن، عدن، 2000م، ص 45–68.

الموارد المائية، إذ يُزرع بأســاليب الريّ بالغمر التقليدي التي تتطلب كميات مائية مرتفعة، مما أدى إلى استنزاف كبير للمياه الجوفية وتراجع إنتاجية الأراضي المجاورة.

كما أدى التوسع العشوائي في زراعة الموز على حساب المحاصيل الغذائية الأقل استهلاكًا للمياه إلى اختلال التوازن الزراعي في الدلتا، وازدياد هشــاشــة الأمن الغذائي في الأرياف، وتُظهر صــور الأقمار الصـناعية (FAO, 2021) انخفاضـاً تدريجياً في المسـاحات المزروعة بالحبوب في دلتا أبين خلال العقد الأخير بنسـبة تُقدّر بـــ 38% مقارنة بعام 2010، بسـبب تدهور البنية المائية، وتزايد الكوارث الطبيعية، وتراجع الاستثمار الزراعي العام والخاص على حد سواء[9].

2.2. التحديات الهيكلية والبنية التحتية:

2.2.1. أزمة البنية التحتية للري:

تُعدّ أزمـة البنيـة التحتيـة للريّ أحد أبرز التحـديـات التي تواجـه القطـاع الزراعي في دلتـا أبين. فشبكة الريّ، التي يبلغ طولها الإجمالي 707 كيلومترات وتشمل قنوات رئيسة وفرعية وسدودًا تحويلية (سدّ باتيس، سدّ الهيجة، سدّ الدِّيو، سدّ المخزن، سدّ الجرايب في وادي بَنا، وسدّ الشاقة العمياء في وادي حَسّان)، تعاني من تدهور بنيوي واسع النطاق نتيجة غياب الصيانة الدورية ونقص التمويل، وقد أدى هذا التدهور إلى فقدان كميات كبيرة من مياه السيول عبر التسرب والتبخر، وإلى عجز في التحكم بالتوزيع الزمني والمكاني للمياه، مما يحدّ من الكفاءة المائية للنظام بأكمله، كما أن تعثّر أعمال الصـيانة في بعض المنشـآت الحيوية—مثل "فرمة سالم نصيب" التي تشكل نقطة تحكم رئيسة في توزيع المياه—أسفر عن نشوء نزاعات مائية بين المزارعين، خصوصاً في مواسم الشحّ، في ظل غياب منظومة فعّالة لإدارة المياه على مستوى الدلتا[10].

وتشـير التقديرات إلى أن كفاءة نقل المياه في الشـبكة لا تتجاوز 55%، مقارنة بـــ 80–70% في الأنظمة المحدثة[11]، وهو ما يعني أن ما يقرب من نصـف موارد المياه السـيلية تضـيع قبل أن تصـل إلى الأراضـي الزراعية، ما يجعل إعادة تأهيل السدود التحويلية والقنوات الفرعية ضرورة تنموية عاجلة لضمان فاعلية أي مبادرة في مجال الزراعة الذكية أو إدارة الموارد المائية.

2.2.2. تحديات الطاقة: فخّ الاستدامة الشمسية:

شـهد القطاع الزراعي اليمني خلال العقد الأخير تحولاً واسـع النطاق نحو اسـتخدام الطاقة الشـمسـية لتشـغيل مضـخات الريّ بدلاً من الديزل، مدفوعاً بارتفاع أسـعار الوقود وصـعوبة اسـتيراده نتيجة النزاع، وقد بدا هذا التحول في البداية خطوةً إيجابيةً نحو الاستدامة البيئية، غير أنه أفرز ظاهرةً جديدة تُعرف اصـطلاحًا بـ "فخّ الاستدامة الشمسية"(Solar Sustainability Trap) .

ففي غياب التشـريعات الناظمة، تحولت الطاقة الشـمسـية من وسـيلةٍ لتقليل الانبعاثات وتكاليف التشـغيل إلى محرّكٍ لاسـتنزاف المياه الجوفية، إذ أزالت مجانية الطاقة التشـغيلية الرادع الاقتصـادي الذي كان يحدّ من الضـخّ المفرط، فبات المزارعون—خاصـة مزارعو الموز والقطن—يضـخّون المياه لسـاعات طويلة خلال النهار باسـتخدام الريّ بالغمر دون قيود كمية أو زمنية، هذا النمط غير المنظَّم أدى إلى انخفاض حادّ في

---

[9] World Bank. (2020). Yemen Dynamic Needs Assessment: Phase III – 2020 Update. Washington, D.C.: World Bank Group. Figure 2.8 – Percentage Change in Agricultural Production and Cultivated Area (2014–2017). Source: WFP/FAO/UNICEF Surveys. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/530881593075107517/yemen-dynamic-needs-assessment-phase-3-2020-update [Accessed 4 Nov 2025].

[10] United Nations Development Programme (UNDP) & Ministry of Agriculture and Irrigation – Yemen. (2016). Assessment of Agricultural and Water Resources Conditions in Abyan Delta after the 2015 Conflict. Aden: UNDP Yemen & Ministry of Agriculture and Irrigation. p. 17. Available at: https://www.ye.undp.org/content/yemen/en/home/library/environment_energy/abian-delta-assessment.html [Accessed 4 Nov 2025].

[11] World Bank. (2021). Yemen Water Sector Support and Resilience Assessment: Technical Note on Irrigation Efficiency and Agricultural Water Management in Abyan Delta. Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/612401624839041512 [Accessed 4 Nov 2025].

منسوب المياه الجوفية، ولا سيما في أحواض باتيس وحسان، وتزايد خطر نضوب الخزان المائي الذي تعتمد عليه الدلتا في فترات الجفاف، كما أن غياب الحوكمة المحلية وازدواجية القرارات في السلطات المحلية— التي أحياناً تمنح تراخيص لحفر آبار جديدة لتخفيف التوترات الاجتماعية—أديا إلى تفاقم "الفوضى المائية" وتآكل قاعدة الموارد الطبيعية.

وتشير بيانات البنك الدولي (2021) إلى أن عدد الآبار في مناطق دلتا أبين ارتفع بنسبة تتجاوز 35% بين عامي 2014 و2021[12]، في حين لم يُسجَّل أي تحسن في تنظيم الضخّ أو في معدلات إعادة التغذية الطبيعية للمياه الجوفية، ومن ثمّ، فإنّ ربط الطاقة الشمسية بتقنيات الريّ الذكي (Smart Drip + IoT) يُعدّ أولوية قصوى لتجنّب تحوّل الطاقة المتجددة إلى أداةٍ لتدمير الاستدامة المائية بدلاً من تعزيزها.

2.2.3. التحديات البيئية والمناخية:

تواجه دلتا أبين طيفاً واسعاً من التحديات البيئية المرتبطة بتغير المناخ، أبرزها التصحر وتدهور التربة والتملّح، إلى جانب انخفاض معدلات التصريف المائي في الأودية بسبب تراجع معدلات الأمطار في مناطق المنابع وتزايد التبخر السطحي، وقد أدى ذلك إلى تقليص كميات المياه المتاحة للريّ السيلي، مما أثّر مباشرةً على الإنتاج الزراعي، خاصة في المواسم الجافة، كما أن السيول المفاجئة والعنيفة التي أصبحت أكثر تواتراً في العقد الأخير تتسبب في انجراف التربة الزراعية الخصبة وتدمير أجزاء من شبكة الريّ.

تُظهر التحليلات المناخية الصادرة عن UNDP (2020) أن معدل الأمطار في منطقة وادي بَنا تراجع بأكثر من 12% خلال العقدين الأخيرين، فيما ارتفعت درجة الحرارة المتوسطة السنوية بمقدار 0.8 درجة مئوية[13]، وهو ما يفاقم التبخر ويزيد من الإجهاد المائي للنباتات، كما أن استمرار النزاع وتدهور الخدمات العامة، لا سيما الكهرباء والطرق، زاد من عزلة المزارعين ورفع كلفة النقل والتسويق، ما أدى إلى انخفاض القيمة الاقتصادية للإنتاج الزراعي وإضعاف القدرة التنافسية للمنتجات المحلية مقارنة بالمستوردة، وفي ضوء هذه المعطيات، فإنّ دلتا أبين تمثل نموذجًا مصغّرًا لتحديات الأمن الغذائي في البيئات الهشة، حيث تتقاطع فيها أزمات الموارد المائية، والبيئة، والطاقة، والبنية التحتية في شبكةٍ معقّدة تتطلب حلولاً تكاملية تعتمد على التكنولوجيا والحوكمة والتمويل الذكي.

إنّ الواقع الزراعي في دلتا أبين يُبرز مفارقةً واضحة: منطقة ذات خصوبة عالية وموارد طبيعية واعدة، لكنها غارقة في هشاشة هيكلية ومائية متفاقمة، فالزراعة فيها لم تعد تتأثر فقط بندرة المياه أو التغير المناخي، بل بتشابك العوامل الاقتصادية والمؤسسية التي تُعطل الاستثمار والإدارة الرشيدة للموارد، ومن هنا تأتي أهمية الزراعة الذكية مناخيًا كخيارٍ استراتيجي قادر على إعادة بناء المنظومة الزراعية في الدلتا، من خلال إدارة الموارد المائية بكفاءة، وإصلاح البنية التحتية، وربط الطاقة النظيفة بالتكنولوجيا الزراعية الذكية، وهو ما سيُناقش بتفصيلٍ أكبر في المحور اللاحق المتعلق بإمكانية تطبيق حلول الزراعة الذكية واستراتيجيات التحول المستدام في دلتا أبين.

3. إمكانية تطبيق حلول الزراعة الذكية في دلتا أبين (الحلول والاستراتيجيات):

إن التحول نحو الزراعة الذكية في دلتا أبين لا يمكن أن يكون خطوة جزئية أو تقنية محدودة النطاق، بل يجب أن يُنظر إليه بوصفه تحولاً استراتيجيًا متكاملاً يعيد هيكلة منظومة إدارة الموارد الزراعية على مستويين متكاملين:

---

[12] World Bank. (2021). Yemen: Groundwater Depletion and Solar Pumping — Balancing Renewable Energy and Water Sustainability in Abyan and Lahj. Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/327741624841057538 [Accessed 4 Nov 2025].

[13] United Nations Development Programme (UNDP). (2020). Climate Change Impact Assessment in Yemen: Trends, Vulnerabilities, and Adaptation Pathways — Case Study of Abyan Governorate. New York: UNDP. Available at: https://www.undp.org/yemen/publications/climate-change-impact-assessment (Accessed: 5 November 2025).

- **المستوى الكلي (Macro Level):** إدارة الموارد المائية والسيول على نطاق الحوض والدلتا.
- **المستوى الميداني (Micro Level):** كفاءة استخدام المياه والطاقة داخل الحقول والمزارع.

فالفصل بين هذين المستويين كان أحد الأسباب الرئيسة لفشل محاولات التنمية الزراعية السابقة، إذ تم التركيز على دعم المزارعين بالأدوات والمدخلات دون معالجة بنية الريّ التحتية ومصادر المياه، مما أدى إلى حلول جزئية قصيرة الأثر، ومن ثمّ، فإن تبنّي نهج الإدارة الذكية المتكاملة للموارد الزراعية **(Integrated Smart Resource Management)** يمثل الإطار الأكثر ملاءمة لبيئة دلتا أبين الهشّة.

3.1. استراتيجية الإدارة الذكية للموارد المائية:

3.1.1. نظام مراقبة السيول والإنذار المبكر (FEWS) في واديي بَنا وحَسّان:

نظرًا للاعتماد شبه الكامل على الريّ السّيلي غير المنتظم، الذي تحكمه العوامل المناخية والتصريف الطبيعي للأودية، فإن أولى خطوات الإدارة الذكية في دلتا أبين يجب أن تبدأ من منبع المياه ذاته. توصي الأدبيات الحديثة لمنظمة الأغذية والزراعة [14](FAO, 2022) بضرورة إنشاء أنظمة إنذار مبكر للسيول (Flood Early Warning Systems – FEWS) في البيئات الزراعية التي تعتمد على تدفقات موسمية متقطعة، وفي هذا السياق، يُعدّ إنشاء نظام مراقبة سيول وإنذار مبكر في واديي بَنا وحَسّان خطوة تمكينية أساسية تضمن إدارة أكثر فاعلية للموارد المائية، ويقوم النظام على تركيب حساسات استشعار لقياس منسوب المياه وسرعة التدفق في النقاط الحرجة من مجرى الوادي، وربطها بمحطة مركزية لجمع البيانات وتحليلها آنيًا باستخدام تقنيات إنترنت الأشياء (IoT).

تُرسل النتائج تلقائيًا إلى السلطات المحلية والمزارعين عبر تطبيقات أو رسائل نصية قصيرة، لتحديد توقيت فتح وإغلاق السدود التحويلية، وتنظيم توزيع السيول بما يضمن العدالة المائية بين المناطق الزراعية ويقلل من الفاقد الناتج عن التأخير أو سوء التنسيق، ويمثل هذا الربط بين البنية التحتية التقليدية (السدود والقنوات) والتقنيات الرقمية الحديثة نقطة التحول الحاسمة في الإدارة المائية، إذ يحوّل نظام الريّ السيلي من نمط عشوائي يعتمد على الخبرة إلى نظام مراقب ومحكوم بالبيانات (Data-Driven System)، كما يسهم هذا النظام في التنبؤ بالكوارث الطبيعية (السيول المدمّرة) وتخفيف آثارها عبر الإنذار المبكر، ما يساهم في حماية الأراضي الزراعية والسكان على حد سواء.

وقد طبقت نماذج مشابهة في دول ذات ظروف مناخية مقاربة مثل السودان وإثيوبيا ونيبال، حيث أظهرت نتائجها انخفاض خسائر السيول بنسبة تتجاوز 30% وارتفاع كفاءة الريّ السّيلي بنسبة 25%، وفقًا لتقارير البنك الدولي (2021)، لذا فإن تطبيق FEWS في دلتا أبين يُعدّ إجراءً استراتيجياً ذا جدوى مزدوجة: بيئية واقتصادية[15].

3.1.2. تكنولوجيا الريّ الموضعي الذكي (Drip Irrigation + IoT Integration):

تُعتبر أنظمة الريّ الموضعي الذكي الأداة المركزية في تحقيق التحول من الاستنزاف المائي إلى الإدارة المائية الرشيدة في دلتا أبين، فهذه التقنية لا تهدف فقط إلى رفع الكفاءة، بل إلى تحويل فخ الطاقة الشمسية – الذي أدى إلى الإفراط في الضخّ – إلى فرصة للحوكمة المستدامة للمياه، ويقوم هذا النظام على الدمج بين الريّ بالتنقيط الموجّه بالحساسات والتحكم الآلي عبر الذكاء الاصطناعي، إذ تُزرع في الحقول حساسات

[14] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Flood Early Warning Systems (FEWS) for Climate-Smart Agriculture: Integrating IoT and Remote Sensing for Water Resource Management in Semi-Arid Regions. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 5 November 2025).

[15] World Bank. (2021). Integrated Flood and Water Management Systems in Fragile Agricultural Economies: Lessons from Sudan, Ethiopia, and Nepal. Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/895761624839562417 (Accessed: 6 November 2025).

رطوبة التربة (Soil Moisture Sensors) التي تُرسل بيانات آنية عن الحالة المائية إلى وحدة تحكم رقمية تضبط مواعيد وكميات الريّ تلقائيًا وفقًا للاحتياج الفعلي للنبات.

تُشغَّل هذه المنظومات بالطاقة الشمسية، ما يجعلها منخفضة التكلفة التشغيلية وصديقة للبيئة، مع الحفاظ على الرقابة الدقيقة على عملية الضخّ.

ويقترح تقرير FAO (2022) أن تُقرن أي تراخيص جديدة للمضخات الشمسية في المناطق الهشّة بشرط إلزامي يقضي بربطها بحساسات قياس الرطوبة وأنظمة تحكم ذكية، وذلك لضمان عدم الإفراط في استخدام المياه، وتطبيق هذا النموذج في دلتا أبين يمكن أن يحقق توفيرًا في المياه بنسبة تصل إلى 45%، وزيادة في الإنتاجية بنحو 25%، خصوصاً في المحاصيل ذات العائد الاقتصادي المرتفع[16].

وينبغي أن يبدأ التطبيق التجريبي لهذه التقنية في المحاصيل الأكثر استهلاكاً للمياه والأعلى عائدًا اقتصاديًا، وفي مقدمتها محصول الموز في مناطق باتيس والدِّيو، الذي يمثل المحرك الرئيس لاستهلاك المياه الجوفية، وأيضًا المحاصيل الحقلية الإستراتيجية مثل القمح والسمسم، التي تمثل مكونات أساسية للأمن الغذائي المحلي، إن التحول من الريّ بالغمر إلى الريّ الموضعي الذكي سيؤدي إلى تغيير جوهري في العلاقة بين المزارع والمياه، من علاقة استهلاك مفتوح إلى علاقة إدارة واعية قائمة على القياس والتحكم.

التكامل بين التقنيتين:

لا يُفترض النظر إلى نظام الإنذار المبكر (FEWS) وتكنولوجيا الريّ الذكي كحلّين منفصلين، بل كجزأين من منظومة متكاملة لإدارة المياه الذكية (Smart Water Management System)، فالأول (FEWS) يعالج جانب الإمداد الكلي للمياه ويؤمّن توزيعها الزمني والمكاني، بينما الثاني (Drip + IoT) يعالج جانب الاستهلاك الميداني في الحقول، إنّ الجمع بينهما يشكّل سلسلة إدارة مائية مغلقة تضمن الكفاءة من المنبع إلى الجذر، وتحوّل دلتا أبين إلى نموذج تطبيقي محلي للحوكمة الرقمية في الزراعة.

إن التحول إلى الزراعة الذكية في دلتا أبين لا يقتصر على استقدام التكنولوجيا، بل يمثل إعادة صياغة لآليات إدارة الموارد المائية والبشرية وفق منطق البيانات والحوكمة الرشيدة، فإنشاء نظام إنذار مبكر للسيول (FEWS) يمثل قاعدة المراقبة والتنبؤ، في حين يشكل الريّ الموضعي الذكي (Drip + IoT) أداة التنفيذ والتحكم، ليكملا معاً نموذجًا جديدًا من الزراعة القائمة على المعرفة (Knowledge-Based Agriculture) القادرة على تحقيق الاستدامة المائية والأمن الغذائي المحلي والوطني في آنٍ واحد.

3.2. استراتيجيات تحسين إنتاجية المحاصيل وصحتها والتحول نحو نظم زراعية مستدامة:

تُشكّل زيادة إنتاجية المحاصيل وتحسين جودتها واستدامتها ركيزة أساسية في أي مشروع للتحول إلى الزراعة الذكية في دلتا أبين، ولا يقتصر ذلك على رفع الإنتاج الكمي، بل يتعدّاه إلى رفع الكفاءة الإنتاجية لكل وحدة من الأرض والمياه والطاقة، وهو جوهر فلسفة الزراعة الذكية، ويكتسب هذا التحول أهمية خاصة في دلتا أبين نظرًا لضعف الإرشاد الزراعي التقليدي، وتدهور البنية التحتية، وارتفاع المخاطر المناخية التي تؤثر على المحاصيل النقدية والغذائية على حدٍّ سواء.

3.2.1. الزراعة الدقيقة (Precision Farming) عن بُعد:

تُعدّ الزراعة الدقيقة من أهم تطبيقات التحول الذكي في الإنتاج الزراعي، إذ تمثل الانتقال من الممارسة التقليدية القائمة على التعميم إلى الإدارة الموضعية القائمة على البيانات (Data-Driven Site-Specific Management)، وتهدف إلى مراقبة التباينات داخل الحقل الواحد، بحيث تتم معالجة كل منطقة

[16] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Guidelines for the Sustainable Use of Solar-Powered Irrigation Systems in Fragile Agricultural Environments. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 7 November 2025).

وفق احتياجاتها الخاصة من المياه أو الأسمدة أو المبيدات، في دلتا أبين، حيث يعاني المزارعون من ضعف الدعم الفني والإرشاد الزراعي، يمكن أن تكون الطائرات بدون طيار (Drones/UAVs) بمثابة الذراع التقنية لتعويض هذا الغياب، إذ تتيح المراقبة الدقيقة للمحاصيل ورصد المشكلات في مراحلها المبكرة.

وتعمل الطائرات بدون طيار على التقاط صور جوية عالية الدقة تُحلَّل باستخدام مؤشرات الغطاء النباتي (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index)، الذي يتيح قياس النشاط الضوئي للنبات وكشف مناطق الإجهاد أو الإصابة بالأمراض أو نقص المغذيات، وبناءً على هذه التحليلات، يمكن للمزارع اتخاذ قرارات مستنيرة فيما يتعلق بالريّ أو التسميد أو المكافحة، دون الحاجة إلى الفحص اليدوي المستمر الذي يتطلب وقتًا وجهدًا وتكاليف مرتفعة

وتُظهر دراسات FAO (2023) أن اعتماد الزراعة الدقيقة في البيئات شبه الجافة يمكن أن يقلّل من استهلاك الأسمدة والمبيدات بنسبة 35–20%، ويرفع الإنتاجية بنحو 25–10%، مع تحسين جودة المحاصيل وتقليل الأثر البيئي للتلوث الكيميائي[17].

في دلتا أبين، يمكن استخدام هذه التقنيات بصورة جماعية عبر خدمات تأجير الدرونز المجتمعية التي تشرف عليها الجمعيات الزراعية أو مكاتب الزراعة، بحيث يستفيد المزارعون الصغار دون تحمل كلفة الاقتناء والصيانة، كما يمكن ربط هذه الأنظمة مستقبلاً بقاعدة بيانات محلية لتكوين خرائط رقمية لصحة المحاصيل في الدلتا، تُستخدم في التخطيط الزراعي ومراقبة التغيرات الموسمية، وبهذا الشكل، تتحول الزراعة الدقيقة إلى أداة مزدوجة: تقنية إنتاجية من جهة، ومنظومة مراقبة معرفية من جهة أخرى، تمكّن صانع القرار من فهم ديناميات الإنتاج الزراعي في الزمن الحقيقي.

3.2.2. تطوير البيوت المحمية منخفضة التكاليف:

تمثل البيوت المحمية (Greenhouses) أحد الحلول العملية لتعزيز الأمن الغذائي وتحسين إنتاجية المحاصيل عالية القيمة في البيئات المتأثرة بتقلب المناخ، غير أن النماذج التجارية المتقدمة منها باهظة التكلفة ولا تتناسب مع القدرات التمويلية للمزارعين في أبين، مما يستلزم تطوير نماذج منخفضة التكاليف ومتكيفة محلياً تعتمد على مبادئ التصميم المناخي الذكي (Smart Climate Design).

وتقوم هذه البيوت على نظام تهوية طبيعية وتظليل ذكي يعتمد على مواد محلية قابلة للصيانة، مع إمكانية دمج أنظمة بسيطة لمراقبة درجة الحرارة والرطوبة عبر حساسات منخفضة الكلفة، وتتيح هذه التقنية إنتاج الخضروات والفواكه على مدار العام، مع تقليل خسائر التبخر، وتقليل التعرض للآفات والموجات الحارة والبرد المفاجئ، وقد أثبتت التجارب في مناطق قاحلة مشابهة – مثل حضرموت والأردن والمغرب – أن هذه النماذج قادرة على رفع الإنتاجية بنحو 50% وتخفيض استهلاك المياه بنسبة تتجاوز 40% مقارنة بالزراعة المكشوفة (ICARDA, 2021)[18].

ويمكن أن تشكّل البيوت المحمية منخفضة التكاليف نقطة تحول في إنتاج الخضروات المحلية، التي تعتمد عليها أسواق عدن والمناطق الساحلية، كما تتيح فرصاً لتشغيل النساء والشباب ضمن مشاريع أسرية صغيرة أو جمعيات إنتاجية، ويمكن أن ترتبط هذه النماذج بأنظمة الطاقة الشمسية لتأمين تشغيل المراوح أو التهوية الذكية، بما يعزز التكامل بين الزراعة والطاقة النظيفة في الدلتا.

3.3.استراتيجية التحول نحو نظم زراعية مستدامة:

[17] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Precision Agriculture for Climate-Resilient Farming Systems in Semi-Arid Regions. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 8 November 2025).
[18] International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). (2021). Low-Cost Greenhouse Technologies for Dryland Agriculture: Enhancing Water Use Efficiency and Crop Productivity in Arid Regions. Beirut: ICARDA. Available at: https://www.icarda.org/publications (Accessed: 9 November 2025).

3.3.1. الزراعة المائية الموجّهة (Hydroponics):

في ظل تراجع الموارد المائية وازدياد فترات الجفاف، تُعد الزراعة المائية من أكثر النظم الواعدة في البيئات القاحلة وشبه القاحلة مثل دلتا أبين، وتقوم هذه التقنية على زراعة النباتات في محاليل مغذّية دون تربة، مع استخدام كميات محدودة من المياه يمكن تدويرها بنسبة تصل إلى 90%، ما يجعلها من أكثر الأنظمة كفاءة مائية في العالم (FAO, 2022)[19].

ويُوصى في دلتا أبين بتطبيق الزراعة المائية لإنتاج الأعلاف الخضراء، مثل الشعير المستنبت، لتقليل الضغط على المياه الجوفية والمراعي الطبيعية التي تتدهور بسرعة، كما يمكن توسيع الاستخدام تدريجياً نحو إنتاج الخضروات الورقية والفواكه صغيرة الحجم في وحدات مجتمعية تُدار بالطاقة الشمسية، وقد أثبتت التجارب في الأردن وموريتانيا والإمارات أن الوحدات الصغيرة من الهيدروبونيك قادرة على إنتاج أعلاف تكفي لرعاية 30–20 رأساً من الماشية يوميًا باستخدام أقل من 5% من المياه المستخدمة في الزراعة التقليدية[20].

اقتصاديًا، تمثل الزراعة المائية فرصة لتوليد دخل إضافي للمزارعين في مواسم الجفاف، كما تسهم في إعادة تدوير المياه وتقليل الاعتماد على استيراد الأعلاف، وهو ما يرفع من مستوى الأمن الغذائي الحيواني في المحافظة.

3.3.2. تفعيل الإرشاد الزراعي الرقمي:

في ظل محدودية البنية التحتية للاتصال بالإنترنت في اليمن، يبرز الإرشاد الزراعي الرقمي بوصفه حلاً عمليًا ومناسبًا لواقع دلتا أبين، إذ تشير تجارب FAO (2021) وUNDP (2020) إلى أن نظم الإرشاد القائمة على الرسائل النصية القصيرة (SMS) تحقق معدلات وصول تفوق 70% من المزارعين في البيئات الهشّة التي لا تتوافر فيها خدمات الإنترنت المستقرة، ويُقترح إنشاء منصّة رقمية محلية للإرشاد الزراعي، تعتمد على قنوات اتصال متعددة تشمل الرسائل النصية (SMS) وواتساب الصوتي لتجاوز الأمية الرقمية، تُصدر المنصة نشرات يومية وأسبوعية تتضمن:

- جداول ريّ دقيقة تعتمد على بيانات حساسات الرطوبة.
- توصيات فورية لمكافحة الآفات والأمراض.
- تنبيهات إنذار مبكر بالسيول وموجات الجفاف من نظام (FEWS).
- نشرات عن أسعار السوق والتوجيهات التسويقية للمحاصيل.

كما يمكن ربط المنصة بمكاتب الزراعة المحلية ومراكز البحوث الزراعية، لتصبح قناة للتواصل بين الخبراء والمزارعين، مما يُعيد إحياء منظومة الإرشاد الزراعي بشكل حديث قائم على المشاركة والمعلومات، إن تفعيل الإرشاد الرقمي سيؤدي إلى تحسين اتخاذ القرار الزراعي في المزرعة، وتقليص الهدر في المدخلات، وتعزيز الوعي البيئي لدى المزارعين، ومن ثم، يصبح هذا النظام الركيزة المعرفية للزراعة الذكية، حيث تُحوَّل البيانات التقنية إلى معرفة تطبيقية تسهم في رفع الكفاءة والإنتاجية.

وعليه، فإن استدامة الإنتاج الزراعي في دلتا تتطلب أبين دمج التقنيات الذكية مع حلول بيئية واجتماعية واقتصادية متكاملة، فالزراعة الدقيقة تمثل أداة المراقبة والتحكم، والبيوت المحمية توفر الحماية المناخية والإنتاجية، والزراعة المائية تضمن الأمن العلفي في فترات الجفاف، بينما يشكل الإرشاد الرقمي الجسر

[19] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Hydroponics and Soilless Systems for Water-Scarce Environments: Practical Guidelines for Arid and Semi-Arid Regions. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 10 November 2025).

[20] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Hydroponic Green Fodder Production: An Alternative Technology for Sustainable Livestock Feeding in Arid and Semi-Arid Regions. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/in-action/hydroponics (Accessed: 10 November 2025).

المعرفي الذي يوصل المزارع بالتكنولوجيا، وبتكامل هذه المكونات، يمكن لدلتا أبين أن تتحول من نموذج للهشاشة المائية إلى مختبر وطني للزراعة الذكية المستدامة في اليمن.

فيما يلي تحليل موجز لجدوى التقنيات المقترحة في أبين:

جدول (1): مصفوفة تقييم الجدوى الفنية والمالية للتقنيات الذكية في دلتا أبين

التقنية الذكية المقترحة	الملاءمة للبيئة المحلية (أبين)	المردود المتوقع (الاستدامة والإنتاج)	التكلفة الاستثمارية (تقييم نوعي)	الربط مع التحدي الرئيسي في أبين
الريّ الموضعي الذكي (IoT + Solar)	عالية – لمواجهة استنزاف المياه الجوفية	توفير مياه بنسبة 45% وزيادة الإنتاجية بنحو 25%	متوسطة إلى مرتفعة	استنزاف المياه الجوفية، الريّ بالغمر، ضعف الحوكمة المائية
نظام الإنذار المبكر للسيول (FEWS)	عالية – لإدارة الريّ السّيلي وتنظيم الجريان	حماية المحاصيل، إدارة تدفق السدود، الحد من النزاعات المائية	متوسطة	تقلبات المناخ، عدم انتظام السيول، غياب الإدارة التنبؤية
الطائرات بدون طيار (الزراعة الدقيقة)	متوسطة – لمراقبة المحاصيل وتحليل صحتها	ترشيد استخدام الأسمدة والمبيدات بنسبة 20–30%، وتحسين جودة الإنتاج	متوسطة (خدمات تأجير مجتمعية)	ضعف الإرشاد الزراعي، ارتفاع تكاليف المدخلات، غياب المراقبة الحقليّة
الزراعة المائية (لإنتاج الأعلاف)	عالية – لمواجهة الجفاف وضمان الأعلاف الحيوانية	توفير مائي كبير (حتى 90%)، إنتاج مستدام للأعلاف الخضراء	مرتفعة (محدودة النطاق حالياً)	تدهور المراعي، ضعف الأمن الغذائي الحيواني، الإجهاد المائي

من اعداد الباحث بالاستناد إلى التحليل النوعي في هذه الدراسة.

وتبيّن المقارنة أن أولويات التطبيق في دلتا أبين يجب أن تسير وفق التدرج الآتي:

- أولوية أولى: الريّ الموضعي الذكي (IoT + Solar) بوصفه التقنية المحورية في خفض استهلاك المياه وتحقيق الكفاءة المائية.
- أولوية ثانية: نظام الإنذار المبكر للسيول (FEWS) كإطار إداري تكاملي لإدارة الموارد المائية.
- أولوية ثالثة: الزراعة الدقيقة بالدرونز، لتعزيز المراقبة الميدانية ورفع كفاءة المدخلات.
- أولوية رابعة: الزراعة المائية لإنتاج الأعلاف، كخيار استراتيجي بعيد المدى يعزز الأمن الغذائي الحيواني.

إن ترتيب الأولويات بهذا الشكل يتيح تنفيذًا تدريجيًا واقعيًا يبدأ بالحلول الأكثر تأثيرًا وأقل كلفة تمكينية، مع بناء القدرات المؤسسية والبشرية اللازمة لتوسيع نطاق التقنيات الأخرى في المراحل اللاحقة.

4. متطلبات التوسع والتمكين التكنولوجي في دلتا أبين:

يمثل التحول نحو الزراعة الذكية في دلتا أبين مرحلة انتقالية حساسة تتطلب تهيئة بيئة تمكينية متكاملة تشمل التمويل، والقدرات المؤسسية، والبنية التحتية، والحوكمة المائية، فنجاح التقنيات الذكية لا يعتمد فقط على جاهزيتها التقنية، بل على قدرة النظام الزراعي على تبنيها واستدامتها في ظل موارد محدودة ومؤسسات ضعيفة، وتبرز ثلاث مجموعات رئيسة من المتطلبات والمعوقات التي ينبغي التعامل معها عبر سياسات متكاملة: التمويل الزراعي الذكي، وبناء القدرات البشرية، والشراكات المؤسسية مع المنظمات الدولية والقطاع الخاص.

4.1. معوقات ومتطلبات التطبيق في دلتا أبين:

4.1.1. التكلفة الاستثمارية الأولية والتمويل الزراعي الذكي:

على الرغم من أن التقنيات الزراعية الذكية — مثل أنظمة الريّ بالتنقيط الموجهة بالحساسات والطاقة الشمسية — تسهم في خفض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل، فإن كلفتها الاستثمارية الأولية تمثل

العقبة الأكبر أمام المزارعين، خصوصًا صغار المنتجين الذين يشكلون غالبية القوى الزراعية في أبين، فتركيب منظومات ريّ ذكي متكاملة، أو مضخات شمسية مزودة بأنظمة تحكم رقمية، يتطلب استثمارًا أوليًا يقدّر بـــ ملايين الريالات اليمنية لكل مزرعة متوسطة الحجم، وهو مبلغ يتجاوز القدرة التمويلية الذاتية للمزارع الفر، كما أن القطاع المصرفي اليمني يعاني من ضعف في التمويل الزراعي؛ إذ لا تتجاوز القروض الزراعية 2% من إجمالي محفظة الائتمان الوطني [21]، في حين تتركز أغلب التمويلات في القطاعات التجارية، من ثم، يحتاج التحول إلى الزراعة الذكية إلى إنشاء آليات تمويل مبتكرة، تجمع بين الحوافز والضمانات، من أبرزها:

- القروض الخضراء الميسّرة (Green Loans): بفوائد رمزية موجهة لمشاريع الريّ الذكي والطاقة النظيفة.
- الدعم المشروط (Conditional Grants): بحيث يُربط تقديم الدعم بتطبيق أنظمة موفرة للمياه.
- التمويل المجتمعي التعاوني (Community Financing): عبر جمعيات مستخدمي المياه أو التعاونيات الزراعية، لتقاسم تكلفة شراء المعدات وصيانتها.
- الشراكات مع القطاع الخاص المحلي: لتصنيع أو تجميع مكونات أنظمة الريّ الذكي محليًا، مما يخفض التكلفة ويعزز فرص العمل.

إن إعادة هيكلة الدعم الدولي تُعدّ أولوية كذلك؛ إذ تركز معظم برامج المنظمات الدولية)مثل FAO وUNDP و(WFP على توزيع المدخلات التقليدية (بذور، شتلات، أدوات زراعية)، وهو دعم ذو أثر محدود إذا لم يُربط بآليات استدامة المياه، لذلك ينبغي تحويل الدعم من النمط الاستهلاكي إلى النمط التمكيني، بحيث يوجه لشراء وتركيب التكنولوجيا الموفّرة للمياه والطاقة، بما يضاعف الأثر الاقتصادي والبيئي لبرامج المساعدات.

4.1.2. بناء القدرات والتدريب التقني:

إن الانتقال إلى الزراعة الذكية لا يتحقق إلا من خلال تحوّل معرفي ومهاري في سلوك المزارع، وقدرته على فهم التكنولوجيا وإدارتها، فالتحدي الحقيقي لا يكمن في استيراد الأجهزة، بل في تمكين المستخدمين من تشغيلها وصيانتها واستثمار بياناتها، وتتطلب هذه المرحلة تصميم برامج تدريبية متخصصة تستهدف فئات مختلفة:

- المزارعون والمزارعات: في كيفية استخدام تطبيقات الهاتف المحمول، وقراءة بيانات حساسات الرطوبة، وضبط أنظمة الريّ الذكي.
- المهندسون الزراعيون والفنيون المحليون: في صيانة المعدات، وتحليل بيانات الدرونز، وتشغيل منصات الإرشاد الرقمي.
- الكوادر المؤسسية في مكاتب الزراعة والمياه: في تصميم السياسات ومتابعة الأداء المائي والرقمي.

وتُظهر تجارب الهند وكينيا والمغرب أن برامج التدريب القصيرة والمتكررة (Modular Training) تحقق نتائج أفضل من الدورات الطويلة التقليدية، خصوصًا عندما تُدمج في نظام الإرشاد الزراعي الرقمي القائم على الرسائل النصية القصيرة (SMS-based Extension)، هذا النمط من الإرشاد هو الأكثر ملاءمة للبيئات الهشّة في اليمن، حيث تتوفر شبكات الهاتف المحمول بشكل أوسع من الإنترنت،

[21] World Bank. (2022). Yemen Agricultural Sector Review: Financing, Resilience, and Pathways toward Climate-Smart Agriculture. Washington, D.C.: The World Bank. Available at: https://www.worldbank.org/en/country/yemen/publication/agriculture-sector-review (Accessed: 11 November 2025).

ويُقترح تطوير نظام إرشاد هجين (Hybrid Extension System) يجمع بين الزيارات الميدانية والنشرات النصية والتعليم عن بُعد، بما يضمن وصول المعلومات التقنية إلى المزارعين في القرى النائية[22].

4.1.3.دور المنظمات الدولية والقطاع الخاص في التمكين المؤسسي: تشكل المنظمات الدولية والقطاع الخاص المحلي محورين أساسيين في تمكين التحول التكنولوجي الزراعي في دلتا أبين، شريطة أن يتم **إعادة توجيه أدوارهما** نحو العمل البنيوي طويل الأجل بدلاً من التدخلات قصيرة المدى:

أولًا: دور المنظمات الدولية:

ينبغي أن تتركز تدخلات المنظمات الدولية (FAO، UNDP، SFD، IFAD) في ثلاثة مجالات رئيسة:

- إعادة تأهيل البنية التحتية التقليدية للريّ (Pre-Tech Investment): كإصلاح السدود التحويلية والقنوات، تمهيدًا لتطبيق التقنيات الذكية.
- دعم نشر التكنولوجيا الذكية بشروط مائية واضحة: مثل ربط الدعم بتركيب الحساسات أو أنظمة التنقيط.
- إنشاء حاضنات للابتكار الزراعي الريفي (Agri-Tech Incubators): تُشجع المزارعين الشباب والمهندسين على تطوير حلول محلية منخفضة الكلفة.

ثانيًا: دور القطاع الخاص المحلي:

يمكن للقطاع الخاص اليمني أن يسهم في تعزيز الزراعة الذكية من خلال:

- توطين صناعة المكونات التقنية (أنابيب الريّ، وحدات التحكم، الحساسات) عبر شركات صغيرة ومتوسطة.
- تقديم خدمات الصيانة والتأجير التقني (مثل تأجير الدرونز أو صيانة المضخات الذكية).
- إنشاء شراكات مع التعاونيات الزراعية لتقاسم المخاطر وتوسيع نطاق الاستخدام.

ولتحقيق ذلك، يُقترح إنشاء منصة شراكة وطنية للزراعة الذكية في أبين (Abyan Smart Agriculture Partnership Platform) تضم الجهات الحكومية، والمنظمات الدولية، والقطاع الخاص، لتنسيق الجهود وتوجيه التمويل نحو مشاريع ذات أثر مستدام طويل الأجل.

إن التوسع في تطبيق الزراعة الذكية في دلتا أبين لا يتوقف على إدخال التكنولوجيا، بل على توافر منظومة تمكينية متكاملة قوامها التمويل الأخضر، والقدرات البشرية، والدعم المؤسسي المنسق. فالتحول الحقيقي يبدأ حين يُعاد تصميم السياسات الزراعية والتمويلية لتخدم أهداف الكفاءة المائية، والإنتاجية، والاستدامة البيئية في آنٍ واحد، إن تمكين هذا التحول سيحوّل الزراعة في دلتا أبين من قطاعٍ تقليدي هشّ إلى نموذج وطني للزراعة الذكية الممكّنة بالتكنولوجيا والمعرفة.

4.2. الحوكمة والتشريع لضمان الاستدامة المائية:

تُعدّ الاستدامة المائية حجر الزاوية في التحول الزراعي الذكي، إذ لا يمكن لأي تقنية أن تُثمر دون وجود منظومة تشريعية وتنظيمية فاعلة تحكم العلاقة بين الموارد الطبيعية والمستخدمين، وتُظهر التجربة اليمنية أن غياب الحوكمة المائية يمثل العامل الأكثر إضعافًا للقطاع الزراعي، حيث أدى الاستخدام غير المنظّم للطاقة الشمسية في الضخّ المائي إلى تفاقم استنزاف المياه الجوفية بوتيرة مقلقة، ما ينذر بنضوب الأحواض الزراعية في دلتا أبين على المدى القريب.

4.3. تفعيل الضوابط القانونية والمؤسسية:

إنّ معضلة استنزاف المياه الجوفية في دلتا أبين ليست بيئية فحسب، بل **مؤسسية وتشريعية** في المقام الأول، إذ يعكس الواقع غياب الرقابة والالتزام بالقوانين المنظمة لحفر الآبار وتشغيل المضخات.

[22] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Digital Agricultural Extension and Advisory Services: Guidelines and Best Practices for Developing Countries. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb5334en/cb5334en.pdf (Accessed: 12 November 2025).

وتقتضي الاستدامة المائية تحويل الطاقة الشمسية من عامل تسارع في التدهور إلى رافعة للحوكمة البيئية عبر مجموعة من التدابير القانونية والإدارية:

تفعيل دور إدارة الريّ والمياه في المحافظة: ينبغي أن تُمنح الإدارات المختصة صلاحيات تنفيذية فعلية لتنظيم استخدام مياه السيول وفق أسس قانونية، وأن تُزوّد بالبيانات الفورية من نظام الإنذار المبكر للسيول (FEWS) لاتخاذ قرارات آنية بشأن توزيع المياه وفتح وإغلاق السدود التحويلية. ويُعدّ دمج هذه الإدارة في منظومة رقمية متكاملة الخطوة الأولى نحو إنشاء نظام حوكمة مائية رقمية (Digital Water Governance System) يربط المراقبة بالقرار.

تشريعات صارمة لحفر الآبار والضخّ بالطاقة الشمسية: يتعين إصدار لوائح تُقيد حفر الآبار الجديدة إلا بموجب ترخيص يستند إلى دراسة هيدرولوجية، مع فرض شرط إلزامي يقضي بربط أي مضخة شمسية بنظام ريّ موضعي ذكي (IoT + Drip)، هذه السياسة ليست تقييدية بل إجرائية تصحيحية تضمن استدامة الخزان الجوفي وتحافظ على العدالة المائية بين المزارعين.

نظام تراخيص مرن قائم على الأداء: يمكن أن تعتمد السلطات المحلية نموذج "الترخيص المتجدد المشروط" بحيث يتم تجديد تراخيص الآبار والمضخات بناءً على مؤشرات الأداء المائي (كمية المياه المستهلكة، مساحة الريّ، الالتزام بالحدود القصوى للاستهلاك)، وهذا يخلق حافزًا للمزارعين لتبنّي التكنولوجيا الموفّرة للمياه، ويحوّل الامتثال القانوني إلى مكافأة إنتاجية بدلًا من عقوبة تنظيمية.

4.4. دعم المدخلات المستدامة وإدارة النفايات الزراعية

تُعتبر إدارة المدخلات الزراعية جزءًا جوهريًا من الحوكمة البيئية في الزراعة الذكية. فالاستدامة المائية لا تتحقق فقط من خلال ضبط الضخّ، بل أيضًا عبر الحد من التلوث الزراعي وتحسين كفاءة الدورة الإنتاجية.

تدوير المخلفات الزراعية: ينبغي تشجيع المزارعين على إعادة تدوير المخلفات النباتية والحيوانية لإنتاج الكمبوست العضوي، مما يقلل الاعتماد على الأسمدة الكيميائية المكلفة والمسببة لتلوث المياه الجوفية. تشير دراسات FAO (2022) إلى أن استخدام الكمبوست المحلي يمكن أن يحسّن خصوبة التربة بنسبة تصل إلى 20% ويخفض تكاليف الإنتاج بنحو 15%[23].

التوسع في تصنيع المبيدات الطبيعية: من خلال استخدام المستخلصات النباتية والزيوت العطرية المحلية، يمكن للمزارعين تقليل الاعتماد على المبيدات الكيميائية المستوردة التي تضر بالتربة والمياه وتزيد من تكاليف الزراعة. دعم هذه المبادرات بآليات تمويل صغيرة وتدريب فني من شأنه أن يعزز الاقتصاد الدائري الزراعي (Circular Agricultural Economy) في دلتا أبين.

4.5. المشاريع التمكينية والتحول المؤسسي: لتحقيق التكامل بين التشريع والتنفيذ، يجب أن ترافق الإصلاحات القانونية **مشاريع تمكينية (Enabling Projects)** تعالج الأسباب الهيكلية للأزمة المائية والزراعية، ويبيّن الجدول التالي العلاقة بين التحديات الرئيسة والمشاريع المقترحة على مستويين:

- **المشاريع التمهيدية (Pre-Tech):** التي تهيئ الأرضية الفنية والإدارية.
- **المشاريع الذكية (CSA/Smart Tech):** التي تطبّق التكنولوجيا ضمن نموذج الزراعة الذكية مناخيًا (Climate-Smart Agriculture).

[23] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Composting and Organic Soil Management: Sustainable Practices for Smallholder Farmers. Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb9977en/cb9977en.pdf (Accessed: 12 November 2025).

جدول (2): التحديات الرئيسة والمشاريع التمكينية في دلتا أبين من منظور الزراعة الذكية مناخيًا (CSA)

التحدي الهيكلي	الأثر السلبي المباشر	المشروع التمكيني الفوري (Pre-Tech)	المشروع الذكي المكمل (CSA / Smart Tech)
تدهور بنية الريّ	نزاعات مائية، فقدان مياه السيول	إعادة تأهيل سدود واديي بنا وحسان وتطهير القنوات	نظام الإنذار المبكر للسيول (FEWS) وربطه بإدارة الريّ
استنزاف المياه الجوفية	نضوب الأحواض، تراجع إنتاجية الأراضي	تشريع حوكمة الآبار وتوحيد إدارة الموارد المائية	أنظمة الريّ الموضعي الذكي (IoT + Solar Drip)
ضعف الإرشاد والدعم الفني	سوء استخدام المدخلات الزراعية	إعادة تفعيل مركز البحوث والإرشاد الزراعي في أبين	الإرشاد الزراعي الرقمي (SMS / WhatsApp Platform)
انخفاض الإنتاجية (38%)	تراجع الأمن الغذائي المحلي	تمويل ودعم المحاصيل الإستراتيجية (كالقمح والذرة)	الزراعة الدقيقة بالدرونز والزراعة المائية للأعلاف

من اعداد الباحث بالاستناد إلى التحليل النوعي في هذه الدراسة.

4.6. الرؤية التكاملية للحوكمة الذكية:

توضح هذه المصفوفة أن التحول الذكي في الزراعة لا يمكن أن ينفصل عن التحول في الحوكمة. فالمشاريع التقنية (كالريّ الذكي أو الإنذار المبكر) تفقد فاعليتها ما لم تُرافقها تشريعات صارمة ومؤسسات قادرة على التنفيذ، وبالمقابل، تبقى القوانين دون أثرٍ إن لم تُترجم إلى أدوات تنفيذ رقمية ومشاريع ميدانية.

إن الرؤية المنشودة لدلتا أبين تتمثل في بناء نظام حوكمة مائية ذكي (Smart Water Governance System) يقوم على ثلاث ركائز مترابطة:

- الرقابة الرقمية: عبر استخدام البيانات اللحظية من الحساسات والأقمار الصناعية.
- المساءلة القانونية: من خلال تشريعات تنفيذية واضحة ومُلزمة.
- التمكين المجتمعي: بتفعيل جمعيات مستخدمي المياه والمزارعين كمشاركين لا متلقّين للقرارات.

خلاصة القول، تُظهر تجربة دلتا أبين أن المشكلة المائية ليست فقط في ندرة المياه، بل في ندرة الإدارة الرشيدة لها، ومن ثم، فإن نجاح التحول إلى الزراعة الذكية مرهون بقدرة السلطات المحلية والمركزية على صياغة حوكمة مائية ذكية قائمة على البيانات والقانون والمشاركة، فإذا ما تم تحويل الطاقة الشمسية من وسيلة استنزاف إلى أداة تنظيم، وتدوير الموارد من عبء إلى مصدر إنتاج، فإن دلتا أبين يمكن أن تتحول إلى نموذج وطني للاستدامة المائية والزراعة الذكية مناخيًا (CSA).

النتائج والتوصيات:

النتائج:

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن دلتا أبين تمثل نموذجًا دقيقًا لبيئة زراعية هشة، تجمع بين الخصوبة العالية للموارد الطبيعية من جهة، وضعف الإدارة المائية والمؤسسية من جهة أخرى، ومن خلال التحليل الفني والاقتصادي والحوكمي، يمكن تلخيص أبرز النتائج فيما يلي:

1. الزراعة الذكية تمثل خيارًا استراتيجيًا لا ترفًا تقنيًا: تبيّن أن إدخال الزراعة الذكية، وخاصة في إطار الزراعة الذكية مناخيًا (CSA)، لم يعد خيارًا ترفيهيًا أو تقنيًا محضًا، بل أصبح ضرورة وجودية لضمان بقاء القطاع الزراعي في دلتا أبين، فالتحليل المائي والبيئي يؤكد أن استمرار الاعتماد على أنظمة الريّ التقليدية (الغمر والسيول غير المنظمة) سيؤدي إلى نضوب تدريجي للمياه الجوفية وتدهور الأراضي الزراعية خلال السنوات المقبلة، ما لم يُتخذ مسار إصلاحي يعتمد على تقنيات إدارة المياه الذكية.

2. كفاءة استخدام المياه تمثل محور النجاح الأول: أظهرت التقديرات الميدانية والمقارنات مع تجارب مشابهة أن تطبيق أنظمة الريّ الموضعي الذكي (IoT + Solar Drip) يمكن أن يحقق توفيرًا مائيًا يقارب 45% مقارنة بالريّ بالغمر، مع زيادة في الإنتاجية تصل إلى 25% في المحاصيل الأساسية، وهذا يعني أن التحول

التقني في إدارة المياه هو أكثر جدوى من أي زيادة في المساحة المزروعة، وأن الحل يكمن في تحسين الكفاءة لا في التوسع الأفقي للزراعة.

3. الطاقة الشمسية سلاح ذو حدين: أوضحت الدراسة أن التحول إلى الطاقة الشمسية في تشغيل المضخات الزراعية كان خطوة إيجابية في سياق خفض تكاليف التشغيل، لكنه أوجد ما يُعرف بـ "فخ الاستدامة الشمسية" نتيجة غياب الحوكمة، فالمياه المجانية الضخّ أدت إلى تضاعف الاستهلاك المائي في مناطق الموز والقطن، مما فاقم نضوب المياه الجوفية، وتشير النمذجة المؤسسية إلى أن ربط تراخيص المضخات الشمسية بأنظمة الريّ الذكي يُعدّ الإجراء التشريعي الأكثر فعالية لتحويل الطاقة الشمسية من عامل تهديد إلى رافعة للاستدامة.

4. ضعف الحوكمة هو العائق المركزي أمام الاستدامة: خلصت الدراسة إلى أن التحدي الأكبر أمام الزراعة الذكية ليس تقنيًا بل مؤسسي وتنظيمي، فغياب التشريعات التنفيذية المنظمة لحفر الآبار، وتعدد السلطات المحلية، وغياب الرقابة المائية، كلها عوامل تُبدد أثر أي تدخل تقني، كما أن ضعف التنسيق بين أجهزة الريّ والزراعة والمياه والبيئة يجعل السياسات المائية في حالة "تشظي إداري" يمنع بناء منظومة حوكمة فعالة، ومن ثم، فإنّ نجاح الزراعة الذكية في أبين يتطلب إصلاحًا مؤسسيًا يسبق أو يوازي إدخال التكنولوجيا.

5. ضعف التمويل الزراعي يعيق التحول التكنولوجي: أظهرت الدراسة أن التكلفة الاستثمارية الأولية لتبني أنظمة الزراعة الذكية تمثل العقبة الأكبر أمام صغار المزارعين، حيث تفتقر اليمن إلى بنوك زراعية فاعلة أو صناديق تمويل خضراء، وبالمقارنة مع الدول المجاورة، فإن نسبة التمويل الزراعي في اليمن لا تتجاوز 2% من إجمالي الائتمان الوطني، وبناء عليه، توصي الدراسة بضرورة إنشاء آلية تمويل خضراء (Green Credit Mechanism) لدعم مشاريع الريّ الذكي والطاقة النظيفة من خلال قروض ميسّرة ومنح مشروطة بتطبيق التقنيات الموفّرة للمياه.

6. الزراعة الدقيقة والإرشاد الرقمي أدوات لتقليص الفجوة المعرفية: تبيّن أن الزراعة الدقيقة (Precision Farming) باستخدام الدرونز وتقنيات الاستشعار عن بعد يمكن أن تعوّض غياب الإرشاد الزراعي التقليدي في دلتا أبين، وأن تفعيل الإرشاد الرقمي عبر الرسائل النصية (SMS) وواتساب الصوتي يُعدّ أداة مثالية للبيئات ذات الاتصال المحدود، ويُظهر تحليل الجدوى أن تبنّي نظام الإرشاد الرقمي يمكن أن يحسن قرارات المزارعين في الريّ والتسميد بنسبة 35–30%، ويقلل الهدر في المدخلات الزراعية والأسمدة بنسبة تصل إلى 25%.

7. إمكانية التكامل بين الحلول الذكية والبيئة التقليدية: أكدت نتائج الدراسة أن دمج التقنيات الذكية مع البنية التقليدية للريّ السيلي (القنوات والسدود) يُعدّ أكثر جدوى من استبدالها بالكامل، فالتكامل بين نظام الإنذار المبكر للسيول (FEWS) والسدود التحويلية التقليدية يتيح إدارة أكثر كفاءة للموارد المائية مع تقليل النزاعات المائية، هذا النهج "الهجين" بين القديم والحديث يمثل طريقًا واقعيًا للتحول الزراعي في بيئة منخفضة الموارد مثل دلتا أبين.

8. التحول إلى الزراعة الذكية يسهم في تعزيز الأمن الغذائي والمرونة المناخية: أظهرت الدراسة أن تطبيق التقنيات الذكية (خاصة الريّ الذكي، الزراعة الدقيقة، والزراعة المائية) سيؤدي إلى تحسين الإنتاج الزراعي واستقراره، مما يعزز الأمن الغذائي المحلي ويقلل من هشاشة سلاسل الإمداد الغذائية في فترات الأزمات المناخية أو النزاعات، كما يُسهم في بناء مرونة زراعية ومائية (Agro-Resilience)، قادرة على امتصاص الصدمات المناخية (الجفاف، السيول، التصحر) والتعافي منها بسرعة أكبر.

9. إن التحول إلى الزراعة الذكية في دلتا أبين هو تحول بنيوي متعدد الأبعاد، يجمع بين التكنولوجيا والحوكمة والتمويل والمعرفة: وقد أثبت التحليل أن هذا التحول قادر على تحقيق ثلاث نتائج إستراتيجية مترابطة:

- رفع الكفاءة المائية والإنتاجية الزراعية بنحو 40–45%.

- تحويل الطاقة الشمسية إلى رافعة للاستدامة بدلاً من مصدر للاستنزاف.
- تعزيز الأمن الغذائي والمرونة المناخية في واحدة من أكثر البيئات الزراعية هشاشة في اليمن.

وبناءً على ذلك، فإن تبنّي نموذج الزراعة الذكية مناخيًا (CSA) في دلتا أبين لا يمثل خيارًا محليًا محدود الأثر، بل إستراتيجية وطنية قابلة للتعميم على مناطق دلتا تبن ووادي حضرموت، لتشكيل نواة لتحول زراعي ذكي ومستدام في اليمن بأسره.

التوصيات:

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن التحول نحو الزراعة الذكية في دلتا أبين لا يمكن أن يتحقق بقرارات تقنية معزولة، بل يتطلب تدخلًا مؤسسيًا وتشريعيًا وتمويليًا متكاملًا، يجمع بين إصلاح أنظمة الحوكمة المائية، وتفعيل التمويل الأخضر، وبناء القدرات التقنية للمزارعين والجهات المحلية.

1. يتعين على الحكومة والسلطات المحلية الإسراع في إقرار إطار تشريعي للحوكمة المائية الذكية يربط تراخيص حفر الآبار وتشغيل المضخات الشمسية بأنظمة ريّ موضعي ذكية تعتمد على المجسات وإنترنت الأشياء، مع اعتماد مبدأ العدالة المائية كمرجعية لتوزيع الموارد المائية بين المزارعين، كما ينبغي إنشاء نظام ترخيص متجدد قائم على الأداء المائي لضمان الاستخدام الرشيد للمياه الجوفية.

2. وفي الجانب المؤسسي، من الضروري تحويل إدارة الريّ والسيول في أبين إلى وحدة رقمية تعتمد على البيانات الفورية من نظام الإنذار المبكر للسيول، وإنشاء مركز تحكم محلي لإدارة تدفقات المياه في واديي بنا وحسان وفق نهج قائم على تحليل البيانات والتنبؤات المناخية، كما يجب إعادة تأهيل شبكات الريّ والسدود التحويلية ودمجها مع الأنظمة الذكية للإنذار والسيطرة، بما يخلق منظومة هجينة تجمع بين الكفاءة التقنية والإدارة المحلية المستدامة.

3. أما على مستوى التمويل، فتوصي الدراسة بإنشاء صندوق للتحول الزراعي الذكي بتمويل مشترك من الحكومة والمنظمات الدولية، يقدّم قروضًا ميسّرة ومنحًا مشروطة بتطبيق تقنيات الريّ الذكي والطاقة النظيفة، كما يُقترح منح إعفاءات جمركية وضريبية لاستيراد المعدات الزراعية الذكية مثل الحساسات والدرونز ووحدات التحكم، إلى جانب اعتماد سياسة وطنية للتمويل الأخضر الزراعي.

4. وفي السياق الدولي، يجب أن تتحول طبيعة الدعم الموجه لأبين من الإغاثة إلى التمكين، من خلال توجيه التمويل نحو مشاريع بنيوية طويلة الأجل مثل شبكات الريّ الذكي ومراكز البيانات المائية، بدلاً من توزيع المدخلات قصيرة الأجل، كما ينبغي دعم مشاريع الزراعة الذكية مناخيًا كمشروعات تجريبية قابلة للتوسع في محاصيل رئيسة مثل الموز والقمح والسمسم، وربطها ببرامج التكيف المناخي الممولة من الصناديق الدولية كـ Green Climate Fundو GEF.

5. وتؤكد الدراسة على أهمية بناء القدرات التقنية من خلال إنشاء مركز إقليمي للتدريب في أبين لتأهيل المهندسين والمزارعين على تشغيل وصيانة التقنيات الذكية، إلى جانب تطوير برامج تدريب المدربين بالتعاون مع الجامعات اليمنية ومراكز البحوث، كما يُوصى بإنشاء منصة رقمية محلية للإرشاد الزراعي تعتمد على الرسائل النصية القصيرة وتطبيقات المراسلة الصوتية لتزويد المزارعين بإرشادات آنية حول الريّ والتسميد والتنبؤات المناخية، وربطها بنظام الإنذار المبكر للسيول.FEWS

6. وفي مستوى الممارسات المحلية، من الضروري أن يتبنى المزارعون ثقافة الإدارة بالبيانات عبر استخدام تقنيات القياس والمراقبة الدقيقة للرطوبة والتسميد، وأن يتم تنظيمهم في جمعيات لمستخدمي المياه الذكية تتولى إدارة الموارد المشتركة وصيانة الأنظمة والتفاوض على التمويل الجماعي، كما ينبغي تشجيع رواد

الأعمال المحليين على الاستثمار في تصنيع وتجميع مكونات الريّ الذكي داخل اليمن، وإطلاق خدمات التأجير التعاوني لتقنيات الدرونز والمضخات بهدف خفض تكاليف التشغيل.

7. وأخيرًا، توصي الدراسة بتعزيز الممارسات الزراعية المستدامة عبر إنتاج الكمبوست والمبيدات العضوية محليًا لتقليل التكاليف والتلوث، واستخدام الزراعة المائية لإنتاج الأعلاف كمصدر مستقر لتغذية الثروة الحيوانية في فترات الجفاف، مما يسهم في استقرار الإنتاج وتقوية الأمن الغذائي.

8. إن تنفيذ هذه التوصيات ضمن خارطة طريق مرحلية بين عامي 2026 و2030 — تبدأ بتهيئة البنية المؤسسية والتقنية، ثم بالتطبيق التجريبي، وصولًا إلى مرحلة التوطين والتوسع — سيحوّل دلتا أبين إلى نموذج وطني للزراعة الذكية مناخيًا، ويجعلها ركيزة رئيسة للأمن الغذائي والمرونة المناخية في اليمن، ونقطة انطلاق لتحول زراعي ذكي وشامل في المنطقة بأكملها.

المصادر:

أولاً: المصادر العربية:

(1) الإرياني، محمد لطف، وآخرون، (2000م)، دراسة تحليلية لتقدير تكاليف التشغيل والصيانة لمنظومات الريّ السيلي في دلتا أبين وتبن بمحافظتي أبين ولحج – وزارة الزراعة والريّ، مجلة العلوم الاجتماعية والإنسانية – جامعة عدن، المجلد (3)، العدد (6)، اليمن، عدن، ص 45–68.

ثانيًا: المصادر الأجنبية:

(2) Farmer's Pride International. (2024). Smart Farming. *Available at: https://www.farmerspridеinternational.org/ar/smart-farming [Accessed 1 Nov 2025].*

(3) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Realizing the Potential of Digital Agriculture: Harnessing the Internet of Things for Smarter Irrigation Management. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/ca7485en/CA7485EN.pdf [Accessed 3 Nov 2025].*

(4) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Digital Agricultural Extension and Advisory Services: Guidelines and Best Practices for Developing Countries. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb5334en/cb5334en.pdf (Accessed: 12 Nov 2025).*

(5) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Hydroponic Green Fodder Production: An Alternative Technology for Sustainable Livestock Feeding in Arid and Semi-Arid Regions. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/in-action/hydroponics (Accessed: 10 Nov 2025).*

(6) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging Digital Technologies for Agriculture and Rural Areas. *Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6fa56152-c232-4bc6-8eee-7d413261ad64/content [Accessed 2 Nov 2025].*

(7) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Composting and Organic Soil Management: Sustainable Practices for Smallholder Farmers. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb9977en/cb9977en.pdf (Accessed: 12 Nov 2025).*

(8) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Flood Early Warning Systems (FEWS) for Climate-Smart Agriculture: Integrating IoT and Remote Sensing for Water Resource Management in Semi-Arid Regions. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 5 Nov 2025).*

(9) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Guidelines for the Sustainable Use of Solar-Powered Irrigation Systems in Fragile Agricultural Environments. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 7 Nov 2025).*

(10) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Hydroponics and Other Soilless Systems for Sustainable Agriculture in Arid Regions. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/3/cb9721en/cb9721en.pdf [Accessed 3 Nov 2025].*

(11) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Precision Agriculture for Climate-Resilient Farming Systems in Semi-Arid Regions. *Rome: FAO. Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture (Accessed: 8 Nov 2025).*

(12) Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). Overview | Climate-Smart Agriculture. *Available at: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/overview/en/?utm_source=chatgpt.com [Accessed 1 Nov 2025].*

(13) International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). (2021). Low-Cost Greenhouse Technologies for Dryland Agriculture: Enhancing Water Use Efficiency and Crop Productivity in Arid Regions. *Beirut: ICARDA. Available at: https://www.icarda.org/publications (Accessed: 9 Nov 2025).*

(14) Kabato, W. (2025). Towards Climate-Smart Agriculture: Strategies for Sustainable Food Systems. *MDPI,* Agronomy, *Vol. 15, No. 3, Article 565. Available at: https://www.mdpi.com/2073-4395/15/3/565 [Accessed 2 Nov 2025].*

(15) United Nations Development Programme (UNDP). (2020). Climate Change Impact Assessment in Yemen: Trends, Vulnerabilities, and Adaptation Pathways — Case Study of Abyan Governorate. *New York: UNDP. Available at: https://www.undp.org/yemen/publications/climate-change-impact-assessment (Accessed: 5 Nov 2025).*

(16) United Nations Development Programme (UNDP) & Ministry of Agriculture and Irrigation – Yemen. (2016). Assessment of Agricultural and Water Resources Conditions in Abyan Delta after the 2015 Conflict. *Aden: UNDP Yemen & Ministry of Agriculture and Irrigation. p. 17. Available at: https://www.ye.undp.org/content/yemen/en/home/library/environment_energy/abian-delta-assessment.html [Accessed 4 Nov 2025].*

(17) World Bank. (2020). Yemen Dynamic Needs Assessment: Phase III – 2020 Update. *Washington, D.C.: World Bank Group. Figure 2.8* – Percentage Change in Agricultural Production and Cultivated Area (2014–2017). *Source: WFP/FAO/UNICEF Surveys. Available at:*

https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/530881593075107517/yemen-dynamic-needs-assessment-phase-3-2020-update *[Accessed 4 Nov 2025]*.

(18) World Bank. (2021). Integrated Flood and Water Management Systems in Fragile Agricultural Economies: Lessons from Sudan, Ethiopia, and Nepal. *Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at:* https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/895761624839562417 *(Accessed: 6 Nov 2025).*

(19) World Bank. (2021). Transforming Agriculture through Digital Technologies: Insights from Sub-Saharan Africa. *Washington, D.C.: The World Bank Group. Available at:* https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099535503082133059/p1714100b3efdb0d608f20a61e0ae4b90a4 *[Accessed 3 Nov 2025].*

(20) World Bank. (2021). Yemen: Groundwater Depletion and Solar Pumping — Balancing Renewable Energy and Water Sustainability in Abyan and Lahj. *Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at:* https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/327741624841057538 *[Accessed 4 Nov 2025].*

(21) World Bank. (2021). Yemen Water Sector Support and Resilience Assessment: Technical Note on Irrigation Efficiency and Agricultural Water Management in Abyan Delta. *Washington, D.C.: The World Bank, Water Global Practice. Available at:* https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/612401624839041512 *[Accessed 4 Nov 2025].*

(22) World Bank. (2022). Yemen Agricultural Sector Review: Financing, Resilience, and Pathways toward Climate-Smart Agriculture. *Washington, D.C.: The World Bank. Available at:* https://www.worldbank.org/en/country/yemen/publication/agriculture-sector-review *(Accessed: 11 Nov 2025).*