إطلاق إمكانات تحلية المياه لأغراض الزراعة في المنطقة العربية

مسودة للنقاش

ضمن الاجتماع السادس
للجنة الفنية المشتركة رفيعة المستوى للمياه والزراعة
جامعة الدول العربية
١٦ أكتوبر ٢٠٢٤

مسودة للنقاش

جدول المحتويات

الاختصارات 6

الملخص 8

مقدمة 10

1. تحلية المياه للزراعة في المنطقة العربية 13

أ. مخاوف ندرة المياه 13

ب. استخدامات المياه المحلاة في القطاعات المختلفة في المنطقة العربية 14

ج. الفرص الزراعية والمؤثرات الاجتماعية والاقتصادية الخارجية لمشاريع تحلية المياه 17

د. العوامل المقيدة والمتطلبات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية لتطوير مشاريع تحلية المياه 18

2. تكنولوجيا تحلية المياه المتطورة المناسبة للزراعة 26

أ. نبذة عن تكنولوجيا تحلية المياه 26

ب. التقدم التكنولوجي (أفضل التكنولوجيا المتوفرة) وديناميكيات السوق 28

ثالثًا: إمكانات كفاءة الطاقة: شركات الصناعات الزراعية الناشئة وأهم التحديات 33

رابعًا: السياسات والأطر التنظيمية واستراتيجيات التخطيط القائمة 37

خامسًا: تحليل التكاليف لمحطات تحلية المياه والجدوى الاقتصادية 40

أ. تحليل التكاليف لمشاريع التحلية 40

ب. الجدوى الاقتصادية لمرافق التحلية 44

مسودة للنقاش

ج. تكلفة التحلية والجدوى الاقتصادية للمحاصيل 46
سادسًا. طرق التمويل ونماذج تنفيذ العقد 49
أ. طرق التمويل 49
د. نماذج تنفيذ العقد 53
ج. المخططات المالية: مخطط نموذج الأعمال 58
سابعًا: تطوير القدرات في المنطقة العربية: نمو سوق تحلية المياه والتحديات الرئيسية في مجال البناء 61
ثامنًا: الممارسات الجيدة: دراسات الجدوى واحتمالية التكرار 64
أ. تحلية المياه لأغراض الزراعة في شمال إفريقيا 64
ب. تحلية المياه لأغراض الزراعة في الشرق الأوسط 65
ج. التحلية لأغراض الزراعة على مستوى العالم: مواقف المجابهة بين المديرين والمزارعين في أليكانتي ومرسية (إسبانيا) 67
تاسعًا: التوصيات والآفاق المستقبلية 73
أ. التوصيات الفنية والمالية 73
ب. التوصيات البيئية: الاستراتيجيات المستدامة الناشئة 74
ج. التوصيات السياسية والاجتماعية 75
خاتمة 76
مراجع 78

قائمة الأشكال

الشكل 1. استهلاك المياه حسب القطاع في العالم العربي. (منظمة الأغذية والزراعة ، 2022) .....

الشكل 2. توزيع مشاريع تحلية المياه العربية (2020–2030). (منظمة الأغذية والزراعة ، 2022) .....

الشكل 3. التحديات البيئية الكبيرة المتعلقة بتنمية مشاريع تحلية المياه.....

الشكل 4. ملخص العوامل المقيدة المستخدمة لتقييم تطور تحلية المياه في مختلف الدول. .....

الشكل 5. ملخص المتطلبات الرئيسية المستخدمة لتقييم تطوير تحلية المياه في مختلف الدول.....

الشكل 6. ملخص مفاهيمي للقيم المتوسطة للمتطلبات وفقًا لتقييم الخبراء بخصوص تحلية المياه لكل دولة جرى تحليلها. أُجري تقييم المتطلبات باستخدام مقياس شبه كمي (1–5)، إذ يمثل 1 أقل عدد من المتطلبات و5 أكبر عدد من المتطلبات.....

الشكل 7. ملخص نظري للقيم المتوسطة للعوامل المحددة التي قام خبراء تحلية المياه بتقييمها لكل دولة جرى تحليلها. أُجريَ تقييم العوامل المحددة باستخدام مقياس شبه كمي (1–5)، إذ يمثل 1 عاملًا مقيدًا منخفضًا للغاية ويمثل 5 عاملًا مقيدًا كبيرًا. .....

الشكل 8. تكنولوجيا تحلية المياه الرئيسية ومساهماتها النسبية في القدرات الفعلية العالمية بخصوص تحلية مياه البحر والمياه قليلة الملوحة.....

الشكل 9. تطور تحلية المياه باستخدام مختلف التقنيات .....

الشكل 10. توزيع محطات تحلية المياه التي تعمل بتقنية التناضح العكسي (2020–2030).....

الشكل 11. استهلاك الطاقة وفقًا لخيارات إمدادات المياه وتوزيع الطاقة في محطات تحلية مياه البحر التي تعمل بتقنية التناضح العكسي.....

الشكل 12. وحدات تحلية بالتناضح العكسي تعمل بالخلايا الشمسية وتستخدم لأغراض الري .....

الشكل 13. استهلاك الطاقة في محطات التحلية الكبيرة.....

الشكل 14. وحدة تحلية المياه الكهروضوئية النموذجية لأغراض الري.....

الشكل 15. أهم مشاريع تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية.....

الشكل 17. توزيع النفقات الرأسمالية لمحطات تحلية المياه في المنطقة العربية (2017–2026).....

الشكل 18. توزيع النفقات التشغيلية لمحطات تحلية المياه في المنطقة العربية (2017–2026). .....
الشكل 19. تطور سعر المياه المحلاة.....
الشكل 20. الهيكل الكامل للمشروع الجزائري. .....
الشكل 21. الهيكل الكامل للمشروع التونسي.....
الشكل 22. الهيكل الكامل للمشروع المصري. .....
الشكل 23. مخطط نموذج تنفيذ أعمال الهندسة والمشتريات والبناء .....
الشكل 24. مخطط نموذج تنفيذ أعمال التصميم والبناء والتشغيل .....
الشكل 25. مخطط نموذج تنفيذ البناء والتملك والنقل .....
الشكل 26. نمو سوق تحلية المياه. .....
الشكل 27. سعر الشراء وسعر التوريد والسعر النهائي المعقول للمياه المحلاة من قبل مجتمعات الري .....

قائمة الجداول

الجدول 1. أنظمة تحلية المياه التي قد تكون مناسبة لإنتاج المياه الزراعية. .....
الجدول 2. النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لمحطات التحلية الكبيرة لمياه البحر بالتناضح العكسي.....
الجدول 3. طرق التمويل المختلفة (فاستركابيتال ، 2024).....
الجدول 4. *خريطة مرئية لمشروع تحلية مياه البحر بأغادير.* .....
الجدول 5. الخصائص الأساسية لمجتمعات الري. .....

الاختصارات

BW	المياه قليلة المالحة
BOO	بناء تملك تشغيل
BOOT	بناء، تملك، تشغيل، نقل
BOT	بناء تشغيل نقل
BMC	مخطط نموذج الأعمال
CAPEX	النفقات الرأسمالية (التكلفة)
DBO	تصميم – بناء – تشغيل
ED	التحليل الكهربائي
EIA	متطلبات تقييم الأثر البيئي
EMP	خطة الرصد البيئي
ER	المتطلبات البيئية
ESCWA	اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغرب آسيا
FO	التناضح الأمامي
FS	الدعم المالي
FAO	منظمة الأغذية والزراعة (الأمم المتحدة)
KISR	معهد الكويت للأبحاث العلمية
KSA	المملكة العربية السعودية
LC	اليقين القانوني
MENA	الشرق الأوسط وشمال أفريقيا
MSF	التقطير الومضي متعدد المراحل
MED	التحلية بالتأثير المتبادل

مسودة للنقاش

OPEX	مصاريف التشغيل (التكلفة)
OECD	منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية
O&M	التشغيل والصيانة
PPP	الشراكة بين القطاعين العام والخاص
PV	فوتوفلطي
PI	المشاركة العامة
RO	التناضح العكسي
RE	الطاقات المتجددة
R&D	البحث والتطوير
SW	مياه البحر
SWRO	التناضح العكسي لمياه البحر
SEC	استهلاك الطاقة المحدد
SIDA	الوكالة السويدية للتعاون الإنمائي الدولي
SA	القبول الاجتماعي
TDS	إجمالي المواد الصلبة الذائبة
TST	نقل تاجوس سيجورا
UAE	الإمارات العربية المتحدة
USD	دولار أمريكي
WHO	منظمة الصحة العالمية
WWC	مجلس المياه العالمي

مسودة للنقاش

الملخص

أُجريت هذه الدراسة الدقيقة حول تحلية المياه بهدف استخدامها في الزراعة في سبيل ضمان عمل استكشاف شامل ومتعمق للموضوع، إذ نُظم كل محور في التقرير بعناية للبناء على الأقسام السابقة، مما يوفر تدفقًا منطقيًا للمعلومات التي تشمل كافة الجوانب الهامة لتحلية المياه في المنطقة العربية. على النحو التالي:

سيتناول المحور الأول المسألة الملحة المتمثلة في ندرة المياه وتأثيرها على الزراعة. حيث سيبدأ بمناقشة مدى مخاوف ندرة المياه في المنطقة ثم يشرع في دراسة استخدامات المياه المحلاة القطاعية، مع التركيز على كيفية استخدام المياه المحلاة عبر القطاعات المختلفة، مع التركيز بشكل خاص على الزراعة. بالإضافة إلى ذلك، سيتم أيضًا استكشاف الفرص الزراعية والتأثيرات الخارجية الاجتماعية والاقتصادية لمشاريع تحلية المياه، مع تسليط الضوء على فوائد تحلية المياه للإنتاجية الزراعية والمجتمعات الاجتماعية وسوق النشر الأوسع. وعلاوة على ذلك، سيحدد القسم الخاص بالعوامل المحددة والمتطلبات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية لتطوير مشاريع تحلية المياه التحديات والظروف المختلفة اللازمة للتنفيذ الناجح لمشاريع تحلية المياه، بما في ذلك الاعتبارات البيئية.

سيقدم الجزء التالي من الوثيقة، المحور الثاني، لمحة عامة عن التقنيات الحالية المستخدمة في تحلية المياه، وخاصة تلك التي تنطبق على الزراعة. وسيقدم لمحة عامة عن تقنيات تحلية المياه ويناقش أحدث التطورات التكنولوجية (أفضل التكنولوجيا المتاحة) وديناميكيات السوق، ويستكشف كيف تؤثر الابتكارات وقوى السوق على تبني وتطوير هذه التقنيات.

سيتناول المحور الثالث الفرص المتاحة لتحسين كفاءة الطاقة في عمليات تحلية المياه، وخاصة داخل الشركات الزراعية الصناعية الناشئة، وسيسلط الضوء على التحديات الأساسية التي تواجهها هذه الشركات في المستقبل.

ستستعرض الوثيقة السياسات واللوائح واستراتيجيات التخطيط التي تؤثر على مشاريع تحلية المياه، وتوفر رؤى حول المشهد القانوني والإداري الذي يحكم هذه المبادرات في المحور الرابع.

يتناول المحور الخامس تحليل التكاليف المرتبطة بمشاريع تحلية المياه، وتقييم جدواها الاقتصادية من خلال النظر في الجوانب المالية المختلفة التي تؤثر على جدواها.

ستوضح الوثيقة بعد ذلك في المحور السادس، طرق التمويل ونماذج تسليم العقود، ويناقش خيارات التمويل المختلفة والنماذج التعاقدية المتاحة لمشاريع تحلية المياه. حيث سيشمل هذا الجزء فحص طرق التمويل ونماذج تسليم العقود، بالإضافة إلى مقدمة للخطط المالية: مخطط نموذج الأعمال، والتي ستكون هي أداة التخطيط وتنفيذ الاستراتيجيات المالية. كما سيقيّم تكلفة تحلية المياه والجدوى الاقتصادية للمحاصيل، وتحديد فعالية تكلفة تحلية المياه فيما يتعلق بالجدوى الاقتصادية للمحاصيل المختلفة.

سيركز المحور السابع علاوة على ذلك على نمو سوق تحلية المياه في المنطقة العربية، مع التركيز على جهود بناء القدرات اللازمة والتحديات الكبيرة التي واجهتها في أثناء بناء مرافق تحلية المياه.

ستقدم الوثيقة بعد ذلك أفضل الممارسات: دراسات الحالة وإمكانات التكرار، وتقدم دراسات حالة لمشاريع تحلية ناجحة في مناطق مختلفة. وسوف يعرض هذا القسم أمثلة من شمال إفريقيا والشرق الأوسط، فضلًا عن منظور عالمي، وخاصة دراسة المواقف المتناقضة بين المديرين والمزارعين في أليكانتي ومورسيا (إسبانيا).

أخيرًا، سيختتم التقرير بتوصيات ووجهات نظر مستقبلية، ويقدم نصائح عملية واقتراحات لمشاريع تحلية المياه المستقبلية. سيتضمن هذا القسم توصيات بيئية: استراتيجيات مستدامة ناشئة، مع التركيز على الممارسات المستدامة بيئيًا، وتوصيات سياسية واجتماعية، تقدم إرشادات حول التعامل مع الجوانب السياسية والاجتماعية لتنفيذ مشاريع تحلية المياه.

مسودة للنقاش

مقدمة

نظرًا للمخاوف المتزايدة بشأن تغير المناخ، والأمن الغذائي، وعولمة أسواق وأسعار الغذاء، وندرة المياه، وارتفاع تكاليف الطاقة، يتعرض القطاع الزراعي حاليًا لضغوط كبيرة لتعزيز استراتيجياته وممارساته في إدارة المياه، بما في ذلك تحسين استخدام موارد المياه الحالية، وتنفيذ تقنيات الري الفعالة والاستفادة منها، والحد من هدر المياه، والأهم من ذلك تبني التقنيات المبتكرة واستخدامها. علاوةً على ذلك، يتعين على القطاع الزراعي استكشاف كافة الاحتمالات المُتاحة لتحقيق التوازن بين العرض والطلب على المياه. (بلتران وكو–أوشيما، 2004)

قد تشمل هذه الاحتمالات أيضًا استخدام مياه الصرف الصحي بعد معالجتها، وتجميع مياه الأمطار، وإدارة رطوبة التربة، والتكامل المحتمل لمياه التحلية حيثما كان ذلك ممكنًا. ونظرًا لارتفاع تكاليف إنتاج المياه التقليدية على مدى العقد الماضي في العديد من أنحاء العالم، انخفضت تكاليف تحلية المياه، وبالتالي أصبح حل تحلية المياه أكثر جاذبية اقتصاديًا وتنافسيًا. (لاتيمان، وكينيدي، وشيبرز، وأيمي، 2010) ومع زيادة الطلب على المياه، زاد أيضًا عدد محطات تحلية المياه.

يسمح حل تحلية المياه بتوسيع نطاق استخدام موارد المياه المتاحة من خلال إنتاج مياه عذبة، فعالة من حيث التكلفة، ومستقلة عن الظروف المناخية، وذات جودة خاضعة للرقابة، وذلك من مصادر المياه الطبيعية المالحة، أو قليلة الملوحة للاستخدام الزراعي. (زارزو، 2012) علاوةً على ذلك، يوفر حل تحلية المياه إمدادات مياه موثوقة ومناسبة يمكنها التخفيف من آثار الجفاف ونقص المياه وضمان الإنتاجية الزراعية المستمرة واستقرار إنتاج الغذاء والإمدادات والمساهمة في الأمن الغذائي، وذلك من خلال الاستفادة من احتياطي مياه البحر الضخم. (الخرّاز، 2024)

بالإضافة إلى ذلك، ونظرًا لمعايير جودة المياه المنخفضة اللازمة للاستخدام الزراعي، تتطلب عملية تحلية المياه كميات محدودة من القوى البشرية والمواد الكيميائية واستبدال الأغشية مما يؤدي إلى تقليل التكاليف التشغيلية. (زارزو، 2012) وبالتالي، تؤكد بساطة محطات تحلية المياه لغرض الزراعة، بالتزامن مع انخفاض متطلبات الأعمال المدنية والأتمتة وتدابير السلامة، بشكل أكبر على فعاليتها من حيث التكلفة وإمكانية تنفيذها. (زارزو، 2012)

ونتيجةً لذلك، من المتوقع أن يزيد عدد سكان العالم الذين يعتمدون على مياه البحر المحلاة من 7.5٪ من سكان العالم في عام 2015، إلى 18٪ متوقعة في عام 2050. وعلاوةً على ذلك، زادت إجمالي قدرة تحلية المياه في العالم خلال السنوات الست الماضية، بما في ذلك تحلية المياه المالحة ومياه البحر، بشكل مطرد بمعدل سنوي يبلغ حوالي 9٪. وبالمثل، من المتوقع أن تتضاعف القدرة الإنتاجية العالمية لمياه البحر المحلاة بحلول عام 2040. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024)

في النهاية، تهدف هذه الدراسة إلى تقديم رؤى شاملة حول الوضع الحالي لتعقيدات تحلية المياه المخصصة للتطبيقات الزراعية. كما تسعى هذه الدراسة إلى توجيه أصحاب المصلحة في القطاع الزراعي حول كيفية دمج المياه المحلاة بشكل فعال في ممارسات الري الخاصة بهم من خلال تسليط الضوء على أحدث التطورات والابتكارات في تقنيات تحلية المياه. وتركز هذه الدراسة ايضًا على توفير أحدث المعلومات في مجال استخدام تحلية المياه في الزراعة، وتسليط الضوء على الفوائد المحتملة والعقبات المرتبطة بهذا النهج، بالإضافة إلى اعتماد هذه الدراسة كمصدر حيوي للمزارعين وصناع السياسات والموظفين الحكوميين والباحثين لتعزيز عملية صنع القرار وتعزيز إدارة الموارد المائية في الزراعة من خلال دراسات الحالة، وتحليل التكاليف الدقيقة، ونماذج الأعمال الناجحة، وإمكانية التكرار.

1. تحلية المياه للزراعة في المنطقة العربية

أ. مخاوف ندرة المياه

تشتهر المنطقة العربية بوفرة النفط وليس بنقص المياه، في حين أنها المنطقة الأكثر جفافًا في العالم حيث تقل موارد المياه المتجددة فيها عن المستوى الحرج البالغ 1000 متر مكعب للشخص الواحد في السنة على النحو الذي حددته منظمة الصحة العالمية. (بلتران وكو – أوشيما، 2004)

يتمتع 6.3% من سكان العالم بإمكانية الوصول إلى 1% فقط من إجمالي موارد المياه في العالم، إذ تُعَد ندرة المياه في المنطقة العربية واحدة من التحديات التنموية الرئيسية والأكثر أهمية. ومن المتوقع أن يزداد هذا التحدي بمرور الوقت بسبب العديد من القوى الدافعة الملحة، بما في ذلك النمو السكاني والاقتصادي، والسياحة، وزيادة الطلب على الغذاء والطاقة، والصراعات السياسية والاجتماعية وتغير المناخ، إذ تعيش معظم الدول العربية بالفعل في ظروف مطلقة لندرة المياه. (الخرّاز، 2020)

تُعد المنطقة العربية واحدة من أكثر مناطق العالم التي تعاني من نقص المياه، إذ بلغ متوسط نصيب الفرد من موارد المياه المتجددة 351 متر مكعب/ سنة في عام 2014، في حين يبلغ معدل توافر المياه للفرد في المناطق الجغرافية الأخرى حوالي 7000 متر مكعب/ سنة. علاوةً على ذلك، تعيش اثنا عشر دولة عربية تحت مستوى ندرة المياه المطلقة البالغ 500 متر مكعب/ سنة للفرد. ومن الجدير بالذكر أيضًا أنه يتم توزيع موارد المياه المتجددة على نحوٍ غير متساوٍ في جميع أنحاء المنطقة العربية كما يُتضح من الحصة السنوية للفرد التي تتراوح بين 5 متر مكعب/ سنة في الكويت و2802 متر مكعب/ سنة في موريتانيا. (الخرّاز، 2020)

ونتيجةً لذلك، اكتسب مفهوم الأمن المائي زخمًا في الأجندة السياسية العالمية وحظي باهتمام الحكومات الوطنية على أعلى مستوى، وخاصةً نتيجةً لعلاقته بكافة أشكال الأمن بما في ذلك السلام وأمن الدولة، بالإضافة أيضًا إلى تبعاته على القضايا التنموية.

ومن الجدير بالذكر أنه في مختلف أنحاء المنطقة العربية، يُنظر إلى تحلية المياه بدرجةٍ متزايدة على أنها حلًا فنيًا بالنسبة للعرض إذ يمكنها تلبية الطلب المتزايد الحالي على المياه والتخفيف من الآثار السلبية لتغير المناخ على موارد المياه. وعلى الرغم من كونها تقنية تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، تُدرج الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ تحلية المياه كخيار للتكيف قد يكون مهمًا بشكل خاص في المناطق الجافة شديدة الحرارة والمناطق شبه الجافة مثل المنطقة العربية. (الخرّاز، 2020)

ب. استخدامات المياه المحلاة في القطاعات المختلفة في المنطقة العربية

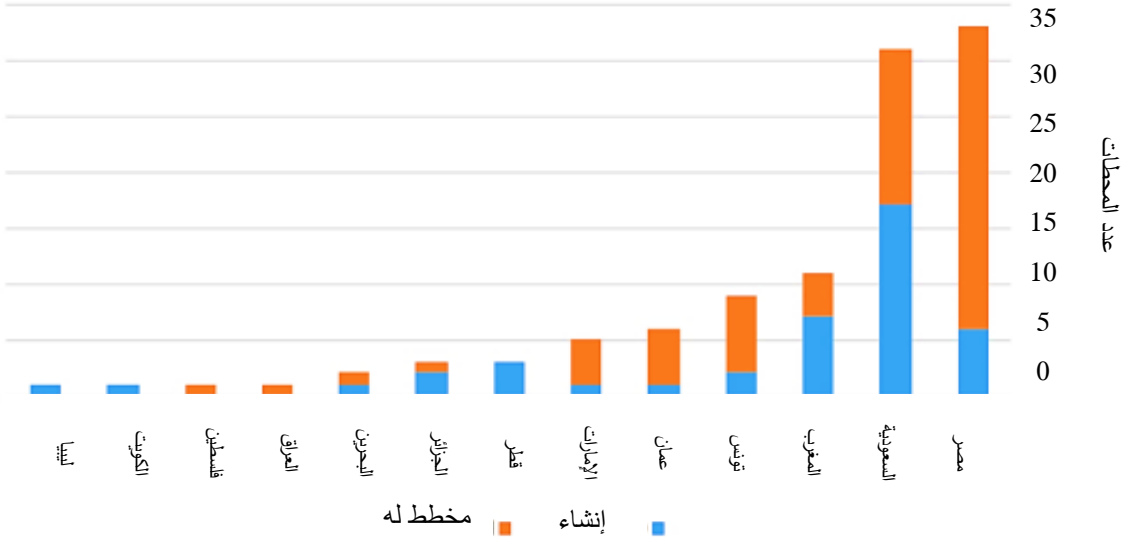
من التحديات الرئيسية التي تواجه المناطق الزراعية الساحلية العربية تزايد ملوحة المياه الجوفية، إذ تنخفض منسوبات المياه في جميع أنحاء البلاد بسبب تسرب مياه البحر والاستخدام المفرط للمياه الجوفية (الخرّاز، 2020) ما أدى إلى استخدام مكثف لمياه الري يُقدّر بنحو 70٪ من إجمالي الاستخدام، يليه الاستخدام الصناعي بنحو 21٪، والاستخدام المنزلي بنحو 9٪. (سويلح، جونسون، وهلال، 2020) كما هو موضح في **الشكل رقم 1**.

ففي البداية، كانت المياه المالحة بوصفها مصدرًا للمياه مقتصرةً على الاستخدام في الجُزُر، والقواعد العسكرية، والمواقع الصناعية، والفنادق (1950 – 1970). وبين عامي 1970 و1995، أصبحت المياه المحلاة هي المصدر الرئيسي للمدن في شبه الجزيرة العربية، وأصبح من المقبول الآن في دول مجلس التعاون الخليجي (GCC) أن الطلب المستقبلي على المياه سيتم تلبيته عن طريق التحلية. بالإضافة إلى دول مجلس التعاون الخليجي، تصبح تحلية المياه الحل الوحيد والاقتصادي الممكن لبلدان مثل الأردن وفلسطين (بلتران وكو–أوشيما، 2004).

ونتيجةً لذلك، أصبحت تحلية المياه حلًا ذو أهمية متزايدة لمشكلة المياه في المنطقة. ففي العديد من الدول التي تعاني من نقص المياه في المنطقة العربية تزيد من إمداداتها المائية من خلال التحلية لتلبية احتياجات النمو المستمر للسكان، وتطورات الصناعة، والسياحة، والزراعة. ولم يعد بالإمكان اعتبار المياه المحلاة موردًا محدودًا، إذ تعتمد بعض الدول مثل قطر والكويت عليها بنسبة 100% للاستخدام المنزلي والصناعي، في حين يبلغ اعتماد السعودية عليها حوالي 60% (الخرّاز، 2020).

وفيما يخص هذا الصدد، زاد عدد محطات تحلية المياه في المنطقة العربية، سواءً المُخطط لها، أو قيد الإنشاء، بدرجةٍ ملحوظة في السنوات الأخيرة، كما هو موضح في **الشكل رقم 2**. وبالتالي، هناك تركيز متزايد على تمكين تقنيات التحلية ذات التكلفة الفعّالة لتوفير المياه بكميات وجودة مناسبة للتطبيقات الزراعية (برن، هوانغ، زارزو، أوليفنياك، وكامبوس، 2015).

الشكل رقم 1. استهلاك المياه حسب القطاع في العالم العربي. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



الشكل رقم 4. توزيع مشاريع تحلية المياه العربية (2020–2030). (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

ففي الواقع، بدأت العديد من الدول في استخدام المياه المحلاة للأغراض الزراعية بمعدلات متفاوتة لتلبية احتياجاتها من المياه. ففي دولة الكويت، على سبيل المثال، حيث تتجاوز الطاقة الإنتاجية المركبة مليون متر مكعب/يوم، تُستخدم 13% فقط للزراعة. وفي المملكة العربية السعودية، حيث تعتبر أكبر منتج منفرد للمياه المحلاة في العالم؛ تُستخدم 0.5% فقط من طاقتها في التحلية لأغراض زراعية. كما نفذت مملكة البحرين طاقة تحلية تبلغ 620,000 م3/ يوم، بينما تُستخدم نسبة صغيرة فقط من المياه المحلاة تبلغ 0.4% للزراعة، في حين استخدمت دولة قطر 0.1% فقط من طاقتها في التحلية للزراعة (منظمة الأغذية والزراعة، 2024). علاوة على ذلك، إذا نظرنا إلى مثال سلطنة عمان، نتيجةً لزيادة مستوى ملوحة التربة والمياه على طول ساحل منطقة الباطنة، فإن عددًا متزايدًا من المزارعين يستخدمون وحدات تحلية صغيرة النطاق لإنتاج مياه الري.

بينما تختلف دول شمال أفريقيا في الطلب على تحلية المياه من الحاجة إلى توفير المياه للمنتجعات البحرية، كما هو الحال في مصر وتونس، إلى أن تصبح بديلًا لمخططات نقل المياه الكبرى، مثل مصر في تطوير سيناء، والمغرب لتوفير المياه لمنطقته الجنوبية.

وتُعد دول أخرى مثل ليبيا والجزائر التحلية مصدرًا فعليًا للمياه لتلبية الطلب المتزايد على الإمدادات العذبة. بينما قد لا ترى سوريا ولبنان الحاجة إلى التحلية، إلا إن سوريا (التي تعاني من استنزاف كبير للمياه الجوفية) لا تزال مضطرة للنظر في التحلية في مناطقها الداخلية البعيدة عن الأنهار والبحر.

ومن ناحية أخرى، تواجه اليمن، الدولة الأكثر نقصًا في المياه في العالم، مشكلة إضافية تتمثل في الاضطرار إلى الجمع بين تحلية المياه ومشاريع النقل الكبرى. ومن المحتمل أن تواجه العراق متطلبات معالجة مياه شديدة تعادل تحلية المياه، كما ستحتاج أيضًا إلى حلول تتضمن تحلية المياه في أراضيها الجنوبية. (بلتران وكو–أوشيما، 2004).

في أبو ظبي، على سبيل المثال، يظهر مستخدمو المياه المحلاة والمعاد تدويرها كفاءة أكبر في استخدام المياه لكل متر مربع من الأراضي المزروعة مقارنة بمزارع المياه الجوفية في العين والظفرة. حيث يتمثل السبب وراء هذه القدرات الهائلة في المنطقة، كما هو موضح في **الشكل رقم 3**، هو التحسينات التقنية التي أدت إلى انخفاض تكلفة التحلية. ففي الوقت الحالي، تأتي المملكة العربية السعودية في مقدمة السوق العالمي بإجمالي قدرة تراكمية تبلغ 15,378,543 م3/ يوم تليها دولة الإمارات العربية المتحدة بقدرة 10,721,554 م3/ يوم (الخرّاز، 2024).

ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه بالرُغم من الاستخدام واسع النطاق للمياه المحلاة في المنطقة العربية، تظل تقنيات التحلية خيارًا مكلفًا للزراعة، وتواجه تحديات بيئية كثيرة، منها متطلبات الطاقة وجودة المياه ووسائل إزالة الملوحة من المياه المرفوضة، والتي تنتهي في كثير من الحالات بتلويث المياه الجوفية وزيادة ملوحتها. ومع ذلك، لا يزال من الممكن أن تكون خيارًا جذابًا للزراعة المستدامة إذا استُخدِمت وفق قيود محددة (الخرّاز، 2020).

ج. الفرص الزراعية والمؤثرات الاجتماعية والاقتصادية الخارجية لمشاريع تحلية المياه

تواجه المنطقة العربية مشاكل في مجال الأمن الغذائي، لا سيما في الدول التي تسعى إلى تعزيزه من خلال زيادة الإنتاج الزراعي. (الصلح، 2015) وبخصوص استهلاك المياه الزراعية، فإن الزراعة وحدها تستخدم 70% من إمدادات المياه في العالم وفقًا لتقرير الأمم المتحدة. من المتوقع أيضًا أن يرتفع الطلب العالمي على الغذاء بنسبة 70٪ أخرى بحلول عام 2050، ولكن التحدي الرئيسي الذي يواجه العالم اليوم –وفقًا للتقرير– لا يتمثل في زيادة الإنتاج الغذائي فحسب، بل في توفير مياه الري الجيدة للمزارعين بكميات كافية. (دغاري، تحلية المياه والزراعة، 2022) وفي هذا الصدد، تُفيد التقارير بأن تحلية المياه لدعم الإنتاج الزراعي عبارة عن مصدر بديل للمياه في بعض دول البحر الأبيض المتوسط التي تواجه معوقات مناخية ومائية. (ريكارت، فيلار نافاسكويس، جيل غيرادو، ريكو أموروس، أراهويتيس، 2020)

تؤكد الإحصائيات المتعلقة بالقدرات الفعلية الحالية في جميع أنحاء العالم ومعدلات التوسع على زخم تحلية المياه ووعدها بالتغلب على المشكلات الاجتماعية والسياسية والإقليمية والبيئية للحلول الهيدروليكية العادية والمساهمة في القوة التحررية للتكنولوجيا بطرق تُعجز الحلول التقليدية مثل السدود والخزانات ونقل المياه بدرجة متزايدة عن تحقيقها. ووفقًا لمؤيدي هذه الإحصائيات، فإن تحلية المياه في الواقع لا تستغل موردًا لا ينضب فحسب، بل يمكنها كذلك إزالة المياه عمليًا من الصراع السياسي الإقليمي البيئي. ولذلك، فإن تحلية المياه بديل ذو "مكاسب" متعددة وخسائر قليلة على الأقل مقارنة بالبدائل التقليدية. (الخرّاز، 2020)

علاوة على ذلك، في عدد قليل من الدول، يستخدم المزارعين بالفعل المياه المالحة المحلاة (التي يصل سعرها عادة إلى ثلث مياه البحر المحلاة) بصورة موسعة. فعلى سبيل المثال، تذهب 22% من المياه المحلاة في إسبانيا إلى الري الزراعي. وجدت دراسة استقصائية أسترالية أن 53% من السكان يتوقعون أن استخدام المياه المحلاة لري الخضروات أمرًا محتملًا (يرمياهو وآخرون، 2007)، ويرجع ذلك إلى المزايا العديدة التي تضمنها تكنولوجيا تحلية المياه مثل التوصيلات المخصصة لمياه الري وتوفير إمداد مضمون وجودة مستمرة للمنتجات الزراعية وزيادة الإنتاج مقارنة بمصادر المياه الأخرى وارتفاع أسعار إعادة بيع المياه نتيجة للجودة والضمان وإمكانية استصلاح التربة المالحة بالري بمياه عالية الجودة. (بورن، هوانغ، زارزو، أولونياك، كامبوس، 2015).

ومن الناحية الاجتماعية، تعمل تحلية المياه على تعزيز الأمن المائي لأي دولة بدرجة كبيرة وكذلك تدعم الاستقرار الإقليمي من خلال تجنب الصراع على الموارد المائية. كذلك تتضمن مواطن القوة والفرص في مشاريع تحلية المياه الانتشار السريع واحتمالية مساعدة المجتمعات النائية والمنشآت السياحية على الازدهار. تُعد فرص العمل المحلية أثناء بناء وتشغيل محطات تحلية المياه ميزة أخرى، ولكن سهولة الوصول إلى المياه تعني أيضًا توفير المزيد من فرص العمل والتعليم للنساء المكلفين بالعمل الذي يستغرق وقتًا طويلًا في الحصول على المياه ونقلها. (ستيرلنغ، 2023)

ومن المهم أيضًا التأكيد على أن تحلية المياه توفر ميزة الإنتاج المستمر لمياه آمنة ممتازة أقل عرضة للتلوث والمخاوف المتعلقة بالصحة العامة وتميز المستخدمين المرتبط غالبًا بتكنولوجيا إعادة استخدام مياه الصرف الصحي. (وليامز، بيفريدج، مايوكس، 2023)

وبالتالي، تعد تحلية المياه أداة لازمة لتلبية الطلب العالمي على المياه العذبة من أجل الري والسياحة والأغراض الصناعية مثل محطات الطاقة، أو التعدين ومياه الشرب وغيرهم، مما يوفر مزايا كبيرة للمنازل والقطاعات، إذ تعمل هذه الدول على تحقيق التنمية الاجتماعية والاقتصادية. (سولا، سايز، لويس سانشيز ليزاسو، 2021)

د. العوامل المقيدة والمتطلبات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية لتطوير مشاريع تحلية المياه

إن التكلفة المرتفعة نسبيًا وحاجة الزراعة إلى أن تكون قريبة من مصادر الإمداد بالمياه المالحة والمياه قليلة الملوحة والتخلص الآمن والفعّال نظرًا لتكلفة المياه المالحة تؤدي جميعها إلى الحد من التطبيق الأوسع لتكنولوجيا تحلية المياه في الزراعة (صويلح، جونسون، هلال، 2020). وبطريقة أخرى، فإن تكاليف المياه المحلاة (الصالحة للشرب) لا تزال مرتفعة للغاية على الرغم من هذا التطور، إذ لا يمكن الاستخدام الكامل لهذا المورد في الزراعة المروية، باستثناء البستنة المكثفة للمحاصيل التجارية عالية القيمة مثل الخضروات والزهور المزروعة في المناطق الساحلية (في البيوت الزجاجية في الغالب)، إذ يكون التخلص الآمن منها أسهل من المناطق الداخلية. (بلتران، كو أوشيما، 2004)

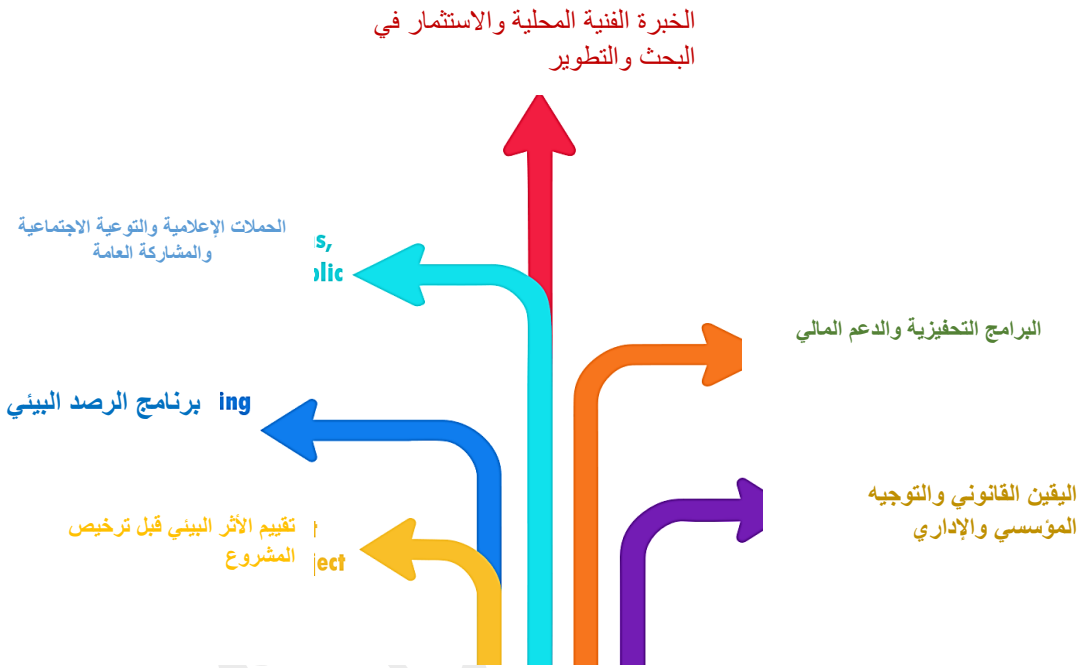
ومن الناحية البيئية، فإن المياه وجودة الهواء ومساحة المحيطات وخزانات المياه وعوامل أخرى قد تتأثر جميعها كذلك بالسلب بسبب محطات التحلية. عادةً ما تُراعى العواقب البيئية لهذه المحطات على المستوى الوطني كما هو موضح في الشكل أدناه، وتختلف متطلبات قبولها وتقليلها حسب الظروف. توصي منظمة الصحة العالمية بتنفيذ برامج مراقبة ما بعد التركيب لمراقبة تأثير محطات التحلية على الاستدامة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

الشكل رقم 6: التحديات البيئية الكبيرة المتعلقة بتنمية مشاريع تحلية المياه. ((منظمة الأغذية والزراعة، 2022)، (المهدي، 2022)، (بلتران، كو أوشيما، 2004)، (العبري، 2022))

وبعيدًا عن المخاوف بشأن تكاليف الطاقة والآثار البيئية، فإن المسائل التي يدرسها علماء الاجتماع تتمثل في –على سبيل المثال– تمويل محطات تحلية المياه ردود أفعال المواطنين السلبية أحيانًا تجاه هذا المورد الجديد والأبعاد الصحية للمياه المحلاة وافتعال ندرة نسبية نظرا لارتفاع التكاليف والتأثيرات خاصة على المزارعين وسكان المدن الفقراء وإمكانية الحصول على موارد مائية أرخص عن طريق التعدين، أو الشركات الزراعية الكبيرة واستمرار تصور وفرة الموارد الوفيرة التي تجعل الحفاظ عليها غير ضروري (لأولئك الذين يستطيعون تحمل تكاليفه) والآثار الجغرافية السياسية المتعلقة بالدعم من خلال تحلية المياه وتحسين العلاقة بين المياه والطاقة والغذاء في بعض المناطق بالعالم وفرص استثمار رأس المال بعد استنفاد أعمال المياه الكبيرة الأخرى وتعزيز جذب الناس إلى المناطق الساحلية والمناطق الأكثر شهرة بخصوص التأثيرات البيئية (الأحياء البحرية والانبعاثات الكربونية إذا كانت الطاقة من محطات توليد الطاقة بالوقود الأحفوري). (الخرّاز، 2020)

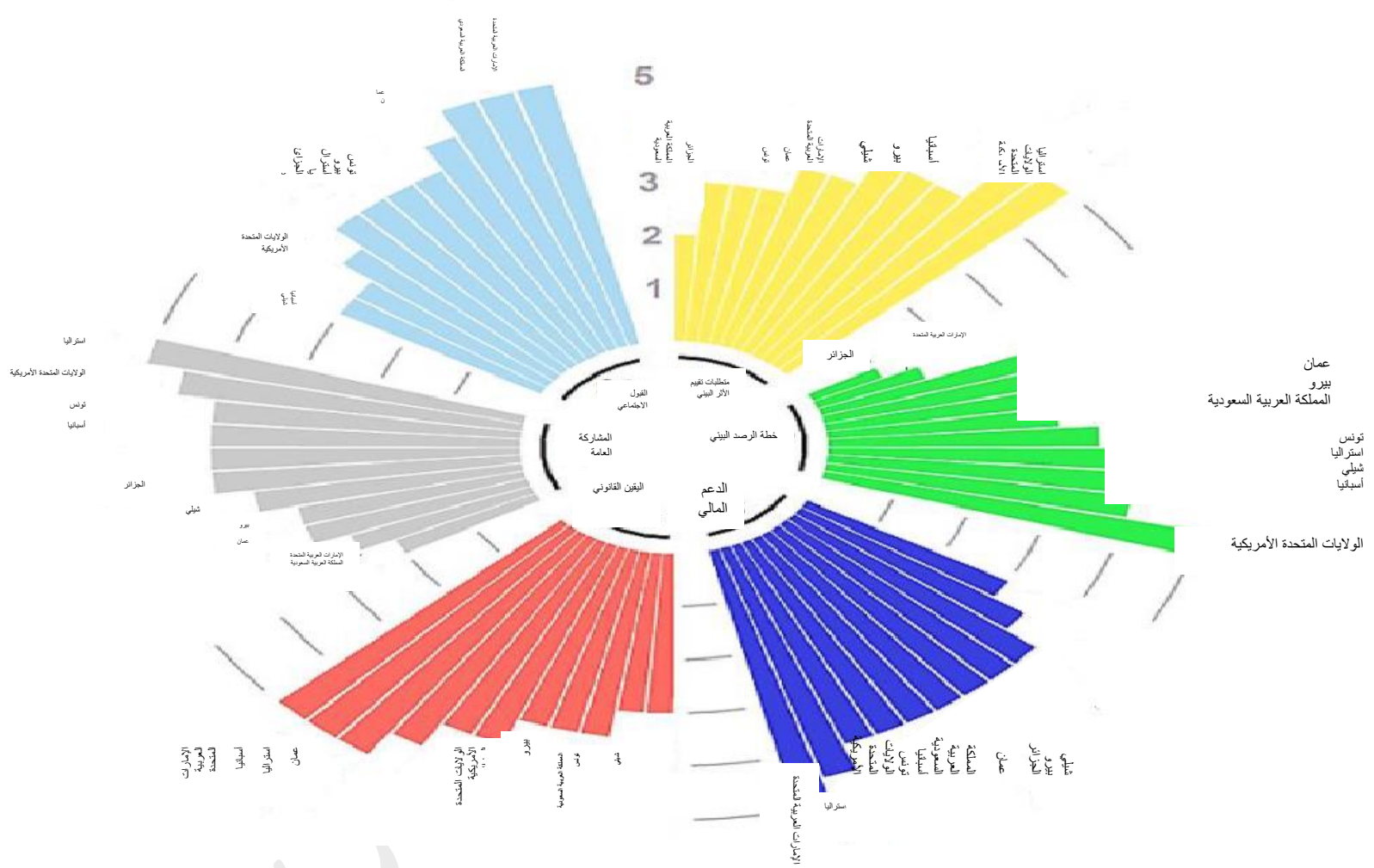
الشكل رقم 9: ملخص العوامل المقيدة المستخدمة لتقييم تطور تحلية المياه في مختلف الدول. (سولا، سايز، لويس سانشيز ليزاسو، 2021)

من المهم أيضًا التأكيد على أن الزيادة المستمرة في الطلب العالمي على المياه العذبة حدثت بسرعة أكبر في بعض الدول بسبب عوامل معينة قد تؤثر على تطوير مشاريع تحلية المياه، ولذلك أجري استقصاء لـ 34 خبير عالمي في مجال تحلية المياه لتقييم المتطلبات الرئيسية والعوامل الأكثر تقييدًا لتطوير مشاريع تحلية المياه في مختلف الدول. (سولا، سايز، لويس سانشيز–ليزاسو، 2021) كما هو موضح في الشكل (4) و(7).



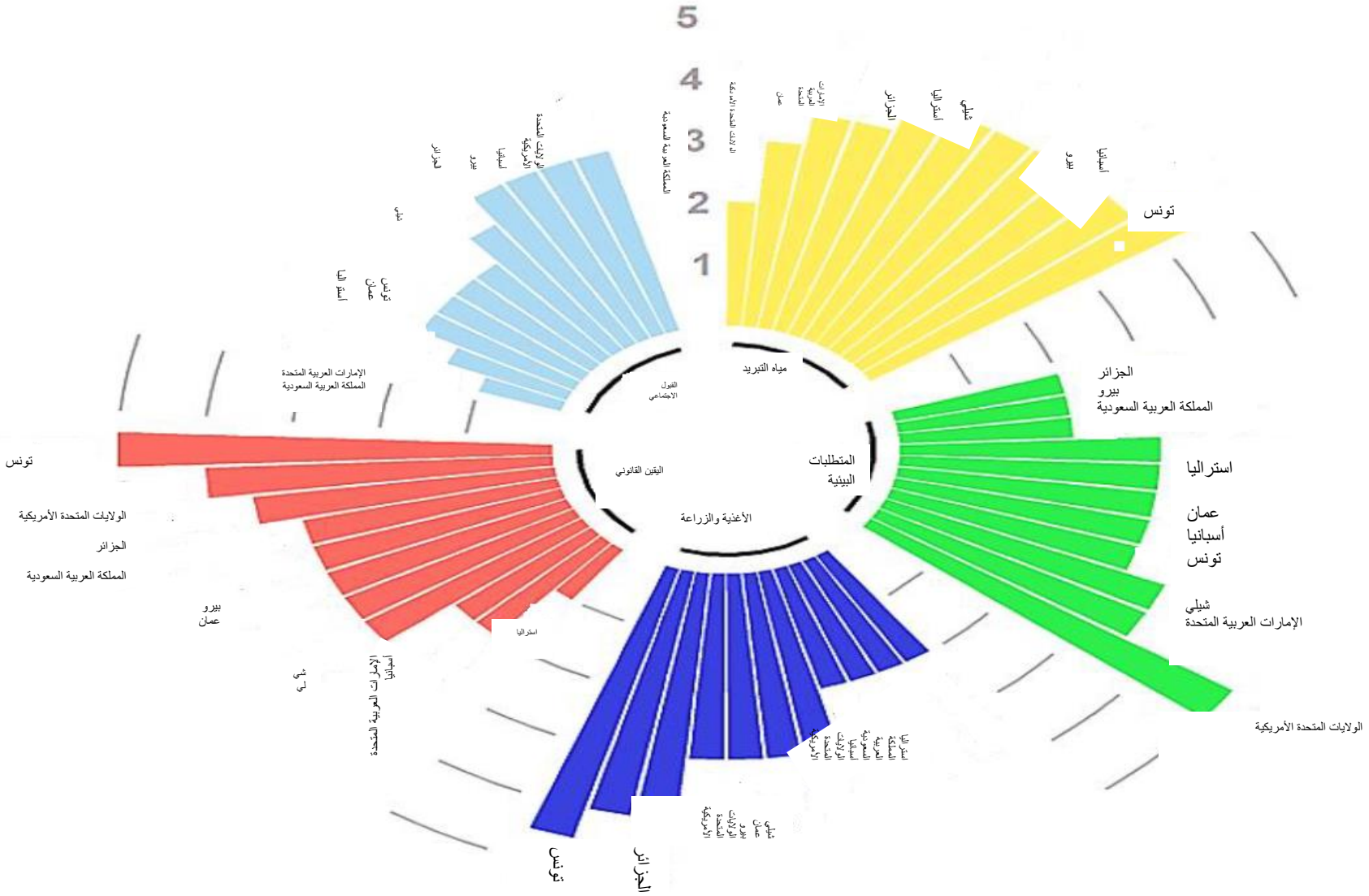
الشكل رقم 12: ملخص المتطلبات الرئيسية المستخدمة لتقييم تطوير تحلية المياه في مختلف الدول. (سولا، سايز، لويس سانشيز ليزاسو، 2021)

يرد في **الشكل رقم 6** تقييم "المتطلبات" المتعلقة بالنواحي الاجتماعية والاقتصادية والبيئية لتطوير تحلية المياه. وبالإشارة إلى تقييم متطلبات تقييم الأثر البيئي، أظهرت النتائج أن أستراليا والولايات المتحدة الأمريكية تفرضان أكبر عدد من المتطلبات في تقييمات الأثر البيئي تليها شيلي وإسبانيا وبيرو، نظرًا لأن كل منهما تفرض عددًا كبيرًا من المتطلبات.



الشكل رقم 15: ملخص مفاهيمي للقيم المتوسطة للمتطلبات وفقًا لتقييم الخبراء بخصوص تحلية المياه لكل دولة جرى تحليلها. أُجريَ تقييم المتطلبات باستخدام مقياس شبه كمي (1–5)، إذ يمثل 1 أقل عدد من المتطلبات و5 أكبر عدد من المتطلبات. (سولا، سايز، لويس سانشيز ليزاسو، 2021)

يوضح الشكل رقم 7 تقييم "العوامل المقيدة" لتطوير مشروع تحلية المياه. وفي هذا التقييم، ذُكرت عدة عوامل تحد من تطوير محطات تحلية المياه في مختلف الدول:



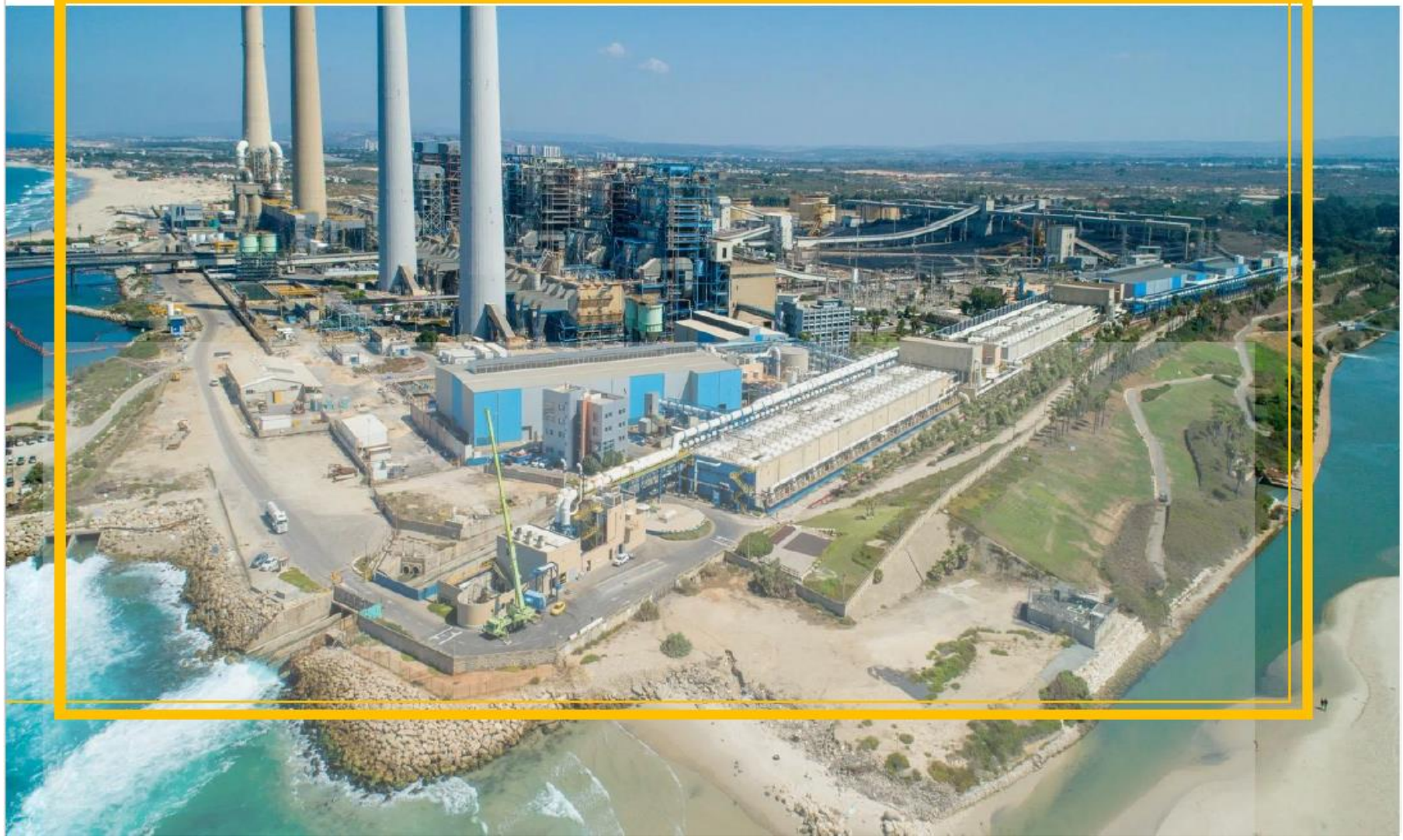
الشكل رقم 17: ملخص نظري للقيم المتوسطة للعوامل المحددة التي قام خبراء تحلية المياه بتقييمها لكل دولة جرى تحليلها. أُجريَ تقييم العوامل المحددة باستخدام مقياس شبه كمي (1–5)، إذ يمثل 1 عاملًا مقيدًا منخفضًا للغاية ويمثل 5 عاملًا مقيدًا كبيرًا. (سولا، سايز، لويس سانشيز ليزاسو، 2021)

أظهرت النتائج المحققة تباين كبير في المتطلبات البيئية والاجتماعية والاقتصادية في مختلف الدول. تمثلت أهم العوائق المذكورة أمام تطوير تحلية المياه في تكلفة المياه المنتجة وانخفاض الدعم المالي والمتطلبات البيئية المتشددة. لوحظ أن القبول الاجتماعي لمشاريع تحلية المياه مرتفعًا بدرجة طبيعية ولا يمثل عاملًا معوقًا لتطورها. وعلى الرغم من ذلك، فقد أُعتبرت المستويات المنخفضة من المتطلبات البيئية و/، أو المشاركة الجماهيرية كمسائل يجب تحسينها في بعض الدول.

وبالإشارة إلى معايير جودة مياه الري، فإن الأضرار التي تلحق بالمحاصيل بعد الري بمياه عالية النقاوة التي تنتجها أكبر محطات تحلية المياه بتقنية التناضح العكسي في العالم تكشف عن ضرورة اتباع معايير معالجة منقحة (يرمياهو وآخرون، 2007).

قد يكون لإدخال المياه المحلاة في الزراعة تأثيرات زراعية فعلية متفاوتة. وتتمثل المخاوف الرئيسية في افتقارها إلى العناصر الغذائية الأساسية مما يعمل على ارتفاع احتياجات التسميد، وخاصة بالنسبة لمحاصيل البيوت الزجاجية. قد يؤدي تركيبها الكيميائي المتميز أيضًا إلى تدهور بنية التربة بسبب الملوحة مما يؤثر سلبًا على إنتاجية المحاصيل، والسُمّية المحتملة من المستويات العالية للبورون والكلوريد (ريكارت، فيلار نافاسكويس، جيل–جويرادو، ريكو–أموروس، أراهويتيس، 2020). وفي هذا الصدد، أظهرت نتائج دراسة ريادية في إسبانيا تناولت الاستبدال التدريجي لموارد مياه الري التقليدية بمياه البحر المحلاة أن الاستخدام المشترك لمياه البحر المحلاة مع الموارد التقليدية هو الخيار الأفضل بدلًا من الري باستخدام مياه البحر المحلاة وحدها (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

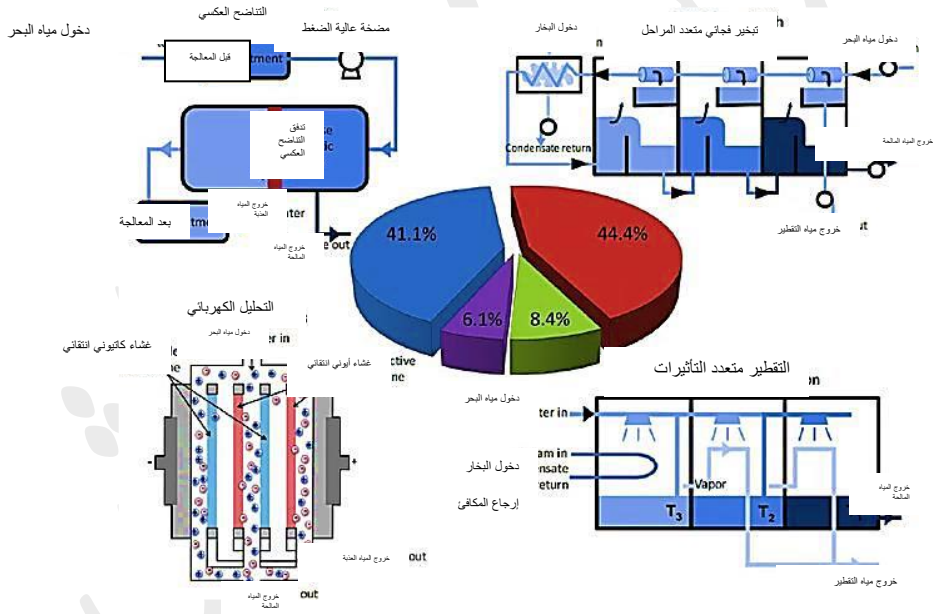
وبالتالي، فإن التطبيق والإدارة الصحيحين لأنظمة الجودة المحددة ونمذجة المزج والإدارة والإمكانيات التقنية في المزرعة وكذلك مراقبة المياه والتربة قد يخفف من هذه المخاطر المتعلقة بالري الزراعي بمياه البحر المحلاة.



2. تكنولوجيا تحلية المياه المتطورة المناسبة للزراعة

أ. نبذة عن تكنولوجيا تحلية المياه

استُخدِمت أكثر من 20 تقنية مختلفة لتحلية مياه البحر منذ اختراع تحلية المياه في العصور القديمة، وقُسّمت بوجه عام إلى ثلاث مجموعات وهي العمليات الحرارية وتقنية فصل الغشاء والتكنولوجيا المتطورة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024) يوضح الرسم التخطيطي أدناه تكنولوجيا تحلية المياه الرئيسية ومساهماتها النسبية في القدرات الفعلية العالمية بخصوص تحلية مياه البحر والمياه قليلة الملوحة. تمثل تقنية التبخير الفجائي متعدد المراحل 44% وتقنية التناضح العكسي 41.1% وتقنية التحلية بالتأثير المتبادل والطرق الحرارية الأخرى 8.4% والتحليل الكهربائي والطرق الأخرى 6.1%. (همبليك، لي، فيلمان، رحمن، 2011)



الشكل رقم 20: تكنولوجيا تحلية المياه الرئيسية ومساهماتها النسبية في القدرات الفعلية العالمية بخصوص تحلية مياه البحر والمياه قليلة الملوحة.

توجد أيضًا تكنولوجيا متطورة أخرى مقيدة بحجم الوحدة، أو لا تزال قيد التطوير على المستوى التجريبي بين القيود الأخرى، مثل تحلية المياه بالتجميد والترطيب/ التجفيف وتحلية المياه بالامتزاز والتقطير الغشائي وخلايا الوقود الميكروبية لتحلية المياه والأمونيا نتيجة للتناضح الأمامي وإزالة التأين بالسعة وإزالة الأيونات الكهربائية. (الخرّاز، 2020)

لا بد من المعالجة اللاحقة للمياه المنتجة بجميع التكنولوجيا، وخاصةً في عمليات التقطير التي تحتاج إلى التمعدن. تهدف المعالجة اللاحقة إلى توازن المياه المنتجة وجعلها متوافقة مع شبكة التوزيع ومتطلبات المستخدم النهائي. لا بد من تعديل الرقم الهيدروجيني إلى ما يقرب 8. يلزم إزالة الأيونات في إنتاج الهيدروجين الأخضر لأنه يساعد في تحقيق الموصلية المنخفضة جدًا اللازمة للعديد من المحللات الكهربائية. هذه الخطوة هي الأخيرة في تحضير الماء عالي النقاء، وذلك من خلال إزالة أي أيونات متبقية، مما يضمن نقاء الهيدروجين المنتج. وفي المقابل، يمكن استخدام الكربنة، أو مواد كيميائية أخرى مثل الجير، ويمكن المزج مع بعض مياه المصدر لزيادة القلوية وإجمالي المواد الصلبة الذائبة واستقرار المياه. قد يلزم إضافة مثبطات التآكل مثل متعدد الفوسفات. (الخرّاز، 2020)

يرد في الجدول (1) قائمة بالطاقة المستخدمة وتكاليف التكنولوجيا، باستثناء التقطير. يوجد طريقتان فقط يمكن اعتبارهما تجاريتين بالكامل وهما التناضح العكسي والتحليل الكهربي بالمحطات الكبيرة قيد التشغيل، على الرغم من أن إزالة التأين بالسعة لها محطة ذات سعة أصغر 1 مل/يوم في المرحلة التجارية. لا تزال بقية الأنظمة تجريبية، على الرغم من نجاح تشغيل الأنظمة التجريبية والنموذجية. (بورن، هوانغ، زارزو، أولونياك، كامبوس، 2015)

الجدول (1): أنظمة تحلية المياه التي قد تكون مناسبة لإنتاج المياه الزراعية. (بورن، هوانغ، زارزو، أولونياك، كامبوس، 2015)

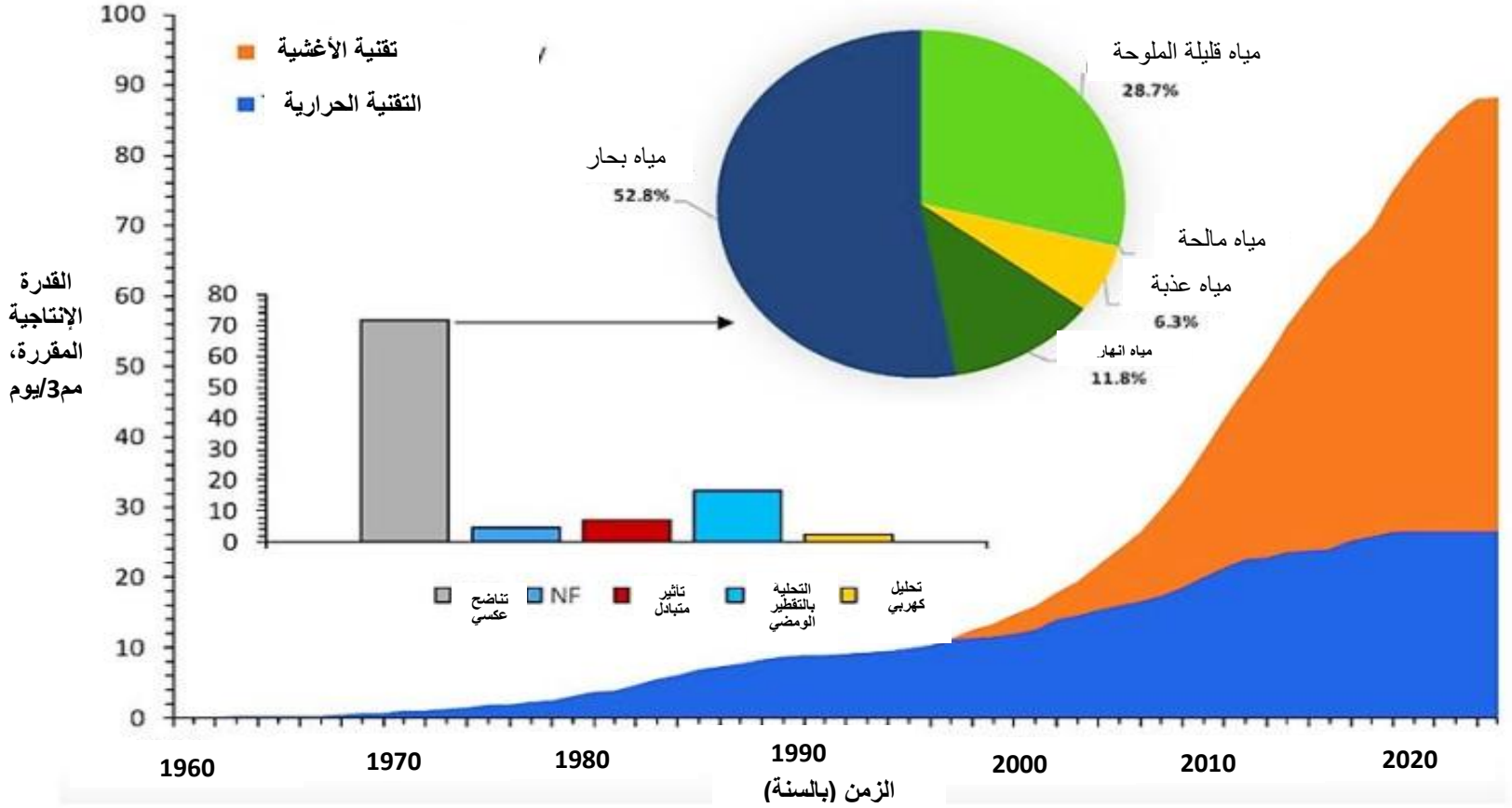
التكنولوجيا	الطاقة المستخدمة (كيلو وات/ ساعة/ كيلو لتر)	الإجمالي (دولار أمريكي/ كيلو لتر)
التناضح العكسي	المياه قليلة الملوحة، 0.7 – 2.0	1.5 – 0.39
	المياه البحرية، 1.6 – 12	1 – 0.55
	المياه المغمورة، 2 – 2.5	بالطاقة الشمسية، المحطة الكبرى 1.3، المحطة الصغرى 2 – 6.5
التناضح الأمامي	المياه قليلة الملوحة، 0.25	غير متوفر
التحليل الكهربائي	المياه قليلة الملوحة، 1.6 – 2.3	0.47
التقطير بالأغشية بوجود التلامس المباشر	المياه البحرية، 40	بالطاقة الشمسية، 15 – 18 بالطاقة الحرارية الجوفية، 13 بالبرك الشمسية، 0.4 – 1.3

التكنولوجيا	الطاقة المستخدمة (كيلو وات/ ساعة/ كيلو لتر)	الإجمالي (دولار أمريكي/ كيلو لتر)
		بالحرارة المهدرة، 1.1 – 1.5
التقطير بالأغشية بوجود الفراغ الهوائي	المياه البحرية	بالطاقة الشمسية، 18.3 بالحرارة المهدرة، 5.3
التقطير بالأغشية بوجود الضغط التفريغي	المياه البحرية، 1.2 – 3.2	بالطاقة الشمسية، 16 بالحرارة المهدرة، 2
الترطيب والتجفيف	مياه قليلة الملوحة	بالطاقة الشمسية، 3 – 6.4 بالطاقة الحرارية الجوفية، 1.2
إزالة الأيونات بالسعة	مياه قليلة الملوحة، 0.13 – 0.59	غير متوفر

ب. التقدم التكنولوجي (أفضل التكنولوجيا المتوفرة) وديناميكيات السوق

أدى التقدم في التكنولوجيا ومكونات أنظمة تحلية المياه إلى انخفاض استخدام الطاقة في إنتاج المياه العذبة بنسبة 80٪ تقريبًا خلال العقدين الماضيين. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024) أدت الابتكارات والتحسينات في الأغشية وأجهزة استعادة الطاقة إلى التقدم في تكنولوجيا تحلية المياه، وخاصة العمليات القائمة على الأغشية بالتناضح العكسي والتناضح الأمامي المستقلة، أو المختلطة التي أصبحت تهيمن على أسواق تحلية المياه في السنوات العشرة الماضية كما هو موضح في الشكل (9).

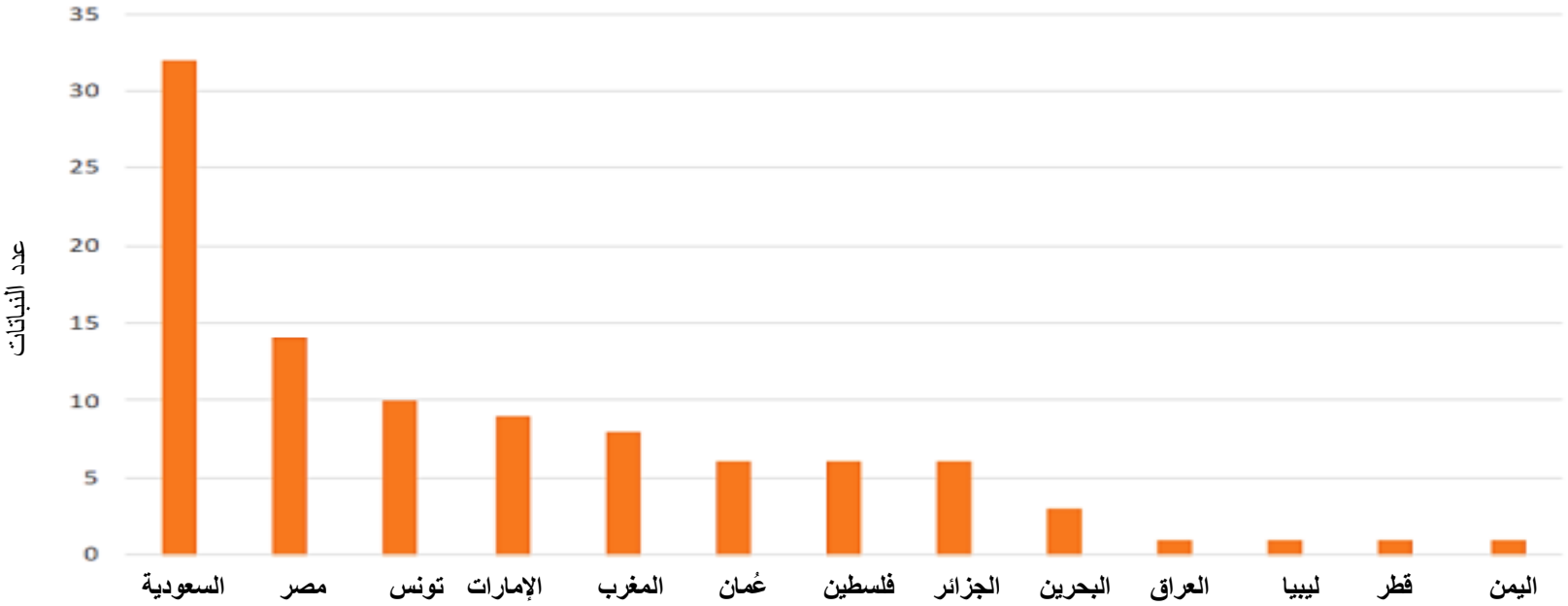
أظهرت دراسة استدامة حديثة أجريت على محطات تحلية مياه البحر في الإمارات العربية المتحدة تفوق تحلية المياه بالتناضح العكسي مقارنة بالتحلية بالتقطير الومضي متعدد المراحل والتأثير المتبادل. قام الباحثون بتطوير درجة الاستدامة ومقارنتها بدرجة الاستدامة التي طورتها منظمة اليونسكو. أظهرت كلا النتيجتين أن استدامة التناضح العكسي أعلى. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) وخلصت الدراسة إلى أنه على الرغم من أن التقطير الومضي متعدد المراحل والتأثير المتبادل يتمتعان باستدامة أعلى من التناضح العكسي من ناحية الأوضاع الاجتماعية والتقنية والاقتصادية، إلا إن أداءهما أقل من ناحية العوامل البيئية.



الشكل رقم 23: تطور تحلية المياه باستخدام مختلف التقنيات. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024)

تُعد تقنية التناضح العكسي التقنية الأكثر شيوعًا بين التقنيات الثلاثة الرائدة في مجال تحلية المياه، وتكمن مزاياها الرئيسية في القدرة على التكيف مع الظروف المتغيرة، والقدرة الإنتاجية بصورة مرنة، وتقليل البصمة الكربونية، وتوفير كبير في التكاليف في تحلية المياه الجوفية المالحة، والتصميم المعياري الذي يشغل حيزًا أقل من مساحة الأرض. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) يوضح الشكل (10) توزيع محطات تحلية المياه التي تعمل بتقنية التناضح العكسي من عام 2020 إلى عام 2030.

كما توفّر تقنيات الأغشية محاليل/ مخصبات الأسمدة ومياه الري وذلك بمستوى مقبول من العناصر الغذائية للتسميد. (صويلح وجونسون وهلال، 2020) ومن ناحية أخرى، تتطلب عملية التناضح العكسي إجراء معالجة أولية مكثّفة، والتي تعرّض بدورها الغشاء للتلوث، كما أن لها تكوين معقد، وتحتاج إلى محترفين مهرة للتشغيل والصيانة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



الشكل رقم 26: توزيع محطات تحلية المياه التي تعمل بتقنية التناضح العكسي (2020–2030). (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

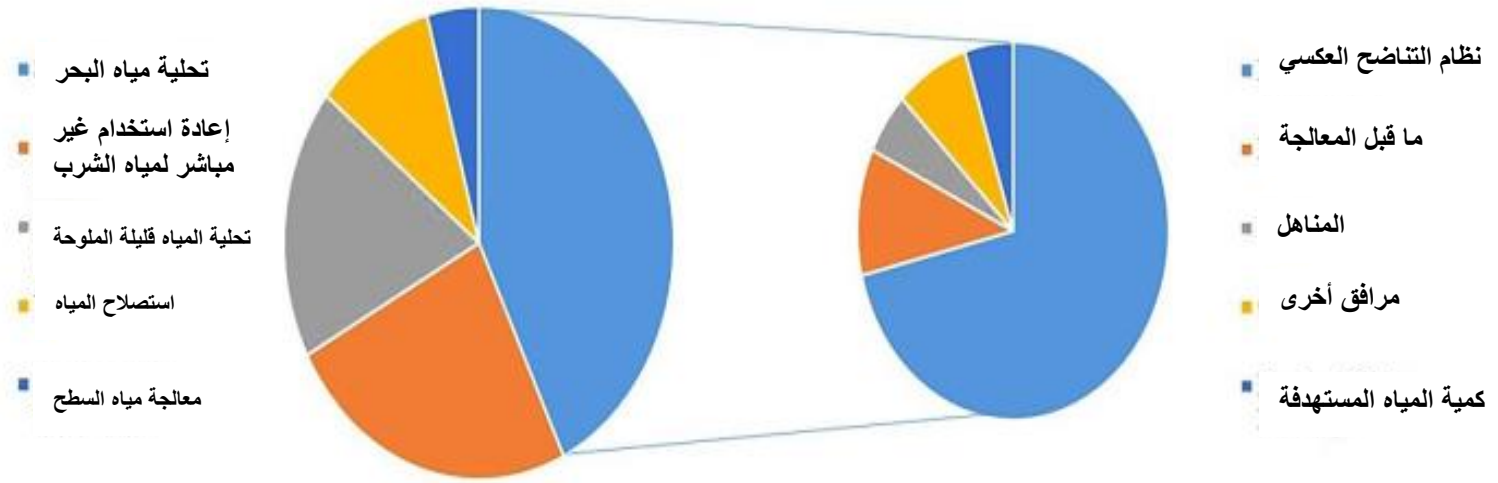
وعليه يمكننا الحصول على عدة استنتاجات في مجال تحلية المياه وتقنياتها. أولًا: تأتي التقنيات الموفرة للتكاليف في المقدمة في مجال تحلية المياه، وتشمل هذه التقنيات أجهزة تجديد الطاقة الفعّالة التي تعيد تدوير التدفقات عالية الضغط لتوفير ما يصل إلى 96% من التكاليف، ومواد الأغشية المتطوّرة والتي تزيد إنتاجيتها بمقدار ثلاثة إلى أربعة أضعاف عن العناصر القياسية، وتقنيات الترشيح الجديدة منخفضة الطاقة مثل التناضح الأمامي والتقطير الغشائي. وتشمل التقنيات الأخرى تقانة النانو، والمحاكاة الحيوية/ تقليد الطبيعة، والعمليات الهجينة المحسَّنة، وتحسين الأنظمة الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي ومراقبة الحالة، كما أن هذه التقنيات واعدة بخفض تكاليف رأس المال والتشغيل، لتعزز بدورها حقبة جديدة من القدرة على تحمل التكاليف،

وخاصّة مع تخفيف القيود النظامية. (هيربر، 2024) ثانيًا: تشهد منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا تطوّرًا ملحوظًا وموثوقية في مجال تحلية المياه؛ تلبيةً للطلب المتزايد على المياه الصالحة للشرب بفاعلية. وتتمتع تقنيات تحلية المياه بالقدرة على التكيف مع متطلبات السوق، مما يضمن الاستجابة للاحتياجات المتطوّرة. (بلتران وكو أوشيما، 2004)

مسودة للنقاش

ثالثًا: إمكانات كفاءة الطاقة: شركات الصناعات الزراعية الناشئة وأهم التحديات

تمثل كفاءة استخدام الطاقة عاملًا هامًا في تشغيل محطات جديدة، أو تحديث محطات قديمة، ففي المملكة العربية السعودية، والتي تمثل 35% من قدرة نزح المياه في المنطقة العربية، يُستخدم 25% من إنتاجها من النفط والغاز لتوليد الكهرباء والمياه. تتطلب عملية تحلية مياه البحر قدرًا كبيرًا من الطاقة مقارنة بالطرق الأخرى المُستخدمة في معالجة المياه. وكما هو موضح في الشكل رقم 11، تستهلك محطات تحلية مياه البحر التقليدية التي تعمل بتقنية التناضح العكسي ما بين 2.5 إلى 4.0 كيلووات في ساعة/متر مكعب. يُعد نظام التناضح العكسي المساهم الأساسي في استهلاك الطاقة المُحدد للمحطة، والذي يبلغ في المتوسط حوالي 1 كيلو وات في الساعة/متر مكعب. كما تضيف عمليات ما قبل معالجة المياه وما بعدها 0.2 إلى 0.4 كيلو وات في الساعة/متر مكعب، كما تستهلك مناهل مياه البحر حوالي 0.19 كيلو وات في الساعة/ متر مكعب، وتستخدم المرافق الأخرى حوالي 0.27 كيلو وات في الساعة/متر مكعب. كما تؤثر جودة وكمية المياه المستهدفة على استهلاك الطاقة المُحدد. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



الشكل رقم 29: استهلاك الطاقة وفقًا لخيارات إمدادات المياه وتوزيع الطاقة في محطات تحلية مياه البحر التي تعمل بتقنية التناضح العكسي. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

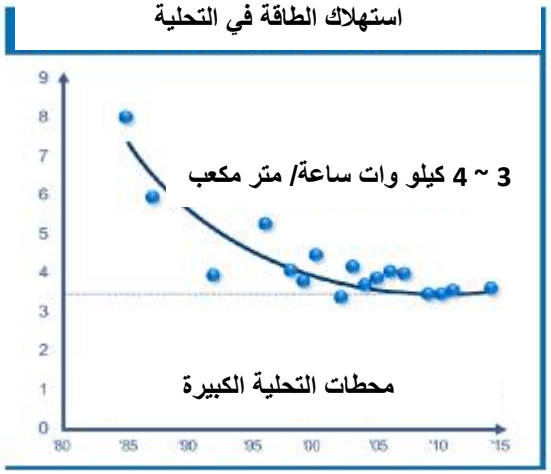
بالإضافة إلى كفاءة المحطة، فإن مصدر الطاقة الذي تعمل به محطة تحلية المياه يحدد بصمتها الكربونية المباشرة، حيث تنتج محطات تحلية مياه البحر التي تعمل بتقنية التناضح العكسي انبعاثات أقل من ثاني أكسيد الكربون مقارنة بتقنيات تحلية المياه الحرارية. وتقدر البصمة الكربونية لمحطات تحلية مياه البحر التي تعمل بتقنية التناضح العكسي بنحو 0.4 – 6.7 كجم مكافئ ثاني أكسيد الكربون/متر مكعب. ومع ذلك، فإن هذا أعلى عمومًا من البصمة الكربونية المقدرة لتحلية مياه البحر باستخدام تقنية التناضح العكسي والتي تبلغ 0.4 – 2.5 كجم مكافئ ثاني أكسيد الكربون/متر مكعب. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

وعلى الجانب الآخر، تُعد الطاقة المتجددة، لا سيما الطاقة الشمسية، حلًا وافيًا لتقليل البصمة الكربونية للمحطات التي تعمل بتقنية التناضح العكسي، وخفض تكاليف تشغيلها، وتقليل الفجوة بين أسعار المياه وتكاليف الوقود. يوضح الشكل رقم 13 استهلاك الطاقة في محطات تحلية المياه واسعة النطاق. ففي حقيقة الأمر، ركزت العديد من الدراسات والمحطات على استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية لتشغيل المحطات التي تعمل بتقنية التناضح العكسي على نطاق صغير، كما هو موضح في الشكلين رقم 12 ورقم 14، كما تعتمد حوالي 32% من أنظمة تحلية المياه الذاتية على وحدات التناضح العكسي التي تعمل بالطاقة الكهروضوئية.

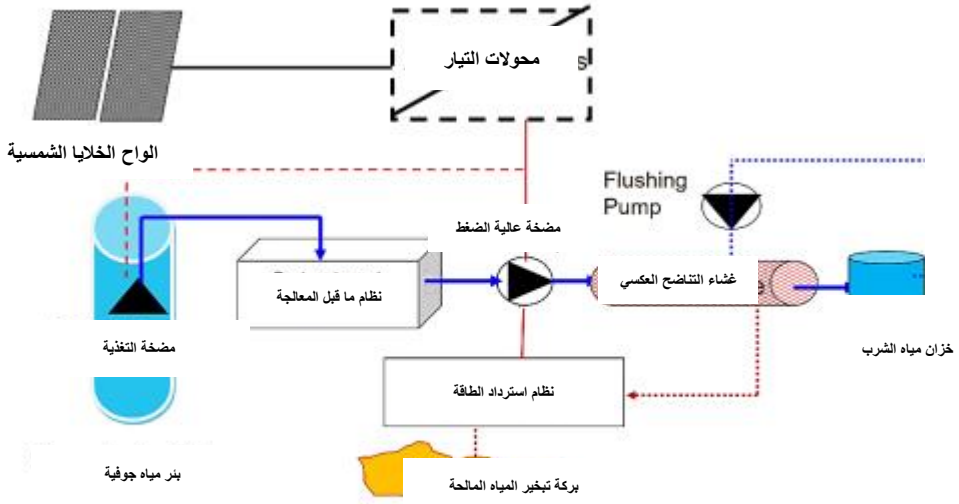
تُعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتقنية التناضح العكسي من التقنيات الأكثر شيوعًا والتي تتمتع بشبكة تجارية واسعة من الشركات المصنِّعة والموردين. ومع ذلك، فإن أهم التحديات التي تواجه تحلية المياه باستخدام الطاقة المتجددة هو أن تقنيات تحلية المياه تعمل عمومًا في ظروف ثابتة، وذلك على عكس مصادر الطاقة المتجددة والتي عادة ما تكون غير ثابتة. في الحقيقة، يحتاج توليد الطاقة المتجددة إلى تعديلات للإمداد المستمر (تخزين الطاقة)، ويمكن لتقنيات تحلية المياه أن تتكيف مع التشغيل المتغير.

وعلينا تسليط الضوء على أنه مع تزايد إلحاح مشكلة شح المياه في العديد من أنحاء العالم، وبخاصة في المنطقة العربية، ظهرت موجة جديدة من شركات الصناعات الزراعية. كما هو موضح في الشكل رقم 15. ومع ذلك، فإن إطلاق محطات تحلية المياه ينطوي على العديد من التحديات الكبرى، بما في ذلك الحاجة إلى ملف شامل من الخبرة الفنية. تتضمن البيانات الرئيسية المطلوبة معلومات حول توزيع المياه واستخدامها للري لتعزيز الكفاءة الزراعية، فضلًا عن الجوانب الكمية والنوعية للموارد مثل هطول الأمطار، والارتشاح، والتدفقات، والتغذية، وجودة المياه. (دغاري، تحلية المياه والزراعة، 2022)

الشكل رقم 31: أشكال التحلية باستخدام الطاقة الشمسية



الشكل رقم 32: استهلاك الطاقة في محطات التحلية الكبيرة



الشكل رقم 35: وحدات تحلية بالتناضح العكسي تعمل بالخلايا الشمسية وتُستخدم لأغراض الري

مزرعة ساندروب

01

استخدمت طاقة شمسية مركزة بهدف تحلية المياه في بورت اغسطا، في أستراليا، وأنتجت 335,103 متر مكعب من المياه المحلاة لاستخدامها في الزراعة المائية في الصوب الزراعية بتكلفة قدرها 205 مليون دولار أمريكي من أجل زراعة طماطم عالية القيمة

مشروع غابة الصحراء

02

أسِست في 2012 بدولة قطر، ويوفر هذا المشروع مياه محلاة لري المحاصيل في أرض مساحتها 300 هكتار وجني محاصيل كبيرة ثم توسعت الشركة في عملياتها إلى تونس واستصلحت 10 هكتار أخرى.

ووتر اف اكس

03

شركة ناشئة في كاليفورنيا قامت ببناء محطة تحلية مياه تعمل بالحرارة الشمسية على مساحة قدرها 14 هكتار وأنتجت 3.8 مليون متر مكعب من مياه الشرب في 2014 لاستخدامها في ري أكثر من 2800 هكتار بتكلفة تشغيلية قدرها 450 دولار أمريكي لكل 1.210 متر مكعب مع إمكانية إجراء مزيد من التطويرات عن طريق شركة بانوك للمياه

الشكل رقم 38: أهم مشاريع تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية. (دغاري، تحلية المياه والزراعة، 2022)

رابعًا: السياسات والأطر التنظيمية واستراتيجيات التخطيط القائمة

أثارت استخدام تحلية المياه لحل مشكلة شُح المياه الجدل لفترة طويلة، حيث أيّد العديد من صنّاع السياسات والوثائق السياسية هذا الخيار، وعلى النقيض أظهر آخرون تشككهم حول هذا الحل وفضّلوا حلولًا أخرى. (الخرّاز، 2020). في الواقع، هناك اتجاهان رئيسيان في تنظيم محطات تحلية المياه في المنطقة العربية. فالاتجاه الأول يشجع مشاركة الحكومة في تصميم وتشغيل محطات تحلية المياه. أما الاتجاه الثاني فيتمثّل في دعم مشاريع تحلية المياه الأقل استهلاكًا للطاقة والتي ينتج عنها تأثير بيئي أقل. ويمكن للحكومات دعم هذه المشاريع من خلال منح عقود إدارة امتيازية لتزويد السكان بالمياه. ويمكن لهيئات المياه الوطنية دعم مشاريع تحلية المياه من خلال تحليل تأثيرها على الاستدامة في كل مرحلة من مراحل عمليات تحلية المياه. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

وعندما يتعلق الأمر بالمنطقة العربية، تأخذ بعض خطط إدارة المياه الوطنية والمحلية تأثيرات تغير المناخ بدرجة كافية في الاعتبار، إذ لم تُطوَّر سياسات التكيف بصورة صحيحة على المستوى الوطني بعد. (الخرّاز، 2020) في الواقع، هناك العديد من القيود المؤسسية في قطاع المياه في المنطقة العربية، كما لم تُحسَّن الموارد البشرية والهيئات ذات الصلة بعد. لقد اهتمت صناعة تحلية المياه بإنتاج المياه أكثر من اهتمامها بالإدارة المتكاملة للموارد البحرية. ويبدو أن هناك نقصًا في السياسات والحوافز لاستخدام التكنولوجيا؛ نتيجة لضآلة الاستثمار في البحث والتطوير. (بلتران وكو-أوشيما، 2004)

وفيما يتعلق باللوائح البيئية، من المهم التأكيد على أنه -وللأسف حتى الآن- لا توجد معايير محددة لمتطلبات تقييم الأثر البيئي، بل مجرد إرشادات يقدمها برنامج الأمم المتحدة للبيئة. كما لم تُدمَج متطلبات تقييم الأثر البيئي بعد في سياسات الإدارة. وعلى الرُغم من توافر التكنولوجيا واستراتيجيات الإدارة للتخفيف من التأثيرات، هناك حاجة إلى معايير راسخة ودراسات متطلبات تقييم الأثر البيئي الشاملة على المستويين المحلي والإقليمي. (الخرّاز، 2020)

ونتيجةً لهذا، يواجه قطاع تحلية المياه في المنطقة العربية تحديات كبيرة بسبب السياسات والأطر التنظيمية غير الملائمة. ولم تنجح بعض الدول العربية بعد في تحقيق نهج متوازن في التعامل مع سياسات المياه، وحتى في الحالات التي توجد فيها مثل هذه السياسات، ففي الغالب لا تُطبَّق بفاعلية لتحقيق الأغراض المقصودة منها. بالإضافة إلى ذلك، لا تعالج القوانين والتشريعات كافة القضايا بدرجة كافية، وهناك فشل ملحوظ في التنفيذ والتطبيق. علاوة على ذلك، فإن عدم التعاون مع النظراء العرب والدوليين يؤدي إلى تفاقم هذه التحديات، مما يعيق بدوره تقدم القطاع. (العبري، 2022)

ومن ناحية أخرى، حازت تحلية المياه أهمية كبيرة في السياسات الوطنية والإقليمية في مختلف أنحاء المنطقة العربية في السنوات الأخيرة. ومن بين الاستراتيجيات الإقليمية المتعلقة بتحلية المياه استراتيجية المياه الغربية 5+5 (التي تضم الجزائر والمغرب وتونس وليبيا وموريتانيا من المنطقة العربية)، والتي تركز على تحلية المياه باعتبارها حلًا حيويًا لمشكلة شح المياه

المزمن، وكذلك التركيز على الحاجة إلى تقنيات فعّالة ومنخفضة التأثير واستخدام الطاقة المتجددة. إن تعزيز الأطر القانونية وتشجيع استثمارات القطاع الخاص أمر ضروري لتلبية الطلب المتزايد على المياه المُحلاة (المياه الصالحة للشرب). (الخرّاز، 2020)

وفي الختام، لمعالجة تحديات تحلية المياه، لا بُد أن تتضمن السياسات حوافز مالية مثل المنح، أو الإعانات، أو الإعفاءات الضريبية للتعويض عن التكاليف المرتفعة لتحلية المياه بالنسبة للمزارعين. كما أن دمج مصادر الطاقة المتجددة لتشغيل محطات تحلية المياه يمكن أن يقلل من التأثيرات البيئية ويعزز الاستدامة. إن تنفيذ اللوائح الخاصة بالتخلص الآمن من المحلول الملحي، مثل معالجة المياه وتنقيتها في الآبار العميقة، أو إعادة الاستخدام الصناعي، أمر بالغ الأهمية لحماية البيئة. وعلاوة على ذلك، فإن سياسات تسعير المياه وتخصيصها التي تشجع الاستخدام الفعّال وتثبط الإسراف يمكن أن تساعد في الحد من الطلب الإجمالي على المياه، مما يجعل تحلية المياه أكثر جدوى. وأخيرًا، ينبغي مواصلة البحث والتطوير لتحسين كفاءة تحلية المياه وخفض التكاليف، وبالتالي جعلها حلًا أكثر جدوى للزراعة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024)

خامسًا: تحليل التكاليف لمحطات تحلية المياه والجدوى الاقتصادية

أ. تحليل التكاليف لمشاريع التحلية

في السنوات الأخيرة، أصبحت التحلية أكثر تنافسية نتيجة زيادة السيولة المالية ونضج الأسواق المالية (منظمة الأغذية والزراعة، 2022). وتتنوع أسعار المياه المحلاة التي تدخل أنظمة التوزيع بصورةٍ واسعة على المستوى العالمي، حيث تتراوح من 0.50 إلى 2.50 دولار أمريكي لكل متر مكعب لتحلية مياه البحر، ومن 0.60 إلى 2.00 دولار أمريكي لكل متر مكعب لتحلية المياه قليلة الملوحة (هيربر، 2024). ويعتمد ذلك على عدة عوامل، مثل سعة ونوع محطة التحلية، ومصدر المياه الخام (مياه بحر، أو مياه قليلة الملوحة)، والعمالة، والموقع، ونوع الطاقة المستخدمة، سواء كانت تقليدية، أو متجددة (الخرّاز، 2020).

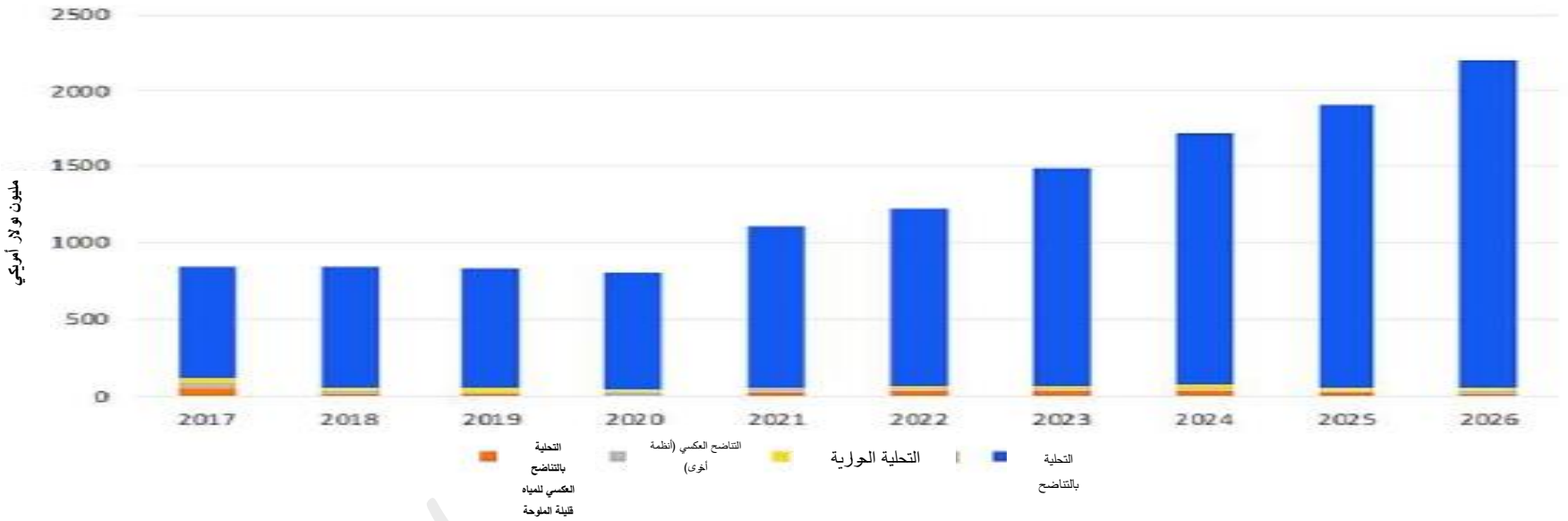
بالإضافة إلى ذلك، يؤثر قرب المحطات من المستخدمين النهائيين بدرجة كبيرة على التكاليف، نظرًا لأن نقل المياه المعالجة لمسافات كبيرة داخل البلاد يتطلب استخدام أنابيب كبيرة القطر، ومضخات تعزيز، وخزانات للتخزين، مما يزيد من تكاليف البنية التحتية الرأسمالية ونفقات الكهرباء التشغيلية. في الواقع، تسلط مشاريع التحلية واسعة النطاق الأخيرة الضوء على التكاليف الكبيرة لنقل المياه إلى الداخل. على سبيل المثال، تطلبت محطة تحلية كارلسباد في مقاطعة سان دييغو، التي تنتج 190,000 متر مكعب من المياه يوميًا، نحو مليار دولار أمريكي لبناء أنبوب يمتد لمسافة 54 ميلًا. كما واجهت محطة تحلية ملبورن في أستراليا تكلفة بلغت 750 مليون دولار أمريكي لمد أنبوب طوله 85 ميلًا. حتى المسافات الأقصر تحمل تكاليف عالية، مثل 140 مليون دولار أمريكي التي أنفقت على بناء أنبوب طوله 25 ميلًا إلى مونتيري في المكسيك. بغض النظر عن المسافة، فإن النقل يفرض أعباء مالية كبيرة (هيربر، 2024).

في المقابل، تظل مصادر المياه العذبة البلدية التقليدية أرخص بكثير، حيث تتراوح تكلفة المياه من الأنهار والبحيرات بين 0.10 و0.50 دولار أمريكي لكل متر مكعب، بينما تتراوح تكلفة المياه الجوفية والآبار بين 0.30 و1.00 دولار أمريكي، وجمع مياه الأمطار بين 0.15 و1.50 دولار أمريكي، وإعادة تدوير مياه الصرف بين 0.30 و1.15 دولار أمريكي. ونتيجةً لذلك، لا تزال تكلفة المياه المحلاة تعادل من 1.5 إلى 4 مرات أكثر من معظم مصادر المياه العذبة التقليدية، مثل البحيرات والأنهار والآبار الضحلة (هيربر، 2024).

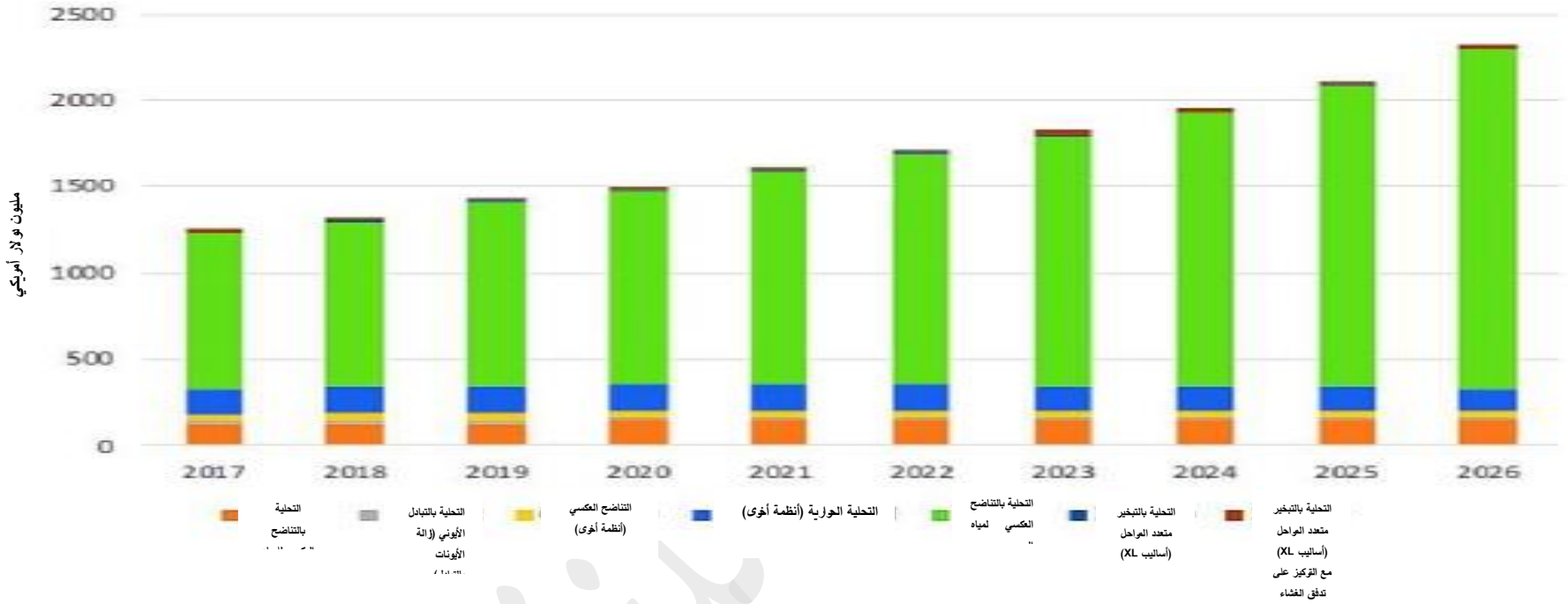
في منطقة الشرق الأوسط، تُعد المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة من بين الأماكن الأقل في التكلفة لتحلية المياه، نظرًا لانخفاض أسعار الطاقة نسبيًا والاستفادة من اقتصاديات الحجم الكبير في منشآتهما الضخمة. قد يسهم الاستخدام المتزايد للطاقة المتجددة في تشغيل عمليات التحلية في خفض التكاليف بصورة أكبر (الخرّاز، 2020). في الواقع، تبلغ تكلفة المياه الناتجة من أحدث مشاريع المملكة العربية السعودية نحو 0.50 دولار أمريكي لكل متر مكعب بفضل الطاقة الشمسية الرخيصة والدعم الحكومي للوقود الأحفوري (هيربر، 2024).

بالإضافة إلى ذلك، أفادت هيئة كهرباء ومياه دبي في عام 2020 أن تكلفة المياه لمحطة التحلية بالتناضح العكسي في حصيان، بسعة إنتاجية تبلغ 545,000 متر مكعب يوميًا، ستكون 0.306 دولار أمريكي لكل متر مكعب عند بدء التشغيل في عام 2023، وهي أدنى تعرفة مائية موحدة في العالم حتى الآن (الخرّاز، 2020).

بلغ إجمالي النفقات الرأسمالية لمحطات التحلية في المنطقة العربية حوالي 6,818 مليون دولار أمريكي في عام 2021، في حين بلغت النفقات التشغيلية 11,002 مليون دولار أمريكي. وبحلول أغسطس 2022، ارتفعت النفقات الرأسمالية إلى 8,162 مليون دولار أمريكي، بينما بلغت النفقات التشغيلية 11,434 مليون دولار أمريكي (منظمة الأغذية والزراعة، 2022). كما هو موضح في الشكلين 17 و18، حافظ سوق التحلية على استقراره في عام 2020 رغم جائحة كورونا، إذ منح 44% من السعة الجديدة خلال فترة الجائحة. ورغم انخفاض إجمالي السعة الجديدة المتعاقد عليها من 6.7 مليون متر مكعب يوميًا في 2019 إلى 4.7 مليون متر مكعب يوميًا في 2020، فإن هذا الرقم لا يزال يمثل رابع أعلى حجم سنوي في التاريخ (منظمة الأغذية والزراعة، 2022).



الشكل رقم 43: توزيع النفقات الرأسمالية لمحطات التحلية في المنطقة العربية (2017–2026). (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



الشكل رقم 40: توزيع النفقات التشغيلية لمحطات التحلية في المنطقة العربية (2017–2026). (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

يعرض الجدول أدناه النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لمحطات تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي واسعة النطاق في مختلف أنحاء العالم.

الجدول (2): النفقات الرأسمالية والتشغيلية لمحطات التحلية الكبيرة لمياه البحر بالتناضح العكسي. (زارزو، 2012)

الدولة	الموقع	السنة	السعة (م3/يوم)	النفقات الرأسمالية	التعرفة	نموذج التمويل
قبرص	لارنكا	2001	52,000	47 مليون يورو	0.74 دولار أمريكي لكل متر مكعب	هندسة – مشتريات – بناء
سنغافورة	سنج سبرينج	2005	136,380	117 مليون دولار أمريكي	0.49 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تملك – تشغيل
الجزائر	هنين	2005	200,000	225 مليون دولار أمريكي	0.756 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – نقل
أستراليا	برث	2006	143,000	387 مليون دولار أمريكي استرالي	1.17 دولار أمريكي استرالي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل
إسبانيا	اغويلاس	2008	210,000	363 مليون دولار أمريكي	0.579 دولار أمريكي لكل متر مكعب	هندسة – مشتريات – بناء + التشغيل والصيانة
الجزائر	سكيكدة	2009	100,000	110.8 مليون دولار أمريكي	0.7398 دولار أمريكي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل
الجزائر	بني صاف	2010	200,000	153.4 مليون دولار أمريكي	0.6994 دولار أمريكي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل
الهند	تشيناي	2010	100,000	91 مليون دولار أمريكي	1.03 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – نقل
قبرص	ليماسول	2012	40,000	55 مليون يورو	0.8725 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – نقل
أستراليا	محطة تحلية المياه الجنوبية (برثII)	2012	306,000	601 مليون دولار أمريكي	0.41 دولار أمريكي لكل متر مكعب	التحالف
الصين	تشينغداو	2013	100,000	135 مليون يورو	0.71 دولار أمريكي لكل متر مكعب	هندسة – مشتريات – بناء + التشغيل والصيانة
سنغافورة	توآسبرينغ	2013	318,500	635 مليون دولار أمريكي	0.36 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – تملك – نقل
الجزائر	تنس	2015	200,000	231 مليون دولار أمريكي	0.59 دولار أمريكي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل
سنغافورة	تواس III	2018	136,000	217 مليون دولار أمريكي سنغافوري	0.54 دولار أمريكي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل – تملك
السعودية	الشقيق 3	2021	450,000	600 مليون دولار أمريكي	0.52 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – نقل
السعودية	رابغ	2022	600,000	650 مليون دولار أمريكي	0.55 دولار أمريكي لكل متر مكعب	تصميم – بناء – تشغيل
الإمارات	الطويلة	2022	900,000	550 – 1.200 مليون دولار أمريكي	0.49 دولار أمريكي لكل متر مكعب	بناء – تشغيل – نقل

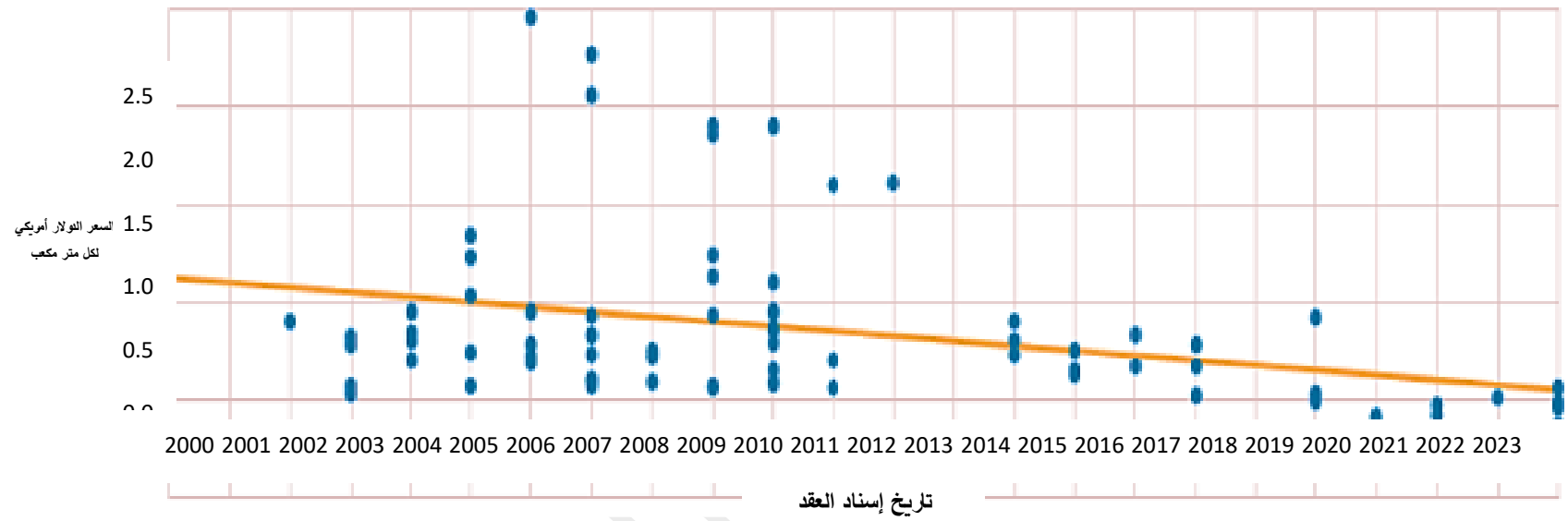
فيما يتعلق بتكلفة إمدادات المياه المحلاة للاستخدامات الزراعية، يُعد الماء المحلى أغلى من الموارد المائية التقليدية، وغالبًا ما يكون غير متاح لمعظم المحاصيل. ومع ذلك، قد يكون الماء المحلى متاحًا بأسعار معقولة لمحاصيل ذات قيمة عالية، خاصةً في حالة وجود دعم للرسوم الرأسمالية. يتمتع الماء المحلى بجودة عالية، ويمكن أن يكون له تأثير أقل سلبية على التربة والمحاصيل مقارنة بالاستخدام المباشر للمياه قليلة الملوحة (بلتران وكو–أوشيما، 2004).

أظهرت دراسة وطنية أجراها المركز الوطني للتميز في التحلية أن المزارعين الحاليين لا يرغبون في دفع أكثر من 1.00 دولار أمريكي أسترالي لكل متر مكعب من المياه، وفي العديد من المناطق يُعد هذا السعر مرتفعًا بصورة غير مقبولة (على سبيل المثال، تتراوح تكاليف المياه الشائعة في جنوب غرب أستراليا بين 0.18 و0.50 دولار أمريكي أسترالي لكل متر مكعب). يقارن هذا الاستعداد للدفع مع تكلفة إنتاج المياه في محطات التحلية الكبيرة، مما يعني أن تحلية مياه البحر تُعد خيارًا غير مرجح للممارسات الزراعية التقليدية إذ لا يوجد دعم حكومي. ومع ذلك، في التطبيقات التي تكون فيها تكلفة المياه صغيرة مقارنة بالاستثمار في البنية التحتية، مثل البيوت الزجاجية والزراعة المائية، فإن تطبيق تقنيات تحلية مياه البحر يُعد حاليًا خيارًا قابلًا للتطبيق (بيرن، هوانغ، زارزو، أوليفنياك، وكامبوس، 2015).

ب. الجدوى الاقتصادية لمرافق التحلية

من المهم أن ندرك أن التقدم في تقنيات الأغشية وأنظمة استرداد الطاقة ساهم في خفض تكاليف التحلية إلى النصف على مدى العشرين عامًا الماضية (هيربر، 2024)، مما جعل التحلية الآن أكثر تنافسية وجاذبية مقارنة بالموارد المائية التقليدية (ريكارت، فيلار–نافاسكويز، جيل–غيرادو، ريكو–أموروس، وآرواهتيز، 2020)، كما هو موضح في الشكل 19.

علاوة على ذلك، تُعد التحلية الاقتصادية للزراعة الأكثر جدوى عندما تتوفر كميات كبيرة من المياه قليلة الملوحة بالقرب من المحيط، مع وجود طلب قائم على الري. تساعد هذه الظروف على تقليل تكاليف إنتاج المياه وتوزيعها. كما أن المياه الجوفية منخفضة الملوحة تسمح بمعدلات استرداد أعلى وخلط المياه الخام مع المياه المحلاة. بالإضافة إلى ذلك، يقلل القرب من المحيط من تكاليف التخلص من المحلول الملحي مقارنة بطرق التخلص في المناطق الداخلية (بيرن، هوانغ، زارزو، أوليفنياك، وكامبوس، 2015).



الشكل رقم 46: تطور سعر المياه المحلاة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024)

بالنسبة للمستخدمين الصناعيين، عادةً ما تكون تكاليف إمدادات المياه غير مؤثرة بدرجة كبيرة على القدرة التنافسية (بلتران وكو-أوشيما، 2004). ومع ذلك، قد تصل تكاليف أنظمة التحلية الصغيرة المستخدمة في الفنادق، أو الصناعات إلى 45 دولار أمريكيا أمريكيًا لكل متر مكعب (هيربر، 2024).

من المتوقع أن يسهم الانخفاض المستمر في تكاليف الإنتاج، إلى جانب الزيادة في نفقات معالجة المياه التقليدية نتيجة للأنظمة التنظيمية الأكثر صرامة وندرة المياه المتزايدة، في تعزيز الاعتماد على مياه المحيط كمصدر رئيسي للمياه (منظمة الأغذية والزراعة، 2024). ويمكن دعم هذا الانخفاض في تكاليف التحلية من خلال اختيار مواقع ساحلية قريبة من مراكز الطلب الرئيسية، وتحديد مواقع سحب المياه ذات المخاطر المنخفضة للتلوث وتجمع الأحياء الدقيقة، واستغلال البنية التحتية البحرية القائمة لأغراض مزدوجة، وتعزيز المنشآت، بما في ذلك أنظمة التخزين، لمواجهة الكوارث الطبيعية (هيربر، 2024).

وبالتالي، تُعد تحلية المياه لأغراض الزراعة ممكنة من الناحية الفنية، لأنه تتوفر التقنيات المناسبة. ومع ذلك، تبقى القضايا الرئيسية التي تحتاج إلى النقاش هي حجم محطات التحلية، وتصاميمها، وأنواع المحاصيل والمناطق التي يمكن استخدام المياه المحلاة فيها، بالإضافة إلى تمويل المشاريع. لذا، فإن العوامل الاقتصادية والبيئية هي العوامل الوحيدة التي يمكن أن تحد من تطبيقها، ويجب تقييمها والتحكم فيها بدقة. (بلتران وكو-أوشيما، 2004)

ج. تكلفة التحلية والجدوى الاقتصادية للمحاصيل

حاليًا، لا تزال تكلفة المياه المحلاة مرتفعة جدًا لتطبيق هذا المورد في الزراعة المروية على نطاق واسع. ومع ذلك، يُعد استثناء الزراعة المكثفة للمحاصيل النقدية ذات القيمة العالية، مثل الخضروات والزهور (خصوصًا في البيوت الزجاجية) المزروعة في المناطق الساحلية، لأن يكون التخلص الآمن من المحاليل الملحية أسهل من المناطق الداخلية. (بيرن، هوانغ، زارزو، أوليفنياك، وكامبوس، 2015). في هذا السياق، قيّم (عواد وآخرون، 2020) تأثير تكلفة المياه على إنتاجية المحاصيل، وأوضحوا أن عملية تحلية المياه يمكن أن تكون مفيدة اقتصاديًا للمزارعين إذا اتبعوا التوصيات الفنية لتحقيق إنتاجية عالية.

في استطلاع أجريناه مع خبراء من المنطقة العربية، عند سؤالهم عن كيفية تحديد الأسعار للمياه المحلاة للعملاء الزراعيين، ذكر 40% أنهم يعتمدون على التسعير الثابت لكل حجم من المياه، بينما ذكر 40% آخرون أنهم يعتمدون على التسعير التفاوضي بناءً على عقود طويلة الأجل. وفيما يتعلق بالعوائق المالية التي تواجه المزارعين للوصول إلى المياه المحلاة بأسعار معقولة، أكدوا على أهمية تسهيل الوصول إلى الدعم الحكومي، أو المؤسسي وتقديم المساعدة المالية، أو الدعم.

وعند سؤالهم عن أنواع المحاصيل التي تُروى بالمياه المحلاة، أشاروا إلى:

الخضروات (مثل: الطماطم، والفلفل)

الفواكه (مثل: الحمضيات، والعنب)

أخيرًا، عندما سألناهم عما يمكن أن يجعل التحلية أكثر جدوى مالية للزراعة، كانت الردود كالتالي:

- خفض تكاليف الطاقة

- الشراكات بين القطاعين العام والخاص(PPP)

– التقدم التكنولوجي الذي يقلل من التكاليف التشغيلية

تُعد المحاصيل النباتية مثل تلك من عائلة الباذنجانيات (مثل الطماطم، والبطاطس، والباذنجان، والفلفل) وعائلة القرعيات (مثل البطيخ، والشمام، والخيار، والكوسا الصيفية) مناسبة لظروف البيوت الزجاجية. يعود نجاح هذه المحاصيل تحت الزراعة المحكومة إلى قدرتها الجيدة على التكيف والنمو عبر عدة دورات زراعية، بالإضافة إلى جدواها الاقتصادية. تمثل هذه المحاصيل حوالي 80% من الزراعة المحكومة في معظم دول منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، مما يجعل استخدام المياه المحلاة لإنتاجها تحت ظروف البيوت الزجاجية خيارًا فعالًا.

على سبيل المثال، تستخدم مزرعة ساندروب 860,000 متر مكعب من المياه العذبة سنويًا لري 2000 متر مربع من البيوت الزجاجية. بينما في إسبانيا، توفر المنتجات الزراعية (الخضروات، الزهور، والنباتات الزينة) قيمة مضافة أكبر لكل وحدة من المياه المروية، حيث تصل إلى 5.79 يورو لكل متر مكعب في المتوسط، تليها كروم العنب وأشجار الفاكهة (1.08 و0.68 يورو لكل متر مكعب على التوالي)، ومحاصيل الحبوب (0.06 يورو لكل متر مكعب). ويُقدر متوسط تكلفة المياه لجميع المنتجات بحوالي 0.41 يورو لكل متر مكعب. هذه الأرقام تشير إلى المحاصيل ذات القيمة العالية، إذ قد تكون تكلفة المياه الإجمالية هامشية مقارنة بالتكاليف الكلية.

على النقيض، من غير المحتمل أن تكون زراعة القطن، أو الأرز، أو السكر فعالة باستخدام المياه الموردة من محطات التحلية، وذلك بسبب عوائدها الاقتصادية المنخفضة ومتطلباتها العالية من المياه. علاوة على ذلك، أظهرت تجربة ري مزارع الفواكه الحمضية بالمياه المحلاة زيادة في الإنتاج تتراوح بين 10% و50%، وذلك اعتمادًا على جودة المياه المستخدمة قبل إدخال المياه المحلاة، في حين انخفضت احتياجات المياه بنسبة 20%. وفي حالة إنتاج الموز في البيوت الزجاجية باستخدام المياه المحلاة، تقليل استخدام الأسمدة والمياه بنسبة 50% و30% على التوالي، مما أدى إلى زيادة إنتاج الموز وتسريع نضوج النباتات. (بيرن، هوانغ، زارزو، أوليفنياك، وكامبوس، 2015)

تعاني دول منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (MENA) من بعض أكبر أزمات نقص المياه في العالم، بينما تُعد هذه المنطقة من أكبر مستوردي المنتجات الزراعية. لذا، يمكن أن تُستخدم تقنية التحلية الشمسية لتوفير المياه العذبة للإنتاج الزراعي في هذه المنطقة (عواد وآخرون، 2020).

من ناحية أخرى، بدأت مصر مشروعًا وطنيًا كبيرًا في عام 2019 لإنشاء 100,000 بيت زجاجي، بما في ذلك 5,000 بيت زجاجي على مساحة 8,500 هكتار في مناطق الحمام، وأبو سلطان، والعاشر من رمضان، وقرية الأمل شرق الإسماعيلية. أدى استخدام البيوت الزجاجية عالية التقنية لبعض المحاصيل إلى تحقيق توفير يصل إلى 90% في مياه الري، مع زيادة الإنتاجية بمعدل ستة أضعاف مقارنةً بالزراعة المفتوحة، بالإضافة إلى توفير مجموعة متنوعة من الخضروات في السوق بأسعار اقتصادية على مدار العام (عواد وآخرون، 2020).

علاوة على ذلك، أظهر (عواد وآخرون، 2020) أن نظام زراعة البيوت الزجاجية يُستخدم بصورة متكررة في منطقة سوس ماسة في المغرب، إذ تنتج هذه المنطقة حوالي 77% من خضروات المغرب و40% من إنتاج الفواكه الحمضية، بينما تمثل فقط 2% من إنتاج الزيتون، وتغطي مساحة تزيد عن 15,000 هكتار. ومع ذلك، تواجه المنطقة مشكلة كبيرة في ندرة المياه، لأنه لا تتجاوز معدلات الأمطار السنوية 200 ملم، ويبلغ نقص المياه أكثر من 260 مليون متر مكعب. علاوة على ذلك، يستخدم الإنتاج الزراعي في هذه المنطقة حوالي 90% من المياه المتاحة. وبالتالي، فإن استخدام المياه المحلاة لري المحاصيل مثل الطماطم والتوت والخضروات المختلفة يمكن أن يكون بديلًا اقتصاديًا لضمان استمرارية إنتاج المنتجات الزراعية.

في تونس، يواجه الري، لا سيما في منطقة ديار الحجاج الساحلية، تهديدًا بسبب تسرب مياه البحر، مما يؤدي إلى تضرر العوائد الزراعية. أظهرت دراسة تحليل جدوى استخدام المياه المحلاة لاستقرار الري أن الاعتماد فقط على المياه المحلاة يؤدي إلى صافي دخل سلبي لمعظم المحاصيل، باستثناء الفراولة. حتى مع تطوير الزراعة الصناعية، تظل معظم المحاصيل في الأراضي المفتوحة غير مربحة، باستثناء الطماطم. كما أن خلط المياه المحلاة مع مياه مالحة أخرى يؤدي أيضًا إلى دخل سلبي للمحاصيل الرئيسية. ومع ذلك، فإن استبدال المحاصيل في الأراضي المفتوحة بزراعة البيوت الزجاجية يكون مفيدًا عند استخدام المياه المحلاة. يحد ارتفاع تكلفة التحلية (0.5 دولار أمريكي/متر مكعب) مقارنةً بسعر المياه المستخدمة للري في تونس (0.05 دولار أمريكي/متر مكعب) من تطبيقها على المحاصيل ذات الاحتياجات المائية المنخفضة والقيمة المضافة العالية (داغاري وآخرون، 2021).

يمكن الاستنتاج من ذلك أن استخدام المياه المحلاة في الزراعة سيكون مجديًا حيثما كانت مصادر المياه المناسبة محدودة. من المرجح أن يكون ذلك اقتصاديًا في بيئات محكمة التحكم، باستخدام ممارسات زراعية تضمن الكفاءة القصوى في استخدام المياه وزراعة محاصيل ذات إنتاجية عالية. غالبًا ما ترتبط هذه الظروف بالبيوت الزجاجية وإنتاج المحاصيل ذات القيمة العالية. ومع ذلك، من المهم الإشارة إلى أن مستوى الدعم المالي العالي والخصومات المقدمة للقطاع الزراعي في دول الاتحاد الأوروبي، على سبيل المثال، يجعل هذا الخيار أكثر جدوى.

سادسًا. طرق التمويل ونماذج تنفيذ العقد

أ. طرق التمويل

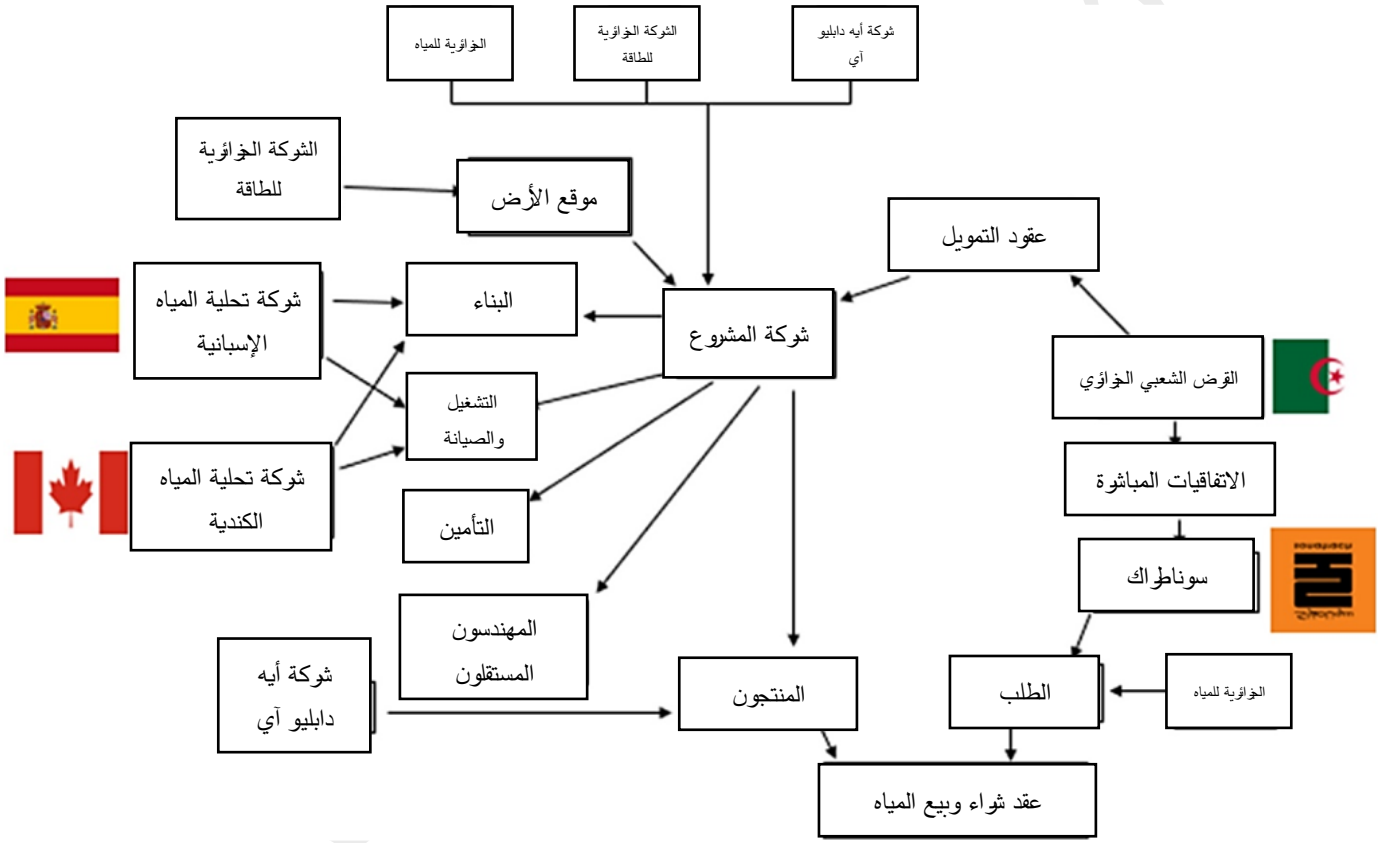
تعتمد الجدوى الاقتصادية لمشاريع تحلية المياه غالبًا على توازن دقيق بين المصالح العامة وعوائد الاستثمار الخاص، ما يستلزم إجراء تقييم شامل لاستراتيجيات تقاسم المخاطر واعتبارات الاستدامة طويلة الأجل. (فاستركابيتال، 2024). من ثمّ، يتطلب الحصول على رأس المال اللازم لمشاريع تحلية المياه الضخمة اتباع نهج متعدد الأوجه، يجمع بين طرق التمويل التقليدية وآليات التمويل المبتكرة وذلك على النحو الموضح في الجدول التالي:

الجدول (3). *طرق التمويل المختلفة (فاستركابيتال، 2024)*

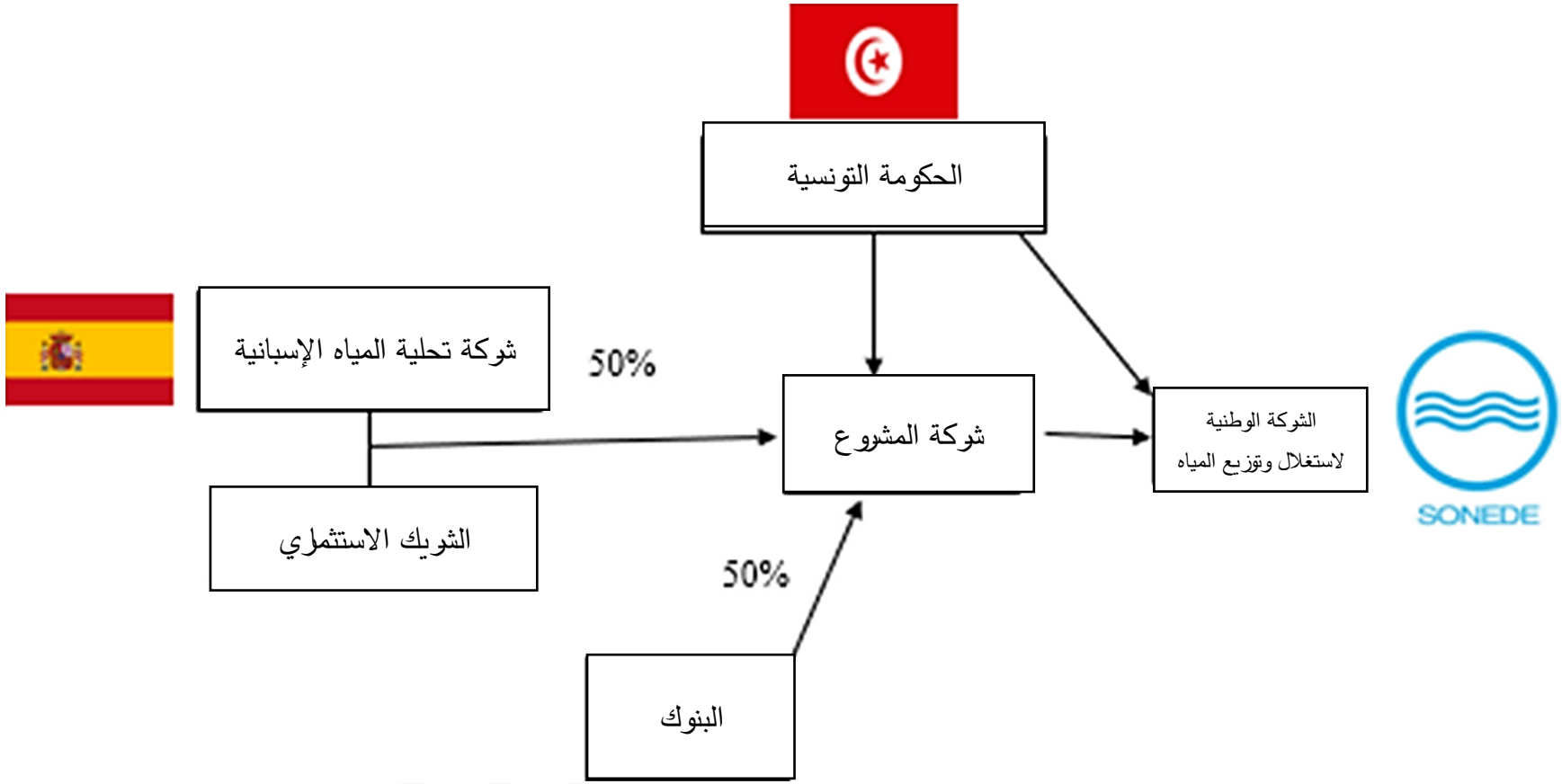
طريقة التمويل	الشرح	مثال
بنوك التنمية متعددة الأطراف	مؤسسات تقدم قروضًا وضمانات لدعم المشاريع الضخمة.	محطة الجبيل لتحلية المياه في المملكة العربية السعودية.
السندات الخضراء وتمويل مشاريع مكافحة التغير المناخي	السندات الصادرة لتمويل المشاريع الصديقة للبيئة ذات الآثار الإيجابية.	مشروع بوسيدون ووتر في هونتينغتون بيتش.
التمويل الحكومي المباشر	تمول الحكومة المشروع بالكامل، ولا سيما عندما يكون أمن المياه أولوية وطنية.	محطات تحلية المياه التي تنفذها شركة أكواميد العامة في إسبانيا.
السندات الإيرادية	السندات المُسدد قيمتها من الإيرادات التي تولدها المحطة، وغالبًا ما تُستخدم في إطار اتفاقيات البيع طويلة الأجل.	محطة بيرث لتحلية مياه البحر في أستراليا.
تمويل الشركات	تمول الشركات الكبرى المحطة بشكل مستقل بسبب احتياجاتها الكبيرة للمياه.	محطة بي إتش بي بيليتون لتحلية مياه البحر في تشيلي.
الشراكات بين القطاعين العام والخاص	التعاون بين الحكومة والقطاع الخاص لتقاسم المخاطر والفوائد.	محطة كارلسباد لتحلية المياه في كاليفورنيا، ومحطة شتوكة آيت لتحلية المياه في المغرب.

في هذا الصدد، قيّمت دراسة حديثة أثر مشاركة القطاع العام في جدوى مشاريع تحلية المياه في ثلاث دول عربية (الجزائر ومصر وتونس)، إذ عرضت الدراسة الأسواق الرئيسية للشركات الإسبانية المتخصصة في تحلية المياه، مع التركيز على هياكل مشاريع تحلية المياه المختلفة. تمثل حالتا الجزائر وتونس طرفي نقيض، ففي حالة الجزائر، يشارك القطاع العام في

ملكية المشروع واتخاذ القرارات بشأن مشروع الشركة وذلك على النحو الموضح في الشكل 20، في حين لا يشكل القطاع العام، في حالة تونس، جزءًا من مشروع الشركة، على النحو الموضح في الشكل 21. (مونتانو، وجارسيا لوبيز، وميلجاريجو، 2021)

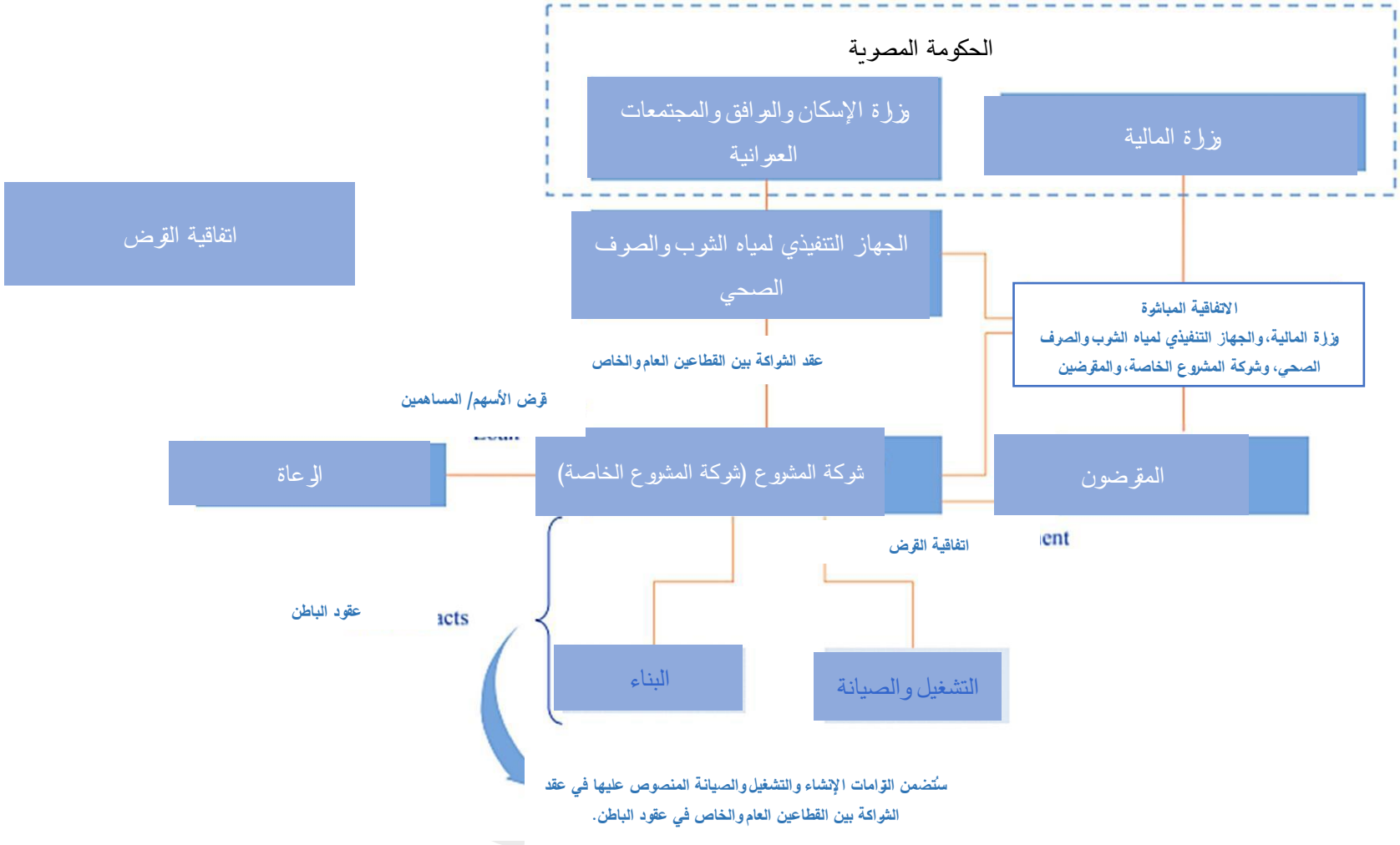


الشكل رقم 48: *الهيكل الكامل للمشروع الجزائري. (مونتانو، وجارسيا لوبيز، وميلجاريجو، 2021)*



الشكل 50. *الهيكل الكامل للمشروع التونسي. (مونتانو، وجارسيا لوبيز، وميلجاريجو، 2021)*

في المقابل، تمثل الحالة المصرية خيارًا وسطًا بين الحالتين السابقتين، إذ يشارك القطاع العام في مشروع الشركة دون أن يكون شريكًا في ملكيتها. (مونتانو، وجارسيا لوبيز، وميلجاريجو، 2021) وذلك على النحو الموضح في الشكل الوارد أدناه:



الشكل رقم 52: *الهيكل الكامل للمشروع المصري. (مونتانو، وجارسيا لوبيز، وميلجاريجو، 2021)*

خلصت الدراسة إلى أن مستوى مشاركة القطاع العام يؤثر بشكل كبير في الجدوى المالية لمشاريع تحلية المياه. يقدم نموذج الجزائر، الذي يتميز بمشاركة قوية من الدولة، بيئة استثمارية أكثر أمانًا مقارنةً بنموذج تونس، الذي يفتقر إلى الضمانات الحكومية الرسمية. يوازن نهج مصر الوسيط بين ضمانات القطاع العام ومشاركته المالية المحدودة، ما يجذب الاستثمار الخاص مع الحفاظ على الرقابة. تشير التحليلات إلى أن المشاركة القوية للقطاع العام، على غرار نموذج الجزائر، تُعد ضرورية لتمويل مشروع تحلية المياه بنجاح، في حين قد يحتاج نموذج تونس إلى إعادة تقييم لتحسين الجدوى الاقتصادية.

من جهة أخرى، في استطلاع أجريناه على مجموعة من الخبراء من المنطقة العربية، أشار 80% منهم أن المصادر الأساسية لتمويل عمليات تحلية المياه تأتي من الاستثمار الخاص، يليه الإعانات الحكومية والقروض/ الائتمانات. وعند سؤالهم عن الحفاظ على الجدوى المالية لعمليات تحلية المياه، أكد 40% من الخبراء المستجوبين على محدودية الوصول إلى التمويل كتحدٍ رئيسي. علاوة على ذلك، عند سؤال الخبراء عن نوع الاستثمار الذي يعتقدون أنه أكثر موثوقية لتمويل مشاريع تحلية المياه، اتفقوا جميعًا على الشراكات بين القطاعين العام والخاص، تليها الاستثمارات الخاصة (مثل المستثمرين الأفراد، أو الشركات الخاصة)، ثم الجمع بين الاستثمار الدولي والخاص.

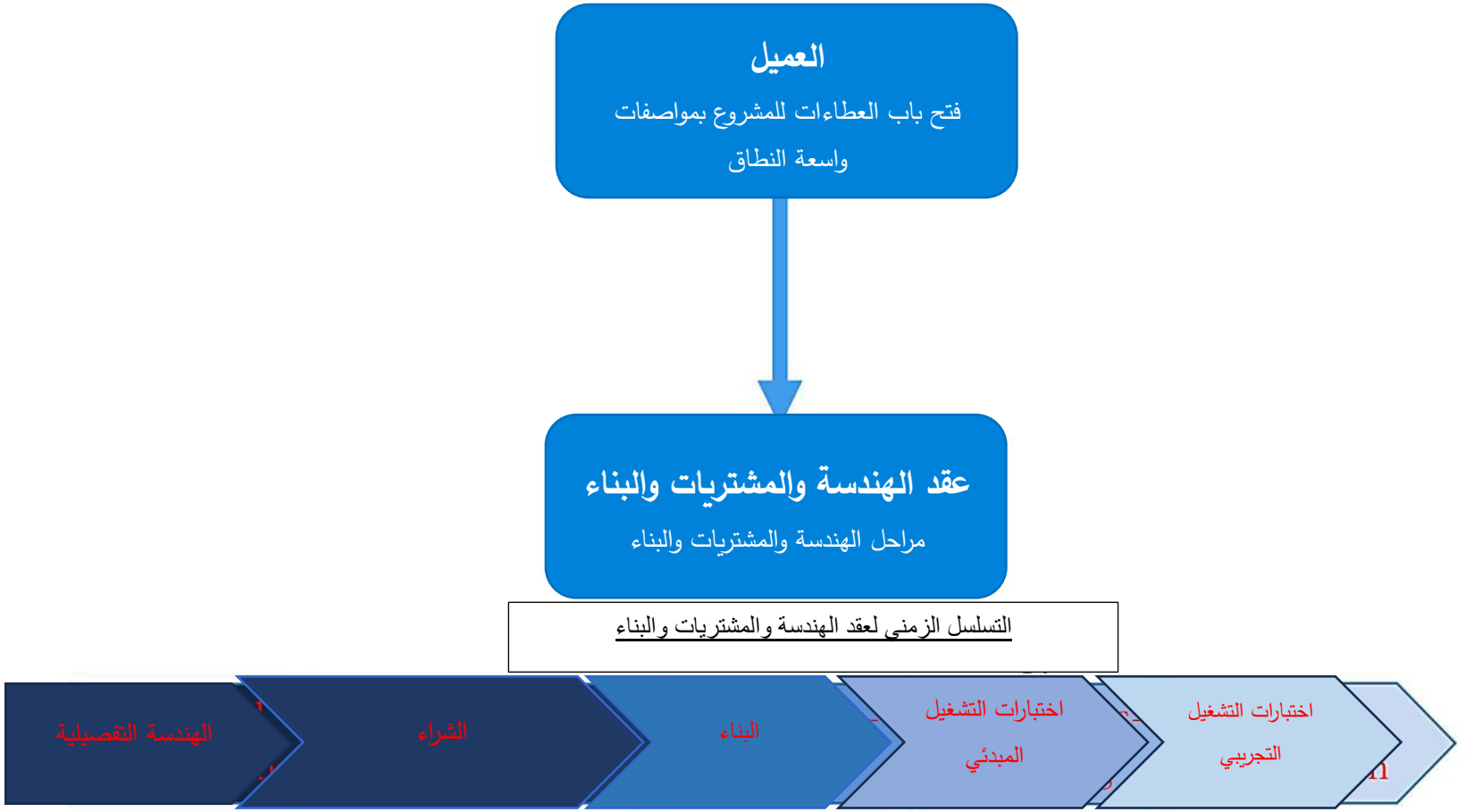
د. نماذج تنفيذ العقد

تُستخدم نماذج تنفيذ مختلفة لشراء مشاريع تحلية المياه. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) يعتمد نموذج التنفيذ المُختار على عدة عوامل، بما في ذلك نوع المالك، أو العميل، وما إذا كان وكالة عامة، أو جهة خاصة، وملف مخاطر المشروع، وخبرة المالك في مشاريع مماثلة، ومصدر تمويل المشروع، الذي قد يشمل القروض، أو المنح، أو السندات، أو الأسهم، أو مزيجًا من مما سبق. ((منظمة الأغذية والزراعة، 2022)، (العبري، 2022)). يمكن تصنيف مشروع تحلية المياه بموجب أي من الشروط ونماذج العقود التالية:

- **الهندسة والمشتريات والبناء**

اتفاقية تعاقدية مبرمة بين مالك المشروع والمقاول. يُمكّن الإطار التعاقدي في عقد الهندسة والمشتريات والبناء المالك من نقل كامل مخاطر التصميم والمشتريات والبناء إلى المقاول.

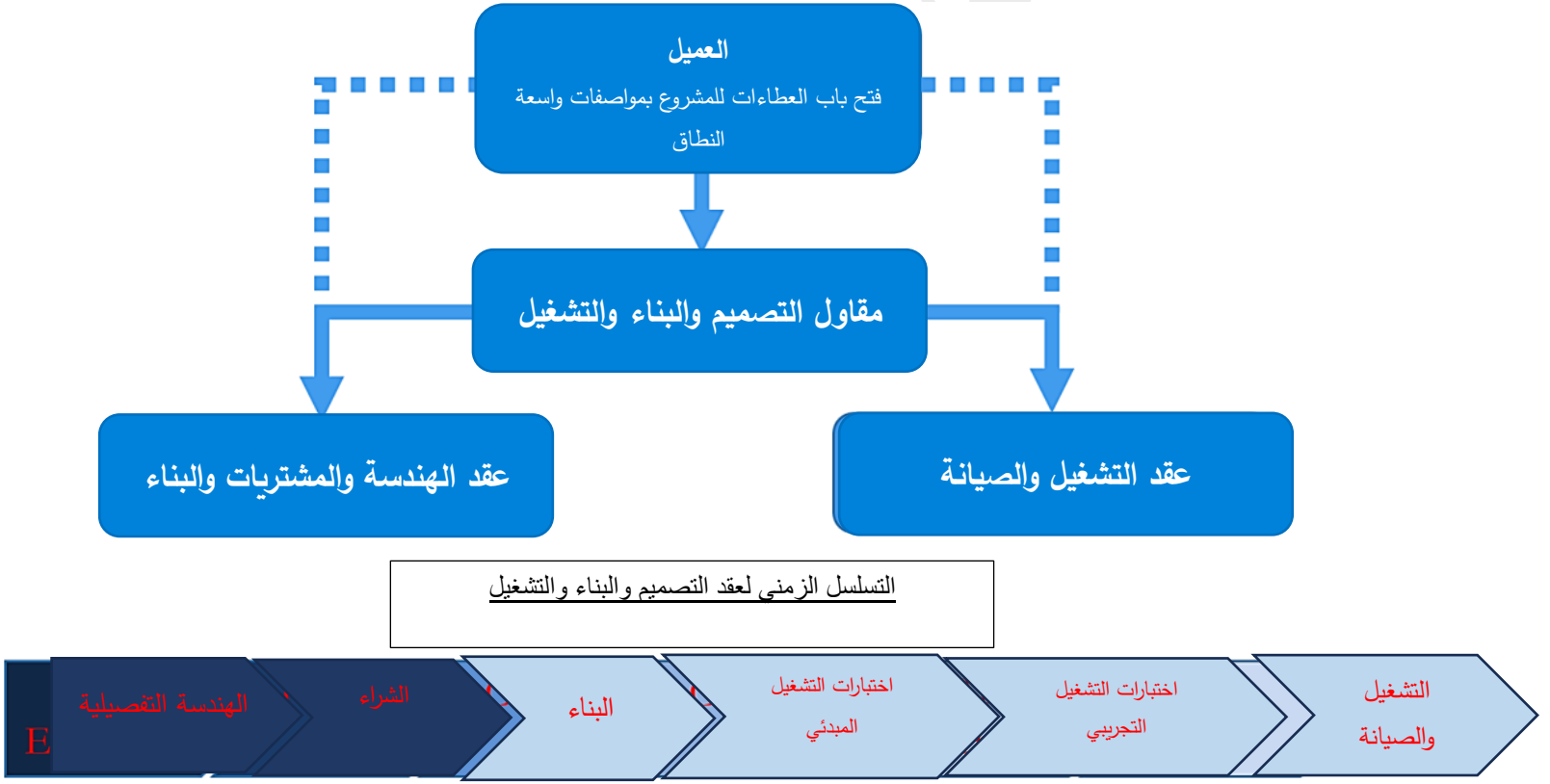
يتحمل المقاول وحده مسؤولية إنجاز المشروع وتسليمه إلى المالك بحالة جاهزة للتشغيل "تسليم المفتاح" (شركة بلاك ريدج، 2023) على النحو الموضح في المخطط الوارد أدناه.



الشكل 54. *مخطط نموذج تنفيذ الهندسة والمشتريات والبناء*

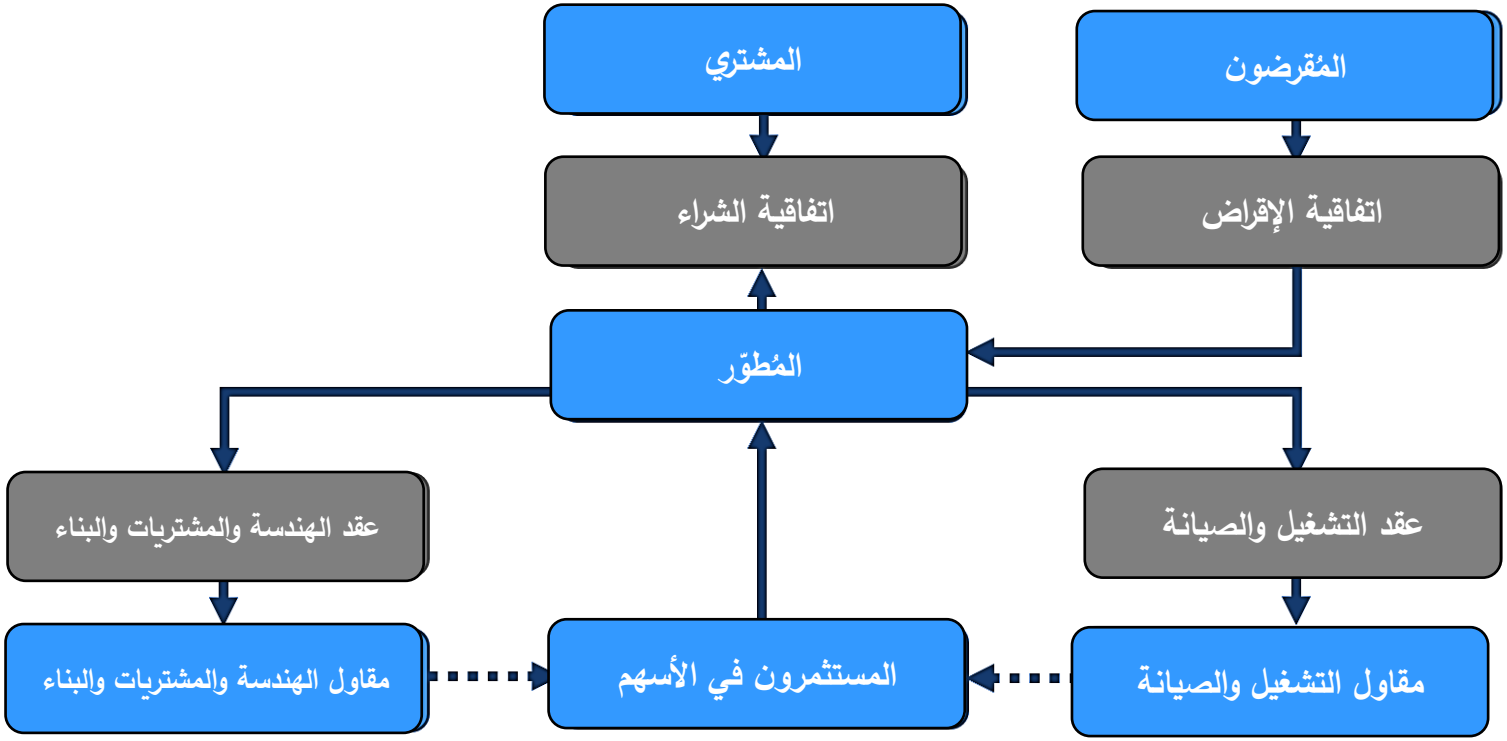
- **التصميم والبناء والتشغيل**

في إطار عملية تقديم العطاءات، يمنح العملاء الراغبون في إنشاء محطات تحلية مياه عقودًا للبناء والتشغيل والصيانة كحزمة واحدة. في بعض الحالات، يتحمل أعضاء الائتلاف المختلفون الذين يقدمون العطاء مسؤوليات مختلفة في العقد فيما يتعلق بالبناء والتشغيل. يتطلب هذا النموذج أطرًا قانونية أقل من النماذج الأخرى (مثل البناء والتملك والنقل) ويشجع على الاعتماد على الموثوقية طويلة الأجل كهدف رئيسي للتنمية نظرًا لأن العنصر التشغيلي للعقد يتطلب أطرًا قانونية أكثر صرامة من تلك الموجودة في النماذج القائمة على البناء والتملك والنقل. استُخدم هذا النموذج لمشاريع إمدادات المياه في البصرة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



- **البناء والتملك والنقل**

يُشرك نموذج التنفيذ الحالي مُطوّر خاص يتولى بناء المنشأة وتملكها وتشغيلها لفترة العقد الأولية على النحو الموضح في الشكل الوارد أدناه. بحلول نهاية فترة العقد، يجوز إعادة نقل ملكية المنشأة إلى العميل، لذلك أطلقنا عليه اسم البناء والتملك والنقل، أو يجوز للمُطوّر الاحتفاظ بالمنشأة وإبرام عقد توريد جديد، لذلك أطلقنا عليه اسم البناء والتملك والتشغيل. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) من الأهمية بمكان التأكيد على أنه في عام 2020، مكّن التمويل الخاص من تحقيق استثمارات كبيرة في مشاريع تحلية المياه الجديدة، ولا سيما باستخدام نموذج مُنتِج المياه المستقل مع عقود البناء والتملك والنقل طويلة الأجل، ومعظمها في دول الخليج العربي. تنتج مشاريع البناء والتملك والنقل المذكورة، مثل الجبيل 3أ والجبيل 3ب وينبع 4، في الوقت الحالي المياه المحلاة بأسعار أقل من 0.50 دولار أمريكي/ م^3. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)



الشكل رقم 58: *مخطط نموذج تنفيذ البناء والتملك والنقل*

من بين العقود المذكورة سابقًا، تكتسب مشاريع تحلية المياه بنظام البناء والتملك والتشغيل والنقل شعبية كبيرة في جميع أنحاء العالم. تُمكّن مشاريع البناء والتملك والتشغيل والنقل البلديات والمرافق العامة من نقل المخاطر المرتبطة بتكاليف المياه المحلاة إلى القطاع الخاص، الأمر الذي يوفر حلًا أكثر استدامة وفاعلية من الناحية المالية. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

فيما يتعلق بالمنطقة العربية، جرت مناقشة الشراكات بين القطاعين العام والخاص على نطاق واسع في المنطقة العربية في العقد الماضي، ونتيجةً لذلك، دخلت العديد من الدول في شراكات بين القطاعين العام والخاص لإدارة شبكات إمدادات المياه الخاصة بها وبناء بنية تحتية جديدة بهدف توفير خدمات المياه والصرف الصحي، بما في ذلك الجزائر ومصر والمغرب وتونس والأردن وعمان وقطر والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة. علاوة على ذلك، أُولي اهتمام خاص لعلاقاتها بالأُطُر المؤسسية والتنظيمية، والمخاطر السوقية، ومخاطر المشتري، وهياكل التعريفة، ورسوم المياه المحلاة، والمخاطر الإنشائية والفنية والتشغيلية، وآليات التمويل، وتحسينات الائتمان، والمخاطر البيئية. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

في سلطنة عُمان، على سبيل المثال، تُعد الشركة العمانية لشراء الطاقة والمياه الجهة التي تضع متطلبات مشاريع تحلية المياه من حيث الطاقات الاستيعابية للمياه والطاقة من خلال عملية المنافسة العادلة والشفافة. بلغت استثمارات القطاع الخاص في قطاع تحلية المياه نحو 2.6 مليار دولار أمريكي حتى عام 2019، وتبلغ الطاقات الاستيعابية الحالية نحو 1.5 مليون متر مكعب يوميًا، وستصل إلى 2 مليون متر مكعب يوميًا بحلول عام 2023. (الخرّاز، 2020). نتيجة للخصخصة والتغييرات التي طرأت على قانون استثمار رأس المال الأجنبي، بذلت سلطنة عُمان جهودًا كبيرة لتحسين بيئة الاستثمار الأجنبي وتوسيع مشاركة القطاع الخاص. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

في شمال إفريقيا، تشرف الجهات الحكومية الرئيسية في المغرب، مثل وزارة التجهيز والماء والمكتب الوطني للكهرباء والماء الصالح للشرب، على إدارة الموارد المائية. (بيريز، 2024) ومع ذلك، تكتسب الشراكات بين القطاعين العام والخاص في المغرب زخمًا أيضًا. يُتوقع أن تستخدم محطة الدار البيضاء، المزمع إنشاؤها بطاقة إنتاجية تصل إلى 800,000 متر مكعب يوميًا، عقد البناء والتملك والنقل، في حين سيسهم قانون جديد، بمجرد سنه، في توسيع قائمة الهيئات العامة التي يمكنها المشاركة في الشراكات بين القطاعين العام والخاص. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) وعلى غرار ذلك، يُتوقع أن يتطلب برنامج مصر الضخم لتحلية المياه لعام 2050 تمويلًا خاصًا، كما ستتبع محطة تحلية المياه في قابس في تونس نموذج البناء والتملك والنقل. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

على النقيض من ذلك، تُحد قيود البنية التحتية من تطبيقات الشراكات بين القطاعين العام والخاص، الأمر الذي يتطلب التعاون مع المؤسسات القائمة، ووضع أنظمة لتخزين المياه، وصياغة سياسات لتسعير المياه، ووضع برامج للحوافز. ومن القيود الأخرى تصور الجمهور لمشاركة القطاع الخاص في الشراكات بين القطاعين العام والخاص، بما في ذلك المخاوف من ارتفاع الأسعار، والممارسات غير الأخلاقية، وعدم كفاية المعلومات. علاوة على ذلك، تُعد تكاليف الاستثمار والمياه المنتجة عوامل رئيسية واضحة في التأثير في صُناع القرار لاختيار التقنيات المناسبة التي يمكن دمجها مع الحوافز المحلية ونماذج تنفيذ العقود. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022) في واقع الأمر، تؤدي اللوائح والسياسات الحكومية دورًا رئيسيًا، إذ تؤثر بشكل كبير في العمليات والتسعير في نموذج الأعمال المعتمد.

ج. المخططات المالية: مخطط نموذج الأعمال

يتضمن مخطط نموذج الأعمال لمحطات تحلية المياه عدة عناصر رئيسية تتفاعل لتخلق إطار عمل تشغيلي مستدام وفعال، وتشمل هذه العناصر القيم المقترحة، وشرائح العملاء، والأنشطة الرئيسية، والشراكات، والتي تساهم مجتمعة في توفير المياه المحلاة.

- القيمة المقترحة: يتمثل العرض الأساسي في توفير المياه العذبة من خلال تحلية المياه، ومعالجة قضايا ندرة المياه في مناطق مختلفة. (النوري وجريفز، 2013)
- شرائح العملاء: يشمل العملاء المستهدفون البلديات والقطاعات الزراعية والمستخدمين الصناعيين، ولكل منهم احتياجات مائية مميزة. (ويديارتي وهارتونو وهانداياني وروخيماه وكوسوما، 2023)
- الأنشطة الرئيسية: تتضمن الأنشطة الرئيسية تشغيل تقنيات تحلية المياه والصيانة وإدارة سلسلة التوريد لتحسين إنتاج المياه. (النوري وجريفز، 2013)
- الشراكات الرئيسية: يعد التعاون مع الجهات المقدمة للتقنيات والهيئات الحكومية والمنظمات البيئية أمرًا بالغ الأهمية لتقاسم الموارد والامتثال للقواعد التنظيمية. (ويديارتي وهارتونو وهانداياني وروخيماه وكوسوما، 2023)

تتفاعل هذه العناصر بشكل ديناميكي، الأمر الذي يضمن أن محطات تحلية المياه لا تلبي الاحتياجات المائية الحالية فحسب، بل تتكيف أيضًا مع التغيرات الاجتماعية والاقتصادية والتطورات التقنية.

من الجدير بالذكر أن نموذج الأعمال لمحطات تحلية مياه البحر في المغرب يجمع الجوانب الأساسية لأُطُرها المالية والتشغيلية، إلى جانب إجراء تحليل عميق لأصحاب المصلحة المشاركين في هذه المشاريع. (البلقاسمي والبوطي، 2023) يمثل الجدول 4 خريطة مرئية منظمة جيدًا للجوانب المختلفة لمشروع تحلية مياه البحر في أغادير. يتناول كل عنوان فرعي جانبًا محددًا من هذه المبادرة الحيوية، من بدء المشروع إلى الشركاء الرئيسيين، والتكاليف، والأنشطة الرئيسية، والمشتريات، وغير ذلك الكثير. يمكّن هذا الهيكل من الفهم الشامل للعناصر الفنية والاقتصادية والاستراتيجية لهذا المشروع الرئيسي لمنطقة أغادير. (البلقاسمي والبوطي، 2023)

الجدول (4). *خريطة مرئية لمشروع تحلية مياه البحر في أغادير. (البلقاسمي والبوطي، 2023)*

إطلاق المشروع	الاستثمار العالمي	تكاليف البناء:
بدأ مشروع تحلية المياه في أغادير وفقًا لنموذج التصميم والبناء والتشغيل والنقل. بدأت عملية المناقصة في عام 2012، وجرى توقيع العقد في مايو 2014، وبدأت مفاوضات إعادة التخصيص في سبتمبر 2016، وبدأت	يبلغ إجمالي الاستثمار للمشروع 4 مليارات درهم مغربي (ما يساوي نحو 400 مليون يورو) على مدار 30 عامًا، ويشمل ذلك تكاليف البناء والتشغيل.	تبلغ تكاليف بناء محطة تحلية المياه 15 مليار درهم مغربي، بما في ذلك البنية التحتية والمعدات اللازمة لعملية تحلية المياه، فضلًا عن تكلفة مالية إضافية تبلغ نحو 500 مليون درهم مغربي للفوائد والرسوم الأخرى.

أعمال البناء في يوليو 2018، وشُغلت المحطة بتاريخ 1 يوليو 2022.

تكاليف التشغيل المتكررة

تشمل تكاليف التشغيل المتكررة الرسوم الإدارية وتكاليف الطاقة ومصاريف النقل والضرائب والتصاريح وغيرها من النفقات التشغيلية. يُحتفظ بسرية تكلفة إنتاج المياه الصالحة للشرب والري، لكنها تظل مرتفعة نسبيًا مقارنةً بالمتوسط العالمي بسبب وضع المغرب بصفتها دولة غير غنية بالنفط.

نطاق التغطية الجغرافية لمحطة تحلية المياه

تلبي محطة التحلية احتياجات سكان منطقة أغادير الكبرى من المياه الصالحة للشرب، من التامري إلى آيت ملول، كما تزود سهل اشتوكة بالمياه اللازمة للري، إذ تغطي حاليًا 15,000 هكتار، مع إمكانية زيادة هذه المساحة إلى 30,000 هكتار.

الشركاء الرئيسيون

يشمل الشركاء الرئيسيون في المشروع المكتب الوطني للكهرباء والماء الصالح للشرب، ووزارة الفلاحة، ووكالة الحوض المائي لسوس ماسة، والمكتب الجهوي للاستثمار الفلاحي لسوس ماسة، وولاية جهة سوس ماسة، والبلديات المجاورة، ووزارة التجهيز.

الأنشطة الرئيسية

تتمحور الأنشطة الأساسية حول توفير مياه الشرب ومياه الري، وذلك وفقًا للتشريعات المعمول بها.

الإمداد

يُنظِّم عقد الهندسة والمشتريات والبناء المبرم مع شركة أبينغوا عملية بناء محطة التحلية وتشغيلها، ما يضمن توفير إمدادات مستمرة من المياه النقية.

الموارد الرئيسية

تشمل الموارد الرئيسية منحة قيمتها 2 مليار درهم مخصصة للري، وقرض بقيمة 18 مليار درهم لتمويل مياه الشرب، بالإضافة إلى مساهمات من شركاء آخرين يبلغ مجموعها نحو 2 مليار درهم.

في حين يوفر مخطط نموذج الأعمال نهجًا منظمًا، من الضروري مراعاة الأثار البيئية وتحديات الاستدامة المرتبطة بتحلية المياه، مثل استهلاك الطاقة والتخلص من المحلول الملحي، التي قد تعقد نموذج الأعمال الشامل. (زيولكوفسكا ورييس، 2016)

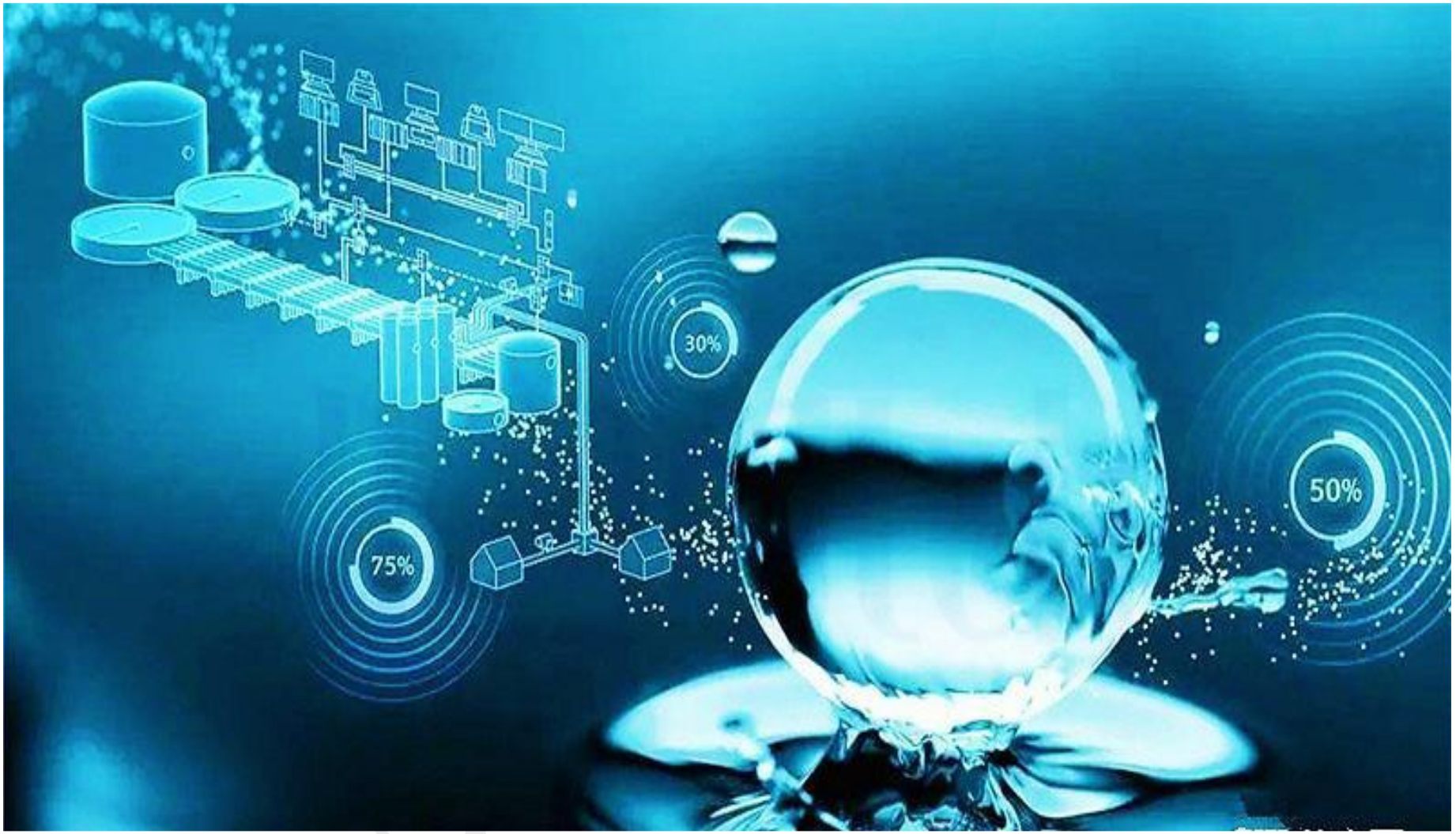
سابعًا: تطوير القدرات في المنطقة العربية: نمو سوق تحلية المياه والتحديات الرئيسية في مجال البناء

شهد قطاع التحلية في المنطقة العربية نموًا ملحوظًا ليصبح أحد أكبر الأسواق العالمية، ما مكّن دول الخليج العربي بشكل خاص من المساهمة في تدريب دولها المجاورة لسنوات عديدة، ويُوضح ذلك في **الشكل رقم 26**. ومع ذلك، تواجه محطات تحلية المياه في الوقت الحاضر مخاطر فنية وتشغيلية كبيرة، لا سيما في مجال التشغيل والصيانة)، الأمر الذي أثر بدوره في الاستقرار المالي وتدفقات الإيرادات. بالإضافة إلى ذلك، تظل هناك حاجة ماسة مستمرة لتطوير الموارد البشرية اللازمة وتدريبها بغرض تشغيل محطات التحلية الحالية والمستقبلية في المنطقة العربية. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

الجدول 61. *نمو سوق تحلية المياه. (العبري، 2022)*

يسعى موردو المحطات إلى حل هذه المشكلة من خلال إنشاء مرافق وبرامج تدريبية داخل الدولة المضيفة، أو خارجها، ومن بين المبادرات الرائدة في هذا الصدد، مبادرات مركز الشرق الأوسط لأبحاث تحلية المياه في سلطنة عمان والأكاديمية السعودية الذين يهدفان إلى تطوير الخبرة المحلية اللازمة لتشغيل محطات التحلية وصيانتها بفاعلية. علاوة على ذلك، تنظم شركات ومؤسسات تحلية المياه الدولية دورات تدريبية دورية، مثل معهد دي إتش بول آند ماسار تكنولوجيز دي إم إي لتحلية المياه، ومركز هاوارد للتكنولوجيا – الشرق الأوسط، وأكاديمية بوشناق، وأكاديمية أبيكس. بالإضافة إلى ذلك، تساعد الرابطات والجمعيات الدولية، مثل الرابطة العالمية لتحلية المياه والرابطة الدولية للمياه والجمعية الأوروبية لتحلية المياه، على تنظيم دورات تدريبية وورش عمل خلال مؤتمراتها السنوية. (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)

نتيجةً لذلك، أدى انخفاض الاستثمار في البحث والتطوير إلى نقص حاد في الموارد والموظفين، ما خلق حاجة ملحة لتدريب الكوادر المحلية وتطوير التقنيات. (العبري، 2022)


30%
75%
50%

ثامنًا: الممارسات الجيدة: دراسات الجدوى واحتمالية التكرار

تشير العديد من المؤشرات إلى أنه سيستمر الاتجاه عالميًا إلى استخدام التحلية على نطاق واسع. أشارت التقديرات في تقرير الأمم المتحدة العالمي عن تنمية الموارد المائية لعام 2021 إلى أن نحو 2.2 مليار شخص يعانون من صعوبة الوصول إلى المياه العذبة وأن ما يصل إلى 5.7 مليار شخص قد يواجهون ندرة في المياه لمدة شهر واحد على الأقل في العام بحلول عام 2050 (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

ومن ثم ترى العديد من الدول الساحلية أن تحلية المياه حلًا لمشكلة ندرة المياه (داغاري، تحلية المياه والزراعة، 2022).

أ. تحلية المياه لأغراض الزراعة في شمال إفريقيا

يواجه المغرب تحديات كبيرة أمام إمداد المياه بسبب مناخه شبه الجاف، وعدم انتظام هطول الأمطار، والزيادة السكانية؛ لذا وضعت الحكومة التحلية في صدارة الأولويات لضمان الأمن المائي. تستهلك الزراعة –التي تساهم بنسبة 14% من إجمالي الناتج المحلي– نحو 88% من الموارد المائية للدولة وقد يؤدي الأمن المائي إلى انخفاض إجمالي الناتج المحلي إلى ما يصل إلى 6.5%. وفي سبيل علاج هذه المشكلة يركز المغرب على الموارد المائية غير التقليدية مثل مياه البحر المحلاة ومياه البحر المعالجة (بيريز، 2024).

أطلق المغرب في 2020 البرنامج الوطني للتزويد بالماء الشروب ومياه السقي 2020–2027 كجزء من المخطط الوطني للماء 2020–2050 إلى جانب زيادة الميزانية إلى 14.3 مليار دولار أمريكي في 2023. يمتلك المغرب في الوقت الحالي أحد عشر محطة تحلية بالإضافة إلى خطط التوسعة إلى 20 محطة بحلول عام 2030 لدعم مياه الشرب والزراعة والصناعة. ستستخدم المحطات المستقبلية مصادر الطاقة المتجددة إذ تعمل شركتا "ماتيتو للمرافق" و"مجموعة التحلية" على تطوير مشروع ري متعدد المستخدمين باستخدام المياه المحلاة (بيريز، 2024).

علاوة على ذلك شكلت شركة " أوسموسون" بالشراكة مع المجموعة الصناعية المغربية ش.م.ع شركة "أوسمسون إم إيه" لإنشاء مشروعات تحلية المياه الصغيرة والمتوسطة في المناطق المعزولة. تدير الشركة الفرنسية المغربية " ساند تو غرين" مشروعًا للزراعة التجديدية في منطقة كلميم واد نون باستخدام وحدة تحلية تعمل بالطاقة الشمسية لري حراجة زراعية تبلغ مساحتها 38 هكتار. تنتج هذه الوحدة 140 متر مكعب من المياه العذبة في اليوم وتدعم تحويل الأراضي الصحراوية إلى أراض خصبة (ماجوم، 2024).

في الجزائر يُنظر إلى التحلية على أنها أمرًا حيويًا لتجنب نقص المياه في المستقبل. تؤدي الظروف الجوية المتوسطية للجزائر إلى انخفاض تكاليف التحلية ما يؤدي إلى بناء محطات واسعة النطاق بسعة إجمالية تزيد عن 2 مليون $م^3$/اليوم منذ أزمة المياه التي حدثت عام 2021. استثمرت ليبيا أيضًا في التحلية من خلال تشغيل نحو 10 محطات. أما في تونس وفي حين

جدوى التحلية من الناحية الفنية، إلا إنها باهظة التكاليف وتعتمد الدولة على مزيج من مياه السدود مع طبقات المياه الجوفية لمجابهة تداخل مياه البحر كبديل (داغاري، التحلية والزراعة، 2022).

ب. تحلية المياه لأغراض الزراعة في الشرق الأوسط

تخطط الدول العربية لزيادة سعة التحلية من 36 مليون متر مربع في اليوم في 2021 إلى نحو 86 مليون متر مربع في اليوم بحلول عام 2025. يُتوقع أن تتمركز معظم هذه الاستثمارات في دول الخليج. تصل الحاجات الاستثمارية التقديرية إلى 38 مليار دولار أمريكي بحلول العام 2025 يُخصص منها 27 مليار دولار أمريكي لدول الخليج (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

تُعد أبو ظبي على سبيل المثال آمنة غذائيًا، ولكنها ليست مكتفية ذاتية من الغذاء وتعتمد بشدة على الواردات بنسبة 90% من احتياجاتها الغذائية. تأتي مياه المنطقة من ثلاثة موارد رئيسية: المياه الجوفية (65)، والمياه المحلاة (30%)، والمياه المُعاد تدويرها (5%). مع ذلك تنضب المياه الجوفية –التي تُعد حيوية للزراعة وللنُظم البيئية الطبيعية– بسرعة وتُعد في الأساس موردًا غير متجدد، ومع معدلات الاستخدام الحالية قد تنفد المياه الجوفية بحلول 2060–2070 ما قد يؤدي إلى زيادة ملوحة طبقات المياه الجوفية. تواجه أبو ظبي عجزًا مائيًا كبيرًا إذ تتجاوز ميزانيتها المحددة للمياه بنسبة 60%. على الإمارة، في سبيل ضمان الأمن الغذائي مستقبلًا والحد من الاعتماد على الواردات، المحافظة على المياه الجوفية وتطوير نظام زراعي فعال بالنسبة للحفاظ على المياه على أن يكون قابل للتوسعة بسرعة (عامر، وعديل، وبوير، وصالح، 2016).

تستهلك قطر على الصعيد الآخر نحو 1.2 مليون متر مربع من المياه المحلاة يوميًا، في حين تحتاج الزراعة 3.5 مليون متر مكعب إضافية لا يمكن تحقيقها إلا بالطرق المتقدمة للحفاظ على المياه مثل الصوبات الزراعية، والري بالتنقيط، والزراعة في الماء. يخلف كل متر مربع من المياه المحلاة 45 كيلو جرام من الملح ما يؤدي إلى إنتاج 175 مليون كيلو جرام من الملح كمنتج ثانوي ومن ثم تتأثر الحياة البحرية سلبًا. تحتاج قطر لتلبية حاجاتها الزراعية إلى توليد طاقة بقدرة 1.8 جيجا وات ما يعادل نحو 4,000 هكتار من الطاقة الشمسية. ونظرًا لتوفر 1% فقط من الأراضي الصالحة للزراعة و68,716 هكتار متاحة للزراعة ستحتاج قطر لاستصلاح 30,000 هكتارًا إضافيًا لتلبية الحد الأدنى من أهداف الإنتاج الغذائي البالغة 1.7 مليون طن في العام (عامر، وعديل، وبوير، وصالح، 2026).

تواجه المملكة العربية السعودية تحديات زراعية كبيرة بسبب مناخها الجاف، وفقر التربة، وقلة الموارد المائية، ومحدودية الأراضي الصالحة للزراعة. وعلى الرغم من هذه العقبات استطاعت المملكة تحقيق الاكتفاء الذاتي من المحاصيل الشرهة في استهلاك المياه مثل القمح من خلال الاستثمار في السياسات الزراعية منذ السبعينات. وصل إنتاج القمح في 2006 إلى أكثر من 2.6 مليون طن، ولكنه أدى على صعيد آخر إلى استنزاف موارد المياه الجوفية غير المتجددة. نتيجة لذلك تحولت المملكة من التركيز على الاكتفاء الذاتي إلى تحلية المياه لتلبية الطلب المتزايد. توفر المياه الجوفية 84% من موارد المياه في حين توفر التحلية 8% وتستهلك الزراعة نحو 86% من إجمالي المياه. ونظرًا للاستخدام غير الرشيد للمياه –الذي تفاقم نتيجة لانخفاض سعر تعريفة المياه وإيلاء الأولوية للمياه العذبة في الزراعة– تعمل الحكومة على إنهاء دعم القمح وحظر إنتاجه للحفاظ على المياه. قررت المملكة منذ عام 2016 الاعتماد كليًا على واردات القمح وخصصت 12.3 مليار دولار أمريكي لتطوير البنية التحتية الزراعية (عامر، وعديل، وبوير، وصالح، 2026).

بالإضافة إلى ذلك أنشأ المزارعون أكثر من 50 محطة تحلية للمياه المالحة في غور الأردن باستخدام تقنية التناضح العكسي بسعة تتراوح بين 360 إلى 2400 م3/اليوم. تسحب هذه المحطات 11.7 مليون متر مكعب من المياه سنويًا وتُنتج 7.7 مليون متر مكعب من المياه المحلاة و4.1 مليون متر مكعب من الماء المالح. تتراوح ملوحة المياه المالحة من 1300 إلى 7000 جزء في المليون ويبلغ متوسط ملوحة المياه المحلاة 195 جزء في المليون. تعمل المحطات 24 ساعة في اليوم في فصل الصيف و12 ساعة في اليوم في فصل الشتاء باستخدام شبكة توزيع الكهرباء. تُستخدم المياه المحلاة المخففة إلى نحو 700 جزء في المليون في ري المحاصيل عالية القيمة مثل الموز والفراولة والتمر. تتراوح تكلفة الاستثمار للمتر المكعب من السعة المقررة 89 دولار أمريكي في حين تتمتع المحطات الكبيرة بتكاليف تحلية أقل مقارنةً بالمحطات الصغيرة (0.48 دولار أمريكي/م^3). يبلغ متوسط تكلفة التحلية على مستوى المحطات جميعها 0.38 دولار أمريكي لكل متر مكعب (قطيشات وآخرون، 2016).

على النقيض يستخدم المزارعون في عمان وحدات تحلية على نطاق صغير لدعم محاصيل الحقول منخفضة المحصول. إن أغلب مرافق التحلية الداخلية في عمان (80%) من نوع التناضح العكسي ومحدود السعة (أقل من 10,000 م^3/اليوم) وأكثر من 50% منها تعمل على تحلية المياه الداخلية، أو المياه المالحة (مجموع المواد الصلبة الذائبة 3,000 مجم/1≥20,000 مجم/1) (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

علاوة على ذلك في ديسمبر 2014 أطلقت لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية والاجتماعية لغرب آسيا والوكالة السويدية للتعاون التنموي الدولي مشروع لمدة 4 سنوات لتعزيز الأمن الغذائي والمائي في المنطقة العربية. يهدف المشروع إلى تحسين عملية التنسيق بين المؤسسات الزراعية والمائية، والتركيز على تقييم أثر توفر المياه في الزراعة، وإعداد سياسات متكاملة للأمن الغذائي والمائي، وتقييم الأمن الغذائي، وزيادة كفاءة إنتاج الغذاء. تدير لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية والاجتماعية لغرب آسيا المشروع بالتعاون مع جامعة الدول العربية والمنظمات الإقليمية الأخرى بناءً على تقييمات أثر التغير المناخي السابقة (الصلح، 2015).

في الختام وعلى الرغم من التقدم التقني في مجال الزراعة، خلص صانعو القرارات العرب إلى أنه لا يمكن تحقيق الأمن الغذائي من خلال الاكتفاء الذاتي فقط. لذلك اتجهت العديد من الدول العربية إلى تداول السلع دوليًا وعقد اتفاقيات مع دول أجنبية لضمان الأمن الغذائي والحفاظ على موارد المياه الشحيحة (البنك الدولي، 2012).

ج. التحلية لأغراض الزراعة على مستوى العالم: مواقف المجابهة بين المديرين والمزارعين في أليكانتي ومرسية (إسبانيا)

على الرغم من الدراسة المتعمقة لتكلفة المياه ومعايير الجودة، حظي التفاعل بين مديري محطات التحلية ومجتمعات الري بشأن تناول الأمن المائي باهتمام أقل (ريكارت، وفيلار نافاسكويس، وجيل جيرادو، وم. ريكو أموروس، وأراهويتس، 2020). بحثت دراسة متخصصة الطريقة التي عمل بها هؤلاء المديرون والمزارعون معًا لسد فجوة مياه البحر المحلاة لأغراض الري الزراعي في أليكانتي ومرسية في إسبانيا. وقع الاختيار على 11 مجتمع من مجتمعات الري لإجراء الدراسة الموضحة في الجدول التالي التي تناولت أكثر من 58,000 مروى و120,000 هكتار تمثل نحو 82% من إجمالي الأرض المروية من نقل تاجوس سيجورا. يستخدم كل مجتمع ري في الوقت الحالي المياه المحلاة –سواء بطريقة مباشرة، أو بالمبادلة– وتتصل جميعها تقريبًا بمحطة تحلية تديرها شركة أكواميد الجهة العامة الإسبانية التي تدير البنية التحتية للتحلية (ريكارت، وفيلار نافاسكويس، وجيل جيرادو، وم. ريكو أموروس، وأراهويتس، 2020).

الجدول (5): الخصائص الأساسية لمجتمعات الري (ريكارت، وفيلار نافاسكويس، وجيل جيرادو، وم. ريكو أموروس، وأراهويتس، 2020)

مجتمع الري	السطح الصالح للري	السطح المروي	المراوِ	متوسط حجم الحقل (هكتار)	المحاصيل الأساسية [8]	طريقة الري
اغويلاس	6029	نحو 4800	1620	3 [1]	خضروات وفاكهة	تنقيط (100%)
كامبو دي كارتجينا	41,920	38,319	59678	4	خضروات وفاكهة	تنقيط (96%) ورش وغمر (2%)
ألهاما دي مورسيا	7200	5096	2318	1> [2]	خضروات وفاكهة	تنقيط (80%) وغمر (20%)
السلتداور	2500	2300	نحو 1000	1.5–4 [3]	خضروات وفاكهة	تنقيط (98%) ورش (2%)
ليبريا	2532 [4]	نحو 1900	1916	1> [4]	خضروات وفاكهة	تنقيط (40%) وغمر (60%)

مجتمع الري	السطح الصالح للري	السطح المروي	المراوِ	متوسط حجم الحقل (هكتار)	المحاصيل الأساسية [8]	طريقة الري
لوركا	23,905	23,905 [6]	نحو 12,000	1.5	خضروات وفاكهة	تنقيط (80%) وغمر (20%)
ماثارون	4803	3595	1150	1>	خضروات وفاكهة	تنقيط (100%)
بويرتو لوبريراس	4022	نحو 3000	880	4-3 [5]	خضروات وفاكهة	تنقيط (90%) ورش (2%) وغمر (8%)
بولبي	8451	نحو 7000	1239	3 [6]	خضروات وفاكهة	تنقيط (70%) ورش (30%)
ريجوس دي ليفانتي إزكيردا ديل سيجورا	نحو 26,000	نحو 24,000	نحو 22,000	1 =	خضروات وفاكهة	تنقيط (45%) وغمر (55%)
توتانا	10,765	6979	4216	1> [7]	خضروات وفاكهة وعطريات	تنقيط (80%) وغمر (20%)

المصدر: إعداد ذاتي من الاستبانات. [1] بعض المزارع تصل إلى 200-300 هكتار؛ [2] بعض المزارع تصل إلى 400 هكتار؛ [3] بعض المزارع تصل إلى 40-50 هكتار؛ [4] مزارعون محترفون: 20 هكتار مع 7-8 شركات خضروات وفاكهة كبرى (25-30 هكتار للواحدة)؛ [5] بعض المزارع تصل إلى 50-100 هكتار؛ [6] تستخدم إحدى شركات البستنة 800 هكتار وشركة فواكه نحو 300 هكتار؛ [7] بعض شركات البستنة تصل إلى 150 هكتار؛ [8] تشمل الخضروات الخس والبروكلي والخرشوف والقرنبيط والطماطم والكرفس والبطاطس والبصل والفلفل، وتشمل الفواكه الحمضيات والكنتالوب والبطيخ والعنب والمانجو.

- ***الخدمات والإدارة التي طورتها أكواميد***

وبصرف النظر عن امتيازات المياه، تبرم مجتمعات الري اتفاقيات مع أكواميد بهدف استخدام البنية التحتية لتحلية المياه، تغطي استرداد التكاليف والتشغيل والصيانة وشروط الدفع. ومع ذلك، تنتقد بعض المجتمعات هذه العقود باعتبارها جامدة وغير مرغوب فيها، ذلك لأنها تتطلب دفع ثمن المياه المحلاة بغض النظر عن الاستخدام.

في الواقع، يقدم الري ردود فعل مختلطة. وقدمت ستة مجتمعات محلية تقييمات إيجابية، في حين قدمت أربعة مجتمعات محلية ردود فعل سلبية. واحد لديه وجهات نظر مختلطة. تركز ردود الفعل الإيجابية على إمدادات المياه الموثوقة، والتواصل الجيد مع موظفي محطة تحلية المياه، وجودة المياه العالية. تشير التقييمات السلبية إلى مشكلات فنية مثل التخزين المحدود ومعدلات الإنتاج المنخفضة وقيود شبكة التوزيع وسوء الصيانة.

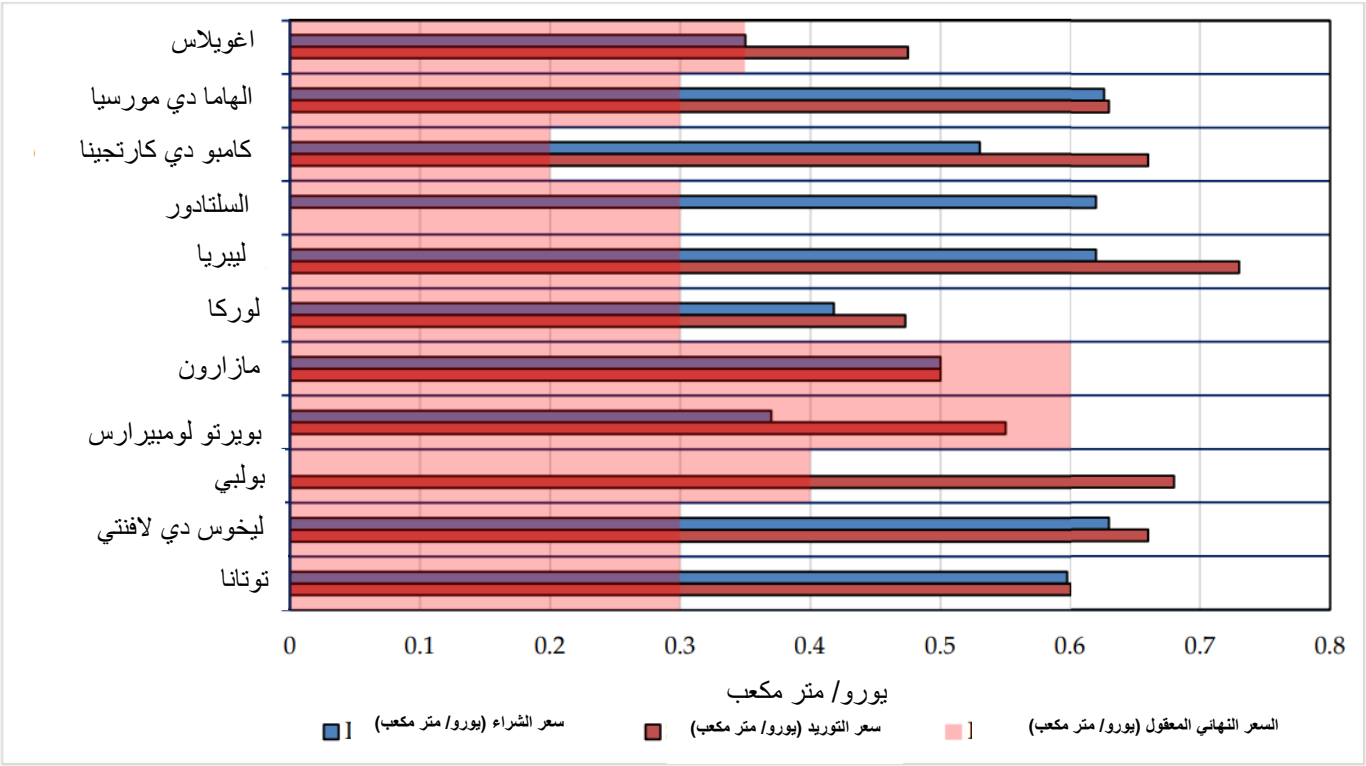
تنبع العديد من التصورات السلبية من كيفية إدارة العقود، إذ تجادل المجتمعات بأنها مجبرة على قبول شروط غير مواتية دون معرفة الظروف المالية الكاملة. وقد أدى ذلك إلى اتهامات بالإدارة غير العادلة، حيث تنظر بعض المجتمعات إلى أكواميد على أنها بيروقراطية وتركز فقط على تحصيل الإيرادات. وتساهم فضائح الفساد والاستثمارات الكبيرة في محطات تحلية المياه في انعدام الثقة هذا.

ونتيجةً لذلك، تعتقد العديد من مجتمعات الري أن إدارة تحلية المياه يجب أن يتم التعامل معها من قبل سكارتس (المنظمة التي تمثل جميع مجتمعات الري) وهيئة حوض نهر سيغورا، بدلًا من السماح بإجراء مفاوضات فردية مع أكواميد. وهم يجادلون بأن التفاوض الجماعي من شأنه أن يحسن العدالة ووحدة العمل.

وعلى النقيض من ذلك، ومن وجهة نظر أكواميد، تنشأ الخلافات من تضارب المصالح وعدم فهم المستخدمين فيما يتعلق بتمويل البنية التحتية واسترداد التكاليف. وتقر الوكالة، بأن التكاليف، ولا سيما تلك المتعلقة بالاستثمارات، هي قضية رئيسية، ولكنها تدعي أن هذه التكاليف غير قابلة للتفاوض.

- ***تسعير المياه والضرائب والتكلفة***

ومن الناحية الاقتصادية، فإن أسعار المياه التي حددتها محطات تحلية المياه أكواميد للاستخدام الزراعي، والتي تتراوح بين 0.38 يورو/م3 في محطة أغويلاس – غوادالنتين، و0.48 يورو/م3 في محطة توريفايجا، و0.57 يورو/م3 في محطة فالديلينتيسكو، بما في ذلك تكاليف الضخ والتوزيع التي تبلغ على التوالي 0.09 و0.08 و0.13 يورو/م3، أقل من تلك التي أبلغت عنها مجتمعات الري. كما هو موضح في الشكل التالي. ويرجع ذلك أساسًا إلى عوامل إضافية مثل تسرب المياه، ورسوم التوزيع، والرسوم الإضافية، والتكاليف المتعلقة بالبنية التحتية الخاصة بهم.



الشكل رقم 27: سعر الشراء وسعر التوريد والسعر النهائي المعقول للمياه المحلاة من قبل مجتمع الري.

المصدر: تفصيل خاص من الاستبيانات (ريكارت، فيلار نافاسكويس، جيل-جويرادو، ريكو-أموروس، أراهويتيس، 2020)

ونتيجةً لذلك، فإن إعادة التقييم المستمرة لهيكل تسعير المياه المحلاة للزراعة أمر بالغ الأهمية. وذلك من خلال النظر في التكاليف الإضافية التي تواجهها مجتمعات الري. ويمكن أن يشمل ذلك بذل جهود للحد من تسرب وسائل النقل، أو تبسيط البنية التحتية للتوزيع، أو دعم التكاليف لضمان القدرة على تحمل التكاليف للمزارعين.

- ***الإطار التنظيمي***

فيما يتعلق باللوائح، أشارت شركة أكواميد ومديرو المحطة إلى أن هناك مشروعًا أوليًا تنفذه هيئة حوض نهر سيغورا يهدف إلى ربط جميع محطات تحلية المياه. وقد صُمِم هذا المشروع بهدف معالجة القضايا المتعلقة بالتنظيم وسعة التخزين من خلال استخدام البنية التحتية الهيدروليكية الحالية بعد النقل.

بالإضافة إلى ذلك، فإن أكواميد ليست مسؤولة عن تشغيل وصيانة أنابيب التوزيع التي تنقل المياه إلى نقاط الاستهلاك خارج نقاط التسليم إلى الري. ويتمثل التزامهم الأساسي في توفير الكمية الشهرية المتفق عليها من المياه بناء على قدرة كل محطة تحلية للمياه. وبالتالي، فإن أي طلب يتجاوز هذا الحجم غير مضمون.

علاوة على ذلك، لا تتعامل أكواميد مع دمج المياه المحلاة في أنظمة التوزيع العامة التي تنطوي على مصادر مياه متعددة. ويقترحون أن بناء العناصر التنظيمية يمكن أن يكون حلا قابلا للتطبيق إذا اعتبرت هذه العناصر مربحة، مع مراعاة تكاليف الاستثمار ومصلحة المستخدم. ومع ذلك، تؤكد أكواميد أنها تقتصر على إجراءاتها المتعاقد عليها ولن تتحمل تكاليف البناء والتشغيل للعناصر التنظيمية إلا إذا كانت هناك اتفاقات، على الرغم من وجود بنية تحتية أخرى تديرها كيانات مختلفة.

- ***معايير جودة المياه***

وفيما يتعلق بمعايير جودة المياه للمياه المحلاة، تم تقييم ثلاث قضايا رئيسية: الموصلية، وتركيز البورون، وتدابير الإدارة. أنشأت معظم مجتمعات الري أنظمة مراقبة الجودة التي تراقب المعلمات مثل الموصلية مع تحليلات أسبوعية، أو نصف أسبوعية. تقع مستويات التوصيل المبلغ عنها للمياه المحلاة ضمن النطاقات المقبولة، إذ تتراوح قيم محطات أكواميد بين 200–500 ميكروسيمنز/ سنتيمتر في توريفيخا، و400–600 ميكروسيمنز/ سنتيمتر في فالدينتيسكو، و500–900 ميكروسيمنز/ سنتيمتر في اغويلاس–جوادالنتين. تُصنف غالبية مجتمعات الري جودة المياه المحلاة على أنها جيدة، أو جيدة جدا، حيث نادرا ما تتجاوز مستويات التوصيل عتبة 1300 ميكروسيمنز/ سنتيمتر التي تعتبر مناسبة لمعظم المحاصيل. كما هو موضح في الجدول التالي.

في حين أن تركيز البورون في المياه المحلاة لا ينظر إليه عموما على أنه إشكالي، فقد واجهت بعض المجتمعات مشاكل. في لوركا، تجاوز تركيز البورون أحيانا 0.5 مجم/ لتر، مما تسبب في صعوبات لمحاصيل الحمضيات. وقد أشار أكواميد إلى شروط العقد التي تسمح بما يصل إلى 1 مجم/ لتر من البورون. كما عانت مجتمعات أخرى، مثل بولبي وبويرتو لومبيرارس من مشاكل متعلقة بالبورون، مما دفعها إلى خلط المياه المحلاة مع مصادر المياه الأخرى لتقليل مستويات البورون.

من المهم التأكيد على أن معظم مجتمعات الري تعتقد أنه لا توجد حاجة إلى معالجة إضافية للمياه المحلاة قبل الاستخدام. ومع ذلك، باستثناء حالات قليلة، فإنها تخلط المياه المحلاة مع مصادر المياه الأخرى لتحسين جودة المياه بشكل عام، واستخدام الموارد التقليدية المتاحة، وخفض التكاليف. وتعقد هذه الممارسة إمكانية طلب نوعية مياه محددة من محطات تحلية المياه المصممة خصيصا لتلبية احتياجات المحاصيل، لأنها ستتطلب أحواض ري ذات صفات مائية متفاوتة ويحتمل أن تزيد من تكاليف الإنتاج. فقط عدد قليل من المجتمعات تفكر في طلب صفات مائية محددة، مع الاهتمام الذي يعتمد في المقام الأول على الممارسات القائمة، أو المخاوف بشأن مستويات البورون إذا كانت المياه المحلاة هي مصدرها الوحيد.

في النهاية، يمكن الوصول إلى العديد من الخصومات مما يسمح بتكرار التجربة بشكل فعال. علاوة على ذلك، يعد ضمان شفافية العقود أمرا بالغ الأهمية. يجب أن تكون الاتفاقيات عادلة ومرنة ويتم الكشف عنها بالكامل قبل التوقيع. وهذا يتجنب الشروط الصارمة ويعزز الثقة بين مجتمعات الري وكيانات الإدارة. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي تشجيع التفاوض الجماعي من خلال الهيئات التمثيلية بالنظر إلى أن الاتفاقات الموحدة تضمن التوازن وتمنع المجتمعات الفردية من مواجهة شروط غير مواتية، مما يعزز العدالة ووحدة العمل.

علاوة على ذلك، فإن معالجة المشكلات الفنية مثل سعة التخزين والصيانة أمر ضروري إلى جانب ضمان عمل البنية التحتية بكفاءة يساعد على منع الاضطرابات وعدم الرضا بين المستخدمين. التواصل الجيد بين موظفي محطة تحلية المياه والمستخدمين أمر حيوي. الاتصال المباشر والمتجاوب يقوي الثقة ويعزز الإدارة العامة.

من الضروري تسليط الضوء على أن هيكل التكلفة المرن مهم أيضا. يتجنب التسعير القائم على الاستخدام الفعلي عدم الرضا عن الرسوم الثابتة للخدمات غير المستخدمة، مما يؤدي إلى رضا المستخدم بشكل أفضل. وأخيرا، يمكن أن يساعد الحد من البيروقراطية وإشراك السلطات المحلية في التوسط في المفاوضات وضمان الشفافية، وتعزيز تعاون أكثر سلاسة بين أصحاب المصلحة.

تاسعًا: التوصيات والآفاق المستقبلية

أ. التوصيات الفنية والمالية

يتطلب النهوض بمشاريع تحلية المياه لأغراض الزراعة اتباع نهج استراتيجي يركز على زراعة المحاصيل عالية القيمة، والتي تقدم عوائد مالية كبيرة لكل وحدة من المياه المستخدمة. وتُعد المنتجات البستانية مثل الخضروات والزهور ونباتات الزينة وكروم العنب وفواكه الأشجار مناسبة بصورةٍ خاصة للمياه المحلاة نظرًا لقيمتها السوقية الأعلى، ما يبرر التكاليف المرتبطة بها. وعلى النقيض من ذلك، تُعد المحاصيل مثل القطن والأرز والسكر، والتي تحتاج المزيد من المياه وتقدم عوائد اقتصادية أقل، مرشحين أقل مثالية لتحلية المياه.

ولقد ظهرت الصوبات الزراعية بوصفها بيئة زراعية موصى بها للغاية للمحاصيل عالية القيمة تلك. وتيسر الصوبات الزراعية الاستخدام الأكثر كفاءة للمياه وتعزز فوائد المياه المُحلاة وذلك من خلال توفير بيئة مُحكمة. وتُعد محاصيل مثل الطماطم والبطاطس والباذنجان والفلفل والبطيخ والشمام والخيار والقرع الصيفي مناسبة تمامًا لظروف الصوبات الزراعية، ما يحقق أقصى استفادة ممكنة من المياه المُحلاة.

عند تقييم خيارات المياه المُحلاة، تبرز تحلية المياه المالحة باعتبارها حلًا أكثر فاعلية من حيث التكلفة مقارنةً بتحلية مياه البحر؛ إذ عادةً ما تكون تكلفة المياه المالحة حوالي ثلث تكلفة تحلية مياه البحر، ما يجعلها خيارًا اقتصاديًا للاستخدامات الزراعية. ومع ذلك، فمن المهم إدارة مصادر المياه المالحة المحلية بعناية نظرًا لكون المياه الجوفية ليست متجددة مثل مياه البحر.

إن اعتماد تقنيات الأغشية المتقدمة، مثل التناضح العكسي والتحليل الكهربائي، والتي تعمل بأنظمة كهروضوئية يوفر حلولًا فعالة ومستدامة لتحلية المياه الزراعية. وتمثل هذه التقنيات، خاصة عند دمجها مع مصادر الطاقة المتجددة، أكثر الطرق المتاحة فاعلية.

ومن الناحية المالية، فإن اعتماد نموذجًا متوازنًا يجمع بين مشاركة القطاعين العام والخاص أمرًا حيويًا لنجاح مشاريع تحلية المياه؛ إذ يوفر دعم القطاع العام ضمانات أساسية للمشروع ويقلل من المخاطر، بينما توفر مشاركة القطاع الخاص الكفاءة والابتكار. وتُعد الشراكة بين القطاعين العام والخاص في عقود البناء والتشغيل والنقل طويلة الأجل فعالة على نحوٍ خاص، ما يسمح للبلديات والمرافق بتحويل المخاطر المالية إلى جهات خاصة، ومن ثمّ ضمان الاستدامة طويلة الأجل والجدوى المالية.

وفيما يخص حجم المحطة، فإنه يُفضل محطات تحلية المياه الكبيرة عمومًا نظرًا لفوائدها، ومنها مشاركة القطاع العام، وتحسين الاستفادة من التمويل، وتقليل تحديات التشغيل والصيانة. كما أن اختيار الموقع أمر بالغ الأهمية؛ إذ يجب إعطاء الأولوية للمواقع الساحلية القريبة من مراكز الطلب الرئيسية ذات الخيارات الآمنة للتخلص من المياه المالحة. وعلاوةً على

ذلك، يعد اختيار المواقع ذات المخاطر الأقل من حيث الوقود الحيوي والتلوث، والاستفادة من البنية التحتية البحرية القائمة، وإعداد المنشآت لمواجهة الكوارث الطبيعية، أمرًا حيويًا لضمان كفاءة مشاريع تحلية المياه ومرونتها.

ب. التوصيات البيئية: الاستراتيجيات المستدامة الناشئة

تقدّر العديد من تقييمات دورة الحياة البيئية أن استخدام المياه المُحلاة للري يؤدي إلى ارتفاع الآثار البيئية في عدة فئات مثل الاحتباس الحراري واستخدام الطاقة وجودة التربة والسمية البيئية المائية. وغالبًا ما يؤدي هذا إلى تعزيز السلطات المسؤولة عن الموارد المائية لإدارة الطلب على المياه، أي تجنب السحوبات غير القانونية وتقليل التسرب في شبكات مياه الشرب، أو الري وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي. وإذا لم يُكتف بتلك التدابير، تشجع السلطات تغيير الاستخدامات الحالية، مع إعطاء أولوية واضحة لتزويد المدن، أو إعادة تغذية طبقات المياه الجوفية، وربما تقييد تسليم المياه للزراعة (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

وفي هذا السياق، هناك العديد من الاستراتيجيات المستدامة الناشئة للتخفيف من تبعات تحلية المياه إلى جانب تقنيات المعالجة المتقدمة. (منظمة الأغذية والزراعة، 2024) بما في ذلك ما يلي:

- تقليل النفايات: يتضمن ذلك تقليل حجم النفايات السائلة المالحة التي تنتجها الصناعات ومحطات تحلية المياه. ويمكن تحقيق ذلك من خلال تحسين المعالجة، وفصل النفايات، وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي.
- التصريف الخالي من السوائل: هي عملية معالجة تهدف إلى إنتاج تيار نفايات صلبة، أو مركزة دون أي تصريف سائل. ويمكن تحقيق ذلك من خلال عمليات الفصل الغشائي، والتبخر، والتبلور.
- استعادة الموارد: يتضمن ذلك استعادة المواد القيمة من النفايات السائلة المالحة، مثل الأملاح والمعادن والمواد الغذائية. ويمكن القيام بذلك من خلال عمليات مثل التبلور والتبخر والاستخلاص الكهربائي.
- التكامل مع مصادر الطاقة المتجددة: يمكن أن يؤدي استخدام مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، لتقليل الأثر البيئي لمعالجة النفايات السائلة المالحة.

ج. التوصيات السياسية والاجتماعية

ينبغي وضع أُطر قانونية وتشريعية وتنظيمية شاملة لتعزيز تطوير مشاريع تحلية المياه للاستخدامات الزراعية. ويجب تشجيع البحث المتقدم في مجال تقنيات تحلية المياه الزراعية، مع التركيز على توطين كل من التقنيات وعمليات التصنيع. وعلاوةً على ذلك، فمن الضروري تقديم الدعم المالي وبرامج الحوافز لمساعدة صغار المزارعين (العبري، 2022)، كما وينبغي إنشاء منتدى لأصحاب المصلحة لتسهيل تبادل المعرفة وأنشطة بناء القدرات وتحديد الأولويات للمبادرات ذات الصلة. ويعد توفير الخبرة وتعزيز أفضل الممارسات التي تشجع المزارعين على اعتماد مصادر المياه غير التقليدية للري أمرًا حيويًا، بل ويجب أن تتاح الاستفادة من المياه المحلاة للجميع، وليس فقط لكبار المزارعين، بل أيضًا لصغار المزارعين، أو مجموعات المزارعين الصغار الذين يمكنهم التعاون لتقاسم وحدة تحلية المياه لتلبية احتياجاتهم من الري. ويُطبق تطبيق هذا النهج بالفعل في المنطقة العربية، كما هو الحال في مدينة المهدية في تونس. وأخيرًا ينبغي تمكين القطاع الخاص في مساعدة صناع القرار الرئيسيين في التخطيط لمشاريع تحلية المياه، وضمان تقييم تلك المبادرات تقييمًا شاملًا، مع مراعاة آثارها الاقتصادية والبيئية والاجتماعية (منظمة الأغذية والزراعة، 2024).

ويمكن أن تصبح مشاريع تحلية المياه للاستخدامات الزراعية، من خلال تنفيذ هذه التوصيات، مجدية على نحوٍ أكبر من الناحية الاقتصادية، والاستدامة البيئية والتكامل الأوسع نطاقًا مع الاستراتيجيات الزراعية واستراتيجيات إدارة المياه.

خاتمة

تهدف هذه الدراسة إلى بحث فرص استخدام مياه البحر المُحلاة في ري الأراضي الزراعية والتحديات والمخاوف المرتبطة بها، ونتيجةً لذلك، تعد تقنية تحلية المياه حلًا واعدًا لمواجهة تحديات ندرة المياه التي تواجهها المنطقة العربية في سياق التنمية الزراعية على وجه التحديد. ومع استنفاد مصادر المياه العذبة التقليدية على نحوٍ متزايد، يمكن لاعتماد تقنيات تحلية المياه أن يوفر مصادر إمداد مياه موثوقة ومستدامة لأغراض للري. ولا يعزز ذلك الإنتاج الزراعي فحسب، بل يساهم أيضًا في الأمن الغذائي في منطقة تعتمد اعتمادًا كبيرًا على الزراعة في اقتصادها وسبل العيش فيها.

يتطلب النجاح في تطوير مشاريع تحلية المياه للاستخدامات الزراعية اتباع نهج متعدد الأوجه يركز على المحاصيل ذات القيمة العالية وطرق الزراعة الفعالة. ويمكن تبرير التكاليف المرتفعة للمياه المُحلاة من خلال التركيز على محاصيل مثل الخضروات والزهور والفواكه، والتي تنتج عوائد مالية أكبر. كما أن الزراعة في الصوبات الزراعية، التي تعزز كفاءة استخدام المياه، تزيد من جدوى استخدام المياه المُحلاة في الزراعة. وعلاوةً على ذلك، ثبت أن تحلية المياه المالحة أكثر فاعلية من حيث التكلفة من تحلية مياه البحر، خاصة عندما تُقترن بتقنيات الأغشية المتقدمة مثل التناضح العكسي والتحليل الكهربائي التي تعمل بالطاقة المتجددة. ويمكن لهذه التقنيات، إلى جانب الاستعانة بنموذج تمويل متوازن يضم القطاعين العام والخاص، ضمان الاستدامة المالية لمشاريع تحلية المياه.

ومن الناحية الاقتصادية، وعلى الرغم من التكاليف المتفاوتة للمياه المُحلاة– التي تتراوح من 2.50 دولار أمريكي إلى 0.50 دولار أمريكي لكل متر مكعب لتحلية مياه البحر ومن 2.00 دولار أمريكي إلى 0.60 دولار أمريكي لكل متر مكعب لتحلية المياه المالحة – فإن التطورات المستمرة في تقنيات الأغشية وأنظمة استعادة الطاقة خفضت هذه التكاليف انخفاضًا كبيرًا. ونتيجةً لذلك، أصبحت المياه المُحلاة أكثر تنافسية للاستخدام الزراعي. وبعبارة أخرى، في حين أن المياه المُحلاة ما تزال أكثر تكلفة من المصادر التقليدية، فإن فوائدها البيئية والاجتماعية والاقتصادية تجعلها خيارًا جذابًا. ويمكن أن تساعد في تقليل الاعتماد على الموارد المائية غير المتجددة، ومنع الهجرة الريفية، ودعم إنتاج المحاصيل عالية القيمة، ما يبرر التكاليف الأعلى. وعلاوةً على ذلك، فتوفر الشراكة بين القطاعين العام والخاص في العقود طويلة الأجل نموذجًا للتسليم قابلًا للتطبيق، إذ تنتقل المخاطر المالية وتعزز الاستدامة طويلة الأجل.

وعلاوةً على ذلك، يُفضل استخدام المحطات الكبيرة بسبب كفاءتها التشغيلية ودعم القطاع العام، بينما يعد اختيار موقع بالقرب من المناطق الساحلية ذات الخيارات الآمنة للتخلص الآمن من المياه المالحة والمخاطر البيئية المنخفضة أمرًا حاسمًا للنجاح على المدى الطويل. ولا يمكن تحقيق ذلك إلا من خلال التقييم المستمر للأثر البيئي لعمليات تحلية المياه، وضمان تنفيذها جنبًا إلى جنب مع ممارسات إدارة المياه الفعالة. ومن خلال الاستثمار في تقنيات تحلية المياه المبتكرة والممارسات الزراعية المستدامة، يمكن للمنطقة العربية الاستفادة الفعالة من مواردها الساحلية وتعزيز المرونة الزراعية وتأمين مستقبل أكثر استدامة لقطاعها الزراعي. وبالإضافة إلى ذلك، يمثل التعاون بين الحكومات والقطاع الخاص والمجتمعات المحلية أمرًا حاسمًا في صياغة

سياسات تدعم تلك المبادرات ومعالجة التحديات المحتملة مثل استهلاك الطاقة والتخلص من المياه المالحة. كما يمكن أن تؤدي برامج التعليم والتوعية إلى تمكين المزارعين من اعتماد هذه التقنيات والممارسات الجديدة، ما يعزز ثقافة الاستدامة التي تعود بالنفع على البيئة والاقتصادات المحلية. ولا يعزز هذا النهج الشامل الأمن الغذائي فحسب، بل يساهم أيضًا في الاستقرار الاقتصادي العام للمنطقة، ما يمهد الطريق لمشهد زراعي أكثر صمودًا.

تهدف نتائج هذه الدراسة إلى دعم الجهود المستقبلية في معالجة مخاوف مجتمعات الري، مع التركيز على العوامل والحواجز الرئيسية، بما يشمل نماذج مختلفة لتحلية مياه البحر، وتسعير المياه، واستهلاك الطاقة، وقيود سعة التخزين، والمسائل التنظيمية، والآثار البيئية. ويمثل التغلب على هذه العقبات أمرًا حيويًا في تحويل التحديات الحالية إلى أفضل الممارسات لاستخدام التحلية وإدارتها. ومن ثم، فإن دمج التحلية بوصفها عنصرًا رئيسيًا في الممارسات الزراعية المستدامة يساهم في الأمن المائي والتنمية الاقتصادية.

مسودة للنقاش

المراجع

ج. الخرّاز (2020). تحلية المياه باعتبارها بديل للتخفيف من ندرة المياه والتكيف مع تغير المناخ. البرنامج الإقليمي لأمن الطاقة وتغير المناخ. أكدال – الرباط: مؤسسة كونراد أديناور. اطُلع عليه بتاريخ 15 يوليو 2024، عبر: www.kas.de/remena.

أ. المهدي (2022). مياه الصرف الصحي وتحلية المياه باعتبارها فئة أصول جديدة مع تمويل المياه المناخي. صندوق المناخ الأخضر. اطُلع عليه بتاريخ 13 يوليو 2024.

ت. هـ. قطيشات، ع. ك آل كرابليه، أ. ز سلمان، م. أ طبيه، هـ. ف القضاة، ن. سدر (12 ديسمبر 2016). تحليل اقتصادي لتحلية المياه المالحة المستخدمة في الري في وادي الأردن. التحلية ومعالجة المياه. اطُلع عليه بتاريخ 31 أغسطس 2024، عبر: [https://pdf.sciencedirectassets.com/785634/1-s2.0-S1944398617X72007/1-s2.0-S1944398624131207/main.pdf?X-Amz-SecurityToken=IQoJb3JpZ2luX2VjEF4aCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIGDk4xo9hG1kcqsg%2FK5Hd1M5Dq2fu%2BUVtFnLutBuq%2FBXAiAeDLi2wFjDLwGOhdGG%2BuK7Tk7VASMAL25qsj7o].

س. ريكارت، ر. فيلار نافاسكويس، س. م جيل جيرادو، أ. ريكو أموروس، أ. أراهويتيس (15 أبريل 2020) طريقة سد فجوة مياه البحر المحلاة لري الزراعة، سلوكيات المواجهة بين المديرين والمزارعين في أليكانتي ومورسيا (إسبانيا). المياه. اطُلع عليه بتاريخ 5 أغسطس 2024.

ج. ر. زيولكوفسكا، ر. ريس، (4 مايو 2016). التحليل الجيومكاني لتحلية المياه في الولايات المتحدة: أداة تفاعلية للتقييمات الاجتماعية واقتصادية ودعم القرار. الجغرافيا التطبيقية. نظام معرف الكائن الرقمي https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.04.013

م. العبري (2022). تحلية المياه في المنطقة العربية: الوضع والتحديات والآفاق. القاهرة: منظمة الأغذية والزراعة.اطُلع عليه بتاريخ 4 أغسطس 2024.

م. ت النوري، س. ك. غريفز، (2013). نمذجة سلسلة التوريد لتحلية المياه وتحسينها. ورش عمل هندسة البيانات (المؤتمر الدولي لورش عمل هندسة البيانات). بريسبان، كوينزلاند، أستراليا: معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات. نظام معرف الكائن الرقمي: 10.1109، المؤتمر الدولي لورش عمل هندسة البيانات 2013.6547447

ك. م عامر، ز. عديل، ب. بوير، ب، و. صالح (المحررون). (2016). علاقة الترابط بين المياه والطاقة والأمن الغذائي في المنطقة العربية. (الطبعة المصورة). مجلة سبرينغر، 2016. اطُلع عليه بتاريخ 24 يوليو 2024.

هـ. عواد، ع. منصور، م. أكرمي، إ. س. فتح، أ. جفادي، أ. نجم (15 سبتمبر 2020). توفر تحلية المياه وجدواها باعتبارها مصدر غير تقليدي للري الزراعي في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا: مراجعة. الاستدامة. اطُلع عليه بتاريخ 24 يوليو 2024.

ج. م بلتران، س. كو-أوشيما (2004). تحلية المياه لاستخدامات الزراعة. روما: منظمة الأغذية والزراعة. اطُلع عليه بتاريخ 13 يوليو 2024.

بلاك ريدج. (17 أكتوبر 2023). ما عقد الهندسة والمشتريات والبناء؟ إليك كل ما تحتاج معرفته. اطُلع عليه بتاريخ 25 أغسطس 2024، عبر بلاك ريدج للأبحاث: https://www.blackridgeresearch.com/blog/what-is-an-epc-contract

س. بيرن، م. هوانج، د. زارزو، ف. أوليونياك، إي. كامبوس (2 مارس2015). تقنيات التحلية – مراجعة لفرص التحلية في الزراعة. التحلية. اطُلع عليه بتاريخ 17 يوليو 2024 عبر: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916415000600

إ. داغاري، (2022). تحلية المياه والزراعة. م. وكيل شهزاد، ج. ديكسون، جب.ب. باراسي، ب. ب. شو، وي. جيانغ (المحررون)، مسارات تحلية المياه الفعالة وتحدياتها. إنتك أوبن، نظام معرف الكائن الرقمي: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100197

إ. داغاري، م. ر الزروق، س. موانداء، ج. ر كومباني، س. كنزار، أ. بن ميمون، (2021). جدوى تحلية المياه لاستخدامات الري: دراسة حالة المنطقة الساحلية المروية بديار الحجاج، تونس. إمدادات المياه. نظام معرف الكائن الرقمي 10.2166/ws.2020.218

هـ. البلقاسمي، ر. بوتي، (2023). تقييم النموذج التجاري لمحطة تحلية المياه على ساحل أغادير، المغرب. جامعة ابن زهر، أغادير. اطُلع عليه بتاريخ 29 يوليو 2024.

ج. الخرّاز، (2024). تحلية المياه للزراعة: الاستدامة الاقتصادية والتمويل. اطُلع عليه بتاريخ 16 يوليو 2024.

ر. الصلح، (2015). صلة الترابط بين المياه والطاقة المائي في المنطقة العربية. اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغرب آسيا بيروت: اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغرب آسيا. اطُلع عليه بتاريخ 2 أغسطس 2024.

س. الغزيزل، م. طاحيكت، د. الضيبا، أ. الميداوي، م. تاكي، م. (4 يونيو 2021). تحلية المياه في المغرب: الوضع والآفاق. تحلية المياه ومعالجتها، 13. اطُلع عليه بتاريخ 20 يوليو 2024، عبر: www.deswater.com

منظمة الأغذية والزراعة (2022). تحلية المياه في المنطقة العربية: الوضع والتحديات والآفاق. المكتب الإقليمي للشرق الأدنى وشمال أفريقيا، منظمة الأغذية والزراعة. اطُلع عليه بتاريخ 19 يوليو 2024، عبر: https://www.aoad.org/Mini%20Fifth%20Meeting/3-1%20Water%20Desalination-done/Desalination%20in%20the%20Arab%20region%20Status%20Challenges%20and%20Prospects%20EN%20Final.pdf

(2024) تحلية المياه لتنمية الزراعة: معالجة الفرص والتحديات في سياق تغير المناخ وسوق السلع الزراعية العالمية. منظمة الأغذية والزراعة، روما. اطُلع عليه بتاريخ 14 يوليو 2024.

فاستر كابيتال (2024) تمويل مشاريع تحلية المياه الكبرى. اطُلع عليه بتاريخ 23 أغسطس 2024 عبر فاستر كابيتال: https://fastercapital.com/services/Financing-for-Big-Scale-Desalination-Projects.html

س. جورجيان، (2020). تطبيقات الأنظمة الكهروضوئية في تقنيات تحلية المياه. في تحويل الطاقة الشمسية الكهروضوئية. التقنيات والتطبيقات والآثار البيئية (ص 237-274). اطُلع عليه بتاريخ 29 يوليو 2024.

ج. هربر، (18 فبراير 2024). ثمن تحلية المياه: عوامل وحلول لجعل تكلفة المياه النقية في المتناول. اطُلع عليه عبر: https://medium.com/@desalter/price-of-desalination-factors-and-solutions-for-making-clean-water-more-affordable-1a4957803570

ج. هربر، (12 مارس 2024) السعر الحقيقي للمياه المُحلاة: ما سعر المياه المُحلاة وكيف يقارن بمصادر المياه النقية الأخرى؟ اطُلع عليه بتاريخ 24 أغسطس 2024 عبر: https://medium.com/@desalter/what-is-the-price-of-desalinated-water-and-how-does-it-compare-to-other-sources-of-clean-water-02f20a7b64fb

ت.، هومبليك، ج. لي، أ. فيلمان، ف. رحمن (17 يونيو 2011). استخدام المواد ذات البنية النانومترية لتحلية المياه. اطُلع عليه بتاريخ 15 يوليو 2024، عبر: stacks.iop.org/Nano/22/292001

س. لاتمان، م. كينيدي، ج. س شيبيرز، ج. أيمي (2010). الوضع العالمي لتحلية المياه. في مجلة العلوم والهندسة المستدامة، المجلد 2. إلزفير. نظام معرف الكائن الرقمي: 10.1016/S1871-2711(09)00202-5

إي. ماجوم، (12 يوليو 2024). الشركة الفرنسية أوزموسون تنشئ أول وحدة لتحلية المياه في المغرب لخدمة الزراعة. أفريك 21. اطُلع عليه بتاريخ 18 يوليو 2024، عبر: https://www.afrik21.africa/la-francaise-osmosun-installe-sa-1ere-unite-de-dessalement-au-maroc-pour-lirrigation/

ب.، مونتانو، م. غارسيا لوبيز، ج. ملغاريجو. (19 يوليو 2021). الجدوى المالية والقانونية لمشروع تحلية المياه. التحلية. نظام معرف الكائن الرقمي: https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.11523

ك. ن. بيريز، (26 مارس 2024) تحلية المياه في المغرب :تلبية احتياجات المياه في منطقة تعاني من ندرة المياه .مجلة المياه الذكية .اطُلع عليه بتاريخ 18 يوليو 2024 عبر: https://smartwatermagazine.com/news/smart-water-magazine/desalination-morocco-meeting-water-demands-a-water-scarce-region#:~:text=Desalination%20in%20Morocco%3A%20meeting%20water%20demands%20in%20a%20water%2Dscarce%20region,-Smart%20Water%20Magazine&text=

أ. سانتيني، أ. دي فونزو، إ. غيامبيتيري (18 مايو 2023). خطوة نحو الاستدامة في استخدام المياه: تطبيق نموذج أعمال لخدمات استشارات الري. الزراعة. اطُلع عليه بتاريخ 29 يوليو 2024.

إ. سولا، سي أ سايز، ج. لويس سانشيز-ليزاسو (4 أكتوبر 2021) تقييم المتطلبات البيئية والاجتماعية الاقتصادية لتحسين تطوير تحلية المياه. الإنتاج الأنقى. اطُلع عليه بتاريخ 7 أغسطس 2024 عبر: https://pdf.sciencedirectassets.com/271750/1-s2.0-S0959652621X00364/1-s2.0-S0959652621034818/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEBwaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIELLEtdr3dZzYlsFjloQFh5PH9AQV381rZNgL1J16XosAiBnKAsDLCTz2FkUhA8yS18pvflQ%2BO3CAeJqOTz5EmRZmS

ج. سترلينغ (13 مارس 2023) .لتحلية المياه فوائد اجتماعية – وتكلفة أيضًا. اطُلع عليه بتاريخ 27 أغسطس 2024، من مجلة العلوم والتكنولوجيا بجامعة خليفة: https://kustreview.com/desalination-has-social-benefits-and-costs-too/#:~:text=Local%20employment%20opportunities%20during%20the,of%20sourcing%20and%20carrying%20water.

و. صويلح، د. جونسون، ن. هلال. (28 مايو 2020). تحلية المياه بالأغشية وإعادة استخدام المياه في الزراعة: أحدث التطورات والتوقعات المستقبلية. تحلية المياه، 20. اطُلع عليه بتاريخ 16 يوليو 2024، عبر: www.elsevier.com/locate/desal

البنك الدولي (2012). تحلية المياه بالطاقة المتجددة: حل ناشئ لسد الفجوة المائية في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. واشنطن العاصمة. اطُلع عليه بتاريخ 8 أغسطس 2024.

م. ت ويديارتي، ج. هارتونو، هندایاني، ز. ب روخيمة، س. ي. كوسوما (1 مايو 2023). تطبيق نموذج الأعمال بادا أود ماكمور ماندیري. اطُلع عليه بتاريخ 31 أغسطس 2024 عبر: file:///E:/Desalination%20project_FAO/Implementasi%20business%20model%20canvas%20pada%20ud%20makmur%20mandiri.pdf

ج. ويليامز، ر. بيفريدج، ب. ل. مايو، (2023). المياه غير التقليدية: فهم نقدي لتحلية المياه وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي. بدائل المياه، 429–443. اطُلع عليه بتاريخ 31 أغسطس 2024 عبر: https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol16/v16issue2/714-a16-2-15/file#:~:text=Desalination%20and%20wastewater%20reuse%2C%20in%20particular%2C%20are%20routinely%20presented%20as,least%2C%20increase%20agricultural%20yields%20while

ي. يرمياهو، أ تال، أ. بن غال، أ. بار تال، ج. تارخيتسكي، د. لاهاف (2007). إعادة النظر في جودة المياه المُحلاة والزراعة. العلوم البيئية. اطُلع عليه بتاريخ 25 يوليو 2024.

د. زارزو (2012). تحلية المياه لأغراض الزراعة: إسبانيا كدراسة حالة. الجمعية الإسبانية لتحلية المياه وإعادة استخدامها، أمستردام. اطُلع عليه بتاريخ 16 يوليو 2024.