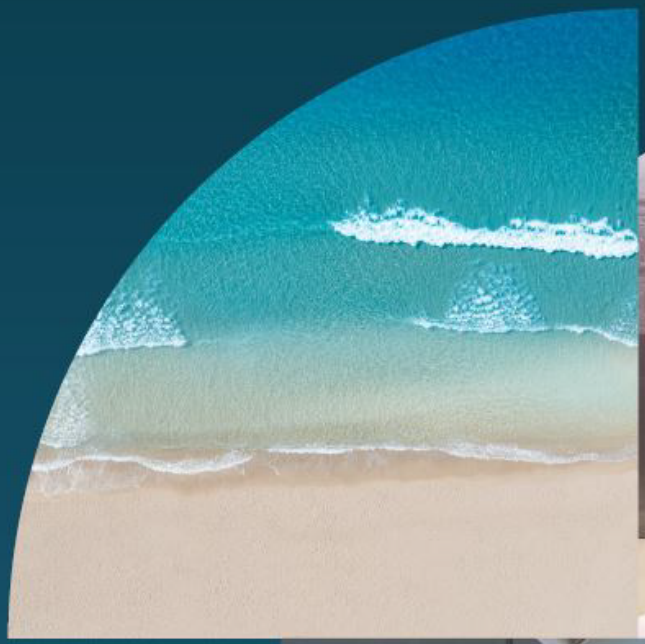
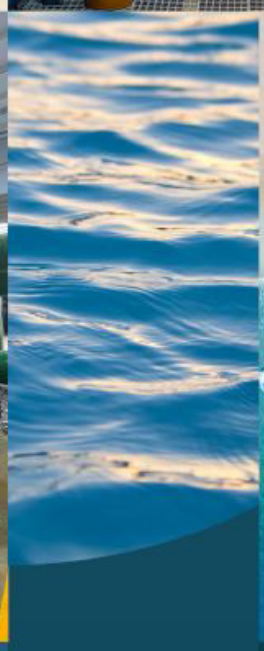
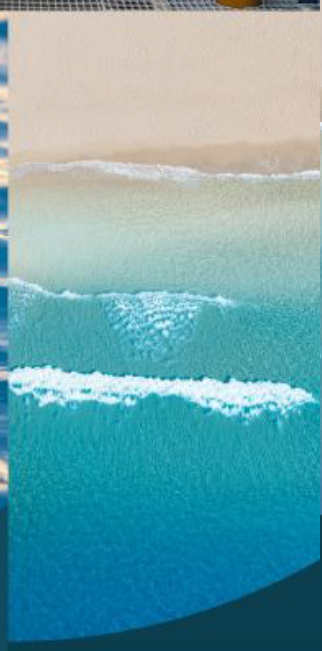
Public Disclosure Authorized
Public Disclosure Authorized
Public Disclosure Authorized
Public Disclosure Authorized

تحلية المياه
في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا
آفاق جديدة: تحديات وفرص



مجموعة البنك الدولي

© 2025 البنك الدولي للإنشاء والتعمير / البنك الدولي

1818 H Street NW, Washington, DC 20433

رقم الهاتف: 1000-473-202؛ موقع الإنترنت: www.worldbank.org

هذا التقرير هو نتاج عمل موظفي البنك الدولي، بالإضافة إلى إسهامات من أطراف خارجية. ولا تمثّل النتائج والتفسيرات والاستنتاجات الواردة فيه بالضرورة وجهات نظر البنك الدولي، أو مجلس مديريه التنفيذيين، أو الحكومات التي يُمثّلونها.

ولا يضمن البنك الدولي دقة أو المعلومات الواردة في هذه الدراسة، ولا يتحمَّل أي مسؤولية عن أي أخطاء أو سهو أو تناقضات في المعلومات، ولا يتحمَّل أي مسؤولية عن استخدام أو عدم استخدام المعلومات أو الأساليب أو الإجراءات أو الاستنتاجات الواردة فيها. ولا تعني الحدود والألوان والمسميات والروابط / الحواشي والمعلومات الأخرى المبينة في هذا العمل أي حكم من جانب مجموعة البنك الدولي على الوضع القانوني لأي إقليم أو تأييد لهذه الحدود أو قبولها. ولا يعني الاستشهاد بأعمال من تأليف آخرين أن البنك الدولي يقر الآراء التي يعبر عنها هؤلاء المؤلفون أو محتوى أعمالهم.

والمحتويات الواردة في هذه المطبوعة هي لأغراض المعلومات العامة فقط، ولا يُقصد منها تقديم مشورة قانونية أو مشورة بشأن أوراق مالية أو استثمارات، ولا تشكِّل رأياً بشأن مدى استحسان أي استثمار، أو التماساً لعرض شراء أو تقديم خدمات من أي نوع. وقد يكون لدى بعض مؤسسات مجموعة البنك الدولي أو الجهات التابعة لها استثمارات في شركات وجهات معيَّنة (يرد ذكرها في هذا التقرير)، أو تقدِّم لها المشورة أو خدمات أخرى، أو تكون لها حصة مالية فيها على أي نحو.

ولا تحوي هذه المطبوعة ما يُشكِّل أو يُفسَّر أو يُعتبر قيداً على أو تخلياً عن الامتيازات أو الحصانات التي تتمتع بها أي من مؤسسات مجموعة البنك الدولي، فجميعها محفوظة على نحوٍ مُحدَّد وصريح.

الحقوق والأذون

تخضع محتويات هذا العمل لحقوق الطبع والنشر. ولأن البنك الدولي يُشجِّع على نشر معارفه، فإنه يجوز إعادة نسخ هذا التقرير كلياً أو جزئياً لأهداف غير تجارية، ما دام يتضمن نسبته بشكل كامل إلى هذا العمل.

نسبة العمل إلى المؤلف - يرجى الالتزام بالصيغة التالية عند الاستشهاد بهذا العمل:

World Bank. 2025. Fresh Perspectives: Emerging Issues and Opportunities for Desalination in the Middle East and North Africa
البنك الدولي. 2025. تقرير تحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا ــ آفاق جديدة: تحديات وفرص. واشنطن العاصمة. الترخيص: نسب المشاع الإبداعي 43759/CC BY 3.0 IGO https://hdl.handle.net/10986

الترجمات — إذا قمت بترجمة هذا العمل، يُرجى إضافة صيغة إخلاء المسؤولية التالية مع الإشارة إلى مصدر العمل: هذه الترجمة ليست من إعداد البنك الدولي ولا يجب اعتبارها ترجمة رسمية. ولا يتحمل البنك الدولي أي مسؤولية عن أي محتوى أو أخطاء في هذه الترجمة.

الاقتباس والتعديل —إذا قمت بالاقتباس من هذا العمل، يُرجى إضافة صيغة إخلاء المسؤولية التالية جنباً إلى جنب مع نسبة العمل لصاحبه: هذا اقتباس من عمل أصلي للبنك الدولي؛ والمسؤولية عن وجهات النظر والآراء المُعبَّر عنها في الاقتباس تقع حصراً على كاتب الاقتباس أو كاتبيه، ولا يُقرها البنك الدولي..

محتوى الغير- لا يمتلك البنك الدولي بالضرورة جميع مكونات المحتوى المتضمن في هذا الكتاب، لذا فإنه لا يضمن ألا يمس استخدام أي مُكوِّن منفرد مملوك لطرف آخر متضمن في هذا العمل أو جزء من هذا المُكوِّن بحقوق تلك الأطراف الأخرى، وتقع مسؤولية أي مطالبات قد تنشأ عن هذا المساس على عاتقك وحدك، وإذا أردت إعادة استخدام أحد عناصر هذا التقرير، فإنك تتحمل مسؤولية تحديد ما إذا كان يلزم الحصول على ترخيص لذلك الاستخدام والحصول على إذن من صاحب حقوق الملكية. ويمكن أن تتضمن أمثلة المكوِّنات، على سبيل المثال لا الحصر، الجداول أو الأشكال أو الصور.

يجب توجيه جميع الاستفسارات عن الحقوق والتراخيص بما في ذلك حقوق التبعية إلى إدارة مطبوعات البنك الدولي على العنوان التالي: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA، فاكس:202-522--2625، بريد إلكتروني: pubrights@worldbank.org.

تحلية المياه

في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

آفاق جديدة: تحديات وفرص

مجموعة البنك الدولي

المحتويات

شكر وتقدير v

الاختصارات والأسماء المختصرة vi

ملخص تنفيذي 1

1 سياق الأمن المائي و التحلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 1

2 دور التكنولوجيا والابتكار في تطوير تحلية المياه 13

2.1. تحلية المياه على نطاق واسع: خفض التكاليف الإجمالية والانتقال من التكنولوجيات الحرارية إلى الأنظمة القائمة على الأغشية 14

2.2. تزايد تطبيق تكنولوجيا التحلية في الحلول اللامركزية صغيرة النطاق 21

2.3. الاعتبارات الأساسية عند تصميم تحلية المياه 23

3 محور العلاقة بين الطاقة والمياه: دور التحلية في تعزيز التنمية 25

3.1. تحلية المياه منخفضة الانبعاثات الكربونية كوسيلة للتخفيف من آثار تغيّر المناخ 25

3.2. التحديات والفرص المرتبطة بدمج الطاقة المتجددة في تحلية المياه 28

3.3. أوجه التآزر بين الهيدروجين الأخضر وتحلية المياه 34

4 ضمان الاستدامة البيئية والاجتماعية لتحلية المياه 37

4.1. الآثار البيئية لتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 38

4.2. إدارة الآثار البيئية والاجتماعية لتحلية المياه والتخفيف منها 41

4.3. الآثار الاجتماعية والاقتصادية لتحلية المياه والمشاركة المجتمعية فيها 50

5 أهمية الحوكمة في تعميم التحلية 55

5.1. ضمان ملاءمة الأطر المؤسسية والإدارية للغرض المرجو منها 55

5.2. إدراج تحلية المياه في الإدارة المتكاملة لموارد المياه 59

5.3. اعتبارات الحوكمة لمشروعات الشراكة بين القطاعين العام والخاص في تحلية المياه 62

6 إستراتيجيات لتوسيع نطاق تحلية المياه واستدامتها 67

6.1. تحقيق الاستدامة المالية لقطاع المياه 67

6.2. تعبئة التمويل لتحلية المياه 72

6.3. تحقيق العدالة والحماية الاجتماعية في مقابل تكلفة المياه 77

7 التحديات والفرص الناشئة لتحلية المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 83

المراجع 91

الأشكال

الشكل ES.1 • توفر المياه بالنسبة إلى إجمالي الناتج المحلي، حسب المنطقة وفئة الدخل 1

الشكل ES.2 • السعة التشغيلية لمرافق ومحطات التحلية ونسبة التحلية في مزيج إمدادات المياه، حسب فئة الدخل 2

الشكل ES.3 • أثر الابتكارات التكنولوجية والمالية المتنوعة على الحد من تكاليف التحلية- مثال من جمهورية مصر العربية 5

الشكل 1.1 • توفر المياه بالنسبة إلى إجمالي الناتج المحلي، حسب المنطقة وفئة الدخل 2

الشكل 1.2 • زيادة الطلب على المياه والفجوة بين العرض والطلب في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بحلول عام 2050، حسب فئة الدخل 2

الشكل ب1.1.1 • النسبة المئوية للمستجيبين الذين أشاروا إلى أن تلوث المياه يمثل مشكلة خطيرة للغاية أو خطيرة 3

الشكل ب1.2.1 • التوسع التراكمي في قدرات تحلية المياه القائمة والفعلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وبقية العالم، الإجمالي (أعلى) ومصنفا حسب التكنولوجيا (أسفل) 5

الشكل ب1.2.2 • استخدام المياه المحلاة حسب القطاع 6

الشكل ب 1.2.3 • عدد محطات تحلية المياه القائمة والجاري إنشاؤها في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حسب الحجم 6

الشكل 1.3 • السعة التشغيلية لمرافق ومحطات التحلية ونسبة التحلية في مزيج إمدادات المياه، حسب فئة الدخل 7

الشكل 2.1 • مراحل تطور أسعار المياه المُحلاة عبر الزمن بحسب التكنولوجيا المستخدمة 13

الشكل 2.2 • وفورات الحجم لعمليات التحلية المختلفة 15

الشكل 2.3 • تطور عدد ومتوسط سعة محطات التحلية الكبيرة الجديدة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا عبر الزمن 16

الشكل 2.4 • متوسط سعة محطات التحلية التي تمت ترسيتها خلال الفترة 2010–2025 في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حسب فئة الدخل 16

الشكل 3.1 • مقارنة متوسط المرجح العالمي للتكلفة المستوية للكهرباء بين مصادر الطاقة المتجددة والوقود الأحفوري لعامي 2010 و2023 26

الشكل ب4.1.1 . عملية تتألف من ست خطوات لإجراء تقييمات الأثر التراكمي 49

الشكل 5.1 • أمثلة على النماذج المؤسسية لتوفير خدمات المياه 58

الشكل ب5.3.1 • إنتاج المياه – مالطا 61

الشكل ب6.1.1 • التدابير على جانبي الطلب والعرض لإدارة الطلب على المياه في عام 2050 69

الشكل ب6.1.2 • أثار مختلف تدابير الهيكلة المالية على تكلفة تحلية المياه 70

الشكل ب6.6.1 • الإطار المفاهيمي لتطوير تحلية المياه في عدن 79

الشكل ب6.7.1 • نموذج نمطي للإدارة المتكاملة للموارد المائية، مع الانتقال تدريجياً من التمويل العام إلى الخاص 80

الشكل 7.1 • مسارات الانتقال المتعاقبة للتطوير من البلدان ذات الدخل المنخفض إلى مستوى الدخل المتوسط ثم المرتفع 87

الإطارات

الإطار 1.1 • ضعف جودة المياه يؤدي إلى تفاقم شح المياه ويقلل من العائد على الاستثمار 3

الإطار 1.2 • السمات الرئيسية لتحلية المياه على مستوى قطاعات المياه في جميع أنحاء العالم وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 5

الإطار 2.1 • دور البحث والتطوير في دفع الابتكار لتحسين الكفاءة وخفض تكاليف تحلية المياه 17

الإطار 2.2 • التحوّل في تكنولوجيات تحلية المياه في المملكة العربية السعودية 19

الإطار 2.3 • التكنولوجيات الناشئة والآخذة في التطور لتحلية المياه 20

الإطار 2.4 • تطبيقات التحلية صغيرة النطاق لدعم إمدادات المياه في المناطق المتأثرة بالصراعات 22

الإطار 3.1 • وضع حدود قصوى للانبعاثات في مشاريع التحلية: دراسة حالة ــ مشروع الناقل الوطني للمياه (العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه) 27

الإطار 3.2 • نظام التخزين بالضخ في المملكة العربية السعودية 30

الإطار 3.3 • دور محطات التحلية في تعزيز استقرار الشبكة الكهربائية 31

الإطار 3.4 • الإصلاحات القانونية والتنظيمية على مستوى السياسات في قطاع الطاقة بالمغرب لمساندة مشاريع التحلية المعتمدة على الطاقة المتجددة 33

الإطار 4.1 • تعظيم الاستفادة من الحوكمة البيئية والاجتماعية لتحلية المياه 43

الإطار 4.2 • تعزيز التنمية التعاونية المستدامة لتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 49

الإطار 5.1 • دعم استعادة وتوسيع نطاق قدرات تحلية المياه في ليبيا 56

الإطار 5.2 • الإدارة المتكاملة للمياه في مالطا 60

الإطار 5.3 • دعم اتخاذ القرار من خلال أداة المحاكاة وتعظيم الاستفادة من المحفظة (SPOT) 62

الإطار 5.4 • زيادة الشفافية في مناقصات مشاريع التحلية لخفض التكلفة 63

الإطار 6.1 • إستراتيجيات تحسين الاستدامة المالية لتحلية المياه في جمهورية مصر العربية 68

الإطار 6.2 • تحسين أداء المرافق وتقليل خسائر شبكات المياه لتحقيق استقرار في مبلغ فاتورة توسيع قدرات تحلية المياه 71

الإطار 6.3 • اتفاقيات مدفوعات المستخدمين لتمكين تحلية المياه في المغرب 74

الإطار 6.4 • النُهُج البرامجية لتقليل المخاطر وتوسيع استثمارات المياه 75

الإطار 6.5 • إنشاء مشاريع تحلية جاذبة للمستثمرين من خلال الاستفادة من أسواق الكربون 76

الإطار 6.6 • أُطُر تطوير مشروعات التحلية في بيئات الهشاشة والصراع والعنف (FCV) 78

الإطار 6.7 • برامج الإدارة المتكاملة للموارد المائية يمكن أن تُحفِّز مشاركة القطاع الخاص واستثماراته 80

الإطار 7.1 • برنامج شراكة تحلية المياه بين السعودية والبنك الدولي 90

قائمة الجداول

الجدول 7.1 • التحديات الرئيسية والفرص المتاحة لتحلية المياه في البلدان مرتفعة ومتوسطة ومنخفضة الدخل في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 88

قائمة الخرائط

الخريطة 1.1 • موقع وقدرات/سعة وتكنولوجيا محطات التحلية الرئيسية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في عام 2025 8

الخريطة 3.1 • إمكانات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 29

شكر وتقدير

أعد هذا التقرير فريق بقيادة فلوريس داليمانز (أخصائي المياه)، وماركوس ويشارت (كبير أخصائيي إدارة الموارد المائية)، وراجيش بالاسوبرامانيان (مسؤول أول الاستثمار)، وضم الفريق كلا من جيسون جينغرونغ لو (كبير خبراء المياه والتمويل) ومحمد زكريا كمه (أخصائي أول الطاقة) ونور الدين سيتروين (أخصائي أول الطاقة) وأُلفة خليفي (أخصائي أول شؤون البيئة) وسفن شلومبرغر (أخصائي إمدادات المياه والصرف الصحي)، ووليد تيسير الحداد (خبير الطاقة)، ويسرا محمد أسامة مصطفى العساكر (خبير أول الطاقة).

ويود الفريق أن يتقدم بالشكر إلى الزملاء الذين قاموا بمراجعة التقرير لما قدموه من تعليقات قيمة وثاقبة خلال عملية الاستعراض وهم: كورادو سوماريفا (الرئيس التنفيذي لاستشارات المياه والكهرباء المستدامة)، وجيمس بيتر مور (مستشار إقليمي للبيئة والمعايير الاجتماعية)، وليالي عابدين (مسؤول أول تنمية الأعمال)، وناول سيريل ماري (مسؤول أول العمليات)، ونيكولا روجيرو سابوريتي (مسؤول أول الاستثمار)، ويتباريك تيسيما (كبير الخبراء العالميين في مجال إمدادات المياه والصرف الصحي)، وزائل سانز أوريارتي (أخصائي أول في مجال إمدادات المياه والصرف الصحي). كما نثمن ما قدمه ساروج كومار جاه (المدير العام لقطاع الممارسات العالمية للمياه) من تعليقات وآراء. واستفاد هذا العمل من الرؤى والتحليلات الواردة في سلسلة معارف البنك الدولي المعنونة "حوكمة واقتصاديات تحلية المياه وإعادة استخدامها"، بقيادة زائل سانز أوريارتي (أخصائي أول إمدادات المياه والصرف الصحي)، وجيهون لي (أخصائي المياه)، وسفين شلمبرجير (أخصائي إمدادات المياه والصرف الصحي)، ولارا لوسك-جارسيا (مهنية مبتدئة)، وهيلا كوهين مزراف (استشارية). ويود الفريق أيضا أن يشكر هوغو بيرتش من شركة غلوبال ووتر إنتيليجنس على مشورته في تحليل البيانات، وكذلك شانون كيه ماكارثي من الجمعية الدولية لتحلية المياه وإعادة استخدامها على مشورته الفنية. ومع امتنان فريق العمل للجميع، وجب التنويه أن الآراء الواردة هنا وأي أخطاء تقع على عاتق المؤلفين وحدهم ويجب ألا تنسب إلى الأفراد أو المؤسسات التي شاركت بآرائها.

وتم إعداد هذا التقرير بدعم وتوجيه من جهاز إدارة البنك الدولي لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، ونخص بالذكر أوسمان ديون (نائب الرئيس لشؤون منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا)، وبثينة غرمازي (مديرة الإستراتيجية والعمليات)، ومسكيرم برهان (المدير الإقليمي لشؤون الكوكب)، ومايكل هاني (مدير قطاع الممارسات العالمية للمياه)، وحسام بيديس (مدير قطاع الممارسات العالمية للطاقة). ويود الفريق أن يتقدم بالشكر إلى إيزابيل مارتن كاريرا، وسولانج فيلاميل، وتريسي-آن ويسدم، ومها كامل من إدارة الحلول المؤسسية العالمية - وحدة الترجمة التحريرية والفورية بالبنك الدولي على دعمهم لتنسيق هذا التقرير وتحريره على التوالي، وكذلك لورين كالي جونسون من وحدة التصميم، وعدنان غوشه، وغادة القطارنة لما قدماه من دعم في المراجعة اللغوية للتقرير. كما يتوجه الفريق بالشكر والامتنان إلى المساندة التي قدمتها مارلي جينيان بيرز من وحدة رسم الخرائط بالبنك الدولي للمساعدة في وضع الخرائط الواردة في هذا التقرير. ونتوجه بالشكر إلى ناديج ميرتوس وشارون دي سي فولكنر على مساندتهما الإدارية للفريق طوال العملية.

لم يكن إعداد هذا التقرير ممكناً لولا الدعم المالي الذي قدمته الشراكة العالمية للأمن المائي وخدمات الصرف الصحي، وهي صندوق استئماني متعدد المانحين يديره قطاع الممارسات العالمية للمياه بالبنك الدولي. وتشمل الجهات الداعمة لهذه الشراكة وزارة الشؤون الخارجية والتجارة الأسترالية، ووزارة المالية الاتحادية بالنمسا، ومؤسسة غيتسن، ووزارة الشؤون الخارجية الدنماركية، ووزارة الخارجية الهولندية، ووزارة الشؤون الاقتصادية والتحول الرقمي الإسبانية، والوكالة السويدية للتعاون الإنمائي الدولي، وأمانة (سكرتارية) الدولة السويسرية للشؤون الاقتصادية، والوكالة السويسرية للتنمية والتعاون، والوكالة الأمريكية للتنمية الدولية.

قام بترجمة هذا التقرير من اللغة الإنجليزية إلى اللغة العربية محمود إبراهيم، رئيس فريق الترجمة العربية ــ إدارة الحلول المؤسسية العالمية بالبنك الدولي.

الاختصارات والأسماء المختصرة

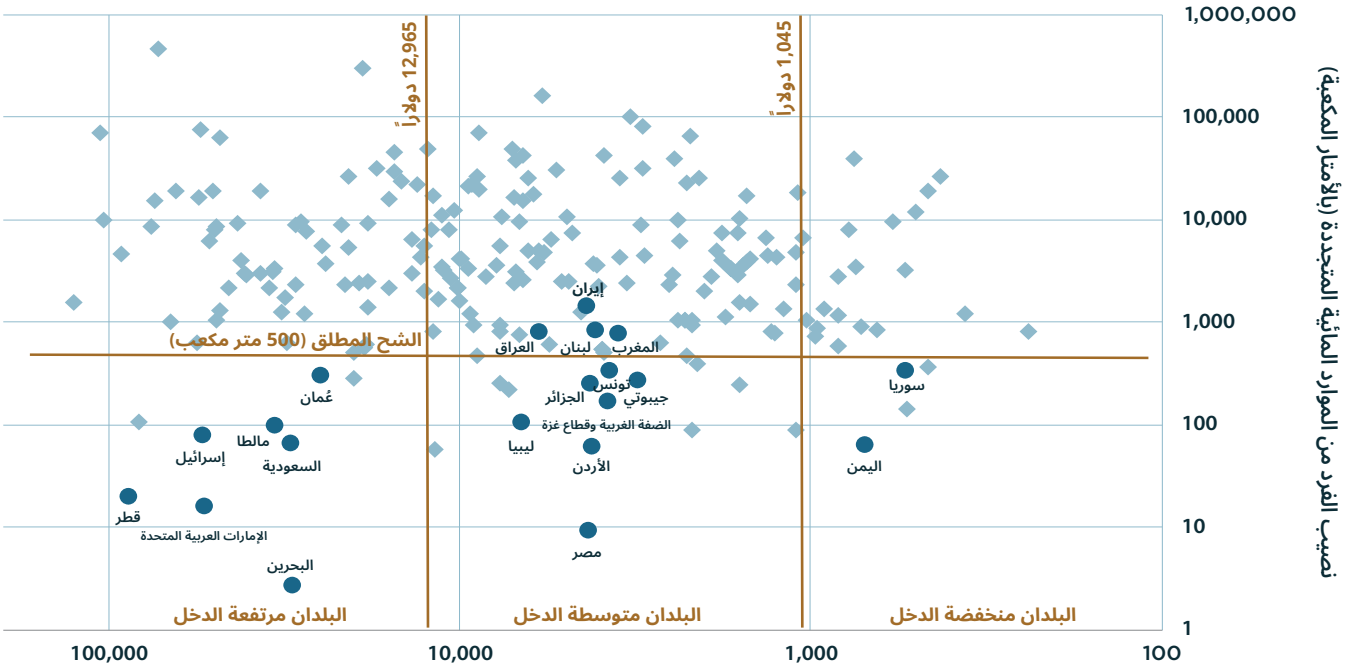
AAWDCP	مشروع الناقل الوطني للمياه (العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه)
AI	الذكاء الاصطناعي
AIIB	البنك الآسيوي للاستثمار في البنية التحتية
BANOBRAS	البنك الوطني للأشغال العامة والخدمات
BCM	مليار متر مكعب
BOO	البناء والتملك والتشغيل
BOT	البناء والتشغيل ونقل الملكية
CAPEX	النفقات الرأسمالية
CCDR	التقرير القطري للمناخ والتنمية
CDI	إزالة الأيونات بالسعة
CIA	تقييم الأثرّ التراكمي
CSP	طاقة شمسية مركّزة
DBO	التصميم والبناء والتشغيل
DBOOT	نظام (التصميم، والبناء (التشييد)، والتملك، والتشغيل ونقل الملكية)
DH	درهم (مغربي)
DZD	دينار (جزائري)
E&S	الجوانب البيئية والاجتماعية
ED	الديلزة (الفصل الغشائي)
EIA	تقييم الأثرّ البيئي
EHS	البيئة والصحة والسلامة
EPC	أعمال هندسية وتوريدات وإنشاءات
ESF	إطار العمل البيئي والاجتماعي
ESIA	تقييم الآثّار البيئية والاجتماعية
ESMP	خطة الإدارة البيئية والاجتماعية
ESP	السياسة البيئية والاجتماعية
ESS	المعيار البيئي والاجتماعي
FAO AQUASTAT	نظام المعلومات العالمي بشأن المياه والزراعة لمنظمة الأغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة (الفاو)
FO	التناضح الأمامي
FONADIN	الصندوق الوطني للبنية التحتية
GCC	مجلس التعاون الخليجي
GDP	إجمالي الناتج المحلي
GHG	غازات الدفيئة (غازات الاحتباس الحراري)
GWI	المعلومات عن إمدادات المياه العالمية
GWSP	الشراكة العالمية للأمن المائي وخدمات الصرف الصحي
HAM	النموذج المختلط للدفعات السنوية
HEPCA	جمعية الغردقة لحماية البيئة والحفاظ عليها "هيبيكا"
HICs	البلدان مرتفعة - الدخل
IFC	مؤسسة التمويل الدولية
IMF	صندوق النقد الدولي
IRENA	الوكالة الدولية للطاقة المتجددة
IWP	شركة إنتاج مياه مستقلة
KPI	مؤشر الأداء الرئيسي
kWh	كيلوواط ساعة
LE	جنيه مصري
LICs	البلدان منخفضة الدخل
LWSC	المؤسسة المحلية للمياه والصرف الصحي
m3	متر مكعب
MCM	مليون متر مكعب
MD	التقطير الغشائي
MED	تقطير متعدد التأثيّرات
MICs	البلدان متوسطة الدخل
MIGA	الوكالة الدولية لضمان الاستثمّار
MMBTU	مليون وحدة حرارية بريطانية
MSF	التقطير الومضي متعدد المراحل
MW	ميجاواط
NIS	شيكل إسرائيلي جديد
O&M	التشغيل والصيانة
OPEX	المصاريف التشغيلية

PPA	اتفاقية شراء الكهرباء
PPM	أجزاء في المليون
PPP	الشراكة بين القطاعين العام والخاص
PROMAGUA	برنامج تحديث شركات تشغيل (مشغلي) شبكات المياه
PV	الطاقة الكهروضوئية
R&D	البحوث والتطوير
RAS	الخدمات الاستشارية مستردة التكلفة
RFP	طلبات تقديم العروض
RO	التناضح العكسي
ROI	العائد على الاستثمّار
SCADA	منظومة الحصول على البيانات ومراقبتها
SCALE	صندوق توسيع نطاق العمل المناخي عن طريق خفض الانبعاثاّت
SOE	المؤسسات المملوكة للدولة
SPOT	أداة المحاكاة وتعظيم الاستفادة من المحفظة
P2P	من القطاع الخاص إلى القطاع الخاص
PHS	تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ
SRI	ريال سعودي
SRM	شركة إقليمية متعددة الخدمات
SWA	الهيئة السعودية للميـــاه
SWCC	المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة
SWRO	التناضح العكسي لمياه البحر
TWh	تيراواط ساعة
UNCLOS	اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار
UNEP	برنامج الأمم المتحدة للبيئة
UV	الأشعة فوق البنفسجية (فوق بنفسجي)
VEC	المكون البيئي والاجتماعي الذي تم تقييمه
WBG	مجموعة البنك الدولي
WHO	منظمة الصحة العالمية
ZLD	عدم تصريف السوائل

ملخص تنفيذي

تواجه منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا أشد حالات نقص المياه في العالم. وتضم المنطقة أكثر من نصف البلدان التي تعاني من الشح المطلق في المياه، موزعة على مختلف مستويات الدخل (الشكل ES.1). وتتفاقم هذه الأزمة بفعل الإفراط في استهلاك المياه الجوفية، وتدهور جودة الموارد المائية، إلى جانب تزايد الطلب نتيجة النمو السكاني والتنمية الاقتصادية. ويسهم تغيّر المناخ في تفاقم هذه التحديات، إذ يؤدي إلى أنماط مناخية غير متوقعة ويقلل من توافر المياه العذبة. إضافة إلى ذلك، فإن أكثر من 60% من الموارد المائية في المنطقة عابرة للحدود، أي مشتركة بين بلدين أو أكثر، مما يضيف طبقة أخرى من المخاطر ويزيد من هشاشة الأمن المائي الوطني. ونتيجة لذلك، يجد العديد من البلدان صعوبات متزايدة لتلبية احتياجاتها من المياه البلدية والصناعية والزراعية من الموارد السطحية والجوفية.

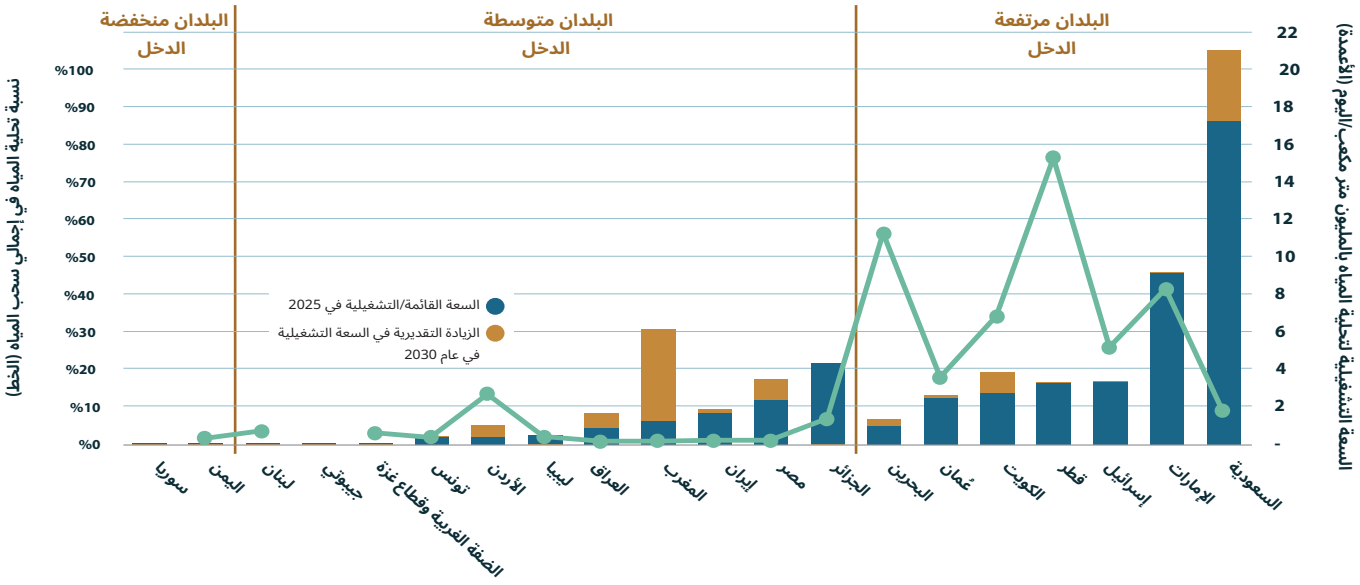
الشكل ES.1 • توفر المياه بالنسبة إلى إجمالي الناتج المحلي، حسب المنطقة وفئة الدخل



المصدر: أعد هذا الشكل أصلاً لأغراض هذا التقرير، استنادا إلى بيانات النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو) والبيانات المفتوحة للبنك الدولي.

تحلية المياه تمثل استجابة راسخة لدى البلدان مرتفعة الدخل في المنطقة لمواجهة تحديات شح المياه، وتبرز كإستراتيجية تكيف محورية للتكيف في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل. وتواصل بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا زيادة استثماراتها في الموارد المائية غير التقليدية، مثل تحلية المياه وإعادة استخدام المياه المستعملة، لضمان توفير إمدادات موثوقة للمياه. وقد كانت البلدان مرتفعة الدخل في دول مجلس التعاون الخليجي رائدة في استثمار واسع النطاق في البنية التحتية لتحلية المياه، مما ساهم في دفع الابتكار التكنولوجي ووضع معايير عالمية لسعة محطات التحلية وكفاءتها وفاعليتها من حيث التكلفة. وأسهمت هذه الابتكارات في تسريع اعتماد أساليب جديدة لتحلية المياه وخفض تكاليف الإنتاج، مما أتاح فرصاً جديدة أمام البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل لتبني إستراتيجيات مماثلة لتأمين إمدادات مياه موثوقة (الشكل ES.2).

الشكل ES.2 • السعة التشغيلية لمرافق ومحطات التحلية ونسبة التحلية في مزيج إمدادات المياه، حسب فئة الدخل



المصدر: أعد هذا الشكل أصلاً لأغراض هذا التقرير، استنادا إلى بيانات من تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (الأعمدة)،[1] وبيانات النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو) والبيانات المفتوحة للبنك الدولي،[2] (تصنيف الدخل).[3]

لن تكون مشاريع تحلية المياه وحدها كافية للتغلب على التحديات المائية في المنطقة، إذ يتطلب الأمر نهجاً شاملاً يوازن بين الاعتبارات التكنولوجية والبيئية والمالية، بالإضافة إلى اعتبارات الحوكمة. ويجب دمج الفرص الناشئة المرتبطة بتحلية المياه بعناية ضمن مجموعة متوازنة من الحلول على جانب العرض، إلى جانب أطر الاقتصاد الدائري التي تتيح إنشاء أنظمة مستدامة ذات دورة مغلقة. علاوة على ذلك، ينبغي إدماج التوسع في التحلية كحل على جانب العرض ضمن إستراتيجيات أوسع لقطاع المياه، تشمل الإدارة الفعالة للطلب، وتحسين كفاءة استخدام المياه، وتعزيز حوكمة القطاع، لضمان الاستدامة على المدى الطويل. كما أن الحيز المحدود نسبياً في المالية العامة والطلب شديد التنافس على موارد الموازنة في العديد من البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل يستدعي النظر بعناية في الاستثمارات المستهدفة للتحلية مقارنة بإستراتيجيات إدارة المياه الأخرى. كما تحقيق التوازن بين مختلف الاعتبارات والاستفادة من التكنولوجيات الحديثة في المنطقة سيساعد بلدانها على تعزيز قدرتها على الصمود في مواجهة شح المياه والتقلبات المناخية.

1 انظر تنبؤات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، وتم الاطلاع في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).
2 انظر https://www.fao.org/aquastat/en/.
3 انظر https://data.worldbank.org/.

يهدف هذا التقرير إلى تقديم إرشادات لواضعي السياسات والممارسين المعنيين بهذا المجال بشأن دمج تحلية المياه بشكل فعّال في شبكات إمدادات المياه. ويتم ذلك من خلال دراسة المشكلات والتحديات والفرص الناشئة المرتبطة بالدور المتطور لتحلية المياه كإستراتيجية رئيسية للتكيف مع شح المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وقد تم تحديد خمس تحديات وفرص رئيسية باعتبارها بالغة الأهمية في تشكيل مستقبل تحلية المياه في المنطقة. وتكتسب هذه الإصلاحات أهمية خاصة مع بروز التحلية كخيار قابل للتطبيق بشكل متزايد لتعزيز الأمن المائي في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل. كما يهدف هذه التقرير إلى تقديم تحليل متكامل لكيفية مساهمة الابتكار التكنولوجي، وكفاءة استخدام الطاقة والطاقة المتجددة، والإدارة البيئية والاجتماعية، والحوكمة القوية، والاستدامة المالية في تشكيل مستقبل التحلية في المنطقة على نحو جماعي يتسم بتضافر الجهود. ومن خلال تسليط الضوء على الحاجة إلى نهج شامل يراعي السياق وإمكانية التعاون بين البلدان مرتفعة ومتوسطة ومنخفضة الدخل، يطرح التقرير معلومات لدعم القرارات المتعلقة بالسياسات والاستثمار بما يعزز الأمن المائي والقدرة على الصمود في مواجهة الضغوط المناخية والإنمائية.

وفيما يلي خمس تحديات وفرص رئيسية:

1. **الابتكار التكنولوجي يساهم الابتكار التكنولوجي في إحداث تحولات نوعية في أساليب تحلية المياه، مما يجعلها حلاً ميسوراً وفعالاً من حيث التكلفة بشكل متزايد يلبي مجموعة واسعة من احتياجات إمدادات المياه.** ولقد كانت منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في طليعة التطور في تكنولوجيا تحلية المياه ونماذج التشغيل، مما أسهم تدريجياً في خفض تكاليف الإنتاج وتقليل متطلبات الطاقة وتحسين جودة المياه. ونتيجة لذلك، أصبح الوصول إلى التحلية أكثر سهولة على نطاق واسع، سواء في المراكز الحضرية أو في المناطق الصغيرة اللامركزية، بما في ذلك المناطق النائية أو المتأثرة بالصراعات. وقد أصبح هذا الحل مجدياً من حيث التكلفة لعدد متزايد من الاستخدامات البلدية والصناعية وحتى الزراعية عالية القيمة. وقد برز التناضح العكسي كطريقة مفضلة، إذ يوفر كفاءة أكبر في استخدام الطاقة وتكاليف إجمالية أقل مقارنة بالتقنيات الحرارية التقليدية. كما تبشر الأساليب الحديثة، مثل التناضح الأمامي والتقطير الغشائي والتحلية الكهروكيميائية، بمزيد من التحسينات في التكلفة والاستدامة. ولضمان السلامة على المدى الطويل وتجنب المخاطر التكنولوجية، يتطلب التنفيذ الناجح لمشروعات التحلية في المنطقة دراسة دقيقة لاختيار التكنولوجيا المناسبة، والظروف البيئية المحلية، ومصادر الطاقة، وطرق التخلص من الرجيع الملحي.

2. **أهمية كفاءة استخدام الطاقة ودمج مصادر الطاقة المتجددة يسهم ذلك بصورة كبيرة في خفض تكاليف تحلية المياه والتخفيف من آثار تغير المناخ في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.** ولا يزال استهلاك الطاقة عاملاً رئيسياً في التكلفة والأثر البيئي، إذ يُتوقع أن تمثل تحلية المياه أكثر من 10% من إجمالي استهلاك الطاقة في المنطقة بحلول عام 2040. وإذا كانت المنطقة تطمح إلى فصل التوسع في قدرات التحلية عن الزيادة المقابلة في البصمة الكربونية، فسيكون من الضروري إعادة تشكيل محور العلاقة بين الطاقة والمياه لتحقيق نمو أخضر قادر على الصمود. وسيسهم التحول من الأساليب الحرارية كثيفة الاستهلاك للطاقة إلى التكنولوجيات المعتمدة على الأغشية في خفض الانبعاثات الكربونية وتكاليف التشغيل، إلى جانب التحسينات المستمرة في كفاءة استخدام الطاقة. وبالمثل، فإن دمج مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، يوفر إمكانية تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وذلك على الرغم من ضرورة التصدي للتحديات المرتبطة بأعطال التوليد والنقل والأطر التنظيمية. كما توجد إمكانات كبيرة للاستفادة من المبادرات الطموحة للهيدروجين الأخضر في المنطقة، التي تستهدف المساهمة بنسبة 21% من الإنتاج العالمي بحلول عام 2050، مما يتيح فرصاً لتعزيز أوجه التآزر وتضافر الجهود ودعم مشاريع التحلية وتحسين جدوى المحطات وتعظيم الاستفادة من السعة المتاحة. وفي نهاية المطاف، قد يتطلب تعظيم الاستفادة من التكامل بين التحلية وقطاع الكهرباء وضع إستراتيجية وطنية شاملة للتحلية، ونهجاً متكاملاً لأنظمة الطاقة والمياه، إلى جانب إمكانية منح حوافز، على سبيل المثال وضع حدود قصوى للانبعاثات.

3. **الإدارة البيئية والاجتماعية الفعالة الإدارة البيئية والاجتماعية الفعالة ضرورة للاستفادة من فوائد تحلية المياه مع حماية النظم البيئية والمجتمعات المحلية.** يمكن لتحلية المياه أن تخفف الضغوط على الموارد المائية المستغلة بشكل مفرط، لكنها قد تشكل أيضاً مخاطر محتملة على البيئات البحرية، والسكان في المناطق القريبة، وخدمات النظم الإيكولوجية التي تعتمد

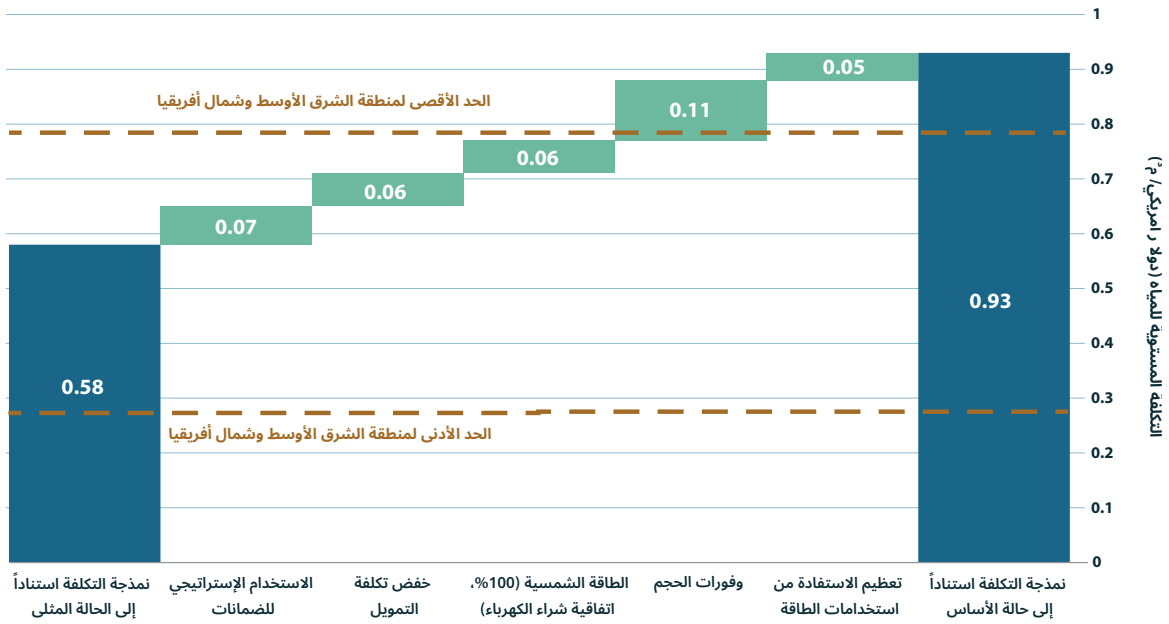
عليها. وتعد الإدارة الفعالة للمخاطر البيئية والحلول الهندسية المبتكرة، المسترشدة باللوائح التنظيمية على مستوى العديد من البلدان وبمتطلبات المقرضين، غاية في الأهمية لتقليل الآثار المحتملة وإدارتها والحد منها. وينبغي تحديد المتطلبات بما يتناسب مع الظروف المختلفة على مستوى مناطق المياه من المحيط الأطلسي والخليج العربي وحتى البحر الأبيض المتوسط. كما يجب توخي الحذر عند إعداد تطوير مشاريع التحلية في المسطحات الساحلية الضحلة، خاصة تلك التي تعاني من ضعف الدوران، إذ تكون أكثر عرضة للآثار التراكمية الناجمة عن تصريف المياه المالحة وإطلاق المواد الكيميائية والتلوث الحراري. وفي ظل غياب توافق علمي بشأن إمكانية حدوث آثار تراكمية، يلزم اعتماد نهج وقائي يجمع بين أفضل الممارسات وتقييمات الأثر الصارمة. ومن منظور اجتماعي واقتصادي، يمكن للتحلية أن تخلق فرص عمل، وتحفز التنمية الاقتصادية، وتحقق منافع صحية عامة للمدن والصناعات والمزارعين. وتتضاعف هذه المنافع عندما تشارك المجتمعات المحلية مشاركة فعالة طوال مراحل تصميم المشروع وتنفيذه، وعندما يتم تحديد التعرفات بشفافية وتطبيق آليات دعم موجهة للمستحقين لضمان حصول الجميع على المياه بتكلفة ميسورة، لا سيما الأسر الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية.

4. الحوكمة القوية للقطاع والإدارة المتكاملة للموارد المائية تشكلان العمود الفقري لتحلية المياه الناجحة والمستدامة، لا سيما على النطاق المتصور في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. يجب أن تحدد الأطر القانونية بوضوح حقوق المياه والمسؤوليات المتعلقة باستخراج مياه البحر، وتوزيع المياه المحلاة، وإدارة الرجيع الملحي الناتج عن التحلية. ولاستيعاب الدور المتنامي لتحلية المياه، قد تحتاج بلدان المنطقة إلى تكييف الهياكل المؤسسية ونماذج الإدارة، وضمان وجود أحكام تنظيمية فعالة وهيئات معنية بمحور العلاقة بين المياه والطاقة، وتعزيز شركات التشغيل (مشغلي شبكات المياه) بما يتماشى مع قدرات أصحاب المصلحة والسياقات المحلية. كما تسهم التحلية في إدخال مجموعة من الأطراف الفاعلة وأصحاب المصلحة الجدد المحتملين في قطاع المياه، مما يغيّر بعض الأدوار والمسؤوليات التي كانت تقليدياً من اختصاص مرافق إدارة الموارد المائية ومستجمعات المياه على المستوى الوطني. ومن الضروري بشكل خاص، للاستفادة من خبرات القطاع الخاص، وجود أطر واضحة للأدوار والمسؤوليات، وتوزيع المخاطر، والمشتريات والتعاقدات والمناقصات التنافسية، والإدارة الفعالة للعقود. والأهم من ذلك، يجب ألا تُعامل التحلية كحل قائم بذاته، بل ينبغي دمجها في إستراتيجيات أوسع لقطاع المياه، جنباً إلى جنب مع مبادئ الاقتصاد الدائري، وإعادة استخدام مياه الصرف، وإدارة الطلب، والحد من الفاقد، وتحسين الكفاءة، وتعزيز أداء المرافق. ويمكن لمثل هذا النهج المتكامل لإدارة الموارد المائية أن يعظم عوائد الاستثمار ويضمن الاستدامة المالية على المدى الطويل.

5. الاستدامة المالية شرط أساسي لتوسيع نطاق تحلية المياه دون المساس بالإنصاف أو استقرار المالية العامة لقطاع المياه. يُعد توسيع نطاق تحلية المياه مكلفاً، لا سيما بالنسبة للبلدان متوسطة ومنخفضة الدخل في المنطقة التي تواجه متطلبات وأولويات تنموية متنافسة على موارد المالية العامة. لذلك، يجب دمج برامج التحلية بشكل إستراتيجي في التخطيط الأوسع نطاقاً لقطاع المياه لضمان القدرة على تحمل التكاليف واستدامتها على المدى الطويل. ويمكن أن يسهم إيلاء الاهتمام للمياه غير المدرة للإيراد، وإدارة الطلب، والكفاءة التشغيلية في تحديد الحجم الأمثل لعمليات التحلية المطلوبة. ويتطلب ضمان السلامة المالية أيضاً تسعيراً يعكس التكلفة مع مراعاة البعد الاجتماعي. ونظراً لأن تعرفة المياه في المنطقة من بين الأدنى عالمياً، يلزم تنفيذ إصلاحات تدريجية يمكن التنبؤ بها، مقرونة بدعم موجّه وتدابير حماية اجتماعية لضمان حصول الأسر الأكثر احتياجًا على المياه بتكلفة ميسورة. وعلى مستوى المشاريع، تعتمد الاستدامة على تحقيق الاستفادة المثلى من تكاليف دورة الحياة من خلال الابتكار التكنولوجي والمالي (انظر الشكل ES.3). وينبغي أن تستفيد المشاريع من التقدم في كفاءة استخدام الطاقة وتكامل ودمج مصادر الطاقة المتجددة، مع الحرص على اختيار المواقع المناسبة وحجم المحطات الملائم. كما يجب اختيار نماذج تقديم الخدمات وإنجاز المشاريع والهياكل المالية بما يعظم القيمة مقابل المال في السياق السائد. وفي مختلف أنحاء المنطقة، يظهر تنفيذ مشروعات التحلية مشاركة واسعة للقطاع الخاص، بدءاً من الشراكات بين القطاعين العام والخاص الممولة بالكامل من القطاع الخاص في دول مجلس التعاون الخليجي وصولًا إلى المشتريات والتعاقدات والمناقصات العامة التقليدية في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل. وتبرز حالات النجاح والإخفاق في هذه الشراكات أن جذب التمويل الخاص يعتمد على مشروعات قابلة للتمويل من البنوك، ومرافق تتمتع بالجدارة والملاءة الائتمانية، وأسس قوية للقطاع. ويمكن للبلدان متوسطة ومنخفضة الدخل استخدام التمويل العام المحدود بشكل إستراتيجي لتعزيز البيئة المواتية (من خلال تعرفات وإعانات دعم يمكن التنبؤ بها،

وشفافية اللوائح والمشتريات، ومرافق ذات كفاءة تتمتع بالكفاءة والملاءة الائتمانية) وتحسين إمكانية تمويل المشاريع من البنك (عبر حلول تمويل مبتكرة تشمل سد فجوات السلامة المالية، والضمانات، والتمويل المختلط، وتمويل الأنشطة المناخية، وحيثما أمكن، الدعم المتبادل المرتبط بالهيدروجين الأخضر). ومن شأن ذلك أن يقلل المخاطر ويجذب مجموعة متنوعة من المستثمرين. وفي كثير من الحالات، يمكن لهذا المزيج من الحلول المبتكرة بشأن تقاسم مخاطر شراء المياه وتوزيعها على أكثر من جهة وتوفير الثقة للمطورين من القطاع الخاص أن يجعل التحلية خياراً أكثر فاعلية من حيث التكلفة مقارنة بالحلول التي يقدمها القطاع الخاص لإمدادات المياه على نطاق صغير.

الشكل ES.3 • أثر الابتكارات التكنولوجية والمالية المتنوعة على الحد من تكاليف التحلية- مثال من جمهورية مصر العربية



المصدر: البنك الدولي 2024ب (غير منشور).

ملاحظة: تستند التكلفة القائمة على النمذجة لمحطة بسعة 100 ألف متر مكعب يوميا. وقد تم حساب الحد الأدنى والأقصى للقيم الإقليمية لمجموعة من 18 محطة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بسعة تتجاوز 100 ألف متر مكعب يوميا تمت ترسيتها بين عامي 2019 و2023. MENA = منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا؛ PPA = اتفاقية شراء الكهرباء.

يتطلب تحقيق التوازن الصحيح بين هذه التحديات والفرص (الخمسة) مسارات متمايزة ومصممة خصيصاً لتعكس السياقات الخاصة ببلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وستواصل البلدان مرتفعة الدخل في المنطقة، التي لديها مشاريع قائمة لتحلية المياه، دفع الابتكار التكنولوجي ووضع معايير للكفاءة وفاعلية التكلفة وخفض الانبعاثات، بما لذلك من آثار إيجابية غير مباشرة على المستويين الإقليمي والعالمي. أما البلدان متوسطة الدخل، فسيتعين عليها التركيز على دمج التكنولوجيات الجديدة ونماذج التمويل المستدام، مع تكييف حوكمة قطاع المياه من الظروف السائدة لدعم الخطط الطموحة للتوسع في التحلية. وفي المقابل، ستواصل البلدان منخفضة الدخل، التي يعاني الكثير منها من الهشاشة والصراع، تطوير حلول لامركزية صغيرة لبناء القدرة على الصمود وتوفير خدمات مياه ميسورة التكلفة وموثوقة، مع السعي لتهيئة الظروف المواتية لإيجاد حلول أوسع نطاقًا للأمن المائي. وفي جميع أنحاء المنطقة، يمكن للتعاون والتعلم المشترك أن يسرّعا وتيرة التقدم نحو مشاريع التحلية الميسورة والمستدامة، والفعالة من حيث التكلفة، بما يساعد البلدان على مواجهة التحديات المشتركة وضمان حلول طويلة الأمد لحماية الأمن المائي.

بحدسة: آرني هوبل/ البنك الدولي

1 سياق الأمن المائي والتحلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

تُعد منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا أكثر مناطق العالم شحاً في المياه. وتضم المنطقة أكثر من نصف البلدان التسعة والعشرين الواقعة تحت عتبة الشح المطلق للمياه البالغة 500 متر مكعب للفرد، حيث يقل نصيب الفرد في 10 من أصل 19 بلدًا في المنطقة عن 200 متر مكعب من الموارد المائية المتجددة الداخلية (الشكل 1.1). وتتفاقم تحديات شح المياه بسبب تناقص العوائد من أساليب التخزين الجديدة للمياه السطحية، والإفراط في استغلال المياه الجوفية، وزيادة الطلب الناجم عن النمو السكاني والاقتصادي، والهجرة وتدفق اللاجئين، فضلاً عن تزايد حالة عدم اليقين الناتجة عن تغير المناخ. واستجابة لذلك، يرى العديد من البلدان أن الاستثمار في الموارد المائية غير التقليدية أمر بالغ الأهمية لتعزيز الأمن المائي وبناء القدرة على الصمود، وقد برز اعتماد تكنولوجيات تحلية المياه كإستراتيجية تكيف واعدة لتأمين موارد مياه عذبة مستدامة. وعلى الرغم من أن هذا كان في السابق إلى حد كبير من اختصاص البلدان مرتفعة الدخل في دول مجلس التعاون الخليجي، فإن عدداً متزايداً من البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل في المنطقة يدرك أهمية تطوير التحلية كحل طويل الأجل لمواجهة القيود التي يفرضها شح المياه.

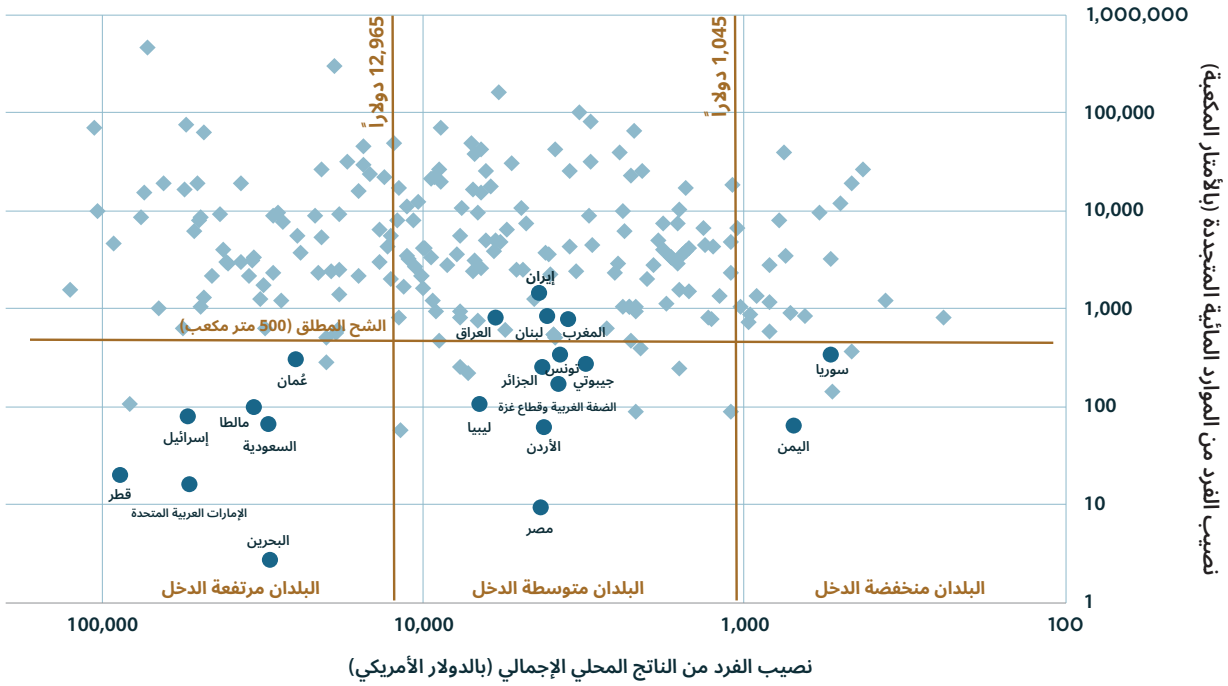
يتفاقم ضعف الموارد الطبيعية من المياه في المنطقة بسبب النمو الاقتصادي، والاتجاهات السكانية، والافتقار إلى تدابير فعالة لإدارة الطلب، وتدهور جودة المياه. وعلى الرغم من الاستثمارات الكبيرة في البنية التحتية ذات الصلة بالمياه السطحية والجوفية، فإن الفجوة بين العرض والطلب على المياه زادت إلى مستويات غير مسبوقة،[4] حيث يقوم نحو نصف بلدان المنطقة بالفعل بسحب المياه العذبة بمعدلات غير مستدامة.[5] ويفرض النمو السكاني السريع واستمرار التنمية الاجتماعية والاقتصادية ضغوطاً تصاعدية على الطلب على المياه.[6] وتتفاقم التحديات المادية بسبب نقص الاستثمارات المقابلة في التدابير المؤسسية والتدابير على السياسات اللازمة لإدارة الطلب على المياه، مثل تطوير البيانات والمعلومات، وتحسين كفاءة تخصيص المياه وتوزيعها، وتعزيز التنسيق المؤسسي، واعتماد نماذج التمويل المستدام للعمليات والتشغيل والإدارة (دي وال وآخرون، 2023). كما يتزايد شح المياه نتيجة تدهور جودة المياه، مع تصاعد المخاوف بين السكان الساعين إلى مستويات معيشية أفضل (الإطار 1.1). ووفقًا للتوقعات، سيزداد الطلب على المياه بنسبة تتراوح بين 20% و50% في جميع بلدان المنطقة بحلول عام 2050، مع زيادة النقص الكلي في المياه بمقدار خمسة أضعاف (الشكل 1.2)، والحاجة إلى 25 مليار متر مكعب إضافية لتلبية الطلب الإقليمي/ على مستوى المنطقة (بورغوميو وآخرون، 2018؛ البنك الدولي، 2012). ومع اقتران ذلك بتراجع العائد من موارد المياه العذبة الجديدة والتحديات المرتبطة بالحفاظ على عمليات السحب ضمن حدود مستدامة، سيواجه العديد من البلدان فجوات متزايدة بين الطلب والمصادر الطبيعية للإمدادات، ولا سيما في دول مجلس التعاون الخليجي، وكذلك في إسرائيل والأردن واقتصاد الضفة الغربية وقطاع غزة (الشكل 1.2).

4 كما هو مبين في العديد من تقارير البنك الدولي القطرية عن المناخ والتنمية في المنطقة (انظر https://www.worldbank.org/en/publication/country-climate- development-reports).

5 النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو) ، بيانات 2020 (https://www.fao.org/aquastat/en/).

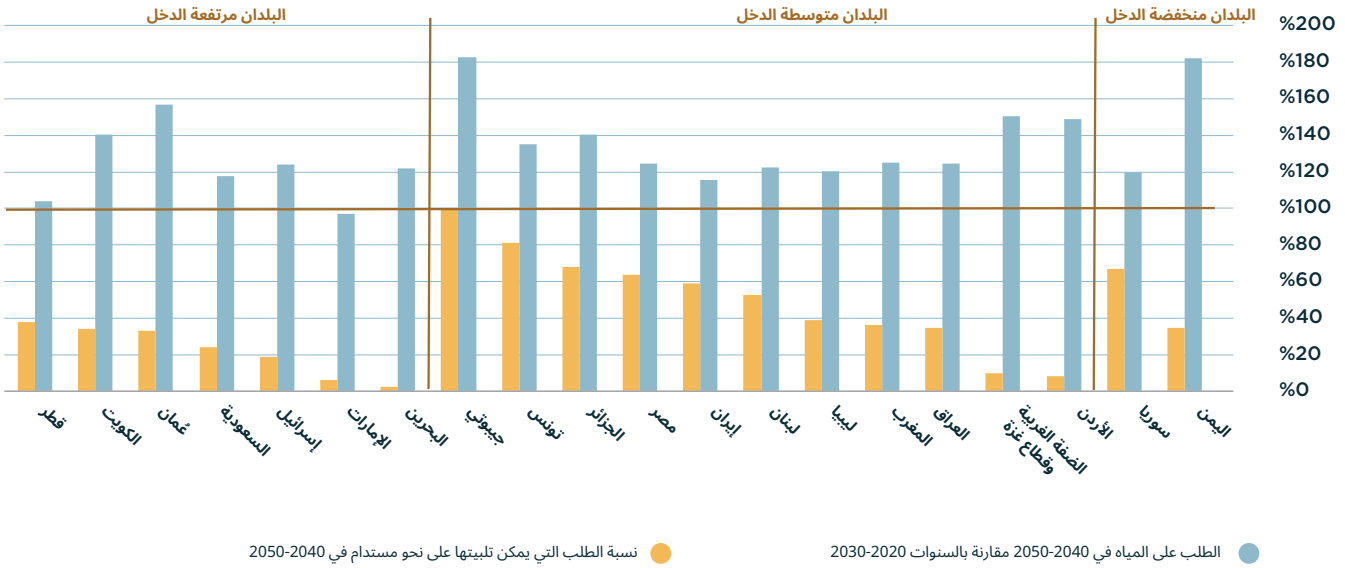
6 كما هو مبين في العديد من تقارير البنك الدولي عن المناخ والتنمية في المنطقة (انظر https://www.worldbank.org/en/publication/country-climate-development-reports).

الشكل 1.1 • توفر المياه بالنسبة إلى إجمالي الناتج المحلي، حسب المنطقة وفئة الدخل



المصدر: أعد هذا الشكل أصلاً لأغراض هذا التقرير، استنادا إلى بيانات النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو)[7] والبيانات المفتوحة للبنك الدولي.[8]

الشكل 1.2 • زيادة الطلب على المياه والفجوة بين العرض والطلب في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بحلول عام 2050، حسب فئة الدخل



المصدر: أُعِدَّ أصلاً لأغراض هذا التقرير استناداً إلى بيانات من البنك الدولي (2012).

7 النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو)، بيانات 2020 (https://www.fao.org/aquastat/en/).

8 انظر https://data.worldbank.org/.

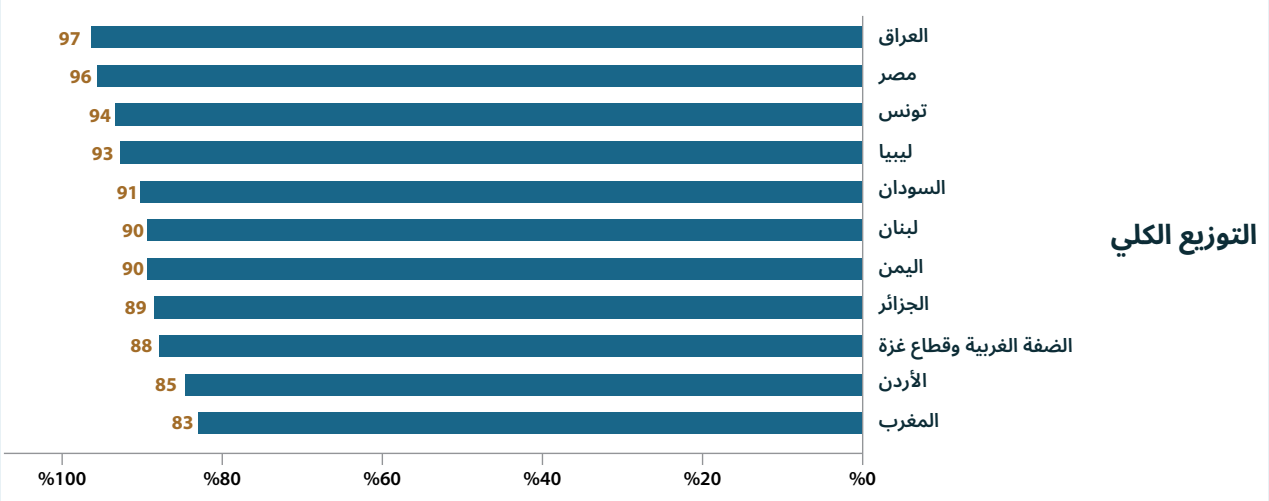
الإطار 1.1 • ضعف جودة المياه يؤدي إلى تفاقم شح المياه ويقلل من العائد على الاستثمار

يسهم تلوث المياه في تفاقم تحديات شح المياه من خلال تقليص توافر المياه النظيفة والقابلة للاستخدام، وزيادة المخاطر الصحية، وفرض أعباء اقتصادية إضافية. ويمكن أن يؤدي التلوث الناجم عن المصادر الصناعية والزراعية والمنزلية إلى تلويث المسطحات المائية، مما يجعلها غير صالحة للاستهلاك أو الزراعة أو الاستخدامات الصناعية. ويؤدي ذلك إلى الحد من التوافر العام للمياه النظيفة وزيادة حدة الشح المائي. وإلى جانب الفاقد الفني والإداري من المياه، قد يؤثر ذلك سلباً على عوائد الاستثمارات في تحلية المياه.

يشير المواطنون في البلدان الإحدى عشرة التي شملها المسح في إطار الدورة (مجموعة الدراسات) الخامسة لاستطلاع الباروميتر العربي، بأغلبية ساحقة، إلى وجود مخاوف كبيرة بشأن تلوث المياه (الشكل ب1.1.1). ففي العراق وجمهورية مصر العربية، اعتبر جميع المشاركين تقريباً تلوث المياه مشكلة خطيرة أو بالغة الخطورة (97% و96% على التوالي)، وذكر نحو 9 من كل 10 مشاركين الشيء نفسه في تونس (94%)، وليبيا (93%)، والسودان (91%)، واليمن (90%)، ولبنان (90%)، والجزائر (89%). ولا تزال معدلات القلق مرتفعة في الضفة الغربية وقطاع غزة (88%)، والأردن (85%)، والمغرب (83%). وحتى في لبنان وليبيا وتونس والضفة الغربية وقطاع غزة، التي واجهت أزمات كبيرة في إدارة النفايات، تأتي المخاوف بشأن تلوث المياه في المرتبة الثانية بعد القلق من سوء إدارة النفايات (راز، 2020).

تجدر الإشارة إلى أن المواطنين في جميع البلدان التي شملها المسح يشعرون بالقلق من تلوث المياه بمعدلات أعلى من قلقهم بشأن تغير المناخ أو جودة الهواء. وتؤكد هذه الفجوة بين المخاوف والقلق بشأن تلوث المياه وتغير المناخ أو جودة الهواء، على الرغبة الشديدة في الحصول على مياه نظيفة، إضافة إلى المفاهيم الخاطئة لدى الجمهور بشأن الترابط بين تحديات البيئة الأوسع نطاقاً (راز، 2020).

الشكل ب1.1.1 • النسبة المئوية للمستجيبين الذين أشاروا إلى أن تلوث المياه يمثل مشكلة خطيرة للغاية أو خطيرة



المصدر: الدورة الخامسة من مجموعة الدراسات الاستقصائية الباروميتر العربي.

ملاحظة: تقديرات مرجحة.

يسهم تغير المناخ في زيادة حالة عدم اليقين بشأن شح المياه، ويفاقم التحديات القائمة للأمن المائي. وتعد منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا من أكثر مناطق العالم عرضة للتأثر بتغير المناخ. ويؤدي تغير المناخ إلى ارتفاع درجات الحرارة والتبخر، وزيادة التقلبات في أنماط هطول الأمطار، وانخفاض توافر المياه، وزيادة شدة وتواتر الفيضانات وموجات الجفاف (الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ 2023).[9] فعلى سبيل المثال، تظهر عمليات المحاكاة أن زيادة درجة الحرارة درجتين مئويتين ستقلل من توفر المياه العذبة في المنطقة بنسبة تتراوح بين 15% و45% (البنك الدولي 2022). ومع اشتداد شح إمدادات المياه وتقلباتها وعدم اليقين بشأنها، من المرجح أن تكون العواقب الاجتماعية والاقتصادية كبيرة. فعلى سبيل المثال، تشير التقديرات إلى أن الخسائر في ظل سيناريوهات المناخ الحار قد تصل إلى 6% من إجمالي الناتج المحلي سنوياً بحلول منتصف القرن، ونحو 4% في ظل سيناريوهات ارتفاع درجات الحرارة. ونظرًا لأن 60% من موارد المياه السطحية في المنطقة عابرة للحدود، ومع تقاسم العديد من البلدان لخزان مياه جوفية واحد على الأقل، فإن المنافسة المتزايدة على الموارد المائية المشتركة، والتي تفاقمت بفعل تغير المناخ، يمكن أن تؤدي إلى حلقة مفرغة تزيد من حدة التوترات الاجتماعية. وفي هذا السياق، ستكون قدرة المنطقة على التكيف مع هذه التغيرات بالغة الأهمية للتخفيف من آثار تغير المناخ على الأمن المائي وضمان التنمية المستدامة. وتشير التقديرات إلى أن تنفيذ الاستثمارات والسياسات ذات الأولوية في مجال التكيف يمكن أن يخفض خسائر إجمالي الناتج المحلي المذكورة أعلاه إلى حوالي 3% و1% على التوالي.

برزت تحلية المياه كإستراتيجية تكيف واعدة لتعزيز أمن موارد المياه العذبة واستدامتها مع اشتداد شح المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وتحلية المياه هي عملية إزالة الأملاح والمعادن الأخرى من المياه المالحة (سواء مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة أو غيرها) لإنتاج مياه عذبة تُستخدم في الأغراض البلدية والصناعية وحتى في الاستخدامات الزراعية عالية القيمة. ويتيح ذلك الحصول على إمدادات ثابتة ومنظمة من المياه العذبة بعيداً عن الاعتماد على الأمطار الطبيعية، والموارد السطحية المتقلبة، والمصادر الجوفية المستنفدة. ومن خلال تقليل الاعتماد على الإمدادات المرتبطة بتوافر المياه العذبة المعتمدة على المناخ، ومع محدودية فرص توسيع السدود واستغلال المياه الجوفية في المنطقة، أصبحت التحلية خياراً عملياً بشكل متزايد لسد الفجوة بين العرض والطلب على المياه، مع تعزيز موثوقية الإمدادات وإمكانية التنبؤ بها. ويتضح ذلك من خلال التوسع المستمر في قدرات تحلية المياه في المنطقة، حيث بلغ متوسط معدل النمو السنوي 8% منذ عام 1980.[10] وبحلول عام 2025، استحوذت المنطقة على 46% من السعة العالمية الفعلية لتحلية المياه، وبالتالي متجاوزة شرق آسيا والمحيط الهادئ (23%)، وأمريكا الشمالية (11%)، وأوروبا الغربية (7%).[11] واستشرافا للمستقبل، ستظل المنطقة القوة الدافعة للنمو في السوق العالمية لتحلية المياه، حيث ستشكل 63% من السعة المتوقعة المتعاقد عليها حديثا بين عامي 2026 و2030،[12] بالإضافة إلى استمرار التحول من التكنولوجيات الحرارية إلى التكنولوجيات القائمة على الأغشية (انظر الإطار 1.2).[13]

9 أظهر استعراض داخلي أجراه البنك الدولي في عام 2023 لجميع تقارير المناخ والتنمية المكتملة البالغ عددها 36 تقريراً أن زيادة تواتر وشدة موجات الجفاف والفيضانات وتصاعد شح المياه قد تم تسليط الضوء عليها في كل منها.

10 انظر تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية (https://www.desaldata.com/) DesalData 2025 (GWI). تم الاطلاع في 11 أبريل/نيسان 2025.

11 انظر تنبؤات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، وتم الاطلاع في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).

12 انظر تنبؤات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، وتم الاطلاع في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).

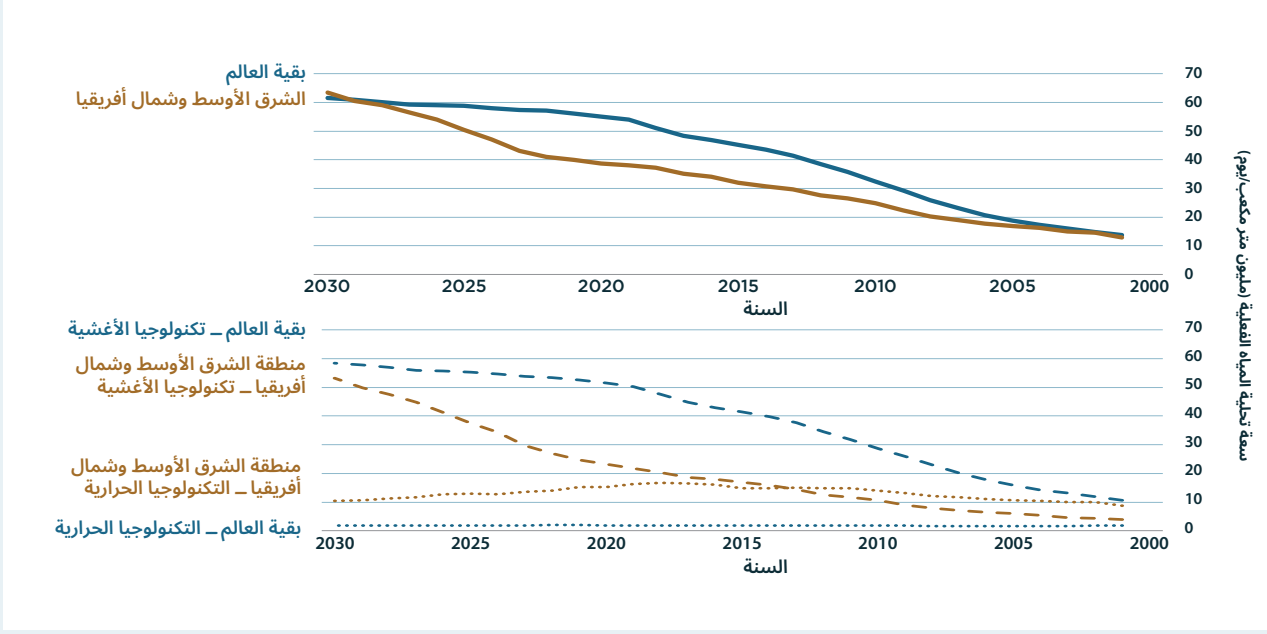
13 انظر تنبؤات GWI DesalData Forecast Desalination 2024

الإطار 1.2 • السمات الرئيسية لتحلية المياه على مستوى قطاعات المياه في جميع أنحاء العالم وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

تطورت تحلية المياه بسرعة من حل مبتكر ومتخصص إلى حجر زاوية للأمن المائي في العديد من البلدان، حيث تتصدر منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا هذا التحول. وعلى الرغم من ظهور تكنولوجيا التحلية في الستينيات، فقد توسعت الطاقة الإنتاجية بشكل كبير منذ العقد الأول من القرن الحالي، مما يعكس دورها المتزايد في الإستراتيجيات الوطنية لإمدادات المياه، ولا سيما للاستخدامات البلدية والصناعية (الشكل ب 1.2.1؛ والشكل ب1.2.2). ومن بين تكنولوجيتي التحلية الرئيسيتين، كانت الطاقة الحرارية سائدة في البداية لكنها ظلت شبه ثابتة منذ عام 2010، في حين أن التوسع العالمي في عمليات التحلية مؤخراً كان مدفوعاً بالكامل تقريباً بالتكنولوجيات القائمة على الأغشية، وأبرزها التناضح العكسي (الشكل ب1.2.1).

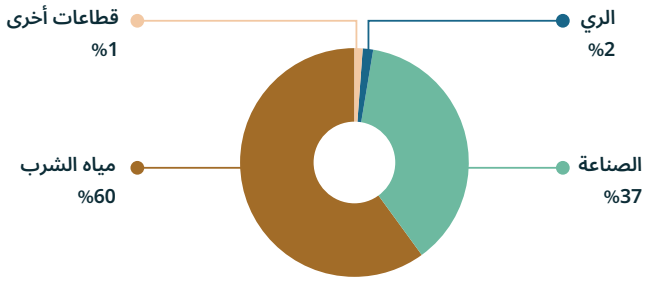
قادت منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا الجهود العالمية في هذا المجال، حيث شكلت ما يقرب من نصف السعة العالمية الفعلية في عام 2025، مع أكثر من 5000 محطة بأحجام مختلفة. وتواصل المنطقة دفع عجلة النمو في هذا القطاع، إذ يُتوقع أن تشهد زيادة سنوية في السعة الفعلية تتراوح بين 1.5 و3.5 ملايين متر مكعب يومياً بين عامي 2026 و2030 (الشكل ب1.2.1). وعلى الرغم من أن المنطقة لا تزال المستخدم الرئيسي للتحلية الحرارية، فقد شهدت تحولاً كبيراً نحو التكنولوجيا القائمة على الأغشية، وهو اتجاه مرشح للاستمرار مع الإلغاء التدريجي للمحطات الحرارية بسبب ارتفاع النفقات الرأسمالية وكثافة استهلاك الطاقة. ومن السمات الأخرى المميزة للمشروعات الجديدة في المنطقة الاتجاه نحو إنشاء محطات أكبر حجماً للاستفادة من وفورات الحجم (الشكل ب 1.2.3). وتضم المنطقة أكبر 30 محطة تحلية قائمة بالفعل أو قيد الإنشاء على مستوى العالم في عام 2025. ولهذه الأسباب، تُعد المشروعات الكبيرة لتحلية مياه البحر محور التركيز الرئيسي لهذا التقرير. ويتناول القسم 2.1 من التقرير مناقشة أكثر تفصيلاً لتكنولوجيات التحلية وأحجام المحطات.

الشكل 1.2.1 • التوسع التراكمي في قدرات تحلية المياه القائمة والفعلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وبقية العالم، الإجمالي (أعلى) ومصنفا حسب التكنولوجيا (أسفل)



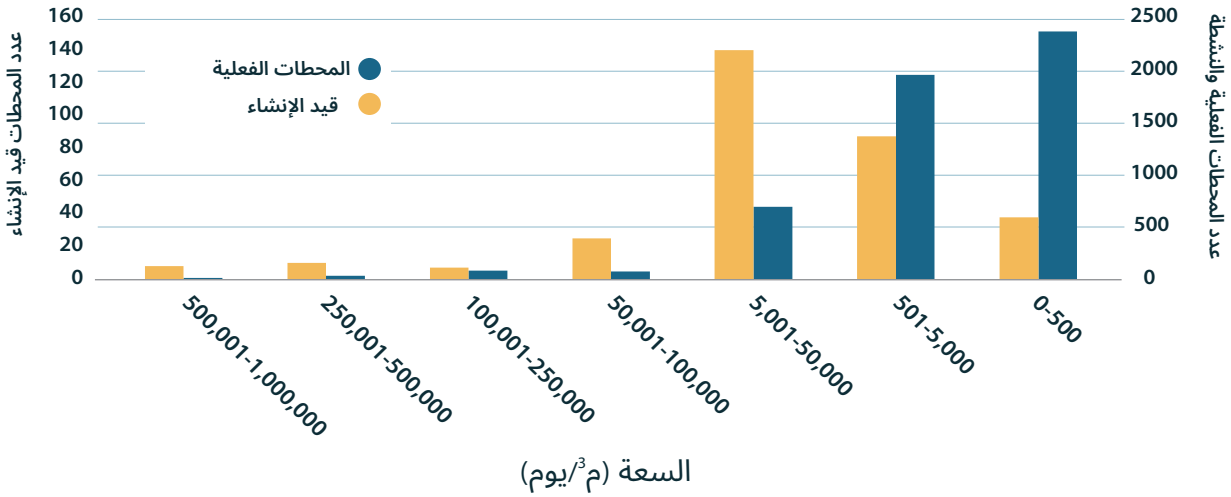
المصدر: أعد أصلا لأغراض هذا التقرير استنادا إلى بيانات من تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، تم الاطلاع عليه في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).

الشكل ب1.2.2 • استخدام المياه المحلاة حسب القطاع



المصدر: أُعِدَّ أصلاً لأغراض هذا التقرير استناداً إلى بيانات من تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025.

الشكل ب 1.2.3 • عدد محطات تحلية المياه القائمة والجاري إنشاؤها في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حسب الحجم



المصدر: أُعِدَّ أصلاً لأغراض هذا التقرير استناداً إلى بيانات من تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025.

لطالما كانت تحلية المياه ميزة للبلدان مرتفعة الدخل التي يمكنها تحمل تكلفة التكنولوجيات الباهظة نسبيا. وقد لعب الإجهاد المائي، مقترنا بالموارد المالية اللازمة للتصدي للتحديات التي يشكلها، دوراً رئيسياً في اعتماد تحلية المياه في جميع أنحاء المنطقة. ونظراً لأن تحلية المياه كانت منذ وقت طويل خياراً باهظ التكلفة نسبياً لإمدادات المياه، فإن دول مجلس التعاون الخليجي ذات الدخل المرتفع مثل الكويت وقطر والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة - التي يقل نصيب الفرد[14] فيها جميعا عن 100 متر مكعب من إجمالي الموارد المائية المتجددة - كانت من أوائل البلدان التي تبنت هذا النهج وقامت بإنشاء محطات كبيرة لتحلية المياه بحلول السبعينيات والثمانينيات.[15] وحتى الآن، لا تزال هذه البلدان مرتفعة الدخل من بين البلدان الرائدة عالميا من حيث قدرات تحلية المياه ونسبة التحلية في مزيج إمدادات المياه (الشكل 1.3).[16] وتبعتها عدة بلدان أخرى، مثل الجزائر ومصر وإسرائيل، مدفوعة بعدم إمكانية التنبؤ بتوافر المياه من مصادر المياه التقليدية وتزايد الشح الناجم

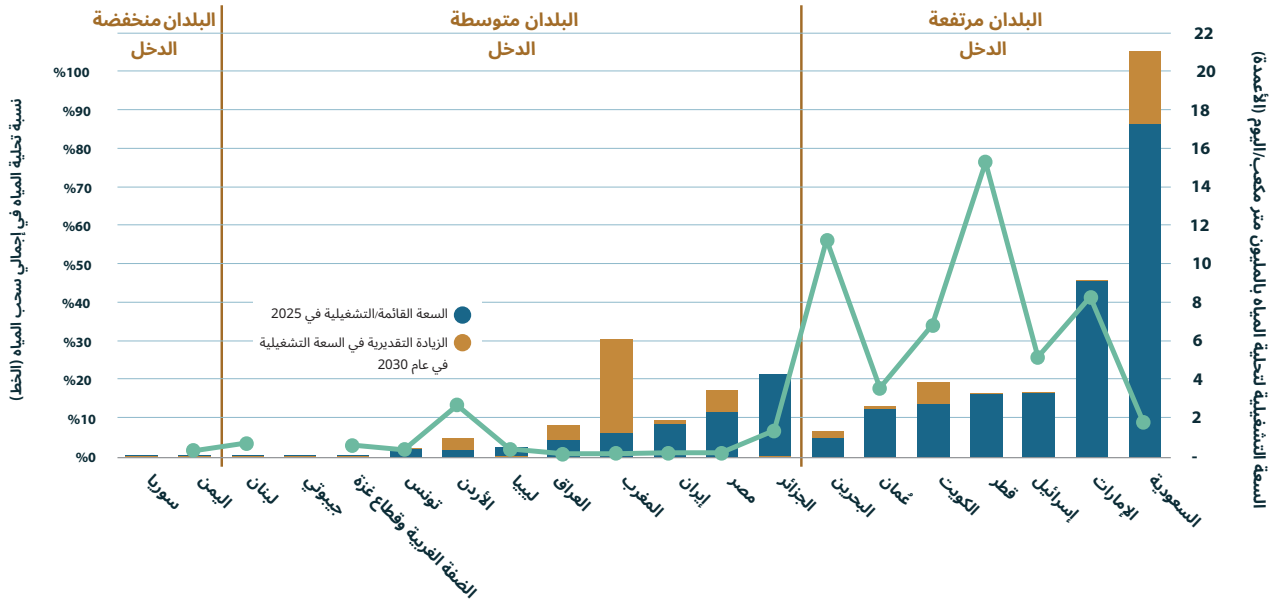
14 النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو) ، بيانات 2020 (https://www.fao.org/aquastat/en/).

15 تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData 2025. تم الاطلاع في 11 أبريل/نيسان 2025.

16 البلدان الخمسة التي لديها أكبر مرافق قائمة لتحلية المياه في عام 2025 هي المملكة العربية السعودية (17.3 مليون متر مكعب يوميا)، والصين (14.0 مليون متر مكعب في اليوم)، والولايات المتحدة الأمريكية (11.0 مليون متر مكعب في اليوم)، والإمارات العربية المتحدة (9.1 ملايين متر مكعب في اليوم)، وإسبانيا (5.0 ملايين متر مكعب يوميا).
المصدر: بيانات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، تم الاطلاع 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).

عن موجات الجفاف المتكررة. وأقامت هذه البلدان بنيتها التحتية لتحلية المياه منذ ثمانينيات القرن الماضي، حتى أصبحت قدراتها الحالية مماثلة لقدرات العديد من دول مجلس التعاون الخليجي. ومع ذلك، لا تزال حصة التحلية في مزيج إمدادات المياه محدودة في الجزائر ومصر نظرًا لضخامة إجمالي مسحوبات المياه لديهما (الشكل 1.3). وتتجه البلدان متوسطة الدخل الأخرى التي تعاني من شح شديد في المياه، مثل الأردن والمغرب وتونس، بشكل متزايد إلى التحلية لزيادة طاقتها وسد الفجوة بين جانبي العرض والطلب (الخريطة 1.1). أما البلدان التي ترتفع فيها مستويات المياه نسبيًا (مثل لبنان) والبلدان منخفضة الدخل، ولا سيما تلك المتأثرة بأوضاع الهشاشة والصراع (مثل اليمن والجمهورية العربية السورية)، فلا تزال قدراتها في مجال التحلية محدودة.

الشكل 1.3 • السعة التشغيلية لمرافق ومحطات التحلية ونسبة التحلية في مزيج إمدادات المياه، حسب فئة الدخل



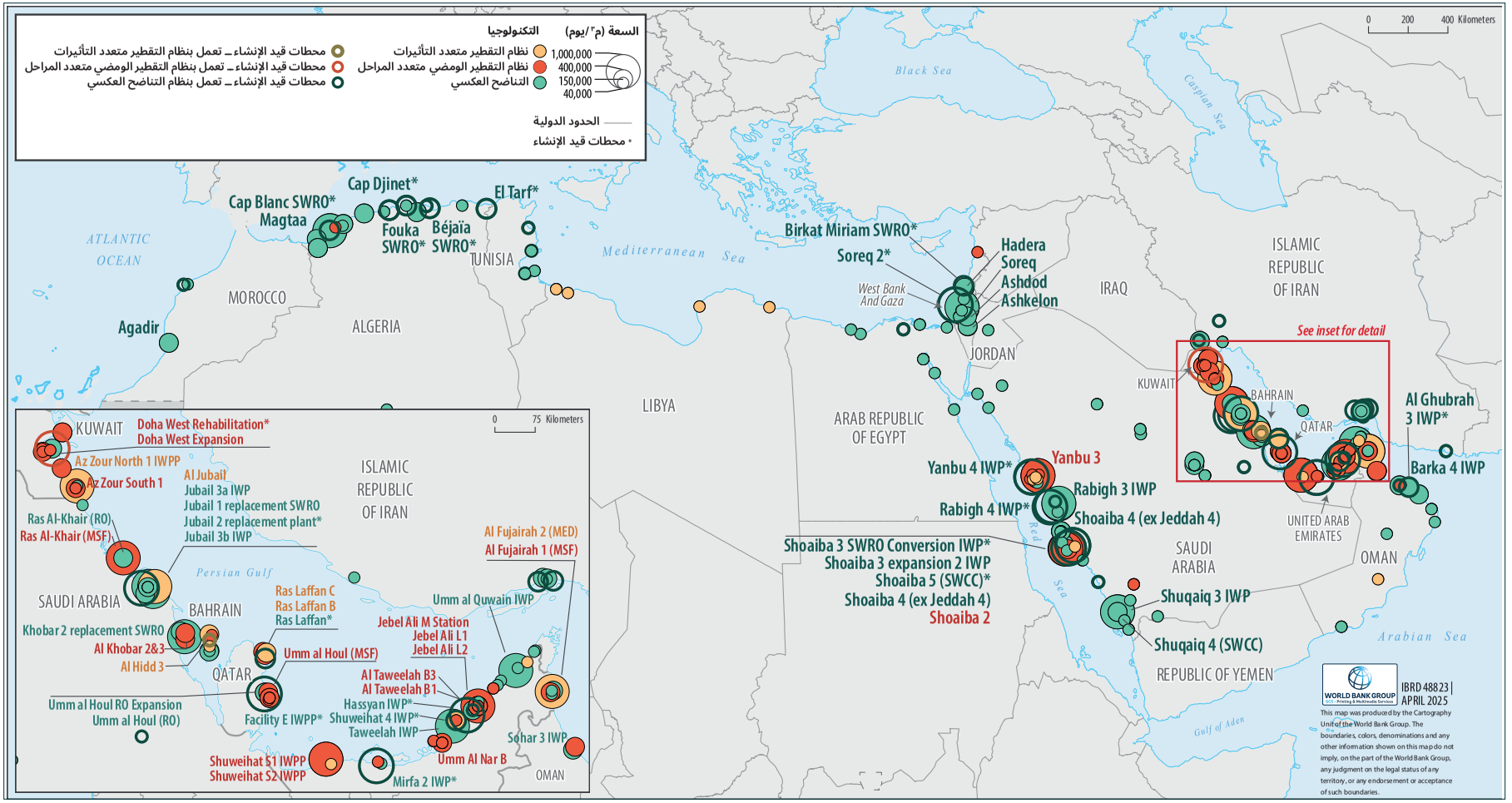
المصدر: أعد هذا الشكل أصلاً لأغراض هذا التقرير، استنادا إلى بيانات من تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (الأعمدة)[17]، وبيانات النظام العالمي للمعلومات بشأن المياه والزراعة (AQUASTAT) لمنظمة الأغذية والزراعة (الفاو) (الخط) [18]والبيانات المفتوحة للبنك الدولي، (حسب تصنيف الدخل).[19]

17 انظر تنبؤات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData Forecast Desalination 2025 (قيد الإصدار، وتم الاطلاع في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2025).

18 انظر https://www.fao.org/aquastat/en/.

19 انظر https://data.worldbank.org/.

الخريطة 1.1 • موقع وقدرات/سعةوتكنولوجيا محطات التحلية الرئيسية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في عام 2025



المصدر: أعد أصلا لأغراض هذا التقرير، استنادا إلى تقرير GWI 2025.[20]

ملاحظة: وفقاً لتقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية: GWI DesalData 2025، تم تشغيل أكثر من 5100 محطة لتحلية المياه في عام 2025 في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، من بينها 332 محطة تعمل بنظام التقطير متعدد التأثيرات (8% من السعة)، و214 محطة تعمل بالتقطير الومضي متعدد المراحل (27% من السعة)، و4474 محطة تعمل بالتناضح العكسي (63% من السعة). ومن بين أكثر من 5100 محطة ، تبلغ طاقة إنتاج 236 منها 40 ألف متر مكعب يوميا على الأقل، وهي معروضة على الخريطة. ويمثل هذا 74% من إجمالي السعة الفعلية.
IWP = شركة مستقلة لإنتاج المياه؛ MED = تقطير متعدد التأثيرات؛ MSF = تقطير ومضي متعدد المراحل؛ SWCC = المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة؛ SWRO = التناضح العكسي لمياه البحر RO = التناضح العكسي.

20 انظر https://www.desaldata.com/. تم الاطلاع في أبريل/نيسان 2025.

تعتمد إستراتيجيات حماية المياه وتأمينها في بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بشكل متزايد على تنمية الموارد المائية غير التقليدية، مثل تحلية المياه وإعادة استخدام المياه المستعملة. وعلى الرغم من محدودية البيانات المتعلقة بالاستثمارات المستقبلية في مشاريع التحلية، فإن تقييم خطط التنمية الوطنية والمشاريع الجاري إعدادها وإنشاؤها يشير إلى أن هذه الاستثمارات ستصل إلى عشرات المليارات من الدولارات في مختلف أنحاء المنطقة خلال العقد المقبل. ومن المتوقع أن تنمو قدرات وسعة التحلية في دول مجلس التعاون الخليجي بنسبة 75% بين عامي 2020 و2030 (ياغرسكوغ وبارغوثي، 2022) لمواكبة الفجوة بين العرض والطلب (الشكل 1.2). كما وضعت البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل خططاً وبرامج طموحة لتطوير التحلية، مدفوعة بالانخفاض المستمر في تكاليف التطوير. فعلى سبيل المثال، تبلغ الطاقة الإنتاجية لمشروعي الشراكة بين القطاعين العام والخاص في مجال تحلية المياه في الأردن والمغرب 822 ألف متر مكعب يوميا للمحطة، مما يجعلها أكبر مشروعات التحلية خارج دول مجلس التعاون الخليجي على مستوى العالم.[21] وخططت ليبيا وتونس أيضا لتوسيع سعة تحلية المياه بشكل كبير بحلول عام 2030 إلى مليوني متر مكعب يوميا و630 ألف متر مكعب يوميا على التوالي.[22] كما يجري التخطيط لهذه الاستثمارات جنباً إلى جنب مع نهج الاقتصاد الدائري لضمان تجميع هذه المياه "الجديدة" ومعالجتها وإعادة استخدامها. فعلى سبيل المثال، ضاعفت مصر قدرتها الإنتاجية لإعادة استخدام مياه الصرف أربع مرات بين عامي 2020 و2025 من خلال إنشاء واحدة من أكبر محطات إعادة الاستخدام في العالم. وفي الوقت نفسه، تعتزم السعودية الوصول إلى نسبة إعادة الاستخدام البالغة 70% بحلول عام 2030 عبر محطات معالجة كبيرة الحجم يمولها القطاع الخاص، فيما تهدف الإمارات إلى رفع نسبة إعادة استخدام مياه الصرف من 80% إلى 100% بحلول عام 2030 (خيمكا وإبرهارد، 2025). وتُظهر السياسات وخطط الاستثمار والمشاريع الكبرى ذات الأهمية الكبرى في جميع أنحاء المنطقة تركيزاً متزايداً على تحلية المياه وإعادة استخدام مياه الصرف المعالجة كإستراتيجية رئيسية للتكيف مع التحديات التي يفرضها تغير المناخ، وذلك لضمان تحقيق الأمن المائي في العقود القادمة.

على الرغم من أن تحلية المياه توفر حلاً مرناً على جانب العرض، فإن استدامة قطاع المياه وكفاءته على المدى الطويل ستتطلب تدابير تكميلية لإدارة الطلب. وتنطوي خطط التوسع الإقليمي على إمكانات كبيرة لتعزيز موثوقية الإمدادات ومرونتها وقدرتها على الصمود، لا سيما بفضل التقدم التكنولوجي. ومع ذلك، فإن التحديات المتعددة المرتبطة بزيادة نسبة التحلية في مزيج الإمدادات بدرجة كبيرة ستتطلب خططاً طموحة بالقدر نفسه لتلبية الطلب وتحسين حوكمة القطاع. ويكتسب ذلك أهمية خاصة في البلدان متوسطة الدخل التي لا تملك الحيز الكافي في المالية العامة للإنفاق. والطريق نحو توسيع نطاق التحلية بشكل مستدام محفوف بالتحديات، أهمها ضرورة وجود الاستثمارات الرأسمالية الكبيرة المطلوبة، وارتفاع كثافة الطاقة والكربون في عمليات التحلية، والعوامل البيئية الخارجية المحتملة، والارتفاع النسبي في تكاليف التشغيل والصيانة. ونظراً لأن قطاع المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا يتسم بارتفاع فاقد المياه وبمستويات كبيرة من الدعم المالي، فإن تعميم مشاريع التحلية سيتطلب إصلاحات شاملة في الحوكمة لتجنب تفاقم التحديات المتعلقة بإدارة عجز الموازنة، خاصة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. ويمكن لهذه البلدان الاستفادة من التطورات والخيارات التكنولوجية المتاحة، إضافة إلى الاستفادة من تطور ممارسات الحوكمة الجيدة والأمثلة الناجحة لدمج أنشطة التحلية في مختلف أنحاء المنطقة.

الهدف من هذا التقرير هو استعراض سياق تحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وتقديم إرشادات لدعم تطور تحلية المياه كإستراتيجية للتكيف مع تغير المناخ في البلدان متوسطة الدخل ومنخفضة الدخل في جميع أنحاء المنطقة. كما يستند التقرير إلى مجموعة كبيرة من الأعمال والأنشطة التي لعبت دوراً أساسياً في تشكيل فهم تكنولوجيا تحلية المياه، وجدواها الاقتصادية، وآثارها البيئية والاجتماعية المحتملة، والسياق المؤسسي الذي تم تطويرها فيه (دي وال وآخرون 2023؛ وياغرسكوغ وبارغوثي 2022؛ وخيمكا وإيبرهارد 2025؛

21 محطتا التحلية في العقبة والدار البيضاء - سطات، تقرير المناخ والتنمية الخاص بالأردن، وتقرير المناخ والتنمية الخاص بالمغرب، على التوالي.
22 إستراتيجية المياه في تونس 2050؛ البنك الدولي 2025ه.

البنك الدولي 2012؛ البنك الدولي 2019؛ البنك الدولي 2025أ، ب، ج، د).[23] كما يقدم التقرير إطاراً مرجعياً لواضعي السياسات والممارسين العاملين في مجال المياه على مستوى المنطقة من خلال تقييم التحديات المرتبطة بتطوير تحلية المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، ومناقشة سبل توظيف الحلول التكنولوجية وآليات الحوكمة لبناء قطاع مياه آمن ومستدام. يُضاف إلى ذلك توسيع نطاق النقاش من التركيز التقليدي على تحلية المياه في دول مجلس التعاون الخليجي، وتعظيم الاستفادة من الخبرات والابتكارات الإقليمية لطرح رؤى ومعالجة التحديات التي تواجهها البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل أثناء تطوير قدراتها في مجال التحلية استجابة لتزايد شح المياه وتقلباته وآثار تغيّر المناخ. وأخيراً، يسلط التقرير الضوء على التحديات الناشئة والفرص المتاحة لتعزيز تحلية المياه عبر مختلف فئات دخل البلدان في المنطقة، مع توضيح الإجراءات المطلوبة لدعم الاستثمارات في البنية التحتية، إلى جانب المساندة المحتملة من مجموعة البنك الدولي وشركاء التنمية الآخرين.

23 انظر أيضا: تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية **https://www.desaldata.com**/GWI DesalData 2025)، ومشروع إمدادات المياه في جنوب تاراوا في كيريباتي (P162938)، وبرنامج تحلية المياه المركزية في قطاع غزة (P168739).

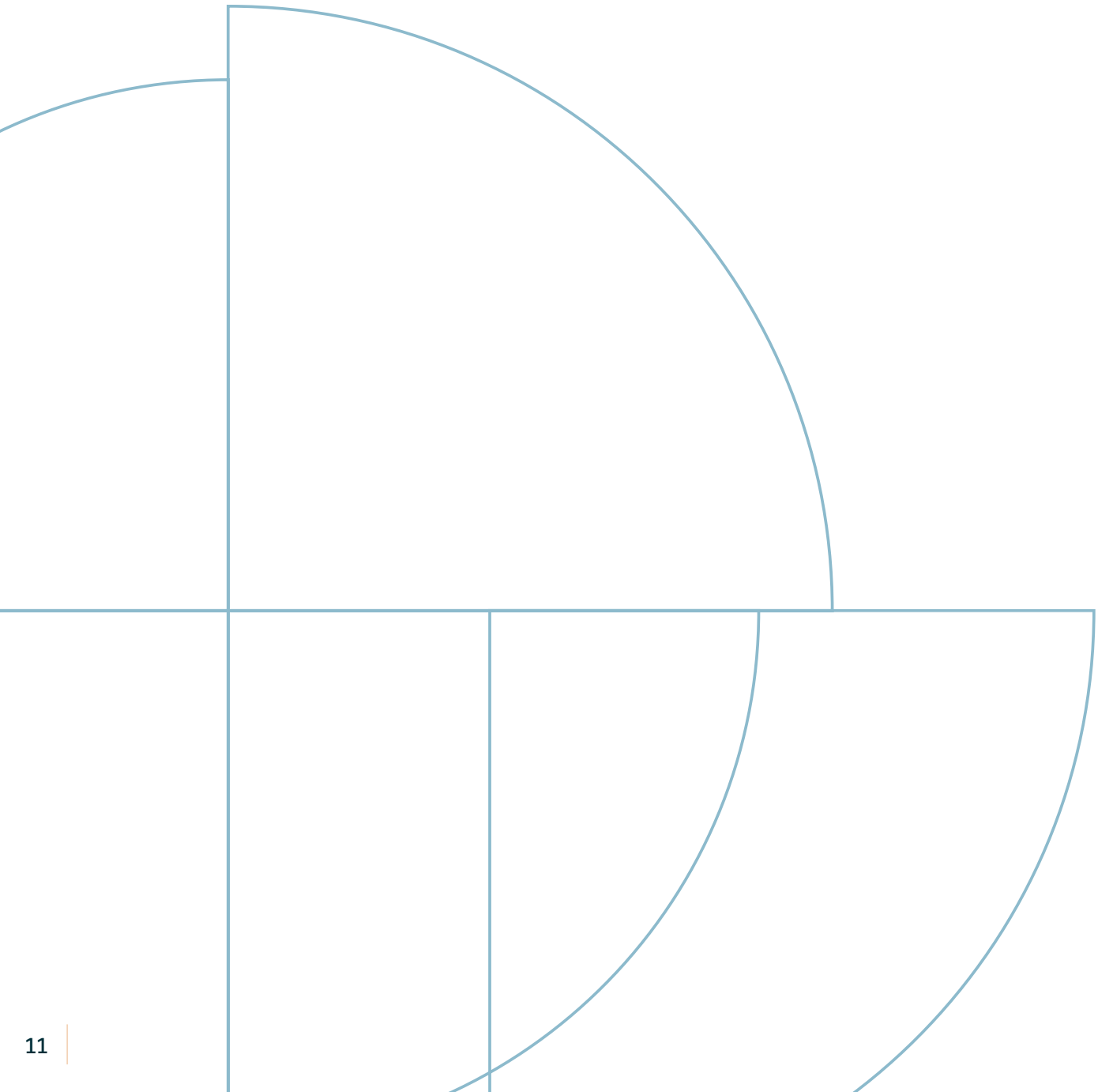
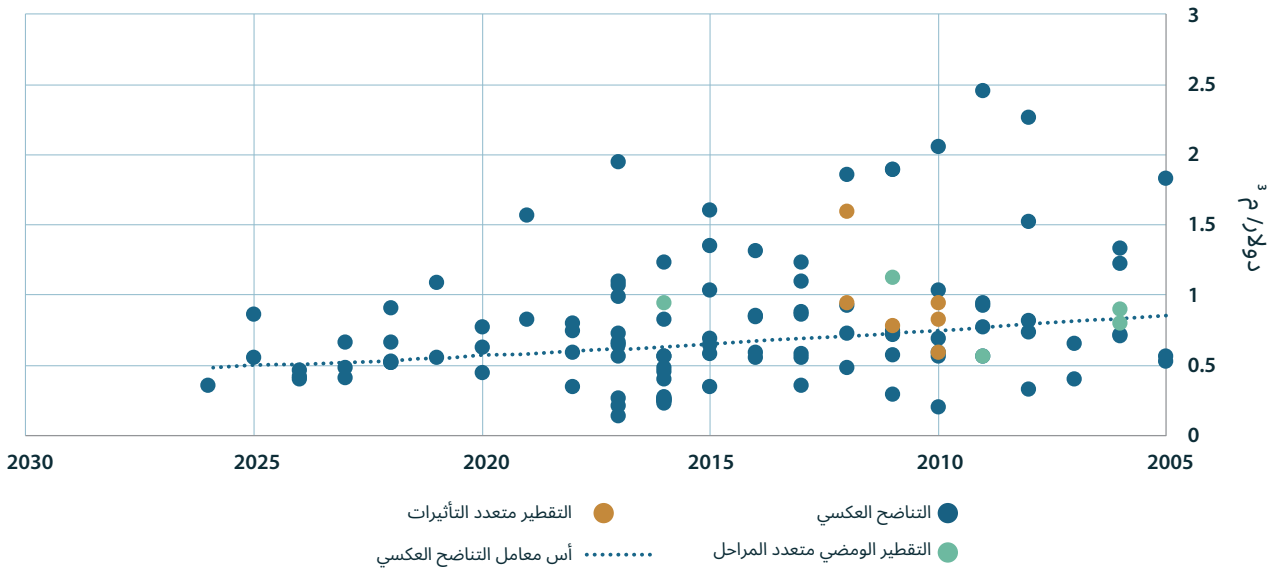


ABB
CAUTION
NOTICE

2 دور التكنولوجيا والابتكار في تطوير تحلية المياه

أدت التطورات المتسارعة في مجالي التكنولوجيا والابتكار إلى خفض ملموس في تكلفة تحلية المياه وتعزيز إمكانية الوصول إليها، مما ساهم في توسيع نطاق اعتماد هذه الحلول في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وعلى المستوى العالمي. وقد اضطلعت بلدان المنطقة، ولا سيّما دول مجلس التعاون الخليجي، بدور محوري في دفع هذه الابتكارات وتطويرها، مما أسهم في خفض النفقات الرأسمالية والتشغيلية، والحدّ من كثافة استهلاك الطاقة، والارتقاء بمعايير جودة المياه المنتَجة تدريجياً. وقد تراجعت تكلفة تحلية المياه من نحو 2.5 – 5.0 دولارات أمريكية لكل متر مكعب في الثمانينيات إلى متوسط يقل عن 1.0 دولار أمريكي لكل متر مكعب، بينما حققت بعض المشاريع في العقدين الثاني والثالث من هذا القرن تكلفة تتراوح بين 0.4 – 0.5 دولار أمريكي لكل متر مكعب (البنك الدولي، 2019) (انظر الشكل 2.1). ورغم هذا التوجّه العام نحو حلول أقل تكلفة، لا تزال تكلفة المياه المنتَجة عبر التحلية متباينة بدرجة كبيرة تبعاً لعدد من العوامل، منها جودة مياه التغذية، وتركيز الأملاح، ونوع التكنولوجيا المستخدمة، وتكاليف الطاقة، فضلاً عن اعتبارات مؤسسية وقانونية أخرى (الشكل 2.1). وبناءً عليه، يصبح من الضروري إجراء تقييم دقيق للتكنولوجيا الأنسب للتحلية في أي مشروع جديد خلال مرحلة التصميم. وبينما يعتبر التناضح العكسي التكنولوجيا الأنسب في الوقت الراهن في العديد من الحالات—كما سيتم استعراضه لاحقاً في هذا الفصل—فإن العوامل الخاصة بكل سياق قد تستلزم النظر في خيارات بديلة.

الشكل 2.1 • مراحل تطور أسعار المياه المُحلاة عبر الزمن بحسب التكنولوجيا المستخدمة



المصدر: أُعد خصيصاً لأغراض هذا التقرير، استناداً إلى بيانات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData 2025، وتم الاطلاع عليه في 11 أبريل/نيسان 2025.

2.1. تحلية المياه على نطاق واسع: خفض التكاليف الإجمالية والانتقال من التكنولوجيات الحرارية إلى الأنظمة القائمة على الأغشية

تشكِّل الأنظمة الحرارية والأنظمة القائمة على الأغشية المجموعتين الرئيسيتين لتكنولوجيات التحلية واسعة النطاق. وتعتمد التكنولوجيات الحرارية على استخدام الحرارة لتبخير المياه، وإعادة تكثيف البخار الناتج إلى مياه نقية، مع فصلها عن الشوائب والأملاح. ومن أبرز هذه التكنولوجيات: التقطير الومضي متعدد المراحل والتقطير متعدد التأثيرات باستخدام ضغط البخار الحراري. وتتميز هذه الأنظمة بمتانتها وقدرتها على التشغيل على نطاقات واسعة جداً. أما تكنولوجيا التحلية القائمة على الأغشية، فتقوم على دفع المياه عبر غشاء نصف منفذ باستخدام الضغط العالي لإنتاج مياه نقية، مما يسمح بمرور المياه مع حجز الأملاح والشوائب، ما يؤدي إلى فصل فعّال للمياه عن الأملاح. وتتميز هذه الأنظمة بالمرونة وقابليتها للتجزئة، مما يتيح تكييفها بسهولة وفق متطلبات السعة والظروف التشغيلية لكل موقع. وتعد تكنولوجيا التناضح العكسي حالياً أكثر الأنظمة القائمة على الأغشية استقراراً وانتشاراً.

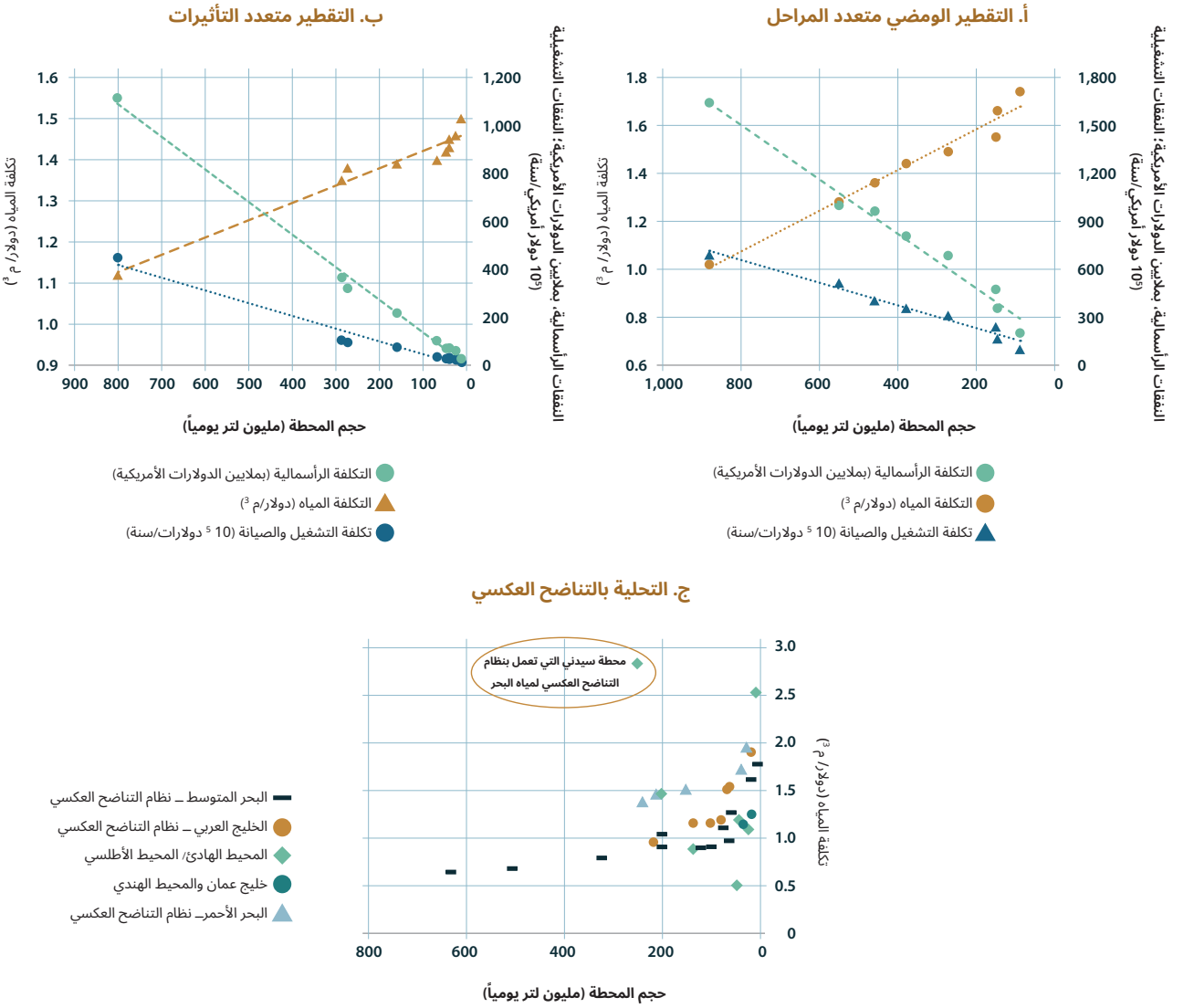
أصبحت تحلية المياه على نطاق واسع أكثر قدرة على المنافسة من حيث التكلفة، بفضل الابتكارات التكنولوجية والإدارية والحكومية المتزامنة. وتتأثر النفقات الرأسمالية والتشغيلية لمشروعات التحلية بعدة عوامل يمكن تصنيفها إلى عوامل تكنولوجية، واقتصادية، وبيئية، وتنظيمية، بما في ذلك تصميم المحطة وحجم وحداتها، وموقعها بالنسبة لمصادر المياه والبنية التحتية المحلية والمستفيدين النهائيين، والبنية التحتية للتوزيع والنقل، وجودة مياه التغذية والمياه المنتَجة، وأسعار الطاقة، ومتطلبات الامتثال البيئي، وترتيبات تطوير المشروع وتمويله، فضلاً عن البيئة المؤسسية والتجارية والسوقية (البنك الدولي، 2019). كما أسهمت التحسينات المتزامنة المرتبطة بعوامل التكلفة الأخرى في تعزيز الاستفادة من التقدم التكنولوجي، مما أسهم في زيادة القدرة التنافسية لمشروعات التحلية.

يمكن لمحطات التحلية الكبيرة تحقيق وفورات كبيرة في الحجم، وتزداد هذه الوفورات عادة في حالة التحلية الحرارية، نتيجة زيادة حجم الوحدات، بينما تميل إلى التراجع في التحلية بالتناضح العكسي نظراً للطبيعة المعيارية لهذه الأنظمة، كما هو موضَّح في الشكل 2.2 (البنك الدولي، 2019). كما لوحظ اتجاه نحو زيادة حجم محطات التحلية الجديدة عبر الزمن (الشكل 2.3). وقد تختلف آثار وفورات الحجم بين البلدان مرتفعة الدخل ومتوسطة ومنخفضة الدخل، ففي حين تتمتع البلدان مرتفعة الدخل بالقدرة على تغطية النفقات الرأسمالية والتشغيلية المرتفعة (بالقيم المطلقة) لمحطات كبيرة، مما يتيح إنتاج المياه المحلاة على نطاق واسع وبأسعار أقل، قد تضطر البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل إلى الاعتماد على محطات أصغر حجماً وبتكلفة أعلى نسبياً لكل متر مكعب من المياه (الشكل 2.4)، مع وجود استثناءات واضحة مثل الجمهورية الإسلامية الإيرانية والمغرب. والجدير بالاعتبار أن وفورات الحجم قد تكون محدودة إلى حد معين، إذ غالباً ما تُبنى المحطات كبيرة الحجم بعيداً عن نقاط توزيع المياه، ما يزيد بشكل كبير من النفقات الرأسمالية والتشغيلية. كما تشكِّل تكاليف الطاقة المتعلقة بالبنية التحتية للتوزيع والنقل عاملاً مهماً يجب أخذه بعين الاعتبار عند تحديد الحجم الأمثل للمحطة وموقعها.

يسهم تحسين كفاءة الطاقة بشكل مباشر في خفض تكلفة التحلية، إذ تعد عملية التحلية من العمليات كثيفة الاستهلاك للطاقة، حيث تُقدَّر تكاليف الطاقة ما بين 37 و75% من النفقات التشغيلية للمحطات (البنك الدولي، 2019). وقد أسهمت مجموعة من الإجراءات الابتكارية وتحسين كفاءة التشغيل؛ مثل تحسين تصميم المحطات، وتعزيز كفاءة العمليات، واستعادة الطاقة بعد العمليات، في تقليل متطلبات الطاقة لكل متر مكعب من المياه المحلاة بشكل ملحوظ، مما ساهم في خفض التكلفة الإجمالية للتحلية. وقد قُدّر استهلاك الطاقة لتحلية مياه البحر خلال الفترة 2010–2020 بما يلي: التناضح العكسي: 2.5–5.5 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب، و التقطير متعدد التأثيرات: 5.5–12.0 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب، والتقطير الومضي متعدد المراحل: 9.0–16.0 كيلووط ساعة لكل متر مكعب (بوندشوه وآخرون 2021؛ وكوزين 2019؛ والسعيد وآخرون 2020؛ وسيد وآخرون 2023؛ البنك الدولي 2012). ولا تزال هذه القيم أعلى بكثير مقارنة بتكاليف إنتاج المياه عبر المصادر التقليدية، مثل معالجة المياه السطحية (نحو 0.5 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب) ومعالجة مياه الصرف الصحي (حوالي 1–2 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب). ويجري السعي لتحقيق خفض إضافي لاستهلاك الطاقة في التكنولوجيات الحرارية من خلال زيادة حجم الإنتاج (انظر الشكل 2.2 لتوضيح وفورات الحجم)، وتحسين أداء المُبخرات، وزيادة استعادة الطاقة، وتطبيق تكنولوجيات جديدة مثل تبخر الندى. أما بالنسبة لأنظمة التناضح العكسي،

فقد ساهمت تحسينات الأغشية وتقنيات استرداد الطاقة في خفض كثافة استهلاك الطاقة، إلا أن نطاق الخفض المتبقي محدود، خصوصاً مع اقتراب الاستهلاك من الحد الأدنى النظري للطاقة وفق قوانين الديناميكا الحرارية. وسيتم تناول محور العلاقة بين استهلاك الطاقة وعمليات التحلية بمزيد من التفصيل في القسم 3.

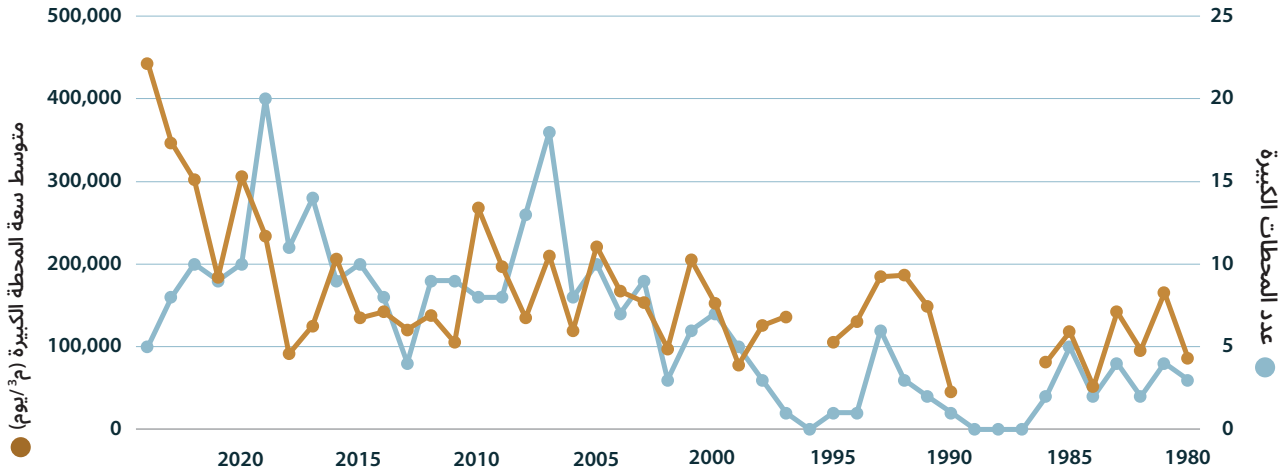
الشكل 2.2 • وفورات الحجم لعمليات التحلية المختلفة



المصدر: البنك الدولي، 2019.

ملاحظة: جميع التكاليف بالدولار الأمريكي لعام 2016. CAPEX = النفقات الرأسمالية، MLD = مليون لتر يومياً؛ O&M = التشغيل والصيانة؛ OPEX = النفقات التشغيلية؛ SWRO = التناضح العكسي لمياه البحر.

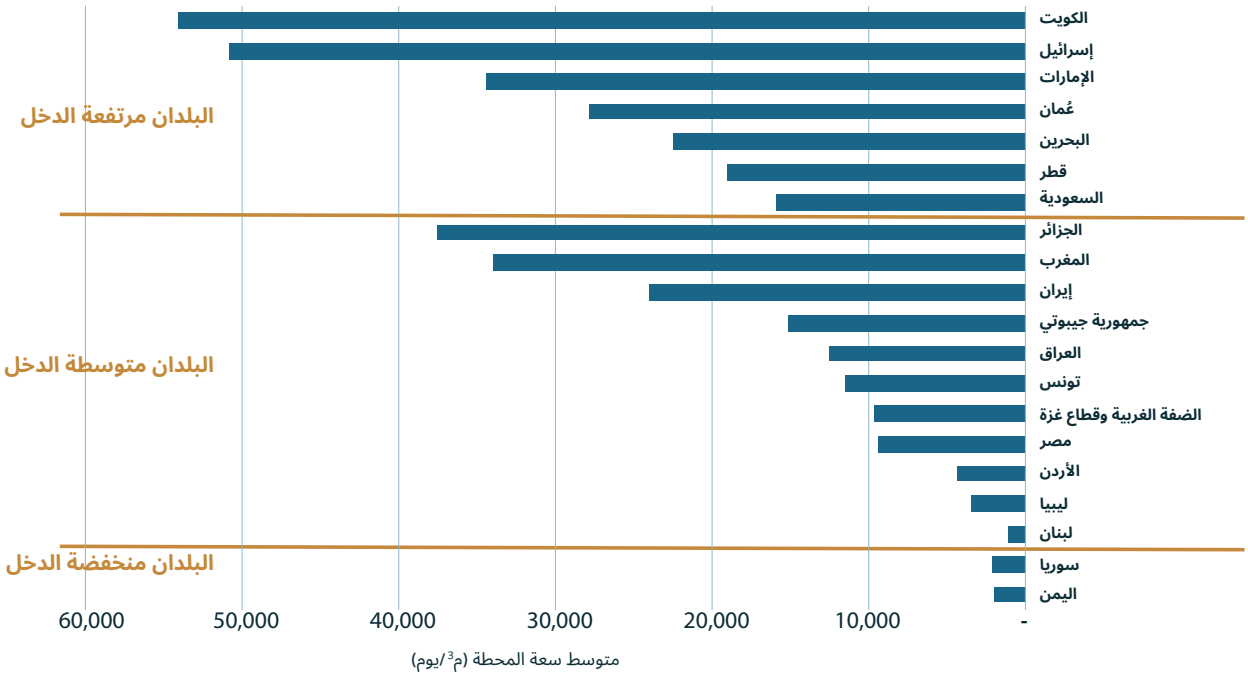
الشكل 2.3 • تطور عدد ومتوسط سعة محطات التحلية الكبيرة الجديدة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا عبر الزمن



المصدر: أُعد خصيصاً لأغراض هذا التقرير، استناداً إلى بيانات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData ، وتم الاطلاع عليه في 11 أبريل/نيسان 2025.

ملاحظة: يُراعي هذا الشكل محطات التحلية الكبيرة فقط، أي تلك التي تبلغ سعتها الإنتاجية 40 ألف متر مكعب يومياً أو أكثر، وفق بيانات قاعدة بيانات GWI.

الشكل 2.4 • متوسط سعة محطات التحلية التي تمت ترسيتها خلال الفترة 2010–2025 في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حسب فئة الدخل



المصدر: أُعد خصيصاً لأغراض هذا التقرير، استناداً إلى بيانات تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI DesalData ، وتم الاطلاع عليه في 11 أبريل/نيسان 2025.

أسهمت التحسينات في عمليات المعالجة المُسبقة واللاحقة بشكل كبير في رفع كفاءة التحلية وخفض تكلفتها. فقد أدى تطوير أغشية التناضح العكسي المتقدّمة إلى تقليل الضغط والطاقة المطلوبة للعملية، كما أسهمت هذه الأغشية والتكنولوجيات المبتكرة للمعالجة المسبقة في الحد من انسداد الأغشية (انظر الإطار 2.1)، مما يطيل عمرها الافتراضي ويقلل الحاجة إلى الصيانة والاستبدال. كما تُجهز محطات التحلية الحديثة بتكنولوجيات تقلل من تصريف الرجيع الملحي الناتج عن التحلية، مع تكثيف جهود البحث والتطوير لتصميم وتنفيذ عمليات تحلية ذات تصريف صفري للسائل(ZLD) (علي 2021؛ جاد الله وفتح وإليزابيث 2023). ويسهم تطوير إضافات صديقة للبيئة وقابلة للتحلل للتحكم في الترسيب في معالجة تحديات التكلس، مع تقليل الآثار البيئية المحتملة، مما يعزز استدامة عمليات التحلية (انظر القسم 4 لمناقشة أكثر تفصيلاً). وبالنسبة للعمليات اللاحقة، أسهمت التطورات في إجراءات مثل إعادة التمعدن، وضبط الرقم الهيدروجيني، والتعقيم، في تحسين إدارة جودة المياه، مما يجعل التحلية خياراً أكثر موثوقية وأماناً واستدامة لتوفير المياه.

تُسهم الرقمنة في تعزيز كفاءة منظومات التحلية وموثوقيتها ومرونتها التشغيلية، غير أنها تفرض متطلبات متزايدة تتعلق بجودة البيانات، وتكامل الأنظمة، وتعزيز الأمن السيبراني. فقد باتت المرافق تعتمد على أنظمة الإشراف على البيانات والتحكم فيها والحصول عليها، والتحليلات القائمة على الذكاء الاصطناعي، لتحسين تشغيل وحدات التناضح العكسي، والتنبؤ بمعدلات انسداد الأغشية وأدائها، والتحول من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة التنبؤية، بما يقلل فترات التوقف غير المخطط لها ويخفض استهلاك الطاقة (أبواتفا وآخرون، 2023؛ ألينيزي وألبيادلي 2025). كما أصبح التكامل بين محطات التحلية والشبكات الكهربائية "أكثر ذكاءً"، حيث يربط المشغِّلون قدرات وحدات التناضح العكسي الكبيرة بمصادر الطاقة النظيفة وبأدوات رقمية لاحقة، مثل العدادات الذكية، وأنظمة الكشف الفوري عن التسربات، ومنصّات الإدارة الرقمية للإيرادات، بهدف خفض تكاليف التشغيل وتحسين الكفاءة. وتتيح هذه الأدوات الرقمية تعزيز إدارة مخاطر مصادر المياه عبر تقنيات الاستشعار عن بُعد وأنظمة الإنذار المبكر لانتشار الطحالب، ما يمكّن من تشغيل مصادر السحب وجرعات المواد الكيميائية، وبالتالي الحد من الصدمات التشغيلية التي تؤدي إلى الانسداد وانقطاع التيار الكهربائي (ظاهر وآخرون، 2024). وللاستفادة الكاملة من المكاسب الرقمية، يتعيّن على مشغِّلي محطات التحلية ضمان أمن سيبراني متين لتكنولوجيا التشغيل، وجمع بيانات موثوقة وبوتيرة عالية، وتحقيق قابلية التشغيل البيني بين الأنظمة والمعدات، وتطوير قدرات القوى العاملة لإدارة الحلول الرقمية وتطبيقها بفاعلية (الهيئة السعودية للمياه 2022).

الإطار 2.1 • دور البحث والتطوير في دفع الابتكار لتحسين الكفاءة وخفض تكاليف تحلية المياه

أدّت جهود البحث والتطوير في مجال الأغشية المقاومة للتلوث إلى تحقيق طفرة ملحوظة في تكنولوجيا التحلية، ولا سيمّا في المناطق ذات الملوحة العالية ودرجات الحرارة المرتفعة، مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويواصل الباحثون والشركات حول العالم تطوير أجيال جديدة من الأغشية المتقدمة المصمّمة لمقاومة الترسبات والاتساخ، مما يعزّز كفاءة التشغيل ويقلل التكاليف التشغيلية على المدى الطويل. فعلى سبيل المثال، طورت المملكة العربية السعودية أغشية نانوية مركّبة تتمتع بقدرة محسنة على صد الملوثات، مما يقلل وتيرة التنظيف ويحد من استهلاك المواد الكيميائية، ويُطيل العمر التشغيلي للأغشية في البيئات القاسية. ويستكشف الباحثون في جامعة خليفة بأبوظبي استخدام أكسيد الغرافين في الأغشية بهدف زيادة معدل تدفق المياه، وتحسين مقاومة الاتساخ، وتعزيز كفاءة الطاقة. وابتكرت شركة دنماركية متخصّصة في التكنولوجيا الحيوية أغشية مدمجاً فيها بروتينات القنوات المائية (الأكوابورين)، تحاكي الآليات البيولوجية الطبيعية لتوفير نفاذية مائية أعلى وتقليل الميل إلى الاتساخ. وفي أستراليا، طور الباحثون طلاءات مضادة للاتساخ مصنوعة من مواد زويترونية، أظهرت انخفاضاً ملحوظاً في معدلات الاتّساخ وتحسناً ملموساً في الأداء الكلي لعمليات التحلية في ظروف تشغيلية صعبة.

تُجسِّد هذه الجهود التزاماً عالمياً متنامياً لتعزيز استدامة وكفاءة محطات التحلية، لما لها من أثر جوهري في اقتصاديات التحلية واستدامتها على مستوى العالم، ولا سيمّا في البيئات القاسية بمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وفي هذا السياق، أطلقت دول مجلس التعاون الخليجي عدداً من المبادرات الرائدة لدعم البحث والتطوير وتشجيع الابتكار في مجال التحلية. فعلى سبيل المثال، أُطلقت جائزة محمد بن راشد آل مكتوم العالمية للمياه عام 2014 بهدف تحفيز تطوير حلول مبتكرة ومستدامة للتحلية، خصوصاً المعتمدة على مصادر الطاقة المتجددة. كما أطلقت الهيئة السعودية في عام 2023 الجائزة العالمية للابتكار في التحلية لدفع عجلة تطوير تكنولوجيات وممارسات أكثر تقدّماً لمواجهة تحديات شح المياه عالمياً. وفي دولة الإمارات العربية

المتحدة، أطلقت مبادرة محمد بن زايد للمياه في عام 2024 لتعزيز إمكانية الوصول المستدام إلى المياه عالمياً من خلال دعم تطوير وتطبيق التكنولوجيا الرائدة، فضلاً عن رفع الوعي بشح المياه وتعزيز حضورها كأولوية على الأجندة العالمية، وتشمل هذه المبادرة مسابقة "إكس برايز للحد من شح المياه"؛ وهي جائزة تستمر لخمسة أعوام بقيمة 119 مليون دولار أمريكي، ممولة من استثمار يبلغ 150 مليون دولار من مبادرة محمد بن زايد للمياه وتهدف إلى توسيع نطاق الوصول إلى المياه النظيفة عبر تطوير أنظمة تحلية مياه البحر أكثر موثوقية واستدامة وكفاءة من حيث التكلفة.

أدى التنافس المتزايد في التكلفة وكفاءة الطاقة لتكنولوجيا التناضح العكسي إلى تحول ملحوظ بعيداً عن التكنولوجيات الحرارية، خاصة في بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ورغم التفاوت بين المشاريع، فقد قُدِّرت التكلفة المتوسطة المجمعة (النفقات التشغيلية + النفقات الرأسمالية) لتكنولوجيا التناضح العكسي في المنطقة بين 0.98–1.38 دولاراً أمريكياً لكل متر مكعب في عام 2019، مقارنة بـ 1.39–1.44 دولاراً أمريكياً لكل متر مكعب للتكنولوجيات الحرارية (البنك الدولي 2019). ويُعد نطاق خفض التكاليف أكبر بالنسبة لتكنولوجيات التناضح العكسي الحديثة مقارنة بالتكنولوجيات الحرارية التقليدية.[24] كما يتضح من التكاليف التشغيلية لنحو 17 محطة تحلية تعمل بتكنولوجيا التناضح العكسي تمت ترسيتها خلال الفترة من 2019 و2025 في المنطقة، والتي سجّلت متوسطاً قدره 0.52 دولار أمريكي لكل متر مكعب. كما تستهلك هذه التكنولوجيا طاقة أقل بكثير من العمليات الحرارية، نظراً لاعتمادها على الكهرباء بدلاً من الحرارة، مما يسهل دمج مصادر الطاقة المتجددة، ويتيح تقليل الكثافة الكربونية الإجمالية لمحطات التناضح العكسي.[25] وبناءً على ذلك، استحوذ التناضح العكسي على نحو 65% من سعة التحلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا و89% في بقية أنحاء العالم عام 2025 (انظر الشكل ب1.2.1)، بينما ظلت السعة الحرارية مستقرة نسبياً منذ عام 2010 ومحصورة أساساً في دول مجلس التعاون الخليجي (انظر الخريطة 1.1). ويرجع الأداء المتميز للتحلية الحرارية في دول الخليج إلى ارتفاع ملوحة ودرجة حرارة مياه البحر، ومتطلبات إنتاج مرتفعة تستفيد من وفورات الحجم، والموقع المشترك مع محطات توليد الطاقة الذي يتيح الاستفادة من الحرارة المهدورة، وانخفاض تكاليف الطاقة. ومع ذلك، أصبح التناضح العكسي الخيار المهيمن تقريباً في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا منذ عام 2015، بما في ذلك في دول مجلس التعاون الخليجي، حيث شرعت بعض البلدان في إحلال محطات التناضح العكسي أو محطات هجينة محل محطات التحلية الحرارية قبل نهاية عمرها الافتراضي (انظر الخريطة 1.1 والإطار 2.2).

24 انظر تقرير مؤسسة معلومات المياه العالمية **https://www.desaldata.com**) GWI DesalData 2025/). تم الاطلاع في 11 أبريل/نيسان 2025.

25 رغم أن تكنولوجيا التناضح العكسي تستلزم نظرياً طاقة أقل، حتى عند معالجة المحاليل شديدة الملوحة بتركيز يصل إلى 50 غراماً لكل لتر، فإن ذلك مشروط بتوفر أغشية تجارية متطورة قادرة على تحمل الضغوط التشغيلية المطلوبة (أحمد، خليل وهلال 2021).

الإطار 2.2 • التحوّل في تكنولوجيات تحلية المياه في المملكة العربية السعودية

تُعد تحلية المياه الركيزة الأساسية في جهود المملكة العربية السعودية لتعزيز القدرة على الصمود في مواجهة تغير المناخ وضمان إمدادات مياه مستقرة وطويلة الأمد. فقد أدركت المملكة منذ وقت مبكر الأهمية الحيوية للتحلية في مواجهة تحديات شح المياه. ومع محدودية الموارد المائية المتجددة—حيث يبلغ متوسط هطول الأمطار السنوي نحو 59 ملم لكل متر مربع—والنمو السكاني السريع، استثمرت المملكة بكثافة في تكنولوجيات التحلية لضمان توفير مياه موثوقة ومستدامة، بدءاً من أجهزة تقطير المياه التي تعمل بالفحم في أوائل القرن العشرين، وصولاً إلى شبكة حديثة ومعقدة من محطات التحلية. وقد مكّن هذا التوجّه الإستراتيجي المملكة من بناء إمداد يومي بالتحلية يصل إلى 14 مليون متر مكعب، يغطي نحو 75% من احتياجاتها من المياه الصالحة للشرب، ويحدّ من اعتمادها على الموارد الجوفية المحدودة والمستغلة بشكل مفرط. ومن المتوقع أن يرتفع هذا الإمداد اليومي إلى نحو 19 مليون متر مكعب بحلول عام 2030 لتلبية الطلب المتزايد على المياه في القطاعات الحضرية والصناعية.

نجحت المملكة العربية السعودية في خفض استهلاك الطاقة في عمليات تحلية المياه على نحو منهجي، من خلال الانتقال من التكنولوجيات الحرارية كثيفة الاستهلاك للطاقة إلى أنظمة التناضح العكسي الأكثر كفاءة. وقد شكّل هذا التحول التدريجي من تكنولوجيا التقطير الومضي متعدد المراحل وتكنولوجيا التقطير متعدد التأثيرات إلى تكنولوجيا التناضح العكسي خطوة نوعية من حيث كفاءة الطاقة، حيث انخفض استهلاك الطاقة بنسبة 80–85%، من نحو 15 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب إلى حوالي 2.7 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب في عام 2025. وجاء هذا التحول في كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات مع مجموعة من الإجراءات المصاحبة، شملت إيقاف تشغيل المحطات الحرارية القديمة، وإعطاء الأولوية لتكنولوجيا التناضح العكسي على التقطير الومضي متعدد المراحل عند الإمكان (تم تحويل التكنولوجيا في 8 من أصل 13 محطة تحلية حرارية رئيسية)، فضلاً عن التحول من استخدام الوقود السائل إلى الغاز الطبيعي. ومن المتوقع أن توفر تكنولوجيا التناضح العكسي نحو 83% من المياه المحلاة في المملكة بحلول عام 2027.

تسعى السعودية إلى تعزيز كفاءة الطاقة في قطاع التحلية عبر التوسع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة. ومن المتوقع أن يُسهم هذا الدمج، وخصوصاً الطاقة الشمسية، في خفض الانبعاثات الكربونية وتقليل التكاليف التشغيلية. وتهدف المملكة إلى توليد ما يصل إلى 30% من الطاقة المطلوبة من المصادر المتجددة، مما يؤدي إلى تقليل نحو 37 مليون طن من الانبعاثات الكربونية بحلول عام 2025. وفي هذا السياق، توجد مشاريع محطات طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة 66.6 ميجاواط قيد التطوير، بالإضافة إلى مشروع جديد بقدرة 130 ميجاواط تمت الموافقة عليه.

المصدر: الهيئة السعودية للمياه، 2024أ؛ 2024ب.

من المتوقع أن تواصل الابتكارات التكنولوجية تعزيز المنافسة المالية لقطاع التحلية، مع احتمال ابتكار تكنولوجيا جديدة تنافس تكنولوجيا التناضح العكسي بشدة في المستقبل. وهناك عدد من التكنولوجيات الناشئة والآخذة في التطور، تمر بمراحل مختلفة من الاختبار والتسويق، تمتلك القدرة على التطور إلى أنظمة تحلية موثوقة وواسعة النطاق خلال العقود المقبلة (انظر الإطار 2.3). ومن المتوقع أن تُسهم هذه التطورات في تحسين الاستدامة البيئية وخفض تكاليف التحلية، حيث تشير التقديرات إلى إمكانية انخفاض التكاليف إلى نحو 0.3–0.5 دولار أمريكي لكل متر مكعب خلال الخمسة عشر عاماً القادمة (البنك الدولي 2019). كما يُتوقع أن يؤدي إدخال أغشية أكثر كفاءة، ذات قدرة أعلى على رفض الأملاح وضغط غشائي منخفض، مصنوعة من مواد محسّنة مثل الأغشية النانوية، والأنابيب النانوية الكربونية، والأغشية البيوميمتيكية، إلى تحقيق خفض إضافي في تكاليف تكنولوجيات الأغشية. وفي المقابل، يبدو أن نطاق تحسين التكنولوجيا الحرارية محدود، ويقتصر على إجراءات هامشية للأساليب الحالية أو من خلال استخدام تبخر الندى. وفي الوقت نفسه، يتم تطوير تقنيات فصل بديلة، مثل التناضح الأمامي، والتقطير الغشائي، والتحلية الكهروكيميائية، التي تُظهر كفاءة أعلى واستهلاكاً أقل للطاقة. وتُبرز هذه التطورات السريعة الحاجة إلى تقييم دقيق وتحسين مستمر لتجنب استثمار مبالغ كبيرة في أصول قد تصبح قديمة تقنياً ومكلفة على المدى الطويل.

الإطار 2.3 • التكنولوجيات الناشئة والآخذة في التطور لتحلية المياه

من المتوقع أن تُحدث التكنولوجيات الهجينة الناشئة والآخذة في التطور تحولاً جوهرياً في قطاع التحلية، من خلال تعزيز الكفاءة وخفض التكاليف وتقليل الأثر البيئي. ورغم أن استمرار جهود البحث والتطوير يظل شرطاً أساسياً لتجاوز القيود التكنولوجية الحالية وتحقيق انتشار تجاري واسع، فإن مجموعة من هذه التكنولوجيات الجديدة تعد بجعل التحلية أكثر سهولة وإتاحة:

- **يعتمد التقطير الغشائي** على فرق درجة الحرارة وضغط البخار عبر الغشاء، حيث تتبخّر مياه التغذية على جانب واحد، وينتقل البخار عبر الغشاء، ثم يُكثف على جانب النفاذ. وتجمع هذه التكنولوجيا بين المبادئ الحرارية وتكنولوجيا الأغشية لتقليل متطلبات التسخين مقارنة بالعمليات الحرارية التقليدية. ومع ذلك، لا تزال محطات التقطير الغشائي تواجه تحديات تتعلق بتدفقات المياه المنخفضة وارتفاع استهلاك الطاقة، مما حدّ من انتشارها التجاري حتى الآن. وتتركز جهود البحث والتطوير على تحسين مواد الأغشية وتصميم العمليات. ويظل استهلاك الطاقة أعلى بطبيعته من تكنولوجيا الأغشية التقليدية، ما يجعلها خياراً مجدياً فقط عند استغلال الحرارة منخفضة الجودة، أو الطاقة المتجددة، أو الحرارة المستعادة من عمليات تكثيف النفاذ. وتُعد هذه التكنولوجيا مكوناً أساسياً في الأنظمة الهجينة، حيث يتم دمجها مع التناضح العكسي أو الأمامي لتعزيز استعادة الموارد ومعالجة المحاليل عالية الملوحة.
- **يعتمد التناضح الأمامي** على فرق الضغط الأسموزي لسحب المياه من محلول منخفض التركيز عبر العملية الأسموزية الطبيعية (الأمامية). ويُستعاد محلول السحب لاحقاً استخدام تكنولوجيات أخرى، مثل التناضح العكسي أو التقطير الغشائي، لإنتاج المياه المحلاة. ورغم أن هذه الأنظمة الهجينة تستلزم نفقات رأسمالية أعلى، تشير الدراسات إلى أن أنظمة التناضح الأمامي - التناضح العكسي يمكن أن تخفّض النفقات التشغيلية لتحلية مياه البحر باستخدام التناضح العكسي بنسبة تصل إلى 56%، كما سجّلت أنظمة التناضح الأمامي -التناضح العكسي نتائج واعدة مماثلة (روفوس وآخرون 2022). ومع ذلك، يحتاج استهلاك الطاقة في هذه التكنولوجيا —الذي تراوح بين 3 و8.5 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب في عام 2021—إلى خفضٍ يُقدّر بحوالي 50% ليصبح التناضح الأمامي منافساً كاملاً للتناضح العكسي، ولا سيّما في تحلية مياه البحر (روفوس وآخرون، 2022). ويتركّز البحث حالياً على تطوير أغشية أكثر كفاءة وتحسين تصميم الأنظمة والعمليات، بما يشمل تعزيز خصائص محاليل السحب وعمليات الاسترجاع، وتحسينات تشغيلية أخرى.
- **تستخدم التحلية الكهروكيميائية** الحقول الكهربائية لإزالة الأيونات من محلول التغذية. وتعد الديلزة (الفصل الغشائي) واحدة من أكثر أشكال هذه المعالجة تطوراً، حيث يتم تطبيق مجال كهربائي بين قطبين يفصل بينهما أغشية تبادل الأيونات، مكوناً قنوات متناوبة منخفضة وعالية التركيز نتيجة حركة الأيونات في المياه المالحة تحت تأثير المجال الكهربائي. وتتميّز الديلزة بمعدلات مرتفعة لاسترداد المياه، قد تصل إلى 85–90%، وهي نسب أعلى بكثير مقارنة بالتكنولوجيات التقليدية التي غالباً ما تعمل بمعدلات نحو 50%. ويجعل هذا الأداء الديلزة خياراً واعداً في الحالات التي تستلزم تقليل كميات الرجيع الملحي، مثل المناطق الداخلية التي يصعب فيها التخلص من تلك النفايات (جياكالون وآخرون. 2024) أو في عمليات استخلاص الأملاح والمعادن والموارد من الرجيع الملحي. كما تُعد مناسبة في الحالات التي يكون فيها إمداد المياه محدوداً، مثل الأنظمة صغيرة النطاق أو معالجة المياه منخفضة الملوحة، حيث يمكن أن يكون استهلاك الطاقة أقل بكثير مقارنةً بالتناضح العكسي عند انخفاض ملوحة المياه المغذّية (الخضرة وآخرون. 2022). ومع ذلك، يظل استهلاك الطاقة لتحلية مياه البحر عبر الديلزة، والذي يتراوح بين 3 و7 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب، أعلى من التناضح العكسي التقليدي.
- **تعد إزالة الأيونات بالسعة** أحد الأساليب الكهروكيميائية الناشئة في مجال التحلية، وقد أثبت فاعلية ملحوظة في التطبيقات صغيرة النطاق. وتعتمد هذه التكنولوجيا على إزالة أيونات الملح من المياه وتخزينها في الطبقة المزدوجة الكهربائية للقطب ذي المساحة السطحية النوعية العالية، مما يتيح إنتاج مياه نقية. وعند تشبّع الأقطاب بالأيونات، تُجرى عملية التجديد عبر تحرير الأيونات المخزّنة إلى مجرى نفايات، ليصبح بالإمكان استخدام الأقطاب مجدداً في دورة معالجة جديدة. وتتميّز هذه التكنولوجيا بكفاءة مرتفعة في استخدام الطاقة، إلا أن تكلفتها التشغيلية قد تكون أعلى مقارنة بالخيارات الأخرى بسبب انخفاض معدلات استرداد المياه وطول زمن تجديد الأقطاب. كما أن أداءها يتدهور مع ارتفاع ملوحة المياه المغذّية، مما يجعلها غير مناسبة لتحلية مياه البحر.

2.2. تزايد تطبيق تكنولوجيا التحلية في الحلول اللامركزية صغيرة النطاق

أصبحت التحلية صغيرة النطاق خياراً عملياً وفعالاً لتوفير المياه للمجتمعات المحلية التي تعاني من محدودية الوصول إلى مصادر مياه آمنة. ويمكن تكييف تكنولوجيات التحلية الصغيرة، مثل التناضح العكسي، وإزالة الأيونات بالسعة، والتقطير باستخدام الطاقة الشمسية، لتلبية الاحتياجات المحددة لكل مجتمع ريفي. وعادةً ما تتيح هذه الأنظمة إنتاج نحو 1–10 متر مكعب من المياه العذبة يومياً، ما يجعلها مناسبة للمجتمعات المحلية الصغيرة ذات الطلب المحدود، أو في الحالات التي يكون فيها توافر المياه، وموثوقيتها، أو جودتها غير كافية لتلبية الاحتياجات الخاصة، مثل المناطق السياحية، والمشروعات الصناعية عالية القيمة، أو مخيمات اللاجئين. وعند دمج هذه التكنولوجيات مع مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، يمكن لمحطات التحلية الصغيرة خفض انبعاثات غازات الدفيئة (الغازات المسببة للاحتباس الحراري) وتقليل تكاليف التشغيل، مما يجعلها خياراً أكثر استدامة لإمدادات المياه، لا سيما في المناطق النائية التي ترتفع فيها تكاليف الطاقة. كما تُسهم هذه الحلول في التخفيف من آثار تغيّر المناخ، من خلال مواجهة الآثار السلبية المترتبة على انخفاض معدلات الأمطار وزيادة التبخر، فضلاً عن تحسين الصحة العامة ودعم التنمية الاقتصادية من خلال توفير مياه نظيفة وآمنة ومستدامة (انظر الإطار 2.4).

يعتمد اختيار التكنولوجيا الأنسب على السياق المحلي في بيئات التحلية اللامركزية صغيرة النطاق. في المناطق الساحلية، أو عند تجاوز ملوحة المياه 3,500 جزء في المليون، تظل تكنولوجيا التناضح العكسي الخيار السائد، حتى على نطاقات صغيرة، نظراً لقدرتها على الحفاظ على استهلاك طاقة منخفض، أقل من 10 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب، كما هو الحال في الهند وتونس، (كاريمان، شافيعيان، وخياداني، 2023). أما في المناطق الداخلية ذات المياه قليلة الملوحة ونادرة التوفر، فقد تكون التكنولوجيات الأخرى أكثر ملاءمة. فالتناضح العكسي في هذه البيئات يعاني من انخفاض معدل استرداد المياه بواقع 50%، وارتفاع تكاليف الطاقة عند معالجة المياه منخفضة الملوحة،[26] فضلاً عن ارتفاع التكاليف الرأسمالية وتعقيد إدارة وتشغيل النظام بالنسبة للمجتمعات المحلية، مما يقلل من جدواه في هذه المواقع. كما أن الأساليب الحرارية التقليدية عادةً ما تكون غير اقتصادية عند النطاقات الصغيرة نظراً لانخفاض الكفاءة والأداء (أوكسفام، 2018). أما في المناطق الداخلية ذات المياه قليلة الملوحة ونادرة التوفر، فتصبح التكنولوجيات الناشئة والآخذة في التطور مثل التحلية الكهروكيميائية والتقطير الغشائي خيارات جذابة. ورغم ارتفاع التكاليف الرأسمالية لهذه التكنولوجيات، فإنها تتميز بمعدلات استرداد مياه أعلى وكفاءة طاقة أكبر عند معالجة المياه منخفضة الملوحة (انظر الإطار 2.3). كما تعمل الديلزة عند ضغوط منخفضة نسبياً، مما يلغي الحاجة لمضخات عالية الضغط في أنظمة المنازل، ويؤدي بذلك إلى توفير ملحوظ في التكاليف. ومع ذلك، ينبغي التنويه إلى أن أنظمة الديلزة، على الرغم من كونها أقل عرضة لانسداد الأغشية مقارنة بتكنولوجيا التناضح العكسي، لا تزال تستلزم صيانة دورية وتحكماً دقيقاً لضمان الأداء الأمثل. ومن بين التكنولوجيات الأخرى التي أثبتت جدواها على النطاق الصغير: إزالة الأيونات بالسعة، والتقطير الغشائي، والتكثيف–إزالة الرطوبة، والتقطير متعدد التأثيرات.[27]

26 يستلزم التناضح العكسي مدخلات طاقة مماثلة لمعالجة المياه قليلة الملوحة ومياه البحر، رغم انخفاض ملوحة المياه الأولى، بسبب استهلاك جزء كبير من الطاقة للتغلب على الاحتكاك والهيدروديناميكا داخل النظام، وليس فقط الضغط الأسموزي.

27 هناك العديد من التطبيقات العملية للتحلية صغيرة النطاق لكل من مياه البحر والمياه قليلة الملوحة، والتي يمكن الاستفادة منها: نظام التناضح العكسي يعمل بالطاقة الشمسية في راجستان، الهند، وتكنولوجيا إزالة الأيونات بالسعة في الهند. والديلزة (الفصل الغشائي) في تشيلورو، الهند، وفي غزة، وأجهزة التقطير باستخدام الطاقة الشمسية في نوخالي، بنغلاديش، ونظام التناضح العكسي للمياه قليلة الملوحة يعمل بالطاقة الشمسية في سيئون، الجمهورية اليمنية (كينيدي 2023؛ أوكسفام 2018).

الإطار 2.4 • تطبيقات التحلية صغيرة النطاق لدعم إمدادات المياه في المناطق المتأثرة بالصراعات

قدَّمت وحدات التحلية صغيرة النطاق مصدر حياة في مناطق الصراعات، من خلال توفير أمن مائي أساسي، لا سيمّا في المناطق التي تعاني من شح المياه. ففي مناطق مثل غزة والجمهورية اليمنية، حيث تفاقمت مشكلة شح المياه نتيجة الصراعات الدائرة، توفر هذه الوحدات مصدراً موثوقاً للمياه الصالحة للشرب. وتبرُز فاعليتها بشكل خاص في المناطق الساحلية، حيث يمكن تحلية مياه البحر لتلبية احتياجات المجتمعات المتأثرة، فضلاً عن تحسين جودة المياه الجوفية منخفضة الملوحة. وعلى الرغم من ارتفاع التكاليف ومتطلبات الطاقة، تُعد هذه الوحدات حلاً مستداماً، حيث تُموَّل محلياً وتُدار لتزويد السكان المشردين والنازحين والمجتمعات المحلية بالمياه، غالباً بتكلفة أقل من مقدِّمي المياه من القطاع الخاص. ولا تقتصر فوائدها على تحسين جودة المياه فحسب، بل تُسهم أيضاً في دعم سُبُل العيش من خلال إشراك العائلات المحلية في عمليات التحلية والتوزيع، مما يعزز القدرة على الصمود في مواجهة آثار تغير المناخ ويساهم في استقرار المناطق المتأثرة بالنزاعات.

تُعد وحدات التحلية صغيرة النطاق عنصراً أساسياً للأمن المائي في ظل الصراع المستمر في غزة. ففي عام 2021، بلغ نصيب الفرد من الموارد المائية نحو 25 متراً مكعباً، وكانت المياه المتاحة تقتصر على المياه الجوفية قليلة الملوحة ذات مستويات مرتفعة من النترات، ما يجعل هذه الوحدات مصدراً موثوقاً للمياه الصالحة للشرب ويخفف من حدة الأزمة المائية. وقد وفرت ثلاث محطات تحلية قصيرة الأمد ومنخفضة الإنتاج نحو 13 مليون متر مكعب سنوياً قبل تصاعد الصراع، استفاد منها نحو 870 ألف شخص. إضافة إلى 106 محطات تحلية عامة و114 محطة خاصة لمعالجة المياه قليلة الملوحة، بطاقة إنتاجية تصل إلى 11 مليون متر مكعب سنوياً، مع تفاوت القدرات (السعة) الإنتاجية بحسب المواسم.تراوح سعر المياه المحلاة بين 5–6 شيكل جديد[أ] للمتر المكعب على مستوى المحطة، بينما تصل الأسعار للمستهلك إلى 20–30 شيكلاً إسرائيلياً جديداً. وخلال أوقات الصراع، كان 62% من سكان غزة يتلقون أقل من 6 لترات مياه للشخص الواحد يومياً للشرب والطهي، ما يجعل وحدات التحلية الصغيرة لا تقتصر على تحسين جودة المياه فحسب، بل توفر أيضاً شريان حياة ضرورياً للسكان.

اليمن واحد من أكثر البلدان منخفضة الدخل التي تعاني شح المياه على مستوى العالم ، وقد أصبحت وحدات التحلية صغيرة النطاق حلاً أساسياً لمواجهة شح المياه الحاد، لا سيما في ظل النزاعات الممتدة. وتواجه البلاد تحديات كبيرة نتيجة محدودية المياه العذبة، والتي تفاقمت بفعل النمو السكاني السريع والاستخراج المفرط للمياه الجوفية. ورغم التحلية تُعد مكلفة وتستهلك طاقة عالية، فإنها تُعتبر خياراً مستداماً لتوفير المياه الصالحة للشرب ودعم المجتمعات المحلية، وتشمل المبادرات الأخيرة إنشاء محطات تحلية صغيرة في المخا وباب المندب، بقدرات (سعة) إنتاجية تصل إلى 700 و1,000 متر مكعب يومياً على التوالي. وتتم هذه المبادرات بتمويل محلي بهدف توفير مياه صالحة للشرب للمجتمعات المحلية المتضررة من الصراعات. كما توجد خطط لمشاريع أكبر، مثل محطة تحلية تجريبية في عدن بسعة 10 آلاف متر مكعب يومياً. ورغم التكاليف التشغيلية المرتفعة، تُقدِّم التحلية خياراً واعداً لتعزيز الأمن المائي في المدن الساحلية اليمنية، داعمةً الاحتياجات الحضرية والزراعية على حد سواء.

أ. شيكل إسرائيلي جديد

2.3. الاعتبارات الأساسية عند تصميم تحلية المياه

يجب إدراك أن تكاليف التحلية تتفاوت بشكل كبير، وأن تقييم آثارها ينبغي أن يتم ضمن السياق القطاعي الخاص بكل بلد أو منطقة. فلا يوجد نهج موحد يناسب جميع الظروف لإنشاء محطة تحلية المياه، وهناك العديد من العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار. وكما نوقش سابقاً وفي الأقسام التالية، تشمل هذه العوامل: اختيار التكنولوجيا، والظروف البيئية، ومصدر الطاقة، والتخلص من المياه والنفايات، والحجم المطلوب، والإطار التنظيمي والمؤسسي والمعني بالسياسات. كما يوضِّح القسم 5 أن السياق القطاعي الأوسع، مثل مصادر المياه الأخرى وحالة شبكة توزيع المياه، يجب أن يُؤخذ في الاعتبار أيضاً. ومن الضروري تقييم جميع هذه العوامل بدقة لضمان تصميم وتشغيل المحطة بنجاح. كما تحتاج بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إلى التفكير بعناية فيما إذا كانت هناك حاجة فعلية لبناء محطة تحلية في الوقت الحالي، أو ما إذا كان من الممكن تأجيل المشروع إلى المستقبل. فمع استمرار الابتكار وتحسن التكنولوجيات وانخفاض تكاليف الطاقة، من المرجَّح أن تكون المحطات المستقبلية أكثر كفاءة مقارنة بتلك المبنية اليوم. وبناءً عليه، ينبغي على هذه البلدان —وخاصة البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل—موازنة ضرورة إنشاء المحطة الآن، مع إمكانية ترك مجال لتحديثاتها المستقبلية، في مقابل المخاطر المتعلقة بالوقوع في فخ تكنولوجيا غير متطورة وتصميم محدد لعشرات السنوات دون القدرة على الخروج من هذا الوضع، فضلاً عن المخاطر الناجمة عن عدم استكمال الإجراءات التشغيلية المطلوبة، مثل تقليل الفاقد المائي قبل إدخال المياه المحلاة إلى الشبكة.

الصورة: "نور 1 و2" / محطة الطاقة الشمسية ورزازات، تصوير: ريتشارد ألواي، CC BY 2.0

3 محور العلاقة بين الطاقة والمياه: دور التحلية في تعزيز التنمية

3.1. تحلية المياه منخفضة الانبعاثات الكربونية كوسيلة للتخفيف من آثار تغيّر المناخ

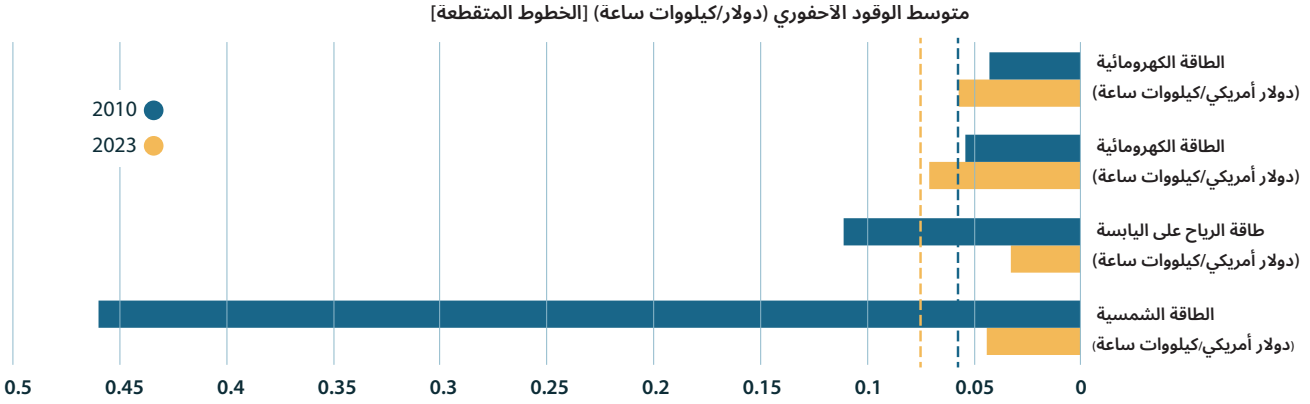
يمكن أن تؤدي مشاريع التحلية إلى زيادة استخدام الطاقة والبصمة الكربونية في مزيج إمدادات المياه، ما يجعلها محوراً رئيسياً في جهود التخفيف من آثار تغيّر المناخ في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. وتتفاوت شدة استهلاك الطاقة والانبعاثات الناتجة عن التحلية بحسب مجموعة من العوامل الخاصة بكل بلد ومشروع، مثل التكنولوجيا المستخدمة، وخصائص مياه التغذية، ومزيج الطاقة، ومعامل انبعاث الشبكة، والمسافات بين مواقع الإمداد ونقاط الطلب على المياه (كورنيجو وآخرون 2016؛ وسيد وآخرون 2023). وعلى الرغم من هذا التباين، تُقدّر الدراسات عادةً أن استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون للمياه المحلاة يتجاوزان بكثير تلك المرتبطة بالمياه السطحية والجوفية والمياه المعالجة (غريفيث-ساتنسبيل وويلسون، 2009؛ وجاجيرسكوغ وبرغوثي، 2022). وقد أدّى الاعتماد الواسع على الوقود الأحفوري منخفض التكلفة والدعم غير المباشر للطاقة في بلدان المنطقة إلى توسع كبير في التحلية كثيفة الاستهلاك للطاقة، بما في ذلك التكنولوجيات الحرارية عالية الانبعاثات. وتُظهر التقديرات أنه بحلول عام 2040، ستوفر التحلية وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي نحو 4% من إمدادات المياه العالمية، لكنها في المقابل ستستهلك ما يقرب من 60% من الطاقة المستخدمة في قطاع المياه على مستوى العالم، مع تركّز جزء كبير من هذا الاستهلاك في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وفي الوقت نفسه، ستشكّل التحلية وحدها أكثر من 10% من إجمالي استهلاك الطاقة في المنطقة (الوكالة الدولية للطاقة، 2016). وإذا كانت المنطقة تسعى إلى فك الارتباط بين التوسع المتوقع في سعة التحلية وأي زيادة موازية في البصمة الكربونية، وما يترتب على ذلك من آثار سلبية مثل تدهور جودة الهواء، يصبح من الضروري إعادة تصميم محور العلاقة بين الطاقة والمياه بما يضمن نمواً أخضر ومرناً ومستداماً.

يُعد رفع كفاءة الطاقة والانتقال من التكنولوجيات الحرارية إلى تكنولوجيات أغشية الأداة الأولى الفعالة لتقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة بالتحلية. وشهد استهلاك الطاقة في محطات التحلية انخفاضاً ملحوظاً منذ سبعينيات القرن الماضي، مما عزّز الجدوى المالية وخفض الانبعاثات. وتدعم هذه التطورات مواصلة جهود التحسين، خصوصاً في التكنولوجيات الحرارية كثيفة الاستهلاك للطاقة.[28] كما يتماشى خفض الانبعاثات الكربونية في قطاع التحلية مع اعتبارات التكلفة، الأمر الذي أدى إلى تسريع وتيرة التحول من التكنولوجيات الحرارية إلى تكنولوجيات الأغشية. ويبرز هذا الاتجاه بوضوح في دول مجلس التعاون الخليجي، التي بدأت تتحول تدريجياً بعيداً عن الاعتماد على التكنولوجيات الحرارية التقليدية نحو استخدام واسع لتكنولوجيات الأغشية منخفضة الكربون وذات كفاءة عالية من حيث التكلفة. ويرجع جزء من هذا التحول إلى أهداف السياسات الأوسع نطاقاً، فالإمارات العربية المتحدة تهدف إلى الوصول إلى صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2050، بينما التزمت البحرين، والكويت، وعُمان والمملكة العربية السعودية بتحقيق هذا الهدف بحلول عام 2060.

28 على الرغم من اختلاف كثافة الكربون في عمليات التحلية حسب السياق، تُظهر تقديرات كورنيخو وآخرين (2016) وسيد وآخرين (2023) أن تكنولوجيات التحلية الحرارية عادةً ما تُنتج انبعاثات أعلى بكثير، تتراوح بين 0.3 و34.7 كجم من ثاني أكسيد الكربون لكل متر مكعب، مقارنةً بتكنولوجيا التناضح العكسي التي تتراوح انبعاثاتها بين 0.08 و4.3 كجم لكل متر مكعب.

أصبح دمج الطاقة المتجددة مع تكنولوجيات التحلية المتقدِّمة تحولاً جوهرياً، يُسهم بصورة ملموسة في خفض الانبعاثات الكربونية في بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وقد تزايد الاهتمام في السنوات الأخيرة بربط محطات التحلية، بما في ذلك إدارة الرجيع الملحي الناتج عن التحلية (جاد الله، فتح، والعزب 2023)، بمصادر الطاقة المتجددة. ويتوقف اختيار تكنولوجيا الطاقة المتجددة المناسبة على مجموعة من العوامل، مثل تكلفة رأس المال، والموقع الجغرافي، وحجم المحطة، وخصائص مياه التغذية، والبنية التحتية لشبكة الكهرباء، إلى جانب عوامل تقنية وبيئية أخرى. وتُعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح أكثر مصادر الطاقة المتجددة استخداماً لتشغيل محطات التحلية المعتمدة على تكنولوجيا التناضح العكسي والديلزة (الفصل الغشائي). وفي المقابل، تُستخدم الطاقة الحرارية الشمسية، وخاصة الطاقة الشمسية المركزة، في تكنولوجيات التقطير الومضي متعدد المراحل والتقطير متعدد التأثيرات.[30،29] وأصبحت الطاقة المتجددة تنافسية على نحو متزايد في السوق؛ إذ تُظهر المقارنة العالمية لتكلفة الكهرباء المرجّحة لعام 2023 انخفاض تكلفة مصادر الطاقة المتجددة بنسبة تتراوح بين 29 و67% مقارنة بالخيارات المعتمدة على الوقود الأحفوري (انظر الشكل 3.1). تُعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية والحرارية من الخيارات الواعدة وغير المستغلة بشكل كافٍ في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، حيث تتميز المنطقة بواحدة من أعلى مستويات الإشعاع الشمسي عالميًا (البنك الدولي، 2012). وتسجِّل المنطقة أدنى مستوى من تكاليف إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية على مستوى العالم في المشاريع واسعة النطاق، حيث تبلغ 0.026 دولار أمريكي لكل كيلوواط ساعة في الإمارات العربية المتحدة و0.036 دولار أمريكي لكل كيلوواط ساعة في المملكة العربية السعودية (انظر الشكل 3.1؛ الوكالة الدولية للطاقة المتجددة "آيرينا"، 2024). ويمكن لوحدات التناضح العكسي المعتمدة على الطاقة الشمسية الكهروضوئية خفض الانبعاثات الكربونية وتكلفة الكهرباء إلى النصف مقارنة بالمحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري، مما يجعلها مكملاً مهماً للفوائد المتحققة من التحول نحو تكنولوجيات الأغشية في المنطقة.

الشكل 3.1 • مقارنة متوسط المرجح العالمي للتكلفة المستوية للكهرباء بين مصادر الطاقة المتجددة والوقود الأحفوري لعامي 2010 و2023



المصدر: أعد أصلا لأغراض هذا التقرير، استناداً إلى تقرير آيرينا 2023 IRENA.

يستلزم الدمج الناجح للطاقة المتجددة مع التحلية استمرار تحسين الأساليب التقنية والتصاميم التشغيلية، إلى جانب تطوير نماذج تمويل مبتكرة تتناسب مع متطلبات هذا القطاع. وقد أثبتت العديد من التجارب والتحليلات والمشاريع التجريبية والتجارية قابلية دمج مصادر الطاقة المتجددة بنجاح في محطات التحلية، سواء عبر التوليد في الموقع مباشرة أو من خلال الربط مع الشبكة الكهربائية. ويُلاحظ أن الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة يزداد تدريجياً في الجيل الجديد من مشاريع التحلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وكانت محطة الخفجي

29 وعالمياً، يعتمد نحو 57% من السعة المركبة لمحطات التحلية المدعومة بالطاقة المتجددة على الطاقة الشمسية (الكهروضوئية أو الحرارية).

30 وفي المقابل، تظل مصادر الطاقة المتجددة الأقل استخداماً في التحلية هي الطاقة الكهرومائية، والطاقة النووية، والطاقة الحرارية الأرضية، والوقود الحيوي. ولا تضم منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا حالياً أي محطات نووية عاملة لتوليد الكهرباء، رغم أن عدداً من بلدانها يعمل على تطوير برامج نووية وطنية. فعلى سبيل المثال، تقوم مصر بإنشاء محطة نووية بقدرة 4.8 جيجاواط يُتوقّع بدء تشغيلها في عام 2029. أما الطاقة الحرارية الأرضية، فيمكن استغلالها بصورة مباشرة أو غير مباشرة في عمليات التحلية. ففي التحلية الحرارية الأرضية المباشرة، تُسخّن مياه البحر إلى درجة الغليان داخل المبخر، ثم يُحوَّل البخار المتكوّن إلى مكثّف لإنتاج المياه العذبة. أما في الطريقة غير المباشرة، فيُستخدم جزء من حرارة الأرض لتوليد الكهرباء التي تُشغّل تكنولوجيات التحلية بالأغشية. ويمكن أيضاً استخدام الوقود الحيوي لتشغيل محطات التحلية في المنطقة، ولا سيما في التكنولوجيات الحرارية، سواء كوقود منفرد أو ضمن مزيج مع الوقود الأحفوري.

في المملكة العربية السعودية—التي أُنشئت عام 2018 بطاقة إنتاجية تبلغ 60 ألف متر مكعب يومياً وتغذيها محطة شمسية كهروضوئية بقدرة 20 ميجاواط—أول محطة تحلية كبيرة تعمل بالطاقة المتجددة على مستوى العالم. وتمتلك المملكة أيضاً عدداً من محطات التحلية التي تعمل بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، من بينها جبيل 3 (أ) لتحلية مياه البحر (45.5 ميجاواط)، وينبع 4 (20 ميغاواط)، وجبيل3- (ب) (61 ميغاواط). كما أعلنت بلدان أخرى في مجلس التعاون الخليجي عن خطط لتطوير محطات تحلية جديدة تعمل بالطاقة الشمسية، في حين يركز كل من الأردن والمغرب على دمج الطاقة المتجددة ضمن مشاريع التحلية واسعة النطاق. وتتضمن مشاريع التحلية في الأردن والمغرب اشتراطات محددة للمطورين للحد من الانبعاثات وزيادة استخدام الطاقة المتجددة من جانب المطورين من القطاع الخاص ضمن مشاريع التحلية الراقية في العقبة والدار البيضاء، ويأتي بعضها استجابةً لحدود انبعاثات محددة تفرضها مؤسسات التمويل والإقراض الدولية (انظر الإطار 3.1). وعلى مستوى المجتمعات المحلية الصغيرة أو المعزولة، يتزايد دمج الطاقة المتجددة مع وحدات التحلية صغيرة النطاق، مثل تلك المستخدمة في الجمهورية اليمنية (غارسيا رودريجيز وديلجادو توريس 2022). وتتطلب هذه المشاريع—سواء التجريبية أو التجارية— جهوداً مستمرة في مجال البحث والتطوير، فضلاً عن تبادل الخبرات بشأن تحسين الجوانب التقنية والاقتصادية لدمج الطاقة المتجددة في عمليات التحلية، بما في ذلك تعزيز كفاءة استهلاك الطاقة، وتطوير تقنيات التخزين واستعادة الطاقة، وتوسيع نطاق الأنظمة غير المرتبطة بالشبكة (بوندشوه وآخرون، 2021).

الإطار 3.1 • وضع حدود قصوى للانبعاثات في مشاريع التحلية: دراسة حالة ــ مشروع الناقل الوطني للمياه (العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه)

يهدف مشروع الناقل الوطني للمياه (العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه) إلى تعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ وسد الفجوة بين العرض والطلب على المياه. ومع وصول نصيب الفرد من الموارد المائية إلى 61 متراً مكعباً سنوياً بحلول عام 2025، يُصنَّف مستوى المياه في الأردن أقل بكثير من الحد المطلق لشح المياه البالغ 500 متر مكعب للفرد سنوياً، ومن المتوقع أن ينخفض هذا النصيب بنسبة إضافية تصل إلى 30% بحلول عام 2040. وبالنظر إلى محدودية فرص زيادة الموارد المائية التقليدية، تُعدّ تحلية المياه مكملًا مهمًا للجهود الموازية الرامية إلى تقليل فاقد المياه، وتعزيز كفاءة استخدام المياه، واعتماد تدابير تكاملية لدعم نهج الاقتصاد الدائري من خلال إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة.

هذا المشروع يتكون من ثلاثة مكونات رئيسية، إضافة إلى الأعمال البحرية والمرافق المشتركة، وهي: محطة التحلية بتكنولوجيا التناضح العكسي بقدرة إنتاجية تصل إلى 300 مليون متر مكعب سنوياً في العقبة، ونظام نقل المياه: ضخ المياه من خلال نحو 445 كيلومتراً من الأنابيب، من محطة التحلية على ارتفاع يقارب 115 متراً وصولاً إلى المدن الواقعة على طول المسار، ثم إلى العاصمة عمان عند ارتفاع يقارب 985 متراً، ومنشآت الطاقة المتجددة: التوليد الذاتي للكهرباء من خلال مصادر الطاقة المتجددة سواء من خلال أنظمة متصلة بالشبكة أو خارجها، بما في ذلك طاقة الرياح، والطاقة الشمسية وأنظمة التخزين، بهدف تزويد المشروع بالطاقة اللازمة وتحقيق حدود الانبعاثات المستهدفة.

تستلزم عمليات التحلية كميات كبيرة من الطاقة، ومن المتوقع أن يحتاج المشروع إلى قدرة (سعة) كهربائية مركبة تتراوح بين 200 و300 ميجاواط، وهو ما يضاعف استهلاك الطاقة في قطاع المياه، الذي يمثل حالياً نحو 16% من إجمالي استهلاك الكهرباء في الأردن، كما قد تزيد أحمال الذروة الكهربائية في المملكة بنحو 10%. وتشير التقديرات إلى أن الطاقة قد تمثِّل نحو 40% من إجمالي تكلفة المشروع و70% من التكاليف التشغيلية السنوية. وللحد من الآثار البيئية المحتملة للمشروع، حددت لجنة التنمية الاقتصادية التابعة لمجلس الوزراء بتاريخ 13 مارس/آذار 2022 حداً أقصى لانبعاثات الغازات يبلغ 3.2 كجم من مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل متر مكعب من المياه المنتجة (الرقم المرجعي: 17014/2/11/57). ويُمنح المطورون مرونة اختيار أي حلول أو تقنيات يرونها مناسبة للوصول إلى هذا المستوى المستهدف من الانبعاثات.

ويُتوقع أن يؤدي الالتزام بهذا الحد إلى خفض الانبعاثات بأكثر من 20% مقارنةً بالاعتماد الكامل على الشبكة الكهربائية، بما يتماشى مع التزام الأردن بخفض الانبعاثات بنسبة 31% بحلول عام 2030 مقارنةً بسيناريو استمرار الوضع الراهن (بقاء الأمور على حالها). ويسمح هذا النهج للحكومة بتشجيع الابتكار وتجنب فرض تقنيات مكلفة أو غير قابلة للتطبيق، فضلاً عن الامتثال للمعايير الأوروبية الخاصة بمبدأ "عدم التسبب في ضرر جسيم" ضمن المشروعات المرتبطة بالتحلية ونقل المياه.

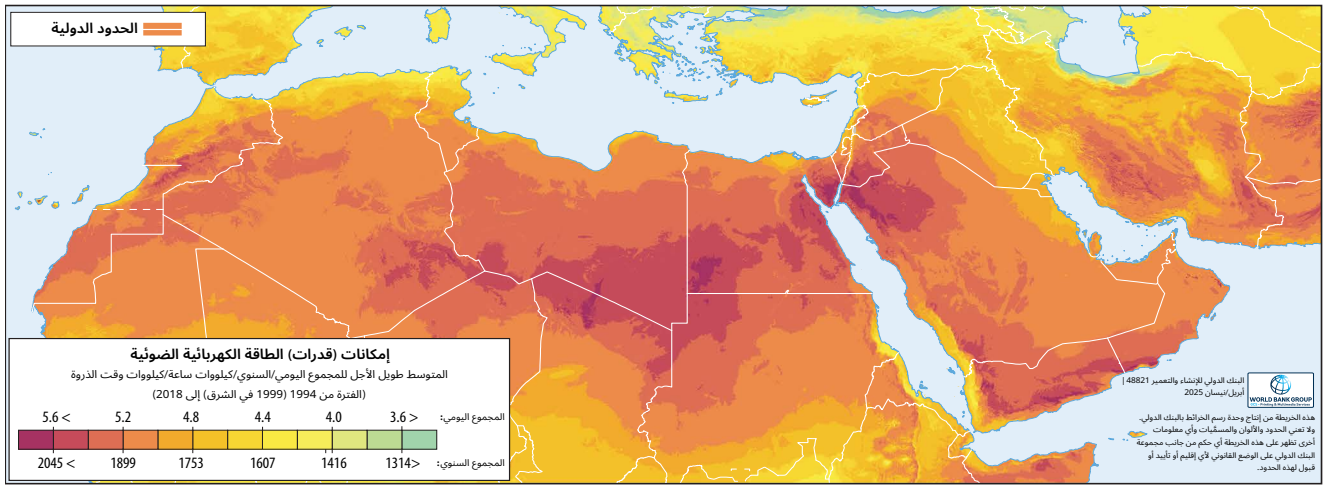
3.2. التحديات والفرص المرتبطة بدمج الطاقة المتجددة في تحلية المياه

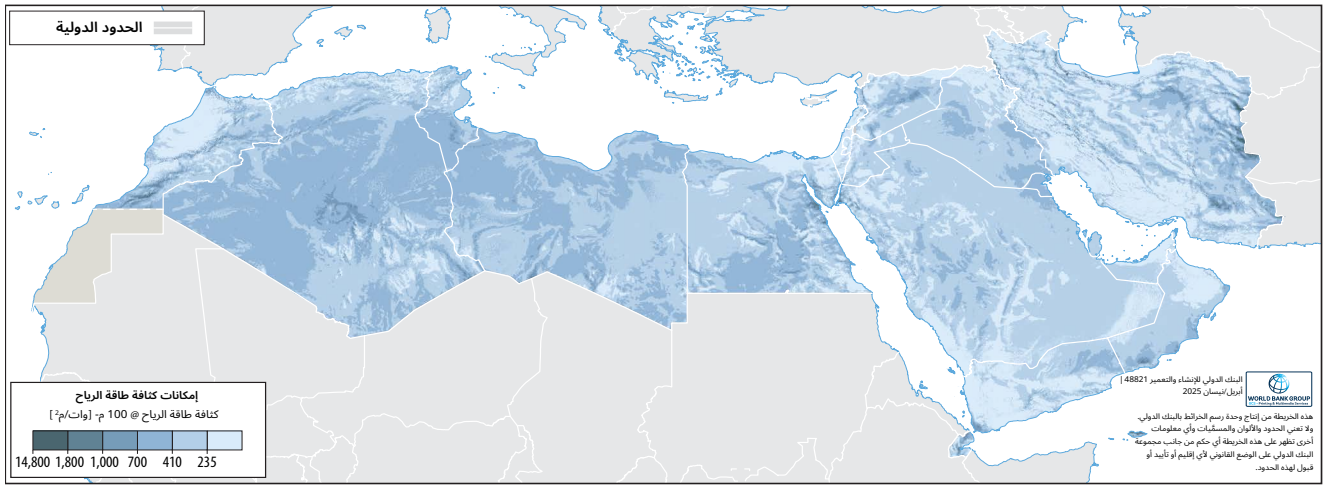
يعد الدمج الفعّال لمصادر الطاقة المتجددة ضمن مشاريع التحلية تحدياً رئيسياً نظراً للطبيعة المتقطعة لهذه المصادر، مما يجعل ضمان توفير الكهرباء على نحو مستمر وموثوق دون انقطاع أمراً بالغ الأهمية. ففي التحلية بالتناضح العكسي، يتطلب دفع المياه عبر الأغشية شبه المنفذة ضغطاً عالياً مستمراً، وأي انقطاع في تيار الكهرباء قد يؤدي ليس فقط إلى توقف العملية، بل أيضاً إلى تعرض أجزاء النظام لأضرار تشغيلية مكلفة.[31] فالأغشية المستخدمة شديدة الحساسية للتغيير في الضغط ومعدلات التدفق؛ إذ يمكن أن يتسبب أي انقطاع مفاجئ أو ممتد في ارتداد التدفق أو ركود المياه داخل النظام، مما يقلص عمر الأغشية ويزيد من تكلفة الصيانة. وفي عمليات التحلية الحرارية، مثل التقطير الومضي متعدد المراحل والتقطير متعدد التأثيرات، يُعدّ الإمداد المستمر بالطاقة عاملاً حاسماً للحفاظ على استقرار عمليات تبادل الحرارة والتبخّر؛ إذ قد يؤدي أي انقطاع في الكهرباء إلى تعطّل كامل لسلسلة العمليات الحرارية داخل المنظومة. كما تشكّل الانقطاعات المتكررة للكهرباء ضغطاً إضافياً على البنية التحتية الداعمة لمحطات التحلية، بما في ذلك وحدات التحلية والمرافق والأجهزة الداعمة مثل المضخّات وخزانات التخزين. ومع مرور الوقت، قد يُسهم هذا الضغط المتكرر في تسريع معدلات التآكل وزيادة أعمال الصيانة الدورية، فضلاً عن زيادة احتمالات الأعطال المبكرة للمعدات. ومع ذلك، يبقى ضمان توفير الكهرباء بصورة مستمرة تحدياً قائماً، حتى مع وفرة مصادر طاقة متجددة وتنافسيتها مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح (سيد وآخرون، 2023). ويستلزم هذا الواقع تخطيطاً دقيقاً واعتماد إستراتيجيات فعّالة للتخفيف من المخاطر، بما في ذلك توفير مصادر طاقة احتياطية، بما يضمن إدارة التأثيرات التشغيلية المحتملة، وضمان توفير المياه المحلاة على نحو موثوق دون انقطاع.

قد يؤدي عدم التقارب المكاني بين مواقع محطات التحلية ومواقع مصادر الطاقة المتجددة إلى انخفاض الكفاءة التشغيلية وظهور تحديات في نقل الطاقة. فمحطات التحلية تقام عادة في المناطق الساحلية لتقليل تكلفة ضخ مياه التغذية عبر مسافات طويلة، وهي عملية مكلفة ومرتفعة الاستهلاك للطاقة وغير فعّالة من حيث الأداء. وفي المقابل، غالباً ما تكون المناطق الساحلية بعيدة عن المواقع المثلى التي تتمتّع بأعلى إمكانات لمصادر الطاقة المتجددة—سواء من حيث الخصائص الطبيعية مثل الإشعاع الشمسي وسرعات الرياح والشلالات (مساقط المياه)، أو توفر المساحات الشاسعة اللازمة لتوليد الطاقة المتجددة—كما هو موضّح في الخريطة 3.1. وتتمتع المناطق الصحراوية الداخلية عموماً بمستويات عالية من الإشعاع الشمسي المباشر، بفعل التعرض المستمر والمكثف لأشعة الشمس مع محدودية العوائق الطبيعية، وانخفاض تكاليف الفرص البديلة للأرض، مما يجعلها مواقع مثالية لتوليد الطاقة الشمسية على نطاق واسع. بينما تعاني المناطق الساحلية الحضرية من تأثيرات التظليل الناتج عن المباني العالية، وارتفاع الرطوبة وكثرة الغيوم، مما يقلل الإشعاع الشمسي المباشر ويزيد تكلفة الأراضي. وبالمثل، تعتمد إمكانات طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية بشكل كبير على الخصائص الجغرافية والبيئية للمواقع، وغالباً ما تكون أعلى في مناطق بعيدة عن مواقع محطات التحلية. كما يمكن أن يمثل القبول الاجتماعي تحدياً إضافياً عند إنشاء منشآت توليد الطاقة في المناطق ذات الكثافة السكانية المرتفعة. هذه التباينات الجغرافية والبيئية تفرض إجراء دراسات جدوى اقتصادية شاملة، مع تقييم خيارات خفض التكاليف، للمقارنة بين البدائل المكانية المختلفة عند تطوير مشاريع تحلية تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة.

31 وبالمثل، يُعد توفير الكهرباء بصورة مستمرة دون انقطاع شرطاً أساسياً للحفاظ على الهجرة المتواصلة للأيونات وضمان الكفاءة التشغيلية لعملية التحلية بتكنولوجيا الديلزة (الفصل الغشائي) .

الخريطة 3.1 • إمكانات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا





المصدر: أعد أصلاً لأغراض هذا التقرير، استناداً إلى بيانات الأطلس الشمسي العالمي وأطلس الرياح العالمي.

يمكن لتكنولوجيات تخزين الطاقة أن تُسهم في التخفيف من تقطّع مصادر الطاقة المتجددة المستخدمة في التحلية، إلا أن تطبيقها قد يكون مكلفاً أو مجدياً فقط عند التشغيل على نطاقات كبيرة للغاية. وتوفر تكنولوجيات التخزين في الموقع —مثل البطاريات—حلاً واعداً من خلال تخزين فائض الطاقة المُنتَجة خلال فترات ذروة التوليد من المصادر المتجددة، وإطلاقه عند انخفاض الإنتاج. وبذلك، يمكن لخيارات التخزين أن تعزز استقرار الكهرباء لعمليات التحلية، وتقلل الاعتماد على الشبكة، وتضمن استمرارية التشغيل. ومع ذلك، قد يؤدي الاعتماد على التخزين في الموقع إلى زيادة كبيرة في النفقات الرأسمالية والتشغيلية لمحطات التحلية. ويُعد هذا التحدي أكثر وضوحاً في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل في المنطقة، حيث ترتفع تكلفة رأس المال، كما أن الطلب على المياه المحلّاة غالباً لا يتوافق مع المواقع التي تتوافر فيها إمكانات عالية للطاقة المتجددة. ومن ثم، يبقى التكامل الفعّال للحلول القائمة على البطاريات مرتبطاً باستمرار انخفاض تكلفتها، مع دعم ذلك من خلال التكنولوجيات المتطورة، والتوسع في الإنتاج، والمنافسة في السوق. وبديلاً عن ذلك، يمكن الاستفادة من أنظمة التخزين المركزي للطاقة—مثل التخزين الحراري للطاقة—و/أو التوليد الحراري المرن على مستوى المرافق، بهدف تعويض تقطّع مصادر الطاقة المتجددة من خلال تعزيز مرونة الشبكة واستقرارها وقدرتها على الصمود. ومع ذلك، يظل تطبيق هذه الخيارات محدوداً طالما أن الطلب على الكهرباء لأغراض التحلية لا يزال منخفضاً نسبياً مقارنةً بالسعة الإجمالية لشبكات الكهرباء.[32] كما يجري العمل على اكتشاف نُهج وأساليب مبتكرة تربط بين التحلية ونُظُم التخزين بالضخ، حيث يمكن لهذه الأنظمة تخفيف تقطّع مصادر الطاقة المتجددة، والاستفادة من الضغط المخزن في الخزان العلوي لمنظومة التخزين بالضخ لتوفير الضغط المطلوب لعمليات التناضح العكسي (انظر الإطار 3.2).

الإطار 3.2 • نظام التخزين بالضخ في المملكة العربية السعودية

يمثّل الربط الهيدروليكي بين محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ ووحدات التحلية بالتناضح العكسي تقدّماً تكنولوجياً واعداً. ويقوم هذا النهج على استخدام الطاقة المخزنة في خزانات الضخ لتوليد ضغط مياه البحر مباشرةً، مما يقلّل الحاجة إلى تحويلات الطاقة الكهربائية التقليدية. ويُسهم في تعزيز كفاءة تشغيل محطات التحلية بصورة ملموسة، كما يتيح هذا التكامل إمكانية التغلّب على فترات انخفاض القدرة الكهربائية المتاحة، مع تعزيز استقرار الشبكة ودعم استمرار إنتاج المياه الصالحة للشرب. ويتمثّل التحدي الرئيسي في اختيار المواقع المناسبة التي تجمع بين ارتفاع كافٍ لمحطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ وقربها من السواحل لتشغيل محطات التحلية. وفي السعودية، جرى تطوير هذا المفهوم وتحليله بصورة منهجية، لا سيما من خلال الدراسات والأبحاث التي أُجريت في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية، والتي تناولت فرص دمج نظم تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ مع التبريد والتحلية بالتناضح العكسي على البيئات الساحلية الصحراوية ذات التضاريس الجبلية. ويُتوقع أن يكون هذا النموذج قابلاً للتطبيق على نطاق واسع في بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، التي تتوفر فيها الطبيعة الطبوغرافية المواتية، والضغوط المائية المناسبة، فضلاً عن التوسع السريع في مشاريع الطاقة المتجددة، مما يخلق فرصاً واعداً للابتكار المشترك بين قطاعي الطاقة والمياه، ويعزز كفاءة شبكات الكهرباء وإمدادات المياه.

المصدر: هانت وآخرون (2025).

32 على سبيل المثال، تمتلك شبكة الكهرباء المصرية قدرة (سعة) توليد تصل إلى 60 جيجاواط، مع فائض يصل إلى 35 جيجاواط عند ذروة الطلب، وإجمالي إنتاج فعلي يبلغ 215 تيراواط ساعة في عام 2022. ويقدّر الطلب على الكهرباء لجميع محطات التحلية الحالية، في حال تشغيلها بكامل طاقتها، بنحو 4.25 تيراواط ساعة، أي ما يعادل نحو 2 % فقط من إجمالي إنتاج الكهرباء. وعلى الرغم من أن التوسع في مشروعات التحلية سيزيد الطلب على الكهرباء ليصل إلى نحو 10 تيراواط ساعة بحلول عام 2050، فإن إجمالي إنتاج شبكة الكهرباء المصرية سيتوسع بالتوازي، وقد يتجاوز 400 تيراواط ساعة. ونتيجة لذلك، ستظل نسبة التحلية من إجمالي استهلاك الكهرباء منخفضة نسبياً، بحيث لا تبرر الاستثمار في نظام تخزين مركزي مخصص لهذا الغرض.

كما يمكن لربط محطات التحلية المعتمدة على الطاقة المتجددة بالشبكات الوطنية أن يُسهم بفاعلية في معالجة تحديات التقطّع ونقل الطاقة. ففي حالة المحطات التي تعتمد على توليد الكهرباء من مصادر طاقة متجددة في الموقع، يضمن الربط بالشبكة استمرار تزويد الكهرباء خلال فترات توقف التوليد. وقد طبق هذا النهج في محطة الخفجي في السعودية، وهي أول محطة تحلية كبيرة تعتمد بالكامل على الطاقة المتجددة، حيث صُممت محطة الطاقة الشمسية في الموقع بقدرة 20 ميجاواط لتلبية 100% من احتياجات المحطة. إلى جانب اتصالها بالشبكة الوطنية من خلال نظام القياس الصافي لضمان استمرار الكهرباء.[33] ويتيح هذا الربط إمكانية مساهمة محطات التحلية في دعم استقرار الشبكة (انظر الإطار 3.3). كما يمكّن من الفصل المكاني بين مواقع التحلية ومواقع توليد الطاقة المتجددة، بما يسمح بإنشاء مشروعات الطاقة المتجددة في مواقع بعيدة عن محطة التحلية، مستفيدةً من المناطق الأعلى جدوى من حيث الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، ونقل الطاقة الكهربائية المنتجة عبر الشبكة الوطنية. وتتيح هذه الحلول على نطاق أوسع الاستفادة من وفورات الحجم فيما يتعلق بأحجام محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، والاستفادة من خبرات وكفاءات الشركات المتخصصة في توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، بما يعزز القدرة التنافسية لمشروعات التحلية بوجه عام. وتُعد محطة التحلية في الدار البيضاء بالمغرب نموذجاً بارزاً على هذا النهج، حيث توفَّر الطاقة المتجددة اللازمة لتشغيل محطة التحلية بطاقة إنتاجية تبلغ 800 ألف متر مكعب لكل يوم من قِبل مطور خاص خارج الموقع، مما يُسهم في تحقيق تكلفة إنتاج تنافسية للغاية تُقدَّر بنحو 0.4 دولار أمريكي لكل متر مكعب. كما يمكن دمج الإنتاج المتجدد اللامركزي والمزوّد عبر الشبكة في مشاريع تحلية أخرى في مراحل لاحقة.

الإطار 3.3 • دور محطات التحلية في تعزيز استقرار الشبكة الكهربائية

يمكن لمحطات التحلية، وخصوصاً تلك التي تعتمد على التناضح العكسي وتُشغَّل بالكهرباء، أن تقوم بدور إستراتيجي في تعزيز استقرار الشبكة الكهربائية من خلال عملها كأحمال مرنة قابلة لضبط استهلاكها وفقاً لظروف الشبكة. وعلى خلاف الأحمال الصناعية الثابتة، يمكن تكثيف تشغيل وحدات التحلية لاستيعاب الإنتاج المتجدِّد في فترات الذروة، مثل ذروة الطاقة الشمسية عند منتصف النهار، وتقليص تشغيلها أثناء فترات الطلب العالي. وتُسهم هذه المرونة التشغيلية في تحقيق توازن أفضل بين العرض والطلب، وتقليل الهدر في الطاقة المتجددة، وتعزيز موثوقية الشبكة الكهربائية. وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حيث تشهد بلدان مثل مصر والأردن والمغرب استثمارات كبيرة في مشاريع الطاقة المتجددة، يُلاحظ أن شبكاتها الكهربائية لا تزال محدودة المرونة نسبياً وقليلة القدرة على التخزين. وفي هذا السياق، يمكن لتحلية مياه البحر أن تعمل كحل تكاملي، يحوّل الطلب الحيوي على المياه إلى أداة لتحسين كفاءة استخدام الطاقة، وعند دمج محطات التحلية مع تكنولوجيات الشبكات الذكية وأنظمة إدارة الطلب، يمكن لها أن تسهل دمج توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة وإن كان بصورة متقطعة، وتخفف الضغوط المفروضة على الموارد المائية.

إن ربط مصادر الطاقة المتجددة بالشبكة لتشغيل محطات التحلية قد يؤدي إلى عدد من التحديات المتعلقة بالنقل. أولاً، ستحدث خسائر في الطاقة أثناء النقل لمسافات طويلة. ثانيًا، إذا تم النقل عبر الشبكة الوطنية القائمة وكانت القدرة المطلوبة كبيرة نسبياً مقارنة بسعة خطوط النقل المتاحة، فقد تزيد الأعباء والأحمال على الشبكة بشكل كبير، مما يستلزم تعزيز المرونة وجهوداً إضافية لإدارة الطلب والإنتاج على المستوى

33 تُغذّي المحطة أيضاً الشبكة خلال ساعات النهار من خلال فائض الطاقة المتجددة ، وتعتمد على طاقة الشبكة ليلاً، وبالتالي لا توجد حاجة إلى أي حلول إضافية لتخزين الطاقة.

الوطني.[34] ثالثًا، حتى في حالة إنشاء خط نقل مخصص، فإن ذلك يستلزم استثمارات إضافية قد تؤثر على الجدوى الاقتصادية الإجمالية للمشروع. وبشكل عام، هناك عدد من التحديات التنظيمية والمرتبطة بالسياسات التي يجب معالجتها لضمان التنفيذ الناجح واستغلال إستراتيجية الربط بالشبكة بأقصى كفاءة.

قد يستلزم الإنتاج اللامركزي للطاقة المتجددة أيضاً إصلاحات على صعيد السياسات والقوانين والتنظيمات محددة. ومن الضروري وضع إطار تنظيمي ومرتبط بالسياسات يضمن تحقيق وصول عادل إلى الشبكة من قبل الغير (انظر الإطار 3.4)، وهو أمر لا يتحقق بالضرورة في جميع البلدان. ويجب أن يتلاءم الإطار التنظيمي لكل بلد مع خصائص سوق الكهرباء المحلية، ويشمل عناصر مثل الأسواق المفتوحة، وإجراءات وصول الغير إلى الشبكة مقابل رسوم النقل، واتفاقيات شراء الكهرباء مع القطاع الخاص، واتفاقيات الشراء أو التوريد.[35] ويستلزم تحديد تعرفة الكهرباء المستخدمة في مشاريع التحلية ورسوم نقل الطاقة عبر الشبكة إجراء تحليل دقيق وتفصيلي للشبكة والمنظومة بأكملها. وتعكس التعرفة ورسوم النقل الوضع العام لأحمال محطات التحلية وإنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، فضلاً عن التكلفة المرتبطة بالبنية التحتية الإضافية المطلوبة، مثل توسيع الشبكة، وخطوط النقل، وخدمات التخزين. كما يستلزم الأمر إجراء تقييم ودراسة دقيقة لآليات دعم المياه والكهرباء—بما في ذلك أشكال الدعم المباشر وغير المباشر والأسعار التفضيلية والرسوم التفاضلية—لتحديد الآثار التراكمية المحتملة ومعالجتها، وتقييم تأثيرها على الجدوى الاقتصادية الكليّة للمشروع.

بات من الضروري وضع إستراتيجية وطنية للتحلية تتناسب مع السياق الخاص بكل بلد، وتعتمد نهجاً على مستوى المنظومة بأكملها يعزز التكامل بين التحلية وقطاع الطاقة. فالعوامل المتعلقة بتوفر الأراضي الملائمة لتوليد الطاقة المتجددة، وممرات نقل الكهرباء إلى مواقع الطلب، والمسافات بين مواقع إنتاج الطاقة ومواقع وحدات التحلية، ستحدد في نهاية المطاف النموذج الأمثل لإمداد محطات التحلية بالطاقة. ويمكن أن تشمل نماذج الإمداد ما يلي: 1) محطة طاقة متجددة مخصّصة لكل محطة تحلية، على غرار نموذج التوليد الذاتي، 2) ممر نقل كهربائي مشترك تستخدمه عدة جهات منتجة للطاقة ويُخصَّص لتغذية مجموعة من محطات التحلية مع إبقائه معزولاً عن الشبكة الوطنية، 3) الربط بالشبكة الوطنية القائمة بحيث تعمل الشبكة كنظام موحّد يوفر مرونة أعلى في موازنة الأحمال. وستحدد طبيعة وحجم نظام الكهرباء الوطني، وخصائص الوضع العام للطلب، وتكلفة رأس المال، فضلاً عن أحجام محطات التحلية وتوزيعها الجغرافي المتوقع، ومقدار الطاقة المتجددة التي يمكن دمجها لتشغيل هذه المحطات. وستُسهم هذه العوامل في تحديد وتيرة تطوير البنية التحتية اللازمة، بما يتوافق مع خطط توسعة الشبكة وتعزيزها، وفي تقييم الخيار الأمثل بين إنشاء العديد من محطات التحلية الصغيرة ، أو الاعتماد على عدد محدود من المحطات المركزية ذات السعات الكبيرة. وبناءً على دراسات وتحليلات متخصصة، يمكن للإستراتيجية الوطنية للتحلية أن تقدِّم توصيات واضحة بشأن نماذج الطاقة المتجددة المفضَّلة والطموحات الواقعية الممكن تحقيقها، فضلاً عن تحديد الإصلاحات القانونية والتنظيمية والمعنية بالسياسات المطلوبة. ومن ثم، يصبح من الممكن تطوير البنية التحتية للطاقة والمياه وفق نُهُج وأساليب قائمة على الأنظمة.

34 يوضِّح مشروع التحلية في الدار البيضاء بالمغرب أهمية هذه الاعتبارات. فمن المتوقع أن يحتاج المشروع إلى نحو 1 تيراواط ساعة من الكهرباء سنوياً، أي ما يعادل نحو 2% من إجمالي الاستهلاك الوطني للطاقة في عام 2022. ويستلزم ذلك تزويده بقدرة (سعة) كهربائية إضافية تُقدَّر بنحو 100 ميجاواط من الشبكة. وفي حال الاعتماد على محطة لطاقة الرياح، وبافتراض معامل قدرة يبلغ 35%، ستتجاوز القدرة (السعة) المركبة المطلوبة 300 ميجاواط؛ وهي قدرة تكفي لتزويد مدينة مغربية متوسطة الحجم يبلغ عدد سكانها حوالي 500 ألف نسمة. كما أن نقل قدرة إضافية تقارب 300 ميجاواط عبر شبكة كهربائية تعمل بالفعل بالقرب من الحد الأقصى لها يتطلّب إدارة دقيقة ومنسقة لتفادي صعوبة التشغيل.

35 تشمل أمثلة الدعم المرتبط بالطاقة دعم الوقود الأحفوري المستخدم في توليد الكهرباء الحرارية، وتسهيلات تأجير الأراضي لمحطات الطاقة المتجددة، أو خطوط النقل، أو محطات التحلية. ففي مصر، على سبيل المثال، تختلف تعرفة الكهرباء بين القطاعات؛ إذ تتراوح في قطاع الري بين 1.94–2.00 جنيه مصري لكل كيلوواط ساعة، بينما تتراوح في قطاع المياه والصرف الصحي بين 1.94–2.34 جنيه مصري لكل كيلوواط ساعة للجهد المتوسط والجهد المنخفض على الترتيب. كذلك، تؤدي مستويات الدعم التفاضلية لأسعار الوقود إلى خفض تكلفة الغاز المستخدم في توليد الكهرباء إلى نحو 4 دولارات أمريكية لكل مليون وحدة حرارية بريطانية، وخفض تكلفة زيت الوقود إلى نحو 6,500 جنيه مصري للطن لتوليد الكهرباء، مقارنة بالأسعار المطبَّقة في القطاع الصناعي التي تبلغ نحو 4.75 دولارات أمريكية لكل مليون وحدة حرارية بريطانية للغاز، ونحو 10,500 جنيه مصري للطن لزيت الوقود (وفق القيم السارية حتى أبريل/نيسان 2025).

الإطار 3.4 • الإصلاحات القانونية والتنظيمية على مستوى السياسات في قطاع الطاقة بالمغرب لمساندة مشاريع التحلية المعتمدة على الطاقة المتجددة

قامت المغرب بتطوير وتحديث الإطار القانوني بما يتيح دمج مصادر الطاقة المتجددة. ويمنح القانون رقم 13-09 مطوري القطاع الخاص الحق في إبرام اتفاقيات شراء الكهرباء بين أطراف من القطاع الخاص، بما يسمح بإنتاج الكهرباء من مواقع بعيدة ونقلها مباشرة إلى المستهلك النهائي. ومع ذلك، لا يزال تنفيذ هذه الأحكام يواجه جملة من العقبات نتيجة التحديات المتعددة التي يعاني منها القطاع. ويتمثل التحدي الرئيسي الأول في قدرة الشبكة الكهربائية على استيعاب الطاقة المتجددة، وهو ما يستلزم استثمارات كبيرة لتعزيز مرونتها وكفاءتها التشغيلية. أما التحدي الثاني فيرتبط بالهيكل التنظيمي لسوق الكهرباء، لا سيمّا على مستوى الجهد المتوسط، حيث كانت مسؤولية التوزيع موزعة تقليدياً بين المكتب الوطني للكهرباء والماء الصالح للشرب من جهة، والمستثمرين من القطاع الخاص وشركات التوزيع العمومية (الشركات أو الهيئات العمومية لإدارة المرافق) الخاضعة لإشراف وزارة الداخلية. وبموجب القانون رقم 83-21 الصادر في يوليو/تموز 2023، أعيد تنظيم هيكل التوزيع ليصبح مكوناً من 12 شركة إقليمية (جهوية) متعددة الخدمات، جميعها تحت إشراف وزارة الداخلية. وغالباً ما تعتبر هذه الشركات المعنية بالتوزيع أن تطوير مشاريع الطاقة المتجددة من قِبل القطاع الخاص في إطار اتفاقيات شراء الكهرباء تهديد محتل لاستقرارها المالي.

لمعالجة هذه التحديات، منح القانون رقم 40-19 الصادر في فبراير/شباط 2023 شركات التوزيع الحق في شراء ما يصل إلى 40% من الكهرباء المتجددة المنتَجة وفقاً لأحكام القانون رقم 13-09 والموردة للمستهلكين ضمن نطاق توزيعها. إلا أن تفعيل هذا الإطار ما يزال معلقاً بصدور اللوائح التنفيذية لوزارة الانتقال الطاقي، فضلاً عن القرارات التنفيذية الخاصة بالهيئة المنظمة، وهي الوكالة الوطنية لتنظيم الطاقة. كما يعد القانون رقم 82-21 الصادر في فبراير/شباط 2023 ذو أهمية خاصة لقطاع الطاقة المتجددة، إذ يتيح التوليد الذاتي بسعات مختلفة لإنتاج الطاقة المتجددة لأغراض الاستهلاك الذاتي، مع السماح—على نحو خاص—للمنشآت التي تتجاوز قدراتها 5 ميجاواط بإنتاج الكهرباء في مواقع بعيدة ونقلها إلى مواقع الاستهلاك. ومع ذلك، وكما هو الحال مع القانون رقم 40-19، لم يدخل هذا القانون حيز التنفيذ بعد، إذ لا يزال ينتظر صدور اللوائح التنفيذية والقرارات التنظيمية.

تحدد هذه القوانين الأربعة الجوانب الأساسية للإطار المؤسسي المعني بالتحلية في المغرب. ويأتي ذلك، أولاً، في سياق القرار (على الرغم من كونه غير رسمي) المعني بتزويد جميع محطات التحلية بالطاقة المتجددة. ومن الأمثلة البارزة على ذلك مشروع محطة التحلية في الدار البيضاء–سطات بطاقة إنتاجية تبلغ 822 ألف متر مكعب يومياً، والتي من المتوقع تغذيتها بالطاقة من محطة رياح بقدرة 360 ميجاواط تقع عن بُعد في بئر أنزران . كما يُتوقع أن تقوم الشركات الإقليمية (الجهوية) متعددة الخدمات بدور مهم في نقل المياه المنتَجة من محطات التحلية إلى مراكز الاستهلاك. وفي هذا الإطار، أطلقت الشركة القائمة في الدار البيضاء في فبراير/شباط 2025 مناقصة لتشييد نظام نقل المياه من محطة التحلية بالدار البيضاء–سطات.

3.3. أوجه التآزر بين الهيدروجين الأخضر وتحلية المياه

تقوم منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بدور محوري في تشكيل مستقبل الهيدروجين الأخضر، مما يخلق فرصاً مبتكرة لقطاع تحلية المياه. وتستند هذه المبادرات إلى تعظيم الاستفادة من الموارد الوفيرة للطاقة المتجددة في المنطقة، لا سيما الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، لتسهيل إنتاج الهيدروجين الأخضر عبر تقنيات التحليل الكهربائي.[36] وقد أصبحت المنطقة فاعلاً رئيسياً في سوق الهيدروجين العالمي، إذ تستحوذ على نحو 13% من الاستثمارات العالمية في هذا المجال، رغم أن حصتها من إجمالي الناتج المحلي العالمي لا يتجاوز 4%. وتشير التوقعات إلى إمكانية ارتفاع مساهمة المنطقة إلى نحو 21% من إنتاج الهيدروجين ومشتقاته وتصديره عالمياً بحلول عام 2050 (المنتدى الاقتصادي العالمي ومؤسسة أكسينتور 2023). يعكس ذلك المكانة الإستراتيجية للمنطقة ودورها المحوري في تشكيل مستقبل اقتصاد الهيدروجين على المستوى العالمي. وتقود دولة الإمارات العربية المتحدة هذه الجهود، عبر استهداف إنتاج 1.4 مليون طن من الهيدروجين منخفض الكربون بحلول عام 2031 ضمن إستراتيجيتها الوطنية للهيدروجين. كما تواصل مصر والسعودية العمل على قدم وساق في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر والميثانول، مع استفادتهما من الموقع الجغرافي المتميز لكل منهما والاستثمارات الضخمة. وفي السياق نفسه، تمضي عُمان قدماً في تنفيذ إستراتيجيتها الوطنية للهيدروجين بهدف التحول إلى مُصدّر عالمي رئيسي بحلول عام 2030. وتستكشف كل من الأردن والمغرب وقطر فرصاً متزايدة في هذا القطاع، مع وضع المغرب أهدافاً طموحة للإنتاج بحلول عام 2030 وما بعدها. وتركّز هذه الجهود على مشاريع صناعية واسعة النطاق تستهدف الأسواق المحلية وأسواق التصدير، مع تخصيص نحو مليون هكتار من الأراضي لدعم مشروعات الهيدروجين الأخضر.

تُعد محطات التحلية مورداً رئيسياً محتملاً لتوفير المياه اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، لا سيما في بلدان المنطقة التي تعاني من شح الموارد المائية. ويستلزم إنتاج الهيدروجين الأخضر كميات كبيرة من المياه. ونظرياً، يحتاج إنتاج 1 كجم من الهيدروجين إلى 9 لترات من الماء (أي ما يعادل 9 كجم). أما في التطبيقات العملية، فغالباً ما تتراوح كمية المياه المطلوبة بين 15 و30 لتراً، نظراً لمحدودية كفاءة تكنولوجيا التحليل الكهربائي وضعف كفاءة الإنتاج بوجه عام. وبالنظر إلى محدودية موارد المياه العذبة في المنطقة، وتنافس الطلب عليها بين الاستخدامات البلدية والزراعية والصناعية، سيكون من الصعب توفيرها على نحو مستدام. فعلى سبيل المثال، يتطلب مستهدف دولة الإمارات لإنتاج 1.4 مليون طن من الهيدروجين الأخضر بحلول عام 2031 ما يتراوح بين 21 و42 مليون متر مكعب من المياه، وهو ما يعادل نحو 0.5–0.9 % من الطلب الوطني الحالي على المياه.[37] كما تتطلب تكنولوجيات التحليل الكهربائي عادةً معالجة أولية للمياه العذبة لرفع جودتها، مما يزيد من استهلاك الطاقة ويؤثر على تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر وقدرته التنافسية في السوق. وفي المقابل، يمكن أن يكون استخدام مياه البحر المحلاة كمصدر لمياه التغذية لعملية التحليل الكهربائي خياراً أكثر ملاءمة لتحقيق أهداف إنتاج الهيدروجين الأخضر وطموحات التصدير في العديد من بلدان المنطقة، حيث تُضاف المياه المحلاة إلى الموارد التقليدية من المياه السطحية والجوفية، دون التنافس مع القطاعات الأخرى، كما أن جودتها العالية تجعلها صالحة للاستخدام مباشرة في التحليل الكهربائي دون الحاجة إلى معالجة إضافية.

36 يتضمن التحليل الكهربائي فصل جزيء الماء إلى الهيدروجين والأكسجين. ويُعد التقنية الأكثر انتشاراً لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام مياه البحر المحلاة. ورغم ريادته، توجد تكنولوجيات وعمليات بديلة تهدف إلى تحقيق الهدف ذاته، من أبرزها العمليات الكيميائية الحرارية، التي تعتمد على سلسلة من التفاعلات الكيميائية لإنتاج الهيدروجين من الماء باستخدام مصادر حرارة عالية، مثل الطاقة الشمسية المركَّزة أو الطاقة النووية، لتحفيز هذه التفاعلات. ومع ذلك، تواجه هذه البدائل تحديات تقنية جوهرية، وتظل جدواها التجارية محوراً مستمراً للبحث والتطوير. وتُعد كفاءتها وقابليتها للتوسع مقارنةً بالتحليل الكهربائي من المعايير الرئيسية عند تقييم إمكاناتها المستقبلية.

37 توفر شركات/محطات التصنيع عادةً إرشادات تفصيلية ومواصفات دقيقة لجودة المياه المطلوبة لضمان التشغيل الأمثل لأنظمة التحليل الكهربائي.

ويمكن لاستغلال أوجه التآزر بين الهيدروجين الأخضر والتحلية أن يعزز الجدوى المالية وكفاءة استخدام الطاقة لمحطات التحلية. فمع امتلاك العديد من بلدان المنطقة خططاً طموحة لبناء محطات تحلية واسعة النطاق لتلبية الطلب المستقبلي، يتوقف تحقيق مستويات الإنتاج المتوقعة على عدة عوامل، منها مستويات التنمية العمرانية والتوسع الحضري، ونصيب الفرد من استهلاك المياه ، وإعادة تدوير وإعادة استخدام مياه الصرف المعالجة، وغيرها من العوامل المؤثرة.[38] ونظراً لارتفاع التكلفة الرأسمالية للتحلية، واحتياج الهيدروجين الأخضر إلى مياه عالية النقاء، يمكن تعظيم الفائدة المتبادلة بينهما عبر إنشاء محطات إنتاج الهيدروجين الأخضر بالقرب من محطات التحلية، مع مراعاة الاعتبارات الفنية والمالية الأخرى. إذ يتيح هذا التقارب الجغرافي تزويد محطات إنتاج الهيدروجين الأخضر بالمياه المحلاة، وخاصةً عندما يكون الطلب على الموارد المائية الأخرى أدنى من المتوقع أو لم يصل إلى الحد الأقصى. كما يسهم هذا النموذج في رفع معدل استخدام القدرة الإنتاجية لمحطة التحلية، ويوفر المياه اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر بتكلفة أقل بفضل وفورات الحجم مقارنةً بمحطات تحلية صغيرة تُنشأ لتلبية احتياجات محطة إنتاج الهيدروجين فقط. ويمكن أن تؤدي القيمة المرتفعة للهيدروجين الأخضر إلى تعزيز العائد الاقتصادي للمشروع المشترك (محطة هيدروجين مع محطة تحلية) مقارنة بوجود محطة تحلية فقط.

38 المثال الواضح على ذلك هو محطة التحلية في العلمين بمصر التي تعمل بنسبة لا تتجاوز 10–15 % من السعة (القدرة) المركبة الخاصة بها، نتيجة عدم وصول معدلات النمو السكاني إلى المستوى المخطط.

4 ضمان الاستدامة البيئية والاجتماعية لتحلية المياه

ظهرت تحلية المياه كرد فعل على تزايد الإجهاد المائي في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، بهدف تأمين مصدر منتظم وموثوق للمياه، والحد من الآثار السلبية للإفراط في استخراج المياه السطحية وموارد المياه الجوفية. وفي جميع أنحاء المنطقة، أصبح من الصعب بشكل متزايد تحديد مصادر جديدة للمياه السطحية، حيث تم بالفعل تطوير معظم الخيارات المجدية من الناحيتين التقنية (الفنية) والاقتصادية. وأدى ذلك إلى زيادة استخدام موارد المياه الجوفية، التي تمثل نسبة كبيرة من جميع عمليات سحب المياه. غير أن هذه الموارد عادةً ما تكون ضعيفة التنظيم ويتم سحبها بمعدل أسرع من معدل تجديدها، مما يؤدي إلى الاستغلال المفرط والاستنزاف المستمر للمياه الجوفية. وقد يؤدي هذا الاستغلال المفرط والاستخدام غير المستدام للموارد المائية إلى هبوط الأرض، وانخفاض منسوب المياه الجوفية، وارتفاع مستويات الملوحة، مما يجعل المياه غير صالحة للاستهلاك البشري، ناهيك عن فقدان النظم الإيكولوجية الحيوية. وبالمثل، يمكن أن يؤدي الإفراط في سحب المياه السطحية إلى إرباك التوازنات الهيدرولوجية، وتدهور الموائل المائية، وتهديد التنوع البيولوجي. وفي هذا السياق، يمكن أن تحقق تحلية المياه عدداً من المساهمات الإيجابية البيئية والاجتماعية من خلال تخفيف الضغط على مصادر المياه التقليدية. ويمكن أن تؤدي زيادة توافر المياه عن طريق تحلية المياه المالحة إلى تحسين قدرة المجتمعات المحلية على الحصول عليها، وتعزيز نواتج الصحة العامة، بالإضافة إلى دعم الاستقرار الاجتماعي والاقتصادي في المناطق التي تعاني من شح المياه. ويمكن تحقيق الاستفادة القصوى من ذلك عن طريق اتباع نُهُج وأساليب الاقتصاد الدائري التي تشجع الاستثمارات الموازية في تجميع المياه ومعالجتها وإعادة استخدامها، بهدف زيادة المنافع البيئية والاجتماعية المتأتية من تحلية المياه.

مع ذلك، لا تخلو تحلية المياه من احتمال حدوث آثار سلبية من الناحيتين البيئية والاجتماعية، لا سيما في المناطق القاحلة التي تعاني من شح المياه، مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويمكن أن تظهر هذه الآثار من خلال التأثيرات المحلية المرتبطة بمرحلة التصميم والتطوير الأولي وطوال مرحلتي التشغيل والصيانة. وترتبط الآثار الرئيسية طويلة الأمد باعتبارات التصميم، مثل موقع مرافق مآخذ المياه، والآثار التشغيلية المرتبطة بتوليد الرجيع الملحي الناتج عن التحلية والتخلص منه، وتغير درجة حرارة المياه، واستخدام الكيماويات وتصريفها، وذلك على سبيل المثال، بالإضافة إلى آثارها على التنوع البيولوجي البحري. وهناك أيضا عوامل خارجية سلبية مرتبطة بالطاقة وكثافة الكربون، لا سيما انبعاثات غازات الدفيئة، والتي تم تناولها في القسمين 2 و3، بالإضافة إلى تحدياتٍ ناشئة تتعلق بالآثار التراكمية المحتملة بسبب التطوير المتزايد لتحلية المياه في بعض المناطق. وهناك عدد من الروابط المعقدة بين المخاطر البيئية والاجتماعية، مثل الآثار على الموائل البحرية التي تؤثر على مصائد الأسماك أو سبل كسب العيش في قطاع السياحة، أو تحديد مواقع البنية التحتية التي تؤدي إلى استملاك الأراضي (الاستحواذ على الأراضي/مصادرة الأراضي) أو النزوح لدوافع اقتصادية، أو تقييد الوصول إلى الموارد الطبيعية. وبالتالي، تتطلب مشروعات تحلية المياه نُهُجاً متكاملة لإدارة المخاطر البيئية والاجتماعية التي يمكنها معالجة الجوانب الاجتماعية المحتملة أيضاً، مثل عدالة الاستفادة من منافع المشروع، والصحة والسلامة المجتمعية، والمشاركة الاستباقية مع أصحاب المصلحة المتأثرين به. ويُعد فهم هذه التحديات أمراً بالغ الأهمية لوضع تدابير فعالة للتخفيف من الآثار السلبية للتحلية وتنفيذها، وضمان مساهمتها الإيجابية في تحقيق الأمن المائي دون المساس بجوانب السلامة البيئية

والاجتماعية. ولهذا الأمر أهميته الخاصة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا نظراً لأن المنطقة تجمع بين أعلى تركيز وقدرة لمحطات تحلية المياه وبين هشاشة المسطحات المائية والتكنولوجيات القديمة كثيفة الاستخدام للطاقة.

4.1. الآثار البيئية لتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

يشكل تصميم وتحديد مواقع مرافق مآخذ سحب المياه البحرية لمحطات التحلية تحدياً بيئياً كبيراً بسبب عمليات سحب واحتجاز الكائنات البحرية. ويُعتبر الأثر الواقع على الكائنات البحرية بسبب سحب المياه من أكبر المخاوف، حيث يمكن أن تؤدي عمليات سحب المياه إلى احتجاز هذه الكائنات والأحياء وحشر الأكبر حجماً منها أمام مصافي السحب، في حين يتم شفط الكائنات صغيرة الحجم مثل العوالق وبيض الأسماك واليرقات إلى داخل نظام المعالجة، حيث لا يمكنها النجاة من المعالجة الميكانيكية والكيميائية. علاوة على ذلك، يمكن أن يتداخل بناء وتشغيل هذه المرافق البحرية مع تيارات المياه ونقل الرواسب، مما قد يؤثر على الملاحة وغيرها من الأنشطة البحرية. وتمثل هذه الأمور مشكلة خاصة للمحطات ذات حجم السحب العالي، حيث تزيد عمليات تصريف المياه باستمرار من تكرار مثل هذه الحوادث. بينما يمكن للمآخذ تحت السطح مثل آبار الشاطئ أو الآبار الجوفية تقليل هذه الآثار من خلال تقليل سرعة سحب المياه وتجنب الاتصال المباشر بالحياة البحرية، إلا أنها قد تتضمن التسبب في حدوث اضطرابات أولية كبيرة في أثناء مراحل البناء والإنشاء بسبب استبدال الرواسب أو إعادة تعليقها. وقد يؤثر اختيار نوع مأخذ المياه أيضاً على الخصائص الكيميائية والحرارية للرجيع الملحي الناتج عن التحلية التي يتم تصريفها، مما قد يؤثر بشكل أكبر على النظم الإيكولوجية البحرية.

يمكن أن يؤثر التخلص من المياه والنفايات المالحة عالية التركيز، وهي أحد المنتجات الثانوية لعملية التحلية، بشكل كبير على البيئات البحرية المحلية. ويختلف تأثيرها تبعاً لعملية التحلية المستخدمة. فعادة ما يكون للرجيع الملحي الناتج عن التحلية الحرارية أقل تركيزاً لكن مرتفعة الحرارة، في حين أن الرجيع الملحي الناتج عن التحلية بتقنية التناضح العكسي تكون مرتفعة الملوحة لكن درجة حرارتها تشبه درجة حرارة مياه البحر. وعند إعادتها إلى البحر، يمكن أن تؤدي إلى ارتفاع مستويات الملوحة وتغيير درجات حرارة المياه،[39] حيث تكون الشعاب المرجانية حساسة بشكل خاص للإجهاد الكيميائي والحراري. فعلى سبيل المثال، شهد خليج العقبة حالات ابيضاض للشعاب المرجانية التي تعود إلى الإجهاد الحراري والملحي الناتج عن محطات تحلية المياه القريبة (بيترسن وآخرون 2018). كما أن ارتفاع مستويات الملوحة قد يتسبب في إضعاف قدرة الأسماك والنباتات على تنظيم امتصاص الماء والمغذيات، مما يؤدي بدوره إلى تقليل معدلات نجاتها وفقدان التنوع البيولوجي.[40] وقد تؤدي زيادة الملوحة أيضاً إلى تقليل معدلات تكاثر الأنواع البحرية، وتقليل قابلية ذوبان الأكسجين في المياه، وتعطيل دورات المغذيات داخل النظم الإيكولوجية البحرية. ويمكن أن تؤدي هذه التغيرات إلى اختلالات بيئية، بالإضافة إلى تكاثر الطحالب وغيرها من الظواهر الضارة. ونظراً لأوجه الترابط والتداخل بين سلامة النظم الإيكولوجية البحرية والمجتمعات المحلية، فقد تؤثر هذه التغيرات البيئية على الأمن الغذائي، وممارسات الصيد التقليدية، والأنشطة الاقتصادية في المناطق الساحلية المتأثرة.

39 على سبيل المثال، أظهرت دراسة أجريت بالقرب من جدة بالمملكة العربية السعودية أن درجات حرارة المياه حول نقاط التصريف كانت أعلى باستمرار بمقدار 2–5 درجات مئوية مقارنة بالمناطق المحيطة، مما أدى إلى إجهاد وابيضاض جزئي لأنواع الشعاب المرجانية المحلية. وأظهرت أبحاث مماثلة حول شرم الشيخ في مصر أن درجات حرارة المياه بالقرب من مخارج تحلية المياه كانت أعلى بمتوسط 2–3 درجات مئوية من درجات حرارة البحر المحيطة، مما تسبب في حالات ابيضاض للشعاب المرجانية المحلية (فاين وآخرون 2019).

40 على سبيل المثال، هناك نوع من الأعشاب البحرية المتوطنة في البحر المتوسط يسمى بوسيدونيا أوشينيكا، يُعد عنصراً حيوياً للنظام الإيكولوجي البحري للمنطقة ويحظى بالحماية بموجب اللوائح البيئية نظراً لقيمته البيئية الكبيرة والخدمات التي يقدمها (بيريس وبيكار 1975). ولذلك قام المجلس الأوروبي بإدراج أعشاب البحر المتوسط في كتالوج الموائل الطبيعية ذات الأولوية العالية للحفظ (التوجيه EEC/43/92 بشأن الحفاظ على الموائل الطبيعية الحيوانية والنباتية، 21 مايو/أيار 1992). ومع الزيادة المتوقعة في تركيب محطات تحلية جديدة، أصبحت قدرة هذه الأعشاب على تحمل زيادة الملوحة من التحديات والقضايا الملحة. وتشير الأبحاث التي أجراها غاسيا وآخرون (2007) إلى أن مستوى ملوحة يقارب 45 ملليغرام لكل لتر يمكن أن يؤدي إلى موت نسبة 50% من أعشاب بوسيدونيا أوشينيكاخلال 15 يوماً، في حين تنخفض معدلات نموها بنسبة 50% عند مستوى ملوحة تعادل 43 ملليغرام لكل لتر.

تشكل الإضافات الكيميائية والمعادن الثقيلة المستخدمة في تحلية المياه مخاطر إضافية على البيئات البحرية. وتُعد هذه المواد الكيميائية ضرورية لمنع التكلس ومكافحة نمو الميكروبات، مما يعزز كفاءة وطول عمر أنظمة التحلية. غير أنها يمكن أن تؤدي إلى عواقب بيئية وخيمة إذا لم تتم إزالتها بشكل كامل من الرجيع الملحي الناتج عن التحلية الذي يتم تصريفه. على سبيل المثال، يمكن أن تتراكم مضادات التكلس في البيئة البحرية وتتداخل مع عمليات التكلس الحيوية للكائنات مثل الشعاب المرجانية والمحار (بيلكين وآخرون 2017؛ وخورداغي 1997؛ ومورتون، وكاليستر، ووايد 1996).[41] بالإضافة إلى ذلك، يمكن للكلور، المستخدم على نطاق واسع في الوقاية من التلوث الحيوي، أن يتفاعل مع المواد العضوية في مياه البحر لتكوين مركبات سامة مثل الهالوميثانات الثلاثية وأحماض الخليك الهالوجينية (خورداغوي ومنسي 1983)، والتي تسبب الضرر للحياة البحرية وربما لصحة الإنسان. كما لوحظ تلوث كبير في الموائل البحرية حول مخارج محطات التحلية، حيث تحتوي المياه والرواسب حول هذه المخارج على تركيزات كبيرة من الهيدروكربونات ومضادات التلوث ومضادات التكلس (سعيد، وخورداغي، والحشاش 1999؛ وميري وتشويخي 2005). على سبيل المثال، يمكن أن يتأثر نمو وبقاء أشجار المنغروف بزيادة الملوحة ومستويات الملوثات. ففي بعض المناطق والبلدان مثل الإمارات العربية المتحدة، لوحظ تضرر أشجار المنغروف في المناطق المجاورة لمحطات التحلية، مما يؤثر على الموئل بأكمله الذي يدعم مجموعة متنوعة من أنواع الطيور والأسماك والقشريات (باليولوجوس وآخرون 2019). ويمكن أن يؤدي تدهور مثل هذه الموائل إلى عواقب اجتماعية واسعة النطاق، بما في ذلك فقدان خدمات النظم الإيكولوجية، وزيادة قابلية السواحل للتأثر، وانخفاض فرص تحقيق الدخل للسكان المحليين المعتمدين على هذه النظم الإيكولوجية.

قد يكون لتحلية المياه أثر كبير أيضاً على الموائل الساحلية والبرية المجاورة، ومنها أشجار المنغروف، والأراضي الرطبة، والكثبان الرملية، وغيرها من النظم الإيكولوجية الساحلية، التي توفر خدمات أساسية مثل الحماية الساحلية، واحتجاز الكربون، والموائل الحيوية للتنوع البيولوجي. وغالباً ما تكون هذه المناطق شديدة الحساسية، وقد تتدهور بسبب أعمال تطهير وتمهيد الأراضي، أو تغير النظام الهيدرولوجي، أو التلوث في أثناء مراحل البناء والتشغيل. وقد يؤدي هذا التدهور إلى الحد من الحماية الطبيعية للمجتمعات المحلية الساحلية من العواصف المفاجئة والتآكل، مما يؤثر على السلامة العامة ومواقع التراث الثقافي، وسبل كسب عيش السكان المعتمدين على هذه النظم. ويجب إجراء دراسات بيئية أساسية قوية، بما في ذلك التقييمات الموسمية، من أجل التقييم الصحيح للآثار المحتملة على النظم الإيكولوجية البحرية والبرية.

يمكن أن تشكل الآثار المجمعة لسحب أو احتجاز الكائنات والأحياء البحرية، وزيادة مستوى الملوحة، والملوثات الكيميائية الناتجة عن أنشطة التحلية تهديداتٍ كبيرة للتنوع البيولوجي البحري. وتكشف الملاحظات البيئية طويلة الأمد عن تحولات في التنوع البيولوجي بالقرب من مناطق النشاط المكثف للتحلية، مع زيادة في أنواع مثل قناديل البحر والطحالب القادرة على تحمل درجات أعلى من الملوحة (حسيني وآخرون 2021). وتزدهر مثل هذه الأنواع في ظل تغير الظروف، لكنها قد لا تدعم نفس مستويات التنوع البيولوجي التي كانت توفرها الأنواع الأصلية التي حلت محلها. ويزيد ارتفاع الملوحة الناتج عن تصريف الرجيع الملحي من تفاقم هذه الآثار من خلال خلق ظروف مفرطة في الملوحة قد تضر بالحياة البحرية، خاصة الكائنات الحية القاعية والشعاب المرجانية، مما يسبب ضغوطاً فسيولوجية لدى الأنواع البحرية تؤثر على نموها وتكاثرها ومعدلات بقائها. ويمكن أن تتراكم الملوثات الكيميائية، بما في ذلك المواد الكيميائية المعالجة المتبقية والمعادن الثقيلة، في البيئة البحرية، مما يؤدي إلى سمية مياه البحر واختلال توازنها الكيميائي، وبالتالي التأثير على سلامة الكائنات البحرية وتنوعها وتفاقم تدهور النظم الإيكولوجية البحرية. ويمكن أن تؤدي هذه الآثار إلى تراجع كبير في التنوع البيولوجي البحري، مما يغير هيكل النظام الإيكولوجي ووظائفه، ويعطل شبكات الغذاء، مع توالي آثارها على الأمن الغذائي، والأنشطة الثقافية، وسبل كسب عيش المجتمعات الساحلية. فعلى سبيل المثال، تم توثيق انخفاض العوالق، وهي جزء حيوي من سلسلة الغذاء البحرية، في الخليج العربي مع وجود آثار على أنواع الأسماك ذات الأهمية التجارية في السلسلة الغذائية (شاريفينيا وآخرون 2019).

41 وفقاً لخورداغي (1997)، تتراوح مستويات مضادات التكلس عند مخارج المحطات بين 0.8 و1.0 جزء في المليون، بينما أبلغ مورتون وكاليستر، ووايد (1996) عن مستويات تبلغ 0.53 جزء في المليون.

يمكن أن تؤدي هذه الاضطرابات البيئية بدورها إلى تداعيات مباشرة على الاقتصادات المحلية من خلال إعاقة تقديم الخدمات وتراجع الدخل من مصائد الأسماك والنشاط السياحي. فعلى سبيل المثال، في الكويت، ارتبطت عمليات التفريغ الحراري من محطات التحلية بتكرار تكاثر قناديل البحر، مما يؤدي إلى انسداد مآخذ السحب في منشآت ومحطات الطاقة والتحلية. وأدت هذه الحالات إلى توقف عمليات التشغيل وزيادة تكاليف الصيانة، مما تسبب في تعطيل خدمات المياه والطاقة الحيوية (الشمري والقلاف 2024). وفي البحرين، ارتبط ارتفاع الملوحة الناتج عن عمليات التصريف الناتجة عن التحلية بانخفاض كبير في مصائد الأسماك المحلية، حيث أفاد الصيادون بتراجع كمية الصيد اليومية من نحو 40 كجم إلى 3 كجم فقط. وأصبحت الأنواع المميزة مثل البومفريت الفضي والشاد نادرة بشكل متزايد، مما يهدد الأمن الغذائي وسبل كسب العيش التقليدية في المجتمعات المحلية الساحلية (منير 2025). وفي مصر، أدى تدهور الشعاب المرجانية على ساحل البحر الأحمر، الناتج في جانبٍ منه عن أنشطة التنمية الساحلية والبنية التحتية المرتبطة بمحطات التحلية، إلى تعريض التنوع البيولوجي البحري وعائدات السياحة للخطر. وأعربت المنظمات البيئية غير الحكومية، ومنها جمعية الغردقة لحماية البيئة والحفاظ عليها، بالإضافة إلى المجتمعات المحلية عن مخاوفها بشأن مدى جدوى استمرار النموذج الحالي للنشاط السياحي الذي يهدد الموائل البيئية الهشة على المدى الطويل (عز 2025؛ وجمعية الغردقة لحماية البيئة والحفاظ عليها 2022؛ ومنير 2022).

تتزايد احتمالات حدوث الآثار التراكمية المرتبطة بتطوير أنشطة تحلية المياه نظراً للتوسع المتنامي الذي تشهده بعض أجزاء منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في محطات التحلية، بالإضافة إلى الخصائص الفريدة لمسطحاتها المائية. وقد يؤدي استمرار تصريف الرجيع الملحي الناتج عن التحلية والمواد الكيميائية والتلوث الحراري من عدة محطات قريبة جغرافياً من بعضها البعض بمرور الوقت إلى مستويات تصريف تتجاوز مجتمعةً القدرةَ الاستيعابية للمسطح المائي المستقبل لها. وتختلف مخاطر تراكم هذه الآثار بمرور الوقت بشكل كبير اعتماداً على خصائص البيئة البحرية المحيطة. فمن غير المرجح أن يشهد المحيط الأطلسي، بحجمه الهائل وحركة مياهه الديناميكية، آثاراً تراكمية كبيرة نظراً لسرعة الرجيع الملحي الناتج عن التحلية بسرعة. على النقيض من ذلك، يواجه البحر المتوسط، كونه بحراً شبه مغلق وبطيء التبادل المائي مع المحيط الأطلسي، ارتفاع احتمالات حدوث الآثار التراكمية، في حين يعتبر الخليج العربي والبحر الأحمر معرضين بشكل خاص للخطر بسبب تزايد عدد محطات التحلية وضحالة عمقهما، وضعف التبادل المائي، بالإضافة إلى خصائصهما الطبيعية الخاصة التي تحد من التخفيف والتشتيت الطبيعي للرجيع الملحي. وهذا يعني أن تصريف الملوثات والمياه المالحة من محطات التحلية يمكن أن يتراكم بمرور الوقت، مما يؤدي إلى تفاقم مستويات الملوحة المرتفعة بطبيعتها.

يتطلب غياب التوافق العلمي في الآراء بشأن الآثار التراكمية المحتملة اتباعَ نهج احترازي. فعلى الرغم من أن الآثار المحلية تكون في أغلبها جيدة التوثيق، فعادة ما يكون هناك قدر أقل من الإجماع على الآثار التراكمية، حيث يعكس تباين الآراء مدى تعقيد تقييم الآثار البيئية لتحلية المياه. ولا تُعد [42] الآثار المحتملة لتحلية المياه معزولة، بل تتفاعل مع ضغوط بيئية أخرى مثل التلوث والصيد الجائر وتغير المناخ، مما يجعل من الصعب عزلها بمفردها. ويتطلب فهم كيفية ترجمة الآثار المحلية إلى آثارٍ إقليمية أوسع بياناتٍ ونمذجةً واسعة، وهو ما قد يكون من الصعب الحصول عليه وتفسيره. ونتيجة لذلك، لا يزال فهم الآثار الإقليمية الأوسع تحدياً كبيراً، خصوصاً في المسطحات المائية شبه المغلقة والحساسة للغاية مثل الخليج العربي أو البحر الأحمر. ونظراً لاعتماد العديد من السكان المحليين على هذه النظم الإيكولوجية البحرية في العمل والتغذية والهوية الثقافية، فقد يؤدي الإخفاق في معالجة المخاطر التراكمية إلى أضرار اجتماعية واقتصادية طويلة الأمد. وفي ظل غياب التوافق العلمي، سيقتضي النهج الاحترازي إعطاء الأولوية لمنع الأضرار البيئية غير القابلة للإصلاح، حتى في ظل عدم اليقين العلمي، من خلال تنفيذ تقييمات شاملة للآثار التراكمية، والتأكيد على ممارسات الإدارة التكيفية التي تتيح المرونة والاستجابة للاكتشافات العلمية الجديدة والتغيرات البيئية، والدعوة إلى استخدام أفضل التكنولوجيات المتاحة لتقليل البصمة البيئية.

42 انظر على سبيل المثال باباريلا، وداغوستينو، وبيرت 2022؛ ولو كوين وآخرين 2021؛ وسعيد وإرشاث والتيسان 2019.

4.2. إدارة الآثار البيئية والاجتماعية لتحلية المياه والتخفيف منها

النُهُج المتبعة على مستوى البلدان ومتطلبات جهات التمويل بشأن التقييمات البيئية

يسترشد تطوير تحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وتشغيلها بمجموعة متنوعة من الاتفاقيات العالمية والمعاهدات الإقليمية والقوانين واللوائح التنظيمية المحلية، بالإضافة إلى المتطلبات والاشتراطات التي يفرضها المقرضون. وتضمن هذه الأطر التزام ممارسات تحلية المياه بالمعايير الدولية للاستدامة البيئية والمسؤولية الاجتماعية التي تشمل مجموعة واسعة من مبادئ وأدوات التقييم البيئي (اللوائح الإلزامية، والحوافز المستندة إلى الأسواق، والتدابير الطوعية) الضرورية للتخفيف من الآثار البيئية والاجتماعية السلبية المرتبطة بتحلية المياه، وضمان مساهمة هذه المرافق بشكل إيجابي في تحقيق أهداف الاستدامة الإقليمية. وتشمل الأمثلة معايير الأداء الخاصة بسرعة مأخذ مياه البحر، ودرجة حموضة الرجيع الملحي الناتج عن التحلية، ودرجة الحرارة، ومعايير التصميم التي تحدد الحد الأدنى لطول مجرى تدفق الرجيع الملحي وعمق نقطة التصريف، والتزامات التعويض عن تقديرات النفوق في مصائد الأسماك. ومن الجدير بالذكر أن المتطلبات تُعد أكثر انتشاراً فيما يخص تصريف الرجيع الملحي مقارنة بسحب مياه البحر. وعلى الرغم من عدم وجود لوائح تنظيمية محددة تتعلق بانبعاثات غازات الدفيئة، فإن بعض البلدان تفرض متطلبات الإفصاح عن المعلومات كجزء من عملية مراجعة تقييم الأثر البيئي والاجتماعي أو متطلبات استخدام الطاقة المتجددة التي قد تكون شرطاً للحصول على الموارد الميسّرة.

تسهم الاتفاقيات الدولية بدور محوري في تشكيل البروتوكولات البيئية والممارسات المستدامة الخاصة بتطوير تحلية المياه. ومن أبرز هذه المعاهدات اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار، التي أنشئت عام 1982، والتي تحكم جميع جوانب الأنشطة البشرية في محيطات وبحار العالم، بالإضافة إلى حقوق ومسؤوليات البلدان في إدارة واستخدام الموارد البحرية. وتتطلب هذه الاتفاقية قيام مرافق التحلية بإدارة تصريف الرجيع الملحي الناتج عن التحلية لتجنب تلويث البيئات البحرية، مع التشديد على حماية التنوع البيولوجي واستدامة سلامة النظم الإيكولوجية البحرية. وتكمل اتفاقية التنوع البيولوجي، التي أنشئت في عام 1992، اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار من خلال تعزيز الحفاظ على التنوع البيولوجي، وضمان قيام تحلية المياه بالحد قدر الإمكان من آثارها على الحياة البحرية، والحفاظ على خدمات النظام الإيكولوجي، وحماية الأنواع المحلية والمهاجرة على حد سواء. وتحمل هذه الاتفاقيات البيئية تداعيات اجتماعية مهمة، خصوصاً في المجتمعات الساحلية التي تعتمد مصادر رزقها، مثل الصيد أو السياحة، على سلامة نظمها الإيكولوجية البحرية. وتسهم معاهدات دولية أخرى، مثل تلك التي تهدف إلى تنظيم انبعاثات غازات الدفيئة والحد منها، في إنشاء نظام للمساءلة يتجاوز حدود البلد الواحد.

تعمل المعاهدات الإقليمية في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا على تكييف هذه المبادئ العالمية لتناسب سياقات جغرافية وبيئية محددة، مما يعزز التعاون الإقليمي من أجل معالجة التلوث وإدارة البيئة. فعلى سبيل المثال، توفر اتفاقية الكويت الإقليمية للتعاون لحماية البيئة البحرية من التلوث، التي أطلقت في عام 1978، إطاراً تعاونياً لدول الخليج العربي لمعالجة التلوث بفاعلية. وتشجع على اعتماد أفضل الممارسات والتكنولوجيات التي تقلل من تصريف النفايات والملوثات الضارة في البيئات البحرية. وبالمثل، تفرض الاتفاقية الإقليمية لحماية البحر الأحمر وخليج عدن، التي أنشئت عام 1982، ضوابط صارمة على الأنشطة الصناعية لحماية النظم الإيكولوجية البحرية الحساسة. وعلى الرغم من أن تحلية مياه البحر لم تُذكر صراحةً في هذه الاتفاقيات، فإنها تصنف على أنها "نشاط بري" يخضع لهذه الاتفاقيات. وتهدف اتفاقية برشلونة لحماية البيئة البحرية والمنطقة الساحلية في البحر المتوسط السارية منذ عام 1976، إلى الحد من أوجه التلوث البحري وإدارة المناطق الساحلية للبحر المتوسط على نحو مستدام، وتم تعديلها في ديسمبر/كانون الأول عام 2021 لتشمل تصريف الرجيع الملحي الناتج عن أنشطة محطات تحلية المياه. واستناداً إلى اللوائح التي طبقتها الأطراف الموقعة على اتفاقية برشلونة، ظهرت عدة مبادرات لصياغة معايير بيئية تتعلق تحديداً بتحلية المياه، بما في ذلك قيم حدود تصريف الرجيع الملحي الناتج عن التحلية، وأفضل التكنولوجيات المتاحة، والممارسات البيئية،

إلى جانب تدابير إقليمية مثل إدراج التحلية في سياق بروتوكول الحماية من التلوث من المصادر والأنشطة البرية الذي يهدف إلى الحد من تلوث البيئة البحرية من المصادر البرية والقضاء عليه (برنامج الأمم المتحدة للبيئة لعام 2003).

تضع القوانين واللوائح التنظيمية الوطنية في بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إطاراً لإجراءات التقييم البيئي والاجتماعي الخاصة بتطوير محطات التحلية. وعادة ما تتطلب هذه القوانين والتشريعات تقييمات تفصيلية للأثر البيئي والاجتماعي لتحديد الآثار الجوهرية واقتراح التدابير والإجراءات التي تكفل التخفيف منها قبل اعتماد مشروعات التحلية. وتعد تقييمات الأثر البيئي والاجتماعي ضرورة للتنبؤ بالآثار البيئية والاجتماعية في مرحلة مبكرة، مما يتيح تصميم وتنفيذ تدابير التخفيف قبل وأثناء البناء والتشغيل. كما تسهم هذه التقييمات بدور حيوي في مراقبة الآثار البيئية والاجتماعية والتعامل معها في أثناء التشغيل لضمان عدم تجاوز الأنشطة المستمرة حدود الآثار المتوقعة ومعالجة أي عواقب غير متوقعة في وقتها. بالإضافة إلى ذلك، تعد هذه التقييمات عنصراً أساسياً في عمليات التحقق من استعادة أو تعويض الظروف البيئية بعد بدء تشغيل المحطات، وتقييم الآثار طويلة الأجل للمشروعات. ويزداد الإقرار بأهمية الأبعاد الاجتماعية كجزء أصيل من هذه التقييمات، بما في ذلك الآثار المحتملة على سبل كسب العيش واستخدام الأراضي والفئات السكانية الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية، إلى جانب غيرها من العناصر. وقد تشترط الأطر الوطنية أيضاً إجراء مشاورات أصحاب المصلحة في إطار إجراءات تقييم الآثار البيئية والاجتماعية، رغم أن هذه المشاورات غالباً ما تكون محدودة النطاق. ويمكن أن يساعد إنشاء آليات واضحة لمشاركة أصحاب المصلحة، ومعالجة المظالم، والمراقبة الاجتماعية، لا سيما خلال مراحل البناء والتشغيل، في ضمان توفير الحماية الكافية لحقوق ومصالح المجتمعات المتضررة. ولهذا يعتبر تنفيذ تقييمات الآثار البيئية والاجتماعية والالتزام بالقوانين البيئية الوطنية أمراً بالغ الأهمية للحفاظ على الممارسات المستدامة في تحلية المياه. وعادة ما تقوم الأجهزة والهيئات الوطنية بمراقبة الامتثال، حيث تتوفر لها الصلاحيات اللازمة لفرض العقوبات أو إيقاف عمليات المشروع حال عدم الالتزام بتطبيق المعايير.

غالباً ما يكون لدى المقرضين ومؤسسات التمويل متطلباتهم واشتراطاتهم الخاصة التي تؤثر أيضاً على تشكيل إستراتيجيات إدارة الآثار البيئية والاجتماعية والتخفيف منها فيما يتعلق بإعداد وتطوير مشروعات التحلية. وعادة ما تستهدف هذه المتطلبات ضمان عدم اقتصار جدوى المشروعات على النواحي التقنية (الفنية) والاقتصادية، بل أن تكون أيضاً مستدامةً بيئياً ومقبولة اجتماعياً. على سبيل المثال، يستخدم الإطار البيئي والاجتماعي، الذي يحدد المتطلبات التي تنطبق على المقترضين من البنك الدولي، نهجاً قائماً على المخاطر ومتناسباً لتعزيز الإدارة المتكاملة للمخاطر البيئية والاجتماعية (الإطار 4.1). وبالمثل، تعد مبادئ التعادل،[43] التي تستند إلى معايير الأداء الخاصة بمؤسسة التمويل الدولية، أساساً مشتركاً وإطاراً لإدارة المخاطر لمؤسسات القطاع الخاص والمؤسسات المالية لتحديد المخاطر البيئية والاجتماعية وتقييمها وإدارتها، ويمكن أن تساعد في ضمان تطوير تحلية المياه وتشغيلها على نحوٍ مستدام ومسؤول. وفي إطار التحضير للحصول على قرض من البنك الآسيوي للاستثمار في البنية التحتية لتمويل إنشاء محطتين جديدتين لتحلية مياه البحر بتنقية التناضح العكسي في السعودية، كلفت المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة بإعداد تقرير تقييم الفجوات لمقارنة نظام الإدارة البيئية والاجتماعية في المؤسسة مع معايير السياسة البيئية والاجتماعية والمعايير البيئية والاجتماعية الخاصة بالبنك. وتم تصنيف المشروع من الفئة الأولى (أ)، نظراً لأهمية تصريف الرجيع الملحي في البيئة البحرية، واستخدم تقرير تقييم الفجوات لتحديد المجالات التي قد تتطلب إجراءات إضافية لتلبية متطلبات التمويل الدولية، وبناءً عليه تم إعداد خطة العمل البيئية والاجتماعية لإرشاد عمليات تنفيذ المشروع. ومن أجل التوافق مع هذه المتطلبات، من الضروري دمج الاعتبارات البيئية والاجتماعية منذ المراحل الأولى لإعداد وتطوير المشروع. ويجب أن تقوم دراسات الجدوى المبدئية ودراسات الجدوى الرئيسية بدمج الأبعاد البيئية والاجتماعية بشكل منهجي، وعدم الاقتصار على الجدوى المالية والتقنية (الفنية) فقط، لتشمل الفحص الأولي للمخاطر (مثل الآثار على الفئات السكانية الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية، وسبل كسب العيش، والقدرة على الوصول إلى الأراضي أو الموارد)، فضلاً عن التحليل الأولي للبدائل. ويمكن للمشاركة المبكرة للمطورين ومديري المشروعات والمتخصصين في الجوانب البيئية والاجتماعية أن تسهم في تحديد

43 يُرجى زيارة الموقع الإلكتروني: https://equator-principles.com/.

المخاطر الرئيسية مسبقاً، وتشكيل خيارات أكثر استدامة فيما يتعلق بتصميم المشروع، وتجنب التأخير في إعداد الوثائق الخاصة بالجوانب البيئية والاجتماعية والموافقة عليها. ويمكن لهذه المتطلبات والأطر التي يفرضها المقرضون ومؤسسات التمويل مجتمعةً أن تسهم في تعزيز حوكمة الآثار البيئية والاجتماعية ودعم دمج الممارسات المستدامة في تحلية المياه في جميع أنحاء المنطقة. وتشترط هذه الجهات إجراء تقييمات شاملة للآثار البيئية والاجتماعية، وتنفيذ إستراتيجيات التخفيف، والتدابير الخاصة بالمشاركة الشاملة لأصحاب المصلحة ووضع آليات لمعالجة المظالم، وانتظام أعمال المراقبة والإفصاح عن البيانات لضمان استمرار الامتثال للمعايير البيئية والاجتماعية.

الإطار 4.1 • تعظيم الاستفادة من الحوكمة البيئية والاجتماعية لتحلية المياه

يحدد إطار العمل البيئي والاجتماعي المتطلبات والاشتراطات التي تسري على المقترضين من البنك الدولي. ويستخدم نهجاً متناسباً يستند إلى تحليل المخاطر، ويطبق مزيداً من موارد الرقابة والمتابعة للمشروعات المعقدة، ويتيح استجابةً أكبر للتغيرات في ظروف المشروع من خلال إدارة المخاطر التكيفية ومشاركة أصحاب المصلحة. ويركز هذا الإطار أيضاً على تعزيز أنظمة الإدارة البيئية والاجتماعية والمؤسسات الوطنية القائمة على تطبيقها، فضلاً عن تعزيز مستوى الشفافية ومشاركة أصحاب المصلحة من خلال سرعة الإفصاح عن البيانات والمعلومات، والمشاورات الهادفة والمستمرة، وتفعيل آليات معالجة المظالم للاستجابة للشكاوى المقدمة بشأن المشروع. ويتضمن الإطار 10 معايير بيئية واجتماعية تنطبق على جميع عمليات تمويل المشروعات الاستثمارية التي بدأت في الأول من أكتوبر/تشرين الأول عام 2018 أو بعد هذا التاريخ. ومن بين هذه المعايير، ينطبق ما يلي بصورة مباشرة على التحديات الفريدة في تحلية المياه:

المعيار البيئي والاجتماعي 1. تقييم وإدارة المخاطر البيئية والاجتماعية والآثار المترتبة عليها: يحدد هذا المعيار مسؤوليات المقترضين عن تقييم المخاطر والآثار البيئية والاجتماعية المرتبطة بكل مرحلة من مراحل المشروع. ويتطلب ذلك إجراء تقييم شامل للآثار البيئية والاجتماعية لضمان تحديد الآثار السلبية المحتملة على النظم الإيكولوجية والمجتمعات المحلية والتخفيف منها، مما يحد من أثر العوامل الخارجية السلبية والتكاليف. ويشمل ذلك تقييم احتمال تسبب المشروع في تغيير مستويات ملوحة المياه المحلية، والآثار المحتملة على الحياة البحرية، وعلى سبل كسب العيش المحلية، خصوصاً للمجتمعات التي تعتمد على أنشطة الصيد أو السياحة. كما يتطلب تقييم الآثار التراكمية التي قد تنشأ من تعدد مشروعات تحلية المياه أو غيرها من المشروعات الصناعية في المنطقة الساحلية أو البحرية نفسها، ويوصي باستخدام التقييمات البيئية والاجتماعية الإستراتيجية أو القطاعية، عند الاقتضاء. ويؤدي هذا التقييم إلى وضع خطة إدارة الجوانب البيئية والاجتماعية التي تحدد التدابير والإجراءات الكفيلة بالتخفيف من المخاطر التي تم تحديدها، مثل التكنولوجيات المتطورة المستخدمة في إدارة الرجيع الملحي بهدف تقليل الآثار الناجمة عن ارتفاع مستوى الملوحة، أو تركيب أنظمة تبريد للحد من عمليات التفريغ الحراري.

المعيار البيئي والاجتماعي 3. كفاءة استخدام الموارد ومنع التلوُّث وإدارته: يحدد هذا المعيار المتطلبات والاشتراطات التي تكفل تحقيق الكفاءة في استخدام الموارد ومنع التلوث وإدارته طوال دورة حياة المشروع. ويتضمن تطبيق هذا المعيار في مشروعات التحلية تبني تكنولوجيات وممارسات تعزز الكفاءة وتقلل من البصمة البيئية. وقد يشمل ذلك استخدام أجهزة استعادة الطاقة ومضخات عالية الكفاءة لتقليل استهلاك الطاقة. وستركز تدابير الوقاية من التلوث على تقليل استخدام المواد الكيميائية في عملية التحلية أو اختيار المواد الكيميائية المراعية للبيئة لتقليل الآثار السمية على النظم الإيكولوجية البحرية. وتماشياً مع إرشادات مجموعة البنك الدولي بشأن البيئة والصحة والسلامة، يتعين على تحلية المياه أيضاً النظر في إدارة الأغشية والوسائط المستهلكة، بما في ذلك المواد مثل الرمل والفحم والتراب الدياتومي وراتنجات التبادل الأيوني، أو الكربون المُنشَّط الحبيبي. ويُعد التعامل السليم مع تدفقات هذه النفايات وتصنيفها والتخلص منها أمراً بالغ الأهمية للحد من المخاطر البيئية طويلة الأجل.

المعيار البيئي والاجتماعي 4. الصحة والسلامة المجتمعية: يحدد هذا المعيار متطلبات واشتراطات معالجة مخاطر وآثار الصحة والسلامة والأمن الواقعة على المجتمعات المتأثرة بأنشطة المشروع والمسؤولية المقابلة للمقترضين لتجنب هذه المخاطر والآثار أو الحد منها قدر الإمكان، مع إيلاء اهتمام خاص للأشخاص الذين قد يُعدون من الفئات الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية، بسبب ظروفهم الخاصة. وبالنسبة لتحلية المياه، يتركز الاهتمام على التخفيف من المخاطر التي تهدد صحة وسلامة المجتمعات المجاورة لها، بما في ذلك ضمان عدم تأثير مآخذ المياه وتصريف النفايات سلباً على مصادر المياه المحلية المستخدمة لأغراض ترفيهية أو تجارية. كما يتضمن تنفيذ أنظمة استجابة للطوارئ للتعامل مع التسربات الكيميائية المحتملة أو غيرها من الحوادث. وفي بعض الحالات، قد تكون هناك حاجة إلى معالجة إضافية بعد عملية التحلية لضمان مطابقة المياه المُحلّاة للمعايير المطبقة لجودة مياه الشرب، خاصة عندما تفتقر إلى المعادن الأساسية أو تحتوي على آثار ملوثات متبقية. ويجب الاستجابة لهذه المتطلبات بما يتماشى مع إرشادات منظمة الصحة العالمية وإرشادات مجموعة البنك الدولي بشأن البيئة والصحة والسلامة.

المعيار البيئي والاجتماعي 5. الاستحواذ على الأراضي، والقيود المفروضة على استخدام الأراضي، وإعادة التوطين القسرية: قد تتطلب تحلية المياه الاستحواذ على أراضٍ لإنشاء المحطات، أو مد خطوط الأنابيب، أو إنشاء طرق الوصول إلى المشروع، أو إنشاء البنية التحتية البحرية (مآخذ المياه ومصارفها)، مما قد يؤثر على سبل كسب العيش البرية والبحرية. وقد تحدث إعادة توطين قسرية، أو فرض قيود على الوصول، أو نزوح السكان لدوافع اقتصادية، خاصة في المجتمعات الساحلية التي تعتمد على أنشطة الصيد أو السياحة. ويجب على المشروعات ضمان تحديد مثل هذه المخاطر مبكراً واتخاذ التدابير والإجراءات المناسبة لتعويض السكان واستعادة سبل كسب العيش، عند الاقتضاء.

المعيار البيئي والاجتماعي 6. حفظ التنوع البيولوجي والإدارة المستدامة للموارد الطبيعية الحية: يقر هذا المعيار بأن حماية التنوع البيولوجي والحفاظ عليه وإدارة الموارد الطبيعية الحية على نحو مستدام تعد أموراً أساسية لتحقيق التنمية المستدامة. كما يقر بأهمية الحفاظ على الوظائف البيئية الأساسية للموائل الطبيعية والتنوع البيولوجي الذي تدعمه، والحاجة إلى مراعاة سبل كسب عيش الأطراف المتأثرة بالمشروع، بما في ذلك الشعوب الأصلية، التي قد يؤثر المشروع على وصولها أو استخدامها للتنوع البيولوجي أو الموارد الطبيعية الحية. لذلك، يجب على مشروعات التحلية مراعاة آثارها على التنوع البيولوجي المحلي، وخاصة النظم الإيكولوجية البحرية، إلى جانب الوظائف والموارد التي توفرها. وتساعد هذه الإجراءات في توجيه تطوير تحلية المياه بحيث تتجنب المواقع الحيوية للتنوع البيولوجي، بالإضافة إلى اتخاذ الإجراءات التي تكفل الحد من الآثار الواقعة على الحياة البحرية والتخفيف منها قدر الإمكان، مثل تعديل مواقع مرافق مآخذ المياه وتصريف النفايات لمنع الإضرار بالكائنات البحرية.

حلول هندسية وتكنولوجيات مبتكرة

تُدار الآثار البيئية المرتبطة بتحلية المياه والتخفيف من حدتها بشكل متزايد من خلال الابتكار التكنولوجي وإستراتيجيات الإدارة المحسنة، كما أن هذه الابتكارات تسهم في تعزيز كفاءة عمليات التحلية وخفض تكلفتها. فعلى سبيل المثال، أدى دمج الأنظمة التي تعمل بالطاقة المتجددة والتشغيل في مواقع مشتركة مع محطات توليد الطاقة إلى تقليل الآثار البيئية المرتبطة بمحطات التحلية من خلال خفض استهلاكها للطاقة والحد من انبعاثات غازات الدفيئة بشكل كبير. ومن خلال وضع معايير محددة للتصميم، وتحسين الإجراءات، والتشغيل في مواقع مشتركة مع محطات معالجة مياه الصرف الصحي (لخلط النفايات السائلة)، يمكن تعزيز إدارة الرجيع الملحي والتخفيف من الآثار الإيكولوجية المرتبطة بالتخلص منها. ويؤدي استخدام الأغشية المقاومة للتلوث وطرق التنظيف البديلة إلى تقليل الآثار الكيميائية المحتملة على النظم الإيكولوجية البحرية والساحلية، في حين يمكن لاستخدام الآبار وتحديد سرعات تدفق المآخذ أن يؤدي إلى تجنب حدوث سحب الكائنات البحرية واحتجازها. ويؤثر الموقع الجغرافي والتكنولوجيا المستخدمة في تحلية المياه ونوع مياه التغذية بصورة كبيرة على الجدوى الاقتصادية والتقنية للنُهُج المختلفة (جونز وآخرون 2019). وتسهم هذه التكنولوجيات مجتمعةً في زيادة استدامة تحلية المياه كخيار متاح لتوفير إمدادات المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، مما يؤدي إلى المعالجة الفعالة لمشكلة شح المياه دون تفاقم غيرها من المشكلات البيئية. والأهم من

ذلك أن هذه الابتكارات قد تسهم أيضاً في تحقيق نواتج اجتماعية إيجابية، منها تحسين القدرة على تحمل تكاليف المياه وضمان الوصول العادل إليها، خصوصاً عندما يعود خفض التكاليف بالفائدة على المستخدمين النهائيين. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي الحد من التلوث البحري والانبعاثات البحرية إلى دعم الصحة العامة ورفاهة المجتمع على نطاق أوسع، لا سيما في المناطق الساحلية. علاوة على ذلك، يمكن لهذه التكنولوجيات أن تعزز الجدوى الاقتصادية لتحلية المياه من خلال خفض تكاليف التشغيل وإطالة عمر المعدات، مما يجعل إنتاج المياه في متناول سكان المنطقة، فضلاً عن دعم استقرارها الاقتصادي.

تؤدي التطورات في إدارة الرجيع الملحي دوراً حيوياً في التخفيف من الآثار البيئية لتحلية المياه وإدارتها (خان، ومرقة، ومحمد 2021؛ وكاتال وآخرون 2020؛ ومنصور، وعرفات، وحسن 2017). ففي المناطق الساحلية، يُعتبر تصريف هذه النفايات مرة أخرى في مياه المحيط أبسط إستراتيجية للتخلص منها، مع وجوب مراعاة العديد من المخاوف البيئية. أما بالنسبة لمحطات تحلية المياه الواقعة في المناطق الداخلية، فغالباً لا يكون التصريف في المياه السطحية ضمن الخيارات الواردة، لأن تصريف الرجيع الملحي في المسطحات المائية العذبة عادةً غير مقبول من الناحية البيئية، بالإضافة إلى أنه يجعل مياهها غير صالحة للاستخدام للأغراض الإنتاجية. وبإمكان محطات تحلية المياه الساحلية والداخلية استخدام عدة طرق تقليدية أخرى للتخلص من الرجيع الملحي، رغم أنها عادة ما تكون من الخيارات الأنسب للمحطات الداخلية، وهذه الطرق تشمل التصريف عن طريق شبكة المجاري، والحقن في الآبار العميقة، ونشر النفايات فوق الأرض، والتبخير في أحواضٍ عميقة. وتشمل تكنولوجيات إدارة الرجيع الملحي المبتكرة طريقة تركيز الرجيع الملحي لتقليل حجمها، وعمليات استعادتها، وإعادة تدويرها. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير وتنفيذ برامج عدم تصريف السوائل (ZLD) في محطات تحلية المياه الداخلية. وعندما يتم تصميم هذه الحلول وتنفيذها بصورة صحيحة، يمكنها أيضاً الحد من المخاطر الصحية المجتمعية المحتملة التي ترتبط بالتعرض للرجيع الملحي والتلوث بسببها، وتعزيز قبول الجمهور لتكنولوجيات تحلية المياه والوثوق بها. علاوة على ذلك، يمكن لهذه الحلول تقليل النزاعات المتصلة باستخدام الأراضي وتجنب الآثار السلبية الواقعة على سبل كسب العيش (الزراعة أو مصائد الأسماك) بالقرب من مواقع التصريف.

بالنسبة لمحطات تحلية المياه الساحلية، فإن طريقة تصريف الرجيع الملحي الأكثر شيوعاً هي تصريفه في المياه السطحية ونشرها (توزيعها) في المحيط (إحسان الله وآخرون 2022). وتقوم معظم محطات تحلية المياه الساحلية الكبيرة بتصريف الرجيع الملحي عبر مخارج مغمورة إلى مناطق الخلط، مما يعزز تخفيفها ونشرها على مساحة أكبر لتقليل آثارها السلبية على البيئة البحرية. وتساعد الموزعات والتيارات السائدة على توزيع الرجيع الملحي بشكل أكثر توازناً في البيئة البحرية وتقليل حدة تأثيرها.[44] على سبيل المثال، يتضمن مشروع الناقل الوطني للمياه (العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه) بسعة 300 مليون متر مكعب الموزعات ونماذج التشتيت لضمان تخفيف الرجيع الملحي إلى مستويات آمنة، والحد من آثارها على البيئة البحرية. غير أنه يجب ملاحظة أنه بينما تسهم الموزعات عالية السرعة في خفض تركيزات الملوحة، فإنها يمكن أن تغير الظروف الهيدروديناميكية بشكل كبير. وقد ثبت أن التغيرات في سرعة تدفق المياه تؤدي إلى تحولات بيئية باتجاه ظهور أنواع بحرية تتكاثر وتزدهر في بيئات عالية التدفق، مما يخل بالتوازن البحري الأصلي (كلارك وآخرون 2018). وتؤكد هذه الملاحظات على الحاجة الملحة إلى تصميم مخارج التصريف بحيث توازن بعناية بين تقليل أثر الملوحة والتغيرات المحتملة في الظروف الهيدروديناميكية، وبما يضمن تقليل الاضطراب في التنوع البيولوجي البحري لأدنى حد. علاوة على ذلك، قد يكون لتصريف الرجيع الملحي بالقرب من المجتمعات الساحلية عواقب اجتماعية غير مباشرة، لا سيما بالنسبة لمن يعتمدون على النظم الإيكولوجية البحرية لكسب عيشهم، مثل صغار الصيادين والعاملين في قطاع السياحة الساحلية. ويعد التواصل المبكر مع المجتمعات المتأثرة والإفصاح عن الآثار المحتملة بصورة شفافة أمراً بالغ الأهمية لبناء الثقة وقبول المجتمع المحلي الساحلي بتحلية المياه وتشغيله.

بالنسبة لمحطات تحلية المياه الداخلية، تختلف طرق التخلص من الرجيع الملحي حسب خصائص كل محطة منها. وتعتبر الأحواض التي تسمح بالتبخر الطبيعي للرجيع الملحي من أكثر الطرق استخداماً (إحسان الله وآخرون 2022)، وهي طريقة فعالة للغاية في المناطق القاحلة ذات الشمس الوفيرة، وينتج عنها بلورات ملحية يمكن جمعها بشكل دوري. ومع ذلك، قد تكون هذه الطريقة مكلفة (باباريلا،

44 على سبيل المثال، أفاد بلاتوي وآخرون (2017) أن الموزعات متعددة المنافذ، مثل تلك الموجودة في محطة تحلية المياه بولاية موستغانم في الجزائر، تقلل فعلياً من الآثار السلبية على تجمعات الكائنات الحية القاعية.

داجوستينو، وبيرت 2022)، ويجب اتخاذ الاحتياطات لإدارة المخاوف البيئية على نحو سليم، مثل احتمال تلوث المياه الجوفية. وإذا لم تتم إدارة هذا التلوث بشكل سليم، فقد يشكل مخاطر على المجتمعات المحيطة، بما في ذلك التأثير على مصادر مياه الشرب والإنتاجية الزراعية. ويمكن أيضاً تصريف الرجيع الملحي مباشرة إلى أنظمة تجميع مياه الصرف الصحي المحلية. ومع ذلك، يمكن أن يؤثر ارتفاع نسبة محتوى المواد الصلبة المذابة على عملية معالجة مياه الصرف. وهذا يعني أن تدفق الرجيع الملحي لا يمكن أن يتجاوز 5% من القدرة اليومية لمعالجة مياه الصرف (بانغوبولوس، وهارالامبوس، ولويزيدو 2019)، مما يحصر هذه الطريقة في محطات تحلية المياه قليلة الملوحة ومحدودة النطاق. ويمكن أيضاً التخلص من الرجيع الملحي من خلال الحقن في الآبار العميقة، باستخدام طبقات المياه الجوفية المعزولة بشكل كاف عن طبقات المياه الجوفية المنتجة للمياه العذبة لمنع تلوثها. أما نشر النفايات فوق الأرض فيعتبر طريقة أخرى للتخلص من الرجيع الملحي، حيث يتم استخدامها لري النباتات المقاومة للملوحة. ومع ذلك، وبسبب القيود المتعلقة بقدرة النباتات على تحمل الملوحة والاعتبارات الجغرافية والمناخية، فإن هذه الطريقة مناسبة فقط للكميات المحدودة من النفايات الناتجة عن المياه قليلة الملوحة (باباريلا، ودي أغوستينو، وبيرت 2022).

تتيح طريقة عدم تصريف السوائل (ZLD) إمكانية توفير حل مستدام للتحديات البيئية التي يفرضها التخلص من الرجيع الملحي. وتتضمن هذه الطريقة تقنيات تبخر متقدمة لاستعادة الرجيع الملحي، مما يترك خلفها رواسب صلبة. وتستهلك هذه العمليات الكثير من الطاقة لكنها قادرة على الوصول إلى استعادة 100% من المياه مع المساعدة في حماية البيئة الطبيعية. وعادة ما تتكون تكنولوجيات هذه الطريقة من ثلاث مراحل وهي: التركيز المسبق، والتبخير، والتبلور، وتعتمد بشكل عام على تكنولوجيات غشائية كثيفة الطاقة تتطلب من 20 إلى 40 كيلوواط ساعة لإنتاج متر مكعب واحد من المياه العذبة من الرجيع الملحي والتكنولوجيات الحرارية بما يزيد على 30 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب (باباريلا، ودي أغوستينو، وبيرت 2022). على سبيل المثال، محطة تحلية مياه البحر بتقنية التناضح العكسي القياسية التي تعمل بمعدل لاستعادة المياه بواقع 50% وتصريف الرجيع الملحي في المياه السطحية عادة ما تستخدم 2.5–5.5 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب واحد من المياه العذبة التي يتم إنتاجها. أما ترقيتها لتحقيق استرداد كامل للمياه بنسبة 100% باستخدام مزيج من تقنية التحلية الكهربائية (ED) أو التحلية الكهربائية العكسية (ED reversal) مع مركِّزات الرجيع الملحي لتحقيق انعدام التصريف، فسيؤدي نظرياً إلى استهلاك إجمالي للطاقة خلال العملية (لكل من التحلية الأولية وعملية عدم تصريف السوائل) يتراوح بين 5–11 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب من المياه العذبة المنتجة. وفي حين تبدو هذه التكنولوجيا واعدة، فإن التوسع في استخدامها يعتمد على تجاوز الحواجز الاقتصادية والمتعلقة بالطاقة. ومع استمرار أنشطة البحث والتطوير، قد تصبح أنظمة عدم تصريف السوائل أكثر فاعلية من حيث التكلفة والكفاءة في استهلاك الطاقة، مما يمهد الطريق للتوسع في تطبيقها في قطاع تحلية المياه. ويجب اعتبار تطبيق تكنولوجيا عدم تصريف السوائل أفضل الممارسات الكفيلة بتقليل المخاطر البيئية، لا سيما عندما تقع محطات التحلية ونقاط تصريف الرجيع الملحي بالقرب من مناطق حساسة بيئياً مثل الشعاب المرجانية، أو أشجار المنغروف، أو الموائل الطبيعية المحمية. وقد يكون القبول والتأييد العام من الجمهور ومشاركة أصحاب المصلحة المحليين مطلوبين أيضاً عندما يتعلق الأمر باستخدام الأراضي أو الموارد الحيوية.

يُعد استخراج الموارد من الرجيع الملحي نهجاً واعداً لمعالجة بعض التحديات البيئية والاقتصادية المرتبطة بتحلية المياه، إذ يتضمن استخراج المعادن المطلوبة من الرجيع الملحي، وتحويلها إلى مورد، مما يسهم في الاقتصاد الدائري، ويحد من الآثار البيئية المحتملة. وتعتمد طرق الاستخراج عادة على استخدام تكنولوجيات هجينة لتكثيف تركيز الرجيع الملحي ثم إخضاعها لعمليات صناعية نهائية لاستخلاص بعض المعادن مثل الصوديوم والمغنيسيوم والبوتاسيوم والبروميد (كامبوس وآخرون 2020؛ وكاساس وآخرون 2013). وهناك أيضاً اهتمام متزايد وأبحاث في استعادة المعادن النزرة، رغم أن الليثيوم والسترونشيوم واليورانيوم فقط هي المعادن التي تُعتبر جذابة من الناحية الاقتصادية (بيلو وآخرون 2021؛ وكامبوس وآخرون 2020؛ وديل فيلار وآخرون 2023؛ وإحسان الله 2022؛ وبراساد 2023). وتُقدر القيمة الاقتصادية للبورون، والكالسيوم، والسترونتيوم، والمغنيسيوم، والصوديوم، والليثيوم، والروبيديوم، والغاليوم الموجودة في الرجيع الملحي في مرافق تحلية المياه في إسبانيا بين 13.4 و29.8 مليار يورو سنوياً (منظمة التعاون والتنمية الاقتصادية 2024)، بينما تتوقع السعودية أن تصل الاستثمارات في أنشطة استخراج الموارد من الرجيع الملحي إلى 2.1 مليار دولار (8 مليارات ريال سعودي) بحلول عام 2030، مما يسهم بنحو 400 مليون دولار (1.5 مليار ريال سعودي) في إجمالي الناتج المحلي سنوياً. وبالإضافة إلى الإيرادات الوطنية، قد يسهم استخراج الموارد من الرجيع الملحي في توفير فرص عمل على مستوى المجتمعات المحلية وتنويع الأنشطة الاقتصادية، لا سيما في المناطق القريبة من البنية التحتية لمحطات التحلية. ومن

شأن ضمان عودة مشروعات التحلية بالنفع على المجتمعات المحلية وعدم تسببها في معاناة الفئات الأكثر احتياجاً أكثر من غيرها أن يكون في غاية الأهمية لعدالة تنفيذها. وفي حين نجد أن عمليات استخراج الموارد من الرجيع الملحي يمكن أن تساعد في توفير حل مستدام للتخلص منه وتحقيق منافع اقتصادية عن طريق استعادة الموارد، لا تزال هناك تحديات قائمة، لا سيما ما يتعلق منها باستهلاك الطاقة والتكلفة. ومن المرجح أن تؤدي التطورات التكنولوجية والأبحاث المستمرة إلى تعزيز الجدوى الاقتصادية وجاذبية أنشطة استخراج الموارد من الرجيع الملحي في المستقبل.

يمكن أيضاً استخدام معالجة الرجيع الملحي وطرق التنظيف البديلة للحد من تصريف الملوثات الكيميائية. فغالباً ما تُستخدم مواد كيميائية خطرة في طرق التنظيف التقليدية لمحطات تحلية المياه، وقد تتسبب في حدوث أضرارٍ بيئية. ويمكن التخفيف من آثارها، من بين أمور أخرى، من خلال محطات إزالة الكلور التي تعالج الرجيع الملحي قبل تصريفه، مما يقلل من سمية مشتقات الكلور. وتوفر الطرق البديلة، مثل استخدام المنظفات الإنزيمية أو الأشعة فوق البنفسجية، تنظيفاً فعالاً دون المخاطر البيئية المرتبطة باستخدام المواد الكيميائية. فعلى سبيل المثال، تستخدم محطة "آسفي" لتحلية المياه في المغرب طريقة التعقيم المعتمد على الأشعة فوق البنفسجية للسيطرة على التلوث الحيوي، مما يقلل من استخدام المواد الكيميائية الخطرة بشكل كبير. ولا تسهم هذه الطريقة في تقليل تكاليف التشغيل فحسب، بل أيضاً تقليل البصمة الكيميائية لعملية التحلية. ويزداد استخدام هذه الطرق واعتمادها على نطاق واسع لأنها تقلل أيضاً من تكاليف التشغيل المرتبطة بالتعامل مع المواد الكيميائية والتخلص منها.

أهمية تقييمات الأثر التراكمي في مشروعات تحلية المياه

تُعد الآثار البيئية لعمليات سحب مياه البحر وتصريف الرجيع الملحي بارزةً بشكل خاص في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بسبب الخصائص الفريدة لنظمها الإيكولوجية البحرية. وتجمع المنطقة بين أعلى قدرة إنتاجية لتحلية المياه ومسطحات مائية صغيرة نسبياً وضحلة وشبه مغلقة (الخليج العربي، والبحر المتوسط، والبحر الأحمر) تتسم بارتفاع مستوى الملوحة ومعدلات التبخر وضعف تبادل المياه. وبسبب ارتفاع الملوحة الطبيعية، تمثل الكويت وقطر والسعودية والإمارات العربية المتحدة 55% من إنتاج الرجيع الملحي على مستوى العالم، بينما تنتج 32% من إجمالي المياه المحلاة (جونز وآخرون 2019). وتسهم هذه الخصائص في زيادة تأثير العوامل الخارجية السلبية المحتملة عند سحب مياه البحر وتصريفها، مما يخلق خطر الدخول في حلقة مفرغة من زيادة الملوحة وارتفاع استهلاك الطاقة وتكلفة تحلية المياه. وتشير الدراسات والأبحاث الحالية إلى أن إنتاج محطات التحلية في منطقة الخليج العربي من المياه العذبة يعادل نحو 2% من متوسط التبخر السنوي (نيستيروف 2025؛ وباباريلا، ودي أغوستينو، وبيرت 2022)، وهي نسبة مرشحة للزيادة إلى 8% بحلول عام 2050 (البنك الدولي 2025ب). ورغم أهمية ذلك، تشير النماذج إلى أن التغير الكلي الناتج في مستوى الملوحة لا يتجاوز نطاق التغيرات الموسمية والسنوية المعتادة (تشينويث والمصري 2021؛ والبنك الدولي 2025ب). ولا يوجد توافق في الآراء حول التأثيرات التراكمية المحتملة لتحلية المياه على هذه المسطحات المائية. كما أن هناك عدداً من الدراسات التي تشير إلى أن التوزيع المكاني المحتمل والتباين الموسمي لتغيرات الملوحة المرتبطة بالتحلية — حتى متوسط التغيرات البسيطة في الملوحة — قد يؤدي إلى آثار بيئية واجتماعية سلبية، لا سيما في المناطق التي تعتمد على مصائد الأسماك أو السياحة الساحلية أو النظم الإيكولوجية البحرية المشتركة (كامبوس وآخرون 2020؛ والبنك الدولي 2025أ).

تُعد تقييمات الأثر التراكمي من الأدوات المهمة التي تساعد السلطات التنظيمية على فهم الآثار المحتملة المرتبطة بالتوسع المتزايد في تحلية المياه. وتسهم هذه التقييمات في توفير نهج إقليمي للإدارة البيئية عن طريق تقييم مُجمَل الآثار البيئية للمشروعات المتعددة لتحلية المياه، خصوصاً في المناطق الساحلية ذات الكثافة السكانية العالية والتي تضم العديد من المرافق والمنشآت التي تعمل بشكل متزامن. كما تعد ضرورية لتحديد الآثار الإجمالية لزيادة الملوحة، والتلوث الحراري، وتصريف المواد الكيميائية التي قد تغفل عنها تقييمات الأثر البيئي الفردية. وتكتسب هذه التقييمات أهمية خاصة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا نظراً للخصائص والتحديات الخاصة التي تفرضها البيئات البحرية في المنطقة، مما يوفر أداة حيوية تضمن أن يكون تطوير مشروعات التحلية في الخليج العربي والبحر الأحمر مستداماً من الناحية البيئية، ومجدياً من الناحية الاقتصادية، ومسؤولاً من الناحية الاجتماعية. وبالإضافة إلى تقييمات الأثر التراكمي، قد يستفيد التوسع في مشروعات تحلية المياه أو

البنية التحتية المتصلة بها من استخدام التقييمات البيئية والاجتماعية الإستراتيجية أو القطاعية. وتُعد هذه الأدوات التخطيطية رفيعة المستوى مهمة نظراً لأنها تدمج عناصر التحليل التراكمي، وتساعد في تحديد المخاطر البيئية والاجتماعية، بما في ذلك المخاطر المرتبطة بالمناطق المحمية أو المناطق الحساسة للتنوع البيولوجي، والتي ينبغي تجنبها تماماً.

غالباً ما يتضمن تقييم الآثار التراكمية لتحلية المياه إعداد وتطويرَ نماذج قوية لمحاكاة التداعيات والآثار المحتملة لتصريف الرجيع الملحي الناتج عن التحلية على مستوى جودة مياه البحار. وتكمن أهمية هذه التقييمات في أنها تساعد على صياغة الإجراءات اللازمة للحد من المخاطر على التنوع البيولوجي، ودعم وصول المجتمعات المحلية إلى خدمات النظام الإيكولوجي على نحو مستدام، ناهيك عن المنافع الاقتصادية التي توفرها. وتعد هذه النماذج أدواتٍ أساسية للمساعدة في التنبؤ بالآثار السلبية والتخفيف منها على المستويين الوطني والإقليمي، وبالنظر إلى الطبيعة المشتركة للخليج العربي والبحر الأحمر، فيمكنها تسهيل التعاون الإقليمي في إدارة الآثار البيئية والتخطيط المشترك وتنفيذ التدابير اللازمة لحماية سلامة المسطحات المائية المشتركة. ومن خلال دمج تقييمات الأثر التراكمي في عمليات التخطيط لتحلية المياه الجديدة والموافقة عليها، يمكن لأصحاب المصلحة إدارة البصمات البيئية لهذه المشروعات والتخفيف منها بشكل أفضل، فضلاً عن حماية الرفاهة الاجتماعية والاقتصادية للمجتمعات المحلية، وضمان السلامة طويلة الأجل للنظم الإيكولوجية البحرية (الإطار 4.2).

قد تكون تقييمات الأثر التراكمي ذات أهمية خاصة للبيئات البحرية المشتركة والعابرة للحدود. ويمكن لتحلية المياه أن تؤدي إلى ضغوط تراكمية، مثل عمليات سحب واحتجاز الكائنات البحرية عند مآخذ المياه، الرجيع الملحي (غالباً ما تكون أكثر دفئاً)، والمواد الكيميائية المتبقية عند مخارج التصريف، بالإضافة إلى بصمات الطاقة وغازات الدفيئة على مستوى نظام التحلية بأكمله، والتي تتفاعل مع الاستخدامات الساحلية الأخرى وتنتقل إلى ما وراء الحدود الوطنية عبر التيارات المائية. وهذا أمر مهم بشكل خاص للنظم الإيكولوجية الحساسة المحتملة، مثل الخليج العربي والبحر الأحمر، حيث يُعد تنسيق العمل ضرورة لا غنى عنها. ويجب أن تكون المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة والحدود القصوى مُصَمَمة حسب السياق المحدد باستخدام أهداف الجودة البيئية ومعايير المياه التي يتم استقبالها، بما في ذلك الحدود الرقمية المقترحة، وطرق الرصد والمراقبة المستندة إلى قوائم الأنواع الحية المحلية، والمعايير القياسية القائمة، والظروف الهيدروديناميكية للمسطح المائي المعني. ويمكن استخدام هذه المعايير لوضع حدود مقبولة وتغيرات مسموح بها في الملوحة ودرجة الحرارة والمؤكسدات والملوثات ضمن مناطق الخلط المحددة، بالإضافة إلى توجيه معايير تصميم وتشغيل مآخذ المياه لتجنب سحب الكائنات الحية واحتجازها. ويُعد ضمان الفهم الصحيح لكيفية تداخل آثار محطة تحلية واحدة مع آثار محطات وأنشطة أخرى عبر الزمان والمكان أمراً مهماً لتحديد مواقع إنشاء المحطات، وكيفية تصميم مآخذ المياه ومخارج التصريف، وماهية معايير الأداء التي يجب تحديدها، وكيفية مراقبة العمليات وتكييفها بشكل مشترك عبر الحدود، وطبيعة ترتيبات الحوكمة اللازمة للحفاظ على المكونات البحرية ذات القيمة ضمن الحدود المقبولة.

الإطار 4.2 • تعزيز التنمية التعاونية المستدامة لتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

تُعد تقييمات الأثر التراكمي أدواتٍ قوية فيما يتعلق بتوفير فهمٍ شاملٍ للتحديات المشتركة، وتسهيل وضع إستراتيجيات الإدارة المشتركة، وتعزيز التواصل والتفاعل بين أصحاب المصلحة، وتدعيم أوجه التعاون بشأن النظم الإيكولوجية البحرية العابرة للحدود. وعلى عكس تقييمات الأثر البيئي التقليدية التي تركز على آثار مشروع بمفرده، توفر تقييمات الأثر التراكمي تقييماً شاملاً للآثار المجمعة لكافة المشروعات السابقة والحالية والمستقبلية المتوقعة على نحو معقول. وفي البيئات البحرية، يمكن لهذه التقييمات أن تسهم في تحديد مناطق الإجهاد الناتج عن تراكم الملوحة، واقتراح أماكن أفضل للموزعات، وتوجيه التخطيط المكاني البحري الإقليمي، مما يتيح فهماً أكثر شمولية لديناميكيات النظام الإيكولوجي. وقد يؤدي ذلك إلى تحسين إستراتيجيات التخفيف، والحد من المخاطر على مستوى المشروعات، وتعزيز قدرة النظم الإيكولوجية الساحلية والبحرية التي تعتمد عليها المجتمعات المحلية على الصمود. ويحدد دليل الممارسات الجيدة لتقييم الأثر التراكمي وإدارته الصادر عن مؤسسة التمويل الدولية عمليةً تتألف من ست خطوات لتحديد المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة، وفهم الضغوط التراكمية، وتحديد أولويات إجراءات التخفيف العملية (الشكل ب4.1.1). ويساعد هذا النهج في ضمان إدارة المخاطر البيئية والاجتماعية بشكل استباقي، وألا تأتي التنمية على حساب سلامة النظام البيئي أو رفاهة المجتمع.

الشكل ب4.1.1 . عملية تتألف من ست خطوات لإجراء تقييمات الأثر التراكمي

الخطوة 1: مرحلة تحديد النطاق 1- تحديد المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة

الإجراء	النواتج
الإجراء: تحديد الجوانب البيئية والاجتماعية ذات القيمة التي يحتمل أن تكون معرضة لمخاطر داخل المنطقة المتأثرة.	**النواتج:** وضع الحدود الجغرافية والزمانية للتقييم.

الخطوة 2: مرحلة تحديد النطاق 2 - النظر في الأنشطة الأخرى والمحركات البيئية

الإجراء	النواتج
الإجراء: تحديد التطورات والأنشطة الحالية أو المخططة أو المتوقعة، إلى جانب الظواهر الطبيعية التي يمكن أن تؤثر على المشروع.	**النواتج:** فهم شامل للتفاعلات التراكمية المحتملة.

الخطوة 3: وضع خط الأساس للمكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة

الإجراء	النواتج
الإجراء: جمع وتحليل البيانات الحالية لفهم الوضع الحالي لكل مكون من المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة.	**النواتج:** خط أساس قوي لتقييم التغيرات والتنبؤ بالآثار التراكمية بدقة.

الخطوة 4: تقييم الآثار التراكمية

الإجراء	النواتج
الإجراء: دراسة كيف سيؤثر المشروع المقترح والأنشطة الأخرى المحددة على المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة بصورة تراكمية.	**النواتج:** تقييم الآثار المجمعة المكبرة على البيئة والأوضاع الاجتماعية.

الخطوة 5: تقييم دلالة وأهمية الآثار التراكمية المتوقعة

الإجراء	النواتج
الإجراء: تحديد حجم وأهمية الآثار التراكمية.	**النواتج:** تقييم شدة كل تأثير على المكونات البيئية والاجتماعية ذات القيمة ومدته وإمكانية عكس اتجاهه.

الخطوة 6: إدارة الآثار التراكمية

الإجراء	النواتج
الإجراء: تصميم وتنفيذ إستراتيجيات للتخفيف من الآثار السلبية التراكمية.	**النواتج:** وضع إستراتيجيات للرصد والمتابعة والإدارة التكيفية بناء على النواتج ومشاركة أصحاب المصلحة.

المصدر: أُعِدَّ أصلاً لأغراض هذا التقرير استناداً إلى بيانات صادرة عن مؤسسة التمويل الدولية 2013.

4.3. الآثار الاجتماعية والاقتصادية لتحلية المياه والمشاركة المجتمعية فيها

تسهم تحلية المياه بدور حيوي في تعزيز أمن المياه ودفع عجلة التنمية المجتمعية والصحة العامة في المناطق الجافة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. فعن طريق توفير إمدادات مياه مستقرة ومنتظمة لتلبية الاحتياجات المنزلية والصناعية والزراعية، يمكن لتحلية المياه تعزيز قدرة المجتمعات المحلية على الصمود في مواجهة تسارع وتيرة موجات الجفاف ونقص المياه، مما يحافظ بدوره على الاستقرار الاقتصادي وسبل كسب العيش للمجتمعات المحلية. ومن المتوقع أن تسهم مشروعات التحلية في زيادة إمدادات المياه للمجتمعات المحلية، وتحسين مستويات الصحة العامة والصرف الصحي في المناطق التي تواجه نقصاً حاداً في إمدادات المياه، مما يوفر دعماً حيوياً لأنشطة التوسع الحضري المستدام والارتقاء بمستويات المعيشة. وفي الوقت نفسه، من المهم إدراك ضرورة دمج تحلية المياه ضمن الإستراتيجيات الأوسع لصون الموارد المائية وإدارة الطلب عليها. وقد تؤدي تحلية المياه إلى ظهور توقعات غير واقعية بتوفر كميات غير محدودة من المياه. ويجب أن يضمن اتباع نهجٍ متوازن أن تكون استثمارات التحلية مكملةً للجهود المبذولة لتعزيز استدامة شبكات المياه العذبة القائمة، لا أن تصبح بديلاً لها.

على الرغم من أن تحلية المياه تعزز الأمن المائي، فإن ارتفاع تكلفتها مقارنة بمصادر المياه العذبة الطبيعية يستوجب فرض ضوابط مناسبة على أسعار استهلاكها لأغراض الحماية الاجتماعية. ومن الضروري الإقرار بأن زيادة أسعار الاستهلاك على المستخدمين النهائيين فيما يتعلق بتحلية المياه قد تفرض عبئاً مالياً متزايداً على الأسر، لا سيما الأسر الفقيرة أو الأكثر احتياجاً منها. ومن المهم وضع هيكل منظم للأسعار على نحو فعال، بما في ذلك أحكام شاملة اجتماعياً مثل توفير الحد الأدنى أو الأساسي من إمدادات المياه لاستهلاك الأسر الأشد فقراً، لضمان الوصول العادل إلى المياه. ويمكن استخدام هيكل الأسعار التصاعدية الموحدة، غير أنها لا تراعي الفئات الفقيرة بصورة دائمة نظراً لمحدودية تغطية الخدمة وضعف الاستهلاك من جانب الأسر الأكثر احتياجاً. كما أن هناك ضرورة لتطبيق الدعم المستهدف أو الذكي بحيث يضمن ألا تؤدي تحلية المياه إلى تفاقم التفاوتات الاجتماعية.

تتزايد مساهمة تحلية المياه في دعم القطاعات الزراعية والصناعية والحضرية الرئيسية بصورة مستمرة. كما باتت تحلية المياه، التي طُورت في البداية لإمدادات المياه المنزلية، تلعب دوراً متزايداً في دعم الزراعة والصناعة والتنمية الحضرية في المناطق التي تعاني من شح المياه. ويعتبر أثرها على تنويع الأنشطة الاقتصادية والاستدامة كبيراً، إذ توفر مصدراً منتظماً لإمدادات المياه اللازمة لبقاء هذه القطاعات واستمرارها، وتدفع نحو تحسين كفاءة استخدام المياه ودعم توسعها المستدام بالطرق التالية:

- **الزراعة:** في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، أحدثت التحلية ثورة في قطاع الزراعة، حيث مكنت المزارعين من زراعة المحاصيل على مدار السنة وأسهمت في تحسين الأمن الغذائي. فعلى سبيل المثال، طورت السعودية عمليات زراعة واسعة في الصوب الزراعية تعتمد بشكل كبير على المياه المحلاة، مما يتيح إنتاج الفواكه والخضروات للأسواق المحلية والتصدير. وبالمثل، في الإمارات العربية المتحدة، تستخدم بعض المشروعات مثل مركز خدمات المزارعين بأبوظبي المياه المحلاة لري أشجار النخيل ومحاصيل الخضروات، مما يدعم إنتاج الغذاء المحلي ويقلل الاعتماد على واردات الغذاء.
- **الصناعة:** تعتمد القطاعات الصناعية في بلدان مثل الكويت والسعودية وقطر بشكل كبير على المياه المحلاة في عمليات التبريد والتصنيع وأنشطة التكرير. فعلى سبيل المثال، تستخدم مدينة الجبيل الصناعية في السعودية ومدينة رأس لفان الصناعية في قطر المياه المحلاة لدعم الصناعات البتروكيماوية والصناعات الثقيلة وإنتاج الغاز الطبيعي المسال، مما يسهم في النمو الاقتصادي والتشغيل والإيرادات الوطنية.
- **التنمية الحضرية:** تلعب المياه المحلاة دوراً محورياً في التخطيط الحضري والتنمية في مدن المنطقة سريعة النمو. فمدن مثل أبوظبي ودبي وجدة تعتمد على المياه المحلاة لدعم المجمعات السكنية وصناعات الضيافة والخدمات البلدية، مما يضمن التنمية الحضرية

المستدامة دون استنزاف الموارد الطبيعية للمياه العذبة. وعلى سبيل المثال، في البحرين، توفر المياه المحلاة جميع احتياجات المياه الحضرية والسكنية تقريباً، مما يدعم تطوير مراكز حضرية ومناطق تجارية جديدة.

تساهم تحلية المياه في تحفيز ودفع عجلة الاقتصادات المحلية من خلال خلق مجموعة كبيرة من فرص العمل، إذ توفر محطات التحلية فرص عمل في مجالات متنوعة، مثل البناء والهندسة والتشغيل والصيانة. وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حيث يعد التنويع الاقتصادي أولوية قصوى، يُعد أثر هذه المشروعات على نسب التشغيل المحلي (توفير فرص عمل على المستوى المحلي) جدير بالملاحظة بصورة خاصة. فعلى سبيل المثال، في السعودية، أدى إنشاء محطة تحلية المياه في رأس الخير، وهي إحدى أكبر منشآت تحلية المياه في العالم، إلى توفير آلاف الوظائف، تتراوح بين وظائف هندسية عالية التخصص إلى وظائف متنوعة في عمليات التشغيل. كما يؤدي تشغيل هذه المحطة إلى توفير الوظائف في المناطق المجاورة لها في الصناعات المساندة التي توفر السلع والخدمات اللازمة لتشغيلها.

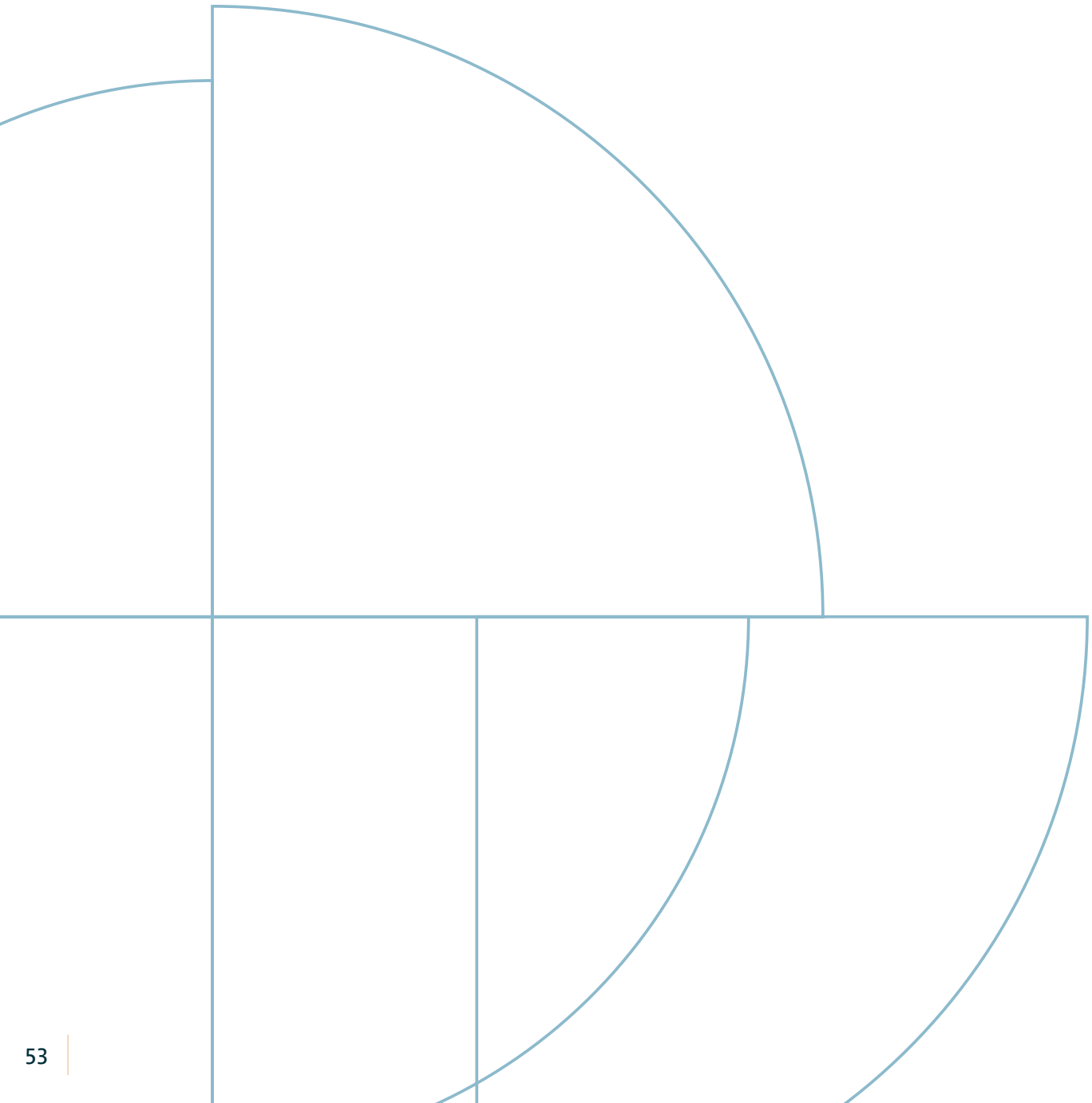
تُعتبر المشاركة المجتمعية الفعالة ضرورةً في إعداد وتطوير تحلية المياه، لكنها نادرة الحدوث في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويمكن للتواصل والتفاعل مع المجتمعات المحلية والحصول على موافقتها على هذه المشروعات أن يضمن نجاحها إلى حد كبير. وتضمن المشاركة المجتمعية طوال دورة حياة المشروع بأكملها — من مرحلة الإعداد حتى مرحلة التنفيذ — دراسة احتياجاتهم ومخاوفهم والتعامل معها بصورة فعالة، مما يؤدي إلى زياد مساحة قبولها وإطالة أمد استدامتها. وتشمل إستراتيجيات المشاركة الفعالة إجراء مشاورات عامة، وعقد حلقات عمل توعوية، والتواصل الشفاف لتوجيه تصميم المشروع والتعريف واسع النطاق بمنافع المشروع وآثاره المحتملة. ويمكن لهذه الأساليب أن تعزز الشعور بالملكية والثقة بين السكان المحليين. ومع ذلك، غالباً ما يتبع تطوير البنية التحتية في المنطقة هياكل حوكمة من الأعلى إلى الأسفل. هذا التطوير يتم تنفيذه عادة من خلال اتخاذ قرارات مركزية مع استشارات محلية محدودة دون قدر كبير من الالتزامات القانونية إزاء مشاركة أصحاب المصلحة (منظمة التعاون والتنمية الاقتصادية 2024). وتُعد الأمثلة جيدة التوثيق على المشاركة المجتمعية المجدية في تحلية المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا نادرة، لكنها تثبت المنافع المحتملة للنُهُج الشاملة للجميع. فعلى سبيل المثال، كانت مشاورات أصحاب المصلحة والمشاركة في التخطيط جزءاً أصيلاً من مشروع تطوير محطة جربة لتحلية المياه في تونس، التي افتتحت في 2018، لضمان معالجة مخاوف السكان المحليين وتلبية احتياجاتهم (وفا وآخرون 2022). والأمر يتطلب تحسين الأطر المؤسسية والتنظيمية للعمليات التشاركية في المستقبل على مستوى المنطقة بأسرها.

تُعد الإدارة البيئية الكافية والفعالة على نفس القدر من الأهمية لكسب التأييد العام من الجمهور. كما يُعد إنشاء أنظمة للرصد البيئي، وتقليل الآثار البيئية إلى أدنى حد من خلال التكنولوجيات المتقدمة، والحفاظ على حوار مفتوح مع أصحاب المصلحة المباشرة خطوات أساسية لبث روح الطمأنينة لدى المجتمعات المحلية فيما يتعلق بالتزام المشروع بالاستدامة البيئية. ومن خلال دمج هذه العناصر، تصبح تحلية المياه في المنطقة في وضع أفضل لتحقيق نواتج ناجحة تعكس استدامة الإدارة البيئية وأولويات المجتمعات المحلية. وعند الاقتضاء، يعتبر الرصد والمراقبة القائمة على المشاركة التي تشمل المجتمعات المحلية المتأثرة من أفضل الممارسات، لا سيما عندما تكون جودة المياه على المدى الطويل محل اهتمام بالغ. ولا يؤدي هذا النهج إلى تحسين جودة بيانات الرصد وأهميتها فحسب، بل يعمل أيضاً على بناء الثقة والشفافية وزيادة الشعور بالملكية والمسؤولية بين المجتمعات المحلية.

بالإضافة إلى ما سبق، وفي حين يمكن أن تطرح تحلية المياه تحدياتٍ بيئية كبيرة، يجب تقييم الآثار الاجتماعية وتدابير التخفيف مقارنة بغيرها من الطرق البديلة لتوفير إمدادات المياه. فبينما يتم إخضاع تحلية المياه للفحص والتدقيق على نحو سليم بسبب بصمتها البيئية، فقد تؤدي العودة إلى بدائل أخرى غيرها إلى ظهور آثار خارجية أخرى بيئية واجتماعية أو تفاقمها، مثل الإفراط في استخراج المياه الجوفية وسحب المياه السطحية. ويمكن أن يؤدي استنزاف المياه الجوفية إلى هبوط الأرض، وزيادة الملوحة، وفقدان النظم الإيكولوجية الحيوية، في حين يمكن أن يؤدي الإفراط في سحب المياه السطحية إلى اختلال التوازنات الهيدرولوجية، وتدهور الموائل المائية، وتهديد التنوع البيولوجي. وأيضاً قد تنشأ مخاطر اجتماعية، مثل الحد من قدرة الأسر الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية على الوصول إلى المياه النظيفة، وظهور النزاعات حول تخصيص

الموارد، ناهيك عن المخاطر الصحية المرتبطة بتدهور جودة المياه. وتنطوي إعادة استخدام مياه الصرف الصحي التي تمت معالجتها أيضاً على آثار خارجية محتملة بيئية واجتماعية، منها تراكم الملوحة في التربة، والإثراء بالمغذيات الناتج عن غزارة استخدام المغذيات، ومخاطر التلوث الكيميائي ومسببات الأمراض. ويؤكد ذلك على ضرورة اتباع نهج شامل لإدارة الجوانب البيئية والاجتماعية. وينبغي أن تعمل إستراتيجية الموارد المائية المتوازنة على تعظيم المكاسب من إدارة الطلب على المياه، وأن توازن المفضالات بين خيارات العرض المختلفة، وتدمج تدابير التخفيف في إجراءات وتدابير تخصيص جميع الموارد المائية المتاحة على نحو مستدام (انظر القسم 5.2).

يجب تحقيق التوازن بين حماية البيئة وفاعلية التكلفة لضمان الجدوى المالية لتحلية المياه ومزيج إمدادات المياه بشكل عام. ويمكن أن يسهم اتباع نهج قائم على تحليل التكاليف والمنافع في المراجعات وإصدار التراخيص البيئية (على سبيل المثال، عبر التحقق من النفقات المتكبدة والمكاسب الناتجة عن فرض القيود البيئية) في الحيلولة دون تحوّلها إلى عبء مالي باهظ. وعلى الرغم من أن الالتزام البيئي قد يستلزم استثمارات أولية، فإنه يوفر قيمة طويلة الأجل عبر تقليل المخاطر الإيكولوجية، وزيادة القبول المجتمعي للمشروعات، ودعم الاستدامة الشاملة. في موازاة ذلك، ينبغي دمج الاعتبارات الاجتماعية، كمدى القدرة على تحمل التكاليف، والمساواة في الحصول على الخدمات، والآثار الواقعة على الفئات الأكثر احتياجاً، ضمن تحليلات التكاليف والمنافع لضمان ألا تتحقق السلامة المالية على حساب العدالة الاجتماعية. وتوفر اللوائح البيئية الواضحة والمُنفذة بفاعلية إطارَ عمل يمكن التنبؤ به يدعم التخطيط الفعال للمشروعات والأداء المستدام. كما أن تبسيط إجراءات الترخيص وتقديم الدعم الحكومي للمستحقين خلال مرحلة التخطيط يمكن أن يسرّع وتيرة تطوير تحلية المياه الجديدة. كذلك، تسهم عمليات التخطيط الشاملة والشفافة، بما في ذلك التواصل الفعال مع المجتمعات المتأثرة، في تعزيز التأييد العام من جانب الجمهور والحد من مخاطر التنفيذ. ويسهم تصميم التدابير البيئية والاجتماعية لتكون متوافقة مع الظروف والسياقات المحلية في الإدارة الفعالة للمخاطر البيئية والاجتماعية، إلى جانب تقليل المعوقات غير الضرورية التي تحول دون تطوير مشروعات جديدة لتحلية المياه.



5 أهمية الحوكمة في تعميم التحلية

حقق التطور المضطرد الذي تشهده تحلية المياه ودمجها في الأنظمة الوطنية للمياه آثاراً مهمة على الحوكمة الشاملة لقطاع المياه. ويشكل ذلك أهمية خاصة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، نظراً لحجم التطور وسرعته في مجال تحلية المياه. وقد صُممت الأطر الحاكمة لتطوير وإمداد وإدارة المياه على نحو تقليدي بما يتماشى مع موارد المياه السطحية والجوفية التقليدية، وتطورت على مدى عقود استجابةً لجملة من القوى الدافعة بحكم الواقع والقانون. إن دمج التحلية بشكل متزايد في مزيج الموارد المائية يتطلب إجراء تعديلات كبيرة على مستوى سلسلة الإمداد بأكملها، بالإضافة إلى تصميم إستراتيجيات موجهة حول سبل تخصيص هذه الموارد المائية الثمينة وتنميتها وحيازتها وتحمل المسؤولية بشأنها ودمجها في مزيج الموارد المائية. كما تقتضي عملية التحلية الانتقال من أساليب دورة المياه التقليدية الخطية، التي تركز على الإنتاج والاستهلاك والصرف، إلى إستراتيجيات الاقتصاد الدائري للمياه، خاصة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا التي تعد أكثر المناطق شحا في المياه على مستوى العالم. وتُعد هذه الإستراتيجيات ضرورية لتعظيم الفائدة من المياه المحلاة ذات الكلفة العالية، من خلال التشديد على تجميع ومعالجة وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي. إن الجمع بين إعادة استخدام مياه الصرف الصحي وتحلية المياه باعتبارهما ركيزتين متكاملتين ضمن إطار الاقتصاد الدائري للمياه يمكن أن يضمن للاستثمارات تحقيق أكبر نفع ممكن، مما يعزز كفاءة واستدامة إدارة موارد المياه. وتأتي الحوكمة الجيدة على نفس القدر من الأهمية الأساسية لتحقيق هذه المكاسب، وتمكين القطاع الخاص من المشاركة الفاعلة من خلال أدوار واضحة، وآليات للمساءلة، وحوافز مُحكمة التوافق. وتستعرض الأقسام التالية الاعتبارات الرئيسية المتعلقة بالأطر المؤسسية والقانونية والتنظيمية والخاصة بالسياسات اللازمة لتعميم تحلية المياه في منظومة أرصدة المياه.

5.1. ضمان ملاءمة الأطر المؤسسية والإدارية للغرض المرجو منها

تلعب الأطر المؤسسية لتوفير خدمات المياه دوراً حاسماً في دمج تحلية المياه كإستراتيجية لإدارة موارد المياه. وثمة أهمية أساسية لهذه الأطر تتمثل في تنسيق وتنظيم شتى الأنشطة المرتبطة بالتحلية (بما في ذلك الإنتاج، والإمداد، والتخزين، والتوزيع) وأصحاب المصلحة الرئيسيين (مثل مرافق المياه، الجهات التنظيمية، والمستهلكين). وتسهم الأطر ذات العمليات الواضحة، وتنسيق الإمدادات، والتدفقات المالية الملائمة في تيسير دمج مشاريع التحلية ضمن مجمل سياسات إدارة الموارد المائية ومخططاتها. علاوةً على ذلك، تضمن الأطر المؤسسية إدارة فعّالة للجوانب المالية والتنظيمية المتعلقة بدمج تحلية المياه. وتساعد الرقابة المناسبة على المشتريات وإدارة العقود وتخطيط الإنتاج ومراقبة الأداء على ضمان تلبية تحلية المياه لأهدافها التشغيلية والمالية. وتضمن الرقابة الملائمة والامتثال التزام هذه المشاريع بالمتطلبات البيئية ومعايير

الجودة. ويستلزم التنفيذ الناجح لهذه المشاريع إطاراً مؤسسياً وتنظيمياً ومالياً متكاملاً يشتمل على السياسات الملائمة، مدعوماً بحزمة متماسكة من الممارسات التقنية (الفنية) والإدارية والبيئية والاجتماعية. (انظر الإطار 5.1).

الإطار 5.1 • دعم استعادة وتوسيع نطاق قدرات تحلية المياه في ليبيا

اضطلعت الحكومة الليبية باستثمارات ضخمة في البنية التحتية للمياه بين عامي 1980 و2010 للتصدي لشح المياه الحاد (98 متر مكعب للفرد في عام 2021) وتلبية الحاجة المتزايدة لإمدادات المياه لدعم التنمية الاجتماعية والاقتصادية. تضمنت الاستثمارات ما يزيد على مليار دولار أمريكي لإنشاء محطات لتحلية مياه البحر مصممة لإنتاج ما يقرب من 330 ألف متر مكعب يومياً. ومع ذلك، أدى الصراع الطويل في البلاد إلى تدهور كبير في خدمات إمدادات المياه، حيث لم يعد هناك حالياً سوى عدد قليل من محطات التحلية التي تعمل بنحو 10% فقط من إجمالي طاقتها الإنتاجية. وبسبب القيود على الموازنة العامة للدولة، وانخفاض التعرفة الجمركية، والاعتماد الكبير على الدعم الحكومي، تدهورت البنية التحتية، وجابهت المحطات قصوراً شديداً في المدخلات الإنتاجية الأساسية، مما أجبر العديد منها على تعليق الإنتاج جزئياً.

على الرغم من التحديات التي تواجه ليبيا، تبقى مشاريع التحلية عنصراً أساسياً في إنشاء شبكة مرنة وقادرة على الصمود من إمدادات المياه وتعزيز الأمن المائي للسكان على المدى الطويل وسط ضغوط بيئية متزايدة. وتوفر التحلية بديلاً عن المصادر التقليدية للمياه يتسم بالاستقرار والصمود أمام العوامل المناخية. وتعكف ليبيا على وضع خطة طموحة ترمي إلى إنتاج مليوني متر مكعب من المياه المحلاة يومياً من خلال إنشاء 15 محطة جديدة تغطي معظم المدن الساحلية. يتطلب الشروع في تنفيذ هذه الخطة الطموحة ترسيخ بعض الركائز الأساسية من أجل تعزيز القدرة الإنتاجية والاستدامة والحوكمة الجيدة لتحلية المياه في ليبيا، ووضع أسس ثابتة تدعم المشاركة من القطاعين العام والخاص. وتشمل هذه الإجراءات تحديث السياسات والأطر التنظيمية، وإعادة هيكلة الترتيبات المؤسسية والمالية، وتحسين الكفاءة التشغيلية عبر إدماج تكنولوجيات حديثة، وتعزيز التخطيط البيئي والإستراتيجي للحفاظ على ثروات البلاد الطبيعية. وسيؤدي تنفيذ هذه التوصيات إلى رفع كفاءة المنشآت الحالية، وتوسيع القدرات لتلبية الطلب المستقبلي، ووضع أطر متينة تدعم مرونة القطاع مع مراعاة المسؤوليات البيئية، فضلاً عن تشجيع إستراتيجيات الاستثمار الشفافة وجذب مشاركة القطاع الخاص.

المصدر: البنك الدولي لعام 2025م.

يشكل الاعتماد المتزايد على مشاريع التحلية تحدياً للأطر القانونية القائمة والمصممة أصلاً لاستخدام المياه السطحية وموارد المياه الجوفية. وعادةً ما تعتبر كل من المياه العذبة ومياه البحر موارد عامة والدولة أمين عليها نيابة عن الجمهور ولخدمة مصالحه. ومعنى هذا أنه لا يمكن لأي فرد أو شركة المطالبة بالملكية الحصرية لهذه المصادر، كما أنها تلقي على عاتق الدولة المسؤولية عن ضمان استغلال الموارد المائية بشكل مستدام وعادل، مع تحقيق التوازن بين احتياجات شتى المستخدمين وحماية البيئة من أجل أجيال الحاضر والمستقبل. وعادةً ما تُدرج البنود القانونية التي تحكم هذه الالتزامات ضمن قوانين مختلفة، حيث تُنظم المياه السطحية والجوفية من خلال قوانين الموارد المائية، بينما تدرج البنود القانونية التي تحكم مياه البحر ضمن شبكة معقدة من القوانين الوطنية والاتفاقيات الإقليمية والمعاهدات الدولية والقوانين العرفية الدولية، والتي تهدف جميعاً إلى تنظيم استخدام البيئات البحرية والساحلية، وحمايتها وإدارتها.

قد تقتضي زيادة حجم التحلية في مزيج إمدادات المياه مراجعة أنظمة حقوق المياه. وقد ظلت مياه البحر على مدى التاريخ مجردة من أي قيمة اقتصادية تتعلق بالاستخدام المفيد، ولم تكن مشمولة ضمن قوانين الموارد المائية. كما أنه ليس من الواضح دائماً أي مستوى حكومي يمتلك سلطة الملكية على مياه البحر ويتمتع بالصلاحيات اللازمة لإصدار التصاريح وتراخيص الاستخدام لأطراف أخرى. وعليه فغالباً ما تكون هناك ضبابية تكتنف تنظيم مسألة الحق في استخراج مياه البحر ومن له الحق في ملكية الناتج من المياه المحلاة، وماهي المسؤوليات المتعلقة بالناتج من الرجيع الملحي. وقد يؤدي غياب نظام تنظيمي مناسب إلى نشوب نزاعات وإلى زيادة مضطربة في الطلب على المياه، مما يبدد فوائد التكيف وموثوقية الخدمة التي يمكن لمصادر المياه غير التقليدية أن توفرها ضمن المزيج المائي. كما يعد تكييف أنظمة حقوق المياه ضرورياً لتوفير الطمأنينة القانونية اللازمة للاستثمارات الخاصة في مجال تحلية المياه وتحسين عائد الاستثمار المعدل حسب المخاطر في توفير المياه. (البنك الدولي، 2025 أ).

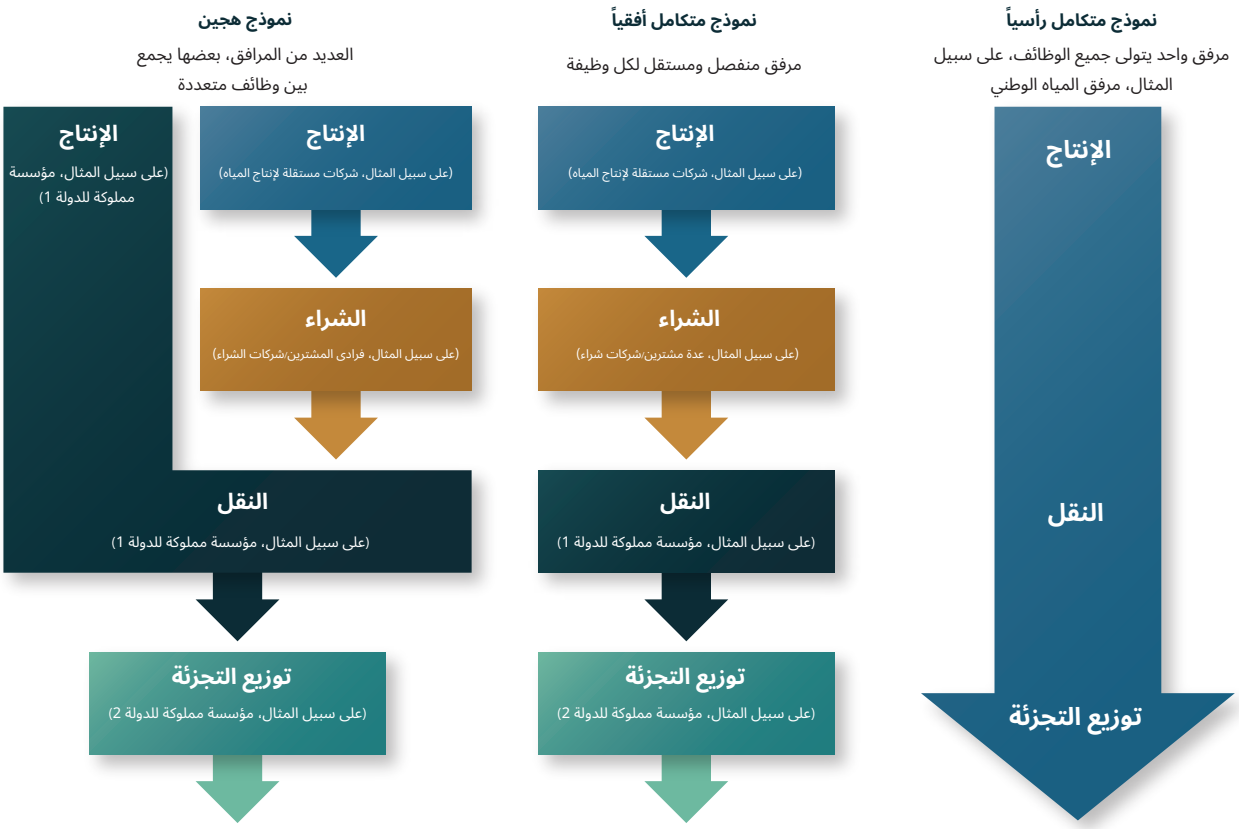
قد تتطلب الهياكل المؤسسية ونماذج الإدارة الخاصة بتوفير خدمات المياه تحديثاً لتطوير ودمج التحلية على نطاق واسع. ويتعين دمج موارد المياه المحلاة ضمن سلسلة القيمة المائية التي تشمل السياسات والتخطيط، والإمدادات الضخمة من الموارد المائية التقليدية وغير التقليدية، وتخزين ومعالجة وتوزيع المياه الصالحة للشرب، وتجميع ومعالجة مياه الصرف الصحي. وقد يحتاج دمج التحلية إلى تكييف أو تحديث الأدوار والمسؤوليات المرتبطة بالوظائف الأساسية لتقديم خدمات المياه، بما في ذلك الإنتاج الضخم للمياه (الهيئات والمرافق أو موردي القطاع الخاص الذين يمتلكون ويشغلون محطات الإنتاج)، وشراء المياه بالجملة (هيئات الشراء المسؤولة عن التفاوض وتنفيذ اتفاقيات شراء المياه مع موردي القطاع الخاص)، وتوريد ونقل المياه بالجملة (الهيئات التي تمتلك وتشغل خطوط النقل لمسافات طويلة)، والتوزيع بالتجزئة (المرافق الخاصة بمد المياه إلى المنازل)، وتجميع ومعالجة مياه الصرف الصحي لإعادة الاستخدام (مرافق مياه الصرف الصحي). ولمواجهة تحديات توفير خدمات تحلية المياه بالتحديد، قد تحتاج الترتيبات الحالية والتدفقات المالية بين المؤسسات والهيئات والمرافق المعنية إلى تعديلات تتماشى مع هذا الهدف. وقد يكون من الضروري للمؤسسات العامة المعنية تطوير قدرات (سعة) جديدة لتلبية متطلبات أنشطة التحلية أو تفويض شركاء من القطاع الخاص ببعضها.

هناك مجموعة متنوعة من النماذج المؤسسية لتكليف الجهات المسؤولة بمجموعة من المهام الرئيسية لتقديم خدمات المياه. يتمتع كل من هذه النماذج بمزايا وعيوب خاصة (البنك الدولي 2025ب)، ويجب مواءمتها مع السياق المحلي لكل بلد. ينتهج النموذج المندمج رأسيا أسلوباً مركزياً تضطلع فيه جهة واحدة بكافة مهام تقديم الخدمة. هذا التصميم المتكامل لوحدة المرافق يسهل عملية مجابهة تحديات المنبع والمصب (الإنتاج والتوزيع)، بالإضافة إلى إدارة موارد المياه المدمجة، وهو ما يعد خياراً أمثل في مراكز التركيزات السكانية و/أو الجهات ذات التصنيفات الائتمانية القوية. أما النموذج المندمج أفقيا فيفصل بين الكيانات والمؤسسات والجهات المسؤولة عن كل وظيفة من وظائف خدمات المياه. ويفتح هذا النموذج المجال لمزيد من فرص مشاركة القطاع الخاص في إمدادات المياه، خاصةً في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل ذات التصنيف الائتماني المنخفض. وقد يجلب المشترون المتحمسون أيضاً مهارات مالية وتعاقدية متخصصة لطرح وإدارة تحلية المياه الكبيرة بالشراكة بين القطاعين العام والخاص، والتي تختلف في طبيعتها عن مهارات إدارة البنية التحتية التي تقدمها المرافق القائمة. وقد يكون من الأسهل أيضاً تجنب تضارب المصالح في النماذج الأفقية.

تعتمد عملية تقديم خدمات المياه في معظم بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا نموذجاً هجينا يجمع بين عناصر الهياكل الرأسية والأفقية. فعلى سبيل المثال، قد يكون أحد المرافق مسؤولاً تاريخياً عن إنتاج المياه الصالحة للشرب وضخها ونقلها، في حين يتم تعيين هيئة أخرى كمشتر منفرد مكرس لشراء وتوصيل المياه التي تنتجها شركات خاصة ضمن مشاريع ضخمة لتحلية المياه بالاشتراك بين القطاعين العام والخاص (الشكل 5.1). وتحمي هذه الطريقة التي تعتمد على المشتري المنفرد تحلية المياه من مخاطر التوزيع اللاحقة المرتبطة بمرافق توزيع لا تتمتع بملاءة ائتمانية، مما يجعلها أكثر جاذبية للمستثمرين والممولين. وفي النهاية، يتوقف نجاح أي نموذج بدرجة كبيرة على السياق، فلا يوجد نهج يناسب جميع الحالات. وينبغي أن يتم تكليف الشركات (العامة أو الخاصة) بالمهام بناءً على تقييم شامل للمخاطر المرتبطة بمبادرة التحلية المعنية مع الأخذ بعين الاعتبار الأدوار التاريخية، والتفويض القانوني، والقدرات الفنية والإدارية، والقوة التمويلية والتعاقدية لمختلف الأطراف

الفاعلة في القطاع. كذلك تتغير العوامل الداخلية والخارجية بمرور الوقت. ويمكن للبلدان والمناطق ذات الاختصاص التحرك على استخدام الأسلوب العمودي (الرأسي) والأفقي لتحسين الكفاءة، وجذب مشاركة القطاع الخاص، وتقليل المخاطر. ويظهر هذا على سبيل المثال في الانتقال الأخير في السعودية من نموذج مركزي بشكل كبير إلى نموذج يتمتع باندماج أفقي أكبر.

الشكل 5.1 • أمثلة على النماذج المؤسسية لتوفير خدمات المياه



المصدر: مأخوذ بتصرف من البنك الدولي 2025ب.

ملاحظة: IWP = شركة مستقلة لإنتاج المياه؛ SOE = مؤسسة مملوكة للدولة.

5.2. إدراج تحلية المياه في الإدارة المتكاملة لموارد المياه

ينبغي النظر في وضع حلول تتعلق بجانب العرض، مثل التحلية، في إطار إستراتيجيات أوسع لقطاع المياه تشمل أيضا إدارة الطلب، وتحسين الكفاءة، وتخطيط الاستثمارات الرأسمالية. وعلى مدى التاريخ، تبنت بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا سياسات الاستثمار في جانب الإمدادات المائية ومنحتها الأولوية جنباً إلى جنب مع تطبيق تدابير متحررة نسبيا في إدارة الطلب رغم المعاناة من شح الموارد المائية. وقد نتج عن ذلك ارتفاع كبير في متوسط استهلاك الفرد في بعض البلدان، فضلا عما ساد من اعتقاد صدقه المجتمع على نطاق واسع بأن شح المياه ينبع حصرياً من القيود في جانب العرض. وأدى غياب السياسات القوية التي تضمن الاستغلال الأمثل والمستدام للموارد المائية الحالية إلى استهلاك المياه بشكل غير مسؤول وقصور الصيانة وتأخيرها، مما زاد من معدلات فاقد المياه، وأدى إلى توزيع غير فعال للمياه عبر القطاعات المختلفة، الأمر الذي فاقم التحديات المرتبطة بالاستدامة المالية، وأفضى إلى ارتفاع مستويات الدعم وزيادة أعباء الدين على قطاع المياه. وبالتالي، فإن النقص الشديد في المياه يزيد من حدة الأزمة في عموم المنطقة، مما يجعل الخلل المزمن في العرض والطلب يؤدي إلى استنزاف المصادر التقليدية للمياه.

يتسبب انخفاض أسعار المياه وارتفاع معدلات المياه غير المولدة للإيرادات في خلق تعقيدات أمام تطوير تحلية المياه الصالحة للتمويل وتحقيق الاستدامة المالية المطلوبة. وعلاوة على ذلك، فإن الاستهلاك غير المستدام للمياه وتوزيعها غير الفعال يبدد فاعلية التكيف لمشاريع التحلية، مما يزيد بلا داعي من بصمتها الكربونية ومن عوامل التأثير الخارجية على البيئة، بالإضافة إلى تشويه القدرة على تحسين توزيع الموارد المائية في قطاعات الزراعة، والصناعة، والاحتياجات المنزلية (دي وال وآخرون 2023؛ مولا 2018؛ البنك الدولي 2019). ويجب أن تُبنى قرارات الاستثمار في مشاريع التحلية على دراسات جدوى قوية وشاملة تجرى في إطار التخطيط الشامل للقطاع، مع تقييم المقارنة بين مشاريع التحلية والخيارات البديلة الأخرى. كما يجب أن يأخذ في الاعتبار إجمالي العرض والطلب على المياه، واختيار التكنولوجيات ومواقع المشاريع/ وأن تنظر في تقييم التأثيرات البيئية والاجتماعية والخاصة بالحوكمة، إضافة إلى تقييم الجدوى التجارية والمالية، وقدرة المستهلكين على تحمل التكاليف ومدى انعكاس ذلك على الاستدامة المالية بوجه عام.

يتطلب ضمان مستقبل مستدام للمياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إحداث تحول نموذجي نحو إستراتيجية إدارة متكاملة لموارد المياه تُوازن بين الاستثمارات على جانب العرض وإدارة شاملة على جانب الطلب. ولا تعد مجرد زيادة العرض كإصلاح سريع بدون إدارة فعّالة للطلب على المياه وتقليل خسائر المياه الناتجة عن التسرب (الإطار 5.2) وتدهور الجودة، حلاً مستداماً لتحديات أمن المياه في المنطقة، كما أنها لن تدر عوائد جيدة على الاستثمار (ROI). ولا ينبغي اعتبار التوسع في تحلية المياه بديلاً عن الإدارة المتكاملة لموارد المياه؛ بل يجب أن تكون خياراً أخيراً يُلجأ إليه بعد استنفاد خيارات أقل تكلفة على جانب العرض وتدابير إدارة الطلب،[45] مثل تقليل الخسائر المادية والتجارية في المياه، وتطبيق معايير أكثر صرامة وكفاءة لتخصيص واستخدام المياه، وتعظيم الاستفادة من إعادة استخدام مياه الصرف الصحي. كما يجب أن يقترن تطوير تحلية المياه بدعم تحسين حوكمة القطاع من أجل تعظيم عوائد الاستثمار، بما يشمل الأداء الفني والتجاري والملاءة الائتمانية لمشغلي المياه (المرافق، وجهات الشراء، وما إلى ذلك)، بالإضافة إلى إرساء الأطر المؤسسية والتنظيمية المناسبة، وتسعير المياه بشكل عادل وتخصيصها بكفاءة بين المستخدمين النهائيين، مع ضمان استدامة مالية للقطاع وحماية الأسر الأكثر ضعفاً واحتياجاً والأولى بالرعاية. وعلى الرغم من وجود عدد من الأدوات المتاحة لتسهيل عمليات تحسين الاستثمار (الإطار 5.3)، ثمة ضرورة لاتخاذ قرارات سياسية صعبة لتحسين مستوى الحوكمة في القطاع. وهذه القرارات ليست سهلة، لكنها تُشكّل أساساً لبيئة داعمة تُفضي إلى تحسين خدمات التشغيل والصيانة، وتشجع مشاركة القطاع الخاص، وتضمن استدامة طويلة الأجل للاستثمارات الرأسمالية.

45 القيمة بالدولار الأمريكي لكل متر مكعب من المياه يتم توفيرها.

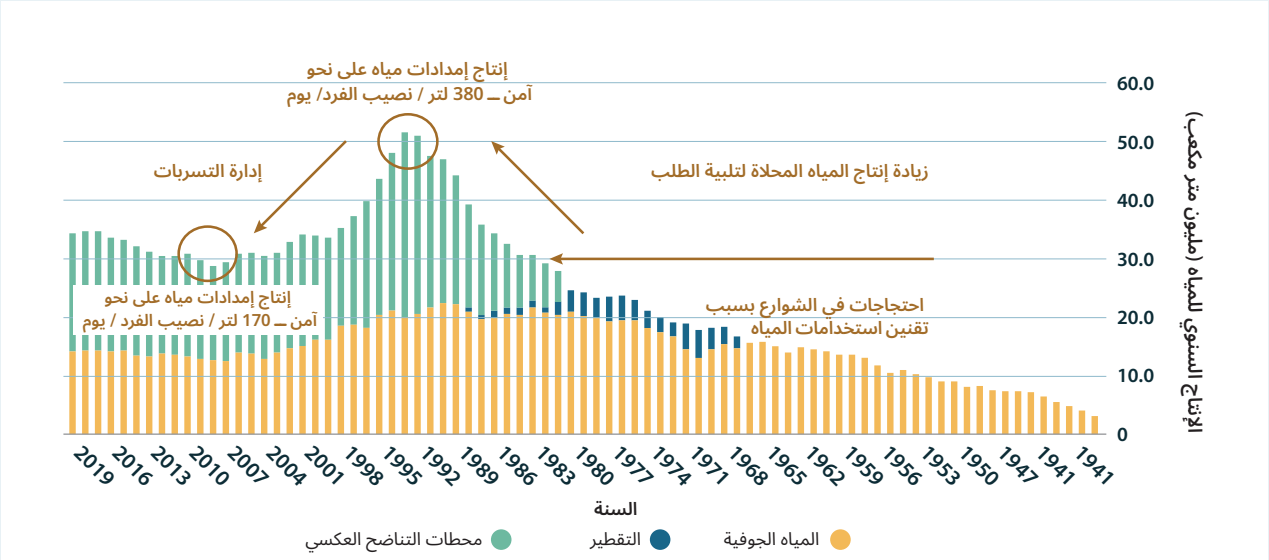
إن تزايد دمج الموارد المائية غير التقليدية يُشكّل تحدياً للأدوار والمسؤوليات القائمة التي يجب مراجعتها ضمن سياق النهج المتكامل لإدارة موارد المياه. ومع دمج تحلية المياه وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي في إمدادات مصادر المياه التقليدية، هناك حاجة إلى مراجعة أساليب حوكمة المياه التقليدية، مع استخدام نهج أكثر تعقيداً ومراعاة للسياق. ويؤدي الاعتماد المتزايد على المياه المُحلاة في مزيج مصادر المياه إلى طمس الحدود التقليدية بين المصدر وصنبور المستهلك، كما يُدخِل منتجين جدداً للمياه بالجملة ويجلب عقوداً جديدة، ويزيد من قوة الارتباط بين تخطيط موارد المياه والجهات التنظيمية لقطاعي الطاقة والسواحل. ويجب على إدارات الأحواض ومستجمعات المياه ومخططي خدمات المرافق إضافة موارد جديدة للمياه ضمن عملية تحسين المصادر المتعددة لها، وتحديد كمية المياه المحلاة التي يجب إضافتها إلى المصادر القائمة، وتوقيت استخدامها بالتناسب مع المياه السطحية، و الجوفية، وإعادة الاستخدام، والنقل، وإدارة الطلب. ويقتضي هذا تطوير أدوات تحليلية جديدة، وتبادل البيانات بين الجهات والمؤسسات والمرافق المعنية، وربما استحداث وظيفة تنسيق مركزية لتجنب القرارات المجتزأة واستنزاف الأصول. و يستدعي هذا أيضا أن تقوم الجهات التنظيمية بتحديث القواعد المتعلقة بالحقوق، والتسعير، والجودة، وحماية البيئة.

الإطار 5.2 • الإدارة المتكاملة للمياه في مالطا

وضعت مالطا إطاراً متطوراً لإدارة المياه بشكل متكامل للتصدي لتحديات شح المياه لديها، يقوم على الاستخدام المتزامن لتدابير زيادة العرض وإدارة الطلب. وتعاني الجزيرة من شح شديد في الموارد الطبيعية للمياه (70 متر مكعب للفرد)، حيث يعتمد توفير المياه العذبة بشكل كامل على المسطحات المائية الجوفية الهشة التي تتعرض للاستغلال المفرط ولتسرب مياه البحر إليها. ويعمل إطار سياسة المياه في مالطا على توسيع قاعدة موارد إمدادات المياه من خلال إدخال الموارد المائية غير التقليدية تدريجياً، مثل تحلية مياه البحر، وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة، وتجميع مياه الأمطار في المناطق الحضرية والريفية. ونتيجة لذلك، انخفض نصيب المياه الجوفية في مزيج الإمدادات من 61% عام 2014 إلى 48% عام 2021. ويكتمل هذا التنويع في مصادر الإمداد بتدابير إدارة الطلب لتحسين كفاءة استخدام المياه، مما يقلص بدوره الحاجة إلى إنتاج المياه غير التقليدية. وتمكنت مالطا من خلال الجمع بين إجراءات العرض والطلب، والمدعومة بالخطة الثانية لإدارة حوض النهر، من مواءمة سياسات المياه الخاصة بها مع توجيهات الاتحاد الأوروبي، في الوقت الذي عززت فيه قدرتها على الصمود أمام آثار تغير المناخ (سابيانو 2019).

أسفر هذا النهج المنسق عن تحقيق نتائج ملموسة تسهم في تلبية الطلب الوطني على المياه مع تخفيف الضغط على الموارد الطبيعية من المياه العذبة. وقد أسهم برنامج إدارة وإصلاح التسربات الصارم الذي تتبناه مالطا في خفض الطلب من قبل البلديات على المياه بنسبة تقارب 40% منذ تسعينيات القرن العشرين، على الرغم من النمو السكاني، وزيادة النشاط الاقتصادي، وتحسن مستويات المعيشة. وأتاح ذلك تخفيض استخراج المياه الجوفية لاستخدام البلديات من 21 مليون متر مكعب في أوائل تسعينيات القرن العشرين إلى 13 مليون متر مكعب في عام 2019، مع الحفاظ على مستويات إنتاج المياه المحلاة دون تغيير يُذكر (الشكل B5.3.1). كما يتم تحفيز الاستخدام الفعّال للمياه على مستوى الأفراد من خلال حملة وطنية للحفاظ على المياه، وأنشطة توعية تفاعلية، وآليات تسعير حسب الشرائح، مما أدى إلى الحد من متوسط استهلاك الفرد من المياه إلى نحو 110 لتر يومياً. أما في الزراعة، فقد تم تجهيز معظم الأراضي المروية بتكنولوجيات الري بالتنقيط، بينما تدار المياه الجوفية بشكل أكثر استدامة من خلال القياس التدريجي. وقد اقترنت هذه المكاسب الناتجة عن كفاءة استهلاك المياه بتحسين كفاءة استخدام الطاقة إذ انخفضت حصة إنتاج المياه من إجمالي الطلب الوطني على الطاقة من 10% في تسعينيات القرن العشرين إلى أقل من 4% في عام 2019. ولعب الاستثمار في تكنولوجيا التناضح العكسي (RO) للارتقاء بتقنيات الأغشية واستعادة الطاقة دوراً حيوياً في تخفيض متطلبات الطاقة الخاصة بالتحلية إلى النصف من 6 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب في عام 2000 إلى 3 كيلوواط ساعة لكل متر مكعب في عام 2020 (سابيانو 2019).

الشكل ب5.3.1 • إنتاج المياه – مالطا



المصدر: سابيانو 2019.

يساعد تطبيق أساليب الاقتصاد الدائري في تعظيم قيمة عمليات التحلية. ويؤدي دمج المبادئ الدائرية، المستندة إلى الانتقال من الأنظمة الخطية إلى الأنظمة التجديدية، إلى إطالة عمر موارد المياه مع تعزيز الفوائد الاقتصادية. ويحقق تجميع المياه المحلاة ذات التكلفة العالية نسبياً عبر شبكات الصرف الصحي ومعالجتها وإعادة استخدامها فوائد متعددة، حيث يوفر مصدراً موثوقاً للاستخدامات الصناعية والزراعية وحتى مياه الشرب، غالباً بتكاليف استثمار أدنى واستهلاك أقل للطاقة مقارنة بعمليات التحلية الجديدة. ويسهم دمج إعادة الاستخدام ضمن دورة التحلية في تخفيض تكاليف التشغيل وفتح مصادر دخل جديدة من بيع المياه المعالجة. وفي الوقت نفسه، يخفض الطلب على موارد المياه العذبة ويخفف الضغط على الأنظمة البيئية الطبيعية. ولا يقتصر الأمر على الحفاظ على الموارد المائية الشحيحة، بل يشمل أيضاً خفض البصمة البيئية الناتجة عن عمليات التحلية، وخاصة من خلال تقليل استهلاك الطاقة والتخفيف من أعباء التخلص من الرجيع الملحي.

يتطلب تحسين حلول إمدادات المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا أخذ تحلية المياه في الاعتبار ضمن الحلول السيادية لتأمين موارد المياه. وتقسم أكثر من 60% من موارد المياه في المنطقة بين بلدين أو أكثر، مما يفاقم حالة انعدام اليقين والمخاطر على اعتبارات الأمن المائي الوطني، ويزيد من الضعف أمام العوامل الخارجية. ويؤدي غياب الاتفاقيات الشاملة العابرة للحدود إلى تفاقم هذه الأزمة. ومع احتدام شح المياه نتيجة زيادة الطلب وتغير المناخ، يُتوقع أن تزداد المخاطر المتعلقة بالمنافسة على الموارد المشتركة. وفي هذا السياق، يمكن لتحلية المياه أن تقلل من الاعتماد على الموارد المائية العابرة للحدود، مما يعزز الأمن المائي السيادي من خلال توفير مصدر مستقل وموثوق للمياه العذبة. ونظراً لارتفاع تكاليف تحلية المياه، فإن قرارات الاستثمار في هذا النشاط تحتاج إلى تقييم في ضوء المخاطر السياسية المرتبطة بالتعاون في مجال المياه عبر الحدود، مع الأخذ في الاعتبار الفوائد طويلة الأجل المترتبة على الاكتفاء المائي والتكاليف المحتملة لعدم الاستقرار السياسي. وعلى الرغم من ارتفاع التكاليف، أصبحت التحلية خياراً إستراتيجياً يعتمد عليه العديد من بلدان المنطقة بشكل متزايد للتخفيف من شح المياه الذي تفاقم بسبب تغير المناخ، وأيضا لتعزيز الأمن المائي السيادي.

الإطار 5.3 • دعم اتخاذ القرار من خلال أداة المحاكاة وتعظيم الاستفادة من المحفظة (SPOT)

ينبغي أن تكون التحلية جزءاً من محفظة مشاريع متنوعة ومحكمة التخطيط للحد من المخاطر الكلية على إمدادات المياه ضمن سياق إستراتيجيات إدارة الموارد المائية المتكاملة. وعلى الرغم من أن إنتاج المياه المحلاة ومياه الصرف الصحي المعالجة غالباً ما يكون أعلى كلفة من الموارد المائية التقليدية، فإنه يتميز بدرجة أكبر من الموثوقية وإمكانية التنبؤ نظراً لاستقلاله عن التقلبات في معدلات هطول الأمطار. لذلك، فإن تحديد كمية كافية من المياه غير التقليدية وتحقيق التوازن المناسب بين التحلية وإعادة الاستخدام قد يسهمان في تحسين العائد المعدل حسب المخاطر لمحفظة الاستثمارات المائية، سواء للمرفق أو لمؤسسة المياه، رغم ارتفاع تكلفته.

تم تطوير أداة المحاكاة وتعظيم الاستفادة من المحفظة (SPOT) بحيث تساعد مسؤولي التخطيط المائي على تحديد المحفظة الأكثر كفاءة من حيث التكلفة لمشروعات الإمداد التي توفر في الوقت نفسه مستوى التكيف المطلوب مع تغير المناخ. كما تُقيّم أداة SPOT الخيارات بين الموارد المائية غير التقليدية. وقد تتيح تحلية المياه درجة أعلى نسبياً من الأمن المائي، مع مواجهة عقبات تنظيمية ومعوقات اجتماعية أقل، ويجب إعطاء الأولوية لها في الاستخدامات البلدية أو في المواقع النائية حيث إن إعادة استخدام مياه الصرف الصحي قد تكون أقل تكلفة، ولها تأثيرات بيئية أقل، ويجب إعطاء الأولوية لها للاستخدامات الزراعية والصناعية.

المصدر: البنك الدولي 2025ج.

5.3. اعتبارات الحوكمة لمشروعات الشراكة بين القطاعين العام والخاص في تحلية المياه

مع تصاعد الضغط على الموارد العامة، يُتوقع أن يلعب القطاع الخاص دوراً أكبر في تطوير تحلية المياه، غير أن تحقيق النجاح يعتمد على حوكمة قوية. وبالإضافة إلى تعبئة رأس المال، تسهم مشاركة القطاع الخاص في تقديم الابتكار والخبرة المتخصصة، ولكنها تحتاج إلى قواعد واضحة ومتسقة. ولذلك، تُعد الحوكمة الفعالة عنصراً أساسياً لضمان نجاح الشراكات بين القطاعين العام والخاص في تحلية المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي. ويجب أن تضع الأطر الواضحة حدوداً للمسؤوليات المتعلقة بالتخطيط والتوريدات والتعاقدات والشراء والملكية والدفع والتنظيم والمراقبة على مستوى سلسلة القيمة الخاصة بالمياه. ويتعين أن تكون المهام والاختصاصات محددة بشكل صريح، والتنسيق مُنظماً، والتدفقات المالية قابلة للتنبؤ. ويعد وجود جهات مخصصة للشراء وإدارة قوية للعقود أمراً ضرورياً لضمان دمج المياه المحلاة والمعاد تدويرها بشكل موثوق وفعال من حيث التكلفة في هذه المنظومة. وفي غياب هذه الركائز الأساسية، قد تواجه الشراكات بين القطاعين العام والخاص مخاطر مجابهة التعقيدات وزيادة الأعباء المالية دون معالجة الفجوات الكامنة في الحوكمة.

يقتضي توسيع نطاق مشاركة القطاع الخاص أن تختار الحكومات النماذج المؤسسية وتوزيع المخاطر بما يتناسب مع القدرات الإنتاجية والملاءة الائتمانية وعمق السوق. وعادة ما يتحمل الشركاء من القطاع الخاص مخاطر البناء والتكنولوجيا والتشغيل والصيانة، بينما تظل مسؤوليات مثل توفير مواقع العمل والحصول على التصاريح من اختصاص القطاع العام (الحكومي). وتقتضي مخاطر الطلب والدمج هيكلة متقنة للعقود، فيما تحتاج المخاطر الاقتصادية الكلية أو مخاطر سوق الصرف إلى أدوات مالية مناسبة أو دعم على مستوى السياسات. ويجب أن يقترن الدعم الحكومي الشفاف بإصلاحات قطاعية لتجنب الالتزامات اللانهائية.[46] وتسهم القواعد الواضحة والقابلة للتنفيذ في خفض علاوات المخاطر وتوسيع قاعدة المشاركين في المناقصات، بينما يمكن للتمويل العام الموجه أن يساهم في معالجة التعثر في منبعه، في حين يمكن لأدوات مثل الضمانات وتعزيز الائتمان أن تدعم تعبئة رأس المال الخاص. وتم استعراض هذه المفاهيم بشكل أكثر تفصيلاً في القسم 6.2.

46 انظر https://ppp-risk.gihub.org/risk-allocation-matrix/water-waste/water-desalination/.

كما تُعد عمليات الشراء التنافسية والشفافة ضرورية للاستفادة من مشاركة القطاع الخاص في مشاريع التحلية. وينبغي التعامل مع العروض المقدمة دون دعوة، إذا ما تم النظر فيها، بحذر وباعتبارها استثناء للمشتريات والتعاقدات والمناقصات العامة بهدف حشد قدرات القطاع الخاص مع الحفاظ على المصلحة العامة. ويتعين على الجهات المختصة الإفصاح عن معايير التقييم وشروط العقود والمعالم المحددة، فضلاً عن توفير وثائق موحدة تتضمن مواصفات فنية واضحة. وتساهم استطلاعات السوق المنظمة وطلبات العروض (RFPs) المفصلة والقابلة للتمويل مع توزيع متوازن للمخاطر في جذب مقدمي عروض موثوقين وتحقيق قيمة مقابل المال. كما يجب أن تقوم شراكات القطاعين العام والخاص على عقود مستندة إلى الأداء تتضمن مؤشرات أداء رئيسية قابلة للقياس وآليات دفع واضحة. كذلك يلزم تضمين الضمانات البيئية في التصاريح ومؤشرات الأداء الرئيسية مع ضمان المتابعة المستمرة والإفصاح العام للجمهور. وحيث إن تعرفة الخدمات لا تعكس التكلفة، ينبغي تخصيص الدعم بشكل شفاف في الموازنة العامة للدولة. ويساهم وجود هيئات تنظيمية مستقلة والمراجعات المنتظمة في الحفاظ على مصداقية العقود وقابليتها للتكيف. وتتضمن الإرشادات الأساسية وضع أطر واضحة وشفافة، وإجراء دراسات جدوى صارمة تراعي المصلحة العامة، وخلق بيئة تنافسية قوية قدر الإمكان، وضمان تحقيق قيمة مقابل المال من خلال الاستعانة بمستشارين خارجيين (البنك الدولي 2017ب). كما يجب أن تستمر مبادئ الحوكمة الجيدة بعد إسناد العقود، حيث تحتاج وحدات إدارة العقود إلى صلاحيات واضحة وموظفين مؤهلين وأنظمة بيانات قوية وحقوق تدخل وآليات لتسوية النزاعات بهدف معالجة تدني الأداء والحد من انقطاع الخدمة. ويوضح الإطار 5.4 بشكل مفصل مزايا عمليات الشراء الشفافة.

الإطار 5.4 • زيادة الشفافية في مناقصات مشاريع التحلية لخفض التكلفة

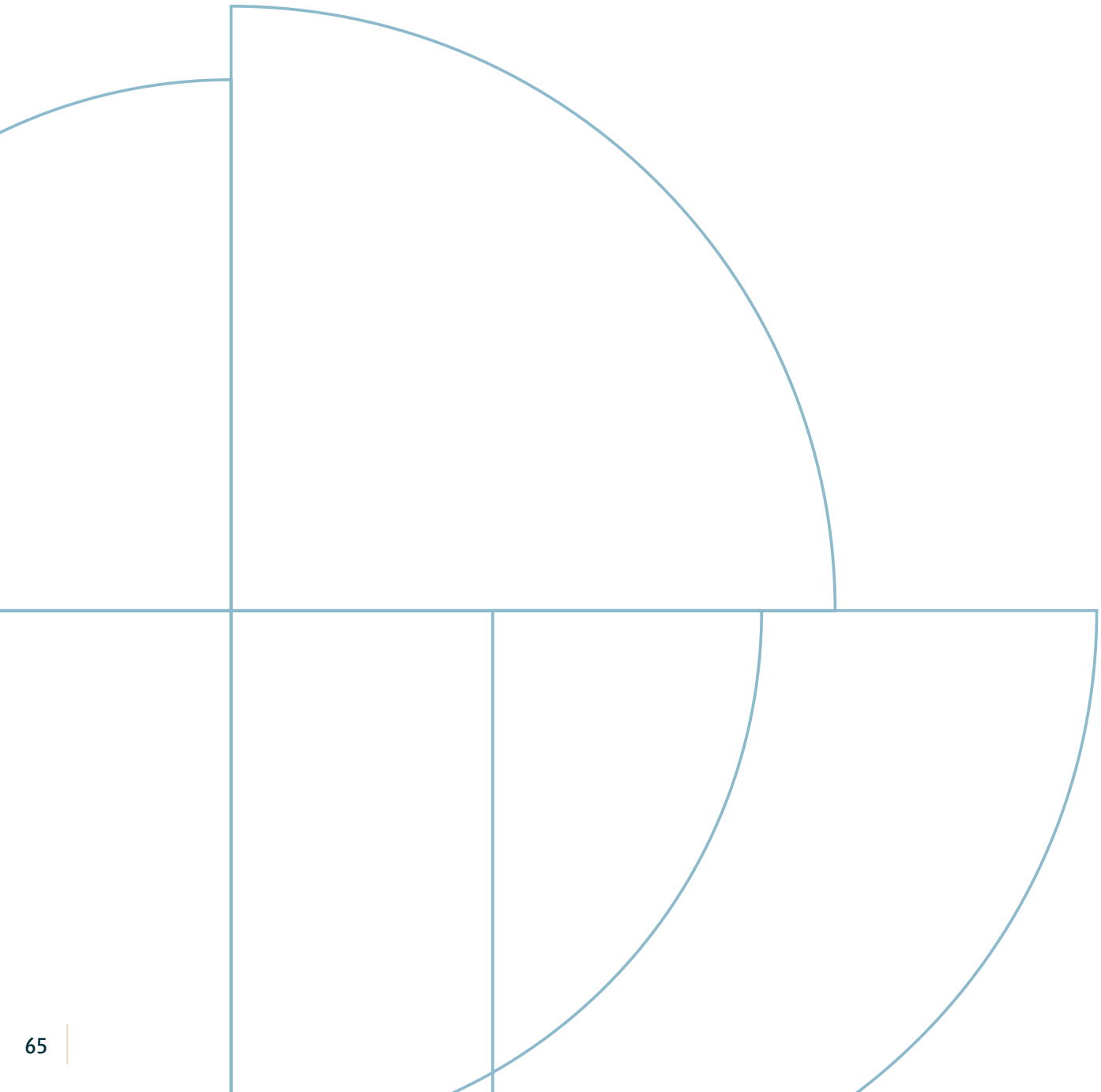
تعد الشفافية في إجراءات الشراء والتعاقدات والمناقصات المنظمة والموثوقة أساساً لتوفير بنية تحتية لتحلية المياه تتسم بالفاعلية من حيث التكلفة والقدرة على الصمود. وعادة ما تتضمن مشاريع التحلية عقوداً طويلة الأجل، وارتفاع التكاليف المبدئية، وتكنولوجيات متطورة، مما يجعل مرحلة التعاقد وطرح المناقصات عاملاً محورياً في تحديد القيمة على المدى الطويل. وعندما يكتنف الغموض الإجراءات والعمليات وتصبح غير قادرة على المنافسة أو غير مستقرة، تواجه الحكومات تكاليف مرتفعة وعلاوات مخاطر متزايدة، وانخفاضاً في الكفاءة، وضعفاً في الابتكار، وعزوف بعض المتقدمين. وعلى النقيض من ذلك، فإن أطر الشراء الشفافة يمكن أن تحفز المنافسة القوية، وتجذب مستثمرين أكفاء، وتقلل من التكاليف طوال دورة حياة المشروع من خلال تحديد معايير واضحة، والتفاعل المبكر مع السوق، والإفصاح العام للجمهور عن المعلومات الرئيسية.

تعزز عمليات وإجراءات الشراء والتعاقدات والمناقصات الشفافة المساءلة وتحسن الأداء خلال دورة حياة المشروع. ومن خلال الكشف عن نتائج المناقصات وشروط العقود ومعالم التنفيذ، تخلق الجهات المسؤولة عن المشتريات التعاقدات والمناقصات بيئة ملائمة للرقابة ومتابعة الأداء. وفي قطاع التحلية، حيث تعد الموثوقية التشغيلية ومراقبة التكاليف على مدى العقود أمرا أساسيا، تساعد مثل هذه الممارسات في ضمان التزام الشركاء من القطاع الخاص بتعهداتهم الفنية والمالية. كما تعمل الحوكمة القوية للمشتريات والتعاقدات والتوريدات والمناقصات على تقليل مخاطر إعادة التفاوض والنزاعات على العقود والتي يمكن أن تؤثر سلباً على تقديم الخدمة وعلى ثقة الجمهور.

بالنسبة لواضعي السياسات في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، فإن شفافية المشتريات والتعاقدات والمناقصات ليست مجرد ضرورة فنية، لكنها تمثل استثماراً إستراتيجياً في الانضباط المالي وثقة الجمهور. ومع تسريع المنطقة لاستثماراتها في مجال التحلية، فإن مواءمة ممارسات المشتريات والتعاقدات والمناقصات مع المعايير الدولية لا يساعد فقط في ضمان تحسين إمكانية تمويل هذه المشاريع ، بل أيضا في استدامتها اجتماعياً ومالياً. ومن خلال ترسيخ الشفافية في أنظمة المشتريات والتعاقدات والمناقصات، يمكن للحكومات تحقيق نتائج أفضل لمواطنيها، مع تعزيز شرعية ومصداقية قرارات الاستثمار العام.

ختاماً، تُعتبر إدارة التزامات المالية العامة الطارئة أحد أهم جوانب حوكمة الشراكة بين القطاعين العام والخاص. وينبغي على وزارات المالية تبني إطار عمل منضبط لتحديد هذه الالتزامات والموافقة عليها وتسعيرها وتوثيقها والإفصاح عنها، خاصة تلك المرتبطة بمشاريع تحلية المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي في إطار الشراكة بين القطاعين، وذلك استناداً إلى تقييمات مسبقة للمخاطر على المالية العامة أثناء مرحلة فحص المشاريع، مع الموافقة الصريحة على الدعم الحكومي مثل الضمانات، والتيسيرات المرتبطة بتوفير السيولة، والتعويض عن خفض كميات المياه المشتراة، وآليات الدعم المالي الأجنبي، ضمن الحدود المعلنة. ويجب تحديد سقف المخاطر من خلال بنود تعاقدية موحدة تشمل صيغ دفع واضحة عند إنهاء المشاريع، وحدودا للتعويض عن تغيير القوانين، وهياكل ضمان للدفع ذات مدة محددة، مع تقدير رسوم ومصروفات الضمانات بناءً على المخاطر والخسائر المتوقعة. كما يجب إخضاع المشاريع لاختبارات تحمل الضغوط. هذه الضغوط تشمل صدمات الطلب وأسعار الطاقة وأسعار صرف النقد الأجنبي لتقييم المبالغ الممكنة التي يتعين على الحكومة دفعها، ويتم دمج هذه المخاطر والجوانب في أطر المالية العامة متوسطة الأجل مع إدراجها في البيانات السنوية لمخاطر المالية العامة. وينبغي أن تكون تدابير ضمان (تأمين) الدفع (مثل حسابات الضمان والحسابات الاحتياطية وضمانات المخاطر الجزئية) بحجم يناسب الاحتياجات التشغيلية مع اقتران ذلك بالظروف التي تؤدي إلى خفض بعض الالتزامات أو اشتراطات الضمانات عند تحسن أداء جهة شراء المياه، وبالتالي يمكن تجنب الالتزامات اللانهائية. كما ينبغي اعتماد سجل مركزي لإدارة مخاطر الشراكة بين القطاعين على المالية العامة، إلى جانب وحدة فعالة لإدارة العقود ورصد ومتابعة مختلف الظروف وتنفيذ التعهدات والاتفاقيات ومراجعة المخاطر طوال مدة العقد، مما يضمن الشفافية للمستثمرين مع الحفاظ على حدود آمنة لمخاطر المركز المالي.[47]

47 يُعد نموذج تقييم مخاطر مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص على المالية العامة (PFRAM)، الذي وضعه صندوق النقد الدولي ومجموعة البنك الدولي، أداة تحليلية لتقييم التكاليف والمخاطر المالية الناجمة عن هذه المشاريع. وقد تم تصميم هذا النموذج لمساعدة الحكومات في تقييم الآثار المالية لهذه المشاريع، إلى جانب إدارتها بشكل استباقي. انظر **https://www.ppiaf.org/documents/5782.**



الصورة من: شاتيستوك/خوسيه لويس مسيس

6 إستراتيجيات لتوسيع نطاق تحلية المياه واستدامتها

قد ينطوي توسيع أنشطة ومشاريع تحلية المياه على تحديات مالية كبيرة على المستوى القطاعي وللمشاريع الفردية، لا سيما في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ولذلك، يُمكِن أن تُوفِّر التحلية مصدراً موثوقاً للمياه، لكن تداعياتها المالية تخلق تحديات كبيرة للبلدان ذات القدرات الاقتصادية المحدودة في المنطقة، مما يستلزم الدراسة الدقيقة والتخطيط الإستراتيجي لتحقيق إدارة مستدامة للموارد المائية. ويستعرض هذا القسم أولاً إستراتيجيات رئيسية للمساعدة في التخفيف من الآثار على المالية العامة وتعزيز الاستدامة المالية لقطاع المياه مع تَولِّي التحلية دوراً أكبر في مزيج إمدادات المياه. ثم يستكشف النُهُج المُبتَكرة لتعبئة التمويل على مستوى مشاريع التحلية الفردية، مع تركيز خاص على فرص الاستفادة من استثمارات القطاع الخاص من خلال أدوات تمويل جديدة، وأُطُر تنظيمية، وآليات تمويل عامة أو خاصة. وغالباً ما يتفاقم العبء المالي لتحلية المياه بسبب الحاجة إلى دعم لتوفير أدوات لحماية الأسر الضعيفة والأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية، وهو ما يُبرز أهمية مراعاة اعتبارات العدالة الاجتماعية في إستراتيجيات التمويل للتأكد من قدرة الناس على تحمُّل تكاليف الخدمات ووصول الجميع إليها وعدم استبعاد أحد بسبب تغيُّر نماذج تقديم الخدمات.

6.1. تحقيق الاستدامة المالية لقطاع المياه

ينطوي إدخال التحلية في الميزان المائي على آثار وانعكاسات مالية كبيرة تتطلَّب تخطيطاً إستراتيجياً من أجل بناء القدرة على تحمُّل التكاليف والاستدامة على المدى الطويل. فعملية التحلية باهظة التكاليف بطبيعتها، وعلى الرغم من تناقص متوسط تكلفة المياه المُحلَّاة، فإنها لا تزال بوجه عام أعلى بأربعة إلى خمسة أضعاف من المياه السطحية المُعالَجة (GWI 2022).[48] ويرجع ذلك في المقام الأول إلى طبيعة عملية التحلية من حيث كثافة استخدام الطاقة، إلى جانب أنها تستلزم استثمارات رأسمالية كبيرة في البنية التحتية وارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة مقارنة بمصادر المياه التقليدية.[49] وتُقدَّر متطلبات التمويل المتوقعة لتطوير قدرات تحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في الفترة من 2026 إلى 2029 بأكثر من 6.3 إلى 7.2 مليارات دولار سنوياً للنفقات الرأسمالية، مع حاجة إضافية إلى ما يتراوح من 5.4 إلى 6.7 مليارات سنوياً للعمليات التشغيلية.[50] وقد تكون هذه قد تكون هذه المبالغ مرهقة، خاصةً للحكومات ذات الحيز المالي الضيق، وتصنيفات مخاطر سيادية مرتفعة.

تتفاقم الآثار المرتبطة بارتفاع تكاليف تحلية المياه في العديد من البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل في المنطقة بسبب الضعف المالي للعديد من مُقدِّمي خدمات المياه. ويعمل الكثير من شركات المرافق في هذه البلدان بالفعل بمستويات منخفضة لاسترداد التكاليف، وتعرفات

48 بلغ متوسط تعرفة المياه في 41 مدينة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا 0.57 دولار أمريكي للمتر المُكعَّب في عام 2022.

49 يُخطط الكثير من البلدان لزيادة إنتاجها السنوي من المياه المُحلَّاة بمئات الملايين من الأمتار المُكعَّبة. وكمرجع، تشير بيانات مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI حول محطات التحلية إلى أن أسعار الأعمال الهندسية والمشتريات والتشييد (EPC) تتراوح عادة بين 2 إلى 6 ملايين دولار أمريكي لكل مليون متر مُكعَّب سنوياً وتُنشَر على الإنترنت (الحسابات في هذا التقرير لمجموعة فرعية من محطات تحلية لا تقل سعتها عن 5 ملايين متر مُكعَّب سنوياً والتي تم ترسية عقود عليها منذ عام 2010، استناداً إلى تقرير GWI DesalData 2025). انظر https://www.desaldata.com. تم الاطلاع عليه في 11 أبريل/نيسان 2025.

50 انظر GWI DesalData 2025، التوقعات العالمية Global Forecast. تم الاطلاع عليها عبر الإنترنت في 28 أبريل/نيسان 2025.

مُحدَّدة بمستويات أقل من التكاليف الفعلية، واعتماد كبير على الدعم الحكومي. ومن المرجح أن يتطلَّب البدء بتطبيق عملية التحلية الباهظة التكاليف زيادة في إعانات الدعم المباشر، والالتزامات الطارئة من خلال ترتيبات البناء والتشغيل ونقل الملكية (BOT)، وإعانات الدعم الضمني للكهرباء، مما يُؤدي إلى تعريض المالية العامة لمزيد من الضغوط. وفي ظروف مُعيَّنة، قد يُوجَد سبب وجيه لدعم أنشطة تحلية المياه — مثل الاستثمارات الرائدة، أو لتوفير مياه ميسورة التكلفة لفئات السكان الضعيفة والأكثر احتياجاً والمناطق النائية، أو تخفيف الضغط على مكامن المياه الجوفية التي تعاني من الإفراط في الاستغلال. وكما ناقشنا في الإطار 6.1 والفقرات التالية، فإن دمج التحلية في التخطيط الأوسع لقطاع المياه، وترشيد التكاليف، وتنفيذ سياسات داعمة ولوائح تنظيمية صارمة هي عناصر ضرورية لحماية الاستدامة المالية لقطاع المياه مع ازدياد أهمية التحلية في مزيج إمدادات المياه.

الإطار 6.1 • إستراتيجيات تحسين الاستدامة المالية لتحلية المياه في جمهورية مصر العربية

وضعت جمهورية مصر العربية خطة طموحة للتوسُّع في أنشطة تحلية المياه من مليون متر مُكعَّب يومياً في عام 2023 إلى 8.85 ملايين متر مُكعَّب يومياً بحلول عام 2050. وتتطلَّب هذه الخطة استثمارات رأسمالية تُقدَّر بنحو 8.5 مليارات دولار أمريكي و0.8 مليار دولار سنوياً للتشغيل والصيانة (O&M). وغالباً ما يتم تمويل الاستثمارات الرأسمالية بالكامل من خلال الموازنة العامة للدولة، وعلى الرغم من زيادة التعرفة بنسبة 47% في عام 2018، فإن مستوى استرداد مُقدِّمي الخدمات لتكاليف التشغيل يبلغ حوالي 90%. وتُطبَّق التعرفة بشكل مُوحَّد في جميع أنحاء البلاد، لكن توجد فروق كبيرة في تكاليف المياه (من 3.4 جنيهات للمتر المُكعَّب في الجيزة إلى 20 جنيهاً للمتر المُكعَّب في سيناء). ونتيجة لذلك، جرى تقديم إعانات دعم كبيرة تبلغ قيمتها 38 مليون دولار أمريكي كدعم مباشر في الفترة 2020–2021، إلى جانب دعم غير مباشر يتعلق بالتزامات الدين ودعم الكهرباء. وفي ظل سيناريو "بقاء الأمور على حالها"، ستتطلَّب التكاليف المرتبطة بخطة التوسُّع مبلغاً إضافياً يتراوح من 233 إلى 306 ملايين دولار أمريكي لكل قدرة (سعة) إضافية قدرها مليون متر مُكعَّب في اليوم، مما يخلق عبئاً تمويلياً إضافياً على القطاع.

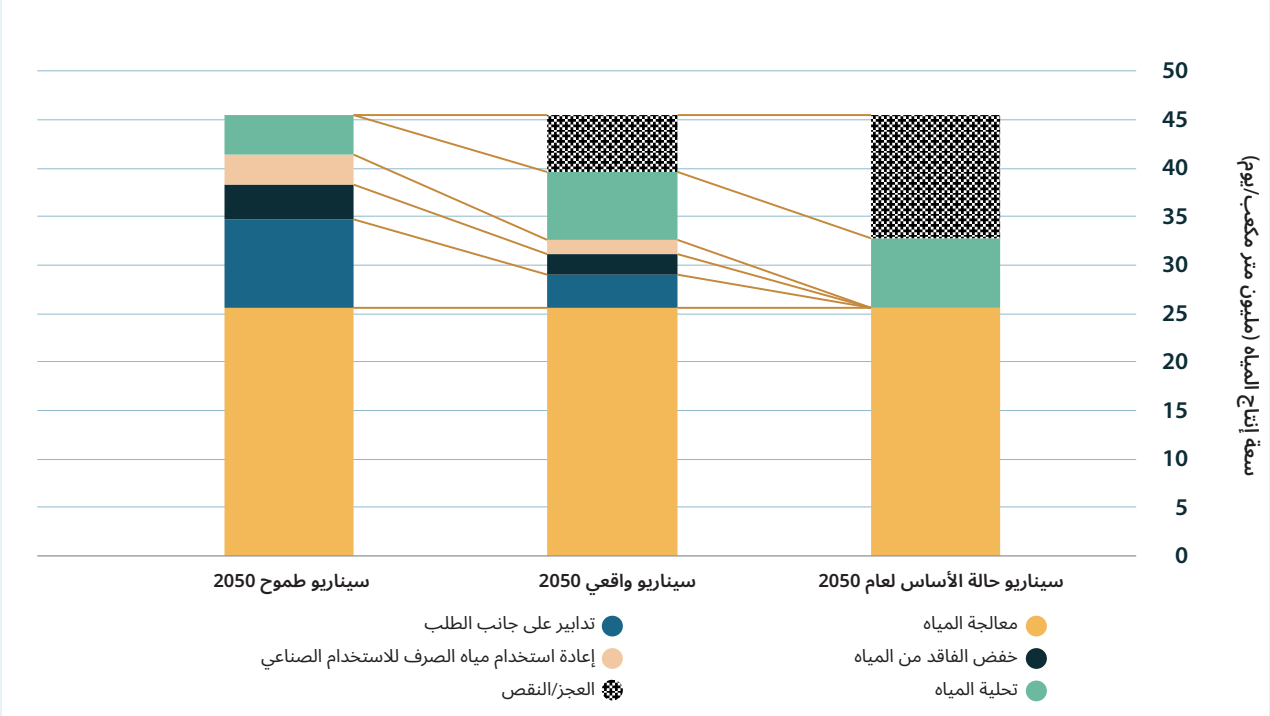
لقد اقتُرحت عملية موازية ذات مسارين لتوجيه مسار المالية العامة نحو المزيد من الاستدامة المالية. ويعتمد ذلك على تقييم استدامة المالية العامة لتحلية المياه ودعم صندوق مصر السيادي، المسؤول عن تنفيذ برنامج تحلية المياه من خلال الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP). وساندت مجموعة البنك الدولي مساري عمل متوازيين: في المسار الأول، قامت مؤسسة التمويل الدولية (IFC)، في إطار اضطلاعها بدور استشاري المعاملات والعمليات، بتنفيذ إجراءات العناية الواجبة (الفحوصات النافية للجهالة) الفنية والقانونية والمالية والبيئية والاجتماعية في المشروع التجريبي وأوصت بهيكل معاملات يتضمَّن أساليب مبتكرة لخفض التكاليف، بما في ذلك اعتماد نموذج هجين للشراكة بين القطاعين العام والخاص. وفي مسار العمل الثاني، أجرى البنك الدولي للإنشاء والتعمير (IBRD) دراسات العناية الواجبة والفحص النافي للجهالة بالتعاون مع مؤسسات التمويل الإنمائي والمانحين لتحديد وتقييم مصادرهم المتاحة للتمويل المُيسَّر ومنتجاتهم المالية المختلفة التي يمكن أن تدعم تعبئة رأس المال الخاص. وساعد التعاون الوثيق بين البنك والمؤسسة، والوكالة الدولية لضمان الاستثمار (MIGA) في استكشاف خيارات التمويل المختلط، وخطط الشراكة بين القطاعين العام والخاص، والضمانات، والأدوات المالية الهجينة، مع تقديم خدمات استشارية للمشروعات والعمليات للتأكُّد من التنظيم الجيد للمشروعات وسلامة الترتيبات المالية. وتُركِّز العملية الموازية المقترحة ذات المسارين على سلسلة من إصلاحات القطاع وإجراءات العناية الواجبة المطلوبة وهيكلة مبتكرة لتحلية المياه بغية تحقيق كفاءة التكاليف والاستدامة المالية.

من الضروري اتخاذ تدابير لإصلاح قطاع المياه في أربعة مجالات رئيسية: الإدارة المتكاملة للموارد المائية، بما في ذلك دمج التكاليف الاقتصادية لمصادر إمدادات المياه المختلفة في عملية اتخاذ القرارات؛ وإدارة جانب الطلب التي تشمل مراجعة معايير إمدادات المياه، وتوسيع إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المُعالَجة، وترشيد هياكل التعرفة؛ وتحسينات في كفاءة التشغيل، بما في ذلك تقليل فاقد المياه، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة، وتعزيز آليات الفوترة والتحصيل؛ والتحسينات التنظيمية والمؤسسية، بما في ذلك الإدارة المستندة إلى الأداء لمرافق المياه، وتعزيز الجهة المُنظِّمة للقطاع، وزيادة الشفافية في تحويلات إعانات الدعم والتمويل البرامجي. ويمكن أن تساعد هذه الإصلاحات القطاعية في توفير حوالي 2.33 مليار متر مُكعَّب (BCM) من المياه سنوياً بحلول عام 2050 (الشكل ب6.1.1). وبدورها، ستؤدي هذه الإصلاحات إلى تأجيل وتقليل الحاجة إلى استثمارات في تحلية المياه، مما يُقلِّل من أعباء النفقات الرأسمالية (CAPEX) لتحلية المياه بمقدار 5.5 مليارات دولار أمريكي، والنفقات السنوية للتشغيل والصيانة بمقدار 500 مليون

دولار. وسيساعد هذا أيضاً في تجنب التقادم التكنولوجي مع احتمال أن تصبح تكنولوجيات أكثر تقدماً متاحة لتقليل تكاليف المعالجة وتوليد الطاقة وإدارة الرجيع الملحي.

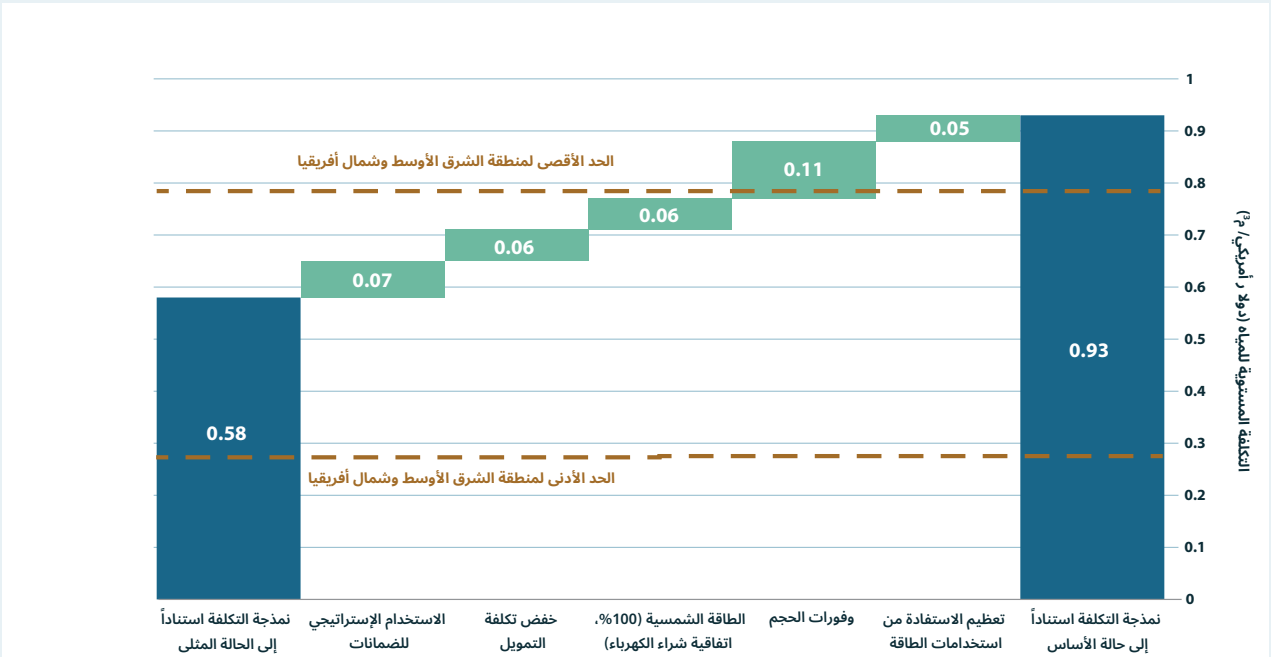
يمكن أن يؤدي الالتزام الدقيق بمتطلبات العناية الواجبة والهيكلة المبتكرة لتحلية المياه إلى تقليل تكلفة المتر المُكعَّب من المياه المُحلَّاة (الشكل ب6.1.1). وتشمل المُتطلَّبات الأساسية لتحقيق مشاريع جاذبة للمستثمرين أو المقرضين، من بين أمور أخرى، الاختيار السليم للموقع لتقليل تكاليف ما قبل المعالجة وما بعدها؛ وتصميم أحجام المحطات على ألا تقل سعتها عن 400 ألف متر مُكعَّب يومياً كحد أدنى للاستفادة من وفورات الإنتاج الكبير؛ وتيسير ربط تحلية المياه بالطاقة المتجددة من خلال شراء شهادات الطاقة المتجددة، وإعلان تعرفة تنافسية لنقل الكهرباء، والسماح لشركات التوليد الخارجية ببيع الكهرباء بشكل مباشر لكبار المستهلكين؛ وتطبيق متطلبات كفاءة استخدام الطاقة من خلال إجراءات تعاقدية. ويُمكِن أن يؤدي التأنِّي في اختيار الأدوات المالية وهيكلتها إلى تعزيز جدوى المشروعات وخفض الاستثمارات الأولية، من خلال أدوات مثل السندات، والضمانات، وتمويل فجوات الجدوى، والتمويل المختلط، والمدفوعات السنوية المتكررة.

الشكل ب6.1.1 • التدابير على جانبي الطلب والعرض لإدارة الطلب على المياه في عام 2050



المصدر: البنك الدولي 2024 (غير منشور).

الشكل ب6.1.2 • أثار مختلف تدابير الهيكلة المالية على تكلفة تحلية المياه



المصدر: البنك الدولي 2024ب (غير منشور).

ملاحظة: تستند التكلفة القائمة على النمذجة لمحطة بسعة 100 ألف متر مكعب يوميا. وقد تم حساب الحد الأدنى والأقصى للقيم الإقليمية لمجموعة من 18 محطة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بسعة تتجاوز 100 ألف متر مكعب يوميا تمت ترسيتها بين عامي 2019 و2023. MENA = منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا؛ PPA = اتفاقية شراء الكهرباء.

يُمكِن أن يساعد دمج برامج التحلية الوطنية في الإستراتيجيات الأوسع لتخطيط قطاع المياه في تحديد الحجم المناسب لقدرات (سعة) التحلية المطلوبة والتحكم في التكاليف. ويجب أن تكون الخطوة الأولى نحو تحقيق سلامة المالية العامة واستدامتها هي تحديد الكميات المطلوبة من قدرات التحلية بالتنسيق مع مصادر الإمدادات الأخرى وتدابير جانب الطلب (انظر الإطار 6.1 والإطار 6.2). وحالما يتحدَّد النطاق اللازم لعمليات التحلية، يُمكِن استكشاف مجموعة متنوعة من خيارات التكنولوجيا والتصميم لخفض التكلفة النسبية للمياه المُحلَّاة، مثل تحقيق الاستفادة المثلى من حجم المحطات وموقعها، وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة، واستخدام مصادر الطاقة المتجددة في تشغيل محطات التحلية (انظر الإطار 6.1). ويُمكِن للسياسات الإستراتيجية واللوائح التنظيمية والقواعد والمعايير التي يجب اتباعها عند شراء السلع أو التعاقد على الخدمات أن تُحفِّز على استخدام هذه الأساليب المُوفِّرة للتكاليف أو تفرض تبنِّيها، مما يساعد على منع حدوث عجز كبير في المالية العامة مع التوسُّع في برامج التحلية. ويُمكِن أن يساعد تشجيع إدارة الطلب والكفاءة التشغيلية من خلال سياسات قطاعية مُوجَّهة في التقليل بدرجة كبيرة من الاعتماد على التحلية وغالباً ما تكون هذه الطريقة هي الأسلوب الأمثل والأقل تكلفة لزيادة مستويات توافر المياه. ويُمكِن أن تساهم تدابير مثل تعديل التعرفة للتأثير على سلوك المستهلكين والتشجيع على استخدام المياه بكفاءة، ومراجعة القواعد المُنظِّمة لمتوسط نصيب الفرد من إمدادات المياه في معايير التصميم، وفرض عقوبات على الاستهلاك المفرط، واستخدام الأدوات الرقمية لإبلاغ المستهلكين باستخدامهم للمياه في تحقيق إدارة فعالة للطلب. علاوة على ذلك، يُوفِّر تقليل فاقد المياه منافع ثلاثية للمرافق: انخفاض الإنتاج، وتقليل استهلاك الطاقة، وزيادة المياه المفوترة. وتُعزِّز هذه الإستراتيجيات معاً السلامة المالية لقطاع المياه مع تقليل أو تأجيل الحاجة الفورية لقدرات تحلية إضافية لتلبية الطلب المستقبلي.

الإطار 6.2 • تحسين أداء المرافق وتقليل خسائر شبكات المياه لتحقيق استقرار في مبلغ فاتورة توسيع قدرات تحلية المياه

يُقدِّم البنك الدولي خدمات استشارية وأعمالاً تحليلية لدعم البلدان والجهات المتعاملة معه من أجل إثراء جهود وضع تدابير تهدف إلى تحسين الأمن المائي. وخلص أحد هذه التحليلات للتكلفة الوطنية للمياه إلى أن الإيرادات التي تم تحصيلها لمُقدِّمي خدمات المياه غطت 49% فقط من تكاليف التشغيل، وتمت تغطية الجزء الباقي من الدعم المُقدَّم من الخزانة العامة، والاستثمارات المباشرة، والمُخصَّصات من المرفق (الصندوق) الوطني للمياه، والدخل الناتج عن خدمات إدارة المشاريع المُسنَدة للغير. وفي هذه الحالة تحديداً، لم يتم تعديل تعرفة المياه منذ عام 2005، حيث تُمثِّل الفجوة بين التكلفة الفعلية لتقديم خدمات المياه والإيرادات المُحصَّلة من تعرفة المياه 0.44% من الناتج المحلي الإجمالي للبلاد. وشكَّلت إعانات الدعم لمحطات التحلية حوالي خُمْس العجز، مع دعم ضمني إضافي للتحلية من خلال الطاقة والاستغلال والإنفاق الرأسمالي (CAPEX). وأظهرت نماذج المحاكاة أنه إذا تمكن مُقدِّمو الخدمات من زيادة إنتاجيتهم وكفاءة شبكاتهم، مما يُقلِّل الحاجة إلى إنتاج المياه المُحلَّاة، فإن التعرفة اللازمة لتغطية تكاليف التشغيل ستكون 0.59 دولار أمريكي للمتر المُكعَّب. وفي المقابل، فإنه في غياب مثل هذه التحسينات والزيادة المصاحبة في إنتاج المياه المحلَّاة، يجب أن تكون التعرفة أعلى بحوالي 50%، عند حوالي 0.89 دولار أمريكي للمتر المُكعَّب.

المصدر: البنك الدولي 2019 (دراسة تحليلية غير منشورة).

من شأن استخدام المزيج الصحيح من سياسات المالية العامة والقواعد التنظيمية أن يساعد في تحقيق استرداد التكاليف وتقليل آثار زيادة أنشطة تحلية المياه على المالية العامة. وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، تعد تعرفة استخدام المياه من بين أقل التعرفات على مستوى العالم، وعلى الرغم من أن إنجازات التقدم التكنولوجي والتحسينات في كفاءة عملية التحلية تُقلِّل بشكل مُطرد من تكلفة إنتاج المياه المُحلَّاة، فإنها غالباً ما تظل أعلى بكثير من تعرفة مياه التجزئة (GWI 2022).[51] ومع التوسُّع في أنشطة تحلية المياه وارتفاع الإنفاق التشغيلي، يجب أن ينمو تمويل القطاع - سواء من خلال وضع تعرفة مرتفعة أو زيادة الدعم الحكومي - وذلك لتغطية هذه التكاليف الإضافية. ومن منظور السياسات، يُفضَّل إجراء زيادات تدريجية في تعرفة خدمات المياه، لأنها تساعد على تذكير المستهلكين بشح المياه، وتدعم الاستدامة المالية لمُقدِّمي الخدمات، وتُعزِّز استرداد التكاليف بشكل كاف. ومع ذلك، يجب تنفيذ مثل هذه التعديلات تدريجياً لتجنب صدمات مفاجئة في القدرة على تحمُّل التكاليف من جانب المستهلكين. ويُمكِن أيضاً تعزيز الكفاءة المالية من خلال توجيه مُخصَّصات الدعم الحكومي من الخزانة العامة إلى جهات التوزيع المسؤولة عن دفع تكلفة إمدادات المياه التي يتم توريدها للمستخدمين، بدلاً من توجيهها إلى منتجي المياه المحلَّاة أو مشتريها أو القائمين على نقلها، مما يحسن الشفافية والمساءلة والحوافز لتحقيق كفاءة التكاليف على مستوى سلسلة الإمداد. وقد يكون وجود إطار تنظيمي قوي وموثوق يُبيِّن كيفية تحديد تعرفة المياه أمراً ضرورياً لتحقيق التوازن بين السلامة المالية لشركات المياه والحاجة إلى تقديم خدمات فعالة ومُنصِفة وعادلة وعالية الجودة. وقد تكون آليات تنظيمية مثل ربط تعرفة المياه بالتضخم ضرورية لتخفيف مخاطر السيولة المرتبطة بتقلبات أسعار الطاقة، والتشجيع على استخدام المياه بكفاءة، والحرص على حصول جميع المستهلكين، ومنهم الأسر ذات الدخل المنخفض، على خدمات مياه ميسورة التكلفة.

قد تُؤثِّر القواعد التنظيمية للقطاعات ذات الصلة، لا سيما قطاع الطاقة، أيضاً على جدوى مبادرات تحلية المياه وتكلفتها وآثارها البيئية. ولأن الطاقة تُشكِّل في العادة ما بين الثلث والثلثين من إجمالي تكلفة إنتاج المياه المُحلَّاة، فإن جدوى مشاريع التحلية وتقلُّب تكاليفها يرتبطان ارتباطاً وثيقاً بالإطار الوظيفي والتنظيمي لقطاع الطاقة. إن توفير إمدادات موثوقة من الطاقة، وتقليل تقلبات أسعار الكهرباء، وتنفيذ لوائح تنظيمية داعمة للطاقة — مثل السماح لمشروعات التحلية باستخدام شهادات الطاقة المتجددة، وتيسير نقل الطاقة الكهربائية عبر شبكات الغير (طرف ثالث/جهة خارجية)، والسماح لشركات التوليد الخارجية ببيع الكهرباء بشكل مباشر لكبار المستهلكين — كلها عناصر ضرورية لترشيد

51 تشير بيانات مؤسسة معلومات المياه العالمية GWI لعام 2022 عن 41 مدينة رئيسية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إلى أن متوسط تعرفة المياه يبلغ 0.57 دولار أمريكي للمتر المُكعَّب. ولا تحقق تكلفة إنتاج تقل عن هذا المعيار سوى مجموعة محدودة من تحلية المياه الأخيرة، ولكن لا يشمل ذلك حتى التوزيع وجمع ومعالجة مياه الصرف الصحي.

التكاليف وخلق حوافز اقتصادية مواتية لتحلية المياه. وتتحدَّد جدوى ربط أنظمة الطاقة المتجددة بمشاريع التحلية أيضاً من خلال موثوقية الإمدادات، والأحكام التنظيمية، والمعايير البيئية. علاوة على ذلك، تتأثَّر البصمة الكربونية لتحلية المياه بدرجة كبيرة بمعامل انبعاثات شبكة الكهرباء والقدرة القانونية لمُشغِّلي محطات التحلية على شراء الطاقة المتجددة أو توليدها. وقد يكون من الصعب تنسيق السياسات بين الوزارات والإدارات، لكن تعزيز الاتساق والتناسق بين هذه المجالات المختلفة يمكن أن يجلب منافع كبيرة على مستوى النظام كله.

6.2. تعبئة التمويل لتحلية المياه

تزداد أهمية رأس المال الخاص لتلبية احتياجات الاستثمار في تحلية المياه، لكن ذلك لن يتحقق إلا إذا كان قطاع التحلية مستقراً ويتمتع بقواعد تنظيمية جيدة. وتسعى بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا سعياً حثيثاً إلى الاستفادة من خبرات القطاع الخاص وقدرته على التمويل لتنفيذ تحلية المياه. وتم بناء حوالي نصف القدرات الجديدة الواسعة النطاق لتحلية المياه في أنحاء العالم من خلال مشاريع شراكة بين القطاعين العام والخاص في أوائل عشرينيات القرن الحالي، وبوجه عام بنظام البناء والتشغيل ونقل الملكية BOT أو البناء والتملك والتشغيل (BOO). ولكن من المستبعد انخراط القطاع الخاص على نطاق واسع تاريخياً في مشروعات التحلية ما لم تُعزِّز السياسات الأساسية الكفاءة والاستدامة والتحوط المالي. وغالباً ما توجد فجوة كبيرة بين مستويات تعرفة المياه والتكلفة النسبية للمياه—أي التكلفة التي يمكن بها استرداد كل من النفقات الرأسمالية والتشغيلية لمنشأة جديدة. ويُحجِم القطاع الخاص عن الانخراط في مشروعات التحلية دون الحصول على دعم مالي كبير أو ضمانات دفع، وهو ما يخلق التزامات طارئة على الحكومات. ولا يمكن أن تكون هذه الأدوات المالية الرامية لتخفيف المخاطر بديلاً عن أساسيات الحوكمة الجيدة للقطاع، مثل المُشغِّلين الأكفاء، والتسعير الملائم للمياه، وهيئة تنظيمية تتمتع بالنزاهة والشفافية. وفي غياب هذه العناصر، قد يُؤدِّي انخراط القطاع الخاص في مشروعات التحلية إلى تقادم الأصول، ومخاطر تقلبات أسعار الصرف، وتعهدات لشراء أو بناء قدرات لتحلية المياه لا يمكن الوفاء بها بدون دعم حكومي كبير أو الاستدانة.

تتطلَّب تعبئة التمويل الخاص في العادة إمَّا مشاريع جاذبة للمستثمرين أو مرافق جاذبة للمستثمرين—وكلاهما غائب إلى حد كبير في معظم البلدان متوسطة الدخل ومنخفضة الدخل في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويصبح اجتذاب التمويل الخاص أسهل عندما تكون المشاريع جاذبة للمستثمرين أو المقرضين — أي عندما يمكنها سداد رأس المال المُستثمر بعائد كاف يأتي حصرياً من التعرفة الناتجة عن مبيعات المياه. ومع ذلك، فإن العديد من شركات المرافق في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا لا تسترد حتى تكاليفها للتشغيل والصيانة في العمليات والمشروعات القائمة من خلال التعرفة، ناهيك عن تمويل إنشاء وتوسيع مشروعات لتحلية المياه — التي عادة ما تكون تكاليف الوحدة فيها أعلى بكثير من مصادر المياه التقليدية. وبدلاً من ذلك، يمكن للشركات التي تتمتع بمراكز مالية قوية أن تحصل على التمويل إذا كانت تحويلات الدعم المتوقعة من الخزينة العامة تُغطِّي عجز النفقات التشغيلية وتُوفِّر فائضاً من التدفقات النقدية. ويتيح هذا تقديم التمويل حتى للمشاريع التي من المستبعد أن تحقِّق إيرادات تكفي لتغطية تكاليفها دون دعم خارجي (بسبب ضعف مستويات استرداد تكاليف التعرفة) ولكن مع تحقيق منافع إنمائية عالية، مثل توسيع الوصول إلى الخدمات. وفي الواقع، فإن المشاريع المؤهلة للتمويل والكيانات المؤهلة للتمويل نادرة في أنحاء الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، باستثناء دول مجلس التعاون الخليجي ذات الدخل المرتفع مثل البحرين وقطر والسعودية والإمارات العربية المتحدة، التي تموِّل تحلية المياه بدعم مالي حكومي كبير.

يجب على السلطات العامة تصميم تحلية المياه بعناية واختيار نماذج لتقديم الخدمات تُعظِّم القيمة المُحقَّقة مقابل المال في سياقها. وتعد القرارات السليمة والشفافة بشأن تصميم المشاريع—بما في ذلك الهيكلة المالية، ونماذج تقديم الخدمات، ونوع ودرجة مشاركة القطاع الخاص، وأساليب الشراء والتعاقد والتوريد—عناصر جوهرية لاستدامة تحلية المياه. ومع ذلك، فإن الإرشادات القائمة لتقييم الشراكات بين القطاعين العام والخاص وتحليل القيمة مقابل المال لا تأخذ في الاعتبار غالباً المخاطر والخصائص المُحدَّدة التي تنطوي عليها تحلية المياه. ويتطلب اختيار النموذج الصحيح لتقديم الخدمات والهيكل المالي المناسب التقييم خطوة بخطوة لملاءمة مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص وتحديد التوزيع المناسب للأدوار بين الكيانات العامة والخاصة في التصميم والبناء والتشغيل والصيانة والتمويل (البنك الدولي 2025د). وتتراوح خيارات تقديم الخدمات لتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا من المشتريات العامة التقليدية (عقود الأعمال

الهندسية، والتوريدات، والإنشاءات الممولة من الحكومة دون مشاركة طويلة الأمد للقطاع الخاص) إلى مجموعة متنوعة من نماذج عقود الشراكة بين القطاعين العام والخاص التي تُوزِّع التمويل، والملكية، والمسؤولية التشغيلية، والمخاطر بطرق مختلفة بين الأطراف العامة والخاصة.[52] وتُظهِر هذا الطائفة المتنوعة أن النموذج الأمثل للشراكة بين القطاعين يعتمد على حجم المشروع ونوعه وسياقه القطاعي وسياق البلد المعني. وبالنسبة للمشروعات البلدية واسعة النطاق لتحلية المياه مع جهة شراء موثوقة، تعد ترتيبات البناء والتملُّك والتشغيل BOO والبناء والتشغيل ونقل الملكية BOT وشركة مستقلة لإنتاج المياه IWP نماذج ثبتت جدواها للتوزيع المناسب للمخاطر وتقليل تكاليف الإنتاج. وبالمثل، الشراكات بين القطاعين العام والخاص التي تعتمد اعتماداً كاملاً على التمويل الخاص هي النموذج الأكثر شيوعاً في دول مجلس التعاون الخليجي. وعلى النقيض من ذلك، تعتمد البلدان متوسطة الدخل ومنخفضة الدخل عادة على نموذج التصميم والبناء والتشغيل (DBO)، والعقود الهجينة، والأنواع المختلفة لنموذج الأعمال الهندسية والتوريدات والإنشاءات EPC، نظراً لصغر الأنظمة، وضعف القدرات المالية، وعدم نضج القدرات التنظيمية والمؤسسية. وإذا كان التمويل العام متاحاً ولكن الخبرة الخاصة في التشغيل والصيانة مطلوبة، فقد يكون نموذج التصميم والبناء والتشغيل DBO أكثر ملاءمة. وبالنسبة للمشاريع التجريبية أو الرامية إلى إثبات جدوى المفهوم، يقدم استخدام التمويل العام مع عقد للتشغيل والصيانة نهجاً أبسط وأسرع، مما يتيح للحكومات بناء القدرات قبل الانتقال إلى مشاريع أكثر تقدماً للشراكة بين القطاعين العام والخاص. وبالنسبة للمشاريع التي تعاني من ارتفاع مستوى عدم اليقين التقني، يُوصَى بتحالف أو نموذج قائم على التعاون الوثيق بين جميع الأطراف، يتم فيه تقاسم المخاطر بشكل جماعي وتنشأ بيئة عمل تُشجِّع على الابتكار.

تبرز الخبرات المكتسبة في أنحاء المنطقة عوامل النجاح والجوانب السلبية التي تواجهها مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص لتحلية المياه. فقد اعتمدت السعودية على نطاق واسع نماذج شركة مستقلة لإنتاج المياه IWP مع اتفاقيات شراء طويلة الأجل للمياه، حيث يتم شراء أكثر من 70% من إنتاج المياه الجديد من خلال مشاريع شراكة بين القطاعين العام والخاص مثل رابغ 3، والشقيق 3، وينبع، وجبيل. وحقَّقت الإمارات العربية المتحدة تعرفة قياسية منخفضة للمياه من خلال شركات مستقلة لإنتاج المياه، مثل الطويلة وحصيان. وكانت عُمان رائدة في مشاريع تعمل بنظام شركة مستقلة لإنتاج المياه IWP والبناء والتشغيل ونقل الملكية BOT، وأرست الجزائر عقوداً على محطات تحلية بنظام البناء والتشغيل ونقل الملكية، واختارت تونس إنشاء محطات تحلية باستخدام عقود الأعمال الهندسية والتوريدات والإنشاءات EPC مع مسؤولية عن التشغيل والصيانة لفترات قصيرة، وهو ما يُبيِّن تنوع النهج المتبعة في محطات التحلية. وهناك عدة عوامل تدعم نجاح مشروعات الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPPs). على سبيل المثال، ساعدت اتفاقات الشراء القوية التي تتضمَّن التزامات من شركات المرافق الحكومية بأخذ المُنتَج أو دفع ثمنه على ضمان تحقيق إيرادات حيوية لهذه المشروعات؛ وسهَّلت الأُطُر القانونية الشفافة للشراكة بين القطاعين العام والخاص (مع وحدات حكومية متخصصة مسؤولة عن برامج الشراكات بين القطاعين في دول مثل مصر والأردن والمملكة العربية السعودية) توحيد عمليات الشراء؛ وساعدت الابتكارات المؤسسية مثل الفصل بين مشاريع المياه والطاقة من خلال شركات مستقلة لإنتاج المياه في خفض التكاليف وزيادة المرونة المتاحة للحكومة في كيفية الشراء من هذه الشركات في دول مجلس التعاون الخليجي. ومع ذلك، لا تزال التحديات قائمة. على سبيل المثال، أدت مخاطر عدم اليقين بشأن الطلب وتقلُّب أسعار الصرف وسوء توزيع المخاطر إلى خروج المشاريع عن مسارها في سياقات يعاني فيها المشترون من الضعف المالي، وأعاقت الفجوات التنظيمية والمؤسسية أيضاً التقدم في عدة بلدان.

يتطلَّب توسيع التمويل لتحلية المياه من البلدان متوسطة الدخل ومنخفضة الدخل في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا تعزيز بيئة عمل داعمة أوسع تُقلِّص المخاطر وتجتذب طائفة متنوعة من المستثمرين. وتتجه معظم حكومات هذه البلدان إلى التمويل الخاص لسد الفجوات المالية، لكن تحلية المياه لا تزال تعتمد على التمويل التقليدي للمشاريع الذي يشمل البنوك التجارية، ووكالات ائتمان الصادرات، ومؤسسات التمويل الإنمائي. ويتطلَّب توسيع قاعدة المستثمرين لتشمل صناديق الثروة السيادية، ومُقدِّمي التمويل الإسلامي، وصناديق الاستثمار المباشر التي تُركِّز على البنية التحتية، والمقرضين المحليين معالجة كلٍ من العوائق الحقيقية والمتصورة. وتشمل هذه العوائق التعرفة المنخفضة، وضعف المرافق العامة، والمخاطر السياسية، والبيئات التنظيمية غير الشفافة التي تتسم بضعف مستويات إنفاذ العقود، ومحدودية الخبرة في برامج الشراكة بين القطاعين العام والخاص في قطاع المياه (البنك الدولي 2017أ؛ البنك الدولي 2024أ).[53]

52 تشمل هذه الأنظمة البناء والتشغيل ونقل الملكية (BOT)، والبناء والتملك والتشغيل (BOO) أو شركة مستقلة لإنتاج المياه (IWP)، والتصميم والبناء والتشغيل (DBO)، والتصميم والبناء والتملك والتشغيل ونقل الملكية (DBOOT)، وعقود الامتياز أو التأجير التمويلي/الانتفاع، والمشروعات الهجينة للشراكة بين القطاعين العام والخاص.

53 على الرغم من أن استثمارات القطاع الخاص في البنية التحتية بمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا زادت بنسبة 37% لتصل إلى 2.9 مليار دولار أمريكي بين عامي 2019 و2023 (ساها، هونغ وبهاتاشاريا 2023)، لا تزال المنطقة مُتخلِّفة عن مناطق أخرى مثل شرق آسيا (51.4 مليار دولار أمريكي) وأمريكا اللاتينية (15.8 مليار دولار أمريكي).

وسيعتمد بناء سجل أداء راسخ في مجال الشراكة بين القطاعين العام والخاص على سياسات ولوائح تنظيمية قوية، وهياكل مؤسسية مناسبة، وقائمة مُحدَّدة تحديداً جيداً للمشروعات المستقبلية، وآليات شراء شفافة، ونظام يمكن التنبؤ به لإعانات الدعم، وتدابير مناسبة لتخفيف المخاطر، ومرافق تتمتع بالكفاءة والجدارة (الملاءة) الائتمانية. ويمكن للتمويل العام أن يلعب دوراً مُحفِّزاً في خلق هذه الظروف الداعمة، وتعزيز قدرات شركات المرافق في هيكلة المشاريع، والعمليات والمشروعات القائمة على الشراكة بين القطاعين العام والخاص، وإدارة العقود، ومعالجة الحواجز والعوائق التي تنشأ في المراحل الأولى لدورة حياة المشروع مثل نقص العملات الأجنبية، وضحالة أسواق رأس المال المحلية، وانخفاض مستويات صلاحية القطاع للتمويل. وبدلاً من ذلك، أو في الوقت نفسه، يمكن اتباع نُهُج بديلة لا تعتمد على كيانات خاصة، ويقودها القطاع المعني نفسه، لتقليل المخاطر المالية من أجل تنفيذ تحلية المياه بنجاح (الإطار 6.3).

الإطار 6.3 • اتفاقيات مدفوعات المستخدمين لتمكين تحلية المياه في المغرب

المغرب واجه ست سنوات متتالية من الجفاف بين عامي 2018 و2024، حيث تراوحت مستويات الهطول بين 54٪ و84٪ من المعدلات السنوية. ولمعالجة ذلك، يتوقع المخطط الوطني للمياه لعام 2050 زيادة القدرة الإنتاجية لتحلية مياه البحر من 377 مليون متر مكعب سنويًا في عام 2025 إلى ما يقارب 1.7 مليار متر مكعب سنويًا بحلول عام 2050. وهذه التوسعة ضرورية لتوفير مياه الشرب في المدن الكبرى، وبدرجة أقل، لدعم الري في المناطق التي يزداد فيها شح مصادر المياه التقليدية. وتسعى الحكومة أيضاً بخطى حثيثة لبناء محطات لتحلية المياه ذات سعة أكبر لاستخدامات متعددة (بلدية، وصناعية، وزراعية) من أجل تحقيق وفورات الإنتاج الكبير.

ومن الأمثلة البارزة على ذلك منطقة سوس-ماسة، حيث وقعت السلطات الإقليمية والمزارعون اتفاقية في عام 2015 لحماية مكامن المياه الجوفية في شتوكة من خلال بناء محطة تحلية للاستعاضة جزئياً عن المياه الجوفية بالمياه المحلَّاة، وبالتالي الحد من عمليات السحب من المكامن الجوفية التي تتعرض لاستغلال مفرط. وتبع الاتفاقية مرسومٌ في عام 2017 يتضمن عدة آليات مبتكرة مثل حصص المياه السنوية لاستخدام المياه الجوفية وآلية "خذ أو ادفع" التي تُلزِم المزارعين بدفع تكلفة ما لا يقل عن 3,600 متر مُكعَّب لكل هكتار من المياه المحلاة سواء استخدموا هذه الكمية أم لا وذلك بسعر تُحدِّده نتائج عروض القطاع الخاص في المناقصة في إطار الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP) (سعر عام 2025 حوالي 5.5 دراهم للمتر المُكعَّب، أو 0.55 دولار أمريكي للمتر المكعَّب، وهو ما يعادل ثلاثة أضعاف تعرفة المياه السطحية).

بدأ تشغيل محطة التحلية في عام 2022، حيث تنتج 125 ألف متر مُكعَّب يومياً من المياه المُحلَّاة للري و150 ألف متر مُكعَّب يومياً للاستخدامات البلدية. وتهدف الخطط الموضوعة إلى توسعة المحطة ليصل إنتاجها إلى 200 ألف متر مُكعَّب يومياً لكل استخدام للمياه. وبدأت أشغال إنشاء شبكة مُخصَّصة لتوزيع المياه المُحلَّاة للري من المحطة إلى منافذ فردية للمزارعين بناء على عدة التزامات تعاقدية سابقة تضمن أن كمية كافية من المياه المُحلَّاة سيتم شراؤها أو استخدامهما.

بعد أن تُنفِّذ الحكومة إصلاحات تخلق بيئة عمل داعمة، فإنه يمكنها استخدام التمويل العام بشكل مباشر لتعزيز صلاحية المشاريع للتمويل وقدرتها على تحمُّل التكلفة. ويمكن لأدوات مالية مُصمَّمة خصيصاً لمعالجة مشكلات مُعيَّنة أن تخفِّف من المخاطر التي قد تواجهها المشاريع، وتقلل من تكلفة رأس المال، وتبقي تعرفة المياه عند مستويات ميسورة. ويُمكِن أن يُقلِّل تمويل فجوة الجدوى من التكاليف الرأسمالية المبدئية ويحد من الحاجة إلى الاقتراض مع الحفاظ على الجدوى المالية. ويمكن أن تساعد المدفوعات السنوية الدورية المدعومة جزئياً من الخزانة العامة في إبقاء تعرفات المياه عند مستويات ميسورة. وتجمع الأدوات المالية الهجينة مثل النموذج المختلط للمدفوعات السنوية (HAM) بين المدفوعات العامة المؤجَّلة وتحمُّل الشريك الخاص للمسؤولية الرئيسية والمخاطر المالية إذا حدث خطأ أثناء الإنشاءات أو خلال مرحلة التشغيل، مع التخفيف من مخاطر تقلُّب الطلب على الشريك الخاص. ويمكن أن تؤدي تحسينات الوضع الائتماني مثل ضمانات الدفع وأدوات التمويل المختلط إلى تقليل تكاليف التمويل أيضاً من خلال معالجة مخاطر تخلُّف القطاع العام عن السداد (الإطار 6.1). ويمكن أن تؤدي القروض المُيسَّرة والمنح من شركاء التنمية إلى خفض المتوسط المُرجَّح لتكلفة رأس المال. ويمكن للحكومات أيضاً دمج هذه الأدوات بشكل برامجي، من خلال دمج الهيكلة المالية مع نماذج تقديم الخدمات لضمان أن تكون توسعة تحلية المياه مستدامة من الناحية المالية ومنصفة اجتماعياً (الإطار 6.4).

الإطار 6.4 • النُهُج البرامجية لتقليل المخاطر وتوسيع استثمارات المياه

في السعودية، يُوضِّح برنامج مركزي للشراكة بين القطاعين العام والخاص وترتكز فيه جميع الشركات على جهة شراء واحدة كيف يمكن لتخفيف المخاطر والمشتريات القابلة للتنبؤ أن تسهم في تعبئة رأس المال الخاص على نطاق واسع. وتهدف الإصلاحات المستمرة في الهيكل المؤسسي لتقديم خدمات المياه — من نموذج متكامل رأسياً إلى نموذج هجين (انظر القسم 5.1؛ البنك الدولي 2025ب)—إلى اجتذاب مشاركة القطاع الخاص على نطاق أوسع بكثير. وتقوم الشركة السعودية لشراكات المياه (SWPC)، وهي الذراع الحكومية لمشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص، الآن بدور المشتري الرئيسي للمياه المُحلَّاة من كلٍ من شركة حلول المياه المملوكة للقطاع العام (WSC) ومشاريع إنتاج المياه المستقلة (IWPs). وتدير شركة SWPC مناقصات تنافسية في مجموعة واسعة من فئات الأصول (محطات تحلية المياه، معالجة مياه الصرف الصحي، نقل المياه، الخزانات، والسدود) وتدخل في عقود طويلة الأجل بوصفها المشتري الرئيسي للمياه. وتساعد عمليات شرائها الشفافة على تعزيز المنافسة والابتكار، حيث غالباً ما تكون أسعار العطاءات أقل من تلك التي يحققها المشترون الآخرون في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويمنح توحيد وثائق عمليات الشراء، والأنظمة أو العمليات القابلة للتكرار، ونشر قائمة مشاريع متعددة السنوات ("بيان شركة SWPC لمدة 7 سنوات" للفترة 2024–2030) المُطوِّرين والمقرضين رؤية واضحة لتوزيع المخاطر وتدفق مقترحات الأعمال. وتُقلِّل هذه الميزات معاً من مخاطر تقصير الطرف المقابل وتلك المتعلقة بالطلب، وتُقصِّر الإطار الزمني الذي تستغرقه الشركات لإعداد وتقديم مقترحات أعمالها وترتيب التمويل اللازم للمشروع، وتساعد في خفض تكاليف التمويل. ويظهر هذا النموذج عملياً كيف يُمكِن للحكومات تقليل مخاطر الاستثمارات من خلال هيكل للشراء تدعمه أو تضمنه الحكومة، والتصميم المسبق للعقود بطريقة مُوحَّدة، وخفض تكلفة رأس المال من خلال تقليل عدم اليقين وتكاليف المعاملات، وتخطيط المشروعات وتنفيذها في إطار سلسلة متواصلة طويلة الأمد وليس بشكل فردي بدلاً من أن يكون المشروع مبادرة قائمة بذاتها لمرة واحدة.

في المكسيك، تظهر منصات التمويل الوطنية التي يديرها البنك الوطني للأشغال العامة والخدمات (BANOBRAS) كيف يمكن للدعم العام المختلط أن يُخفِّف من المخاطر في المشاريع ويقلل من تكلفة رأس المال ضمن إطار برامجي. ومن خلال الصندوق الوطني للبنية التحتية (FONADIN) وبرنامج تحديث مُشغِّلي المياه (PROMAGUA)، يجمع BANOBRAS بشكل منهجي بين الموارد الفيدرالية ورأس المال الخاص لجعل مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص للمياه والصرف الصحي جاذبة للمستثمرين والمقرضين. وتُستخدَم الموارد العامة على شكل منح إعداد المشاريع، ومساهمات لسد فجوة الجدوى، وأدوات تعزيز الائتمان لمساعدة البلديات في هيكلة مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص وطرح المناقصات المُجمَّعة في السوق. وفي كثير من الحالات، يغطي التمويل الفيدرالي المشترك ما يصل إلى نصف تكاليف المشروع، مما يخلق هيكلاً مالياً مختلطاً يُقلِّل من مخاطر المشروع مع خفض المتوسط المرجح لتكلفة رأس المال بشكل مباشر. ومن خلال تقليل تكاليف التمويل، تساعد هذه الآليات أيضاً في إبقاء تعرفة المياه عند مستويات أكثر تيسيراً مع الحفاظ على الجدوى المالية للاستثمارات. مثال رائد لذلك هو محطة معالجة مياه الصرف الصحي في أتوتونيلكو في وادي المكسيك، حيث كان للدعم الفيدرالي من BANOBRAS وFONADIN دور رئيسي في اجتذاب مشاركة القطاع الخاص في إحدى أكبر محطات معالجة مياه الصرف الصحي في العالم.

يخلق التفاعل الوثيق بين تحلية المياه وقطاع الطاقة فرصاً إضافية لتحسين الهياكل المالية والاستفادة من التمويل المبتكر، بما في ذلك من خلال الهيدروجين الأخضر وتمويل الأنشطة المناخية. ومن المتوقع أن يصل الإنتاج العالمي من الهيدروجين الأخضر إلى 530 مليون طن سنوياً بحلول عام 2050، مما يتطلَّب 8 مليارات متر مكعب (غم ^{3}) من المياه النظيفة منزوعة الأيونات—أي ما يعادل حوالي 35% من القدرة العالمية الحالية للتحلية. وفي المناطق الغنية بالطاقة المتجددة ولكنها تعاني من شح المياه مثل الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، يمكن أن يساعد تطوير الهيدروجين الأخضر في دعم محطات التحلية عبر ترتيبات التوليد المشترك. وفي الوقت نفسه، يمكن لاستثمارات تحلية المياه تعبئة التمويل المناخي المُيسَّر من خلال الجمع بين منافع التكيُّف والتخفيف في نفس المشروع، وتعزيز القدرة على الصمود وتحمُّل الإجهاد المائي مع استخدام

موارد الطاقة المتجددة ضمن إمدادات كهرباء المشروع. وتشمل المصادر المحتملة تمويل المنح من صندوق التكيُّف،[54] وصناديق الاستثمار المناخي، وصندوق[55] المناخ الأخضر،[56] وصندوق البيئة العالمية،[57] بالإضافة إلى القروض الخضراء، والسندات الخضراء، وتمويل المانحين المُيسَّر المرتبط بالمستويات المستهدفة لحجم الطاقة المتجددة المستخدمة في المشروع. ويمكن تكملة هذه المصادر من خلال الآليات المرتبطة بالنتائج مثل برنامج البنك الدولي لتوسيع العمل المناخي من خلال خفض الانبعاثات (SCALE) وتوليد اعتمادات سوق الكربون (الإطار 6.5).

الإطار 6.5 • إنشاء مشاريع تحلية جاذبة للمستثمرين من خلال الاستفادة من أسواق الكربون

يمر الزخم الذي يشهده العمل المناخي بنقطة تحوُّل. والآن أصبحت أهداف التعافي الأخضر والوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر الأولويات القصوى للزعماء. ويتجاوز هذا السعي الحثيث الحكومات، حيث يعلن عدد متزايد من الشركات عن أهداف تقليل الانبعاثات طويلة الأمد ويسعى نحو تحقيقها. وفي عام 2023، تعهدت 21% من أكبر 2000 شركة في العالم، والتي تزيد مبيعاتها على 14 تريليون دولار أمريكي، بالعمل لتحقيق أهداف الوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر.

غالباً ما يتطلَّب تحقيق أهداف الوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر شراء تعويضات الكربون (المعاوضات الكربونية)، مما زاد بشكل كبير من الاهتمام بكلٍ من أسواق الامتثال والأسواق الطوعية لتداول الكربون. وعلى سبيل المثال، اتسع حجم المعاملات في سوق الكربون الطوعية العالمية أربعة أضعاف، من 528 مليون دولار أمريكي إلى 1.9 مليار دولار أمريكي، بين عامي 2020 و2022. ومن المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على اعتمادات الكربون خمسة عشر ضعفاً بحلول عام 2030، مما يُسهِّل تدفق التمويل لمشاريع إزالة الكربون عالية الأثر في الاقتصادات الناشئة.

تولِّد معظم مشروعات إزالة الكربون اعتمادات كربونية من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة أو زيادة حصة الطاقة المتجددة في المشروعات. ويضع هذا تحلية المياه في موقع مثالي لتوليد تعويضات الكربون لتداولها في أسواق الكربون، مما يعزز جدواها المالية. ويمكن بيع هذه الاعتمادات للشركات المحلية للوفاء إما بالتزامات الامتثال (سوق الامتثال المحلية) أو التعهدات بتحقيق أهداف الوصول بالانبعاثات إلى الصفر (السوق الطوعية المحلية). وبدلاً من ذلك، يمكن بيعها دولياً، إما في أسواق الامتثال الدولية بموافقة من الدولة المضيفة (مع تعديل مناظِر لرصيد الانبعاثات) أو للشركات مقابل التعهدات بالوصول بالانبعاثات إلى الصفر (السوق الطوعية الدولية، دون تعديل مناظِر لرصيد الانبعاثات).

من الضروري في هذه العملية المراقبة والإبلاغ والتحقق بدرجة كافية من تخفيضات الكربون. وقد وافق المجلس العالمي للكربون، أول برنامج طوعي لتعويض الكربون في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، بالفعل على منهجية لتحلية المياه المرتبطة بشبكة المياه والتي تعمل بالطاقة المتجددة لتحفيز الأنشطة التي تقلل من انبعاثات الكربون في محطات التحلية (مجلس التعاون الخليجي 2022). وتُكمِّل هذا الجهد منهجية المجلس المعتمدة لتحقيق وفورات في المياه المحلَّاة في المباني بالتركيز على كيفية استخدام المستهلكين للمياه (مجلس التعاون الخليجي 2023). ومع ذلك، يجب ملاحظة أن شركات التحلية لم تحصل بعد على موافقة أكبر جهات إصدار الائتمان مثل فيرا وجولد ستاندرد لتوليد اعتمادات الكربون.

54 انظر https://www.adaptation-fund.org/. يمكن العثور على مثال على مشروع تجريبي لتحلية المياه في مجتمعين ريفيين في ناميبيا، ممول من منحة لصندوق التكيُّف بقيمة 5 ملايين دولار أمريكي، في https://www.adaptation-fund.org/project/pilot-rural-desalination-plants-using-renewable/.

55 انظر https://www.cif.org/. في إطار البرنامج التجريبي لصناديق الاستثمار المناخي للقدرة على الصمود في وجه تغيُّر المناخ في غرينادا، تم تمويل محطة صغيرة النطاق لتحلية مياه البحر بنظام التناضح العكسي تعمل بالطاقة الشمسية كجزء من الحلول اللامركزية للتكيُّف والتعافي من صدمات المياه (انظر https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/caribbean_dwrm_case_study.pdf).

56 انظر https://www.greenclimate.fund/. يمكن الاطلاع على مثال على محطة تحلية تعمل بالطاقة الشمسية بتمويل من منحة لصندوق المناخ الأخضر بقيمة 28.6 مليون دولار أمريكي (49% من إجمالي تكلفة المشروع) في https://www.greenclimate.fund/project/fp091.

57 انظر https://www.thegef.org/. قدَّم برنامج المنح الصغيرة لصندوق البيئة العالمية منحاً لتحلية المياه على مستوى المجتمعات المحلية، على سبيل المثال في سانت لوسيا (https://sgp.undp.org/spacial-itemid-projects-landing-page/spacial-itemid-project-search-results/spacial-itemid-project-detailpage.html?view=project&id=23301).

6.3. تحقيق العدالة والحماية الاجتماعية في مقابل تكلفة المياه

يعد تحقيق التوازن بين الحاجة إلى تعرفة تعكس التكلفة في تحلية المياه واعتبارات العدالة أمراً بالغ الأهمية لتحقيق إدارة مستدامة للمياه مع حماية الأسر الفقيرة والضعيفة (الأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية). وغالباً ما تنطوي تحلية المياه على تكاليف رأس مال وتشغيل عالية بسبب العمليات الكثيفة في استخدام الطاقة ومتطلبات الصيانة. وتعتبر تعرفة المياه العاكسة للتكاليف ضرورية لتغطية هذه النفقات وتحقيق الجدوى المالية لمشاريع التحلية، لكن تحديد التعرفة بناء على استرداد التكاليف فقط قد يُؤثِّر بشكل غير متناسب على الأسر ذات الدخل المنخفض والضعيفة، حيث تشكل نفقات المياه جزءاً كبيراً من الإنفاق الأسري. وقد يكون لسياسات تسعير المياه آثار على توزيع الدخل، مما يثير مخاوف بشأن الوصول المُنصِف إلى المياه العذبة، لا سيما للفئات ذات الدخل المنخفض في المنطقة، وبالتالي خطر تقويض الاستقرار الاجتماعي وزيادة الهشاشة (دي وال وآخرون 2023).[58] وفي المقابل، قد تكون التعرفة المنخفضة للمياه أيضاً غير مُنصِفة اجتماعياً. وقد يكون وصول الفئات الفقيرة والضعيفة والأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية إلى المياه محدوداً، فهم يستهلكون في العادة أقل بكثير من الفئات الميسورة، و/أو يعتمدون على المُورِّدين من القطاع الخاص بتكاليف أعلى بكثير. ونتيجة لاعتبارات الاقتصاد السياسي المُعقَّدة، غالباً ما تُفرَض تعرفة للمياه أقل من تكلفة تقديم الخدمات، وذلك نتيجة للضغوط السياسية للحفاظ على القدرة على تحمُّل التكاليف. وقد يؤدي هذا التسعير المنخفض للمياه إلى نقص الاستثمار في البنية التحتية وضعف جودة الخدمات، حيث تكافح شركات المرافق لتغطية تكاليف التشغيل والصيانة.

يمكن أن تساعد سياسات ذكية في تصميم تعرفة المياه وتحسين توجيه الدعم في إدارة وتخفيف الآثار المالية لتحلية المياه وحماية الفئات الفقيرة والضعيفة (الإطار 6.6). ويُمكِن استخدام عدد من الآليات لمعالجة هذه التحديات المتضاربة وحماية الفئات الضعيفة اقتصادياً. وأحد الأساليب الفعالة لذلك هو استخدام مفهوم التعرفة الأساسية، وهي التي تُوفِّر مستوى أساسياً من استهلاك المياه بمُعدَّل مدعوم، مما يضمن تلبية الاحتياجات الأساسية للمياه دون فرض أعباء مالية غير مُبرَّرة على الفقراء. علاوةً على ذلك، يمكن استخدام الدعم المُوجَّه للتعويض عن أثر زيادة التعرفة على الأسر ذات الدخل المنخفض والضعيفة. ويجب تصميم إعانات الدعم هذه بعناية لتصل إلى من هم أشد احتياجاً، ومن ثَمَّ تجنُّب المأزق الشائع الذي تعود فيه إعانات الدعم بالنفع بشكل غير متناسب على المستهلكين الأغنى. علاوة على ذلك، يجب أن يصاحب تطبيق تعرفة المياه التي تعكس التكلفة جهودٌ لتحسين فهم الجمهور لفوائد هذه التعرفة، ومنها تحسين جودة الخدمات والاستدامة طويلة الأجل. ويُمكِن أن يساعد التواصل الشفاف والمشاركة المجتمعية في تعزيز الثقة واستعداد المستهلكين للدفع، ومن ثَمَّ دعم الانتقال إلى نماذج أكثر استدامة لتسعير المياه. ومع أن تعرفة المياه العاكسة للتكلفة تعتبر ضرورية لاستدامة تحلية المياه، فإنه يجب مراعاة اعتبارات الإنصاف في تصميم التعرفة لضمان بقاء المياه متاحة للجميع، ولا سيما الفقراء والضعفاء.

58 تُظهِر دراسة دي وال وآخرون (2023) أنه في ظل التعرفات السائدة للمياه في بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، تدفع أفقر شريحة خمسية من الأسر نسباً من دخلها أعلى ما بين أربعة وتسعة أضعاف مما تدفعه أغنى شريحة خمسية. ومع ذلك، تظهر حسابات أولية أيضاً أنه في جميع أنحاء المنطقة، حتى بالنسبة لتلك الشريحة الخمسية الأفقر، تبلغ تكاليف إمدادات المياه فقط 0–3% من نفقاتهم اليومية في ظل التعرفة السائدة للمياه—أي أقل بكثير من الحدود الشائعة 3–5% المستخدمة لتقييم القدرة على تحمُّل تكاليف إمدادات المياه.

الإطار 6.6 • أُطُر تطوير مشروعات التحلية في بيئات الهشاشة والصراع والعنف (FCV)

جمهورية اليمن هي أكثر البلدان ذات الدخل المنخفض شحاً في المياه، إذ إن متوسط نصيب الفرد من الموارد المائية المتاحة أقل بكثير من عتبة الشح المطلق للمياه. ويتفاقم مستوى الشح الفعلي للمياه في العديد من المناطق بسبب التدهور الاقتصادي، مع الفجوات التاريخية في البنية التحتية التي تتفاقم بسبب النزوح الداخلي للسكان، مما يخلق ضغوطاً أشد مما تتحمَّله البنية التحتية القائمة، والتي تضرر الكثير منها بسبب الصراع الذي طال أمده. ونتيجة لذلك، من المتوقع أن تزداد الاحتياجات التي لا تتم تلبيتها من إمدادات المياه البلدية من 12% إلى ما يقرب من 20% على المستوى الوطني بحلول عام 2050.

تواجه مدينة عدن الساحلية نقصاً حاداً في المياه. هذا النقص يتفاقم بسبب النمو العمراني وتغيُّر المناخ. ويُوفِّر المشروع المقترح لإنشاء محطة تحلية بسعة 20 ألف متر مُكعَّب يومياً إمكانية إيجاد مصدر مستدام وعالي الجودة للمياه العذبة يُقلِّل الاعتماد على المياه الجوفية ويُعزِّز الأمن المائي (الشكل ب6.6.1). وسيُعزِّز المشروع المقترح أيضاً تنظيم وقدرات مُقدِّمي خدمات المياه، ويدعم بيئة مواتية لتقليص الحواجز المؤسسية والتنظيمية، ويخلق المزيد من الاستقلالية المالية والإدارية والمساءلة.

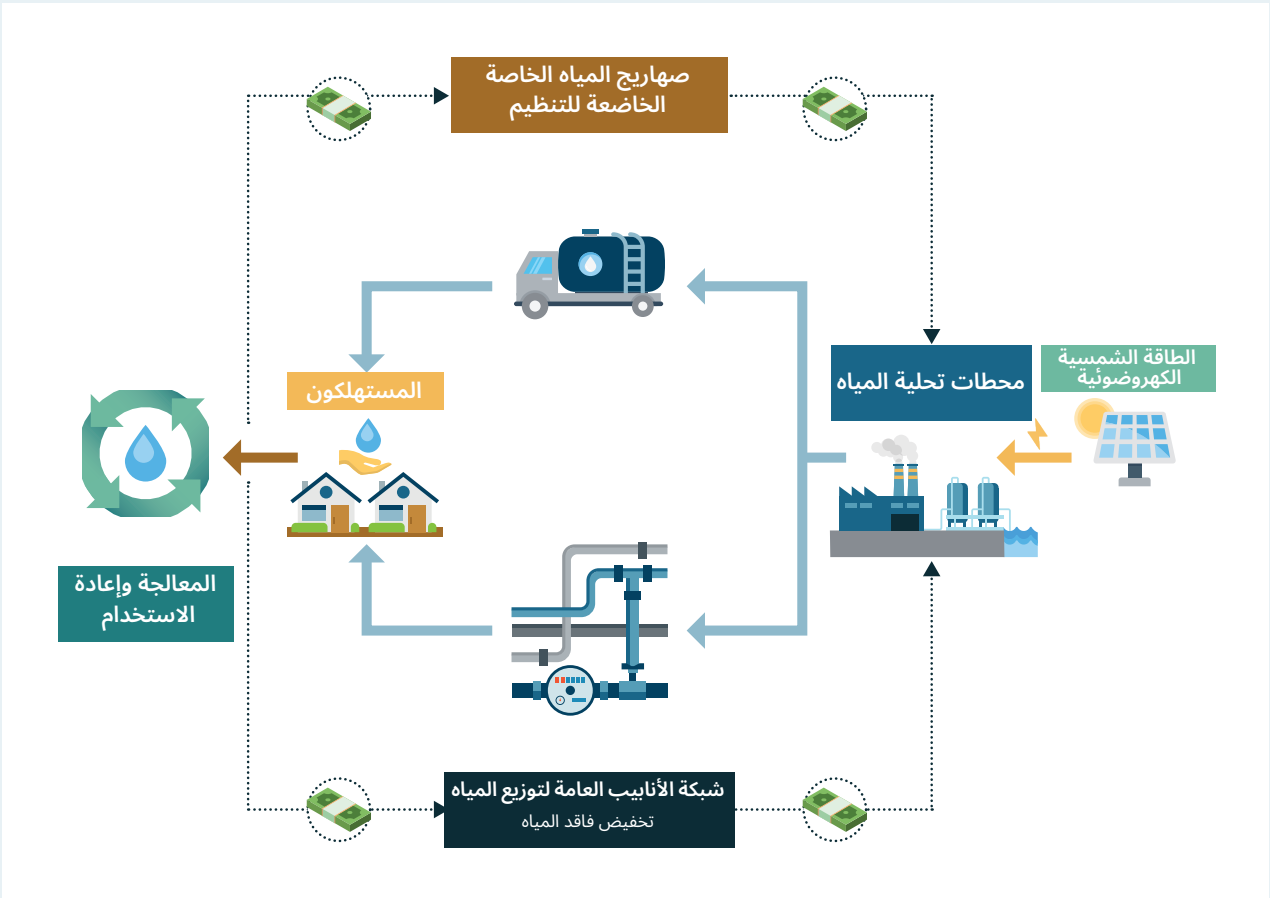
أياً ما كان الأمر فإن تحلية المياه نشاط باهظ التكلفة ينطوي على مخاطر تشغيلية في دولة هشة مثل جمهورية اليمن. وتتجاوز نسبة فاقد المياه في عدن 42%، ويرجع ذلك في المقام الأول إلى الفاقد الإداري، ومن الصعب تحقيق الاستدامة المالية مع انخفاض معدلات تحصيل التعرفة وضعف القدرة والاستعداد للدفع. ويفرض القانون التعرفة لتغطية تكاليف التشغيل ويشجع على الحفاظ على المياه من خلال زيادة تعرفة شرائح المستهلكين. وتبلغ التعرفة الخاصة 0.34 دولار أمريكي للمتر المُكعَّب للشريحة الأولى، مقارنة ب 2.35 دولار للعملاء الحكوميين و1.41 دولار للعملاء التجاريين. ومع ذلك، تتراوح معدلات تحصيل التعرفة بين 86% للعملاء التجاريين، و37% للعملاء الخاصين، و8 % للعملاء الحكوميين الذين يستهلكون 16% لكنهم يساهمون بنسبة 41% من الإيرادات المفوترة. وبسبب محدودية نطاق تغطية خدمات المياه والإمدادات المتقطعة، يعتمد كثير من المستهلكين على الشاحنات الصهريجية الخاصة التي تتقاضى ما يصل إلى 7.30 دولارات أمريكية للمتر المُكعَّب، أي ما يقرب من 25 ضعف أسعار المياه البلدية.

نظراً لسياق الهشاشة والصراعات والعنف (FCV) في جمهورية اليمن، يجب تقييم المخاطر المالية والتشغيلية بشكل واقعي وتنفيذ تدابير التخفيف لتحسين الجدوى. ويُقتَرح تقديم دعم لتحلية المياه من خلال ثلاثة مسارات متوازية. سيُركِّز المسار الأول على تعبئة دعم من القطاع الخاص لتطوير محطة التحلية، وهو ما يتطلب عقد اتفاقيات للشراء مع مصادر دخل مضمونة من المؤسسة المحلية للمياه والصرف الصحي (LWSC) و/أو المُورِّدين من القطاع الخاص. ويهدف المسار الثاني إلى تعزيز هذه المؤسسة من خلال الاستثمارات في شبكات التوزيع والصرف الصحي وجمع ومعالجة وإعادة استخدام مياه الصرف، إلى جانب تحسين الاستدامة المالية. ويهدف المسار الثالث إلى إنشاء سلاسل إمداد للقطاع الخاص من خلال الشاحنات الصهريجية للمياه، وتحديد معايير جودة إمدادات المياه، وتحسين الجدوى المالية من خلال اتفاقيات للشراء تغطي جميع التكاليف وهامش ربح مُحدَّد.

بدعمٍ منسق من مجموعة من شركاء التنمية، هناك فرصة لإدارة المخاطر وتحقيق حلول مستدامة لإمدادات المياه تكفل القدرة على الصمود لعدن. وخصَّص صندوق المناخ الأخضر بصورة مؤقتة موارد في إطار البرنامج الوطني لتمويل المناخ في اليمن، ويُموِّل البنك الدولي سلسلة مشاريع مقترحة لدعم وزارة المياه والبيئة والمؤسسة المحلية للمياه والصرف الصحي لتعزيز المعلومات والبنية التحتية والبيئة التنظيمية اللازمة لتمكين المشروع. ويمكن لمؤسسة التمويل الدولية (IFC) المساعدة في هيكلة الشراكات لتقليل العبء المالي على الحكومة ونقل المخاطر إلى القطاع الخاص، بما في ذلك الدعم المباشر من خلال الاستثمارات في حقوق الملكية والقروض، أمَّا الوكالة الدولية لضمان الاستثمار (MIGA) فتُقدِّم منتجات لتعزيز الائتمان والتأمين من

المخاطر السياسية لتحسين جدوى المشروع. ومن خلال الاستفادة من مواطن القوة المجتمعة، تعمل مجموعة البنك الدولي على تحفيز استثمارات القطاع الخاص ودعم جهود الجمهورية اليمنية لمعالجة شح المياه.

الشكل ب6.6.1 • الإطار المفاهيمي لتطوير تحلية المياه في عدن



المصدر: أعد أصلاً لأغراض هذا التقرير.

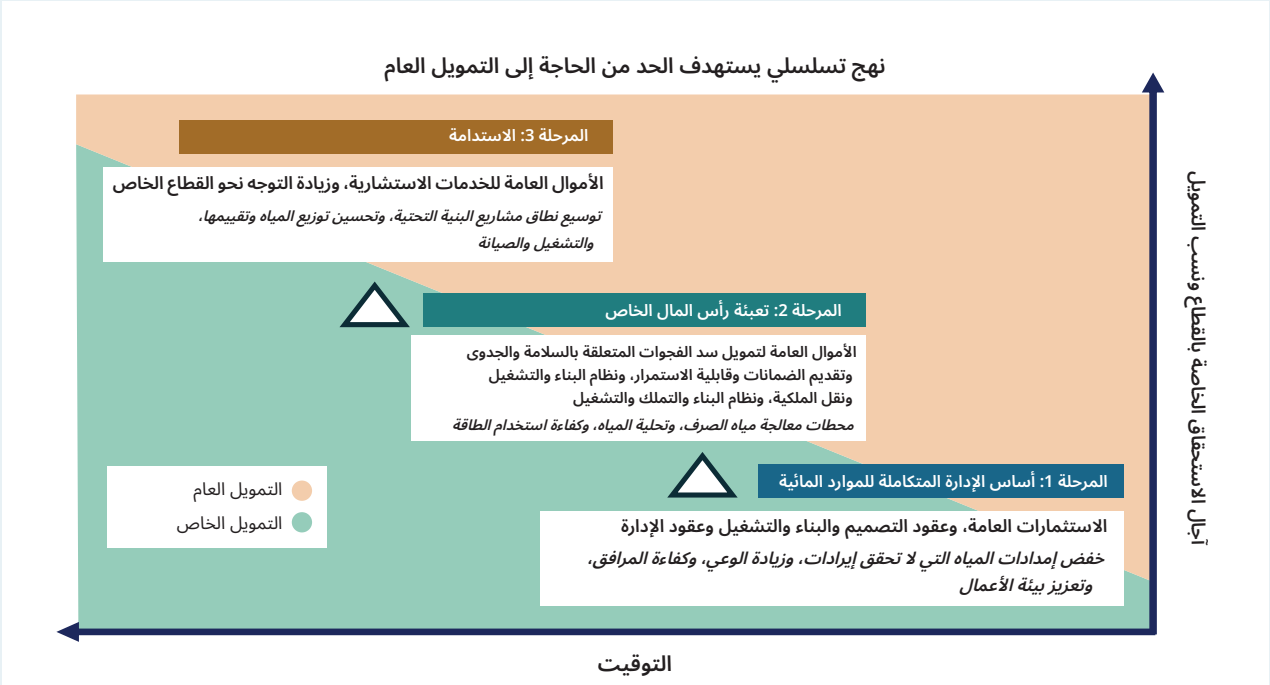
ملاحظة: PV = كهروضوئي.

تكون مبادئ تحلية المياه أكثر فاعلية عندما تُدمَج في النُهُج الشاملة والبرامجية للأمن المائي. ويمكن تفعيل المبادئ الموضحة في هذا الفصل — الحفاظ على استدامة القطاع (القسم 6.1)، وتعظيم القيمة مقابل المال (القسم 6.2)، وحماية العدالة الاجتماعية (القسم 6.3)— من خلال برامج شاملة ومتكاملة للموارد المائية تجمع بين الاستثمارات في مشروعات إمدادات المياه (ومنها تحلية المياه) مع إدارة الطلب، وتخفيض الفاقد المائي، والسياسات التكميلية، وكذلك الإصلاحات التنظيمية والمؤسسية. ويتيح النهج المرحلي للحكومات تحقيق انتصارات سريعة على صعيد الأمن المائي على المدى القصير، مع تهيئة الظروف لمبادرات أكثر تعقيدا يقودها القطاع الخاص ويمكن توسيعها مع مرور الوقت. ويعرض الإطار 6.7 مثالاً نمطياً لذلك.

الإطار 6.7 • برامج الإدارة المتكاملة للموارد المائية يمكن أن تُحفِّز مشاركة القطاع الخاص واستثماراته

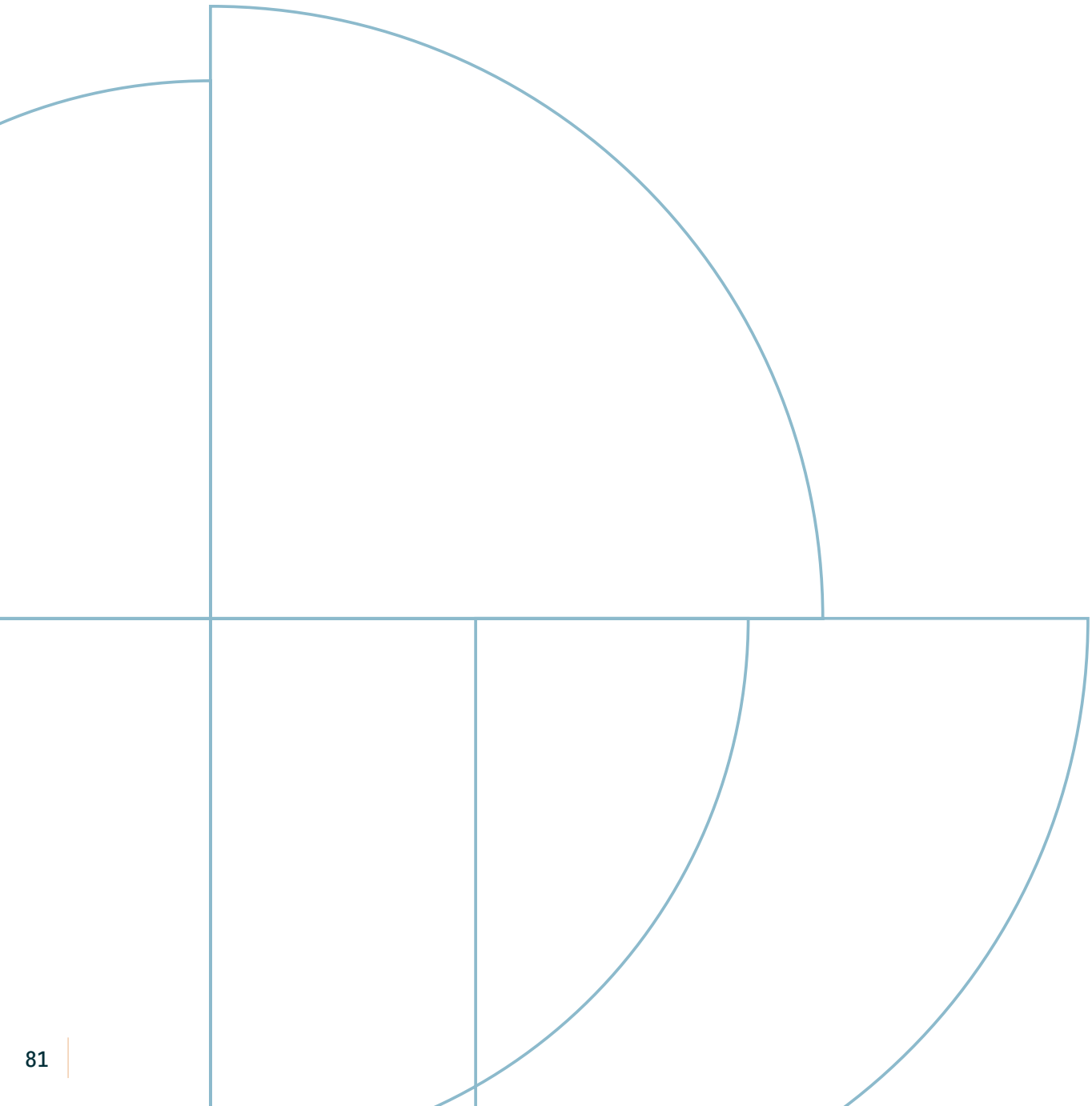
يجب دمج استثمارات تحلية المياه ضمن إستراتيجية أوسع لإدارة القطاع المائي لتحقيق نتائج مستدامة من الناحية المالية، ونافعة من الناحية البيئية، ومنصفة على الصعيد الاجتماعي. وكمثال نمطي على ذلك (الشكل ب6.7.1)، ينبغي لبرنامج شامل وجيد التسلسل للقطاع المائي على مستوى البلد كله أن يُركِّز في المرحلة الأساسية الأولى على جني ثمار سهلة المنال لإجراءات يسهل تنفيذها ورخيصة نسبياً على أساس المتر المُكعَّب، مثل تقليل المياه غير المدرة للإيراد، وتحسين تخصيص المياه، وزيادة الوعي العام. وبالتوازي مع ذلك، يُمكِن أن يُركِّز البرنامج على إصلاحات قطاعية رئيسية لتعزيز بيئة عمل مواتية لمزيد من التدابير والحلول الجديدة مثل التحلية وإعادة استخدام المياه. وفي المرحلة الثانية، يمكن تنفيذ مشاريع لتحلية المياه صغيرة النطاق وممولة جزئياً من الموازنة العامة باستخدام أدوات مناسبة لتخفيف المخاطر (ضمانات، تمويل فجوة الجدوى، وما إلى ذلك) لبناء سجل من الإنجازات واكتساب القدرات، مع تحسين الأُطُر المؤسسية والتنظيمية بشكل أكبر. ويمكن في المرحلة الثالثة بعد ذلك البناء على المكاسب المتراكمة على صعيد الكفاءة المادية والمالية والمؤسسية للتوسُّع في إنشاء محطات التحلية وإعادة استخدام المياه على نطاق واسع من خلال زيادة الاستثمارات الخاصة. وجرت العادة على أن التدابير والأنشطة الأولى في البرامج تعتمد في معظمها على التمويل من الموازنة العامة وتشمل أشكالاً أساسية من مشاركة القطاع الخاص، مثل عقود الإدارة. ومع تهيئة بيئة العمل المواتية مع مرور الوقت، يمكن أن يتعمَّق انخراط القطاع الخاص تدريجياً عبر النماذج المختلفة للشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP)، مع احتمال أن يمتد إلى الخصخصة الكاملة. وخلال مراحل هذه العملية، يُمكِن للمؤسسات المالية الدولية مثل مجموعة البنك الدولي دعم هذا المسار بمجموعة متنوعة من أدوات التمويل والخدمات الاستشارية.

الشكل ب6.7.1 • نموذج نمطي للإدارة المتكاملة للموارد المائية، مع الانتقال تدريجياً من التمويل العام إلى الخاص



المصدر: أعد أصلاً لأغراض هذا التقرير.

ملاحظة: BOO = البناء والتملك والتشغيل؛ BOT = البناء والتشغيل ونقل الملكية؛ DBO = التصميم والبناء والتشغيل؛ IWRM = الإدارة المتكاملة للموارد المائية؛ O&M = التشغيل والصيانة؛ WWTP = محطة معالجة مياه الصرف الصحي.



7 التحديات والفرص الناشئة لتحلية المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

تنطوي أنشطة تحلية المياه على إمكانية أن تُقدِّم مساهمة حيوية في معالجة تحديات الأمن المائي التي تواجهها البلدان في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وعلى الرغم من هذه الإمكانيات لمعالجة تحديات المياه في المنطقة، فإن التكاليف الرأسمالية والنفقات التشغيلية الكبيرة جعلت مبادرات ومشروعات التحلية التي تُنفَّذ على نطاق واسع تقتصر على البلدان مرتفعة الدخل في منطقة الخليج، والتي كانت في طليعة جهود تحفيز الابتكار وخفض التكاليف. ومع تزايد الطلب بسبب النمو السكاني والاقتصادي المرتفع، وتناقص إمدادات المياه السطحية وموارد المياه الجوفية بسبب الاستغلال المفرط، وتزايد التقلُّبات وعدم اليقين جراء تغيُّر المناخ، تبرز تحلية المياه كتكنولوجيا مجدية وناجعة وأقل تكلفة لبناء القدرة على الصمود وتوفير إمدادات مياه أكثر موثوقية واستدامة للأجيال القادمة. وتزداد أهمية تحلية المياه كحل مهم على جانب العرض للبلدان متوسطة الدخل والبلدان ذات الدخل المنخفض، مما يُسلِّط الضوء على عدد من التحديات، لا سيما بالنظر إلى الآثار على المالية العامة وترتيبات الحوكمة في العديد من هذه البلدان، ويخلق فرصاً نافعة، لا سيما فيما يتعلق بخيارات التمويل المبتكرة التي يمكن أن تساعد في تقليل التكاليف وحماية الأسر الضعيفة.

هناك خمسة تحديات رئيسية وفرص تتعلق ببذل مزيد من الجهود لتوسيع وتحسين محطات تحلية المياه في البلدان مرتفعة الدخل بالمنطقة وبدء ظهورها في البلدان متوسطة ومنخفضة الدخل. ويتطلَّب تحقيق التوسع المستدام في تحلية المياه في مزيج إمدادات المياه اعتبارات تقنية مُعقَّدة، منها تلك التي تتعلق بالطاقة، إلى جانب التحديات البيئية وتلك التي تتعلق بالحوكمة والجوانب المالية. ويستلزم تحقيق نتائج مستدامة من الناحية المالية، ونافعة من الناحية البيئية، ومنصفة على الصعيد الاجتماعي للتوسع في أنشطة تحلية المياه مزيجاً من خدمات الاستشارات الإستراتيجية وتحسين البيانات والتحليلات، إلى جانب تصميم وتطبيق آليات مالية مبتكرة. ومع زيادة مساهمة التحلية في التوازن المائي على المستوى القطري، هناك حاجة إلى إجراء تغييرات مقابلة في إطار الحوكمة لتوجيه إنتاج وتوزيع المياه المحلَّاة ودمجها في الإستراتيجية الوطنية لإدارة الموارد المائية. وسيعتمد توازن هذه الاعتبارات جزئياً على خصائص وقدرات المالية العامة لكل بلد على حدة، بالإضافة إلى الأحكام السائدة القانونية والتنظيمية والخاصة بالسياسات العامة.

كان الابتكار التكنولوجي مفتاحاً لتحسين إمكانية الوصول والقدرة على تحمُّل تكاليف تحلية المياه في المنطقة. وركَّزت هذه الابتكارات بشكل أساسي على ترشيد العمليات، وتحسين نفاذية المياه وطرد الأملاح، وزيادة مقاومة ترسبات المعادن والتلوث البيولوجي، وتقليل استهلاك الطاقة، وتحسين كفاءة التكلفة. ويمكن أن تساعد فرص زيادة الأتمتة واستخدام الذكاء الاصطناعي، إلى جانب المراقبة الفورية، في تعزيز موثوقية النظام، وتحسين الصيانة الاستباقية، وتقليل استهلاك الطاقة. وإلى حد كبير تمثَّلت القوة الدافعة الرئيسية خلف هذه الابتكارات في القطاع الخاص والأوساط الأكاديمية والكيانات المملوكة للدولة والمراكز البحثية. وفي إطار جهودها المستمرة لحث خطى الابتكار، تستضيف عدة دول في الخليج فعاليات إقليمية وعالمية حول تحلية المياه، وتهدف مبادرات مثل جائزة الإمارات العربية المتحدة لشح المياه بقيمة 150 مليون دولار

أمريكي (XPRIZE) إلى تعزيز الوصول على نطاق واسع إلى المياه النظيفة من خلال وضع حلول تحلية موثوقة ومستدامة وبتكلفة معقولة. ويمكن للمنظمات الدولية المتعددة الأطراف، مثل البنك الدولي، تسهيل تبادل الخبرات والابتكارات بين الدول الأعضاء.

لعب قطاع الطاقة دوراً محورياً في تنمية وتطوير تكنولوجيا تحلية المياه، إذ ساعد على تقليل استهلاك الطاقة والبصمة الكربونية. وكانت الابتكارات في قطاع الطاقة واحدة من أهم التطورات في تكنولوجيا التحلية، مما جعلها حلاً مستداماً وقابلاً للتوسع لتعزيز الأمن المائي. وتشمل هذه الابتكارات التحسينات في أنظمة كفاءة استخدام الطاقة، والتكامل مع الطاقة المتجددة، والاستفادة من التآزر وتضافر الجهود بين إنتاج الطاقة ومعالجة المياه. وساعدت استثمارات قطاع الطاقة في تكنولوجيات الطاقة القابلة للتوسع والفعالة في إحداث خفض كبير لتكاليف تشغيل محطات التحلية، والتي كانت تاريخياً تمثل حوالي 30% إلى 50% من تكاليف التحلية، وقلَّلت أيضا من البصمة الكربونية. وسيستمر قطاع الطاقة في القيام بدور تتزايد أهميته في مواءمة تطوير أنشطة تحلية المياه مع إستراتيجيات إزالة الكربون الأوسع من خلال التشجيع على تبنِّي تكنولوجيات منخفضة الانبعاثات. ويمكن للمنظمات الدولية تقديم المشورة بشأن السياسات والأُطُر التنظيمية لتحسين تدابير دمج الطاقة المتجددة في تحلية المياه مع وضع طموحات واقعية وتسلسل منطقي للتدابير والإصلاحات، مما يساعد على تحفيز التنسيق بين قطاعي الطاقة والمياه، وخلق مجالات للتآزر وتضافر الجهود مع تطوير الهيدروجين الأخضر.

تساهم التحسينات في الإدارة البيئية والتخفيف من الآثار البيئية في تقليل التداعيات المحلية وزيادة المنافع المستمدة من المنتجات الثانوية، وتتيح الزيادة المتوقعة في القدرات إمكانية حدوث أثار تراكمية في أنحاء المنطقة. ومن خلال تضمين تحلية المياه تدابير مثل المعالجة المسبقة، وأجهزة توزيع الرجيع الملحي في مسطح مائي أوسع، واستخراج الموارد من الرجيع الملحي، وذلك من بين أمور أخرى، يُمكِن تحويل التحديات التاريخية إلى فرص لتحقيق مكاسب اقتصادية وبيئية. وعلى الرغم من هذه التحسينات في إدارة الآثار البيئية على المستوى المحلي، فإن التطوير المتوقع لمحطات تحلية المياه وزيادة القدرات يطرح تحديات جديدة مرتبطة بإمكانية حدوث آثار تراكمية. وأي آثار تراكمية من هذا النوع ستعتمد على موقع وخصائص كل من محطات التحلية والمسطحات المائية المعنية. ويمكن للمحطات الموجودة على طول الساحل الأطلسي الاستفادة من آثار تخفيف الرجيع الملحي، لكن المحطات الواقعة على سواحل الخليج العربي والبحر الأحمر لديها كميات أصغر من المياه، ودرجات حرارة وملوحة أعلى، وحركة أقل للمياه، وأوقات إقامة أطول للمياه تزيد من قابلية المحطات للتعرض للآثار التراكمية المحتملة للتحلية، وتحتاج المحطات على سواحل البحر المتوسط إلى التفكير في تنسيق الخطط وجهود التطوير مع بلدان جنوب أوروبا. ويجب تقييم الآثار السلبية المحتملة بعناية على أساس خيارات إمدادات المياه البديلة، مع إدراك أن أكثر الخيارات الممكنة تكنولوجياً والأقل تكلفة للبنية التحتية الهيدروليكية الكبيرة في المنطقة قد تم تطويرها بالفعل، وأن استخراج المياه الجوفية في معظم البلدان يتجاوز معدلات إعادة التغذية المستدامة للمكامن. ويمكن للمنظمات الدولية المساعدة في ترسيخ ممارسات جيدة في تقييم وإدارة الآثار البيئية والاجتماعية، وتسهيل العمليات التعاونية، وتعبئة الأموال العالمية اللازمة لتقييم الآثار التراكمية المحتملة وتقييم المقايضات البيئية في تحسين التوازن المائي.

تتطلَّب أطر الحوكمة لإدارة تطوير الموارد المائية عادة تعديلات كبيرة لتسهيل دمج التحلية في مزيج إمدادات المياه. وقد تطوَّرت الأُطُر القانونية والمؤسسية القائمة على مدى عقود حول موارد المياه السطحية والمياه الجوفية مع مجموعة راسخة من أصحاب المصلحة مثل مرافق المياه والجهات التنظيمية والمستهلكين. وقد يشمل إنتاج وتوريد وتخزين وتوزيع المياه المحلاة أصحاب مصلحة جدداً، لا سيما شركاء القطاع الخاص، مما قد يتطلب تحديث نماذج ومتطلبات تقديم خدمات المياه، وإنشاء إدارة شفافة للمشتريات والعقود ومراجعة مصادر الإيرادات وقدرات أصحاب المصلحة. ومن منظور التخطيط، يجب دمج تحلية المياه بعناية ضمن إستراتيجية موحَّدة للإمدادات تهدف إلى تعظيم التوافر والموثوقية والاستدامة والفعالية من حيث التكلفة. وبالتالي، يجب دمج حلول الإمدادات ضمن إستراتيجية متكاملة لإدارة الموارد المائية تُكمِّل تدابير جانب الطلب، وتدابير تحسين جودة المياه، وحملات التوعية العامة. وتمتلك المنظمات الدولية المتعددة الأطراف، مثل البنك الدولي،

مجموعة من الأدوات المتخصصة والخبرات العالمية لدعم جهود البلدان في تعزيز البيئة التنظيمية والمؤسسية لتقديم خدمات المياه وتحسين العوائد بعد حساب المخاطر للاستثمارات المتنوعة في قطاع المياه.

يتطلَّب تعزيز الاستدامة المالية لمحطات تحلية المياه والعمل كي تصبح مصدراً موثوقاً وفعالاً من حيث التكلفة للمياه عدة اعتبارات مهمة. فتحقيق واستدامة استرداد التكاليف في خدمات المياه يستلزم مصادر دخل يمكن التنبؤ بها تقوم على مزيج مستدام من رسوم المستخدمين والتعرفة، إلى جانب تحويلات حكومية من خلال إعانات دعم مُوجَّه حيثما كان ذلك مناسباً. ونظراً لأن الآثار المالية للتحلية عادة ما تكون كبيرة، فإن السياسات المالية واللوائح الاقتصادية الواضحة ضرورية لإدارة آثار التحلية على الأعباء المالية للقطاع، مع مراعاة اعتبارات العدالة الاجتماعية وحماية الأسر الفقيرة والضعيفة. وتشمل الإجراءات الملموسة لتقليل تكاليف تحلية المياه والمساعدة في تحقيق الاستدامة المالية للحكومات والمستخدمين، من بين أمور أخرى: تحسين كفاءة القدرات المطلوبة؛ وتصميم هياكل تمويل فعالة وتحقيق أفضل الشروط للتمويل بالدين وأسهم حقوق الملكية؛ واختيار نماذج لتقديم الخدمات تُعظِّم القيمة مقابل المال؛ واستخدام الضمانات الحكومية للمستثمرين من القطاع الخاص بشكل إستراتيجي وتصميم عقود تضمن أسعار عروض أسعار تنافسية؛ وتنفيذ تحلية المياه على مراحل وإدارة التكاليف بعناية، بما في ذلك تأجيل مدفوعات الديون أو حقوق الملكية لفترة سماح لتقليل التكاليف الأولية؛ وجذب أصحاب الاستثمارات طويلة الأجل، مثل صناديق معاشات التقاعد، الذين يتوقعون عوائد أقل وفترات سماح طويلة (لا سيما في مراحل المشاريع اللاحقة، مثل التوسع أو إعادة التمويل). ولهذه الاعتبارات أهمية كبيرة للبلدان متوسطة ومنخفضة الدخل، حيث يشيع انخفاض أسعار خدمات المياه ويجعل من الصعب تغطية تكاليف التشغيل والصيانة. ويمكن للمنظمات الدولية، لا سيما تلك التي تقدم الدعم العام والخاص، أن تقدم مجموعة من الأدوات المالية المبتكرة لإطالة أجل التمويل، وتقليل التكاليف، وزيادة ثقة القطاع الخاص. ويمكنها أيضاً تقديم خدمات استشارية إستراتيجية لتحسين خيارات تنفيذ المشاريع، وتعزيز بيئة العمل المواتية لمشاركة القطاع الخاص، والحرص على وجود أُطُر تنظيمية كافية، وخلق حوافز تؤدي إلى تعظيم قيمة استثمارات تحلية المياه.

يتطلب تحقيق التوازن بين هذه الاعتبارات اتباع نهج مُصمَّم خصيصاً يراعي السياق الخاص بكل بلد. وتختلف بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا اختلافاً كبيراً من حيث متوسط نصيب الفرد من الدخل، والهياكل الاقتصادية، والتحديات الإنمائية. وكانت الاقتصادات ذات الدخل المرتفع المُصدِّرة للنفط رائدة عالمياً في تطوير تكنولوجيات تحلية المياه، أمَّا البلدان متوسطة الدخل في المنطقة فتنظر بشكل متزايد إلى التحلية بوصفها حلاً لبناء القدرة على الصمود ومعالجة شح المياه. وتواجه العديد من البلدان منخفضة الدخل والهشة والمتأثرة بالصراعات صعوبة في توفير الخدمات الأساسية وسط تصاعد الأزمات والآثار المتتالية لتغيُّر المناخ، لكنها ترى أن تحلية المياه بديل فعال من حيث التكلفة مقارنة بإمدادات المياه الخاصة التي غالباً ما تكون مرتفعة التكلفة. ومن الضروري فهم هذا التنوع ومراعاة هذه الاعتبارات لتحسين وتطوير مشاريع تحلية المياه وتعظيم الاستفادة منها وتكييف التدابير اللازمة لتلبية الاحتياجات الفريدة لبلدان المنطقة، مما يساعد على إيجاد حلول مستدامة وموثوقة لإمدادات المياه في واحدة من أكثر المناطق معاناة من شح المياه في العالم.

لعبت البلدان مرتفعة الدخل في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا دوراً رائداً في تطوير تحلية المياه لما فيه منفعة المنطقة والعالم. وتتمتع هذه البلدان بأعلى مستويات الدخل في العالم، وهو ما يرجع في المقام الأول إلى صادرات النفط والغاز التي تُسهِم بشكل كبير في الدخل الوطني والاستقرار المالي. ومكَّنت هذه الموارد من القيام باستثمارات كبيرة في البنية التحتية والتكنولوجيات المتقدمة، بما في ذلك تحلية المياه. ودعَّمت أنظمة الحوكمة والمالية القوية نسبياً المشاريع واسعة النطاق والابتكارات، مع مشاركة كبيرة من القطاع الخاص في التدابير الهيكلية وغير الهيكلية. ومع ذلك، فإن اقتصادات البلدان المنتجة للنفط معرضة لتقلُّبات الأسعار، وهناك إدراك متزايد للحاجة إلى تنويع الأنشطة الاقتصادية. وقد يخلق الاستمرار في دمج الطاقة المتجددة في تحلية المياه من أجل تقليل كثافة الكربون إحدى هذه الفرص النافعة. علاوة على

ذلك، فإن معدلات استهلاك المياه للفرد من بين أعلى المعدلات في العالم، وهناك حاجة إلى كفاءة استخدام المياه وتدابير للحفاظ على المياه لتعزيز تدابير إدارة أكثر استدامة للموارد المائية تُكمِّل أنشطة التحلية واسعة النطاق.

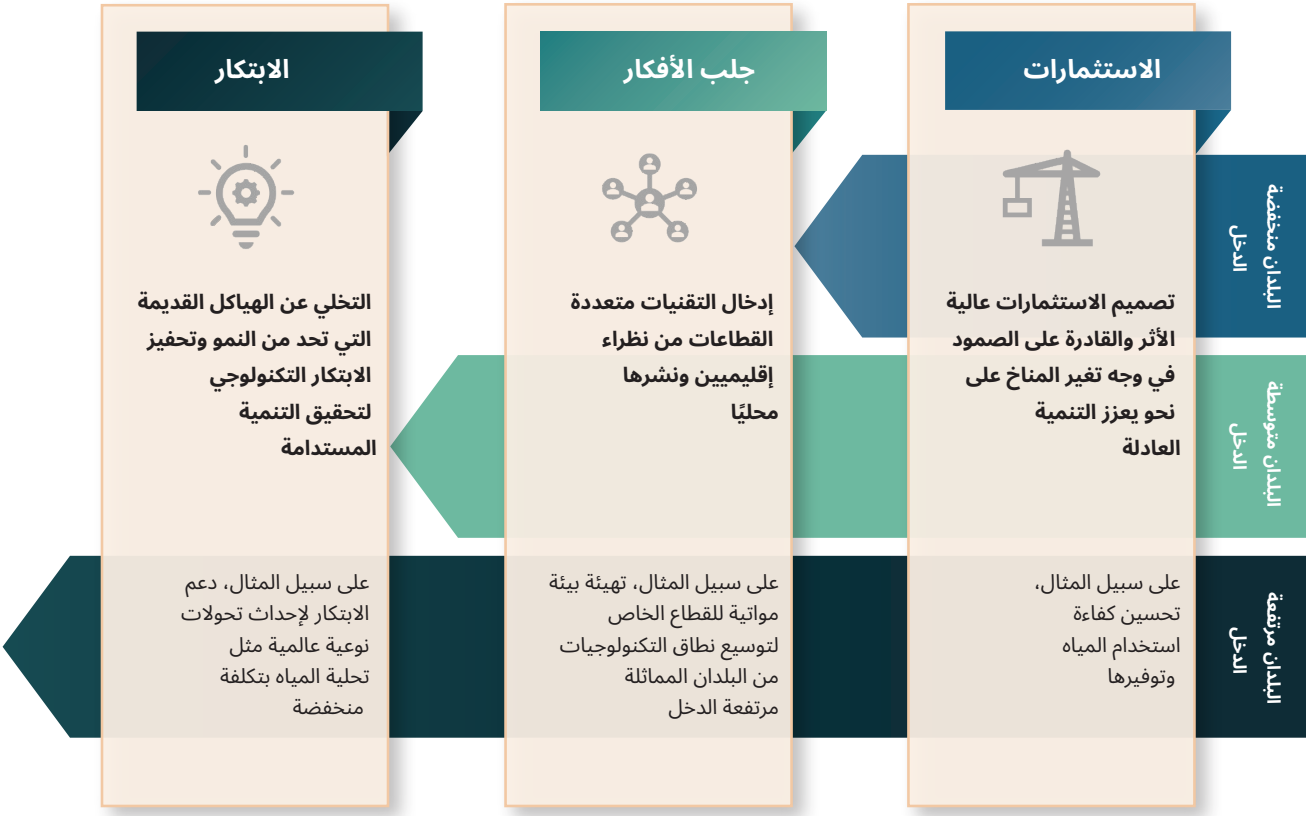
يمكن القول بأن البلدان متوسطة الدخل في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا تواجه أكبر التحديات في تطوير قدرات تحلية المياه ودمجها في منظومة إمدادات المياه الأوسع بطريقة مستدامة مالياً. وفي ظل المستوى المتوسط لنصيب الفرد من الدخل، وضيق الحيز المتاح للإنفاق في إطار المالية العامة، وعدد من أولويات التنمية المتضاربة، قد تخلق التكاليف المرتبطة بتطوير وتشغيل وصيانة محطات تحلية المياه أعباء كبيرة على الموازنة العامة. وتعرفة المياه في معظم البلدان متوسطة الدخل في المنطقة بعيدة كل البعد عن تغطية تكاليف التشغيل والصيانة الحالية. وعلى الرغم من انخفاض تكاليف تحلية المياه، فإنها ستستلزم زيادة التعرفة وإجراء تحسينات في مستويات الكفاءة، وأن تقترن غالباً بالاستمرار في تقديم إعانات الدعم الحكومي أو حتى زيادتها، لتحقيق الاستدامة المالية لقطاع المياه، والخدمات التي يقدمها، وحماية الأسر الفقيرة والضعيفة من آثار توزيع الدخل المرتبطة بخطط تعديل التعرفة تدريجياً. ويعاني العديد من البلدان متوسطة الدخل أيضاً من مواطن ضعف مؤسسية تفاقمت بسبب عدم الاستقرار الإقليمي وأزمات اللاجئين. ويتطلَّب البدء بتطبيق تكنولوجيا تحلية المياه إدخال تعديلات كبيرة على هياكل حوكمة المياه. ويجب على الوزارات والمؤسسات المعنية بالأحواض المسؤولة تقليدياً عن إدارة تطوير موارد المياه السطحية والمياه الجوفية التنسيق مع المراكز الحضرية الكبيرة التي تُطوِّر قدراتها الخاصة لتحلية المياه كمصدر موثوق للمياه لتلبية احتياجات سكان الحضر الذين يزداد ثراؤهم. وهناك حاجة أيضاً إلى بذل جهود كبيرة لتقليل التكلفة الإجمالية لتطوير تحلية المياه، بما في ذلك تكلفة رأس المال لتطوير المشاريع من خلال استخدام أدوات الضمان، إلى جانب إصلاحات السياسات والاستثمارات التي تهدف إلى تحسين كفاءة القطاع. ومن الجدير بالذكر أن هناك حاجة إلى تدابير لمعالجة الحواجز السياسية والمؤسسية التي تعوق التنفيذ، وتقليل الخسائر المادية والتجارية، وتعزيز نُهُج الاقتصاد الدائري التي يمكن أن تعظم إعادة استخدام المياه والقيمة الكلية المستمدة من المياه المحلَّاة.

تواجه البلدان منخفضة الدخل، وكذلك البلدان المتأثرة بأوضاع الهشاشة والصراع والعنف (FCV)، عدداً من التحديات الفريدة. ومن بينها تحديات شديدة تتعلَّق بالحوكمة، وانعدام الأمن، ونزوح واسع النطاق للسكان. ويحد تفشِّي الفقر وضعف موارد المالية العامة من الاستثمارات في البنية التحتية، ويعوق ضعف المؤسسات وهياكل الحوكمة تخطيط المشاريع وتنفيذها وصيانتها. وتشمل الدول المتأثرة بأوضاع الهشاشة والصراع والعنف في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بعضاً من أشد البلدان معاناة من شح المياه في العالم، ولذلك على الرغم من هذه التحديات، تتيح تحلية المياه فرصاً لبناء القدرة على الصمود وتقديم الخدمات الأساسية. وفي الكثير من سياقات الهشاشة والصراع والعنف، يقوم القطاع الخاص بتوفير المياه، غالباً من خلال شاحنات صهريجية للمياه غير مُرخَّص لها وذات جودة منخفضة نسبياً وبتكلفة مرتفعة (تصل إلى 17 دولاراً أمريكياً للمتر المُكعَّب). ومع التحسينات في تكنولوجيا تحلية المياه وتناقص التكلفة، يمكن أن توفِّر التحلية مصدراً بديلاً عالي الجودة وفعالاً من حيث التكلفة للمياه. وقد يُعقِّد الاعتماد على المساعدات الدولية جهود التنمية طويلة الأمد، لا سيما في الاستثمارات مثل تحلية المياه، ولذا فإن التركيز على وحدات التحلية الصغيرة واللامركزية والمحمولة أثبتت فعاليته في تلبية الاحتياجات الفورية وبناء هياكل مجتمعية. ولقد أثبت المانحون الدوليون وشركاء التنمية أهميتهم الأساسية في تقديم الدعم التكنولوجي والمالي في كل من الاستجابة الفورية من خلال إعطاء الأولوية للوصول الأساسي للمياه، والتخطيط والتطوير الأطول أجلاً للبنية التحتية واسعة النطاق.

تتيح منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا فرصاً كبيرة للتعاون فيما بين البلدان للعمل بشكل جماعي لتسريع جهود تطوير تحلية المياه كإجراء رئيسي للتكيُّف من أجل بناء القدرة على الصمود وتحقيق الأمن المائي. وعلى الرغم من تنوع سياقات البلدان في المنطقة، هناك عدد من التحديات والفرص والمسارات الإستراتيجية لتحلية المياه التي يمكن أن تساعد في الترقِّي على درجات سلم الدخل من بلدان منخفضة الدخل إلى بلدان متوسطة ثم مرتفعة الدخل (الجدول 7.1). ويسلط نهج مُنظَّم لمسارات التنمية الضوء على ثلاثة أبعاد رئيسية: الاستثمار، الذي يُوفِّر

الدعائم الأساسية ويكفل وجود البنية التحتية الضرورية ورأس المال البشري اللازم لتعزيز التنمية المنصفة؛ جلب أفكار أو تكنولوجيات جديدة من الخارج، حيث تتعلَّم البلدان من الآخرين في المنطقة، وتستقدم تكنولوجياتها المبتكرة وتتبنَّاها ثم تقوم بتعديلها لتناسب ظروفها المحلية أو احتياجاتها، وبعد ذلك تنشرها على الصعيد المحلي لتوافق سياقها الوطني؛ والابتكار الذي يُشجِّع على خلق أفكار أو تكنولوجيات جديدة وتحسين مستويات الكفاءة بتحفيز الناس والمؤسسات على تطوير تكنولوجيات جديدة وأفضل تدعمها الإصلاحات المؤسسية (الشكل 7.1). وفي قطاع تحلية المياه، تتصدر البلدان مرتفعة الدخل الابتكار التكنولوجي المستمر، حيث تقوم بدور رائد في تحسين الكفاءة وتقليل التكاليف وتعزيز الاستدامة البيئية. ويمكن للبلدان متوسطة الدخل الاستفادة من هذه الإنجازات من خلال تسخير الخبرات المستمدة من المنطقة، ودمجها في مشاريع تنميتها المحلية مع تحسين الحلول لتتناسب مع الظروف المحلية. وهذا التفاعل من خلال التآزر، وتبادل المعارف، وتعزيز التعاون — حيث تقوم البلدان مرتفعة الدخل بتطوير تكنولوجيات جديدة، وتُسهِّل البلدان متوسطة الدخل انتشار هذه التكنولوجيات، وتنخرط جميع البلدان في تحلية المياه — يمكن أن يجعل حلول تحلية المياه أكثر سهولة واستدامة وفاعلية من حيث التكلفة تدريجياً في أنحاء المنطقة.

الشكل 7.1 • مسارات الانتقال المتعاقبة للتطوير من البلدان ذات الدخل المنخفض إلى مستوى الدخل المتوسط ثم المرتفع



المصدر: مقتبس من تقرير عن التنمية العالمية لعام 2024.

الجدول 7.1 • التحديات الرئيسية والفرص المتاحة لتحلية المياه في البلدان مرتفعة ومتوسطة ومنخفضة الدخل في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

التحديات والفرص	البلدان مرتفعة الدخل (HICs)	البلدان متوسطة الدخل (MICs)	البلدان منخفضة الدخل (LIC) والبلدان المتأثرة بالهشاشة والصراع والعنف
الابتكارات التكنولوجية	تعزيز الابتكار، وتجاوز حدود الممكن في تكنولوجيا المياه • تعزيز الابتكار التكنولوجي في مجال تحلية المياه وتبادل المعارف لصالح البلدان الأخرى (الإطار 7.1).	البناء والاستفادة من جلب الابتكارات • التبادل مع النظراء الإقليميين (البلدان على مستوى المنطقة) لتبنّي الابتكارات تدريجياً مع توسُّع قطاع التحلية لتجنُّب الوقوع في فخ تكنولوجيات وتصاميم عفا عليها الزمن لأجل طويل.	الاستفادة من الابتكار والتوطين • يجب ألا يُركِّز الابتكار التكنولوجي فقط على التطبيقات واسعة النطاق. فالخيارات التي تتسم بالكفاءة والقدرة على الصمود واللامركزية ضرورية للبلدان منخفضة الدخل والسياقات التي تعاني أوضاع الهشاشة والصراع والعنف (FCV)، سواء التي تعتمد على مياه البحر أو المياه المالحة. • توفر المحطات الصغيرة خيارات للوصول الأساسي إلى مصدر موثوق للمياه واستمرارية الخدمات، لا سيما في المناطق النائية وكشريان حياة في حالات الطوارئ.
كفاءة استخدام الطاقة والطاقة المتجددة	يقود الجمع بين أحدث التكنولوجيات والإنتاج الأكبر وتكلفة رأس المال الأقل (في المتوسط)، التحرُّك من أجل: • الانتقال إلى التناضح العكسي (RO) من العمليات الحرارية وإيقاف تشغيل المحطات القديمة • تجريب وترقية وحدات التناضح العكسي القائمة على الطاقة الشمسية الكهروضوئية لتحسين الجوانب التقنية الاقتصادية • دمج الطاقة المتجددة في مشروعات تحلية المياه على نطاق واسع من خلال الشبكة العامة وإصلاحات قطاع الطاقة المصاحبة.	العوامل التي يجب أن تؤخذ في الحسبان بشأن العلاقة بين إنتاج المياه واستخدام الطاقة مع توسُّع قدرات تحلية المياه: • الاستفادة من الخبرات في محطات التناضح العكسي لفصل التوسُّع في تحلية المياه عن البصمة الكربونية. • السعي لتحقيق زيادة في كفاءة استخدام الطاقة كوسيلة رئيسية للتخفيف من الآثار على المالية العامة. • تحسين تطوير قطاع الطاقة للتمكين من زيادة دمج الطاقة المتجددة في تحلية المياه بوتيرة وطموح واقعي.	مع وجود أنظمة لامركزية صغيرة النطاق في الغالب، فإن كثافة الكربون أصبحت مصدر قلق أقل إلحاحاً نسبياً. • الطاقة المتجددة واعدة بشكل ملحوظ كمصدر للطاقة في المناطق التي تفتقر إلى الوصول المستقر إلى الشبكة العامة.
الإدارة البيئية والاجتماعية	يقود الجمع بين أحدث التكنولوجيات والإنتاج الأكبر وتكلفة رأس المال الأقل (في المتوسط)، التحرُّك من أجل: • تحسين المعايير البيئية والاجتماعية (ESS) • اتباع نهج الاقتصاد الدائري • قيادة عملية تقييمات الأثر التراكمي (CIAs) بالنسبة للخليج العربي والبحر الأحمر بناء على زيادة قدرات التحلية المتوقعة.	الاعتبارات المتزايدة التي يجب مراعاتها بشأن العلاقة بين التحلية والبيئة مع توسُّع قدرات تحلية المياه: • ضمان الإدارة الكافية وذات الكفاءة للمخاطر البيئية لتخفيف المخاطر المحلية (والمخاطر المتراكمة) • المشاركة في تقييمات الأثر التراكمي بالنسبة للخليج العربي والبحر الأحمر.	مع وجود أنظمة لامركزية صغيرة النطاق في الغالب، فإن الآثار على الموائل المائية أقل أهمية نسبياً. • المشاركة في تقييمات الأثر التراكمي بالنسبة للخليج العربي والبحر الأحمر.

التحديات والفرص	البلدان مرتفعة الدخل (HICs)	البلدان متوسطة الدخل (MICs)	البلدان منخفضة الدخل (LIC) والبلدان المتأثرة بالهشاشة والصراع والعنف
حوكمة القطاع	توجد بالفعل أُطُر حوكمة قوية لقطاع تحلية المياه، وذلك بفضل عقود من الخبرة الواسعة النطاق. ويمكن تعزيز القطاع بدرجة أكبر من خلال: • التشريعات الاقتصادية • حوافز لتعزيز كفاءة وإنتاجية استخدام المياه • سياسة لتشجيع الابتكار.	من الضروري إيجاد بيئة عمل ملائمة من أجل تنمية تحلية المياه بشكل مستدام لتصبح جزءاً مكتمل العناصر وكبيراً من محفظة إمدادات المياه. • تقييمات قائمة على البيانات وخرائط طريق خاصة بكل بلد لضبط الحلول المؤسسية والإدارية والتنظيمية حسب الظروف والأحوال • الهياكل المؤسسية (الرأسية والأفقية) التي تُحسِّن مستويات الكفاءة وتوزيع المخاطر، وتجتذب مشاركة القطاع الخاص، وتُقلِّل من المخاطر • تحسين مزيج إمدادات المياه والحلول المائية المتكاملة، التي تشمل مُقدِّمي خدمات المياه ذوي الأداء الجيد والموثوقية، والإدارة الوافية للطلب، والتخصيص الذكي لإمدادات المياه • سياسات مالية ذكية، وأنظمة اقتصادية عادلة، وإدارة شفافة للمشتريات والعقود، وتسعير معقول للمياه • بناء القدرات وتبادل المعارف مع النظراء في المنطقة (بلدان المنطقة).	نظراً للبيئات الهشة والتحديات الشديدة في تنسيق الحوكمة بين القطاعات، يمكن أن يعزِّز الدعم الفني والمالي من المانحين الدوليين وشركاء التنمية تطوير قطاع التحلية ككل وأن يدعم المشاريع الفردية. • إقامة شراكات وتبادل أفضل الممارسات.
الاستدامة المالية	ينطوي الاستمرار في توسيع قدرات تحلية المياه على خطر ضئيل نسبياً على الاستدامة المالية، نظراً لوفرة الموارد واستقرار أوضاع المالية العامة والأُطُر التنظيمية القوية التي تحكم الجوانب الاقتصادية للقطاع. فإمَّا أن تكون مشاركة القطاع الخاص واسعة النطاق بالفعل، أو أن تستفيد المرافق العمومية بالبناء على عقود من الخبرة ذات الصلة. ويمكن تحسين الاستدامة والعدالة على المدى الطويل بدرجة أكبر من خلال: • زيادة مساهمة تعرفة المستخدمين مع تقليل إعانات الدعم الحكومي • تحسين توجيه الدعم نحو الأسر الفقيرة والضعيفة والأكثر احتياجاً والأولى بالرعاية.	يمكن أن تُعزِّز بيئة العمل المواتية مع الهياكل المناسبة لتقديم الخدمات الاستثمارات الخاصة على نطاق واسع مع الحد في الوقت نفسه من الآثار على المالية العامة. • ترشيد القدرات المطلوبة لتحلية المياه وضبط تكاليف المشروع. • الاستخدام الإستراتيجي للتمويل العام لمعالجة الحواجز التي تظهر في المراحل الأولى ومواطن الضعف والقصور في السوق (ضعف المرافق، ضبابية اللوائح التنظيمية، نقص العملات الأجنبية، ضحالة أسواق رأس المال المحلية، وما إلى ذلك). • تخفيف مخاطر الاستثمارات وتقليل تكلفة رأس المال (المنح، التمويل المُيسَّر، الضمانات، التمويل المختلط، تمويل فجوة الجدوى، وما شابه ذلك). • تعزيز قدرات الجهات المسؤولة عن تقديم خدمات المياه والمرافق في هيكلة المشاريع، ومشروعات الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP)، وإدارة العقود. • تقييم ملاءمة الشراكة بين القطاعين العام والخاص في مشاريع تحلية المياه واختيار نموذج تقديم الخدمات الذي يكفل تعظيم القيمة مقابل المال. • تجريب مشاريع الشراكة بين القطاعين العام والخاص لبناء سجل أداء وتحديد مجموعة من المشاريع المحتملة الجاذبة للمستثمرين أو المقرضين. • استكشاف خيارات إضافية للتخفيف من الآثار على المالية العامة لتوسيع قدرات تحلية المياه.	محطات التحلية صغيرة الحجم والأشكال الأساسية لمشاركة القطاع الخاص (مثل العقود المستندة إلى الأداء وتفويض المهام) تؤدي إلى مخاطر محدودة نسبياً على المالية العامة على المستوى الوطني. ويُلاحظ أن عدم استقرار المالية العامة يُمثِّل تحدياً على مستوى المشاريع، لا سيما بسبب ضعف الحوكمة. • تخطيط وتنفيذ مشاريع تحلية المياه باستخدام نُهُج شاملة لتعظيم فرص النجاح. • إشراك المجتمعات المحلية في أنشطة تحلية المياه وإدارة كيفية توزيع المياه المحلاة لدعم سبل العيش المحلية.

المصدر: أعد أصلاً لأغراض هذا التقرير.

الإطار 7.1 • برنامج شراكة تحلية المياه بين السعودية والبنك الدولي

برنامج شراكة تحلية المياه هو جهد تعاوني لنشر المعارف وبناء القدرات بين الهيئة السعودية للمياه (SWA) والبنك الدولي.

والذراع التشغيلية للهيئة هو المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة (SWCC)، وقد تم تكليفها منذ عام 1974 بتحلية مياه البحر، وإيصال المياه المحلاة المُنتَجة لمختلف مناطق المملكة. وهي أكبر مُنتِج للمياه المُحلَّاة في العالم، حيث تمتلك وتُشغِّل 33 محطة، و14 شبكة لنقل المياه، و4,000 كيلومتر من خطوط الأنابيب، بقدرة إنتاجية تُقدَّر بنحو 11 مليون متر مُكعَّب يومياً. وعلى مدى عقود قامت الهيئة SWA بدور رائد عالمياً في تعزيز الابتكار التكنولوجي والتشغيلي في مجال تحلية المياه، وتميَّزت بشكل ملحوظ بانتقالها التدريجي من الأساليب الحرارية الكثيفة في استخدام الطاقة إلى التناضح العكسي المُتقدِّم (RO)، الذي يسهم الآن بنسبة 75% من القدرة التشغيلية. وساهمت الهيئة بذلك في تقليل التكاليف بشكل كبير، مما جعل تحلية المياه متاحة للعديد من البلدان التي لم تكن من قبل قادرة على تحمل تكلفتها. وأصبحت الهيئة الآن تحتل بشكل متزايد مكانة متميزة ككيان رائد في إدارة الآثار البيئية والاجتماعية، مع الإدارة الحديثة للرجيع الملحي، ودمج الطاقة المتجددة في عملية التحلية، والمعايير البيئية الصارمة، وأنشطة بناء القدرات المقابلة.

تم إطلاق برنامج شراكة تحلية المياه المتعدد المراحل في يوليو/تموز 2024 كخدمات استشارية مُستردَة التكاليف (RAS)، واستغرقت المرحلة الأولى 18 شهراً. ومن خلال دمج الخبرات الواسعة للهيئة وابتكاراتها التكنولوجية في أنشطة تحلية المياه مع خبرة البنك الدولي كمؤسسة مالية رائدة في قطاع المياه وقدرته العالمية على تعبئة الموارد وجمع الأطراف، يسعى البرنامج إلى تعزيز ممارسات الاستدامة في تحلية المياه مع تعزيز تبادل المعارف بين المؤسستين والبلدان الأخرى في مختلف مراحل تطوير قدرات التحلية. ولهذا الغاية، يستعرض البرنامج تطوُّر تحلية المياه في السعودية ويقارن أداءه بأداء البلدان الأخرى. ويُركِّز البرنامج أيضاً على توسيع عروض التدريب في الأكاديمية السعودية للمياه، بناء على تقييم مُعمَّق لاحتياجات بناء القدرات لمجموعة من البلدان التي تنوي توسيع قطاع تحلية المياه لديها. وأخيراً، يدعم البرنامج الهيئة SWA في وضع لوائح اقتصادية وبيئية وفنية قائمة على البيانات، لا سيما تلك المتعلقة بالتحلية المستدامة، استناداً إلى أفضل الممارسات العالمية في قطاع المياه والبيئة.

من خلال برنامج شراكة تحلية المياه، تهدف الهيئة السعودية للمياه SWA إلى تدعيم مكانتها كمُنتِج عالمي المستوى للمياه المُحلَّاة، من خلال تعزيز ممارساتها الجيدة في تقييم وإدارة الآثار البيئية والاجتماعية، وتبادل الخبرات، وتعزيز التميُّز التقني والابتكار. وسيساعد البرنامج الهيئة على إبراز مواطن قوتها الفريدة وجوانب تميُّزها على الآخرين، ويدعم أساليبها التعاونية في إدارة المياه مع الشركاء الإقليميين، ويضع الأساس لتعزيز التميُّز التنظيمي في السعودية بما يتماشى مع أفضل الممارسات الدولية.

المراجع

Abuwatfa, Waad H., Nour AlSawaftah, Naif Darwish, William G. Pitt, and Ghaleb A. Husseini. 2023. "A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs)" Membranes 13, no. 7: 685. **https://doi.org/10.3390/membranes13070685**

Ahmed, Farah Ejaz, Abdullah Khalil, and Nidal Hilal. 2021. "Emerging Desalination Technologies: Current Status, Challenges, and Future Trends." *Desalination* 517: 115183.

Alenezi, Anwur, and Yousef Alabaiadly. 2025. "Artificial Intelligence Applications in Water Treatment and Desalination: A Comprehensive Review" Water 17, no. 8: 1169. **https://doi.org/10.3390/w17081169**

Ali, Mohamed E.A. 2021. "Nanofiltration Process for Enhanced Treatment of RO Brine Discharge." *Membranes* 11 (3): 212.

Alkhadra, Mohammad A., Xiao Su, Matthew E. Suss, Huanhuan Tian, Eric N. Guyes, Amit N. Shocron, Kameron M. Conforti, J. Pedro de Souza, Nayeong Kim, Michele Tedesco, Khoiruddin Khoiruddin, I. Gede Wenten, Juan G. Santiago, T. Alan Hatton, and Martin Z. Bazant. 2022. "Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion." *Chemical Reviews* 122: 13547–13635.

Al-Shammari, A., and A. Al-Qallaf. 2024. "Impact of Jellyfish Blooms on Desalination and Power Plants." *The International Journal of Engineering and Science* 13 (3). 108–113.

Andres, Luis A., Michael David Thibert, George Joseph, Alexander Danilenko, and Christian Borja-Vega. "Water and Sanitation: Rethinking Subsidies in Support of the Sustainable Development Goals." World Bank Blogs, August 28, 2019. **https://blogs.worldbank.org/en/water/smarter-subsidy-design-and-sdg-agenda-water-and-sanitation**.

Andres, Luis A., Michael David Thibert, Camilo Lombana Cordoba, Alexander V. Danilenko, George Joseph, and Christian Borja-Vega. *Doing More with Less: Smarter Subsidies for Water Supply and Sanitation.* World Bank, Washington, DC.

Belatoui, Abdelmalek, Hassiba Bouabessalam, Omar Rouane Hacene, Jose Antonio de-la-Ossa-Carretero, Elena Martinez-Garcia, and Jose Luis Sanchez-Lizaso. 2017. "Environmental Effects of Brine Discharge from Two Desalination Plants in Algeria (South Western Mediterranean)." *Desalination and Water Treatment* 76: 311–318.

Belkin Natalia, Eyal Rahav, Hila Elifantz, Nurit Kress, and Ilana Berman-Frank. 2017. "The Effect of Coagulants and Antiscalants Discharged with Seawater Desalination Brines on Coastal Microbial Communities: A Laboratory and in situ Study from the Southeastern Mediterranean." *Water Research* 110. 321–331.

Bello, Adewale S., Nabil Zouari, Dana A. Da'ana, John N. Hahladakis, and Mohammad A. Al-Ghouti. 2021. "An Overview of Brine Management: Emerging Desalination Technologies, Life Cycle Assessment, and Metal Recovery Methodologies." *Journal of Environmental Management* 288: 112358.

Borgomeo, Edoardo, Anders Jägerskog, Amal Talbi, Marcus Wijnen, Mohamad Hejazi, and Fernando Miralles-Wilhelm. 2018. *The Water-Energy-Food Nexus in the Middle East and North Africa: Scenarios for a Sustainable Future.* World Bank, Washington, DC.

Bundschuh, Jochen, Michał Kaczmarczyk, Noreddine Ghaffour, and Barbara Tomaszewska. 2021. "State-of-the-Art of Renewable Energy Sources used in Water Desalination: Present and Future Prospects." *Desalination* 508: 115035.

Campos, Edmo J.D., Filipe Vieira, Georgenes Cavalcante, Björn Kjerfve, Mohamed Abouleish, Sakib Shahriar, Reem Mohamed and Arnold L. Gordon. 2020. "Impacts of Brine Disposal from Water Desalination Plants on the Physical Environment in the Persian/Arabian Gulf." *Environmental Research Communications* 2 (12): 125003.

Casas, Sandra, Carlos Aladjem, Enric Larrotcha, Oriol Gibert, César Valderrama, and José Luis Cortina. 2013. "Valorisation of Ca and Mg by-products from Mining and Seawater Desalination Brines for Water Treatment Applications." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 89 (6).

Chenoweth, Jonathan, and Raya A. Al-Masri. 2021. "Cumulative Effects of Large-Scale Desalination on the Salinity of Semi-Enclosed Seas." *Desalination* 526: 115522.

Clark, Graeme F., Nathan A. Knott, Brett M. Miller, Brendan P. Kelaher, Melinda A. Coleman, Shinjiro Ushiama, and Emma L. Johnston. 2018. "First Large-Scale Ecological Impact Study of Desalination Outfall Reveals Trade-Offs in Effects of Hyper Salinity and Hydrodynamics." *Water Research* 145. 757–768.

Cornejo, Pablo K., Mark V.E. Santana, David R. Hokanson, James R. Mihelcic, and Qiong Zhang. 2016. "Carbon Footprint of Water Reuse and Desalination: A Review of Greenhouse Gas Emissions and Estimation Tools." *Water Reuse* 4 (4): 238–252.

Cosin, Carlos. 2019. "The Evolution of Rates in Desalination." *Smart Water*, January 15, 2019. **https://smartwatermagazine.com/blogs/carlos-cosin/evolution-rates-desalination-part-i**.

de Waal, Dominick, Stuti Khemani, Andrea Barone, and Edoardo Borgomeo. 2023. *The Economics of Water Scarcity in the Middle East and North Africa: Institutional Solutions.* Washington, DC: World Bank.

del Villar, Alberto, Joaquín Melgarejo, Marcos García-López, Patricia Fernández-Aracil, and Borja Montano. 2023. "The Economic Value of the Extracted Elements from Brine Concentrates of Spanish Desalination Plants." *Desalination* 560: 116678.

Elsaid, Khaled, Mohammed Kamil, Enas Taha Sayed, Mohammad Ali Abdelkareem, Tabbi Wilberforce, and A. Olabi. 2020. "Environmental Impact of Desalination Technologies: A Review." *Science of the total Environment* 748: 141528.

Ezz, Mohamed. 2025. "Egypt's Tourism Push Puts Pristine Red Sea Beach at Risk, Say Environmentalists." Reuters, April 15, 2025. **https://www.reuters.com/world/africa/egypts-tourism-push-puts-pristine-red-sea-beach-risk-say-environmentalists-2025-04-15**.

Fine, M., M. Cinar, C.R. Voolstra, A. Safa, B. Rinkevich, D. Laffoley, N. Hilmi, and D. Allemand. 2019. "Coral Reefs of the Red Sea – Challenges and Potential Solutions." *Regional Studies in Marine Science* 25. 100498.

Gacia, Esperança, Olga Invers, Marta Manzanera, Enric Ballesteros, and Javier Romero. 2007. "Impact of the Brine from a Desalination Plant on a Shallow Sea-Grass (Posidonia oceanica) Meadow." *Estuarine Coastal and Shelf Science* 72 (4): 579–590.

Gadalla, Mamdouh A., Amr Abdel Fatah, and Hany A. Elazab. 2023. A novel renewable energy powered zero liquid discharge scheme for RO desalination applications.

Garcia-Rodriguez, Lourdes, and Agustín M. Delgado-Torres. 2022. "Renewable Energy-Driven Desalination: New Trends and Future Prospect of Small Capacity Systems." *Processes* 10 (4): 754.

GCC (Global Carbon Council). 2022. "Methodology for Water Grid Connected Renewable Energy Based Desalination Plant." GCC, Doha.

GCC (Global Carbon Council). 2023. "Methodology for Desalinated Water Savings in Buildings." GCC, Doha.

Giacalone, Francesco, Antonia Filingeri, Alessandro Tamburini, A. Cipollina, and Giorgio Micale. 2024. "Electrodialysis for Sustainable Management of Seawater-Brine: Increasing Water Recovery via Production of Hypersaline Solution for Brine-Mining Processes." *Desalination* 575: 117294.

Griffiths-Sattenspiel, Bevan, and Wendy Wilson. 2009. *The Carbon Footprint of Water.* River Network, Portland.

GWI (Global Water Intelligence). 2022. *Global Water Tariff Survey.* GWI, Oxford.

HEPCA (Hurghada Environmental Protection and Conservation Association). 2022. "Introduction to Conservation Concerns in the Red Sea." HEPCA blog, January 14, 2022. **https://www.hepca.org/blog/introduction-to-conservation-considerations-in-the-red-sea-#**.

Hosseini, Hoda, Imen Saadaoui , Navid Moheimani , Mohammad Al Saidi, Fahad Al Jamali, Hareb Al Jabri, and Radhouane Ben Hamadou. 2021. "Marine Health of the Arabian Gulf: Drivers of Pollution and Assessment Approaches Focusing on Desalination Activities." *Marine Pollution Bulletin* 164: 112085.

Hunt, J. D., Al-Nory, M. T., Slocum, A. H., and Wada, Y. (2025). Integrated seasonal pumped hydro, cooling, and reverse osmosis: A solution to desert coastal regions. Desalination, 593, 118242.

IAE (International Energy Agency). 2016. *World Energy Outlook 2016: Water Energy Nexus – Excerpt from the World Energy Outlook 2016.* World Energy Outlook Special Report, IAE, Paris.

IFC (International Finance Corporation). 2013. *Good Practice Handbook: Cumulative Impact Assessment and Management: Guidance for the Private Sector in Emerging Markets.* Washington, DC: World Bank Group.

Ihsanullah, Ihsanullah, Jawad Mustafa, Abdul Mannan Zafar, M. Obaid, Muataz A. Atieh, and Noreddine Ghaffour. 2022. "Waste to Wealth: A Critical Analysis of Resource Recovery from Desalination Brine." *Desalination* 543: 116093.

IRENA (International Renewable Energy Agency). 2023. *Renewable Power Generation Costs in 2022.* Abu Dhabi: IRENA.

IRENA (International Renewable Energy Agency). 2024. *Renewable Power Generation Costs in 2023.* Abu Dhabi: IRENA.

Jägerskog, Anders, and Shawki Barghouti. 2022. *Advancing Knowledge of the Water-Energy Nexus in the GCC Countries.* World Bank, Washington, DC.

Jones, Edward, Manzoor Qadir, Michelle T.H. van Vliet, Vladimir Smakhtin, and Seong-mu Kang. 2019. "The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook." *Science of The Total Environment*, 657: 1343–1356.

Kariman, Hamed, Abdellah Shafieian, and Mehdi Khiadani. 2023. "Small Scale Desalination Technologies: A Comprehensive Review." *Desalination* 567: 116985.

Katal, Reza, Teo Ying Shen, Iman Jafari, Saeid Masudy-Panah, and Mohammad Hossein Davood Abadi Farahani. 2020. "An Overview of the Treatment and Management of the Desalination Brine Solution." In *Desalination – Challenges and Opportunities*, edited by Mohammad Hossein Davood Abadi Farahani, Vahid Vatanpour, and Amir Hooshang Taheri. London: IntechOpen.

Kennedy, Maria, Sabine Latteman, Nirajan Dhakal, Sergio Salinas, and Jan Schippers. 2023. "Emerging Trends in Seawater and Brackish Water Desalination". Unpublished presentation.

Khan, Qasim, Munjed A. Maraqa, and Abdel-Mohsen O. Mohamed. 2021. "Inland Desalination: Techniques, Brine Management, and Environmental Concerns." In *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*, edited by Abdel-Mohsen O. Mohamed, Evan K. Paleologos, and Fares M. Howari, 871–918. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Khemka, Rochi and Eberhard, Rolfe. 2025. Scaling Water Reuse: A Tipping Point for Municipal and Industrial Use. World Bank. **http://hdl.handle.net/10986/43326**

Khordagui, Hosny K. 1997. "Environmental Aspects of Brine Reject from Desalination Industry in the ESCWA Region." Proceedings from the Expert Group Meeting on Development of Non-Conventional Water Resources and Appropriate Technologied for Groundwater Management in the ESCWA Member Countries, Manama, October 27–30, 1997.

Khordagui, Hosny K., and K.H. Mancy. 1983. "Formation of Trihalomethanes During Disinfection of Drinking Water." *Water Quality Bulletin* 8 (1): 37–44.

Le Quesne, W.J.F., L. Fernand, T.S Ali, O. Andres, M. Antonpoulou, J.A. Burt, W.W. Dougherty, P.J. Edson, J. El Kharraz, J. Glavan, R.J. Mamiit, K.D. Reid, A. Sajwani, and D. Sheahan. 2021. "Is the Development of Desalination Compatible with Sustainable Development of the Arabian Gulf?" *Marine Pollution Bulletin* 173 (A): 112940.

Mansour, Shefaa, Hassan A. Arafat, and Shadi W. Hasan. 2017. "Brine Management in Desalination Plants." In *Desalination Sustainability: A Technical, Socioeconomic, and Environmental Approach,* edited by Hassan A. Arafat, 207–236. Elsevier: Amsterdam.

Miri, Rachid, and Abdelwahab Chouikhi. 2005. "Ecotoxicological Marine Impacts from Seawater Desalination Plants." *Desalination* 182: 403–410.

Morton, A.J., I.K. Callister, and N.M. Wade. 1996. "Environmental Impacts of Seawater Distillation and Reverse Osmosis Processes." *Desalination* 108. 1–10.

Mounir, Eman. 2022. "How the Largest Mooring System in the World is Saving Egypt's Corals." Euronews, January 24, 2022. **https://www.euronews.com/green/2022/01/24/how-the-largest-mooring-system-in-the-world-is-saving-egypt-s-corals**.

Mounir, Eman. 2025. "The Decline of Bahrain's Fisheries Due to Desalination." Pulitzer Center, January 8, 2025. **https://pulitzercenter.org/stories/decline-bahrains-fisheries-due-desalination-expansion**.

Mualla, Wael. 2018. "Water Demand Management is a Must in MENA Countries. But Is It Enough?" *Journal of Geological Resource and Engineering* 6 (2).

Nesterov, Oleksandr. 2025. "An Assessment of Seawater Desalination Impact on Salinities in the Arabian / Persian Gulf using a 3D Circulation Model." *Ocean Modelling* 194: 102503.

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2024. "Governing Sustainable Prosperity in the Middle East and North Africa." OECD Public Governance Reviews, OECD Publishing, Paris.

Oxfam. 2018. "A Roadmap for Small-Scale Desalination: An Overview of Existing and Emerging Technology Solutions for Cost-Efficient and Low-Energy Desalination in South and Southeast Asia." Technical Briefing, Oxfam, Nairobi.

Paleologos, Evan K., B.A. Welling, M.E. Amrousi, and Huda Masalmeh. 2019. "Coastal Development and Mangroves in Abu Dhabi, UAE." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 344: 012020.

Panagopoulos, Argyris, Katherine-Joanne Haralambous, and Loizidou. 2019. "Desalination Brine Disposal Methods and Treatment Technologies: A Review." *Science of The Total Environment* 693: 133545.

Paparella, Francesco, Daniele D'Agostino, and John A. Burt. 2022. "Long-Term, Basin-Scale Salinity Impacts from Desalination in the Arabian/Persian Gulf." *Scientific Reports* 12 (1): 20549.

Pérès, J.M., and J. Picard. 1975. «Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers de Posidonia Oceanica sur les côtes françaises de la Méditerranée.» *Aquatic Botany* 1: 133–139.

Petersen, Karen Lykkebo, Adina Paytan, Eyal Rahav, Oren Levy, Jacob Silverman, Oriya Barzel, Donald Potts, and Edo Bar-Zeev. 2018. "Impact of Brine and Antiscalants on Reef-Building Corals in the Gulf of Aqaba – Potential Effects from Desalination Plants." *Water Research* 144. 183–191.

Prasad, T.L. 2023. "Brine Management through Brine Mining of Trace Metals for Developing Secondary Sources of Nuclear Fuel." *Nuclear Engineering and Technology* 55 (2): 674–680.

Raz, Daniella. 2020. "Water Pollution Worries in MENA." Arab Barometer, March 17, 2020. **https://www.arabbarometer.org/2020/03/water-pollution-concerns-in-mena/**.

Rufuss, D. Dsilva Winfred, Vedansh Kapoor, S. Arulvel, and Philip Davies. 2022. "Advances in Forward Osmosis (FO) Technology for Enhanced Efficiency and Output: A Critical Review." *Journal of Cleaner Production* 356 (8): 131769.

Saeed, Mohamed O., M.I. Mohamed Ershath, and Ibrahim A. Al-Tisan. 2019. "Perspective on Desalination Discharges and Coastal Environments of the Arabian Peninsula." *Marine Environmental Research* 145: 1–10. **https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.02.005**.

Saeed, Talat, Hosny Khordagui, and Huda Al-Hashash. 1999. "Contribution of Power and Desalination Plants to the Levels of Volatile Liquid Hydrocarbons in the Nearby Coastal Areas of Kuwait." *Environmental International* 25 (5): 553–562. **https://doi.org/10.1016/S0160-4120(99)00037-9**.

Saha, Deblina, Seong Ho Hong, and Apala Bhattacharya. 2023. *Private Participation in Infrastructure (PPI) Annual Report.* World Bank, Washington, DC.

Sapiano, Manuel. 2019. "Integrated Water Resources Management in the Maltese Islands." Proceedings from the International Workshop: Challenges for Sustainable Water Management, October 2019, Forte dei Marmi. *Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater* 9 (3). **https://doi.org/10.7343/as-2020-477**.

Sayed, Enas Taha, A.G. Olabi, Khaled Elsaid, Muaz Al Radi, Rashid Alqadi, and Mohammad Ali Abdelkareem. 2023. "Recent Progress in Renewable Energy Based–Desalination in the Middle East and North Africa MENA Region." *Journal of Advanced Research* 48: 125–156.

Sharifinia, Moslem, Zahra Afshari Bahmanbeigloo, Walker O. Smith Jr., Chee Kong Yap, Mehrzad Keshavarzifard (2019). "Prevention is Better than Cure: Persian Gulf Biodiversity Vulnerability to the Impacts of Desalination Plants." Global Change Biology 25 (12): 4022–4033.

SWA (Saudi Water Company) 2022. "Smart Desalination Hydrating the future using AI" **https://www.swcc.gov.sa/uploads/WhitePaper-on-Water-Desalination.pdf**.

SWA (Saudi Water Authority). 2024. Presentation of the Saudi Water Authority at the United Nations Convention to Combat Desertification 16th Session of the Conference of the Parties in Riyadh, 2–13, December 2024.

SWA (Saudi Water Authority). 2024. "Desalination Energy Consumption - A Comprehensive Report on Water Desalination Sector". **https://swa-cdn.swa.gov.sa/Reports/**

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Sea Water Desalination Activities in the Mediterranean Assessment and Guidelines.* Mediterranean Action Plan Technical Reports Series No. 139, UNEP, Athens.

Wafa, Ajala, Ben Ali Samir, Fetoui Mondher, and Abdeladhim Mohamed Arbi. 2022. "Sustainability Impact Assessment of Seawater Desalination Plant of Djerba in the Southeast of Tunisia." *Journal of New Sciences, Agriculture and Biotechnology* 89 (4): 5033–5039.

World Bank. 2012. *Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close the Water Gap in the Middle East and North Africa.* MENA Development Report 73070, World Bank, Washington, DC.

World Bank. 2017a. *Beyond Scarcity: Water Security in the Middle East and North Africa.* MENA Development Series. World Bank, Washington, DC.

World Bank. 2017b. *Guidelines for the Development of a Policy for Managing Unsolicited Proposals in Infrastructure Projects.* Washington, DC: World Bank and Public-Private Infrastructure Advisory Facility.

World Bank. 2019. "The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World." Technical Paper, World Bank, Washington, DC.

World Bank. 2022. *Middle East & North Africa Climate Roadmap (2021–2025): Driving Transformational Climate Action and Green Recovery in MENA.* Washington, DC: World Bank.

World Bank. 2024a. *Business Read 2024.* Washington, DC: World Bank.

World Bank. 2024b. "Fiscal Sustainability of Desalination in Egypt." (Unpublished report). World Bank, Washington, DC.

World Bank. 2025a. "Governance and Economics of Desalination and Reuse : Volume 1 – Adjusting Policy and Regulatory Frameworks to Go Mainstream." Governance and Economics of Desalination and Reuse Washington, D.C. : World Bank Group. **http://documents.worldbank.org/curated/en/099607007222523110**

World Bank. 2025b. "Governance and Economics of Desalination and Reuse : Volume 2 – Sector-Level Governance Models." Washington, D.C. : World Bank Group. **http://documents.worldbank.org/curated/en/099651407222523237**

World Bank. 2025c. "Governance and Economics of Desalination and Reuse : Volume 3 – Evaluating Economic Viability Using Modern Portfolio Theory." Washington, D.C. : World Bank Group. **http://documents.worldbank.org/curated/en/099655507222510271**

World Bank. 2025d. "Governance and Economics of Desalination and Reuse : Volume 4 – Selecting the Appropriate Project Delivery Model and Financial Structure." Washington, D.C. : World Bank Group. **http://documents.worldbank.org/curated/en/099708007222525576**

World Bank. 2025e (forthcoming). "Turning the Tide: Desalination in Libya." Policy Note, World Bank, Washington, DC.

WEF (World Economic Forum) and Accenture. 2023. *Enabling Measures: Roadmap for Low-Carbon Hydrogen Middle East and North Africa*. WEF, Cologny.

Zahir, Muhammad, Yuping Su, Muhammad Imran Shahzad, Gohar Ayub, Sami Ur Rahman, and Jehangir Ijaz. 2024. A review on monitoring, forecasting, and early warning of harmful algal bloom, Aquaculture, 593, 741351, **https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741351**

مجموعة البنك الدولي