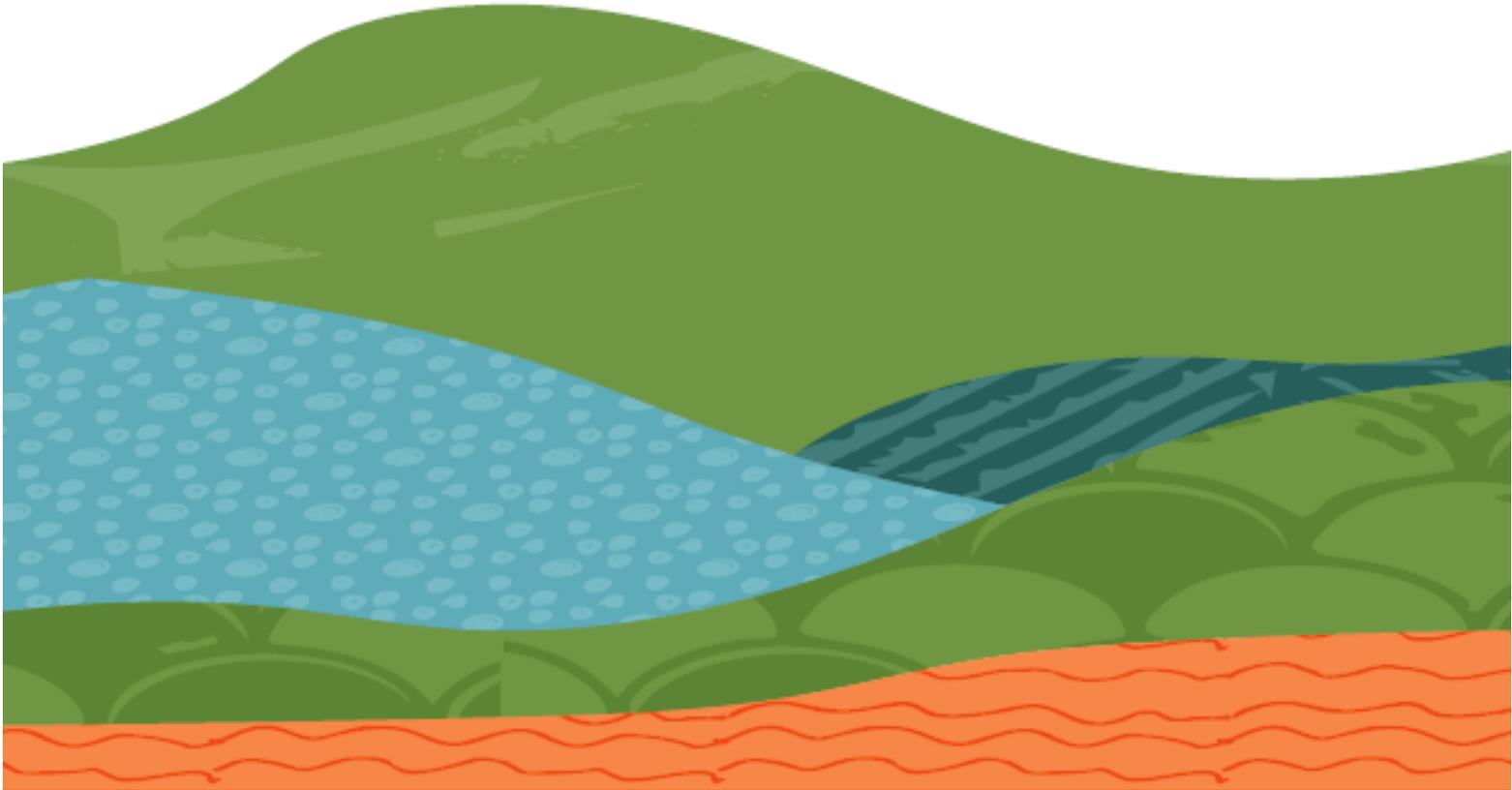




المجلس الوزاري العربي المشترك للمياه والزراعة

تحلية المياه في المنطقة العربية: الواقع والتحديات والآفاق (مسودة تقرير للنقاش)



ازدهار البلدان كرامة الإنسان



منظمة الأغذية والزراعة
للأمم المتحدة



المحتوى

3	1. المقدمة
3	1.1. ندرة المياه في المنطقة العربية
3	1.2. نظرة عامة على تقنيات تحلية المياه
4	1.2.1. التحلية الحرارية
5	1.2.2. التحلية بالأغشية
7	1.2.3. تقنيات التحلية الناشئة
9	1.3. تقنيات التحلية الرئيسية: الميزات وقاط الضعف
10	2. تحلية المياه في الوطن العربي
10	2.1. اتجاهات الطلب على المياه في العالم العربي
12	2.2. مصادر المياه غير التقليدية
12	2.3. الاعتماد على تحلية المياه في الوطن العربي
13	2.4. الاستخدام القطاعي لمياه التحلية في الوطن العربي
13	3. أبعاد تحلية المياه في المنطقة العربية
14	3.1. الأبعاد القانونية والسياسية
14	3.2. الأبعاد الاقتصادية
18	3.2.1. نظام التعرف
18	3.3. الأطر المؤسسية والتنظيمية للاستثمار الخاص
19	3.4. السوق والتداول
19	3.5. المخاطر الإنشائية والفنية والتشغيلية
	3.6. نظم التمويل 20
21	4. التحديات
21	4.1. التأثير البيئي
21	4.2. تحديات الإنشاء
21	4.3. جودة الهواء والبصمة الكربونية
22	4.4. البيئة البحرية
23	5. أفضل الممارسات
23	5.1. توافر البيانات والمعلومات وإمكانية الوصول إليها
23	5.2. توسيع وتحديث المراقبة الوطنية لتوافر المياه
24	5.3. تبادل البيانات والمعلومات عبر الحدود.

- 25 6.1. شراء محطات التحلية
- 25 6.2. عقود التصميم والبناء والتشغيل (DBO)
- 25 6.3. عقود البناء والتشغيل والنقل (BOT)
- 25 6.4. البناء والامتلاك والتشغيل (BOO)
- 26 6.5. القيود المتعلقة بالتصور العام لمشاركة القطاع الخاص في الشراكة بين القطاعين العام والخاص

- 27 7.1. الدرجات والأدوار الأكاديمية
- 27 7.2. البحث والتطوير
- 28 7.3. التدريب المهني والتقني

- 28 8.1. رؤى جديدة للتقنيات المبتكرة
- 29 8.2. الاستدامة المالية
- 29 8.3. الاستدامة البيئية
- 30 8.4. السعي لتحديث التشريعات والقوانين
- 30 8.5. الطلب على المياه في الثورة الصناعية الرابعة ودور التقنيات الهادمة

1. المقدمة

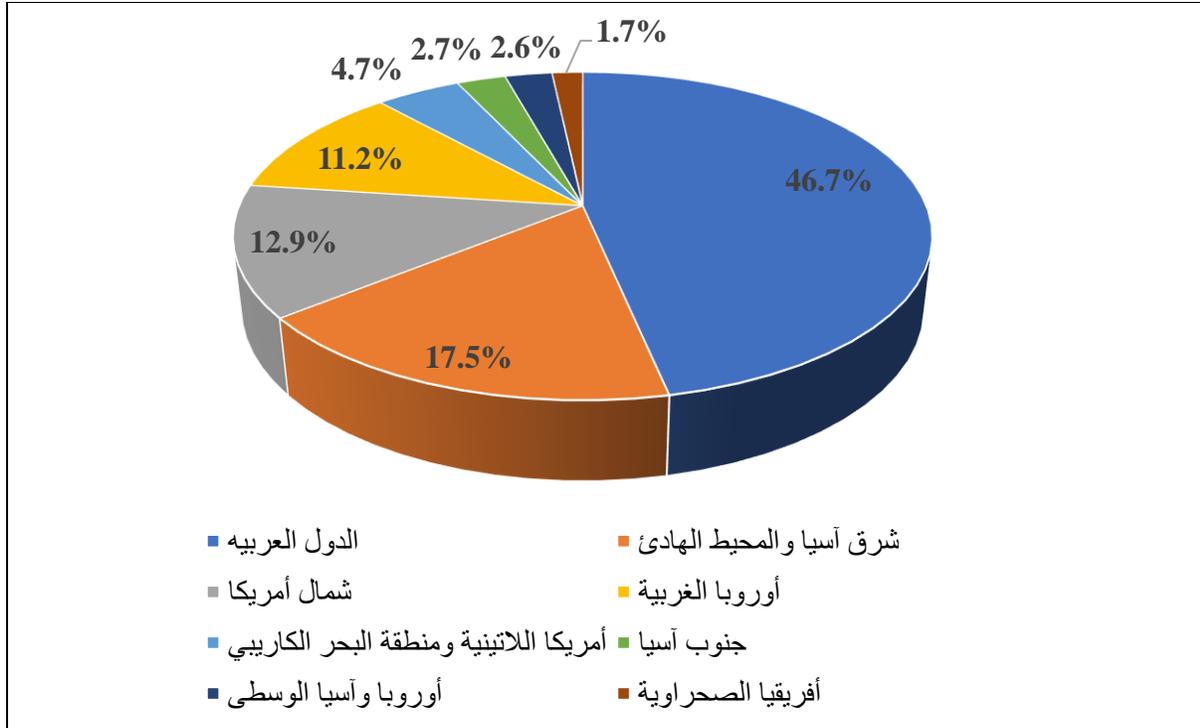
1.1. ندرة المياه في المنطقة العربية

الجفاف وشح الموارد المائية والسواحل الطويلة تجعل منطقة الدول العربية معرضة بشكل خاص لتأثير التغير المناخي. وتعد المنطقة العربية أكثر مناطق العالم ندرة بالمياه، حيث يبلغ نصيب الفرد من موارد المياه المستدامة 1000 متر مكعب في السنة تقريباً. والذي يعتبر أقل بكثير من الحد الأدنى لموارد المياه المتجددة البالغ 1700 متر مكعب / سنة للفرد [1]. تتفاقم هذه المشكلة بسبب تغير المناخ حيث ترتفع درجات الحرارة العالمية وتتنخفض مستويات هطول الأمطار، مما يؤدي إلى تناقص الموارد المائية. هنالك توقعات بانخفاض نصيب الفرد من المياه بمنطقة الدول العربية بمقدار النصف بحلول عام 2050، والذي سيؤدي بدوره إلى حدوث عجز بين العرض والطلب بنسبة زيادة تصل إلى 50 في المئة [2]. ومع ذلك، يمكن أن يقترن هذا بانخفاض الطلب على المياه العذبة إلى النصف. تساهم العديد من العوامل في ندرة المياه العذبة، مثل الاعتماد على موارد المياه المشتركة والتلوث وآثار تغير المناخ والجفاف والظواهر الجوية الشديدة ونضوب المياه الغير متجددة والاستخدام غير الفعال للمياه وارتفاع معدلات النمو السكاني. بالتالي تتطلب نقص المياه المتزايد إدارة مصادر مياه بديلة، مثل تحلية مياه البحر لإنتاج مياه نقية [3].

1.2. نظرة عامة على تقنيات تحلية المياه

تزيل تحلية المياه الأملاح والمعادن من المياه المالحة لإنتاج مياه شرب نقية، وهي حل ناجح لنقص المياه، لا سيما في المناطق ذات المناخات الأكثر حرارة وجفافاً. على الرغم من وجود محطات تحلية المياه في كل جزء من العالم تقريباً والبعض قيد الإنشاء، إلا أن عدداً كبيراً منها موجود بالمنطقة العربية، حيث تمثل 46.7% من الطاقة الإنتاجية العالمية (GWI) كما هو موضح في الشكل 1. المملكة العربية السعودية (عدد السكان 35 مليوناً) تستخدم حالياً حوالي 60% من المياه الناتجة عن تحلية مياه البحر للاستخدام المنزلي. في أوائل القرن العشرين، بدأت مرافق التحلية التجارية في العمل وتم تطويرها بسرعة في المنطقة العربية. يقال إن شركة هولندية قامت ببناء أول محطة لتحلية المياه في منطقة الخليج عام 1907 في جدة بالمملكة العربية السعودية. تم إنشاء محطات تحلية المياه على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم خلال منتصف القرن العشرين، على الرغم من أن الشرق الأوسط كان أول منطقة يستخدمها. في المنطقة العربية، تمت محطات تحلية المياه بشكل كبير، بإجمالي سعة تبلغ 57 مليون متر مكعب في اليوم من 6782 وحدة تحلية قائمة على مياه البحر والمياه الجوفية ومياه الصرف ومياه الأنهار والمياه المالحة بحلول عام 2022 (GWI). تتراوح طاقة هذه المشاريع ما بين 100 إلى 1,000,000 متر مكعب في اليوم [4، 5].

تشتمل تقنية التحلية على ثلاث فئات رئيسية: التبخير والتكثيف، والترشيح، والتبلور. كان التبخير والتكثيف من أوائل عمليات التحلية التي تم إدخالها وتطبيقها لإنتاج المياه المحلاة. تستخدم هذه العمليات الطاقة الحرارية أو الميكانيكية لمياه البحر، وتنتج بخاراً، ثم تكثفه. أكثر التقنيات شيوعاً هي التقطير متعدد التأثيرات (MED)، والتقطير الومضي متعدد المراحل (MSF)، وضغط البخار (VC). يتم الآن دراسة البدائل الأخرى بما في ذلك التقطير الشمسي الثابت (SSD) والمداخن الشمسية (SC) والترطيب وإزالة الرطوبة (HDH). أما في فئة الترشيح، يعتبر التناضح العكسي (RO) هو أكثر تقنيات التحلية استخداماً. يتم استخدام الفرز الكهربائي بالأغشية، الديليزة، (ED) والتبادل الأيوني (IXR) أيضاً لإنتاج الماء، ولكن لتحلية المياه منخفضة الملوحة. كما توجد تقنيات أخرى للتحلية مثل التناضح الأمامي (FO)، والترشيح النانوي (NF)، تقنية التقطير بالأغشية (MD)، وإزالة الأيونات بالسعة الكهربائية (CDI) ولكنها ما زالت في المراحل الأولى من التطوير [6].



الشكل 1: نسب إنتاج المياه المحلاة عالمياً (GWI)

1.2.1. التخلية الحرارية

ظلت التخلية الحرارية هي التقنية الأكثر شيوعاً وموثوقة لعدة عقود، ولكن نظراً لاستهلاكها للطاقة، يتم الآن استبدالها إلى حد كبير بأنظمة تعتمد على الأغشية. يتطلب إنتاج 1000 متر مكعب في اليوم من المياه العذبة بالتقنيات الحرارية حوالي 10 آلاف طن من الوقود الأحفوري سنوياً. يعزى ذلك إلى متطلبات الطاقة الحرارية العالية (60-80 كيلو واط في المتر مكعب). ومع ذلك، تعتبر العمليات الحرارية مثالية لدول المنطقة العربية بسبب التكلفة المنخفضة للوقود الأحفوري وإمدادات الطاقة. يعتبر توفر الوقود الأحفوري السبب الرئيسي في أن دول الخليج العربي، وعلى رأسها الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية، تستحوذ على ما يقارب 90٪ من الطاقة الحرارية المستخدمة عالمياً في تطبيقات تحلية المياه. الطرق الرئيسية المستخدمة في فئة التقنيات الحرارية هي التبخير الومضي متعدد المراحل (MSF) والتقطير متعدد التأثير (MED) والتبخير بضغط البخار الميكانيكي (MVC) أو الحراري (TVC) [7].

يتم استخدام طريقة التبخير الومضي المتعدد المراحل (MSF) من قبل جميع دول مجلس التعاون الخليجي، ويتم استخدامها جنباً إلى جنب مع محطات الطاقة المرتبطة بها. يرفع سخان المحلول الملحي مياه البحر التي تدخل النظام إلى درجة حرارة عالية خلال هذه العملية. بعدها يتم سكب الماء الساخن في غرف محكمة الإغلاق، بحيث تكون الغرفة الأولى أكثر سخونة من الغرفة التي تليها، وهكذا دواليك. عندما يدخل الماء إلى الغرفة، فإنه يومض ليخرج ويتبخر. لأن الضغط في الغرفة التالية أقل، فيومض الماء عند درجة حرارة منخفضة. ناتج التقطير هو المياه العذبة المتراكمة في المرحلة الأبرد أو النهائية، ومع زيادة تركيز مياه البحر من خطوة إلى أخرى، يترام المحلول الملحي ويتم التخلص منه في المرحلة النهائية. تتكون محطات التبخير الومضي المتعدد المراحل عادة من 18-25 مرحلة، ولكن يمكن أن تصل إلى 40 مرحلة [5].

يحدث التقطير متعدد التأثير (MED)، مثل التبخير الومضي المتعدد المراحل، على مراحل ويستخدم نفس مبادئ التبخير والتكثيف عند ضغط منخفض تدريجياً في كل مرحلة، ولكن دون إضافة حرارة إضافية. يتمثل الاختلاف الأساسي بين MSF و MED في عملية التبخير ونقل الحرارة، والتي تحدث عند

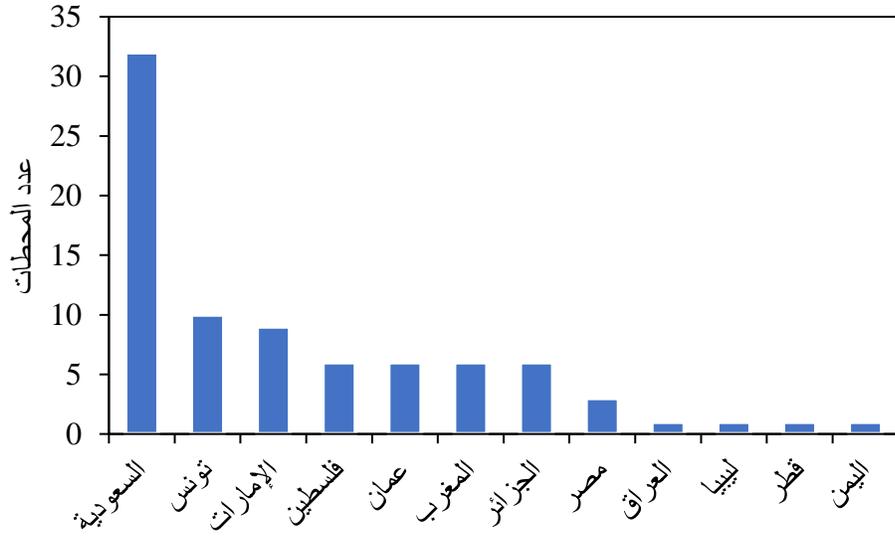
درجة حرارة منخفضة (70 درجة مئوية لـ MED و 90-110 درجة مئوية لـ MSF) [4]. علاوة على ذلك، تعد MED أول العمليات الحرارية الرئيسية، حيث يتم ضخ المياه المالحة من خلال أنابيب ساخنة لتبخير من خلال الفتحات. مع ذلك، إذا كان الماء شديد التعكر، يمكن أن تسد هذه الفتحات بالكلس والملوثات. بسبب هذه المخاوف، بدأ التقطير بالـ MSF بالانتشار بعد عام 1960. ونتيجة لمزيد من التحسينات التكنولوجية، تتنافس MED الآن مع MSF تقنياً واقتصادياً، لكن التقطير MSF لا يزال تقنية موثوقة ومثبتة وتعتبر تقنية فعالة من حيث التكلفة في المناطق التي تكون فيها أسعار الوقود منخفضة. إلى جانب MED و MSF، تعد تقنية التبخر بضغط البخار الميكانيكي (MVC) أو الحراري (TVC) تقنية تحلية ممتدة قائمة على الحرارة يتم فيها تحويل المياه المالحة إلى بخار عبر مبادل حراري ثم ضغطها ميكانيكياً أو حرارياً. بغض النظر عن الطريقة المستخدمة لصنع البخار، يتم تكثيف البخار في ناتج التقطير عن طريق المرور عبر مبادل حراري. ومع ذلك، فإن السمة المهمة لـ MVC هي أن حوالي 100٪ من الحرارة الكامنة الناتجة عن بخار الماء تنتقل إلى المحلول الملحي؛ ووفقاً لعملية الاسترداد، لا يلزم سوى القليل من الحرارة الخارجية [4].

1.2.2. التحلية بالأغشية

تستخدم تقنية التحلية القائمة على الأغشية لتحلية مياه البحر وسيط من أغشية. ازدادت شعبية هذه التقنيات منذ عام 2000 حيث إن ما يقرب من 70٪ من عمليات التحلية تعتمد الآن على الأغشية. تقنية التقطير بالأغشية هي تقنية فصل تعتمد على الاختلاف الحراري تم فيها جزيئات البخار فقط عبر غشاء دقيق المسام. يقود فرق ضغط البخار الناتج عن اختلاف درجة الحرارة عبر الغشاء الطارد للماء بعملية التقطير بالأغشية. لذلك فهي تقنية واعدة للغاية لتحلية المياه شديدة الملوحة. علاوة على ذلك، توفر هذه التقنية العديد من الخصائص الجذابة، بما في ذلك اعتمادها على درجات حرارة أقل لتشغيلها مقارنة بتقنيات التحليل الحراري حيث إنه لا يستدعي وصول الماء لدرجة الغليان. علاوة على ذلك، فإن الضغط الهيدروستاتيكي المستخدم أقل من ذلك الذي تحتاجه عمليات الغشاء المدفوعة بالضغط مثل التناضح العكسي (RO) [8]. في المنطقة العربية، لا توجد بيانات عن عدد محطات التحلية التي تستخدم MD التي سيتم بناؤها بين عامي 2020 و 2030 بناءً على GWI / desaldata.

التناضح العكسي (RO) عبارة عن تقنية تحلية قائمة على الأغشية تُستخدم على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم وتعتبر واحدة من أكثر طرق التحلية كفاءة. التناضح العكسي هو عملية مدفوعة بالضغط يحدث فيها الفصل عبر آلية انتشار المحلول عبر غشاء شبه نافذ. التناضح العكسي لا يعتمد على التسخين وإنما يعتمد على مضخات طرد مركزي ذات ضغط عالي. يتطلب وجود الطاقة الكهربائية لتشغيل مضخات الطرد المركزي عالية الضغط، ويتم تحديد مقدار الضغط المطلوب من خلال ملوحة المياه المراد تنقيتها. المحلول المركز المرتجع، والمعروف بالمحلول الملحي، يتم إرجاعه إلى البحر. من الناحية التجارية، تشمل عملية التناضح العكسي على المعالجة المسبقة، حيث يتم معالجة مياه التغذية الواردة غالباً بالمواد الكيميائية لجعلها أكثر ملاءمة لأغشية التناضح العكسي عن طريق تقليل التعكر والبكتيريا والملوثات والمواد الصلبة ومؤشر كثافة الطمي. من أهم محطات التحلية القائمة على التناضح العكسي محطة الشقيق 3، التي تعد واحدة من أكبر محطات تحلية المياه في المملكة العربية السعودية بسعة إنتاج تبلغ 450 ألف متر مكعب في اليوم، ما يكفي لتلبية احتياجات 2 مليون شخص [4].

تعتبر تحلية المياه بالتناضح العكسي أسرع تقنيات تحلية المياه نمواً في العالم، بقيمة سوقية تبلغ 9.227 مليار دولار أمريكي متوقعة بحلول عام 2022. بالنسبة لمياه البحر (SWRO)، يتراوح الضغط الهيدروليكي بين 55 و 70 بار، بينما بالنسبة للمياه الجوفية المالحة، فإن الضغط يتراوح بين 15 و 30 بار. من المتوقع تشغيل وتشيد 78 محطة لتحلية المياه باستخدام تقنية التناضح العكسي بين عامي 2020-2030 في الوطن العربي، بسعة تتراوح بين 100 و مليون متر مكعب في اليوم. جميع محطات التناضح العكسي المخططة موجودة في مواقع برية باستثناء ثلاث محطات متحركة في المملكة العربية السعودية. يوضح الرسم البياني في الشكل 2 توزيع هذه المحطات في المنطقة العربية. ستمتلك المملكة العربية السعودية أكبر عدد من هذه المحطات، تليها تونس والإمارات. كذلك من المتوقع أن تمتلك قطر وليبيا والعراق واليمن محطة واحدة جديدة لتحلية المياه بالتناضح العكسي.



الشكل 2: توزيع محطات التحلية القائمة على التناضح العكسي (2020-2030)، المصدر (GWI DesalData / IDA)

تُستخدم الكهرباء لتشغيل تقنيات تحلية المياه القائمة على الأغشية. يمكن أن تُعزى أغلب سعة المياه المحلاة في سلطنة عُمان، ونصفها تقريباً في المملكة العربية السعودية إلى تقنية التناضح العكسي (RO) في عمليات التحلية القائمة على الأغشية. كجزء من مشروع تقوم بتطويره الشركة السعودية للكهرباء، تم افتتاح مشروع رابع 3 في عام 2022، مع إمكانية أن يصبح أحد أكبر محطات تحلية مياه البحر القائمة على الأغشية في العالم، وذو دور رئيسي في إمداد المملكة بالمياه المحلاة.

تقنية الديليزة (الفرز الغشائي بالكهرباء) (ED) هي تقنية تحلية تعتمد على الأغشية وهي تقنية شبيهة بتقنية التبادل الأيوني. تعتمد هذه التقنية على جذب الأيونات الموجودة في الماء إلى أقطاب كهربائية ذات شحنة معاكسة. تعتمد هذه التقنية على استخدام الأغشية الانتقائية التي تسمح للأيونات أو الكاتيونات (ولكن ليس كليهما) بالمرور عند وضعها بين زوج من الأقطاب الكهربائية. تُستخدم وحدات الديليزة عادةً لتحلية المياه قليلة الملوحة (المياه الجوفية أو السطحية). تستخدم تقنية الفرز الغشائي المعاكس بالكهرباء (EDR) لتقليل تلوث الغشاء والتكلس. تختلف هذه التقنية عن سابقتها اعتماداً على عكس القطبية الكهربائية بعد فترة زمنية محددة. مثل التناضح العكسي، يتطلب نظامي ED وEDR مضخة لدفع الماء عبر الأغشية، ولكنه يكون بضغط أقل (وتكلفة أقل) مقارنة بتقنية التناضح العكسي [9]. نظراً لأن تقنية الديليزة أكثر مقاومة لتلوث الأغشية، فإن التكاليف المرتبطة باستبدال الأغشية وتنظيفها يمكن أن تقلل التكلفة الإجمالية [7]. ونظراً لأن ED يستخدم عادةً في المياه قليلة الملوحة مع مستويات منخفضة من إجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS)، فإن التكلفة غير مكلفة (حوالي 0.6 دولار / متر مكعب). تتميز تقنية الديليزة بقدرتها على تحقيق استرداد عالٍ للمياه تتراوح بين 85-94٪ وجودة مياه منتجة عالية بتركيز للمواد الصلبة الذائبة من 140-600 مجم / لتر.

يعتبر التناضح الأمامي (FO) عملية جديدة جذبت اهتمام العاملين في مجال تحلية المياه بسبب العديد من الميزات المختلفة. توفر العملية الأساسية إمكانات استرداد عالية النفاذية، تصل إلى 90٪ عند تحلية المياه قليلة الملوحة، ولا تتطلب استخدام ضغط عالي. تستخدم تحلية FO، مثل تحلية المياه بتقنية التناضح العكسي، غشاءً منفذاً بشكل انتقائي لفصل مياه التحلية عن مياه التغذية، مع وجود اختلاف في مستويات تركيز المواد المذابة على جانبي الغشاء الذي يقود عملية الفصل. تم ابتكار طريقة FO جديدة باستخدام الأمونيا وثاني أكسيد الكربون مع فوائد إضافية مثل زيادة قابلية ذوبان غاز الأمونيا وثاني أكسيد الكربون في الماء والضغط الأسموزي العالي لمحاول بيكرونات الأمونيوم المنتج. تتطلب هذه التقنية أقل من 0.25 كيلو واط للمتر المكعب من الطاقة لضخ السوائل حول الوحدة. نتيجة لذلك، تم تخفيض تكاليف التشغيل والصيانة بشكل كبير. بسبب هذه الفوائد، تم إنشاء مرفق تناضح أمامي في منطقة خولف في سلطنة عمان سنة 2009. تبلغ سعة هذا المصنع 100 متر مكعب في اليوم، وعند مقارنته مع التناضح العكسي لمياه البحر القريبة، فإنه يعمل بنفس السعة بدون تنظيف كيميائي [5].

الترشيح النانوي (NF) هو طريقة ترشيح غشائية تستخدم لإزالة الأيونات الذائبة أو المواد العضوية من الماء لتوليد الماء بتركيز محدود من الأيونات التي تسبب التكلس (Ca^{+2} , Mg^{+2} ...). يشبه التناضح العكسي بشكل عام هذا النهج. الفرق الرئيسي هو الإجراء المطلوب لاستخراج الأيونات من المياه المالحة. يستخدم NF غشاء نصف نفاذ، وقوة الدفع الخاصة به هي الضغط الهيدروليكي [6]. تشير كلمة "نانو" إلى أقطار المسام في الغشاء، والتي تتراوح من 1 إلى 10 نانومتر، مما يجعلها أصغر من تلك المستخدمة في تقنيات الترشيح الأخرى (الترشيح الدقيق والترشيح الفائق) ولكنها أكبر من تلك الخاصة بتقنية التناضح العكسي. نتيجة لذلك تزيل هذه الطريقة بشكل أساسي الأيونات ثنائية التكافؤ (على سبيل المثال، Ca^{+2} و Mg^{+2}) بكفاءة 90% إلى 98%. إزالة الأيونات أحادية التكافؤ محددة بنسبة تتراوح بين 60% و 85%. هناك محطتان لتحلية المياه تعملان بتقنية NF في عام 2020 في المنطقة العربية، واحدة في المملكة العربية السعودية تسمى مشروع مرافق إزالة الكبريتات (SRF) - محطة حزمة الترشيح النانوي (NF) بسعة 69266 متر مكعب في اليوم ومحطة أصغر في عمان بسعة 329 متر مكعب في اليوم. لا يزال هنالك توجه لإنشاء محطة واحدة فقط بين 2020-2030 تعمل بتقنية NF. حيث ستكون هذه المحطة بالمملكة العربية السعودية، تحت مسمى محطة تبوك لمعالجة المياه (Nano Filtration) باستخدام المياه قليلة الملوحة أو المياه الجوفية حيث يبلغ إجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS) 3000 جزء في المليون - >20000 جزء في المليون. تستهدف إنتاج مياه الشرب بمستوى TDS من 10 جزء في المليون - >1000 جزء في المليون للاستهلاك المنزلي بالسعودية وستبلغ طاقتها 150000 متر مكعب في اليوم (GWI / desaldata).

1.2.3. تقنيات التحلية الناشئة

تقنية التقطير بالأغشية لتحلية المياه شديدة الملوحة

التقنيات "المستجدة" هي تلك التي لا تزال في مرحلة البحث والتطوير مثل التناضح الأممي، التقطير الغشائي وإزالة الأيونات بالسعة الكهربائية. التقطير الغشائي (MD) هو تقنية فصل جديدة تجمع بين تقنيات التحلية الحرارية والقائمة على الأغشية مع القدرة على استخدام حرارة منخفضة. كما هو موضح بإيجاز في طرق العمل للتقنيات المختلفة في قسم MD أعلاه، حيث تبقى الأيونات وغيرها من المواد الذائبة غير المتطايرة في تيار التغذية المالحة. تم إجراء معظم دراسات تحلية المياه ذات الملوحة العالية على مستويات مخبرية ونماذج أولية معملية. ذكرت مقالة حديثة أن قطر تقوم بتشغيل محطة تقطير بالأغشية بسعة إنتاج 2 متر مكعب في اليوم (528 جالون في اليوم). تعالج هذه المحطة مياه مرتجعة من محطة تقطير مياه البحر بتركيز 70,000 جزء في المليون من إجمالي المواد الصلبة الذائبة محققة 34% ناتج المياه المعالجة. لم يتم حتى الآن تسجيل محطات تحلية تستخدم فقط نوع MD سواء لتحلية مياه البحر أو مياه شديدة الملوحة. المياه المنتجة من MD تحتوي على نسبة منخفضة جدًا من المواد الصلبة الذائبة لأن الأملاح بطبيعتها غير متطايرة، وعادة ما تكون أقل من 20 جزء في المليون بغض النظر عن ملوحة المدخلات. نتيجة لذلك يتميز نظام بالتقطير الغشائي بعدم تأثر إنتاجيته بزيادة ملوحة المياه الداخلة وبإنتاجه مياه عالية النقاء. هناك ميزة أخرى يتم تسليط الضوء عليها بشكل متكرر وهي قدرة النظام على استخدام طاقة حرارية منخفضة الدرجة بدلاً من مدخلات الطاقة عالية الجودة [10].

تقنية التناضح الأممي لتحلية المياه شديدة التلوث

التناضح الأممي هو عملية معالجة تتكون من خطوتين لتحلية المياه. في الخطوة الأولى، يمتص المحلول المصمم عالي التركيز الماء تناضحياً من تيار التغذية المالحة عبر غشاء شبه نفاذ بينما يتم في المرحلة الثانية فصل المياه العذبة عن التيار ذات التركيز المنخفض. تعتمد المرحلة الثانية على الفصل الحراري في أغلب الأحيان وتستخدم إنتاج الماء العذب وإعادة توليد عامل السحب لإعادة تدويره مرة أخرى إلى الخطوة الأولى. تستخدم أغشية التناضح العكسي (RO) كغشاء شبه نفاذ لهذه التقنية، ولكن يعمل الخبراء لإنتاج أغشية خاصة بالتناضح الأممي تكون أكثر فعالية. هناك العديد من الدراسات التي تناولت فعالية تقنية التناضح الأممي في تحلية المياه عالية الملوحة، والمياه متوسطة الملوحة والمياه عالية التلوث. تستخدم تقنية التناضح الأممي ضغط هيدروليكي منخفض (قريب من ضغط البيئة المحيطة) ولا يعتمد

على تركيز مياه التغذية على عكس أغشية التناضح العكسي، التي تحتاج لضغط عال يتناسب مع ملوحة مياه التغذية. وقد ثبت أن ضغط العمل المنخفض هذا يقلل بشكل كبير من الآثار السلبية للتراكبات على أغشية التناضح الأممي. تكون التراكبات في الغالب قابلة للإزالة ويمكن التخلص منها باستخدام عمليات تنظيف بسيطة نسبياً. وبناءً على ذلك، يُظهر نظام التحلية الأممي نتائج واعدة في معالجة واحدة من القضايا الرئيسية التي تواجه التقنيات القائمة على الأغشية لتحلية المياه شديدة التلوث ولتحقيق استرجاع كميات كبيرة من المياه [10].

تحلية المياه بالطاقة الشمسية

● تحلية المياه بالطاقة الشمسية المباشرة

تعتبر المقطرات الشمسية من بين أقدم أنواع التحلية الشمسية وأكثرها بساطة. يتم تبخير المياه المالحة مباشرة بواسطة الطاقة الشمسية في جهاز شمسي ثم تتكثف على شكل ماء مقطر ولذلك فإن إنتاجية التبخر بسيطة وأقل من المستويات المطلوبة للمياه العذبة المحلاة (بكفاءة 30-45٪ وإنتاجية المياه العذبة 5 لتر لكل متر مربع في اليوم). خلال العقود القليلة الماضية، تم دمج المقطرات الشمسية مع عمليات وتقنيات أخرى بما في ذلك السخانات والعاكسات والمكثفات لتحسين كفاءة تحلية المياه [11,12]. هناك نوعان من المقطرات الشمسية بناءً على تأثيرها: التأثير الفردي (التقطير الشمسي أحادي المنحدر) والمقطرات الشمسية متعددة التأثيرات. يبلغ معدل كفاءة التقطير الشمسي أحادي المنحدر 30-40٪. من ناحية أخرى، تعد المقطرات الشمسية متعددة التأثيرات أكثر كفاءة من مجموعة التأثير الفردي ولكنها أشد اعتماداً على الحرارة الكامنة للتكثيف [12].

● تحلية المياه بالطاقة الشمسية غير المباشرة

تُستخدم التقنيات الحرارية وغير الحرارية بشكل شائع في تحلية المياه بالطاقة الشمسية غير المباشرة. ولكن ينصب التركيز الأساسي على التناضح العكسي. حيث يعد فهم استخدام الطاقة في محطات التناضح العكسي أمراً حيوياً لمعرفة الطريقة الأمثل لاستخدام الطاقة الشمسية لتشغيلها. على الرغم من أن استهلاك الطاقة المحدد لمحطة التناضح العكسي تتضمن اسهام مرافق نظام التغذية والمعالجة قبل وبعد التحلية، والتخلص من المحلول الملحي، فإن نظام تحلية الأغشية يمثل 60-80٪ من استهلاك الطاقة. وفقاً لـ Bhambare et al [13]، تتلقى جميع محافظات سلطنة عمان متوسط إجمالي يومي للإشعاع الأفقي العالمي بين 6 و6.75 كيلو واط للمتر المربع مع مؤشر وضوح سماء عالي والأمر مشابه في معظم الدول العربية. نتيجة لذلك، يعتبر الوطن العربي من أفضل الوجهات لتطبيقات الطاقة الشمسية. ومع ذلك، فإن كامل إمكانات الطاقة الشمسية لم تتحقق بالكامل بعد. في 27 يوليو 2022، أعلنت كل من شركة TotalEnergies و Veolia عن اتفاقية لبناء أكبر محطة للطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) لتوفير الطاقة لنظام تحلية المياه بالتناضح العكسي في مدينة صور في سلطنة عمان. سيكون نظام الزنورة 17 ميغاواط أول نظام يتم تركيبه في المنطقة وستنتج أكثر من ثلث الاستهلاك اليومي لمحطة التحلية، باستخدام أكثر من 30 ألف ميغاوات ساعة من الكهرباء سنوياً [14،15].

● تقنية التحلية بنظام إزالة الأيونات بالسعة الكهربائية لتحلية المياه قليلة الملوحة

نظراً لوجود مياه قليلة الملوحة أكثر من المياه العذبة في الأرض، فمن الواضح أن استخدام موارد المياه قليلة الملوحة للاستهلاك البشري وللإستخدام السكني والزراعة والصناعة أمر جذاب بشكل خاص. برز نزع الأيونات بالسعة الكهربائية (CDI) مؤخراً كتقنية موثوقة وفعالة من حيث استهلاك الطاقة وقيمة تكلفة التحلية للمياه بتركيز ملح منخفض إلى متوسط. ترتبط كفاءة الطاقة لـ CDI للمياه التي تحتوي على تركيز ملح أقل من 10 جم / لتر [16]. تعتمد هذه التقنية على قدرة الأقطاب الكهربائية ذات مساحة السطح العالية على امتصاص المكونات الأيونية من الماء، مما يؤدي إلى تحلية المياه [17].

1.3. تقنيات التحلية الرئيسية: الميزات ونقاط الضعف

على الرغم من الملاءمة العالية للعمليات الحرارية لتحلية مياه البحر في البلدان ذات أسعار الوقود الأحفوري المنخفضة (الوطن العربي)، يوصى باستخدام التقنيات القائمة على الأغشية للتحلية في البلدان التي تشكل فيها أسعار الطاقة مصدر قلق كبير [18]. بالإضافة إلى ذلك، توفر تقنيات التحلية الغشائية حلاً أكثر شمولاً وتسمح بمعالجات تتناول كلاً من تأثير الملوحة وخصوصية سمات الملوثات الفردية. انخفضت تكلفة تقنيات الأغشية في السنوات الأخيرة، بينما اتسعت قابليتها للتطبيق في إجراءات معالجة وتحلية المياه المتنوعة. عند مقارنتها بالتقنيات الحرارية، تتميز العمليات الغشائية بكونها قابلة للتكيف، مع عمليات مساعدة مختلفة، في معالجة مياه الصرف واستعادة الموارد دون التأثير بشكل كبير على جودة المياه المنتجة أو متطلبات المساحة [19]. بالنسبة للمياه شديدة الملوحة، فإن التقطير بالأغشية لا يتأثر بالترسبات عند مقارنته بالتناضح العكسي، بسبب عمله على ضغط هيدروليكي منخفض [10].

أنظمة التحلية الرئيسية المستخدمة صناعياً هي التناضح العكسي والتقطير متعدد التأثيرات، والتقطير الومضي متعدد المراحل. أظهرت دراسة استدامة حديثة أجريت لمحطات تحلية مياه البحر في دولة الإمارات العربية المتحدة تفوق تحلية المياه بالتناضح العكسي مقارنة بمحطات التحلية الحرارية. طور الباحثون في هذه الدراسة نظام الاستدامة وقارنوها بنتيجة الاستدامة التي طورها اليونسكو. أظهر كلا النظامين استدامة أعلى للتناضح العكسي. خلصت الدراسة إلى أنه على الرغم من أن تقنيات التحلية الحرارية لديها استدامة أعلى من التناضح العكسي في النواحي الاجتماعية والتقنية والاقتصادية، إلا أن أداءها أقل بسبب النواحي البيئية [20]. العوامل التي تم دراستها:

- العوامل البيئية والتي تشمل استخراج مياه البحر، وتأثير المياه المالحة المرتجعة، وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، والآثار البيئية الأخرى، مساحة الأراضي المستخدمة
- العوامل التقنية الاقتصادية والتي تشمل موثوقية ومتانة التكنولوجيا التقنية الاقتصادية، وجودة المياه المنتجة، والتكتلات والتكلس، والتكلفة المعادلة لإنتاج المياه، وحساسية التكلفة المعادلة لإنتاج المياه، ومعدل العائد الداخلي.
- العوامل الاجتماعية والتي تشمل المستوى الاجتماعي للقبول الجمالي، ومستوى الضوضاء، وتوفير فرص العمل، والسلامة التكنولوجية، ومعدل استهلاك الوقود الأحفوري.

من بين تقنيات تحلية المياه الثلاثة الرائدة، يعتبر التناضح العكسي هو الأكثر استخداماً. المزايا الرئيسية للتناضح العكسي هي:

- يتكيف بسهولة مع الظروف المتغيرة.
- قدرة إنتاجية مرنة
- توفير كبير في التكلفة في تحلية المياه الجوفية قليلة الملوحة
- معياري ويشغل مساحة أقل.

ومع ذلك، يتطلب التناضح العكسي معالجة مسبقة واسعة النطاق. حيث إنه يواجه مشكلة تلوث الأغشية بسبب تكوينه المعقد كما أنه يحتاج إلى خصائص أكفاء للتشغيل والصيانة.

2. تحلية المياه في الوطن العربي

2.1. اتجاهات الطلب على المياه في العالم العربي

في المناطق ذات المناخ القاحل وشبه القاحل، من المتوقع أن تتضاءل الموارد المائية المتاحة مما يتسبب في مشاكل ندرة المياه في جميع أنحاء العالم في المستقبل القريب. مع اشتداد ندرة المياه وزيادة الطلب على الغذاء، هناك طلب متزايد على الري في العديد من المناطق. أصبح من الضروري استكشاف خيارات إمدادات مياه بديلة. يتنافس الطلب المتزايد على استخدام المياه للأغراض المنزلية والصناعية مع التوسع في الزراعة المروية في المناطق التي تعاني من ندرة المياه، مما قد يؤدي إلى صراعات بين المستخدمين، وتخصيص المياه للقطاعات ذات الأولوية العالية على حساب الزراعة. شكل 3 يوضح نسب استهلاك المياه لكل قطاع.

يمكن تنفيذ العديد من الاستراتيجيات لتعزيز توافر موارد المياه للري، بما في ذلك تحديث البنية التحتية، وأنظمة الري الذكية، وعمليات نقل المياه الإقليمية. ومع ذلك، من غير المحتمل أن تؤدي أي من هذه الاستراتيجيات إلى زيادة موارد المياه التقليدية وإنما ستمكن فقط على تحسين استخدام المياه. الطريقة الوحيدة لزيادة إمدادات المياه بما يتجاوز ما هو متاح من الدورة الهيدرولوجية هي استخدام موارد المياه غير التقليدية (تحلية المياه وإعادة التدوير). قد تكون إعادة تدوير المياه العذبة وتحلية المياه الجوفية قليلة الملوحة محدودة بسبب إنتاج المياه العادمة المنزلية واستنفاد الخزان الجوفي، ولكن تحلية مياه البحر هي وسيلة ضرورية لمعالجة مشكلة ندرة المياه العالمية، مما يوفر مصدرًا موثوقًا للمياه من أجل الإنتاج الزراعي المستدام [21].

بالمقارنة مع موارد المياه التقليدية، تمثل مياه البحر المحلاة مصدرًا وفيرًا وثابتًا للمياه دون التأثير سلبًا على النظم البيئية المائية الداخلية والخزانات الجوفية. في المناطق الساحلية القاحلة حيث لا توجد بدائل واضحة للمياه، وفرت مياه البحر المحلاة عائدًا مرتفعًا للزراعة بسبب هذه الخصائص الجوهرية. شهدت السنوات الأخيرة زيادة كبيرة في تحلية المياه قليلة الملوحة لأغراض الزراعة حيث إن تكلفتها عادة ما تكون أقل من نصف تكلفة تحلية مياه البحر. كانت مياه البحر المحلاة مكلفة للغاية بحيث لا يمكن أخذها بالاعتبار لري المحاصيل، ولكنها تعتبر الآن خيارًا قابلًا للتطبيق في بعض المناطق. تعمل بعض الدول مثل الولايات المتحدة (فلوريدا وكاليفورنيا) وإسبانيا، حاليًا على تقييم أو التخطيط لتطبيق مياه البحر المحلاة في الزراعة [21, 22].

على الرغم من استخدام المياه المحلاة بشكل أساسي لزيادة المصادر التقليدية الأخرى لري المحاصيل، إلا أن الري المباشر يمارس أيضًا. في المستقبل القريب، من المتوقع أن تصبح مياه البحر المحلاة مصدرًا بديلاً أكثر أهمية للزراعة. كانت مياه البحر المحلاة في البداية مجرد حل للاحتياجات المنزلية والصناعية. ولكن مع تحسن تقنيات تحلية المياه وانخفاض تكاليف تحلية مياه البحر من المتوقع أن يمتد تطبيقها إلى قطاع الزراعة [21]. قبل عقدين من الزمن، اختبرت مصر قابلية تطبيق تحلية مياه البحر للري باستخدام محطات تحلية المياه التي أنتجت حوالي مليار متر مكعب [23]. خلص التحليل الاقتصادي إلى أن ري المحاصيل الموسعة مثل القمح والذرة والأرز بالمياه المحلاة غير فعال اقتصاديًا. يوضح الجدول 1 محطات التحلية المختبرة وتكاليف تركيبها وإنتاجها. يتضح من الجدول أن تحلية مياه البحر لم تكن فعالة من حيث التكلفة لزراعة المحاصيل الحقلية. ومع ذلك، قد تكون زراعة الخضروات والفواكه عالية القيمة مجدية من حيث التكلفة. كذلك لم تشمل هذه التجربة استخدام تقنية التناضح العكسي التي أصبحت فيما بعد أكثر جدوى من التقنيات الأخرى.

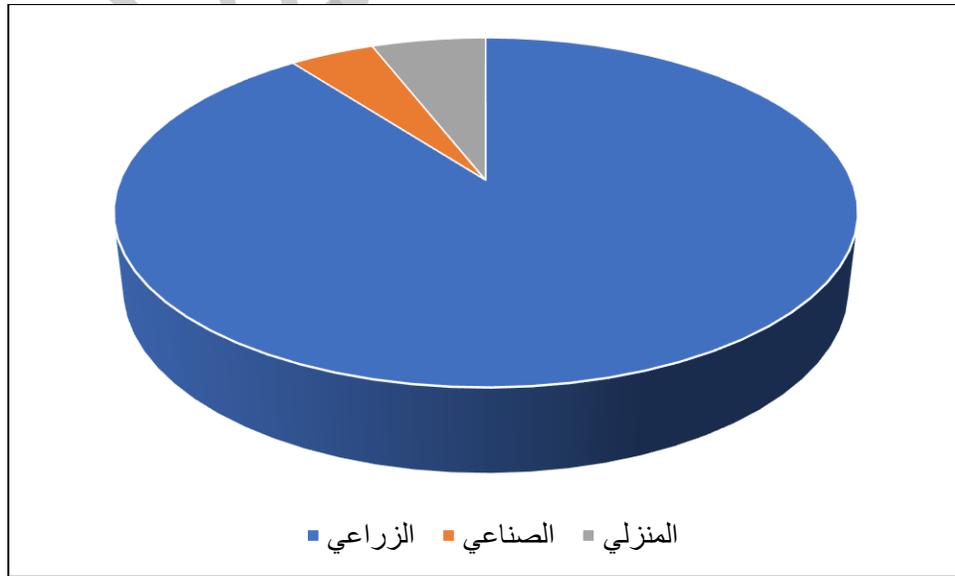
الجدول 1: أنواع محطات التحلية وتكاليف تركيبها وإنتاجها.

أنواع محطة التحلية	تكلفة التركيب (US \$/m ³)	تكلفة إنتاج المياه (US \$/m ³)
التقطير الومضي متعدد المراحل	1200-1500	1.10-1.25
التقطير متعدد التأثيرات	900-1000	0.75-0.85

خلص خبراء في دراسة حديثة إلى أن تحلية المياه للمحاصيل ذات العائد المرتفع أصبحت مجدية اقتصاديًا، على الرغم من أن تكلفة التحلية لا تزال باهظة بالنسبة لمعظم الزراعة المروية. مع ذلك يجب مراعات العديد من العوامل عند التخطيط لاستخدام مياه البحر المحلاة لري المحاصيل. تعد الجودة الزراعية للمياه قضية حاسمة بالنسبة للري بمياه البحر المحلاة. عادة ما تنتج أغشية التناضح العكسي ماءً بمحتوى أملاح مذابة بتركيز أقل من 250 مجم / لتر، ودرجة حموضة حمضية، وعسرة مياه منخفضة للغاية. هذه الخصائص غير مناسبة لاستخدام المياه للأغراض المنزلية أو الصناعية أو الزراعية وقد يؤدي استخدامها كذلك لتلف نظام التوزيع. لذلك، من الضروري معالجة الماء المحلى بعد التحلية لإعادة المعادن والتوازن الأيوني قبل التوزيع. ولذلك يعتمد التركيب الكيميائي لمياه البحر المحلاة بشكل كبير على نوع المعالجة اللاحقة التي تلقتها. لا توجد لوائح رسمية عالمية تحدد جودة مياه البحر المحلاة التي يمكن إطلاقها في نظام التوزيع، ولكن يجب أن تتوافق مياه البحر المحلاة مع اللوائح الوطنية الخاصة بمياه الشرب، والتي تختلف بشكل كبير عن الخصائص المطلوبة للري. لم يتم وضع معايير محددة لنوعية المياه لمياه البحر المحلاة المخصصة للاستخدام الزراعي، على عكس معالجة مياه الصرف الصحي للري والتي تخضع لقواعد محددة في معظم البلدان المتقدمة [21, 24].

تغطي مجموعة واسعة من اللوائح معايير الجودة لمياه الري. هناك عشرة معايير للجودة متضمنة في مجموعة المعايير للجمع بين الاستخدام الزراعي والمنزلي لمياه البحر المحلاة. المعايير هي: الرقم الهيدروجيني، والتوصيل الكهربائي، ومستويات الكلور، واليوديوم، والبورون، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والكبريتات، وإمكانية ترسيب كربونات الكالسيوم. لذلك من الضروري تحديد بعض معايير جودة الري المماثلة من أجل تحديد جودة مياه البحر المحلاة الذي يلي متطلبات ري المحاصيل على أفضل وجه. هناك تباين كبير في الآثار الزراعية لاستخدام مياه البحر المحلاة في الزراعة بسبب جودة مياه الري التي يتم استبدالها بمياه البحر المحلاة، فضلاً عن تكلفة مياه البحر المحلاة نفسها. من خلال استبدال مياه الري منخفضة الجودة بمياه البحر المحلاة التي تتميز بموصلية كهربائية منخفضة والتي تقلل من إجهاد الملوحة، يمكن زيادة غلة المحاصيل وتحسين جودتها. نتيجة لذلك، يمكن تقليل متطلبات الري بشكل كبير حيث يمكن دعم ملوحة المياه باستخدام مياه الري التكميلية [21].

تستخدم المياه السطحية والجوفية للري في المنطقة العربية. ثمانون في المئة من الطلب على المياه يأتي من القطاع الزراعي. يجب تقييم متطلبات وكمية المياه المستخدمة للري لتحديد مدى ضغط الري على الموارد المائية المتاحة. من المتوقع أن يزداد استهلاك المياه الصناعية والمنزلية والزراعية بشكل كبير في العقدين المقبلين. ولكن ستظل الزراعة أكبر قطاع مستهلك للمياه كما هو موضح بالشكل 3، ولكن الطلب غير الزراعي سينمو بوتيرة أسرع من الطلب الزراعي خلال السنوات القليلة القادمة.



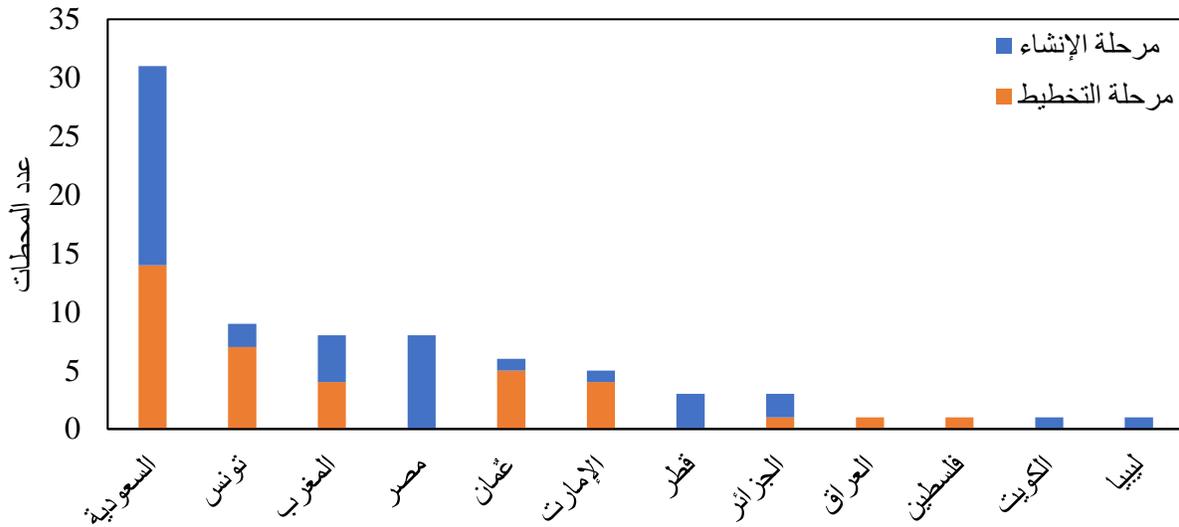
الشكل 3. استهلاك المياه لكل قطاع في الوطن العربي

2.2. مصادر المياه غير التقليدية

وفقاً للعديد من المنظمات الدولية مثل الرابطة الدولية لتحلية المياه (IDA) والتحالف العالمي لتحلية المياه النظيفة (GCWDA)، يمكن لمصادر المياه غير التقليدية توفير مياه شرب عالية الجودة للاستخدامات المنزلية والصناعية والزراعية، وبالتالي حل مشكلة ندرة المياه وتعزيز النمو الاقتصادي. المصادر الأكثر شيوعاً لمصادر المياه غير التقليدية هي مياه البحر المحلاة أو المياه قليلة الملوحة والمياه الرمادية ومياه الصرف الصحي المنزلية والصناعية المعالجة [25]. توفر المياه قليلة الملوحة كمصدر غير تقليدي للمياه إمكانية تحلية المياه اقتصادياً.

2.3. الاعتماد على تحلية المياه في الوطن العربي

ليس هناك شك في أن المنطقة العربية، إحدى أكثر مناطق العالم ندرة في المياه، حيث لديها أدنى مستويات توافر المياه للفرد الواحد. لذلك تعتمد المنطقة العربية بشكل كبير على تحلية المياه، خاصة للاستخدام المنزلي. تستهلك المنطقة العربية حالياً تسعين بالمائة من الطاقة الحرارية المستخدمة في تحلية المياه في جميع أنحاء العالم، مع كون الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية من أبرز المستهلكين [26]. من المتوقع أن تنمو تحلية المياه في المنطقة العربية بمعدل 7-9٪ سنوياً. يوجد في المنطقة العربية حالياً 78 مشروعاً لتحلية المياه قيد التشغيل أو المخطط لها بين عامي 2020 و 2030، كما هو موضح في الشكل 4 (المصدر: (GWI DesalData / IDA).



الشكل 5: توزيع مشاريع تحلية المياه في الوطن العربي (2020-2030) ، المصدر (GWI DesalData / IDA)

بسبب الطفرة الاقتصادية بالخليج العربي، تتركز سعة تحلية مياه البحر الجديدة في عدد قليل من المشاريع الكبيرة كما هو مبين من قبل GWI Worldwide Desalting Inventory. هناك خمسة مشاريع تمثل أكثر من 40٪ من إجمالي الإنتاج اليومي في المنطقة العربية في المملكة العربية السعودية: - الجبيل 2 (استبدال محطة SWRO) ومشروع تحويل الشعبية 3 (شيد في 2022)، الجبيل 3 بنظام IWP (شيد في 2021) والجبيل IWP 3a والشعبية 5 (SWCC) (شيدت في عام 2020). من المقرر أن تضيف محطة رابع IWP 4 600 ألف متر مكعب في اليوم في عام 2022. بالإضافة إلى مشروع حسيان، المرفأ IWP 2، نيوم،

رايع 4 IWP، الجبل 3 ب، الغبرة 3، مصيرة IWA، والجافورة المخطط لها في عام 2022. تم منح محطات تحلية بقدرة استيعابية كبيرة في المغرب ومصر والجزائر وتونس في الفترة من 2020-2022. تم منح توسعة قياسية في السعة الجديدة في عام 2022 في بقية العالم العربي، بإجمالي 1.16 مليون متر مكعب في اليوم. يشهد الخليج العربي حقبة جديدة من المياه المحلاة الرخيصة بمعدل يقل عن 0.50 دولار للمتر المكعب بسبب هذا الرقم القياسي الجديد للتوسعة. كان انخفاض أسعار المياه المحلاة مدفوعاً بمعدلات الاسترداد المرتفعة والأحجام الاقتصادية والطاقة الرخيصة، وخاصة الطاقة المتجددة. ولكن مع تقلص الهوامش يصبح تحقيق المزيد من التخفيضات في التكاليف أكثر صعوبة [27].

2.4. الاستخدام القطاعي لمياه التحلية في الوطن العربي

يجري التخطيط والعمل على إنشاء 21 محطة تحلية في المنطقة العربية خلال الفترة 2020-2030 لتلبية المتطلبات الصناعية في المنطقة. باستخدام تقنية التناضح العكسي، سيتم استخدام هذه المحطات في تلبية مختلف المتطلبات، مثل الأغذية والمشروبات، والمعادن، والتعدين، والنفط والغاز، والطاقة، وصناعة الورق والمنسوجات، ومحطات الطاقة. تتواجد معظم هذه المحطات في المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة. حيث سيكون مصدر المياه إما المياه قليلة الملوحة أو مياه البحر. وتتراوح السعة الإنتاجية لهذه المحطات بين 50 و500000 متر مكعب في اليوم. تمتلك محطة نيوم لتحلية المياه أعلى سعة بين هذه المحطات. حيث أن هذه المحطة تعتمد على تقنية التناضح العكسي وتعمل بالطاقة المتجددة من شبكة نيوم وستولد ما يقدر بنحو 500000 متر مكعب في اليوم من المياه العذبة. إضافة إلى محطة (مشروع BW-0126) لتحلية المياه الجوفية بنظام التناضح العكسي (BWRO) ذات السعة الأقل. تقع كلا المحطتين في المملكة العربية السعودية (GWI / desaldata).

كما تم التخطيط لخمس وخمسين محطة تحلية في المنطقة العربية (2020-2030) للاستهلاك المنزلي. توجد هذه المحطات في فلسطين وتونس وسلطنة عمان والمغرب والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة والجزائر ومصر وقطر وليبيا. تتراوح السعة الإنتاجية لهذه المحطات ما بين 200 - 1,000,000 متر مكعب في اليوم، معظمها في المملكة العربية السعودية. حيث يعتبر مشروع البصرة (العراق) ومحطة تحلية الجبل 2 (المملكة العربية السعودية) الأعلى من ناحية سعة الإنتاجية. ستساهم جميع مشاريع تحلية المياه على تزويد المنازل بمياه الشرب حيث تتراوح نسبة المواد الصلبة الذائبة بين 10 جزء في المليون - >1000 جزء في المليون. في المقابل، تم التخطيط لمشروع واحد فقط لأغراض الري. تم إنشاء مشروع المرفأ 2 في دولة الإمارات العربية المتحدة في عام 2021، ومن المتوقع أن يتم تشغيله في عام 2024. وهو عبارة عن محطة لتحلية المياه بالتناضح العكسي وتبلغ سعته 363,680 متر مكعب في اليوم (GWI / desaldata). علاوة على ذلك، تم إنشاء محطة تحلية أعادير في عام 2018 في اشتوكة في المغرب، مع توقيع العقد بموجب الشراكة الخاصة العامة (PPP). اكتمل العمل في هذه المنشأة بنسبة 98.5٪. تهدف المحطة إلى إنتاج مياه للشرب والزراعة بسعة إنتاجية إجمالية تبلغ 275 ألف متر مكعب في اليوم. حيث ستوفر المحطة 150 ألف متر مكعب من المياه يوميًا على الأقل للمدينة والأراضي المحيطة بها. علاوة على ذلك، هناك إمكانية لزيادة السعة إلى 450,000 متر مكعب في اليوم. بالإضافة إلى تلبية احتياجات المياه المنزلية في منطقة أعادير، فإن هذا المشروع الواسع النطاق صديق للبيئة ويتم تشغيله بواسطة طاقة الرياح.

3. أبعاد تحلية المياه في المنطقة العربية

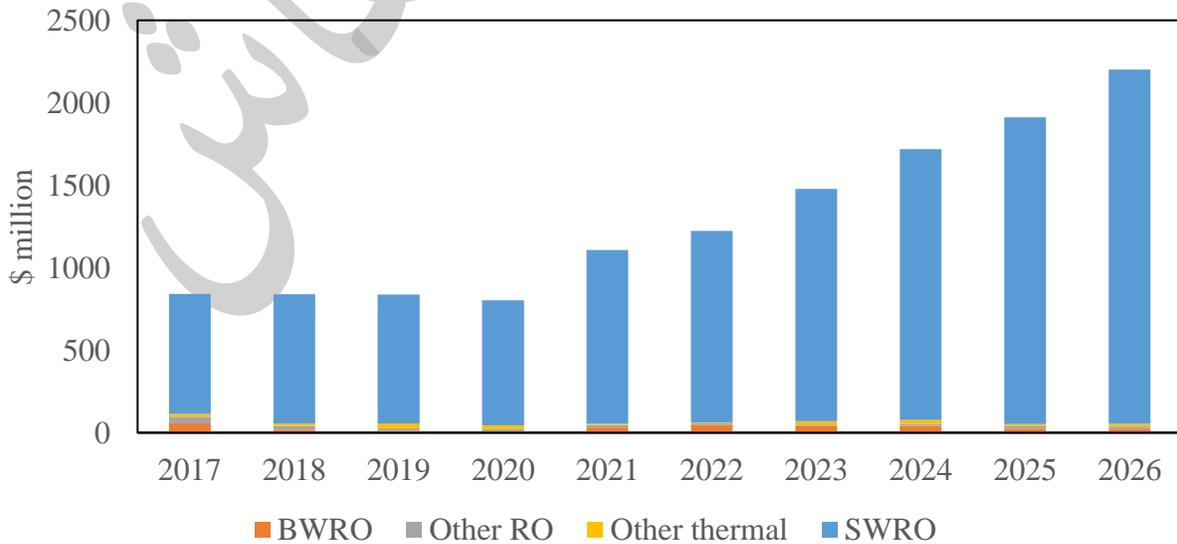
يتم تصميم محطات تحلية المياه بطرق واحتياجات مختلفة، مع مراعاة الأبعاد البيئية، ومراعاة الاستدامة واستخدام الطاقة. حيث تشير الإحصائيات إلى أنه في السنوات القادمة سيكون هناك زيادة بنسبة 15٪ في الطلب على المياه المحلاة كل عام [28]. والذي سيؤدي إلى زيادة أعدادها وأنواعها واستخدامها لمصادر الطاقة المختلفة والأبعاد البيئية.

3.1. الأبعاد القانونية والسياسية

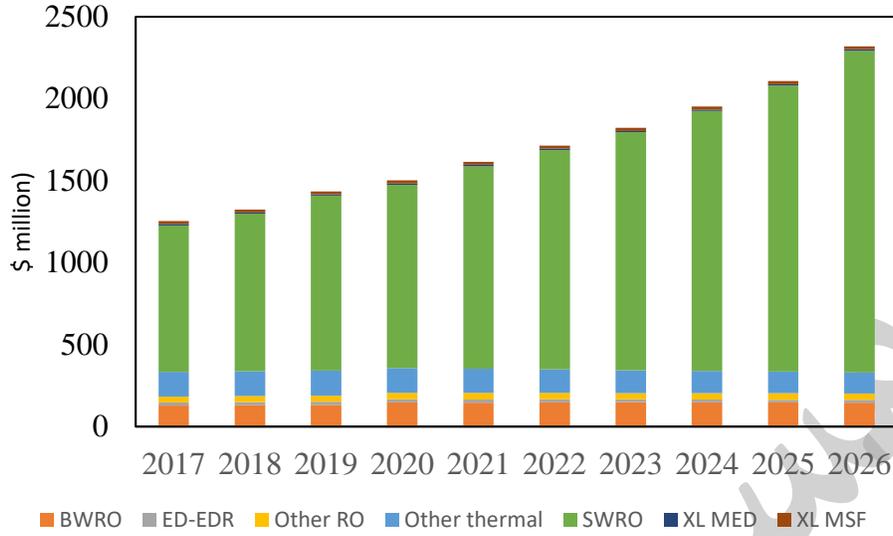
هناك توجهمان رئيسيان في تنظيم محطات تحلية المياه في المنطقة العربية. التوجه الأول هو التشجيع على مشاركة الحكومة في تصميم وتشغيل محطات تحلية المياه. أما التوجه الثاني فيعتمد على دعم مشاريع تحلية المياه ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة والصديق للبيئة. يمكن للحكومات دعم هذه المشاريع من خلال منح عقود إدارة ميسرة لتزويد السكان بالمياه. قد تدعم هيئات المياه الوطنية مشاريع تحلية المياه، ولكن بعد تحليل تأثيرها على الاستدامة في كل مرحلة من مراحل عملية التحلية. يحمي القانون حقوق المياه الخاصة، لكن لا يتمتع القطاع العام والخاص بحقوق قانونية متساوية فيما يتعلق بتطوير واستخدام المياه. هناك ثلاث طرق لتحقيق الاستدامة: اقتصادياً واجتماعياً وبيئياً. قد تتأثر جودة المياه والهواء ومساحة المحيطات وخزانات المياه الجوفية وعوامل أخرى سلباً بمرافق محطات تحلية المياه. عادة ما يتم النظر في العواقب البيئية لهذه المرافق على المستوى الوطني، وتختلف متطلبات قبولها وتخفيفها حسب السياق [29]. توصي منظمة الصحة العالمية (WHO) بتنفيذ برامج مراقبة ما بعد التثبيت لرصد تأثير محطات تحلية المياه على الاستدامة.

3.2. الأبعاد الاقتصادية

على الصعيد العالمي، أصبح التناضح العكسي أكثر شيوعاً من التحلية الحرارية. ترجع شعبية التناضح العكسي إلى العديد من العوامل أهمها استهلاك الطاقة، والآثار البيئية، والتكاليف المرتبطة بإجمالي الإنفاق الرأسمالي (Capex) وإجمالي النفقات التشغيلية (Opex). بلغ إجمالي نفقات محطات التحلية في العالم العربي في عام 2021 تقريباً 6,818 مليون دولار، في حين بلغت النفقات التشغيلية 11,002 مليون دولار. بحلول آب (أغسطس) 2022، ارتفعت النفقات الرأسمالية إلى 8,162 مليون دولار، في حين بلغت النفقات التشغيلية 11,434 (GWI / desaldata)، كما هو موضح في الشكلين 5 و6. في عام 2020، وعلى الرغم من وجود جائحة كورونا (COVID-19)، ظل سوق تحلية المياه ثابتاً، حيث بلغت نسبة 44٪ من السعة الجديدة. على الرغم من انخفاض إجمالي سعة تعاقدات التحلية من 6.7 مليون متر مكعب في اليوم في عام 2019 إلى 4.7 مليون متر مكعب في اليوم في عام 2020، إلا أنها لا تزال رابع أعلى سعة سنوية في التاريخ. على الرغم من أن خط الأنابيب قد شهد تأخيرات متتالية، فمن المتوقع أن يشهد عام 2022 انتعاشاً كبيراً في سوق التحلية.

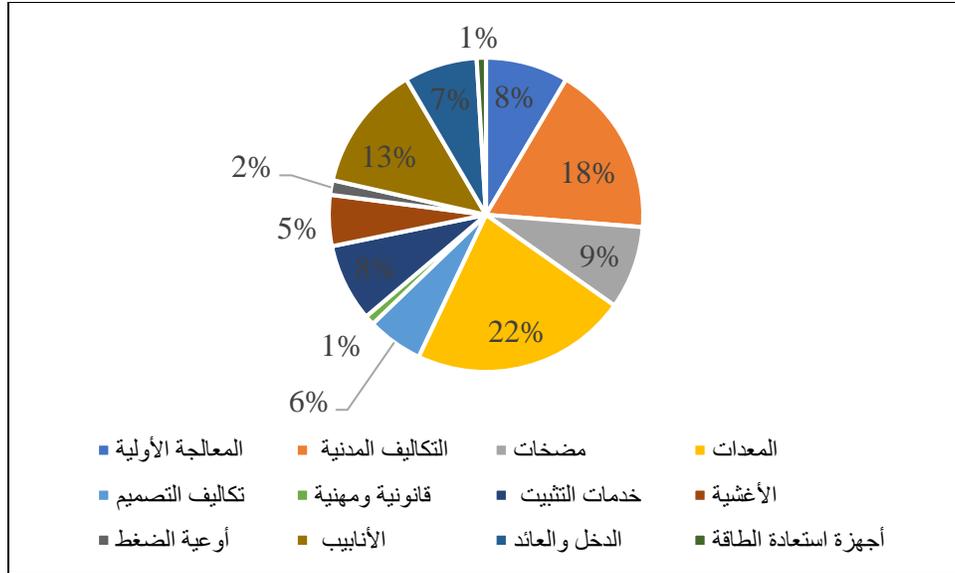


الشكل 5: الإنفاق الرأسمالي لمحطات تحلية المياه في الوطن العربي (2017-2026)

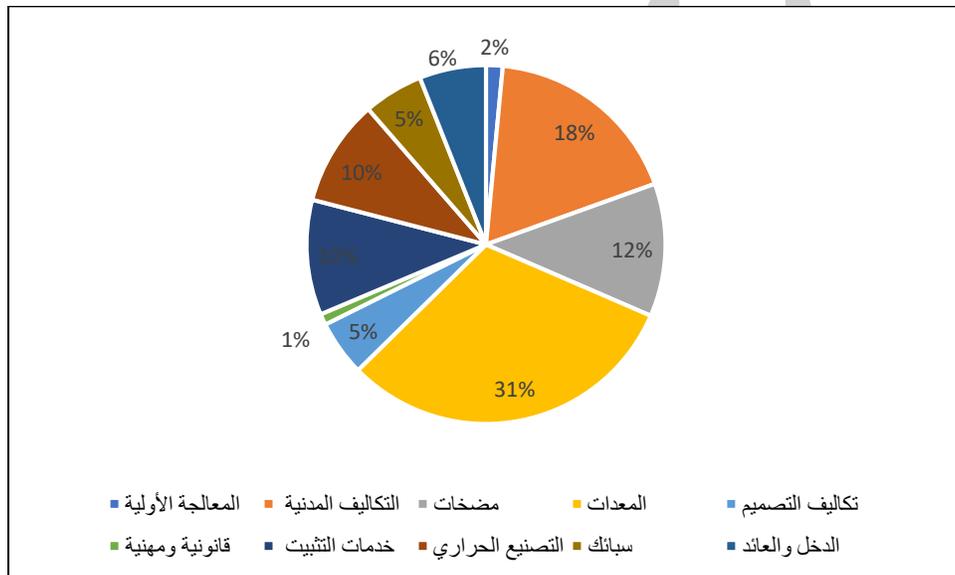


الشكل 6. توزيع الإنفاق التشغيلي لمحطات تحلية المياه في المنطقة العربية (2017-2026)

هناك فئتان رئيسيتان من النفقات الرأسمالية: مباشر وغير مباشر. عادةً ما يتم تخصيص 50٪ إلى 85٪ من إجمالي النفقات الرأسمالية للتكاليف المباشرة، والتي تشمل المعدات والمباني وخطوط الأنابيب وتطوير الموقع. تشمل التكاليف غير المباشرة الفوائد والرسوم المالية، والنفقات الهندسية والقانونية والإدارية والطوارئ. بالنسبة لمعظم محطات التحلية، يتم تقسيم تكاليف ومكونات النفقات الرأسمالية إلى تسعة أجزاء: استخدام ونقل المياه الخام، المعالجة الأولية، تحلية المياه، المعالجة بعد التحلية، ضخ وتخزين المياه المنتجة، والنظام الكهربائي والأجهزة، والمباني، والموقع والأعمال المدنية للمحطة، وتصريف المياه المالحة وموقعها من المحطة، ونوع مصافي السحب وهيكل السحب، ونوع أنابيب السحب (مدفونة أو فوق الأرض). تمتلك Global Water Intelligence أداة "تقدير التكلفة". بناءً على هذا التقدير، يبلغ إجمالي توزيع النفقات الرأسمالية 169,684,000 دولاراً أمريكياً لمحطة تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي و344,796,000 دولاراً أمريكياً لمحطة تحلية مياه البحر بالتقطير الوميض. يقدم الشكلان 7 و8 تفصيلاً كاملاً للنفقات الرأسمالية. في الوقت نفسه، يبلغ توزيع النفقات التشغيلية 24,794,000 دولاراً أمريكياً لمحطات تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي و37,431,000 دولاراً أمريكياً لمحطة تحلية مياه البحر بالتقطير الوميض. تكاليف المعالجة المسبقة لمحطات التناضح العكسي تبلغ (GWI / desaldata) \$14,423,000.



الشكل 7. تكلفة تحلية المياه بالتناضح العكسي التقليدي: تحليل الإنفاق الرأسمالي



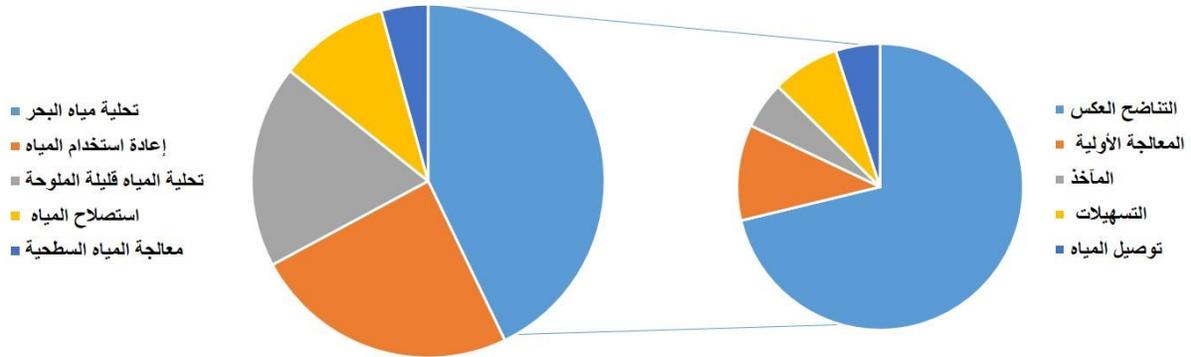
الشكل 8. تكلفة تحلية المياه في محطات التقطير الومضي: تحليل الإنفاق الرأسمالي

تستهلك مضخات السحب، والمعالجة المسبقة، والمصب، ومضخات الضغط العالي المستخدمة في التناضح العكسي كميات كبيرة من الطاقة، مما يجعلها باهظة الثمن. تعتبر الطاقة المستخدمة الأعلى تكليفاً في النفقات التشغيلية لعمليات التحلية الحرارية والغشائية، بنسبة 40-60٪ تقريباً، كما هو موضح في الشكل 9. لا يعتبر نظام التقطير الومضي منافساً اقتصادياً لتحلية المياه مقارنة بالتناضح العكسي بسبب ارتفاع تكاليف رأس المال. ستستمر ابتكارات تقنية تحلية المياه في تقليل تكلفة تحلية المياه بالتناضح العكسي. هناك جهود بحثية جارية لتحلية المياه قليلة الملوحة ومياه البحر، مما سيزيد من تنوع مصادر المياه الصالحة للشرب وتوفرها ويقلل من تكاليف المياه.



الشكل 9. تكلفة تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي وMSF: تحليل الإنفاق التشغيلي

تعتبر كفاءة الطاقة أحد الاعتبارات الرئيسية عند بدء تشغيل محطات جديدة أو تعديل المحطات القديمة. تستخدم المملكة العربية السعودية التي تمتلك 35% من سعة نزع المياه في المنطقة العربية 25 بالمائة من إنتاجها من البترول والغاز لتوليد الكهرباء والمياه [32]. على عكس معالجة المياه بالطرق التقليدية، فإن تحلية المياه باستخدام مياه البحر تستهلك طاقة أكثر من معالجة المياه باستخدام موارد المياه الأخرى. يوضح الشكل 10 استخدام الطاقة لمصادر المياه المختلفة ولحمة عامة عن استخدام الطاقة النموذجية لمحطات تحلية مياه البحر. تستهلك تحلية المياه طاقة عالية جداً مقارنة بمعالجة المياه. إن عملية تحلية مياه البحر في محطة التناضح العكسي للمياه العذبة تستهلك 2.5-4.0 كيلو واط / متر مكعب. يبين نظام التناضح العكسي على استهلاك الطاقة لمحطة التناضح العكسي. ونتيجة لذلك، فإن لها تأثيراً مباشراً على استهلاك الطاقة النوعية المستهلكة. تبلغ نسبة الطاقة النوعية المستهلكة بالمحطة حوالي 1 كيلو وات ساعة / متر مكعب أعلى من نظام التناضح العكسي. إن الطاقة المستهلكة قبل وبعد المعالجة تكون حوالي 0.2 إلى 0.4 كيلو واط / متر مكعب بغض النظر عن ظروف التغذية المائية والعوامل الأخرى، بالإضافة إلى ذلك، يستهلك نظام سحب المياه الداخلة حوالي 0.19 كيلو واط ساعة / متر مكعب وتستهلك المرافق الأخرى حوالي 0.27 كيلو واط ساعة / متر مكعب. كما أن نوعية وكمية المياه المستهدفة تؤثر على الطاقة النوعية المستهلكة [30، 31].



الشكل 10. استهلاك الطاقة في عملية التحلية لمختلف مصادر المياه وتوزيع استهلاك الطاقة لمحطة تحلية مياه البحر

3.2.1. نظام التعرفة

تعد المنطقة العربية من أكثر مناطق العالم شحاً في الموارد المائية. تم تلبية أكثر من 90٪ من جميع الاحتياجات المائية اليومية في المنطقة العربية باستخدام تحلية مياه البحر. تسعى الحكومات في المنطقة بشكل كبير إلى زيادة استثماراتها في محطات تحلية المياه، حيث تنتج 46.7٪ من المياه المحلاة في العالم. تمتلك الكويت والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة بعضاً من أكبر محطات تحلية المياه في العالم [34]. وبناءً على ذلك، استثمرت الدول العربية 20.3 مليار دولار أمريكي في أكبر 10 محطات لتحلية المياه. في عام 2020، منحت الدول العربية عقوداً بقيمة 7.8 مليار دولار أمريكي في مشاريع تحلية المياه. قدرت GWI أن سوق تحلية المياه في المنطقة العربية من المتوقع أن يصل إلى 4.3 مليار دولار بحلول عام 2022. حيث أن النفقات التشغيلية الأساسية المقترضة استخدامها 95٪، بتعريفية 0.08 دولار / كيلواط ساعة، 3.5 كيلو واط ساعة للمتر المكعب لمحطات التناضح العكسي، 1.5 كيلو واط ساعة للمتر المكعب لمحطات التقطير متعدد التأثيرات، و4 كيلو واط ساعة للمتر المكعب لمحطات التقطير الومضي متعدد المراحل.

خلال العامين الماضيين، انخفضت تكلفة إنتاج المياه المحلاة في المنطقة العربية بمقدار النصف تقريباً. يشير انخفاض تكاليف المياه المحلاة إلى أن البلدان الفقيرة يمكنها الآن تحمل تكلفة التحلية. يمكن أن ترتفع تكلفة تحلية المياه من 0.63 دولاراً إلى 1.50 دولاراً لكل متر مكعب يتم تسليمه على حسب الدولة [33]. ساهمت عدة عوامل رئيسية في ذلك، بما في ذلك تعزيز كفاءة الطاقة، وانخفاض أسعار الفائدة - مما يجعل تمويل مشروع تحلية المياه أمراً مرغوباً فيه. تتراوح التعريفية بين 0.5 دولار أمريكي و0.9 دولار أمريكي لكل متر مكعب من المياه المحلاة. اعتباراً من عام 2023، ستفرض شركة كهرباء ومياه دبي رسوماً قدرها 0.306 دولاراً أمريكياً لكل متر مكعب من المياه، وهي أقل تعرفة للمياه في العالم حتى الآن. ومع ذلك، فإن تحلية المياه منخفضة التكلفة تكاليف في المقام الأول تكاليف الطاقة، والتغيرات في دولار للكيلو واط ساعة لها تأثير أكبر من العوامل الأخرى، مثل تكاليف رأس المال.

3.3. الأطر المؤسسية والتنظيمية للاستثمار الخاص

يمكن اعتماد موارد المياه غير التقليدية إذا تمت إعادة النظر في تنظيم خدمات القطاعات ذات الصلة. قد تتمكن الشركات الخاصة من المساعدة في تطوير تحلية المياه والأنشطة التشغيلية وذلك يعتمد على احتياجات المؤسسات. في المملكة العربية السعودية، أنشأت الحكومة مشطري واحد مسؤولاً عن جمع كل المياه من مرافق التحلية وبيعها إلى تاجر الجملة (المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة) أو مباشرة إلى شركات التوزيع. مع ذلك يجب أن يكون هناك تقييم شامل للمخاطر الملازمة لمبادرة التحلية وإعادة الاستخدام قبل إسناد المسؤوليات إلى أحدهم وما إذا كان ينبغي إدارة هذه الخدمات داخلياً أو تفويضها إلى شريك خاص. بالإضافة إلى فحص السجل التاريخي، والتفويضات القانونية، والقدرات التقنية والإدارية، والتمويل، والقوة التعاقدية لمختلف أصحاب المصلحة في القطاع، ينبغي على أصحاب المصلحة المختلفين أن يأخذوا في الاعتبار القوة المالية والتعاقدية [35]. هذا يشمل:

- إنشاء منتدى لأصحاب المصلحة يسهل تبادل المعرفة وأنشطة بناء القدرات ويعطي الأولوية لها
- مساعدة صانعي القرار الرئيسيين في تخطيط مشاريع تحلية المياه
- تقييم إمكانات التحلية مع مراعاة التكاليف الاقتصادية والبيئية والاجتماعية
- المساعدة وتقديم الخبرات حسب الحاجة وتعزيز أفضل الممارسات
- المشاركة في تطوير السياسات الوطنية والإقليمية لتحلية المياه

نتيجة للشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP)، تحسن تقديم خدمات المياه المحلاة في البلدان العربية، لكن القطاع العام لا يزال هو النمط السائد لتقديمها. دخلت العديد من البلدان في شراكات بين القطاعين العام والخاص لإدارة شبكات إمدادات المياه وإنشاء بنية تحتية جديدة لتوفير خدمات المياه والصرف الصحي، بما في ذلك الجزائر ومصر وقطر والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة. إضافة إلى المغرب حيث تم تقديم طلب الشراكة بين القطاعين العام والخاص

في محطة تحلية أغادير، التي تم بناؤها في عام 2018. علاوة على ذلك، سيتم تشغيل المرافق في عمان والدار البيضاء من قبل القطاع الخاص بموجب عقود إدارية. نتيجة للخصخصة والتغييرات في قانون استثمار رأس المال الأجنبي، بذلت سلطنة عمان جهودًا كبيرة لتحسين مناخ الاستثمار الأجنبي وتوسيع مشاركة القطاع الخاص.

3.4. السوق والتداول

زادت الاستثمارات العربية في سوق تحلية المياه بشكل كبير، حيث شكلت 48٪ من مشاريع تحلية المياه العالمية، وفقًا لتقرير سوق تحلية المياه العربية الصادر عن Ventures Onsite، والذي يتتبع مشاريع البناء في المنطقة. من المتوقع أن تعزز الاستثمارات الإضافية السوق إلى 4.3 مليار دولار بحلول عام 2022 [36]. والجدير بالذكر أن المملكة العربية السعودية تمثل حُصص الإنتاج العالمي، فهي تقود العالم في إنتاج المياه المحلاة، وتنتج 4,000,000 متر مكعب في اليوم. على مدى السنوات العشر القادمة، من المتوقع استثمار ما يقدر بـ 80 مليار دولار في مشاريع إضافية. أدى الاستثمار المتزايد في القدرات الجديدة لتحلية المياه إلى بقاء المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة في الريادة بهذا المجال في عام 2022 [36]. تعمل الحكومات العربية ودول مجلس التعاون الخليجي على وجه الخصوص على تسريع استثماراتها في تحلية المياه باستخدام تقنيات مختلفة. نتيجة لاحتياجاتها العالية من الطاقة، تراجعت أعداد محطات التقطير متعدد التأثيرات والتقطير الومضي متعدد المراحل بشكل كبير في العالم العربي بينما اكتسب التناضح العكسي شعبية أكبر.

من ناحية أخرى، قد تكون الهيئات الحكومية والخاصة المتعهد (مشتري المياه) لمحطات تحلية المياه. أو قد يكون المتعهد وكالة حكومية محلية أو شركة معالجة صناعية تحتاج إلى المياه لتزويد عملياتها. يعد تحديد الأسعار والتقلبات بموجب اتفاقية الشراء / شراء المياه أمرًا بالغ الأهمية. في بعض الأحيان، يتم تحديد أسعار المياه من قبل لجان المرافق العامة أو الوكالات الحكومية. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تتناول اتفاقية الشراء (شراء المياه) قبول أي من الأطراف لأي تخفيض مستقبلي في الأسعار بعد توقيع الاتفاقية. فمثلًا يجب على المتعهد المعني بالحطة التي تعمل بالتناضح العكسي تحديدا مراعاة ما إذا كان يفضل التعاقد مباشرة مع مورد الأغشية أو تعاقد مشغل الحطة مباشرة مع المورد. هناك نوعان من العقود: العقود المباشرة والعقود التي توكل المسؤولية على المشغل. التعاقد المباشر هو الخيار الذي قد يفضل فيه الرعاة / المالكون العقود المباشرة على العقود غير المباشرة، لأنها أكثر شفافية وتسمح لهم بالتحكم المباشر في جودة الغشاء وسعره. ومع ذلك، قد لا يرغب الرعاة / المالكون في التعامل مع هذا العقد بشكل مستقل. لنفترض أن المشغل قد تم تكليفه بمسؤولية إمداد الأغشية بموجب اتفاقية تشغيل وصيانة مع مشغل الحطة. في هذه الحالة، تختلف العواقب اعتمادًا على ما إذا كانت الاتفاقية مبنية على أساس السعر الثابت أو على أساس تكلفة المرور. إذا كانت الاتفاقية التشغيل والصيانة سعرًا ثابتًا، فيجب تقييد المشغل من المساومة على جودة الغشاء أو تأخير الاستبدال لتقليل التكاليف. يجب على الراعي / المالك التحكم في التكاليف من خلال عملية إعداد الميزانية، مما يحفز المشغلين على صيانة الأغشية. ومع ذلك، نظرًا لأن المتعاقدين عادة ما يكونون حكومات أو حكومات لديها ضمانات سيادية، فإن أخطار التعاقدات قليلة [37].

3.5. المخاطر الإنشائية والفنية والتشغيلية

هنالك عشرة محطات تحلية في مرحلة البناء حاليًا في الوطن العربي تهدف إلى استخدام مياه البحر وتحتوي على نسبة الملوحة تتراوح بين (20000 جزء في المليون - 50000 جزء في المليون) من إجمالي المواد الصلبة الذائبة، كما هو موضح بالتفصيل في الجدول 2. تستخدم هذه المحطات تقنية التناضح العكسي (RO) المصممة لتزويد المدن بمياه الشرب بجودة مياه منتجة تتراوح بين (10 جزء في المليون - >1000 جزء في المليون)) من إجمالي المواد الصلبة الذائبة.

الجدول 2: محطات تحلية المياه في مرحلة البناء 2022 في العالم العربي

النولة	الموقع	المنطقة	اسم المشروع	السعة (متر ³ /يوم)
عمان	بركاء	الباطنة	IWP 5 بركاء	100000
الجزائر	قورصو الرغاية	بومرداس	قورصو SWRO	1000000
السعودية	الجبيل		جبيل 2	80000
السعودية	شعبية		مشروع تحويل شعبية 3	600000
السعودية			محطة تحلية مؤقتة	21000
السعودية			معادن	6000
السعودية			معادن	6000
السعودية			محطة التناضح العكسي مياه البحر المغورة تحت سطح البحر	50
السعودية			محطة التبلور بالمؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة	58
السعودية			توفير وحدة التناضح العكسي مع التركيب	2000

خلال مرحلة التشييد، هناك احتمال أن تزيد التكاليف خلال فترة التنفيذ بسبب الظروف غير العادية في الموقع، والتأخير في تسليم المعدات وتركيبها، وتجاوز تكاليف البناء، والأخطاء والسهو من قبل المصممين والمقاولين، بالإضافة إلى مخاطر الموثوقية والأداء المرتبطة مع بدء تشغيل المصنع والتكليف والقبول.

فيما يتعلق بالمخاطر التشغيلية والفنية في محطات تحلية المياه، يمكن أن تشكل عمليات التشغيل والصيانة (O&M) العديد من المخاطر على عمر المنشأة أو طول استئثار المتعهد. تعد صيانة المصنع وتشغيله بشكل ثابت وموثوق أمرًا ضروريًا للوفاء بالالتزامات المالية، لذلك تظل تدفقات الإيرادات ثابتة. في حالة عدم وجود خبرة في تشغيل محطات تحلية المياه ذات الحجم المماثل، قد يستفيد صاحب المشروع من التعاقد على تشغيل وإدارة محطة تحلية المياه مع مقاول معين ومتخصص جيد يتمتع بخبرة عالية. بمرور الوقت، تقل أهمية تحديات التشغيل والصيانة والمخاطر المرتبطة بنقص العمالة المحلية الماهرة مع ازدهار سوق تحلية المياه. بالإضافة إلى ذلك، فإن نظام المعالجة المسبقة للمياه لمحطات تحلية مياه البحر يمكن أن يتأثر بسبب ظروف مياه البحر المفاجئة والمتغيرة، وخاصة تكاثر الطحالب الضارة. يمكن اعتبار تركيب أنظمة التطوير بالهواء المذاب (DAF) كحل بديل في مثل هذه الحالات، ولكنه سيكون عبءًا للنقطة الرأسية للمحطة. علاوة على ذلك، فإن تحقيق أعلى إنتاج للأغشية عند أدنى ضغط تشغيل يعد أمرًا مثاليًا. تعمل محطات تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي عادةً بين 50 و70 بار؛ ويؤدي تقليل الضغط عمومًا إلى انخفاض كمية إنتاج الماء. بالإضافة إلى ذلك، تقل نفاذية الغشاء بسبب التراكم البيولوجية والمواد العضوية والأغشية الحيوية وترسبات المواد غير العضوية أثناء التشغيل. كذلك يؤدي إجراء تنظيف الأغشية إلى إيقاف تشغيل المصنع وينتج عنه مخلفات سائلة، مما يزيد من استهلاك الطاقة وتكاليف المياه على مدار عمر المحطة.

3.6. نظم التمويل

تؤثر التكاليف المالية بشكل كبير على تكاليف تحلية المياه لأن مثل هذه المشاريع باهظة الثمن. عادة ما يقدم فيها المطورون رأس المال الخاص، بينما تقدم المؤسسات المالية القروض. يختلف عائد الاستثمار تبعًا لمخاطر المشروع، وأحيانًا يكون الدين أقل تكلفة من نظام الأسهم الخاصة. اعتمادًا على مخاطر البلد، ومخاطر المشروع، ومرونة العميل، يتراوح الاشتراك المالي بينها عادةً بين 70/30 و85/15 سهم / دين.

تؤثر المتغيرات المختلفة على تكاليف إنتاج المياه المحلاة، مما يجعل المقارنات المباشرة بين المشاريع صعبة. في السنوات الأخيرة، أصبحت صناعة تحلية المياه أكثر قدرة على المنافسة بسبب زيادة السيولة وازدهار الأسواق المالية. هناك تفاوت بالأسعار لإنتاج 1 متر مكعب من المياه المحلاة بالتناضح العكسي، بدءاً من 0.60 دولار أمريكي للمتر المكعب لمحطات التحلية الكبيرة بسعة تقريبية (325,000 متر مكعب في اليوم) إلى حوالي 1.25 دولار أمريكي للمتر المكعب للمحطات الصغيرة (10,000 متر مكعب في اليوم).

4. التحديات

4.1. التأثير البيئي

من الضروري فهم أن المحلول المركز المرتجع (المحلول الملحي) هو نتاج تركيز المواد المذابة المنبعثة من نظام التناضح العكسي. يحتوي المحلول الملحي الناتج من محطات التناضح العكسي على جميع مكونات مياه المصدر تقريباً، ولكن بتركيز أعلى. يحتوي أيضاً على المواد الكيميائية المستخدمة أثناء عملية المعالجة المسبقة. وبالتالي فإن تركيز المحلول الملحي يكون حوالي 5-7 مرات أكثر تركيزاً من مياه المصدر. لا يقتصر تأثير مياه البحر على المدخل بالمحطة فقط. فمن الممكن أن يحدث اصطدام، وحبس للكائنات الكبيرة، ويمكن للكائنات الأصغر وحيدة الخلية أن تمر عبر الغرابة الأولية في إمداد المياه مما قد تؤثر على نظام التحلية وتركيز المحلول الملحي المنتج. إضافة إلى أن التفرغ الكيميائي من المحطة بعد مصدر قلق كبير. تخضع مياه المصدر للعديد من المعالجات الكيميائية للتحكم في التكتلات الحيوية، وإزالة المواد الصلبة العالقة، وإزالة مضادات التلوث، والتحكم في الرغوة، والتنظيف. يحدد نوع وكمية المواد الكيميائية المستخدمة في التبريد المسبق وتشكيل وتصميم المآخذ والمنافذ تأثير تحلية المياه على المآخذ والمخلفات [38]. تتسبب تركيبات المكونات المختلفة للمعالجات وضوابط العمليات الخاصة بالمصنع في اختلاف التلوث الكيميائي للمخلفات بين محطات تحلية المياه. علاوة على ذلك، يمكن أن يحدث التلوث الكيميائي للمخلفات بسبب تآكل الأجزاء المعدنية داخل النظام [39].

4.2. تحديات الإنشاء

بالإضافة إلى الدراسات التجريبية والميدانية والنمذجة، هناك أدلة على أن تحلية المياه لها تأثيرات بيولوجية وبيئية محددة تتأثر بالمواقع، ومحطات التحلية نفسها، والمعايير الخاصة بأنواع. يجب مراعاة عوامل معينة في إنشاء محطة تحلية المياه، بما في ذلك المنطقة الساحلية وبيئة قاع البحر، وموائل الطيور والتديبات، والتعرية، والتلوث من مصادر مختلفة. يمكن أن يؤثر إنشاء المحطة على المناطق الحساسة بيئياً بسبب إنشاء البنية التحتية لسحب المياه وشبكة الأنابيب التي تنقل المياه إلى المحطة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يتسبب الخط الساحلي المفتوح في تركيز المحلول الملحي وتراكمه إذا تم تصريفه في المسطحات المائية المحصورة أو المناطق ذات التضاريس الباطميّة (متعددة الأعماق) التي تقلل من انتشاره [39].

4.3. جودة الهواء والبصمة الكربونية

على الرغم من زيادة الاهتمام بتلوث الغلاف الجوي الناجم عن التلوث بالمخاليط الملحية المرتجعة والمواد الكيميائية في المجاري المائية، تم إيلاء القليل من الاهتمام للتأثيرات غير المباشرة لتحلية المياه. يساهم الإنتاج الضخم لمحطات تحلية المياه في منطقة الخليج في رداءة نوعية الهواء في المنطقة. قد تساهم انبعاثات أكسيد النيتروجين، من بين الملوثات الأخرى، في تكوين ضباب دخان كيميائي ضوئي فوق بعض المدن الكبرى [39].

تشير جميع سيناريوهات الانبعاثات التي درسها العلماء إلى أنه سيكون من المستحيل خفض درجات الحرارة العالمية حتى 2 درجة مئوية هذا القرن دون الحد بشكل كبير من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. أحد الآثار العامة للبناء وإيقاف التشغيل المرتبط بالتنمية الساحلية هو إطلاق انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي التي تنتج عن متطلبات الطاقة لمحطات تحلية المياه [40].

بالإضافة إلى كفاءة المحطة، يحدد مصدر الطاقة الذي يشغل محطة تحلية المياه بصمتها الكربونية المباشرة. وجد أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من محطات التناضح العكسي أقل من تقنيات التحلية الحرارية. تقدر البصمة الكربونية لمحطات تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي بـ 0.4 - 6.7 كجم من مكافئ ثاني أكسيد الكربون للمتر المكعب. ومع ذلك، فإن هذا أعلى بشكل عام من البصمة الكربونية المقدرة لتحلية المياه الأقل ملوحة بالتناضح العكسي والتي تبلغ 0.4 - 2.5 كجم من مكافئ ثاني أكسيد الكربون في المتر المكعب. تختلف هذه القيم في أجزاء مختلفة من العالم. يُعزى الاختلاف إلى الموقع والتقنيات ومراحل دورة الحياة والعوامل المستخدمة وأدوات التقدير، والتي تم تحديدها جميعًا على أنها عقبات كبيرة لتقديم مقارنات دقيقة. ومن الشائع أيضًا أن تنبعث من محطات تحلية المياه الغازات الدفينة غير المباشرة (GHGs).

4.4. البيئة البحرية

من المحتمل أن يكون لمحطات تحلية مياه البحر، سواء التي تم بناؤها أو تشغيلها أو إيقاف تشغيلها على المدى الطويل، عددًا من الآثار السلبية على بيئتنا البحرية التي لا ينبغي التغاضي عنها. كما ذكرنا سابقًا (القسم 4.1)، يمكن أن يتسبب الخط الساحلي المفتوح في تركيز المحاليل الملحية إذا تم إطلاق أنابيب التصريف في المسطحات المائية المحصورة أو المناطق ذات التضاريس الباثيمترية التي تقلل من انتشارها بالمكان. يتم تحديد تأثير محطة تحلية المياه على مآخذ وتصريف المياه من خلال نوع وكمية المواد الكيميائية المستخدمة في المعالجة المسبقة للمياه، وكذلك على تكوين وتصميم المآخذ والمنافذ.

يعد تأثير تحلية المياه على البيئة جانبًا مهمًا من جوانب العملية الشاملة. حيث تعتبر حماية الحياة البحرية من أهم الاعتبارات عند التعامل مع محطات تحلية مياه البحر. تمثل إحدى الخطوات الأولى، في هذا الصدد، في تقبل مخاطر الاصطدام بالأنواع البحرية. توفر التصميمات الجديدة في مآخذ مياه البحر مجموعة واسعة من الخيارات مثل المآخذ البحرية المغمورة، ومآخذ قاع البحر، والمآخذ ذات الموقع المشترك، والآبار الشاطئية والساحلية، والمآخذ السلبية.

يتسبب تصريف المحلول الملحي من محطات التحلية في مشاكل للنظام البيئي البحري، خاصة في منطقة الخليج العربي المغلقة. لقد ثبت في الدراسات الحديثة أن نقاط تصريف المياه المالحة داخل المنشآت المتواجدة في مياه البحر غالبًا ما تكون موطنًا حيويًا للحياة البحرية. يتم استخدام طرق مختلفة لتقليل تأثير تصريف المحلول الملحي، بما في ذلك أجهزة نشر متعددة المنافذ؛ التصريفات المدججة في نفس الموقع لمياه التبريد والمياه الملوثة؛ حقن الآبار العميقة والتبخير واستعادة الأملاح والمعادن. طرق التخفيف الأخرى متاحة لمعالجة الآثار السلبية المحتملة. تشمل طرق التخفيف هذه:

- تقليل عدد وتركيز المواد الكيميائية المسموح بها في المصب والتأكد من استيفاء شروط التصريف
- تقليل الحمل الكيميائي لمحطات تحلية المياه بالتناضح العكسي مع المعالجة المسبقة بغشاء الضغط المنخفض وتطوير طرق جديدة للتعامل مع والتخلص من المواد الصلبة المستعادة من عمليات تنظيف الأغشية.
- أحد الجوانب الأساسية للتشغيل الكلي لمحطة تحلية المياه هو مراقبة البيئة المجاورة للموقع. حيث تسمح تقنيات وممارسات المراقبة المحسنة بملاحظات أكثر دقة لأي تأثير محتمل. يسمح لمشغلي المحطة بتغيير ظروف التشغيل وفقًا للمتطلبات البيئية، إذا لزم الأمر.

يجب أيضاً مراعاة التخلص من الحلول الملحي بواسطة محطات تحلية المياه قليلة الملوحة. يمكن أحياناً تصريف الحلول الملحي من المحطات دون التأثير على الجسم المائي الحالي. في حالات أخرى، يمكن حقنها في بئر عميق أو في بركة تبخير. في كلتا الحالتين، يجب مراعاة التخلص الآمن من الحلول الملحي في التصميم الأصلي للمحطات مع الزيادة المتوقعة في تكلفة رأسمال. يمكن بعد ذلك تعديل توقعات تكلفة التشغيل وفقاً لذلك.

5. أفضل الممارسات

يعاني أكثر من 200 مليون شخص حالياً من ندرة توفر المياه ويعيش 160 مليوناً في ظروف ندرة مياه مطلقة [41]. لذلك يجب على الدول العربية اعتماد طرق مبتكرة لمعالجة الطلب التنافسي على المياه وتنفيذ الإدارة المتكاملة لموارد المياه (IWRM) للتعامل مع النمو السكاني السريع والتنمية الاقتصادية والاعتبارات البيئية وتغير المناخ. يمثل جزء رئيسي من الاستراتيجية العربية للأمن المائي (ASWS) في تعزيز مبادئ الإدارة المتكاملة للموارد المائية لمواجهة تحديات ومتطلبات التنمية المستدامة. من الضروري أيضاً إنشاء سياسات نشطة وأطر تشريعية وأطر مؤسسية لإدارة الإدارة المتكاملة للموارد المائية. كجزء من خطط التنمية الوطنية، طورت معظم الدول العربية استراتيجيات لأهداف التنمية المستدامة (SDGs)، على وجه التحديد الهدف 6.5، الذي يلتزم كذلك بالإدارة المتكاملة للموارد المائية من أجل التنمية المستدامة والإدارة الفعالة للمياه.

5.1. توافر البيانات والمعلومات وإمكانية الوصول إليها

مشاركة البيانات والمعلومات محدودة في بعض البلدان، ويتم ذلك بشكل أساسي على أساس مخصص أو مشروع. إن إنشاء أنظمة معلومات المياه الوطنية والتكاتف الوطني سيسهل التعاون الفعال بين أصحاب المصلحة الرئيسيين، بما في ذلك الإدارات الوزارية ومؤسسات المياه. كجزء من قوانين وبروتوكولات أو مراسيم المياه، تعمل لبنان على إنشاء نظام وطني للمعلومات المائية، بما في ذلك المشاركة الإلزامية للمعلومات عبر مختلف المؤسسات والسلطات. قد يكون من الممكن أيضاً استخدام الذكاء الاصطناعي كبديل لتحليل بيانات تحلية المياه.

في بعض البلدان، عُقدت حلقات عمل لأصحاب المصلحة المختلفين، مما أتاح رؤية قيمة للجهود المبذولة لتنفيذ الإدارة المتكاملة لموارد المياه (IWRM). قامت العديد من المنظمات بتحديد وتدريب المختصين، بما في ذلك برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP)، ومركز DHI التابع لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة بشأن المياه والبيئة، وCap-Net UNDP، ومنظمة الصحة العالمية، وUN-Water. يجب تعزيز وتحديث رصد المياه على الصعيد الوطني، ويجب إعطاء الأولوية لمشاركة البيانات والمعلومات بين البلدان، كما يجب تعزيز تبادل البيانات والمعلومات عبر الحدود لتحقيق المزيد من التقدم.

5.2. توسيع وتحديث المراقبة الوطنية لتوافر المياه

بالإضافة إلى بناء بيئة ممكنة (استشارات، تدريب، إلخ) وإنشاء هيكل حوكمة لإدارة وتنفيذ نظام معلومات مياه وطني، قامت لبنان بالاستشارات اللازمة لضمان إنتاج البيانات وتخزينها ومعالجتها والوصول بها لأصحاب المصلحة. اقترحت العديد من الدول، بما في ذلك الأردن ولبنان والمغرب وسلطنة عمان والصومال، تطوير وتحديث وتوسيع شبكات المراقبة.

5.3. تبادل البيانات والمعلومات عبر الحدود.

تتطلب أهمية المياه العابرة للحدود في المنطقة إضفاء الطابع الرسمي على ترتيبات تبادل البيانات والمعلومات وتعزيزها. تضمنت بعض الاقتراحات إنشاء بوابة إلكترونية عامة مشتركة بين جميع البلدان العربية. ويمكن بعد ذلك توسيع تبادل البيانات والمعلومات ليشمل قطاعات أخرى. كما يوصى بإنشاء مرصد إقليمي لزيادة التعاون والمعرفة بين الدول العربية فيما يتعلق بتقنيات تحلية المياه لدعم طلبها المتزايد على المياه من خلال اعتماد تقنيات تحلية المياه الأكثر كفاءة واستدامة. وسيعزز ذلك تطوير الابتكارات ونقل المعرفة بين الدول العربية.

6. دور القطاع الخاص

من العوامل المهمة في تطوير مشاريع المياه في جميع أنحاء العالم هو التمويل الخاص. جدير بالذكر أن 38٪ من طاقة محطات تحلية المياه التي تم بناؤها بين عامي 2000 و2020 جاءت نتيجة هذا النوع من التمويل. تجدر الإشارة إلى أنه يتم استخدام نماذج توصيل مختلفة لشراء مشاريع تحلية المياه. ويعتمد نموذج التسليم المختار على ما إذا كان تمويل المشروع من مصدر عام أو خاص. ويمكن تصنيف مشروع تحلية المياه تحت أي من شروط ونماذج العقد التالية:

- الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP).
- الامتيازات أو معاملات الاستعانة بمصادر خارجية للمرافق.
- مشروع المياه والطاقة المستقل (IWPP).
- مخططات البناء والتشغيل (BOO).
- إنشاء محطات التشغيل الخاصة بها مع إرفاق صلاحية النقل (BOOT).

ستنشأ الخلافات حتماً بسبب الأهداف المتعددة لدمج تصميم محطات تحلية المياه وتشغيلها وصيانتها مع الملكية والتمويل. من أجل تحقيق أقل تكلفة للتقروض، يجب على الشركة تقليل المخاطر. من ناحية أخرى، ترتبط الابتكارات التكنولوجية بمستويات أعلى من المخاطر. يتعين على أي كيان ناهج من القطاع الخاص أن يختار الحل التقتي الأنسب بناءً على تكلفة العمر الكلي للأصل، لتحسين رأس المال وتكاليف التشغيل وتحقيق تعريفة تنافسية (السعر لمتراً مكعباً من المياه).

من أجل تشييد المحطات، يتم استخدام ثلاثة نماذج عقود أولية EPC (الهندسة والمشتريات وعقد البناء)، DBO (التصميم والبناء والتشغيل) و BOT (البناء والتشغيل والنقل). أصبحت مشاريع بناء وامتلاك وتشغيل ونقل (BOOT) محطات تحلية المياه منتشرة بشكل متزايد في جميع أنحاء العالم لأنها تسمح للبلديات والمرافق العامة بتحويل المخاطر المرتبطة بتكاليف المياه المحلاة إلى القطاع الخاص.

كما أن هناك قيود على البنية التحتية لتطبيق الشراكة بين القطاعين العام والخاص. على سبيل المثال، تتطلب تحلية المياه عادة نقل المياه المحلاة لمسافات طويلة إلى الموقع المطلوب. لذلك يجب أن تُستكمل الشراكة بين القطاعين العام والخاص بالقيود المؤسسية، بما في ذلك وضع سياسات تسعير المياه، واستثمارات البحث والتطوير، وإدارة موارد المياه المتكاملة. كما أن تصور السكان لمشاركة القطاع الخاص في الشراكة بين القطاعين العام والخاص يمثل قيداً أيضاً. وتشمل المخاوف من إمكانية ارتفاع الأسعار، والممارسات التجارية غير الملائمة، ونشر المعلومات بشكل غير مثالي. هذا ناهيك عن أن الموارد البشرية والجوانب ذات الصلة لا تزال في طور الإنشاء، ولم يتم قياس جودة المياه للمياه كميّاً لتحقيق النمو الاجتماعي والاقتصادي.

6.1. شراء محطات التحلية

يتأثر اختيار نموذج الشراء لمشروع تحلية المياه بعوامل مختلفة، مثل موقع المشروع، وحجم المحطة، وبيان مخاطر المشروع، ومصادر التمويل، والسندات، وتجربة المالك. علاوة على ذلك، تُستخدم نماذج تسليم مختلفة لشراء مشاريع تحلية المياه، اعتمادًا على ما إذا كان المشروع ممولًا من قبل وكالة عامة أو كيان خاص. وتُستخدم نماذج التسليم هذه عندما يريد العميل الاحتفاظ بملكية المحطة. وتشمل هذه الفئات الهندسة والمشتريات والبناء (EPC) أو التصميم والبناء (DB) أو تصميم العطاء والبناء (DBB). ويتطلب أن يتكفل العميل للحصول على أيًا من هذه النماذج بإعداد الرسومات والمواصفات التفصيلية. ثم يتم إحضار الرسومات والمواصفات إلى المقاول من قبل العميل حتى يبدأ البناء [42].

6.2. عقود التصميم والبناء والتشغيل (DBO)

أثناء عملية طرح المناقصة، يقوم العملاء الراغبين بمحطة تحلية المياه بمنح عقود البناء والتشغيل والصيانة (O&M) كحزمة واحدة. في بعض الحالات، يتحمل الأعضاء الذين يقدمون العروض مسؤوليات مختلفة في العقد الخاص بالبناء والتشغيل. ويتطلب النموذج أطرًا قانونية أقل من النماذج الأخرى (مثل BOT) ويحفز الموثوقية طويلة الأجل كهدف إيمائي رئيسي لأن المكون التشغيلي للعقد يتطلب أطرًا قانونية أكثر صرامة من تلك الخاصة بالنماذج القائمة على BOT [42]. على سبيل المثال تم استخدام هذا النموذج لمشاريع إمدادات المياه في البصرة.

6.3. عقود البناء والتشغيل والنقل (BOT)

في نموذج التسليم هذا، تمتلك شركة التطوير الخاصة كافة الأصول، ويستلم العملاء أصولهم في نهاية فترة العقد؛ في عام 2020، مكنت مشاركة التمويل الخاص هذه من تحقيق مستوى عالٍ من الاستثمار في مشاريع تحلية المياه الجديدة. واستفادت المشاريع بشكل كبير من نموذج عقد إنتاج المياه المستقل (IWP)، والذي تضمن عقد BOT طويل الأجل. يذكر أن معظم السعة الممنوحة من خلال هذا النموذج حدثت في دول الخليج العربي. حيث تنتج العديد من مشاريع BOT الآن المياه الحلالة بأقل من 0.50 دولار للمتر المكعب. وتشمل هذه المشاريع الجليل 3 أ (0.41 دولار للمتر المكعب)، والجيل 3 مليارات (0.42 دولار للمتر مكعب)، وبنبع 4 (0.47 دولار للمتر مكعب). ومع ذلك؛ قد يتعذر الحصول على أسعار منخفضة خارج منطقة الشرق الأوسط بسبب ارتفاع التكاليف البيئية والتنظيمية والعمالة [34]. وفي شمال إفريقيا، تكتسب الشركات بين القطاعين العام والخاص في المغرب زخمًا أيضًا. من المتوقع أن تستخدم محطة الدار البيضاء والذي يخطط أن تبلغ طاقته الإنتاجية 800 ألف متر مكعب في اليوم عقد البناء والتشغيل والتحويل، في حين أن القانون الجديد بالمغرب، عند صدوره، سيوسع قائمة الهيئات العامة التي يمكنها المشاركة في الشراكة بين القطاعين العام والخاص. وبالمثل، من المتوقع أن يتطلب البرنامج الضخم لتحلية المياه في مصر لعام 2050 تمويلًا خاصًا. كما ستتيح محطة تحلية قابس التونسية نموذج BOT.

6.4. البناء والامتلاك والتشغيل (BOO)

على عكس BOT، لا يتضمن هذا النموذج نقل الأصول. تختار البلديات والجهات المشرفة على المرافق العامة طريقة مشروع البناء وامتلاك وتشغيل ثم نقل المحطات (BOOT) لتحويل مخاطر تحلية المياه إلى القطاع الخاص. ومن المهم ملاحظة أن هناك أخطار معينة مرتبطة بتشغيل محطات تحلية مياه البحر واسعة النطاق. وتشمل هذه التنبؤات بأداء المصنع بسبب التحديات في الحصول على التصاريح، وجودة المياه، وتكاليف بدء التشغيل والتشغيل، والحجرة المحدودة للقطاع العام فيما يتعلق بتكنولوجيا الأغشية ومعداتها [42].

6.5. القيود المتعلقة بالتصور العام لمشاركة القطاع الخاص في الشراكة بين القطاعين العام والخاص

من خلال الشراكة مع القطاع الخاص، يمكن للحكومات تقليل التكاليف وتحسين الخدمات خارج نطاق البيع التي يقدمها القطاع الخاص. جدير بالذكر أن الشراكات بين القطاعين العام والخاص (PPPs) نوقشت على نطاق واسع في المنطقة العربية في العقد الماضي. وقد تم إيلاء اهتمام خاص للعلاقات مع الأطر المؤسسية والتنظيمية، ومخاطر السوق، ومخاطر الشراء، وهياكل التعرفة، ورسوم المياه المحلاة، والبناء، والمخاطر الفنية والتشغيلية، وآليات التمويل، وتعزيز الائتمان، والمخاطر البيئية. ومع ذلك؛ فإن تطبيق الشراكات بين القطاعين العام والخاص يتأثر بقيود البنية التحتية. علاوة على ذلك؛ يجب استشارة المؤسسات القائمة بالاقتران مع الشراكات بين القطاعين العام والخاص، مثل إنشاء أنظمة تخزين المياه. والتي غالباً ما تشابك إدارة الموارد المائية مع وضع سياسة تسعير المياه وبرنامج الحوافز، وهذه عوامل أخرى يجب معالجتها بالاقتران مع الشراكات بين القطاعين العام والخاص، كثيراً ما يشعر المواطنون والمقيمون في هذه الدول بالقلق إزاء ارتفاع الأسعار، والممارسات التجارية غير الملائمة، والافتقار العام إلى المعلومات التي يسهل فهمها في الواقع، حتى الآن، لم يوجد تقدير كمي كامل لشرح سبب تأثير جودة المياه سلباً على التنمية الاجتماعية والاقتصادية، ولا تزال الموارد البشرية والمنظمات ذات الصلة المطلوبة لإنشاء هذه الرابطة في محدها [42].

هناك قيد آخر يتمثل في تصور العامة لمشاركة القطاع الخاص في الشراكة بين القطاعين العام والخاص. تشمل المخاوف الاستغلال المحتمل لمورد أساسي لصالح الربح. علاوة على ذلك، يعتبر الاستثمار وتكاليف المياه المنتجة عوامل أساسية بديهية في التأثير على صانعي القرار لاختيار التقنيات المناسبة، والتي يمكن دمجها مع الحوافز المحلية ونماذج تسليم العقود. قد تختلف التكاليف لكل متر مكعب من المياه المحلاة بشكل كبير اعتماداً على عدة عوامل، بما في ذلك قدرة إنتاج المياه وجودتها، ومصدر مياه التغذية (مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة)، والموقع، ونوع الطاقة المستخدمة.

تشمل هذه المخاوف الاستغلال المحتمل لمورد أساسي لصالح الربح. علاوة على ذلك؛ يعتبر الاستثمار وتكاليف المياه المنتجة عوامل أساسية بديهية في التأثير على صانعي القرار لاختيار التقنيات المناسبة، والتي يمكن دمجها مع الحوافز المحلية ونماذج تسليم العقود. وقد تختلف التكاليف لكل متر مكعب من المياه المحلاة بشكل كبير اعتماداً على عدة عوامل، بما في ذلك قدرة إنتاج المياه وجودتها، ومصدر مياه التغذية (مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة)، والموقع، ونوع الطاقة المستخدمة.

7. تنمية القدرات

في المنطقة العربية، وخاصة في دول الخليج العربي، تطورت تحلية المياه لتصبح واحدة من أكبر الأسواق في العالم. بالإضافة إلى كونها رائدة على مستوى العالم في مجال تقنية تحلية المياه، يمكن لمنطقة الخليج العربي أن تكون جزءاً يساهم في التدريب بالبول المجاورة لها. وفقاً لبراء الصناعة، فإن الحاجة الملحة للتدريب وبناء القدرات في مجال تحلية المياه أمر لا جدال فيه. في الوقت الحاضر، يتم بناء محطات تحلية المياه على نطاق واسع بشكل أسرع من تدريب الأشخاص الذين يمكنهم تشغيلها. هناك حاجة مستمرة لتطوير وتدريب الموارد البشرية لتشغيل محطات التحلية الحالية والمستقبلية في المنطقة العربية.

تفتقر المنطقة العربية إلى القوى العاملة المناسبة في مجال تحلية المياه - المستشارون؛ والمصممون؛ والباحثون الخبراء؛ والفنيون المهرة؛ والمشغلون - لتلبية احتياجات المنطقة بشكل مناسب الآن وفي المستقبل. كما تشير العديد من التقديرات إلى أن العمليات الحالية والمستقبلية لصناعة تحلية المياه في هذه المنطقة سوف تتطلب

عدداً كبيراً من الموظفين على جميع المستويات الفنية. علاوة على ذلك، فإن معظم المقاولين والاستشاريين ليسوا من السكان المحليين. يمكن أن يُعزى هذا العامل إلى حقيقة أن معظم أنشطة تحلية المياه في المنطقة بدأت في البلدان المنتجة للنفط التي يمكنها تحمل العبء الوافدة أو ليس لديها مهارات محلية. وعلى العكس من ذلك، فإن معظم الدول غير المنتجة للنفط قد بدأت للتو في تحلية المياه وليس لديها الموارد البشرية اللازمة في هذا المجال.

في الوقت الحالي، تهيمن مبادرات القطاع الخاص والدورات المتخصصة التي تقدمها الجامعات الإقليمية على التعليم الإقليمي حول تحلية المياه. على الرغم من هذه المبادرات، فمن غير المحتمل أن يكونوا قادرين على تلبية احتياجات النمو المقدر لهذه الصناعة. كما أن النهج الذي ينطوي على التشارك بين المعاهد والمنظمات ضروري لتوفير التعليم والتدريب الأكثر فعالية؛ فيما يلعب البحث والتطوير دوراً حيوياً في جميع المجالات التي تؤدي إلى تقدم التقنية. من جانب آخر فإنه ولسوء الحظ، فإن معظم الشركات التي تزود تقنيات تحلية المياه لا تستثمر كثيراً في البحث والتطوير، ربما بسبب نقص الأموال. ولذلك فإنه يجب تكريس استثمارات كبيرة لتطوير تقنيات مجدية اقتصادياً لاكتساب ميزة تنافسية في السوق.

وبالمثل، وعلى الرغم من ارتفاع مستوى المنافسة في سوق تحلية المياه، فإن معظم مستخدمي التقنية لا يشاركون بنشاط في إدخال تحسينات على محطاتهم لزيادة أدائهم التشغيلي؛ وقد يكون هذا أيضاً بسبب نقص التمويل أو الموارد البشرية المدربة للإشراف وإجراء البحوث. تجدر الإشارة إلى أن بعض البلدان في المنطقة العربية لديها بالفعل برامج راسخة لتحلية المياه، بما في ذلك دول مجلس التعاون الخليجي، وإلى حد ما، ليبيا.

ومع ذلك، فإن المشكلة الرئيسية في هذه التطورات هي نقص الموظفين المؤهلين في العديد من هذه البلدان، حيث لا يوجد لدى العديد منها مرافق تدريب أو برامج تدريب مخصصة للموظفين. يحاول موردو المصانع حل هذه المشكلة من خلال إنشاء مرافق وبرامج تدريبية داخل البلد المضيف أو في الخارج. كجزء من هذه المبادرة، في سلطنة عمان؛ يقدم مركز الشرق الأوسط لأبحاث تحلية المياه (MEDRC) دورات تدريبية قصيرة يتم إجراؤها في المنطقة من قبل خبراء معترف بهم دولياً في هذا المجال. ويعزز القدرات البحثية من خلال إشراك باحثين محليين في فرق البحث لكل مشروع برعاية المركز ورعاية الطلاب المتابعة مؤهلات الدراسات العليا في تحلية المياه والمجالات المرتبطة بها.

7.1. الدرجات والأدوار الأكاديمية

تمتلك الجامعات ومراكز الأبحاث في المنطقة العربية موارد مرافق، وعدداً محدوداً من الموظفين المتاحين لتطوير تقنيات جديدة. ومع ذلك، فهم يقومون بالبحث لتحسين العمليات الحالية. تركز معظم الأعمال البحثية في الجامعات العربية على دراسات التقييم ومحاكاة العمليات لتقييم المحطات القائمة وأنظمة تحلية المياه الصغيرة وتطبيقات الطاقة المتجددة في تحلية المياه، عدداً قليلاً جداً من الجامعات في جميع أنحاء العالم تقدم دورات في تنقية المياه في برامجها الهندسية. ومع ذلك، توجد استثناءات في ذلك، مثل جامعة الملك عبد العزيز في جدة، وجامعة الكويت، والمدرسة الوطنية للمهندسين بتونس (L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis). ولتلبية هذه الحاجة بشكل أكبر، ساعد مركز أبحاث تحلية المياه في الشرق الأوسط في سلطنة عمان على إطلاق منح لدراسة الماجستير والدكتوراه، ودورات للدراسات العليا تقدم في الجامعات العربية. كذلك تمنح الدول العربية مواطنيها منح للدراسات العليا في مجال التحلية خارج المنطقة [43].

7.2. البحث والتطوير

أدى تحسين الوصول إلى المعلومات والأبحاث إلى دعم أبحاث تحلية المياه ونموها في معظم المؤسسات في المنطقة، ويتركز البحث والتطوير بشكل أساسي على تحسين كفاءة محطات تحلية المياه المحلية وعلى تحسين التقنيات المتاحة. بالإضافة إلى ذلك، يتم أيضاً إجراء أبحاث في الظواهر المتعلقة بتحلية المياه مثل التحجيم، وتلوث الأغشية، والتنظيف، والتطهير، والتآكل. ولكن كل ذلك لا يكفي بسبب قلة المراكز التي تعنى بتحلية المياه في المنطقة العربية، مثل المؤسسة العامة لتحلية

المياه المالحة (SWCC) في المملكة العربية السعودية ، ومعهد الكويت للأبحاث العلمية (KISR) في الكويت، ومركز أبحاث الشرق الأوسط (MEDRC) في سلطنة عمان.

من الضروري وجود موظفين مؤهلين وذوي خبرة لإنشاء محطات تحلية مياه بمواصفات عالمية. وتشير العديد من التقديرات إلى الحاجة إلى المزيد من موظفي الدعم على جميع المستويات الفنية. ولذلك يجب إنشاء مراكز تدريب وتعليم، ويجب على المؤسسات الأكاديمية تدريب العاملين في القطاع. كما يجب دراسة تقنيات تحلية المياه والموضوعات ذات الصلة لإنشاء برنامج تعليمي عملي، لا سيما بشأن تقنيات محددة تختلف من بلد إلى آخر. ويوصى بأن تكون عملية التعليم مرنة وديناميكية، وقادرة على معالجة التغييرات والتحسينات مع تطور التقنيات [43]. كما يجب أن يبدأ الوعي بقضايا وبرامج المياه على مستوى المدارس الابتدائية والثانوية. وفي الآونة الأخيرة، قامت العديد من الدول العربية بتطوير برامج بناء القدرات في مجال نزع المياه على المستويات المحلية والإقليمية والدولية. ووفرت هذه البرامج تدريباً عملياً على التعامل مع الأجهزة، والعمل المخبري، والتحليل الكيمائي والفيزيائي، واختبار وفهم مكونات المصنع. ومن المتوقع أن تؤدي خصخصة صناعة تحلية المياه إلى زيادة الاستثمار في برامج بناء القدرات التي تقدم:

- استخدام العلم والخبرة والمواد والتطبيقات الجديدة لإحياء التقنيات غير الناجحة سابقاً.
- ابتكار عمليات جديدة تماماً.
- التحسين المستمر للتقنيات الحالية.

7.3. التدريب المهني والتقني

تجري شركات ومؤسسات تحلية المياه الدولية دورات تدريبية بانتظام، مثل DH Paul و Masar Technologies DME Desalination Institute و Haward Technology Middle East و Bushnak Academy و Apex. بالإضافة إلى ذلك، تساعد الجمعيات الدولية مثل الرابطة الدولية لتحلية المياه (IDA)، والرابطة الدولية للمياه (IWA)، والجمعية الأوروبية لتحلية المياه (EDS) في إجراء دورات تدريبية وورش عمل خلال مؤتمراتها السنوية. يمكن أن يكون كل مشروع لتطوير المياه ناجحاً وسلساً إذا شارك السكان في جميع المراحل التي تسبق الإنجاز (مرحلتى التخطيط والتنفيذ). ونتيجة لذلك ستبذل المجتمعات قصارى جهدها لضمان الإدارة الناجحة لهذه المشاريع لأنها المستفيد النهائي. ولذلك يجب تقديم المزيد من الدعم لبرامج التعليم الفني والمهني لتحلية المياه (بما في ذلك التعلم الإلكتروني). كما يساعد إجراء التدريب المهني والتقني وإشراك السكان المحليين في تقليل تكلفة تحلية المياه بشكل مباشر أو غير مباشر.

8. التوصيات والتوقعات المستقبلية

8.1. رؤية جديدة للتقنيات المتكبرة

تعمل مراكز ومؤسسات البحث الدولية على تطوير تقنيات جديدة لتحلية مصادر المياه غير التقليدية، وأهمها المياه المنتجة من حقول النفط. تنتج آبار حقول النفط القديمة كمية كبيرة من المياه أثناء إنتاج النفط. في سلطنة عمان، يتم إنتاج 9 براميل من المياه العادمة المالحة لكل برميل من النفط. من الضروري اعتبار هذه المياه كمصدر آخر للمياه بدلاً من تصنيفها كمياه عادمة يجب التخلص منها. تحلية هذه المياه ستوفر مصدرًا ممتازًا للمياه الصالحة للاستخدام، خاصة للري.

تعمل عمليات التفريغ الصفري السائلة الصديقة للبيئة على تعزيز تطوير تقنيات جديدة لتحلية المياه مثل التقطير بالأغشية والتبلور. كما يتم تطوير تقنيات أخرى لتحلية المياه من مصادر غير البحر. بالإضافة إلى ذلك؛ يجري البحث المتقدم لتطوير تقنيات تحلية المياه للتطبيقات الزراعية، بما في ذلك NF و CDI و EDR وعمليات التحلية المدججة. ومن المتوقع أن يزداد تطبيق هذه التقنيات، مما يؤدي إلى الفصل بين تقنيات تحلية مياه البحر وتقنيات تحلية المياه قليلة الملوحة.

8.2. الاستدامة المالية

تساهم عدة عوامل في ارتفاع تكلفة تحلية المياه، بما في ذلك هيمنة القطاع العام على الصناعة والتكاليف الاستثمارية الهائلة المرتبطة بمحطات تحلية المياه الجديدة، خاصة بالنسبة للمشاريع الكبيرة. وبسبب هذه العوامل؛ سيكون من الصعب على صناعة المياه العالمية تلبية الطلب المتزايد بسرعة على المياه. كما أنه سيضع عبئاً ثقيلاً على الميزانيات الوطنية. تستطيع الحكومات تصميم حوافز للشركات المحلية وتشجيع الاستثمار المحلي في تصنيع المكونات الرئيسية لمحطة تحلية المياه من أجل تحقيق الاستدامة الاقتصادية. وحتى فإن توطين التقنيات والتصنيع سيؤدي إلى زيادة الناتج المحلي الإجمالي وزيادة فرص العمل وتعزيز المهارات المحلية وتقليل تكلفة تحلية المياه وتعزيز دور القطاع الخاص في تحلية المياه. ويجب على الجهات الرسمية الحث على تعزيز الابتكار في التكنولوجيا والعمليات من خلال تقييم الطاقة بأسعار السوق العالمية حسب المعمول به في القطاع الخاص. كذلك فإنه يجب اتخاذ التدابير اللازمة لتقليل تكلفة الدورة الإجمالية لتحلية المياه وجودتها، خاصة لمحطات تحلية المياه الكبيرة. بالإضافة إلى ذلك فإن استخدام المنتجات المنتجة محلياً والموارد البشرية المحلية سيؤدي إلى تقليل تكاليف إنتاج المياه المحلاة.

8.3. الاستدامة البيئية

إن استخدام الطاقة المتجددة لتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والتأثيرات المتعلقة بالمناخ واعتماد أنظمة بيئية أكثر صرامة يضمن الاستدامة البيئية. التوصية الرئيسية الأخرى هي تقليل التأثير البيئي باستخدام مياه منخفضة الجودة أو مياه البحر بدلاً من المياه العذبة أو المحلاة في المصانع، وخاصة للتبريد. هذا ويمكن للقاتمين على هذه الجهود في المنطقة العربية النظر في لوائح وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) بشأن التصريف المباشر وغير المباشر للمخلفات الناتجة من تحلية مياه الشرب. كما اكتسب التفريغ الصفري السائل (ZLD) مؤخرًا قوة دفع لتقليل التأثير البيئي للملح على الحياة البحرية والشعاب المرجانية ومن الممكن الاستفادة منه أيضاً. يذكر أن نظام ZLD ينتج معدل استرداد أعلى للمياه ويوفر خيار استعادة الأملاح لإنتاج الحد الأدنى من المياه والمخلفات الصلبة.

من جانب آخر فإن الدول العربية تعتمد بشكل كبير على الزراعة التي تساهم بنسبة 80٪ من إجمالي استخدام المياه. فمن الضروري تشجيع المزارعين على استخدام المياه غير التقليدية للري من خلال جلسات التوعية العامة والتشريعات والتمكين من خلال تزويدهم بالتدريب والأدوات والمعدات الحديثة. ويمكن للعالم العربي الاستثمار في تقنيات جديدة لتحلية المياه مناسبة بشكل أفضل للزراعة، مثل عمليات الترشيح بالنانو، ونظام CDI، وعمليات EDR. هذه العمليات مناسبة للغاية لتحلية المياه ذات الملوحة المنخفضة والمتوسطة ويمكنها التحكم في ملوحة المياه المحلاة. كما أن البحث ضروري للتحقق من إمكانية خلط كميات ونوعية مختلفة من المياه الجوفية ومياه الصرف الصحي المعالجة والمياه المحلاة والمياه السطحية للأغراض الزراعية. بالإضافة إلى ذلك، يعد إجراء المزيد من الأبحاث أمراً بالغ الأهمية في الزراعة الملحية، والزراعة المائية (الأكوابونيك والهيدروبونيك).

8.4. السعي لتحديث التشريعات والقوانين

تتطلب زيادة القدرات والمعرفة والقيمة المضافة للاقتصاد المحلي مراجعة السياسات والممارسات. وعلى المجتمع العربي أن يكرس الكثير من خبراته وقدراته حالياً للتشغيل والصيانة، في حين يتم إيلاء القليل من الاهتمام لتصميم المحطات والتصنيع والبناء. ولا يزال يتعين على بعض الدول العربية تحقيق التوازن في سياسات المياه من خلال تنفيذ الأطر القانونية والتشريعية اللازمة. هذا إن كانت موجودة بالفعل، فإن هذه الأطر لا يتم ممارستها بشكل مثالي للأغراض المخصصة لها. ولا تعالج القوانين والتشريعات جميع القضايا بشكل كافٍ، أو تفشل أدوات التنفيذ في ضمان التطبيق السليم، مما يؤدي إلى نقص في التنفيذ.

تعد الأطر القانونية والتشريعية القوية ذات أهمية قصوى لضمان التنفيذ السليم للسياسات وتحقيق التنمية المتوازنة. ولذلك يجب وضع إطار تنظيمي شامل لتغطية المياه بالإضافة إلى برامج الحوافز التي تهدف إلى تقليل البصمة الكربونية والأثر البيئي المرتبط بعملية التحلية. علاوة على ذلك، يجب على المشرعين التعاون مع أقرانهم العرب والدوليين أثناء تطوير تشريعات المياه المناسبة. يتيح التعاون للمشرعين تطوير تشريعات شاملة وواسعة النطاق مناسبة للمنطقة بأكملها والأجيال القادمة.

8.5. الطلب على المياه في الثورة الصناعية الرابعة ودور التقنيات الهادمة

- تقنية النانو لديها مجموعة واسعة من التطبيقات المحتملة في معالجة وتحلية المياه لأنها رائدة في تصنيع المواد والأنظمة والتقنيات الجديدة بتكاليف منخفضة وكفاءة عالية. من خلال تقنية النانو، يمكن إطلاق العنان لمصادر مياه جديدة على نطاق واسع، مما يعود بالفوائد على العديد من الصناعات، بما في ذلك إزالة تلوث المياه، وتطوير البنية التحتية، والمراقبة. تقديراً للتأثير المحتمل لهذه التكنولوجيا، يستثمر الاقتصاد العالمي بالفعل في تكنولوجيا النانو. ومن المتوقع أن يتجاوز القطاع 125 مليار دولار بحلول عام 2024.
- تكتسب الطاقة المتجددة لتحلية المياه المباشرة وغير المباشرة اهتماماً في البلدان الغنية بأشعة الشمس. كما أثبتت التطورات الأخيرة قدرة الطاقة المتجددة على استبدال عمليات المعالجة المعتادة المستخدمة في تحلية المياه. هذه العمليات المعتادة تستهلك طاقة عالية ومواد كيميائية ضارة وإنللك فإن محطات التحلية التي تعمل بالطاقة المتجددة هي مستقبل تحلية المياه لأنها تقلل من تكاليف الطاقة، ويعوض الطلب على الطاقة خلال ساعات الذروة، وصديقة للبيئة.
- شددت التوجهات الأخيرة لهدف تحقيق صافي انبعاثات صفرية على الحاجة إلى إنتاج الهيدروجين الأخضر بدلاً من ألوان الهيدروجين الأخرى. يتم إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الكهرباء لفصل جزيئات الماء إلى هيدروجين وأكسجين. تتطلب التقنيات الحالية درجة نقاء عالية من المياه لإنتاج الهيدروجين الأخضر. تحتاج إلى 9 لترات من الماء لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين و8 كجم من الأكسجين. الكمية الإجمالية لإنتاج الهيدروجين اليوم، حوالي 70 مليون طن من الهيدروجين، تتطلب 617 مليون متر مكعب من الماء إذا تم إنتاجها كلها عن طريق التحليل الكهربائي [44].

يمكن أن تؤدي مشاريع الهيدروجين داخل المناطق التي تعاني من إجهاد مائي فوق المتوسط إلى زيادة الطلب على تحلية المياه بمقدار خمسة أضعاف بحلول عام 2040 [45]. ونتيجة لذلك، يتعين على الدول العربية التي تخطط لإنتاج الهيدروجين الأخضر الاعتماد على تحلية مياه البحر للحصول على المياه اللازمة لهذه العملية.

نظراً لهذا النمو الكبير في طلب إنتاج الهيدروجين الأخضر، وقعت المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة بالمملكة العربية السعودية مذكرة تفاهم مع شركة Cummins Arabia لاستكشاف سبل تطوير تقنيات الهيدروجين الخضراء بشكل مشترك كواحد من المشاريع العملاقة في المملكة لتنويع اقتصادها،

كذلك فإن مشروع نيوم الذي تبلغ تكلفته 500 مليار دولار على ساحل البحر الأحمر سيطور واحدًا من أولى مشاريع الهيدروجين الأخضر واسعة النطاق في الشرق الأوسط. بالإضافة إلى ذلك، هناك مشروع جديد وطموح لإنتاج الهيدروجين الأخضر من المياه المحلاة قيد التنفيذ في أبو ظبي، مما يخطو خطوة كبيرة في سوق الطاقة المتجددة. هذا وتناقش موانئ أبو ظبي وشركة طاقة، اللتان تتحكمان في جميع البنية التحتية للمياه في الإمارة، إمكانية إنشاء مصنع أخضر للهيدروجين والأمونيا في منطقة خليفة الصناعية. ستعمل محطة للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 2 جيجاوات على تشغيل عملية التحليل الكهربائي.

المصادر:

- [1] G. Baggio, M. Qadir, V. Smakhtin, Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs, *Science of The Total Environment*, 792 (2021) 148230.
- [2] H. Adun, H.P. Ishaku, A.T. Ogungbemi, Towards Renewable energy targets for the Middle East and North African region: A decarbonization assessment of energy-water nexus, *Journal of Cleaner Production*, 374 (2022) 133944.
- [3] D. Dimkić, M. Dimkić, S. Vujasinović, Drought and alluvial groundwater resources, (2021).
- [4] M. Ayaz, M. Namazi, M.A. ud Din, M.M. Ershath, A. Mansour, Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations, *Desalination*, 540 (2022) 116022.
- [5] B. Moossa, P. Trivedi, H. Saleem, S.J. Zaidi, Desalination in the GCC countries-a review, *Journal of Cleaner Production*, (2022) 131717.
- [6] D. Curto, V. Franzitta, A. Guercio, A review of the water desalination technologies, *Applied Sciences*, 11 (2021) 670.
- [7] Y. Shatilla, Nuclear desalination, *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*, Elsevier2020, pp. 247-270.
- [8] A. Alkhudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination*, 287 (2012) 2-18.
- [9] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies, *Desalination*, 266 (2011) 263-273.
- [10] K.M. Shah, I.H. Billinge, X. Chen, H. Fan, Y. Huang, R.K. Winton, N.Y. Yip, Drivers, challenges, and emerging technologies for desalination of high-salinity brines: A critical review, *Desalination*, 538 (2022) 115827.
- [11] F.E. Ahmed, R. Hashaikeh, N. Hilal, Solar powered desalination—Technology, energy and future outlook, *Desalination*, 453 (2019) 54-76.
- [12] M. Rahman, Foreword I, *Green Energy and Technology*, Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6887-5>, 2019.
- [13] P.S. Bhambare, M. Majumder, C. Sudhir, Solar thermal desalination: a sustainable alternative for Sultanate of Oman, *International Journal of Renewable Energy Resources*, 8 (2018) 733-751.
- [14] Veolia and TotalEnergies partner to build largest solar system for desalination plant in Oman, *Times of Oman*, 2022.
- [15] Solar energy to power sur desalination plant Oman Observer Oman, 2022.
- [16] P.S.Z.R. Van Der, Wal A. Presser V. Biesheuvel P, *Prog. Mater. Sci*, 58 (2013) 1388.
- [17] Y. Oren, Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment—past, present and future (a review), *Desalination*, 228 (2008) 10-29.
- [18] N.J. Vickers, Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?, *Current biology*, 27 (2017) R713-R715.
- [19] P. Goh, K. Wong, A. Ismail, Membrane technology: A versatile tool for saline wastewater treatment and resource recovery, *Desalination*, 521 (2022) 115377.

- [20] Y. Ibrahim, H.A. Arafat, T. Mezher, F. AlMarzooqi, An integrated framework for sustainability assessment of seawater desalination, *Desalination*, 447 (2018) 1-17.
- [21] H.A. Awaad, E. Mansour, M. Akrami, H.E. Fath, A.A. Javadi, A. Negm, Availability and feasibility of water desalination as a non-conventional resource for agricultural irrigation in the mena region: A review, *Sustainability*, 12 (2020) 7592.
- [22] J.A. Aznar-Sanchez, L.J. Belmonte-Urena, J.F. Velasco-Munoz, D.L. Valera, Farmers' profiles and behaviours toward desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain, *Journal of Cleaner Production*, 296 (2021) 126568.
- [23] A. Hafez, S. El-Manharawy, Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study, *Desalination*, 153 (2003) 335-347.
- [24] J.M. Beltrán, S. Koo-Oshima, Water desalination for agricultural applications, *FAO Land and water discussion paper*, 5 (2006) 48.
- [25] C.-Y. Chen, S.-W. Wang, H. Kim, S.-Y. Pan, C. Fan, Y.J. Lin, Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy, *Water Research*, 199 (2021) 117193.
- [26] T. Kober, H.-W. Schiffer, M. Densing, E. Panos, Global energy perspectives to 2060—WEC's World Energy Scenarios 2019, *Energy Strategy Reviews*, 31 (2020) 100523.
- [27] N. Ghaffour, T.M. Missimer, G.L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination*, 309 (2013) 197-207.
- [28] H. Sewilam, P. Nasr, Desalinated water for food production in the Arab region, *The water, energy, and food security nexus in the Arab region*, Springer 2017, pp. 59-81.
- [29] J. Eke, A. Yusuf, A. Giwa, A. Sodiq, The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity, *Desalination*, 495 (2020) 114633.
- [30] J. Kim, K. Park, D.R. Yang, S. Hong, A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants, *Applied Energy*, 254 (2019) 113652.
- [31] N. Voutchkov, Energy use for membrane seawater desalination—current status and trends, *Desalination*, 431 (2018) 2-14.
- [32] U. Caldera, D. Bogdanov, S. Afanasyeva, C. Breyer, Role of seawater desalination in the management of an integrated water and 100% renewable energy based power sector in Saudi Arabia, *Water*, 10 (2017) 3.
- [33] M. Fawzi, M.I. Al Ajlouni, Water Safety Plan Resources In Jordan Quantity and Quality, (2021).
- [34] E. ALEISA, A. ALJUWASSERI, K. ALSHAYJI, A. AL-MUTIRI, ENVIRONMENTAL IMPACTS OF REVERSE OSMOSIS IN WASTEWATER TREATMENT VERSUS DESALINATION TO MEND THE WATER CYCLE: A LIFE CYCLE ASSESSMENT, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 257 (2022) 27-37.
- [35] R.A. Al-Masri, J. Chenoweth, R.J. Murphy, Exploring the Status Quo of Water-Energy Nexus Policies and Governance in Jordan, *Environmental Science & Policy*, 100 (2019) 192-204.
- [36] S.M. East, N. Africa, A.R. Egypt, ROAD AHEAD.
- [37] D.M. Warsinger, Desalination Innovations Needed to Ensure Clean Water for the Next 50 Years, *The Bridge*, (2020).
- [38] E.J. Campos, F. Vieira, G. Cavalcante, B. Kjerfve, M. Abouleish, S. Shahriar, R. Mohamed, A.L. Gordon, Impacts of brine disposal from water desalination plants on the physical environment in the Persian/Arabian Gulf, *Environmental Research Communications*, 2 (2020) 125003.
- [39] M.A. Dawoud, S.O. Alaswad, H.A. Ewea, R.M. Dawoud, Towards sustainable desalination industry in Arab region: challenges and opportunities, 4th international water desalination conference: future of water desalination in Egypt and the Middle East, 2020.
- [40] M.A. Dawoud, Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study, *International Journal of Environment and Sustainability*, 1 (2012).
- [41] J. Daher, Water scarcity, mismanagement and pollution in Syria, European University Institute, 2022.

[42] R.A. Greer, K. Lee, A. Fencel, G. Sneegas, Public–Private Partnerships in the Water Sector: The Case of Desalination, *Water Resources Management*, 35 (2021) 3497-3511.

[43] N. Ghaffour, The challenge of capacity-building strategies and perspectives for desalination for sustainable water use in MENA, *Desalination and Water Treatment*, 5 (2009) 48-53.

[44] F. Birol, The future of hydrogen: seizing today's opportunities, IEA Report prepared for the G, 20 (2019).

[45] A. Boretti, L. Rosa, Reassessing the projections of the world water development report, *NPJ Clean Water*, 2 (2019) 1-6.

مسودة للتقارير

مسودة للنفقات

