



تنمية قدرات البلدان الأعضاء في الإسكوا
على معالجة الترابط بين المياه والطاقة
لتحقيق أهداف التنمية المستدامة

مجموعة أدوات تشغيلية للترابط بين المياه والطاقة
نموذج الطاقة المتجددة



الأمم المتحدة

الإسكوا
ESCWA

تنمية قدرات البلدان الأعضاء في الإسكوا
على معالجة الترابط بين المياه والطاقة
لتحقيق أهداف التنمية المستدامة

مجموعة أدوات تشغيلية للترابط بين المياه والطاقة
نموذج الطاقة المتجددة



طلبات (إعادة) طبع مقتطفات من المطبوعة أو تصويرها توجّه إلى لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)، بيت الأمم المتحدة، ساحة رياض الصلح، صندوق بريد: 11-8575، بيروت، لبنان.

جميع الطلبات الأخرى المتعلقة بالحقوق والتراخيص ولا سيما الحقوق الثانوية توجّه أيضاً إلى الإسكوا.

البريد الإلكتروني: publications-escwa@un.org: الموقع الإلكتروني: www.unescwa.org

مطبوعة للأمم المتحدة صادرة عن الإسكوا.

ليس في التسميات المستخدمة في هذا المنشور، ولا في طريقة عرض مادته، ما يتضمن التعبير عن أي رأي كان للأمانة العامة للأمم المتحدة بشأن المركز القانوني لأي بلد، أو إقليم، أو مدينة، أو منطقة، أو بشأن سلطات أي منها، أو بشأن تعيين تخومها أو حدودها.

لا يعني ذكر أسماء ومنتجات تجارية أن الأمم المتحدة تدعمها.

جرى تدقيق المراجع حيثما أمكن.

المقصود بالدولار دولار الولايات المتحدة الأمريكية، ما لم يُشر إلى خلاف ذلك.

تتألف رموز وثائق الأمم المتحدة من حروف وأرقام باللغة الإنكليزية ويعني إيراد أحد هذه الرموز الإحالة إلى إحدى وثائق الأمم المتحدة.

إن الآراء الواردة في هذه المادة الفنية هي آراء المؤلفين، وليست بالضرورة آراء الأمانة العامة للأمم المتحدة.

E/ESCWA/SDPD/2017/TOOLKIT.2

17-00164



شكر وتنويه

أعدّ نموذج الأدوات التشغيلية للترابط بين المياه والطاقة «الطاقة المتجددة» الدكتور حسن عرفات، الأستاذ في دائرة الهندسة الكيماوية والبيئية في معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا، والاستشارية المستقلة الدكتورة سناء بيراني. وراجع النموذج قسم موارد الطاقة والمياه في شعبة سياسات التنمية المستدامة في الإسكوا في بيروت. وقام بتحديد الموضوعات التي تناولها النموذج بصورة مشتركة أعضاء لجنة الطاقة وأعضاء لجنة المياه في الإسكوا.



9	مقدمة
15	تقييم استخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة في تطبيقات المياه ومياه الصرف الصحي
42	تقييم تكنولوجيات الطاقة المتجددة لإنتاج الكهرباء
51	مؤشرات الأداء الرئيسية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة
53	تكنولوجيات الطاقة المتجددة - المنظور المالي
58	الخلاصة والتوصيات
60	المرفق
64	الحواشي
66	المراجع

قائمة الجداول

18	الجدول 1. القيم النموذجية لكل معيار تشغيلي في إنتاج الغاز الحيوي في محطات معالجة مياه الصرف الصحي
28	الجدول 2. محطات الطاقة الشمسية المركزة في البلدان العربية
32	الجدول 3. الخصائص الرئيسية لمختلف عمليات تحلية المياه
32	الجدول 4. تباين خصائص مياه البحر في المنطقة العربية
34	الجدول 5. خصائص العمليات الأكثر شيوعاً لتحلية المياه باستخدام المصادر المتجددة
43	الجدول 6. الأهداف التي حددها معظم البلدان العربية لنشر استخدام الطاقة المتجددة، 2013
45	الجدول 7. الطاقة الشمسية والطاقة النووية: تحليل نوعي مقارنة
46	الجدول 8. الطاقة المتجددة: السعة المركبة والأهداف في البلدان العربية
49	الجدول 9. أبرز استخدامات المياه لإنتاج الطاقة والآثار المحتملة على جودة المياه
52	الجدول 10. ملخص عن أبرز المؤشرات حول فعالية الطاقة المتجددة
54	الجدول 11. الكلفة المقدرة لتوليد الكهرباء بواسطة الغاز الحيوي بتقنية الهضم اللاهوائي
56	الجدول 12. تكاليف رأس المال للتقنيتين الرئيسيتين لتحلية المياه بواسطة الطاقة الشمسية المركزة

قائمة الأشكال

10	الشكل 1. الترابط في أمن المياه والطاقة والغذاء
11	الشكل 2. فرص الطاقة المتجددة ومختلف عناصر الترابط بين المياه والطاقة والغذاء

12	الشكل 3. توزيع انبعاثات غازات الدفيئة من حيث مصدرها في العالم، 2010
12	الشكل 4. متوسط النمو السنوي العالمي في القدرة على إنتاج الطاقة المتجددة والوقود الحيوي في ثلاثة من قطاعات الاستخدام النهائي: الطاقة والتسخين والنقل
13	الشكل 5. الحصة الإجمالية للطاقة المتجددة حسب التطبيقات والقطاعات في الفترة 2014/2013 والحصة المتوقعة وفقاً لخارطة طريق الطاقة المتجددة
14	الشكل 6. نسبة توليد الطاقة الإجمالية في عام 2013 والنسبة المتوقعة لعام 2030
15	الشكل 7. كمية الطاقة اللازمة لتوفير متر مكعب واحد من المياه المأمونة للاستهلاك البشري من مختلف المصادر
16	الشكل 8. استخدام الطاقة المتجددة في سلسلة إمدادات المياه
17	الشكل 9. رسم تخطيطي لعملية معالجة مياه الصرف الصحي في محطة المعالجة المنتجة للطاقة
21	الشكل 10. رسم تخطيطي لمضخة مياه تعمل على الطاقة الشمسية
22	الشكل 11. رسم تخطيطي لنظام هجين مزود بمولد احتياطي لتطبيقات ضخ المياه
25	الشكل 12. مبادئ التسخين الشمسي الحراري لمياه الغلايات البخارية
25	الشكل 13. الجهات المعنية الرئيسية المشاركة في برنامج بروسول في مراحله الأولى والثانية
26	الشكل 14. القدرة السنوية على تحلية المياه، بحسب المناطق
27	الشكل 15. القدرة التراكمية على تحلية المياه في عام 2015، بحسب البلد
31	الشكل 16. تحلية المياه باستخدام الطاقة المتجددة في العالم حسب مصادر الطاقة، 2009
31	الشكل 17. النمط الأمثل من حيث الكلفة لإمداد المياه مستقبلاً في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في ظل تغير المناخ (سيناريو بقاء الأمور على حالها)، 2000-2050
33	الشكل 18. المجالات الممكنة لإدراج مصادر الطاقة المتجددة في مختلف تكنولوجيات تحلية المياه
35	الشكل 19. رسم تخطيطي لنظام خلايا فوتوفلطية مع تكنولوجيا التناضح العكسي
36	الشكل 20. رسم تخطيطي لنظام الطاقة الشمسية المركزة/التقطير المتعدد الآثار
38	الشكل 21. أنواع الوقود الحيوي ومراحل تطور إنتاجه، 2011
38	الشكل 22. رسم تخطيطي لعملية إنتاج مختلف المواد الصناعية من الطحالب
40	الشكل 23. رسم تخطيطي لنظام مقترح حول الاستخراج المحسن للنفط من الرمال النفطية بواسطة الطاقة الشمسية
41	الشكل 24. إمكانية تطبيق النظام في مصافي البترول: التهذيب والتكسير باستخدام الطاقة الشمسية خارج الموقع
42	الشكل 25. حصة الوقود بمختلف أنواعه من مجموع مصادر توليد الكهرباء حسب مناطق العالم، 2013
47	الشكل 26. رسم بياني تطبيقي لدمج موارد طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية
48	الشكل 27. مخطط المياه الافتراضية المستعملة في إنتاج الطاقة
50	الشكل 28. استخدام المياه لإنتاج الطاقة الأولية

51	الشكل 29. استخدام المياه لتوليد الكهرباء بواسطة تكنولوجيا التبريد
54	الشكل 30. التكاليف والوفورات المرتبطة بمصادر الطاقة المتجددة حسب القطاعات، 2030
55	الشكل 31. تكاليف التسخين الشمسي للمياه مقارنة بتكاليف التسخين بواسطة الكهرباء والغاز الطبيعي في مناطق مختلفة
55	الشكل 32. تكاليف المياه المحلاة في مختلف عمليات التحلية بالطاقة المتجددة
56	الشكل 33. الكلفة المتوازنة لتوليد الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة الواسعة النطاق، 2010 و2014
57	الشكل 34. الكلفة المتوسطة المرجحة لتوليد الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة الواسعة النطاق حسب المنطقة مقارنة بتكاليف توليد الطاقة من الوقود الأحفوري، 2013/2014

مقدمة

في إطار مساعدة البلدان الأعضاء على وضع نهج متكامل لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، تنفذ اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا) مشروع حساب الأمم المتحدة للتنمية الذي يهدف إلى تنمية قدرات الدول الأعضاء في مجال دراسة الترابط بين المياه والطاقة.

وتتبع الإسكوا مسارين متكاملين ومتوازيين لتنفيذ هذا المشروع. يتوجه الأول إلى كبار المسؤولين في وزارات المياه والطاقة، الذين سيتلقون تدريباً حول كيفية إدماج هذا الترابط في السياسات والاستراتيجيات الوطنية والإقليمية باستخدام مجموعة أدوات متعلقة بالسياسات الإقليمية. وتستند هذه المجموعة إلى سبع أولويات حددها الاجتماع التشاوري على مستوى الحكومات في عام 2012¹. وأقرت لجنتنا الطاقة والموارد المائية في الإسكوا الأولويات السبع كما يلي²:

- أ. التوعية ونشر المعرفة؛
- ب. تنسيق السياسات العامة؛
- ج. دراسة الترابط بين أمن المياه وأمن الطاقة؛
- د. تحسين الكفاءة؛
- هـ. زيادة المعرفة في الخيارات التكنولوجية؛
- و. الترويج للطاقة المتجددة؛
- ز. التصدي لتغير المناخ وللحوادث الطبيعية.

ويتوجه المسار الثاني إلى مقدمي خدمات المياه والطاقة من خلال التركيز على ثلاثة مجالات فنية تتناولها مجموعة أدوات تطبيقية مؤلفة من ثلاثة نماذج:

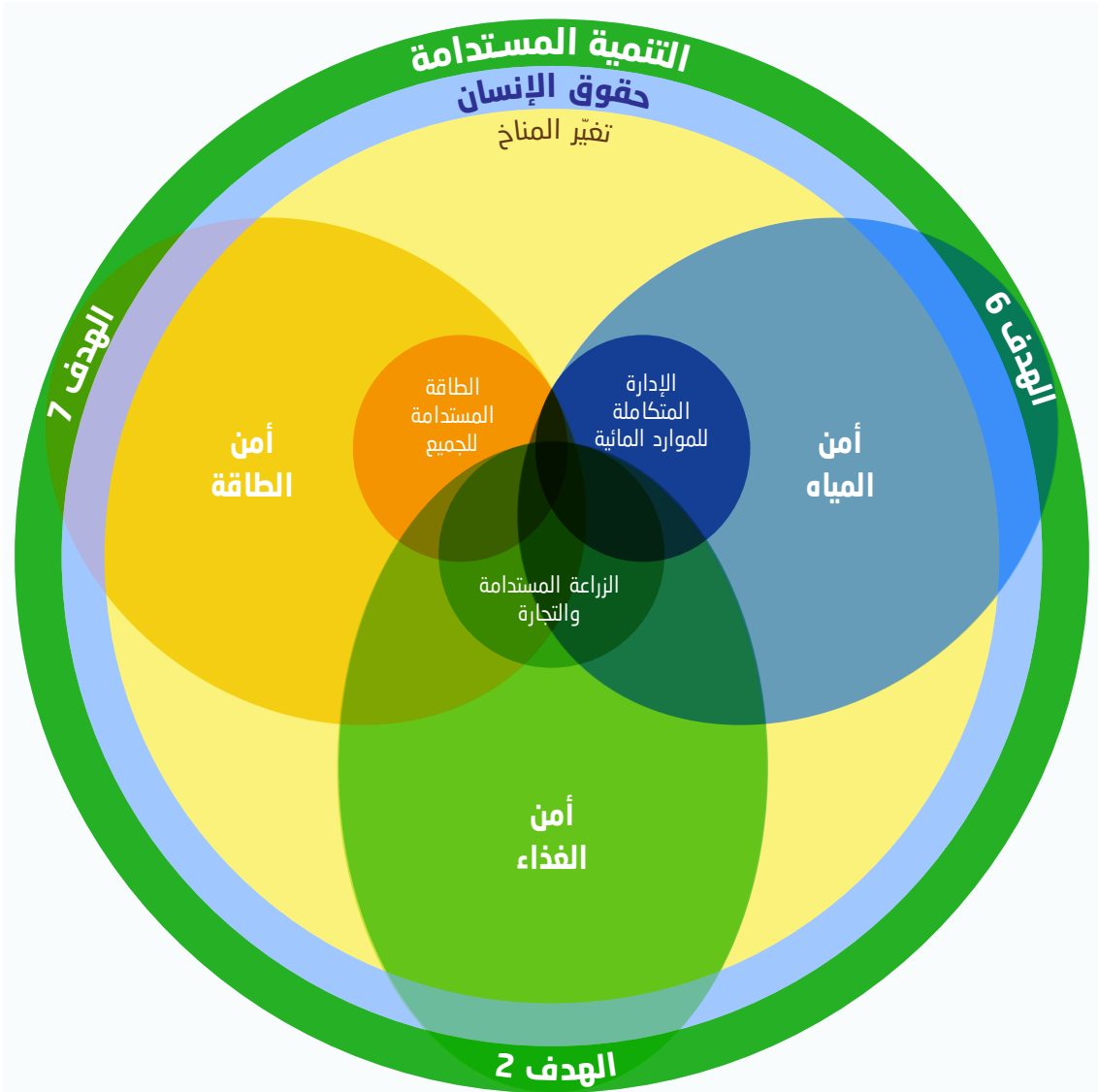
- أ. كفاءة الموارد: تحسين كفاءة إنتاج الموارد والخدمات المتعلقة بالمياه والطاقة واستهلاكها؛
- ب. نقل التكنولوجيا: مراعاة قضايا المياه والطاقة عند نقل التكنولوجيات الجديدة على المستوى الإقليمي؛
- ج. الطاقة المتجددة: تقييم التكاليف والفوائد الناجمة عن تطبيق تكنولوجيات الطاقة المتجددة في المنطقة.

ويناقش كل نموذج في ورشة عمل فنية إقليمية من بين ثلاث ورشات تجمع بين مشاركين يزاولون أنشطة مماثلة في مختلف القطاعات.

معلومات أساسية

يبين الترابط بين المياه والطاقة والغذاء الوثيقة بين هذه الموارد الثلاثة التي يصعب فصلها عن بعضها³. ومع أن الترابط يُعالج عادةً للدلالة على العلاقة بين المياه والطاقة والغذاء، أُضيفت إليه في بعض المراجع أبعاد أخرى (مثل المناخ⁴)، وفي مراجع أخرى استُبدل الغذاء بعدد آخر (مثل الأراضي⁵). ويعرض الشكل 1 رسماً تخطيطياً للترابط في أمن المياه والطاقة والغذاء من منظور الإسكوا. ويبين مختلف أهداف التنمية المستدامة والأطر المؤسسية وأطر السياسة العامة (مثل الإدارة المتكاملة للموارد المائية من أجل أمن المياه) لكل بعد من أبعاد هذا الترابط. وتجدر الإشارة إلى أن المياه والطاقة هما دوماً عنصران متكاملان في الترابط، بغض النظر عن الهيكلية العامة للترابط وعن المؤسسة التي تقترحها. لذا ستتناول هذه الوثيقة هذين البعدين بالتحديد.

الشكل 1. الترابط في أمن المياه والطاقة والغذاء



المصدر: United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA), 2015.

وتتعدد أساليب تعزيز الترابط بين المياه والطاقة باستخدام الطاقة المتجددة. ويبين الشكل 2 العلاقات والفرص ذات الصلة. ويساعد استخدام الطاقة المتجددة على تحسين أمن المياه من خلال توفير الطاقة اللازمة لتشغيل الأنشطة المائية مثل توزيع المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي، وعلى تعزيز أمن الطاقة من خلال توفير مصادر الطاقة الأقل استهلاكاً للمياه.

للطاقة المتجددة إذاً أهمية كبيرة في أي نقاش حول مستقبل الطاقة المستدامة في المنطقة العربية، ولا بد من التركيز على مصادر الطاقة البديلة لتتمكن البلدان العربية من تحقيق أهداف سياساتها الوطنية المتعلقة بالطاقة. وينطوي استخدام الطاقة المتجددة على الكثير من المزايا منها الحد من التلوث الذي ينجم لا محالة عن استخدام مصادر الطاقة التقليدية، وخفض انبعاثات غازات الدفيئة، وتعزيز أمن الطاقة عبر تنويع مصادرها، وتحسين إمكانية الحصول على الطاقة، وتسهيل التنمية الاقتصادية من خلال استحداث الوظائف، وتخفيف الاعتماد على مصادر الطاقة غير المتجددة، والحد من النزاعات الناجمة عن استخدام مصادر الطاقة التقليدية المحدودة⁶. ولهذه المزايا أهمية كبيرة بالنسبة إلى البلدان العربية كونها تشهد تزايداً سريعاً في معدلات التوسع الحضري، وارتفاعاً في معدلات الطلب غير المُلبى على المياه، وتسجل أحد أعلى معدلات استهلاك الطاقة في العالم. لذا يمكن لاستخدام الطاقة المتجددة أن يساعد البلدان العربية على معالجة هذه المسائل وتحقيق التنمية المستدامة. ويبين الشكل 3، مثلاً، أن الطاقة هي أكبر مصدر لانبعاثات غازات الدفيئة، واستبدال مصادر الوقود التقليدية بمصادر الطاقة المتجددة يمكنه إذاً الحد من الانبعاثات وتخفيف آثار تغيّر المناخ. ويؤكد ذلك أهمية النظر في قضايا المناخ كجزء من الترابط، على النحو المبين في الشكل 1.

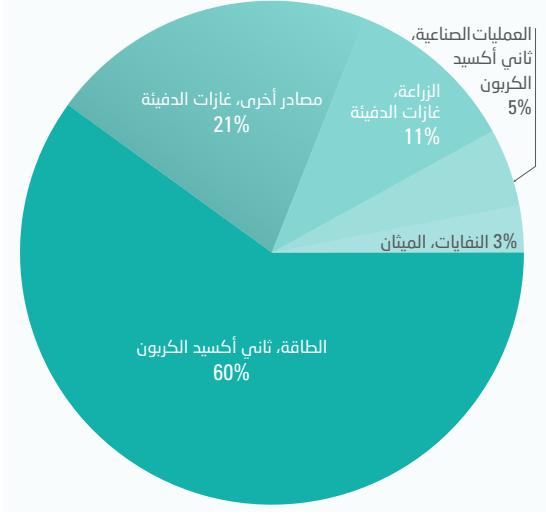
بيد أن استخدام الطاقة المتجددة ينطوي أيضاً على سلبيات منها الطبيعة المتقطعة لمعظم مصادر الطاقة المتجددة، وارتفاع تكاليف رأس المال (بسبب ارتفاع كلفة تكنولوجيات تحويل الطاقة من بين أسباب أخرى)، وارتفاع التكاليف المتوازنة، واحتمال انتشار هواجس بيئية واجتماعية (مثل مناقشة مسألة الغذاء مقابل الوقود في ما يتعلق باستخدام موارد الكتلة الأحيائية)، وزيادة المتطلبات المكانية لبعض تكنولوجيات الطاقة المتجددة. ونظراً للطبيعة المتقطعة لبعض مصادر الطاقة المتجددة، لا بد من توفير طاقة احتياطية (من خلال المحطات/ مصادر الطاقة التقليدية في حال استعمال النظم الواسعة النطاق والموصولة بالشبكة الكهربائية، وتخزين الطاقة في حال استعمال النظم اللامركزية لتوليد الطاقة). ومن المتوقع تخطي بعض هذه السلبيات مع التطور المستمر

الشكل 2. فرص الطاقة المتجددة ومختلف عناصر الترابط بين المياه والطاقة والغذاء



المصدر: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2015a

الشكل 3. توزيع انبعاثات غازات الدفيئة من حيث مصدرها في العالم، 2010



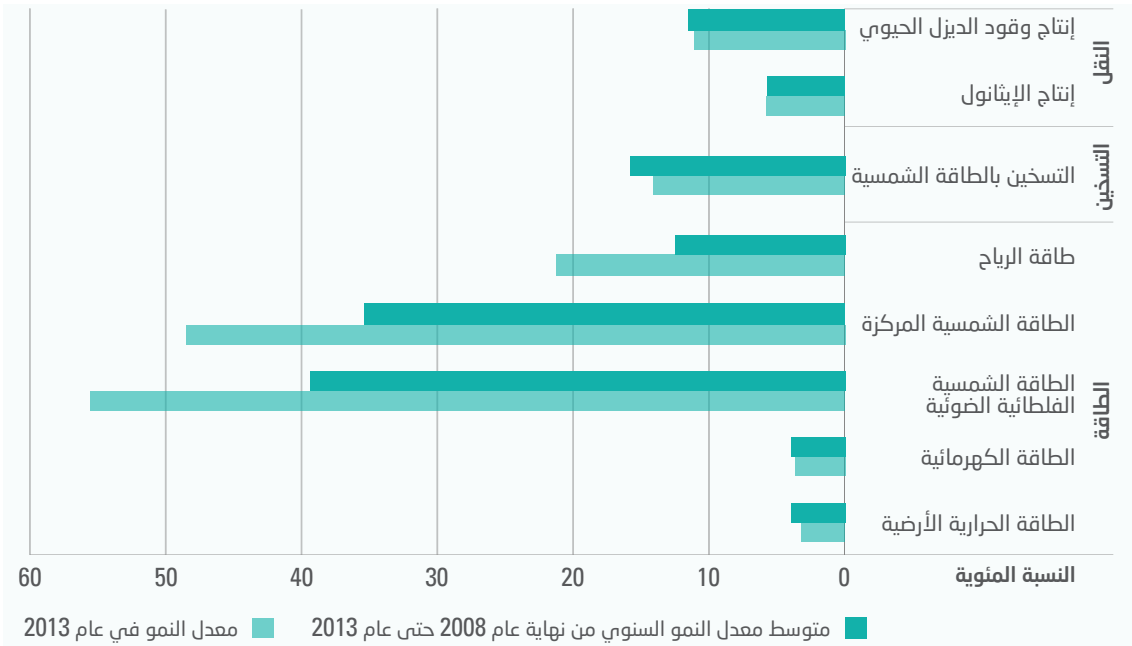
المصدر: IRENA, 2016a.

لتكنولوجيات الطاقة المتجددة والترويج لها على نطاق أوسع⁷. وكلما زادت المتطلبات المكانية لبعض تكنولوجيات الطاقة المتجددة، كلما زادت قدرتها على منافسة النظم الأرضية الأخرى مثل الحفاظ على التنوع البيولوجي والزراعة (أي الغذاء). وعند مراعاة هذه النقطة، يتضح سبب استبدال بُعد الغذاء بُعد الأرض في بعض الدراسات المتعلقة بالترابط.

ويبين الشكل 4 نمواً في نشر استخدام الطاقة المتجددة في العالم خلال السنوات الماضية ويظهر الشكل 5 الزيادة المتوقعة في النمو في الأعوام المقبلة. كما يبين الشكل 4 زيادة استخدام الطاقة المتجددة في مختلف قطاعات الاستخدام النهائي بين عامي 2008 و2013، والنمو الكبير الذي سُجل في عام 2013 والذي يساوي أو يزيد عن متوسط النمو السنوي المسجل خلال الأعوام الأربعة السابقة. ومن المتوقع أن يستمر هذا النمو الملحوظ في نشر استخدام الطاقة المتجددة.

في عام 2011، أطلق الأمين العام للأمم المتحدة السيد بان كي مون، مبادرة عالمية بعنوان الطاقة المستدامة للجميع. وتشمل هذه المبادرة جميع قطاعات المجتمع وتهدف إلى تحقيق ثلاثة أهداف بحلول عام 2030،

الشكل 4. متوسط النمو السنوي العالمي في القدرة على إنتاج الطاقة المتجددة والوقود الحيوي في ثلاثة من قطاعات الاستخدام النهائي: الطاقة والتسخين والنقل



المصدر: IRENA, 2015a.

ومنها مضاعفة حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة العالمي⁸. وفي هذا السياق، أطلق بعض المنظمات مثل الوكالة الدولية للطاقة والوكالة الدولية للطاقة المتجددة خارطة طريق لمستقبل الطاقة المتجددة. وفي إطار خارطة طريق الطاقة المتجددة التي أطلقتها الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، جرى استعراض أفضل الممارسات لمختلف البلدان، ومناقشة سُبل مضاعفة حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة العالمي بحلول عام 2030 (مقارنة بعام 2014)⁹. ويبين الشكل 5 النمو المتوقع لحصة الطاقة المتجددة في مختلف التطبيقات والقطاعات في عام 2030، وفقاً لخارطة طريق الطاقة المتجددة، مقارنة بالقيم الفعلية المسجلة في الفترة 2013/2014. ومن الواضح أن القطاعين الأكثر حاجة إلى زيادة استخدام الطاقة المتجددة هما النقل والصناعة، بما في ذلك قطاع توليد الطاقة.

ويعطي الشكل 6 فكرة عن الزيادة المتوقعة في استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الطاقة بين عامي 2013 و2030 (وفقاً لخارطة طريق الطاقة المتجددة)، ونسبة مساهمة مختلف مصادر الطاقة في عملية توليد الطاقة عموماً. ومن المتوقع أن يبقى الفحم والغاز الطبيعي مصدرين هامين لتوليد الطاقة، إلا أن التوقعات تشير أيضاً إلى تنام ملحوظ في نسبة استخدام بعض التكنولوجيات مثل طاقة الرياح، والطاقة الشمسية (الفوتوفلطية)، وطاقة حرارة باطن الأرض.

وفي المنطقة العربية الكثير من الإمكانيات المتاحة لاستخدام الطاقة المتجددة. ويناقش هذا النموذج إمكانية تطبيق تكنولوجيات الطاقة المتجددة في قطاعي المياه والطاقة في البلدان العربية. وأهم الإمكانيات المتوفرة في المنطقة هي في مجال استخدام تكنولوجيات الطاقة الشمسية (أي الطاقة الشمسية المركزة والطاقة

الشكل 5. الحصة الإجمالية للطاقة المتجددة حسب التطبيقات والقطاعات في الفترة 2014/2013 والحصة المتوقعة وفقاً لخارطة طريق الطاقة المتجددة



المصدر: IRENA, 2016a.

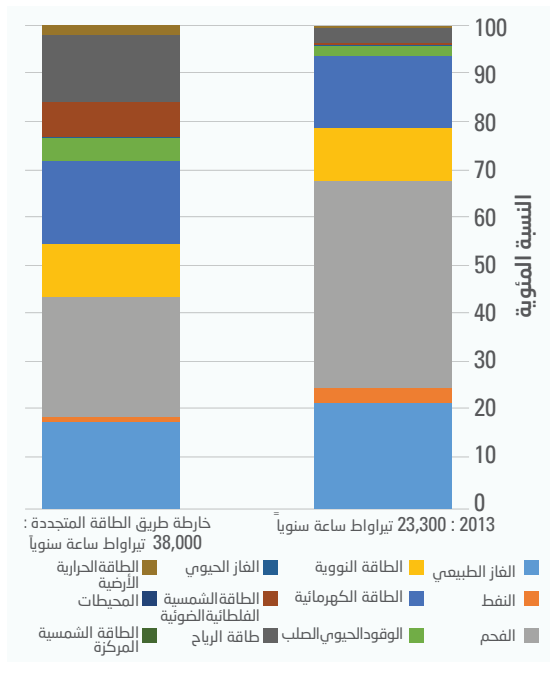
الشمسية الفوتوفلطية). وتتوفر بعض الإمكانيات للاستفادة من طاقة الرياح، وطاقة حرارة باطن الأرض، والطاقة الكهرومائية، ولكنها تنحصر ببعض البلدان فقط¹⁰. وتطبق مشاريع واسعة النطاق للطاقة الكهرومائية في البلدان التي تضم أحواض أنهار (مثل العراق ومصر¹¹)، وهناك إمكانيات لتطبيق مشاريع الطاقة المائية الصغيرة في المنطقة. وأقل الإمكانيات في المنطقة العربية كلها هي في مجال استخدام طاقة الكتلة الأحيائية من حيث توفر الكتلة الأحيائية الحديثة لإنتاج الوقود الحيوي. ولكن استخدام المصادر التقليدية للكتلة الأحيائية لإنتاج الطاقة، ولا سيما لأغراض الطهي، شائع جداً في أقل البلدان العربية نمواً¹². ويركز هذا النموذج على تكنولوجيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح من بين مصادر الطاقة المتجددة، نظراً لوفرة الإمكانيات المتاحة لتطبيقها، ويتناول أيضاً استخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة الأخرى في تطبيقات أو بلدان معينة حسب الاقتضاء.

الأهداف

تهدف مجموعة الأدوات هذه إلى تعزيز قدرة البلدان الأعضاء في الإسكوا على تحقيق الإدارة المتكاملة والمستدامة للموارد المائية ومصادر الطاقة، ما يسهم في تحقيق التنمية المستدامة فيها. وتركّز على تنمية القدرات الفنية للمسؤولين الحكوميين الذين يديرون عملية توفير خدمات المياه والطاقة في البلدان الأعضاء للإسكوا أو يشرفون عليها. كما تزودهم بالاستراتيجيات التكنولوجية التي يمكن استخدامها لمراعاة الترابط بين المياه والطاقة في العمليات والأنشطة والمشاريع ذات الصلة.

ومع أن الترابط بين المياه والطاقة يُعالج من خلال السياسات والأطر المؤسسية¹³، يعتمد تطبيقه على التدخلات الفنية التي قد تساعد على تحسين كفاءة استخدام الموارد أو فعاليتها¹⁴. ولا يمكن أن ينجح تنفيذ هذه التكنولوجيات إلا من خلال الحصول على معلومات شاملة عن الخيارات التكنولوجية المتاحة، حتى يتسنى اتخاذ قرارات مستنيرة. وهذه هي المعلومات التي تسعى مجموعة الأدوات إلى تقديمها.

الشكل 6. نسبة توليد الطاقة الإجمالية في عام 2013 والنسبة المتوقعة لعام 2030



المصدر: IRENA, 2016a.

ويهدف هذا النموذج التطبيقي حول الترابط بين المياه والطاقة إلى المساعدة على بناء القدرات للتعاون وتبادل الخبرات بين مختلف التخصصات، باستخدام لغة مشتركة ومجموعة مشتركة من أدوات التقييم والتقنيات والمؤشرات لترويج استخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة على المستوى التشغيلي أي في التخطيط للاستثمار أو في تشغيل وصيانة مرافق المياه والطاقة أو محطات معالجة مياه الصرف الصحي. ويناقش التكاليف والمنافع المتعلقة بتطبيق تكنولوجيات الطاقة المتجددة الملائمة في المنطقة العربية، لا سيما في إطار الترابط بين المياه والطاقة. وتتضمن أيضاً مبادئ توجيهية للهيئات المسؤولة عن خدمات المياه والطاقة. وتتناول مؤشرات الأداء الرئيسية المستخدمة في قطاعي المياه والطاقة، لا سيما في ما يتعلق بالطاقة المتجددة. والتحليل القائم على استخدام هذه المؤشرات يتيح التخطيط على المدى

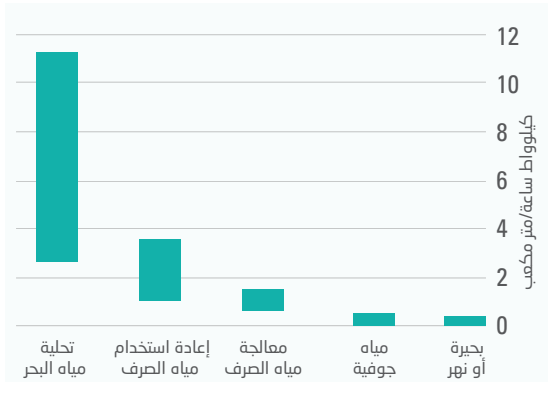
البعيد ويعزز الكفاءة في إدارة الموارد الطبيعية الوطنية. ولضمان فعالية هذا التخطيط، لا بد من جمع ما يكفي من البيانات والإحصاءات لتعزيز القدرات التحليلية، ولا سيما في مجال استخدام الطاقة المتجددة، ما يسهّل وضع السياسات وتقييمها على أساس الأدلة في المجالات المترابطة المتعلقة بالمياه والطاقة.

تقييم استخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة في تطبيقات المياه ومياه الصرف الصحي

يشير الترابط بين المياه والطاقة إلى العلاقة بين الموارد المائية المستخدمة لإنتاج الطاقة (كما في حال الطاقة الكهرومائية وعمليات التبريد في محطات توليد الطاقة) والطاقة المستخدمة في استخراج المياه على أنواعها (مثل مياه الشرب، ومياه الصرف الصحي) ومعالجتها، وتوزيعها، والتخلص منها. وبما أن هذا النموذج يركّز على الطاقة المتجددة، يتناول القسم التالي علاقة الترابط بين المياه والطاقة. ويبين الشكل 7 كمية الطاقة اللازمة لتوفير متر مكعب واحد من المياه المأمونة للاستهلاك البشري من مختلف المصادر. ومع أن كمية الطاقة اللازمة لمعالجة مياه البحر متفاوتة جداً، من الواضح أنها الأعلى مقارنة بسائر مصادر الطاقة. وهذا ينطبق على البلدان العربية التي تعتمد على تحلية المياه لتلبية حاجتها إلى المياه. ويبين الشكل 8 المراحل التي يمكن فيها استخدام مصادر الطاقة المتجددة في سلسلة إمدادات المياه، وتُفضّل كل مرحلة منها في الفقرات التالية. وقد يكون من المفيد العودة إلى بيانات الشكل 7 عند مناقشة مرحلة «تحلية المياه/معالجتها» ومرحلة «معالجة مياه الصرف الصحي» في الشكل 8.

معالجة المياه ومياه الصرف

الشكل 7. كمية الطاقة اللازمة لتوفير متر مكعب واحد من المياه المأمونة للاستهلاك البشري من مختلف المصادر

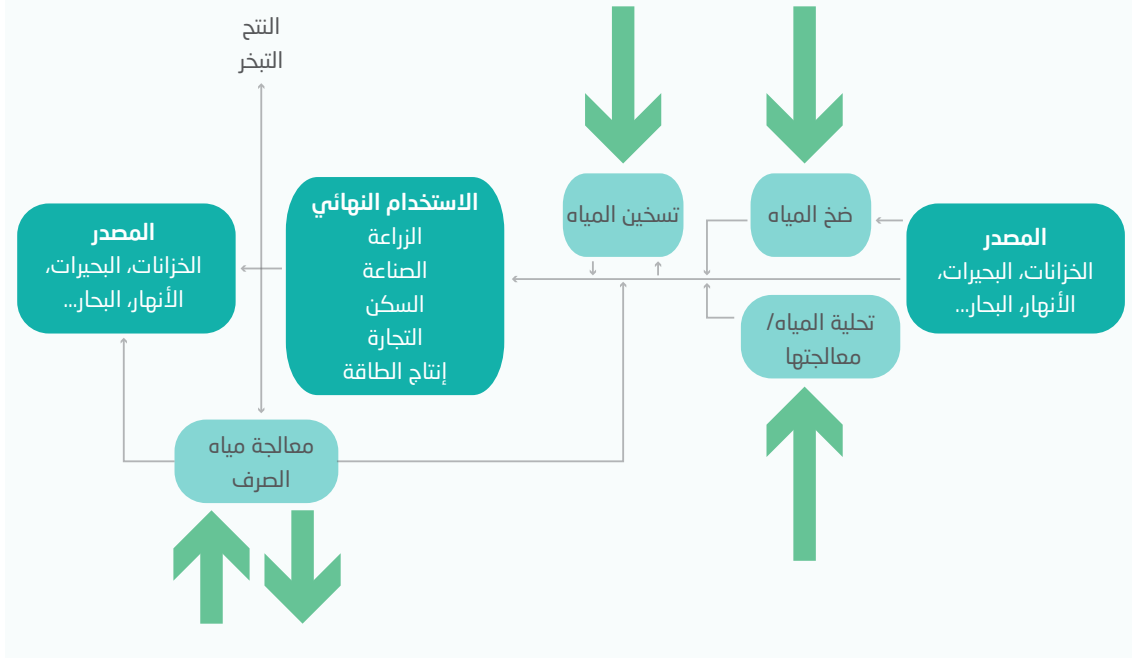


المصدر: United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), 2014

كما هو مبين في الشكل 7، تتطلب عمليات معالجة مياه الصرف الصحي كمية من الطاقة، يمكن توفيرها من مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح والكتلة الأحيائية والوقود الحيوي¹⁵. وللطاقة الشمسية أهمية خاصة في معالجة مياه الصرف. إذ يمكن استخدام الإشعاع الشمسي المباشر أثناء المعالجة الفعلية وإزالة السمّية القائمة على استعمال المواد الكيميائية (التي تساعد على تحسين أداء محطة المعالجة) إلى جانب المعالجة الأحيائية¹⁶.

ويمكن تحويل الحمأة الناجمة عن المرحلتين الأولى والثانوية لمعالجة مياه الصرف إلى غاز حيوي (وهو أساساً خليط من ثاني أكسيد الكربون والميثان) باستخدام الهضم اللاهوائي، كما هو مبين في الشكل 9 الذي يَصوّر هذه العملية المتّبعة في سليكون فالي. وبدوره، يُحوّل الغاز الحيوي إلى طاقة كهربائية

الشكل 8. استخدام الطاقة المتجددة في سلسلة إمدادات المياه



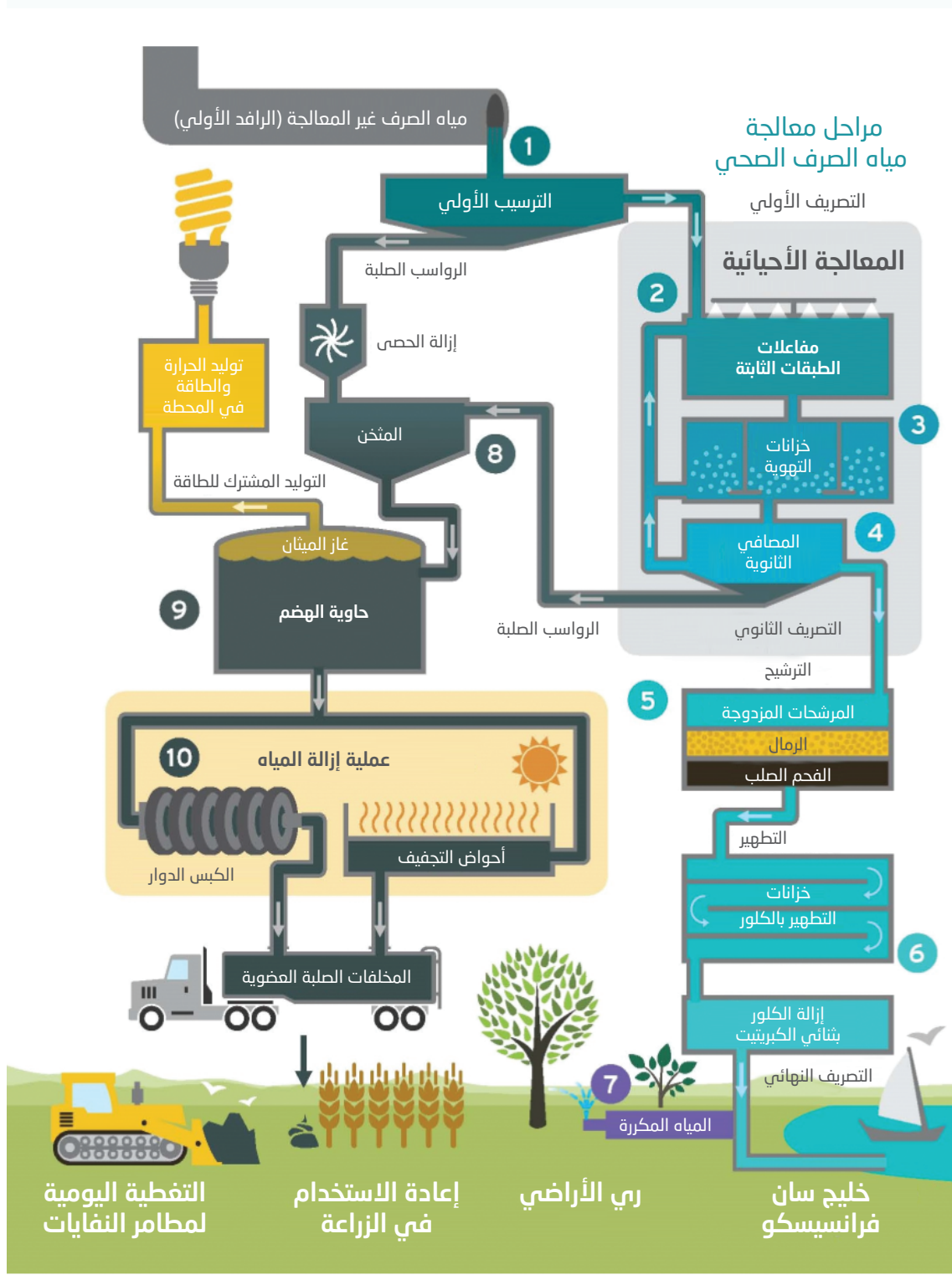
المصدر: IRENA, 2015a.
ملاحظة: * تشير الأسهم الخضراء إلى حيث يمكن استخدام الطاقة المتجددة.

تُستخدم في تشغيل محطة معالجة مياه الصرف. ويبين الشكل 9 مراحل إنتاج الطاقة واستهلاكها في محطة المعالجة. ومنافع تكنولوجيا الهضم اللاهوائي المستخدمة لحمأة مياه الصرف معترف بها وقائمة أصلاً في عدة بلدان.

كما أُدرج في نُظم المعالجة نظام استرداد الحرارة بهدف زيادة كفاءة الطاقة. من هنا، يُطلق على هذا النظام تسمية «نظام مشترك لتوليد الطاقة والحرارة»، يتسم بفعالته من حيث الكلفة وبموثوقيته لمحطات معالجة مياه الصرف القائمة على الهضم اللاهوائي. ويمكن استخدام الطاقة الحرارية المنتجة لتلبية متطلبات التدفئة وتوفير الحمل الحراري اللازم للهاضمات. ونظام التوليد المشترك يزود المحطة بالكهرباء لقاء تكاليف منخفضة ويقلص الحاجة إلى الوقود من مصادر خارجية¹⁷. غير أن منافع هذا النظام محدودة في البلدان العربية لأن درجات الحرارة مرتفعة نسبياً ومماثلة لتلك المطلوبة لعملية الهضم اللاهوائي. والمناخ هو فعلاً العامل الذي يحدد الحرارة اللازمة للهاضمات¹⁸. وقد يستفيد بعض المناطق في فترات ومواسم معينة من نظام التوليد المشترك خاصة عند انخفاض درجات الحرارة. ولتحسين كفاءة نظام التوليد المشترك، يُخفّض مستوى المياه في الحمأة قبل معالجتها بواسطة الهاضم اللاهوائي، أو تعالج المياه مسبقاً عبر تكنولوجيا التفكيك التي تساعد على تحسين إنتاج الغاز¹⁹.

ويمكن تحويل الطاقة الكيميائية في الغاز الحيوي إلى كهرباء عبر محركات الاحتراق الداخلي أو التربينات الصغيرة. وتختلف قدرات المحركات ذات الاحتراق الداخلي (من بضعة كيلواطات إلى أكثر من 4 ميغاواط)، في حين أن التربينات الصغيرة لديها نطاق أصغر يتراوح بين 30 و250 كيلواط. غير أن هذه التكنولوجيات محدودة من حيث كفاءة الطاقة (25-35 في المائة)، لذا تزايد التركيز مؤخراً على بدائل أخرى مثل خلايا الوقود²⁰.

الشكل 9. رسم تخطيطي لعملية معالجة مياه الصرف الصحي في محطة المعالجة المنتجة للطاقة



المصدر: Silicon Valley Clean Water (SVCW), 2012.

وبشكل عام، يسمح مليون غالون يومي من مياه الصرف بتوليد الغاز الحيوي الذي ينتج بدوره 26 كيلوواط من الكهرباء و2.4 مليون وحدة حرارية بريطانية (Btu) يومياً عبر نُظْم التوليد المشترك²¹. ويبيّن الجدول 1 القيم النموذجية لكل معيار تشغيلي في محطات معالجة مياه الصرف التي تستخدم الهاضمات اللاهوائية، إلى جانب وصف لبعض المعايير.

الجدول 1. القيم النموذجية لكل معيار تشغيلي في إنتاج الغاز الحيوي في محطات معالجة مياه الصرف الصحي

المعايير التشغيلية	القيم النموذجية	الوصف
فترة الاحتفاظ بالمياه	16-25 يوماً	المدة النظرية التي تبقى فيها الحمأة في الهاضم اللاهوائي والتي تتحول فيها المواد العضوية إلى غاز حيوي بفعل الكائنات المجهرية. يعمل معظم مفاعلات الهضم اللاهوائي في محطات معالجة مياه الصرف الصحي بدرجة حرارة معتدلة. ونظراً لارتفاع كمية المياه في حمأة مياه الصرف، تتحسن نسبة إمداد الطاقة للتسخين إلى كمية الطاقة المكتسبة. ولهذا السبب نفسه، تكون درجة الحرارة المثلى في هذه المحطات أقل من الحرارة في محطات أخرى قائمة على الهضم اللاهوائي.
الحرارة	35-39 درجة مئوية	بما أن الغاز الحيوي ناجم عن التحلل الجراثيمي للمواد العضوية الجافة، يرتبط إجمالي إنتاج الغاز مباشرة بتحليل هذه المواد. وتعتمد نسبة المواد العضوية الجافة في الحمأة وتحللها على عدة عوامل كنوع الحمأة، ومدة تواجدها، وخصائص عملية تنظيف المياه وفترة الاحتفاظ بالمياه.
إجمالي إنتاج الغاز وتحلل المواد العضوية الجافة	450-500 لتر/كيلوغرام من المواد العضوية الجافة أو	
تحلل المواد العضوية الجافة	18-26 لتر/معدل عدد السكان يومياً	
كمية الميثان في الغاز الحيوي	63%-67% من الميثان	يحتوي الغاز الحيوي الناجم عن حمأة مياه الصرف على نسبة عالية من الميثان مقارنة بالغاز الحيوي الناجم عن مواد مدخلة أخرى.
استخدام الغاز الحيوي المنتج	95%-99% (النطاق الأمثل)	يبيّن مقدار الغاز الحيوي المستخدم لتوليد الطاقة أو الحرارة أو لإنتاج الوقود الحيوي. يحرق الجزء المتبقي.
الكفاءة الكهربائية لتحويل الغاز الحيوي عبر نُظْم التوليد المشترك	100 كيلوواط: 25%-35% 500-100 كيلوواط: 5%-40% 500 < : 38%-45%	تُعطى الأولوية للكفاءة الكهربائية لأن الحرارة متوفرة عادة بكميات كافية في المحطات القائمة على نُظْم التوليد المشترك.
استقلالية محطات معالجة مياه الصرف (التي تستخدم نُظْم التوليد المشترك) من حيث توليد الطاقة الكهربائية	> 10000 معدل عدد السكان: 37% > 100000 معدل عدد السكان: 68%-100%	تبيّن الاستقلالية في توليد الكهرباء والطاقة الحرارية نسبة الطاقة المولدة إلى الطاقة المستخدمة في محطة معالجة مياه الصرف الصحي. ولدى المحطات الكبيرة مستويات أعلى من الاستقلالية نظراً لارتفاع كفاءة عملياتها (إنتاج أعلى، هدر أقل).
استقلالية محطات معالجة مياه الصرف الصحي (التي تستخدم نُظْم التوليد المشترك) من حيث توليد الطاقة الحرارية	100%-90%	ويحقق العديد من المحطات استقلالية تامة في توليد الطاقة الحرارية. أما بالنسبة إلى الاستقلالية التامة في توليد الطاقة الكهربائية، فلا يحققها اليوم سوى المحطات المتقدمة جداً.

المعايير التشغيلية	القيم النموذجية	الوصف
الطاقة الكهربائية المولدة	20-10 كيلوواط ساعة/معدل عدد السكان/ سنوياً	
الطاقة الكهربائية المستخدمة في عملية الهضم اللاهوائي	2.5-1 كيلوواط ساعة/معدل عدد السكان/ سنوياً	
الطاقة الكهربائية المستخدمة لإزالة المياه من الحمأة	3.5-0.5 كيلوواط ساعة/معدل عدد السكان/ سنوياً	
الطاقة الحرارية المستخدمة في معالجة الحمأة وتسخين المفاعل	16-8 كيلوواط ساعة/ معدل عدد السكان/ سنوياً	

معدل السكان هو نسبة حمل التلوث (أي الطلب الكيميائي الحيوي على الأكسجين يومياً) في المحطة والناجم عن المستخدمين والخدمات المنزلية والصناعية، إلى حمل التلوث الفردي الناجم عن مياه الصرف الصحي المنزلي للشخص الواحد. المصدر: Bachmann, 2015.

ضخ المياه ونقلها

تشمل تكنولوجيات الطاقة المتجددة التي يمكن استخدامها لتشغيل نُظم ضخ المياه ونقلها المضخات العاملة على طاقة الرياح والطاقة الشمسية والوقود الحيوي. ويمكن أن تكون المضخات الريحية ميكانيكية أو كهربائية. وتتناول الفقرات التالية كلاً من هذه التكنولوجيات بالتفصيل.

المضخات الريحية الميكانيكية (الطواحين الهوائية)

صُنِعَ أكثر من 8 ملايين طاحونة هوائية في الولايات المتحدة الأمريكية في القرن العشرين، استُعملت أساساً لضخ المياه للاستخدامات المنزلية والصناعية والزراعية. ونظراً لنجاح هذه التكنولوجيا، انتشر استخدامها في جميع أنحاء العالم²². ومع أن الطواحين الهوائية ما زالت مستخدمة في بلدان مثل الأرجنتين وأستراليا والولايات المتحدة، يُفَضَّل استخدام التربينات الريحية الحديثة لأن الطواحين أقل كفاءة من حيث استهلاك الطاقة (4-8 في المائة) بسبب شفراتها التي ليس لديها سطح هوائي انسيابي. ويمكن أن تعمل الطاحونة باستخدام أي من أنواع المضخات التالية: مضخة بكباس، أو مضخة ترددية، أو مضخة الإزاحة الموجبة. وتعمل المضخة عندما تكون الرياح قوية بما يكفي لتمكين رافعة المضخة الريحية من رفع القضبان، والكباس والمياه داخله، والتغلب على الاحتكاك. وتعتمد كمية المياه الناجمة عن الضخ على مستوى معين، على سرعة الرياح وقطر المضخة. فالمضخات التي تتسم بقطر عريض تضخ كميات أكبر من المياه ولكنها تستلزم مقداراً أكبر من عزم الدوران لتشغيلها. ومن المستحسن أن يكون للمضخة حجم يسمح بتشغيلها عندما تقارب سرعة الرياح نسبة 75 في المائة من متوسط سرعة الرياح المحلية²³. وتبلغ سرعة الرياح المحلية المطلوبة عادة لتمكين التربينات الريحية من توليد الكهرباء حوالي 3 أمتار في الثانية²⁴.

والطواحين الهوائية الحديثة قادرة على تحسين كفاءة الطاقة بفضل خصائص تضاف إليها كالتصاميم المتغيرة الشوط والأثقال الموازنة التي توضع على عارضة تشغيل المضخة. وتساهم هذه الأثقال الموازنة

في الحد من عزم عمود الدوران الذي تفرضه نُظْم «الجيل الثالث» لبدء الضخ. وعليه، فإن الطواحين الحديثة قادرة على الدوران في ظل سرعة رياح منخفضة، كما هي قادرة على التحكم بسرعة الدوران في حال ارتفاع سرعة الرياح²⁵. واستبدال ألواح الطواحين التقليدية بعدد أقل من الشفرات ذات السطح الهوائي الانسيابي يساعد أيضاً على زيادة كفاءة الطاقة وخفض التكاليف. وفي الأسواق التجارية، تُستخدم المضخات الريحية الميكانيكية التي تعمل بسرعة رياح منخفضة وبكفاءة تتراوح بين 7 و27 في المائة في ظل سرعة رياح متوسطة. ويقتصر استخدامها على السهول والمناطق المسطحة²⁶. لهذه الأسباب، استُخدمت الطواحين الميكانيكية أساساً في المناطق النائية لضخ المياه رغم النزعة إلى استخدام نُظْم ضخ المياه بالطاقة الشمسية الفوتوفلطية. غير أن الطواحين الميكانيكية تتطلب صيانة مكثفة (لا سيما للمضخات بكباس)، وهذا يشكّل رادعاً رئيسياً يحول دون استخدامها. ولا تُستخدم التربينات الريحية الصغيرة عادة كبديل عن الطواحين الهوائية الميكانيكية في المناطق النائية. في مصر مثلاً، يُستخدم وقود الديزل لتوليد الطاقة في النُظْم النائية لضخ المياه التي تتعدى قوتها 10 كيلوواط²⁷. وقد أعدت دراسات أثبتت أن تربينات الرياح الصغيرة في مصر قادرة على ضخ المياه اللازمة للزراعة وتوليد الكهرباء خارج نطاق الشبكة²⁸. كما كشفت الدراسات عن الجدوى الاقتصادية لاستخدام هذه التربينات الصغيرة (حيثما تم تشجيع استخدام تربينات تفوق طاقتها 200 كيلوواط)²⁹. واعتُبرت أراضي المغرب ومصر مؤاتية لاستخدام المنشآت الريحية الصغيرة³⁰. وفي عُمان، أنشئ نظام كهربائي لضخ المياه باستخدام طاقة الرياح في منطقة نائية ولاقى نجاحاً كبيراً³¹.

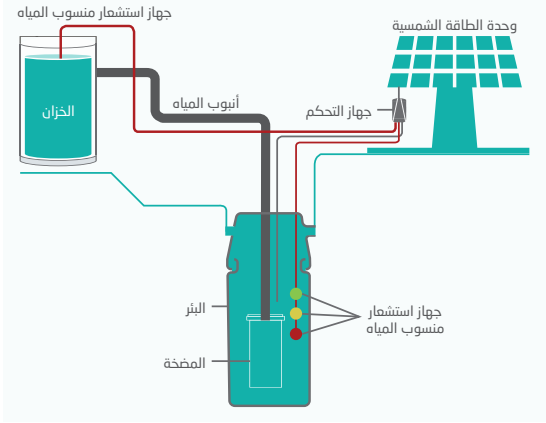
التربينات الريحية الكهربائية لتشغيل مضخات المياه

التربينات الريحية الكهربائية قادرة على توليد التيار الثابت أو المتردد لتشغيل المحركات العاملة على التيارين، ما يسهّل ضخ المياه. وهي الأكثر ملاءمة لمضخات الطرد المركزي. وفي حال كانت التربينات مقترنة بمحرك يعمل على التيار المتردد، يمكن الاستغناء عن البطاريات والمحولات أثناء التركيب. وتتم هذه التكنولوجيا أيضاً بالمرونة من حيث موقع التربينات الريحية (فمن الممكن مثلاً وضع التربينات الريحية على أرض مرتفعة للاستفادة من سرعة الرياح العالية)، وبأداء أفضل كلما تزايدت السرعة، وبقلة الأجزاء المتحركة (ما يخفف من الصيانة). كما تسمح التربينات الكهربائية بتخزين الطاقة الكهربائية الفائضة بواسطة المحولات والبطاريات، ما يتيح استخدام هذه التربينات لشتى التطبيقات مثل الإنارة. ويبدأ تشغيل التربينات الريحية الكهربائية عندما تكون سرعة الرياح عالية (فالبدء بضخ المياه بواسطة تربين ريحي بقوة 1.5 كيلوواط يتطلب سرعة رياح متوسطة تتراوح بين 4 و5 أمتار في الثانية). وبتات التربينات الريحية الكهربائية تنافس الطواحين الهوائية في تطبيقات ضخ المياه إذا تم تشغيلها بسرعة رياح متوسطة تفوق 5 و6 أمتار في الثانية³². وتتسم المضخات التي تستخدم تربينات ريحية كهربائية بضعف كفاءة الطاقة مقارنة بالطواحين الهوائية، كما تعتبر أكثر كفاءة من حيث الكلفة مقارنة بالمضخات العاملة على وقود الديزل أو الطاقة الفوتوفلطية أو الطواحين التقليدية. وأفضل تصميم للتربينات الريحية يحقق كفاءة تفوق بقليل نسبة 40 في المائة³³. وهذه التربينات متاحة في الأسواق التجارية بقدرات مختلفة (من 50 واط إلى بضعة ميغاواط)³⁴.

المضخات التي تعمل على الطاقة الشمسية (الفوتوفلطية)

تستخدم المضخات الفوتوفلطية الإشعاع الشمسي كمصدر لتوليد الطاقة، كما هو مبين في الشكل 10. وهي تتألف من مصفوفات فوتوفلطية تلتقط الإشعاع الشمسي وتحوّل الطاقة الإشعاعية مباشرة إلى طاقة كهربائية (تيار ثابت). ويمكن تغيير نوع التيار من ثابت إلى متردد باستخدام محوّل. ويُستخدم التيار المتردد لتشغيل المحركات الكهربائية التي تشغّل بدورها المضخة المائية. ومن عيوب هذه المضخات ارتفاع تكاليفها الاستثمارية التي يمكن تعويضها بتكاليف التشغيل والصيانة المنخفضة في فترة التشغيل

الشكل 10. رسم تخطيطي لمضخة مياه تعمل على الطاقة الشمسية



المصدر: Au-Yeung, 2016.

الطويلة لهذه التكنولوجيا³⁵. وفي الآونة الأخيرة، أصبحت هذه المضخات أكثر فعالية من حيث الكلفة بفعل انخفاض تكاليف التكنولوجيا الفوتوفولطية، أقله في ما يتعلق بالتكنولوجيا الأساسية. أما بالنسبة للنظم التي تستخدم محركات التيار المتردد، فيضاف إليها محول إلى جانب عناصر أخرى مثل البطاريات، ما يزيد من كلفتها³⁶. ولحد من الكلفة، يمكن استبدال المحول في محركات التيار المتردد بأجهزة استشعار وجهاز تحكم بسيط ومنخفض الجهد. وهذا يساعد على جعل النظام أكثر مرونة واستقلالية³⁷، على النحو المبين في الشكل 10.

وتعتبر المضخات العاملة على الطاقة الفوتوفولطية تكنولوجيا موثوقة تسمح بموائمة مواصفات المضخة مع كمية المياه المطلوبة. وهي أيضاً خيار

مناسب للمجمعات الصغيرة أو القطاع السكني. ونظراً للطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية، ينبغي تصميم نظام الضخ، بما فيه سعة تخزين المياه وسعة نظام تخزين البطارية (وهي عادة جزء من النظام)، مع مراعاة المصدر الشمسي والطلب على المياه. أما المنشآت الأكثر تعقيداً، فقد تتطلب نظام تخزين احتياطي مثل مولد كهربائي يعمل بطاقة الرياح أو الربط على الشبكة الكهربائية لضمان مصدر إضافي للطاقة في الأيام التي يكون فيها الإشعاع الشمسي ضعيفاً³⁸. وقد أعدت في المنطقة العربية مجموعة من الدراسات لتقييم أداء نظم ضخ المياه العاملة على الطاقة الفوتوفولطية. ففي عام 2004، كشفت دراسة أجريت في مصر أن كفاءة نظم الضخ يمكن رفعها بنسبة تصل إلى 20 في المائة بواسطة تحريك المضخة يدوياً لتتبع حركة الشمس ثلاث مرات في اليوم. كما أكدت دراسة أخرى أجريت في عام 2013 في المملكة العربية السعودية على ضرورة مراعاة تشكيل المصفوفة الإلكترونية لمطابقة نقاط الطاقة القصوى للمصفوفة الفوتوفولطية مع المضخة. وأظهرت دراسة أجريت في عام 1999 في الجزائر أن النظم الفوتوفولطية يمكن أن تسهم في التنمية الاجتماعية والاقتصادية في مناطق الصحراء النائية³⁹.

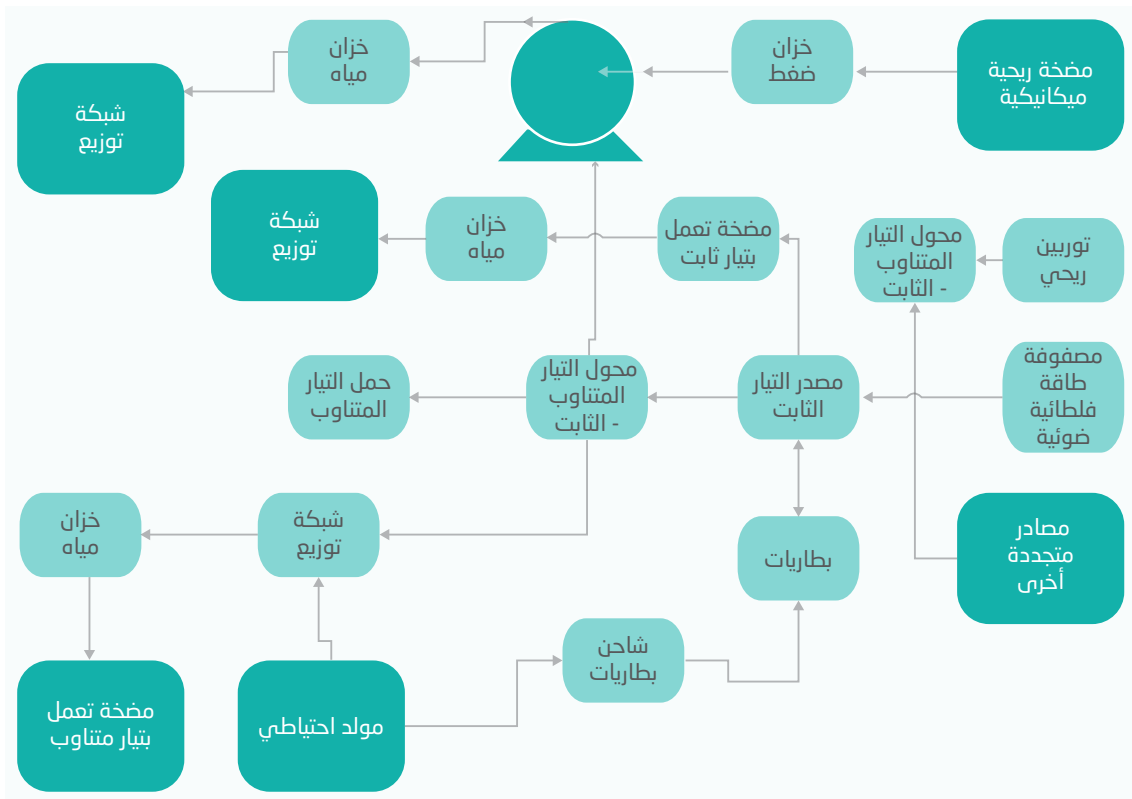
مضخات الوقود الحيوي

مضخات الوقود الحيوي مفيدة للتطبيقات في المناطق الريفية. فالوقود الحيوي يمكن أن يوفر ما يصل إلى 80 في المائة من كمية الوقود المطلوبة لتشغيل محركات الديزل. كما يمكن استخدامه في المحركات ذات الاحتراق الداخلي التي تستخدم لضخ المياه⁴⁰. وتم التوصل إلى تكنولوجيا جديدة في هذا المجال، هي نظم الطاقة الحيوية المعيارية الصغيرة التي تستخدم أي نوع من المخلفات الزراعية لتوليد الحرارة أو الكهرباء. كما يمكن استخدامها لتطبيقات أخرى مثل نظم تنقية المياه وتشغيل مضخات المياه. ويمكن الاستفادة من مخلفات الماشية لتوفير الغاز الحيوي اللازم لتشغيل المحركات. ولدى هذه المضخات القدرة على توليد الكهرباء لقرى بأكملها (صغيرة أو متوسطة الحجم) وللمراكز الحضرية⁴¹.

ولكن استخدام مضخات الوقود الحيوي يواجه بعض القيود. فالقيمة الحرارية لوقود الكتلة الأحيائية منخفضة، ما يجعل هذه النظم أقل استدامة من الناحية الاقتصادية، ولا تكون مجدية إلا عندما تكون الكتلة الأحيائية متاحة مجاناً وعندما يعمل محرك المضخة على نوعين من الوقود (أي وقود الديزل والوقود الحيوي). وتكاليف التشغيل والصيانة لنظم الضخ العاملة على الوقود الحيوي أعلى منها لدى نظم

الضخ التي يشغلها مصدر آخر من مصادر الطاقة المتجددة. ويؤثر الوقود الحيوي أيضاً على أداء المحركات، بسبب عدة عوامل مثل تآكل عناصرها وتدني القيم الحرارية. وتُهدر كميات إضافية من الطاقة أثناء نقل الطاقة من المحرك إلى المضخة⁴². تتضح إذاً أسباب عدم دراسة مضخات الوقود الحيوي عن كثب، نظراً لإمكاناتها المحدودة. وفي البلدان العربية التي تواجه شحاً في المياه، يُفصّل استخدام الأراضي الزراعية لإنتاج الأغذية وليس الوقود. ولا يمكن أن تُعتمد مضخات الوقود الحيوي كبديل مستدام في تلك المناطق إلا إذا تم تشغيلها بواسطة المخلفات الحيوية أو تلك التي لا تحتاج إلى كميات كبيرة من المياه العذبة. وتجدر الإشارة إلى أن السودان تشكل استثناءً؛ ففي عام 2016، أنتجت السودان 65 مليون ليتر من الإيثانول الذي يُتوقع ارتفاعه إلى 200 مليون ليتر في عام 2017⁴³. وفي عام 2014، وصلت مساهمة الكتلة الحيوية في مزيج الطاقة الوطني إلى 56.3 في المائة⁴⁴، مع أن هذه الكتلة اتّخذت شكل الفحم والخشب واستُخدمت أساساً في التطبيقات الصغيرة مثل توليد الحرارة للاستخدامات المنزلية والصناعية⁴⁵. وتستثمر السودان كثيراً اليوم في الطاقة الأحيائية للحد من وارداتها النفطية وتشجيع إعادة التحريج. ويخوض الباحثون فيها حالياً مرحلة تجريبية تقضي بزراعة أشجار الجاتروفا التي تشكل مصدراً مستداماً للكتلة الأحيائية. كما ينظر الباحثون في إمكانية استخدام الوقود الحيوي في قطاع النقل على غرار وقود المحركات النفاثة. وفي عام 2013، أعلنت شركة سكر كنانة في السودان عن إطلاق مشروع يقوم على استخدام خليط الإيثانول والبنزين للحد من انبعاثات المركبات وتحسين الأوكتان⁴⁶. وتزخر السودان بالموارد الطبيعية (من أراض زراعية وموارد مائية)⁴⁷، ما يسمح بنمو الكتلة الأحيائية. واستخدام الوقود الحيوي لتشغيل قطاع المياه (كجزء من الأنشطة الزراعية مثلاً)⁴⁸ يشكل عنصراً هاماً لدفع مشاريع توليد الطاقة قدماً.

الشكل 11. رسم تخطيطي لنظام هجين مزود بمولد احتياطي لتطبيقات ضخ المياه



المصدر: Argaw, 2004.

النُّظْم الهجينة لضخ المياه

تشمل النُّظْم الهجينة الممكنة لضخ المياه الطاقة الفوتوفلطيّة مع وقود الديزل، وطاقة الرياح مع وقود الديزل، وطاقة الرياح مع الطاقة الفوتوفلطيّة، والطاقة الفوتوفلطيّة مع مصادر أخرى للطاقة المتجددة. وقد ناقشت دراسات شتى إمكانات النُّظْم الهجينة التي تستخدم التربينات الريحية والألواح الفوتوفلطيّة ومدى استمراريّتها، مشيرة إلى أن هذه النُّظْم تحقق مزيداً من الموثوقية وتحسن المخرجات⁴⁹. كما يمكن أن يشمل النظام الهجين تخزين البطاريات، والمحولات، ومولد احتياطي، وغيرها. ويبين الشكل 11 رسماً تخطيطياً لنظام ضخ هجين يعتمد على ثلاثة مصادر للطاقة المتجددة، منها طاقة الرياح والطاقة الشمسيّة. وتتسم النُّظْم الهجينة بموثوقية أعلى من النظام الذي يعتمد على مصدر واحد للطاقة المتجددة. وبفضل هذه الموثوقية، يمكن استخدام هذه النُّظْم لتشغيل تطبيقات متكاملة (مثل ضخ المياه وإنارة الشوارع). ومع تطور تكنولوجيا الطاقة المتجددة، أصبحت النُّظْم الهجينة أقل كلفة مقارنة باستخدام نظام الطاقة الفوتوفلطيّة أو نظام طاقة الرياح على حدة. وإمكانها أن تكون الأصغر حجماً في منظومة توليد الطاقة كلها لأنها تستخدم عناصر أصغر حجماً. ولكن هذه النُّظْم تتطلب تكاليف رأس مال مرتفعة جداً وخبراء من ذوي المهارات العالية لصيانتها⁵⁰.

تسخين المياه

أصبح استخدام الطاقة الشمسيّة لتسخين المياه شائعاً، لا سيما في القطاع السكني. ويتزايد أيضاً استخدامها في القطاعات التجارية والصناعية. وتسخين المياه هو الأكثر استهلاكاً للطاقة في الدورة المائيّة⁵¹. كما يتزايد استخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسيّة وطاقة حرارة باطن الأرض، لاستبدال مصادر الطاقة التقليديّة من أجل تسخين المياه. وكمثال من المنطقة العربيّة، برنامج الطاقة الشمسيّة بروسول في تونس الذي أدى إلى تزايد تركيب نُظْم تسخين المياه بالطاقة الشمسيّة بعشرة أضعاف من عام 2004 إلى عام 2011⁵². وتعتمد التكاليف المرتبطة بهذه النُّظْم على عدة عوامل مثل الموقع والسعة، مع أن سخانات الطاقة الشمسيّة تنافس سخانات التي تستخدم الغاز أو الكهرباء (وتكاليف رأس المال المرتفعة يقابلها تدني التكاليف التشغيلية). وتتفاوت فترة استرداد رأس مال سخانات المياه الشمسيّة من موقع إلى آخر. فقد وجدت دراسة أجريت في الولايات المتحدة أن فترة استرداد كلفة التسخين بالطاقة الشمسيّة في المباني السكنية تتفاوت من 4 أعوام إلى 13 عاماً، حسب المدينة التي تُركَّب فيها هذه النُّظْم وشكل نظام التسخين (علماً بأن النظام التقليدي الكهربائي لتسخين المياه في كل مدينة قد اعتمد كمقياس)⁵³. وكشفت دراسة أخرى استخدمت نظام تسخين شمسي بسعة 1000 لتر في مدينة جامعيّة في الهند أن فترة الاسترداد تقارب السنتين⁵⁴. ووجدت دراسة أجريت في عام 2011 حول المباني السكنية في عُمان أن فترة الاسترداد البسيطة تناهز 20 عاماً. ولا تنخفض هذه الفترة إلا في حال دعمت الحكومة تكاليف رأس المال لهذا النظام، عندها تتراوح بين 7 و10 أعوام⁵⁵. وفي بعض الحالات، ترتبط نُظْم التسخين الشمسيّة بنُّظْم هجينة تولّد الطاقة للتدفئة والتسخين معاً. ويمكن استخدام برمجيات قائمة على المحاكاة مثل TRNSYS لتصميم نُظْم شمسيّة حرارية بدقة مع مراعاة بعض العوامل مثل الطلب على الطاقة⁵⁶.

ويمكن استخدام نُظْم الطاقة الشمسيّة الحرارية التقليديّة لتسخين المياه بدرجات حرارة تصل إلى 125 درجة مئوية أو 250 درجة مئوية إذا استُخدمت نُظْم أكثر تطوراً. وتعتمد هذه النُّظْم على تكنولوجيا المجمعات المسطحة ومجمعات الأنابيب المفرغة⁵⁷. ويمكن أن تكون المجمعات المسطحة لامعة أو غير لامعة. وتتألف المجمعات المسطحة غير اللامعة من سطح ماص قاتم اللون معدني أو مصنوع من البولييمر. والمجمعات المسطحة اللامعة مشابهة مع طبقة إضافية مصنوعة من غطاء واحد أو أكثر من الزجاج أو البلاستيك. أما مجمعات الأنابيب المفرغة فتتكون من صفوف متوازية من الأنابيب الزجاجية الشفافة، يحتوي كل منها على أنبوب معدني داخلي ماص، يحيط به وأنبوب زجاجي خارجي. ويرتبط الأنبوب المعدني بزغرفة مطلية بمادة

تمتص الطاقة الشمسية وتمنع تسرب الحرارة المكتسبة. والفراغ الفاصل بين كل من الأنبوبين الزجاجي والمعدني يمنع تسرب الطاقة الحرارية المرتبطة بعملية الانتقال الحراري بالحمل والتوصيل. وتُستخدَم مجمعات الأنابيب المفرغة عادة في التطبيقات التجارية. أما النوع الثالث من المجمعات فهو نظام تخزين يتكامل مع المجمع. ويتألف هذا النظام من صندوق لامع معزول يحتوي على خزان أو أنبوب أسود واحد أو أكثر. ويجب أن تمرّ المياه المراد تسخينها في هذا النظام حيث تخضع للتسخين المبدئي، وتتابع مسارها لتصل إلى سخان احتياطي تقليدي⁵⁸. وتُعتبر نُظُم التخزين المتكاملة مع المجمع موثوقة وتُستخدم خصيصاً لتسخين المياه، كما أنها بسيطة لأنها تجمع بين تسخين المياه وتخزينها في مكان واحد، ما يُغني عن مضخات تدوير المياه ويقلل الأجزاء الميكانيكية⁵⁹. والظروف المثالية لتشغيل هذه النُظُم المتكاملة هي الظروف المناخية المعتدلة التي نادراً ما تسجل درجات حرارة دون درجة التجمد، ومن هنا ملائمتها للمنطقة العربية. ولكن المجمعات المسطحة تبدو أفضل من مجمعات الأنابيب المفرغة لتسخين المياه للاستخدامات المنزلية في البلدان العربية⁶⁰. فهي ليست فقط أقل كلفة بل يمكنها أيضاً أن توفر الطاقة الحرارية على درجة حرارة تصل إلى 80 درجة مئوية، ما يكفي لتسخين المياه. وتعطي مجمعات الأنابيب المفرغة أداءً أفضل عندما يكون مستوى الإشعاع الشمسي متدنياً⁶¹، ما لا ينطبق على البلدان العربية التي تتميز بمستويات إشعاع شمسي مرتفعة.

ويمكن الحصول على درجات حرارة تصل إلى 400 درجة مئوية عند استخدام التكنولوجيات المتطورة للتسخين الشمسي الحراري، حيث تُستخدَم المركّزات الشمسية بمفردها أو إلى جانب مجمعات الأنابيب المسطحة ومجمعات الأنابيب المفرغة. وتشمل تكنولوجيات المركّزات الشمسية مركّزات القطع المكافئ ومجمعات فريسنل الخطية. وعند بلوغ هذه الدرجة العالية، يمكن تلبية نصف الطلب على الطاقة الحرارية في القطاع الصناعي⁶². ولتحقيق هذا الغرض، يمكن دمج نُظُم الطاقة الشمسية الحرارية في المنشآت الصناعية قيد الإنشاء، ولا سيما المصانع الصغيرة والمتوسطة الحجم. ولتحقيق الاستفادة القصوى من هذه المنشآت، يجب تخزين الحرارة أيضاً لتلبية الطلب عندما يكون الإشعاع الشمسي غير كاف.

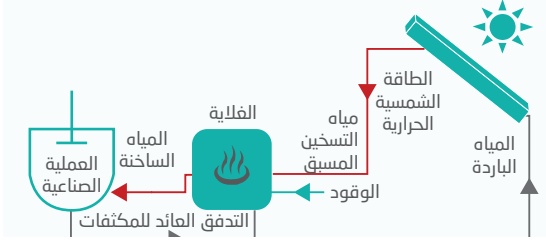
وقد بلغت تكنولوجيات المجمعات المسطحة ومجمعات الأنابيب المفرغة مستوى من النضوج، وتزخر بالإمكانات لتشغيل نُظُم التسخين الصناعية ذات الحرارة المتدنية في البلدان التي تشهد نمواً في القطاعات الصناعية. ومن القطاعات الصناعية الأكثر ملاءمة لهذه التكنولوجيات هي قطاع الأغذية، والمشروبات، والمنسوجات، والمواد الكيميائية، والورق، والبلاستيك. وفي بعض القطاعات الصناعية، يمكن استخدام الطاقة الشمسية الحرارية في عمليات التبريد القائمة حالياً على المبردات الكهربائية⁶³.

ويمكن استخدام نُظُم الطاقة الشمسية الحرارية لتوليد الحرارة اللازمة للعمليات الصناعية بما أنها توفر مصدراً إضافياً لتسخين المياه المستخدمة في الغلايات البخارية (في حال تطلبت العمليات الصناعية مياه تغذية عالية الحرارة [الشكل 12]). ومن ناحية أخرى، يمكن استخدامها لتأمين مياه التغذية مباشرة للعمليات الصناعية (في حال تطلبت العمليات الصناعية مياه تغذية منخفضة الحرارة)⁶⁴. وفي الحالتين، يُستخدَم الوقود التقليدي ولكن بكميات أقل، بفضل نُظُم التسخين الشمسية. وتسمح هذه النُظُم الهجينة بتلبية المزيد من الطلب مقارنة بنظام التسخين على الطاقة الشمسية وحده. ويمكن تلبية 20 في المائة من طلب المصانع على التسخين بواسطة نُظُم التسخين الشمسية. وغالباً ما يعتمد ذلك على مساحة سطح المصنع التي يمكن استخدامها لتركيب المجمعات الشمسية⁶⁵.

بروسول: برنامج تسخين المياه بالطاقة الشمسية في تونس

في عام 1996، قدمت تونس دعماً حكومياً لتغطية 35 في المائة من تكاليف رأس المال لسخانات المياه الشمسية في إطار مشروع أُطلق بدعم من البنك الدولي وتمويل من مرفق البيئة العالمي التابع للبنك الدولي ومن الحكومة البلجيكية. ومع أن هذا المشروع حفّز نمو سوق السخانات الشمسية، لم يكن هذا النمو مستداماً واقتصر مدته

الشكل 12. مبادئ تغطية الطاقة الشمسية الحرارية لتسخين مياه الغلايات البخارية

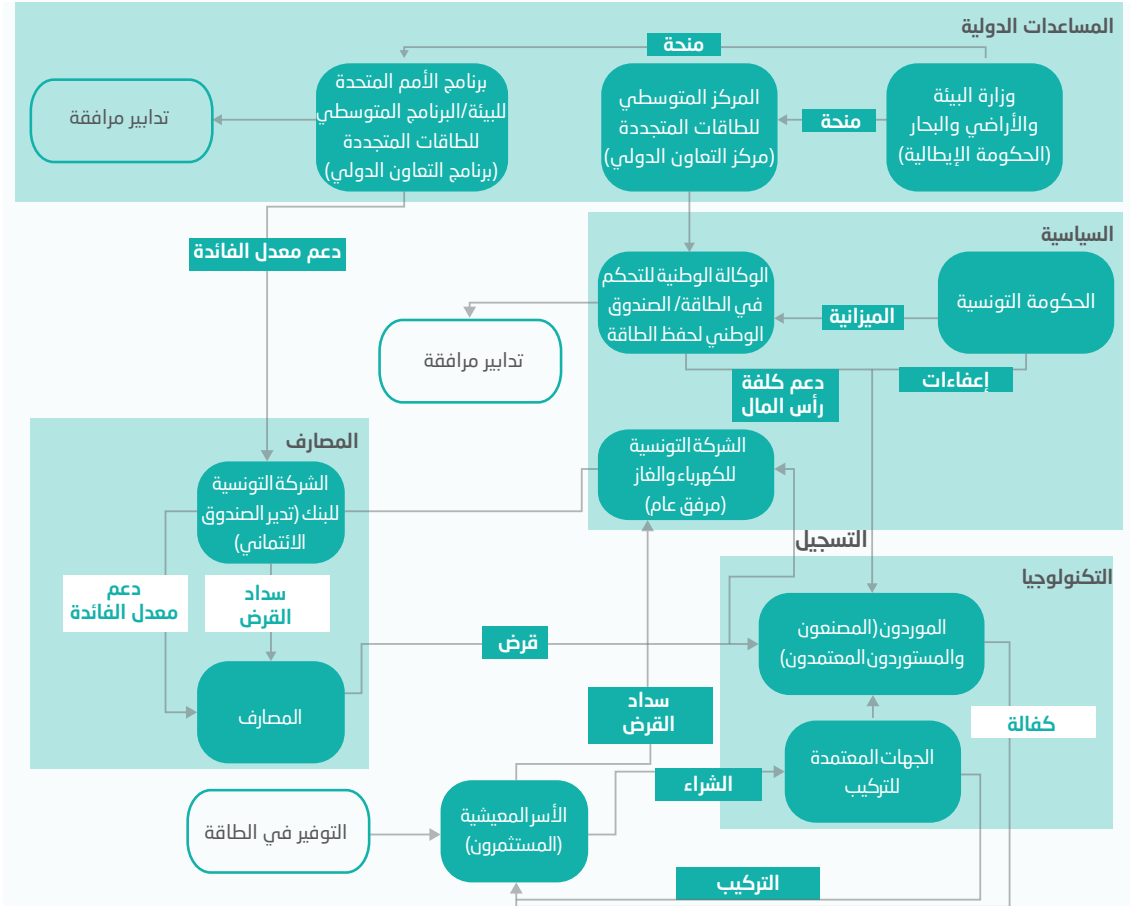


المصدر: IRENA and IEA-ETSAP, 2015.

على توافر التمويل. وفي عام 2005، أطلقت الحكومة التونسية برنامجها الخاص بوصول لتسخين المياه باستخدام الطاقة الشمسية. ومن خلال هذا البرنامج، قُدِّم دعم حكومي لتغطية تكاليف رأس المال للسخانات (بلغ 20 في المائة لسخانات المياه الشمسية في القطاع السكني)، بالإضافة إلى قروض من المصارف التجارية بفائدة منخفضة للمستهلكين في القطاع المنزلي. وقد تم تسديد هذه القروض عبر الشركة التونسية للكهرباء والغاز عن طريق فواتير الكهرباء. وسهّل البرنامج إشراك المرفق الحكومي للكهرباء ليضطلع بدور محصل أقساط القروض الضامن والكفيل والمنفّذ، ما ساعد على تخطي مشكلة غياب الائتمان للمستهلك للاستثمار في الطاقة المتجددة وانعدام الأداء الائتماني الموثوق.

وساهمت حملات التوعية الموجهة للمستهلكين والمصارف التجارية في بناء قدرات المؤسسات المالية ومزودي الخدمات التكنولوجية، ما أتاح لهم تطوير خبراتهم ومعارفهم على المدى الطويل. وقد أنشئ الصندوق الوطني

الشكل 13. الجهات المعنية الرئيسية المشاركة في برنامج بروسول في مرحلته الأولى والثانية



المصدر: Trabacchi, Micale and Frisari, 2012.

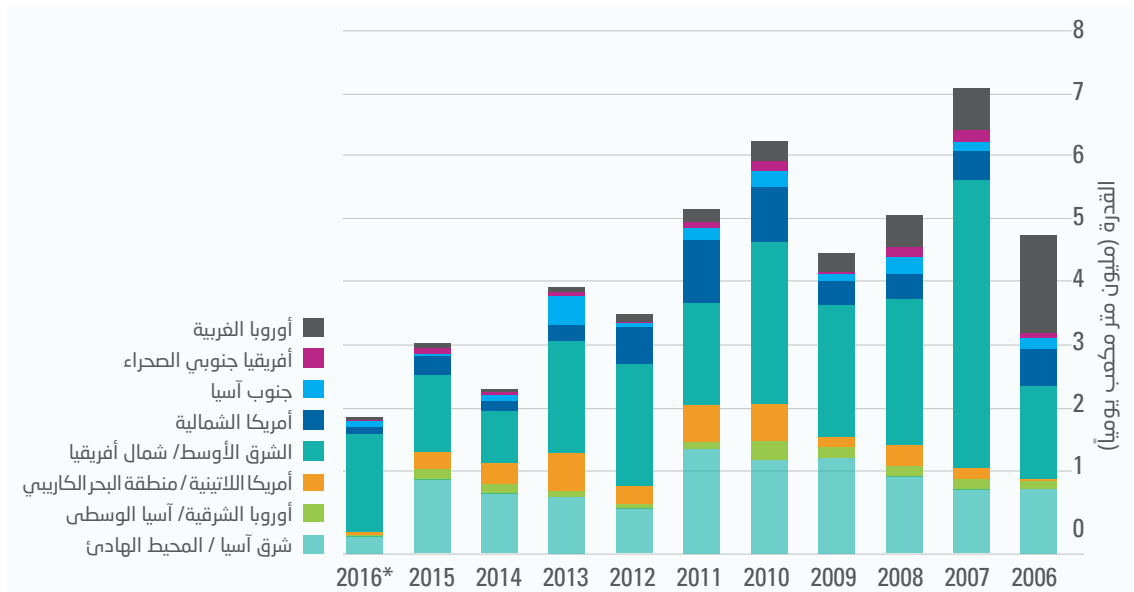
للتحكم في الطاقة بموجب القانون لدعم مبادرات كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة؛ وكان من المقرر أن تموله الرسوم الجمركية المحصلة من نُظم تكييف الهواء والإيرادات الضريبية من تسجيل السيارات. ويبيّن الشكل 13 مختلف الكيانات التي شاركت في المرحلة الأولى من برنامج بروسول.

ودخلت المرحلة الثانية من برنامج بروسول حيّز التنفيذ في عام 2007 بتمويل بلغ 21.8 مليون دولار من الحكومة التونسية و0.2 مليون دولار من الحكومة الإيطالي⁶⁶. وأدرجت في المرحلة الثانية بعض التحسينات المستمدة من تجربة المرحلة الأولى.

وتشمل إنجازات برنامج بروسول من عام 2005 إلى عام 2010:

- تنفيذ استثمارات عامة وخاصة بلغ مجموعها 134 مليون دولار؛
- زيادة السعة المركبة السنوية لسخانات المياه الشمسية بخمسة أضعاف بلغت 119,000 نظام، استناداً إلى مساحة المجمعات؛
- تحقيق أرباح صافية في الميزانية العامة. بعد أن تغيّر الطلب الاستهلاكي نتيجة للبرنامج، انخفضت الإعانات الحكومية التونسية للوقود الأحفوري بقيمة 15.2 مليون دولار. ومن المتوقع أن تصل هذه المبالغ المدخرة إلى 101 مليون دولار طيلة فترة استخدام سخانات المياه الشمسية. وتعوّض هذه المبالغ بسهولة المبلغ الأولي الذي استثمرته الحكومة في برنامج بروسول والذي بلغ 21.8 مليون دولار؛
- تفادي استهلاك 251 ألف طن مكافئ نفط من الوقود الأحفوري طيلة فترة استخدام سخانات المياه على الشمسية؛
- تفادي انبعاث 715 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون طيلة فترة استخدام سخانات المياه الشمسية؛
- استحداث حوالي 3,000 وظيفة جديدة⁶⁷.

الشكل 14. القدرة السنوية على تحلية المياه، بحسب المناطق



المصدر: Virgili, Pankratz and Global Water Intelligence (GWI), 2016. ملاحظة: * القيم الصادرة حتى حزيران/يونيو 2016.

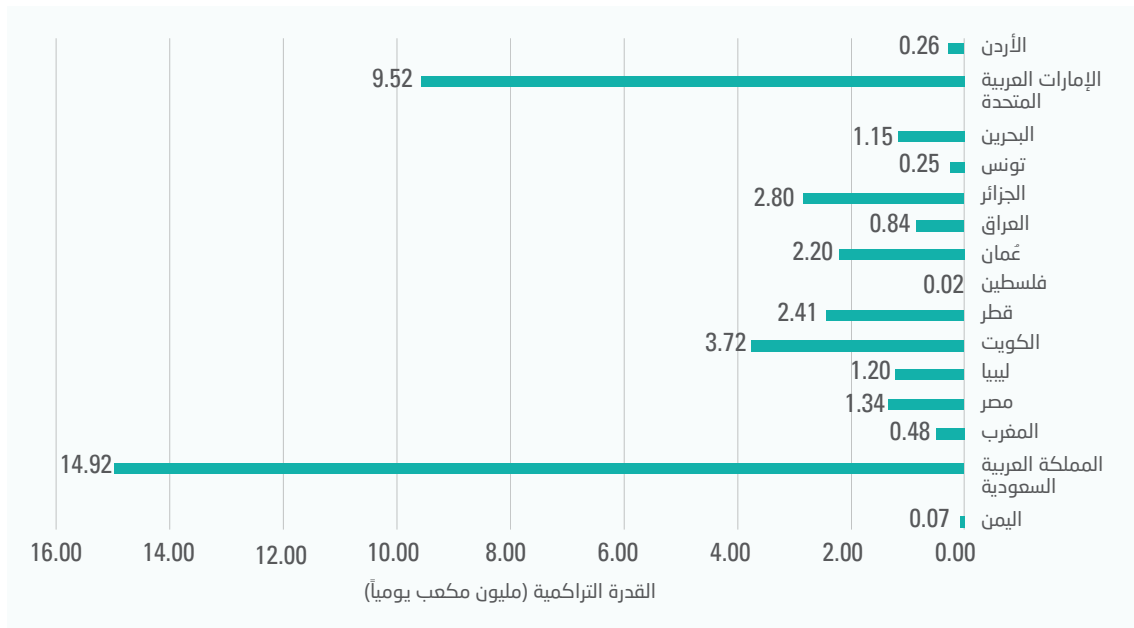
ساهم برنامج بروسول إذاً في زيادة استقلالية تونس في مجال الطاقة وتحسين التنمية الاقتصادية. كما بيّن كيف يؤدي توظيف الموارد العامة (وتحديداً المرافق في هذه الحالة) لدعم الاستثمارات في الطاقة المتجددة إلى تخفيض الطلب على مصادر الطاقة التقليدية، حتى في ظل توفر إعانات الوقود الأحفوري. ويعود نجاح برنامج بروسول إلى برنامجه التدريبي، ومخططات إصدار شهادات الاعتماد للجهات المسؤولة عن التركيب والإمداد، وشهادات الاعتماد وتوسيم الأداء لسخانات المياه، والكفالات لعناصر السخانات، وعقود الصيانة ما بعد البيع. وهذا ما أدى إلى انخفاض معدلات إخفاق التكنولوجيا حتى بلغت بالكاد واحد في المائة. وكان إنشاء الوكالة الوطنية للتحكم في الطاقة عاملاً هاماً في نجاح برنامج بروسول. فهي وكالة متخصصة ساهمت في تصميم البرنامج وتنفيذه وإدارته والترويج له. وقد ساهمت الوكالة أيضاً في عملية بناء القدرات في جميع مراحل سلسلة التوريد وعالجت تحديات التنفيذ عبر التنسيق بين الجهات المعنية المحلية والدولية⁶⁸.

تحلية المياه

يعتمد العديد من البلدان العربية على تحلية المياه من أجل تلبية الحاجة إلى المياه. ويبيّن الشكل 14 السعات المركبة لمحطات التحلية في مختلف مناطق العالم سنوياً بين عامي 2006 و2016. وفي كل عام استأثرت منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بحصة الأسد من حيث السعات المركبة لمحطات التحلية، ولم يكن عام 2016 خارجاً عن القاعدة. ويبين الشكل 15 أهمية التحلية بالنسبة للبلدان العربية، والسعات التراكمية لمختلف البلدان العربية في عام 2015.

ويبين الشكل 16 مدى اعتماد قطاع تحلية المياه على مصادر الطاقة المتجددة في عام 2009، حسب نوعها، ويوضح أن النسبة الكبرى كانت للطاقة الشمسية. ومع أن عملية التحلية تنطوي على استهلاك كثيف للطاقة،

الشكل 15. القدرة التراكمية على تحلية المياه في عام 2015، بحسب البلد



المصدر: Alvarado-Revilla, 2015.

الجدول 2. محطات الطاقة الشمسية المركزة في البلدان العربية

البلد	المحطة	التكنولوجيا	الحالة	القدرة
الجزائر	مركز الفضاء الألماني - المحطة التجريبية للطاقة الشمسية المركزة في الجزائر	جهاز استقبال مركزي (برج للطاقة)	قيد التطوير	7 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في حاسي الرمل	القطع المكافئ - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	يعمل	25 ميغاواط
	حاسي الرمل (2)	القطع المكافئ	أطلق المشروع	70 ميغاواط
	المغائر	القطع المكافئ	أطلق المشروع	70 ميغاواط
	النعامة	القطع المكافئ	أطلق المشروع	70 ميغاواط
مصر	بني عباس	جهاز استقبال مركزي (برج الطاقة)	أطلق المشروع	150 ميغاواط
	الوادي	جهاز استقبال مركزي (برج الطاقة)	أطلق المشروع	150 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في كريمة	القطع المكافئ - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	يعمل	20 ميغاواط
	مرسى علم	القطع المكافئ	قيد الإنتظار	30 ميغاواط
	مشروع الطاقة الشمسية المركزة في غرب النيل	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	100 ميغاواط
الأردن	مشروع الطاقة الشمسية المركزة في كوم أمبو	القطع المكافئ	قيد التطوير	100 ميغاواط
	محطة الطاقة الشمسية المركزة "طاقة"	جهاز استقبال مركزي (برج للطاقة)	قيد التخطيط	250 ميغاواط
	مشروع بناء القدرات في مجال طاقة الرياح والطاقة الشمسية المركزة	مجمعات فريبل	قيد الإنشاء	1 ميغاواط
	مشروع شركة أبينجوا لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في الأردن	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	25 ميغاواط
	مشروع شركة Catalyst Private Equity لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في الأردن	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	50 ميغاواط
الكويت	مشروع الشركة الأردنية الأوروبية للطاقة المتجددة لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في منطقة معان	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	50 ميغاواط
	مشروع مجموعة Evolution Solar لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في الأردن	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	50 ميغاواط
	مشروع شركة Mitsubishi لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في الأردن	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	50 ميغاواط
	مشروع مجمع الشقايا - معهد الكويت للأبحاث العلمية	القطع المكافئ	قيد التخطيط	50 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في العبدلية	القطع المكافئ - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	قيد التطوير	60 ميغاواط

البلد	المحطة	التكنولوجيا	الحالة	القدرة
لبنان	مشروع شركة زعني للتجارة لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة في بصرما، الكورة	القطع المكافئ	قيد التخطيط	2.8 ميغاواط
	مشروع شركة زعني للتجارة لإنشاء محطة للطاقة الشمسية المركزة تولد 50 ميغاواط	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	50 ميغاواط
ليبيا	مشروع مجمعات فريبل في ليبيا	مجمعات فريبل	غير مؤكد	15 ميغاواط
المغرب	مشروع مجموعة CNIM للطاقة الشمسية الحرارية	مجمعات فريبل	قيد التطوير	1 ميغاواط
	محطة شركة Airlight Energy للطاقة الشمسية المركزة في آيت باها	القطع المكافئ	يعمل	3 ميغاواط
	مشروع للطاقة الشمسية المركزة وتحلية المياه في طانطان	لم تعلن بعد	غير مؤكد	20 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في عين بني مطهر	القطع المكافئ- توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	يعمل	20 ميغاواط
عمان	نور ورزازات 3	جهاز استقبال مركزي (برج الطاقة)	قيد الإنشاء	150 ميغاواط
	نور ورزازات 1	القطع المكافئ	يعمل	160 ميغاواط
	نور ورزازات 2	القطع المكافئ	قيد الإنشاء	200 ميغاواط
	نور ميدلت	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	400 ميغاواط
	محطة شركة تنمية نفط عُمان للاستخراج المحسّن للنفط	القطع المكافئ	يعمل	7 ميغاواط
قطر	محطة مرآة للاستخراج المحسّن للنفط عبر استخدام الطاقة الشمسية في إنتاج البخار	القطع المكافئ	قيد التخطيط	1 جيجاواط
	مشروع غابة الصحراء	القطع المكافئ	يعمل	تجربة رائدة
المملكة العربية السعودية	نظام تسخين مياه بالطاقة الشمسية في جامعة الأميرة نورة	مجمعات الألواح المسطحة	يعمل	17 ميغاواط
	الشركة السعودية للكهرباء - محطة دوبا المتكاملة لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة المرحلة الأولى	القطع المكافئ - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	قيد الإنشاء	50 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في وعد الشمال	القطع المكافئ - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	قيد الإنشاء	50 ميغاواط
	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في الطيبة	لم تعلن بعد	قيد التخطيط	180 ميغاواط

البلد	المحطة	التكنولوجيا	الحالة	القدرة
تونس	المشروع المتكامل لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة في البرمة	برج - توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية والدورة المركبة	قيد التخطيط	5 ميغاواط
	محطة الطاقة الشمسية المركزة في أكاريت - الشركة التونسية للكهرباء والغاز	القطع المكافئ	قيد التخطيط	50 ميغاواط
	مشروع Elmed للطاقة الشمسية المركزة	القطع المكافئ	قيد الانتظار	100 ميغاواط
	مشروع TuNur - المرحلة الأولى	جهاز استقبال مركزي (برج للطاقة)	قيد التطوير	250 ميغاواط
	مشروع TuNur - المرحلة الثانية	جهاز استقبال مركزي (برج الطاقة)	قيد التطوير	2000 ميغاواط
الإمارات العربية المتحدة	محطة الشعاع المتجه إلى الأسفل للطاقة الشمسية	جهاز استقبال مركزي (برج للطاقة)	يعمل	0.1 ميغاواط
	المشروع التجريبي لتقنية صحن ستيرلنغ	صحن ستيرلنغ	يعمل	0.11 ميغاواط
	شمس 1	القطع المكافئ	يعمل	100 ميغاواط
	مشروع هيئة كهرباء ومياه دبي للطاقة الشمسية المركزة - المرحلة الأولى	جهاز استقبال مركزي (برج للطاقة)	قيد التخطيط	200 ميغاواط

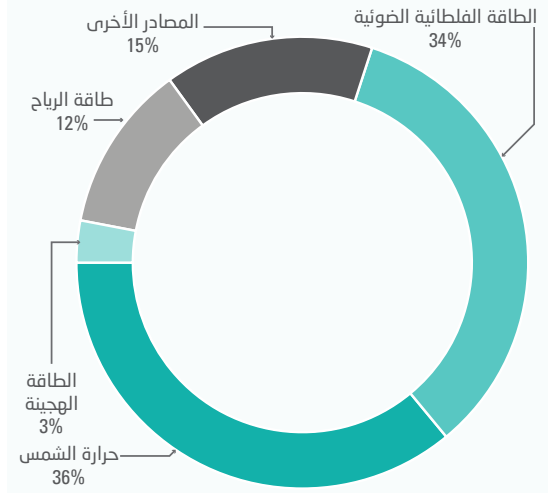
المصدر: CSP Today, 2016; IRENA, 2016c; Servicios Avanzados de Comunicación y Marketing SL (SACM), 2015.

يمكن التغلب على بعض مساوئها من خلال تشغيلها بواسطة مصادر الطاقة المتجددة. فالتحلية القائمة على استخدام الطاقة المتجددة تحد من انبعاثات غازات الدفيئة، وتمنع آثاراً بيئية أخرى ناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري، مثل فقدان التنوع البيولوجي بسبب استخراج النفط والفحم وتلوث الهواء.

وفي البلدان العربية، لا تزال ساعات محطات التحلية التي تستخدم الطاقة المتجددة محدودة (100 متر مكعب يومياً)، ولا يُستخدم سوى عدد قليل من المحطات المتوسطة الحجم. ويتم حالياً إنشاء أكبر محطة لتحلية المياه، قائمة على استخدام الطاقة الشمسية الفوتوفلطية لتشغيل محطة تحلية بقدرة 60,000 متر مكعب يومياً، وسوف تستخدم أغشية تعتمد على النانو تكنولوجي في منطقة الخفجي في المملكة العربية السعودية. ويُتوقع تشغيل هذه المحطة في عام 2017⁶⁹. وتعمل محطات تحلية أخرى تستخدم الطاقة المتجددة في الأردن، والإمارات العربية المتحدة، ومصر، والمغرب، غير أنها صغيرة⁷⁰.

ويبين الشكل 17 النمط الأمثل من حيث الكلفة لإمداد المياه مستقبلاً في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في ظل تغير المناخ. ومن الواضح أن العقود القليلة المقبلة ستشهد ارتفاعاً ليس فقط في إعادة استخدام مياه الصرف الصحي بل أيضاً في التحلية بواسطة الطاقة الشمسية المركزة، التي يُتوقع أن تغطي نسبة عالية من إمداد المياه في العالم العربي في عام 2050. وبالرغم من توفر مصادر عديدة للطاقة

الشكل 16. تحلية المياه باستخدام الطاقة المتجددة في العالم حسب مصادر الطاقة في عام 2009

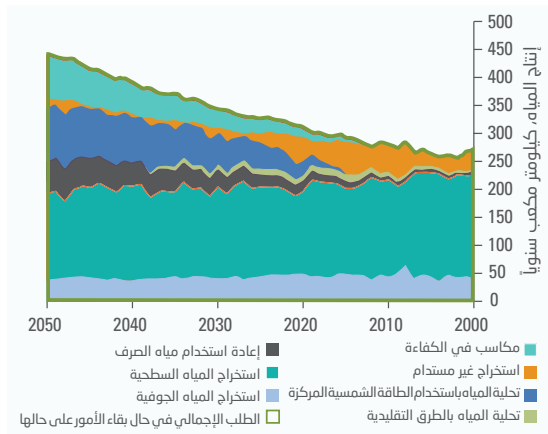


المصدر: World Bank, 2012.

والحرارة (ويمكن تخزين هذه الحرارة واستخراجها بسهولة وكفاءة)، وهي تناسب المرافق وتكنولوجيات إزالة الملوحة الواسعة النطاق. ولكن أحد أبرز مساوئ نُظُم الطاقة الشمسية المركزة هي أنها تتطلب استخدام المياه للتبريد وتوليد البخار، على عكس تكنولوجيات طاقة الرياح والطاقة الفوتوفولطية.⁷²

ويدرج إنشاء محطات الطاقة الشمسية المركزة ضمن أهداف الطاقة المتجددة في العديد من البلدان العربية. ويتضح ذلك في الجدول 6 الذي سيتناوله التقرير في فقرات لاحقة. ويبين الجدول 2 مختلف محطات الطاقة الشمسية المركزة القائمة أو قيد

الشكل 17. النمط الأمثل من حيث الكلفة لإمداد المياه مستقبلاً في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في ظل تغيّر المناخ (سيناريو بقاء الأمور على حالها)، 2000-2050



المصدر: World Bank, 2012.

المتجددة المستخدمة لتحلية المياه (مشار إليها في الشكل 16)، من المتوقع أن يزداد استخدام الطاقة الشمسية المركزة في بعض البلدان العربية. ومن المقدر أن تولد نُظُم الطاقة الشمسية المركزة 462,000 تيراواط ساعة سنوياً، ما يفوق معدل الاستهلاك السنوي للطاقة في المنطقة العربية بحوالي 350 مرة (اعتباراً من عام 2012). أما الطاقة الفوتوفولطية، فيمكن أن تولد 356 تيراواط ساعة سنوياً (أي حوالي 31 في المائة من الكهرباء المستخدمة في المنطقة في عام 2012).⁷¹ وبالإضافة إلى هذه الإمكانيات الكبيرة المتاحة في المنطقة، ما يميّز الطاقة الشمسية المركزة هي القدرة على توسيعها أو تقليصها لتناسب التطبيقات الصغيرة والكبيرة، وإمكاناتها الكبيرة لتحقيق التنمية المستقبلية (وخفض التكاليف). كما أنها تكنولوجيا الطاقة المتجددة الوحيدة التي تسمح بتخزين الطاقة وتوفيرها عند الطلب، وتوليد الحد الأدنى المطلوب من الكهرباء

والحرارة (ويمكن تخزين هذه الحرارة واستخراجها بسهولة وكفاءة)، وهي تناسب المرافق وتكنولوجيات إزالة الملوحة الواسعة النطاق. ولكن أحد أبرز مساوئ نُظُم الطاقة الشمسية المركزة هي أنها تتطلب استخدام المياه للتبريد وتوليد البخار، على عكس تكنولوجيات طاقة الرياح والطاقة الفوتوفولطية.⁷²

ويدرج إنشاء محطات الطاقة الشمسية المركزة ضمن أهداف الطاقة المتجددة في العديد من البلدان العربية. ويتضح ذلك في الجدول 6 الذي سيتناوله التقرير في فقرات لاحقة. ويبين الجدول 2 مختلف محطات الطاقة الشمسية المركزة القائمة أو قيد الإنشاء في المنطقة العربية. ومن الواضح أن هذه المحطات ستستخدم حتماً لتشغيل بعض الأنشطة المتعلقة بتحلية المياه. ومحطة الطاقة الشمسية المركزة الوحيدة المعروفة بأنها محطة لتحلية المياه هي محطة طانطان في المغرب، ولكنها غير مثبتة حالياً. وبشكل عام، حظيت النُظُم الهجينة للطاقة الشمسية المركزة والتقطير المتعدد الآثار بالمزيد من الاهتمام في منطقة مجلس التعاون الخليجي، باعتبارها فرصة محتملة لدمج مصادر الطاقة المتجددة في سوق تحلية المياه التي تسيطر عليها تكنولوجيا الحرارة. وينفذ معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا في أبو ظبي مشروعاً لدراسة تحلية المياه باستخدام أغشية تعتمد على الطاقة المتجددة.⁷³ وتشمل مصادر الطاقة المتجددة التي يُنظر في استخدامها تكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة وتكنولوجيا النظم الفوتوفولطية.

الجدول 3. الخصائص الرئيسية لمختلف عمليات تحلية المياه

نوع العملية			الخصائص
عمليات هجينة	عدم تغيّر المراحل	تغيّر المراحل	
عملية حرارية + غشائية: التقطير الغشائي، التقطير المتعدد المراحل/التناضح العكسي، التقطير المتعدد الآثار/التناضح العكسي	عملية مدفوعة بتفاوت الضغط/التركيز: التناضح العكسي (فصل الفشاء)، الفرز الغشائي-الكهربائي (فصل كهربائي-كيميائي)	عملية حرارية: التقطير المتعدد الآثار، التقطير المتعدد المراحل، ضغط البخار الميكانيكي، ضغط البخار الحراري (تبخر وتكثيف)	طبيعة العملية
0.2-0.6 ميكرومتر	0.1-3.5 نانومتر	-	حجم مسام الأغشية
40-80 درجة مئوية	أقل من 45 درجة مئوية	60-120 درجة مئوية	درجة حرارة التغذية
20-25 درجة مئوية	-	قد يكون مطلوباً	تدفق المياه الباردة
تفاوت الحرارة والتركيز	تفاوت التركيز والضغط	تفاوت الحرارة والتركيز	القوة الدافعة للفصل
حرارية وميكانيكية	ميكانيكية و/أو كهربائية	حرارية وميكانيكية	الطاقة
مصادر الحرارة بدرجة منخفضة أو مصادر الطاقة المتجددة	طاقة ميكانيكية/كهربائية عالية الجودة مستمدة من الوقود الأحفوري أو المصادر المتجددة	بخار أو حرارة بدرجة منخفضة أو حرارة ضائعة، وطاقة ميكانيكية للضخ مستمدة من الوقود الأحفوري أو المصادر المتجددة	نوع الطاقة
تقطير عالي الجودة مع مجموع جوامد ذائبة بين 20 و500 جزء في المليون	مياه صالحة للشرب مع مجموع جوامد ذائبة أقل من 500 جزء في المليون	تقطير عالي الجودة مع مجموع جوامد ذائبة أقل من 20 جزءاً في المليون	نوعية المنتج

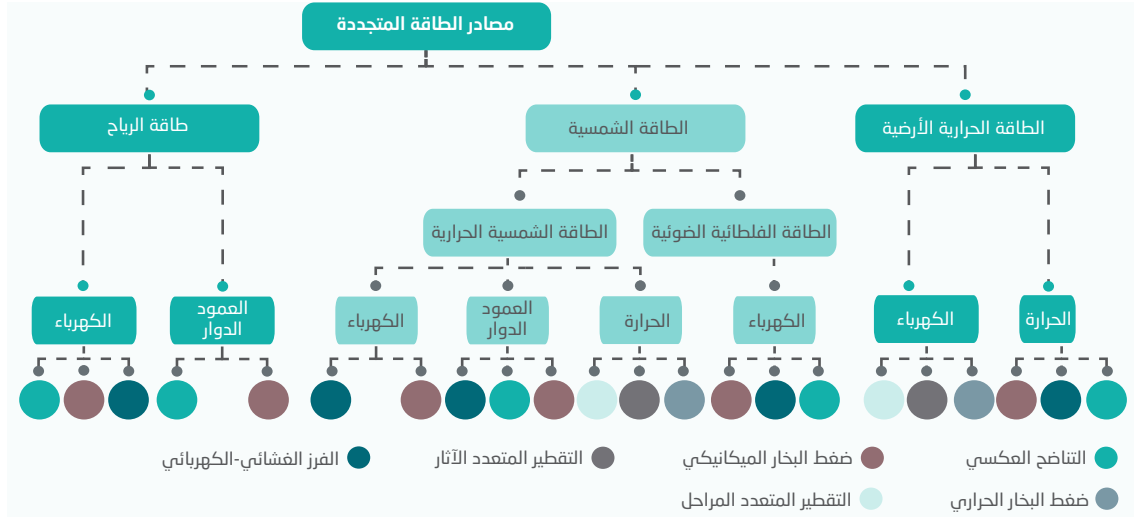
المصدر: Gude, Nirmalakhandan and Deng, 2010.

الجدول 4. تباين خصائص مياه البحر في المنطقة العربية

درجة الحرارة (درجة مئوية)	الملوحة (ملغرام/لتر)	مصدر المياه
15-30	38,000-41,000	البحر الأبيض المتوسط والمحيط الأطلسي
20-35	41,000-43,000	البحر الأحمر والمحيط الهندي
20-35	45,000-47,000	الخليج

المصدر: World Bank, 2012.

الشكل 18. المجالات الممكنة لإدراج مصادر الطاقة المتجددة في مختلف تكنولوجيات تحلية المياه



المصدر: Al-Karaghoul and Kazmerski, 2011; IRENA, 2015a

تصنف عمليات تحلية المياه بشكل عام بين تكنولوجيات حرارية وتكنولوجيات غشائية وذلك وفقاً لعملية الفصل المتبعة. ولطالما طُغى استخدام التكنولوجيات الحرارية لتحلية المياه في الشرق الأوسط، ولكن التكنولوجيات الغشائية شهدت نمواً سريعاً خلال العقود الخمسة الماضية فتجاوز استخدامها العمليات الحرارية لا سيما في المنشآت الجديدة⁷⁴. وتتنوع تكنولوجيات تحلية المياه وتشمل التقطير المتعدد الآثار، والتقطير المتعدد المراحل، وضغط البخار الحراري، والفرز الغشائي-الكهربائي، وضغط البخار الميكانيكي، والتناضح العكسي، والأكثر استخداماً هما التقطير المتعدد المراحل والتناضح العكسي. ويعرض الجدول 3 بإيجاز سمات هذه التكنولوجيات. ولا بد من الإشارة إلى أن ملوحة المياه التي تخضع للتحلية وحرارتها هما من العوامل الهامة لتحديد التكنولوجيا التي ينبغي استخدامها⁷⁵. ويبين الجدول 4 أيضاً مدى اختلاف خصائص المياه في المنطقة العربية. فاستخدام تقنية التناضح العكسي في الخليج أعلى كلفة من استخدام تقنية التقطير المتعدد الآثار بسبب ارتفاع ملوحة المياه⁷⁶، وتعتبر عملية التقطير المتعدد الآثار باستخدام الطاقة الشمسية المركزة أكثر كفاءة من حيث الطاقة من تقنية التناضح العكسي باستخدام الطاقة الشمسية المركزة⁷⁷. والعوامل الأخرى التي ينبغي أخذها في الاعتبار عند تحليل الجدوى لمحطة تحلية المياه بواسطة الطاقة المتجددة هي توفر الطاقة المتجددة في الموقع والمتطلبات المتعلقة بالمعالجة الأولية لمياه التغذية.

ويبين الشكل 18 المجالات الممكنة لإدراج مصادر الطاقة المتجددة في مختلف تكنولوجيات تحلية المياه. ويتضح أن معظم مصادر الطاقة المتجددة (باستثناء الطاقة الفوتوفولطية)، يمكن أن توفر الطاقة بشتى أشكالها: الحرارة، الكهرباء، الطاقة الميكانيكية. ويمكن لتكنولوجيات التحلية الحرارية على غرار التقطير المتعدد المراحل الاستفادة من مختلف أشكال الطاقة هذه، بينما يقتصر مصدر الطاقة التي تحتاج إليها عمليات التحلية الغشائية على الكهرباء مباشرة (أو الطاقة الميكانيكية). ومع أن الاحتمالات التي يعرضها الشكل 18 ممكنة لتنفيذ نظم تحلية تعمل على الطاقة المتجددة، لا تصلح جميعها للتطبيق على المستوى التجاري. لذا يعرض الجدول 5 الاحتمالات الأكثر رواجاً بالإضافة إلى بيانات عن الطاقة التي تحتاج إليها هذه النظم ومعلومات عن مراحل تطويرها الراهنة. ويبين التكنولوجيات التي يجري فعلياً تطبيقها لتحلية المياه باستخدام الطاقة المتجددة، وهي أجهزة التقطير الشمسي، والتبخير المتعدد التأثيرات باستخدام الطاقة الشمسية، ونظم هجينة مثل الطاقة الفوتوفولطية والتناضح العكسي، وطاقة الرياح والتناضح العكسي. وبتناول القسم التالي مختلف أنواع الطاقة المتجددة التي يمكن استخدامها لتحلية المياه، مع التركيز على تلك المطبقة أصلاً أو التي يمكن تطبيقها.

الجدول 5. خصائص العمليات الأكثر شيوعاً لتحلية المياه باستخدام المصادر المتجددة

مرحلة التطوير	الطلب على الطاقة (كيلوواط ساعة/متر مكعب)	السعة الفنية (متر مكعب يومياً)	
التطبيق	الطاقة الشمسية السلبية*	أقل من 1.0	أجهزة التقطير الشمسي
البحث والتطوير؛ التطبيق	الطاقة الحرارية: 100 الطاقة الكهربائية: 1.5	100-1	التبخير المتعدد التأثيرات باستخدام الطاقة الشمسية
البحث والتطوير	الطاقة الحرارية: 200-150	10-0.15	التقطير الغشائي-الشمسي
البحث والتطوير	الطاقة الحرارية: 70-60 الطاقة الكهربائية: 2-1.5	أكثر من 5,000	التقطير المتعدد التأثيرات باستخدام الطاقة الشمسية/الطاقة الشمسية المركزة
البحث والتطوير؛ التطبيق	الطاقة الكهربائية: مياه مالحة: 0.5-1.5 مياه البحر: 4-5	أقل من 100	الطاقة الفوتوفلطية والتناضح العكسي
البحث والتطوير	الطاقة الكهربائية: مياه مالحة فقط: 3-4	أقل من 100	الطاقة الفوتوفلطية والفرز الغشائي الكهربائي العكسي
البحث والتطوير؛ التطبيق	الطاقة الكهربائية: مياه مالحة: 0.5-1.5 مياه البحر: 4-5	50-2,000	طاقة الرياح والتناضح العكسي
البحث الأولي	الطاقة الكهربائية: مياه البحر فقط: 11-14	أقل من 100	طاقة الرياح وضغط البخار الميكانيكي

المصدر: IRENA and IEA-ETSAP, 2012. ملاحظة: * ينتقل الإشعاع القصير الموجات ويستخدم كطاقة حرارية.

نُظم تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية

يمكن تصنيف نُظم الطاقة الشمسية بين نُظم شمسية حرارية ونُظم فوتوفلطية. في نُظم الطاقة الشمسية الحرارية، توفر حرارة الشمس مدخلات الطاقة، أما في النُظم الفوتوفلطية فتحوّل الطاقة الشمسية مباشرةً إلى طاقة كهربائية. وتعد نُظم الطاقة الشمسية نُظم تجميع مباشرة عندما تستخدم الطاقة الشمسية لإنتاج مواد ذائبة مباشرةً في المجمع الشمسي. في حين تعتبر غير مباشرة عندما تجمع بين وحدات تحلية المياه التقليدية ومعدات الطاقة الشمسية. وتتطلب نُظم التجميع المباشرة عادةً مساحة واسعة من الأراضي وهي أقل إنتاجية رغم قدرتها التنافسية في محطات تحلية المياه الصغيرة بسبب انخفاض كلفتها وطريقة عملها المبسطة⁷⁸.

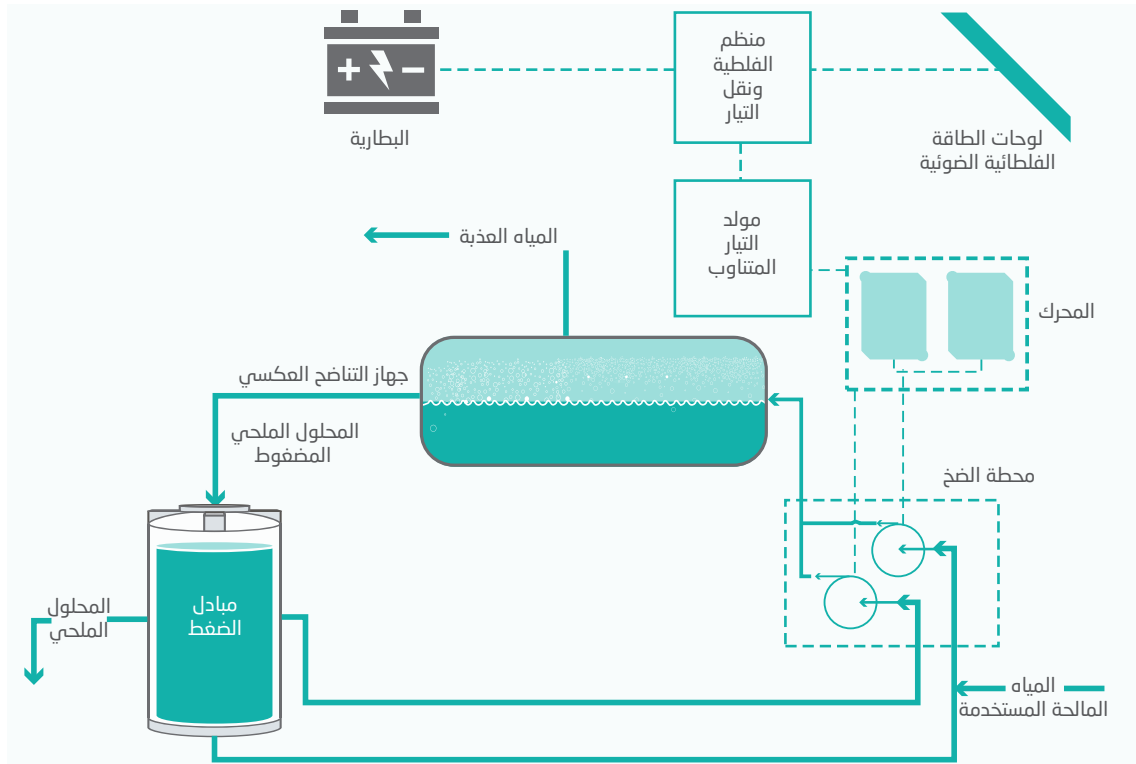
تحلية المياه باستخدام نُظم الطاقة الفوتوفلطية: يمكن ربط تكنولوجيا النُظم الفوتوفلطية مباشرةً بعمليات التحلية القائمة على الفرز الغشائي-الكهربائي أو التناضح العكسي. والخلايا الفوتوفلطية تحوّل الطاقة الشمسية مباشرةً إلى تيار ثابت. ويتألف نظام الخلايا الفوتوفلطية من عدة وحدات أو مصفوفات يضم كل منها العديد من الخلايا الشمسية، ويكون عبارة عن لوحات مسطحة أو نُظم مركزة. وتتطلب نُظم الخلايا دقة عالية في صيانة نُظم

التخزين وتشغيلها. وينتشر استخدام نُظم التحلية الصغيرة السعة القائمة على الطاقة الفوتوفلطية في جميع أنحاء العالم، ولا سيما في المناطق النائية والجزر. ففي الرياض في المملكة العربية السعودية مثلاً، يستخدم نظام الخلايا والتناضح العكسي لمعالجة المياه المالحة وتبلغ سعته 5 أمتار مكعبة يومياً^{81,80,79}.

وتتميز نُظم الخلايا الفوتوفلطية المركزة بأنها أكثر كفاءة وإحكاماً لإنتاج قدر معين من الطاقة. وفي السابق، واجهت هذه النُظم المركزة الكثير من التحديات، منها التكلفة الاستشارية العالية. ونتيجة لذلك، توقف بعض الشركات الرائدة في هذا المجال عن العمل، في حين واجه بعضها الآخر صعوبات في توسيع نطاق العمل نظراً لصعوبة جمع رأس المال اللازم لمثل هذه الجهود. والإمكانات واردة لتبليغ تكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة مستوى أعلى من الكفاءة، ما سيساعد على الحد من تكاليفها⁸².

ويعرض الشكل 19 رسماً تخطيطياً لنظام خلايا فوتوفلطية مع تكنولوجيا التناضح العكسي. ويعد هذا النظام من أكثر أشكال الطاقة المتجددة الواعدة في مجال تحلية المياه، ولا سيما في المناطق النائية⁸³. ويستخدم التناضح العكسي الكهرباء (بعد تحويلها إلى تيار متردد) لتشغيل المضخات. ويشمل النظام أيضاً بطاريات تخزين تساعد على تشغيل النظام باستمرار وانسياب عندما يكون مستوى الإشعاع الشمسي غير كافٍ (في الليل مثلاً وفي الطقس الغائم). ويمكن استخدام نُظم الطاقة الفوتوفلطية والتناضح العكسي لمعالجة المياه المالحة ومياه البحر على حد سواء. وتستخدم لكل منهما أغشية مختلفة في عملية التحلية، ولا بد من مراعاة كلفة الاستبدال المنتظم للبطاريات في الحالتين لا سيما عند استخدام مصفوفات خلايا كبيرة. أما تقنية التناضح العكسي لتحلية المياه المالحة، فهي أقل كلفة منها لتحلية مياه البحر، وتحقق معدل استرداد أعلى. وبما أن الضغط التناضحي لمياه البحر أعلى بكثير منه للمياه المالحة، تستهلك عملية تحلية مياه البحر طاقة أكثر وتتطلب عناصر أقوى ميكانيكياً ومصفوفات أكبر حجماً⁸⁴.

الشكل 19. رسم تخطيطي لنظام خلايا فوتوفلطية مع تكنولوجيا التناضح العكسي



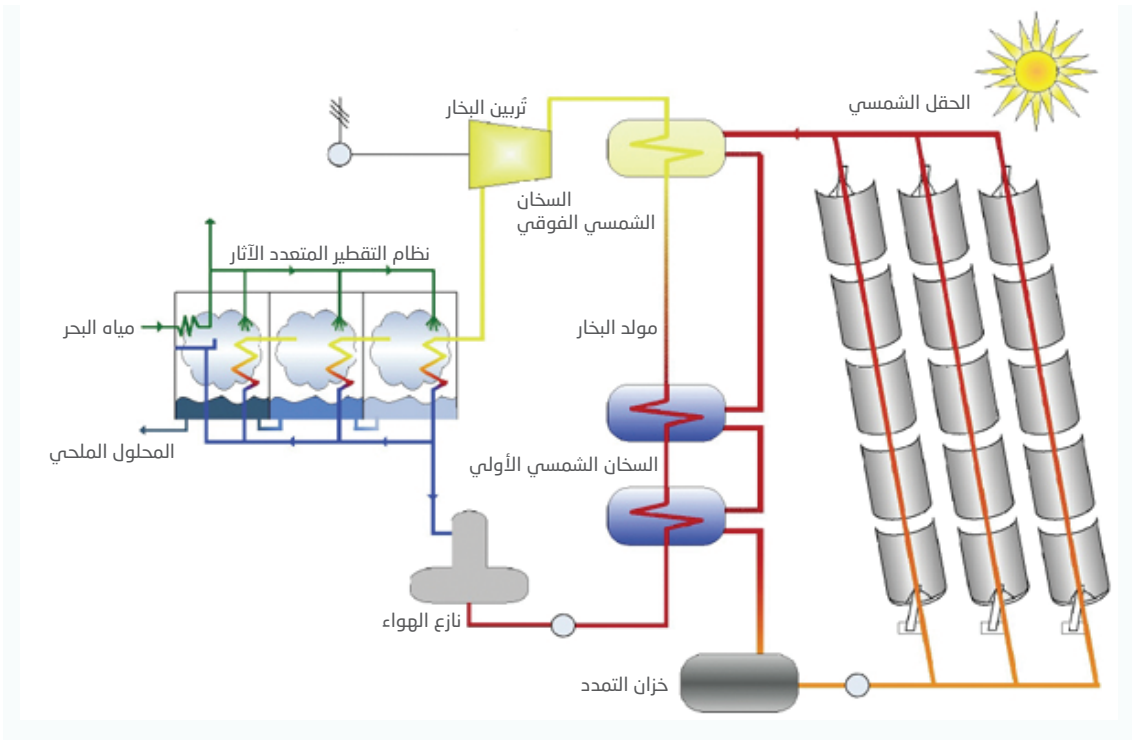
المصدر: Kim and others, 2013.

تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية الحرارية: الطاقة الشمسية المركزة هي نوع من التكنولوجيات المستخدمة لتحلية المياه بالطاقة الشمسية الحرارية. وسبقت مناقشة إيجابيات هذه التكنولوجيات وسلبياتها. وسيتناول هذا القسم كيفية استخدامها في عمليات تحلية المياه. ويعرض الشكل 20 رسماً تخطيطياً لنظام الطاقة الشمسية المركزة/التقطير المتعدد الآثار. وتعمل تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة عادةً على تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام مرايا زجاجية تتبع حركة دوران الشمس باستمرار.

ويوفر الجدول ألف-1 في المرفق مقارنة بين مختلف نُظُم تجميع الطاقة الشمسية المركزة. وتقنيات القطع المكافئ المبيّنة في الشكل 20 هي حالياً أفضل التقنيات المثبتة في هذه النُظُم⁸⁵ (كونها الأكثر نضجاً والأكثر استخداماً على المستوى التجاري)⁸⁶.

وتعتبر تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة القائمة على القطع المكافئ التقنية الأكثر رواجاً في السوق التجارية، ويمكن أن تقتصرن بعلميتي التحلية الغشائية والحرارية على حد سواء، بما أنها تعمل على تركيز الإشعاع الشمسي وتوفير حرارة عالية يمكن استخدامها لتوليد الكهرباء. وبالإضافة إلى ما هو مبين في الشكل 20، كثيراً ما تتضمن محطات الطاقة الشمسية المركزة أيضاً نُظُم تخزين حرارية تتيح توفير الطاقة باستمرار، أو تقتصرن بمصادر الوقود التقليدية في المحطات الهجينة. فالمحطة المبيّنة في الشكل 20 تنتج بشكل أساسي المياه، ولكن يمكنها أيضاً توليد الكهرباء كمنتج ثانوي. كما أن تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة أكثر ملاءمة من تكنولوجيا الطاقة الفوتوفولطية لمنشآت التحلية المتوسطة والكبيرة الحجم⁸⁷. ويتضمن الجدول ألف-2 في المرفق مقارنة بين أبرز خصائص تكنولوجيات تخزين الطاقة الشمسية الحرارية المختلفة.

الشكل 20. رسم تخطيطي لنظام الطاقة الشمسية المركزة/التقطير المتعدد الآثار



المصدر: Zachary and Layman, 2010.

تحلية المياه باستخدام طاقة الرياح

يمكن لتربينات الرياح إمداد محطات التحلية بالطاقة الميكانيكية أو الكهربائية. وتعتبر هذه التكنولوجيا ناضحة ومتاحة في السوق على غرار تكنولوجيا الطاقة الفوتوفلطية. ووجه الشبه الآخر بين التقنيتين هو ملاءمتها لعمليات التحلية الصغيرة والمتوسطة الحجم (فالجمع بين طاقة الرياح والتناضح العكسي يمكن أن يُنتج بين 50 و2,000 متر مكعب يومياً)⁸⁸. وطاقة الرياح ملائمة أيضاً للمناطق الساحلية حيث إمكانيات الرياح وقابلية التنبؤ بها مرتفعة. ويمكن أن تكون محاور الدوران في تربينات الرياح عمودية أو أفقية. لكن المحور الأفقي لديه كفاءة أعلى في توليد الطاقة، ما يجعله أكثر شيوعاً⁸⁹. وعلى غرار الطاقة الشمسية، يحتم انقطاع الرياح ضرورة تخزين الطاقة أو توفير نظام طاقة احتياطي لتخطي أي عوائق في عملية تحلية المياه، وذلك من خلال إنشاء نُظم هجينة مثلاً⁹⁰. ويرتبط استخدام طاقة الرياح عادةً بعمليات التحلية القائمة على التناضح العكسي أو الفرز الغشائي-الكهربائي أو ضغط البخار الميكانيكي. وفي حالة ضغط البخار الميكانيكي، تستخدم الطاقة الميكانيكية التي تنتجها تربينات الرياح مباشرةً لضغط البخار من دون الحاجة إلى تحويل طاقة الرياح إلى كهرباء، ما يعزز كفاءة العملية⁹¹.

تحلية المياه باستخدام طاقة حرارة باطن الأرض

يمكن استخدام طاقة حرارة باطن الأرض لإنتاج الحرارة والكهرباء، وبالتالي يمكن استخدامها لتشغيل عمليتي التحلية الحرارية والغشائية على حد سواء. وتكون خزانات حرارة باطن الأرض عادةً ذات درجات حرارة منخفضة (أقل من 180 درجة مئوية) أو مرتفعة (أكثر من 180 درجة مئوية)⁹². وتستخدم الخزانات المعتدلة أو المرتفعة الحرارة مباشرةً لتشغيل عمليات التحلية الحرارية. وإذا كان ضغط مصدر الطاقة الحرارية لباطن الأرض عالياً بما فيه الكفاية، يمكن استخدام الطاقة الميكانيكية مباشرة لتشغيل جهاز التحلية المدفوع ميكانيكياً. أما السوائل الحرارية الأرضية المرتفعة الحرارة، فيمكن استخدامها لتوليد الكهرباء بهدف تشغيل محطات التحلية العاملة على التناضح العكسي أو الفرز الغشائي-الكهربائي⁹³. أما الطاقة الحرارية الأرضية المنخفضة الحرارة (70-90 درجة مئوية)، فتُعد الأنسب للتحلية بواسطة التقطير المتعدد الآثار. ومن أهم مزايا الطاقة الحرارية لباطن الأرض هي أنها مصدر مستمر للطاقة ولا تستلزم تخزين الطاقة. كما أنها تساعد على تحلية المياه بكلفة منخفضة نسبياً، مع أن تكاليف رأس المال قد تكون مرتفعة. أما مدى ملاءمة استخدام مصدر الطاقة هذا، فيتوقف إلى حد كبير على الظروف المحلية⁹⁴. فقد أجريت في الإمارات العربية المتحدة مؤخراً دراسة خلصت إلى أن الجمع بين طاقة حرارة باطن الأرض والتحلية بواسطة التقطير المتعدد الآثار أو التناضح العكسي يشكل طريقة موثوقة لإمداد المياه بوتيرة ثابتة، مع أن هذه التكنولوجيا لم تثبت بعد مدى استمراريته المالية بالنسبة إلى عمليات التحلية المرتكزة على التقطير المتعدد الآثار والتناضح العكسي باستخدام الوقود الأحفوري. أما في المناطق الساحلية في منطقة الخليج، فقد يكون استخدام التناضح العكسي بواسطة طاقة حرارة باطن الأرض، وبدرجة أقل عملية التقطير المتعدد الآثار بواسطة هذه الطاقة الحرارية، فعالاً من حيث الكلفة⁹⁵.

مخلفات العمليات الصناعية

إنتاج الطاقة الحيوية من المخلفات الصناعية

سبقت مناقشة عملية إنتاج الغاز الحيوي من حمأة مياه الصرف في محطات معالجة مياه الصرف الصحي. لكن المنشآت الصناعية الأخرى قد تنتج بدورها مخلفات عضوية أو مياه صرف يمكن استخدامها كمصدر للطاقة الحيوية. ويبين الشكل 21 مختلف أنواع الوقود الحيوي المتوفرة ومراحل تطور إنتاجها في عام 2011. ومن الواضح أن إنتاج الغاز الحيوي بواسطة الهضم اللاهوائي، الذي يطبق في بعض مرافق معالجة مياه الصرف، تكنولوجيا متطورة ومستخدمة في جميع أنحاء العالم. وبالإضافة إلى حمأة مياه الصرف

الشكل 21. أنواع الوقود الحيوي ومراحل تطور إنتاجه، 2011

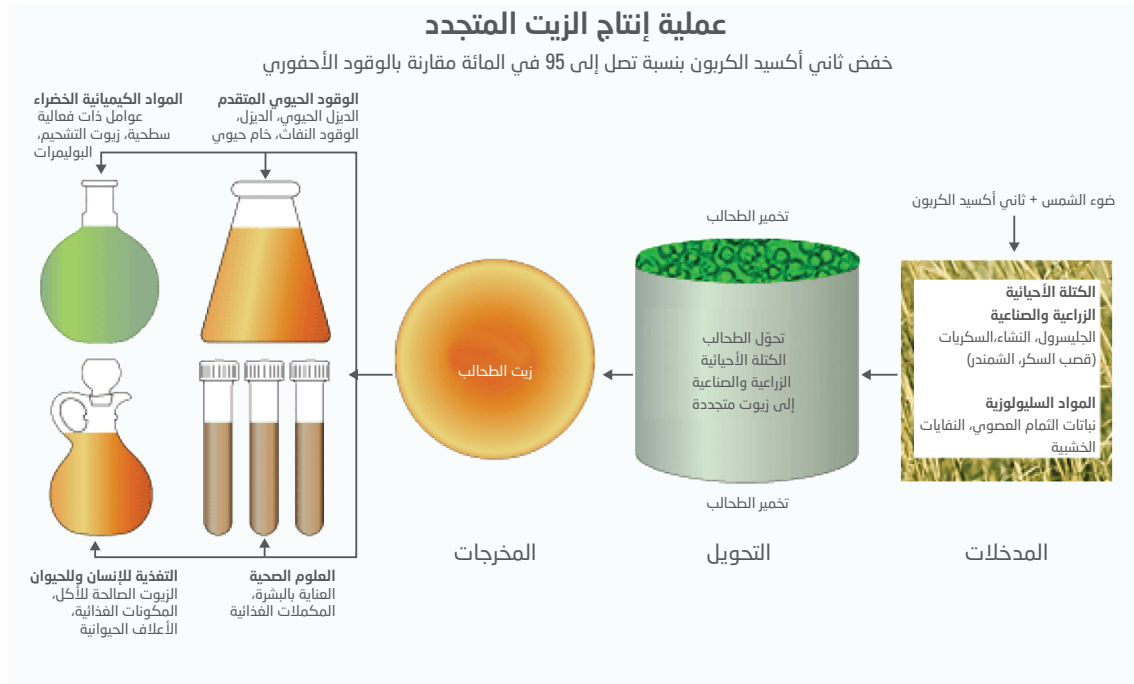
الوقود الحيوي التقليدي	الوقود الحيوي المتطور			
مرحلة التسويق	مرحلة التسويق الأولية	مرحلة العرض	المرحلة الأساسية ومرحلة البحث والتطوير	
الإيثانول المستخرج من السكر والنشاء	الإيثانول السيلولوزي			الإيثانول الحيوي
الديزل الحيوي بالأسرة المتبادلة	الزيت النباتي المعالج بالهيدروجين	الديزل عبر تحويل الكتلة الأحيائية إلى سائل (التحويل إلى غاز + عملية فيشر-تروبش)	الديزل الحيوي المستخرج من الطحالب الدقيقة، الهيدروكربونات القائمة على السكر	وقود الديزل الحيوي
		البيوتانول الحيوي، ثنائي ميثيل الإيثر، الوقود القائم على الانحلال الحراري للميثانول	الوقود المستحدث (مثل منتجات الفوران)	الأنواع الأخرى من الوقود والإضافات
الغاز الحيوي (الهضم اللاهوائي)	الغاز الحيوي-الاصطناعي			الميثان الحيوي
		تهديب الغاز الحيوي	التحويل إلى غاز مع التهذيب	الهيدروجين
		جميع الطرق المستحدثة الأخرى		

الوقود الحيوي السائل الوقود الحيوي الغازي

المصدر: Biernat, Malinowski and Gnat, 2013.

يمكن استخدام الهضم اللاهوائي لمعالجة المخلفات العضوية الصناعية الأخرى. وبعد إنتاج الغاز الحيوي، يمكن تنقيته لتحويله إلى ميثان حيوي (عبر إزالة ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين)، ثم استخدامه كوقود للنقل (كالغاز الطبيعي المضغوط الحيوي) أو كمصدر للهيدروجين الذي يمكن استخدامه في خلايا الوقود. ويمكن استخدام مادة محفزة لتحويل الغاز الحيوي (مثل الميثان) بسهولة إلى غاز اصطناعي (مركب الهيدروجين وأول أكسيد الكربون). ويستخدم الغاز الاصطناعي في الصناعة الكيميائية لإنتاج وقود سائل وغيرها من المنتجات عالية القيمة التي يمكن فصلها بسهولة بعد إنتاجها⁹⁶.

الشكل 22. رسم تخطيطي لعملية إنتاج مختلف المواد الصناعية من الطحالب



المصدر: Biernat, Malinowski and Gnat, 2013.

ويبين الشكل 22 كيفية استخدام الطحالب، وهي كائنات مجهرية، لتحويل المخلفات الصناعية العضوية إلى طاقة، وتنوع مجالات استخدام الوقود الذي تنتجه. وتتسم الطحالب بعدة مزايا مثل سهولة زراعتها، لأنها قابلة للنمو في أماكن مثل الصحراء والمحيطات وحتى مياه الصرف الصحي. وتتميز الطحالب عادةً بمعدل نموها السريع، وملاءمتها التامة لطبيعة مياه الصرف المعقدة والمتغيرة وغير المعقمة، وقدرتها على تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى طاقة، ما يسهم في الحد من الاحتباس الحراري، وامتصاص الملوثات مثل النيتروجين والفوسفور، ومعالجة الأضرار البيئية. ويرتبط معدل نمو الطحالب ومعدل الوقود الحيوي الذي تنتجه بعدد من العوامل مثل نسبة تركيز المواد المخمرة (أي المواد/المخلفات العضوية) التي تتغذى منها وكميتها ونوعها. ويمكن للطحالب المستخدمة لإنتاج الوقود السائل أن تخفض كميات مياه الصرف الصحي عبر تنقيتها وإزالة المواد السامة منها مثل المعادن الثقيلة⁹⁷.

دراسة حالة: قطاع النفط والغاز

للطاقة المتجددة إمكانات عالية لتلبية حاجة قطاع النفط والغاز إلى الطاقة. وتكون هذه الطاقة المتجددة أولاً إما طاقة شمسية أو طاقة رياح، وتُستخدم لتشغيل العديد من الأدوات والمعدات طوال مراحل إنتاج الوقود الأحفوري. ويمكن أيضاً استخدام الطاقة المتجددة للتسخين بواسطة نظم الطاقة الشمسية الحرارية والطاقة الحرارية لباطن الأرض. واستخدام الطاقة المتجددة في هذه المجالات غاية في الأهمية بالنسبة إلى البلدان العربية، سيما وأن بعضها من أبرز البلدان المنتجة للنفط ويستفيد من إشعاع شمسي وافر. وقد تبين أن أهم احتياجات النفط الثقيل في العالم تتركز في المناطق التي تتلقى نسبة عالية من الإشعاع الشمسي⁹⁸، من هنا جدوى استخدام الطاقة المتجددة في عمليات إنتاج النفط والغاز. ويجري حالياً استخدام الطاقة المتجددة في المراحل الأولية لهذه الصناعة. لكن الأمر مختلف بالنسبة إلى المراحل النهائية منها، وإن كان من المتوقع أن يبدأ استخدامها في هذه المراحل في المستقبل القريب.

ومعظم شركات النفط الكبرى تشغل تطبيقاتها الميدانية بواسطة ألواح الخلايا الفوتوفلطية⁹⁹. وتشمل هذه التطبيقات أضواء الإنذار غير الموصولة بالشبكة للمنشآت البحرية. وقد ساهم استخدام هذه التكنولوجيا في تحقيق وفورات مالية كبيرة لهذه الشركات. وفي العديد من شركات النفط، تُستخدم هذه التكنولوجيا (أو من المقرر استخدامها) في تطبيقات أخرى تشمل الحماية المهبطية لأغلفة الآبار والأنابيب من التآكل، وتشغيل منصات النفط والمنشآت النفطية البعيدة البحرية والساحلية¹⁰⁰.

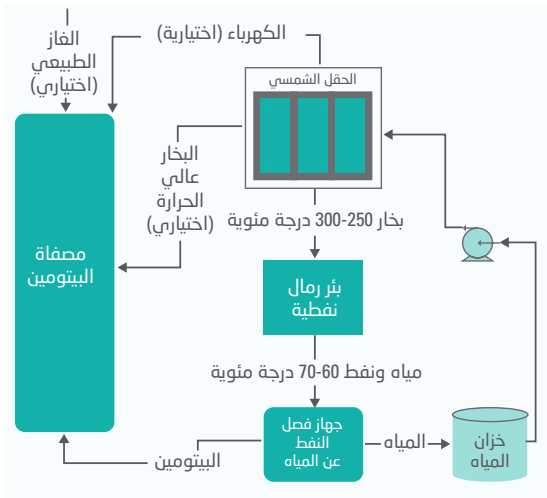
وعند استخدام تكنولوجيا نظم الخلايا الفوتوفلطية في مناطق معينة مثل منطقة الخليج، لا بد من التنبه لبعض العوامل لتحسين أداء النظام وهي كمية الغبار ومخلفات الطيور التي تتعرض لها (والتي ينبغي إزالتها بانتظام عن نظم الخلايا)، ودرجات الحرارة المرتفعة ولا سيما خلال الصيف (التي تخفض إنتاجية هذه النظم)، والتغيرات في الجمل التي يمكن مواجهتها عبر تخزين فائض بنسبة 15 في المائة على الأقل من الجمل العادي¹⁰¹. منذ أكثر من عشر سنوات، نفذت وحدة Chevron Energy Solutions نظام خلايا فوتوفلطية واسع النطاق هو نظام Solarmine، لتشغيل العمليات النفطية في كاليفورنيا ولا سيما وحدات ضخ النفط ومحطات المعالجة. وتبلغ قدرة النظام 490 كيلوواط (تيار متردد) وهو يضم 4,800 لوح شمسي، تنتج 1,000 ميغاواط ساعة سنوياً. وتمتد محطة الطاقة الفوتوفلطية على مساحة تبلغ حوالي 24,000 متر مربع. وتبين في تقرير أعد في عام 2005 عن أداء المحطة، أنها حققت الأهداف التي أنشئت من أجلها، لا بل تجاوزتها أحياناً بنسبة تتراوح بين 5 و10 في المائة¹⁰². وفي أيلول/سبتمبر 2016، أبرمت شركة Eni للطاقة اتفاقاً لبناء محطة فوتوفلطية بقدرة 10 ميغاواط في حقل بئر رابع الشمالي النفطي في الجزائر¹⁰³.

ومن أهم التطبيقات المحتملة لتكنولوجيات الطاقة الشمسية الحرارية المركزة في قطاع النفط والغاز، توليد البخار اللازم للتسخين وللإستخراج المعزز للنفط. فتكنولوجيا الطاقة الشمسية يمكن أن تولد البخار

بضغط عال ودرجة حرارة مرتفعة (تصل إلى 550 درجة مئوية). ويتطلب الاستخراج المعزز للنفط بخاراً بدرجة تتراوح بين 115 و300 درجة مئوية، يمكن توفيره باستخدام تكنولوجيا الطاقة الشمسية. أما الغاز الطبيعي المستخدم عادةً لإنتاج البخار من أجل الاستخراج المعزز للنفط، فقد ازدادت كلفته بسبب النقص في الإمدادات، واستخدام أنواع الوقود البديلة مثل الفحم يؤدي إلى زيادة كبيرة في انبعاثات الكربون. وبالتالي يمكن أن توفر الطاقة الشمسية المركزة طريقة فعالة من حيث الكلفة ومراعية للبيئة لتوليد هذا البخار. وقد أثبتت محطة تجريبية أنشئت في كاليفورنيا، وبدأ تشغيلها في عام 2010، جدوى استخدام تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة لتوليد البخار واستخدامه في استخراج النفط من الحقول. وكما يبين الجدول 2، أنشئت في عُمان محطة للطاقة الشمسية الحرارية بقدرة 7 ميغاواط، وهي قيد التشغيل، وتجمع بين محطة للطاقة الشمسية الحرارية ومحطة تقليدية قائمة أصلاً لتوليد البخار. وقد أثنى العديد من الدراسات الأخرى على فعاليتها أيضاً. وتحتفظ محطة الطاقة الشمسية الحرارية بالمرابا ولاقطات الأشعة في هيكل زجاجي يحميها من الظروف الخارجية القاسية. وقد ساهمت هذه المحطة في خفض كمية الغاز الطبيعي المطلوب بنحو 49,500 جيجا جول سنوياً، ويبين تقرير أعد في عام 2014 أن المحطة تولد أكثر من 80 طن من البخار يومياً، وقد نجحت في توليد أكثر من 97 في المائة من الإنتاج النظري المتوقع¹⁰⁴. ويجري حالياً وضع خطة لإنشاء محطة بقدرة 1 جيجاواط، تعمل على الطاقة الشمسية المركزة من أجل الاستخراج المعزز للنفط في عُمان (الجدول 2)، وتبحث شركة نفط الكويت في إمكانية استخدام تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة لتشغيل المشاريع المستقبلية المتعلقة بالاستخراج المعزز للنفط في البلاد¹⁰⁴. وفي ما يتعلق بالرمال النفطية والنفط غير التقليدي، أظهرت دراسة أجريت في عام 2009 مدى فعالية الكلفة والموثوقية في استخدام الطاقة الشمسية لإنتاج البخار من أجل استخراج البيتومين من الرمال النفطية. والنظام الذي تناوله هذه الدراسة يقوم على توليد مشترك للحرارة والكهرباء. ويبين الشكل 23 رسماً تخطيطياً لنظام مقترح حول الاستخراج المعزز للنفط من الرمال النفطية بواسطة الطاقة الشمسية.

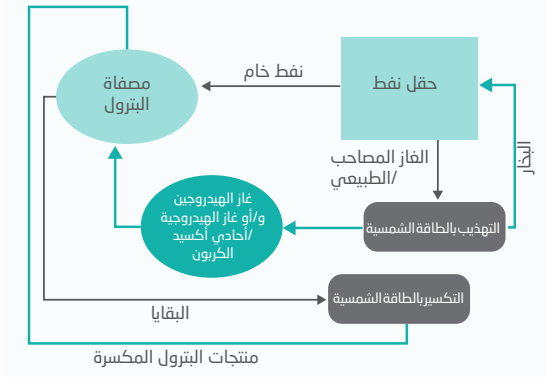
ويمكن أيضاً استخدام الطاقة الشمسية في قطاع النفط والغاز لتحلية المياه المالحة المنتجة من آبار النفط والغاز. فالمخلفات السائلة المعالجة غير ضارة بالبيئة، ويمكن إعادة استخدام المياه المعالجة في المحطة نفسها أو في بعض التطبيقات الأخرى (مثل الزراعة). ويُعرف عن العمليات النهائية في قطاع النفط والغاز، مثل إنتاج الهيدروجين وتقطيره، أنها تتطلب كمية كبيرة من الطاقة وكثافة عالية ودرجات حرارة مرتفعة. لذا، ستشكل تكنولوجيا الطاقة الشمسية الحرارية خياراً واعداً لهذه العمليات، مع أنه لم تُنشأ أي محطة صناعية لاستعمال هذه التكنولوجيا في التطبيقات المذكورة¹⁰⁶. ويعزى ذلك إلى التحديات المرتبطة بهذه التطبيقات، مثل محدودية الأراضي لإقامة منشآت الطاقة الشمسية، وانقطاع الطاقة الشمسية، ما يعني أن كل محطة يجب أن تكون جزءاً من نظام هجين أو أن يكون فيها خيارات لتخزين الطاقة¹⁰⁷. ولمعالجة مساحة الأراضي المحدودة، يمكن إنشاء المحطة على مسافة من المصافي في المواقع التي تتاح فيها الأراضي المفتوحة. وتتم معالجة المخلفات

الشكل 23. رسم تخطيطي لنظام مقترح حول الاستخراج المحسّن للنفط من الرمال النفطية بواسطة الطاقة الشمسية



المصدر: Absi Halabi, Al-Qattan and Al-Otaibi, 2015.

الشكل 24. إمكانية تطبيق النظام في مصافي البترول: التهذيب والتكسير باستخدام الطاقة الشمسية خارج الموقع



المصدر: Absi Halabi, Al-Qattan and Al-Otaibi, 2015.

فوراً في المنشأة المعزولة، ثم تنقل المخرجات إلى المصافي عبر الأنابيب. ويعرض الشكل 24 مثلاً عن هذا النظام، حيث ينتج الهيدروجين أو الغاز الاصطناعي بعيداً عن المصافي من خلال التهذيب بواسطة الطاقة الشمسية. وأي حرارة زائدة منتجة خارج الموقع يمكن استخدامها لتلبية احتياجات الطاقة الحرارية في المصافي. ويمكن ضخ بقايا النفط الثقيلة بعيداً عن المصافي لتكسيرها بواسطة الطاقة الشمسية، ثم تنقل المنتجات إلى المصافي حيث تخضع لمزيد من المعالجة¹⁰⁸.

وإلى جانب الطاقة الشمسية، يمكن استخدام أنواع أخرى من الطاقة المتجددة في قطاع النفط والغاز، وقد بدأ استخدامها أصلاً. فمجموعة Shell مثلاً، تستخدم تربينات الرياح وتُظم الخلايا الفوتوفولطية معاً لتشغيل بعض المنصات الأحادية البرج¹⁰⁹. كما

أظهرت دراسة أجريت في عام 2012 إمكانية تحويل الطاقة الحرارية للمحيطات في مواقع بعيدة عن السواحل حيث يتجاوز فرق الحرارة بين قاع البحر والشاطئ 20 درجة مئوية. كما يمكن استخدام طاقة حرارة باطن الأرض في قطاع النفط والغاز. فالنفط يتكون على درجة حرارة قد تصل إلى 130-150 درجة مئوية، وبالتالي يمكن نظرياً الاستفادة من الفرق بين حرارة تكوين النفط وحرارة سطح الأرض لتوليد الحرارة. وخلال عمليات الاستخراج المعزز للنفط، يتم حقن المياه ثم توليد الحرارة كنتيجة ثانوية لهذه العمليات. ويمكن تحويل مختلف المنتجات الكربونية الثانوية الناجمة عن العمليات الصناعية (مثل الفحم البترولي وبقايا التفرغ) إلى غاز يمكن استخدامه لإنتاج الغاز الاصطناعي الذي يمكن الاستفادة منه كمصدر للطاقة¹¹⁰.

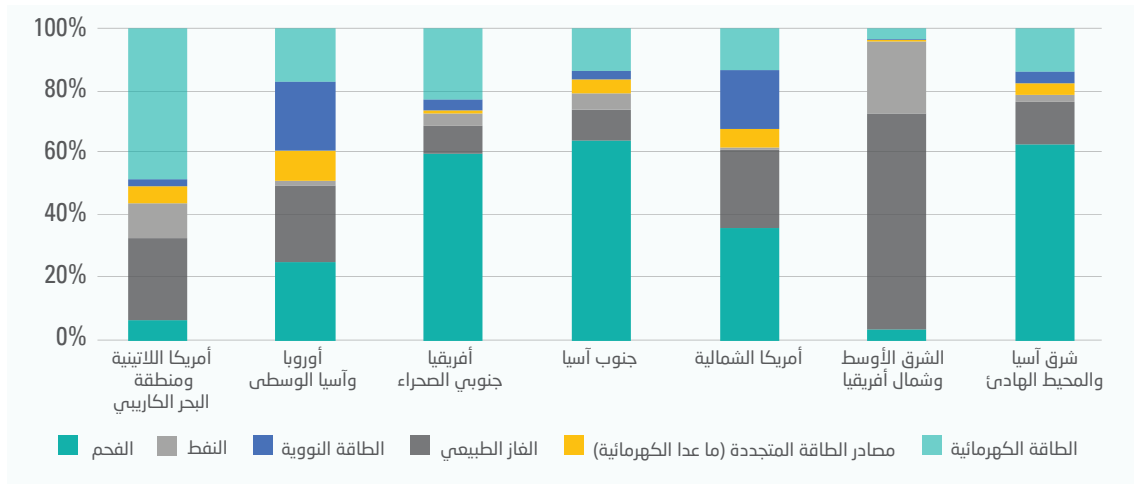
وعلى الرغم من الإمكانيات الكبيرة المتاحة لتُظم الطاقة المتجددة، يعتمد تطبيقها إلى حد كبير على أسعار النفط التي تشهد تقلبات مستمرة. ولكن من المتوقع أن تزداد مجالات استخدام الطاقة المتجددة في قطاع النفط والغاز، لا سيما في ظل زيادة الطلب على الطاقة في هذا القطاع بفعل الاستخدام المتزايد لتقنيات الاستخراج الثانوي والثالث، الشديدة الاستهلاك للطاقة. وباستثناء بعض التطبيقات في بعض المجالات الأولى من الإنتاج، يهدف الكثير من منشآت الطاقة المتجددة القائمة أو المقرر إنشاؤها في قطاع النفط والغاز إلى تقديم عرض توضيحي، ستسهم نتائجه في توسيع نطاق استخدام الطاقة المتجددة في هذا القطاع. وبحلول عام 2035، من المتوقع أن تلي الطاقة الشمسية حوالي 5 في المائة من حاجة هذا القطاع إلى الطاقة أي ما يعادل حوالي 2 بيتاجول¹¹¹.

تقييم تكنولوجيات الطاقة المتجددة لإنتاج الكهرباء

تستخدم مصادر الطاقة المتجددة في مختلف أنحاء العالم إلى جانب مصادر الطاقة غير المتجددة بهدف إنتاج الكهرباء. ويبيّن الشكل 25 حصة الطاقة المتجددة المستعملة لتوليد الكهرباء في مختلف مناطق العالم في عام 2013، مقارنة بأنواع مختلفة من الوقود. ومن الواضح أن نسبة استخدام الطاقة المتجددة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا كانت ضئيلة في عام 2013 (0.32 في المائة). ومن المتوقع أن ترتفع هذه النسبة نتيجة الأهداف التي وضعتها لنفسها البلدان العربية لنشر استخدام الطاقة المتجددة. وهذه الأهداف مذكورة في الجدول 6. وبالنسبة للعديد من البلدان العربية، كان الدافع الأول لوضع هذه الأهداف، كما ذُكر مراراً، هو إصلاح تسعير الطاقة¹¹². وقد تأثر استخدام الطاقة المتجددة بهاجس بعض البلدان بشأن التزايد السريع في الطلب المحلي على الوقود الأحفوري (نظراً لأسعاره المدعومة من بين عوامل أخرى)، وبما ترتب على ذلك من زيادة في إنتاج الوقود الأحفوري وضرورة تحويله من أسواق التصدير إلى الأسواق المحلية لتلبية الطلب الداخلي. ويترتب على هذا الوضع فرصة ضائعة عالية الكلفة، وتتفاقم الأمور بفعل تدني أسعار النفط¹¹³.

وأعلن العديد من البلدان العربية عن تعهدات جديدة باتجاه استخدام الطاقة المتجددة من خلال المساهمات المقررة المحددة وطنياً بشأن المناخ. وفي الكثير من الحالات، خضعت الأهداف للتحديث لتعكس المتطلبات والظروف المحلية. كما اعتمدت الاستراتيجية العربية لتطوير استخدامات الطاقة المتجددة 2010-2030، التي سهّلت أيضاً وضع أهداف الطاقة المتجددة. واعتمدت هذه الاستراتيجية في القمة العربية للتنمية الاقتصادية والاجتماعية في عام 2013، تحت مظلة جامعة الدول العربية. وتنص على أهداف طويلة الأمد لإنتاج الكهرباء باستخدام الطاقة المتجددة، وتهدف إلى زيادة هذا الاستخدام في شتى القطاعات مثل تحلية المياه¹¹⁴. كما يُدرك واضعو السياسات في البلدان العربية منافع نشر استخدام الطاقة المتجددة. وقد ساعدت هذه المنافع التي تشمل الوصول إلى الطاقة واستحداث الوظائف، على تهيئة الظروف المؤاتية لوضع أهداف الطاقة المتجددة.

الشكل 25. حصة الوقود بمختلف أنواعه من مجموع مصادر توليد الكهرباء حسب مناطق العالم، 2013



المصدر: البنك الدولي، 2015.

وفي الوقت عينه، يمكن القول إن هذه الأهداف غير طموحة بما يكفي. فبين عامي 2014 و2050، من المتوقع أن تسهم الطاقة المتجددة بحوالي 67 في المائة في النمو الصافي لسعة الطاقة في العالم، مقابل أقل من 15 في المائة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا¹¹⁵. كما من المتوقع أن يختلف تخطيط البلدان العربية عما يُتَوَقَّع إنجازُه. فالبلدان التي تعتمد على الوقود المستورد لتلبية الطلب المحلي على الطاقة (مثل المغرب) يُتَوَقَّع أن تكون أكثر إقداماً في بلوغ أهدافها المتعلقة بالطاقة المتجددة نتيجة للبيئة الداعمة والمؤاتية التي أوجدتها لاستخدام هذه التكنولوجيا البديلة. وتفيد الوكالة الدولية للطاقة بأن البلدان العربية حصلت من بين بلدان العالم على أدنى أسعار في العقود الطويلة الأمد لتشغيل مصادر الطاقة المتجددة في الفترة 2016-2018 (فأدنى الأسعار كانت في مصر، مثلاً، لتوليد طاقة الرياح الساحلية، وفي الأردن والإمارات العربية المتحدة لتوليد الطاقة الشمسية الفوتوفلطية على نطاق واسع). ومن المتوقع أيضاً أن تصبح المنطقة من أسرع الأسواق نمواً من حيث استخدام تكنولوجيا الطاقة الفوتوفلطية¹¹⁶. تزخر المنطقة إزاء القدرات، وهذه المجموعة من الأدوات تهدف إلى تسهيل اعتماد تكنولوجيات الطاقة المتجددة في سبيل توليد الطاقة في البلدان العربية.

الجدول 6. الأهداف التي حددها معظم البلدان العربية لنشر استخدام الطاقة المتجددة، 2013

البلد	أهداف الطاقة المتجددة
الأردن	15 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2015
الإمارات العربية المتحدة	24 في المائة من الطاقة النظيفة (بما فيها الطاقة النووية) في مجموعة مصادر الطاقة بحلول عام 2021؛ دبي: 7 في المائة من السعة بحلول عام 2020 و15 في المائة بحلول عام 2030 (مقارنة بنتائج العمل المعتاد)؛ أبو ظبي: 7 في المائة من سعة توليد الكهرباء بحلول عام 2020
البحرين	5 في المائة من السعة المركبة بحلول عام 2030
تونس	25 في المائة من سعة الطاقة المركبة بحلول عام 2030؛ 30 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
الجزائر	15 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020؛ 27 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
السودان	20 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
العراق	10 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
عمان	10 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020
فلسطين	25 في المائة من الطاقة النهائية بحلول عام 2020؛ 10 في المائة (أو على الأقل 240 جيجاواط ساعة) من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020
قطر	2 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020؛ 20 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
الكويت	10 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020؛ 15 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2030
لبنان	12 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020
ليبيا	7 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020؛ 10 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2025
مصر	20 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020
المغرب	42 في المائة من السعة المركبة لتوليد الكهرباء بحلول عام 2020؛ 52 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2039
المملكة العربية السعودية	9.5 جيجاواط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2023؛ 50 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة من الموارد غير الهيدروكربونية بحلول عام 2032
موريتانيا	20 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2020
اليمن	15 في المائة من الطاقة الكهربائية المولدة بحلول عام 2025

المصدر: El-Katiri, 2014; IRENA, 2016b; Poudineh, Sen and Fattouh, 2016; Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) and Institute for Sustainable Energy Policies (ISEP), 2013; REN21, 2016

والطاقة البديلة التي تُسهم في توليد الكهرباء في بعض البلدان من بين مصادر الطاقة الأخرى هي الطاقة النووية. ويتضمن الجدول 7 مقارنة نوعية بين الطاقة الشمسية والطاقة النووية مع وصف لميزات كل تكنولوجيا وعيوبها. ما يتعلق بالطاقة النووية في البلدان العربية، لم يحصل بعد استخدامها على نطاق تجاري (أي لأغراض تشغيلية) مع أن بعض البلدان مثل الأردن، والجزائر، ومصر، والمملكة العربية السعودية في صدد التخطيط أو التنفيذ لمشاريع الطاقة النووية. وتحتل الإمارات العربية المتحدة الصدارة في هذا المجال إذ تقدمت على سائر البلدان العربية في بناء محطة لتوليد الطاقة النووية. وسيكون لمشروعها الرائد «بركة» سعة مركبة تبلغ 5.6 جيغاواط، قادرة على تلبية حوالى 25 في المائة من الحاجة الوطنية إلى الكهرباء. ويُتوقع أن يبدأ تشغيل المرحلة الأولى من هذا المشروع في عام 2017، ومن المقرر تشغيل وحدته النهائية في عام 2020. كما تخطط المملكة العربية السعودية لبناء ستة عشر مفاعلاً نووياً بحلول عام 2032، ما سيغطي 15 في المائة من حاجة البلاد إلى الكهرباء. وستبلغ السعة المركبة الإجمالية لهذه المفاعلات 17 جيغاواط، ويُتوقع أن يبدأ تشغيل المفاعل الأول في عام 2022. كما وقّع كل من الأردن ومصر اتفاقات مع الشركة الوطنية النووية في روسيا لتوليد 2000 ميغاواط بحلول عام 2023 و4800 ميغاواط بحلول عام 2028¹¹⁷. ونظراً لمخاطر السلامة المرتبطة بتكنولوجيا الطاقة النووية، توقّف بعض البلدان العربية مثل عُمان، وقطر، والكويت عن تنفيذ خطط للاستثمار فيها. وتنظر بلدان أخرى، مثل تونس والمغرب، في جدوى استخدام هذه الطاقة¹¹⁸. وللطاقة النووية أيضاً ميزة هامة إذ هي مصدر مستمر للكهرباء، ما يساعد البلدان على بلوغ أهدافها من حيث الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. لذا يعود القرار إلى كل بلد على حدة لتحديد ما إذا كانت منافع هذه الطاقة تفوق التحديات المرتبطة بها.

والخيار الهام الآخر لتوليد الكهرباء على نطاق صغير هي الطاقة المائية الصغيرة، ويمكن لأنظمة الطاقة الكهرمائية أن تولد ما يصل إلى 100 كيلواط من الكهرباء. ويمكن استخدام هذه الأنظمة في المنازل الكبيرة والمشاريع التجارية الصغيرة مثل المنتجعات والمزارع الصغيرة وغيرها. ونظام الطاقة المائية الصغيرة بحاجة إلى جهاز يحوّل طاقة المياه المتدفقة إلى طاقة دورانية تُحوّل لاحقاً إلى طاقة كهربائية. ويمكن أن يكون هذا الجهاز تريبناً أو مضخة أو ساقية، إلا أن الجهاز الأكثر استخداماً في أنظمة الطاقة المائية الصغيرة هو التربين الدفعي. ويتطلب تشغيل التربين بفعالية وضعه على ارتفاع لا يقل عن ثلاثة أقدام أو حوالى 0.9 متراً (وهو الارتفاع العمودي بين مستوى مياه الخزان ومستوى مجرى المياه) إلى جانب تدفق المياه بسرعة 20 غالوناً في الدقيقة¹¹⁹. وأنظمة الطاقة المائية الصغيرة هي عادة أنظمة تولّد الطاقة من التيار النهري، ما يعني أنها ليست بحاجة إلى سدود أو خزانات كبيرة للمياه. كما يمكن استخدامها لإنتاج الطاقة من خلال دمجها مع شبكات إمدادات المياه والبنية الأساسية لمياه الصرف الصحي. واستخدام تكنولوجيا الطاقة المائية الصغيرة في الصناعة المائية يتطلب توسيع النشاط الصناعي وإجراء مزيد من البحوث¹²⁰.

وفي تكنولوجيا الطاقة المائية الصغيرة، تُوجّه كمية من المياه من مصدرها أي النهر مثلاً، إلى قنوات أو خطوط الأنابيب المضغوطة التي تنقلها إلى التربين أو الساقية. والدوران الناجم عن تحويل المياه يؤدي إلى دوران عمود يُستعمل في العمليات الميكانيكية (مثل ضخ المياه) أو لتشغيل مولد التيار المتردد أو الثابت لتوليد الكهرباء. ويمكن أن يكون نظام الطاقة المائية الصغيرة موصولاً بالشبكة الكهربائية أو غير موصول بها، وهذا بدوره يؤثر على عناصره. والأنظمة غير الموصولة بالشبكة لديها عادة بطاريات لتخزين الكهرباء التي تولدها¹²¹.

وخلافاً لمصادر الطاقة المتجددة الأخرى، تتميز الطاقة المائية الصغيرة بقدرتها على توليد الطاقة باستمرار ومن دون انقطاع. كما أن هذه الطاقة أقل كلفة من طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية، ولا سيما من حيث تكاليف رأس المال. ولكن هذه المقارنة لا تأخذ في الاعتبار الإعانات الحكومية التي تُقدّم في العديد من البلدان إلى طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وتركيبات الطاقة المائية الصغيرة أبسط، ما يجعل صيانتها أسهل. ويمكنها أن تولّد الطاقة من مصادر مياه بعيدة. ومن أبرز عيوب الطاقة المائية الصغيرة هي أنها تتطلب الوصول إلى مصدر مناسب من المياه المتدفقة في حين أن موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح متوفرة نسبياً في كل مكان. كما أن كل نظام مركب للطاقة المائية الصغيرة لديه خصائص تختلف بحسب الموقع، فلا يمكن تصنيع نظام واحد مناسب للمواقع كلها كما هي الحال في تركيبات طاقة الرياح والطاقة الشمسية إلى حد ما. ومن غير المرجح أن تُقدّم إعانات حكومية للطاقة المائية الصغيرة نظراً لآثارها البيئية التي تختلف من نظام إلى آخر والتي ينبغي تحديدها حسب الحالة¹²².

الجدول 7. الطاقة الشمسية و الطاقة النووية: تحليل نوعي مقارن

الآثار الاجتماعية والاقتصادية المشتركة				التنافسية من حيث الكلفة				
الموارد البشرية والتدريب	إمكانات الصناعة المحلية	فرص عمل	الأثر البيئي والاستدامة على المدى الطويل	استخدام الأراضي	الكمية اللازمة من المياه	تكاليف التوازن	كلفة متوازنة لتوليد الكهرباء	
+	+	+	--	++	--	+	++	الطاقة النووية
								التبريد من دون إعادة التدوير
								برج تبريد رطب
								برج تبريد جاف
-	++	-	+	--	+		القطع المكافئ	الطاقة الشمسية
								المركزة
								الصحني الشمسي
								البرج الشمسي
--	-	-	+	-	++	--	++	الطاقة الفوتوفلطية

المصدر: Cour des comptes, 2014؛ الإسكوا (2015)؛ Kost and others, 2013. ملاحظات: تشير علامة «+» و«-» إلى ملاءمة نوع الطاقة أو عدم ملاءمته للعامل المذكور. وتشير علامة «++» إلى ملاءمة أعلى مما تعنيه علامة «+». وتشير علامة «--» إلى ملاءمة أدنى مما تعنيه «-».

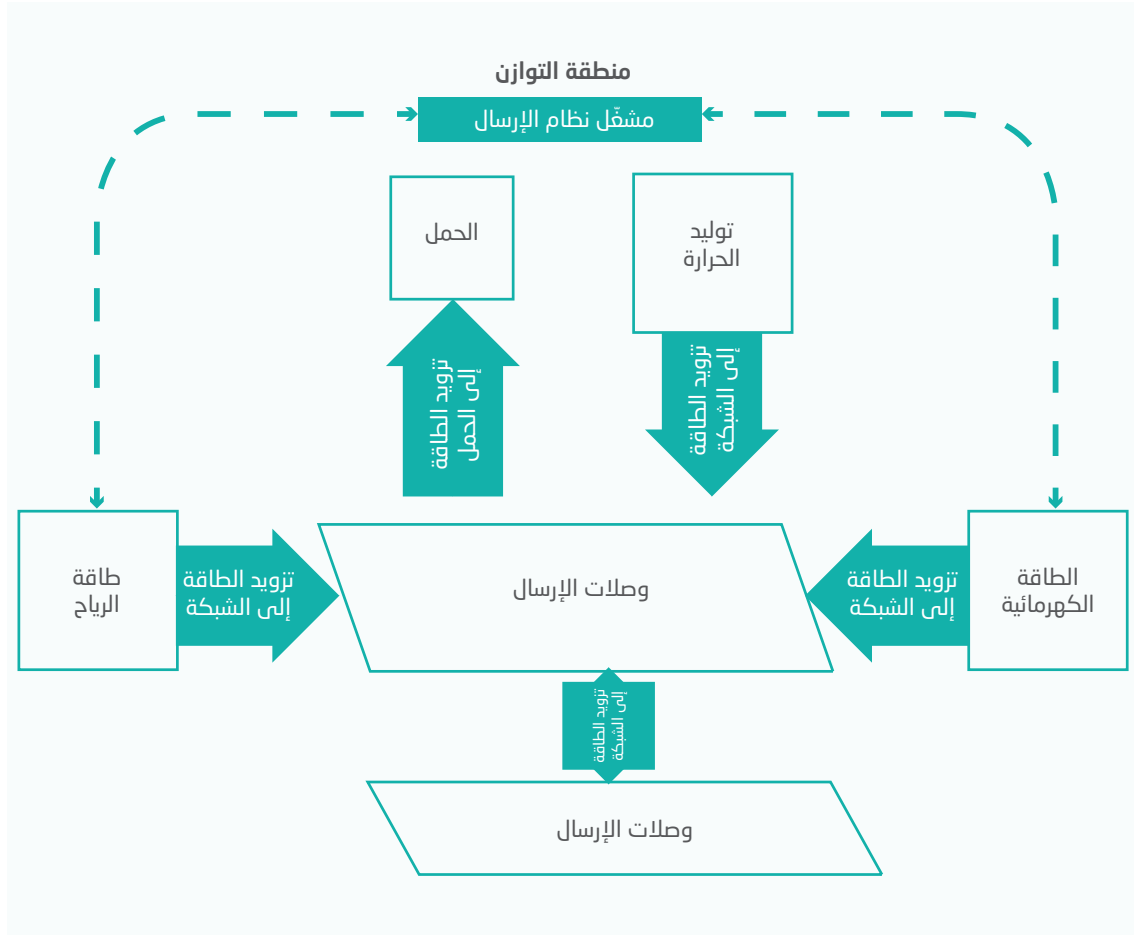
والخيار الآخر، الذي خضع إلى حد ما للنقاش، هو دمج أنواع مختلفة من الوقود لمعالجة الانقطاع الذي يحدثه بعض الأنواع من الطاقة المتجددة. ويُمزج عادةً أحد أنواع الطاقة المتجددة مع مصدر تقليدي للطاقة. ويمكن استكشاف إمكانية المزج بين طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية، إذ يمكن للطاقة الكهرومائية أن تعوّض، بفضل مرونتها، عن الطبيعة المتقطعة لطاقة الرياح. كما يمكن للطاقة الكهرومائية أن تواكب بسهولة التغيّرات السريعة في الحمل الصافي، وأن تؤمن تخزين الطاقة. ومقارنة بتوليد الطاقة من خلال الوقود الأحفوري، تتميز الطاقة الكهرومائية أيضاً بتدني عامل السعة¹²³. ويشير عامل السعة إلى كمية الكهرباء الفعلية التي تنتجها محطة توليد الطاقة مقارنة بالكمية التي يُفترض أن تنتجها عند تشغيلها بكامل طاقتها الإسمية على الدوام (أي الطاقة الناتجة من المحطة). وتُعتبر الطاقة الكهرومائية أيضاً وسيلة منخفضة الكلفة

الجدول 8. الطاقة المتجددة: السعة المركبة والأهداف في البلدان العربية

التاريخ المستهدف	الطاقة الكهرمائية [ميغاواط]		الطاقة الشمسية المركزة [ميغاواط]		نظم الطاقة الفوتوفلطية [ميغاواط]		طاقة الرياح [ميغاواط]		
	الهدف	المركبة	الهدف	المركبة	الهدف	المركبة	الهدف	المركبة	
2020	-	12	100	-	800	15	800	197	الأردن
2030	-	-	-	100	5,000	33	-	0	الإمارات العربية المتحدة
2030	-	-	-	-	-	10	-	0.5	البحرين
2030	-	66	460	-	1,510	20	1,755	245	تونس
2020	-	228	-	25	3,000	270	1,010	10	الجزائر
2030	-	-	-	2,000	-	13,575	-	5,010	
2030			1,300		2,000		1,000		الجمهورية العربية السورية
2025			200		200		300		جيبوتي
-			(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)		(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)				
2020	63	1,593	50	-	667	12	680	-	السودان
2030	-	-	-	100	-	1,000	-	1,000	
2020	-	2,513	-	-	300	3.5	-	-	العراق
-	-	-	-	7	-	-	-	-	عمان
2020	-	-	20	-	45	4	44	0.7	فلسطين
2030	-	-	-	-	-	1.2	-	-	قطر
2030	-	-	5,700	-	4,600	1.8	700	-	الكويت
2020		280	100-150	-	100-150	20	400	-	لبنان
2030		400	(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)		(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)				
2020	-	-	125	-	344	5	600	-	ليبيا
2025	-	-	-	375	-	844	-	1,000	
2022	-	2,874	-	20	+2,300	90	7,200	810	مصر
2020		1,770	2,000	183	2,000	15	2,000	790.5	المغرب
2030		2,000	(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)		(نظم الطاقة الفوتوفلطية + الطاقة الشمسية المركزة)			4,200	
2040	-	-	25,000	-	16,000	23.2	9,000	-	المملكة العربية السعودية
2020	-	30	-	-	30	18	30	34.4	موريتانيا
2025	-	-	100	-	8.25	3	400	-	اليمن

المصدر: IRENA, 2016b.

الشكل 26. رسم بياني تطبيقي لدمج موارد طاقة الرياح والطاقة الكهرمائية

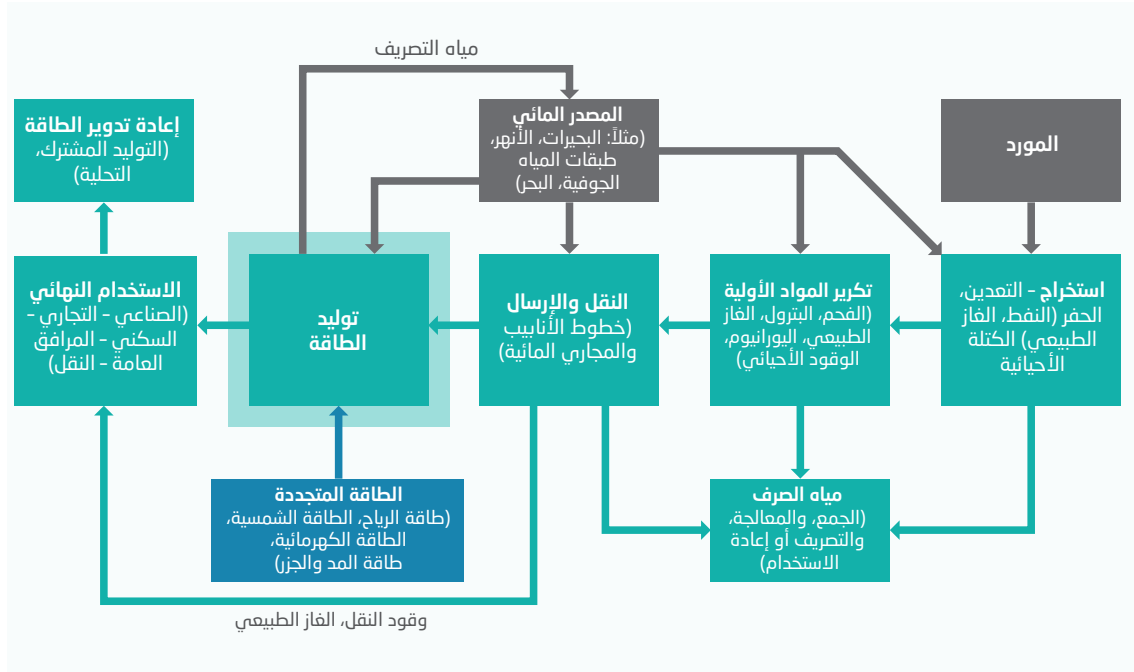


المصدر: Acker, 2011.

لتوليد الكهرباء¹²⁴. ويعرض الشكل 26 رسماً تخطيطياً لهذا النظام الهجين. وتشير الخطوط المتقطعة الزرقاء إلى تدفق البيانات أو المعلومات. ولا داعي أن تكون مصادر طاقة الرياح والطاقة الكهرمائية في موقع التوليد نفسه طالما هي مرتبطة بالشبكة عينها.

ومع أن موارد طاقة الرياح والطاقة الكهرمائية محدودة في المنطقة العربية مقارنة بموارد الطاقة الشمسية (بما فيها الطاقة الفوتوفلطية والطاقة الشمسية المركزة)، يزخر بعض البلدان بإمكانات عالية لاستغلال هذه الموارد¹²⁵. فبلدان شمال أفريقيا (أي تونس والجزائر ومصر والمغرب وموريتانيا) تنطوي على إمكانات هامة من حيث طاقة الرياح¹²⁶. والدليل على ذلك سعة الرياح المركبة أصلاً في تلك البلدان وسعة الرياح الإضافية التي تنوي زيادتها على إنتاجها من مصادر الطاقة المتجددة وفقاً لأهدافها المتعلقة بالطاقة المتجددة، كما هو مبين في الجدول¹²⁷. ويُقدَّر مجموع الإمكانات الاقتصادية لطاقة الرياح في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بحوالي 300 تيراواط ساعة. وفي ما يتعلق بالطاقة الكهرمائية، فلدى بعض البلدان مثل العراق ومصر إمكانات عالية¹²⁸، وهذا ينعكس في السعة المائية المركبة فيها (الجدول 8)¹²⁹. والبلدان العربية المتصدرة من حيث أهداف الطاقة المتجددة هي السودان ولبنان والمغرب¹³⁰. ويبلغ مجموع إمكانات توليد الكهرباء من الطاقة الكهرمائية في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا حوالي 182 تيراواط ساعة¹³¹.

الشكل 27. مخطط المياه الافتراضية المستعملة في إنتاج الطاقة



المصدر: Water in the West, 2013.

استخدام المياه في عمليات إنتاج الكهرباء

يبين الشكل 27 عملية إنتاج الطاقة بالكامل ومختلف الأساليب والمراحل التي تُستعمل فيها المياه. كما يبين المراحل التي يمكن فيها استخدام الطاقة المتجددة لتشغيل عملية توليد الطاقة. ولدراسة الترابط بين المياه والطاقة، لا بد من مناقشة كيفية استخدام المياه في إنتاج الكهرباء وكيف يمكن التخفيف من استخدام الموارد في هذه العمليات. وعند استخدام خيارات الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء، تختلف عملية توليد الطاقة حسب التكنولوجيا المستعملة. وتختلف كمية المياه المستعملة أيضاً باختلاف أنواع الطاقة المتجددة. يتضمن هذا الجزء تحليلاً لهذا التباين في معدل استهلاك المياه.

يبين الجدول 9 أبرز استخدامات المياه لإنتاج الطاقة والآثار المحتملة على جودة المياه في إنتاج الطاقة الأولية وتوليدها. والتباين واضح بين استخدامات المياه في هذه العمليات والآثار المحتملة على جودة المياه، وهذا يعود إلى التكنولوجيا المستخدمة. ولا يقتصر التحليل على استخدامات المياه لإنتاج الطاقة فعلياً بل يشمل دورة حياة الوقود كلها مع التركيز على طريقة استخراجها ومعالجتها من بين استخدامات أخرى. ونظراً لطبيعة مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تُستخدم كمية محدودة أو معدومة من المياه، ولا سيّما في مرحلة تأمين هذه الموارد أي أثناء حشدها في المراحل الأولى من العمليات العادية. هذه العملية مختلفة تماماً عن الاستخراج المعزز للنفط مثلاً، حيث يتطلب الحصول على الوقود استخداماً مكثفاً للمياه في المراحل الأولى من عملية توليد الكهرباء. وبذلك، تُتضح فوائد استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء في البلدان العربية القاحلة. ولكن الطاقة الكهرومائية تُستثنى من هذه القاعدة لأنها تعتمد أساساً على المياه كمصدر لتوليد الطاقة، علماً بأن هذه المياه مستخرجة ولكنها غير مستهلكة.

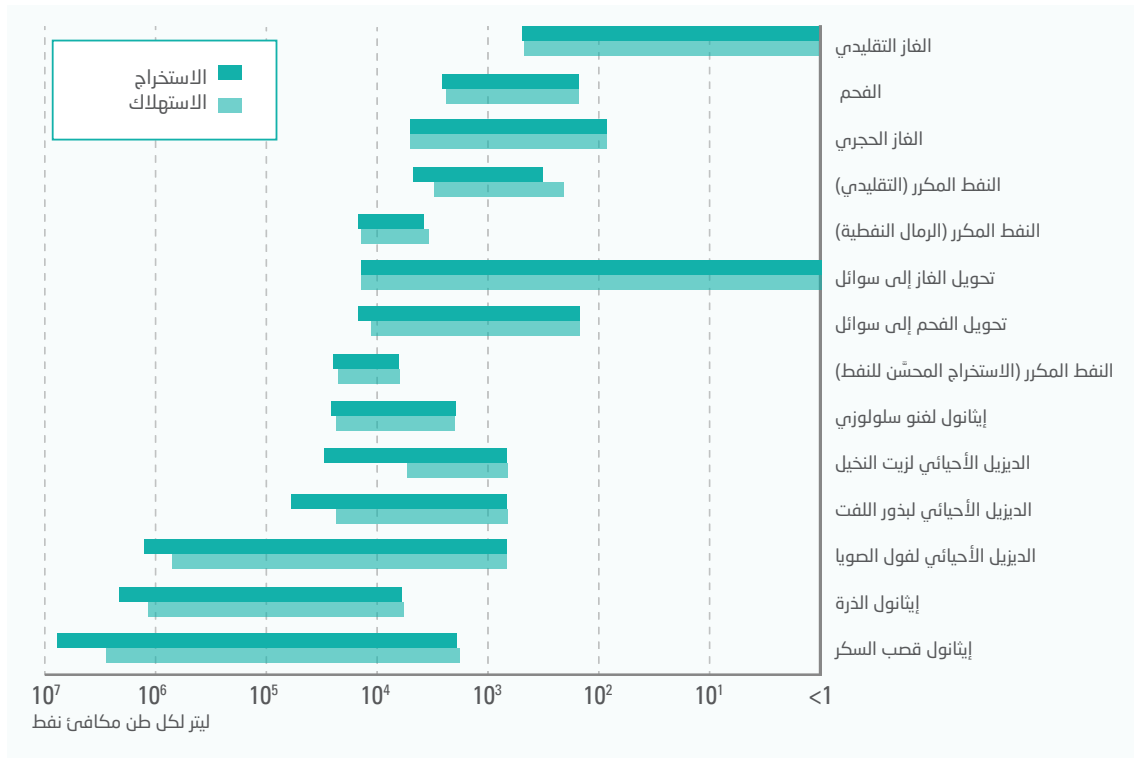
ويبين الشكل 28 المياه المستهلكة في إنتاج بعض مصادر الطاقة الأولية عند دخولها سلسلة الإمداد، ومعدلات المياه المستهلكة أثناء استخراج الوقود ومعالجته ونقله. أما في ما يتعلق بالطاقة الأحيائية، فهي مصدر للطاقة المتجددة وتترافق مع معدلات عالية لاستهلاك المياه. وكما هو مبين في الشكل 28، تستهلك المواد العضوية التي

الجدول 9. أبرز استخدامات المياه لإنتاج الطاقة والآثار المحتملة على جودة المياه

إنتاج الطاقة الأولية	الاستخدامات	الآثار المحتملة على جودة المياه
النفط والغاز	حفر الآبار وإنجازها والتصديق الهيدرولي. الحقن في الخزان أثناء الاستخراج المعزز والثانوي للنفط. التعدين في الرمال النفطية واستخراج النفط في الموقع. تحسين المنتجات وتكريرها.	التلوث بفعل ارتشاح تَخالة التعدين أو السوائل المتصدعة أو التدفق الرجعي أو المياه المُنتجة (السطحية والجوفية).
الفحم	القطع وإخماد الغبار أثناء التعدين والجر. الفسل لتحسين نوعية الفحم. إعادة الفطاء النباتي في المناجم السطحية. النقل على مسافة طويلة عبر ملاط الفحم.	التلوث بفعل ارتشاح تَخالة التعدين أو تصريف المناجم أو المياه المُنتجة (السطحية والجوفية).
الوقود الحيوي	ري محاصيل المواد المدخلة. الطحن الرطب والفسيل والتبريد في عملية تحويل الوقود.	التلوث بسبب الجريان السطحي الذي يحتوي على أسمدة ومبيدات ورواسب (المياه السطحية والجوفية). مياه الصرف الصحي الناجمة عن التكرير.
توليد الطاقة الحرارية (الوقود الأحفوري، والطاقة النووية الأحيائية)	تغذية الغلاية أي المياه المستعملة لتوليد البخار أو المياه الساخنة. التبريد لتكثيف البخار. غسل الملوث باستخدام معدات مراقبة الانبعاثات.	التلوث الحراري بسبب تصريف مياه التبريد (المياه السطحية). التأثير على النظم الإيكولوجية المائية. الانبعاثات الجوية التي تلوث المياه باتجاه الريح (المياه السطحية). تصريف الغلاية أي تغذية الغلاية التي تحتوي على جوامد معلقة.
الطاقة الشمسية المركزة و طاقة حرارة باطن الأرض	سوائل النظام أو تغذية الغلاية أي المياه المستعملة لتوليد البخار أو المياه الساخنة. التبريد لتكثيف البخار.	التلوث الحراري بسبب تصريف مياه التبريد (المياه السطحية). التأثير على النظم الإيكولوجية المائية.
الطاقة الكهرومائية	توليد الكهرباء. التخزين من خلال وضع المياه في خزان (تشغيل السدود الكهرومائية أو لتخزين الطاقة).	تغيّر درجة حرارة المياه، وحجم التدفق وتوقيته، والنظم الإيكولوجية المائية. تسريب بخار من الخزان.

المصدر: International Energy Agency (IEA), 2012.

الشكل 28. استخدام المياه لإنتاج الطاقة الأولية



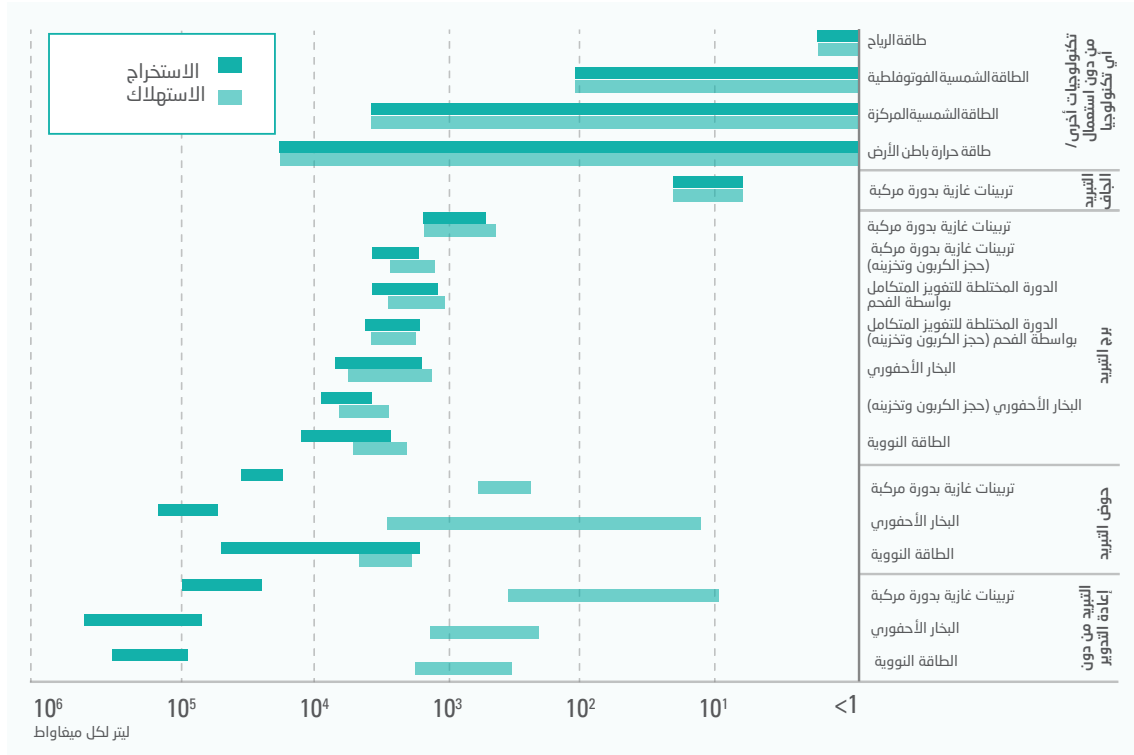
المصدر: IEA, 2012.

ملاحظات: * المعدل الأدنى هو لاستخراج الأولي والمعدل الأقصى هو لاستخراج الثانوي؛
 ** المعدل الأدنى هو للإنتاج في الموقع والمعدل الأقصى هو للتعبدين السطحي؛
 *** يشمل حقن ثاني أكسيد الكربون والبخار والقلوي، والاحتراق في الموقع؛
 **** ما عدا المياه المستعملة لبقايا المحاصيل المخصصة للإنتاج الزراعي.

تُستعمل كمواحد مدخلة لإنتاج الوقود الحيوي (مثل الذرة وقصب السكر وفول الصويا) كميات هامة من المياه تفوق تلك التي يستهلكها بعض أنواع الوقود الأحفوري. وهذا يعود إلى الكمية اللازمة من المياه لزراعة هذه المحاصيل. ونتيجة للإجهاد المائي الذي تشهده منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، بلدان الخليج هي في طليعة البلدان التي تجري بحوثاً حول استخدام النبات الملحي لإنتاج الوقود الأحيائي (وهي محاصيل تنمو في بيئة مالحة)¹³². ويمكن أن تنمو هذه المحاصيل في مجموعة واسعة من الموائل المالحة (مثل المناطق الساحلية والصحاري الداخلية)¹³³. وهي توافق تماماً المياه المالحة في الخليج العربي.

ومن بين مختلف العمليات التي ينطوي عليها توليد الكهرباء، عملية التبريد هي الأكثر حاجةً للمياه¹³⁴. وتختلف كمية المياه اللازمة حسب نوع التبريد المستعمل (مثلاً، التبريد من دون إعادة التدوير يستلزم كمية مياه أكبر مما تتطلبه أبراج التبريد). ويبيّن الشكل 29 مختلف كميات المياه اللازمة لعمليات توليد الكهرباء حسب نوع الطاقة المستعملة ونوع التبريد. وتجدر الإشارة إلى أن المياه المستخرجة هي كمية المياه المأخوذة من مصدر المياه في بداية العملية، في حين أن المياه المستهلكة هي كمية المياه المستعملة أثناء العملية. والفرق بين هذين المعيارين هي كمية المياه التي تُعاد إلى مصدر المياه. ويبيّن الشكل 29 كيف يمكن لتكنولوجيات الطاقة المتجددة كلها أن تولد الكهرباء بكفاءة أعلى في استخدام المياه مقارنةً بموارد الوقود الأحفوري. ومع أن مصادر الطاقة المتجددة تسجل معدلات متباينة في استخراج المياه واستهلاكها، من الواضح أنها تحقق كفاءة أعلى في استخدام المياه مقارنةً بالتبريد الجاف لموارد الوقود الأحفوري (علماً بأن التبريد الجاف يستخدم الهواء عوضاً عن المياه كوسيلة

الشكل 29. استخدام المياه لتوليد الكهرباء بواسطة تكنولوجيا التبريد



المصدر: IEA, 2012.

ملاحظات: * تشمل تكنولوجيات الحوض والبرج وفريزل (Fresnel) باستخدام البرج والتبريد الجاف والهجين وتكنولوجيا ستيرلينج؛ ** تشمل التكنولوجيا الثنائية والومضية والنظام الحراري الأرضي المحسن باستخدام البرج والتبريد الجاف والهجين.

للتبريد). إذاً، فوائد استخدام مصادر الطاقة المتجددة واضحة تماماً. كما تجدر الإشارة إلى أن معدلات استخراج المياه تتشابه مع معدلات استهلاكها بالنسبة لمصادر الطاقة المتجددة، لأن المياه التي تستخرجها تُستهلك كلها ولا تُعاد كميات منها إلى مصدر المياه. وهذه ميزة إيجابية لأن النفايات السائلة من محطات توليد الطاقة تتطلب عادةً المعالجة قبل إعادتها إلى مصدر المياه حفاظاً على المعايير البيئية. وانعدام النفايات السائلة يحد من الأضرار البيئية المحتملة.

مؤشرات الأداء الرئيسية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة

وفقاً للوكالة الدولية للطاقة المتجددة، تُقيّم سياسات نشر استخدام الطاقة المتجددة بواسطة المؤشرات التالية: الفعالية والكفاءة والإنصاف والجدوى المؤسسية¹³⁵. وبما أن هذا البحث يتناول الترابط بين المياه والطاقة من الناحية الفنية، فإن مؤشر الفعالية هو الأكثر ارتباطاً بهذا الموضوع وسنناقش في الفقرات التالية. يعرض الجدول 10 ملخصاً عن مختلف مؤشرات فعالية الطاقة المتجددة. وتجدر الإشارة إلى أن هذه المؤشرات تُطوّر وتُحسّن باستمرار على ضوء ما يطرأ من مستجدات.

الجدول 10. ملخص عن أبرز المؤشرات حول فعالية الطاقة المتجددة

المؤشر	الاستعمال
السعة المركبة (ميغاواط)	هذا أبسط مؤشر يمكن استخدامه إذ يستلزم عدداً قليلاً جداً من البيانات. قد يحتوي على بيانات تواردية. لا يغطي الأداء التشغيلي. يستلزم القليل من البيانات. يغطي الأداء التشغيلي. يقيّم الصلة بين الإنجازات والأهداف من دون أن يحدد مدى طموح السياسة.
الطاقة الكهربائية المولدة (ميغاواط ساعة)	يقيس نشر استخدام الطاقة في سنة معينة بالنسبة للإمكانات غير المستغلة والتي يمكن تحقيقها حتى عام 2020. يستلزم كمية عالية من البيانات والقدرات الفنية لتقدير الإمكانات القابلة للتحقيق. لا يأخذ معدلات التعلم في الاعتبار. نقل سنة الأساس يمنع المقارنة منذ أمد بعيد.
بلوغ الأهداف الحكومية المحددة مسبقاً	يقيس نشر استخدام الطاقة (من حيث توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة) في سنة معينة بالنسبة إلى نشر الطاقة المتجددة اللازمة لتوليد الكهرباء بين عامي 2005 و2030 ليتوافق مع التقديرات المستقبلية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة في تقرير آفاق الطاقة في العالم والبالغ عددها 450 (وهو المسار المرتقب لكي تستقر تركيزات ثاني أكسيد الكربون في العالم على 450 جزءاً بالمليون بحلول عام 2030).
مؤشر الفعالية الخاص بالمفوضية الأوروبية	التقديرات المستقبلية الوطنية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة في تقرير آفاق الطاقة في العالم غير متوفرة لجميع البلدان غير المنتمية إلى منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية/مجموعة البريكس (البرازيل وروسيا والهند والصين وجنوب أفريقيا)، ويصعب تفصيلها انطلاقاً من التقديرات على المستوى الإقليمي. استخدام سنة الأساس الثابتة يسهّل المقارنة منذ أمد بعيد. يقيس كمياً نضج الأسواق الوطنية لتكنولوجيا الطاقة المتجددة.
مؤشر أثر السياسات	المؤشر المركب الذي يجمع بين إنتاج تكنولوجيا الطاقة المتجددة بالنسبة إلى الاستهلاك، والإنتاج بالنسبة إلى الإمكانات التي يمكن تحقيقها بحلول عام 2030، والسعة المركبة. يستلزم بيانات كثيرة.
مؤشر حالة نشر استخدام الطاقة	

المصدر: Nicholls and others, 2014.

وتقدّم مؤشرات الفعالية معياراً لقياس النجاح في نشر استخدام تكنولوجيا الطاقة المتجددة. وبعض مؤشرات الفعالية، مثل السعة المركبة والطاقة الكهربائية المولدة، بسيطة بطبيعتها (أي استخدامها سهل وشائع). وتعتبر هذه المؤشرات البسيطة دلالة غير مباشرة على الفعالية. ورغم بساطتها، يمكن التمييز بين مكوناتها. فتحليل مخرجات الطاقة، مثلاً، قد يكون أفضل من تحليل نمو السعة لأن المخرجات تعطي معلومات حول مدى إنتاجية تكنولوجيا الطاقة المتجددة¹³⁶.

أما سائر مؤشرات الفعالية، مثل مؤشر حالة الانتشار ومؤشر أثر السياسة، فهي أكثر تعقيداً. وتقيس هذه المؤشرات المعقدة المتغيرات مثل الاختلاف في إمكانات الموارد والتقدم نحو الأهداف، ما يسمح بإجراء مقارنات أكثر شمولاً وتحديداً بين البلدان. ويتطلب هذا التحليل جمع مزيد من البيانات ومعالجتها، ما قد يصعب تأمينه في البلدان المنخفضة الدخل¹³⁷. ومع أن المقارنة بين البلدان ضرورية للحكم على جدارتها، لا بد من

إجرائها بتأن وحذر. وينبغي تحديد فئات من البلدان النظيرة وإجراء المقارنات ضمنها. واقترح استخدام مؤشر الفعالية الخاص بالمفوضية الأوروبية كمؤشر رئيسي¹³⁸. ومع أن هذا المؤشر معقد، يتطلب بيانات أقل مقارنة بسائر المؤشرات المعقدة حتى أنه لا يفوق سوى بقليل المؤشرات البسيطة من هذه الناحية.

ووفقاً لمبادرة الطاقة المستدامة للجميع، تحددت عدة أهداف للتنمية المستدامة مع غاياتها المختلفة التي ترتبط بدورها بمختلف المؤشرات. يرمي الهدف السابع إلى ضمان حصول الجميع بتكلفة ميسورة على خدمات الطاقة الحديثة الموثوقة والمستدامة. والغاية المرتبطة بهذا الهدف والمتعلقة بالطاقة المتجددة هي 7.2 (تحقيق زيادة كبيرة في حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة العالمي بحلول عام 2030)، والمؤشر المتعلق بالمتابعة هو 7.ب (توسيع نطاق البنى التحتية وتحسين مستوى التكنولوجيا من أجل تقديم خدمات الطاقة الحديثة والمستدامة للجميع في البلدان النامية بحلول عام 2030). ومن بين المؤشرات ذات الصلة، الحوافز الضمنية لاستخدام الطاقة المنخفضة الكربون في قطاع الكهرباء (والتي تُقاس بالدولار لكل ميغاواط ساعة أو بالدولار لكل طن مُتجنّب انبعاثه من ثاني أكسيد الكربون). وهذا ما يُشار إليه بالمؤشر رقم 52 من بين المؤشرات المذكورة في شبكة حلول التنمية المستدامة وإطار المتابعة¹³⁹. والأساس المنطقي لهذا المؤشر هو أنه يحلّل الكلفة الاجتماعية لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري ويدعو إلى تنفيذ السياسات الحكومية التي تفرض تسعير الكربون. وتُقاس فعالية تسعير الكربون في قطاع الكهرباء من خلال هذا المؤشر الذي يحتسب صافي الكلفة التي يتكبدها المجتمع لقاء كل وحدة من وحدات تخفيض غازات الاحتباس الحراري. ويمكن أن تكون الأسعار المفروضة على الكربون واضحة أو ضمنية، ومن خلال مقارنة الأسعار الفعلية التي تفرضها مختلف السياسات في شتى البلدان والقطاعات على الكربون، يمكن استخلاص مدى فعالية هذه السياسات المختلفة في الحد من الانبعاثات على المدى الطويل. ويعطي هذا المؤشر تقديرات بشأن تكاليف خفض غازات الاحتباس الحراري وتأثير ذلك على الأسعار من دون معالجة المنافع المجتمعية. ولا بد من تحليل النتائج الرقمية لهذا المؤشر بعناية ودقة نظراً لغياب قيمة أساس واحدة لتسعير الكربون يمكن الاعتماد عليها لتقييم ما تحاول السياسات المتنوعة أن تنجزه في بلد ما وبأي كلفة¹⁴⁰.

وكما ذكر أعلاه، لا تزال هذه المؤشرات قيد الإعداد. ولا يمكنها في صياغتها الحالية سوى أن تعطي خلاصات محدودة. فلا تعطي هذه المؤشرات أي معلومات حول نجاح نشر استخدام إحدى تكنولوجيات الطاقة المتجددة أو مدى تقبلها في المجتمع أو توقعات حول نشر استخدام الطاقة المتجددة في المستقبل¹⁴¹. ولتفسير القيم التي يسجلها بلد ما على مؤشر معين، لا بد من التعمق في فهم وضع هذا البلد وتحليل عدة مؤشرات في آن معاً.

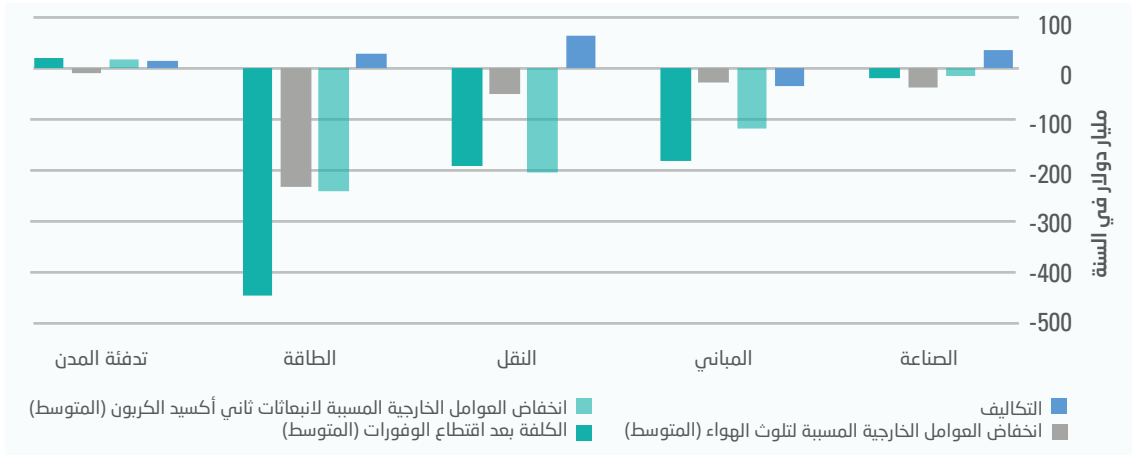
تكنولوجيات الطاقة المتجددة - المنظور المالي

يتناول هذا الجزء بالتفصيل المنظور المالي لتكنولوجيات الطاقة المتجددة التي سبقت مناقشتها في هذا التقرير. ويبيّن الشكل 30 التكاليف والوفورات التي يُتوقع أن تسجلها تكنولوجيات الطاقة المتجددة في عام 2030. وتشير التكاليف السلبية إلى الوفورات أي الفوائد التي أتاحتها تكنولوجيات الطاقة المتجددة. ومن الواضح أن الوفورات في القطاعات كلها ما عدا تدفئة المدن، تفوق التكاليف ولا سيما في قطاع الكهرباء. وهذا يثبت أن نشر استخدام الطاقة المتجددة لديه فوائد على المدى البعيد وأن الكلفة الأولية التي تُعدّ حالياً من أبرز التحديات في استخدام الطاقة المتجددة، ستأتي بفوائد أعلى على المدى الطويل.

وفي معالجة مياه الصرف الصحي، تُستخدَم تقنية الهضم اللاهوائي لتحويل حمأة مياه الصرف إلى غاز حيوي يساعد على تشغيل العمليات في محطة المعالجة. ويبيّن الجدول 11 التكاليف المترتبة على استخدام هذا الغاز

الحيوي لتوليد الكهرباء وتكاليف مختلف عمليات إنتاج الكهرباء. ويُستنتج من الجدول أن أكثر الطرق فعاليةً من حيث الكلفة لتوليد الكهرباء هي باستخدام تربيين، ولكن هذا الخيار لا ينطبق سوى على المحطات الكبيرة لمعالجة مياه الصرف الصحي. والمحرك الذي يستهلك القليل من وقود الاحتراق يمكن أن يكون خياراً غير باهظ نسبياً ومناسب للمحطات على اختلاف سعتها. ويبلغ سعر الكهرباء الحالي في الولايات المتحدة حوالي 0.12 دولار لكل كيلوواط ساعة، ما يفوق القيم الواردة في الجدول 11. وهذا يظهر جدوى استخدام حمأة مياه الصرف كمصدر للطاقة وكسبيل لتحقيق وفورات هامة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي. والبلدان العربية عموماً لم تؤثر بناء منشآت لتوليد الطاقة من النفايات لأنها أقل استدامةً من غيرها من الناحية المالية. ومع تراجع احتياطي الوقود الأحفوري، وانخفاض أسعار النفط وتحسّن تكنولوجيات توليد الطاقة من النفايات، يُتوقع أن تتزايد جدوى إنتاج الطاقة من النفايات مثل حمأة مياه الصرف. ويبدو هذا الاستنتاج منطقياً عندما تُقارن قيم الجدول 11 مع الكلفة المتوازنة لتوليد الكهرباء المرتبطة بمختلف التكنولوجيات السائدة في أسواق بلدان الخليج. والتكاليف المترتبة على استخدام الغاز والفحم والطاقة الشمسية الفوتوفلطية ماثلة لتلك الواردة في

الشكل 30. التكاليف والوفورات المرتبطة بمصادر الطاقة المتجددة حسب القطاعات، 2030



المصدر: IRENA, 2016a.

الجدول 11. الكلفة المقدرة لتوليد الكهرباء بواسطة الغاز الحيوي بتقنية الهضم اللاهوائي

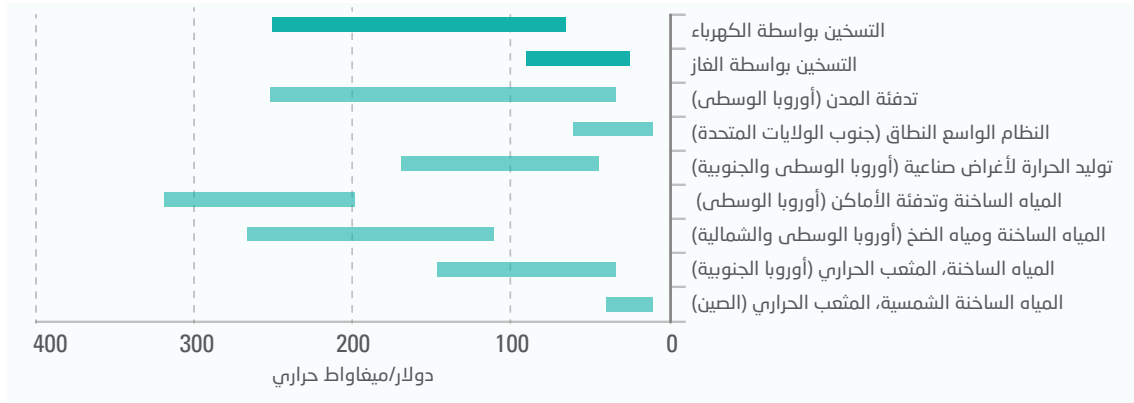
التربين	الكلفة المقدرة للتوليد (دولار لكل كيلوواط ساعة)					حجم محطة معالجة مياه الصرف الصحي (مليون غالون يومياً)
	المحرك القليل للاستهلاك لوقود الاحتراق	خلايا الوقود	المحرك الكثير للاستهلاك لوقود الاحتراق	التربين الصغير	حجم نظام التوليد المشترك للحرارة والطاقة (كيلوواط)	
-	-	-	0.073	0.064	130-30	5-1
-	-	0.083	0.060	0.064	260-130	10-5
-	0.051	0.083	0.060	0.064	520-260	20-10
-	0.051	0.083	-	-	1,040-520	40-20
-	0.040	0.083	-	-	3,900-1,040	150-40
0.032	0.040	-	-	-	3,900<	150<

المصدر: ERG and RDC, 2011.

الجدول 11 في حين أن تكاليف استخدام سائر أنواع الوقود، مثل النفط والغاز الطبيعي المسيل، هي أعلى لكل كيلواط ساعة من الكهرباء المولدة¹⁴².

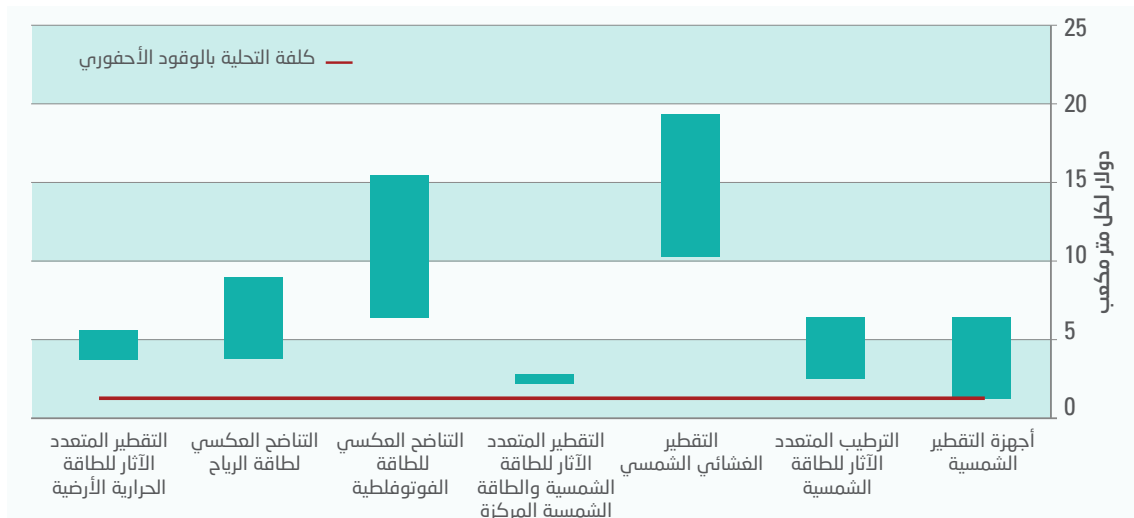
وفي ما يتعلق بتسخين المياه بواسطة الطاقة الشمسية الحرارية، يبين الشكل 31 تبايناً في تكاليف الإنتاج حسب مصدر الطاقة المستخدم لتشغيل عملية التسخين. وتشير الخطوط البيئية اللون في الشكل إلى التكنولوجيات التقليدية، والخطوط الصفراء إلى تكنولوجيات الطاقة الشمسية الحرارية. ومع أن هذه البيانات لا تتعلق بالبلدان العربية، تعطي فكرة عن تكاليف هذه العمليات. وعند المقارنة بين مصادر الطاقة التقليدية والطاقة الشمسية الحرارية، يتبين أن تكاليف تسخين المياه بالطاقة الشمسية أقل من تلك المرتبطة بمصادر الطاقة التقليدية في بعض الحالات، كما في جنوب الولايات المتحدة والصين. هذا يُظهر فعالية الكلفة عند التسخين بواسطة تكنولوجيا الطاقة الشمسية الحرارية التي بدأ التداول بها تجارياً في الأسواق وأصبح استخدامها رائجاً في العديد من البلدان، ولا سيما على

الشكل 31. تكاليف التسخين الشمسي للمياه مقارنة بتكاليف التسخين بواسطة الكهرباء والغاز الطبيعي في مناطق مختلفة



المصدر: Eisentraut and Brown, 2014.

الشكل 32. تكاليف المياه المحلاة في مختلف عمليات التحلية بالطاقة المتجددة



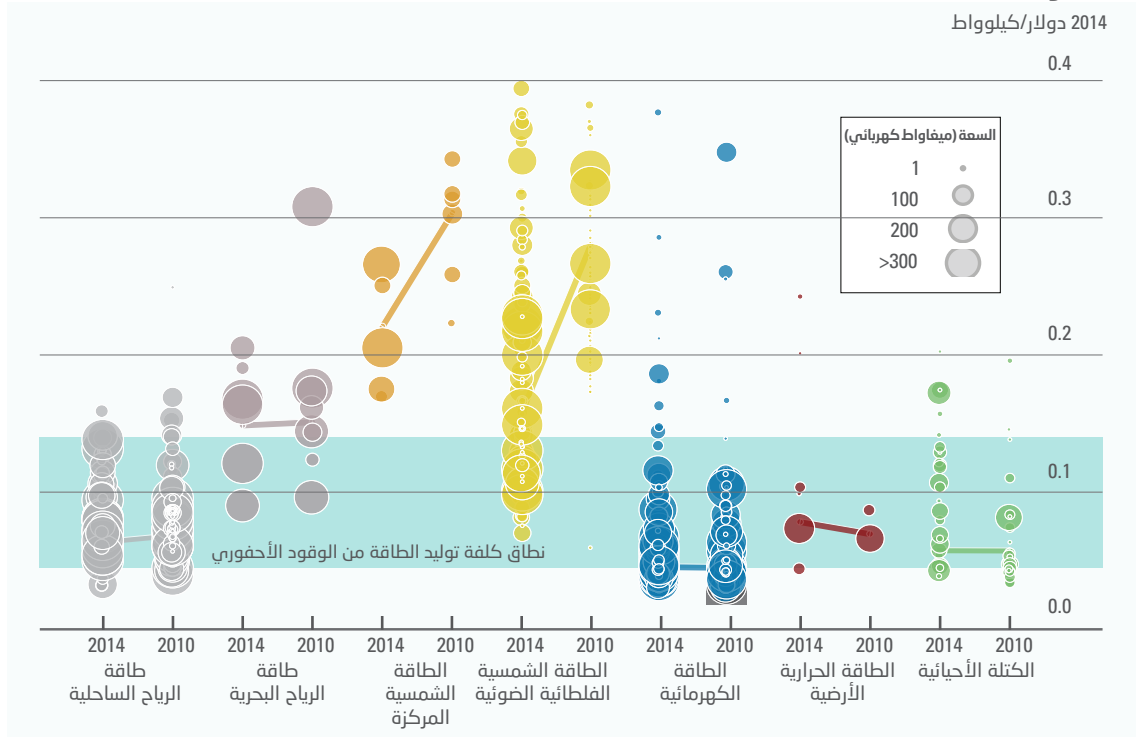
المصدر: IRENA, 2015a.

الجدول 12. تكاليف رأس المال للتقنيتين الرئيسيتين لتوليد المياه بواسطة الطاقة الشمسية المركزة

التناضح العكسي باستخدام الطاقة الشمسية المركزة + التبريد الجاف	التقطير المتعدد الآثار باستخدام الطاقة الشمسية المركزة	
2,425–1,748	3,136	تكلفة رأس المال للتوليد (دولار لكل متر مكعب)
10,145–9,877	9,125	تكلفة رأس المال (الطاقة الشمسية المركزة + المحطة الحرارية) (دولار لكل متر مكعب)
12,570–11,625	12,261	تكلفة الاستثمار الإجمالية (دولار لكل متر مكعب)
		توزيع تكاليف رأس المال للطاقة الشمسية المركزة (%)
54	57	الحقل الشمسي
20	21	التخزين الحراري
19	18	محطة توليد الطاقة
5	4	غلاية احتياطية
2	0	التبريد

المصدر: (World Bank 2012).
ملاحظة: تستند التكاليف المذكورة إلى محطة توليد بسعة 100,000 متر مكعب يومياً، في إطار نظام هجين مع الطاقة الشمسية المركزة. بلغ حجم تخزين الطاقة الحرارية ضعف سعة تجميع الطاقة الشمسية على افتراض توفر الطاقة الشمسية 46 في المائة من العام بالنسبة للتقطير المتعدد الآثار، و54 في المائة للتناضح العكسي.

الشكل 33. الكلفة المتوازنة لتوليد الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة الواسعة النطاق، 2010g 2014g

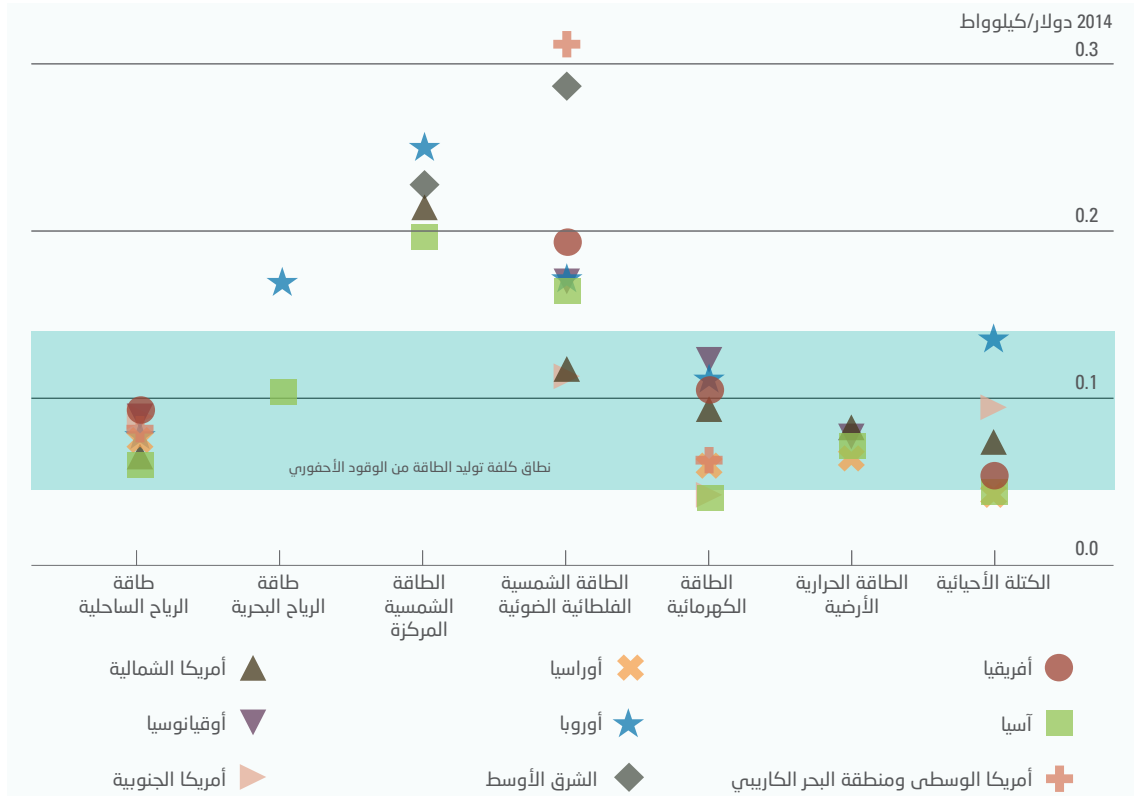


المصدر: IRENA, 2015c.

المستوى السكني. وتتعدد قصص النجاح المرتبطة بتسخين المياه بواسطة الطاقة الشمسية في البلدان العربية، ومثال على ذلك برنامج بروسول في تونس، الذي يتناوله هذا التقرير. والبلدان العربية الأخرى التي تبلي بلاءً حسناً في هذا المجال هي الأردن وفلسطين ولبنان. ومنذ الفترة 2010-2012، تجاوزت السعة المركبة لتسخين المياه بالطاقة الشمسية 3,000 ميغاواط في بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، ولدى العديد من هذه البلدان أهداف متعلقة بالتسخين بواسطة الطاقة الشمسية من بين أهداف الطاقة المتجددة. وكثيراً ما تترافق هذه الأهداف مع سياسات تنظيمية وحوافز ضريبية وتعليمية¹⁴³.

يبين الشكل 32 التكاليف المرتبطة بنظم التحلية التي تشغلها مصادر الطاقة المتجددة بالإضافة إلى تكاليف التحلية بواسطة الوقود الأحفوري. وباستثناء التحلية بواسطة أجهزة التقطير الشمسية، لم يحقق أي من خيارات الطاقة المتجددة الاستدامة الاقتصادية التي بلغتها مصادر الطاقة التقليدية. ولكن التقنيات التي تبدو واعدة أكثر من سواها هي تقنية التناضح العكسي مع استخدام طاقة الرياح، والتقطير المتعدد الآثار مع استخدام طاقة حرارة باطن الأرض، والترطيب المتعدد الآثار باستخدام الطاقة الشمسية. وليست كلفة التحلية هي العامل الوحيد الذي ينبغي الارتكاز عليه عند اختيار مصادر الطاقة في محطة تحلية المياه، بل يجب مراعاة عوامل أخرى. وتجدر الإشارة إلى اختلاف التصميم بين محطات التحلية بالطاقة الشمسية ومحطات التحلية بواسطة الوقود الأحفوري. فتصميم محطات التحلية باستخدام الطاقة الشمسية يركّز على تكاليف رأس المال والسعة المتاحة للتحلية، في حين أن تصميم محطات التحلية باستخدام الوقود الأحفوري يركّز على تحقيق أقصى قدر من الكفاءة في إنتاج الكهرباء¹⁴⁴. وكمثال على تكاليف رأس المال لعملية التحلية بواسطة مصادر

الشكل 34. الكلفة المتوسطة المرجحة لتوليد الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة الواسعة النطاق حسب المنطقة مقارنة بتكاليف توليد الطاقة من الوقود الأحفوري، 2013/2014



المصدر: IRENA, 2015c.

الطاقة المتجددة، يبين الجدول 12 تكاليف رأس المال المرتبطة بالتقنيتين الرئيسيتين للتحلية بواسطة الطاقة الشمسية المركزة. فمن المتوقع أن تحقق هذه التكنولوجيا نمواً هاماً في المنطقة العربية. ويبدو التقطير المتعدد الآثار باستخدام الطاقة لطاقات الشمسية المركزة أعلى كلفةً إلى حد ما. والتباين المرتفع في تكاليف رأس المال لتكنولوجيا التناضح العكسي يعكس تنوع ملوحة مياه البحر في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.

وفي مجال إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، يتضمن الشكلان 33 و34 معلومات عن كلفة إنتاج الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة الواسعة النطاق. يبين الشكل 33 كيف تغيّرت كلفة الكهرباء في العالم من عام 2010 إلى عام 2014 لمختلف ساعات توليد الكهرباء. وتراجعت كلفة هذه التكنولوجيات كلها أو بقيت على حالها، وأهم انخفاض في الكلفة كان للتكنولوجيات الشمسية، أي الطاقة الفوتوفلطية والطاقة الشمسية المركزة. وبذلك، تكون تكاليف تكنولوجيات الطاقة المتجددة كلها، باستثناء الطاقة الشمسية المركزة، مشابهة لتكاليف الوقود الأحفوري. والطاقة الشمسية المركزة، كما ورد في هذا التقرير، هي من أكثر التكنولوجيات القابلة لمزيد من التطوير والتحسين.

وفي المقابل، يبين الشكل 34 تغيّر كلفة الكهرباء حسب المنطقة. وكلفة استخدام الطاقة الشمسية المركزة في الشرق مشابهة لتلك السائدة في مناطق أخرى. ولكن الأمر لا ينطبق على تكنولوجيا الطاقة الفوتوفلطية حيث كلفة الكهرباء عالية نسبياً في الشرق الأوسط. وهذا لا يؤيد ما تناوله الجزء الثالث في بدايته. ويُعزى هذا التباين إلى أن بيانات الشكل 34 تعود إلى عام 2014 في حين أن المرجع المذكور في الجزء الثالث يركز على قيم الفترة 2016-2018. وهذا يدل على الانخفاض السريع في أسعار الطاقة الفوتوفلطية، الذي شهدته البلدان العربية في العامين الماضيين. كما أن القيم المذكورة في الجزء الثالث تعود إلى بلدان محددة، أما الشكل 34 فيعطي متوسط القيم لمنطقة الشرق الأوسط كلها. ومثال على ذلك أبو ظبي حيث تلقت هيئة مياه وكهرباء أبو ظبي، في عام 2016، عروضاً لبناء محطة لتوليد الطاقة الشمسية الفوتوفلطية بأدنى سعر قياسي¹⁴⁵. وبلغ هذا السعر القياسي 2.42 دولار للكيلوواط ساعة وقدمته الشركة القابضة الصينية جينكو للطاقة الشمسية (Jinko Solar) في عرض مشترك مع شركة ماروبيني اليابانية (Marubeni Corp). وبالفعل، انخفضت أسعار تكنولوجيا الطاقة الشمسية بحوالي 70 في المائة بين عامي 2011 و2016¹⁴⁶.

الخلاصة والتوصيات

استخدام مصادر الطاقة المتجددة وسيلة هامة للحد من تعرّض موارد المياه والطاقة للمخاطر الناجمة عن الترابط بين المياه والطاقة. وتعالج هذه المجموعة من الأدوات كيف يمكن تسهيل هذا الاستخدام في البلدان العربية. فهذه البلدان تزخر بالإمكانات لاستغلال موارد الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ولدى بعض البلدان العربية أصلاً أدنى الأسعار لتكنولوجيا طاقة الرياح الساحلية والطاقة الشمسية الفوتوفلطية. يتضح إذاً أن تكنولوجيات الطاقة المتجددة تناسب البلدان العربية، من هنا الحاجة إلى رفع معدل النمو المنخفض نسبياً الذي شهدته المنطقة في الماضي في مجال استخدام هذه التكنولوجيات.

ويهدف هذا التقرير إلى تسهيل هذه العملية ويناقش مختلف المجالات التي يمكن أن تُستخدَم فيها الطاقة المتجددة في قطاع المياه. فعلى سبيل المثال، حمأة مياه الصرف الناجمة عن معالجة مياه الصرف الصحي يمكن استخدامها كمصدر طاقة لتشغيل عمليات محطة معالجة مياه الصرف الصحي. وتسخين المياه بالطاقة الشمسية هي تكنولوجيا ناضجة تُستعمل على نطاق واسع في القطاع السكني، رغم صعوبة استخدامها على نطاق واسع في الصناعة. ولا تزال بعض التكنولوجيات المذكورة في هذا التقرير، مثل خيارات الطاقة المتجددة لقطاع النفط والغاز وإنتاج الطاقة الحيوية من النفايات الصناعية، في مرحلة التطوير أو المشاريع الاسترشادية.

واستخدام مصادر الطاقة المتجددة في عملية التحلية هو أيضاً خيار تنظر فيه البلدان العربية وتعتمده بوتيرة متزايدة. وينتشر استخدام تقنيات كل من الطاقة الفوتوفلطية وطاقة الرياح مع تقنية التناضح العكسي لتحلية المياه في البلدان العربية، مع أن التقطير المتعدد الأثر هو أكثر كفاءة وأقل كلفة من التناضح العكسي نظراً لارتفاع ملوحة مياه الخليج وحرارتها. وعندما تُستخدَم أنظمة الطاقة المتجددة لتشغيل عمليات التحلية ولأغراض أخرى، لا بد من معالجة مشكلة الانقطاع في العديد من مصادر الطاقة المتجددة. ولدى بعض النظم القدرة على تخزين الطاقة، والبعض الآخر مزود بأنظمة هجينة تشغلها مصادر الطاقة المتجددة والتقليدية في آن معاً. وفي ما يتعلق بتوليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، يُظهر هذا التقرير الجدوى المالية لهذه العملية، بالنسبة للبلدان العربية، وفوائدها التي تتخطى بأضعاف التكاليف الأولية لنشر هذه التكنولوجيا.

وقد تبدو مسألة أمن المياه، بالنسبة للبلدان العربية، أكثر إلحاحاً من أمن الطاقة. ولكن، نظراً للترابط بين المياه والطاقة، حتى ولو ركزت المؤسسات على زيادة اعتمادها على مصادر الطاقة المتجددة، ستحسّن أيضاً أمن المياه في المنطقة. وكمثال على ذلك، يُظهر هذا التقرير كيف تستهلك مصادر الطاقة المتجددة كميات مياه أقل مما تستهلكه مصادر الطاقة التقليدية في عملية توليد الكهرباء.



جدول المرفق 1. مقارنة أنظمة الطاقة الشمسية المركبة

التكنولوجيا	نظام التمدد المكافئ	نظام فريزل الخطي	برج الطاقة الشمسية	أنظمة الصحن المكافئ المقطع
التطبيق	بخار مسخن جداً لمحطات توليد الطاقة المرتبطة بالشبكة	بخار مسخن جداً لتوليد الحرارة للأغراض الصناعية ومحطات توليد الطاقة المرتبطة بالشبكة	بخار مشتع ومسخن جداً لمحطات توليد الطاقة المرتبطة بالشبكة	أنظمة مستقلة وصغيرة لتوليد الطاقة وغير مرتبطة بالشبكة أو مدمجة بصحون أكبر مرتبطة بالشبكة
نطاق السعة (ميغاواط)	280-5	30-5	370-10	0.11-0.025
السعة القصوى المحققة للوحدة (ميغاواط)	السعة المركبة (ميغاواط) (قيم عام 2011)	السعة المركبة (ميغاواط) (قيم عام 2011)	السعة المركبة (ميغاواط) (قيم عام 2011)	السعة المركبة (ميغاواط) (قيم عام 2011)
ذروة كفاءة الطاقة الشمسية (نسبة مئوية)	280	30-2	370	0.11
كفاءة الطاقة الشمسية السنوية (نسبة مئوية)	920 (1,600 قيد الإنشاء)	7 (40 قيد الإنشاء)	38 (17 قيد الإنشاء)	ما من حالات هامة لنشر الاستخدام التجريبية (بعد ما كانوا الثاني/يناير 2013)
درجة الحرارة (درجة مئوية)	14 (16 متوقعة)	13-11	19-14	30-25
نسبة التركيز	الزيت الاصطناعي، المياه/البخار	المياه/البخار	الهواء، الملح المحصور، المياه/البخار	غير منطبق
طريقة التشغيل	معرض	معرض	معرض	معرض
مُعامل استخدام الأراضي	550-350	550-270	565-250	750
استخدام الأراضي (م2/ميغاواط ساعة/سنة)	80-70	70-60	1,000	1,300 <

تكاليف الاستثمار المقدرة (يورو/كيلوواط) حالة التطوير	تكاليف الاستثمار المقدرة (يورو/كيلوواط) حالة التطوير	تكاليف الاستثمار المقدرة (يورو/كيلوواط) حالة التطوير	تكاليف الاستثمار المقدرة (يورو/كيلوواط) حالة التطوير
مرحلة التطوير الأولى	6,000-4,000	4,500-2,500	6,500-3,500
ميد المرص	بدأ التداول به مؤخراً	بدأ التداول به مؤخراً	مُتبت تجارياً
ليست منتشرة	الملح المصهور، الخرسانة، مواد تغيير الطور مُتبت حديثاً	خرسانة للتسخين والمسبق والتسخين الشديد، مواد تغيير الطور للتحجّر مُتبت حديثاً	ملح مصهور، خرسانة، مواد تغيير الطور مُتبت على المدى الطويل
كفاءة عالية جداً في تحويل ذروة الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية حاقمة (ما فوق 30 في المائة)	ارتفاع الحرارة يساعد على زيادة كفاءة دورة الطاقة	هيكل بسيط وسهل في الإنشاء تحمّل المنحدرات الطفيفة	موثوقية وديمومة مُبتتتان على المدى الطويل
قابلية التركيب	يتحمل المواقع غير المسطحة	القدرة على توليد البخار مباشرة	خيارات التخزين متاحة للزيت المبرد بالقطع المكافئ
أعلى درجة فعالية في دمج الناتج الحراري	تكنولوجيا التخزين متاحة ولكن غير مُتتمة بعد على المدى الطويل		
دمج الحرارة الخارجية / المخزون لعدة صحن لتقلها إلى محطة كهرباء كبيرة			
خبرة في تشغيل المشاريع الاسترشادية الأولى	ارتفاع تكاليف الصيانة	التخزين لتوليد البخار مباشرة (مواد	تحول درجة الحرارة المحددة
سهولة التصنيع والإنتاج على نطاق واسع من الأجزاء المتاحة	والمعدات	تغير الطور) في مرحلة مبكرة جداً	لمناع نقل الحرارة دون تحقيق الكفاءة والفعالية
لا حاجة إلى استخدام المياه لتبريد الدورة	ما من أمثلة تجارية على نطاق واسع		هيكل معقد، والدقة العالية
الأهداف المتعلقة بالتكاليف المتوقعة للإنتاج الواسع النطاق، ما زالت غير مُتتمة بعد			مطلوبة أثناء البناء في الموقع
إمكانية متجددة في التحكم بنقل وتوزيع الكهرباء لدمج الشبكة			يتطلب مساحة مسطحة
أجهزة الاستقبال الهجينة لا تزال قيد البحث والتطوير			

المصدر: 2012، World Bank، 2001؛ Tyner، and others، 2001؛ IRENA، 2012؛ Gupta، Gehlot and Gujrathi، 2014؛ Richter، Teske and Short، 2009.





جدول المرفق 2. مقارنة السمات الرئيسية لتكنولوجيات تخزين الطاقة الشمسية الحرارية

التكنولوجيا	الملح المصهور	الخرسانة	مواد تغيّر الطور	المياه/البخار	المياه الساخنة
نطاق السعة (ميفواط) (مقارنة)	3,000 < 500	3,000 < 1	3,000 < 1	200 < 1	3,000 < 1
السعة القصوى المحققة (ميفواط ساعة)	1,000	2	0.7	50	1,000
السعة القصوى المحققة (ميفواط ساعة) (مقارنة)	7.7	غير مطبقة بعد على محطات توليد الطاقة الشمسية المركزة	غير مطبقة بعد على محطات توليد الطاقة الشمسية المركزة	1	غير مطبقة بعد على محطات توليد الطاقة الشمسية المركزة
السعة المرئية (ميفواط ساعة)	4,100.0	3	0.7	50	20,000 (لغير الطاقة الشمسية المركزة)
الكفاءة السنوية (نسبة مئوية)	98	98	98	90	98
سائل نقل الحرارة	الملح المصهور	الزيت الاصطناعي، المياه البخار	المياه/البخار	المياه/البخار	المياه
نطاق درجة الحرارة (درجة مئوية)	390.0-290.0	500-200	وصولاً إلى 350.0	وصولاً إلى 550	95-50
تكاليف الاستثمار (رورو/ كيلواط ساعة)	60-40	40-30 (20 متوقعة)	50-40 متوقعة	180	5-2

المواد

التخزين المنخفض الكلفة للحرارة دون 100 درجة مئوية والمولدة للأغراض الصناعية. مخرب في التطبيقات الصناعية.	تخزين الحرارة الكاملة يسمح بثبيت درجة الحرارة عند نقل الحرارة.	تخزين الحرارة الكاملة يسمح بثبيت درجة الحرارة عند نقل الحرارة.	مناسب تماماً للسائل الناقل للحرارة أي الزيت الاصطناعي. مواد متاحة بسهولة.	سعة تخزين عالية وكلفة منخفضة نسبياً. مخرب في التطبيقات الصناعية.
مخرب في التطبيقات الصناعية.	مخرب في التطبيقات الصناعية. مناسب تماماً لعملية التبخّر والتكثف في مجمعات توليد البخار مباشرة.	مناسب تماماً لعملية التبخّر والتكثف في مجمعات توليد البخار مباشرة.	مناسب تماماً للتسخين المسبق والتكثف في توليد البخار مباشرة.	مناسب تماماً للسائل الناقل للحرارة أي الزيت الاصطناعي.
يتطلب التخزين الحراري الملموس هبوط درجة الحرارة عند نقل الحرارة. لا تنطبق على التوليد الطاقة.	غير مناسب للتسخين المسبق والتسخين الشديد. توليد البخار مباشرة. مرحلة التطوير الأولى.	غير مناسب للتسخين المسبق والتسخين الشديد في مجمعات توليد البخار مباشرة.	غير مناسب لعملية التبخّر والتكثف في مجمعات توليد البخار مباشرة.	يتطلب التخزين الحراري الملموس هبوط درجة الحرارة عند نقل الحرارة. يتجمد الملح المصهور عند حرارة 230 درجة مئوية.

الميوّب

المصدر: World Bank, 2012.

.Turkenburg and others, 2012	.84	.Argaw, 2004	.38	United Nations Economic	.1
Al-Karaghoulis and Kazmerski,	.85	Chandel, Nagaraju Naik and	.39	and Social Commission for	
.2011		.Chandel, 2015		.Western Asia (ESCWA), 2012	
.IRENA, 2012	.86	.Gopal and others, 2013	.40	.ESCWA, 2016	.2
.IRENA and IEA-ETSAP, 2012	.87	.Argaw, 2003	.41	Bizikova and others, 2013,	.3
.World Bank, 2012	.88	.Gopal and others, 2013	.42	p.1	
.Dvorak, 2014	.89	.World Bioenergy, 2016	.43	World Business Council for	.4
Al-Karaghoulis and Kazmerski,	.90	.Wida'a, 2015	.44	Sustainable Development	
.2011		.Lang, 2014	.45	(WBCSD), 2015	
.IRENA and IEA-ETSAP, 2012	.91	.Sudan Tribune, 2013	.46	European Report on	.5
.IRENA, 2015c	.92	.Wida'a, 2015	.47	.Development, 2012	
Al-Karaghoulis and Kazmerski,	.93	.Ahmed, 2014	.48	.Turkenburg and others, 2012	.6
.2011		.Vick and Neal, 2012	.49	.Turkenburg and others, 2012	.7
.IRENA & IEA-ETSAP, 2012	.94	.Argaw, 2004	.50	United Nations and World	.8
.Loutatidou and Arafat, 2015	.95	.IRENA, 2015a	.51	.Bank, 2016	
.Angenent and others, 2004	.96	.Turkenburg and others, 2012	.52	International Renewable	.9
Biernat, Malinowski and	.97	.Hang, Qu and Zhao, 2012	.53	Energy Agency (IRENA),	
.Gnat, 2013		Khambalkar, Gadge and	.54	.2016a	
Absi Halabi, Al-Qattan and	.98	.Karale, 2009		.World Bank, 2012	.10
.Al-Otaibi, 2015		.Gastli and Charabi, 2011	.55	.IRENA, 2016b	.11
.Turkenburg and others, 2012	.99	.IRENA and IEA-ETSAP, 2015	.56	.Amer and others, 2017	.12
.Turkenburg and others, 2012	.100	.Turkenburg and others, 2012	.57	.Weinberg, 2015	.13
.Turkenburg and others, 2012	.101	National Renewable Energy	.58	.Turkenburg and others, 2012	.14
Absi Halabi, Al-Qattan and	.102	.Laboratory, 2003		.Argaw, 2003	.15
.Al-Otaibi, 2015		.Menicucci, 2009	.59	.Hegre and others, 2012	.16
.Eni S.p.A., 2016	.103	.Ayompe and others, 2011	.60	Eastern Research Group, Inc.	.17
Absi Halabi, Al-Qattan and	.104	.Eisentraut and Brown, 2014	.61	(ERG) and Resource Dynamics	
.Al-Otaibi, 2015		.IRENA and IEA-ETSAP, 2015	.62	.Corporation (RDC), 2011	
.Graves, 2016	.105	.Turkenburg and others, 2012	.63	.ERG and RDC, 2011, p. 15	.18
Absi Halabi, Al-Qattan and	.106	.Turkenburg and others, 2012	.64	.Bachmann, 2015	.19
.Al-Otaibi, 2015		.Turkenburg and others, 2012	.65	de Arespacochaga and others,	.20
Turkenburg and others,	.107	Polycarp, Brown and Fu-	.66	.2015	
.2012		.Bertaux, 2013		.ERG and RDC, 2011, p. 15	.21
Turkenburg and others,	.108	Trabacchi, Micale and Frisari,	.67	.Argaw, 2003	.22
.2012		.2012		.Argaw, 2003	.23
Absi Halabi, Al-Qattan and	.109	Trabacchi, Micale and Frisari,	.68	Union of Nova Scotia	.24
.Al-Otaibi, 2015		.2012		Municipalities (UNSM) and	
Absi Halabi, Al-Qattan and	.110	.Harrington, 2015	.69	.Verterra Group, 2015	
.Al-Otaibi, 2015		.IRENA and IEA-ETSAP, 2012	.70	.Argaw, 2004, p. 13	.25
Turkenburg and others,	.111	.World Bank, 2012	.71	.Argaw, 2003	.26
.2012		.World Bank, 2012	.72	.Vick and Neal, 2012	.27
.IRENA, 2015	.112	.IRENA, 2016c	.73	Global Environmental	.28
Poudineh, Sen and Fattouh,	.113	.Subramani and others, 2011	.74	Finance (GEF) Small Grants	
.2016		.World Bank, 2012	.75	.Programme, 2003	
.IRENA, 2016b	.114	Turkenburg and others, 2012;	.76	.Abdelhady and others, 2015	.29
.Philibert, 2015	.115	.World Bank, 2012		.Rolland, 2013	.30
Turkenburg and others,	.116	.IRENA and IEA-ETSAP, 2012	.77	Munawwar and Ghedira,	.31
.2012		.World Bank, 2012	.78	.2014	
.Nakhle, 2016	.117	.Hasnain and Alajlan, 1998	.79	.Argaw, 2003	.32
.ESCWA, 2015	.118	.Kalogirou, 2005	.80	.Argaw, 2004	.33
.Campbell, 2010	.119	.IRENA and IEA-ETSAP, 2012	.81	.Argaw, 2003	.34
.McNabola and others, 2014	.120	.Philipps and others, 2016	.82	.Argaw, 2003	.35
وزارة الطاقة الأمريكية.	.121	Al-Karaghoulis and Kazmerski,	.83	.Meah, Ula and Barrett, 2008	.36
.Potter, 2010	.122	.2011		.Turkenburg and others, 2012	.37



- .SDSN, 2016 .140
 .Nicholls and others, 2014 .141
 .IRENA, 2016c .142
 .REN21, 2013 .143
 Al-Karaghoul and .144
 .Kazmerski, 2011
 .Dipaola, 2016 .145
 .Dipaola, 2016 .146
- .134 اقتباس من الفصل المتعلق بكفاءة
 الموارد في هذه المجموعة من
 الأدوات .
 .Nicholls and others, 2014 .135
 .Nicholls and others, 2014 .136
 Turkenburg and others, .137
 .2012
 Turkenburg and others, .138
 .2012
 Sustainable Development .139
 Solutions Network (SDSN),
 .2016
- .Acker, 2011 .123
 Turkenburg and others, .124
 .2012
 .World Bank, 2012 .125
 .Meisen and Hunter, 2007 .126
 .IRENA, 2016b .127
 .World Bank, 2012 .128
 .REN21, 2013, p. 21 .129
 .IRENA, 2016b .130
 .World Bank, 2012 .131
 .Böer, 2004 .132
 .Shabala, 2013 .133



- Landscape Investment and Risk Management. International Institute for Sustainable Development (IISD), February. Available from http://www.iisd.org/pdf/2013/wef_nexus_2013.pdf
- Böer, Benno (2004). Halophyte development in the Gulf Arab countries – UNESCO Doha's activities 2001-2003. *Tropical Ecology*, vol. 45, No. 1, pp. 187-189
- Campbell, Richard J. (2010). Small Hydro and Low-Head Hydro Power – Technologies and Prospects (CRS Report for Congress No. R41089). Congressional Research Service. Available from http://nepinstitute.org/get/CRS_Reports/CRS_Energy/Renewable_Fuels/Small_hydro_and_Low-head_hydro_power.pdf
- Chandel, S. S., M. Nagaraju Naik, and Rahul Chandel (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49 (September), pp. 1084-1099. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Cour des comptes (2014). Le coût de production de l'électricité nucléaire: Actualisation 2014. Communication à la Commission d'Enquête de l'Assemblée Nationale. May. Available from https://www.ccomptes.fr/content/download/68537/1858246/version/2/file/20140522_rapport_cout_production_electricite_nucleaire.pdf
- CSP Today (2016). Projects Tracker Overview. Available from http://tracker.newenergyupdate.com/tracker/projects/table?order=field_pt_country_value&sort=desc&world-region%5B151%5D=151&country%5BMorocco%5D=Morocco&country%5BUAE%5D=UAE&country%5BAlgeria%5D=Algeria&country%5BEgypt%5D=Egypt&country%5BIran%5D=Iran&country%5BIraq%5D=Iraq&country%5BJordan%5D=Jordan&country%5BKuwait%5D=Kuwait&country%5BLebanon%5D=Lebanon&country%5BLibya%5D=Libya&country%5BOman%5D=Oman=country%5BQatar%5D=Qatar&country%5BSaudiArabia%5D=SaudiArabia&country%5BTunisia%5D=Tunisia&country%5BYemen%5D=Yemen&reset=Reset. Accessed 3 January 2017
- de Arespacochaga, Nicolas, and others (2015). On-site cogeneration with sewage biogas via high-temperature biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology*, vol. 22, No. 9 (September), pp. 477-485. Available from <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001>
- Argaw, Neway (2003). Renewable Energy in Water and Wastewater Treatment Applications [Period of Performance: April 1–September 1, 2001] (No. NREL/SR-500-30383). National Renewable Energy Laboratory (NREL), June. Available from <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/30383.pdf>
- Argaw, Neway (2004). Renewable Energy Water Pumping Systems Handbook [Period of Performance: April 1–September 1, 2001] (No. NREL/SR-500-30481). Denver, Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), July. Available from <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/30481.pdf>
- Au-Yeung, Neo (2016). High Power DC Submersible Solar Water Pump for Agricultural. Available from http://suntotalneo.en.ec21.com/High_Power_DC_Submersible_Solar--8960729_8960740.html. Accessed 29 December 2016
- Ayompe, Lacour M., and others (2011). Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate. *Energy*, vol. 36, No. 5 (May), pp. 3370-3378. Available from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.034>
- Bachmann, Nathalie (2015). Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants. IEA Bioenergy. Available from http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf Biernat, Krzysztof, Arthur Malinowski, and Malwina Gnat (2013). The Possibility of Future Biofuels Production Using Waste Carbon Dioxide and Solar Energy. In *Biofuels – Economy, Environment and Sustainability*, Zhen Fang, ed., InTech. Available from <http://www.intechopen.com/books/biofuels-economy-environment-and-sustainability/the-possibility-of-future-biofuels-production-using-waste-carbon-dioxide-and-solar-energy>
- Bizikova, Livia, and others (2013). The Water-Energy-Food Security Nexus: Towards a Practical Planning and Decision-Support Framework for Abdelhady, Suzan, Domenico Borello, and Simone Santori (2015). Economic Feasibility of Small Wind Turbines for Domestic Consumers in Egypt Based on the New Feed-in Tariff. *Energy Procedia*, vol. 75 (August), pp. 664-670. Available from <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.482>
- Absi Halabi, Mamun M., Ayman Al-Qattan, and A. Al-Otaibi (2015). Application of solar energy in the oil industry—Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43 (March), pp. 296-314. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.030>
- Acker, Thomas L. (2011). Hydroelectric Industry's Role in Integrating Wind Energy (No. T102700-0371). Canada: CEATI International Inc. Available from https://www.ceati.com/freepublications/0371_Web.pdf
- Ahmed, Abdelmoneim Taha (2014). Biofuel industry in Sudan: Experience and Future Prospects. Presented at the 2nd Bioenergy Week, Maputo, Mozambique, May. Available from http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2014_events/2nd_Bioenergy_Week_5-9May2014_Maputo/2_-_TAHA_AHMED.pdf
- Al-Karaghoul, Ali A., and L. L. Kazmerski (2011). Renewable Energy Opportunities in Water Desalination. In *Desalination, Trends and Technologies*, Michael Schorr, ed., InTech. Available from <http://www.intechopen.com/books/desalination-trends-and-technologies/renewable-energy-opportunities-in-water-desalination>
- Alvarado-Revilla, Fabiola (2015). Desalination Markets 2016: Global Perspective and Opportunities for Growth. Oxford: Media Analytics
- Amer, Kamel M., and others, eds. (2017). *The Water, Energy, and Food Security Nexus in the Arab Region*. Springer International Publishing AG. Available from https://books.google.ae/books?id=KMWiDQAAQBAJ&pg=PA93&lpg=PA93&dq=traditional+biomass+use+biomass+_MENA&source=bl&ots=xA0NqmdlF&sig=9zXx6q2cDz3EAwzko-fGRj-5B6g&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwvChcOjz8vRAh=XBOxQKHRdbA1sQ6AEINzAF#v=onepage&q&f=false
- Angenent, Largus T., and others, (2004). Production of bioenergy and



org/chenected/2015/10/saudi-arabia-creates-new-solar-powered-desalination-technology. Accessed 11 December 2016

Hasnain, Syed M., and Saleh A. Alajlan (1998). Coupling of PV-powered RO brackish water desalination plant with solar stills. *Desalination*, vol. 116, No. 1 (1 September), pp. 57-64. Available from [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00057-5)

International Energy Agency (IEA) (2012). *World Energy Outlook 2012*. Paris, France: International Energy Agency. Available from http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012_free.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2012). *Concentrating Solar Power. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, vol. 1: Power Sector, No. 3/5* (June). Available from http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015a). *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*. Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Water_Energy_Food_Nexus_2015.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015b). *Renewable Energy Target Setting*. Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Target_Setting_2015.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015c). *Renewable Power Generation Costs in 2014*. Abu Dhabi: IRENA. Available from https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016a). *REMap: Roadmap for a Renewable Energy Future* (2016 Edition). Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REMap_2016_edition_report.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016b). *Renewable Energy in the Arab Region. Overview of Developments*. Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Arab_Region_Overview_2016.pdf

Gastli, Adel, and Yassine Charabi (2011). Solar water heating initiative in Oman energy saving and carbon credits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, No. 4 (May), pp. 1851-1856. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.015>

Global Environmental Finance (GEF) Small Grants Programme (2003). *Small-Scale Wind Turbines for Water Pumping and Electricity Generation*. Egypt: United Nations Development Programme (UNDP). Available from <http://www.hy-pa.org/Publications/2005/publications/12-Small-scale%20wind%20turbines%20for%20water%20puming%20and%20electricity%20generation.pdf>

Gopal, C., and others (2013). Renewable energy source water pumping systems—A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25 (September), pp. 351-370. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.012>

Graves, LeAnne (2016). Kuwait Oil Company looks to solar to power crude extraction. *The National*, 28 May. Available from <http://www.thenational.ae/business/energy/kuwait-oil-company-looks-to-solar-to-power-crude-extraction>. Accessed 4 January 2017

Gude, Veera G., Nagamany Nirmalakhandan, and Shuguang Deng (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, No. 9 (December), pp. 2641-2654. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.008>

Gupta, Ashok K., Dilip Gehlot, and Ankit S. Gujrathi (2014). Experimental Investigation of Convex Lens Concentrating Solar Power Collector Prototype Performance. *International Journal of Innovation In Engineering Research & Management*, vol. 1, No. 2 (April), pp. 1-4

Hang, Yin, Ming Qu, and Fu Zhao (2012). Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. *Energy and Buildings*, vol. 45 (February), pp. 181-188. Available from <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.057>

Harrington, Kent (2015). Saudi Arabia Creates New Solar-Powered Desalination Technology. 16 October. Available from <http://www.aiche.org>

fuel cells: Benchmarking against other options based on industrial-scale data. *Fuel Processing Technology*, vol. 138 (October), pp. 654-662. Available from <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.07.006>

Dipaola, Anthony (2016). Cheapest Solar on Record Offered as Abu Dhabi Expands Renewables. *Bloomberg.com*, 19 September. Available from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-09-19/cheapest-solar-on-record-said-to-be-offered-for-abu-dhabi>

Dvorak, Paul (2014). Why not more vertical-axis wind turbines? *Windpower Engineering & Development*, 31 October. Available from <http://www.windpowerengineering.com/design/vertical-axis-wind-turbines/>. Accessed 11 December 2016

Eastern Research Group, Inc. (ERG), and Resource Dynamics Corporation (RDC) (2011). *Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field*. U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, October. Available from http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/epa_wwtf_opportunities.pdf

Eisentraut, Anselm, and Adam Brown (2014). *Heating Without Global Warming: Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat*. International Energy Agency (IEA). Available from https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/FeaturedInsight_HeatingWithoutGlobalWarming_FINAL.pdf

El-Katiri, Laura (2014). *A Roadmap for Renewable Energy in the Middle East and North Africa*. Oxford Institute for Energy Studies. Available from <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2014/01/MEP-6.pdf>

Eni S.p.A. (2016). Eni enters the field of renewable energies in Algeria. 23 September. Available from https://www.eni.com/docs/en_IT/enicom/media/press-release/2016/09/Eni_enters_Algeria_renewables_sector.pdf

European Report on Development (ERD) (2012). *Confronting Scarcity: Managing water, energy and land for inclusive and sustainable growth*. European Union. Available from http://ec.europa.eu/europeaid/sites/devco/files/conscareport-erd-2011_en.pdf



- U.S. Department of Energy. Available from <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34279.pdf>
- Nicholls, Jack, and others (2014). Evaluating Renewable Energy Policy: A Review of Criteria and Indicators for Assessment (IRENA UKERC Policy Paper). Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/documentdownloads/publications/evaluating_re_policy.pdf
- Philibert, Cédric (2015). Renewables in the MENA region. Presented at the COP21, Paris, France. 5 December. Available from <http://www.iea.org/media/workshops/2015/cop21/otherevents/5DecPhilibert.pdf>
- Philipps, Simon P., and others (2016). Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology (Version 1.2). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and National Renewable Energy Laboratory (NREL). Available from https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2016_02_09_CPV_Report_ISE_NREL_Version_1_2.pdf
- Polycarp, Clifford, Louise Brown, and Xing Fu-Bertaux (2013). Mobilizing Climate Investment: the Role of International Climate Finance in Creating Readiness for Scaled-up Low-carbon Energy. World Resources Institute. Available from http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/mobilizing_climate_investment.pdf
- Potter, Matthew (2010). Micro Hydro. Stanford University, 28 November. Available from <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/potter2>
- Poudineh, Rahmatallah, Anupama Sen, and Bassam Fattouh (2016). Advancing Renewable Energy in Resource-Rich Economies of the MENA. The Oxford Institute for Energy Studies. Available from <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/10/Advancing-Renewable-Energy-in-Resource-Rich-Economies-of-the-MENA-MEP-15.pdf>
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) (2013). MENA Renewables Status Report. Paris: REN21 Secretariat. Available from http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Regional%20Reports/MENA_2013_lowres.pdf
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) (2016). Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_technologies.pdf
- Lang, Andrew (2014). Final Report: Bioenergy in Sudan. Sudan University of Science and Technology, January
- Loutatidou, Sawina, and Hassan A. Arafat (2015). Techno-economic analysis of MED and RO desalination powered by low-enthalpy geothermal energy. *Desalination*, vol. 365 (1 June), pp. 277-292. Available from <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.010>
- McNabola, Aonghus, and others (2014). Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: an opportunity to improve sustainability. *Water Policy*, vol. 16, No. 1 (February), pp. 168-183. Available from <https://doi.org/10.2166/wp.2013.164>
- Meah, Kala, Sadrul Ula, and Steven Barrett (2008). Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, No. 4 (May), pp. 1162-1175. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.020>
- Meisen, Peter, and Lesley Hunter (2007). Renewable Energy Potential of the Middle East, North Africa vs. The Nuclear Development Option. Global Energy Network Institute (GENI), October. Available from <http://www.geni.org/globalenergy/research/middle-east-energy-alternatives/MENA-renewable-vs-nuclear.pdf>
- Menicucci, David (2009). Assembly and Comparison of Available Solar Hot Water System Reliability Databases and Information (No. SAND2009-2757). USA: Sandia National Laboratories. Available from <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/092757.pdf>
- Munawwar, Saima, and Hosni Ghedira (2014). A review of Renewable Energy and Solar Industry Growth in the GCC Region. *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 3191-3202. Available from <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.069>
- Nakhle, Carole (2016). Nuclear Energy's Future in the Middle East and North Africa. 28 January. Available from <http://carnegie-mec.org/2016/01/28/nuclear-energy-s-future-in-middle-east-and-north-africa-pub-62562>. Accessed 4 January 2017
- National Renewable Energy Laboratory (2003). Heat Your Water with the Sun (A Consumer's Guide No. DOE/GO-102003-1824). Washington, D.C.:
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016c). Renewable Energy Market Analysis: The GCC Region. Abu Dhabi: IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Market_GCC_2016.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA), and the International Energy Agency's Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA-ETSAP) (2012). Water Desalination Using Renewable Energy (Technology Brief No. 112). IEA-ETSAP and IRENA. Available from <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20.112%20Water-Desalination.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA), and the International Energy Agency's Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA-ETSAP) (2015). Solar Heat for Industrial Processes (Technology Brief No. E21). IEA-ETSAP and IRENA. Available from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf
- Kalogirou, Soteris A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 31, No. 3, pp. 242-281. Available from <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.03.001>
- Khambalkar, Vivek P., Sharashchandra R. Gadge, and Dhiraj S. Karale (2009). Solar water cost and feasibility of solar water heating system. *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 31, No. 2, pp. 208-218. Available from <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2009.023896>
- Kim, Jihun, and others (2013). Design Optimization of a Solar-Powered Reverse Osmosis Desalination System for Small Communities. In Proceedings of IDETC/CIE 2013. Portland, Oregon, USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME). Available from http://www.academia.edu/24544513/Design_Optimization_of_a_Solar-Powered_Reverse_Osmosis_Desalination_System_for_Small_Communities
- Kost, Christoph, and others (2013). Levelized Cost of Electricity: Renewable Energy Technologies. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems ISE. Available from <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/>



- Security Nexus in the Arab Region. E/ESCWA/SDPD/2015/2. Beirut: United Nations. Available from https://www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/publications/files/e_escwa_sdpd_15_2_e_0.pdf
- United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) (2016). Developing the Capacity of ESCWA Member Countries to Address the Water and Energy Nexus for Achieving Sustainable Development Goals: Regional Policy Toolkit. E/ESCWA/SDPD/2016/Manual. Beirut: United Nations. Available from https://www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/events/files/nexus_training_module.pdf
- United Nations World Water Assessment Programme (WWAP) (2014). The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy, vol. 1. Paris: UNESCO. Available from <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002257/225741E.pdf>
- United Nations, and World Bank. Sustainable Energy for All: About Us. Available from <http://www.se4all.org/about-us>. Accessed 2 November 2016
- U.S. Department of Energy (n.d.). Microhydropower Systems. Available from <https://energy.gov/energysaver/microhydropower-systems>. Accessed 4 January 2017
- Vick, Brian D., and Byron A. Neal (2012). Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. *Solar Energy*, vol. 86, No. 5 (May), pp. 1197-1207. Available from <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.012>
- Virgili, Francisco, Tom Pankratz, and Global Water Intelligence (GWI) (2016). IDA Desalination Yearbook 2016-2017. Oxford, UK: Media Analytics Ltd. Available from https://www.paperturn.com/flipbook/id/ida-yb_free/ida-desalination-yearbook-2016-2017?pid=NzU7549#
- Water in the West (2013). Water and Energy Nexus: A Literature Review. Stanford Woods Institute for the Environment, and Bill Lane Center for the American West. Available from http://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/Water-Energy_Lit_Review.pdf
- Weinberg, Josh (2015). Making Water-Energy Food Nexus approaches operational to support sustainable urbanization. Presented at the <http://www.sudantribune.com/spip.php?article46293>. Accessed 18 January 2017
- Sustainable Development Solutions Network (SDSN) (2016). Indicators and a Monitoring Framework. SNDS. Available from <http://indicators.report/indicators/i-52/>. Accessed 5 January 2017
- Trabacchi, Chiara, Valerio Micale, and Gianleo Frisari (2012). San Giorgio Group Case Study: Prosol Tunisia. Climate Policy Initiative (CPI). Available from <https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2012/08/Prosol-Tunisia-SGG-Case-Study.pdf>
- Turkenburg, Wim C., and others (2012). Chapter 11 – Renewable Energy. In *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Johansson, Thomas B., ed., Cambridge University Press, and the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, pp. 761-900. Available from http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter11_renewables_lowres.pdf
- Tyner, Craig E., and others (2001). Concentrating Solar Power in 2001: An IEA/SolarPACES Summary of Present Status and Future Prospects (SolarPACES Task I: Electric Power Systems). SolarPACES. Available from https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/energy-technology/renewable-energy-carriers-dam/documents/Publications/Documents%20for%20Downloading/CSP_2001.pdf
- Union of Nova Scotia Municipalities (UNSM), and Verterra Group (2015). Wind Energy Fact Sheets for Nova Scotian Municipalities. Canada: UNSM. Available from <http://www.unsm.ca/renewable-energy.html>
- United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) (2012). Report: Intergovernmental Consultative Meeting on the Water and Energy Nexus in the ESCWA Region – Beirut, 27-28 June 2012. E/ESCWA/SDPD/2012/IC.1/2/Report. Beirut: United Nations. Available from https://www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/events/files/water_and_energy_nexus_in_escwa_region_report_e.pdf
- United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) (2015). ESCWA Water Development Report 6: The Water, Energy and Food Renewables Global Status Report 2016. Paris: REN21 Secretariat. Available from http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), and Institute for Sustainable Energy Policies (ISEP) (2013). Renewables Global Futures Report 2013. REN21. Available from http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gfr/REN21_GFR_2013.pdf
- Richter, Christoph, Sven Teske, and Rebecca Short (2009). Concentrating Solar Power Global Outlook 09: Why Renewable Energy is Hot. Greenpeace International, SolarPACES, and European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA). Available from <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/planet-2/report/2009/5/concentrating-solar-power-2009.pdf>
- Rolland, Simon (2013). Promoting Small Wind in Developing Markets. 1 April. Available from <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-16/issue-2/wind-power/promoting-small-wind-in-developing-markets.html>. Accessed 7 February 2017
- Servicios Avanzados de Comunicación y Marketing SL (SACM) (2015). CSP World Map. CSPWorld.org. Available from <http://cspworld.org/cspworldmap>. Accessed 3 January 2017
- Shabala, Sergey (2013). Learning from halophytes: physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops. *Annals of Botany*, vol. 112, No. 7 (November), pp. 1209-1221. Available from <https://doi.org/10.1093/aob/mct205>
- Silicon Valley Clean Water (SVCW) (2012). Wastewater Treatment. SVCW. Available from <http://www.svcw.org/facilities/sitePages/wastewater%20treatment.aspx>. Accessed 29 December 2016
- Subramani, Arun, and others (2011). Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: A review. *Water Research*, vol. 45, No. 5 (February), pp. 1907-1920. Available from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.032>
- Sudan Tribune (2013). KSC introduces biofuel for cars in Sudan for the first time. 20 April. Available from



World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2015). Co-optimizing Solutions: Water and Energy for Food, Feed and Fiber. Available from <http://www.wbcsd.org/Projects/Climate-Smart-Agriculture/Resources/Co-optimizing-Solutions-water-and-energy-for-food-feed-and-fiber>

Zachary, Justin, and Colleen M. Layman, Bechtel Power Corp. (2010). Adding Desalination to Solar Hybrid and Fossil Plants. POWER, 1 May. Available from <http://www.powermag.com/adding-desalination-to-solar-hybrid-and-fossil-plants>

East and North Africa. Washington, DC: The World Bank. Available from <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-0-8213-8838-9>

World Bank (2015). World Development Indicators -World DataBank. Available from <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators>. Accessed 24 August 2015

World Bioenergy (2016). Sudan trying reduce oil dependence with biofuel. Available from <https://www.elmia.se/en/worldbioenergy/For-press/news-from-world-bioenergy-not-seen/Sudan-trying-reduce-oil-dependence-with-biofuel/>. Accessed 18 January 2017

Sustainable Megacities: Food, Energy, Water and the Built Environment Workshop: Food, Energy, and Water Nexus in Sustainable Cities, Beijing, China, 21 October

Wida'a, Abdel Azim (2015). Biofuel Potential for Transport Sector in Sudan. Presented at the UNCTAD, 17th Africa OILGASMINE, Khartoum, Sudan. November. Available from <http://unctad.org/meetings/en/Presentation/17OILGASMINE%20Abdel%20Azim%20Wida%27a%20%20.S11.pdf>

World Bank (2012). Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close the Water Gap in the Middle



