ملخص
تنفيذي

كتاب التكنولوجيا الخضراء

حلول الطاقة لمواجهة تغير المناخ

WIPO

© الويبو، 2024 / نسب المصنف 4.0 دولي
(CC BY 4.0)

لا ينطبق ترخيص المشاع الإبداعي على محتوى وضعته
جهات أخرى غير الويبو في هذا المنشور.

الغلاف: Getty Images / Jaakko Heikkilä, Anze
Furlan/psgtproductions, marvinh

مرجع الويبو: AR/ExSum1080/24-RN
DOI: 10.34667/tind.58492

ملخص عملي

التكنولوجيات التي تقلل الطلب على الطاقة تُقدِّم نهجاً عملياً للتعامل مع تغيُّر المناخ

في المؤتمر الثامن والعشرين لأطراف اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ الذي عُقد في عام 2023، تعهدت الدول بزيادة القدرة الإنتاجية للطاقة المتجددة ثلاثة أضعاف، ومضاعفة التحسينات العالمية في كفاءة استخدام الطاقة بحلول عام 2030، مما يضع الكفاءة في استخدام الطاقة في صدارة القرارات المتعلقة بالسياسات. وعلى الرغم من الزيادة الإجمالية في التمويل المناخي العالمي، فإن الاستثمارات في مجال كفاءة الطاقة لا تزال متأخرة عن الركب (مبادرة سياسات المناخ (2023، ICPI). ولا يزال هناك تفاوت كبير بين البلدان المتقدمة والنامية من حيث تطوير تكنولوجيات الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة والأخذ بتلك التكنولوجيات. ولسد هذه الفجوة، لا بد من تعزيز التعاون الدولي ونقل التكنولوجيات بكفاءة. ويؤدي المستهلكون –ولا سيما المستهلكون المنتجون– دوراً متزايد النشاط في استخدام الطاقة النظيفة. ولكن توجد حاجة ماسة إلى تغييرات هيكلية في السياسات والاستثمارات لدعم الوصول الأوسع نطاقاً والأكثر إنصافاً إلى التكنولوجيات التي تتسم بالكفاءة في استخدام الطاقة، والإنتاج اللامركزي للطاقة المتجددة.

وما دام الاعتماد على الوقود الأحفوري مستمراً، فإن الكفاءة في استخدام الطاقة تُقدِّم إسهاماً عملياً ومفيداً للجميع في عملية التحول في مجال الطاقة. وإنتاج الطاقة المتجددة هو الحل الرئيسي للتوقف التدريجي عن استخدام الوقود الأحفوري، ولكنه أيضاً يطرح تحديات، مثل النزاعات المتعلقة باستخدام الأراضي، ومشكلات سلاسل الإمداد، وإدارة النفايات. ويُعدّ الاستثمار في كفاءة الطاقة وإدارة الطلب عليها استراتيجيةً مضمونةً لتقليل استهلاك الطاقة. كما أن تكنولوجيات وممارسات الكفاءة في استخدام الطاقة يمكن تطبيقها بسلاسة على جميع المستويات، ابتداءً من فُرادى الأسر وصولاً إلى المرافق الكبيرة الحجم. أضف إلى ذلك أن تدابير الكفاءة في استخدام الطاقة تُعزز الأمن في مجال الطاقة عن طريق تقليل الاعتماد على الوقود المستورد وزيادة صمود أنظمة الطاقة التي تواجه تقلبات العرض والطلب.

الاستخدام النهائي والتكنولوجيات التمكينية يقودان الابتكار في تكنولوجيا الطاقة النظيفة

يقدم تحليلُ اتجاهات البراءات في مجال الطاقة رؤى قيّمة بشأن التطورات التكنولوجية وتوجهات القطاع، وإن لم يكن ذلك التحليل بالضرورة مؤشراً على الطلب في السوق أو النجاح التجاري. وتهيمن التكنولوجيات التمكينية، مثل البطاريات والهيدروجين والشبكات الذكية واحتجاز الكربون، على اتجاهات البراءات في الآونة الأخيرة، وهو ما يشير إلى وجود تركيز أوسع على حلول الاستخدام النهائي وأنظمة الطاقة اللامركزية. وقد شهدت ابتكارات الطاقة النظيفة نمواً ملحوظاً على مر السنين، إذ تتصدر

الطاقة الشمسية الزيادة في إيداعات البراءات المتعلقة بالطاقة المتجددة (الويبو، 2023). ولكن مصادر الطاقة المتجددة تمثل أقل من خُمس إجمالي ابتكارات الطاقة النظيفة. ولوسائل النقل مكانة مهمة في براءات الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة، خصوصاً فيما يتعلق بالمركبات الكهربائية وتكنولوجيات الشحن. وعلى الصعيد الإقليمي، تهيمن أوروبا واليابان والولايات المتحدة الأمريكية على إيداعات البراءات، لكن الصين تتصدر الآن في عدة قطاعات، وهو ما يسلط الضوء على تحول عالمي في قيادة الابتكار. وفي هذا الإصدار الثالث من كتاب التكنولوجيا الخضراء، نعرض العديد من أهم الابتكارات التكنولوجية في مجال الطاقة داخل القطاعات الرئيسية للمجتمع، ألا وهي:

- المناطق الحضرية
- والمناطق الريفية
- والخدمات الأساسية.

استخدام الطاقة في المدن على نحو أذكى

إن المدن مراكز رئيسية لاستهلاك الطاقة، ولها دور محوري في عملية التحول في مجال الطاقة. ويُتيح استخدام الحافلات الكهربائية والمركبات الذاتية القيادة فرصاً لتقليل استهلاك الوقود، على الرغم من استمرار وجود تحديات مثل ارتفاع التكاليف الأولية ومدى القبول الشعبي لها. كما أن الابتكارات المتعلقة بكفاءة استخدام الطاقة في المباني، وإدماج الطاقة المتجددة في الأماكن العامة، والترابط بين المياه والطاقة في المناطق الحضرية ضرورية أيضًا للتحول في مجال الطاقة في المناطق الحضرية. وهناك دراسات حالات إفرادية واعدة –مثل نظام النقل السريع بالحافلات الكهربائية في السنغال، ومشروع استعادة الحرارة المهدرة في مترو الأنفاق بلندن– توضح قدرة التكنولوجيا على تهيئة بيئات حضرية أكثر استدامة عند معالجة أوجه عدم المساواة الاجتماعية والاقتصادية.

إلا أن الإدارة الفعالة للطاقة تبدأ من مرحلة التصميم، مع التركيز على إنشاء مدن كثيفة يسهل المشي فيها، بالإضافة إلى مبان خاصة وتجارية معزولة جيداً تستفيد من مبادئ التصميم المُعتمد على عناصر طبيعية. فذلك يساعد على خفض الطلب على الطاقة، عن طريق تقليل الاعتماد على وقود النقل وتكنولوجيات التدفئة والتبريد المستهلكة للطاقة. ويحقق تصميمُ مدن موفرة للطاقة كثيراً من الوفورات في التكلفة والطاقة على المدى البعيد. وتعمل المدن الرائدة في ذلك على زيادة ترشيد استخدام الطاقة والوقود على مختلف المستويات من خلال حلول رقمية مؤتمتة ومترابطة، مثل أنظمة المرور الذكية والأنظمة الذكية لإضاءة الشوارع. ولكن مدناً متنامية كثيرة لا تستفيد من هذه الفرصة في البداية. ويوجد أيضاً تفاوت كبير بين مدن العالم في القدرة على تنفيذ مثل هذه التدابير، وفي تطبيق حلول تدير الطلب على الطاقة في المدن، ابتداءً من المنازل وصولاً إلى قطاعات الاستخدام النهائي.

ترشيد التدفئة والتبريد واستخدام المياه لتلبية الطلب المتزايد

تُستخدم معظم الطاقة المنزلية في التدفئة والتبريد. ويدل ذلك على أهمية تكنولوجيات مثل أنظمة التدفئة الموفرة، وأجهزة تجميع الطاقة الشمسية الحرارية، والأجهزة الذكية. ويُعدّ أيضاً تكامل إدارة المياه والطاقة أمراً ضرورياً، لأن المياه الساخنة المنزلية قد تستحوذ على نسبة كبيرة من الطاقة المُستخدمة في المنزل. كما أن السوق المتنامية للأجهزة الموفرة للطاقة وللمياه، إلى جانب التشريعات الداعمة ووعي المستهلكين، تُتيح فرصاً لخفض نفقات الطاقة والانبعاثات. وللمعايير والعلامات الدنيا المتعلقة بأداء الطاقة أثرٌ مُثبَت على استخدام التكنولوجيات، ولكن لم يتسع نطاقها حتى الآن ليشمل جميع البلدان وجميع أنواع الأجهزة.

ومع شروع المجتمعات المحلية في استكشاف الإنتاج اللامركزي للطاقة، ظهر مفهوم "المستهلكين المنتجين" الذي يُقصد به الأسر التي تستهلك الطاقة وتنتجها في آن واحد. وبفضل التكنولوجيا، يُمكِّن ذلك السكانَ من المشاركة بفعالية في عملية التحول في مجال الطاقة من خلال مبادرات جماعية. ويتجلى استعداد المستهلكين لأداء دور نشط في النمو الكبير في إنفاق الأسر على حلول التخفيف من آثار تغير المناخ، وهو النمو الذي يرجع بدرجة كبيرة إلى الإنفاق على السيارات الكهربائية، يليه الإنفاق على أنظمة الطاقة الشمسية الكهرضوئية في المنازل، ثم سخانات المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية، ثم التعديلات التحديثية للمنازل من أجل توفير الطاقة.

وتتعرض مرافق المياه لضغط متزايد، بسبب تضاؤل موارد المياه الذي تفاقم بسبب تغير المناخ، في حين أنها تستأثر بنحو 4% من الاستهلاك العالمي للكهرباء. وللبنية التحتية القديمة إسهام كبير في هذه الكثافة في استهلاك الطاقة. ولكن التطورات التكنولوجية، مثل المضخات الموفرة للطاقة وأساليب التهوية المتقدمة والأنظمة الذكية لإدارة المياه، تُتيح فرصاً لتقليل استهلاك الطاقة. كما أن إدماج التكنولوجيات الرقمية، مثل العدادات الذكية والذكاء الاصطناعي، يكتسب زخماً متزايداً، بما في ذلك في بلدان الجنوب. وذلك يُيسِّر الرصد الآني وتحسين توزيع المياه. ويجري أيضاً دراسة محطات معالجة مياه الصرف الصحي بوصفها مرافق محتملة لاستعادة الطاقة من خلال التحلُّل اللاهوائي وإنتاج الغاز الحيوي. كما أن التكنولوجيات المستجدة، مثل خلايا الوقود الميكروبية وأنظمة استعادة الحرارة، إلى جانب عمليات تحلية المياه الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة، من المتوقع أيضاً أن تعزز توفير الطاقة في قطاع المياه. وتزداد أهمية ذلك يوماً بعد يوم مع ارتفاع الطلب على المياه في مواجهة آثار تغير المناخ.

حلول الطاقة المتجددة تتغلب على تحديات الطاقة في المناطق الريفية

تواجه المجتمعات الريفية والنائية تحديات فريدة من نوعها في الحصول على الطاقة بسبب انخفاض الكثافة السكانية، وارتفاع الاستثمار الرأسمالي، والصعوبات التقنية. وغالباً ما يكون توسيع الشبكة الكهربائية لتصل إلى هذه المناطق ذا تكلفة باهظة. وتعتمد حتى الآن الحلولُ المستقلة عن الشبكة على الوقود الأحفوري، في حين أن استخدام الطاقة في المنازل غالباً ما يعتمد في المناطق الريفية على الوقود الحيوي والكيروسين اللذين لا يتسمان بالكفاءة في استخدام الطاقة، وكلاهما يُسهم في انبعاثات غازات الدفيئة. ولأوجه التقدم الذي تشهده تكنولوجيات الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، والابتكارات التي يشهدها مجال تخزين الطاقة والكفاءة في استخدامها أهميةٌ بالغة في معالجة هذه المشكلة.

وقد بدأت الشبكات الصغيرة والمتناهية الصغر التي تعمل بمصادر الطاقة المتجددة تبرز بوصفها حلولاً فعالة من حيث التكلفة للبلدان النامية والمتقدمة على حد سواء. ويزداد يوماً بعد يوم شيوع الحلول اللامركزية، مثل الشبكات الصغيرة التي تعمل بالطاقة المتجددة والنماذج التي تركز على المجتمع المحلي. وتؤدي التكنولوجيات المتقدمة، مثل الخلايا الشمسية الكهروضوئية المُحسَّنة، وتخزين الطاقة في بطاريات، وأنظمة التحكم التي تعمل بالذكاء الاصطناعي، إلى تعزيز إدارة الطاقة. كما أن الابتكارات التي تشهدها الشبكات الكهربائية المتناهية الصغر، والإمداد اللامركزي بالكهرباء من مصادر متعددة، والطاقة الكهرومائية الصغيرة النطاق، وتكنولوجيات الطاقة الشمسية والطاقة المتولدة من النفايات تدعم في الوقت نفسه التنمية الريفية والقدرة على تحمل تغير المناخ. وأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية والهجينة فعالة في المناطق الواقعة خارج الشبكة. وفي الوقت نفسه، تُتيح أيضاً تكنولوجيات الطهي بالطاقة النظيفة وحلول توليد الطاقة من النفايات فرصاً للحد من استهلاك الطاقة، مع تحقيق فوائد أخرى مهمة، مثل تحسين الصحة، وجودة الهواء، والحد من إزالة الغابات، وإدارة النفايات.

تعميم مراعاة البيئة في الزراعة بفضل ابتكارات كفاءة الطاقة

تؤثر الزراعة تأثيراً كبيراً على تغير المناخ من خلال انبعاثات غازات الدفيئة، ويرجع جزء من ذلك التأثير إلى استخدام الطاقة. وستحتاج أي ثورة خضراء جديدة إلى تحقيق أقصى استفادة من التكنولوجيات المتاحة بالفعل للتحول إلى الإنتاج الأخضر وإطعام سكان العالم المتزايدة أعدادهم. ويمكن لابتكارات مثل الألواح الشمسية الزراعية (وهي ألواح شمسية مدمجة مع المحاصيل) والألواح الشمسية المائية (وهي الألواح الشمسية المدمجة مع أنظمة تربية الأحياء المائية) أن تُسهم في التخفيف من آثار تغير المناخ والتكيف معه، من خلال وضع الألواح في موقع مشترك من أجل إنتاج كل من الطاقة المتجددة والمحاصيل. كما أن الممارسات والتكنولوجيات الموفرة للطاقة، مثل الزراعة المُحْكمة، والري بالطاقة الشمسية، والآلات التي تعمل بالكهرباء، وبرمجيات إدارة المزارع، وأجهزة الاستشعار المتصلة بالإنترنت، تساعد على تقليل الانبعاثات والحفاظ على المياه وتوفير الطاقة. ونماذج التمويل المبتكرة، مثل نماذج الدفع حسب الاستهلاك والنماذج التعاونية، مهمةٌ لكل من سكان الريف والمزارعين ليتمكنوا من الحصول على هذه التكنولوجيات واستخدامها.

وقد ثبت أن التجهيز والتخزين بعد الحصاد يستهلكان طاقة كثيفة للغاية. ويُسهم الفاقد والمهدر من الأغذية إسهاماً كبيراً في انبعاثات غازات الدفيئة، إذ يُفقَد ويُهدَر نحو 30% من الأغذية المنتجة، لا سيما في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط. ويمكن للابتكارات التكنولوجية، مثل المجففات الموفرة التي تعمل بالطاقة الشمسية، أن تلبي الطلب على الطاقة وأن تُعالج خسائر ما بعد الحصاد، على الرغم من أن الحصول على هذه التكنولوجيات غالباً ما يكون محدوداً في حالة المزارعين أصحاب الحيازات الصغيرة. ويمكن أن ينخفض الطلب على الطاقة بفضل التكنولوجيات الموفرة للطاقة المُستخدمة في تجهيز منتجات الألبان والتجفيف، والطحن، وتخزين الحبوب، ومصادر الطاقة المتجددة. كما أن الابتكارات التي تحدث في لوجستيات سلسلة التبريد، والتعبئة والتغليف، والحفظ في الثلاجات ضروريةٌ لمعالجة استهلاك الطاقة ومنع الهدر الغذائي والحد من الانبعاثات.

والأهم من ذلك أن تكنولوجيات الطاقة النظيفة في المناطق الريفية تُعدّ أدوات للتكيف مع آثار تغير المناخ وللتخفيف من حدتها. فهي تعزز القدرة على الصمود في مواجهة أعطال الشبكة والاضطرابات الناجمة عن آثار تغير المناخ، وتسمح بتوفير الكهرباء في المناطق الريفية التي تعاني نقصاً في الخدمات، وتضمن الإمداد الموثوق به للطاقة لمواجهة التحديات المناخية. ويمكن للتكنولوجيات المعروضة هنا أن تعود على سكان الريف بمجموعة متنوعة من فوائد التكيُّف والصمود، منها أمن الطاقة والاكتفاء الذاتي منها وتحسين جودة الهواء والصحة والمعايير الاقتصادية وجودة الحياة.

مستهلكو الطاقة المُتغاضَى عنهم في الغالب

إن المتاجر الشاملة الكبرى، بوصفها مستهلكاً كبيراً للطاقة، تطرح تحديات وفرصاً فريدة من نوعها فيما يخص الكفاءة في استخدام الطاقة واستدامتها. وقد نشأت المتاجر الشاملة الكبرى في الولايات المتحدة وأوروبا في أوائل القرن العشرين ثم انتشرت في كل أنحاء العالم. وتستغل هذه المتاجر الكبرى وفورات الإنتاج الكبير لتُقدم منتجات متنوعة، ولكنها تحتاج إلى طاقة كبيرة للتبريد والإضاءة والتحكم في درجة الحرارة. وتؤدي احتياجاتها من الطاقة، إلى جانب الأغذية المهدرة والانبعاثات الناتجة عن مواد التبريد، إلى تضخيم أثرها البيئي. وتؤكد كثافة استهلاك الطاقة في هذا القطاع، لا سيما في المتاجر الصغيرة، وجود حاجة ماسة إلى تكنولوجيات موفرة للطاقة. ويمكن أن ينخفض بشدة استهلاك الطاقة والانبعاثات بفضل التطورات التي تشهدها أنظمة التبريد بثاني أكسيد الكربون فوق النقطة الحرجة، والأنظمة الفعالة والآلية للتدفئة والتهوية وتكييف الهواء، واستعادة الحرارة، وإنتاج الطاقة المتجددة في الموقع.

ولا غنى عن مرافق الرعاية الصحية لرعاية المرضى، ولكن لها تأثيرات بيئية كبيرة غالباً ما يُغضّ الطرف عنها. وتتسم هذه المرافق أيضاً بالكثافة العالية في استخدام الطاقة بسبب استمرار عملياتها على مدار الساعة، لا سيما شبكات التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، والإضاءة، والمعدات الطبية. كما أنها عُرضة للظروف الجوية القاسية وانقطاع التيار الكهربائي، مما قد يهدد رعاية المرضى، وهو ما يتطلب أن تكون البنية التحتية الخاصة بالطاقة قادرة على الصمود. وتدعو مبادرات عالمية مثل مبادرة "رعاية صحية بلا ضرر" إلى جعل المستشفيات أكثر مراعاةً للبيئة من خلال إعداد تقارير الاستدامة الطوعية، وتنسيق العمل، وتبادل المعرفة بشأن تدابير تطبيق أفضل الممارسات. وللحد من الانبعاثات وتعزيز أمن الطاقة، لا غنى عن أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء والإضاءة الموفرة للطاقة، وعن أنظمة الطاقة اللامركزية، ومنها أنظمة الطاقة الشمسية والتوليد المشترك للحرارة والطاقة. ولا غنى في هذه الجهود عن تكنولوجيات مثل أنظمة التهوية التكيّفية، والمُجمِّدات الطبية وأجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي الموفرة للطاقة، والإضاءة الآلية التي تعمل بتقنية LED، إلى جانب معالجة استهلاك الطاقة الاحتياطية.

وتستهلك مراكز البيانات –وهي بنية تحتية مهمة لا غنى عنها لحياتنا الرقمية– قدراً كبيراً من الطاقة والمياه، مما يثير المخاوف بشأن أثرها السلبي. وفي حين أن البيانات تدعم أيضاً كثيراً من الحلول المناخية الحديثة، ابتداءً من التنبؤ بالمناخ وصولاً إلى الزراعة المُحْكمة، فإن الأثر النهائي لاستخدام البيانات على المناخ ليس مفهوماً في الغالب. ويتناول القسم الخاص بمراكز البيانات حلولاً مبتكرة لخفض استهلاكها للطاقة وتقليل احتياجات تبريدها. ومع تزايد الطلب على البيانات، لا سيما بسبب بروز الذكاء الاصطناعي، أصبح من الضروري استخدام حلول مثل توليد الطاقة المتجددة في الموقع، والطاقة الاحتياطية من الهيدروجين الأخضر. ويؤثر الموقع الجغرافي لمراكز البيانات على أثرها المناخي، فالمناطق ذات المناخ البارد والغنية بالكهرباء المُراعية للبيئة تجذب مرافق الحوسبة السحابية. وتوجد استراتيجيات متنوعة تُحسِّن الكفاءة وتزيد القدرة على تحمل تغير المناخ، ومنها الحوسبة الافتراضية، وتوزيع الحِمْل، واستخدام أجهزة وبرمجيات موفرة للطاقة. وفي الوقت نفسه، فإن الابتكارات التي تشهدها تكنولوجيات التبريد، مثل التبريد بالغمر والتبريد الطبيعي، تساعد على تحسين إدارة درجة الحرارة. وإضافة إلى ذلك، يزداد يوماً بعد يوم استكشاف أنظمة استعادة الحرارة المهدرة من أجل استخدام الحرارة الزائدة في تلبية الاحتياجات المحلية من الطاقة. والابتكارات التكنولوجية المُعدَّة لعمليات مراكز البيانات على وجه الخصوص متاحة بسهولة، ولاستخدامها أهميةٌ بالغة في تقليل التأثير المناخي الناجم عن تزايد الاستهلاك العالمي للبيانات.

الرسائل الرئيسية

التحول في مجال الطاقة من أجل الجميع

تقود التكنولوجيا والابتكار عمليةَ إضفاء الطابع الديمقراطي على التحوُّل في مجال الطاقة عن طريق تمكين الإنتاج اللامركزي للطاقة، وتعزيز مرونة الشبكة، وتقديم مجموعة متنوعة من الحلول التي تحتاج إليها الأسر والمجتمعات والمرافق والمدن والشركات لتحقيق الكفاءة في استخدام الطاقة وإدارة الطلب عليها. كما أن الأجهزة الموفرة للطاقة ومُنظِّمات الحرارة الذكية وأجهزة إنترنت الأشياء تُمكِّن المستهلكين من ترشيد استخدام الطاقة وتقليل الاستهلاك وخفض التكاليف، مما يجعل الممارسات المستدامة أيسر. وهذه التطوراتُ تُعزِّز الاكتفاء الذاتي من الطاقة وتزيد القدرة على الصمود في مجال الطاقة في جميع القطاعات عن طريق تمكين المستهلكين والمستخدمين النهائيين من توليد الطاقة التي يحتاجون إليها وتخزينها وإدارتها بفعالية، وهو ما يُعد مُكمِّلاً للاستثمارات الكبيرة في البنية التحتية الخاصة بالطاقة.

خدمات الطاقة أصبحت أهم من الإمداد

إن التحول في مجال الطاقة يُبشر بحقبة جديدة لأمن الطاقة تتمحور حول خدمات الطاقة بدلاً من سلع الطاقة. وستكون التكنولوجيات أهم من الوقود. في الماضي، كان جزء كبير من أمن الطاقة يتحقق من خلال تدابير متعلقة بالعرض، بينما كانت إدارة الطلب على الطاقة تُعدّ أقل أهمية. وسيتحول المشهد الجغرافي والسياسي نحو مزيد من الاعتماد على الموارد المحلية في مجال الطاقة، حيث ستعتمد الدول في المقام الأول على المصادر الإقليمية وستقل حاجتها إلى واردات الوقود الأحفوري البعيدة. وستستمر الروابط العالمية من خلال أسواق التكنولوجيات النظيفة المشتركة وسلاسل الإمداد. وسوف يزداد التركيز على البلدان النامية، ووصولها إلى التكنولوجيات والتمويل ومعارف الملكية الفكرية. وسوف تُفسح الأنظمة المركزية المجال لمزيد من الحلول اللامركزية التي تُشرِك المستهلكين. وسوف تزداد مراعاة الآثار البيئية والاستدامة والقدرة على التكيُّف مع المناخ –بما في ذلك تنويع مصادر الطاقة– عند التخطيط والاستثمار.

مزايا التحوُّل إلى الطاقة الخضراء على صعيد الاقتصاد الكلي

تمتلك معظم البلدان موارد متجددة تستطيع تسخيرها لتحقيق أمن الطاقة والاكتفاء الذاتي منها، فتقلل الحاجة إلى الوقود المستورد والتعرض لتقلبات أسعار الوقود الأحفوري. كما أن التحوُّل في مجال الطاقة سيُتيح فرصاً للبلدان النامية التي غالباً ما تفتقر إلى احتياطيات محلية من الوقود ويمكن أن تستفيد من زيادة استخدام موارد الطاقة المتجددة. وقد لا توفر تكنولوجيات الطاقة المتجددة إمكانية تحقيق الاكتفاء الذاتي المطلق في مجال الطاقة، لكنها تسمح للبلدان بأن تعزز أمنها وبأن تزيد قدرتها

على الصمود في هذا المجال من خلال الاستفادة من مواردها. وسيكون بإمكان البلدان التي تعتمد بشدة على واردات النفط أو الغاز أو الفحم أن تتجاوز الشبكات الوطنية والأنظمة القائمة على الوقود الأحفوري. وغالباً ما تكون التكنولوجيات التي تعزز الحصول على الطاقة في البلدان النامية (مثل موارد الطاقة المستقلة عن الشبكة، والهجينة، واللامركزية) أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنةً بالوقود الأحفوري على المدى البعيد. ويمكن أن توفر البلدان نحو 156 مليار دولار أمريكي من التكاليف عن طريق استخدام مصادر الطاقة المتجددة (الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، 2022. وغالباً ما تكون لنظام الطاقة الشمسية المنزلية تكاليف أولية أقل مقارنةً بالاستثمار في نظام قائم على الوقود الأحفوري أو توسيع البنية التحتية للشبكة التقليدية. كما أن الأنظمة المحلية واللامركزية، مثل أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية والشبكات المتناهية الصغر، يمكن إنشاؤها بسرعة مقارنةً بالبنية التحتية المركزية للوقود الأحفوري، وقد تكون أيضاً أكثر صموداً في مواجهة الاضطرابات والكوارث الطبيعية. ويمكن تكييف التكنولوجيات حسب الموارد المحلية (مثل الطاقة الكهرومائية الصغيرة النطاق في المناطق النهرية) لزيادة قابليَّة التَّنفيذ والاستدامة. وقد تتحول الحكومات والمنظمات الدولية من دعم الوقود الأحفوري إلى تقديم إعانات أو منح أو حوافز لمشروعات الطاقة المتجددة، مما يخفف أعباء التكاليف. ويمكن أن يؤدي تطبيق تكنولوجيات الطاقة المتجددة وصيانتها إلى خلق فرص عمل محلية، وتعزيز ريادة الأعمال المحلية، ودفع عجلة تنمية المشروعات الصغيرة والمتوسطة الحجم.

البنى التحتية اللامركزية للطاقة المتجددة تُعزز المرونة وتنوُّع سُبُل الحصول على الطاقة

تُعدّ البنية التحتية اللامركزية للطاقة المتجددة خياراً يزداد قبولاً لإمداد المناطق الريفية الواقعة خارج الشبكة بالكهرباء. ويمكن أن تساعد على تحقيق أهداف التخفيف من آثار تغير المناخ والتكيف معه، وإتاحة إمكانية الحصول على طاقة نظيفة ومستقرة في المناطق التي تفتقر إلى الخدمات، وتلبية الميل المتزايد إلى مرونة الطاقة والاكتفاء الذاتي منها في الاقتصادات الناشئة والمتقدمة على حد سواء. وتستند أنظمة الإمداد بالكهرباء خارج الشبكة إلى تكنولوجيات وتصاميم متنوعة، مما يزيد مرونتها وقدرتها على التكيف مع الظروف المحلية. وتستخدم الشبكاتُ الذكية تكنولوجيات رقمية، وأجهزة استشعار، وعدادات ذكية لرصد تدفق الكهرباء. فتتعقب أنماطَ الاستخدام، وتضبط أحمالَ الشبكة حسب الطلب، وتُقلل فقدان الطاقة من خلال اكتشاف أوجه القصور في الشبكة ومعالجتها بسرعة، وتُسهِّل تكامل المصادر اللامركزية للطاقة المتجددة من خلال إدارة الناتِج المتغير والتنسيق مع موارد الشبكة الأخرى. وهذا أمر لا غنى عنه لتعزيز قدرة الشبكة على الصمود في مواجهة الاضطرابات والظواهر الجوية القاسية، ومن ثَمّ الإسهام في التكيف مع تغير المناخ. كما أن الشبكات المتناهية الصغر، التي يمكن أن تعمل بشكل مستقل عن الشبكة الرئيسية، لها أهمية بالغة في عملية التحول في مجال الطاقة في المجتمعات الريفية، إذ تُحفز الإقبال على مصادر الطاقة المتجددة مع ضمان أمن الطاقة والقدرة على تحمل تكاليفها وصمودها.

الحلول الجديدة والفعالة والأرخص ثمناً لتخزين الطاقة تنشر حلول الطاقة المتجددة في كل مكان

مع زيادة استخدام المصادر اللامركزية للطاقة المتجددة، تصبح موازنة الإنتاج المتقطع للطاقة أمراً ضرورياً لتخزين الطاقة الزائدة. وقد انخفضت تكاليف بطاريات أيونات الليثيوم الحديثة انخفاضاً كبيراً في السنوات الأخيرة، بينما تحسنت كثافة طاقتها وزاد عمرها الافتراضي وارتفعت كفاءتها. كما أن الابتكارات الخاصة بتكنولوجيات تخزين الطاقة في ازدياد، بما في ذلك بطاريات التدفق، وتخزين الطاقة الكهرمائية عن طريق الضخ للمرتفعات، والتخزين باستخدام الحذافات، والتخزين بالجاذبية الذي يستغل طاقة الجاذبية الكامنة، وهو مفيد بشدة في المناطق الريفية والمناطق الواقعة خارج الشبكة. ولكن يجب التوسع بدرجة كبيرة في تخزين الطاقة للوفاء بتعهد مؤتمر الأطراف الثامن والعشرين الذي

يقتضي زيادة القدرة الإنتاجية العالمية للطاقة المتجددة ثلاثة أضعاف بحلول عام 2030 مع الحفاظ في الوقت نفسه على الأمن الكهربائي.

يجب تلبية الطلب العالمي على الغذاء في المستقبل من خلال حلول جديدة مُراعية للبيئة، وليس بالطريقة المعتادة

الطاقة المتجددة والكفاءة في استخدام الطاقة ركيزتان أساسيتان لإطعام عدد متزايد من السكان بشكل مستدام. ومن المفارقات أن الابتكارات السابقة التي كانت تهدف إلى تحسين الإنتاجية الزراعية ساهمت في تدهور التربة وفقدان التنوع البيولوجي وتلوث المياه وانبعاثات غازات الدفيئة. وخلال الثورة الخضراء الأولى، أدت الآلات إلى زيادة الإنتاجية وأحدثت ارتفاعاً هائلاً في إنتاج الأسمدة والمبيدات الحشرية، ولا يزال ذلك الارتفاع مستمراً حتى يومنا هذا. ولكن تحدث الآن ثورة خضراء جديدة، إذ توجد حالياً تكنولوجيات كثيرة تعزز استدامة العمليات الزراعية سواء في المزرعة أو طوال عمليات التجهيز والتخزين في مرحلة ما بعد الحصاد. وأما الابتكارات في المزرعة فتشمل الآلات الزراعية الكهربائية، والمضخات وآلات التَّفريخ التي تعمل بالطاقة الشمسية، ووسائل التهوية الموفرة للطاقة في حظائر الماشية والصوبات الزراعية، وزيادة الأكسجين في الماء باستخدام الطاقة المتجددة عند تربية الأحياء المائية، وأنظمة الزراعة بالطاقة الشمسية التي تنتج الطاقة المتجددة والغذاء على حد سواء. وتستخدم تكنولوجيات التجفيف طاقة أقل عن طريق ضبط تدفق الهواء واستخدام أجهزة استشعار الرطوبة. كما أن ابتكارات التخزين البارد تستخدم الطاقة الشمسية، ووحدات النقل الكهربائية، وتكنولوجيات التبريد المتقدمة الموفرة للطاقة، وأنظمة الرصد والتحكم الذكية، والمبردات البديلة ذات التأثيرات المناخية الأقل.

كفاءة الطاقة وإدارة الطلب عليها لهما أهمية بالغة لإبطاء اتجاه الاستهلاك المتزايد للطاقة

للاستثمار في كفاءة الطاقة أهمية بالغة في عملية التحوُّل في مجال الطاقة. وعلى الرغم من وجود نشاط كبير لتسجيل البراءات التي تهدف إلى تحقيق الكفاءة في استخدام الطاقة وتمكين تكنولوجيات الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة في البلدان ذات الدخل المرتفع، فإن هذه الاستثمارات لا تزال تعاني نقصاً كبيراً في سياق التمويل المناخي الدولي. وفي حين أن استثمارات الطاقة المتجددة ضرورية، فإن معدل انتشارها الحالي وحده غير كافٍ لمكافحة تغير المناخ بفعالية على نطاق عالمي. فالاعتماد المستمر على الوقود الأحفوري، إلى جانب استمرار الإعانات الوطنية والنمو السريع للطلب العالمي على الطاقة، يؤكد الحاجة الملحة إلى سياسات تقدُّميّة وتكنولوجيات مبتكرة تقلل استهلاك الطاقة وتزيد استعادتها وتستحدث طرقاً جديدة لاستخدام الأجهزة والسلع. كما أن التركيز على الحلول المتعلقة بالعرض مع تجاهل كفاءة الطاقة قد يُسفر عن تحديات أعمق، منها الحاجة إلى تأمين سلاسل إمدادات مستدامة للمواد الخام والتخفيف من الاستيلاء على الأراضي الذي يؤدي إلى تفاقم عدم المساواة الاجتماعية.

انتبهوا للتأثيرات الارتدادية والمفاضلات المحتملة المرتبطة باستثمارات تكنولوجيات الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة

قد يتسبب الاستثمار في الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة وإدارة الطلب في عواقب سلبية غير مقصودة وتأثيرات ارتدادية، كما يتضح في جميع الفصول. ومن أمثلة ذلك: العمل عن بُعد الذي قد يقلل السفر ولكنه يزيد أيضاً استهلاك الطاقة في المنزل، والسيارات الكهربائية وحلول "التنقل كخدمة" (MaaS)

التي قد تحل محل وسائل النقل العام وتغير أنماط ركوب الدراجات، ومصابيح الشوارع التي تعمل بتقنية LED التي تؤثر على الحيوانات في المناطق الحضرية. إن التأثير الارتدادي للاستثمار في كفاءة الطاقة معروف جيداً، إذ تؤدي وفورات التكلفة إلى استخدام المستهلكين لمزيد من الطاقة. ومن المحتمل أيضاً أن تُروَّج الاستثمارات والسياسات اللامركزية في مجال الطاقة لزيادة عدد "المستهلكين المنتجين" للطاقة المتجددة على حساب تعزيز البنية التحتية للشبكة الوطنية ومراعاتها للبيئة. ويجب بحث هذه المفاضلات وفهمها جيداً من أجل تخفيف الضرر وتجنب تقليل المكاسب المتوقعة من الاستثمار في الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة.

خطر فقدان الأصول لقيمتها لا يقتصر على البنية التحتية للوقود الأحفوري

يوجد خطر حقيقي ينذر بظهور شكل جديد من أصول الطاقة الفاقدة لقيمتها. فمن المحتمل أن تؤدي التطورات التكنولوجية السريعة إلى بطلان استعمال أصول الطاقة المتجددة أو بنيتها التحتية الحالية. وعلى غرار المركبات التقليدية والمباني غير الموفرة للطاقة، سيُصبح الجيل الأول للألواح الشمسية من الأمور القديمة التي عفا عليها الزمن. وقد يُستعاض عن توربينات الرياح القديمة ذات الكفاءة الأقل والسعة الأصغر وأنظمة التحكم الأقل تقدماً بطرازات أحدث ذات سعة أكبر وأداء أفضل وتصميم متطور للشفرات. وقد يبطل استعمال أنظمة التخزين في البطاريات القديمة بسبب ظهور تكنولوجيات أحدث، مثل بطاريات أيونات الليثيوم أو البطاريات الصلبة التي تتسم بكثافة طاقة أفضل وعمر أطول وشحن أسرع. وأما الآثار السلبية المترتبة على ذلك فتشمل الهدر الزائد، وزيادة تكاليف التركيب والتحديث، وانخفاض قيمة استثمارات الطاقة المتجددة بمرور الوقت مما يؤدي في النهاية إلى الاستبدال المبكر. ومن المتوقع أن تكون النفايات الناتجة عن مصادر الطاقة المتجددة جزءاً صغيراً من إجمالي النفايات العالمية في المستقبل (مقارنة بالنفايات البلاستيكية، ونفايات البلديات، ورماد الفحم، ونفايات المعدات الإلكترونية)، ورغم ذلك لا بد من البحث والاستثمار في برامج إعادة الاستخدام وإعادة التدوير المتقدمة والحلول التدويرية للوحدات الكهروضوئية. وذلك يسلط الضوء أيضاً على دور التعديلات التحديثية. فبدلاً من تصنيع أصول جديدة تماماً، يمكن استخدام التعديل التحديثي على نطاق أوسع في المباني والمركبات والصناعة. ولا تقتصر التعديلات التحديثية على توفير الطاقة واستخدام المواد فحسب، بل يمكن أن تخلق وظائف جديدة وتُحسّن إنتاجية الموظفين وترفع قيمة الأصول.

التكنولوجيات المبتكرة تُتيح حلولاً جديدة للطاقة في ظل الظروف الصعبة

إن التطورات الحديثة التي شهدتها تكنولوجيات الطاقة ذات الانبعاثات الكربونية المنخفضة تُوسِّع نطاق تطبيقها في جميع أنحاء العالم، حتى في الأجواء القاسية. فالابتكارات التي شهدتها بطاريات السيارات الكهربائية، على سبيل المثال، يمكن أن تدعم أنظمة التدفئة والتبريد المتقدمة، والتحكم الحراري المُحسَّن، وكيمياء البطاريات الجديدة التي تسمح للحافلات الكهربائية بأن تعمل في المناطق الشمالية الباردة. وتُصمَّم الألواح الشمسية الآن بكفاءة أفضل في ظروف الإضاءة المنخفضة. وتُتيح أيضاً الحلول الجديدة لشحن البطاريات إمكانية شحن المركبات في تلك المراكز الحضرية التي تعاني من ضعف أنظمة الشبكة. 2 أضف إلى ذلك أن أنظمة التبريد باستخدام ثاني أكسيد الكربون دون النقطة الحرجة، التي كانت فعالة في توفير الطاقة في المتاجر الكبرى داخل أوروبا، يمكن أن تعمل الآن بكفاءة في الأجواء الأكثر دفئاً بفضل تحسين تصميم النظام. وعلاوة على ذلك، حدث تحسُّن كبير في المضخات الحرارية –التي كانت فيما مضى هي الأكثر كفاءةً في الأجواء المعتدلة– فأصبحت قادرة على توفير التدفئة والتبريد خلال فصلي الشتاء القارس والصيف الحار. وتُعدّ هذه الابتكارات معالم بارزة في مسيرة التحوُّل العالمي في مجال الطاقة، إذ تسمح باستخدام الحلول على نطاق واسع بغض النظر عن الموقع. وتوفر التكنولوجيات التجميعية مزيداً من المرونة وسهولة الاستخدام في المنازل، ومنها

أنظمة التحلُّل اللاهوائي التجميعية الصغيرة الحجم المُعدَّة للاستخدام المنزلي، وأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية المتناهية الصغر التي يمكن تركيبها في وحدات صغيرة قابلة للتوسع، مما يُسهِّل بناء النظام بمرور الوقت. وهذه الابتكارات إنما هي نتاج منظومات الابتكار الفعالة. وتُعدّ حقوق الملكية الفكرية ركناً أساسياً لأي منظومة ابتكار جيدة، وتتيح تلك الحقوق نقل التكنولوجيا، ليس من المختبر إلى السوق فحسب، بل بين الأسواق أيضاً.

نماذج التمويل المبتكرة تحفز اعتماد تكنولوجيات الطاقة في المناطق ذات الدخل المنخفض

إن نماذج التمويل المبتكرة –مثل الدفع حسب الاستهلاك (PAYG)، والطاقة كخدمة (EaaS)، والشبكة المتناهية الصغر كخدمة، والبرمجيات كخدمة– تعمل على إحداث تحوُّل في عملية الحصول على الطاقة من خلال جعل التكنولوجيات النظيفة ذات تكلفة ميسورة وقابلة للتوسيع في المناطق التي تفتقر إلى الخدمات. فهي تُقلل رأس المال الأولي اللازم لاستخدام التكنولوجيات النظيفة. وتتيح نماذج "الدفع حسب الاستهلاك" إمكانية أن يدفع المستخدمون التكلفة على أقساط صغيرة يمكن التحكم فيها، مما يقلل العوائق المالية ويسمح بالتوسع الأسرع في مناطق متنوعة. وغالباً ما تشمل ضمانات الأداء وخدمات الصيانة، وهو ما يقلل المخاطر المالية التي قد يتعرض لها المستهلكون. وكذلك فإن ترتيبات التأجير والترتيبات التعاونية للمعدات الزراعية الموفرة للطاقة توفر للمزارعين حلولاً مرنة وفعالة من حيث التكلفة، مما يمكنهم من استخدام التكنولوجيات المتقدمة دون أن يتحملوا عبء الاستثمارات الكبيرة التي تُدفَع مقدَّماً. ويزداد يوماً بعد يوم ما تقدمه البرامج المبتكرة إلى المُنتجين الزراعيين والشركات الريفية الصغيرة من مِنَح وخصومات وحوافز وتمويل منخفض التكلفة لتركيب أنظمة الطاقة المتجددة وإجراء تحسينات في كفاءة استخدام الطاقة.

الإمكانات غير المستغلة لاستعادة الطاقة

يسمح الابتكار بالحصول على الطاقة من مصادر غير مُستغَلة حتى الآن. ويتطلع مزيد من مرافق إدارة النفايات إلى الاستفادة من المواد العضوية عن طريق التحلُّل اللاهوائي، والتوليد المشترك للحرارة والطاقة، وغيرهما من وسائل إنتاج الطاقة في الموقع مثل التكنولوجيا الناشئة لخلايا الوقود الميكروبية. وتُجرى في المدن تجارب على استخدام طريقة استخلاص الطاقة الحركية لاستعادة الطاقة من حركة مرور المشاة، أو خطوط الامتصاص المسطحة لامتصاص الحرارة في المناطق الحضرية. وأما في المناطق الريفية، فيزداد الإقبال على استخدام أنظمة التحلُّل اللاهوائي الصغيرة الحجم المُكوَّنة من وحدات تجميعية المُعدَّة للمزارع والمجتمعات المحلية الصغيرة، وذلك ليس لتوليد الطاقة المتجددة فحسب، بل أيضاً للمساهمة في إدارة النفايات. وتوجد أمثلة ناجحة على كيفية تحول المتاجر الكبرى إلى موردين للطاقة، من خلال استعادة الحرارة الناتجة عن تبريد خزانات العرض والمُجمِّدات.

الحاجة إلى مزيد من الابتكار في القطاعات الناشئة المستهلكة للطاقة

تُثير القطاعات الناشئة الكبيرة شكوكاً جديدة بشأن استهلاك الطاقة في المستقبل، فيجب توجيه الابتكار نحو معالجة استهلاكها للطاقة. كما أن تحوُّل الاستخدامات النهائية إلى الطاقة الكهربائية سيُغير أنماط استهلاك الطاقة. وينبغي أن تُعالَج من البداية التحديات التقنية والتكاليف والجوانب البيئية والاجتماعية الخاصة بتحديث البنية التحتية. على سبيل المثال، تُعدّ مراكز البيانات، التي قد يتضاعف الطلب على الكهرباء فيها بحلول عام 2026، أحد هذه القطاعات المشمولة بهذا المنشور. ومن المتوقع كذلك أن تكون تحلية المياه مساهماً رئيسياً في الاستهلاك المتزايد للطاقة في قطاع

المياه، فتغيُّر المناخ يزيد عرقلة الحصول على المياه العذبة. وتوجد حاجة ماسة إلى أنظمة التبريد الكهربائية المستخدمة في مركبات النقل لتبريد الحمولة أو تجميدها في سلسلة الإمداد العالمية الآخذة في التوسع. ولا بد من بذل جهود إضافية كبيرة لجذب الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة وتوسيع الشبكة في البلدان الأقل ثراءً التي تشهد تخلُّف بعض المجالات بسبب نقص الاستثمار المستمر والدعم الدولي.

تكنولوجيات الطاقة النظيفة مهمة أيضاً لتعزيز التكيف والقدرة على الصمود

تعمل تكنولوجيات الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة على زيادة قدرة أنظمة الطاقة على مواجهة التأثيرات المادية لتغير المناخ. ويحدث ذلك بعدة طرق. فهي تُحقِّق التكامل بين مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، ومن ثَمّ تعزز صمود الشبكة وتزيد مرونتها وتوفر مزيداً من الخيارات للتعامل مع الظواهر الجوية القاسية. وقد تُقلل أيضاً الاعتماد على البنية التحتية الضعيفة. كما تعمل تكنولوجيات الشبكة الذكية وأنظمة تخزين الطاقة على تحسين قدرة الشبكة على إدارة الأعطال والاستجابة لها. ويمكن للاستثمار في الطاقة المتجددة أن يحفز الاقتصادات المحلية ويخلق فرص عمل، مما يزيد أيضاً قدرة السكان المحليين على تحمُّل الاضطرابات الناجمة عن تغير المناخ. وتؤدي الألواح الشمسية الزراعية (agrivoltaics) إلى تحقيق الاستخدام الأمثل للأراضي لإنتاج الطاقة والمحاصيل في وقت واحد. ويكتسب ذلك أهمية بالغة في المناطق التي تتعرض فيها الأراضي الزراعية للضغط بسبب التأثيرات المناخية والتوسع الحضري. وأما الألواح الشمسية المائية (aquavoltaics) التي تدمج أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية بالمسطحات المائية فتعود بالنفع على مجتمعات الصيد وتربية الأحياء المائية في المناطقة النائية التي تقع خارج الشبكة وتعاني من ارتفاع تكاليف الوقود، وفي الوقت نفسه تُلبي تلك الألواح احتياجات الأمن الغذائي.

يُركِّز الإصدار الثالث من *كتاب التكنولوجيا الخضراء* تركيزاً كبيراً على الطاقة. ويُقدم هذا الملخص العملي معلومات أساسية عن الحلول المتعلقة بتغير المناخ المعروضة في التقرير الكامل، الذي يستعرض مجموعة متنوعة من الابتكارات التكنولوجية المهمة في مجال الطاقة في القطاعات الرئيسية للمجتمع، بما في ذلك الأسر والمجتمعات المحلية في المناطق الحضرية والريفية على حد سواء، فضلاً عن الخدمات الأساسية التي تقدمها المتاجر الكبرى ومرافق الرعاية الصحية ومراكز البيانات.