

كيفية تأثير افتراضات القدرات الثابتة ومعدل الانقطاع القسري لمصادر الطاقة المتجددة على نتائج نماذج التوسيع في القدرات

عمرو الشرفاء وماري بيتيت وفرانك فيلدر

عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحوثاً مستقلة في اقتصاديات وسياسات وتقنيات الطاقة بشتى أنواعها بالإضافة إلى الدراسات البيئية المرتبطة بها. وتتمثل مهمة كابسارك في تعزيز فهم تحديات الطاقة والفرص التي تواجه العالم اليوم وفي المستقبل من خلال بحوث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

إشعار قانوني

© حقوق النشر 2023 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبه بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كنصيحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة، ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

موثوقية الطاقة الشمسية الكهروضوئية
وطاقة الرياح.

تؤثر الافتراضات التي تم تناولها بشأن القدرة
الثابتة ومعدل الانقطاع القسري للطاقة
الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح على
تكاليف توليد الطاقة الكهربائية وانبعثات
ثاني أكسيد الكربون ونشر تقنيات تخزين
البطاريات، وقد لاحظنا في دراسة حالتنا
للمملكة العربية السعودية حتى عام 2030،
زيادة تتراوح ما بين 11% و 17% و 41% على
التوالي عند تناول الافتراضات المتشائمة
مقارنة بتلك المتفائلة.

لا نجد أي أنماط ملحوظة للكيفية التي تؤثر
بها افتراضات القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع
القسري على أداء الموثوقية، بل الواقع أن
باستطاعة تغيير القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع
القسري لمصادر الطاقة المتجددة أن يغيرا
أو يحافظا على حالة الموثوقية للمناطق عند
تناولها بمعزل عن غيرها، دون وجود أي وتيرة
يمكن ملاحظتها.

تؤكد نتائج هذه الدراسة مجدداً أهمية جمع
البيانات الدقيقة للطقس الخاصة بمصادر
الطاقة المتجددة من أجل دعم عمليات النشر
الفعّالة لمصادر الطاقة المتجددة، ومن شأن
ذلك على المساعدة على تجنب الاستثمارات
الكبيرة أو الناقصة بدرجة كبيرة.

تعتمد مرحلة التحول في الإمداد الطاقوي التي نشهدها
في الوقت الراهن اعتماداً كبيراً على مدى انتشار مصادر
الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية
وطاقة الرياح للوفاء بمتطلبات توليد الطاقة الكهربائية،
إذ ستؤدي هذه الموارد المتغيرة والمتقطعة إلى تغيير
موثوقية نظم الطاقة مقارنة بالأوضاع التي يتم فيها
توليد الطاقة الكهربائية عن طريق المحطات التقليدية.
غير أن من الأهمية بمكان رسم صورة دقيقة عن مدى
إسهامها في كفاية الموارد المتعلقة بالتخطيط طويل
الأجل للتوسع في القدرات. ويجري هذا البحث تقييماً
لكيفية تأثير تباين القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري
ولتقنيات الطاقة المتجددة على نماذج التوسع في القدرة،
وذلك عن طريق توظيف ثمانية سيناريوهات مختلفة
ما بين القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري وأهداف
مشاركة الطاقة المتجددة، والاستهلاك السنوي للطاقة
المتجددة في نموذج نظام الطاقة في المملكة العربية
السعودية. ويمثل افتراض وجود قدرة ثابتة عالية نسبياً
ومعدل انقطاع قسري منخفض نسبياً للطاقة المتجددة
(الافتراضات المتفائلة حيال مصادر الطاقة المتجددة)،
بينما يمثل العكس أي الافتراضات المتشائمة لهذه
المصادر. وعند المقارنة، نجد أن الافتراضات المتشائمة
للطاقة المتجددة تؤدي إلى حدوث زيادات كبيرة في
التكاليف والانبعثات ومعدل انتشار البطاريات بنسبة
تتراوح ما بين 11% و 17% و 41% على التوالي. إلا أنه
لم تتم ملاحظة وجود أي أنماط لكفاية الموارد. كما أن
تحديد مدى تأثير القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري
لتقنيات الطاقة المتجددة التي تعتمد اعتماداً كبيراً على
الطقس على الاستثمارات في قطاع الطاقة يوفر رؤى
قيمة بالنسبة لصانعي السياسات بالتزامن مع تقدم
العالم بوتيرة أشد قوة في اتجاه نشر مصادر الطاقة
المتجددة للحد من الانبعثات وتغير المناخ.

ينبغي نمذجة مصادر الطاقة الكهربائية المتغيرة
والمقطعة بعناية في نماذج التوسع في القدرات
من أجل الإعداد الجيد لنظام الطاقة للانتقال إلى
المزيد من المصادر المتجددة، وتعد النتائج المأخوذة
من نماذج التوسع في القدرات حساسة لافتراضات

كذلك ونسبة إلى الأهمية الشديدة لبيانات الطقس لكونها ضرورية لنشر الطاقة المتجددة بفعالية، فإننا نلاحظ أن العديد من دول العالم قد شرعت بالفعل في جمع بيانات الطقس المتعلقة بالطاقة المتجددة. إلا أنه لا توجد بيانات كافية في العديد من المناطق مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، وعلى الرغم من التحديات المتعلقة بهذه البيانات إلا أن مقرري السياسات قد شرعوا فعلياً في التخطيط للانتقال من نظام الطاقة إلى مصادر الطاقة المتجددة.

تقيم هذه الدراسة مدى تأثير الافتراضات المتعلقة بالطقس والموثوقية على التخطيط طويل الأجل للتوسع في الطاقة المتجددة، وتؤكد النتائج التي تم التوصل إليها مجدداً مدى أهمية جمع البيانات الدقيقة عن الطاقة المتجددة. ويركز إطار عمل نمذجتنا على آثار افتراضات القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري على نتائج نموذج توسيع القدرة في المملكة العربية السعودية الذي يمتد حتى عام 2030، فيما يستعرض القسم الثاني من الدراسة الطريقة والنموذج والسيناريوهات الثمانية التي تم بحثها للمملكة العربية السعودية، ويقدم القسم الثالث النتائج الرئيسية ويناقشها. وأخيراً تختتم الدراسة بالملاحظات الرئيسية من دراسة الحالة السعودية.

تخضع قطاعات توليد الطاقة الكهربائية في العديد من الدول لعملية تحول من خلال نشرها للطاقة المتجددة لمعالجة قضايا تغير المناخ، فعلى سبيل المثال تعتزم المملكة العربية السعودية إيقاف استخدام الوقود السائل في مزيج طاقتها، وتطوير قدرتها المتجددة لتحقيق هدفها المتمثل في الوصول إلى 50٪ من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 (الرؤية السعودية 2030 2022، مبادرات السعودية الخضراء والشرق الأوسط الأخضر 2023).

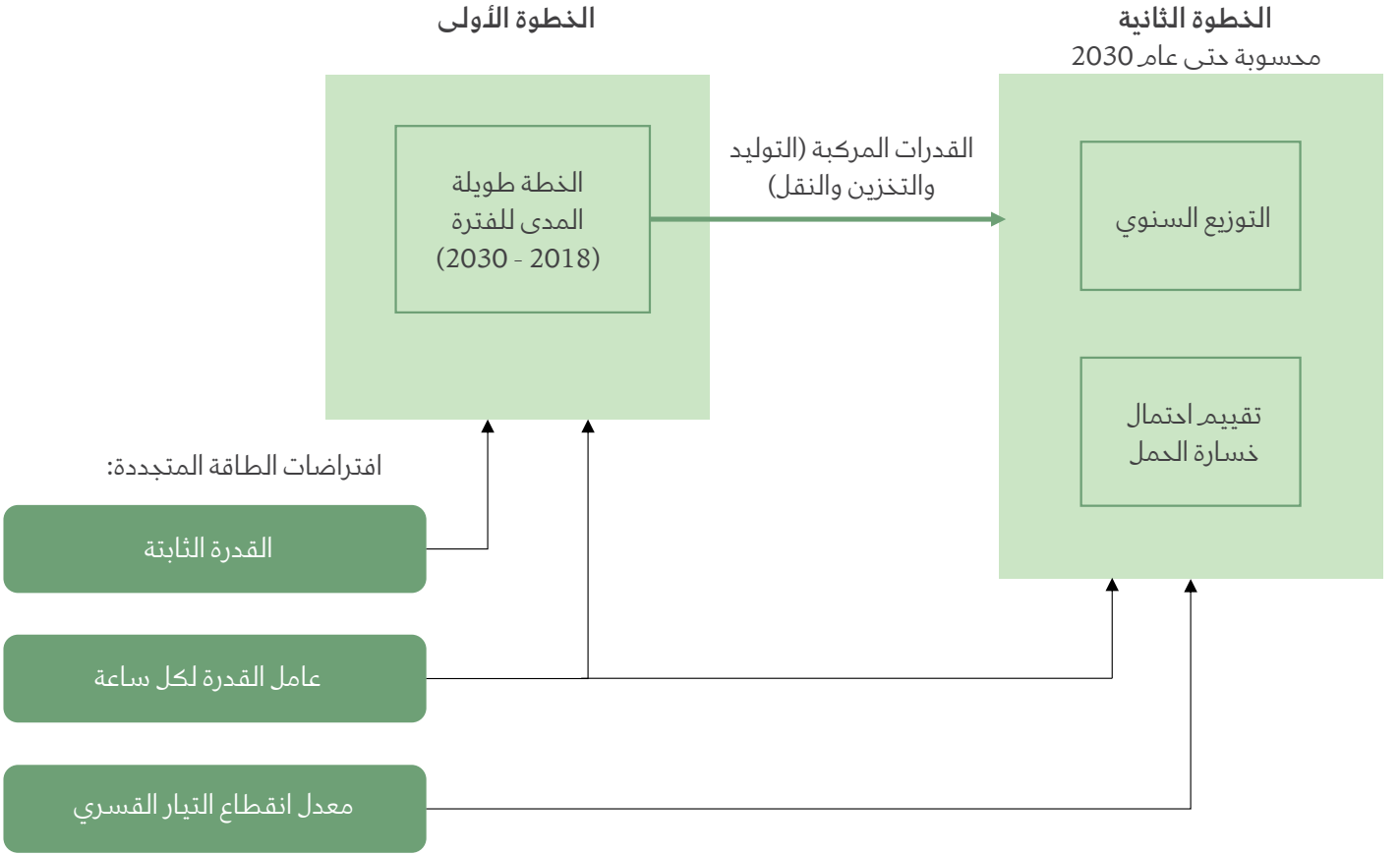
غير أن لمصادر لطاقة المتجددة -على غرار التقنيات الأخرى- نقاط قوة مثلما لها نقاط ضعف، فنجد أنها على الجانب الإيجابي تتمتع بتكلفة توليد هامشية تكاد تكون معدومة، ولا تتطلب وقوداً، ولا تصدر أي انبعاثات كربونية أثناء عمليات التشغيل. كما أن مصادر الطاقة المتجددة من جانب آخر تعد متغيرة ومتقطعة بطبيعتها نظراً لاعتماد إنتاجها على الطقس. كذلك نلاحظ أنه بينما نجحت المرافق في التعامل مع تقلبات الطلب لعقود من الزمن، فإن مصادر الطاقة المتجددة تضيف بُعداً من تقلبات العرض الذي ينبغي مراعاته أثناء مراحل التخطيط والتشغيل. كما أنه وبالتزامن مع زيادة حصة الطاقة المتجددة، يزداد التحدي المتمثل في الحفاظ على موثوقية إمداداتها. فضلاً عن أن بإمكان تخزين الطاقة وتطوير الشبكات أن يسهم في تسهيل إنتاج تقنيات الطاقة المتجددة وبالتالي المساعدة في دمج المزيد من مصادر الطاقة المتجددة في نظم الطاقة (Santos et al. 2017).

الطريقة والنموذج ووصف السيناريو

موارد مزيج توليد الطاقة المركب في عام 2030، واستخدام افتراض القدرة الثابتة لأغراض التخطيط (الخطوة الأولى "1" في الشكل 1) للوصول إلى القدرات المركبة. واستخدمنا في الخطوة الثانية (2) (راجع الشكل 1) معدل الانقطاع القسري لتقييم كفاية الموارد في عام 2030 من خلال احتمال خسارة الحمل.

اتبعنا في هذه الدراسة طريقة تتكون من خطوتين لتقييم التأثيرات الناجمة عن تغيير قيم القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري على النحو المبين في الشكل (1). أولاً، قمنا بحساب تطور مزيج الطاقة السعودي (متضمناً توليد الطاقة وتخزينها ونقلها) حتى عام 2030 من خلال نماذج توسيع القدرات. ثانياً، قيمنا مدى كفاية

الشكل 1. العرض التقديمي للطريقة ذات الخطوتين.



المصدر: الخبراء.

بالنسبة للطاقة المتجددة وبخاصة بالنسبة لطاقة الرياح، لذا فإن من الضروري توسيع المفهوم لدراسة حالات الأعطال المرتبطة بالطقس كما اقترحت دراسة كل من (Milligan and Porter (2005).

النموذج والفرضيات الأساسية

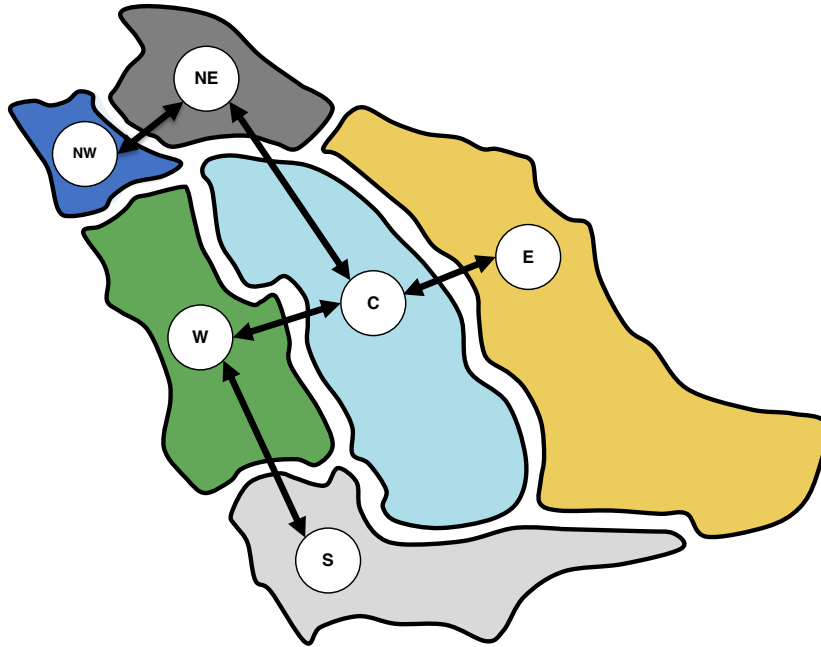
استخدمنا في هذه الدراسة نموذج كابسارك للطاقة الذي تم بناؤه باستخدام برنامج (PLEXOS²) المتاح تجارياً، ويصف هذا النموذج ست مناطق سعودية إلى جانب وصفه للربط الكهربائي البيئي الحالي الموضح في الشكل (2) الذي تمت معايرته وفقاً لبيانات عام 2018. كذلك استخدم نموذجنا في العديد من المنشورات السابقة (Elshurafa and Peerbocus 2020; Elshura- (fa et al. 2021; Soummane et al. 2022)، وتوصلنا أيضاً من خلال البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة المختلطة إلى حل أفق للفترة الزمنية الواقعة ما بين 2018 - 2030، وتقييم الموثوقية لعام 2030 باستخدام نموذج نظام بنسلفانيا البديل للتقييم (PASA) التابع لبرنامج (PLEXOS) مع تحري الدقة اليومية.

تعريف مصطلحي القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري

تم تعريف مصطلح القدرة الثابتة في الدراسة التي أجراها (Sepulveda et al. 2018, 2404) باعتبارها القدرة "التي يمكن الاعتماد عليها لتلبية الطلب عند الحاجة في كل الفصول وعلى مدى فترة زمنية طويلة"، كما تم تعريفها في دراسة (Zachary, Wilson, and Dent (2022) باعتبارها "القدرة المتاحة دائماً لتزويد الطاقة اللازمة بمعدل ثابت معين"، ورغم أن تعريفها يتباين في المنشورات¹ ذات الصلة إلا أنه يمكن اعتبار القدرة الثابتة بصفة عامة على أنها "القدرة المضمونة المتاحة عند الحاجة، وتكون بالتالي متاحة للوفاء بمتطلبات كفاية الموارد" (Brouwer et al. 2014).

بينما تم تعريف مصطلح معدل الانقطاع القسري على أنه "النسبة المئوية للوقت الذي لا تستطيع فيه محطات الطاقة توليد الطاقة الكهربائية" (NERC 2022)، كما يرتبط معدل الانقطاع القسري بوجه عام بحالات الأعطال الميكانيكية، رغم أن هذه الأعطال الميكانيكية لا تعد السبب الوحيد لحالات الانقطاع غير المخطط لها

الشكل 2. المناطق السعودية الست كما حددتها الشركة السعودية للكهرباء، والربط الكهربائي البيئي الحالي المرتبط بها.



ملاحظة: NW = المنطقة الشمالية الغربية، NE = المنطقة الشمالية الشرقية، E = المنطقة الشرقية، C = المنطقة الوسطى، W = المنطقة الغربية، S = المنطقة الجنوبية

المصدر: الخبراء.

2018- العام الذي تمت فيه معايرة النموذج- إلى عام 2022 بناءً على البيانات المتاحة للجمهور. كما يُسمح باتخاذ قرارات الاستثمار بشأن تقنيات توليد الطاقة (الغاز والطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية المركزة والطاقة النووية والبطاريات ذات مدة تخزين أربع ساعات) وخطوط النقل. كذلك قمنا بتضمين مشاريع الطاقة المتجددة المعلنة في المملكة التي يبلغ إجمالي طاقتها 4.5 جيجاواط من الطاقة الشمسية الكهروضوئية، و1.3 جيجاواط من طاقة الرياح، كما نفترض الإيقاف التام لمحطات الطاقة العاملة بالنفط بحلول عام 2030.

نفترض على غرار دراسة (Elshurafa et al. 2021) أن مستوى الجمل الذروي السعودي سيرتفع من 62 جيجاواط في عام 2018 ليبلغ 75 جيجاواط في عام 2030 بالتزامن مع وصول استهلاك الطاقة السنوي إلى 444 تيراواط/ ساعة، ويمكن الرجوع إلى دراسة (Soummane and Ghersi 2022) للاطلاع على وصف تفصيلي لتوقعات الطلب.

يُسمح في المملكة العربية السعودية اعتباراً من عام 2022 وما بعده باتخاذ قرارات الاستثمار بشأن محطات توليد الطاقة وتخزينها وقدرة الشبكات، غير أننا نعتبر أن تطور قطاع الطاقة السعودي بدأ في الفترة منذ عام

الطاقة المتجددة. كما أننا لاحظنا أن الطاقة المتجددة التي سيتم تشغيلها في عام 2030 لتلبية القيود المتعلقة بحصة الطاقة الكهربائية، بمعنى أنه لا يتم نشر الطاقة المتجددة تدريجياً قبل حلول عام 2030 بسبب ارتفاع تكاليفها مقارنة بالتقنيات التقليدية الأخرى. وتم من أجل تسهيل تمثيل تطوير الطاقة المتجددة والحصول على نتائج أكثر واقعية، إجراء مجموعة أخرى من عمليات المحاكاة بأقصى قدرة للطاقة المتجددة يمكن نشرها سنوياً.

السيناريوهات التي تمت محاكاتها:

نقيم الآثار المترتبة على ثلاثة افتراضات أساسية مختلفة تتمثل في افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة أو المتشائمة من حيث معدلات الانقطاع القسري والقدرة الثابتة، والقدرة القصوى للطاقة المتجددة التي يمكن بناؤها سنوياً، وحصة الطاقة المتجددة في إجمالي استهلاك الكهرباء بحلول عام 2030.

سيناريوها افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة والمتشائمة:

تعتبر القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري بمثابة المعايير الأساسية لنمذجة الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح في نماذج توسيع القدرات، ولكن لمعدل الانقطاع القسري معنى أوسع من المعنى المقصود عموماً لوحدة التوليد الحراري، أي أن معدل الانقطاع القسري بالنسبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح يشمل الأعطال الميكانيكية والأعطال التي يتسبب فيها الطقس مثلما ورد في دراسة (Milligan and Porter 2005). كما تشير المنشورات إلى أن بإمكان توربينات طاقة الرياح توفير ما يتراوح ما بين 5% - 25% من القدرة الثابتة (Tuohy and O'Malley 2011; Brouwer et al. 2014)، فيما يتراوح معدل الانقطاع القسري ما بين 50% - 80% (Milligan and Porter 2005; Das and Basu 2020). إلا أنه يبدو أن القدرة الثابتة

كذلك نقوم بالنسبة للنقل، بتضمين قدرة النقل بين المناطق السعودية الشمالية الغربية والمنطقة الغربية التي سيبدأ تشغيلها في عام 2026، ونتيح زيادة قدرة نقل الخطوط الحالية (راجع الشكل 2) أو بناء خطوط جديدة بين المناطق غير المرتبطة بالشبكة في الوقت الراهن (نقصد بذلك المنطقة الشرقية والشمالية الشرقية والوسطى والشمالية الغربية والجنوبية والشمالية الشرقية). فضلاً عن السماح بقدرة نقل إضافية بخطوات تبلغ 1 جيجاواط وحد أقصى 2 جيجاواط لكل ربط كهربائي مشترك "ربط بيني" للفترة الواقعة ما بين عام 2022 إلى عام 2030.

كما تعد التكاليف الرأس مالية والتشغيلية المستخدمة نفس التكاليف التي استخدمتها دراسة (Elshurafa et al. 2021)، باستثناء افتراض ارتفاع وتيرة أسعار الغاز ليبلغ 2 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية اعتباراً من عام 2026، مع تحديد تكاليف النقل الفورية بمبلغ 330 ألف دولار أمريكي لكل كيلومتر (The World Bank 2021). ووضعنا هامشاً احتياطياً للقدرة بنسبة 10% (الشركة السعودية للكهرباء عام 2011) يتم الوفاء به من خلال القدرة الثابتة لكل منطقة (غير القدرة المركبة)، فيما تتساوى القدرة الثابتة للتوليد الحراري مع قدرتها الاسمية، بينما ينبغي للقدرة الثابتة للطاقة المتجددة -حسب ما يوضح الجدول (1)- أن تلبى احتياطي التشغيل بالساعة على المستوى الإقليمي (Mills 2017; KACARE 2018).

كذلك قمنا في البداية بنمذجة حالتين ستصلان في عام 2030 إلى حصص الطاقة المتجددة بمعدل يتراوح ما بين 25% و 50% من الطاقة الكهربائية المولدة من دون القيود المفروضة على إنشاء مشاريع الطاقة المتجددة. وتتناسب حالة استخدام الطاقة المتجددة بنسبة 25% لتوليد الطاقة الكهربائية في عام 2030 مع الإعلانات العامة تقريباً (الرؤية السعودية 2030 2022، مبادرتي السعودية الخضراء والشرق الأوسط الأخضر 2023)، ونجد أن تحقيق هدف 50% أكثر طموحاً ويستخدم لتقييم حساسية النتائج التي توصلنا إليها لمدى انتشار

الطريقة والنموذج ووصف السيناريو

الكهروضوئية متاحة فقط خلال ساعات النهار، بينما يُفترض أن تكون القدرة الثابتة لطاقة الرياح متاحة على مدار اليوم.

أما بالنسبة لكل الوحدات التقليدية الأخرى القابلة للتوزيع، فنفترض أن القدرة الثابتة تبلغ 100 % وأن معدل الانقطاع القسري حوالي 5 % وفقاً للنطاق الوارد في المنشورات (Najjar and Abu- Shamleh 2020).

ومعدل الانقطاع القسري بالنسبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية، تتراوح ما بين 10%-30% و 10%-30% على التوالي (Basu 2020; Das and Basu 2020). كما يلخص الجدول (1) قيم معدل الانقطاع القسري والقدرة الثابتة التي اعتمدت للطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح في سيناريوهات (افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة والمتشائمة)، وتكون القدرة الثابتة للطاقة الشمسية

الجدول 1. ملخص افتراضات القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري للسيناريوهات.

معدل الانقطاع القسري		القدرة الثابتة		التقنية
افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	
10 %	30 %	30 %	10 %	الطاقة الشمسية الكهروضوئية
50 %	80 %	25 %	5 %	طاقة الرياح

ملاحظة: يراعي معدل الانقطاع القسري للطاقة المتجددة التوافر الميكانيكي والانقطاعات المرتبط بالأحوال الجوية المصدر: الخبراء

القيود السنوية المفروضة على المباني:

يتعلق تحليل الحساسية الذي نجريه بمقدار الطاقة المتجددة الذي يمكن بناؤه في عام واحد، إذ يكون للنموذج في السيناريو غير المقيد الحرية المطلقة في بناء أكبر قدر ممكن من الطاقة المتجددة بحسب الحاجة. بينما نحصر الحد الأقصى السنوي المحتمل لبناء الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح في السيناريو المقيد بنحو 6 جيجاواط لكل منهما في سيناريو الطاقة المتجددة 25 %، و12 جيجاواط في سيناريو الطاقة المتجددة 50 % على التوالي.

حصة استهلاك الطاقة المتجددة:

نقوم باختبار هدفين للطاقة المتجددة لعام 2030 يتمثلان في الوصول إلى معدلات طاقة تتراوح ما بين 25 % و50 %، ويتم تنفيذ هدف الطاقة المتجددة بوصفه نسبة مئوية من توليد الطاقة الكهربائية بدلاً من قدرة الطاقة.

موجز السيناريوهات:

يوجد شكلان مختلفان لثلاثة معايير رئيسية إجمالية ثمانية سيناريوهات، ويورد الجدول (2) أدناه هذه السيناريوهات ويلخصها على النحو التالي.

الجدول 2. ملخص السيناريوهات التي تمت محاكاتها.

رقم السيناريو	حصة الطاقة المتجددة	افتراضات القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري	هل توجد قيود مفروضة على بناء الطاقة المتجددة
السيناريو الأول (S1)	25 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	لا
السيناريو الثاني (S2)	25 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	لا
السيناريو الثالث (S3)	25 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	نعم
السيناريو الرابع (S4)	25 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	نعم
السيناريو الخامس (S5)	50 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	لا
السيناريو السادس (S6)	50 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	لا
السيناريو السابع (S7)	50 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة	نعم
السيناريو الثامن (S8)	50 %	افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة	نعم

ملاحظة: يراعي معدل الانقطاع القسري للطاقة المتجددة التوافر الميكانيكي والانقطاعات المرتبط بالأحوال الجوية المصدر: الخبراء

بناء القدرات التقنية

يبين الشكل (3) إجمالي القدرة التراكمية التي سيتم تركيبها عن طريق التقنية في عام 2030، والتي تم الحصول عليها باستخدام نموذجنا في الخطوة الأولى "1" (راجع الشكل 1) ونود فيما يلي مناقشة ثلاث رؤى في هذا السياق.

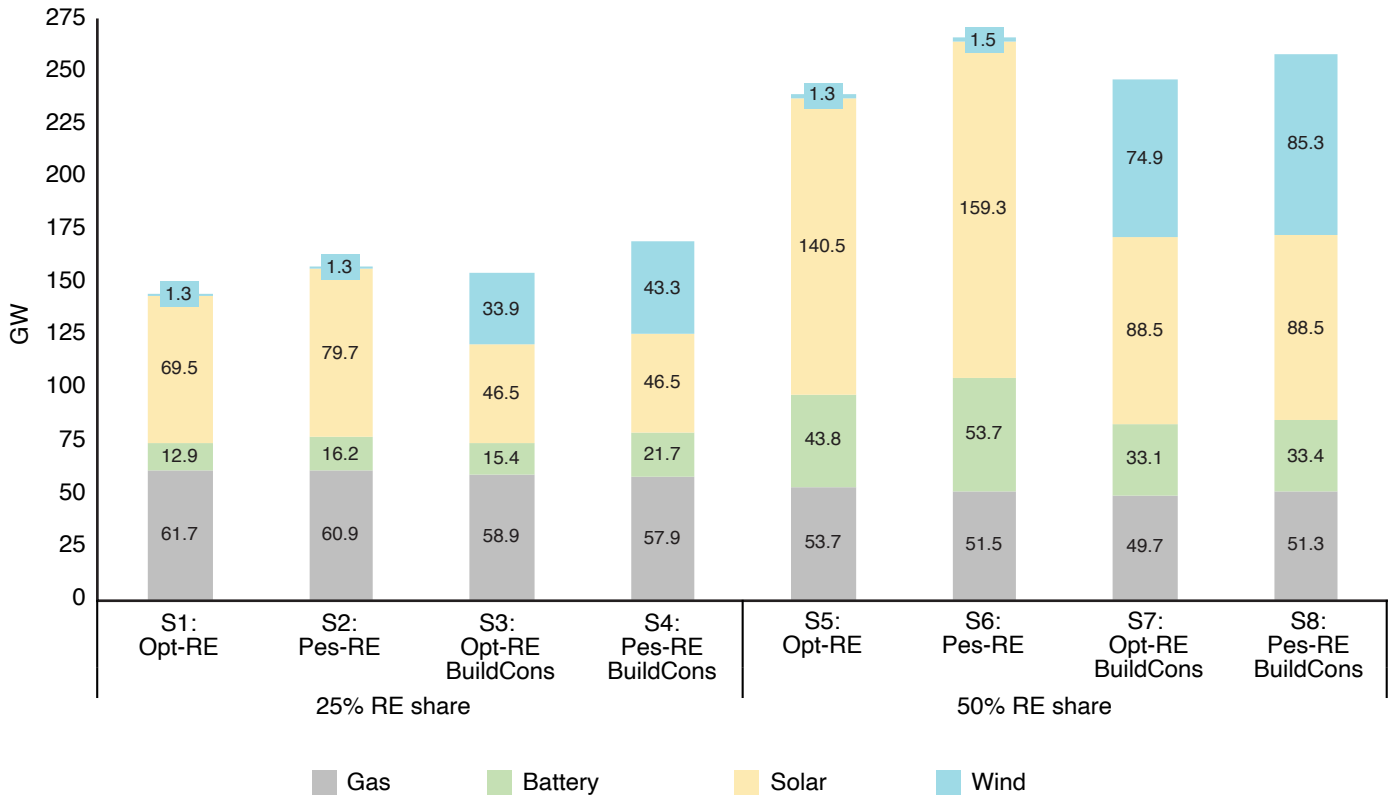
أولاً: نعتقد أن طاقة الرياح لا تزال غير مجدية من الناحية الاقتصادية مقارنةً بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، ونلاحظ في كل السيناريوهات التي لا تتضمن وجود قيود مفروضة على عمليات البناء أن بناء طاقة الرياح يعد مهمة بالغة الصعوبة بل تكاد تنعدم، وأن الطاقة الشمسية الكهروضوئية تهيمن على عمليات النشر مدعومة بمساحة تخزين كبيرة، ويتوافق هذا الاتجاه مع الملاحظات الواردة في دراسة (Breyer et al. 2022) مع ملاحظة أن طاقة الرياح البالغة 1.3 جيجاواط في السيناريوهات التي لا تتضمن وجود قيود بناء سنوية (السيناريوهات S1 و S2 و S5 و S6) تتوافق مع القدرة المعلنة بالفعل والمفترض أن يتم نشرها، أي أنها لا تأتي من نموذج التحسين. علاوة على ذلك، نجد في السيناريوهات التي تتضمن وجود قيود بناء سنوية (السيناريوهات S3 و S4 و S7 و S9) أن هذه القيود المفروضة تكون ملزمة للإنشاءات المتعلقة بالطاقة الشمسية، بمعنى أنه يتم نشر الحد الأقصى المسموح به من قدرة الطاقة الشمسية ثم يستخدم النموذج طاقة الرياح لبلوغ الهدف المتجدد، أو بعبارة أخرى أن القدرة الشمسية التي لوحظت في هذه السيناريوهات ناتجة مباشرة عن قيود البناء السنوية المفروضة على الطاقة الشمسية.

ثانياً: نلاحظ وجود اختلاف في إنشاءات الطاقة الشمسية الكهروضوئية في افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة والمتشائمة (السيناريو الأول "S1" مقابل السيناريوهين الثاني والخامس "S2 و S5" مقابل السيناريو السادس "S6")، مما يسلط الضوء على مدى أهمية التقدير الدقيق للقدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري للطاقة المتجددة لتجنب نقص أو الإفراط في الاستثمار في

الطاقة المتجددة والطاقة غير المخدومة. كما تؤدي الافتراضات المنخفضة للقدرة الثابتة للطاقة المتجددة (أي سيناريوهات التوقعات المتشائمة للطاقة المتجددة) إلى زيادة قدرة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في عام 2030. ولا يحدث هذا الموقف فقط بسبب الفرق في التكاليف بين طاقة الرياح والطاقة الشمسية، وإنما أيضاً بسبب التباين الكبير في مستويات الطلب على الكهرباء بين وقتي النهار والليل، مما يؤكد ضرورة بناء قدرة ضخمة للطاقة الشمسية الكهروضوئية لتلبية الطلب في أوقات الصباح. غير أن قدرة طاقة الغاز والتخزين وطاقة الرياح تكون كافية لتلبية الطلب في أوقات الليل.

ثالثاً: نعتقد في سيناريوهات نسبة 50 % أن النموذج يختار بناء مساحات تخزين كبيرة ومقدار ضئيل من الغاز للتعامل مع الكمية الكبيرة من التوليد الفائض (أي تقليل التخفيض أو الإغراق)، كما ستم إضافة مقدار كبير من قدرة التخزين إلى النظام اعتباراً من عام 2026 لمواجهة التقلبات في مستويات الطاقة المتجددة. وعندما ترتفع معدلات نشر الطاقة المتجددة من نسبة 25 % إلى 50 %، فستزداد بالتالي قدرة التخزين بنسبة 53 % (السيناريو الثامن "S8" مقارنة بالسيناريو الرابع "S4") لتبلغ 240 % (السيناريو الخامس "S5" مقارنة بالسيناريو الأول "S1").

الشكل 3. شبكة النقل في عام 2030 لكل السيناريوهات.



المصدر: الخبراء.

المحاكاة الواقعة ما بين 2018 - 2030 بحوالي 30 ٪ في سيناريوهات الطاقة المتجددة بنسبة 25 ٪ (السيناريو الأول "S1" إلى السيناريو الرابع "S4")، وخفضها بمعدل يتراوح ما بين 44 ٪ - 52 ٪ في سيناريوهات الطاقة المتجددة بمعدل 50 ٪ (السيناريو الخامس «S5» إلى السيناريو الثامن "S8").

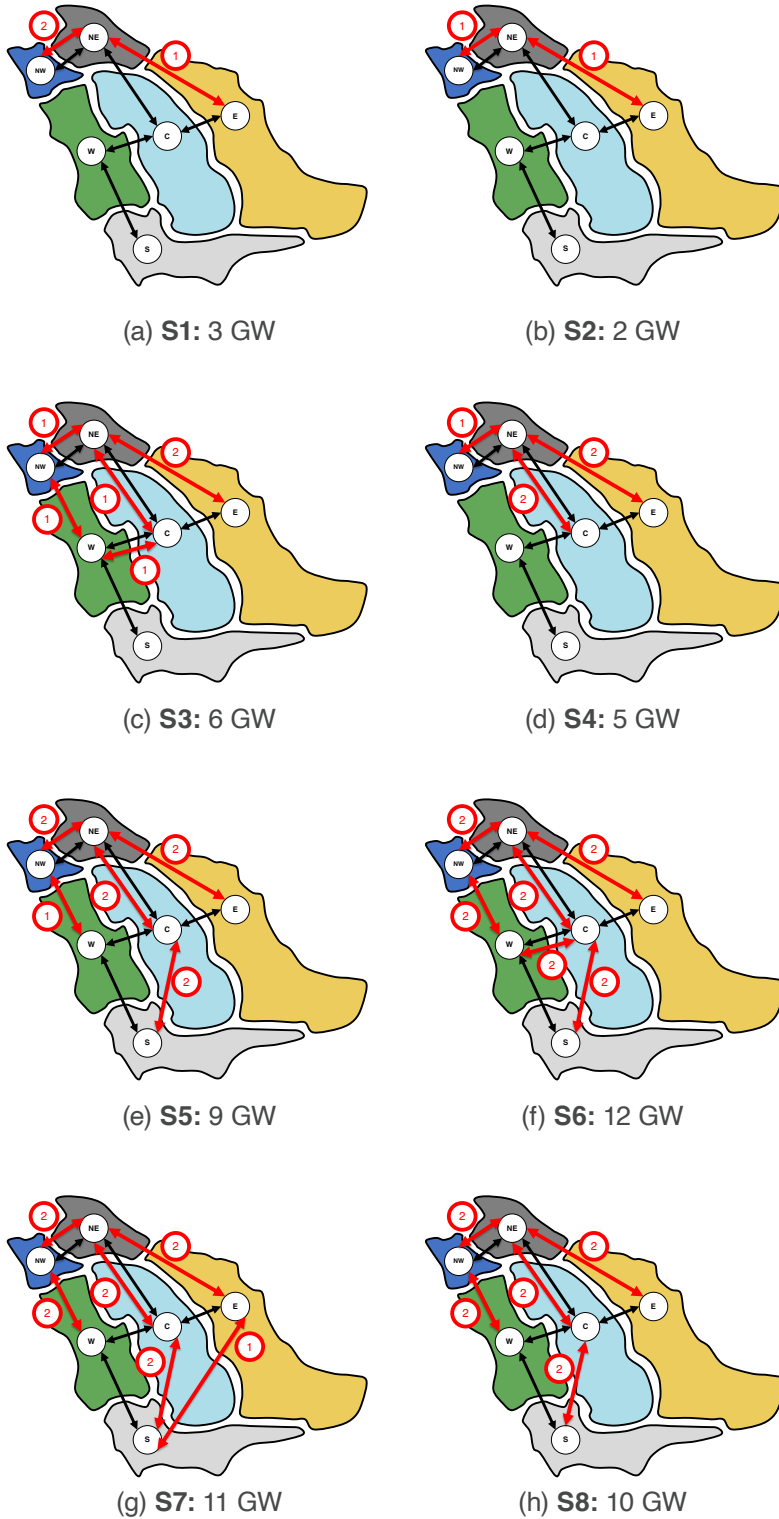
كذلك يؤدي تطوير موارد الطاقة المتجددة كما هو متوقع إلى خفض مستويات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال فترة المحاكاة (راجع ملحق الدراسة)، وبالمقارنة مع السيناريو الثالث (3) "بقاء الأمور على حالها" حيث لم يتم تحديد هدف للطاقة المتجددة، فيتم خفض المستويات السنوية لانبعاثات قطاع الطاقة خلال فترة

مذنبات نقل الطاقة

كما نجد أن النموذج -مقارنةً بسيناريوهات افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة- يتعامل مع عمليات بناء الطاقة المتجددة الإضافية إما من خلال نشر طاقة بطاريات إضافية أو منشآت نقل إضافية كما هو متوقع. فعلى سبيل المثال، نلاحظ أنه تم في السيناريو الثاني (S2) إنشاء عدد أقل من خطوط النقل، ولكن تم نشر قدرة بطاريات تتجاوز القدرة الواردة في السيناريو الأول (S1)، كما لا توجد سيناريوهات افتراضات طاقة متجددة متشائمة تتضمن عددًا أقل من الخطوط وقدرات البطاريات مقارنة بحالات افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة.

يلخص الشكل (4) شبكة نقل الطاقة في عام 2030 بناءً على السيناريوهات الثمانية بأكملها ويحدد منشآت النقل الجديدة (باللون الأحمر)، وليس من المستغرب في هذا الصدد أنه تمت ملاحظة القدرة القصوى لربط شبكات النقل بين جميع السيناريوهات (أي 12 جيجاواط) في السيناريو السادس (S6) الذي يمثل كذلك ذات السيناريو الذي تم فيه نشر القدرة القصوى لتوليد الطاقة المتجددة (راجع الشكل 3). كما أن النموذج لا يختار مطلقاً بناء قدرات إضافية بين المنطقتين الوسطى والشرقية، إذ تبلغ قدرة الخط الذي يربط بين هاتين المنطقتين 6.2 جيجاواط، رغم أن قدرات كل الخطوط الأخرى الموجودة تعد أقل بكثير مقارنة بقدرة هذا الخط.

الشكل 5. شبكة النقل في عام 2030 لكل السيناريوهات.



المصدر: الخبراء

ملاحظة: تم تمثيل خطوط النقل الجديدة باللون الأحمر، فيما يشير الرقم الموجود في الدائرة إلى قدرة خطوط المضافة (بالجيجاواط)، ولم يتم توضيح الخط المزمع بناؤه بين المناطق الغربية والشمالية الغربية لأغراض الإيجاز.

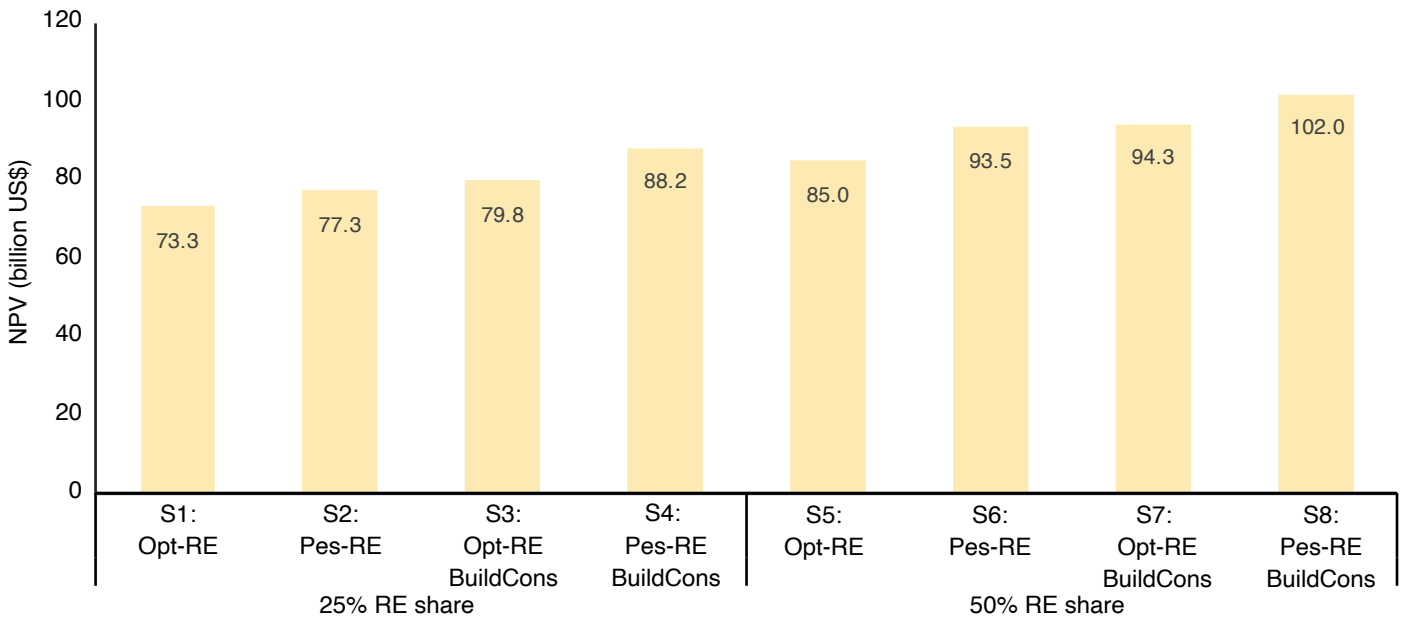
تكاليف نظم الطاقة:

فإنها تؤدي أيضاً إلى زيادة القيمة الحالية الصافية بعوامل تتراوح ما بين 9٪ - 15٪ مقارنة بنظيرها بدون قيود سنوية مفروضة على إنشاء الطاقة. وتُفسر هذه التكلفة الإضافية من خلال طاقة الرياح الكبيرة المستخدمة في هذه السيناريوهات (التي تعد أقل جدوى اقتصادية مقارنة بالطاقة الشمسية في حالتنا) لتحقيق الهدف المتجدد على الرغم من القيود المفروضة على عطاءات الطاقة الشمسية.

ينتج عن السيناريو الثامن "8" (50٪ من الطاقة المتجددة مع افتراضات توقعات الطاقة المتجددة المتشائمة والقيود السنوية المفروضة على إنشاء الطاقة) أعلى قيمة حالية صافية لكل السيناريوهات التي تم تناولها في هذه الدراسة، كما أنه يمثل زيادة بنسبة 39٪ تقريباً مقارنة بسيناريو «بقاء الأمور على حالها» حيث لا يتم تحديد هدف للطاقة المتجددة.

لا تكون قرارات الاستثمار في قطاع الطاقة مدفوعة بتحسين التكلفة فقط، وإنما يمكنها أن تكون مدفوعة بالاعتبارات المتعلقة بالسياسات في كثير من الحالات التي قد تشمل الاهتمامات البيئية على سبيل المثال. فيما ترد القيمة الحالية الصافية لتكاليف كل السيناريوهات في الشكل (5) باستخدام معدل خصم قدره 5٪. أولاً: أنها تبين أن كل سيناريوهات افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة تؤدي إلى قيمة حالية صافية أعلى من نظيراتها في افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة، وتتراوح هذه الزيادة في تكاليف سيناريوهات افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة مقارنةً بنظيراتها من افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة ما بين 5٪ و 11٪، وتعتبر نسبة كبيرة. ثانياً: إذا أخذنا في الاعتبار القيود السنوية المفروضة على إنشاء الطاقة المتجددة،

الشكل 5. القيمة الحالية الصافية (معدل خصم 5٪) للتكلفة على مدى الفترة ما بين 2018 - 2030 لكل السيناريوهات بمليارات الدولارات الأمريكية التي تشمل كافة تكاليف التوليد والتخزين والرسوم الاستثمارية لخطوط النقل الجديدة.



المصدر: الخبراء.

كفاية الموارد

(2018)، مما يعني أن الهدف المستهدف لاحتمال خسارة الحمل يبلغ معدل 0.06 %، وبالتالي تم في الجدول (3) تمييز قيم احتمال خسارة الحمل باللون الأخضر إذا كانت تقل عن معدل 0.06 %، وتمييزها باللون الأحمر إذا كانت بخلاف ذلك.

كذلك لا يمكن وفقاً للبيانات الواردة في الجدول (3) ملاحظة وجود أي اتجاه، وأن بإمكان المنطقة المعنية الوفاء بهدف احتمال خسارة الحمل في سيناريو افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة على العكس من افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة (على سبيل المثال في المنطقة الشمالية الغربية في السيناريوهين الأول والثاني "S1 و S2")، أو العكس (على سبيل المثال في المنطقة الغربية في السيناريوهين الثالث والرابع "S3 و S4"). كما أن بإمكان المنطقة الوفاء بأهداف احتمال خسارة الحمل في سيناريوهات افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة والمتشائمة معاً (على سبيل المثال في المنطقة الجنوبية في السيناريوهين الخامس والسادس "S5 و S6")، أو في عدم وفاء المنطقة بتحقيق أهداف احتمال خسارة الحمل في كلا المتغيرين (على سبيل المثال في المنطقة الشمالية الشرقية في السيناريوهين الأول والثاني "S1 و S2").

نجري في هذه الدراسة تقييماً لكفاية موارد النظام من خلال احتمال خسارة الحمل الذي يتم تعريفه على أنه "احتمال عدم قدرة التوليد المتاحة على تلبية الطلب"، ويمكن تناول مؤشرات كفاية الموارد الإقليمية من خلال منظورين: (1) تقييم مدى كفاية الموارد لكل منطقة بافتراض أن كل منطقة تمثل كياناً جغرافياً مستقلاً، (2) تقييم كفاية الموارد لكل منطقة مع دمج الطاقة التي يمكن استغلالها من المناطق المجاورة من خلال روابط نقل الطاقة المتاحة.

كما توضح النتائج التي توصلنا إليها أنه تم استيفاء أهداف كفاية الموارد في كل المناطق مع مراعاة واردات الطاقة من المناطق المجاورة (أي أن احتمال خسارة الحمل أقل من 0.06 %)، غير أننا نركز في هذه الدراسة على أهداف احتمال خسارة الحمل للمناطق المنعزلة، مما يعد مؤشراً يركز على قطاع الطاقة السعودي.

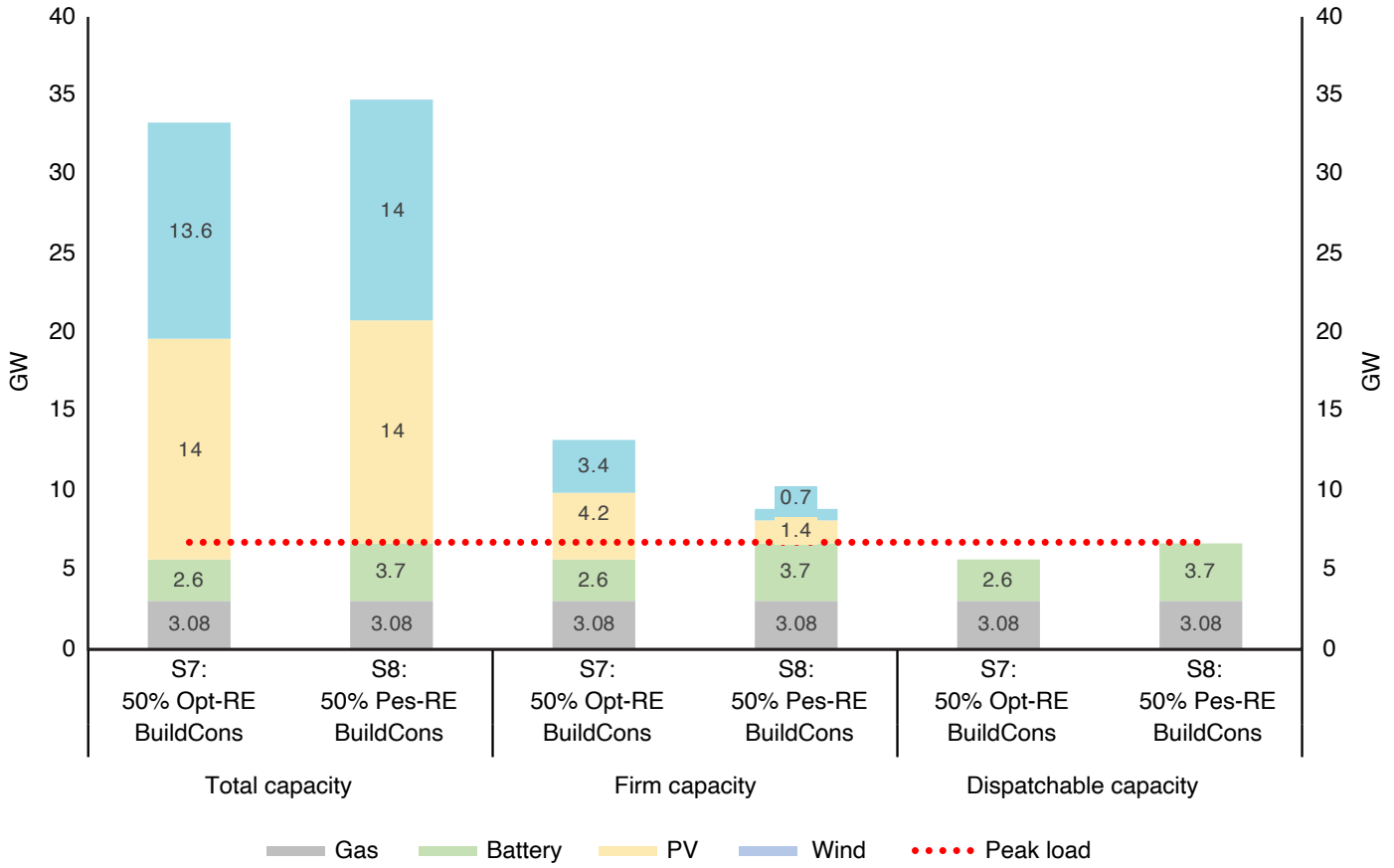
يبين الجدول (3) أدناه احتمال خسارة الحمل المقدرة في عام 2030 لكل منطقة تم تناولها بنحو منفصل³، وتبلغ الخسارة المستهدفة للحمل المتوقع كما أوضحت الهيئة السعودية المنظمة خمس ساعات في السنة (KACARE)

الجدول 3. قيم احتمال خسارة الحمل في المناطق المعزولة (%) في عام 2030، على النحو الذي تمت محاكاته في النموذج.

المناطق						السيناريوهات
الغربية	الجنوبية	الشمالية الغربية	الشمالية الشرقية	الشرقية	الوسطى	
0.32	0.00	0.00	0.16	0.45	0.59	السيناريو الأول (1): افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة 25 %
0.00	0.00	0.07	0.56	0.00	0.00	السيناريو الثاني (2): افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة 25 %
0.50	1.44	0.00	0.00	0.35	0.80	السيناريو الثالث (3): قيود بناء القدرات السنوية في سيناريو افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة 25 %
0.05	0.03	0.49	0.03	0.77	0.34	السيناريو الرابع (4): قيود بناء القدرات السنوية في سيناريو افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة 25 %
2.80	0.00	0.00	0.00	0.08	0.69	السيناريو الخامس (5): افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة 50 %
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	1.22	السيناريو السادس (6): افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة 50 %
7.31	6.67	0.00	0.00	0.00	2.24	السيناريو السابع (7): قيود بناء القدرات السنوية في سيناريو افتراضات الطاقة المتجددة المتفائلة 50 %
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	السيناريو السابع (8): قيود بناء القدرات السنوية في سيناريو افتراضات الطاقة المتجددة المتشائمة 50 %

المصدر: الخبراء.

الشكل 6. إجمالي القدرة المبنية والقدرة الثابتة وقدرة التوزيع في المنطقة الجنوبية في عام 2030.



المصدر: الخبراء

ملحوظة: تحسب القدرة الثابتة بناءً على افتراضات القدرة الثابتة الواردة في الجدول (1)، والقدرة الثابتة بنسبة 100٪ للوحدات الحرارية والبطاريات، وتستثنى مصادر الطاقة المتجددة من القدرة القابلة للتوزيع.

تبلغ القدرة المركبة في السيناريو السابع (S7) حوالي 33 جيجاواط كما يبين الشكل (6)، في حين تبلغ القدرة الثابتة حوالي 13.3 جيجاواط، وإجمالي القدرة القابلة للتوزيع حوالي 5.68 جيجاواط فقط. وتفسر مقارنة القيمة الأخيرة بالحمل الذروي الإقليمي (6.78 جيجاواط) احتمال خسارة الحمل بنسبة 6.67٪. والواقع أن قدرة الطاقة المتجددة تتميز بمعدل انقطاع قسري مرتفع ولا يمكنها التعامل مع فرق 1 جيجاواط بين القدرة القابلة للتوزيع والحمل الذروي الإقليمي الذي لوحظ في

تعد قيمة احتمال خسارة الحمل البالغة 6.67٪ الخاصة بالمنطقة الجنوبية الواردة في السيناريو السابع (S7) واحدة من أعلى القيم المحسوبة في الجدول (3)، وقد ألقينا نظرة فاحصة على هذه القيمة في الشكل (6) الذي يبين إجمالي القدرة المركبة في المنطقة الجنوبية بحلول عام 2030، والقدرة الثابتة الناتجة عن ذلك مع الأخذ في الاعتبار افتراضات القدرة الثابتة (راجع بناء القدرات التقنية أعلاه) فضلاً عن إجمالي القدرة القابلة للتوزيع التي تستثنى قدرة الطاقة المتجددة.

كذلك وجدنا اتجاهات متماثلة في مناطق أخرى من المملكة العربية السعودية، غير أننا نؤكد مجدداً أن احتمال خسارة قيم الحمل الواردة في هذه الدراسة تمثل قيماً للمناطق المعزولة. فيما يقع احتمال خسارة قيم الحمل بالنسبة للمناطق بأكملها بالتزامن مع دمج قدرة نقل المناطق المجاورة ضمن النطاق المسموح به.

السيناريو السابع (S7) مع الوفاء بهدف احتمال خسارة الحمل. ويبدو أن معدل القدرة القابلة للتوزيع أعلى قليلاً في السيناريو الثامن (S8) (تبلغ 6.78 جيجاواط) مقارنة بقيمتها في السيناريو السابع (S7)، التي عندما تضاف إلى قدرة الطاقة المتجددة تكون كافية لتلبية الحمل الذروي الإقليمي البالغ 6.79 جيجاواط بمستوى جيد من الموثوقية. وبالتالي يتم تحقيق هدف احتمال خسارة الحمل في السيناريو الثامن (S8).

أما فيما يتعلق بمدى تأثير القدرة الثابتة المتغيرة ومعدل الانقطاع القسري على الموثوقية، فلم تتم ملاحظة وجود أي أنماط ملحوظة: ويمكن لحالة الموثوقية أن تتغير بالنسبة للمناطق الجغرافية (عند تناولها بمعزل عن غيرها) أو تبقي على حالها دون وجود أنماط قابلة للملاحظة. كما أكدت النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة مجدداً وبصفة عامة مدى أهمية جمع بيانات دقيقة للطبقة للطبقة من أجل دعم النشر الفعّال لموارد الطاقة المتجددة، حيث إن بإمكان هذا تجنب الإفراط في الاستثمار أو نقص معدلاته بنحو ملحوظ.

حددنا في هذه الدراسة مدى تأثير قيم القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري لتقنيات الطاقة المتجددة على نتائج النمذجة لممارسة نمذجة توسيع القدرات، وتوصلنا إلى أنه يمكن أن يكون للاختلافات في قيم القدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري تأثيرات كبيرة على خطط توليد الطاقة طويلة الأجل. ويمكننا القول صراحة في إطار تناول المملكة العربية السعودية بوصفها دراسة حالة، أن افتراض القيم المتشائمة للقدرة الثابتة ومعدل الانقطاع القسري يؤديان إلى زيادة بنسبة تتراوح ما بين 11 % و 17 % و 41 % في تكاليف توليد الطاقة الكهربائية ومستويات الانبعاثات ونشر تقنيات تخزين البطاريات على التوالي مقارنة بافتراض القيم المتفائلة.

¹ أُستخدم مصطلح " قدرة الحمل الكهربائي " في دراسة (Garver 1966)، بينما نجد أنه تم استخدام مصطلح "قيمة القدرة" في دراسة (Milligan and Porter 2005 and Keane et al. 2010)، كما استخدم مصطلح "القدرة الفائضة" في دراسة (Dent, Keane, and Bialek 2010 and Voorspools and D'haeseleer 2006).

² أُجريت هذه الدراسة باستخدام الإصدار (8.300) من برنامج (PLEXOS) المتاح على الرابط:
<https://www.energyexemplar.com/plexos>

³ تم تقدير احتمال خسارة الحمل في شركة (PLEXOS) بدقة يومية، ويتمثل دافع هذا الاختيار في إيجاد التوازن بين الدقة والوقت المطلوبان للوصول إلى حل.

- Basu, Mousumi. 2020. "Optimal generation scheduling of hydrothermal system with demand side management considering uncertainty and outage of renewable energy sources." *Renewable Energy* 146:530-542. DOI: [10.1016/j.renene.2019.06.069](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.069)
- Breyer, Christian, Siavash Khalili, Dmitrii Bogdanov, Manish Ram, Ayobami Solomon Oyewo, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, A.A. Solomon, Dominik Keiner, and Gabriel Lopez. 2022. "On the history and future of 100% renewable energy systems research." *IEEE Access* 10:78176-78218. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3193402](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402)
- Brouwer, Anne Sjoerd, Machteld Van Den Broek, Ad Seebregts, and André Faaij. 2014. "Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33:443-466. DOI: [10.1016/j.rser.2014.01.076](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076)
- Das, Saborni, and Mousumi Basu. 2020. "Day-ahead optimal bidding strategy of microgrid with demand response program considering uncertainties and outages of renewable energy resources." *Energy* 190:116441. DOI: [10.1016/j.energy.2019.116441](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116441)
- Dent, C.J., Andrew Keane, and Janusz W. Bialek. 2010. "Simplified methods for renewable generation capacity credit calculation: A critical review." IEEE PES general meeting. DOI: [10.1109/PES.2010.5589606](https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589606)
- Elshurafa, Amro M., Hatem Alatawi, Salaheddine Soummane, and Frank A. Felder. 2021. "Assessing effects of renewable deployment on emissions in the Saudi power sector until 2040 using integer optimization." *The Electricity Journal* 34(6):106973. DOI: [10.1016/j.tej.2021.106973](https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106973)
- Elshurafa, Amro M., and Nawaz Peerbocus. 2020. "Electric vehicle deployment and carbon emissions in Saudi Arabia: a power system perspective." *The Electricity Journal* 33(6):106774. DOI: [10.1016/j.tej.2020.106774](https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106774)
- Garver, Leonard L. 1966. "Effective load carrying capability of generating units." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (8):910-919. DOI: [10.1109/TPAS.1966.291652](https://doi.org/10.1109/TPAS.1966.291652)
- King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy (KACARE). 2018. "Synthesis of Grid Impact Project." <https://ksa-climate.com/wp-content/uploads/2018/11/Synthesis-of-Grid-Impact-Project.pdf>.
- Keane, Andrew, Michael Milligan, Chris J. Dent, Bernhard Hasche, Claudine D'Annunzio, Ken Dragoon, Hannele Holttinen, Nader Samaan, Lennart Soder, and Mark O'Malley. 2010. "Capacity value of wind power." *IEEE Transactions on Power Systems* 26(2):564-572. DOI: [10.1109/TPWRS.2010.2051341](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051341)
- Milligan, Michael, and Kevin Porter. 2005. "Determining the capacity value of wind: A survey of methods and implementation." National Renewable Energy Laboratory.
- Mills, Robin. 2017. "Saudi Arabia Energy Needs and Nuclear Power." *Avoiding a Nuclear Wild, Wild West in the Middle East*. Chapter 5.
- Najjar, Yousef S.H., and Amer Abu-Shamleh. 2020. "Performance evaluation of a large-scale thermal power plant based on the best industrial practices." *Scientific Reports* 10(1):1-9. DOI: [10.1038/s41598-020-77802-8](https://doi.org/10.1038/s41598-020-77802-8)

North American Electric Reliability Corporation. (NERC). 2022. "Glossary of Terms Used in NERC Reliability Standards." https://www.nerc.com/pa/Stand/Glossary%20of%20Terms/Glossary_of_Terms.pdf

Santos, Sérgio F., Desta Z. Fitiwi, Marco R.M. Cruz, Carlos M.P. Cabrita, and João P.S. Catalão. 2017. "Impacts of optimal energy storage deployment and network reconfiguration on renewable integration level in distribution systems." *Applied Energy* 185:44-55. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.10.053](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.053)

Saudi & Middle East Green Initiatives. 2023. "Initiative 'Transforming Saudi's domestic energy mix' by the Ministry of Energy." <https://www.greeninitiatives.gov.sa/sji-initiatives/>.

Saudi Electricity Company. 2011. "Annual Report 2011." <https://www.se.com.sa/en-us/Lists/AnnualReports/Attachments/9/AnnualReport2011En.pdf>.

Sepulveda, Nestor A., Jesse D. Jenkins, Fernando J. de Sisternes, and Richard K. Lester. 2018. "The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation." *Joule* 2(11):2403-2420. DOI: [10.1016/j.joule.2018.08.006](https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006)

Soummane, Salaheddine, Amro Elshurafa, Hatem Al Atawi, and Frank Felder. 2022. "Cross-seasonal Fuel Savings from Load Shifting in the Saudi Industrial Sector." KAPSARC. DOI: [10.30573/KS-2022-DP01](https://doi.org/10.30573/KS-2022-DP01)

Soummane, Salaheddine, and Frederic Gherzi. 2022. "Projecting Saudi sectoral electricity demand in 2030 using a computable general equilibrium model." *Energy Strategy Reviews* 39:100787. DOI: [10.1016/j.esr.2021.100787](https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100787)

The World Bank. 2021. "The Value of Trade and Regional Investments in The Pan-Arab Electricity Market: Integrating Power Systems and Building Economies." Working paper. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36614>

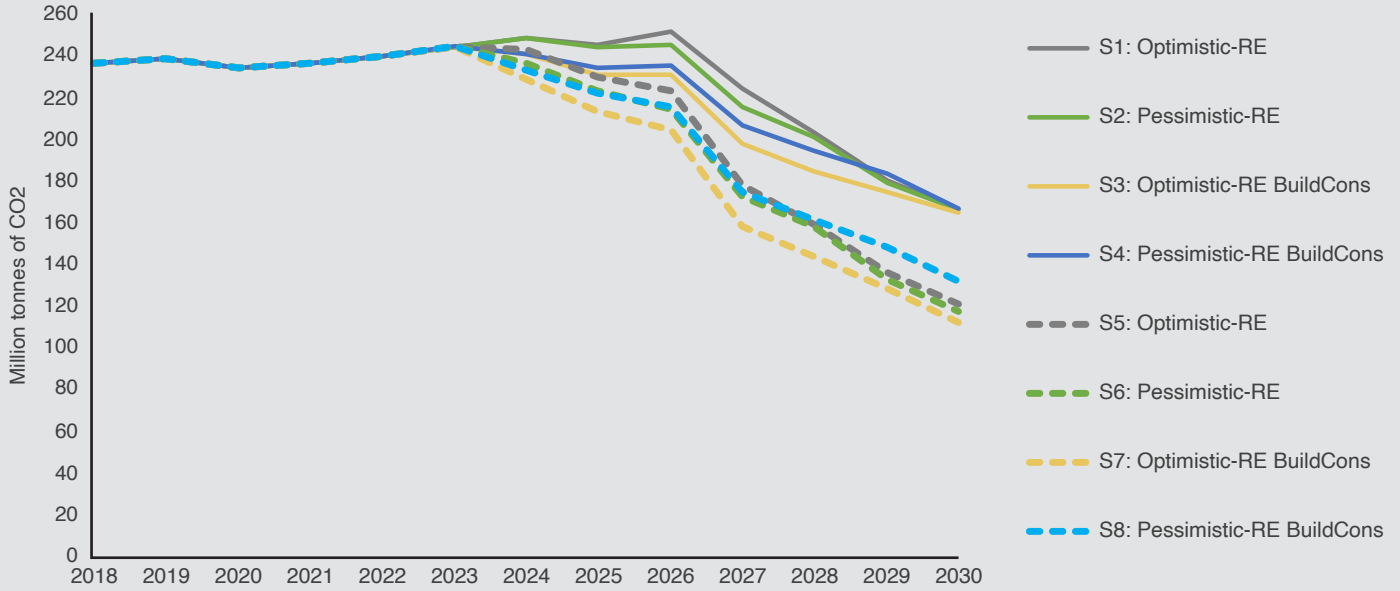
Tuohy, Aidan, and Mark O'Malley. 2011. "Pumped storage in systems with very high wind penetration." *Energy policy* 39(4):1965-1974. DOI: [10.1016/j.enpol.2011.01.026](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.026)

Vision 2030. 2022. "Energy and Sustainability" 2022. Saudi Vision 2030. <https://www.vision2030.gov.sa/thekingdom/explore/energy/>.

Voorspools, Kris R., and William D. D'haeseleer. 2006. "An analytical formula for the capacity credit of wind power." *Renewable Energy* 31(1):45-54. DOI: [10.1016/j.renene.2005.03.017](https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.017)

Zachary, Stan, Amy Wilson, and Chris Dent. 2022. "The integration of variable generation and storage into electricity capacity markets." *The Energy Journal* 43(4). DOI: [10.5547/01956574.43.4.szac](https://doi.org/10.5547/01956574.43.4.szac)

الشكل A1. إجمالي انبعاثات الكربون في قطاع الطاقة بملايين الأطنان حتى عام 2030 لجميع السيناريوهات.

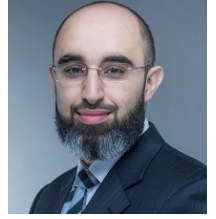


المصدر: الخبراء.

يبيّن الشكل (A1) انبعاثات الكربون لكل سيناريو، وتؤدي جميع السيناريوهات - كما هو متوقع - إلى نتيجة واحدة مفادها انخفاض معدلات الانبعاثات مقارنة بسنة الأساس 2018، كما تعد تخفيضات هذه الانبعاثات كبيرة في كل سيناريوهات الطاقة المتجددة بنسبة تبلغ 50 ٪ (نقصد بذلك السيناريوهات من السيناريو الخامس إلى الثامن (S5 إلى S8)). بينما نجد في سيناريوهات الطاقة المتجددة البالغة 25 ٪ (من السيناريو الأول (S1) إلى السيناريو الرابع (S4))، أن قيم الانبعاثات الإجمالية في عام 2030 تتماثل لتبلغ حوالي 165 مليون طن، ورغم ذلك يكون التباين بدرجة أكبر في سيناريوهات 50 ٪ (من السيناريو الخامس (S5) إلى السيناريو الثامن (S8))، مع وجود السيناريو الثامن (S8) في معظم الانبعاثات.

نبذة عن المؤلفين

عمرو الدثرفاء



مدير برنامج المرافق والطاقة المتجددة بالنيابة في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك)، ويتمتع بخبرة تربو عن 20 عاماً في مجالات الطاقة والتقنية في ثلاث قارات. تكمن اهتماماته البحثية في مجالات سياسات الطاقة المتجددة ونمذجة أنظمة الطاقة والكهربائية الخالية من الانبعاثات الكربونية، فضلاً عن تصميم وتحسين الشبكات الصغيرة الهجينة. كذلك قاد ونفذ العديد من مبادرات النمذجة الوطنية على نطاقيّ التوزيع والمولدات، كما اعتمدت شركة بريتش بتروليوم (BP) البريطانية الشهيرة بعضاً من جوانب بحوثه في إنشاء استعراضها الإحصائي السنوي المعروف. ويتجاوز رصيد نشره البحثي 50 ورقة بحثية، فضلاً عن تسجيله للعديد من براءات اختراع، كما أنه حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية ودرجة الماجستير في إدارة الأعمال في الشؤون المالية.

ماري بيتيت



قائد بحث في برنامج خدمات الطاقة والطاقة المتجددة في مركز كابسارك، وتركز بحوثها الحالية على نمذجة نظم الطاقة الكهربائية وتصاميم السوق لتحويلات الطاقة وتحليل الأطر لنظم الطاقة الكهربائية الموثوقة والمرنة. عملت قبل انضمامها إلى كابسارك مهندساً للبحوث في وحدة البحوث والتطوير لمجموعة كهرباء فرنسا في باريس، وعملت على تصميم سوق الكهرباء على المديين الطويل والقصير، وشبكات النقل على النطاق الأوروبي وفرص الشحن الذكي للمركبات الكهربائية. كما أنها حاصلة على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة دوفين PSL (بفرنسا)، ودرجة الماجستير في اقتصاديات البيئة والطاقة من كلية باريس بونتس باريسيتش "École des Ponts ParisTech" (بفرنسا) ودرجة الماجستير في الهندسة من معهد البوليتكنيك (ENSTA) في باريس "ENSTA Institut Polytechnique de Paris" (بفرنسا).

فرانك فيلدر



مهندس ومحلل لسياسات الطاقة، والمدير السابق لبرنامج المرافق والطاقة المتجددة في مركز كابسارك، عمل قبل انضمامه إلى كابسارك أستاذاً باحثاً في كلية التخطيط والسياسات العامة في جامعة روتجرز الأمريكية بولاية نيوجرسي، ومديراً لمركز الطاقة والاقتصاد والسياسات البيئية، أجرى العديد من البحوث الأصلية والتطبيقية في مجالات نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية والسياسات البيئية النظيفة وتغير المناخ لعدة وكالات حكومية وشركات الطاقة والمؤسسات البحثية ذات الصلة، كما عمل مستشاراً اقتصادياً ومهندساً نووياً، حصل على درجة الدكتوراه من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا.

حول المشروع

يعتمد التحول الجاري في مجال الطاقة اعتماداً كبيراً على نشر وتعميم مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية، ذلك أن هذه الموارد المتغيرة والمتقطعة من شأنها العمل على تعديل موثوقية أنظمة الطاقة مقارنة بالحالة التي يتم فيها توليد الطاقة الكهربائية عبر محطات توليد الطاقة التقليدية القابلة للتوزيع. ويعد هذا المشروع إسهاماً متواضعاً في فهم الكيفية التي تتم وفقها نمذجة الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، وكيف أن نتائج التخطيط طويل الأجل حساسة لهذه الافتراضات. ولا شك أن الوصول لهذا الفهم من شأنه المساعدة على تحديد نشر هذه الموارد وضمان نظام طاقة موثوق يتسم بالمرونة.



www.kapsarc.org