

# تقييم دور مصادر الطاقة المتجددة في تقليل الانبعاثات في قطاع الطاقة السعودي باستخدام تحسين الأعداد الصحيحة المختلط

عمرو الشرفاء، حاتم العطوي،  
صلاح الدين سومان، فرانك فيلدر

## عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) 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 2021 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبته 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 كمنصحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة. ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

# النقاط الرئيسية

يُنظر إلى تقنيات الطاقة المتجددة (RE) على أنها وسيلة مهمة للحد من الانبعاثات المرتبطة بقطاع الطاقة. باستخدام تحسين الأعداد الصحيحة المختلط، نقوم بتقييم إلى أي مدى تقلل الطاقة المتجددة من انبعاثات الكربون في قطاع الطاقة السعودي.

أنشأنا نموذجًا لزيادة السعة، والذي يأخذ في الاعتبار في الوقت نفسه بناء التوليد والنقل ويغطي أفقا زمنيا للتخطيط حتى عام 2040.

تنظر السيناريوهات المحاكية، والتي تضمنت تقاعد الوقود السائل من قطاع الطاقة السعودي وأخذت في الاعتبار أسعار مختلفة للغاز، في تقنيات البناء التالية: الطاقة النووية، والغاز، والخلايا الشمسية الكهروضوئية، وطاقة الرياح، والطاقة الشمسية المركزة مع التخزين، والبطاريات.

يمكن أن تقلل مصادر الطاقة المتجددة انبعاثات الكربون بنسبة 25% إلى 41% بحلول عام 2040، اعتمادًا على سعر الغاز. كما يمكن لاستخدام الطاقة المتجددة داخل المملكة العربية السعودية أن يؤجل خطط توسيع إمدادات الغاز الوطنية، ولكن ليس الاستثمار في توسيع سعة نقل الغاز المحلية.

في ظل ظروف معينة وعند استخدام سعة كبيرة من الطاقة المتجددة، يعمل الربط الأفضل لخطوط النقل بين المناطق على إدارة التقطع من الطاقة المتجددة بشكل أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنة باستخدام التخزين.

لزيادة صادرات النفط السعودية.

السبب الثالث لتمكين المملكة العربية السعودية وبقية العالم من الاعتماد بشكل أقل على الوقود الأحفوري هو انخفاض تكاليف تقنيات الطاقة المتجددة وتحسن أدائها. شهدت الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) وتوليد الرياح بالأخص، انخفاضاً كبيراً في التكلفة في العشرين عاماً الماضية (Das, Hittinger, and Williams 2020). بالإضافة إلى ذلك، تمتلك المملكة العربية السعودية موارد متميزة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، مما يدعم الجدوى المالية للطاقة المتجددة.

تزايد الطلب على الكهرباء في المملكة بشكل ثابت من حيث ذروة الحمل والاستهلاك لسنوات عديدة (Mikayilov et al. 2020)، بسبب النمو السكاني والاقتصادي. وشهد ذلك ركوداً في السنوات القليلة الماضية بسبب إصلاحات أسعار الطاقة التي رفعت أسعار الكهرباء في معظم القطاعات. ومع ذلك، من المتوقع أن يزداد الطلب خلال العقود القادمة بسبب النمو الاقتصادي والعديد من المشاريع الضخمة، بما في ذلك مدينة نيوم والمدن السياحية الجديدة على البحر الأحمر.

نظراً للوقت الطويل الذي تحتاجه مشاريع الطاقة في التنفيذ وطبيعة رأس المال الباهظ المصاحب، فإن التخطيط له أهمية كبرى في هذا القطاع. وتعد النماذج طويلة المدى مفيدة، ولكنها تهدف بشكل أساسي إلى تقليل التكاليف، في حين أن عوامل أخرى يمكن أن تؤثر لصالح خيارات أكثر تكلفة (Mehrabadi, Moghaddam, and Sheikh-El-Eslami 2020). تكمن قيمة هذه النماذج في قدرتها على فهم التوجهات وتحديد الاتجاهات العامة، وليس التقديرات العددية المطلقة التي تنتجها (Felder 2016).

في هذا البحث، نجري دراسة طويلة المدى لزيادة السعة لتقييم آثار تقاعد الوقود السائل من قطاع الطاقة السعودي والآثار المترتبة على الانبعاثات

اعتمدت المملكة العربية السعودية على مدى عقود – مثل العديد من الدول حول العالم – على الوقود الأحفوري لاحتياجاتها من توليد الطاقة. ومكنت موارد الطاقة الوفيرة في المملكة من إنشاء قطاعات صناعية قوية ونوعية أدت إلى حياة أفضل لمواطنيها. وللمضي قدماً، تعتزم المملكة العربية السعودية تقليل أو إلغاء استخدامها للوقود السائل في توليد الطاقة من خلال تنويع مزيجها للطاقة. ويرجع ذلك أساساً إلى ثلاثة عوامل: (1) التزام المملكة بالحد من انبعاثات الكربون الداخلية لمكافحة تغير المناخ (Bradshaw, Van de Graaf, and Connolly 2019) (2) إمكانية استخدام الوقود السائل في الأنشطة ذات القيمة المضافة الأعلى (3) (Matallah 2020)، ظهور تقنيات جديدة لتوليد الطاقة بتكلفة تنافسية (Steffen et al. 2020).

التزمت المملكة العربية السعودية بتحقيق قدر أكبر من الاستدامة البيئية. وهنا، تدعم المملكة مفهوم الاقتصاد الدائري للكربون (CCE) كمسار عملي لتحقيق أهداف تغير المناخ (Gallo et al. 2020). يشتمل الاقتصاد الدائري للكربون على أربعة مبادئ رئيسية (تُعرف باسم R's الأربعة): تقليل كمية الكربون المنبعث، وإعادة استخدام الكربون عن طريق احتجازه وتحويله بحيث يمكن استخدامه كمادة وسيطة، وإعادة تدوير الكربون عن طريق تحويله (على سبيل المثال، في الأسمدة أو الوقود الاصطناعي)، وإزالة الكربون عن طريق تخزينه جيولوجياً أو كيميائياً.

تحل خيارات توليد الطاقة البديلة محل الوقود السائل الذي يمكن استخدامه في أنشطة أكثر قيمة للاقتصاد الكلي الأوسع، بما في ذلك التصدير إلى الأسواق الدولية بالأسعار السائدة. وفقاً لدراسة أجراها Blazquez وآخرون (2020)، فإن السياسات التي تهدف إلى الحد من استهلاك النفط المحلي في المملكة لها آثار إيجابية على الرفاهية تتراوح ما بين 6 دولارات أمريكية إلى 56 دولاراً أمريكياً للبرميل من النفط الذي تم توفيره، حتى بعد النظر في الانخفاض المحتمل في أسعار النفط عالمياً نتيجة

(4) تمتد المدة الزمنية للدراسة حتى عام 2040.

ويتم تنظيم هذه الدراسة على النحو التالي. في القسم (2)، نناقش نماذج تخطيط الزيادة في السعة (CEP) ونوضح قيمتها، ونراجع بالمختصر نماذج تخطيط التوسع في السعة للمناطق خارج المملكة، ثم نركز على تلك التي تم إنشاؤها للمملكة العربية السعودية بالتحديد. ويشرح القسم (3) السيناريوهات التي تم أخذها في الاعتبار في تحليلنا ويقدم وصفًا تفصيليًا لإنشاء النموذج. ويقدم القسم (4) نتائج المحاكاة، تليها مناقشة ووضع السياق. ويلخص القسم (5) الدراسة.

المرتبطة به. يأتي بحثنا هذا انطلاقًا من الإعلانات الحكومية الأخيرة التي ذكرت أن المملكة ستعتمد بشكل كامل على الغاز والطاقة المتجددة في المستقبل لاحتياجاتها من الطاقة (Saudi Gazette 2020). هذه الدراسة هي الأولى من نوعها لتقييم التكاليف ذات الصلة والآثار البيئية لهذا التحول في السياسة بوضوح. هناك أربعة جوانب إضافية تميز هذه الدراسة عن الدراسات السابقة التي تركز على المملكة العربية السعودية: (1) نستخدم بيانات أحدث للسنة الأساسية (2018 بدلاً من 2015)، (2) نستخدم تحسين الأعداد الصحيحة بدلاً من نهج البرنامج الخطي الكلاسيكي، (3) نقوم بإنشاء نموذج أكثر دقة فيما يتعلق بالمناطق وربط الإرسال داخل المملكة (نستخدم ست مناطق بدلاً من أربعة)،

## 2. المراجعة والسياق

### 2.1. نبذة موجزة عن قطاع الطاقة السعودي

تعتمد المملكة العربية السعودية على الوقود الأحفوري لتلبية جميع احتياجاتها تقريبًا من الكهرباء (ECRA 2020). أنتجت المملكة 57% من الكهرباء من الغاز الطبيعي في عام 2019، و 20% من زيت الوقود الثقيل (HFO) والنفط الخام، و 3% من الديزل. منذ عام 2010، ارتفعت حصة الغاز في مزيج الوقود بشكل سريع من 34%، مما أدى إلى خفض متوسط الانبعاثات وزيادة كفاءة قطاع الطاقة في المملكة.

تقسم الهيئة السعودية لتنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (ECRA) المملكة إلى أربع مناطق تشغيلية - الشرقية والوسطى والغربية والجنوبية - حيث يختلف فيها مزيج الوقود بشكل كبير. مثلاً، يلبي الغاز 97% من احتياجات الطاقة في المنطقة الشرقية ولكن 10% فقط في المنطقة الغربية، بينما تعتمد المنطقة الجنوبية على الوقود السائل.

قبل إصلاحات الأسعار الأخيرة، كان الطلب على الكهرباء في المملكة وحمل الذروة في ازدياد لسنوات عديدة. ارتفع استهلاك الكهرباء (أي الطاقة المباعة) من 215 تيراواط في الساعة في عام 2010 إلى حوالي 300 تيراواط في الساعة من عام 2015 فصاعدًا (289 تيراواط في الساعة في عام 2019). وبالمثل، ارتفع الحمل الذروي من حوالي 44 جيجاواط في عام 2010 إلى 62 جيجاواط في عام 2015، ومنذ ذلك الحين وهو حول هذا المستوى. تفسر أسعار الطاقة المرتفعة التي تم طرحها في أوائل عام 2016 جزئيًا ركود الطلب، بما في ذلك الأسعار المتدرجة للقطاع السكني. على سبيل المثال، تضاعفت تعريفة أدنى مستوى ثلاث مرات تقريبًا بعد أن دخلت الإصلاحات حيز التنفيذ: من 0.013 دولارًا أمريكيًا لكل كيلو واط في الساعة إلى 0.048 دولارًا أمريكيًا لكل كيلو واط في الساعة.

### 2.2. تخطيط الزيادة في السعة: نظرة عامة

يهدف تخطيط الزيادة في السعة - الذي يشار إليه أيضًا باسم نمذجة مزيج الطاقة - إلى تقليل تكلفة إنتاج الكهرباء مع مراعاة توفر الوقود وقيود أخرى ضمن مدى زمني طويل نسبيًا من 10 إلى 30 عامًا وربما أكثر (Wierzbowski, Lyzwa, and Musial 2016).

تتطلب أهداف خفض الانبعاثات الفعالة رؤية واضحة لكيفية تطور قطاع الطاقة لأنه يتسم بدرجة عالية من التلوث بشكل عام (Brouwer et al. 2016). وبالمثل، فإن الأثر البيئي لكهربة قطاع النقل يتطلب افتراضات حول مزيج الطاقة في المستقبل. قد تكون المركبات الكهربائية خالية من الكربون على الطريق، ولكن إذا كانت تستمد الطاقة من التقنيات شديدة التلوث مثل الفحم، فيمكنها زيادة صافي الانبعاثات (Elshurafa and Peerbocus 2020). علاوة على ذلك، يجب على الدول التي تعتمد بشكل كبير على الغاز الطبيعي وتتوقع زيادة الطلب على الطاقة أن تخطط وتخصص ميزانية لاستكشاف إضافي للغاز وتخزينه و/أو الاستيراد (Matar and Shabaneh 2020). مثل هذه الحالات توضح مدى ارتباط دراسات تخطيط التوسع في السعة بالاقتصاد الكلي الأوسع.

على الصعيد العالمي، نجد الدراسات السابقة مليئة بدراسات تخطيط التوسع في السعة التي تحاول الإجابة عن أسئلة مختلفة باستخدام أدوات وأساليب تحليلية مختلفة (Gacitua et al. 2018). على سبيل المثال، باستخدام لغة برمجة نظام النمذجة الجبرية العامة (GAMS)، قام Heuberger وآخرون (2017) بإنشاء نموذج لنظام الطاقة في المملكة المتحدة من عام 2015 إلى عام 2050 الذي اعتبر منحنيات التعلم لتكلفة التقنية المحلية. في دراسة أخرى، قام Qadrdan و Pirouti و Pean

الشبكة. تستخدم نماذج التوليد قرارات زمنية يمكن أن تصل إلى ثوانٍ وتأخذ في الاعتبار عوامل تشغيلية متعددة، بما في ذلك أنواع احتياطات التشغيل، وتكاليف ومعدلات التزايد، وتكاليف بدء التشغيل، وأوقات بدء التشغيل، من بين أمور أخرى. لا تتضمن دراسات تخطيط التوسع في السعة عادةً مثل هذه التفاصيل (Buchholz, Gamst, and Pisinger 2019). يمثل هذا تحديًا من حيث قابلية تتبع النموذج، ومتطلبات أجهزة الحوسبة، والوقت اللازم لحل النماذج التي تمتد عادةً من 20 إلى 30 عامًا أو أكثر. ونتيجة لذلك، يستخدم مصممون نماذج تخطيط التوسع في السعة عمومًا درجات دقة زمنية تقريبية ويكونون انتقائيين بشأن المتغيرات التي يجب تضمينها. ومع ذلك، فإن التعقيد المتزايد لأنظمة الطاقة المستقبلية بسبب التخزين ومصادر الطاقة المتجددة يخلق حاجة متزايدة لإدراج مزيد من التفاصيل في دراسات تخطيط التوسع في السعة (Maloney et al. 2020; Diaz, Inzunza, and Moreno 2019). لذلك يجب على مصممي النماذج تحقيق التوازن بين دقة النموذج وإمكانية إدارته وتبعه. ولمزيد من المعلومات حول نماذج تخطيط التوسع في السعة والتخطيط، يرجى الرجوع إلى الدراسات السابقة، بما في ذلك Koltsaklis و Munda و Babatunde و Dagoumas (2018) و Hamam و Dagoumas (2019) و Koltsaklis (2019).

### 2.3. دراسات التوسع في السعة: التركيز على السعودية

على الرغم من أن العديد من دراسات تخطيط التوسع في السعة تغطي الدول الأوروبية والولايات المتحدة الأمريكية، إلا أن القليل فقط يركز على المملكة العربية السعودية. قام Matar و Echeverri و Pierru (2016) بتقييم الجدوى الاقتصادية لاستخدام الفحم في مزيج الطاقة السعودي وخلصوا إلى أنه لن يكون منافسًا بسبب انخفاض الأسعار المدارة للنفط والغاز. وفي دراسة أخرى، قام Matar وآخرون (2017) بتحليل أثر إصلاح أسعار الوقود للقطاع

(2016) بتقييم دور الربط الكهربائي في موازنة العرض والطلب في الأنظمة الفرنسية والبريطانية، باستخدام برنامج متاح تجاريًا: PLEXOS، واستنتجوا أن الربط الكهربائي سيقول من التكاليف التشغيلية الإجمالية، والانبعاثات، والاستهلاك في محطات توليد الطاقة بالغاز المستخدمة للتعويض عن تقطع تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. من ناحية أخرى، استخدم Emodi وآخرون (2017)، نموذج LEAP لتقييم مستقبل مزيج الطاقة في نيجيريا وفقًا لمجموعة من الافتراضات والسيناريوهات. يُعد نموذج "MARKet ALlocation" أو MARKAL منصة شائعة أخرى لدراسات تخطيط التوسع في السعة. على سبيل المثال، قام كل من Victor و Nichols و Zelek (2018) بتطبيق نموذج MARKAL على سياق الولايات المتحدة الأمريكية، ووجدوا أنه من الممكن تحقيق خفض بنسبة 80% في الانبعاثات تحت مستويات عام 2005 بحلول عام 2050 من خلال استخدام التقنيات المتاحة. اعتمدت أبحاث أخرى على تخطيط نظام Wien التلقائي (WASP) أو منصة نظام نمذجة الطاقة مفتوح المصدر (OSeMOSYS)، مثل Zeljko وآخرون (2020) و Riva وآخرون (2019)، على التوالي. تعتبر جميع المنصات المذكورة أعلاه شائعة بشكل عام لدراسات تخطيط التوسع في السعة.

على الرغم من أن الهدف في العديد من تطبيقات تخطيط التوسع في السعة هو تقليل النفقات، يجب على المخططين الأخذ في الاعتبار السيناريوهات المعقولة أو المرغوبة التي تنطوي على تكاليف أعلى. وتشمل أسباب ذلك أهداف الانبعاثات، وخلق فرص العمل، وصعوبة القطع في أسعار الوقود المستقبلية (Bohlmann et al. 2019). ولهذا السبب يمكن اعتبار التحولات الأساسية لنظام الطاقة مدفوعة بالتكلفة والسياسات (Brouwer et al. 2016).

تختلف دراسات تخطيط التوسع في السعة عن دراسات التوليد الأمثل، التي تركز بمزيد من التفصيل على المتغيرات التشغيلية واستقرار

لأسعار الوقود واستنتجوا أن بعض السيناريوهات يمكن أن تؤدي إلى تلبية الطاقة المتجددة ما يقارب ثلث احتياجات الطاقة بحلول عام 2030. وأخيراً، قام Matar و (2020) Shabaneh بدراسة جدوى استيراد و/ أو تخزين الغاز في المملكة وكيف سيؤثر ذلك على بناء توليد الطاقة في المستقبل. يلخص الجدول (1) دراسات تخطيط التوسع في السعة المذكورة أعلاه.

الصناعي في المملكة، ووجدوا أنه يمكن تحقيق نظام طاقة أكثر كفاءة، حيث تنتج التقنيات النووية والمتجددة 70٪ من الكهرباء في عام 2032، إذا تم تحرير أسعار الوقود.

من ناحية أخرى، قام Groissböck و Pickl (2018) بفحص مزيج الطاقة المستقبلي في المملكة العربية السعودية في ظل سيناريوهات مختلفة

الجدول 1. ملخص لدراسات تخطيط التوسع في السعة التي أجريت في المملكة العربية السعودية.

| المرجع                            | الدافع لدراسة تخطيط التوسع في السعة   | كيف تم حل تخطيط التوسع في السعة             | السنة الأساسية | المدة الزمنية |
|-----------------------------------|---|---|----------------|---------------|
| Matar, Echeverri, and Pierru 2016 | تقييم استخدام الفحم في توليد الطاقة   | نظام النمذجة الجبرية العامة: البرمجة الخطية | 2015           | 2030          |
| Matar et al. 2017                 | تقييم أثر إصلاح أسعار الوقود للقطاع الصناعي   | نظام النمذجة الجبرية العامة: البرمجة الخطية | 2015           | 2032          |
| Groissböck and Pickl 2018         | تقييم تأثير أسعار الوقود المختلفة   | OSeMOSYS                                    | 2015           | 2030          |
| Matar and Shabaneh 2020           | تقييم تأثير استيراد و / أو تخزين الغاز  | نظام النمذجة الجبرية العامة: البرمجة الخطية | 2015           | 2030          |
| هذا التعليق                       | تقييم تأثير تقاعد الوقود السائل على بناء الطاقة المتجددة والانبعثات والبنية التحتية للغاز | PLEXOS: عدد صحيح                            | 2018           | 2040          |

تختلف دراستنا عن الأبحاث السابقة التي ركزت على المملكة من ناحيتين مهمتين: أولاً، تغطي الدراسات الأربعة السابقة فترات زمنية من 2015 إلى 2030 أو 2032، وتبدأ هذه الدراسة من عام 2018 وتمتد إلى 2040. ثانياً، تستخدم نهج العدد الصحيح للحل، وهو أكثر دقة من البرمجة الخطية، ولكنها تتطلب المزيد من الذاكرة والوقت لحلها (Miao et al. 2021).



# 3. السيناريو ووصف النموذج

## 3.1. السيناريوهات التي تم أخذها في الاعتبار

نضع نموذجًا لدراسة أثر تقاعد الوقود السائل من قطاع توليد الطاقة في المملكة العربية السعودية على الانبعاثات والدور المصاحب لمصادر الطاقة المتجددة في إطار السيناريوهات الثلاثة التالية، التي تم تلخيصها أيضًا في الجدول (2) أدناه.

أ. السيناريو (1) - الحالة الأساسية (BC): لغرض المقارنة، نفترض أن مزيج الطاقة في المملكة العربية السعودية سيستمر في الاعتماد على الوقود السائل لتوليد الطاقة. ومع ذلك لا نسمح ببناء أي محطات طاقة جديدة تعمل بالسوائل ونحصر المحطات الجديدة على التقنيات التالية: الغاز، والطاقة الكهروضوئية، وطاقة الرياح، والطاقة الشمسية المركزة (CSP)، والطاقة النووية، وتخزين البطاريات. كما نفترض أن أسعار الوقود تستمر كما هي وفقًا للقيم الحالية (انظر الملحق A لمعرفة أسعار الوقود المستخدمة).

ب. السيناريو (2) - تقاعد الوقود السائل وسعر منخفض محدد للغاز (LRAP): هنا نقوم بمقاعدة جميع أنواع الوقود السائل تدريجياً (زيت الوقود الثقيل، والخام، والديزل) وحتى التقاعد الكلي بحلول عام 2030. ولتحقيق ذلك، نحصر حصة الوقود السائل بحد أقصى بنسبة 40% في عام 2022، ونقوم بتقليل هذا خطياً إلى 0% بحلول عام 2030. حددنا سعر الغاز بـ 1.25 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية (US\$/MMBtu) خلال فترة التخطيط ولا نطبق أي قيود على نقل الغاز. تتطابق تقنيات البناء المرشحة مع تلك الموجودة في سيناريو الحالة الأساسية. وتتبع أسعار الوقود السائل الأسعار الحالية حتى عام 2030.

ج. السيناريو (3) - سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة (LRDP): هذا السيناريو يكرر السيناريو السابق باستثناء سعر الغاز، الذي حددناه عند 1.25 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية حتى عام 2025، وبعد ذلك يرتفع إلى 3 دولارات أمريكية لكل مليون وحدة حرارية بريطانية حتى عام 2040، تماشياً مع توقعات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA 2020a). كما في السيناريو (2)، لا نطبق أي قيود على نقل الغاز.

## الجدول 2. ملخص السيناريوهات التي تمت محاكاتها.

| السيناريوهات التي تم أخذها في الاعتبار في هذه الدراسة               |                        |                                 | المعيار               |
|---|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| السيناريو (3) - (LRDP)  | السيناريو (2) - (LRAP) | السيناريو (1) - الحالة الأساسية |                       |
| تقاعد بحلول عام 2030  | تقاعد بحلول عام 2030   | يستخدم حتى عام 2040             | استخدام الوقود السائل |
| محدد خلال المدى الزمني للتخطيط (انظر الملحق A)                      |                        |                                 | سعر الوقود السائل     |
| 1.25 \$/MMBtu خلال 2018-2025<br>3.00 \$/MMBtu خلال 2026-2040        | 1.25 \$/MMBtu          | 1.25 \$/MMBtu                   | سعر الغاز             |
| الغاز، النووي، الكهروضوئي، الرياح، الطاقة الشمسية المركزة والبطارية |                        |                                 | البناء المرشح         |

#### 3.2. بناء النموذج

##### 3.2.1. نظرة عامة على النموذج

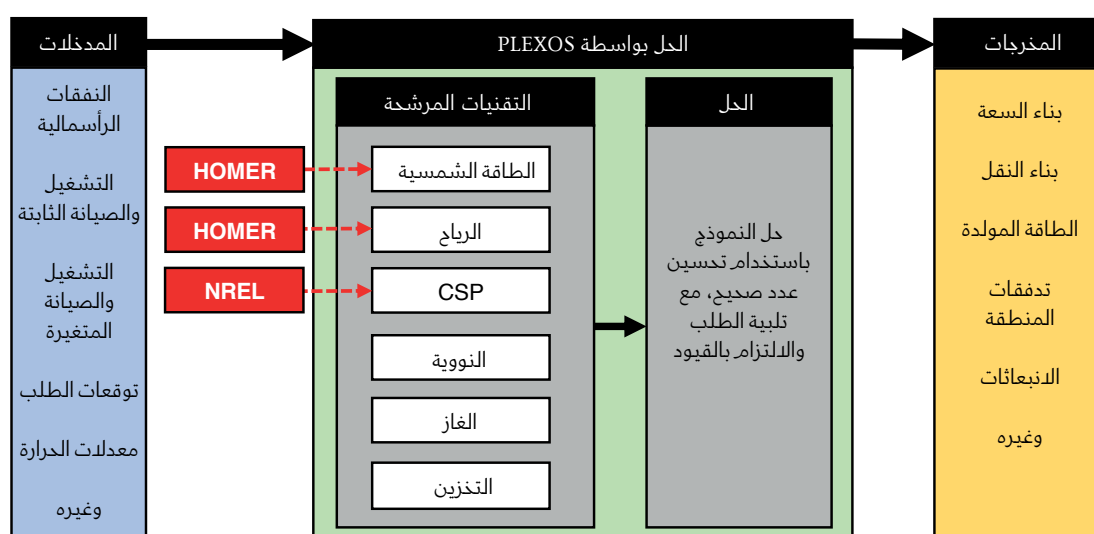
قمنا ببناء النموذج باستخدام PLEXOS واعتمدنا تحسين العدد الصحيح للحل. حددنا سنة الأساس على أنها 2018 و قمنا بحل النموذج حتى عام 2040. كما قمنا بتقسيم المملكة إلى ست مناطق: الشرقية، والوسطى، والغربية، والجنوبية، والشمالية الشرقية، والشمالية الغربية.

يشتمل النموذج على الطاقة الاحتياطية التشغيلية، واحتياطيات السعة، ومعدلات الزيادة في التوليد، وتكاليف هذه الزيادة. على الرغم من أن هذه لا تمثل جميع ظواهر التشغيل إلا أنها من العوامل التشغيلية الرئيسية، لا سيما بالنظر إلى أنه من المتوقع أن تفي مصادر الطاقة المتجددة بحصة كبيرة من الطاقة. كما أنها تحقق توازنًا بين مستوى التفاصيل في وصف المشكلة والموارد الحسابية اللازمة لتشغيل النموذج. حددنا الطاقة الاحتياطية لتكون 10% على الأقل من الحمل في أي لحظة، واحتياطيات السعة

لكل منطقة على 15% من الحمل الذروي في أي سنة (Reimers, Cole, and Frew 2019). يعد الحمل الذروي في المنطقة الوسطى حاليًا أعلى من السعة المتاحة؛ وفقًا لذلك، افترضنا أنه سيتم تحقيق هذا القيد بحلول عام 2025. ولا يوجد تدفق للكهرباء بين المملكة والدول الأخرى. نطبق معدل خصم بنسبة 5% في جميع أنحاء النموذج. يلخص الملحق A جميع تكاليف رأس المال، وتكاليف التشغيل والصيانة الثابتة (O&M)، وتكاليف التشغيل والصيانة المتغيرة، والمعايير والافتراضات الرقمية الأخرى.

يوضح الشكل (1) الهيكل العام للنموذج من خلال عرض المدخلات والمخرجات الرئيسة. قمنا بربط PLEXOS بحزمتين برمجيتين أخريين، HOMER ونموذج (SAM) التابع لمختبر الطاقة المتجددة الوطني الأمريكي (NREL). استخدمنا برنامج HOMER المتاح تجاريًا للحصول على بيانات توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتقنيات الرياح. وبالمثل، حصلنا على بيانات مخرجات الطاقة الشمسية المركزة (CSP) من نموذج SAM.

الشكل 1. الصورة العامة للنموذج.



ملاحظة: تم بناء النموذج وحلّه في PLEXOS. تمثل الأسهم المتقطعة باللون الأحمر روابط بين PLEXOS وحزمتين من البرامج، HOMER ونموذج مستشار نظام مختبر الطاقة المتجددة الوطني.

#### 3.2.2. الطلب

أداء الأنظمة الكهروضوئية المادية بشكل مناسب (Elshurafa et al. 2019)، في حزمة البرامج HOMER Pro. واستخدمت المخرجات بدورها كمدخلات لنموذج PLEXOS. بالإضافة إلى ذلك، فإننا نقيّد النموذج ببناء ما لا يزيد عن 4 جيجاواط من السعة الكهروضوئية سنويًا.

نظرًا لأن الطاقة الكهروضوئية متقطعة ولا توفر الطاقة في الليل، فلا يمكن اعتبار السعة الكهروضوئية المركبة ثابتة (أي قادرة على تلبية الطلب في أي لحظة). ومع ذلك، فمن المعقول تضمين جزء صغير من السعة الكهروضوئية المركبة كسعة ثابتة خلال النهار. نأخذ متوسط بيانات الطاقة الكهروضوئية للساعات من 8 صباحًا إلى 3 مساءً طوال العام ونجد أن متوسط سعة الطاقة هو 25٪ من إجمالي السعة. ويعتمد هذا الحساب المبسط على عمل Frew وآخرون (2017). نتخذ موقفًا متحفّظًا ونفترض أن الطاقة الكهروضوئية تساهم في السعة الثابتة بين الساعة 8 صباحًا و 3 مساءً، ولكن بنسبة 15٪ فقط من إجمالي قدرتها المركبة (Soria et al. 2016).

#### 3.2.4. الرياح

افتراض توليد الطاقة بالرياح ارتفاع العمود 80 مترًا (Ashrafi et al. 2018). كما هو الحال مع الطاقة الكهروضوئية، نقيّد بناء الطاقة بالرياح السنوي بـ 4 جيجاواط في السنة. ومع ذلك، لم يتم التعامل مع السعة الثابتة لطاقة الرياح (Tuohy and O'Malley 2011) بنفس الطريقة التي تعامل بها الطاقة الكهروضوئية: تساهم طاقة الرياح بنسبة 15٪ في السعة الثابتة على مدار اليوم (Brouwer et al. 2014).

في أي دراسة من دراسات تخطيط التوسع في السعة، تمثل مسارات الطلب مدخلا هامًا. شهدت أنماط الطلب على الكهرباء في المملكة العربية السعودية تغيرات هيكلية في السنوات الأخيرة حيث نفذت الحكومة تدابير الكفاءة وبدأت جولتين من إصلاحات الأسعار في عامي 2016 و 2018. أدت هذه التطورات إلى الحد من النمو السريع في الطلب على الكهرباء في الدولة، والذي توقف منذ عام 2016.

توقعنا الطلب بناءً على العمل الذي قام به Soummane و Gheresi (2021)، والذي يصوغ نموذج التوازن العام الديناميكي المحوسب (CGE) للمملكة العربية السعودية لتوقع الطلب القطاعي على الكهرباء. يرصد نموذج التوازن العام الديناميكي المحوسب، الذي تمت معايرته لعام 2013، السمات الاقتصادية الرئيسية للمملكة، مثل أسعار الكهرباء المدارة، ويتبع معايرة ديناميكية. ونتج عن ذلك متوسط معدل نمو سنوي يبلغ حوالي 1.6٪ حتى عام 2040، مما ينتج عنه إجمالي استهلاك وحمل الذروي يبلغ 520 تيراواط في الساعة و 90 جيجاواط على التوالي في عام 2040. ويمثل هذا الأخير زيادة لمدة 20 عامًا في السعة القصوى تبلغ 30 جيجاواط.

#### 3.2.3. الطاقة الشمسية الكهروضوئية

افتراض توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية استخدام وحدات ثابتة الإمالة بكفاءة تبلغ 16٪. كان معامل فقدان درجة الحرارة يبلغ 0.5٪ لكل درجة مئوية، ودرجة حرارة خلية التشغيل الاسمية 47 درجة مئوية. حددنا خسائر نظام الطاقة الكهروضوئية الإجمالية بنسبة 15٪، وافترضنا عدم حدوث تراجع سنوي للوحدات. تم استخدام هذه الافتراضات، التي تصف

#### 3.2.5. الطاقة الشمسية المركزة

لحساب مخزجات محطة الطاقة الشمسية المركزة، الذي افترضنا أنه نظام حوض قطع مكافئ، حصلنا على بيانات الإشعاع الطبيعي المباشر (DNI) المتاحة من مختبر الطاقة المتجددة الوطني الأمريكي.<sup>1</sup> على وجه التحديد، يحول نموذج مستشار نظام مختبر الطاقة المتجددة الوطني بيانات الإشعاع إلى طاقة حرارية ثم إلى صافي الناتج الكهربائي، مع حساب الخسائر التي تحدث من خلال هذه العمليات. كما سيتم توضيحه، لا يختار النموذج بناء أي طاقة شمسية مركزة بسبب تكلفته الرأسمالية العالية، حتى بعد اختبار قيم السعة الثابتة تتراوح من 50٪ إلى 100٪ (Soria et al. 2016).

تتكون محطة الطاقة الشمسية المركزة من ثلاث مكونات: الحقل الشمسي (الذي يولد الطاقة الحرارية)، وجهاز التخزين، ومولد الطاقة. لتمثيل هذا في PLEOXS، نعتمد نفس المنهجية التي سبق ذكرها في Denholm وآخرون (2013)، الذي يربط مولد الطاقة بوحدة تخزين. يمكن للنموذج توفير الطاقة من الإشعاع كل ساعة أو تخزين الطاقة أو استخدام الطاقة المخزنة، وفقاً لسعة وحدة التخزين. نستخدم مضاعف الطاقة الشمسية 1.7 في الحسابات، ونضع محطات الطاقة الشمسية المركزة ليتم بناؤها بزيادة قدرها 1 جيجاواط، ونفترض أن محطة الطاقة الشمسية المركزة يمكن أن توفر ثماني ساعات من التخزين.

#### 3.2.6. الطاقة النووية

يمكن للنموذج إضافة محطات طاقة نووية بمضاعفات صحيحة تبلغ 1 جيجاواط. كما حصرنا النموذج في بناء محطات نووية بالمنطقة الشرقية فقط، حيث ستستضيف المنطقة الغربية عدة مدن سياحية وترفيهية جديدة. يفترض النموذج

معدل حرارة يبلغ 10400 وحدة حرارية بريطانية / كيلو واط في الساعة. وتتبع التكلفة الرأسمالية للطاقة النووية على تخفيض طفيف فقط على مر السنين بسبب زيادة تعقيد الأنظمة ولوائح السلامة الصارمة (Heuberger et al. 2010 ، Grubler 2017). حددنا تكلفة الوقود هنا عند 0.85 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية (Lazard 2019).

#### 3.2.7. الغاز الطبيعي

لتوليد الطاقة عن طريق الغاز الطبيعي، أخذنا في الاعتبار نوعين من التوربينات: توربينات أحادية الدورة (SC) وتوربينات ذات دورة مركبة (CC). بالنسبة للتوربينات أحادية الدورة، قمنا بتعيين معدل الحرارة على 9000 وحدة حرارية بريطانية / كيلو واط في الساعة بسعة تبلغ 200 ميغاواط (MW). بالنسبة للتوربينات ذات الدورة المركبة، افترضنا 6000 وحدة حرارية بريطانية / كيلو واط في الساعة و 400 ميغاواط، على التوالي. حصلنا على قيم (تقريبية) لمعدل الحرارة والسعة من لوائح المواصفات لتوربينات الغاز الجديدة لشركة Siemens و GE. نأخذ في الاعتبار كذلك معدلات وتكاليف الزيادة لكل نوع من التوربينات. افترضنا تكاليف رأسمالية تبلغ 1000 دولار أمريكي / كيلوواط للتوربينات ذات الدورة المركبة و 700 دولار أمريكي / كيلوواط للتوربينات أحادية الدورة (EIA 2020b). نظراً لاستخدام مصادر الطاقة المتجددة، قمنا بإدراج معدلات وتكاليف زيادة إنتاج الطاقة في النموذج. بناءً على لوائح المواصفات، طبقنا معدلات زيادة تبلغ 20٪ و 5٪ من السعة في الدقيقة للتوربينات أحادية الدورة والتوربينات ذات الدورة المركبة، على التوالي. كما حددنا تكاليف الزيادة إلى 0.92 دولاراً أمريكياً / ميغاواط للتوربينات أحادية الدورة و 0.58 دولار أمريكي / ميغاواط للتوربينات ذات الدورة المركبة (Van den Bergh and Delarue 2015).

<sup>1</sup> متاحة في <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/saudi-arabia.html>

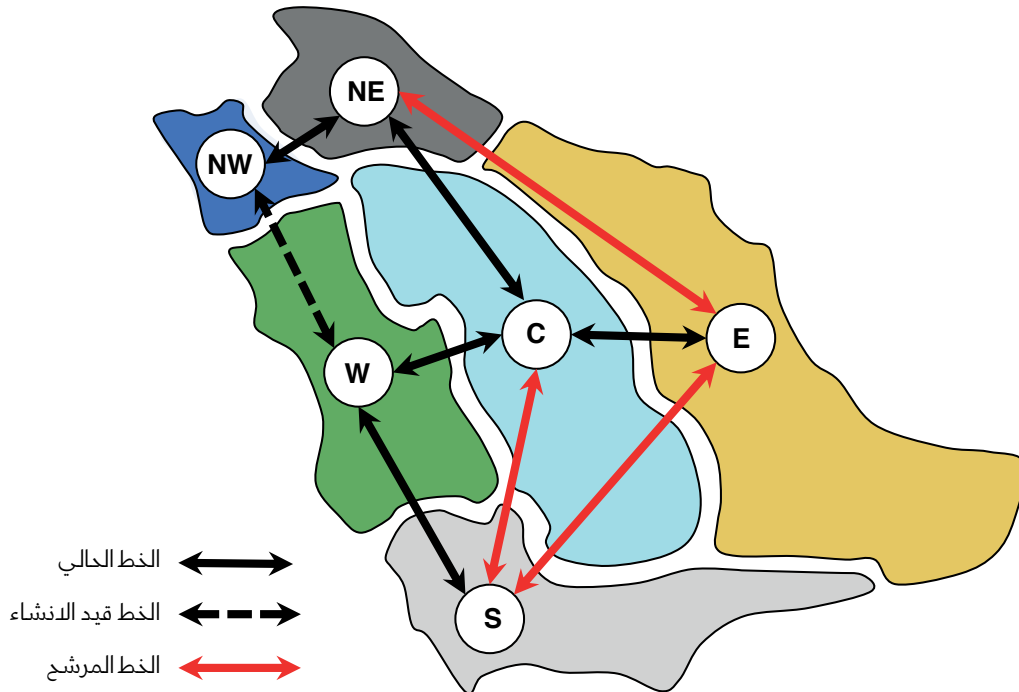
#### 3.2.8. تخزين البطارية

يشتمل النموذج على أجهزة تخزين بطاريات بسعة 100 ميغاواط، وبسعة تخزين تبلغ أربع ساعات (400 ميغاواط في الساعة [MWh])، مما يساهم بشكل كامل في السعة الثابتة. لقد حددنا كلاً من كفاءات الشحن والتفريغ بنسبة 95٪، مما يجعل الكفاءة الإجمالية إلى 90٪ (Cebulla, Naegler, and Pohl 2017). يمكن أن تصل البطاريات إلى حالة شحن لا تقل عن 25٪ كحد أدنى. افترضنا عمراً تقنياً مدته سبع سنوات للبطاريات نظراً لدرجات الحرارة المرتفعة في المملكة العربية السعودية (Smith et al. 2017).

#### 3.2.9. النقل

يوضح الشكل (2) خريطة للمملكة العربية السعودية تحوي المناطق الستة التي تم اعتبارها في النموذج، والتي يتم تمثيلها بواسطة نقطة تقاطع. تمثل الخطوط السوداء المتصلة خطوط النقل الحالية، بينما يمثل الخط الأسود المتقطع الخط المخطط الذي سيربط بين المنطقتين الغربية والشمالية الغربية، والذي من المقرر أن يبدأ تشغيله في غضون بضع سنوات بسعة 3 جيجاواط، وفقاً لتقارير إخبارية مختلفة حديثة. توضح الخطوط الحمراء الخطوط المرشحة التي سيتم بناؤها في النموذج إذا تم اعتبارها اقتصادية. نفترض أن لكل خط سعة إجمالية تبلغ 1.5 جيجاواط، ونفترض أن المهلة اللازمة لبناء خط نقل هي أربع سنوات (Lumbreras and Ramos 2016).

الشكل 2. المناطق الست المستخدمة في النموذج وخطوط النقل التي تربطها (غير مرسومة بمقياس).



ملاحظة: C - الوسطى؛ E - الشرقية؛ NE - شمال شرق؛ NW - شمال غرب؛ S - الجنوبية؛ W - الغربية.

## 4. النتائج والمناقشة

الاحتياطي 15%)، لأن الحمل الذروي سيصل إلى 90 جيجاواط في عام 2040. يوضح الشكل (3) السعات المثبتة لجميع السيناريوهات الثلاثة. كما هو متوقع، يتضمن السيناريو 3 (LRDP) استخداماً كبيراً للطاقة المتجددة نظراً لارتفاع سعر الغاز، مع قدرة إجمالية للطاقة الكهروضوئية تزيد عن 71 جيجاواط بحلول عام 2040. ومن ناحية أخرى، تظهر مصادر الطاقة المتجددة بشكل أقل في السيناريوهات 1 و 2. علاوة على ذلك، فإن نموذج سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة يبني سعة تعمل بالغاز أقل مما هو مطلوب للحمل الذروي، حيث إن الطاقة الكهروضوئية (والقليل من طاقة الرياح) تلبّي الباقي. في عام 2040، تمثل الطاقة الكهروضوئية 44% من إجمالي السعة المتاحة في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة - حوالي 71 جيجاواط - موزعة على النحو التالي: 16.2 جيجاواط في المنطقة الشرقية، 25.9 جيجاواط في المنطقة الوسطى، 22.7 جيجاواط في المنطقة الغربية، 2.2 جيجاواط في المنطقة الجنوبية، 1.4 جيجاواط في المنطقة الشمالية الشرقية، و 3.2 جيجاواط في المنطقة الشمالية الغربية.

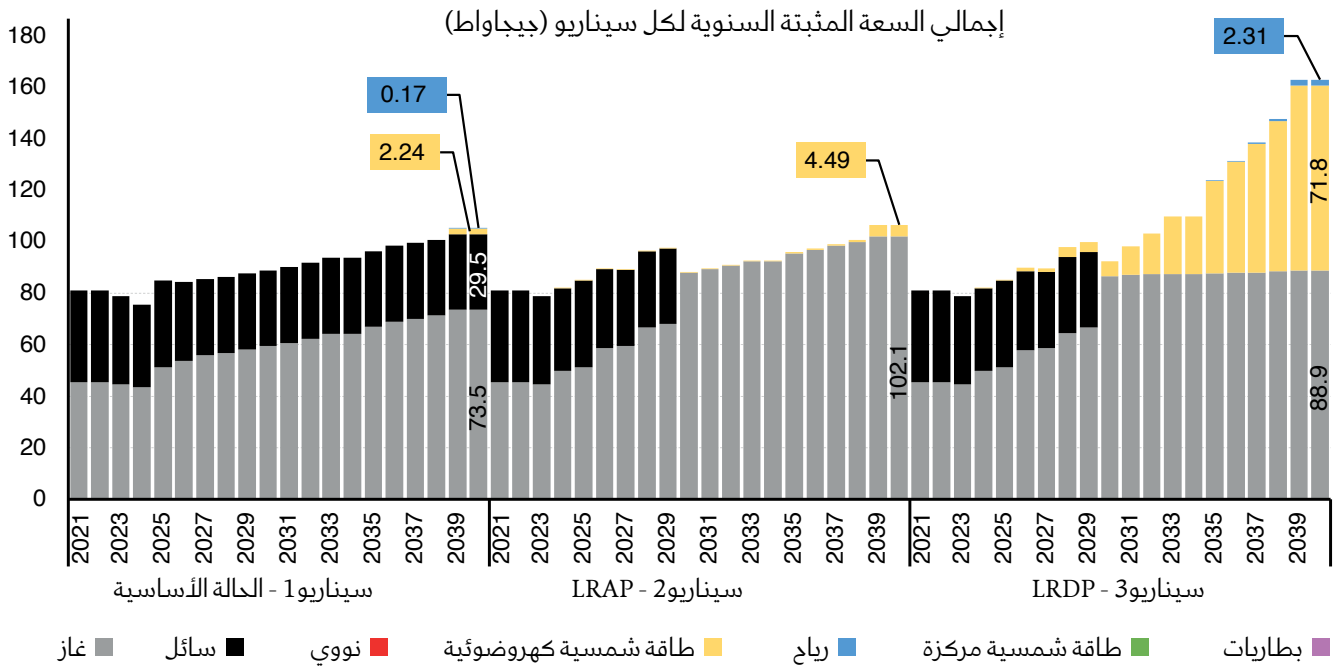
نلاحظ أيضاً أنه في جميع السيناريوهات الثلاثة، لا يبني النموذج توليداً للطاقة الشمسية المركزة أو النووية، ونقدم سببين رئيسيين لذلك. أولاً، كالتقنيتين لهما تكاليف رأسمالية أعلى بكثير من تكاليف الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ثانياً، نظراً لأنه يتم تشغيل النموذج في وضع عدد صحيح، فإن المحطات التي تقل عن 1 جيجاواط غير ممكن بناؤها، مما يزيد من رأس المال الأولي المطلوب. نتيجة لذلك، يلجأ النموذج إلى التقنيات الأخرى المرشحة المتاحة.

كما ذكر سابقاً، يستخدم النموذج التحسين المختلط للأعداد الصحيحة، وهو أكثر دقة من البرمجة الخطية، ولكنه يتطلب موارد حسابية ووقتاً إضافياً. النموذج الذي يتم حله كبير نسبياً، حيث يمتد حتى عام 2040 ويحافظ على الخصائص الزمنية للمشكلة. هذا الأخير مهم خاصة مع مصادر الطاقة المتجددة المستخدمة في نظام الطاقة. كما هو الحال مع جميع ممارسات النمذجة، يجب على النموذج أن يحقق توازناً معقولاً بين الدقة ووقت الحل. باستخدام تسلسل زمني ملائم ودقة زمنية جيدة نسبياً، أجرينا العديد من الاختبارات على جهاز افتراضي (يملك 64 جيجا بايت من RAM و 16 نواة) للوصول إلى إعدادات نموذج معقولة. تراوحت أوقات الحل بين 30 و 60 ساعة اعتماداً على القيود ونظام الحل وإعدادات الحل. تم إنهاء عمليات المحاكاة الأخرى عندما لم يتم التوصل إلى حل بعد ثلاثة أيام. بدلاً من ذلك، أدى الحل الذي استخدم تسلسلاً زمنياً للعينات مع 10 أيام عينة سنوياً إلى تقليل وقت الحل إلى أقل من ست ساعات مع الحفاظ على نتائج مقبولة الدقة. وكمثال، كان إجمالي الانبعاثات لسيناريو الحالة الأساسية الذي تم حله باستخدام التسلسل الزمني المناسب والعيينة في حدود 2% من بعضها البعض. وبالتالي، اعتمدت جميع النتائج الموضحة أدناه، تسلسلاً زمنياً للعينات مع 10 أيام عينة في السنة، وكان الحال المستخدم هو CPLEX.

### 4.1 بناء توليد الطاقة وخصص الكهرباء

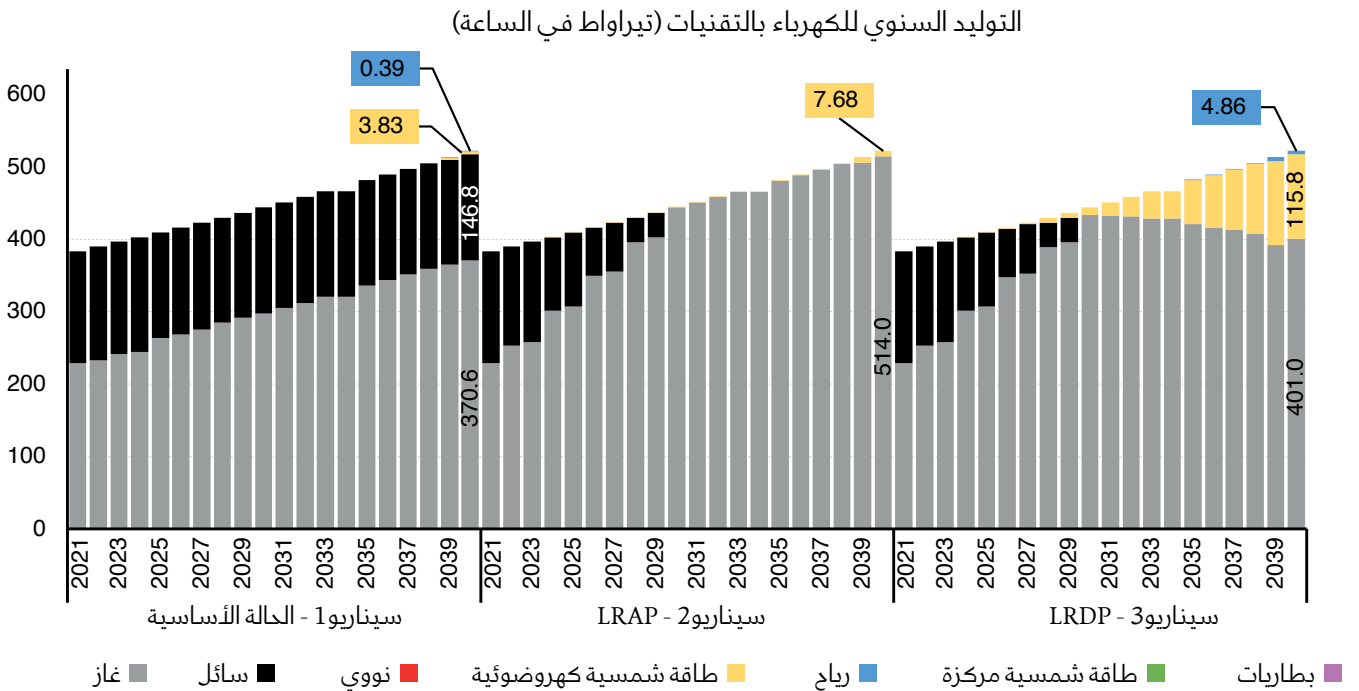
التخلص من الوقود السائل من قطاع الطاقة يترك توليد الطاقة بالغاز فقط كمصدر أساسي للسعة الثابتة، إلى جانب كمية محدودة من مصادر الطاقة المتجددة، كما هو موضح سابقاً. نتيجة لذلك، يمكننا أن نتوقع أن تكون سعة توليد الغاز حوالي 103 جيجاواط (بما في ذلك الهامش

الشكل 3. إجمالي سعة التوليد المتاحة حتى عام 2040.



ملاحظة: تظهر نتائج السيناريو 1 (الحالة الأساسية) على اليسار، ونتائج السيناريو 2 (LRAP) موضحة في المنتصف، ونتائج السيناريو 3 موضحة على اليمين. تمت الإشارة إلى إجمالي السعة المثبتة لعام 2040 فقط.

الشكل 4. حصة الكهرباء بناءً على الوقود لجميع السيناريوهات الثلاثة.



ملاحظة: يُظهر كل من سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة أن السوائل تقلل تدريجياً من حصصها حتى يتم تقاعدها بالكامل في عام 2030.



لا يرى سيناريو الحالة الأساسية وسيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية أي بناء للنقل. ولكن سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة يبني خطأً يربط بين المنطقتين الشرقية والجنوبية يبدأ العمل به في عام 2029. أحد التفسيرات المعقولة لهذا القرار هو الاعتماد الكبير للمنطقة الجنوبية على الوقود السائل. بدلاً من بناء توليد جديد في المنطقة الجنوبية، يرى النموذج قيمة أكبر في ربطه بالمنطقة الشرقية، التي تمتلك سعة غازية كبيرة.

علاوة على ذلك، لا يقوم أي من السيناريوهات ببناء أي تخزين للبطارية؛ يفضل النموذج مزيداً من الترابط داخل المملكة بدلاً من استخدام البطارية، وهذا يعكس نتيجة مهمة لا تحظى عادة بالاهتمام الكافي. على الرغم من أن التخزين يعتبر تقنية تكمل تقطع مصادر الطاقة المتجددة (He et al. 2020)، تتوفر أيضاً خيارات أخرى وقد تكون أقل تكلفة.

من منظور عملي، المملكة هي موطن لمحمية عروق بني معارض للحياة البرية، الواقعة بين المناطق الجنوبية والوسطى. إن خط النقل بين الشرق والجنوب المذكور أعلاه قابل للتنفيذ من الناحية المالية وفقاً للنموذج، ولكن الحصول على تصاريح حق المرور عبر هذه المحمية قد يكون معقداً. علاوة على ذلك، نلاحظ أن التضاريس في المنطقة الجنوبية جبلية. نتيجة لذلك، قد يكون إنشاء خطوط النقل (وإيجاد المواقع المناسبة لاستخدام الطاقة الكهروضوئية) أمراً صعباً.

### 4.3 الانبعاثات

سيؤدي تقاعد استخدام الوقود السائل إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) في قطاع الكهرباء. الطاقة المتجددة ليست خالية من الكربون فحسب، ولكن التوليد المعتمد على الغاز أقل تلويثاً

في الشكل 3، في سيناريو الحالة الأساسية يستمر التوليد القائم على السائل في الوجود طوال فترة الدراسة. ومع ذلك، فإن السعة المثبتة للتوليد القائم على السائل في سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة هي صفر اعتباراً من عام 2030 فصاعداً. لاحظ أنه على الرغم من أن سعة هذه المولدات القائمة على السوائل كبيرة نسبياً حتى عام 2030، إلا أنها لم تستخدم بالكامل بسبب قيود تقاعد الوقود المفروضة (ارجع إلى القسم 3.1 للحصول على التفاصيل). وبالتالي، يوضح الشكل 4 حصص الكهرباء، والذي يعد أكثر إرشاداً وفائدة من هذه الناحية بشكل خاص.

يوضح الشكل (4) كيف يتناقص الطلب على الكهرباء الذي يتم تلبيته من خلال المولدات القائمة على السوائل تدريجياً حتى إزالتها في عام 2030، على الرغم من قدرة التوليد الثابتة نسبياً. توفر الطاقة الكهروضوئية كميات ضئيلة من الطاقة في أول سيناريو هين، ولكن حوالي 22٪ من إجمالي الطلب في عام 2040 في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة. لا يأخذ النموذج في الاعتبار تعديل المولدات الحالية المعتمدة على الوقود السائل لثلاثة أسباب رئيسية: (1) ليس لدينا بيانات تتعلق بالمحطات القابلة للتعديل، (2) ليس لدينا تكاليف التعديل التي تنطبق على كل محطة، (3) لا نعرف ما هي معدلات الحرارة الجديدة بعد التعديل. على الرغم من أنه يمكننا وضع افتراضات معقولة، إلا أننا سوف نكون في شك من النتائج.

### 4.2 بناء خطوط نقل الكهرباء

يأخذ النموذج في الاعتبار كلاً من بناء سعة التوليد والنقل في وقت واحد في التحسين. قبل مناقشة نتائج بناء خطوط النقل، نلاحظ أن الخط قيد الإنشاء حالياً والمخطط لبدء العمل في عام 2026 بين المناطق الغربية والشمالية الغربية سيكون له تأثير كبير على جميع السيناريوهات.



## 4. النتائج والمناقشة

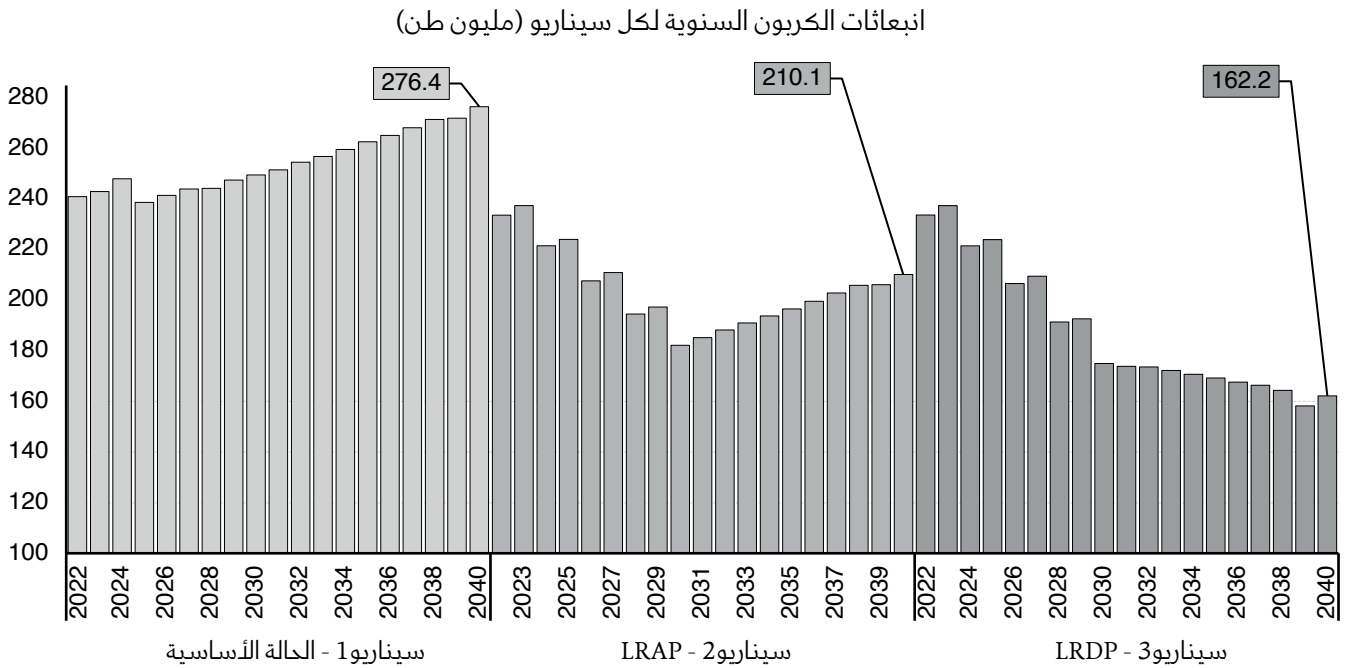
2040، على الرغم من زيادة الطلب على الكهرباء. نعزو هذا بشكل أساسي إلى السعة الكبيرة المستخدمة لمصادر الطاقة المتجددة.

اعتباراً من عام 2018، كانت كثافة انبعاثات المملكة العربية السعودية (Pan et al. 2019) حوالي 0.8 كيلوجرام من ثاني أكسيد الكربون / كيلواط في الساعة (Wogan, Carey, and Cooke 2019). ومع ذلك، فإن كثافة الانبعاثات لسيناريوهات الحالة الأساسية وسحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة تبلغ 0.53 كيلوجرام من ثاني أكسيد الكربون / كيلواط في الساعة، و 0.4 كيلوجرام من ثاني أكسيد الكربون / كيلواط في الساعة، و 0.31 كيلوجرام من ثاني أكسيد الكربون / كيلواط في الساعة، على التوالي.

من التوليد المعتمد على الوقود السائل. في الشكل (5)، نوضح الانبعاثات السنوية لجميع السيناريوهات الثلاثة.

في سيناريو الحالة الأساسية، تزداد الانبعاثات طوال فترة الدراسة، ولكنها تتباطأ في السنوات اللاحقة بسبب بناء الغاز الجديد عالي الكفاءة: في عام 2040، ستبلغ الانبعاثات السنوية حوالي 276 مليون طن. في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية، تنخفض الانبعاثات تدريجياً حتى عام 2030 حيث يتم التخلص التدريجي من الوقود السائل، ثم تزداد مرة أخرى حتى تصل إلى 210 مليون طن في عام 2040. في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، حيث يتبع سعر الغاز (تقريباً) مؤشر Henry Hub بدءاً في عام 2026، تنخفض الانبعاثات إلى حوالي 175 مليون طن في عام 2030، ثم تنخفض بمعدل أبطأ حتى عام

### الشكل 5. انبعاثات الكربون السنوية لكل سيناريو.



ملحوظة: كما هو متوقع، فإن سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة يقلل الانبعاثات أكثر من البقية. ومع ذلك، يتم تقليل كثافة الانبعاثات في جميع السيناريوهات.

## 4.4. استهلاك الغاز والتكلفة

يأخذ تصميم النموذج في الاعتبار العديد من العوامل الرئيسية التي تؤثر على استهلاك الغاز وتكلفته. أولاً، يختلف استهلاك الغاز في المملكة العربية السعودية بشكل كبير خلال العام، حيث يرتفع بشكل حاد في أشهر الصيف بسبب زيادة الطلب على الكهرباء من زيادة استخدام أجهزة تكييف الهواء.

ثانياً، يحتاج القطاع الصناعي في المملكة إلى الغاز للتشغيل والإنتاج، وخاصة صناعة البتروكيماويات. من المنطقة الشرقية الغنية بالنفط والغاز، يسمح نظام الغاز الرئيس بنقل الغاز إلى المناطق الوسطى والغربية والجنوبية. وتوجد حالياً بعض القيود على سعة النقل للغاز الذي يصل إلى المنطقة الغربية. تعتبر حدود نقل الغاز اليومية المحددة سرية (سواء من حيث قيود خطوط الأنابيب أو توفر / تخصيص الغاز). وقد أعلنت المملكة العربية السعودية أنها تعتزم مضاعفة إنتاجها من الغاز بحلول عام 2027 وكذلك توسيع خط الأنابيب الذي يربط بين المنطقتين الشرقية والغربية (Matar and Shabaneh 2020).

عند أخذ كل ذلك في الاعتبار، لا يحتوي النموذج على قيود للغاز، سواء كانت قيود العرض الإجمالية للقطاع بأكمله أو قيود نقل الغاز بين المناطق خلال المواسم المختلفة. هذا الإعداد غير المقيد للنموذج يعطي رؤى حول الحجم الإضافي للغاز الذي سيكون مطلوباً، إن وجد، لتحويل نظام الطاقة في المملكة إلى الغاز بالكامل.

يوضح الشكل (6) استهلاك الغاز السنوي في جميع السيناريوهات الثلاثة ويقارنه مع استهلاك الغاز الفعلي في عام 2019. في سيناريو الحالة الأساسية، يزداد استهلاك الغاز بنحو 110 تريليون وحدة حرارية بريطانية (Tbtu)، أو 5% من مستويات

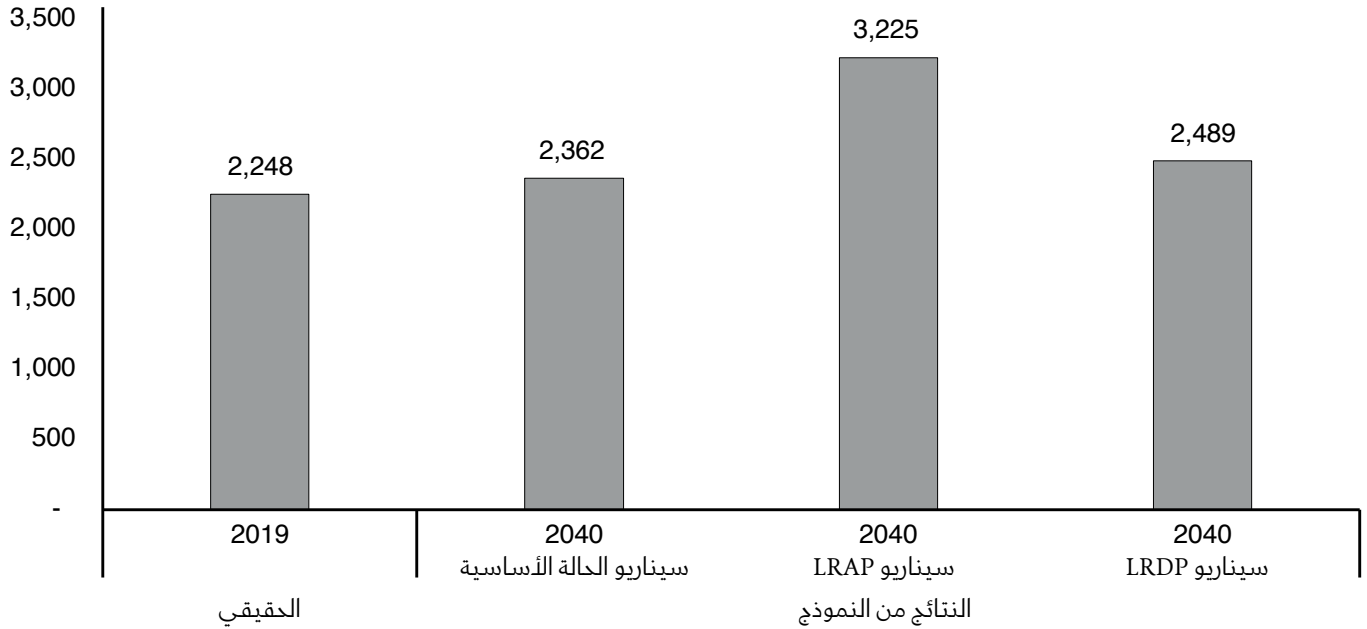
2019. نغزو الارتفاع الطفيف نسبياً في الطلب على الغاز، على الرغم من الزيادة الكبيرة في الطلب على الكهرباء، بشكل أساسي إلى استخدام توربينات غازية جديدة عالية الكفاءة. في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية، حيث تظل أسعار الغاز ثابتة، نرى أن استهلاك الغاز في عام 2040 يزداد بشكل كبير ليصل إلى 3216 تريليون وحدة حرارية بريطانية، حيث يلبي الغاز كل الطلب تقريباً ويعوض الوقود السائل المتقاعد. وفي سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، نرى أن إجمالي استهلاك الغاز لا يبقى قريباً من مستويات 2019، ويرجع ذلك إلى مزيج من توربينات الغاز الجديدة عالية الكفاءة واستخدام ما يقرب من 72 جيجاواط من الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

من المهم إظهار عينة من كمية استهلاك الغاز اليومي في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة على وجه الخصوص لأنه، كما ذكرنا، هناك (حالياً) حدود قصوى يومية على إمدادات الغاز داخل المملكة. يوضح الشكل (7) التوليد ليوم صيفي في عام 2040 بإجمالي حوالي 9 تريليون وحدة حرارية بريطانية. كما هو متوقع، نلاحظ أن الطاقة الكهروضوئية تساهم بشكل كبير في تلبية الطلب خلال النهار. نلاحظ أيضاً أنه مع بدء انخفاض مساهمة الطاقة الكهروضوئية في منتصف النهار تقريباً، يزيد توليد الطاقة التي تعمل بالغاز للتعويض، ونلاحظ "منحنى البطة" المعروف (Wong et al. 2020). علاوة على ذلك، نلاحظ أنه على مستوى الدولة، يُظهر سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة أن المملكة العربية السعودية ستحتاج فقط إلى نفس الكمية من الغاز في عام 2040 كما فعلت في عام 2019، ولكن تختلف متطلبات الغاز بشكل كبير على المستوى الإقليمي.

## 4. النتائج والمناقشة

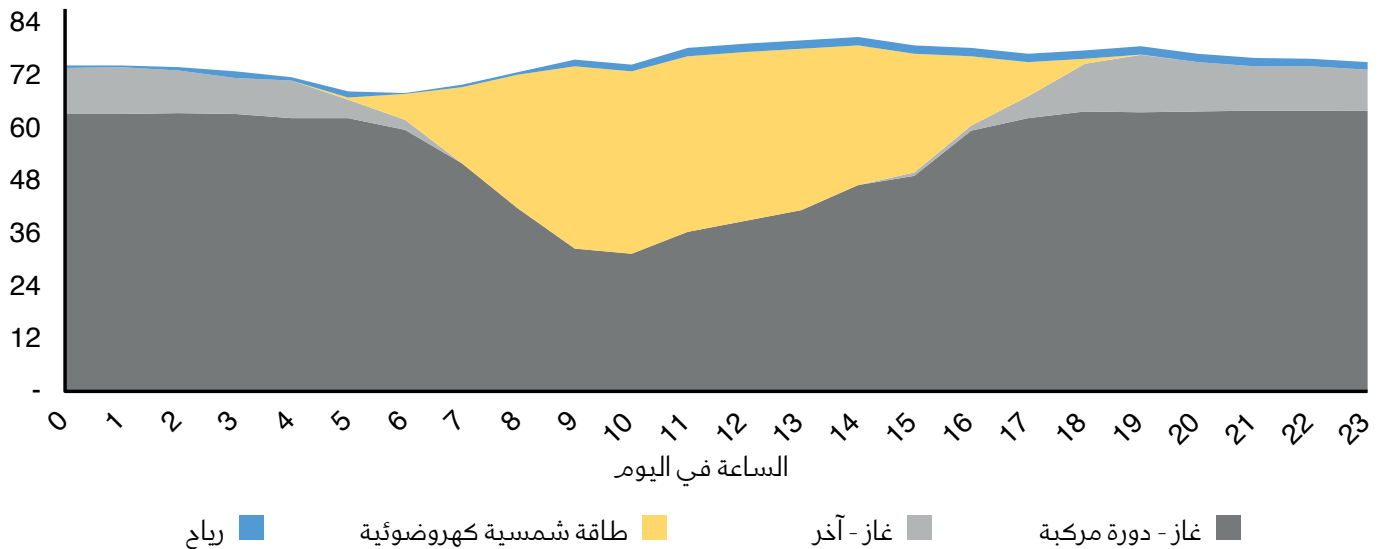
الشكل 6: إجمالي استهلاك الغاز السنوي لعام 2019 مقارنة بنتائج النموذج لجميع السيناريوهات الثلاثة في عام 2040.

إجمالي اقتطاع الغاز السنوي (تريليون وحدة حرارية بريطانية)



الشكل 7: إرسال النظام في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة في أحد أيام الصيف في عام 2040.

الإرسال في 30 يوليو 2040 (جيجاواط)



ملاحظة: يمثل المكون "غاز-آخر" توربينات أحادية الدورة وتوربينات بخارية.

تخفيضات كبيرة في انبعاثات الكربون، كما هو مذكور في القسم (4.3)، بنسبة 25% و 41% على التوالي مقابل سيناريو الحالة الأساسية في عام 2040.

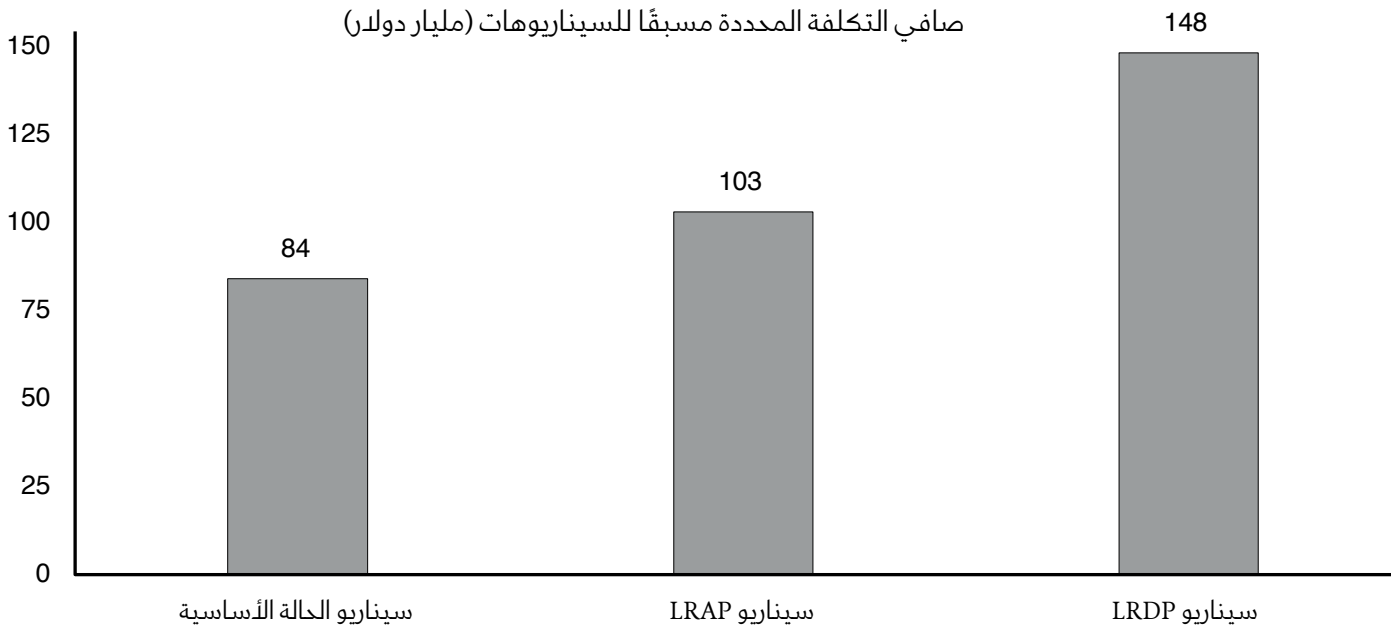
يلخص الشكل (8) التكاليف المرتبطة مباشرة بتوليد الطاقة (الوقود، وبناء النقل، وبناء التوليد، وما إلى ذلك) ولكنه يستبعد استكشاف الغاز، وتوسيع خطوط أنابيب الغاز، وما إلى ذلك. ومع ذلك، نذكر أن سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية يتطلب استهلاك غاز أكبر بكثير من سيناريو الحالة الأساسية. من المحتمل أن يستلزم ذلك إمداد غاز إضافي وتوسيع شبكة الغاز. من ناحية أخرى، لا يتطلب سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة أي إمدادات غاز إضافية، ولكنه يتطلب توسيع شبكة الغاز فقط. مع أخذ ذلك في الاعتبار، قد ينتهي الأمر بسيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية ليكون الخيار الأكثر تكلفة، بما في ذلك التكاليف الضرورية للتنقيب عن الغاز وتوسيع الشبكة.

لم يتم تحمل التكاليف الإضافية لسيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة عبثًا. كما هو مفصل في القسم (4.3)، يؤدي كل من سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة إلى انخفاض كبير في الانبعاثات مقارنةً بسيناريو الحالة الأساسية. وبحلول عام 2040، ينتج عن سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة انخفاضًا في الانبعاثات بنسبة 25% و 41% مقارنةً بسيناريو الحالة الأساسية.

كذلك نقارن استهلاك الغاز في عام 2019 في المنطقة الغربية بنتائج النموذج في عام 2040. وكما ذكر أعلاه، تعتمد المنطقة الغربية حاليًا بشكل كبير على الوقود السائل، وهناك خطط لتوسيع خط أنابيب الغاز الشرقي-الغربي. في عام 2019، استهلكت المنطقة الغربية 136 تريليون وحدة حرارية بريطانية فقط من الغاز، بينما وجد النموذج أنها ستتطلب حوالي 862 تريليون وحدة حرارية بريطانية و 614 تريليون وحدة حرارية بريطانية من الغاز في سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، على التوالي، لتلبية الطلب على الكهرباء في عام 2040، مما يسلط الضوء على حجم الاستثمار في البنية التحتية للغاز اللازمة للمملكة لترك الاعتماد على الوقود السائل. يمكن القيام بذلك من خلال توسيع نظام الغاز الرئيس، أو اللجوء إلى تخزين الغاز عبر طبقات المياه الجوفية أو خزانات النفط / الغاز المستنفدة، أو استيراد الغاز، أو مزيج منهما.

لا شك أن سيناريوهات السياسات الثلاثة التي تم تناولها في هذه الدراسة ستتحقق بتكاليف مختلفة. ونذكر القارئ بأن البدائل والخيارات المطروحة لا تدفعها أو تحكمها الاقتصاديات فحسب كما تمت مناقشة ذلك بالتفصيل في القسم (2). يعرض الشكل (8) صافي التكلفة المحددة مسبقًا (على مدى 20 عامًا) للسيناريوهات الثلاثة. يعتبر سيناريو الحالة الأساسية، الذي يستخدم المولدات التي تعمل بالسوائل على مدى التخطيط، هو الخيار الأقل تكلفة، بينما يعد سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة هو الخيار الأكثر تكلفة. بالطبع، تؤدي التكاليف الإضافية لسيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة إلى

الشكل 8. صافي التكاليف الحالية للسيناريوهات التي تمت دراستها.



ملاحظة: لا تشمل هذه التكاليف تكاليف التنقيب عن الغاز أو توسعة البنية التحتية للغاز. وكان معدل الخصم المستخدم 5٪.

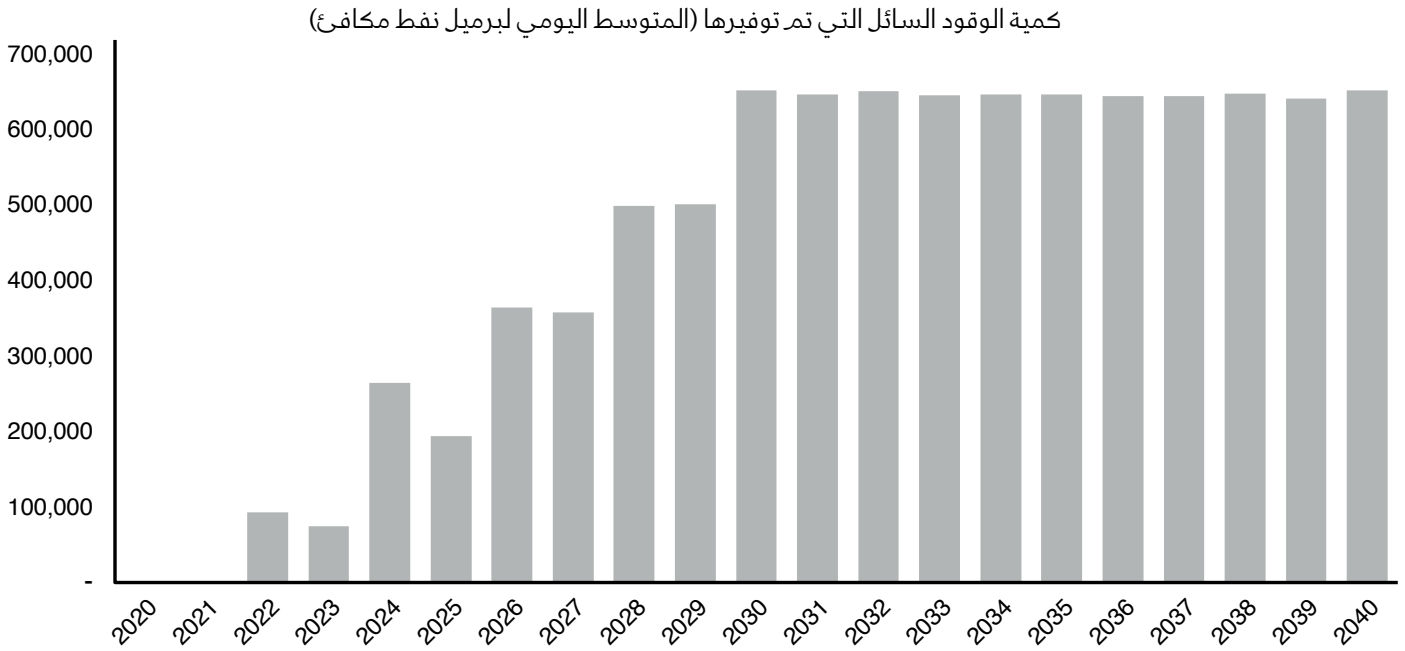
نظر مالية بحتة، تقاعد الوقود السائل من قطاع الطاقة. بمعنى آخر، يجب أن يكون للاستثمارات المخططة قيمة صافية أكبر من الفرق بين سيناريو الحالة الأساسية والسيناريوهات الأخرى. يقدم الشكل (9) تقديرًا للنفط الذي تم توفيره (في براميل النفط المكافئ، BOE) لمدى التخطيط بأكمله.

سيكون هناك، على أساس متوسط يومي، حوالي 650000 برميل من النفط المكافئ تم تجنبها من عام 2030 فصاعدًا بناءً على نتائج النموذج. تبدو هذه النتيجة واقعية، حيث تقع تقريبًا ضمن النطاق نفسه لمستويات الاستهلاك الحالية للوقود السائل في المملكة. من هنا، يمكن استنتاج معدل أدنى للتأكد من أن برميل النفط الذي يتم توفيره، والذي سيتم تصديره إلى السوق الدولية، أو استخدامه كمادة وسيطة في الصناعات المناسبة، أو غير ذلك، سيحقق الحد الأدنى من العوائد المطلوبة.

يمكننا النظر في صافي تكاليف القيمة الحالية في الشكل (8) بعدة طرق. أحدها هو تحديد سياسة سعر الكربون المكافئ الذي سينتج عنه نفس المقدار من خفض انبعاثات الكربون و/أو استخدام الطاقة المتجددة. يمكن حساب ضريبة الكربون المكافئة (بسعر الدولار الأمريكي في عام 2021) بأخذ نسبة الفرق في صافي التكاليف الحالية إلى الفرق في إجمالي الانبعاثات؛ ينتج عن هذا ما يقرب من 20 دولارًا أمريكيًا و 50 دولارًا أمريكيًا للطن في سيناريوهات سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، على التوالي. يمكن النظر إلى نفس القيم على أنها تكلفة التخفيض التي يجب على الحكومة تحملها لتقليل الانبعاثات في كلا السيناريوهين.

يمكن أيضًا وضع الشكل (8) في سياقه استنادًا إلى عائدات النفط التي يجب تحقيقها لتبرير، من وجهة

الشكل 9. متوسط التوفير اليومي في النفط وفقاً للنموذج.



ملاحظة: تم حساب النتائج أعلاه على أنها الفرق بين تفرغ الوقود السائل في سيناريو BAU وتفرغ الوقود السائل في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية. لاحظ كيف يستقر النفط الذي تم توفيره عند حوالي 650000 برميل من النفط المكافئ يومياً ابتداءً من عام 2030 وما بعده.

## 5. الخاتمة وملخص السيناريوهات

ركزت على السعودية من خلال تمديد فترة الدراسة حتى عام 2040، واستخدام نهج العدد الصحيح للتحسين، وتقسيم المملكة إلى ست مناطق بدلاً من أربع مناطق. يلخص الجدول (3) العديد من النتائج الرئيسية من النمذجة التي أجريت في هذه الدراسة.

باستخدام نموذج للطاقة، قمنا بدراسة سيناريوهات مستقبلية لتقديم رؤى حول الآثار المالية والانبعاثات والتأثيرات الأخرى المحتملة التي قد تنتج عن إزالة الوقود السائل من قطاع الكهرباء في المملكة العربية السعودية. تميز هذه الدراسة نفسها عن الدراسات السابقة التي

الجدول 3. النتائج الرئيسية من النموذج لجميع السيناريوهات الثلاثة.

| المعيار   | السيناريو 1: BC | السيناريو 2: LRAP | السيناريو 3: LRDP |
|---|-----------------|-------------------|-------------------|
| إجمالي استهلاك الغاز في عام 2040 (تريليون وحدة حرارية بريطانية)                   | 2,362           | 3,225             | 2,489             |
| إجمالي استهلاك الغاز في المنطقة الغربية عام 2040 * (تريليون وحدة حرارية بريطانية) | 195             | 862               | 614               |
| الانبعاثات السنوية في عام 2040 (مليون طن)   | 276             | 210               | 162               |
| كثافة الانبعاثات في عام 2040 (كيلوجرام · ثاني أكسيد الكربون / كيلوواط ساعة)       | 0.53            | 0.40              | 0.31              |
| إجمالي السعة المثبتة في عام 2040 (جيجاواط)  | 105.4           | 106.6             | 163               |
| السعة الكهروضوئية المثبتة في عام 2040 (جيجاواط)                                   | 2.2             | 4.5               | 71.8              |

\* تشمل المناطق الغربية والشمالية الغربية.

ملاحظة: الحالة الأساسية (BC)، وسحب السوائل بأسعار الغاز غير الخاضعة للضوابط التنظيمية (LRAP)، وسحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة (LRDP). يصل الاستهلاك والحمل الذروي إلى 520 تيراواط في الساعة و 90 جيجاواط على التوالي في عام 2040.

هذه الدراسة (أي تقاعد الوقود السائل). يشجع سيناريو ارتفاع أسعار الغاز على استخدام الطاقة الكهروضوئية ويؤدي إلى تقليل الانبعاثات، ولكن بتكلفة كبيرة، والتي يمكن تفسيرها على أنها تكلفة للحد من الانبعاثات (Wang et al. 2020). كما أنه بمثابة دليل لكيفية استثمار براميل النفط التي تم توفيرها.

وفقًا لأسعار الوقود الأحفوري المُدارة حاليًا، نجد أنه من الصعب على التقنيات البديلة أن تنافس على الرغم من التخفيضات الكبيرة في التكلفة والتقدم التكنولوجي الذي حققته هذه التقنيات الجديدة. علاوة على ذلك، تعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي التكنولوجيا البديلة الوحيدة التي يمكن استخدامها بفعالية على نطاق في سياق

يمكن لتكنولوجيا التخزين معالجة التقطع المتأصل في مصادر الطاقة المتجددة، وهو موضوع متكرر في الدراسات السابقة. ومع ذلك، كما هو موضح في هذه الدراسة، قد يوفر الربط الأفضل بين نقاط تقاطع الشبكة طريقًا أقل تكلفة مقارنة مع حلول التخزين. وجدت هذه الدراسة أن التخزين لن يكون فعالاً من حيث التكلفة في السيناريوهات التي تم دراستها، حتى في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، والذي يستخدم كمية كبيرة من الطاقة الكهروضوئية. ينبغي أن يتنبه صناع السياسات والمستثمرين من الافتراض الفوري بأن التكامل بين التخزين والطاقة الشمسية هو الخيار الأمثل دون النظر إلى بيانات الحمل، ومرونة التوليد المتاح، وإمكانية ربط كهربائي أفضل.

نجد أيضًا أن رفع أسعار الغاز أو تحريرها يؤدي إلى إعادة توزيع الطلب على الغاز داخل المناطق، كما هو موضح في الجدول (2). في عام 2040، ستتطلب المنطقة الغربية ما يقرب من ثلاثة أضعاف الغاز في سيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة مما هو عليه في سيناريو الحالة الأساسية. ومع ذلك، بشكل عام، يحتوي كلا السيناريوهين على إجمالي مماثل للطلب على الغاز. بعبارة أخرى، حتى بالنسبة لسيناريو سحب السوائل بأسعار الغاز الخاضعة للإدارة، قد تكون الاستثمارات في نقل الغاز المحلي بين المناطق كل ما هو مطلوب، مما يؤدي إلى تجنب الحاجة إلى زيادة إمدادات الغاز في قطاع الطاقة. هذا التمييز هو ملاحظة مهمة نتجت عن التحليل العددي الذي أجري في هذه الدراسة.



- Ashrafi, Zabihollah Najafian, Masoud Ghasemian, Misagh Irandoost Shahrestani, Erfan Khodabandeh, and Ahmad Sedaghat. 2018. "Evaluation of Hydrogen Production from Harvesting Wind Energy at High Altitudes in Iran by Three Extrapolating Weibull Methods." *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (6): 3110-3132.
- Babatunde, Olubayo M., Josiah L. Munda, and Yskandar Hamam. 2019. "A Comprehensive State-of-the-art Survey on Power Generation Expansion Planning with Intermittent Renewable Energy Source and Energy Storage." *International Journal of Energy Research* 43 (12): 6078-6107.
- Blazquez, Jorge, Baltasar Manzano, Lester Hunt, and Axel Pierru. 2020. "The Value of Saving Oil in Saudi Arabia." *Economics of Energy and Environmental Policy* 9 (1): 207-222.
- Bohlmann, Heinrich R., Jonathan Mark Horridge, Roula Inglesi-Lotz, Elizabeth L. Roos, and Lardo Stander. 2019. "Regional Employment and Economic Growth Effects of South Africa's Transition to Low-carbon Energy Supply Mix." *Energy Policy* 128:830-837.
- Bradshaw, Michael, Thijs Van de Graaf, and Richard Connolly. 2019. "Preparing for the New Oil Order? Saudi Arabia and Russia." *Energy Strategy Reviews* 26:100374.
- 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.
- Brouwer, Anne Sjoerd, Machteld van den Broek, William Zappa, Wim C. Turkenburg, and André Faaij. 2016. "Least-cost Options for Integrating Intermittent Renewables in Low-carbon Power Systems." *Applied Energy* 161:48-74.
- Buchholz, Stefanie, Mette Gamst, and David Pisinger. 2019. "A Comparative Study of Time Aggregation Techniques in Relation to Power Capacity Expansion Modeling." *TOP* 27 (3): 353-405.
- Cebulla, Felix, Tobias Naegler, and Markus Pohl. 2017. "Electrical Energy Storage in Highly Renewable European Energy Systems: Capacity Requirements, Spatial Distribution, and Storage Dispatch." *Journal of Energy Storage* 14:211-223.
- Dagoumas, Athanasios S., and Nikolaos E. Koltsaklis. 2019. "Review of Models for Integrating Renewable Energy in the Generation Expansion Planning." *Applied Energy* 242:1573-1587.
- Das, Saptarshi, Eric Hittinger, and Eric Williams. 2020. "Learning Is Not Enough: Diminishing Marginal Revenues and Increasing Abatement Costs of Wind and Solar." *Renewable Energy* 156:634-644.
- Denholm, Paul, Yih-Huei Wan, Marissa Hummon, and Mark Mehos. 2013. "Analysis of Concentrating Solar Power with Thermal Energy Storage in a California 33% Renewable Scenario." National Renewable Energy Lab, Golden, Colorado, United States.

- Diaz, Gabriel, Andrés Inzunza, and Rodrigo Moreno. 2019. "The Importance of Time Resolution, Operational Flexibility and Risk Aversion in Quantifying the Value of Energy Storage in Long-term Energy Planning Studies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112:797-812.
- Electricity and Cogeneration Regulatory Authority (ECRA). 2020. Annual Statistical Booklet for Electricity and Seawater Desalination Industries. Saudi Arabia: ECRA.
- Elshurafa, Amro M., Abdullah M. Alsubaie, Ayman A. Alabduljabbar, and Shafi A. Al-Hsaien. 2019. "Solar PV on Mosque Rooftops: Results from a Pilot Study in Saudi Arabia." *Journal of Building Engineering* 25:100809.
- Elshurafa, Amro M., and Nawaz Peerbocus. 2020. "Electric Vehicle Deployment and Carbon Emissions in Saudi Arabia: A Power System Perspective." *Electricity Journal* 33 (6): 106774.
- Emodi, Nnaemeka Vincent, Chinenye Comfort Emodi, Girish Panchakshara Murthy, and Adaeze Saratu Augusta Emodi. 2017. "Energy Policy for Low Carbon Development in Nigeria: A LEAP Model Application." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68:247-261.
- Energy Information Administration (EIA). 2020a. Annual Energy Outlook 2020. United States: EIA.
- . 2020b. Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies. United States: EIA.
- Felder, Frank A. 2016. "Why Can't We All Get Along? A Conceptual Analysis and Case Study of Contentious Energy Problems." *Energy Policy* 96:711-716.
- Frew, Bethany A., Wesley J. Cole, Yinong Sun, Trieu T. Mai, and James Richards. 2017. "8760-based Method for Representing Variable Generation Capacity Value in Capacity Expansion Models." National Renewable Energy Lab, Golden, Colorado, United States.
- Gacitua, L., P. Gallegos, R. Henriquez-Auba, A. Lorca, M. Negrete-Pincetic, D. Olivares, A. Valenzuela, and G. Wenzel. 2018. "A Comprehensive Review on Expansion Planning: Models and Tools for Energy Policy Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98:346-360.
- Gallo, Michela, Luca Moreschi, Michela Mazzocchi, Veronica Marotta, and Adriana Del Borghi. 2020. "Sustainability in Maritime Sector: Waste Management Alternatives Evaluated in a Circular Carbon Economy Perspective." *Resources* 9 (4): 41.
- Groissböck, Markus, and Matthias J. Pickl. 2018. "Fuel-price Reform to Achieve Climate and Energy Policy Goals in Saudi Arabia: A Multiple-scenario Analysis." *Utilities Policy* 50:1-12.
- Grubler, Arnulf. 2010. "The Costs of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing." *Energy Policy* 38 (9): 5174-5188.
- He, Gang, Jiang Lin, Froylan Sifuentes, Xu Liu, Nikit Abhyankar, and Amol Phadke. 2020. "Rapid Cost Decrease of Renewables and Storage Accelerates the Decarbonization of China's Power System." *Nature Communications* 11 (1): 1-9.
- Heuberger, Clara F., Edward S. Rubin, Iain Staffell, Nilay Shah, and Niall Mac Dowell. 2017. "Power Capacity Expansion Planning Considering Endogenous Technology Cost Learning." *Applied Energy* 204:831-845.

International Renewable Energy Association (IRENA). 2019. Renewable Power Generation Costs in 2018. UAE: IRENA.

———. 2020. Renewable Power Generation Costs in 2019. UAE: IRENA.

Koltsaklis, Nikolaos E., and Athanasios S. Dagoumas. 2018. "State-of-the-art Generation Expansion Planning: A Review." *Applied Energy* 230:563-589.

Lazard. 2019. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 13.0. New York, United States: Lazard.

Lumbreras, Sara, and Andrés Ramos. 2016. "The New Challenges to Transmission Expansion Planning. Survey of Recent Practice and Literature Review." *Electric Power Systems Research* 134:19-29.

Maloney, P., P. Chitkara, J. McCalley, B.F. Hobbs, C.T.M. Clack, M.A. Ortega-Vazquez, A. Tuohy, A. Gaikwad, and J. Roark. 2020. "Research to Develop the Next Generation of Electric Power Capacity Expansion Tools: What Would Address the Needs of Planners?" *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 121:106089.

Matallah, Siham. 2020. "Economic Diversification in MENA Oil Exporters: Understanding the Role of Governance." *Resources Policy* 66:101602.

Matar, Walid, and Murad Anwer. 2017. "Jointly Reforming the Prices of Industrial Fuels and Residential Electricity in Saudi Arabia." *Energy Policy* 109:747-756.

Matar, Walid, Rodrigo Echeverri, and Axel Pierru. 2016. "The Prospects for Coal-fired Power Generation in Saudi Arabia." *Energy Strategy Reviews* 13-14:181-190.

Matar, Walid, Frederic Murphy, Axel Pierru, Bertrand Rioux, and David Wogan. 2017. "Efficient Industrial Energy Use: The First step in Transitioning Saudi Arabia's Energy Mix." *Energy Policy* 105:80-92.

Matar, Walid, and Rami Shabaneh. 2020. "Viability of Seasonal Natural Gas Storage in the Saudi Energy System." *Energy Strategy Reviews* 32:100549

Mehrabadi, Reza Allahdadi, Mohsen Parsa Moghaddam, and Mohammad Kazem Sheikh-El-Eslami. 2020. "Generation Expansion Planning in Multi Electricity Markets Considering Environmental Impacts." *Journal of Cleaner Production* 243:118611.

Miao, Pei, Zhaojuan Yue, Tong Niu, As'ad Alizadeh, and Kittisak Jermsittiparsert. 2021. "Optimal Emission Management of Photovoltaic and Wind Generation Based Energy Hub System Using Compromise Programming." *Journal of Cleaner Production* 281:124333.

Mikayilov, Jeyhun I., Abdulelah Darandary, Ryan Alyamani, Fakhri J. Hasanov, and Hatem Alatawi. 2020. "Regional Heterogeneous Drivers of Electricity Demand in Saudi Arabia: Modeling Regional Residential Electricity Demand." *Energy Policy* 146:111796.

National Rural Electric Cooperative Association (NRECA). 2019. "Battery Energy Storage Review." United States: NRECA.

- Pan, Xiongfeng, Md Kamal Uddin, Bowei Ai, Xianyou Pan, and Umme Saima. 2019. "Influential Factors of Carbon Emissions Intensity in OECD Countries: Evidence from Symbolic Regression." *Journal of Cleaner Production* 220:1194-1201.
- Pean, Emmanuel, Marouf Pirouti, and Meysam Qadrdan. 2016. "Role of the GB-France Electricity Interconnectors in Integration of Variable Renewable Generation." *Renewable Energy* 99:307-314.
- Reimers, Andrew, Wesley Cole, and Bethany Frew. 2019. "The Impact of Planning Reserve Margins in Long-term Planning Models of the Electricity Sector." *Energy Policy* 125:1-8.
- Riva, Fabio, Francesco Gardumi, Annalisa Tognollo, and Emanuela Colombo. 2019. "Soft-linking Energy Demand and Optimisation Models for Local Long-term Electricity Planning: An Application to Rural India." *Energy* 166:32-46.
- Saudi Gazette. 2020. "Saudi Arabia to Fully Rely on Gas and Renewables in Future - Minister." February 25. <https://saudigazette.com.sa/article/589743/SAUDI-ARABIA/Saudi-Arabia-to-rely-fully-on-gas-and-renewable-energy-in-future-minister>
- Smith, Kandler, Aron Saxon, Matthew Keyser, Blake Lundstrom, Ziwei Cao, and Albert Roc. 2017. "Life Prediction Model for Grid-connected Li-ion Battery Energy Storage System." 2017 American Control Conference, Seattle, Washington, United States, May 24-26.
- Soria, Rafael, André F.P. Lucena, Jan Tomaschek, Tobias Fichter, Thomas Haasz, Alexandre Szklo, Roberto Schaeffer, Pedro Rochedo, Ulrich Fahl, and Jürgen Kern. 2016. "Modelling Concentrated Solar Power (CSP) in the Brazilian Energy System: A Soft-linked Model Coupling Approach." *Energy* 116:265-280.
- Steffen, Bjarne, Martin Beuse, Paul Tautorat, and Tobias S. Schmidt. 2020. "Experience Curves for Operations and Maintenance Costs of Renewable Energy Technologies." *Joule* 4 (2): 359-375.
- Sullivan, Patrick, Wesley Cole, Nate Blair, Eric Lantz, Venkat Krishnan, Trieu Mai, David Mulcahy, and Gian Porro. 2015. "2015 Standard Scenarios Annual Report: US Electric Sector Scenario Exploration." National Renewable Energy Lab, Golden, Colorado, United States.
- Tuohy, Aidan, and Mark O'Malley. 2011. "Pumped Storage in Systems with Very High Wind Penetration." *Energy Policy* 39 (4): 1965-1974.
- Van den Bergh, Kenneth, and Erik Delarue. 2015. "Cycling of Conventional Power Plants: Technical Limits and Actual Costs." *Energy Conversion and Management* 97:70-77.
- Victor, Nadejda, Christopher Nichols, and Charles Zelek. 2018. "The US Power Sector Decarbonization: Investigating Technology Options with MARKAL Nine-region Model." *Energy Economics* 73:410-425.
- Wang, Zhaohua, Haitao Chen, Ru Huo, Bo Wang, and Bin Zhang. 2020. "Marginal Abatement Cost under the Constraint of Carbon Emission Reduction Targets: An Empirical Analysis for Different Regions in China." *Journal of Cleaner Production* 249:119362.
- Wierzbowski, Michal, Wojciech Lyzwa, and Izabela Musial. 2016. "MILP Model for Long-term Energy Mix Planning with Consideration of Power System Reserves." *Applied Energy* 169:93-111.

Wogan, David, Elizabeth Carey, and Douglas Cooke. 2019. "Policy Pathways to Meet Saudi Arabia's Contribution to the Paris Agreement." Saudi Arabia: King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC).

Wong, Ling Ai, Vigna K. Ramachandaramurthy, Sara L. Walker, and Janaka B. Ekanayake. 2020. "Optimal Placement and Sizing of Battery Energy Storage System Considering the Duck Curve Phenomenon." *IEEE Access* 8:197236-197248.

Zeljko, Mladen, Marko Aunedi, Goran Slipac, and Dražen Jakšić. 2020. "Applications of Wien Automatic System Planning (WASP) Model to Non-Standard Power System Expansion Problems." *Energies* 13 (6): 1392.

الجدول A1. التكاليف الرأسمالية للتقنيات المرشحة المستخدمة في النموذج على مدى فترة الدراسة. جميع التكاليف المدرجة أدناه بالدولار الأمريكي للكيلوواط.

| التخزين | التقنية |        |       |     | السنة |
|---------|---------|--------|-------|-----|-------|
|         | النووي  | الرياح | CSP   | PV  |       |
| 1,100   | 6,553   | 1,159  | 3,669 | 773 | 2021  |
| 1,005   | 6,506   | 1,139  | 3,616 | 736 | 2022  |
| 918     | 6,451   | 1,120  | 3,563 | 703 | 2023  |
| 840     | 6,414   | 1,100  | 3,511 | 674 | 2024  |
| 760     | 6,396   | 1,080  | 3,460 | 646 | 2025  |
| 750     | 6,376   | 1,064  | 3,409 | 626 | 2026  |
| 708     | 6,353   | 1,046  | 3,360 | 607 | 2027  |
| 678     | 6,322   | 1,028  | 3,311 | 589 | 2028  |
| 650     | 6,280   | 1,010  | 3,263 | 572 | 2029  |
| 640     | 6,246   | 992    | 3,215 | 555 | 2030  |
| 620     | 6,213   | 974    | 3,168 | 538 | 2031  |
| 600     | 6,177   | 961    | 3,211 | 522 | 2032  |
| 586     | 6,143   | 942    | 3,077 | 508 | 2033  |
| 571     | 6,114   | 927    | 3,032 | 493 | 2034  |
| 560     | 6,077   | 912    | 2,988 | 479 | 2035  |
| 549     | 6,043   | 896    | 2,944 | 466 | 2036  |
| 538     | 6,008   | 881    | 2,901 | 454 | 2037  |
| 528     | 5,976   | 866    | 2,859 | 442 | 2038  |
| 520     | 5,940   | 850    | 2,817 | 431 | 2039  |
| 518     | 5,906   | 833    | 2,776 | 419 | 2040  |

ملحوظة: PV = الطاقة الشمسية الكهروضوئية، CSP = الطاقة الشمسية المركزة

المصادر: البيانات التي تم الحصول عليها من BNEF كمتوسط قيم للتركيبات العالمية؛ تم جمع بيانات الإنفاق الرأسمالي للطاقة الشمسية المركزة من Sullivan وآخرون (2015).

الجدول A2. المهلة الزمنية والعمر، بالسنوات، للتقنيات المرشحة.

| العمر | المهلة الزمنية | التقنية                |
|-------|----------------|------------------------|
| 25    | 2              | الطاقة الكهروضوئية     |
| 30    | 3              | الطاقة الشمسية المركزة |
| 25    | 2              | الرياح                 |
| 50    | 10             | النووي                 |
| 7     | 3              | تخزين البطارية         |
| 35    | 2              | الغاز - الدورة المركبة |
| 20    | 2              | غاز - دورة واحدة       |

المصادر: (2017) Matar et al., (2017) Matar and Anwer, (2017) Smith et al., (2019) NRECA

الجدول A3. افتراضات التكلفة الثابتة والمتغيرة المستخدمة في النموذج.

| التقنية                | التكاليف الثابتة (دولار أمريكي / كيلوواط / سنة) | التكلفة المتغيرة لغير الوقود (دولار أمريكي / ميغاواط في الساعة) |
|------------------------|---|---|
| الطاقة الكهروضوئية     | 10  | -   |
| الطاقة الشمسية المركزة | 50  | 3.2   |
| الرياح                 | 20  | -   |
| النووي                 | 110   | 3.5   |
| تخزين                  | 20  | -   |
| الغاز - الدورة المركبة | 12  | 3.5   |
| غاز - دورة واحدة       | 10  | 6   |

المصادر: (2015) al. Sullivan et, (2017) Matar and Anwer, (2018) Groissböck and Pickl, (2019; 2020) IRENA, (2019) Lazard

الجدول A4. عوامل انبعاث الكربون للوقود وأسعار الوقود المستخدمة في النموذج.

| سعر الوقود (دولار أمريكي / مليون وحدة حرارية بريطانية) | معاملات الانبعاث (جنيه / مليون وحدة حرارية بريطانية) <sup>2</sup> | التقنية            |
|--|---|--------------------|
| 1.250  | 130.2   | الغاز <sup>3</sup> |
| 1.144  | 170.8   | نفط خام            |
| 0.600  | 189.4   | زيت الوقود الثقيل  |
| 2.410  | 172.4   | ديزل               |

<sup>1</sup> تختلف عوامل الانبعاث في الدراسات السابقة بنسبة قليلة.

<sup>2</sup> تم استخدام سعر الغاز في السيناريوهين 1 و 2. وعلى أي حال، في السيناريو 3، ارتفع سعر الغاز إلى 3.00 دولار أمريكي / مليون وحدة حرارية بريطانية اعتباراً من 2026.

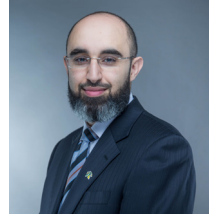




## نبذة عن المؤلفين

### عمرو الشرفا

عمرو زميل باحث في كابسارك، مع ما يقرب من 20 عامًا من الخبرة في مجالات الطاقة والتكنولوجيا في ثلاث قارات. ويهتم في مجال أبحاثه بسياسات الطاقة المتجددة، ونمذجة نظم الطاقة، وتصميم وتحسين الشبكات الهجينة. وقد قاد و نفذ العديد من مبادرات النمذجة الوطنية على نطاق التوزيع والمولدات. ونشر أكثر من 40 ورقة وبحث علمي وسجل العديد من براءات الاختراع. وهو حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية، وعلى ماجستير إدارة الأعمال في التمويل.



### حاتم العطوي

حاتم محلل بحوث أول في كابسارك. وحاصل على درجة الماجستير في اقتصاديات نظام الطاقة والتركيز على أسواق الكهرباء من المعهد الملكي للتكنولوجيا في السويد. وحاصل على درجة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية من جامعة أيداهو.



عمل حاتم قبل انضمامه لكابسارك في مختلف الصناعات. وتدرّب في مجموعة إيه بي بي في فاستيراس بالسويد، حيث عمل في إدارة أصول السيارات الكهربائية تحت مشروع أنظمة الطرق الكهربائية التابعة لإدارة النقل السويدية. كما عمل حاتم في مختبرات شوايتزر الهندسية في ولاية واشنطن، حيث عمل على نمذجة معدلات السرعة والمحركات الأساسية للتوربينات المائية والغازية.

### صلاح الدين بسومان

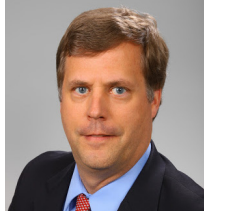
صلاح الدين باحث مشارك في برنامج تحولات الطاقة والطاقة الكهربائية. تشمل مجالات بحوثه الحالية نمذجة سوق الكهرباء السعودية وإصلاحات سوق الكهرباء والإطار التنظيمي.



عمل صلاح الدين قبل انضمامه لكابسارك باحثًا مشاركًا في مختبر التابع للمركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي CIREN في فرنسا، حيث ركز على نمذجة الاقتصاد والطاقة المتكاملة. وقد عمل أيضًا باحثًا في مجموعة كهرباء فرنسا ضمن شعبة البحث والتطوير. وكان جزءًا من أسواق الطاقة التابعة للشعبة ووحدة التنظيم البيئي التي تركز على الأسواق الناشئة.

صلاح الدين حاصل على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة باريس ساكلاي في فرنسا، وعلى درجة الماجستير في اقتصاديات الطاقة من جامعة مونبلييه في فرنسا، وفي الاقتصاد القياسي للأسواق المالية من كلية الاقتصاد في جامعة إيكس مارسيليا في فرنسا.

## فرانك فيلدر



فرانك مهندس ومحلل لسياسات الطاقة. قبل انضمامه لكابسارك مديراً لبرنامج تحولات الطاقة والكهرباء، عمل فرانك أستاذاً باحثاً في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز، ومديراً لمعهد روتجرز للطاقة ومديراً لمركز الطاقة والاقتصاد والسياسة البيئية. وقد أجرى بحثاً في مجالات نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية والسياسات البيئية النظيفية وتغير المناخ للمؤسسات الأكاديمية والوكالات الحكومية وقطاعات الطاقة. كما عمل مستشاراً اقتصادياً ومهندساً نووياً.

## حول المشروع

يقوم هذا المشروع بتقييم آثار تقاعد الوقود السائل من قطاع الطاقة السعودي والآثار المترتبة على الانبعاثات المرتبطة به. يأتي بحثنا نتيجة للإعلانات الحكومية الأخيرة بأن المملكة ستعتمد بشكل كامل على الغاز والطاقة المتجددة في المستقبل لاحتياجاتها من الطاقة.



[www.kapsarc.org](http://www.kapsarc.org)