

الوفورات الموسمية للوقود الناجمة عن تحويل الأحمال الكهربائية في القطاع الصناعي السعودي: رؤى باستخدام نموذج نظام الطاقة الكهربائية

صلاح الدين سومان وعمرو الشرفاء
وحاتم العطوي وفرانك فيلدر

شكر وتقدير

يسرنا أن نزجي أسمي آيات الشكر والعرفان للشركة السعودية للكهرباء على ما قدمته لنا من بيانات حول منحنيات وأنماط الأحمال الكهربائية التي كانت عوناً كبيراً لنا في إعداد هذه الدراسة.

إخلاء مسؤولية

تخص الآراء والأفكار الواردة في هذا البحث الباحثين معدي الدراسة، ولا تعكس بالضرورة موقف المركز أو وجهة نظره.

تضارب المصالح

يقرّ الباحثون عدم وجود أي مصالح مالية معروفة متضاربة أو علاقات شخصية ساهمت في التأثير على هذا البحث.

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 2022 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.

الوقود السائدة. ومع ذلك، تتراوح التكلفة الكاملة للتوفير ما بين 127.2 و 239.4 مليون دولار أمريكي سنويا عند النظر في تكاليف الفرص البديلة لوفورات الوقود (معظمها من النفط الخام). وتمثل هذه الوفورات المحتملة 8.1% من تكاليف الوقود السنوية للنظام. فضلا عن ذلك، فإننا نوصي باستهداف تحويل 15% على الأقل من إجمالي الحمل الكهربائي في قطاع الصناعة من أجل زيادة وفورات الوقود إذا تم إصلاح أسعار الغاز الطبيعي. ثم نختتم الدراسة بمناقشة العوامل التمكينية والعوائق المحتملة التي تحول دون اعتماد آلية تحويل الحمل الكهربائي في المملكة العربية السعودية.

الكلمات الرئيسية: استجابة الطلب، تحويل الحمل الكهربائي، طلب قطاع الصناعة على الكهرباء، نمذجة نظام الطاقة الكهربائية.

يعد تحويل الحمل الكهربائي - أي نقل الطلب من ساعات الذروة إلى خارجها - نوعا مهماً من أنواع الاستجابة للطلب، إذ يمكنه خفض التكاليف التشغيلية الإجمالية لنظام الطاقة وتحسين موثوقية شبكة الكهرباء. وتقدر هذه الدراسة الآثار المالية المترتبة على تحويل الأحمال الكهربائية في القطاع الصناعي السعودي. كما تم استخدام نموذج وطني سعودي لتحسين التوزيع بهدف محاكاة ثلاثة سيناريوهات. وتمكنا باستخدام هذا النموذج من تقييم الآثار المترتبة على تحويل الأحمال الكهربائية في قطاع الصناعة من فترة الذروة في فصل الصيف إلى أشهر فصل الشتاء الواقعة خارج أوقات الذروة، مع بقاء تعريفات الكهرباء الصناعية على حالها دون تغيير. كما يبين تحليلنا أن بإمكان تحويل الحمل الكهربائي الإسهام في توفير ما يتراوح ما بين 7.9 و 17.7 مليون دولار أمريكي سنويا وفقا للأسعار

الملاحم الرئيسة

تبلغ وفورات التكاليف وفقا لأسعار النفط الدولية 8.1% من تكلفة الوقود الإجمالية للنظام

قمنا بتقييم الآثار المالية المترتبة على تحويل الأحمال الكهربائية في القطاع الصناعي السعودي.

يؤدي تحويل أكثر من 15% من الحمل الكهربائي لقطاع الصناعة إلى زيادة الوفورات.

قمنا بمحاكاة عدة سيناريوهات باستخدام نموذج نظام الطاقة السعودي

تتراوح وفورات التكاليف وفقا لأسعار الوقود المنظمة ما بين 7.9 و 17.7 مليون دولار أمريكي سنويا

1. المقدمة والسياق الوطني

من النفط الخام والمنتجات المكررة في عام 2019 (Enerdata 2019).

كما تحدد الأنظمة في المملكة العربية السعودية أسعار الوقود المستخدم في توليد الطاقة الكهربائية بحيث تكون دون المستويات العالمية. وبالتالي، يترتب على استخدام النفط والغاز تكلفة الفرصة البديلة (Gately, Al-Yousef, and Al-Sheikh 2012; Shabaneh and Schenckery 2020; Karanfil and Pierru 2021). علاوة على ذلك، يكون الحمل الكهربائي لنظام الطاقة في فصل الصيف ضعفي الحمل الكهربائي في فصل الشتاء (Howarth et al. 2020). ولذلك فإن إمدادات الوقود تكون أشد صرامة في فصل الصيف، بالتزامن مع انخفاض استخدام نظام الطاقة في فصل الشتاء. ونتيجة لذلك، تختلف تكلفة توليد الطاقة الكهربائية في المملكة اختلافا كبيرا بين أشهر الصيف والشتاء، وقد يزداد هذا التباين إذا تم تحرير أسعار الوقود (Matar and Anwer 2017).

كما شهد الطلب على الكهرباء الصناعية في المملكة العربية السعودية نمواً بمعدل 3.3% سنوياً في الفترة ما بين عامي 2010 و2019. وحالياً، يستهلك قطاع الصناعة 58 تيراواط في الساعة من الكهرباء سنوياً، ما يمثل حوالي 20% من الطلب الإجمالي على الكهرباء في البلاد (ECRA 2020). وزاد خلال الفترة نفسها، عدد الوحدات الصناعية العاملة من 4,858 إلى 7,625، شارك منها نحو 61% في الأنشطة كثيفة الاستهلاك للطاقة¹ (SAMA 2019). وقد دعمت أسعار الطاقة الإدارة تطوير هذه الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة في المملكة (Alarenan, Gasim, and Hunt 2020). ونتيجة لذلك، أصبحت المملكة العربية السعودية منتجا عالمياً رائداً في بعض المجالات كثيفة الاستهلاك للكهرباء. فعلى سبيل المثال، تعتبر المملكة في الوقت الحالي منتجا رئيساً للألومنيوم والكيماويات (Moya and Boulamanti 2016) والأسمدة (Matar and Elshurafa 2017) والصلب (World Steel Association 2020).

يعد توفير الطاقة الكهربائية بموثوقية وأسعار معقولة هدفاً مهماً ولكنه يتسم بالصعوبة بالنسبة للحكومات في كافة أنحاء العالم. فيما تعتبر آليات الاستجابة للطلب طرقاً مؤكدة لخفض تكاليف توفير الإمداد بالكهرباء بنحو فعال (Bradley, Leach, and Torriti 2013). كما يستطيع قطاع الصناعة تحديداً تيسير قدر كبير من استجابة الطلب عبر تحويل الحمل الكهربائي. والمقصود بتحويل الأحمال الكهربائية عملية نقلها من الفترات التي تكون فيها تكلفة التوليد الحدية مرتفعة إلى الفترات التي تكون فيها هذه التكلفة أقل دون الاضطرار إلى خفض معدلات الاستهلاك الكلي (Dutta and Mitra 2017; Pechmann et al. 2017). كذلك تعد مرونة بعض القطاعات المنضوية داخل القطاع الصناعي سمة مهمة من سمات تحويل الحمل الكهربائي. إذ يمكن في هذا القطاع، تحويل الأحمال الكهربائية الكبيرة المتركزة عند حفنة معينة من العملاء دون التأثير على استمرارية العملية الصناعية أو جودة الخدمات النهائية المقدمة (Lund et al. 2015). ومع ذلك، لا تزال الإمكانيات الصناعية لاستجابة الطلب غير مستغلة بالقدر الكافي (Shoreh et al. 2016).

شهد الطلب على الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية ازدياداً كبيراً خلال حقبة السبعينيات، وأثقل الطلب المتنامي على الكهرباء كاهل إمدادات الوقود المحلية والمالية العامة للمملكة على مدى العقود اللاحقة (Alyousef and Stevens 2011; Fattouh and El-Katiri 2013). وتجدر الإشارة إلى أن المملكة العربية السعودية قد نفذت مؤخراً إصلاحات لأسعار الطاقة وبرامج كفاءة استخدام الطاقة بهدف ترشيد الاستهلاك وكبح جماح الطلب سريع النمو (Mikayilov et al. 2020; Aldubyan و Gasim 2021). وعلى الرغم من تسطح منحنى الطلب على الكهرباء في المملكة العربية السعودية منذ عام 2016 إلا أن تكلفة الإمداد بالكهرباء لا تزال مرتفعة. ويشار إلى أن قطاع الطاقة كان مسؤولاً عن 62.5% من استهلاك المملكة من الغاز الطبيعي ونسبة 8.6% من استهلاكها

نفذت المملكة العربية السعودية قبل عام 2016 خطة تسعير مرتبطة بوقت استخدام عملاء القطاع الصناعي. وتم تصميم تعريفات وقت الاستخدام هذه لتعكس التباين في التكلفة الحدية لإمدادات الكهرباء. أو بمعنى آخر، أنها تضمن أن تكون الأسعار مرتفعة خلال ساعات الذروة ومنخفضة خارجها. كما تعمل هذه الخطط على تحفيز تحويل الأحمال الكهربائية من ساعات الذروة إلى الساعات خارجها (Dutta and Mitra 2017). وشرعت هيئة تنظيم الكهرباء السعودية باستخدام هذا النهج، في تنفيذ برامج لتحويل الأحمال الكهربائية مستندة إلى التعريفات المخصصة لكبار المستهلكين. وتهدف هذه البرامج إلى تقليص الحمل الحراري خلال ساعات الذروة الحرجة المستهدفة في أشهر الصيف (Faruqui et al. 2011). وقد ساهمت خطط وقت الاستخدام في تحويل حوالي 10% من الطلب على الطاقة في أوقات الذروة إلى خارجها، كما ساهم المستهلكون الصناعيون في 145 وحدة صناعية بنسبة 69% من إجمالي تحويل الطاقة المحقق، مما أدى إلى خفض التكاليف بنسبة 22% (Alyousef and Abu-Ebid 2012).

كذلك في عام 2016، حددت أسعار الكهرباء الصناعية بمعدل ثابت قدره 0.048 دولارًا أمريكيًا لكل كيلوواط/ساعة على مدار العام. وبالتالي، ينبغي النظر في الفوائد المحتملة للسياسات الأخرى إلى جانب المعدلات المتغيرة لخفض تكاليف توليد الطاقة في نظام الطاقة الوطني. وتقيم هذه الدراسة الآثار المالية المحتملة لتنفيذ برنامج واسع النطاق لتحويل الأحمال الكهربائية الصناعية في نظام الطاقة الوطني السعودي. وتجدر الإشارة إلى أن هذا البرنامج لا يغير الاستهلاك الكلي للكهرباء أو أسعارها، وبالتالي فإنه يحافظ على إيرادات المرافق العامة للطاقة الكهربائية.

تم تقسيم ما تبقى من هذه الدراسة على النحو التالي: يستعرض القسم الثاني (2) المؤلفات المتعلقة بتحويل الحمل الكهربائي في القطاعات ذات الصلة بالسياق السعودي، فيما يقدم القسم الثالث (3) إطار النمذجة وتصميم السيناريوهات، ويتضمن القسم الرابع (4) مناقشة النتائج، ويختتم القسم الخامس (5) هذه الدراسة.

2. مؤلفات حول تحويل الحمل الكهربائي في القطاع الصناعي

على مستوى المصنع. إذ يبحث كل من (Yang, DeFrain, and Faruqui (2020) الموسمية في منشأة مضطلة بتصنيع البولي سيليكون. وتشير تقديراتهم إلى وجود وفورات محتملة في تكاليف الكهرباء المرتبطة بالعديد من سيناريوهات تحويل الأحمال الكهربائية. ونجد أن بإمكان تحويل 50% من الحمل الكهربائي ونقله من فصل الصيف إلى فصل الربيع خفض التكاليف السنوية للكهرباء بنحو 7 ملايين دولار. وتمثل هذه الوفورات 20% من إجمالي التكاليف السنوية للكهرباء، وما يتراوح ما بين 2% إلى 3% من التكاليف السنوية للإنتاج.

نقتصر في هذا القسم على مراجعة المؤلفات المتعلقة بتحويل الحمل الكهربائي في قطاع الصناعة، ويعد تحويل الحمل الكهربائي نهجا لاستجابة الطلب يعمل على جدولة الإنتاج في أوقات انخفاض تكاليف الكهرباء نسبيا (خارج أوقات الذروة). وبذلك، لا يتغير الإنتاج الكلي داخل منشأة التصنيع لأن الوحدة الصناعية تستعيد الإنتاج المفقود خارج أوقات الذروة. ونركز تحديدا على تحويل الحمل الكهربائي في الصناعات ذات الصلة بالسياق السعودي، المتمثلة في صناعات الألمنيوم والكيمياويات والأسمنت والصلب. ونختار هذه الصناعات لتسليط الضوء على جدوى وأهمية عملية تحويل الحمل الكهربائي باعتبارها وسيلة من وسائل الاستجابة للطلب في المملكة العربية السعودية. وبناء على مستويات الإنتاج ومتوسط كثافة إنتاج هذه الصناعات الأربعة نجد أنها تمثل حوالي 25 تيراواط ساعة (حوالي 43%) من طلب قطاع الصناعة على الكهرباء.²

أما فيما يتعلق بصناعة الألمنيوم، فيشير (Nebel et al. (2020 إلى أنه يمكن لعملية إنتاج الألمنيوم الألماني تحويل 25% من الحمل الكهربائي للصناعة، ويرون أن بإمكان تدابير المرونة في العمليات أن تزيد من الحمل الذي تم

يمكن للقطاع الصناعي أن يعتمد إدارة جانب الطلب بهدف تعديل الطلب وخفض تكاليف الطاقة في نهاية المطاف. وتشتمل إدارة جانب الطلب على مجموعة من المقاييس والتدابير التي تهدف إلى خفض المؤقت للطلب من خلال تعديل شكل منحني الحمل الكهربائي، أو خفض الدائم للاستهلاك من خلال كفاءة استخدام الطاقة. وتجدر الإشارة إلى أن تقنيات إدارة جانب الطلب التالية تستخدم على نطاق واسع في هذا السياق (O'Connell et al. 2014; Lund et al. 2015).

تهدف تدابير كفاءة استخدام الطاقة إلى خفض معدلات الكهرباء المستخدمة لتقديم خدمة معينة، وتعتبر تدابير دائمة من شأنها أن تعمل على خفض منحنيات الحمل الكهربائي بالنسبة للعملاء. ومع ذلك، تتطلب تدابير كفاءة استخدام الطاقة وجود استثمارات فعالة لتعديل أو تحديث الأجهزة.

يتم خفض الحمل الكهربائي خلال ساعات الذروة. وبالتالي، فإنه يلغي الحاجة إلى المزيد من وحدات التوليد وأصول النقل والتوزيع لتلبية الطلب في أوقات الذروة.

يشير التسعير الديناميكي إلى مخططات التسعير المتغيرة بمرور الوقت والهادفة إلى عكس تكاليف التوليد والنقل المتغيرة بمرور الوقت. حيث تشجع هذه التدابير على خفض معدلات الاستهلاك خلال أوقات الذروة.

يعمل تحويل الحمل الكهربائي على تحويل الطلب في أوقات ازدحام شبكة الكهرباء، ويؤدي نقل الحمل من ساعات الذروة إلى خارجها إلى خفض تكاليف النظام.

تعمل العديد من الدراسات على تقييم مدى جدوى عملية تحويل الأحمال الكهربائية للإنتاج الصناعي

2. مؤلفات حول تحويل الحمل الكهربائي في القطاع الصناعي

بنسبة 4.2%. بينما يزعم كل من (Shoreh et al. 2016) أنه بالنسبة لإنتاج الأسمنت، يمكن أن يمثل الحمل الكهربائي المحتمل القابل للتحويل ما بين 60% و 70% من إجمالي استهلاك الكهرباء. ويمكن أن تصل الوفورات الناتجة عن تكاليف الكهرباء إلى 20% من تكاليف الكهرباء بالنسبة للمستهلكين. ومع ذلك، فقد سلطوا الضوء على أهمية حساب أي قيود مرتبطة بتخزين الأسمنت عند نقل الإنتاج. فيما قدر كل من (Yao et al. 2015) أن مرونة تحويل الحمل الكهربائي في عملية إنتاج الأسمنت تراوحت ما بين 16% و 20% لطواحين الخام، وما بين 20% و 24% لطواحين الأسمنت. كما يمكن المحافظة على هذه التحويلات لعدة ساعات. أما في جنوب إفريقيا، فقد بين كل من (Lidbetter and Liebenberg 2013) أن بإمكان تحويل الحمل الكهربائي في مصنع الأسمنت خفض الحمل الذروي بنسبة تصل إلى 35%، ويمكن المحافظة على هذا التحويل لمدة تصل إلى ست ساعات، كما يمكنه خفض تكاليف الكهرباء في المصنع بنسبة تصل إلى 2%.

أخيرا، وفي صناعة الصلب، فقد قام كل من (Zhao et al. 2017) بالبحث في تحويل الحمل الكهربائي في مصنع صيني للصلب، وبينوا أن تحويل الحمل الكهربائي القائم على الأسعار (أي فترة الاستخدام) يخفض من تكاليف الكهرباء بنسبة 29.7% دون التأثير على عملية الإنتاج. وبالمثل، بحث كل من (Maneschijn, Vosloo and Mathews 2016) في إمكانية تحويل الحمل الكهربائي القائم على فترة الاستخدام في مصنع للصلب بجنوب إفريقيا، وقدروا قيمة الوفورات الناتجة عن تحويل 25% من الحمل الكهربائي للمصنع من ساعات الذروة إلى خارجها بحوالي 158,000 دولار أمريكي سنويا.³ أما في ألمانيا، فقد كشف كل من (Paulus and Borggreffe 2011) عن أن هناك إمكانية كبيرة لاستجابة الطلب في صناعة الصلب. وقد يصل الحمل الكهربائي القابل للتحويل إلى 100% من

تحويله، والمحافظة على فترة التحويل. كما تشير تقديراتهم أنه يمكن لتحويل الحمل الكهربائي خفض تكاليف الكهرباء على مستوى المصانع بنحو 5%. وينبع هذا التوفير بالأساس من إعادة جدولة عملية الإنتاج لتتناسب مع جدول توليد الطاقة المتجددة. وتؤدي زيادة حصة الطاقة المتجددة إلى خفض أسعار الكهرباء بالجملة. ويقدر كل من (Shafie-khah et al. 2011) and Paulus and Borggreffe (2019) إمكانية تحويل الحمل الكهربائي في صناعة الألومنيوم بنسبة 25% والتي يمكن أن تستمر لمدة أربع ساعات.

أما في صناعة الكيماويات، فيبحث كل من (Paulus and Borggreffe 2011) في عملية إنتاج الكلوريد، ويقدر أن يمكن لاستخدام الكهرباء أن يعمل على خفض بنسبة تصل إلى 40% لمدة تصل إلى ساعتين. علاوة على ذلك، طور كل من (Babu and Ashok 2008) نموذج تحسين لإعادة جدولة عملية إنتاج الصودا الكاوية، التي تعد عملية كيميائية كهروكيميائية. تجدر الإشارة إلى أن من شأن جدولة العمليات على النحو الأمثل باستخدام مخطط لها أن يعمل على خفض فترة الاستخدام من الطلب الذروي للمصنع بنسبة 19%، بالتزامن مع تحقيق وفورات في تكلفة الكهرباء بنسبة 3.9%. بينما بين كل من (Ashok and Banerjee 2000) أن تحويل الحمل الكهربائي في مصنع للأسمدة يحسن عامل الحمل للمصنع بنسبة 4.5%، كما أنه يخفض تكلفة الكهرباء اليومية للمصنع بنسبة 3%.

بالنسبة لصناعة الأسمنت، فقد استخدم كل من (Summerbell et al. 2017) بيانات مأخوذة من مصنع بريطاني لتحسين عملية الإنتاج، وذلك بهدف خفض تكاليف الكهرباء إلى أدنى حد ممكن من دون خفض الناتج الإجمالي. وتوصل هؤلاء الباحثون إلى أن الحمل الكهربائي الذي يتم تحويله من ساعات الذروة إلى خارجها يمثل حوالي 30% من إجمالي حمل المصنع. وقدروا أنه يمكن لتحويل الحمل الكهربائي خفض تكلفة كهرباء المحطة

2. مؤلفات حول تحويل الحمل الكهربائي في القطاع الصناعي

يحظى تحويل الحمل الكهربائي المستخدم لخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإمدادات الطاقة بالاهتمام الكبير، حيث تسعى الحكومات للحد من الانبعاثات الناجمة عن قطاع الطاقة. بينما نجد أن الباحثين (Zohrabian and Sanders (2021) قاما بالبحث في إمكانية تحويل الحمل الكهربائي لعدد (97) محطة لإمدادات المياه في كاليفورنيا. كما بحثوا في تحويل 5% من الحمل اليومي من فترات الانبعاث العالية (أي عندما تنخفض إمدادات الطاقة المتجددة) إلى فترات الانبعاث المنخفضة. ويمكن أن يؤدي القيام بذلك إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوية المصاحبة بنسبة تتراوح ما بين 2% و5% دون التأثير على إجمالي الطلب على الكهرباء.

ترصد هذه الدراسة المؤلفات الموجودة من خلال تحليل الآثار المالية المترتبة على استجابة الطلب الموسمية وبناء على مختلف السيناريوهات. وتوسع لفهم المبالغ والمدد التي يحتمل أن تترتب على تحويل الحمل الكهربائي ومدى تأثيرها على التكلفة الإجمالية للكهرباء في المملكة العربية السعودية. وتساعد هذه الدراسة على معالجة التغير الموسمي الكبير في الطلب السعودي على الطاقة. حيث يرتبط هذا التباين بالتفاوت الكبير في تكاليف التوليد واستخدامات الوقود. ولأن أسعار الوقود المنظمة في المملكة العربية السعودية تقل عن المستويات العالمية، فيترتب على استخدام الموارد في توليد الطاقة تكبد كبار منتجي الوقود الأحفوري لتكاليف فرص بديلة. كما أننا نقيم في هذه الدراسة العوائد المحتملة المرتبطة باستهلاك الوقود المتجنب من توليد الطاقة، وتثبت قدرة تحويل الأحمال على زيادة الإيرادات الحكومية.

حمل المصنع. ومع ذلك، يمكن المحافظة على مثل هذا التحويل الكبير لمدة 30 دقيقة فقط. وأخيرا، أجرى (Ashok (2006) دراسة حالة لمصنع الصلب الهندي. واتضح أن إعادة جدولة الإنتاج بناء على مخطط فترة الاستخدام يمكنها خفض وتيرة الطلب في أوقات الذروة بنسبة 50% وخفض تكلفة الكهرباء في المصنع بنسبة 5.7%.

وعلى الرغم من أن الأنشطة الصناعية كثيفة الاستهلاك للكهرباء تمثل الأهداف الأساسية لبرامج تحويل الحمل الكهربائي نظرا للوفورات المحتملة الكبيرة، إلا أنه يمكن للمصانع الصغيرة والمتوسطة كذلك القيام بعمليات مجددة لتحويل الحمل الكهربائي. فقد قام كل من (Pechmann et al. (2017) بتحليل أربع محطات صناعية صغيرة ومتوسطة لمعالجة المعادن وصبها ومعالجة الزجاج. ووجدوا أن إمكانية تحويل الحمل الكهربائية الفنية تتراوح ما بين 1.2% و5.6%. تعد أنواع الآلات وإستراتيجيات الإنتاج ومرونة جدول الإنتاج من المسببات الرئيسية للتباين في إمكانية تحويل الحمل الكهربائي. لذا، ينبغي مراعاة هذه العوامل عند تصميم برنامج تحويل الحمل الكهربائي. ويلخص الجدول (1) الدراسات التي خضعت للمراجعة التي تدور حول تحويل الحمل الكهربائي وإمكانية خفض تكلفة الكهرباء.

فيما تبحث بعض الدراسات في تحويل الحمل الكهربائي على مستوى المصانع المتعددة أو الصناعة، ويعد البحث في تأثير تحويل الحمل الكهربائي على المستوى الكلي أمرا مفيدا للأسباب بعيدة عن العوامل الاقتصادية. فعلى سبيل المثال،

2. مؤلفات حول تحويل الحمل الكهربائي في القطاع الصناعي

الجدول 1. ملخص دراسات تحويل الحمل الكهربائي في قطاع الصناعة.

المرجع	الصناعة	إمكانية تحويل الحمل الكهربائي	وفورات تكلفة الكهرباء المحتملة
Nebel et al. (2020)	الألومنيوم	25%	5%
Shafie-khah et al. (2019)	الألومنيوم	25%	لم يتم الإبلاغ عنه
Paulus and Borggreffe (2011)	الألومنيوم	25%	لم يتم الإبلاغ عنه
Paulus and Borggreffe (2011)	الكلوريد	40%	لم يتم الإبلاغ عنه
Babu and Ashok (2008)	الكلور الكاوي	19%	3.9%
Ashok and Banerjee (2000)	الأسمدة	لم يتم الإبلاغ عنه	3%
Summerbell et al. (2017)	الأسمنت	30%	4.2%
Shoreh et al. (2016)	الأسمنت	60%-70%	20%
Yao et al. (2015)	الأسمنت	16%-24%	لم يتم الإبلاغ عنه
Lidbetter and Liebenberg (2013)	الأسمنت	35%	2%
Zhao et al. (2017)	الصلب	لم يتم الإبلاغ عنه	29.7%
Maneschijn, Vosloo, and Mathews (2016)	الصلب	25%	~\$158,000
Ashok (2006)	الصلب	50%	5.70%
Alyousef and Abu-Ebid (2012)	الصناعات المختلفة	10%	22%
Yang, DeFrain, and Faruqui (2020)	البولي سييلكون	30%-50%	\$ M 7-0.5

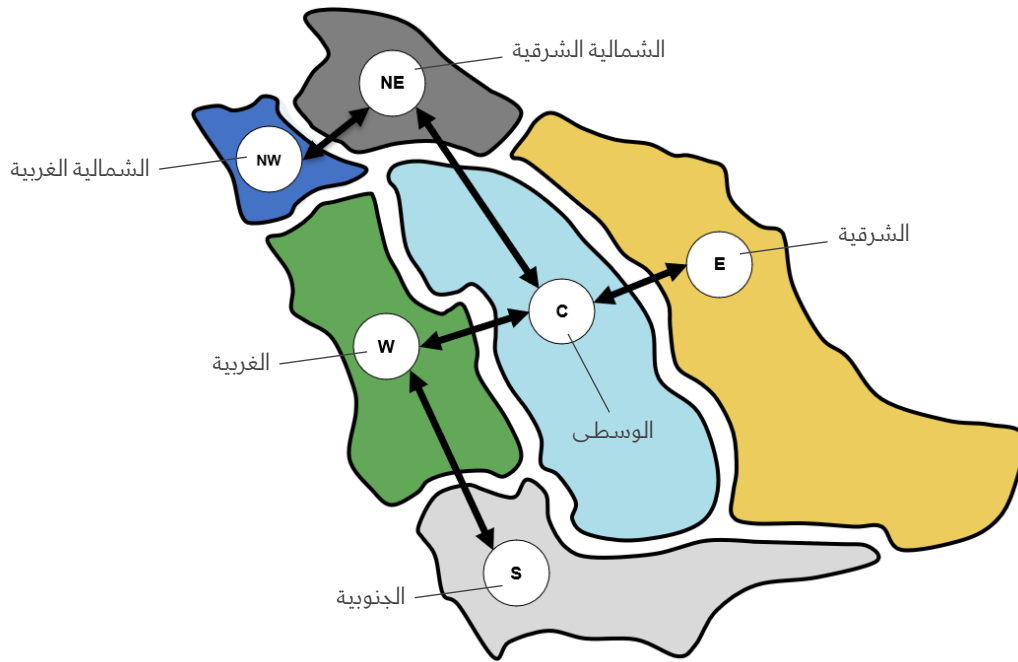
3. الطرق والسيناريوهات

نموذج كابسارك لقطاع الطاقة

استخدمنا نموذجًا لنظام الطاقة مصممًا خصيصًا للمملكة العربية السعودية، ويعد نموذج كابسارك للطاقة نموذجًا لخفض التكلفة يستخدم حزمة برامج متوفرة في الأسواق تعرف باسم PLEXOS⁴.

يتعامل النموذج مع المملكة باعتبارها دولة مجزأة إلى ست مناطق، كما هو موضح في الشكل (1)، ويوضح هذا الشكل مخطط النقل الذي يربط مناطق المملكة. واستند التوضيح المفصل للأسطول التوليد وأنواع الوقود ودرجات الحرارة في هذا النموذج على دراسات سابقة (Elshurafa and Peerbocus 2020; Elshurafa et al. 2021).

الشكل 1. ست مناطق تشغيلية لنظام الطاقة في المملكة العربية السعودية.



المصدر: المؤلف.

ملاحظة: تم تمثيل كل منطقة من مناطق المملكة على هيئة عقدة، وتحتوي كل عقدة على رمز مرتبط بموقعها. حيث يمثل الرمز (C) المنطقة الوسطى ويمثل (E) المنطقة الشرقية ويمثل (NE) المنطقة الشمالية الشرقية ويمثل (NW) المنطقة الشمالية الغربية ويمثل (S) المنطقة الجنوبية ويمثل الرمز (W) المنطقة الغربية.

النقل). ويمكن للطاقة أن تتدفق بين المناطق بسبب القدرات الحالية لخطوط النقل. ويتم استخدام أربعة أنواع رئيسية للوقود في قطاع الطاقة بالمملكة متمثلة في: زيت الوقود الثقيل والنفط الخام والغاز الطبيعي والديزل. ويلخص الجدول (2) أسعارها المدارة.

تتألف عمليات النمذجة من عمليات إرسال قصيرة للطاقة، مما يعني أنه لا يوجد أي استثمار ممكن. وتتم هذه العمليات بناء على أنماط أو منحنيات الحمل في الساعة لكل منطقة. وبالتالي، تنبع مكاسب تحويل الحمل المقدر من وفورات الوقود وتستبعد وفورات التكلفة الرأس مالية (أي الاستثمارات المتجنبة في قدرات التوليد وخطوط

الجدول 2. الأسعار المقدرة لأنواع الوقود المستخدمة في توليد الطاقة.

التكلفة (دولار أمريكي/ مليون وحدة حرارية بريطانية)	
1.144	النفط الخام
2.41	الديزل
1.25	الغاز الطبيعي
0.6	زيت الوقود الثقيل

المصدر: (Elshurafa and Matar (2017).

سيناريوهات تحويل الحمل الكهربائي

تتطلب نمذجة تحويل الحمل في قطاع الصناعة وجود بيانات للطاقة ومعايير تشغيلية مفصلة لتحديد ما إذا كان التحويل مناسباً للمنشأة. كما يجب أيضاً تصنيف التحويل المحتمل على أنه تحويل فني أو تنظيمي على مستوى المنشأة الصناعية (Pechmann et al. 2017). وتجدر الإشارة إلى أن معظم إستراتيجيات استجابة الطلب على مستوى المصنع لها دوافع مالية. وعلى العكس من ذلك، يعمل هذا التحليل على تقييم دراسة حالة مدفوعة في المقام الأول بالأولوية الإستراتيجية على المستوى الوطني للمملكة العربية السعودية لخفض التكلفة الإجمالية لتوفير الكهرباء. وقد جمعت البيانات على مستوى المنشأة الصناعية بدلا من مستوى المصنع بسبب قيود البيانات، ونتوقع أن يتم التطرق إلى هذه القيود جزئياً في المستقبل المنظور بناء على بيانات العدادات الذكية المستخدمة حالياً.⁵

وكما أسلفنا، قد يكون لتحويل الحمل دوافع بيئية، كما هي الحال في تحويل الحمل الكهربائي الذي يهدف إلى خفض معدلات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بتوفير الطاقة. وتتبع دراسة (Zohrabian and Sanders (2021 الخاصة بتحويل الحمل الكهربائي نهجا مشابهاً لنهجنا، إلا أن دراستهم تركز على الدوافع البيئية، وأنهم يتناولون بالبحث

على وجه التحديد تحويل الحمل الكهربائي لخفض الانبعاثات الناجمة عن توليد الطاقة. كما يشار إلى أن إمكانية تحويل الحمل والساعات المستهدفة مختلفة عن ما ورد في دراستنا بسبب سعيهم إلى توضيح نظام الطاقة في كاليفورنيا والميزات الخاصة بالصناعة.

يعتبر هذا التحليل، تحليلاً على مستوى الحمل الصناعي المجمع. وبالتالي، فإننا نستخدم سيناريوهات مختلفة لتمثيل حالات عدم اليقين الفني والاقتصادي والتنظيمي المرتبطة بتحويل الحمل الكهربائي المجمع. كما أننا نحاكي السيناريوهات باستخدام إمكانيات تحويل الحمل بنسبة 15% و 25% و 35%. وتعني إمكانية تحويل الحمل بنسبة 25% أنه يتم تحويل 25% من إجمالي حمل قطاع الصناعة الذي يتم استهلاكه خلال أشهر الصيف المستهدفة إلى غيرها من الشهور. ويفترض أن تستمر هذه التحويلات لعدة ساعات. راجع الملحق (أ) للاطلاع على وصف مفصل وتمثيل رياضي لتحويل الحمل الكهربائي.

نستخدم النسبة 25% كخط أساس لاحتمالية تحويل الحمل، في حين نستخدم النسبتين 15% و 35% كمتغيرات. ويعد هذا الاختيار معقولاً بناءً على البيانات الواردة في الجدول (1)، حيث أن متوسط السعر المقدر مقارب لخط الأساس الذي وقع عليه الاختيار. فضلاً عن ذلك، فإننا قمنا بمحاكاة ثلاثة

3. الطرق والسيناريوهات

صيفاً. فيما يلخص الشكل (2) إجراءات معالجة البيانات وإنشاء السيناريوهات.

متغيرات في كل سيناريو بحسب الفترة الزمنية التي يتم فيها تحويل الحمل. ويشار إلى هذه المتغيرات بما يلي: اليوم بأكمله، ونصف اليوم، وفترة الذروة

الشكل 2. الإجراء التخطيطي المستخدم في هذه الدراسة لتحويل الحمل الكهربائي.



المصدر: المؤلف.

في السعودية (Faruqui et al. 2011). فيما لا يحتاج تحويل الحمل إلى حدوث أي تغيير في الحمل الإجمالي. وبالتالي، فإننا نضمن في الخطوة (4) أن يكون الحمل السنوي متساوياً قبل التحويل وبعده. ونقوم بذلك عن طريق توزيع أي حمل مفقود بعد تحويل الحمل بالتساوي على أشهر الشتاء. ومن ثم نقوم في الخطوة (5) بتحويل الحمل بحسب كل متغير من المتغيرات الثلاثة. ونحدد لكل متغير الساعات التي سيتم تحويل الحمل فيها. ونركز على أيام العمل خلال سنة المحاكاة (أي من الأحد إلى الخميس في عام 2018). وقد جرى توضيح المتغيرات في الشكل (3)، وفيما يلي تعريفاتها:

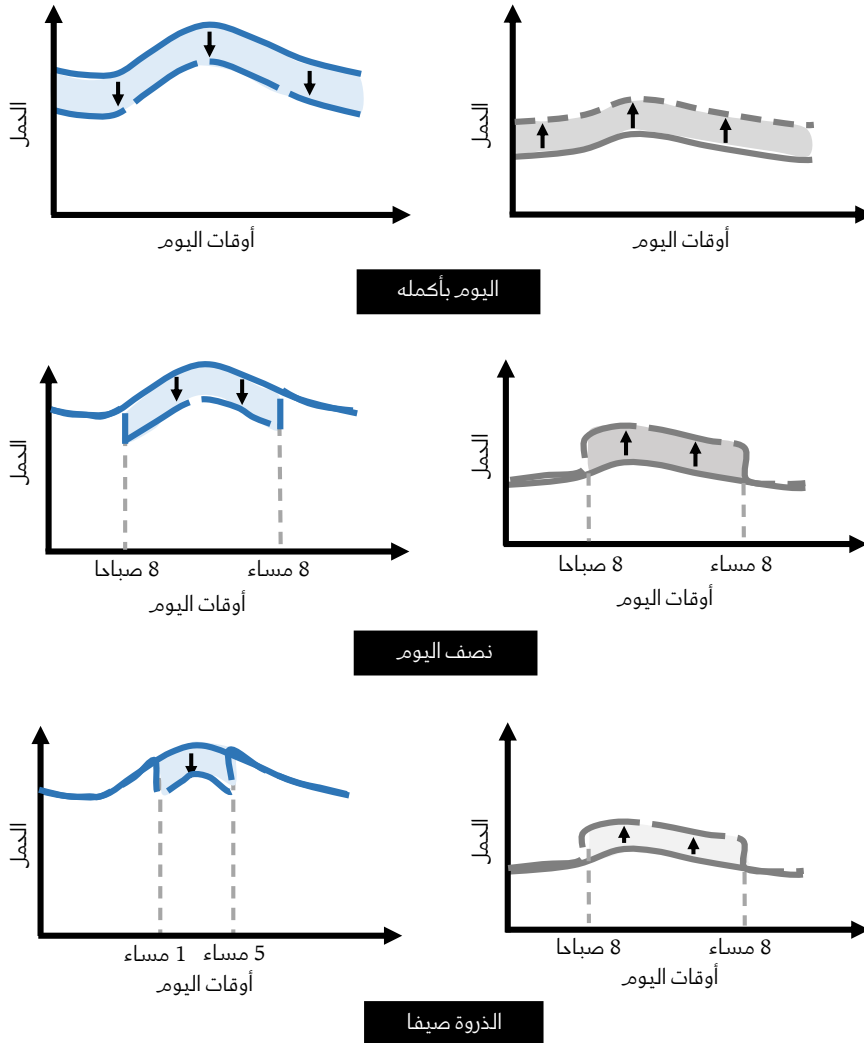
قامت الشركة السعودية للكهرباء بتوفير بيانات عن الأحمال الشهرية لقطاع الصناعة والمجمعة في الخطوة (1) بموجب اتفاقية عدم الإفصاح. وبالتالي، فإنه تم تنقيح المعلومات المتعلقة بأنماط الحمل مثل تلك الموضحة في الشكل (أ) من الملحق الوارد في هذا البحث. وقد ناقشنا الاختلافات بين خط الأساس والسيناريوهات البديلة في القسم (4). وقد قدرنا في الخطوة (2)، إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة منخفضة (15%)، ونسبة متوسطة (25%)، ونسبة مرتفعة (35%). كما حددنا في الخطوة (3) أشهر الصيف التي يتم فيها خفض الحمل الكهربائي، من شهر مايو وحتى شهر سبتمبر، وفقاً لتعريف الجهة التنظيمية

متغير فترة الذروة صيفا: يتم تحويل الحمل لكل يوم عمل في فصل الصيف من ساعات الذروة (أي من الواحدة مساء وحتى الخامسة مساء) وفقا لتوصيات الشركة السعودية للكهرباء.⁶ ويتم تحويل هذا الحمل إلى ساعات العمل في غير أشهر الصيف (أي من الساعة الثامنة صباحا وحتى الثامنة مساء).

متغير اليوم بأكمله: يتم تحويل حمل كل ساعة من أيام العمل صيفا إلى أيام العمل في غيره من الفصول

متغير نصف اليوم: يتم تحويل كل ساعة من أيام العمل صيفا التي تقع ما بين الساعة 8 صباحا والساعة 8 مساء إلى ساعات مماثلة في غير أيام العمل صيفا.

الشكل 3. متغيرات تحويل الحمل الكهربائي (المجموعة أ) اليوم بأكمله، (المجموعة ب) نصف اليوم، (المجموعة ج) فترة الذروة صيفا.



——— منحنى الحمل في أحد أيام الصيف قبل التحويل
- - - منحنى الحمل في أحد أيام الصيف بعد التحويل
——— منحنى الحمل في أحد أيام الشتاء قبل التحويل
- - - منحنى الحمل في أحد أيام الشتاء بعد التحويل

المصدر: المؤلف.

3. الطرق والسيناريوهات

منطقة من هاتين المنطقتين حوالي 1.5% من الحمل الإجمالي للمملكة. وبالتالي، فإننا نرجح استخدام بيانات الحمل الصناعي الإجمالي المحول من فصل الصيف إلى فصل الشتاء والموزع بحسب الحصص الإقليمية للطلب الصناعي في المناطق الأربع. ونفترض على سبيل المثال أن تصل نسبة الحمل القابل للتحويل في المنطقة الوسطى إلى 12.6%، لأنها تمثل 12.6% من الطلب الصناعي على الطاقة في المملكة العربية السعودية.

نجد وفقاً لما هو موضح في القسم (3.1)، أن للمملكة ست مناطق تشغيلية تتميز كل منها بمنحنى حمل يغطي مختلف القطاعات، بما في ذلك قطاع الصناعة. إذ يتطابق توزيع تحويل الحمل حسب المنطقة مع حصة الطلب الصناعي على الكهرباء وفقاً للمنطقة، كما هو موضح في الشكل (1). ويلاحظ أن الاستهلاك الصناعي قد أوردته الجهة التنظيمية في كل المناطق، عدا المنطقتين الشمالية الغربية والشمالية الشرقية.⁷ وتمثل كل

الجدول 3. الحصص المقدرة لاستهلاك قطاع الصناعة للكهرباء حسب المنطقة.

الغربية	الجنوبية	الشرقية	الوسطى	الحصة (%)
14.2	1.3	71.9	12.6	

المصدر: SAMA (2019)

4. النتائج والمناقشة

تخفيض استهلاك نظام الطاقة للنفط الخام بنسبة 2.4% في متغير فترة الذروة صيفا، وبنسبة 2.8 في متغير اليوم بأكمله. ويظل استهلاك الغاز الطبيعي مستقرا (أي +0.1%) في المتغيرات الثلاثة. ويعوض استهلاك الوقود الثقيل نسبيا الانخفاض في استهلاك النفط الخام، حيث يزيد استخدامه بنسبة 0.5% مقارنة بسيناريو خط الأساس.

يوضح الشكل (4) المكاسب المالية المحتملة المتأتية من وفورات تكاليف الوقود في النظام بناء على الأسعار المنظمة الواردة في الجدول (2). تصبح وفورات النفط الخام كبيرة جدا بالتزامن مع زيادة إمكانية تحويل الحمل الكهربائي، أما عندما تكون احتمالية تحويل الحمل متوسطة (25%)، فتقل نسبة استهلاك النفط الخام في متغيري نصف اليوم واليوم بأكمله بنسبة تتراوح ما بين 3.3% و3.6% على التوالي مقارنة بسيناريو الأساس. بينما لا يتغير استهلاك الغاز الطبيعي في جميع المتغيرات الثلاثة المحاكاة عند هذا المستوى من الإمكانية. كما يزيد استخدام زيت الوقود الثقيل بنحو 0.8% مقارنة بسيناريو خط الأساس. وأخيرا، تحقق الزيادة في إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 35% وفورات أكبر في النفط الخام. أما في متغير اليوم بأكمله، فيكون استخدام النفط الخام أقل بنسبة 4.2% من سيناريو خط الأساس واستخدام الغاز الطبيعي أقل بنسبة 0.2%. ويتم التعويض عن هذه الانخفاضات بزيادة قدرها 1.0% في استخدام زيت الوقود الثقيل. وباستخدام هذا السيناريو والمتغير، يصل إجمالي الوفورات إلى 17.6 مليون دولار أمريكي بأسعار الوقود المنظمة. يرجى ملاحظة أن الاختلافات في استهلاك الوقود ترجع إلى خصائص قطاع الطاقة. وتشمل هذه الخصائص معدلات الحرارة لمحطات الطاقة والخسائر المترتبة على النقل والوحدات التي يجب تشغيلها وتدفق الطاقة بين المناطق.

قبل أن نبدأ بعرض وفورات الطاقة الناتجة عن تحويل الطلب في قطاع الصناعة، نحاكي أولا سيناريو خط الأساس دون تحويل الحمل الكهربائي. ويستخدم هذا السيناريو الأحمال الإقليمية لكل ساعة في نموذج التحسين الوطني لتحديد الاستهلاك الأساسي للوقود. وقد استخدمنا أحمالا إقليمية افتراضية دون تحويل الحمل لتحديد المزيج لكل ساعة في عام 2018 (سنة المحاكاة). كما بلغ إجمالي استهلاك النظام للوقود 3,011.8 تيرليون وحدة حرارية بريطانية. ونجد أن نصف الطاقة المولدة تقريبا (أي 47%) كانت من الغاز، يليه زيت الوقود الثقيل بنسبة 38%، والنفط الخام بنسبة 15%، فيما لم يستخدم الديزل في توليد الطاقة. وبلغت التكلفة الإجمالية للوقود بأسعار الوقود المنظمة في سيناريو خط الأساس 2.73 مليار دولار أمريكي (راجع الجدول 2). ولا تشمل هذه التكلفة تكاليف القدرة والنقل والاستهلاك/ الإهلاك والتشغيل والصيانة.

الوفورات الناتجة عن تحويل الحمل الكهربائي بناء على أسعار الوقود المنظمة

تم نقل بعض طلبات قطاع الصناعة في سيناريوهات تحويل الحمل من فترات توفير الكهرباء ذات التكاليف الحدية المرتفعة إلى الفترات ذات التكاليف الحدية المنخفضة. ومع ذلك، تم الحفاظ على إجمالي استهلاك الكهرباء. ويشير إلى أن المكاسب المالية الإجمالية في المتغيرات التسع ناتجة عن وفورات الوقود، كما هو موضح في الجدول (4). ويؤدي تحويل الحمل الكهربائي في جميع السيناريوهات والمتغيرات إلى خفض استهلاك النفط الخام، واستقرار استهلاك الغاز الطبيعي، وزيادة حدية أو هامشية في استهلاك زيت الوقود الثقيل. أما في سيناريو الإمكانية المنخفضة لتحويل الحمل الكهربائي (أي بنسبة 15%)، فيتم

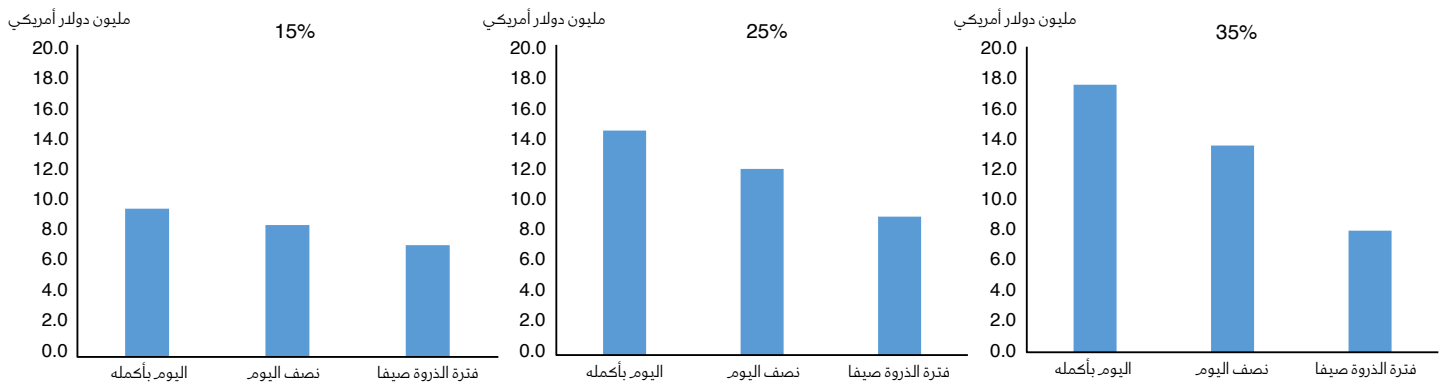
4. النتائج والمناقشة

الجدول 4. تباين استهلاك الوقود لكل سيناريو مقارنة بسيناريو خط الأساس.

الوقود				التكلفة (دولار أمريكي/ مليون وحدة حرارية بريطانية)	إمكانية تحويل الحمل الكهربائي
زيت الوقود الثقيل	الغاز الطبيعي	الديزل	النفط الخام		
%0.46	%0.12	لا ينطبق	%-2.82	اليوم بأكمله	%15
%0.45	%0.10	لا ينطبق	%-2.69	نصف اليوم	
%0.46	%0.05	لا ينطبق	%-2.37	فترة الذروة صيفا	
%0.75	%-0.04	لا ينطبق	%-3.60	اليوم بأكمله	%25
%0.73	%-0.02	لا ينطبق	%-3.30	نصف اليوم	
%0.75	%-0.02	لا ينطبق	%-2.82	فترة الذروة صيفا	
%0.04	%-0.21	لا ينطبق	%-4.17	اليوم بأكمله	%35
%0.99	%-0.12	لا ينطبق	%-3.63	نصف اليوم	
%1.00	%-0.01	لا ينطبق	%-2.92	فترة الذروة صيفا	

المصدر: تحليل المؤلف بالاستناد إلى نتائج نموذج كابسارك للطاقة.

الشكل 4. وفورات التكلفة السنوية في سيناريوهات تحويل الحمل الكهربائي (15% أو 25% أو 35%) مقارنة بسيناريو خط الأساس وبناء على أسعار الوقود المنظمة.



المصدر: عمليات المحاكاة في نموذج كابسارك للطاقة.

الأكثر صرامة لمحتوى الكبريت التي طبقتها المنظمة البحرية الدولية⁵ (Li et al. 2020).

كما قام كل من (Karanfil and Pierru 2021) بتقييم تكلفة الفرصة البديلة لاستخدام الوقود محليا في المملكة العربية السعودية. واستنادا إلى نتائجنا، تتراوح هذه التكلفة ما بين 14.9 و 59.4 دولار أمريكي لكل برميل في عام 2018 (السنة المرجعية). تراعي هذه التقديرات العديد من القيود التي قد تواجهها الدول المصدرة للنفط عند توفير كمية معينة من النفط. ومن الأمثلة على ذلك حصص الإنتاج، ومرونة الطلب العالمي على صادرات النفط السعودي، ومرونة عرض الإنتاج غير السعودي. وبالنظر إلى هذه النتائج والسعر المحلي للسائد للغاز الطبيعي البالغ 1.25 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية، تتراوح الوفورات المالية الإجمالية من تحويل الحمل الكهربائي ما بين 24.2 و 194.4 مليون دولار أمريكي. يعكس الأول إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 15% ومتغير فترة الذروة صيفا بينما يعكس الأخير إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 35% ومتغير اليوم بأكمله. وتعتبر هذه الوفورات أكبر بمعدل يتراوح ما بين 3 إلى 11 مرة، من الوفورات المرتبطة بالنفط الخام وبالسعر المقنن.

تظهر النتائج الواردة في الجدول (5) أنه في سيناريو تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 15%، قلت الوفورات بالتزامن مع زيادة سعر الغاز، وحصلنا على هذه النتيجة لأن تحويل الحمل الكهربائي عند هذا المستوى يزيد من استخدام الغاز الطبيعي مقارنة بالسيناريو الأساسي، على النحو الموضح في الجدول (4). وبالتالي، فإن الزيادة في سعر الغاز الطبيعي تؤثر تأثيرا سلبيا على الوفورات. وفي المقابل، تزيد الوفورات في السيناريوهات الأخرى (أي عندما تكون إمكانية تحويل الحمل الكهربائي 25% و 35%) بالتزامن مع ارتفاع سعر الغاز. وهذه النتيجة مدفوعة بالتقليل من وتيرة استخدام الغاز الطبيعي مقارنة بسيناريو خط الأساس، فيما تزيد الوفورات بالتزامن مع ارتفاع قيمة الوقود.

كذلك تصبح الوفورات أكبر عندما يتم توزيع الأحمال المحولة على فترات زمنية أطول. أو بعبارة أخرى، يحقق متغير اليوم بأكمله ونصف اليوم وفورات أكبر من متغير فترة الذروة صيفا. ويؤدي استهداف ساعات الذروة (من الساعة 1 مساء إلى الساعة 5 مساء)، كما هي الحال في المتغير الأخير إلى تحقيق وفورات أقل. وتتسع فجوة الوفورات بين متغير فترة الذروة صيفا، والمتغيرات ذات التحويلات على مدى فترات زمنية طويلة (أي اليوم بأكمله ومنتصف اليوم) بالتزامن مع زيادة إمكانية تحويل الحمل الكهربائي. وبالفعل، تتراوح وفورات تكلفة الوقود ما بين 7.8 و 9.4 مليون دولار أمريكي في متغير فترة الذروة صيفا. وعلى العكس من ذلك، فإنها تتراوح ما بين 8.7 و 17.6 مليون دولار أمريكي في المتغيرات الأخرى، وذلك بالتزامن مع زيادة وفورات الوقود بسبب زيادة إمكانية تحويل الحمل الكهربائي.

الوفورات الناتجة عن تحويل الحمل الكهربائي بناء على تكاليف الفرص البديلة

يعد تقييم الوفورات في سيناريوهات تحويل الحمل الكهربائي بناء على أسعار الوقود المنظمة بمثابة الخطوة الأولى في تحليلنا. ويمكن استخدام الوقود في أنشطة أخرى أكثر ربحية، مثل البتروكيماويات أو الصادرات إلى الأسواق العالمية. وبالتالي، فإن استخدام الوقود في قطاع الطاقة يخلق تكاليف للفرص البديلة ينبغي مراعاتها في تحليلنا. وللمقايمة بذلك، فإننا نقيم وفورات الوقود من تحويل الحمل الكهربائي عن طريق تخصيص قيم بديلة للوقود الموفر.

يوضح الجدول (5) صافي الوفورات المتأتبة من خفض الوقود وبأسعار مختلفة لتسع حالات جرت محاكاتها. يرجى ملاحظة أن الوفورات تشمل تكاليف زيت الوقود الثقيل أو وفوراته وبالأسعار المنظمة. وقد استبعدنا زيت الوقود الثقيل من تحليل تكلفة الفرصة البديلة، وأبقينا على قيمته بالسعر المدار عند 0.6 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية. ويجب أن يتوافق هذا الوقود مع اللائحة

4. النتائج والمناقشة

أو الحدية فقط. ومن الأمثلة على ذلك أنه بمراعاة الزيادة في سعر الغاز من 1.25 دولار أمريكي لكل مليون وحدة حرارية بريطانية إلى 4 دولارات أمريكية لكل مليون وحدة حرارية بريطانية. وفي هذه الحالة، وفي سيناريو إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 35% مع متغير اليوم بأكمله فإن الوفورات الإجمالية للمملكة العربية السعودية ستزيد بقيمة 8 ملايين دولار أمريكي. وتحديدًا، ستزيد هذه الوفورات من 231.4 إلى 239.9 مليون دولار أمريكي، كما هو موضح في الجدول (5). وبالتالي، نجد في هذا المثال أن 98% من الوفورات مستمدة من النفط الخام (234.6 مليون دولار أمريكي من 239.4 مليون دولار أمريكي)، بما في ذلك التكلفة الإضافية لزيت الوقود الثقيل.

ولتوضيح نهائي لفرصة الوفورات، فإننا قمنا باعتبار السعر العالمي للخام العربي الخفيف مرجعًا لتكلفة الفرصة البديلة. ويبلغ هذا السعر حاليًا 70.6 دولار أمريكي للبرميل. وبموجب هذا الافتراض، فإن المكاسب المالية تصل إلى 129.3 مليون دولار أمريكي بسعر الغاز الطبيعي المقنن في سيناريو إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 15%، ومع متغير فترة الذروة صيفًا. في حين تصل المكاسب إلى 231.4 مليون دولار أمريكي في سيناريو إمكانية تحويل الحمل الكهربائي بنسبة 35% مع متغير اليوم بأكمله (الجدول 5).

تأتي كل الوفورات المالية من تجنب النفط الخام (الجدول 4). وبالتالي، فإن الزيادة في سعر الغاز الطبيعي تؤثر على الوفورات من الناحية الهامشية

الجدول 5. صافي الوفورات السنوية بملايين الدولارات بما في ذلك تكاليف الفرص البديلة للنفط الخام والغاز الطبيعي

التحويل خلال فترة الذروة صيفًا				التحويل لنصف يوم				التحويل ليوم بأكمله				سعر النفط الخام (دولار أمريكي/البرميل)	إمكانية تحويل الحمل الكهربائي	
سعر الغاز الطبيعي (دولار أمريكي/ مليون وحدة حرارية بريطانية)														
4.0	3.0	2.0	1.25	4.0	3.0	2.0	1.25	4.0	3.0	2.0	1.25			
5.7	6.5	7.3	7.9	4.7	6.2	7.6	8.7	4.5	6.2	7.8	9.1	6.4	%15	
35.7	36.5	37.3	37.9	38.8	40.2	41.7	42.8	40.2	41.9	43.5	44.8	22.0		
77.8	78.6	79.4	79.9	86.5	87.9	89.4	90.5	90.2	91.9	93.5	94.8	43.8		
127.2	128.0	128.7	129.3	142.5	143.9	145.4	146.5	148.9	150.6	152.3	153.5	70.6		
10.2	9.9	9.7	9.5	12.7	12.4	12.2	12.0	15.5	14.9	14.3	13.8	6.4	%25	
45.8	45.6	45.3	45.1	54.4	54.1	53.9	53.7	61.0	60.4	59.8	59.4	22.0		
95.8	95.5	95.2	95.0	112.8	112.6	112.3	112.1	124.8	124.2	123.6	123.2	43.8		
154.4	154.1	153.9	153.7	181.4	181.2	181.0	180.8	199.7	199.1	198.6	198.1	70.6		
8.3	8.2	8.1	8.0	18.2	16.5	14.9	13.6	25.7	22.8	19.9	17.7	6.4	%35	
45.2	45.2	45.1	45.0	64.0	62.4	60.7	59.5	78.5	75.6	72.7	70.5	22.0		
97.0	96.9	96.9	96.8	128.3	126.7	125.0	123.8	152.5	149.6	146.7	144.5	43.8		
157.9	157.8	157.7	157.6	203.8	202.1	200.5	199.2	239.4	236.5	233.5	231.4	70.6		

المصدر: تقديرات المؤلف استنادًا إلى نتائج نموذج كابسارك للطاقة.

آلية تحويل الحمل الكهربائي على الأنشطة ذات الإمكانية العالية لتحويل الحمل الكهربائي بناء على الخبرات الدولية، إلا أننا نجد أن إمكانية تحويل الحمل الكهربائي تعد محدودة بالنسبة لهذه الأنشطة. غير أن الأهم من ذلك، أن عددا قليلا من كبار المشغلين الصناعيين يقومون بتجميع هذه الأنشطة. فمثلا وعلى الرغم من أن المملكة العربية السعودية تعد أحد كبار منتجي الأسمنت، إلا أننا نجد أن هذا القطاع يضم حوالي 17 شركة، تشارك خمس شركات من بينها بنحو 50% من السوق (Aljazira Capital 2021). فيما تهيمن الشركات الوطنية على غرار شركات معادن والشركة السعودية للصناعات الأساسية (سابك) على أنشطة الألومنيوم والبتروكيماويات. ويزيد هذا المخطط المجمع للأنشطة من المرونة لمواءمة الجوانب التعاقدية مع أنماط الحمل الكهربائي لصناعة معينة، فضلا عن متطلبات الأعمال. علاوة على ذلك، فإنه يمكن لنشر استخدام العدادات الذكية أن يكون عامل تمكين تقني لتحويل الحمل الكهربائي. فيما يعد تركيب العدادات الذكية على مستوى الآلات أمرا بالغ الأهمية بالنسبة لعمليات تحويل الحمل الكهربائي إلى حين تحقيق توازن استخدام الطاقة في شركات التصنيع (Pechmann et al. 2017).

فضلا عن ذلك، يعد إنشاء سلة للوقود الموفر جانبا آخر بالغ الأهمية بالنسبة لعملية تحويل الحمل الكهربائي. وتبين سيناريوهات تحويل الحمل الكهربائي أن الوقود يعد بصفة عامة نفطا خام، وأنه يتم التعويض عن هذه الوفورات جزئيا بالزيادة في زيت الوقود الثقيل. أما فيما يتعلق بالأسواق العالمية، فيتم تداول زيت الوقود الثقيل بسعر خصم يقدر بـ 150 دولار للطن الواحد، مما يعد أقل من سعر خام برنت في الفترة الواقعة ما بين عام 2017، ومنتصف عام 2019. وفي أواخر عام 2019، اقترب موعد إنفاذ لائحة المنظمة البحرية الدولية حول محتوى الكبريت في زيت الوقود الثقيل. ووصل سعر الخصم بالنسبة للنفط الخام في ذلك الوقت

تعمل سيناريوهات تحويل الحمل الكهربائي على خفض الاستهلاك الكلي للغاز الطبيعي في قطاع الطاقة بصورة حدية فقط. ومع ذلك، فهي تسمح بإرسال كميات مخصصة من الغاز إلى قطاع الطاقة. وتعتمد المملكة على الغاز الطبيعي في ما يقارب نصف عمليات توليد الطاقة. وباستخدام نموذج نظام الطاقة السعودي، يظهر (Matar and Shabaneh 2020) أنه بإمكان المملكة التغلب على التقلبات الموسمية للطلب من خلال الاستثمار في تخزين الغاز الطبيعي. يتسبب هذا التباين في حدوث ازدحام في البنية التحتية لخطوط الغاز الطبيعي خلال الصيف لتلبية ذوة الحمل الكهربائي. وقدروا أن الاستثمارات في منشآت التخزين قد تكلف حوالي 11.5 مليار دولار. وقد يؤدي التحويل الإستراتيجي للحمل الكهربائي إلى خارج أوقات الذروة إلى تقييد أو تأجيل الاستثمارات في مثل هذه البنية التحتية.

بينما يقيم (Shabaneh and Schenckery 2020) الجدوى المالية لاستخدام واردات الغاز الطبيعي المسال لتحل محل النفط الخام في قطاع الطاقة. وتوضح عمليات المحاكاة أن تحويل الحمل الكهربائي من فصل الصيف يحل محل النفط المستخدم في توليد الطاقة مع الحفاظ على استهلاك الغاز الطبيعي دون تغيير تقريبا. وبالتالي، يمكن لتحويل الحمل الكهربائي أن يجنبنا الحاجة إلى استيراد الغاز الطبيعي المسال لسد الفجوة الناتجة عن خفض استهلاك النفط في عمليات توليد الطاقة.

عوامل التمكين والعوائق والتطورات المستقبلية المحتملة

يتعين مناقشة العوائق وعوامل التمكين الهامة لتحقيق وفورات الوقود والوفورات المالية المتوقعة. إذ يمكن للعوامل التمكينية أن تجعل تحويل الحمل الكهربائي في قطاع الصناعة قابلا للتطبيق وجاذبا في ظل السياق السعودي. وكما ذكرنا سابقا، فإنه يمكن للصناعات الكبرى كثيفة الاستهلاك للكهرباء في المملكة العربية السعودية تطبيق

التشغيل، والتأثير على جودة المنتج، وحالات عدم اليقين بشأن وفورات التكلفة. ومع ذلك، يعد الوصول إلى رأس المال، والافتقار إلى وجود عمال مدربين، وأمن البيانات أقل العوائق الماثلة أمام تحويل الحمل الكهربائي في المواقع الصناعية من حيث الأهمية. علاوة على ذلك، قد تكون قيود المعالجة بالغة الأهمية، نظراً لأن العمليات الصناعية لها مزايا وتكاليف مختلفة للحمل. وقد لا تكون القدرات الموسمية قابلة للتطبيق بسبب نقص الحوافز الاقتصادية أو القيود التقنية (Yang, DeFrain, and Faruqi 2020).

أخيراً، قد تتأثر نتائجنا بالتغيرات المستقبلية في مزيج الطاقة السعودي، حيث حددت المملكة العربية السعودية هدفاً يتمثل في توليد 50% من الطاقة من موارد الطاقة المتجددة، و50% من الغاز الطبيعي بحلول عام 2030. وبالتالي، قد تتغير نتائج عمليات المحاكاة مع زيادة حصة موارد الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة للمملكة العربية السعودية.

إلى 300 دولار أمريكي للطن (Shabaneh, Al) (Sadoon, and Al Mestneer 2019). وبالتالي، يمكن لتحويل الحمل الكهربائي أن يخفض من معدلات الاستخدام المحلي للنقط الخام الذي يمكن تصديره بأعلى من القيمة العادية مقارنةً بزيت الوقود الثقيل. وأن يزيد في الوقت نفسه من حصة زيت الوقود الثقيل في مزيج الطاقة بصورة حدية فقط.

كما أننا نقيم في هذه الدراسة تحويل الحمل الكهربائي من منظور نظام الطاقة الوطني، إذ تنشأ المكاسب المالية من المدخرات حيث يتم تقليل الكمية الإجمالية للوقود في نظام الطاقة. ويعد هذا النهج مدفوعاً بحقيقة أن أسعار الكهرباء تكون ثابتة على مدار العام. وبالتالي، فقد تضع العديد من العوامل عوائقاً أمام استخدام آلية تحويل الحمل الكهربائي في قطاع الصناعة. كما قام كل من (Olsthoorn, Schleich, and Klobasa 2015)) بتحليل استطلاع لمواقع تصنيع ألمانية. وتوصلوا إلى أن أكبر العوائق أمام مراعاة تحويل الحمل تتمثل في خطر وجود خلل أثناء عملية

الوقود السنوية لنظام الطاقة. وتؤكد هذه الدراسة على الفوائد المحتملة لتحويل الحمل في قطاع الصناعة. ومع ذلك، فإن العديد من العوامل قد تعيق تنفيذ الخطة الوطنية لتحويل الحمل الكهربائي. لذا، ينبغي أن تركز الجهود البحثية المستقبلية على دراسة العوامل التي قد تسرع من عملية طرح إستراتيجية التآزر التي تشمل المستهلكين الصناعيين، ومنتجي الكهرباء، وموردي الوقود. وتوصي هذه الدراسة بالآتي:

ضرورة إجراء اختبارات تجريبية على مستوى المنشآت الصناعية للتعرف على إمكانيات المرونة الفنية لتحويل الحمل الكهربائي.

النظر في هياكل الدفع المختلفة الرامية إلى تحفيز جدولة الطلب لتعكس التباين في تكلفة توفير الطاقة الكهربائية .

فهم تكلفة الفرصة البديلة للوقود الموفر لتحسين قيمته عبر الاستخدامات المحلية والصادرات إلى الأسواق العالمية.

أجرت هذه الدراسة عمليات المحاكاة باستخدام نموذج وطني لتحسين توزيع الطاقة، بينت أن إزاحة الحمل الصناعي جزئياً من موسم الذروة (أي في فصل الصيف) إلى أوقات أخرى من السنة قد أدت إلى تحقيق وفورات في الوقود. ويتم تحقيق هذه الوفورات دون خفض معدلات الاستهلاك الكلي للكهرباء. كما توصلنا تحديداً إلى أن زيادة سعر الغاز الطبيعي لا تحسن من إجمالي وفورات الوقود إلا عندما تكون نسبة إجمالي تحويل الحمل الصناعي أكثر من 15%. علاوة على ذلك، تتأثر الوفورات بإمكانية تحويل الحمل الكهربائي، والفترة الزمنية من اليوم التي يحدث فيها التحويل. وبشكل عام، تتراوح المكاسب المتوقعة على المستوى الوطني ما بين 7.9 إلى 17.7 مليون دولار سنوياً وفقاً لأسعار الوقود المنظمة. وتعد هذه الوفورات بسيطة نسبياً لعدة أسباب مثل التوزيع الإقليمي للطلب الصناعي، ومزيج الطاقة، وانخفاض أسعار الوقود المدارة السائدة. ومع ذلك، وعند النظر في تكلفة الفرصة البديلة للوقود الموفر الناجم عن تحويل الحمل الكهربائي، فنجد أن الوفورات تتراوح ما بين 127.2 و 239.4 مليون دولار سنوياً. وتشكل هذه الوفورات ما يتراوح ما بين 4.2% و 8.1% من تكلفة

¹ تشمل هذه الأنشطة منتجات المعادن الأساسية والمواد والمنتجات الكيماوية ومنتجات المطاط والبلاستيك والمنتجات اللافلزية الأخرى والمعادن المحسّنة (باستثناء الآلات والمعدات) (SAMA 2019).

² تعتمد هذه القيمة على إنتاج 967 ألف طن من الألومنيوم و 4 ملايين طن من الأمونيا (منتج كيميائي رئيس في المملكة العربية السعودية). يبلغ إنتاج الأسمنت والصلب 44 مليون طن و 8.2 مليون طن على التوالي (Arab Iron and Steel Union 2019; Saudi Arabian Mining Company 2019; SAMA 2019; World Steel Association 2020). تعكس جميع كميات الإنتاج بيانات عام 2018. نفترض أن تكون كثافات الكهرباء 15,100 كيلوواط ساعة/الطن و160 كيلوواط ساعة/الطن و110 كيلوواط ساعة/الطن و 585 كيلوواط ساعة/الطن للألومنيوم والأمونيا والأسمنت والصلب، على التوالي (Worrell et al. 2000; Albelwi, Kwan, and Rezgui 2017; CEPS and Ecofys 2018; IEA 2021). لا نأخذ في الاعتبار توليد الطاقة الاحتياطي.

³ توضح هذه الدراسة الوفورات بالرانند الجنوب أفريقي (ZAR). واستخدمنا سعر الصرف للدولار الأمريكي الذي يعادل 14.6 راند.

⁴ البرنامج متوفر من خلال هذا الرابط: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/>

⁵ قامت المملكة العربية السعودية بتركيب 10 ملايين عداد ذكي لجميع فئات المستهلكين حتى شهر أبريل 2021 (<https://www.smart-energy.com/industry-sectors/energy-grid-management/>) (/saudi-arabias-ami-project-progresses-with-10-million-smart-meter-rollout).

⁶ توصيات تحسين الاستهلاك الصادرة عن الشركة السعودية للكهرباء ملخصة في هذا الرابط (<https://www.se.com.sa/en-us/Pages/IndustrialSector.aspx>).

⁷ يحتوي نموذج الطاقة على ست مناطق تشغيلية. ومع ذلك، فإن الجهة المنظمة تقدم بيانات عن أربع مناطق تشغيلية في المملكة لحساب حصص الحمل، نضيف حمل المنطقة الشمالية الشرقية إلى حمل المنطقة الشرقية. ونضيف حمل المنطقة الشمالية الغربية إلى حمل المنطقة الغربية.

⁸ على سبيل المثال، انخفضت صادرات المملكة العربية السعودية من زيت الوقود الثقيل بنسبة 51% من عام 2019 إلى عام 2020.

⁹ يقيم Elshurafa et al. (2021) سبل الوصول إلى هذا الهدف.

- Alarenan, Shahad, Anwar A. Gasim, and Lester C. Hunt. 2020. "Modelling Industrial Energy Demand in Saudi Arabia." *Energy Economics* 85:104554. DOI: [10.1016/j.eneco.2019.104554](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104554)
- Albelwi, Naif, Alan Kwan, and Yacine Rezgui. 2017. "Using Material and Energy Flow Analysis to Estimate Future Energy Demand at the City Level." *Energy Procedia* 115:440–50. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.05.041](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.041)
- Aldubyan, Mohammad, and Anwar Gasim. 2021. "Energy Price Reform in Saudi Arabia: Modeling the Economic and Environmental Impacts and Understanding the Demand Response." *Energy Policy* 148:111941. DOI: [10.1016/j.enpol.2020.111941](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111941)
- Aljazira Capital. 2021. *Cement Dispatches for July 2021: Saudi Cement Sector Monthly Report*. Riyadh: Aljazira Capital. <https://www.aljaziracapital.com.sa/uploads/pdf/20210809035216-Cement%20Dispatches%20-%20July%202021%20En.pdf>
- Alyousef, Yousef, and Mahmoud Abu-Ebid. 2012. "Energy Efficiency Initiatives for Saudi Arabia on Supply and Demand Sides." In *Energy Efficiency: A Bridge to Low Carbon Economy*, edited by Zoran Morvaj, 297–308. London: IntechOpen. DOI: [10.5772/38660](https://doi.org/10.5772/38660)
- Alyousef, Yousef, and Paul Stevens. 2011. "The Cost of Domestic Energy Prices to Saudi Arabia." *Energy Policy* 39(11):6900–5. DOI: [10.1016/j.enpol.2011.08.025](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.025)
- Arab Iron and Steel Union. 2019. "Steel and Cement Prices in Saudi Arabia in 2019." Accessed March 20, 2021. <https://aisusteel.org/en/archives/16642>
- Ashok, Sas. 2006. "Peak-load Management in Steel Plants." *Applied Energy* 83(5):413–24. DOI: [10.1016/j.apenergy.2005.05.002](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.05.002)
- Ashok, Sharmila, and Rangan Banerjee. 2000. "Load-management Applications for the Industrial Sector." *Applied Energy* 66(2):105–11. DOI: [10.1016/S0306-2619\(99\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00125-7)
- Babu, Challa, and Sas Ashok. 2008. "Peak Load Management in Electrolytic Process Industries." *IEEE Transactions on Power Systems* 23(2):399–405. DOI: [10.1109/TPWRS.2008.920732](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.920732)
- Bradley, Peter, Matthew Leach, and Jacopo Torriti. 2013. "A Review of the Costs and Benefits of Demand Response for Electricity in the UK." *Energy Policy* 52:312–27. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.09.039](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.039)
- Centre for European Policy Studies (CEPS) and Ecofys. 2018. *Composition and Drivers of Energy Prices and Costs: Case Studies in Selected Energy Intensive Industries – 2018*. Luxembourg: European Commission. Doi: [10.2873/004141](https://doi.org/10.2873/004141).
- Dutta, Goutam, and Krishnendranath Mitra. 2017. "A Literature Review on Dynamic Pricing of Electricity." *Journal of the Operational Research Society* 68(10):1131–45. DOI: [10.1057/s41274-016-0149-4](https://doi.org/10.1057/s41274-016-0149-4)
- Electricity and Cogeneration Regulatory Authority (ECRA). 2020. *Annual Statistical Booklet for Electricity and Seawater Desalination Industries 2019*. Riyadh: ECRA.
- 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 Walid Matar. 2017. "Adding Solar PV to the Saudi Power System: What is the Cost of Intermittency?" *Energy Transitions* 1(1):1–9.

- 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)
- Enerdata. 2019. *Global Energy and CO2 Data*. Grenoble, France: Enerdata.
- Faruqui, Ahamd, Ryan Hledik, Greg Wikler, Debyani Ghosh, Joe Priyanonda, and Nilesh Dayal. 2011. *Bringing Demand-side Management to the Kingdom of Saudi Arabia*. Boston: The Brattle Group.
- Fattouh, Bassam, and Laura El-Katiri. 2013. "Energy Subsidies in the Middle East and North Africa." *Energy Strategy Reviews* 2(1):108–15. DOI: [10.1016/j.esr.2012.11.004](https://doi.org/10.1016/j.esr.2012.11.004)
- Gately, Dermot, Nourah Al-Yousef, and Hamad M. Al-Sheikh. 2012. "The Rapid Growth of Domestic Oil Consumption in Saudi Arabia and the Opportunity Cost of Oil Exports Foregone." *Energy Policy* 47:57–68. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.04.011](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.011)
- Howarth, Nicholas, Natalia Odnoletkova, Thamer Alshehri, Abdullah Almadani, Alessandro Lanza, and Tadeusz Patzek. 2020. "Staying Cool in a Warming Climate: Temperature, Electricity and Air Conditioning in Saudi Arabia." *Climate* 8(1):4. DOI: [10.3390/cli8010004](https://doi.org/10.3390/cli8010004)
- IEA. 2021. Cement. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/cement>. Accessed, April 20, 2021.
- Karanfil, Fatih, and Axel Pierru. 2021. "The Opportunity Cost of Domestic Oil Consumption for an Oil Exporter: Illustration for Saudi Arabia." *Energy Economics* 96:105161. DOI: [10.1016/j.eneco.2021.105161](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105161)
- Li, Kevin, Min Wu, Xiaohan Gu, KumFai Yuen, and Yi Xiao. 2020. "Determinants of Ship Operators' Options for Compliance with IMO 2020." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 86:102459. DOI: [10.1016/j.trd.2020.102459](https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102459)
- Lidbetter, Raine, and Leon Liebenberg. 2013. "Load-shifting Opportunities for Typical Cement Plants." *Journal of Energy in Southern Africa* 24(1):35–45. DOI: [10.17159/2413-3051/2013/v24i1a3005](https://doi.org/10.17159/2413-3051/2013/v24i1a3005)
- Lund, Peter D., Juuso Lindgren, Jani Mikkola, and Jyri Salpakari. 2015. "Review of Energy System Flexibility Measures to Enable High Levels of Variable Renewable Electricity." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45:785–807. DOI: [10.1016/j.rser.2015.01.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057)
- Maneschijn, Raynard, Jan C. Vosloo, and Marc J. Mathews. 2016. "Investigating Load Shift Potential Through the Use of Off-gas Holders on South African Steel Plants." International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), Cape Town, South Africa, 104–111.
- Matar, Walid, and Murad Anwer. 2017. "Jointly Reforming the Prices of Industrial Fuels and Residential Electricity in Saudi Arabia." *Energy Policy* 109:747–56. DOI: [10.1016/j.enpol.2017.07.060](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.060)
- Matar, Walid, and Amro M. Elshurafa. 2017. "Striking a Balance between Profit and Carbon Dioxide Emissions in the Saudi Cement Industry." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 61:111–23. DOI: [10.1016/j.ijggc.2017.03.031](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.031)

- Matar, Walid, and Rami Shabaneh. 2020. "Viability of Seasonal Natural Gas Storage in the Saudi Energy System." *Energy Strategy Reviews* 32:100549. DOI: [10.1016/j.esr.2020.100549](https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100549)
- 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. DOI: [10.1016/j.enpol.2020.111796](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111796)
- Moya, Jose A., and Aikaterini Boulamanti. 2016. *Production Costs from Energy-Intensive Industries in the EU and Third Countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Nebel, Arjuna, Christine Krüger, Tomke Janßen, Mathieu Saurat, Sebastian Kiefer, and Karin Arnold. 2020. "Comparison of the Effects of Industrial Demand Side Management and Other Flexibilities on the Performance of the Energy System." *Energies* 13(17):4448. DOI: [10.3390/en13174448](https://doi.org/10.3390/en13174448)
- O'Connell, Niamh, Pierre Pinson, Henri Madsen, and Mark O'Malley. 2014. "Benefits and Challenges of Electrical Demand Response: A Critical Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:686–99. DOI: [10.1016/j.rser.2014.07.098](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.098)
- Olsthoorn, Mark, Joachim Schleich, and Marian Klobasa. 2015. "Barriers to Electricity Load Shift in Companies: A Survey-based Exploration of the End-user Perspective." *Energy Policy* 76:32–42. DOI: [10.1016/j.enpol.2014.11.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.015)
- Paulus, Mortiz, and Frieder Borggrefe. 2011. "The Potential of Demand-side Management in Energy-intensive Industries for Electricity Markets in Germany." *Applied Energy* 88(2):432–41. DOI: [10.1016/j.apenergy.2010.03.017](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.017)
- Pechmann, Agnes, Fadi Shrouf, Max Chonin, and Nanke Steenhusen. 2017. "Load-shifting Potential at SMEs Manufacturing Sites: A Methodology and Case Study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78:431–8. DOI: [10.1016/j.rser.2017.04.081](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.081)
- Saudi Arabian Mining Company. 2019. "Saudi Arabian Mining Company (Ma'aden) Earnings Conference Call – Year End 2019." Accessed March 20, 2021. <https://www.maaden.com.sa/download/2019-Earnings-Call-FY-En.pdf>
- Saudi Arabian Monetary Authority (SAMA). 2019. *Annual Statistics 2019*. Riyadh: SAMA.
- Shabaneh, Rami, Hamid Al Sadoon, and Raed Al Mestneer. 2019. *Implications of IMO 2020: The Potential for High Sulfur Fuel Oil Penetration in Saudi Arabia*. Riyadh: KAPSARC.
- Shabaneh, Rami, and Maxime Schenckery. 2020. "Assessing Energy Policy Instruments: LNG Imports into Saudi Arabia." *Energy Policy* 137:111101. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.111101](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111101)
- Shafie-khah, Miadreza, Pierluigi Siano, J. Aghaei, Mohammad A. Masoum, Fangxing Li, and João P. Catalão. 2019. "Comprehensive Review of the Recent Advances in Industrial and Commercial DR." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15(7):3757–71. DOI: [10.1109/TII.2019.2909276](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2909276)
- Shoreh, Maryam H., Pierluigi Siano, Miadreza Shafie-khah, Vincenzo Loia, and João P. Catalão. 2016. "A Survey of Industrial Applications of Demand Response." *Electric Power Systems Research* 141:31–49. DOI: [10.1016/j.epsr.2016.07.008](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.008)

- Summerbell, Daniel L., Diana Khripko, Claire Barlow, and Jens Hesselbach. 2017. "Cost and Carbon Reductions from Industrial Demand-side Management: Study of Potential Savings at a Cement Plant." *Applied Energy* 197:100–13. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.03.083](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.083)
- World Steel Association. 2020. "World Steel in Figures 2020." Accessed March 20, 2021. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/>
- Worrell, Ernst, Dian Phylipsen, Dan Einstein, and Nathan Martin. 2000. *Energy Use and Energy Intensity of the US Chemical Industry*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Lab.
- Yang, Yingxia, Jared DeFrain, and Ahmad Faruqi. 2020. "Conceptual Discussion on a Potential Hidden Cross-seasonal Storage: Cross-seasonal Load Shift in Industrial Sectors." *The Electricity Journal* 33(8):106846. DOI: [10.1016/j.tej.2020.106846](https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106846)
- Yao, Mingtao, Zhaoguang Hu, Ning Zhang, Wei Duan, and Jian Zhang. 2015. "Low-carbon Benefits Analysis of Energy-intensive Industrial Demand Response Resources for Ancillary Services." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 3(1):131–8. DOI: [10.1007/s40565-015-0102-6](https://doi.org/10.1007/s40565-015-0102-6)
- Zhao, Xiancong, Hao Bai, Qi Shi, Xin Lu, and Zhijui Zhang. 2017. "Optimal Scheduling of a Byproduct Gas System in a Steel Plant Considering Time-of-use Electricity Pricing." *Applied Energy* 195:100–13. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.03.037](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.037)
- Zohrabian, Angineh, and Kelly T. Sanders. 2021. "Emitting Less without Curbing Usage? Exploring Greenhouse Gas Mitigation Strategies in the Water Industry Through Load Shifting." *Applied Energy* 298:117194. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117194](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117194)

يمثل الحمل الكهربائي المحول (SL) الاختلاف ما بين الحمل الصناعي الأولي، والحمل الكهربائي بعد تطبيق إمكانية التحويل. وبالتالي يكون الحمل المحول بالسالب في أشهر الصيف (أي $SL_i < 0$) لأننا نقوم بطرح الحمل المراد تحويله. في حين يكون الحمل المحول بالموجب في أشهر الشتاء (أي $SL_j > 0$) لأننا نضيف الحمل الكهربائي المحول إلى الحمل الكهربائي في هذه الأشهر.

$$SL_i = LS_i - IL_i$$

$$SL_j = LS_j - IL_j$$

يوضح الشكل (أ) الأحمال الكهربائية الشهرية قبل تحويل الحمل الكهربائي وبعده باستخدام هذا الإجراء. وجرى توضيح عمليات تحويل الحمل الكهربائي في الأشهر المندرجة ضمن المجموعتين (i) و (j) باللونين الأحمر والأخضر. وجرى توضيح (SL_i) و (SL_j) في الشكل أ من خلال الفجوات ما بين الأحمال الفعلية والأحمال المحولة في شهري فبراير (أ) ويونيو (ب).

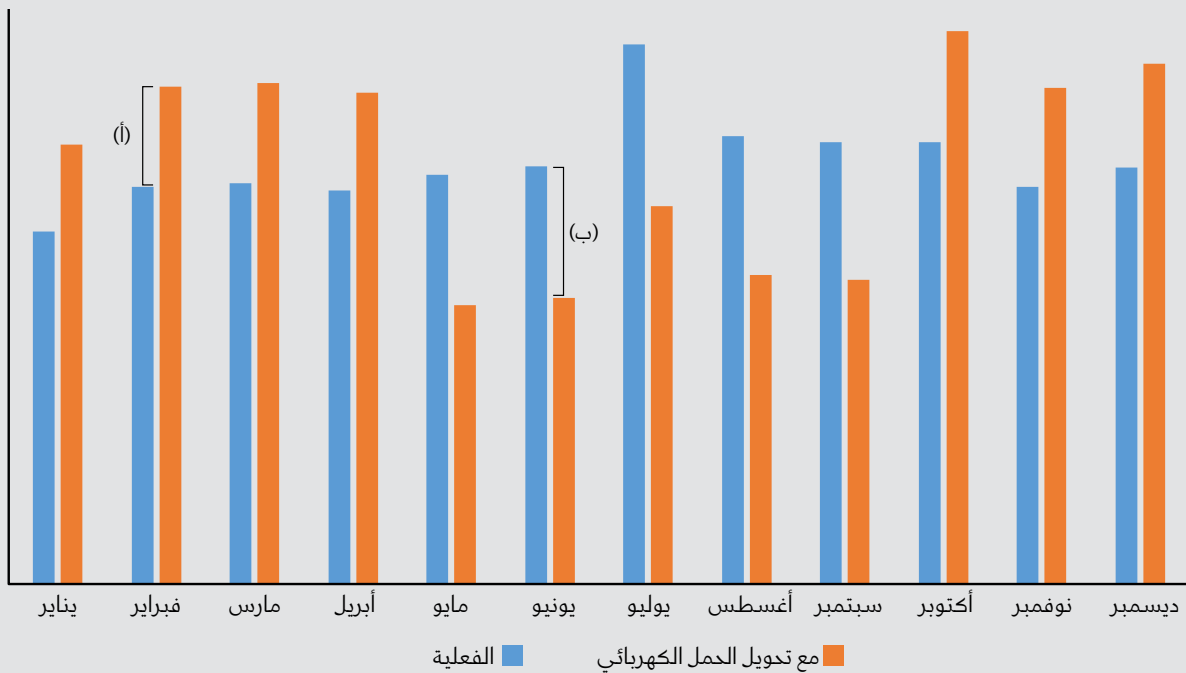
يقدم هذا الملحق تمثيلاً رياضياً مفصلاً لعملية تحويل الحمل الكهربائي الواردة في القسم (3.2). وقد بدأنا أولاً بالبيانات الدالة على إجمالي استهلاك الكهرباء الشهري في قطاع الصناعة (IL) التي قدمتها الشركة السعودية للكهرباء. وتم تصنيف الأحمال الكهربائية إلى مجموعتين، تمثل المجموعة الأولى منهما الحمل المراد تخفيضه خلال أشهر الصيف (LS_i) فيما تمثل المجموعة الثانية الحمل المراد زيادته في باقي أوقات السنة (LS_j). وحددنا هذه الأحمال عن طريق تطبيق إمكانية تحويل الحمل الكهربائي.

$$\begin{cases} LS_i = IL_i \times (1 - SP) \\ LS_j = IL_j \times (1 + SP) \end{cases}, \text{ with } SP = 15\%, 25\%, 35\%$$

حيث يمثل (i) الأشهر التالية: مايو ويونيو ويوليو وأغسطس وسبتمبر

فيما يمثل (j) الأشهر التالية: يناير وفبراير ومارس وأبريل وأكتوبر ونوفمبر وديسمبر.

الشكل أ. الأحمال الشهرية الملحوظة لقطاع الصناعة والأحمال الكهربائية مع التحويل عند مستوى إمكانية 25%



المصدر: الشركة السعودية للكهرباء

ملاحظة: تم إخفاء مستويات الأحمال الكهربائية لتجنب الكشف عن البيانات التجارية

ثم يتم ترجيح الاختلافات لكل ساعة، SL_i و SL_j ، حسب حصص الحمل الصناعي الإقليمية الواردة في الجدول 2. أخيرًا ، يتم زيادة منحنى الحمل الإقليمي الإجمالي (TL)، وهو مدخل في نموذج كابسارك للطاقة، من خلال صافي الأحمال الصناعية المحولة حسب المنطقة.

$$TL'_{i,r} = TL_{i,r} + SL'_{i,r}$$

$$TL'_{j,r} = TL_{j,r} + SL'_{i,r}$$

يمثل (TL) الحمل الإقليمي الإجمالي المحدث بعد تحويل الحمل الكهربائي. ويشير (r) إلى المنطقة. في حين أن $r = COA, EOA, SOA, WOA, NWOA, NEOA$.

نقوم بمجرد اشتقاق إجمالي الحمل الكهربائي المحول لكل شهر، بحساب الأحمال الكهربائية المقابلة المراد تحويلها بحسب الفترة. أو بعبارة أخرى، أننا نقوم بحساب الساعات المراد زيادة الحمل الكهربائي أثناءها (P_i) أو تقليله (P_j) في كل شهر. ويعتمد عدد الساعات (n) التي يتم فيها تحويل الحمل الكهربائي على الساعات المستهدفة في كل من المتغيرات الثلاثة (اليوم بأكمله ومنتصف اليوم وفترة الذروة صيفا). فعلى سبيل المثال، كان عدد أيام العمل في شهر مايو من عام 2018 (23) يوما (علما أن أيام العمل في المملكة العربية السعودية من الأحد إلى الخميس). وبالتالي، (n) يساوي 552 في متغير اليوم بأكمله و276 في متغير منتصف اليوم و115 في فترة الذروة صيفا.

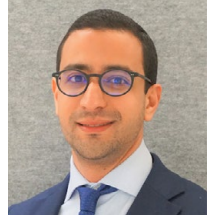
$$SL'_i = \frac{SL_i}{\sum_{h=1}^n P_{n,i}}$$

$$SL'_j = \frac{SL_j}{\sum_{h=1}^n P_{n,j}}$$

نبذة عن الباحثين

صلاح الدين سومان

باحث مشارك في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك)، يشرف على البحوث المتعلقة بسوق الكهرباء السعودية. وتشمل مواضيع بحثه الرئيسية نمذجة قطاع الطاقة، وإدارة جانب الطلب، والأطر التنظيمية. عمل صلاح الدين قبل انضمامه إلى كابسارك باحثًا مشاركًا في المؤتمر الدولي لتوزيع الكهرباء التابع للمركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي في باريس، حيث ركز على نمذجة الاقتصاد الكلي. وقد عمل أيضًا باحثًا في "مجموعة كهرباء فرنسا" ضمن شعبة البحث والتطوير، وكان جزءًا من أسواق الطاقة التابعة للشعبة ووحدة التنظيم البيئي. صلاح حاصل على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة باريس ساكلاي في فرنسا.



عمرو الشترفاء

زميل باحث في كابسارك، مع ما يقرب من 20 عامًا من الخبرة في مجالات الطاقة والتقنية في ثلاث قارات، يولي اهتمامه في مجالات أبحاثه بسياسات الطاقة المتجددة، ونمذجة نظم الطاقة، وتصميم وتحسين الشبكات الهجينة. وقاد ونفذ العديد من مبادرات النمذجة الوطنية على نطاق التوزيع والمولدات. ونشر أكثر من 40 ورقة وبحثًا علميًا، وسجل العديد من براءات الاختراع، عمرو حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية، وعلى درجة الماجستير في إدارة الأعمال في المالية.



حاتم العطوي

محلل بحوث أول في كابسارك، حاصل على درجة الماجستير في اقتصاديات نظام الطاقة من المعهد الملكي للتقنية في السويد، وكان تركيزه على أسواق الكهرباء، وحاصل على درجة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية من جامعة أيداهو. عمل حاتم قبل انضمامه إلى كابسارك 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 في مختبرات شواينزر الهندسية-الواقعة في ولاية واشنطن- على نمذجة محددات السرعة والمحرك الأساسية للتوربينات المائية والغازية.



فرانك فيلدر

مهندس ومحلل لسياسات الطاقة ومدير لبرنامج كابسارك لتحولات الطاقة والطاقة الكهربائية، عمل قبل انضمامه إلى كابسارك أستاذًا باحثًا في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز، ومديرًا لمعهد روتجرز للطاقة. وقد أجرى بحوثًا أصلية وتطبيقية في مجالات نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية وسياسات الطاقة النظيفة وتغير المناخ للوكالات الحكومية وشركات الطاقة والمؤسسات البحثية. كما عمل مستشارًا اقتصاديًا ومهندسًا نوويًا. حاصل على درجة الدكتوراه من معهد ماساتشوستس للتقنية.





www.kapsarc.org