

التأثيرات طويلة الأمد للتسعير الفوري للكهرباء في قطاع الطاقة في المملكة العربية السعودية

وليد مطر

عن كابسارك

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

إشعار قانوني

© حقوق النشر 2021 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.

تقوم هذه الدراسة بتقييم الآثار المترتبة على تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي (RTP) على التكاليف الحدية لتوليد الطاقة على المدى الطويل في المملكة العربية السعودية. ولهذا الغرض، تربط هذه الدراسة نموذج نظام الطاقة متعدد القطاعات بنموذج استخدام الكهرباء السكنية، حيث يشتمل نموذج نظام الطاقة على مكوّن اقتصادي لتحسين الاستخدام الأمثل لتوزيع الطاقة. كذلك يدمج إطار العمل السكني الأسر التي تكون قراراتها خاضعة لمبادئ الاقتصاد الجزئي، ضمن نموذج محاكاة طاقة المباني. فيما يستلزم التحليل تحرير أسعار الوقود بالنسبة لمرافق الطاقة وتحديد أسعار كهرباء ديناميكية تكون مساوية للتكلفة الحدية طويلة الأمد لإمداد الكهرباء. بينما لا تقدم أسعار الكهرباء إلا للأسر فقط لمجرد غرض توضيحي، ونورد فيما يلي النقاط الرئيسية لهذا التحليل:

يعد التسعير اللحظي أو الفوري للكهرباء أو تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي شكلا من أشكال التسعير الديناميكي للكهرباء، يعمل على الحد من التقلبات اليومية للتكاليف الحدية لمرافق الطاقة السعودية.

يؤدي تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي إلى خفض أحمال الطاقة، مما ينجم عنه بالتالي خفض الإنفاق الرأسمالي لقطاع الطاقة السعودي، كذلك يؤدي إلى تقليص الاستثمارات الناتجة في محطات توليد الطاقة بما يفوق تغطية تكلفة استبدال العدادات السكنية الذكية.

يؤدي التحليل إلى نتيجتين رئيسيتين، أولاً، إن تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي يعمل على التقليل من تباين التكاليف الحدية لمرافق الطاقة السعودية على مدار اليوم بالنسبة للسیناريو بدون تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي. وتكون الأسعار عندما يتم تحرير أسعار الوقود، بموجب تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي أعلى من أسعار الكهرباء لعام 2017. وبالتالي، فإنّ أحمال الطاقة تكون أقل، مما يؤدي إلى تراجع الاستثمارات في محطات الطاقة على المدى الطويل. كما يعد النمو في قدرة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في نظام الطاقة السعودي منخفضاً أيضاً. ويقلل انخفاض القدرة الكهروضوئية الإضافية من التباين الواسع في التكلفة الحدية للإنتاج بين فترتي النهار والليل بدون تخزين للطاقة.

ثانياً، يمكن أن تؤدي الاستثمارات المقلصة المتوقعة في محطات الطاقة نتيجة للتسعير في الوقت الفعلي إلى زيادة تغطية تكاليف استبدال العدادات السكنية الذكية. حيث يقدر أن يبلغ إجمالي الاستثمارات بمرور الوقت نحو 24 مليار دولار أقل في سيناريو التسعير في الوقت الفعلي. وبالمقارنة، تبلغ التكلفة الفعلية لاستبدال العدادات الذكية لجميع العملاء في القطاع السكني 2.4 مليار دولار.

تستكشف هذه الدراسة الآثار المحتملة للتسعير الفوري للكهرباء على عمليات قطاع توليد الطاقة في المملكة العربية السعودية. ذلك أنّ المملكة تحدد في الوقت الحالي أسعار الوقود بالنسبة لمرافق الطاقة عند المستويات التي تعمل على خفض تكاليف توليد الطاقة. ويوفر هذا التحليل رؤى حول تأثيرات مخططات تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي في سياق أسعار الوقود المحررة.

تحقيقاً لهذه الغاية، يجمع التحليل بين إطارين للنمذجة، يتمثل الإطار الأول في نموذج كابسارك للطاقة (KEM) وهو عبارة عن نموذج لنظام طاقة متعدد القطاعات في المملكة العربية السعودية. فيما يتمثل الإطار الثاني في نموذج استخدام الكهرباء السكنية. ويشتمل هذا النموذج السكني على الأسر التي تخضع لقراراتها لتعظيم الرفاهية، في إطار نموذج محاكاة طاقة المباني. يتم تشغيل النماذج بشكل متواتر لتحديد التكاليف الحدية المتوازنة لإمدادات الطاقة على المدى الطويل ومنحنيات أحمال الطاقة السكنية. ويعد مصطلح "المدى الطويل" غير مقيد بالوقت وإنما يشير إلى وقت ما في المستقبل البعيد عندما يتم التوصل إلى حالة مستقرة استناداً إلى بيانات بعض سنوات الأساس.

كذلك يستلزم التحليل تقسيم الأسر إلى مجموعات منخفضة ومرتفعة الدخل تعيش في أنواع مختلفة من المساكن النموذجية، ويراعي التحليل أيضاً الخصائص الاجتماعية والاقتصادية والمناخية المحددة للمناطق المختلفة داخل المملكة. إلى جانب افتراض أسعار الوقود المحررة، كما يحدد التحليل التسعير في الوقت الفعلي باعتباره التكلفة الحدية طويلة الأمد لإمداد الكهرباء المتغيرة بمرور الوقت. غير أنه يتم تقديم تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي للأسر فقط، فيما تظل أسعار الكهرباء المفروضة على شرائح المستهلكين الأخرى على حالها دون تغيير. كما يطبق هذا التحليل تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي على جميع الأسر، لأنّ هذه الدراسة تهدف إلى البحث في تأثيرات تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي على نظام الطاقة بصفة عامة.

الموضحة في الجدول رقم (1). وربما يفضل منظمو الكهرباء المحليون من بين هذه الخيارات، مخطط تسعير الكهرباء في وقت الاستخدام باعتباره خطوة أولى لعملية التسعير الديناميكي. بينما قام الباحث Matar 2017, 2018, 2019, 2020 سابقًا بتحليل التعريفات الافتراضية لوقت الاستخدام لعملاء القطاع السكني في المملكة العربية السعودية. ونظرًا لأن المملكة العربية السعودية تفتقر إلى الخبرة السابقة في الأسعار الديناميكية، فإنّ هذه التحليلات لا تعد ذات طبيعة تجريبية. وتهدف هذه الدراسة بوصفها امتدادًا للدراسات السابقة بشأن أسعار وقت الاستخدام إلى مناقشة الآثار المترتبة على تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي على مورديّ الطاقة السعوديين، وتركز هذه الدراسة بصفة خاصة على التكاليف الحدية لتوليد الطاقة للموردين، التي تعتمد على استخدامهم للوقود واستثماراتهم في قدرة الطاقة. وتختلف الأسعار على مدار اليوم في ظل التسعير في الوقت الفعلي بناءً على التكلفة الحدية لإمداد الكهرباء.

بدأت المملكة العربية السعودية مؤخرًا باستبدال عدادات استخدام الكهرباء التناظرية التقليدية للعملاء من السكان بعدادات رقمية، وقد أفادت إحصائيات عام (2019) أن التكلفة الإجمالية لعملية الاستبدال هذه تبلغ 9 مليارات ريال سعودي وتقوم الشركة السعودية للكهرباء (SEC) بتغطية هذه التكلفة بالكامل. إذ ستكون الشركة السعودية للكهرباء بمجرد اكتمال هذا التغيير، قادرة على تبسيط عمليات الفوترة والوصول إلى معلومات أحمال الطاقة الخاصة بوقت الاستخدام (ToU). كذلك ستكون الشركة السعودية للكهرباء فيما يتعلق بنطاق هذه الدراسة، قادرة أيضًا على فرض أسعار كهرباء متفاوتة الوقت. وكما يناقش الباحثون (Yang, Meng and Zhou (2018)، فإنّ الأسعار الديناميكية تشكل إحدى أدوات الاستجابة للطلب على أساس السعر التي قد تستخدمها مرافق الطاقة.

كذلك يصنف الباحثان (Dutta and Mitra (2017) تسعير الكهرباء الثابت والديناميكي إلى الفئات العريضة

الجدول 1. مخططات تسعير الكهرباء بناء على بيانات (Dutta and Mitra (2017).

وصف موجز	مخطط التسعير
سعر كهرباء واحد بمرور الوقت	التعريفات الثابتة
تناسب الأسعار مع كمية الكهرباء المستخدمة في كل فترة زمنية للفوترة، بمستويات كميات مختلفة مطبقة إقليمياً	التعريفات المتدرجة
أسعار الكهرباء الساكنة في كل فترة موسمية	التعريفات الموسمية
المعدلات الثابتة المتفاوتة في الوقت، التي يتم اختيارها لتحفيز العملاء على تحويل أحمالهم إلى أوقات معينة من اليوم	تعريفات وقت الاستخدام (ToU)
سعر كهرباء ديناميكي يكون الأعلى خلال فترة ذروة الحمولة	ذروة التسعير الحرجة
سعر كهرباء ديناميكي يعكس التكلفة الحدية للإمداد الفوري، حيث يمكن تعريف اللحظية على مقاييس زمنية مختلفة	التسعير في الوقت الفعلي (RTP)
الحسومات المقدمة للعملاء لاستخدام كميات من الكهرباء أقل من الكميات المحددة مسبقاً	خصومات وقت الذروة

فيما يشمل الجزء المتبقي من هذا البحث الإيرادات على النحو التالي: يصف القسم التالي أسعار الكهرباء المتغيرة بمرور الوقت ويقدم نظرة متعمقة عن الدراسات السابقة لأسعار الكهرباء الديناميكية والأفكار الإضافية التي يمكن الحصول عليها من هذه الدراسة. بينما يوضح القسم اللاحق الطرق التي تم اتباعها في هذه الدراسة وسيناريوهات تسعير الطاقة، ومن ثم يتم عرض النتائج التي يليها ملخص النتائج التي تم التوصل إليها في الخاتمة.

لفهم تأثيرات تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي، تستخدم هذه الدراسة نموذج كابسارك للطاقة (KEM) وإطار استخدام الكهرباء السكنية، حيث تعد النسخة الأساسية من نموذج كابسارك للطاقة (KEM) بمثابة نموذج توازن يتكون من ست قطاعات للطاقة أو القطاعات كثيفة الاستهلاك للطاقة في الاقتصاد السعودي (KAPSARC 2016) ويمثل قطاع توليد الطاقة الكهربائية أحد هذه القطاعات الستة. كما يقسم النموذج المملكة العربية السعودية إلى أربع مناطق سكنية، ويتم تجميع نموذج كابسارك للطاقة مؤقتًا بحيث يحتوي كل يوم تم تصميمه بواسطة النموذج على ثمانية أجزاء حمل لتوليد الطاقة. وبالتالي، ينتج النموذج ثمانية تكاليف حدية مختلفة للكهرباء يوميًا لكل منطقة من المناطق المشار إليها. لذا فإن التكلفة الحدية الواحدة تعكس متوسط السعر على مدى بضع ساعات في يوم معين.

يدمج نموذج استخدام الكهرباء السكنية المرتبط بقطاع الطاقة الكهربائية مفاهيم الاقتصاد الجزئي مع النموذج التقليدي لطاقة المباني Matar 2020، وينتج هذا النموذج في نهاية المطاف منحنيات القطاع السكني لحمل الطاقة، وتعد منحنيات الأحمال هذه نتاج التعديلات السلوكية للأسر أو مشتريات كفاءة استهلاك الطاقة لأنها تهدف إلى تحقيق أقصى قدر من الرفاهية. وتبحث هذه الدراسة من خلال هذا الربط في التكاليف الحدية طويلة الأجل لتوليد وتسليم الطاقة¹ بأسعار الوقود المقدمة لمحطات الطاقة وفقًا لأسعار السوق لعام 2017.

التسعير المتباين للكهرباء

0.0480 دولار لكل كيلوواط/ ساعة. بينما بدأت التعريفية السكنية على سبيل المقارنة عند 0.0133 دولاراً لكل كيلوواط/ ساعة للأول اثنين (2) ميغاواط من الاستخدام شهرياً.

كذلك أوضحت الدراسات المختلفة أن الانتقال إلى الأسعار الديناميكية يمكنه تحقيق كفاءة وفعالية اقتصادية أعلى. فعلى سبيل المثال، ناقش الباحثون (Faruqui, Hledik and Palmer (2012) المفاضلات بين مخاطر ومكافآت مخططات التسعير المتغيرة بمرور الوقت من منظور المستهلك، التي تحدد مكافأة مخطط التسعير على أنها إمكانية توفير المال، ومخاطرها على أنها التعرض لتقلبات الأسعار المحتملة. ويبدأ الرسم التوضيحي لهؤلاء الباحثين بمخطط تعريفية ثابت ويتوج بالتسعير في الوقت الفعلي. وقد توصلوا إلى أن زيادة تقلب أسعار الكهرباء بمرور الوقت يزيد بشكل عام من قيمة المكافأة وكذلك المخاطر. يُنظر إلى هذه العلاقة على أنها علاقة غير خطية، حيث تزداد المخاطر بسرعة بقدر يفوق المكافأة بالتزامن مع اقتراب الأسعار من معدلات التسعير في الوقت الفعلي.

بينما أفاد كل من (Faruqui and Sergici (2010) بأن المنظمين في الولايات المتحدة قاموا في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدراسة ما إذا كان طلب العملاء على الكهرباء قد استجاب لأسعار الكهرباء الديناميكية وإلى أي مدى. حيث تم تحقيقاً لهذه الغاية إعداد مسح لعدد 15 تجربة على الصعيد الوطني لوقت الاستخدام وتسعير أوقات الذروة الحرجة، وقد تباينت نتائجهم التي توصلوا إليها بدرجة كبيرة اعتماداً على مدى ارتفاع الأسعار ووصول المستهلكين إلى التقنيات التمكينية لاستبدال أو تحويل استخدامهم للكهرباء.

كما قام (Allcott (2011 بدراسة تأثيرات أول برنامج تجريبي في الولايات المتحدة الأمريكية لاختبار التسعير بالساعة في الوقت الفعلي للأسر، وتوصل هذا الباحث إلى أن الأسر استجابت على المدى القصير بالحفاظ على الطاقة أو بإجراء تعديلات سلوكية خلال ساعات الذروة،

يعتبر تسعير السلعة فعالاً في النظرية الاقتصادية عندما تكون التكلفة الحدية للعرض مساوية لقيمتها الحدية للطلب (Deweese 2001). ويتم بشكل عام استخدام التكاليف الحدية قصيرة الأجل لمولدات الكهرباء لتحديد المولد الذي يجب أن يفي بحمل الطاقة المطلوب على الفور. فإذا تم تحديد سعر الكهرباء، فإن عملية الاستجابة المستمرة تكون مسؤولية تقع على عاتق موردي الطاقة. بينما تحاول أسواق الكهرباء بالجملة والتجزئة -على العكس من ذلك- ضمان الفعالية الاقتصادية من خلال تعديل الكميات المعروضة والمطلوبة على أساس سعر التوازن، الذي يتم اكتشافه بالتزامن مع تعديلات الكمية. وتكون في هذه الحالة أعلى تكلفة حدية للتوليد تساوي أعلى قيمة حدية للطلب. غير أن سوق الكهرباء تخضع لهذه العملية بنحو مستمر وبنمط يومي. وتختلف أحمال الطاقة الكهربائية بمرور الوقت فضلاً عن غياب تخزين الكهرباء على نطاق واسع. وبالتالي، فإن التكاليف الحدية تكون قصيرة الأجل وتتغير تبعاً لذلك أسعار التوازن بمرور الوقت. ولكن ومن الناحية العملية، لا يوجد في معظم المناطق سوق يمكن فيها للموردين والمستهلكين الاستجابة السريعة للأحمال المتغيرة أو الأسعار على مدار اليوم.

أضف إلى ذلك أنه قد يتم تسعير الكهرباء حتى في البيئات الخاضعة للتنظيم، لتعكس تكاليف توليد ونقل وتوزيع الكهرباء، وربما تعكس الأسعار المنظمة التكاليف بالنسبة لجميع المستهلكين. رغم أنه قد يتم تحديدها بحيث لا تعكس التكاليف الحقيقية لمجموعة معينة من العملاء. ففي دول مجلس التعاون الخليجي على سبيل المثال، ظلت أسعار الكهرباء ثابتة مع مرور الوقت ومدعومة بين شرائح المستهلكين. على سبيل المثال، تدفع الأسر والمدارس في دول مجلس التعاون معدلات أقل من التكلفة، بينما تدفع شرائح المستهلكين الأخرى لا سيما الحكومية منها، معدلات أعلى من التكلفة. وقد أفادت هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (2018) أن متوسط تكلفة خدمة الكهرباء² في المملكة العربية السعودية بلغ 0.0544 دولاراً للكيلوواط في الساعة في عام 2017، ويذكر نفس التقرير أنه تم في عام 2017، تحديد تعريفية الكهرباء الحكومية عند 0.0853 دولار للكيلوواط/ ساعة، والتعريفية الصناعية

الملاحظ هنا، أن كل هذه الدراسات تقدم نتائج لمناطق مختارة فقط في أوقات معينة. علاوة على أن الكثير من المنشورات أجرت تحليلاً حول تسعير الكهرباء المتغير بمرور الوقت من منظور المستهلك (على سبيل المثال، Allcott 2011; Faruqui, Hledik and Palmer 2012; Faruqui, Sergici and Akaba 2013; Herter, Wood and Blozis 2013)، كما ركزت الأبحاث السابقة على إجراء الدراسات والمسوحات التجريبية لعملاء القطاع السكني. تؤكد هذه الاستطلاعات أو التجارب السابقة بشأن برامج التسعير الديناميكي للكهرباء على التنبؤ النظري بأن أحمال الطاقة تنخفض عندما يواجه المستهلكون أسعاراً أعلى قيمة، ويتوافق تأكيد النظرية هذا مع الطريقة التي اتبعناها في إجراء هذه الدراسة كما ستتم مناقشته في القسم التالي.

إلا أنهم لم يقوموا بتحويل استخدامهم للكهرباء إلى خارج ساعات الذروة.

كذلك قام الباحثون (Faruqui, Sergici and Akaba 2013) في ذلك الوقت تقريباً، بدراسة مدى استجابات الأسعار للعملاء من القطاع السكني في ولاية ميشيغان الأمريكية لخصومات وقت الذروة وأسعار الذروة الحرجة. إذ تختلف مخططات تسعير الكهرباء هذه عن التسعير في الوقت الفعلي، إلا أنها تعد أيضاً شكلاً من أشكال التسعير الديناميكي. واستخدم هؤلاء الباحثون مرونة ثابتة لدوال الاستبدال لتقدير مرونة السعر الإجمالية للعملاء. وقدروا على وجه التحديد، مدى استجابة العملاء من خلال تحويل الأحمال من أوقات الذروة إلى الأوقات خارجها، فضلاً عن المرونة السعرية اليومية، وتوصلوا إلى مرونة إحلال تبلغ (0.11) ومرونة يومية (0.00) في كلتا حالتَي التسعير.

علاوة على ذلك، أجرى الباحثون (Herter, Wood and Blozis 2013) دراسة تجريبية للأسر في كاليفورنيا، حيث أوضحوا أن الأسر التي اشتركت للحصول على معدل كهرباء متغير بمرور الوقت بدلاً من سعر الكهرباء القياسي المتدرج، قد ساعدت مرافق الطاقة على توفير ما يتراوح ما بين 20% إلى 50% من أحمال وقت الذروة، إضافة إلى أن هذه الأسر قد خفضت فواتير الكهرباء في فصل الصيف.

الطريقة المتبعة في البحث

ترتبط هذه الدراسة بين نموذجين، هما:

نموذج كابسارك للطاقة (KEM)، وهو نموذج لتوازن نظام الطاقة تم تطويره للمملكة العربية السعودية.

نموذج استخدام الكهرباء السكنية، يتم فيه تضمين الأسرة في نموذج محاكاة طاقة المباني، وتتم معايرة البيانات بناءً على المسوحات الأسرية التي تجريها الهيئة السعودية العامة للإحصاء (GaStat)، وأخذت مدخلات البيانات التفصيلية من بحث الباحث (Matar (2020).

تم إجراء التحليل على النحو التالي: يُنتج نموذج استخدام الكهرباء السكنية معلومات منحني حمل الطاقة بناءً على التعديلات السلوكية المحسوبة ومشتريات كفاءة الطاقة، ومن ثم يضاف منحني حمل الطاقة

السكنية الناتج إلى شرائح المستهلكين الأخرى. كذلك ينتج نموذج نظام الطاقة القرارات التشغيلية التي يتخذها نظام الطاقة لتلبية طلب الحمل المدخل. يستلزم الارتباط التكرار بين النموذجين حتى تتقارب منحنيات الحمل وأسعار الكهرباء. تتمثل أسعار الكهرباء المستخدمة في هذا التحليل في التكاليف الحدية لتوليد ونقل الطاقة، وتتم الإشارة إلى مخطط التسعير هذا من الآن فصاعداً باسم التسعير في الوقت الفعلي.

كذلك يحدد كلا النموذجين أربع مناطق من مناطق المملكة العربية السعودية كما هو موضح في الشكل (1)، وتستند هذه المناطق المختارة إلى المناطق التي تعمل فيها الشركة السعودية للكهرباء فضلا عن تميزها بسمات اجتماعية واقتصادية ومناخية مختلفة.

الشكل 1. المناطق السعودية الأربع الممثلة في نموذج كابسارك للطاقة ونموذج الكهرباء السكنية.



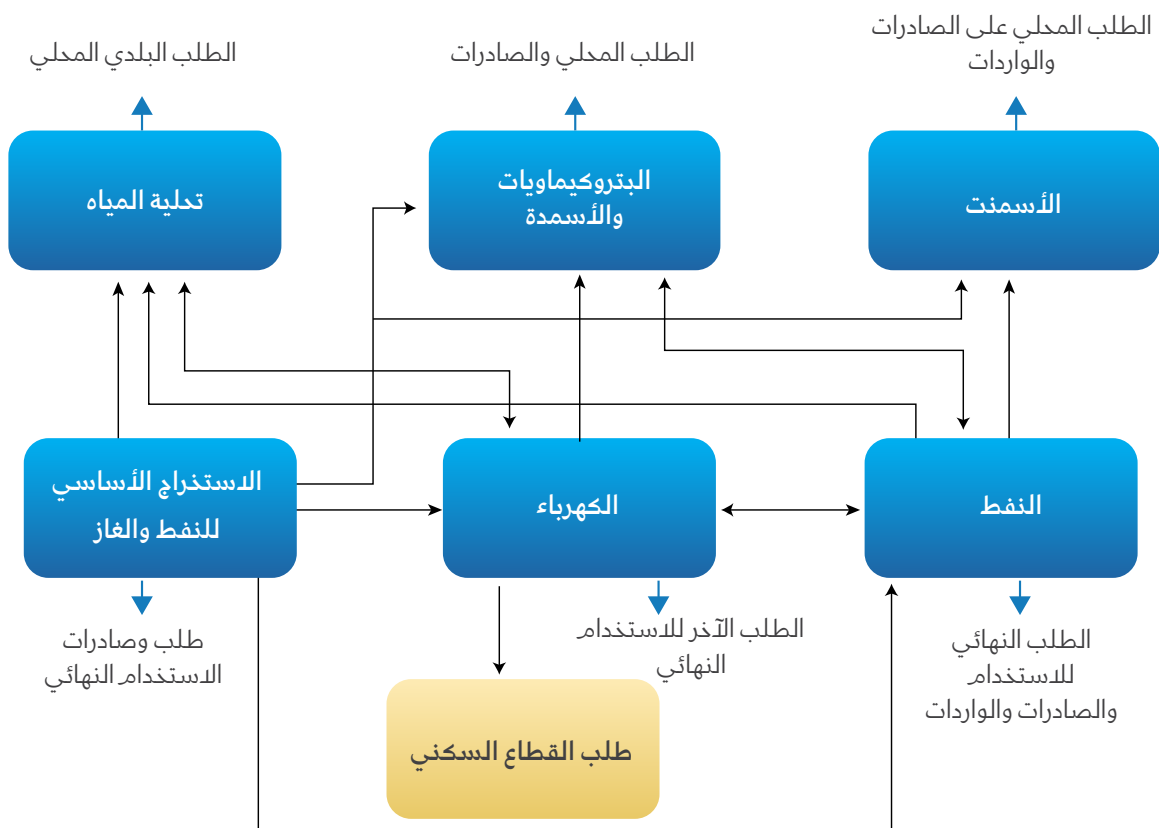
المصدر: كابسارك، 2016م.

نموذج كابسارك للطاقة (KEM)

كل قطاع إما إلى تقليل التكاليف أو تعظيم الأرباح. كذلك تمت صياغة قطاع توليد الطاقة على أنه يهدف إلى تقليل التكاليف لتلبية الطلب على حمل الطاقة. ويقسم النموذج المملكة العربية السعودية إلى أربع مناطق تتوافق مع المناطق التي تعمل فيها الشركة السعودية للكهرباء، وتم تفصيل مدخلات بيانات نموذج كابسارك للطاقة (KEM) لعام 2015 بواسطة الباحثين Matar and Anwer (2017) and Matar and Shabaneh (2020)، واستخدمت هذه البيانات لإجراء هذا التحليل.

يعد نموذج كابسارك للطاقة (KEM) نموذجاً لنظام طاقة متعدد القطاعات للمملكة العربية السعودية (كابسارك 2016)، ويتكون هذا النموذج كما يوضح الشكل (2) من ست قطاعات للطاقة أو ست قطاعات كثيفة الاستهلاك للطاقة. تتمثل هذه القطاعات في قطاعات الكهرباء وإنتاج الأسمدة والبتروكيماويات والأسمدة وتحلية المياه لأغراض استخدامات المياه البلدية واستخراج ونقل النفط والغاز الطبيعي وتكرير النفط، ويميز النموذج القرارات التشغيلية والاستثمارية لكل قطاع على حدة، حيث يهدف

الشكل 2. نموذج كابسارك للطاقة (KEM).



المصدر: كابسارك، 2016م.

يستخدمها الاقتصاديون لدراسة عملية اتخاذ القرار في الأسرة في إطار القوانين الفيزيائية التي تحكم تدفقات الطاقة في المسكن، ويوضح الشكل (3) الهيكل الأساسي للإطار، كما يقدم الباحث (Matar 2020) وصفاً أكثر تفصيلاً لمعايرة البيانات والمدخلات.

كذلك تسترشد قرارات الأسر في مكّون "عنصر" الاقتصاد الجزئي للنموذج بدالة المنفعة التي تقيس مدى رفايتها أو رضاها (Johansson 1991)، ويتم تحديد متغيرات استهلاك الكهرباء في دالة المنفعة هذه عبر نموذج محاكاة طاقة المباني. يميز المكون المادي³ للنموذج الأشكال الموصلة والناقلة للحرارة والباعثة لها "المشعة" وأشكال الحمل الحراري التي تنتقل من وإلى الهواء داخل غلاف حراري. يشبه النموذج في هذا الصدد نماذج الطاقة في المباني التجارية. إلا أن هذا النموذج على عكس تلك النماذج، تم تصميمه من الأسفل إلى الأعلى لربطه بنموذج كابسارك للطاقة، ويهدف إلى تيسير المزيد من التطوير لأغراض إجراء بحوث اقتصادية الطاقة. كما أنه يتضمن المكاسب أو الخسائر المعقولة في الحرارة أو تلك الكامنة نتيجة لعمليات تبادل الهواء، وقد تكون هذه التبادلات بين الهواء في الأماكن المغلقة والمكشوفة والنوافذ والإضاءة والعناصر الداخلية، كشاغلي المسكن والأجهزة المستخدمة فيه. بينما يتمثل إجمالي حمل الطاقة في الساعة في مجموع ثلاث مكونات يتم استخدامها بنحو مباشر بواسطة المصابيح الكهربائية والأجهزة والطاقة المطلوبة لتشغيل مراوح الإمداد والعودة لودعات معالجة الهواء، والطاقة المستمدة من دورة تبريد مكيفات الهواء. كما يرتبط استخدام الطاقة لدورة التبريد ارتباطاً مباشراً بكمية الحرارة المنقولة إلى داخل المسكن أو خارجه من أجل تحقيق درجة الحرارة الداخلية ومستوى الرطوبة النسبية المطلوبة. ولقد تم تصميم المكون المادي بهذه الطريقة لتمكين تحليل تدابير كفاءة استهلاك الطاقة المحددة.

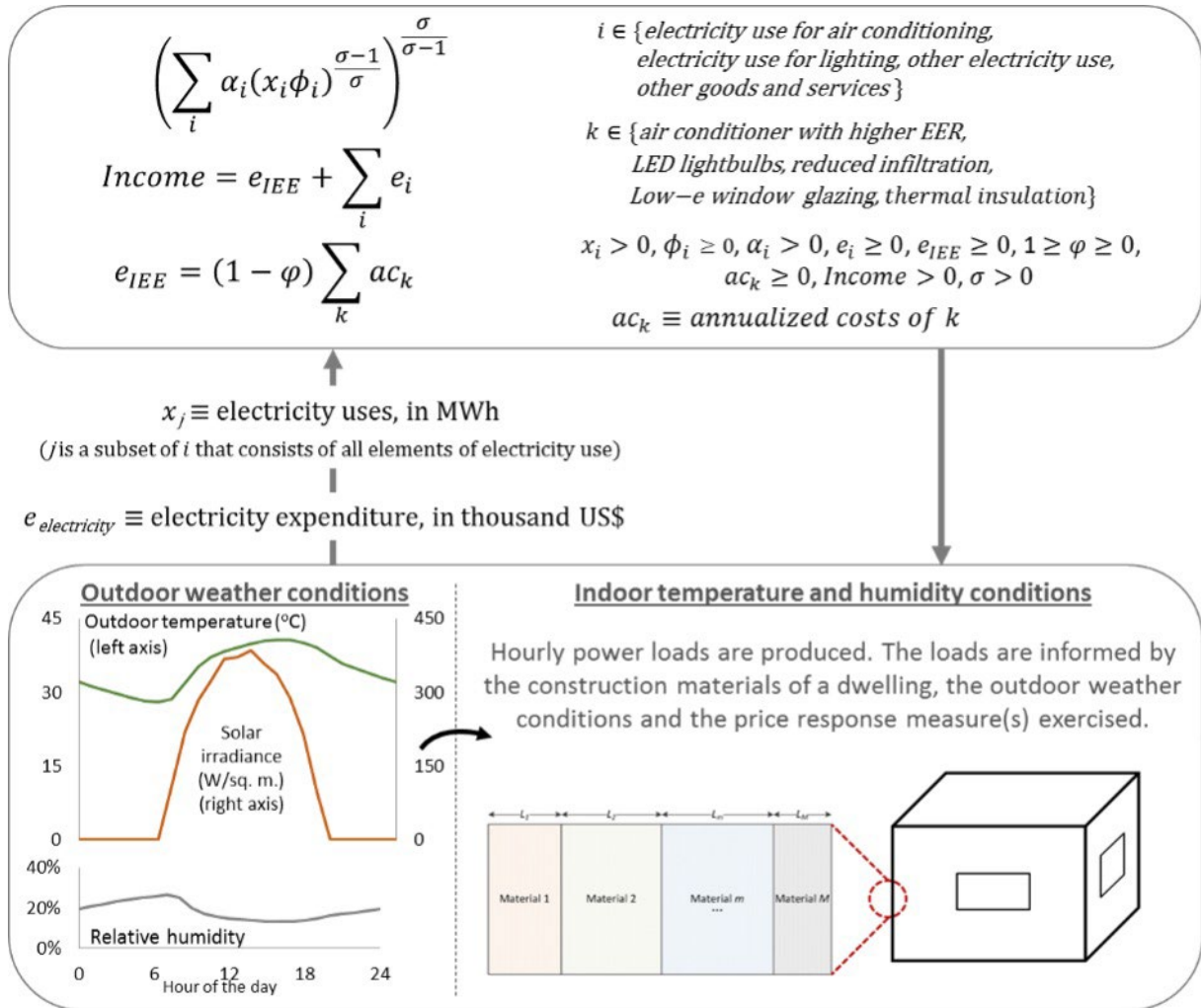
يغطي قطاع توليد الطاقة جميع التقنيات الموجودة في نظام الطاقة السعودي، كما يتضمن أيضاً التقنيات المستقبلية التي قد تقوم المملكة بنشرها مستقبلاً، مثل الطاقة الحرارية النووية والشمسية لأغراض الاستثمارات المحتملة. يتم من أجل الحفاظ على حجم النموذج قابلاً للتتبع، اتخاذ قرارات تشغيلية لأيام الأسبوع وعطلات نهاية الأسبوع التمثيلية في فصلي الصيف والشتاء والفترة الموسمية المتوسطة لكل منطقة من المناطق المشمولة بالدراسة. كما يتم تقسيم كل يوم تمثيلي إلى ثمانية شرائح أحمال. وتكون نواتج النموذج التكاليف الحدية طويلة الأجل لكل شريحة من شرائح الأحمال. وبالتالي، فإن ناتج التكلفة الحدية الفردية التي يتوصل إليها النموذج تكون متوسط التكاليف على مدى بضع ساعات في يوم معين.

يتم تحديد منحنيات حمل الطاقة الزمني للأسر التي تعد مدخلات لنموذج كابسارك للطاقة (KEM) عبر نموذج استخدام الكهرباء السكنية، إذ تحدد أحمال الطاقة هذه إجمالي الطلب على الأحمال الذي يتعين على قطاع توليد الطاقة تلبيته. يتخذ القطاع بناءً على هذه المعلومات، قرارات تشغيلية واستثمارية مناسبة على المدى الطويل. يتم تعريف «المدى الطويل» على أنه الحالة المستقرة التي تحدث في وقت ما في المستقبل. بينما تشمل القرارات التشغيلية مستويات استخدام الوقود حسب الترتيب الزمني التي تتغير مع استجابة الأسر لتغير أسعار الكهرباء من خلال تغيير أحمالها. غير أن بإمكان قطاعات أخرى مثل صناعة تكرير النفط، تغيير عملياتها لاحقاً.

نموذج استخدام الكهرباء السكنية

يوضح الشكل (2) -على مستوى عالٍ- الصلة بين نموذج استخدام الكهرباء السكنية وقطاع توليد الطاقة في نموذج كابسارك للطاقة (KEM)، ولقد وصف الباحث (Matar 2018, 2019, 2020) النموذج السكني. إذ يدمج المكوّن السكني أساسيات الاقتصاد الجزئي التي

الشكل 3. الإطار الاقتصادي الجزئي السكني والمادي.



المصدر: Matar (2020)

ملحوظة: EER = تصنيف كفاءة الطاقة

.W/sq.m = واط لكل متر مربع

ويمثل ϕ_i عامل تعديل يقدر الفائدة المكتسبة من تركيب مقاييس كفاءة استهلاك الطاقة. بمعنى آخر، يتم ضبط ϕ_i لرصد أي انخفاض في استخدام الكهرباء بسبب كفاءة الطاقة عن طريق تعديل $x_i \phi_i$. ويقدم الباحث (Matar (2020) وصفاً أكثر تفصيلاً بالنسبة لـ ϕ_i . فيما يتم تحديد استهلاك السلع والخدمات الأخرى من الناحية النقدية، مع ضبط سعر السلع والخدمات الأخرى بنظام الوحدة.

يتم تغذية مستويات استخدام الطاقة التي يحددها المكوّن المادي للنموذج لمكوّن الاقتصاد الجزئي. حيث يستخدم مكوّن الاقتصاد الجزئي مرونة ثابتة لدالة المنفعة البديلة كما هو موضح بالصيغة الأعلى في الشكل (3). وعلى الرغم من أن مرونة الاستبدال تظل ثابتة، إلا أنه يمكن للمرونة السعرية الخاصة بالطلب على السلع أن تتفاوت بناءً على حصص النفقات، يمثل الرمز x_i استخدام الكهرباء بحسب الخدمة بالميجاواط لكل ساعة،

ويتم حساب النفقات على الكهرباء على أساس الأسعار بالساعة أو على هيكل التسعير التقدمي الحالي في المملكة العربية السعودية (أي المتدرج).

يمثل الرمز e_{IEE} تكلفة الاستثمار والصيانة السنوية لمقياس معين لكفاءة الطاقة. بينما يشمل التحليل النفقات الأعلى على تدابير كفاءة الطاقة في قيود الدخل، وتظهر آثار هذه التدابير في دالة المنفعة في شكل استهلاك أقل للكهرباء. بالإضافة إلى ذلك، فإن ϕ تحدد مستوى الإعانات المالية المقدمة من شركة أخرى أو من الحكومة التي تم تحديدها مساوية للصفر في هذا البحث.

قام الباحث (2020) Matar بتفصيل مزايا وتكاليف تدابير كفاءة الطاقة المدرجة في هذا التحليل والمشار إليها بالرمز (k)، حيث تختلف التكاليف بحسب المنطقة وفقاً للمناخات المختلفة وخصائص المساكن النموذجية، فيما يتم احتساب التكاليف سنوياً باستخدام معدل خصم فردي يتوافق مع الدراسات السابقة. تتبع هذه الدراسة النهج الذي استخدمه الباحثون (Hausman and Harrison, Lau and Williams (2002) and Enzler, Diekmann and Meyer 2014، الذين يقدرون متوسط معدلات الخصم الفردية بحوالي 30٪. بينما في المقابل، يقدر كل من (Alberini, Banfi and Ramsey- 2013) er معدلات الخصم للأفراد في حدود تتراوح ما بين 1.5٪ و 3٪، أقل من تلك التي تستخدمها الشركات الخاصة عادةً.

يمثل الرمز α_i تفضيلات الأسر التي تلخص الوحدة للجميع (i). وتتم معايرة الأسر بحيث تتراوح حصصهم المفضلة للكهرباء ما بين 0.5٪ إلى 35٪. وتعتمد حصة الأسرة التفضيلية على منطقتها ودخلها، كما سيتم توضيحه لاحقاً. كذلك تجرى هذه المعايرة عن طريق تحديد تفضيلات الكهرباء بالقرب من الصفر ورفعها ببطء حتى تتوقف الأسر عن الاستجابة السلوكية لتعريفه الكهرباء لعام 2017، ويتم تقسيم حصة التفضيل المخصصة للكهرباء إلى مكوناتها المختلفة. يستخدم التحليل تقديرات تستند إلى حصص استهلاك عام 2011 للأسرة السعودية التي أوردتها الباحثون (2011) by Faruqui et al. وتم توضيح هذه المقاييس في الجدول (2). بينما تكون الحصة التفضيلية للسلع والخدمات الأخرى عبارة عن الفرق بين 100٪ وحصة التفضيل للكهرباء. أخيراً، يمثل الرمز σ مرونة الاستبدال وتكون قيمتها المعايرة 0.9.

يتمثل الدخل في قيود الميزانية في متوسط دخل الأسرة السنوي حسب المنطقة، الذي يعكس هنا، متوسط دخل الأسرة لعامي 2017-2018 لكل منطقة وفق تقارير الهيئة السعودية العامة للإحصاء (2018) كما هو موضح في الملحق. وتنقسم المجموعة الكاملة للأسر إلى تصنيفين للدخل: الأسر ذات الدخل المحدود والأسر ذات الدخل المرتفع، وقد تمت جدولة مستويات الدخل المرتبطة بكل منطقة في الملحق. كما يمثل الرمز e_i النفقات السنوية على الكهرباء والسلع والخدمات الأخرى،

الجدول 2. الاستخدام التقديري للكهرباء بالنسبة للأسر في المملكة العربية السعودية.

حصة الأسرة السعودية من الكهرباء	الاستخدام النهائي للكهرباء
700	التبريد
5	الإضاءة
25	الاستخدامات الأخرى

المصدر: تقديرات الباحث بناءً على بيانات (2011) Faruqui et al.

تسعير الوقود والكهرباء السكنية في التحليل

سعة الطاقة الجديدة في النموذج إلى أسعار الوقود هذه. غير أن هذا التحليل يراعي أسعار النفط المحررة بالكامل عند دراسة تأثيرات أسعار الكهرباء في الوقت الفعلي. إلا أن المملكة قد تربط بدلاً من ذلك أسعار النفط المحلي بمعياري دولي كجزء من إصلاحات أسعار الطاقة. ويوضح الباحثان (Matar and Anwer 2017) أن نظام الطاقة بدأ في عام 2015، عملية استبدال النفط بتقنيات التوليد البديلة إذا وصل سعر النفط إلى 29 دولارًا للبرميل، ونظرًا لانخفاض تكلفة تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية السائدة بقدر كبير منذ عام 2015، فقد تراجعت أسعار النفط تبعاً لذلك.

تفحص الحالة المرجعية تعريفية الكهرباء السكنية التي تم تطبيقها في المملكة العربية السعودية في عام 2017، وقد تم اختيار هذه التعريفية نظراً لأن نموذج استخدام الكهرباء السكنية تمت معايرته لعام 2017 لأسباب تتعلق بمدى توافق البيانات. فيما توضح هيئة تنظيم الكهرباء والتوليد المشترك (ECRA) تفاصيل تعرفية الكهرباء لعام 2017 الموضحة في الجدول "3" (ECRA 2016). بينما تم تعديل هذه التعريفات في عام 2016 وبقيت على حالها حتى حلول عام 2018. وظلت التعريفات منذ ذلك الحين دون تغيير حتى نهاية عام 2020.

تقوم الحكومة (ECRA 2020a) بتحديد أسعار الوقود في عام 2020، وتختلف أسعار النفط المعروضة لمرافق الطاقة عن أسعار السوق الدولية المقابلة. إذ يتم تسعير الغاز الطبيعي الذي لا يتم تداوله دولياً -فهو بالتالي لا يتأثر بالأسعار الخارجية- بأقل من التكلفة الحدية للإنتاج (Matar and Shabaneh 2020). كما تؤدي هذه الأسعار إلى انخفاض التكاليف الحدية لتوليد الطاقة ولا تشير إلى استثمارات في تقنيات أكثر كفاءة في استخدام الطاقة أو إلى التقنيات المتجددة، ويعكس متوسط تعريفية الكهرباء الحالية التكاليف الحالية المنخفضة لخدمة الكهرباء (ECRA 2020a).

على صعيد آخر، تبحث التحليلات الحديثة في تأثيرات نظام الطاقة على التحرير الجزئي أو الكامل لأسعار الوقود (Matar and Anwer 2017; Matar, Echeverri and Pierru 2016; Matar et al. 2015; Matar et al. 2017; Matar and Shabaneh 2020). أضف إلى ذلك، أن الحكومات تخطط لرفع أسعار الوقود لتناسب مع المعايير الدولية بنحو أفضل (رؤية السعودية 2030، 2017). وبالتالي، فإن هذه الدراسة تبحث في التكاليف الحدية طويلة الأمد لتوليد الطاقة وإيصالها عندما تعتمد أسعار الوقود المقدمة لمحطات الطاقة على أسعار الأسواق لعام 2017. كذلك تستند الاستثمارات في

الجدول 3. تعريفية الكهرباء السكنية في المملكة العربية السعودية لعامي 2017 و2018.

تعريفية الكهرباء (هالة لكل كيلوواط/ ساعة)		الاستهلاك الشهري للكهرباء
عام 2018	عام 2017	
	5	تصل إلى 2 ميغاواط/ ساعة
18	10	أكثر من 2 ميغاواط، وتصل إلى 4 ميغاواط/ ساعة
	20	أكثر من 4 ميغاواط وتصل إلى 6 ميغاواط/ ساعة
30	30	أكثر من 6 ميغاواط/ ساعة

المصدر: هيئة تنظيم الكهرباء والتوليد المشترك (2016، 2018)

تسعير الوقود والكهرباء السكنية في التحليل

نموذجي كابسارك للطاقة والنموذج السكني، حساب هذه الأسعار على أنها تكاليف الكهرباء الحدية عند توازن حالي العرض والطلب. بينما تتأثر الأحمال التي تطلبها الأسر بأسعار الكهرباء المفروضة عليها. يتم تكرار النموذجين لعدة مرات حتى يتقاربان في حالة توازن. ومن ثم يتم توضيح أسعار الكهرباء في حالة التسعير في الوقت الفعلي في قسم النتائج من هذه الدراسة.

أما بالنسبة لحالة التسعير البديل للكهرباء، فيتم تطبيق التسعير في الوقت الفعلي على المنازل فقط. وكما يوضح الجدول (4)، يمثل استخدام الكهرباء في المنازل ما يقرب من نصف إجمالي استخدام الكهرباء في المملكة العربية السعودية في عام 2019. كذلك تعكس الأسعار في الوقت الفعلي التكاليف الحدية طويلة المدى لتوصيل الطاقة بمرور الوقت. ويمكن من خلال ربط

الجدول 4. استخدام الكهرباء بحسب شريحة المستهلكين في المملكة العربية السعودية في فترة الأعوام من 2017 إلى 2019.

حصة استخدام الكهرباء (نسبة مئوية %)			شريحة المستهلكين
عام 2019	عام 2018	عام 2017	
46	45	50	سكني
18	18	16	صناعي
16	16	17	تجاري
14	15	13	حكومي
6	6	4	أخرى

المصادر: مؤسسة النقد العربي السعودي⁵ (SAMA, 2019) والشركة السعودية للكهرباء (SEC 2020).

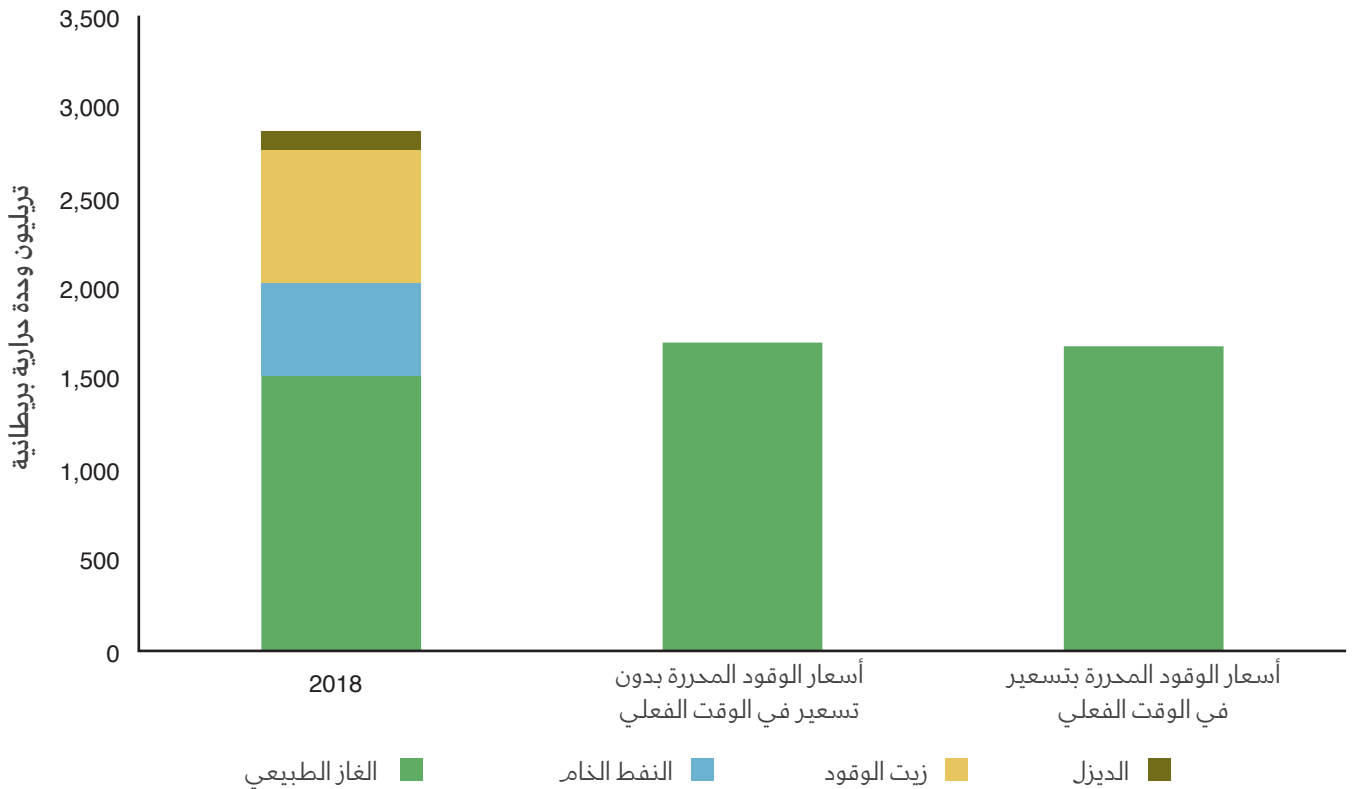
النتائج والمناقشة

مع ما أورده كل من (Matar, Echeverri and Pierru) (2016), Matar et al. (2017), Matar and Anwer (2017) and Matar and Shabaneh 2020.

يتبين لنا بوضوح تام أن عملية رفع أسعار النفط إلى مستوى السوق سيؤدي إلى استبدال النفط بخيارات أقل تكلفة بناءً على استخدام الوقود في عام 2018، وتشمل هذه الخيارات الأقل تكلفة تحسينات كفاءة استهلاك الطاقة ومحطات التناضح العكسي والتكنولوجيا المتجددة. كما يؤدي اعتماد مثل هذه التقنيات إلى زيادة تخصيص الغاز الطبيعي للأغراض توليد الطاقة (Matar and Anwer 2017) تم توضيح الاستثمارات المقابلة لنظام الطاقة في الشكل (5).

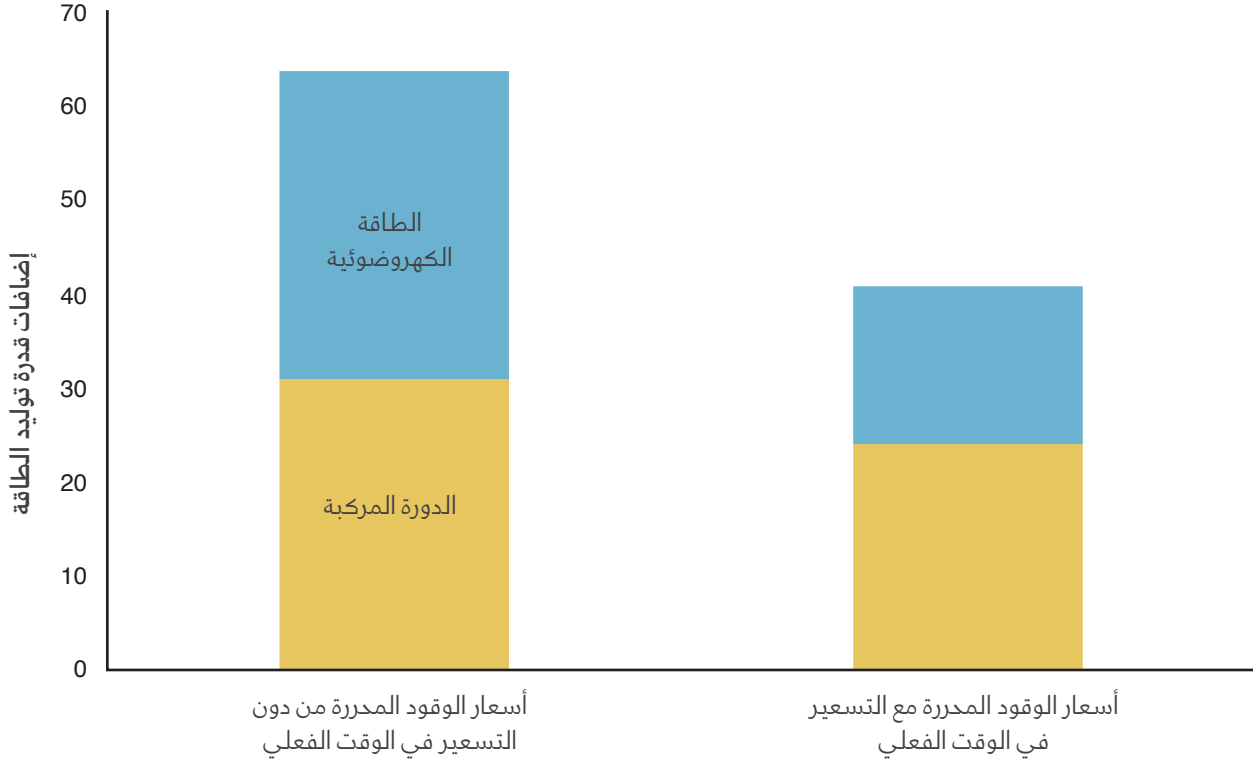
يوضح الشكل (4) كمية الطاقة الموجودة لكل نوع ووقود يستخدمه قطاع الطاقة، كما يبين الشكل أيضا بيانات حالتين من حالات أسعار الوقود: أسعار الوقود المدارة وأسعار الوقود المحررة. ويتم هنا تحليل حالة أسعار الوقود المدارة فقط للأسعار الكهرياء لعام 2017 لتسليط الضوء على مزيج الوقود الحالي. أما في حالة أسعار الوقود المحررة، فيتم تحليل أسعار الكهرياء لعام 2017 والتسعير في الوقت الفعلي. حيث يستخدم في هذا السيناريو قطاع الطاقة الكهربية المزيد من الغاز الطبيعي ويستثمر في المزيد من الطاقة المتجددة مقارنة بالوضع الراهن. ومن ثم يصبح المستوى الحالي لاستخدام النفط مكلفًا بشكل مفرط على المدى الطويل. فيما يتوافق بشكل أساسي، الاختلاف في نتائج استخدام الوقود في حالتين الأسعار المذكورتين

الشكل 4. الوقود المستخدم لتوليد الطاقة على المدى الطويل في ظل الوضع الراهن وبأسعار الوقود المحررة.



المصادر: هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (ERCA, 2019) بيانات عام 2018، والنتائج النموذجية لحالات أسعار الوقود المحررة.

الشكل 5. الاستثمارات طويلة الأمد في محطات توليد الطاقة الجديدة عندما يتم تحرير أسعار الوقود، مع وبدون تسعير في الوقت الفعلي.



المصدر: نتائج النموذج.

الفعلي على عملية توليد الطاقة. يوضح الشكل (5) الإضافات المدخلة على قدرة محطات الطاقة لتحرير أسعار الوقود مع وبدون تسعير في الوقت الفعلي. حيث يبني هذا القطاع بدون تسعير في الوقت الفعلي، قدرة 33 جيجاواط من محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية و31 جيجاواط من قدرة محطات الدورة المركبة التي تعمل بالغاز الطبيعي. فإذا تم تنفيذ التسعير في الوقت الفعلي، فإنّ إضافات قدرة الطاقة الكهروضوئية تنخفض إلى 17 جيجاواط، أيّ حوالي نصف الإجمالي في حالة أسعار الكهرباء لعام 2017. بينما تنخفض قدرة طاقة الدورة المركبة إلى 24 جيجاواط مع التسعير في الوقت الفعلي. وسيتم بشكل عام تجنب حوالي 24 مليار دولار من النفقات الرأسمالية باستخدام التسعير في الوقت الفعلي. بينما في حالة التسعير في الوقت الفعلي، لا ينخفض الطلب على أحمال الطاقة إلى الحد الذي يمكن

كذلك يتم مع أو بدون التسعير في الوقت الفعلي استخدام حوالي 1700 تريليون وحدة حرارية بريطانية من الغاز الطبيعي في بيئة أسعار الوقود المحررة. وعلى الرغم من أن استخدام الغاز الطبيعي يكون أقلّ بقدر طفيف عند تطبيق التسعير في الوقت الفعلي، إلا أنه متماثل في كل سيناريوهات أسعار الوقود المحررة. ويعود ذلك إلى أن هذا النموذج يستخدم الغاز الطبيعي أولاً. وعندما يتم استنفاد إمدادات الغاز، فيتم البحث عن الخيارات التالية الأقل تكلفة لتلبية الطلب المتبقي على أحمال الطاقة. ويتمثل الخيار المتاح في هذه الحالة في استخدام تقنيات الطاقة المتجددة.

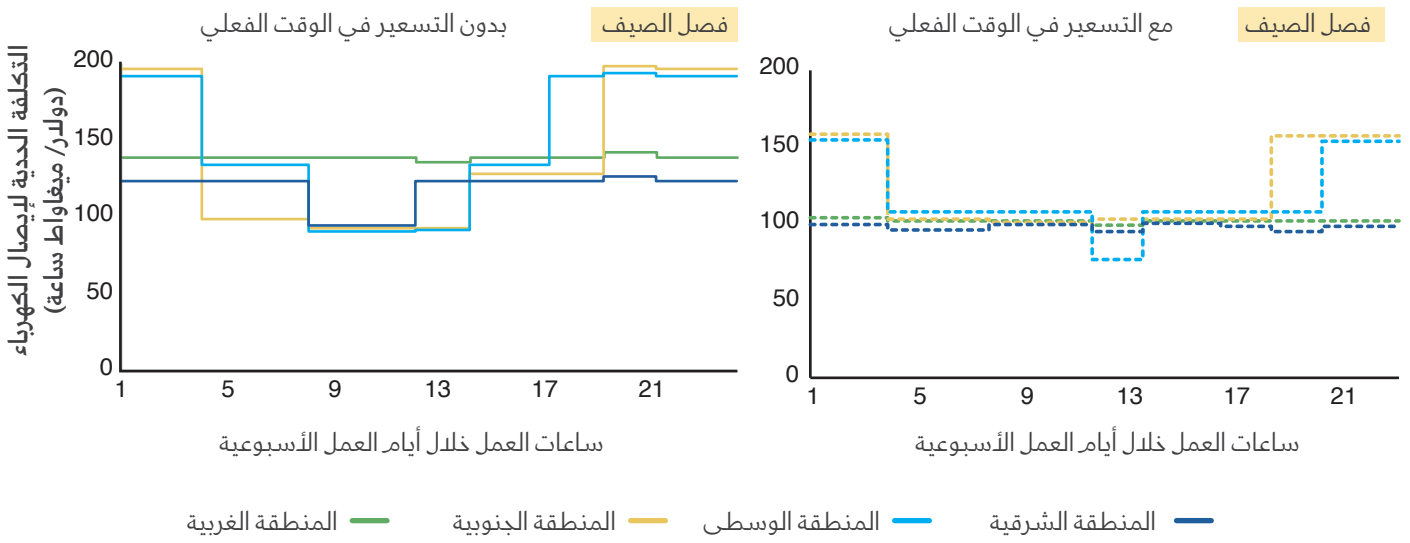
على الرغم من أن استخدام الغاز الطبيعي متماثل في كلا سيناريوهي تحرير أسعار الوقود، إلا أن قصة الاستثمار تبدأ في مقارنة تأثيرات التسعير في الوقت

في الوقت الفعلي، وعادة ما تحتل الطاقة الكهروضوئية بمجرد نشرها المركز الأول في ترتيب الجدارة "التشغيل الاقتصادي الأمثل"، حيث تكون التكلفة الحدية للتوليد صفراً. ويمكن بالتالي، في أشهر الشتاء الأكثر برودة التي تقل فيها بطبيعة الحال أحمال الطاقة مقارنة بأشهر الصيف في المملكة العربية السعودية، أن تنخفض التكاليف الحدية إلى الصفر في وقت متأخر من الصباح وبعد فترة الظهيرة. ولعل القدرة الكهروضوئية التي تم نشرها لتلبية الطلب الصيفي تسمح بتحقيق هذه النتيجة.

الاكتفاء فيه باستخدام الغاز الطبيعي فقط. إلا أن استجابة الطلب للتسعير في الوقت الفعلي يمكنها أن تعين مرافق الطاقة على استرداد قرابة 2.4 مليار دولار (9 مليار ريال سعودي) التي أنفقتها هذه المرافق سابقاً في إصلاح عدادات الكهرباء السكنية.

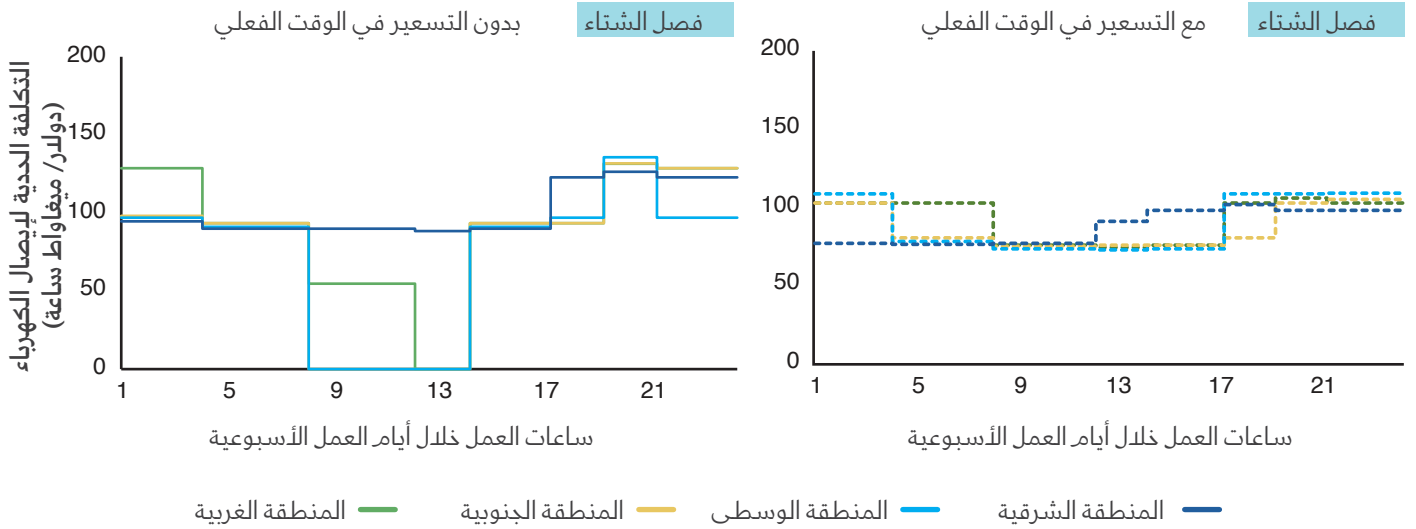
كذلك، يوضح الشكلان (6 و7) التكاليف الحدية المتكبدة لإنتاج الطاقة على المدى الطويل لمناطق المملكة العربية السعودية الأربع، وتوضح هذه الأشكال التكاليف المتكبدة في فصلي الشتاء والصيف مع وبدون تسعير

الشكل 6. التكاليف الحدية طويلة الأمد لتوصيل الكهرباء في أيام العطلة الصيفية بعد تحرير أسعار الوقود، مع وبدون تسعير في الوقت الفعلي.



المصدر: نتائج النموذج.

الشكل 7. التكاليف الحدية طويلة الأمد لتوصيل الكهرباء في أيام الأسبوع الشتوية بعد تحرير أسعار الوقود، مع وبدون تسعير في الوقت الفعلي.



المصدر: نتائج النموذج.

تكون أكثر استقرارًا على مدار العام. وبالتالي، فإن النقاط الرئيسية لهذا القسم تتمثل فيما يلي:

يعمل تسعير الكهرباء في الوقت الفعلي على المدى الطويل على تقليل تباين التكاليف الحدية في قطاع توليد الطاقة.

يكون التسعير في الوقت الفعلي خلال فصل الصيف الأدنى خلال أوقات ذروة النظام (ECRA 2020b)، مما يمكن أن ينتج عنه تحويل غير مرغوب فيه لأحمال الطاقة إلى قطاع ذروة الأحمال.

على الرغم من أن إمداد الطاقة يعد المحور الرئيس الذي تدور حوله هذه الدراسة، إلا أن النتائج تبين الأسباب الكامنة وراء تراجع الطلب على الكهرباء والتكاليف الحدية المستقرة عند تطبيق أسلوب التسعير في الوقت الفعلي. بينما يُظهر إطار عمل النمذجة السكنية أن الأسر تجري تعديلات سلوكية، وتستثمر في كفاءة استهلاك الطاقة على المدى الطويل استجابةً لارتفاع

الملاحظ أن أحمال الطاقة في القطاع السكني تنخفض بالتزامن مع تطبيق الأسعار في الوقت الفعلي، مما يقلل بدوره من الاستثمارات في الطاقة الكهروضوئية. إذ تنخفض أحمال الطاقة على وجه الخصوص أثناء فترات الذروة. وينتج عن الانخفاض في قدرة الطاقة الكهروضوئية "منحنى البطة" الذي يكون أكثر انبساطًا في فصل الصيف. بمعنى آخر، يعاني نظام الطاقة من انخفاض في وهبوط محطات توليد الطاقة الحرارية. بالإضافة إلى ذلك، يكون القاع في جزء النهار في فصل الصيف أعلى من منحنى الحمل. كذلك يقلل الاستثمار المنخفض في قدرة الطاقة الكهروضوئية في سيناريو التسعير في الوقت الفعلي أو يلغي حدوث حالة الصفر في فصل الشتاء.

يمكننا القول بإيجاز، أن التكلفة الحدية لإمداد نظام الطاقة لا ترتفع أو تنخفض إلى أدنى مستوى مع التسعير في الوقت الفعلي. أما بالنسبة إلى حالة تحرير أسعار الوقود وعدم وجود تسعير في الوقت الفعلي، فإن المستهلك يجني فوائد جمة من أسعار الكهرباء التي

متجانسة. إلا أن النتائج تدل على مدى استجابات الأسر. وكما هو الحال في دراسة (Matar 2020)، فإن استجابات الأسر في هذا النموذج تستلزم شراء مكيفات هواء أكثر كفاءة إضافة إلى معدات الإنارة والتكييف التي تتبع نفس النهج. تشمل التعديلات السلوكية للأسر رفع إعدادات منظمات الحرارة في فصول الصيف والربيع والخريف. يوضح الجدول (5) كيفية اختلاف استجابات الأسر ذات الدخل المحدود والمرتفع للتسعير في الوقت الفعلي في هذا النموذج.

أسعار الكهرباء في الوقت الفعلي. وتعمل هذه التدابير مجتمعة على تقليل أحمال تبريد المساكن، وبالتالي، يكون تقليل أحمال الطاقة أكبر قدرًا خلال فترة منتصف اليوم.

إلا أن التدابير التي تتم ممارستها استجابة للتسعير في الوقت الفعلي في النموذج، لا تعد التدابير الفعلية التي يمكن ممارستها في الأوضاع الفعلية. حيث تكون خيارات كفاءة الطاقة مقيدة في نموذجنا، ويتم إجراء التحليل للمساكن النموذجية، في حين تكون الأسر الحقيقية غير

الجدول 5. تدابير الاستجابة التي تمارسها الأسر في ظل التسعير في الوقت الفعلي.

الاختلافات في استجابات الأسر ذات الدخل المرتفع والمحدود	نوع مسكن الأسرة والمنطقة (المناطق)
تشتري الأسر ذات الدخل المرتفع والمحدود على حد سواء مكيفات هواء أكثر كفاءة لتكييف منازلها واستبدال المصابيح الكهربائية بأخرى أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة. كذلك يقوم كلا النوعين من المنازل بضبط منظمات الحرارة الخاصة بهم في فصول الصيف والربيع والخريف وتقليل استخدام الإضاءة. تقوم الأسر ذات الدخل المرتفع برفع درجات ضبط منظمات الحرارة خلال ذروة فصل الصيف أكثر من الأسر ذات الدخل المحدود.	فلل في المنطقة الجنوبية
مشتريات كفاءة الطاقة مماثلة لتلك الخاصة بالفلل في المنطقة الجنوبية، مع تشابه ردود الفعل السلوكية لكلا المجموعتين. ويتمثل الاستثناء الوحيد في أن الأسر ذات الدخل المحدود تقوم برفع درجات ضبط منظمات الحرارة خلال ذروة فصل الصيف أكثر مما تفعل الأسر ذات الدخل المرتفع.	ثشق في المنطقة الجنوبية
تتماثل مشتريات كفاءة الطاقة لنوعي المنازل المذكورة أعلاه. من بين الاستجابات السلوكية، قيام الأسر ذات الدخل المحدود برفع درجات ضبط منظمات الحرارة في فصلي الربيع والخريف، في حين أن الأسر ذات الدخل المرتفع لا تفعل ذلك.	ثشق في المنطقة الغربية
تتماثل مشتريات كفاءة الطاقة في كلا المجموعتين. تقوم الأسر ذات الدخل المحدود على عكس الأسر ذات الدخل المرتفع، برفع درجات ضبط منظمات الحرارة في فصلي الربيع والخريف. أما في المنطقة الجنوبية، فتستجيب الأسر ذات الدخل المرتفع أيضًا في فصلي الربيع والخريف، ولكنها لا تقوم بذلك بنحو مفرط كما تفعل الأسر ذات الدخل المحدود.	بيوت تقليدية في المناطق الجنوبية والوسطى والشرقية

المصدر: نتائج النموذج.

العام. وتظهر هذه النتيجة في معظم المناطق لأنّ الدخل المتاح للأسر ذات الدخل المرتفع أعلى من الأسر ذات الدخل المحدود بعد ارتفاع أسعار الكهرباء. تم توضيح جميع الاستجابات الموضحة في الجدول (4) بالنسبة للحالة الأساسية مصحوبة بأسعار الكهرباء لعام 2017. إذ لا تتفاعل الأسر في هذه الحالة بشكل سلوكي أو تقوم بأيّ عمليات شراء عالية الكفاءة في استخدام الطاقة.

على سبيل المثال، تتفاعل الأسر ذات الدخل المحدود من ساكني الشقق في جميع مناطق المملكة باستثناء المنطقة الغربية بشكل أكثر حدة من خلال ضبط درجات الحرارة الداخلية أعلى مما كانت عليه في الحالة الأساسية في فصليّ الربيع والخريف. بينما نجد نظرائهم من ذوي الدخل المرتفع على النقيض من ذلك، لا يضبطون منظمات الحرارة الخاصة بهم في هذين الفصلين من

على صعيد آخر، يوفر هذا التحليل نتيجتين رئيسيتين هما: أولاً، يعمل التسعير في الوقت الفعلي على تقليل التباين اليومي للتكاليف الحدية لمرافق الطاقة السعودية مقارنة بالحالة دون تسعير في الوقت الفعلي. فعندما يتم تحرير أسعار الوقود، تكون الأسعار في الوقت الفعلي أعلى من أسعار الكهرباء لعام 2017، وتخفض أحمال الطاقة بدورها. كما تؤدي أحمال الطاقة المنخفضة إلى تراجع الاستثمارات في محطات الطاقة على المدى الطويل. يشمل هذا التخفيض إضافات قدرة أقل على الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى نظام الطاقة السعودي. ونظراً لنقص معينات تخزين الطاقة، فإنّ الإضافات المنخفضة للقدرة الكهروضوئية تعمل على التخفيف من حدة التباين الواسع في تكاليف الإنتاج الحدية ليلاً ونهاراً، فضلاً عن تخفيفها لمتطلبات التدرج الخاصة بالمحطات الحرارية.

ثانياً، يغطي تقليص الاستثمارات في محطات الطاقة في سيناريو التسعير في الوقت الفعلي تكلفة استبدال العدادات السكنية الذكية، ويقدر إجمالي الاستثمارات بمرور الوقت في سيناريو التسعير في الوقت الفعلي بحوالي 24 مليار دولار. وبالمقارنة، تقدر التكلفة الفعلية لاستبدال العدادات الذكية لجميع العملاء من القطاع السكني بنحو 2.4 مليار دولار.

تناولت هذه الدراسة بالبحث الآثار المحتملة لتسعير الكهرباء في الوقت الفعلي على عمليات قطاع توليد الطاقة في المملكة العربية السعودية. حيث يقدم التحليل الذي أجرته هذه الدراسة رؤى بشأن الآثار المحتملة لمخططات تسعير الكهرباء في بيئة تسعير الوقود المحررة. وتقدم الدراسة تحقيقاً لهذه الغاية نماذج متعددة القطاعات لاستخدامات الطاقة والكهرباء السكنية.

يشتمل النموذج السكني على الأسر التي تكون قراراتها محكومة بمبادئ الاقتصاد الجزئي ضمن نموذج محاكاة طاقة المباني، وتلتزم تدفقات الطاقة في مساكن هذه الأسر بالقوانين الفيزيائية مثل قانون الحفاظ على الطاقة. كما يقوم التحليل بتقسيم الأسر إلى فئتين، أسر منخفضة الدخل وأسر مرتفعة الدخل تعيش في فلل نموذجية وشقق ومنازل تقليدية. ويتم النظر في المناطق المختلفة للمملكة كل على حدة لحساب خصائصها الاجتماعية والاقتصادية والمناخية الخاصة.

كذلك يتم تحديد التسعير في الوقت الفعلي على أنه التكلفة الحدية طويلة الأجل والمتغيرة بمرور الوقت لإمداد الكهرباء في بيئة تسعير الوقود المحررة. وتقدم الأسعار في الوقت الفعلي للأسر فقط، بينما تظل أسعار الكهرباء المفروضة على شرائح المستهلكين الأخرى على حالها من دون تغيير. ورغم ذلك، فإنّ استخدام التسعير في الوقت الفعلي له تأثيرات واضحة على الطلب الكلي على أحمال الطاقة الكهربائية.

¹ يعني مصطلح "التسليم" التوليد والنقل والتوزيع.

² تتألف تكلفة الخدمة من تكاليف الوقود وشراء الكهرباء من المنتجين المستقلين والنفقات التشغيلية غير المتعلقة بالوقود، بما فيها النقل والتوزيع والاستهلاك والنفقات الرأس مالية.

³ تم تفصيل المكوّن المادي المستخدم في هذا التحليل في دراسة الباحث (Matar (2016)

⁴ تم اختبار معدل خصم أقل في إصدار النموذج المستخدم من قبل الباحث (Matar (2020) عند ارتفاع أسعار الكهرباء، حيث تقوم الأسر ذات معدلات الخصم المنخفضة بإجراء تعديلات سلوكية أكثر تحفظًا. ويكون لديهم بدلاً من ذلك، ميلاً أعلى لشراء الحد الأقصى لمستوى كفاءة الطاقة.

⁵ تسمى الآن مؤسسة النقد العربي السعودي بالبنك المركزي السعودي، إلا أنها مازالت محتفظة باختصار الاسم القديم (SAMA).

⁶ "منحنى البطة" مصطلح صاغه مشغل النظام المستقل في مدينة كاليفورنيا الأمريكية، ونبع من الدراسة التي قام بها كل من (Denholm, Margolis and Milford (2008) ويشير إلى تأثيرات قدرة الطاقة الكهروضوئية على منحنى الحمل المتبقي على مدار اليوم. وهو ببساطة عبارة عن رسم بياني لإنتاج الطاقة خلال يوم يبين اختلال التوقيت بين ذروة الطلب وإنتاج الطاقة المتجددة.

- Alberini, Anna, Silvia Banfi, and Celine Ramseier. 2013. "Energy Efficiency Investments in the Home: Swiss Homeowners and Expectations about Future Energy Prices." *The Energy Journal* 34:49–86. <https://doi.org/10.5547/01956574.34.1.3>
- Allcott, Hunt. 2011. "Rethinking Real-time Electricity Pricing." *Resource and Energy Economics* 33:820–42. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.06.003>
- Argaam. 2019. "Saudi Electricity Awards SAR 9 Bln Smart Meter Project to Local, Chinese Firms." December 15. Accessed June 22, 2020. <https://www.argaam.com/en/article/articledetail/id/1335418>.
- Bruderer Enzler, Heidi, Andreas Diekmann, and Reto Meyer. 2014. "Subjective Discount Rates in the General Population and Their Predictive Power for Energy Saving Behavior." *Energy Policy* 65:524–40. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.049>
- Denholm, Paul, Robert Margolis, and James Milford. 2008. "Production Cost Modeling for High Levels of Photovoltaics Penetration." Technical report NREL/TP-581-42305. <https://doi.org/10.2172/924642>
- Deweese, Donald N. 2001. *Price and Environment in Electricity Restructuring*. Law and Economics Programme, Faculty of Law, University of Toronto: 9.
- Dutta, Goutam, and Krishnendranath Mitra. 2017. "A Literature Review on Dynamic Pricing of Electricity." *Journal of the Operational Research Society* 68:1131–45. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0149-4>
- Electricity & Cogeneration Regulatory Authority (ECRA). 2016. "Electricity Tariff." Fourth Edition, April 2016.
- . 2018. "Activities and Achievements of the Authority in 2017." 128, 153, 154. (Arabic release)
- . 2019. "Annual Statistical Booklet For Electricity & Seawater Desalination Industries. 151.
- . 2020a. "Activities and Achievements of the Authority in 2018." 66, 133. (Arabic release)
- . 2020b. "Annual Statistical Booklet for Electricity and Seawater Desalination Industries 2019." 37.
- Faruqui, Ahmad, Ryan Hledik, Greg Wikler, Debyani Ghosh, Joe Priyanonda, and Nilesh Dayal. 2011. "Bringing Demand-side Management to the Kingdom of Saudi Arabia." *The Brattle Group*. 40. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0877-9_3
- Faruqui, Ahmad, Ryan Hledik, and Jennifer Palmer. 2012. "Time-Varying and Dynamic Rate Design." *The Brattle Group: Global Power Best Practice Series*. 17–8.
- Faruqui, Ahmad, and Sanem Sergici. 2010. "Household Response to Dynamic Pricing of Electricity: A Survey of 15 Experiments." *Journal of Regulatory Economics* 38:193–225. <https://doi.org/10.1007/s11149-010-9127-y>
- Faruqui, Ahmad, Sanem Sergici, and Lamine Akaba. 2013. "Dynamic Pricing of Electricity for Residential Customers: The Evidence from Michigan." *Energy Efficiency* 6:571–84. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9192-z>
- General Authority for Statistics (GaStat). 2018. *Household Expenditure and Income Survey 2018*. 2018:110.

- Harrison, Glenn W., Morten I. Lau, and Melonie B. Williams. 2002. "Estimating Individual Discount Rates in Denmark: A Field Experiment." *American Economic Review* 92(5):1606–17. <https://doi.org/10.1257/000282802762024674>
- Hausman, Jerry A. 1979. "Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables." *Bell Journal of Economics* 10(1):33–54. <https://doi.org/10.2307/3003318>
- Herter, Karen, Vikki Wood, and Shelley Blozis. 2013. "The Effects of Combining Dynamic Pricing, AC Load Control, and Real-time Energy Feedback: SMUD'S 2011 Residential Summer Solutions Study." *Energy Efficiency* 6:641–53. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9209-7>
- Johansson, Per-Olov. 1991. *An Introduction to Modern Welfare Economics*. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511582417>
- KAPSARC. 2016. "The KAPSARC Energy Model for Saudi Arabia: Documentation of the Model Build called 'KEM-SA_v9.16.'" Accessed January 16, 2020. https://www.kapsarc.org/wp-content/uploads/2016/11/KEM-SA_documentation_v9.16.pdf
- Matar, Walid. 2016. "Beyond the End-consumer: How Would Improvements in Residential Energy Efficiency Affect the Power Sector in Saudi Arabia?" *Energy Efficiency* 9(3):771–90. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9392-9>
- . 2017. "A Look at the Response of Households to Time-of-use Electricity Pricing in Saudi Arabia and its Impact on the Wider Economy." *Energy Strategy Reviews* 16:13–23. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.02.002>
- . 2018. "Households' Response to Changes in Electricity Pricing Schemes: Bridging Microeconomic and Engineering Principles." *Energy Economics* 75:300–08. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.028>
- . 2019. "A Household's Power Load Response to a Change in the Electricity Pricing Scheme: An Expanded Microeconomic-Physical Approach." *The Electricity Journal* 32:106644. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106644>
- . 2020. "Residential Energy Efficiency Investment and Behavioral Response under Different Electricity Pricing Schemes: A Physical-Microeconomic Approach." *International Journal of Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1785467>
- Matar, Walid, and Murad Anwer. 2017. "Jointly Reforming the Prices of Industrial Fuels and Residential Electricity in Saudi Arabia." *Energy Policy* 109:747–56. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.060>
- Matar, Walid, Rodrigo Echeverri, and Axel Pierru. 2016. "The Prospects for Coal-fired Power Generation in Saudi Arabia." *Energy Strategy Reviews* 13–14:181–90. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.10.004>
- Matar, Walid, Frederic Murphy, Axel Pierru, and Bertrand Rioux. 2015. "Lowering Saudi Arabia's Fuel Consumption and Energy System Costs without Increasing End Consumer Prices." *Energy Economics* 49:558–69. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.03.019>

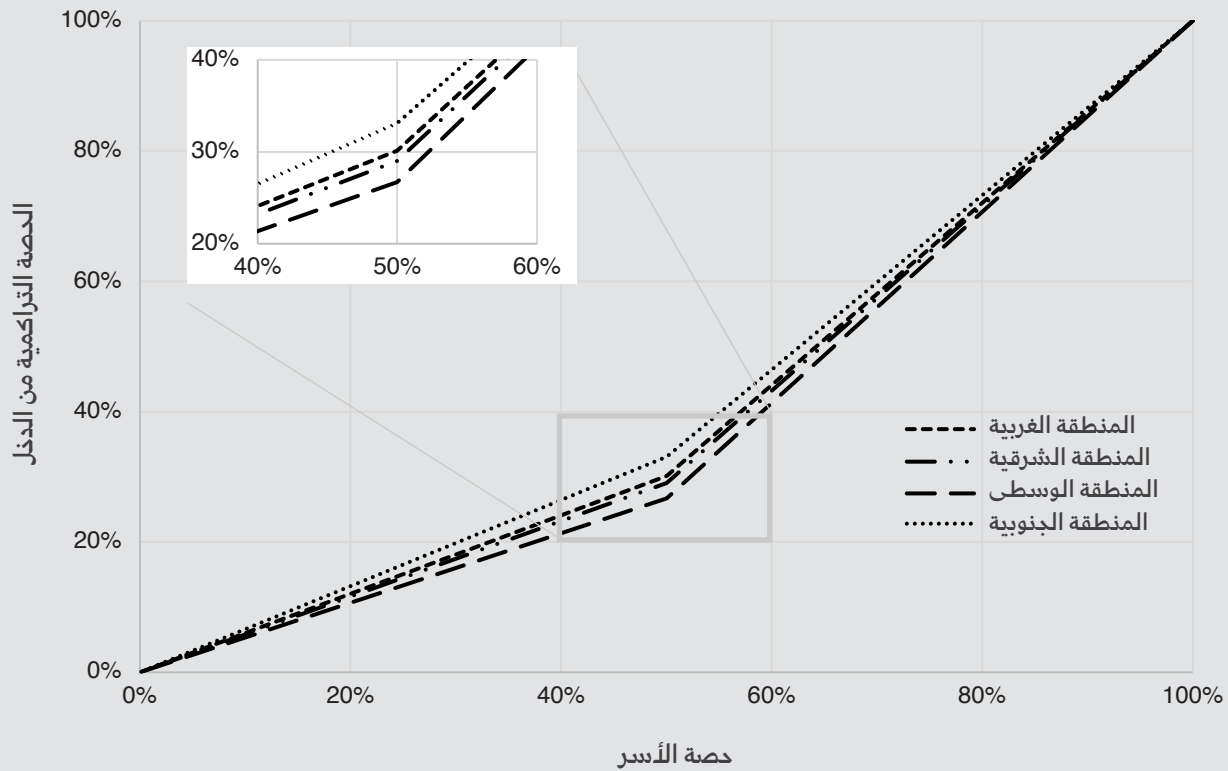
- Matar, Walid, Frederic Murphy, Axel Pierru, Bertrand Rioux, and David Wogan. 2017. "Efficient Industrial Energy Use: The First Step in Transitioning Saudi Arabia's Energy Mix." *Energy Policy* 105:80–92. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.029>
- Matar, Walid, and Rami Shabaneh. 2020. "Viability of Seasonal Natural Gas Storage in the Saudi Energy System." *Energy Strategy Reviews* 32:100549. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100549>
- Saudi Arabian Monetary Authority (SAMA). 2019. "Annual Statistics 2018."
- Saudi Electricity Company (SEC). 2020. "Financial Results for the Fiscal Year Ended 31 December 2019." 2.
- Saudi Vision 2030. 2017. "Fiscal Balance Program: Balanced Budget 2020." 38.
- Yang, Changhui, Chen Meng, and Kaile Zhou. 2018. "Residential Electricity Pricing in China: The Context of Price-based Demand Response." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:2870–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.093>

الملحق: وصف تصنيفات الدخل المستخدمة في التحليل

غالبًا ما يتم قياس توزيع الدخل في المجتمع باستخدام معامل جيني⁷ (Gini coefficient) لتفاوت الدخل، وقد قامت الهيئة السعودية للإحصاء بنشر أحدث بيانات معامل جيني الإقليمي للمملكة العربية السعودية في عام 2018، حيث تم جمع البيانات باعتبارها جزءًا من عملية المسح الإحصائي التي بدأت في أوائل عام 2017 وانتهت في أوائل عام 2018. يوضح الشكل (A1) التوزيعات الإقليمية التراكمية للفئات المنخفضة الدخل (y_1) والفئات ذات الدخل المرتفع (y_2). كما تم النص على شرط أن تكون حصة الدخل التراكمي للمجموعة الثانية أكبر من أو تساوي حصة المجموعة الأولى، وتستخدم هاتان المعادلتان أو المتباينتان لحل نظام مكون من معادلتين ومجهولين لكل منطقة من مناطق المملكة الأربع. فيما تمثل المعادلة (A1) صيغة منفصلة لمعامل جيني تشابه منحنى لورنز.

$$Gini = 3 - \frac{4y_1 + 2y_2}{y_1 + y_2} \quad (A1)$$

الشكل A1. وصف تصنيفات الدخل (الإيرادات) المستخدمة في التحليل.



المصدر: الهيئة العامة للإحصاء (2018) وتحليل كابسارك.

الملحق: وصف تصنيفات الدخل المستخدمة في التحليل

يكون الحد الفاصل بين فئات الدخل المنخفض والمرتفع 50٪، ويقدر هذا التحليل متوسط الدخل الشهري في المناطق الواقعة فوق وتحت هذه النقطة الفاصلة، كما هو مبين في الجدول (A1).

الجدول A1. متوسط الدخل الشهري لكل فئة حسب المنطقة موزعة وفقاً للمنطقة الواحدة بين الأسر.

مناطق المملكة العربية السعودية	ذات الدخل المنخفض (بالدولار الأمريكي)	ذات الدخل المرتفع (بالدولار الأمريكي)
الوسطى	6,525	17,914
الغربية	6,646	15,434
الجنوبية	7,266	14,685
الشرقية	8,340	20,419

المصدر: تحليل كابسارك.

نبذة عن الباحث

وليد مطر



زميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) يعمل على نماذج أنظمة الطاقة، بما فيها نموذج كابسارك للطاقة ومشاريع الأقمار الصناعية مثل نموذج كابسارك لاستخدام الكهرباء السكنية. حصل وليد على درجة الماجستير في العلوم في الهندسة الميكانيكية من جامعة ولاية كارولينا الشمالية ودرجة البكالوريوس في العلوم في نفس المجال من جامعة ساوث كارولينا.

نبذة عن المشروع

يهدف هذا المشروع إلى تطوير إطار عمل لتحليل استجابات أسعار الأسر لأيّ مخططات لتسعير الكهرباء، لا سيما في المناطق التي لا تتوفر فيها بيانات إحصائية بتاتا أو تلك التي لا تكون فيها هذه البيانات كافية. يجمع هذا الإطار بين المبادئ المادية والاقتصاد الجزئي، حيث يتحكم المكون المادي للإطار في استخدام الكهرباء على مدار اليوم. بينما يفرض مكون الاقتصاد الجزئي دالة المنفعة المعيارية على الأسر لتمثيل مدى رضاهم.



www.kapsarc.org