

# الاستثمار الإضافي في كفاءة الطاقة السكنية: منظور سعودي

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 2020 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.

تنظر هذه الدراسة إلى صافي الفائدة الحدية لاعتماد كفاءة طاقة سكنية بعد أن ثبت مقياس كفاءة من قبل. على سبيل المثال، كيف يؤثر تثبيت عزل حراري أكثر كفاءة على قرارات الاستثمار في كفاءة الطاقة بعد ذلك؟ يستخدم نموذج رياضي يقوم بدمج أساسيات الاقتصاد الجزئي والأساسيات الفيزيائية لتوفير نتائج كمية. تم اختيار أربع أسر نموذجية في جميع أنحاء المملكة العربية السعودية وخطتين لتسعير الكهرباء في هذه الدراسة. تظهر الأسر خصائصًا اجتماعية واقتصادية متنوعة، وتواجه ظروفًا مناخية مختلفة، وتعيش في مساكن ذات خصائص فيزيائية مختلفة. وتشمل بعض النتائج الرئيسية لتحليل الأسر السعودية ما يلي:

الاستثمار في عزل حراري أكثر كفاءة بعد الحصول على مكيفات هواء أكثر كفاءة يمكن أن يقلل من رفاهية الأسرة، ولكن ليس بالضرورة العكس.

تنخفض رفاهية الأسرة في ظل مخططات تسعير الكهرباء عندما تستثمر في «تقليل التسريب» بعد تثبيت عزل أكثر كفاءة. ومقارنة بذلك، تتحقق مكاسب الرفاه بالنسبة لجميع حالات الكفاءة الموجودة مسبقًا.

في غرب المملكة العربية السعودية، يعد التباين منخفضًا في رفاهية الأسر بين قرارات الاستثمار الهامشية مقارنة بالمناطق الأخرى.

ينتج عن الاستثمار في كفاءة أعلى لمكيفات الهواء مكاسب رفاهية أعلى من جميع تدابير الكفاءة الأولية الأخرى في حالة تسعير الكهرباء الأساسية، وذلك بعد استثمار أولي في تحسين العزل الحراري، وينطبق ذلك على جميع المناطق. لكن هذا ليس صحيحاً بالنسبة لخطة تسعير وقت الاستخدام، إذ تلاحظ أدنى مكاسب للرفاهية. ففي الصيف ستدفع الأسر مقابل الكهرباء بمعدل متوسط أقل من السعر الأساسي في ظل خطة التسعير لوقت الاستخدام، ومع ذلك فإنها ستدفع بمعدل متوسط أكثر خلال الفترة المتبقية من العام.

علاوة على ذلك، فإن تقليل التسريب بعد تحسين العزل الحراري للمسكن يقلل من رفاهية الأسرة مقارنة بعدم وجود المزيد من تدابير الكفاءة. بينما تحقق مكاسب الرفاهية لتقليل التسريب في جميع حالات الكفاءة الأخرى الموجودة مسبقاً.

تظهر دراسات سابقة أن اعتماد الأسر الفعلي لكفاءة الطاقة بشكل إجمالي أقل مما هو متوقع اقتصادياً. وقد وصف خبراء اقتصاديون ومحللو سياسة هذه الظاهرة بأنها "فجوة كفاءة استخدام الطاقة". يمكن أن يكون هناك العديد من الأسباب لحدوث هذه الفجوة، مثل قلة المعلومات حول تدابير كفاءة الطاقة، أو قرارات الأسر بالاستثمار في مقياس واحد لكفاءة الطاقة مما يقلل الرغبة في اتخاذ تدابير أخرى لاحقة. والسبب الأخير هو ما يحدث عادة عند التعرض لتدابير كفاءة منفصلة.

تبحث هذه الدراسة في الاستثمار في كفاءة الطاقة الهامشية للأسر بعد اعتمادها للتدابير الأولية، وقد أجري التحليل للأسر النموذجية في أربع مناطق بالمملكة العربية السعودية. على سبيل المثال، فإن صافي الفائدة الحدية -أو كما هو معروف بمكاسب الرفاهية الهامشية- التي تحقق من خلال تركيب مكيفات هواء عالية الكفاءة ستتنخفض إلى حد كبير إذا قامت الأسر بتركيب عزل حراري أفضل أولاً مقارنة بالحالة التي لا يتم فيها الاستثمار الأولي. وعلى الرغم من أنه قد يكون هناك مجال لتحقيق أقصى قدر من الرفاهية إذا كانت كفاءة الطاقة تدبيراً مستمراً، إلا أن الطبيعة المنفصلة لاعتماد كفاءة الطاقة قد تسبب رفاهية أدنى من المستوى الأمثل.

وقد حللت حالتين متناقضتين لتسعير الكهرباء، هما: خطة تسعير الكهرباء المستخدمة في المملكة العربية السعودية في عام 2017م، وخطة تسعير الكهرباء الافتراضية لوقت الاستخدام (ToU) إذ تكون تعريفات الكهرباء أعلى خلال ساعات الذروة في الصيف.

et al 2017، بمناقشة الأسئلة المهمة الموجودة سابقًا في هذا المجال، مثل: هل توجد فجوة في كفاءة الطاقة؟ إذا كان الأمر كذلك، فما الذي يمكن عمله لحل ذلك؟ تشير الفجوة في كفاءة استخدام الطاقة إلى الفرق بين إمكانات كفاءة الطاقة المعقولة اقتصاديًا وما يتم تحقيقه بالفعل. وتتمثل النتائج الرئيسية لهذه الدراسات في أن الحجم الفعلي لفجوة كفاءة الطاقة مبالغ فيه، وأن التباين الكبير بين عدد الأفراد في الأسر يتطلب سياسات مستهدفة لكفاءة الطاقة.

استخدمت نسخة معدلة من النموذج الرياضي الذي طرعه مطر (2018، 2019، 2020) لتوفير دعم كمي لأي بيانات يدلى بها. ويستخدم التحليل الخصائص الاجتماعية والاقتصادية والسكنية والمناخية، بما يتفق مع الدراسات التجريبية مثل التي أجراها Nair et al 2010 و Trotta (2018). يجمع النموذج بين السمات الفيزيائية والفوائد الناتجة عن تدابير محددة لكفاءة الطاقة في الأسر التي يتخذ القرار فيها وفقًا لمبادئ الاقتصاد الجزئي. ويحدد رضا الأسرة -الذي يقاس في الاقتصاد من خلال المنفعة ويتم تعظيمه في هذا الإطار- من خلال التفضيلات التي يتم معايرتها بواسطة المحلل لجميع الخدمات المستهلكة للكهرباء. وبعد ذلك، فإن الفوائد المكتسبة لكفاءة الطاقة تحددتها تفضيلات المستهلك وانخفاض الكهرباء، والتي تختلف حسب مقياس الكفاءة.

وقد أجري توضيح كمي لأربع مناطق في المملكة العربية السعودية. وفحصت خمسة تدابير ذات صلة بكفاءة الطاقة، هي: عزل حراري أكثر كفاءة، وكفاءة أعلى لتكييف الهواء، وتحسين تكنولوجيا الإضاءة، ومبنى أكثر إحكامًا، ونوافذ أكثر كفاءة في استخدام الطاقة. تتناول هذه التدابير حمل التبريد المرتفع على شبكة الكهرباء في المملكة العربية السعودية وتهدف إلى تحسين كفاءة الإضاءة. ونظرًا للانخفاض السابق لأسعار الكهرباء التي تديرها الحكومة، فقد تراجعت كفاءة الطاقة السكنية في المملكة العربية السعودية.

تُظهر الوكالة الدولية للطاقة (IEA 2018) الكيفة التي يمكن أن تؤدي فيها كفاءة الطاقة دورًا مهمًا للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة بعد عام 2020م. ومع ذلك تنص الوكالة الدولية للطاقة (2019) على أن الاستثمار في الكفاءة في حالة ركود منذ عام 2014م. ومن جانب الطلب، يعزى التباطؤ إلى التحولات الهيكلية التي تدعم الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، والنشاط الاستهلاكي المتزايد (على سبيل المثال، زيادة مساحات الطابق في المباني)، وعادات الشراء الرأسمالي (على سبيل المثال، المركبات الكبيرة والمزيد من الأجهزة)، وأحوال الطقس الحادة العالمية في عام 2018م.

يتم السعي إلى تحسين فهم الاستثمار في كفاءة الطاقة. على وجه الخصوص، النظر في الحالة الاجتماعية والاقتصادية والهندسية المشتركة لاعتماد المزيد من كفاءة الطاقة نتيجة للاستثمار السابق في تدبير واحد لكفاءة الطاقة. وتنظر هذه الدراسة في عمليات اتخاذ القرار في الأسر لزيادة كفاءة الطاقة وكيف تتغير بمجرد تثبيت تدابير الكفاءة المختلفة بالفعل. تحدث التفاعلات الفيزيائية المعقدة عندما تضاعف تدابير كفاءة الطاقة. وعلى هذا النحو، فإن تلك التدابير التي تعتبر معقولة اقتصاديًا في البداية قد تصبح غير اقتصادية بعد تثبيت إجراء آخر أولًا.

قام Gillingham et al (2009) بتحديد إخفاقات السوق المحتملة التي قد تسبب في زيادة أو ضعف الاستثمار في كفاءة الطاقة. وتشمل الأسباب الرئيسية للإخفاق: سوء تقدير العوامل البيئية الخارجية، وتسعير الطاقة الذي ينحرف عن التكلفة الحدية للعرض، وقلة المعلومات المتوفرة للمستهلكين حول توفير الطاقة، والقيود الرأسمالية التي قد يتعرض لها المستهلكون. وقد تؤدي القيود الرأسمالية إلى ضعف الاستثمار في كفاءة الطاقة.

قامت الدراسات التابعة للباحثين، (Hausman 1979) و Allcott and Greenstone 2012، ومؤخرًا Gerarden

في العالم للكهرباء لكل أسرة في عام 2014م  
(World Energy Council 2020).

وطرح ذلك في دراسة (Matar 2016)، والذي كان  
يتوافق مع (Faruqui et al 2011)، ويعني ذلك حقيقة  
أن المملكة العربية السعودية فيها ثالث أعلى استهلاك

# الاستثمار في كفاءة الطاقة السكنية

تدابير كفاءة الطاقة. واعتمد Malatji et al 2013 إطار الأمثلية الذي يقلل بشكل متزامن من فترة الاسترداد -أي خصم تكاليف الاستثمار الأولي والكهرباء- ويزيد من توفير الطاقة.

على حد علم المؤلف، لم تناقش أي أبحاث حتى الآن مسألة الاستثمار المتزايد في كفاءة الطاقة بعد تثبيت مقياس الكفاءة. وقد لا يكون من المجدي اقتصاديًا تقليل استهلاك الطاقة بشكل أكبر بمجرد تثبيت مقياس لكفاءة الطاقة. وبعبارة أخرى، قد تكون إمكانية الاستثمار في كفاءة الطاقة عملية منفصلة وليست مستمرة. على سبيل المثال، طالبت الشركة السعودية للكهرباء بتزويد المباني السكنية الجديدة في المملكة العربية السعودية بالعزل الحراري منذ عام 2014م (Asif 2016)، إذ إن المباني التي لا تلبى هذا المطلب لن توصل بشبكة الكهرباء. وقد يؤدي تحليل المسكن باستخدام هذا العزل وبدونه إلى الحصول على رؤية حول جدوى اعتماد تدابير إضافية لكفاءة الطاقة.

وثق تحليل التفكير الهامشي عند دراسة صناعة القرار جيدًا في الدراسات السابقة في الاقتصاد، ففي خمسينيات القرن الماضي، جمع (Edwards 1954) ما بين الاقتصاد وعلم النفس لدراسة صنع القرار لدى الأفراد، إنه يعزز فكرة أن الأفراد يتخذون قرارات لتعظيم فائدتهم. وبدعم من الدراسات التجريبية، اقترح (Heath and Fennema 1996) لاحقًا فكرة الفروق في التكاليف الثابتة بمرور الوقت، مما ينتج عنه تكلفة هامشية مكتسبة تختلف عن التكلفة الحدية "الحقيقية". ومن الصعب تطبيق هذا المنظور في التحليلات الثابتة -أي الحالة المستقرة- على المدى البعيد وتستخدم بشكل أساسي في الدراسات المؤقتة.

وبالتوافق مع (Edwards 1954)، استخدمت رغبة الفرد في تجنب المنفعة الحدية السلبية في تحليلات (Hausman 1979) و (Matar 2020) للاستثمار في تدابير محددة لكفاءة الطاقة. يدرس (Hausman 1979) المفاضلة بين أداء مكيف الهواء وعدم الراحة من خلال تضمين هذه المفاضلات في المنفعة. ويحلل Matar 2020 احتمالية شراء العديد من خيارات كفاءة الطاقة والاستجابات السلوكية لأسعار الكهرباء، مثل تعديلات منظم الحرارة (الثرموستات) لزيادة رضا الأسرة. كذلك يعرض (Allcott et al 2011) و (Allcott and Greenstone 2012) نموذجًا للاستثمار في كفاءة الطاقة يعتمد إيجابًا لزيادة الفائدة، قائم على معايير كثافة الطاقة التي يحددها المستخدم.

ومع ذلك فإن معظم الدراسات السابقة تتخذ نهجًا نقديًا قائمًا على التكلفة لدراسة استثمارات معينة في كفاءة الطاقة (على سبيل المثال، Guler et al. [2001]; Jakob [2006]; Malatji et al. [2013]; Krarti et al. [2017])، مقارنة تأثير تدابير كفاءة الطاقة بحالة عدم وجود تدابير لكفاءة الطاقة. على سبيل المثال يقوم Jakob 2006 بدراسة تجريبية لاتخاذ قرارات الاستثمار في كفاءة الطاقة بناءً على التكاليف الحدية وفوائد اعتماده، إذ ينظر في فوائد توفير الطاقة عند مضاعفة

# مدخلات النموذج والبيانات

الرتوبة النسبية. هذا هو المكون الفيزيائي الذي يسمح بتحليل تدابير محددة لكفاءة الطاقة.

أما مكون الاقتصاد الجزئي فيحدد حالة الرضا لكل إعدادات كفاءة الطاقة. وتستخدم مصطلحات "الرفاهية" و "الرضا" و "المنفعة" بالتبادل لتعني الشيء ذاته في هذه الدراسة (Johansson 1991). كما تستخدم دالة المنفعة "مرونة الإحلال الثابت" (CES) (الشكل A1 والمعادلة A1). تصاغ دالة المنفعة بطريقة تختار فيها الأسرة من بين عدة خيارات: الكهرباء للتبريد أو الإضاءة أو غيرها من السلع والخدمات. وعلى عكس نموذج كوب-دوغلاس الوظيفي (Cobb-Douglas) الذي استخدمه (Matar 2018، 2019)، تسمح وظيفة مرونة الإحلال الثابت لمرونة السعر الخاص لطلب السلع بالتنوع بناءً على حصص الإنفاق، ويؤثر على أداء الطبيعة التقريبية لمكون الاقتصاد الجزئي. كما تحتوي دالة المنفعة على عامل التسوية الذي يقوم بمقارنة الرضا الذي تم تحقيقه من تثبيت كل مقياس كفاءة. ويتم أيضًا تضمين قيود الميزانية النقدية، إذ يفرض الاستثمار الإضافي تكلفة استثمار سنوية في كفاءة الطاقة بعد إعداد الكفاءة الأولية. وبالتالي فإن الاستثمار في كفاءة الطاقة سيؤدي إلى خفض استهلاك الكهرباء في وظيفة المنفعة وقيود الميزانية، وتكلفة استثمار أعلى في قيود الميزانية، وعامل تسوية قد يرفع قيمة المنفعة. إن تأثيرات التكاليف والفوائد المترتبة على إجراءات كفاءة الطاقة المحددة ستحدد إنفاق الأسرة على السلع والخدمات الأخرى.

تقدم هذه الدراسة آراءً مدعومة بأدلة كمية، وقد استخدم نموذج استخدام الكهرباء في المساكن لهذه الدراسة. ويوضح الشرح لمبرراتها ومدخلات البيانات بالتفصيل في الملحق. يقوم إطار النمذجة بالدمج ما بين الاقتصاد الجزئي والفيزياء، ويتحكم مكون الاقتصاد الجزئي بقرارات الأسر بناءً على رضاهم الأمثل، بينما يتحكم المكون الفيزيائي في مقدار الكهرباء المستخدمة ويمكنه تمثيل كفاءة الطاقة بوضوح. تمت معايرة النموذج وفقًا لعام 2017م في أربع مناطق بالمملكة العربية السعودية لرصد الخصائص الاجتماعية والاقتصادية والمناخية المختلفة.

باختصار، يميز المكون الفيزيائي أشكال الحرارة التوصيلية، والإشعاعية، والحمل الحراري التي تنتقل إلى الهواء وخارجه في الغلاف الحراري. ويشبه نماذج طاقة المباني التجارية في هذا الصدد، إلا أنه صُمم من الأسفل إلى الأعلى لربطه<sup>1</sup> بنموذج كابسارك للطاقة (KAPSARC 2016)، ولتسهيل المزيد من التطوير في سبيل دراسة اقتصاديات الطاقة. يتضمن المكاسب أو الخسائر المعقولة والكامنة للحرارة نتيجة تبادل الهواء بين الهواء الداخلي والخارجي، والنوافذ، والإضاءة، والعناصر الداخلية مثل الإشغال والأجهزة. وإجمالي حمل الكهرباء بالساعة هو مجموع الاستخدامات المباشرة لمصابيح الإضاءة والأجهزة، والكهرباء المطلوبة لتشغيل المراوح لوحدات معالجة الهواء، وسحب الكهرباء من دورة التبريد لمكيفات الهواء. ترتبط الكهرباء المستخدمة في دورة التبريد ارتباطًا مباشرًا بكمية الحرارة المنقولة إلى الداخل والخارج لتحقيق درجة الحرارة الداخلية المرغوبة وإعدادات

1. قام Matar (2016، 2017) بتقييم الآثار على المدى القريب لسياسة تسعير الكهرباء للمساكن واعتماد كفاءة الطاقة على نظام الطاقة السعودي الأوسع. على وجه الخصوص، كيف ستتأثر تكاليف توليد الكهرباء والكفاءات الحرارية؟ وكيف ستؤثر متطلبات الوقود المختلفة لقطاع الطاقة الكهربائية على عمليات تكرير النفط وعمليات الاستخراج الأولي؟



## اعتماد كفاءة الطاقة

بريطانية لكل واط في الساعة، مما يؤدي إلى سد أي شقوق بين الأبواب أو النوافذ والجدران في نطاق الغلاف الحراري، والاستثمار في زجاج النوافذ منخفض الانبعاث الحرارية، والتدعيم بالعزل الحراري الأكثر متانة، أو استبدال جميع المصابيح الكهربائية بمصابيح ذات صمامات ثنائية باعثة للضوء. هذه الخيارات تتعلق بارتفاع الطلب على التبريد في المنطقة، فحتى تغيير تقنية الإضاءة سيؤثر على حمل التبريد، بالإضافة إلى تأثيره على الاستخدام المباشر للكهرباء.

يصف الملحق عملية النمذجة التي أُجريت لدمج الزيادات الإضافية لكفاءة الطاقة إلى مجموعة واسعة من تدابير كفاءة الطاقة الموجودة مسبقًا. وهناك حاجة إلى النموذج الفيزيائي لتقدير حجم تأثيرات مضاعفة كفاءة الطاقة بشكل صحيح. على سبيل المثال، يختلف تأثير النوافذ ذات الزجاج المزدوج عن تأثير النوافذ المضافة بعد تركيب عزل حراري أفضل.

يراعي هذا النموذج العامل الذي ينطوي على مجموعة محددة من الخيارات الممكنة لتحقيق الكفاءة، كما هو موضح في (الجدول 1). يقسم هذا النهج خيارات الاستثمار إلى عناصر منفصلة، بدلاً من مجموعة متصلة من الخيارات الممكنة غير المحدودة. تتمثل الخيارات في رفع مستوى كفاءة مكيفات الهواء من متوسط نسبة كفاءة استخدام الطاقة (EER) إلى 15 وحدة حرارية

يعرض الجدول (2) مواد الجدران والأسقف لأنماط الفلل النموذجية في كل منطقة في حالة المعايير. كما يعرض المواد المستخدمة في حالة العزل الحراري الأكثر كفاءة، والتي تظهر توصيلًا حراريًا أقل بشكل عام. أُخذت المواد والخصائص الحرارية المرتبطة بالنوافذ منخفضة الانبعاث الحراري واعتماد الصمامات الثنائية الباعثة للضوء من McQuiston et al 2005.

### الجدول 1. تحليل تدابير كفاءة الطاقة (افتراضات المؤلف)

بدون كفاءة طاقة عالية	حالات كفاءة الطاقة
مكيف هواء بمتوسط معدل كفاءة في استخدام الطاقة 15 وحدة حرارية بريطانية / واط في الساعة	
انخفاض التسريب إلى 0.30 تغيرات الهواء في الساعة (ACH)	
نوافذ زجاجية مزدوجة منخفضة الانبعاث الحراري	
العزل الحراري الأكثر كفاءة	
اعتماد LED 100%	

### الجدول 2. بناء الجدران في حالات المعايير والعزل الحراري الأكثر كفاءة (افتراضات المؤلف)

مواد الجدران والأسقف من الأسطح الخارجية (العلوية) إلى الأسطح الداخلية الأرضية [السماكة، حسب المنطقة]	
جص أسمنتي [2.0 cm] خرسانة [15.0 cm to 20.0 cm] جص أسمنتي [2.0 cm]	الفلل القياسية
جص أسمنتي [2.0 cm] خرسانة [13.0 cm] عزل البوليسترين [2.5 cm] خرسانة [13.0 cm] جص أسمنتي [2.0 cm]	العزل الحراري الأكثر كفاءة

على التركيب.

تشير  $\epsilon$  إلى فعالية المصابيح ذات الصمامات الثنائية باعثة الضوء بوحدة قياس لومن لكل واط ( $W$ )، و  $r$  هو تصنيف قوة المصباح، و  $TFA$  تشير إلى إجمالي مساحة الطابق الداخلي للسكن، و  $I$  الإضاءة المطلوبة، و  $ESA$  تشير إلى المساحة الإجمالية للجدران والسقف، و  $TGA$  تشير إلى إجمالي المساحة الزجاجية، و  $L$  تشير إلى تكاليف العمالة لترتيب النوافذ أو العزل الحراري، و  $c$  تشير إلى تكاليف الوحدة لكل مقياس كفاءة. تحسب بالدولار الأمريكي لكل وحدة حرارية بريطانية من قدرة مكيفات الهواء، و دولار أمريكي لكل مصباح إضاءة بصمامات ثنائية باعثة للضوء، و دولار أمريكي لكل متر مربع للنوافذ، والعزل الحراري، وسقف أقوى. تختلف و  $TFA$ ،  $ESA$ ، و  $TGA$  حسب المنطقة ونوع الإقامة، بناءً على المعايير الموضحة في الملحق. وتم تقدير  $L_{window}$  و  $L_{thinsul}$  بمبلغ 100 دولار أمريكي و 500 دولار أمريكي على التوالي.

يشتمل كل خيار من خيارات الكفاءة يتم تثبيته بعد الحالة الأولية على تكلفة شراء تحتسب سنويًا على مدى عمره الافتراضي المصمم باستخدام نسبة خصم قدرها 30%، وذلك وفقًا لدراسة (Harrison et al (2002 و Enzler et al 2004. ذكر (Hausman (1979 أن متوسط القيمة للفرد يصل إلى 26%. ويعرض في الجدول (3) تلخيص التكاليف المسبقة المستخدمة في هذا التحليل.

ستؤثر مستويات العزل الحراري وخفض التسريب ومقدار الحرارة التي يُحصل عليها من خلال النوافذ أو أيهما على أقصى حمل تبريد  $[\max(\dot{Q}_{cooling})]$ ، وهي التي تواجهها الأسر على مدار العام. وسيؤثر هذا بدوره على عدد مكيفات الهواء التي تحتاجها الأسرة وقدرتها، وهو ما ينعكس في تكلفتها. لذلك توضع تكلفة مكيفات الهواء الجديدة كدالة لأقصى حمل تبريد في كل حالة من حالات كفاءة استخدام الطاقة والاستجابة المطلوبة. ولأن حمل التبريد يكون بوحدات الكهرباء وتعطى قدرة تكييف الهواء بوحدات الكهرباء، يضاف ليشير إلى الزيادة الزمنية المستخدمة، وتشتمل تكلفة وحدة التكييف

### الجدول 3. تكاليف الشراء الكاملة لتدابير كفاءة الطاقة (بالدولار الأمريكي)

تدابير كفاءة الطاقة	كامل تكاليف الشراء (دولار أمريكي لكل أسرة)
مكيفات هواء بمتوسط معدل كفاءة في استخدام الطاقة 15 وحدة حرارية بريطانية/ واط في الساعة	$c_{AC} \cdot \max(\dot{Q}_{cooling}) \cdot dt$
سد الشقوق حول النوافذ والأبواب ومنافذ الكهرباء وتجهيزات الإضاءة	$c_{seal} \cdot TFA$
نوافذ زجاجية مزدوجة منخفضة الانبعاث الحراري	$c_{window} \cdot TGA + L_{window}$
العزل الحراري الأكثر كفاءة	$c_{thinsul} \cdot ESA + L_{thinsul}$
اعتماد LED 100%	$\frac{c_{LED} \cdot I \cdot TFA}{\epsilon \cdot r}$

المصدر: تقديرات المؤلف استنادًا إلى (Austrotherm Insulation (2017 للعزل الحراري وتجار التجزئة عبر الإنترنت للباقي. ملاحظة:  $c_{AC} = 4.6$  سنت أمريكي لكل وحدة حرارية بريطانية من القدرة، و  $c_{seal} = 2.15$  دولارًا أمريكيًا لكل متر مربع، و  $c_{window} = 211$  دولارًا أمريكيًا لكل متر مربع، و  $c_{thinsul} = 10$  دولارًا أمريكيًا لكل متر مربع، و  $c_{LED} = 4.4$  دولارًا أمريكيًا لكل مصباح.

يحتسب سعر وقت الاستخدام الذي ينص على تعريفه ثابتة تبلغ 5 سنتات أمريكية لكل كيلو واط في الساعة على مدار العام- باستثناء الصيف خلال ساعات ذروة النظام في المملكة العربية السعودية- عند فرض رسوم تبلغ 15 سنتاً أمريكياً لكل كيلو واط في الساعة، ويطلق على هذا النهج "تسعير وقت الاستخدام".

## سيناريوهات تسعير الكهرباء

في سياق هذه الدراسة، يمكن أن يكون لأسعار الكهرباء آثار غير متوقعة على اعتماد تدابير كفاءة الطاقة. وقد تم البحث في مخططين لتسعير الكهرباء، كما تم تلخيصهما في الجدولين 4 و5:

الأول هو هيكل التسعير التدريجي الذي جرى تطبيقه في المملكة العربية السعودية في عام 2017م، إذ تألفت أسعار العملاء المقيمين من الأسعار التدريجية المنصوص عليها في الجدول (4)، ويعد هيكل الأسعار "تدريجي" لأنه حتى في حال استخدمت الأسر أكثر من 2 ميجاواط في الساعة، فقد تدفع 1.33 سنتاً أمريكياً لكل كيلو واط في الساعة لأول 2 ميجاواط في الساعة، ويطلق على هذا النهج "التسعير الأساسي".

### الجدول 4. تسعير الكهرباء في المساكن عام 2017م

التسعير في عامي 2016 و2017م (سنت أمريكي لكل كيلوواط في الساعة)	الاستخدام الشهري (ميجاواط في الساعة)
1.33	$2 \geq$
2.67	$4 \geq$ و $2 >$
5.33	$6 \geq$ و $4 >$
8.00	$> 6$

المصدر: هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (2016)

### الجدول 5. مخطط أسعار الكهرباء "لوقت الاستخدام" المستخدم في تحليلنا (افتراض المؤلف)

مخطط أسعار الكهرباء "لوقت الاستخدام" (سنت أمريكي لكل كيلوواط في الساعة)	الوقت من العام
15.00	في أشهر الصيف خلال ساعات الذروة (من 12 ظهراً حتى 5 مساءً)
5.00	خارج ساعات الذروة في الصيف، بما في ذلك جميع الفصول الأخرى

التحول من حالة التسعير الأساسي إلى مخطط تسعير وقت الاستخدام.

يؤدي ارتفاع متوسط أسعار الكهرباء في حالة تسعير وقت الاستخدام إلى انخفاض مستوى الرفاهية في جميع المجالات. وكما هو متوقع، فإن ارتفاع أسعار الكهرباء يجعل كفاءة الطاقة أكثر جاذبية من عدم وجودها على الإطلاق. وينتج عن ارتفاع معدل كفاءة استخدام الطاقة لمكيفات الهواء، وتحسين العزل الحراري، والنوافذ منخفضة الانبعاث الحراري، رفاهية أقل في الأسر في جميع المناطق ذات التسعير الأساسي للكهرباء، مقارنة بعدم اتخاذ أي تدابير. وفي ظل تسعير وقت الاستخدام معدل كفاءة استخدام الطاقة الأعلى بشكل عام ينتج رفاهية أعلى من عدم القيام بأي شيء، في حين تنتج حالات كفاءة الطاقة الأخرى خسائر أقل للرفاهية مقارنة بالتسعير الأساسي.

تظهر النتائج أيضًا أنه من الصعب تبرير الاستثمار في النوافذ منخفضة الانبعاث الحرارية ذات الزجاج المزدوج. فتتسبب النوافذ الأكثر كفاءة في خسائر الرفاهية في كل خطط أسعار الكهرباء عندما لا يتم تثبيت أي تدابير سابقة لكفاءة الطاقة، ولكن يتحسن الرضا المكتسب من خلال تثبيتها في الأسر التي لا يوجد لديها تدابير أولية لكفاءة الطاقة.

وتعتبر التفاعلات بين تحسين العزل الحراري ومكيفات الهواء الأكثر كفاءة ذات أهمية خاصة. يوضح Matar 2016 أن وفورات الطاقة المركبة لكلا التدبيرين أكبر من وفورات التدابير الفردية ولكنها أقل من مجموع وفورات الطاقة في كل التدابير. علاوة على ذلك، تظهر النتائج أن الوجود المسبق لمكيفات الهواء ذات معدل كفاءة استخدام الطاقة المرتفع يمكن أن يقلل مكاسب الرفاهية لتركييب عزل حراري أكثر كفاءة لبعض المناخات، ولكن ليس بالضرورة العكس. كما هو موضح أعلاه، تكون تكاليف شراء مكيفات الهواء أقل عند تثبيت العزل الحراري. وهذا ليس صحيحًا عندما تعكس الحالة.

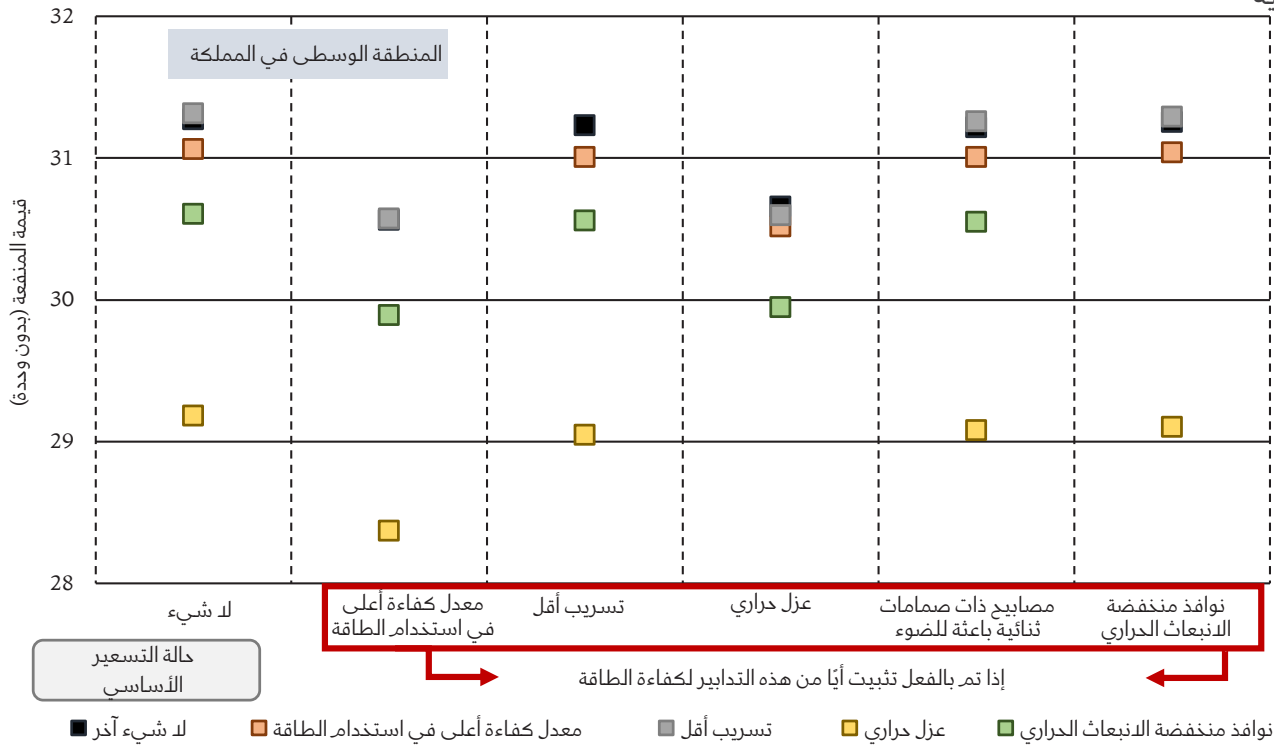
تعرض الأشكال (من 2 إلى 9) فائدة الأسر لكل حالة أولية لكفاءة الطاقة. يتم إجراء عمليات شراء إضافية لكفاءة الطاقة في حالتها تسعير الكهرباء في المناطق الأربع بالمملكة العربية السعودية. وتوضح الرسوم البيانية قيمة المنفعة لخيار الاستثمار الإضافي في كفاءة الطاقة (المحور الرأسي) لكل مجموعة من أسعار الكهرباء والمنطقة، بالنظر إلى إعداد أولي لكفاءة الطاقة (المحور الأفقي). تتقارب قيم المنفعة لبعضها في إعداد محدد لكفاءة الطاقة الأولية ولا يمكن بالضرورة مقارنتها بغيرها من إعدادات الكفاءة الأولية.

نقوم بالبحث في تكاليف مكيفات الهواء قبل وبعد تركيب العزل الحراري المحسن كمثال على كيفية قيام الاستثمارات الأولية في كفاءة الطاقة بتغيير التكاليف الاستثمارية الكاملة لتدابير كفاءة الطاقة المشتركة. وفي الوضع الراهن، احتسبت التكاليف الكاملة لأجهزة التكييف لتكون 1,875 دولارًا أمريكيًا و3,254 دولارًا أمريكيًا و3,446 دولارًا أمريكيًا و3,901 دولارًا أمريكيًا لكل أسرة في المناطق الجنوبية والغربية والوسطى والشرقية من المملكة العربية السعودية على التوالي. وبعد تركيب العزل الحراري المحسن، أصبحت تكاليف الاستثمار الحدية لمكيفات الهواء تبلغ 1,480 دولارًا أمريكيًا و2,493 دولارًا أمريكيًا و2,226 دولارًا أمريكيًا و2,439 دولارًا أمريكيًا لكل أسرة في المناطق الجنوبية والغربية والوسطى والشرقية من المملكة العربية السعودية. وهذا أحد الأمثلة على المدخلات المتغيرة في صنع قرار الأسرة لتعظيم المنفعة.

ولأن تركيب مصابيح ذات صمامات ثنائية باعثة للضوء بالإضافة إلى تدابير كفاءة الطاقة الموجودة مسبقًا يؤدي دائمًا إلى واحدة من أعلى قيم المنفعة، ولا تعرض هذه الدراسة تركيب المصابيح ذات الصمامات الثنائية الباعثة للضوء، حتى تكون الدراسة أكثر وضوحًا. والاستثمار الهامشي في المصابيح ذات الصمامات الثنائية الباعثة للضوء يزيد باستمرار من رفاهية الأسر، بغض النظر عن حالة الكفاءة الأولية أو خطة تسعير الكهرباء. ومع ذلك فإنها تنتج أقل مكاسب فائدة عند

الشكل 2. استثمار في كفاءة الطاقة بسعر أساسي لفيلا نموذجية في المنطقة الوسطى بالمملكة العربية

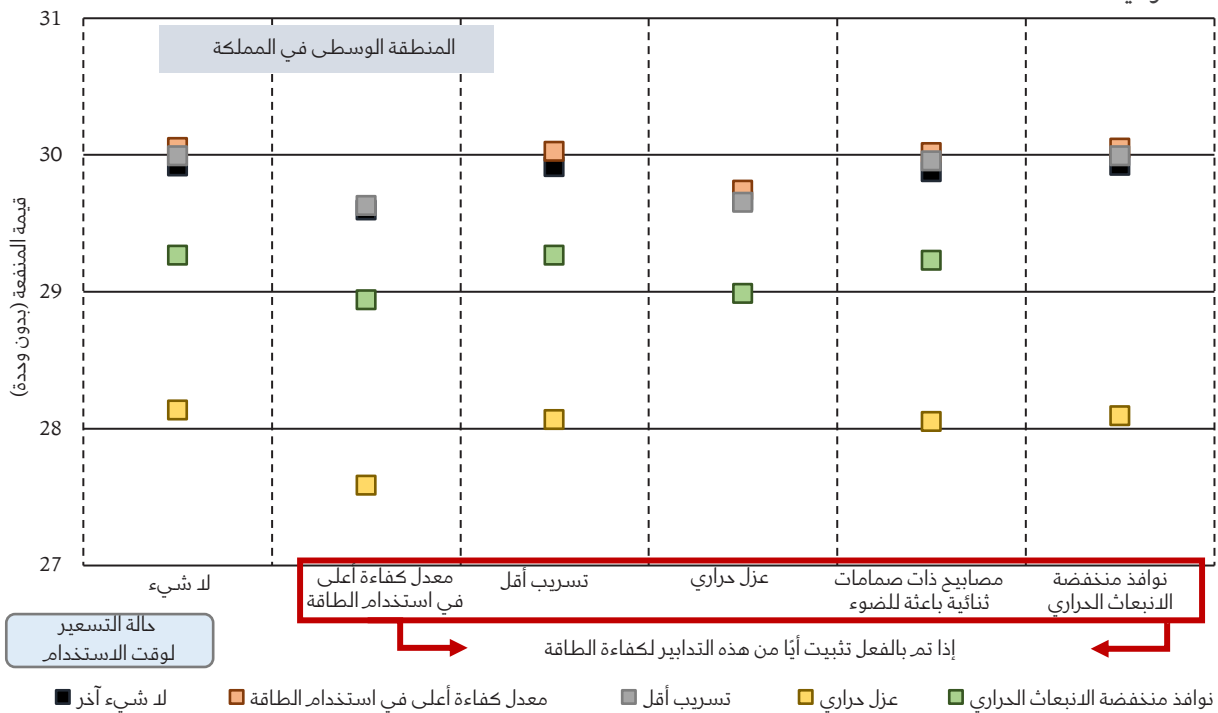
السعودية



المصدر: حسابات المؤلف

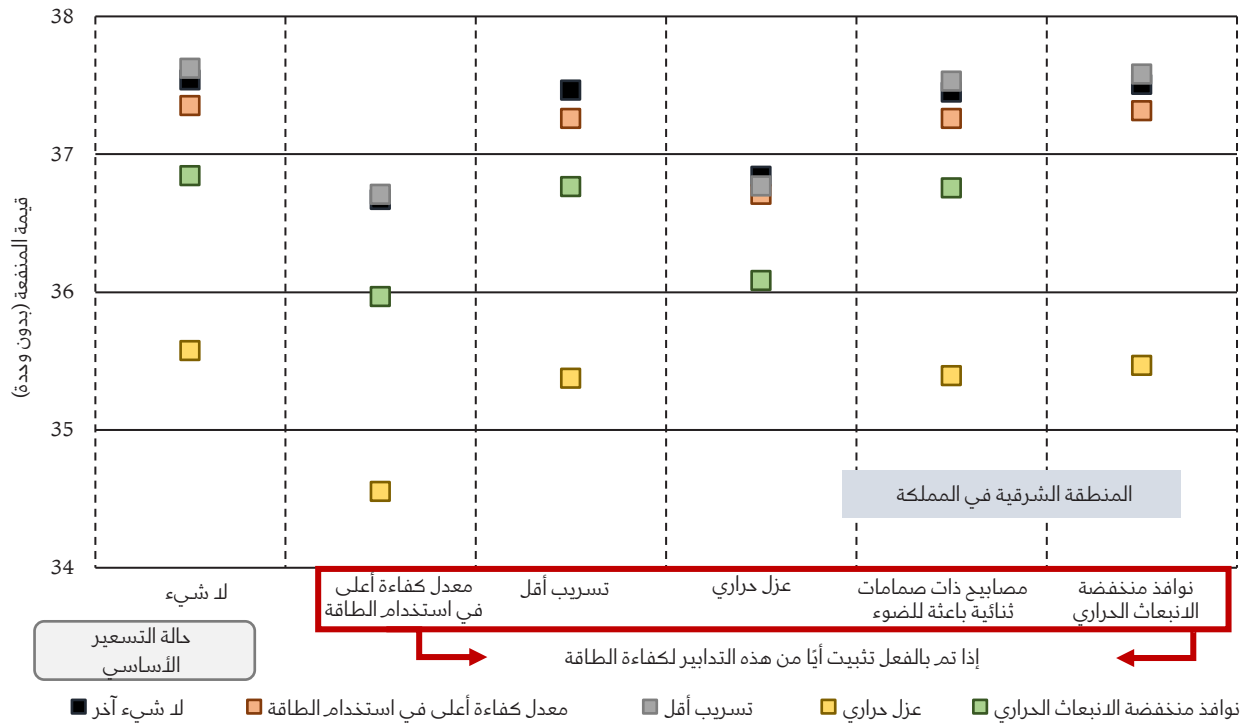
الشكل 3. استثمار في كفاءة الطاقة بالسعر حسب وقت الاستخدام لفيلا نموذجية في المنطقة الوسطى بالمملكة

العربية السعودية



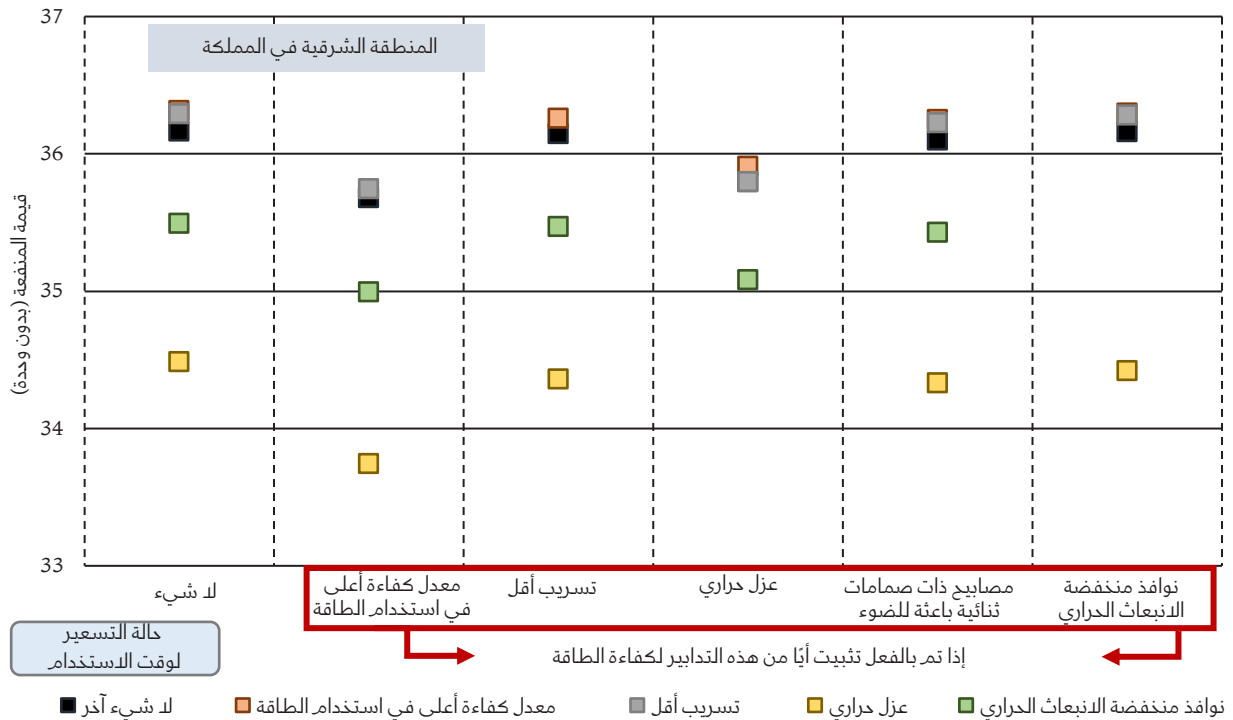
المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 4. استثمار في كفاءة الطاقة بسعر أساسي لفيلا نموذجية في المنطقة الشرقية بالمملكة العربية السعودية



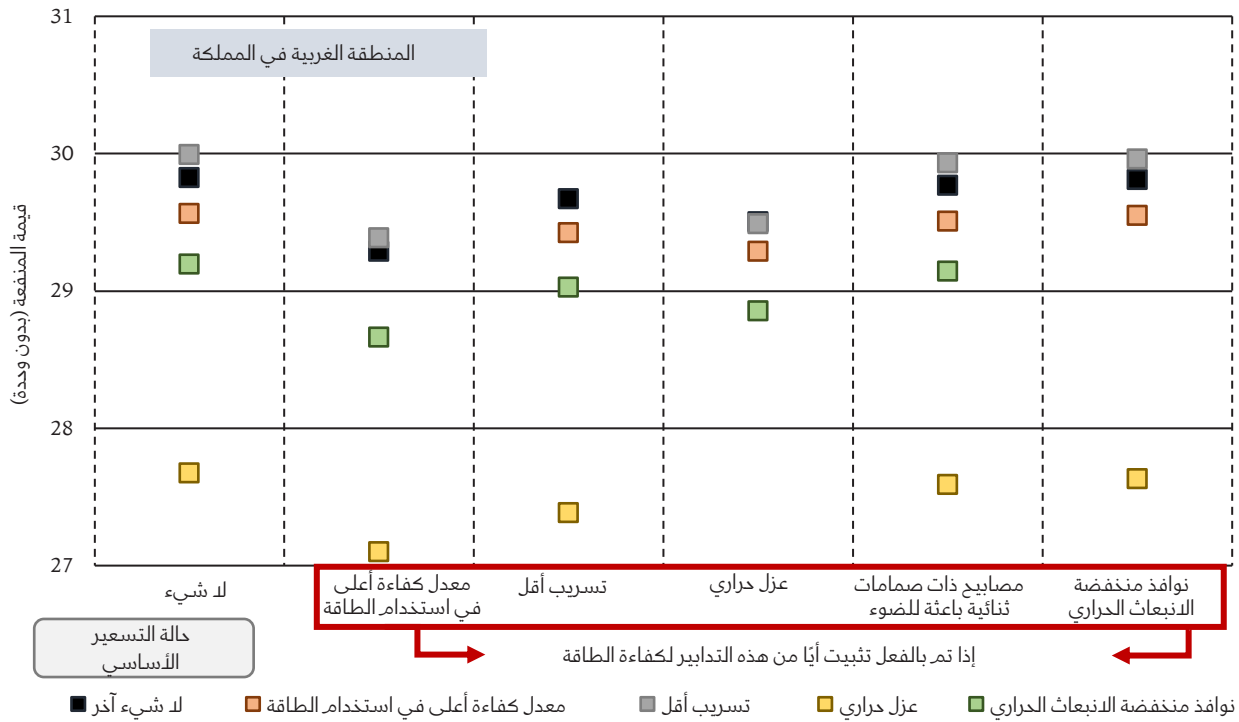
المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 5. استثمار في كفاءة الطاقة بالسعر حسب وقت الاستخدام لفيلا نموذجية في المنطقة الشرقية بالمملكة العربية السعودية



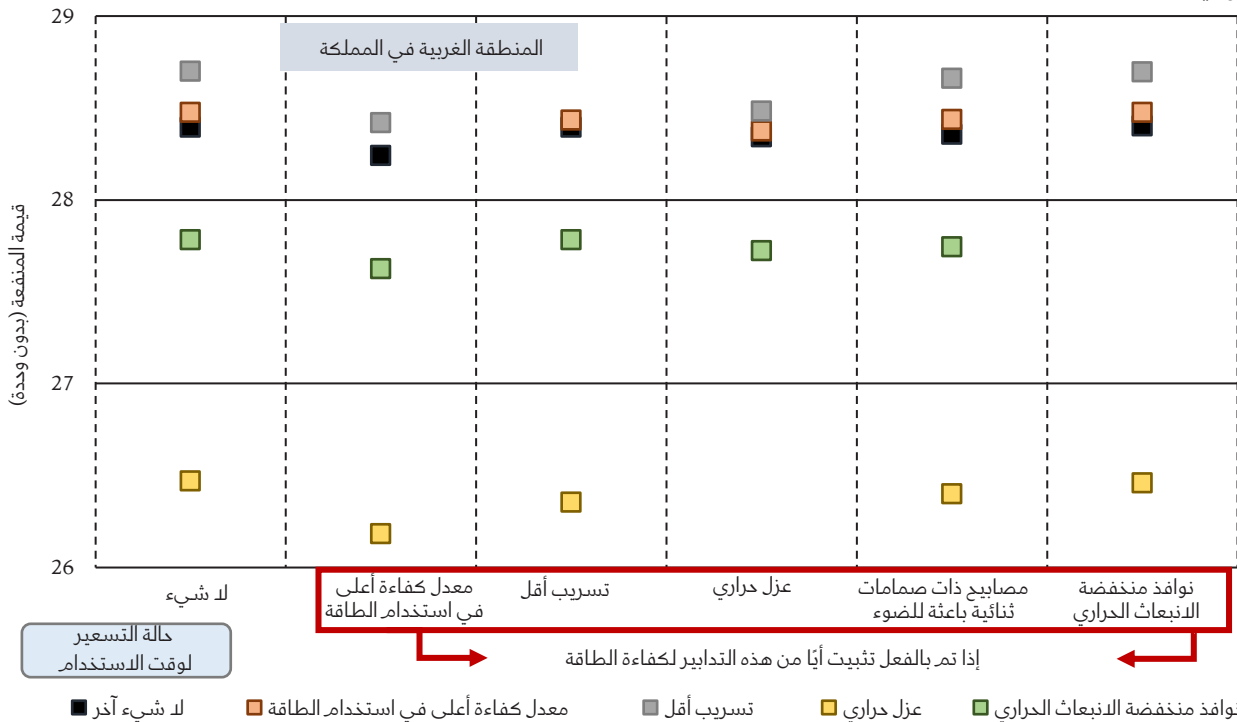
المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 6. استثمار في كفاءة الطاقة بسعر أساسي لفيلا نموذجية في المنطقة الغربية بالمملكة العربية السعودية



المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 7. استثمار في كفاءة الطاقة بالسعر حسب وقت الاستخدام لفيلا نموذجية في المنطقة الغربية بالمملكة العربية السعودية



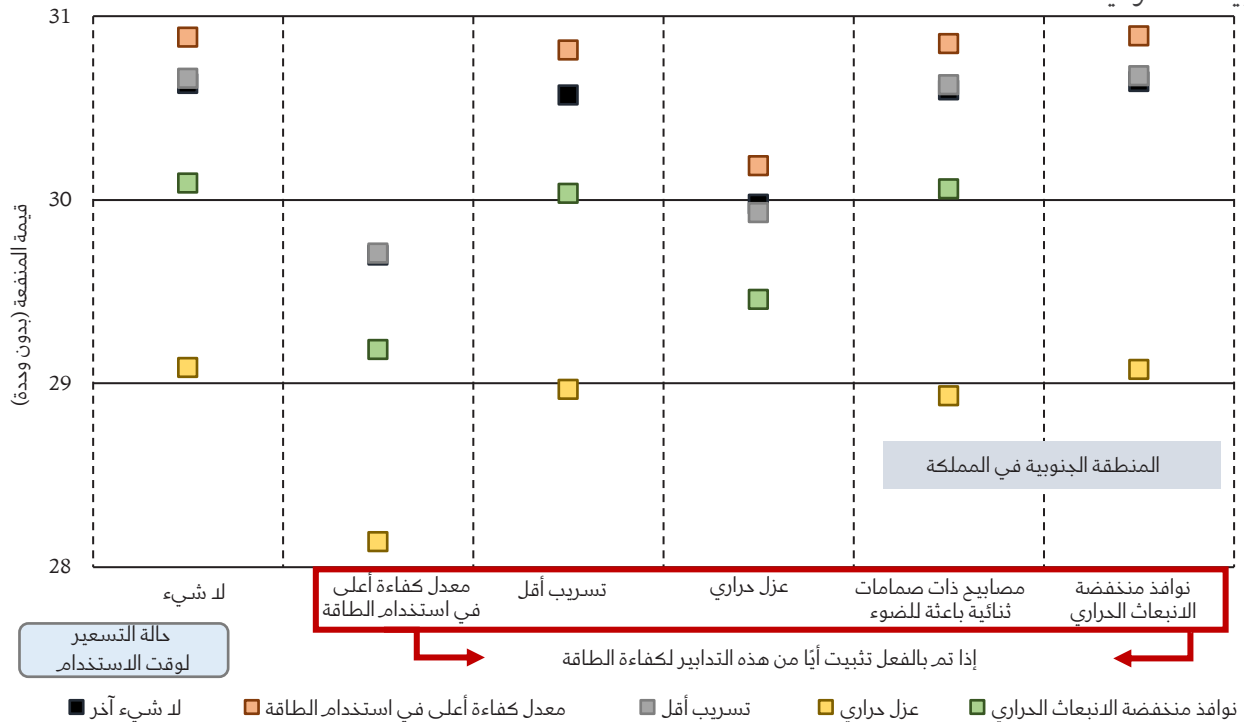
المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 8. استثمار في كفاءة الطاقة بسعر أساسي لفيلا نموذجية في المنطقة الجنوبية بالمملكة العربية السعودية



المصدر: حسابات المؤلف

الشكل 9. استثمار في كفاءة الطاقة بالسعر حسب وقت الاستخدام لفيلا نموذجية في المنطقة الجنوبية بالمملكة العربية السعودية



المصدر: حسابات المؤلف



التحليل بالتكيف مع تغيرات أسعار الكهرباء من خلال الاستجابات السلوكية مثل ضبط إعدادات درجة الحرارة الداخلية أو إطفاء الأنوار. وبذلك فإن التأثير الوحيد هو الإنفاق على الكهرباء وتأثيره على الإنفاق العام للأسر.

والتفسير المعقول لذلك هو أن شريحة 5.33 سنت لكل كيلوواط في الساعة في سيناريو التسعير الأساسي يتم استبدالها أحياناً بسعر 5 سنتات لكل كيلو واط في الساعة في خطة التسعير لوقت الاستخدام، مما يسمح للأسر باستخدام وفورات التكلفة لشراء سلع وخدمات غير-كهربائية إضافية. وفي حالة المعايير، يبلغ متوسط استهلاك الفلل للكهرباء في الصيف 5.3 ميجاواط في الساعة شهرياً في المنطقة الشرقية و4.6 ميجاواط في الساعة شهرياً في المنطقة الوسطى. ويوضح الجدول 4 أن 1.3 ميجاواط في الساعة و0.6 ميجاواط في الساعة من الاستخدام الصيفي للمنطقتين الشرقية والوسطى بسعر 5.33 سنتاً لكل كيلوواط في الساعة في حالة التسعير الأساسي. ويسعر جزء صغير من الطاقة المستهلكة في جميع المناطق بسعر 15 سنتاً لكل كيلوواط في الساعة في ظل سيناريو التسعير لوقت الاستخدام. وبذلك فإن متوسط سعر الكهرباء في حالة سيناريو التسعير لوقت الاستخدام أقرب إلى 5 سنتات لكل كيلوواط في الساعة. وفي أشهر الشتاء الأشد برودة التي يكون خلالها الطلب على تبريد المساحات ضعيفاً، لا تستخدم الأسر النموذجية في جميع المناطق الكهرباء خارج الشريحتين الأولتين المذكورتين في (الجدول 4).

بالإضافة إلى ذلك فإن الاستثمار في «تقليل التسريب» يقلل من رفاهية الأسر فقط عندما يركب عزل حراري أكثر كفاءة مسبقاً. وتحقق مكاسب الرفاهية لجميع تدابير الكفاءة الأخرى الموجودة مسبقاً، حتى عند مقارنتها بعدم إضافة المزيد من الكفاءة. أما مكاسب حرارة التوصيل المنخفضة من الخارج إلى الداخل فتقلل من الرضا عن ميزة توفير الطاقة في المساكن المغلقة.

يمثل هذا الادعاء من خلال النظر في قيم المنفعة الناتجة للأسر عند اعتماد تكييف الهواء «بمعدل كفاءة استخدام طاقة أعلى» أو «العزل الحراري» أولاً. في المناطق الوسطى والشرقية -التي يتشابه مناخها- الاستثمار الحدي في «تحسين العزل الحراري» يتسبب في أعلى خسارة في المنفعة عندما يكون لدى الأسر بالفعل وحدات تكييف هواء أعلى من حيث معدل كفاءة الطاقة، مقارنة بحالة إذا كان لديهم أي مقياس آخر مثبت مسبقاً. والعكس صحيح في المنطقة الجنوبية من المملكة العربية السعودية. وهذه النتيجة تتوافق في كل الخطط لتسعير الكهرباء.

في جميع المناطق باستثناء المنطقة الجنوبية، رفاهية الأسر التي قامت بالفعل بتحسين العزل الحراري تتأثر بشكل مختلف بسيناريوهات تسعير الكهرباء قيد الدراسة. فتتعرض الأسر إلى خسارة في الرفاهية عند الاستثمار في أي كفاءة طاقة أخرى بخلاف العزل، وذلك عند تعرضها لسعر الكهرباء الأساسي. بينما ستحقق مكاسب رفاهية عندما تتعرض لسعر الكهرباء حسب وقت الاستخدام.

لتقديم مثال محدد، تُدرس الأسر التي قامت بتحسين العزل الحراري الموجود مسبقاً. ففي ظل تسعير الكهرباء الأساسي، تعاني الأسر في المنطقة الوسطى التي تستثمر في معدل كفاءة الطاقة الأعلى من أدنى انخفاض في الرفاهية مقارنة بـ «لا شيء» مما لو كان لديها أي تدابير كفاءة أخرى موجودة مسبقاً. ومع ذلك -في ظل أسعار الكهرباء حسب وقت الاستخدام- ينتج عن العزل الحراري الموجود مسبقاً أدنى ارتفاع في الرفاهية مقارنة بجميع تدابير الكفاءة الأخرى الموجودة مسبقاً عندما يكون الاستثمار الهامشي في معدل كفاءة استخدام الطاقة أعلى. ومع تطبيق نظام تسعير الكهرباء الأساسي، سيكون «معدل كفاءة الطاقة الأعلى» هو الخيار الثاني الأكثر رغبة، في حين أنه سيكون الخيار الثاني الأقل رغبة في ظل خطة التسعير لوقت الاستخدام. فوآد توفير الطاقة لكلتا خطتي تسعير الكهرباء هي نفسها، ولا يُسمح للأسر في هذا

خلال حقيقة أن متوسط الدخل في المنطقة الغربية هو الأدنى من أي منطقة في المملكة العربية السعودية. وتستخدم النفقات التي تم تجنبها بسبب تأثير توفير الطاقة للتدابير الأولية لكفاءة الطاقة في شراء تدابير إضافية لكفاءة الطاقة. ويستخدم المبلغ الصافي من المال المدخر لسلع وخدمات أخرى، ولكن هذا له تأثير محدود أكثر على رفاهية الأسر مقارنة بالمناطق ذات الدخل المرتفع.

إن التغييرات في المنفعة للأسرة النموذجية بين قرارات الاستثمار الحدي لمقياس موجود مسبقًا تكون أكثر صمًا في المنطقة الغربية بالمملكة العربية السعودية مقارنة بالمناطق الأخرى. ولهذا السبب، فإن قياس المحاور الرأسية في الشكلين 6 و 7 يكون أكثر وضوحًا من الأشكال الخاصة بالمناطق الأخرى. وبعبارة أخرى، فإن الاستثمار اللاحق في كفاءة الطاقة له تأثير أقل على رفاهية الأسر. ويمكن تفسير هذه الميزة من

الأساسية، ومع ذلك فإنها تدفع سعرًا متوسطًا أعلى في إطار سيناريو التسعير لوقت الاستخدام مقارنة بسيناريو الحالة الأساسية خلال بقية العام. وتوفر هذه النتيجة معلومات يستفاد منها لتصميم تعريفات الكهرباء.

في المناطق الوسطى والشرقية، الاستثمار في «تحسين العزل الحراري» عندما يكون لدى الأسر مسبقًا تكييف هواء أعلى من حيث معدل كفاءة الطاقة (EER) يسبب أعلى خسارة في الرفاهية مقارنة عندما يكون قد تم تثبيت التدابير الأخرى في البداية. هذه النتيجة متسقة في كل خطط تسعير الكهرباء. وفي المنطقة الغربية من المملكة العربية السعودية، يتضاءل التباين في المنفعة للأسرة النموذجية بين قرارات الاستثمار الهامشي لمقياس موجود مسبقًا.

علاوة على ذلك، فإن الاستثمار في «تقليل التسريب» بعد تحسين العزل الحراري للمسكن يقلل من رفاهية الأسرة مقارنة بعدم وجود إضافات للكفاءة. ويتم تحقيق مكاسب الرفاهية لجميع تدابير الكفاءة الأخرى المثبتة مسبقًا.

تسلط هذه النتائج الضوء على التعقيدات المحيطة بحساب فجوة كفاءة الطاقة. ويمكن أن يؤثر قرار الاستثمار الأولي سلبيًا على جدوى تثبيت تدابير الكفاءة لاحقًا. وللتغلب على هذه المشكلة، يمكن أن تتضمن سياسة كفاءة الطاقة حوافزًا لاستثمارات إضافية في كفاءة الطاقة، بالإضافة إلى الاستثمارات الأولية التي تم القيام بها.

تناقش هذه الدراسة صافي الفائدة الحدية لاعتماد كفاءة طاقة سكنية أعلى بمجرد تثبيت مقياس الكفاءة مسبقًا. وسعت إلى الإجابة عن أسئلة مثل كيف يؤثر وجود عزل حراري أكثر كفاءة مسبقًا على قرارات الاستثمار في كفاءة الطاقة بعد ذلك؟ وكيف تتأثر الاستثمارات اللاحقة في كفاءة الطاقة بتركيب النوافذ ذات الزجاج المزدوج مسبقًا؟ ستؤدي الإجابة عن هذه الأسئلة إلى المساعدة على فهم إمكانية الاستثمار في كفاءة الطاقة.

تستخدم الدراسة نموذجًا رياضيًا يدمج أساسيات الاقتصاد الجزئي والأساسيات المادية. وتتميز الأسر المستخدمة في التحليل بخصائصها الاجتماعية والاقتصادية المتنوعة، وظروفها المناخية المتغيرة، وأنها تعيش في مساكن ذات خصائص فيزيائية مختلفة. تم اختيار أربع أسر نموذجية في جميع أنحاء المملكة العربية السعودية لتوضيح قرارات الأسر لكفاءة الطاقة.

كما استخدمت حالتين لتسعير الكهرباء لدراسة كيفية تأثير خطط التسعير على النتائج، وهي تتألف من خطط التسعير التي تعرضت لها الأسر في المملكة العربية السعودية في عام 2017م، والسعر لوقت الاستخدام الذي يرتفع خلال ذروة الطلب في الصيف. يؤدي ارتفاع متوسط أسعار الكهرباء في سيناريو التسعير لوقت الاستخدام مقارنة بسيناريو سعر الكهرباء الأساسي إلى انخفاض الرفاهية. كما أن ارتفاع أسعار الكهرباء يجعل تدابير كفاءة الطاقة مرغوبة أكثر.

في جميع المناطق باستثناء المنطقة الجنوبية، ينتج عن الاستثمار الهامشي في معدل كفاءة الطاقة المرتفع عند تركيب العزل الحراري المحسن مسبقًا أقل خسارة في الرفاهية لجميع تدابير الكفاءة الأولية في حالة خطة الكهرباء الأساسية. ومع ذلك فإنه ينتج أقل مكسب للرفاهية في حالة التسعير لوقت الاستخدام. تدفع الأسر سعرًا متوسطًا أقل للكهرباء في الصيف في ظل خطة التسعير لوقت الاستخدام مقارنة بالحالة

- Allcott, Hunt, Sendhil Mullainathan, and Dmitry Taubinsky. 2017. "Externalities, Internalities, and the Targeting of Energy Policy." New York University.
- Allcott, Hunt, and Michael Greenstone. 2012. "Is There an Energy Efficiency Gap?" *Journal of Economic Perspectives* 26(1): 3-28. DOI: [10.1257/jep.26.1.3](https://doi.org/10.1257/jep.26.1.3)
- AMAD for Technical Consultation and Laboratories. 2011. "High EER at 46°C Kingdom of Saudi Arabia Air Conditioner Project". Presentation slides.
- Asif, M. 2016. "Growth and sustainability trends in the buildings sector in the GCC region with particular reference to the KSA and UAE." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 1267-1273. DOI: [10.1016/j.rser.2015.05.042](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.042)
- Austrotherm Insulation. 2017. "General price list 2017."
- Central Department of Statistics and Information (CDSI). 2013. "Household Expenditure and Income Survey 1428 H."
- Edwards, Ward. 1954. "The Theory of Decision Making." *Psychological Bulletin* 51(4): 380-417. DOI: [10.1037/h0053870](https://doi.org/10.1037/h0053870)
- Electricity and Co-Generation Regulatory Authority (ECRA). 2016. "Electricity Tariff." ECRA Fourth Edition, April 2016.
- Enzler, Heidi Bruderer, Andreas Diekmann, and Reto Meyer. 2014. "Subjective discount rates in the general population and their predictive power for energy saving behavior." *Energy Policy* 65: 524-540. DOI: [10.1016/j.enpol.2013.10.049](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.049)
- Faruqui, Ahmad, Ryan Hledik, Greg Wikler, Debyani Ghosh, Joe Priyjanonda, and Nilesh Dayal. 2011. "Bringing Demand-side Management to the Kingdom of Saudi Arabia." The Brattle Group: 40.
- General Authority for Statistics (GaStat). 2017a. "Household Energy Survey 2017." 37-39; 172-185.
- . 2017b. "Housing Survey." 23, 26, 50.
- Gerarden, Todd D., Richard G. Newell, and Robert N. Stavins. 2017. "Assessing the Energy-Efficiency Gap." *Journal of Economic Literature* 55(4): 1486-1525. DOI: [10.1257/jel.20161360](https://doi.org/10.1257/jel.20161360)
- Gillingham, Kenneth, Richard G. Newell, and Karen Palmer. 2009. "Energy Efficiency Economics and Policy." *Annual Review of Resource Economics* 1: 597-619. DOI: [10.1146/annurev.resource.102308.124234](https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234)
- Guler, Burak, Alan S. Fung, Merih Aydinalp, and V. Ismet Ugursal. 2001. "Impact of energy efficiency upgrade retrofits on the residential energy consumption in Canada." *International Journal of Energy Research* 25: 785-792. DOI: [10.1002/er.721](https://doi.org/10.1002/er.721)
- 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): 1660-1617. DOI: [10.1257/000282802762024674](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. DOI: [10.2307/3003318](https://doi.org/10.2307/3003318)
- Heath, Chip, and M.G. Fennema. 1996. "Mental Depreciation and Marginal Decision Making." *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 68(2): 95-108. DOI: [10.1006/obhd.1996.0092](https://doi.org/10.1006/obhd.1996.0092)
- International Energy Agency (IEA). 2018. "Energy Efficiency 2018."
- . 2019. "Energy Efficiency 2019."
- Jakob, Martin. 2006. "Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector." *Energy Policy* 34: 172-187. DOI: [10.1016/j.enpol.2004.08.039](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.039)
- Johansson, Per-Olov. 1991. *An Introduction to Modern Welfare Economics*. New York: Cambridge University Press. DOI: [10.1017/cbo9780511582417](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](https://www.kapsarc.org/wp-content/uploads/2016/11/KEM-SA_documentation_v9.16.pdf).
- Krarti, Moncef, Kankana Dubey, and Nicholas Howarth. 2017. "Evaluation of building energy efficiency investment options for the Kingdom of Saudi Arabia." *Energy* 134: 595-610. DOI: [10.1016/j.energy.2017.05.084](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.084)

- Malatji, Esrom Mahlatsi, Jiangfeng Zhang, and Xiaohua Xia. 2013. "A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision." *Energy and Buildings* 61: 81-87. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.01.042](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.042)
- 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): 771-790. DOI: [10.1007/s12053-015-9392-9](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. DOI: [10.1016/j.esr.2017.02.002](https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.02.002)
- . 2018. "Households' response to a change in electricity pricing schemes: Bridging microeconomic and engineering principles." *Energy Economics* 75: 300-308. DOI: [10.1016/j.eneco.2018.08.028](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.028)
- . 2019. "Households' Demand Response to Changes in Electricity Prices: A Microeconomic-Physical Approach." *The Electricity Journal* 32: article number 106644. DOI: [10.1016/j.tej.2019.106644](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*. (Accepted; forthcoming)
- Matar, Walid, and Murad Anwer. 2017. "Jointly reforming the prices of industrial fuels and residential electricity in Saudi Arabia." *Energy Policy* 109: 747-756. DOI: [10.1080/14786451.2020.1785467](https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1785467)
- McQuiston, Faye C., Jerald D. Parker, and Jeffrey D. Spitler. 2005. *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*. Sixth edition. John Wiley & Sons: 183-200.
- Nair, Gireesh, Leif Gustavsson, and Krushna Mahapatra. 2010. "Factors influencing energy efficiency investments in existing Swedish residential buildings." *Energy Policy* 38: 2956-2963. DOI: [10.1016/j.enpol.2010.01.033](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.033)
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2017. "NASA Remote Sensing Validation Data: Saudi Arabia." Last Accessed: January 8, 2020. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/saudi-arabia.html>.
- Rehman, Shafiqur, T.O. Halawani, and Tahir Husain. 1994. "Weibull Parameters for Wind Speed Distribution in Saudi Arabia." *Solar Energy* 53(6): 473-479. DOI: [10.1016/0038-092x\(94\)90126-m](https://doi.org/10.1016/0038-092x(94)90126-m)
- Saudi Vision 2030. 2017. "Fiscal Balance Program: Balanced Budget 2020." 38.
- Trotta, Gianluca. 2018. "Factors affecting energy-saving behaviours and energy efficiency investments in British households." *Energy Policy* 114: 529-539. DOI: [10.1016/j.enpol.2017.12.042](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.042)
- World Energy Council. 2020. "Average electricity consumption per electrified household." Last accessed January 8, 2020. <https://wec-indicators.enerdata.net/household-electricity-use.html>

# ملحق - إطار استخدام الكهرباء في المساكن

## A.1 نموذج استخدام الكهرباء في المساكن

النظرية الأساسية التي استوحيت منها الطريقة المستخدمة هي أن دالة الطلب مشتقة من حل حالات الدرجة الأولى لمشكلة تعظيم المنفعة. تنتج هذه الحالات من خلال كتابة دالة لاغرانج وتمييزها وفقاً للمتغيرات التي تشكل دالة المنفعة والقيود. وكنهج تقريبي، يقترح (Matar 2018، 2019، 2020) الربط بين نموذج طاقة البناء المادي والأسرة التي تتوافق قراراتها مع أساسيات الاقتصاد الجزئي، إذ تحسب متغيرات استخدام الكهرباء بواسطة نموذج طاقة بناء متوافق مادياً. وحدثت هذه التحاليل في تدابير الاستجابة للطلب كنتيجة لخطط تسعير الكهرباء المختلفة. وهي تدرس استجابة الطلب السلوكي الناتج عن السعر والاستثمار في كفاءة الطاقة الذي تتم ممارسته أو تثبيته من أجل تعظيم فائدة الأسرة. يناقش (Matar 2019) استخدام النهج النظري بدلاً من النهج التجريبي لأن بعض الدول -مثل دول مجلس التعاون الخليجي- لم تشهد تحركات متكررة أو كبيرة في أسعار الكهرباء المحلية على مدار العقود الماضية.

وتعمل هذه الدراسة على تغيير الإطار الموصوف أعلاه لتشجيع الاستثمار في كفاءة الطاقة إضافة إلى مقياس الكفاءة الموجود مسبقاً. فيتنقل النموذج عبر عدد كبير من التدابير التي ثبتت مسبقاً بالإضافة إلى المسكن الذي تمت معايرته، مثل تحسين العزل الحراري، أو المصابيح الكهربائية الأكثر كفاءة، أو مكيفات الهواء الأعلى من حيث كفاءة الطاقة. ويصاحب حالة الكفاءة العالية في استخدام الطاقة تكاليف سنوية على المدى الطويل لزيادة الاستثمار في كفاءة الطاقة. أما تكاليف التدابير المثبتة سابقاً فلم تؤخذ في الاعتبار في قيود ميزانية الأسر.

يوضح الشكل (A1) الإطار الذي تم تحديثه. الأسر ذات المنفعة مع تفضيلات معينة. وهذا يجعل تفضيلات الوظائف ذات المنفعة معيارية بشكل أساسي، أو كيف «ينبغي» تشكيل المنفعة لمجموعة الأسر؟ تحسب قيمة المنفعة لجميع حالات اعتماد كفاءة الطاقة بافتراض قيود الميزانية.

ولأغراض هذه الدراسة، لا يصف النموذج تدابير الاستجابة السعرية السلوكية المختلفة، مثل رفع إعداد منظم الحرارة الداخلي. بدلاً من ذلك يقوم فقط بوصف تدابير الكفاءة الموضحة في القسم (1.3).

توضع مرونة الإحلال الثابت (CES) لدالة المنفعة في المعادلة A1. ويتكون  $x_i$  من استخدام الكهرباء بالميجاواط، واستهلاك السلع والخدمات الأخرى من الناحية النقدية. وقد عُين سعر السلع والخدمات الأخرى بقيمة الواحد الصحيح. وحُدثت معادلات كميات الكهرباء المستخدمة في التكييف والإضاءة -وباقى استهلاك الكهرباء- بتفصيل أكثر بواسطة (Matar 2020).

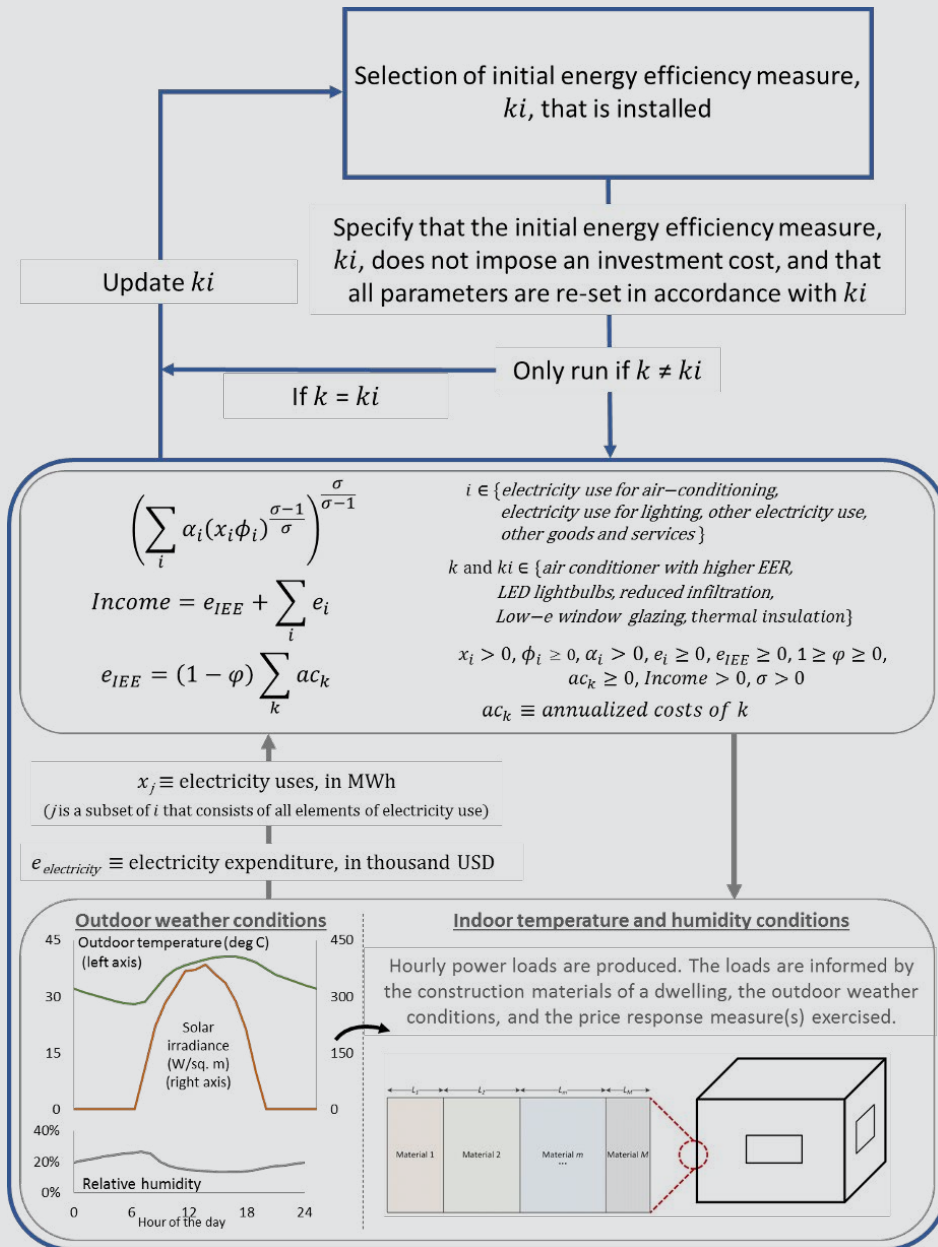
$$(A1) \quad Utility = \left( \sum_i \alpha_i (x_i \phi_i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$



تمت معايرة النموذج للعديد من الفلل النموذجية والشقق والمنازل التقليدية الإقليمية في المملكة العربية السعودية لمطابقة بيانات استخدام الكهرباء الفعلية من عام 2017م. ومع ذلك يقتصر التحليل في جميع المناطق الأربعة على الفلل. وبهذه الطريقة الفلل المستخدمة في هذه الدراسة تتوافق نوعًا ما مع بيانات عام 2017م.

$\phi_i$  هو عامل تسوية يقارب الرضا المكتسب من خلال تركيب كفاءة الطاقة. وعلى الرغم من عدم قياس الاستجابة السلوكية في هذه الدراسة، إلا أن قيمة  $\phi_i$  هي دائمًا الواحد الصحيح للحالات التي تتم فيها دراسة الاستجابة السلوكية فقط، أي في الحالات التي لا يتم فيها تحقيق كفاءة في استخدام الطاقة. ومن المهم ملاحظة ذلك لغرض معايرة النموذج.

الشكل A1. إطار نمذجة استخدام الكهرباء في المساكن



$\phi_i$  تُحدد الكهرباء المستخدمة في التكييف والإضاءة بواسطة المعادلتين A2 و A3 على التوالي. وقيم  $\phi_i$  هي دائماً واحدة للمصطلحات الأخرى في دالة المنفعة. وتؤثر الخدمات -مثل استخدام الإضاءة- على حمل التبريد في المسكن (غير خطي)؛ ومن ثم تؤخذ جميع مكاسب الحرارة في الاعتبار عند ضبط تكييف الهواء. يشير  $EER$  إلى نسبة كفاءة الطاقة لوحدة تكييف الهواء، ويشير  $IHG$  إلى مجموع مكاسب الحرارة الداخلية الإجمالية من الأجهزة والإضاءة خلال العام، و  $SHG$  يشير إلى مجموع زيادة الحرارة الشمسية المباشرة والموزعة عبر النوافذ خلال العام، و  $\Delta T$  يشير إلى مجموع الفروق في درجة الحرارة بين الأسطح الداخلية للجدران والسقف وإعداد درجة الحرارة الداخلية المبدئية المطلوبة، أما  $\omega$  فيشير إلى الحرارة المكتسبة بسبب التسريب. ويتم تحديد مكاسب الحرارة بوحدات الطاقة.

يُدرج الرمز  $\Delta T$  لقياس تأثير نظام العزل الحراري الأكثر كفاءة. ويشير  $s$  إلى حصة كل نوع من الحرارة المكتسبة في إجمالي حمل التبريد في الحالة الأولية أو المعيارية لكل منطقة، ويشير ذلك إلى أن التحسينات في كفاءة استخدام الطاقة لا تمنح الأهمية ذاتها. ويقاس معدل كفاءة الطاقة ( $EER$ ) نسبة استخدام الكهرباء لحمل التبريد، وبالتالي لا يعد جزءاً من  $s$ . وترتبط كل مجموعة من القيم لئى سيناريو بالحالة الأولية، ( $\cdot$ )<sub>initial</sub>.

$$\phi_{AC} = \frac{EER}{EER_{initial}} \left( \frac{IHG_{initial}}{IHG} \right)^{S_{IHG}} \left( \frac{SHG_{initial}}{SHG} \right)^{S_{SHG}} \left( \frac{\Delta T_{initial}}{\Delta T} \right)^{S_{wr}} \left( \frac{\omega_{initial}}{\omega} \right)^{S_{inf}} \quad (A2)$$

$$\phi_{lighting} = \frac{N_{initial}}{N} \quad (A3)$$

في المعادلة A3، تقسم الكهرباء اللازمة لتلبية متطلبات الإضاءة الأولية في الحالة المعيارية ( $N_{initial}$ ) على الكهرباء اللازمة لكل سيناريو لتلبية نفس المتطلبات الأولية ( $N$ ).

يتم تعريف قيم  $\phi_i$  بقيمة الواحد الصحيح لجميع الحالات الأولية لتدابير كفاءة الطاقة الموجودة مسبقاً. على سبيل المثال،  $\frac{\Delta T_{initial}}{\Delta T}$  يساوي قيمة الواحد الصحيح في الحالة الأولية عندما يكون للمسكن عزل حراري موجود مسبقاً. ومع ذلك سيكون أكبر من واحد إذا ثبت العزل الحراري بالإضافة إلى التدابير الأخرى الموجودة مسبقاً.

تشير قيمة  $\phi_i$  إلى التفضيلات، وتشكل مجموع الوحدة لجميع قيم  $\phi_i$ ، وجرت معايرة الأسر لتحصل على حصص تفضيلية للكهرباء تتراوح بين 4% و 6% بحسب المنطقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن قيمة معايرة  $\sigma$  هي 0.9، وهي مرونة الإحلال. وقد أجريت هذه المعايرة من خلال البدء بإعداد تفضيلات الكهرباء بقيمة قريبة من الصفر، وتمت زيادة قيمة هذا التفضيل تدريجياً إلى أن تتوقف الأسر عن الاستجابة لتعريفات الكهرباء لعام 2017م. كما تمت معايرة التفضيل ليكون الأدنى في المنطقة الجنوبية لكون المناخ أقل حدة، والأعلى في المناطق الوسطى والشرقية التي تشهد أشد فصول الصيف حرارة. كما توزع حصة التفضيل المخصصة للكهرباء على مختلف مكوناتها. وتستند تقديرات حصص التفضيل المخصصة إلى حصص استهلاك 2011م المطروحة في دراسة (Faruqui et al (2011) لأسرة في السعودية. وتبلغ قيمة الحصة التفضيلية للسلع والخدمات الأخرى القيمة الإجمالية لكل حصة تفضيلية مطروحاً منها حصة تفضيل الكهرباء.



تظهر قيود الميزانية في المعادلة A4. وتساوي قيمة Income متوسط الدخل السنوي للأسر بحسب المنطقة. وتتم معيارته استناداً إلى متوسط دخل عام 2013م للأسر في كل منطقة باستخدام البيانات التي تم الحصول عليها من الإدارة المركزية للإحصاء والمعلومات (2013CDSI). وتراوح متوسط الدخل السنوي ما بين 31.71 ألف دولار أمريكي في المنطقة الغربية و40.59 ألف دولار أمريكي في المنطقة الجنوبية. وتشير  $e_i$  إلى نفقات الكهرباء والسلع والخدمات الأخرى. ويمكن حساب نفقات الكهرباء بناءً على أسعار الكهرباء في كل ساعة أو وفقاً لهيكل التسعير التدريجي الحالي في المملكة العربية السعودية. و  $e_{IEE}$  يشير إلى تكلفة الاستثمار والصيانة السنوية اللازمة لتدبير معين لكفاءة استخدام الطاقة.

$$(A4) \quad Income = e_{IEE} + \sum_i e_i$$

الشرط المدرج في المعادلة A5 يقلل من تكلفة شراء تدابير كفاءة الطاقة للأسر. لكن هذا التحليل ينص على أن  $\phi$  تساوي صفرًا.  $ac_k$  هي التكاليف السنوية لخيارات كفاءة الطاقة  $k$  المحددة في القسم الفرعي التالي.

$$(A5) \quad e_{IEE} = (1 - \phi) \sum_k ac_k$$

## A.2 مدخلات البيانات ومعايرة النموذج

كما ذكر في (Matar 2020) تجرى معايرة عناصر استخدام الكهرباء في المساكن للفلل النموذجية والشقق والمنازل التقليدية في أربع مناطق في المملكة العربية السعودية، وهي: المنطقة الوسطى، والمنطقة الجنوبية، والمنطقة الغربية، والمنطقة الشرقية. كما تتوافق مجموعات بيانات الطقس الإقليمية مع البيانات التي أخذت من المختبر الوطني للطاقة المتجددة التابع للولايات المتحدة الأمريكية (2017). فيما أخذت المعلومات المتعلقة بمواد البناء وحجم الأسر وعدد المساكن وأبعادها وتدفئة مساحة الأماكن لكل نوع من المساكن وفقاً للمنطقة من الهيئة العامة للإحصاء (a2017, b2017)، ويستخدم معيار آشري لمعايرة ظروف درجة الحرارة الداخلية المقبولة استناداً إلى مجال الراحة الحرارية، أما نقاط ضبط درجات الحرارة في أجهزة الفيلد المعيارية فهي من 22.5 إلى 23 درجة مئوية في الصيف، وفي الربيع والخريف تكون من 20 إلى 22 درجة مئوية، وفي الشتاء تكون من 20.5 إلى 21 درجة مئوية على حسب المنطقة.

كما قام مكتب آماذ للاستشارات التقنية والمختبرات (2011) بتقدير كفاءة مكيف الهواء لتكون 7 وحدات حرارية بريطانية لكل واط في الساعة (BTU/Wh) في عام 2011م. ومنذ عام 2014م، قام المركز السعودي لكفاءة الطاقة والهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة بفرض حد أدنى لمعيار أداء تكييف الهواء لا يقل عن 11.5 وحدة حرارية بريطانية لكل واط في الساعة، في ظروف درجة الحرارة (T1). ومع ذلك فإن قيمة متوسط معدل كفاءة استخدام الطاقة لعدد كبير من السكان كما في المملكة العربية السعودية، يستغرق سنوات للتغيير مع استبدال مكيف الهواء الطبيعي. هذا التأخير، وحقيقة أن 7 وحدات حرارية بريطانية لكل واط في الساعة هي أحدث متوسط قيمة موثقة للمملكة، وأن النموذج المعيار ينتج قيمةً مماثلة لقيم استخدام الكهرباء الفعلية لعام 2017م، يبرر استخدام حوالي 7 وحدات حرارية بريطانية لكل واط في الساعة.

وفي حالة المعايير، يقدر أن جميع الأسر لديها معدل تسريب يتراوح بين 0.65 إلى 0.80 من تغيرات الهواء في الساعة، وذلك بحسب المنطقة. وتتمثل تقنيات الإضاءة المعتمدة حالياً في المصابيح المتوهجة والإضاءة الفلورية الطولية والمصابيح الفلورية المدمجة وفقاً لما ذكرته الهيئة العامة للإحصاء (2017a). ويفترض أن تكون النوافذ أحادية المزجج في المساكن التي جرت معايرتها.

ولمعايرة مواد بناء المساكن، تنص الهيئة العامة للإحصاء (2017b) على أن جميع الفلل والشقق مبنية باستخدام الخرسانة، في حين تم بناء نسبة 65% من المنازل التقليدية باستخدام الطوب اللبن أو الطيني. أما النسبة المتبقية (35%) من المنازل التقليدية فقد بنيت باستخدام الخرسانة. وتستخدم غالبية المنازل التقليدية-المبنية باستخدام الطوب- لتمثيل نموذج واحد لإدارة حجم النموذج.

تم الحصول على مستويات تشبع الأجهزة المنزلية ومعدلات الطاقة المفترضة من (2016) Matar، والتي تحتوي أيضاً على الافتراضات أو المدخلات البيانية غير الواردة في هذا البحث. علاوة على ذلك، فإن البيانات لاستخدام الإضاءة المنزلية بحسب المنطقة والتقنيات تستند إلى الدراسة الاستقصائية للطاقة المنزلية التي أجرتها الهيئة العامة للإحصاء (2017a)، وتحدد أوقات استخدام الإضاءة الداخلية بحيث تشغل الأضواء من غروب الشمس حتى الساعة العاشرة مساءً. كما تحدد متطلبات الإضاءة الداخلية بين 130 و190 شمعة لكل متر مربع داخلي بحسب المنطقة، مثل ما أوضح (2013) Jefferis and Jefferis. وتمثل الإضاءة الخارجية الاستخدام المباشر فقط ولا تسهم في زيادة الحرارة الداخلية.

إن جميع الثوابت الفيزيائية المستخدمة في توضيح المعلومات مثل نفاذية الحرارة عبر النوافذ، وخواص المواد الحرارية، والمقادير الضئيلة من الحرارة المكتسبة من خلال وسائل الانتقال والحمل الحراري، بالإضافة إلى العلاقات المثلية التي تحكم حدوث الإشعاعات الشمسية على كل سطح خارجي من المنزل اقتبست من دراسة (2005) McQuiston et al. ونمذجت مواد الجدار والسقف -كما هو موضح في الجدول (2)- بحيث يكون لكل مادة في الهيكل المركب توصيل حراري وتوزيع حراري. هذه الخصائص الحرارية تشبه قيم U أو R. وتم تقدير سرعة الرياح الإقليمية والموسمية من دراسة (1994) Rehman et al.

## نبذة عن المؤلف

### وليد مطر

زميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك)، يعمل على نماذج أنظمة الطاقة بما فيها نموذج الطاقة الخاص بمركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (نموذج كابسارك العام للطاقة)، ومشاريع الأقمار الصناعية مثل نموذج كابسارك لاستخدام الطاقة الكهربائية السكنية. وهو حاصل على درجة ماجستير العلوم في الهندسة الميكانيكية من جامعة ولاية كارولينا الشمالية بأمريكا، ودرجة بكالوريوس العلوم في الهندسة الميكانيكية من جامعة كارولينا الجنوبية.



## نبذة تعريفية عن المشروع

يهدف هذا المشروع إلى إعداد إطار عمل لتحليل استجابات الأسر للأسعار المدرجة في أنظمة تسعير الكهرباء، وخاصة في المناطق التي تكون البيانات الإحصائية فيها غير متاحة أو غير كافية. ويجمع هذا الإطار بين المبادئ المادية ومبادئ الاقتصاد الجزئي، فيحكم الجانب المادي استخدام الكهرباء على مدار اليوم، بينما يفرض الجانب الاقتصادي الجزئي المعايير الوظيفية للأجهزة المنزلية لتحقيق استيفائها.



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