

# المركبات الكهربائية وانبعثات الكربون في المملكة العربية السعودية: منظور نظام الطاقة

عمرو الشرفاء ونواز بيربوكس

## 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 2019 محفوظة لمركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبته بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كمنصحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار.

# النقاط الرئيسية

صُمِّمَ نموذج نظام الطاقة للمملكة العربية السعودية لقياس آثار انبعاثات الكربون الناجمة عن تبني المركبات الكهربائية داخل المملكة، ومثَّل النموذج مناطق التشغيل الأربع في المملكة، كما تم تقسيمها بواسطة هيئة تنظيم الكهرباء.

لقد حاكى النموذج 18 سيناريو، ونشأت هذه السيناريوهات عن تفاوت عدد المركبات الكهربائية المُفَعَّلة، وكفاءة مركبات محركات الاحتراق الداخلي، وكفاءة المركبات الكهربائية، ووقت الشحن.

استُخدمت طريقة الانبعاثات الهامشية لقياس كمية الانبعاثات الإضافية التي يمكن أن تنجم عن شحن بطاريات المركبات الكهربائية.

وفي المتوسط، سيؤدي تبني 100,000 مركبة كهربائية (تُمثِّل حوالي 0.67% من أسطول مركبات الركاب في المملكة العربية السعودية) بدلاً من نفس العدد من مركبات محركات الاحتراق الداخلي إلى خفض صافي انبعاثات الكربون بنسبة 0.36%، أي بنسبة تتراوح بين 1 و0.5% تقريباً.

وفي أسوأ السيناريوهات، سيزداد صافي الانبعاثات إذا تم استبدال المركبات الكهربائية الأقل كفاءة بمركبات محركات الاحتراق الداخلي الأكثر كفاءة.

وقت شحن بطاريات المركبة الكهربائية ليس له تأثير مادي في انبعاثات المركبة الكهربائية، لأن المولد الهامشي يظل في معظم الأحيان كما هو في جميع المناطق.

وكفاءة المركبات الكهربائية ووقت الشحن لنقل الركاب. كما بحث النموذج أيضًا أفضل السيناريوهات وأسوأها، وبلغ متوسط انخفاض انبعاثات أسطول المركبات بنسبة 0.5% لكل 1% من أسطول مركبات الركاب الذي تم استبدال المركبات الكهربائية به، وفي أفضل السيناريوهات، تنخفض الانبعاثات بنسبة 0.9% لكل 1% من الأسطول المُستبدَل، غير أن أسوأ السيناريوهات تُسفر عن زيادة صافية في الانبعاثات. وعلوّة على ذلك، وبالنظر إلى عدم اختلاف المؤدّ الهامشي لمعظم مناطق المملكة؛ فإن آثار شحن المركبات الكهربائية خلال أوقات الذروة أو في غير أوقات الذروة لا تؤثر كثيرًا في صافي الانبعاثات. وتشير الملاحظة الأخيرة إلى أن التسعير الزمني للاستخدام لن يكون فعالاً في الوقت الراهن في تعزيز خفض الانبعاثات.

على الرغم من أن المركبات ذات البطاريات تعدّ خالية من الانبعاثات الكربونية في أنبوب العادم إلا أن مزيج الطاقة الذي يوفر الكهرباء لشحن المركبات الكهربائية ليس كذلك عادةً، ومن الناحية المثالية فمن الأفضل شحن وحدات المركبات الكهربائية من مصدر طاقة منخفض الكربون أو خالٍ من الكربون، بحيث يفوق مقدار الانبعاثات التي يتم تجنبها عن طريق التحول عن مركبات محركات الاحتراق الداخلي مقدار الانبعاثات التدريجية من الطاقة المستخدمة لشحن المركبات الكهربائية. وتحقيقًا لهذه الغاية، تحدد هذه الورقة البحثية كمية صافي انبعاثات الكربون المرتبطة بتفعيل المركبات الكهربائية في المملكة العربية السعودية من خلال النظر في مزيج الطاقات. لقد وضع المؤلفان نموذجًا يميز نظام الطاقة السعودي، وتم محاكاة ما مجموعه 18 سيناريو مختلفًا باستخدام طريقة الانبعاثات الناتجة عن التوليد الهامشي. وتنوعت السيناريوهات بين نطاقات القيادة

السيارات الكهربائية الهجينة التي تعمل بمحركات كهربائية ومحركات الاحتراق الداخلي بالترادف.

وتركز هذه الورقة فقط على النوع الأول من المركبات الكهربائية.

باستثناء بعض الدول، مثل النرويج والسويد، كان الإقبال على المركبات الكهربائية متواضعاً، وهي تتنافس مع التكنولوجيا الحالية، أي مركبة محرك الاحتراق الداخلي القائمة منذ مدة طويلة. وتشمل التحديات الرئيسية التي تعوق سرعة الإقبال على المركبات الكهربائية بالمقارنة مع مركبات محركات الاحتراق الداخلي ارتفاع تكاليف البيع بالتجزئة والتكلفة الكلية للملكية (Letmathe and Suares 2017; Lévy, Drossinos, and Thiel 2017; Weldon, Morrissey, and O'Mahony 2018) وغياب البنية التحتية واسعة الانتشار (أي محطات الشحن) (-Lo rentzen et al. 2017; Lucas et al. 2018) ونطاقات القيادة القصيرة، مما يؤدي إلى ما يسمى "قلق النطاق" (Adepetu and Keshav 2017; Jung et al. 2015) وأوقات الشحن الطويلة (Bonges III and Lusk 2015; Richard and Petit 2018).

وعلى الرغم من أن صناعة المركبة الكهربائية آخذة في التطور وتجاوز هذه التحديات، فإن معظم التوقعات السائدة لا ترى أن المركبات الكهربائية هي تكنولوجيا النقل السائدة في السنوات العشرين المقبلة، وفي توقعاتها للطاقة لعام 2018، توقعت (شركة بي بي) أن حوالي 15% فقط من ملياري مركبة يتنبأ سيرها على الطرق بحلول عام 2040 ستكون مركبات كهربائية. إن سعر مركبات محركات الاحتراق الداخلي يتراجع كما أن كفاءتها في تحسن، وهذا يعني أن المركبات الكهربائية يجب أن تتنافس مع هدف أخذ في التطور.

وفي حين أن المركبة الكهربائية خالية من الانبعاثات الكربونية على الطريق، على عكس مركبة محرك الاحتراق الداخلي، فمن الضروري حساب صافي انبعاثات

التحول في مجال الطاقة مدفوعاً بالرغبة في جعل إمدادات الطاقة خالية من الكربون عن طريق التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة (Leach 1992) وخفض الطلب على الطاقة عن طريق زيادة ممارسات كفاءة الطاقة (Morris and Pehnt 2014)، كل ذلك أثبت أن الدوافع السياسية العامة التي تقف وراء التحولات في مجال الطاقة هي أمن الطاقة (Jonsson et al. 2015)، والنمو الاقتصادي وخلق فرص العمل من خلال إنشاء قطاعات صناعية في مجال توليد الطاقة المتجددة (Dai et al. 2016)، ومكافحة الآثار البيئية الضارة الناجمة عن حرق الوقود الأحفوري (Balsalobre-Lorente et al. 2018).

ويتم المناشدة بتطبيق التقنيات الأنظف لما لها من فوائد بيئية، حيث يُنتج الوقود الأحفوري الغازات الدفيئة والجسيمات الضارة بالبيئة وصحة الإنسان. ووفقاً للوكالة الدولية للطاقة، بلغ إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) المرتبطة بالطاقة في العالم 32.6 جيجا طن في عام 2017 (IEA 2018). ويمثل قطاعا توليد الطاقة والنقل أكبر باعني ثاني أكسيد الكربون المرتبط بالطاقة، حيث تبلغ حصة كلٍ منهما 42% و25% على التوالي.

على الصعيد العالمي تُشجع الحكومات تطوير تقنيات الطاقة المتجددة للحد من انبعاثات الكربون المرتبطة بقطاع الطاقة (Dogan and Seker 2016; Mittal et al. 2017; Van Vuuren et al. 2016; Squalli 2017). كما أنها توفر الحوافز المشجعة للاستفادة من المركبات الكهربائية للحد من انبعاثات الكربون في قطاع النقل (Moro and Lonza 2018; Teixeira and Sodré 2016; Wolfram and Lutsey 2016)، وهناك فئتان رئيسيتان من المركبات الكهربائية:

المركبات الكهربائية ذات البطارية التي تعتمد كلياً على الكهرباء المخزنة في بطارية لتشغيل محرك كهربائي، و

العليا والدنيا للانبعاثات كميًا، مما يوفر لصناع السياسات حدودًا واقعية لمعايرة توقعاتهم، ووجدنا أن متوسط انخفاض انبعاثات أسطول المركبات بلغ نسبة 0.5% لكل 1% من أسطول مركبات الركاب المُحوّل من مركبات محركات الاحتراق الداخلي إلى مركبات كهربائية. وفي أفضل السيناريوهات، تنخفض الانبعاثات بنسبة 0.9% لكل 1% من الأسطول المحول إلى المركبات الكهربائية، غير أن أسوأ السيناريوهات تُسفر عن زيادة صافية في الانبعاثات، وتشير نتائجنا إلى ضرورة اتباع سياسة حذرة في بدء تشغيل المركبات الكهربائية لضمان تحقيق الأهداف المرجوة بالفعل (Rahman et al. 2017).

تركز هذه الورقة فقط على الصلة بين المركبات الكهربائية ومزيج الطاقة في المملكة العربية السعودية، ولا تأخذ في الحسبان دورة الحياة الكاملة للمركبة أو البطارية أو أي من مكوناتها الأخرى. ولا يُقصد بهذه الورقة دراسة تقييم دورة الحياة (Hache et al. 2019)، وهي دراسة جزئية "من البئر إلى العجلة"، حيث إنها لا تأخذ في الحسبان الانبعاثات المرتبطة بالبحث عن الوقود الأساسي واستخراجه ونقله (Moro and Lonza 2018). وفي حين أن تقييمات دورة الحياة مهمة ومتعمقة (Onat et al. 2017)، فإنها تتجاوز نطاق هذه الورقة، وتفترض هذه الورقة سهولة توافر محطات الشحن والبنية التحتية الأخرى التي تدعم تفعيل المركبة الكهربائية.

الكربون المرتبطة باستخدام المركبات الكهربائية من خلال فهم مزيج الطاقة المولدة للطاقة الكهربائية اللازمة لشحن المركبة الكهربائية ومن الناحية المثالية، ينبغي أن تأتي الطاقة المستخدمة لشحن المركبات الكهربائية من مصدر منخفض الكربون أو خالٍ من الكربون. ومع ذلك، إذا كان مزيج الطاقة رديئًا، فقد يؤدي تفعيل المركبات الكهربائية بشكل أكبر إلى انبعاثات صافية أعلى من تلك التي تولدها مركبات محركات الاحتراق الداخلي. وقد نظرت دراسات عديدة في الصلة بين المركبات الكهربائية ومزيج الطاقة في البلاد؛ وكشفت أن تفعيل المركبات الكهربائية لا يترجم بالضرورة إلى خفض في انبعاثات غازات الدفيئة (Casals et al. 2016; Faria et al. 2013; Jochem, Babrowski, and Fichtner 2015)، وقد خلصت إحدى الدراسات إلى أن تبني المركبات الكهربائية في تاوان سيقول من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ولكنه سيزيد من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت (Li et al. 2016).

تحدد هذه الورقة آثار تبني المركبات الكهربائية في المملكة العربية السعودية على انبعاثات الكربون في البلاد من خلال تحليل مزيج الطاقة الكامن وراء إمدادات الكهرباء في المملكة. لقد طورنا نموذجًا للطاقة في المملكة العربية السعودية باستخدام مجموعة البرمجيات المتاحة تجاريًا PLEXOS، ودرسنا سيناريوهات مختلفة لاعتماد المركبة الكهربائية وعملية شحنها، ووضعت السيناريوهات بطريقة يمكن من خلالها تحديد الحدود

## احتساب كمية الانبعاثات

للوهلة الأولى يبدو تبني المركبات الكهربائية وسيلة ممكنة للحد من انبعاثات الكربون في قطاع النقل، ومع ذلك فإن التأثير الصافي في البيئة يرتبط ارتباطًا مباشرًا بمزيج الطاقة الذي يوفر الكهرباء اللازمة لشحن البطاريات المستخدمة في المركبات الكهربائية. ومن الناحية المثالية، فمن المستحسن أن تفوق الانبعاثات التي يتم تجنبها عن طريق قيادة مركبة كهربائية بدلًا من مركبة محرك الاحتراق الداخلي الانبعاثات الناشئة عن قطاع الطاقة. ويُشكّل هذا المفهوم الأساس للعديد من الدراسات، كما أنه يُشكّل العمود الفقري للتحليل الذي أُجري في هذه الورقة، وتُستخدم طريقتان لتقدير كميات الكربون المنبعثة من قطاع الطاقة: الأولى تستند إلى متوسط الانبعاثات، والثانية تستند إلى الانبعاثات الهامشية.

وكما يوحي الاسم، فإن تقدير متوسط الانبعاثات يستند في حساباته إلى الكربون الكلي المنبعث بالكيلوجرامات من ثاني أكسيد الكربون حسب القطاع الذي تم معايرته من خلال إجمالي الطاقة المتولدة بالكيلوواط ساعة. ومن ثم يستخدم متوسط عامل الانبعاثات الذي يمتلك وحدات من كجم من ثاني أكسيد الكربون/كيلوواط ساعة، لقياس كمية الكربون المنبعث من كيلوواط ساعة إضافي يولدها القطاع، وفي حالة تفعيل المركبة الكهربائية، سيتعين على قطاع الطاقة توفير طاقة إضافية لأغراض شحن المركبة الكهربائية.

يتميز حساب صافي الانبعاثات باستخدام طريقة تقدير المتوسط كونها سهلة وعملية، مما يجعلها جذابة بوجه خاص للدراسات الرفيعة المستوى (Moro and Lonza 2018). فعلى سبيل المثال، استخدمت طريقة متوسط الانبعاثات لتقدير الانبعاثات في السياق الأيرلندي، ووُجد أن نسبة تتراوح بين 50-75% من الانبعاثات الصادرة من السيارات الخاصة ستظل خارج نطاق توفير الكهرباء (Smith 2010)، كما تعتمد دراسات أخرى على متوسط الانبعاثات لدراسة الملوثات وأثارها في صحة الإنسان

(Requia et al. 2018). واستخدمت دراسة أخرى طريقة متوسط الانبعاثات لمقارنة آثار انبعاثات الكربون الناجمة عن تبني المركبات الكهربائية داخل أوروبا، ولكنها اقترنت أيضًا بمحاكاة مونت كارلو لوضع نماذج احتمالية حدوث نتائج مختلفة (Casals et al. 2016). وقيّم تيكسييرا وسودريه أثر انبعاثات الكربون المتمثل في الاستعاضة عن أسطول تقليدي من سيارات الأجرة بمركبات كهربائية في البرازيل باستخدام طريقة المتوسط، ولكنهما استخدمتا أيضًا عدة متوسطات لحساب مزيج الطاقة البديل (Teixeira and Sodré 2016)، كما تم تحليل الانبعاثات من منظور عالمي باستخدام متوسط الانبعاثات (Woo, Choi, and Ahn 2017).

وعلى الرغم من المزايا العملية لطريقة المتوسط فإنها تتسم ببعض أوجه القصور؛ فهي عبارة عن تبسيط مفرط لاستجابة نظام الطاقة للأحمال الإضافية التي تحدث. وبلافتراض أن شركة الكهرباء تولد نصف الكهرباء من مفاعل نووي (خالٍ من الكربون)، ويتم توليد النصف الآخر من الفحم (الذي ينتج حوالي كيلوجرامًا واحدًا من ثاني أكسيد الكربون/كيلوواط ساعة) وباستخدام طريقة المتوسط، سينتج عن توليد كيلوواط ساعة إضافي 0.5 كجم من ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن المفاعل النووي يعمل بصورة واقعية كحمولة أساسية، وسيلبي المولد الهامشي، أي محطة الفحم، الكيلوواط الساعة الإضافي اللازم، ومن ثم فإن انبعاثات الكربون الفعلية الناتجة عن هذه الحالة الافتراضية ستكون كيلوجرامًا واحدًا من ثاني أكسيد الكربون/كيلوواط ساعة، وليس 0.5 كجم من ثاني أكسيد الكربون/كيلوواط ساعة (Thomas 2012).

لا تأخذ طريقة المتوسط في الحسبان عددًا من العوامل التي تؤثر في الانبعاثات الفعلية التي قد تنجم عن تبني المركبات الكهربائية. وقد يتغير مزيج الطاقة خلال الفصول وحتى خلال نفس اليوم (Thomas 2012)، ومثلما يتغير المزيج، يتغير كذلك المولد الهامشي. وفي البلدان الأكبر حجمًا، يمكن أن يختلف المزيج أيضًا من منطقة إلى أخرى، وربما لا تتمكن طريقة متوسط

ونظرًا لأن طريقة الانبعاثات الهامشية أكثر دقة، فإن بروتوكول الغازات الدفيئة ينص على أنه ينبغي للمحللين استخدامها على طريقة متوسط الانبعاثات (Broekhoff 2005)، غير أن أحد التحديات الرئيسية في اعتماد طريقة الانبعاثات الهامشية هو أنها تتطلب بيانات مهمة مقترنة بنمذجة معقدة (Nealer and Hendrickson 2015) عندما لا تكون بالضرورة متاحة على الفور أو ميسورة التكلفة، ولهذين السببين، تُعد طريقة المتوسط أكثر سهولة عمومًا.

### السياق السعودي

الغرض من هذه الورقة هو قياس الأثر الصافي للانبعاثات الناجمة عن إدخال المركبات الكهربائية في المملكة العربية السعودية في ضوء مزيج الطاقة في البلاد، وعليه فمن المهم تقديم لمحة عامة عن قطاع الطاقة السعودي للمساعدة في اتخاذ قرار بشأن أنسب طريقة للقياس الكمي، استنادًا إلى ما تم شرحه في القسم السابق.

وفقًا لهيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج، وهي الهيئة التنظيمية للكهرباء في المملكة، فإن البلد يضم أربع مناطق تشغيل هي: الشرقية والوسطى والغربية والجنوبية. وكما هو معروف على نطاق واسع، فإن الجزء الشرقي من المملكة هو المنطقة الغنية بالنفط والغاز، ومن ثم فإن معظم توليد الطاقة في المنطقة الشرقية يعمل بالغاز. وبالمثل فإن أكثر من 70% من الطاقة الكهربائية في المنطقة الوسطى تتم تغطيتها بالغاز. وعلى النقيض من ذلك، تعتمد المنطقتين الغربية والجنوبية اعتمادًا كبيرًا على الوقود السائل لتوليد الطاقة.

في عام 2017، تم توليد 54% من الكهرباء في المملكة العربية السعودية من الغاز، أما الباقي فقد تم توليده بشكل أساسي من النفط الخام وزيت الوقود الثقيل، وكمية صغيرة من الديزل. وفيما يتعلق بربط خطوط النقل بين المناطق، ترتبط المنطقة الوسطى

الانبعاثات من استيعاب هذه الاختلافات الإقليمية. وقد تختلف الانبعاثات في الولايات المتحدة بنسبة تصل إلى 22% بسبب الاختلافات الإقليمية في مزيج الطاقة ودرجات الحرارة المحيطة (Yuksel and Michalek 2015)، وبالمثل، يمكن للشخص أن يتصور بسهولة كيف يؤثر وقت الشحن أيضًا في مستوى الانبعاثات من قطاع الطاقة (McLaren et al. 2016)، ومن ثم تناولت عدة أوراق بحثية هذه المسألة. على سبيل المثال، اقترح هويهن وتشيستر (Hoehne and Chester 2016) طريقة جدولة مُحسَّنة لتقليل انبعاثات الكربون (Hoehne and Chester 2016)، ويوجد تحسين لطريقة متوسط الانبعاثات، ويُعرف بالمتوسط المرجح لانبعاث الغازات، حيث يدمج في الحساب وزن مزيج الطاقة (Rangaraju et al. 2015) القائم على الوقت من اليوم (Jochem, Doll, and Fichtner 2016).

ومن ناحية أخرى، فإن طريقة الانبعاثات الهامشية قادرة على معالجة الآثار المترتبة على الانبعاثات الناجمة عن شحن المركبات الكهربائية بمزيد من الدقة، ويمكن رصد التفاصيل المكانية والزمنية، ويتوقف ذلك على مدى تفصيل وصف نظام الطاقة. ونظرًا لهذه الميزة، اعتمد العديد من الباحثين طريقة الانبعاثات الهامشية لقياس الانبعاثات الصافية الناتجة عن تفعيل المركبة الكهربائية، ففي الولايات المتحدة، على سبيل المثال، وباستخدام الطريقة الهامشية، تبين أن المركبات الكهربائية ستزيد انبعاثات الغازات الدفيئة بنحو 7% مقارنة بالسيارات الهجينة (Thomas 2012)، وخلصت دراسة أخرى، أجريت على الولايات المتحدة، إلى أن تقييد شحن المركبات الكهربائية في ساعات غير أوقات الذروة سيؤدي إلى ارتفاع إجمالي الانبعاثات (McLaren et al. 2016). وقد تبدو هذه النتيجة الأخيرة غير بديهية للوهلة الأولى، ولكن اعتمادًا على مزيج الوقود وأسعار الوقود، قد يكون المولد الهامشي الذروي أقل في الكثافة الكربونية من المولد الهامشي غير الذروي. كما استُخدمت الطريقة الهامشية لدراسة الانبعاثات في المملكة المتحدة (Hawkes 2010)، وألمانيا (Jochem, Babrowski, and Fichtner 2015)، وهولندا (Van Vliet et al. 2011).



وعلى الرغم من أن المنطقة الشرقية لا تضم سوى نصف عدد السكان في المناطق الوسطى أو الغربية، فإن الحمل الذروي يبلغ 20 جيجاوات، على النحو المبين في الجدول 1، مع استهلاك مماثل للطاقة، على النحو المبين في الجدول 2. ويرجع ارتفاع استهلاك الطاقة السائد في المنطقة الشرقية، مقارنة بالسكان، إلى وجود معظم القطاع الصناعي ومنشآت التصنيع في المملكة بها.

بسبب الصيف الحار، تزداد الأحمال بشكل كبير لتلبية احتياجات أجهزة تكييف الهواء، ويبلغ الحمل خلال فصل الصيف حوالي 60 جيجاوات مقارنةً بـ 35 جيجاوات خلال فصل الشتاء، ومن الواضح أن لهذا الاختلاف أثرًا في التوزيع (أي تحديد المولد الهامشي)، ومن ثم تترتب عليه آثار في انبعاثات الكربون أيضًا.

بكلٍّ من المنطقتين الشرقية والغربية، وترتبط المنطقة الجنوبية بالمنطقة الغربية. بلغ إجمالي طاقة التوليد المتوفرة حوالي 80 جيجاوات في عام 2017 (ECRA 2017)، وكان إجمالي الاستهلاك في المملكة أقل قليلًا من 300 تيراواط ساعة، وبلغ الحمل الذروي 62 جيجاوات.

ومن الملاحظات الجديرة بالذكر حول قطاع الطاقة في المملكة، أن الأحمال القصوى في كلٍّ من المنطقتين الوسطى والجنوبية أعلى من قدرة توليد كل منطقة، كما يبين الجدول 1. ومن وجهة النظر التشغيلية، يعني هذا في واقع الأمر أن القدرة المتاحة في المناطق الأخرى ستتحمل أي عجز.

تضم المنطقتين الوسطى والغربية نحو ثلثي السكان (الجدول 2)، ومع ذلك، لا ترتبط أنماط الحمل الذروي واستهلاك الطاقة ارتباطًا كاملًا بالأنماط الديموغرافية،

### الجدول 1. الأحمال الذروية وقدرة التوليد المتوفرة في المملكة العربية السعودية لعام 2017.

المنطقة	الحمل الذروي (بالجيجاواط)	قدرة التوليد المتوفرة (بالجيجاوات)
الشرقية	20	23
الوسطى	20	16
الغربية	19	21
الجنوبية	6	4

المصدر: هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (2017).

### الجدول 2. السكان واستهلاك الطاقة في المملكة العربية السعودية.

المنطقة	عدد السكان (بالمليون)	السكان (بالنسبة المئوية)	استهلاك الطاقة (بالتيراواط ساعة)
الشرقية	5.637	17.8	82
الوسطى	10.074	31.7	91
الغربية	11.297	35.6	97
الجنوبية	4.734	14.9	28

المصدر: الهيئة العامة للإحصاء (2016) وهيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (2017).

استخدام طريقة متوسط الانبعاثات سيؤدي إلى انحراف النتائج إلى حد كبير، وبافتراض أن معظم عمليات تفعيل المركبة الكهربائية تحدث في المنطقة الغربية، على سبيل المثال (حيث يسيطر الوقود السائل على توليد الطاقة)، فإن استخدام طريقة متوسط الانبعاثات بدلاً من طريقة الانبعاثات الهامشية من شأنه أن يقلل انبعاثات الكربون من المركبات الكهربائية. وعلى العكس من ذلك، إذا حدث معظم تفعيل المركبات الكهربائية في المنطقة الشرقية (أي مع سيطرة الغاز الطبيعي على عملية توليد الطاقة)، فإن طريقة متوسط الانبعاثات ستبالغ في تقدير الانبعاثات. ومن ثم، واستناداً إلى التباين بين حسابات طريقة المتوسط والانبعاثات الهامشية، ومع مراعاة الغرض من هذه الورقة؛ اخترنا طريقة الانبعاثات الهامشية.

يمكن تلخيص الملاحظات الواردة أعلاه بشأن قطاع الطاقة في المملكة في النقاط الأربع التالية:

■ يختلف مزيج الطاقة اختلافاً كبيراً بين المناطق.

■ يحدث نقل كبير للكهرباء بين المناطق.

■ التوزيع الديموغرافي غير موحد.

■ يوجد تفاوت كبير في الحمل بين فصل الصيف وفصل الشتاء.

وبالرابط بين هذه الملاحظات والغرض من هذه الورقة، لتقييم صافي انبعاثات الكربون الناتجة عن تفعيل المركبة الكهربائية، يمكن الاستنتاج بشكل فوري أن

# الطريقة والافتراضات

أثبتنا حتى الآن أن ملاءمة طريقة متوسط الانبعاثات وإمكان الوصول إليها تأتي على حساب الدقة، بينما توفر طريقة الانبعاثات الهامشية قياسًا كميًا أكثر دقة للانبعاثات، رهناً بمزيد من الاحتياجات من البيانات والنمذجة.

لتقييم الانبعاثات المجنبية من استخدام المركبات الكهربائية، يتعين وضع عدة افتراضات تتعلق، ضمن أمور أخرى، بكفاءة وقود مركبات محركات الاحتراق الداخلي، وكفاءة المركبات الكهربائية، ونطاقات القيادة، وعلو على ذلك، يتعين معرفة بيانات الحمل ومزيج الطاقة ووقت الشحن ومحتوى الكربون في الوقود، وذلك لتقييم الانبعاثات الهامشية التي قد تنتج عن زيادة الطلب على الطاقة. وناقش في القسم التالي المنهجية والافتراضات والنمذجة التي أجريناها.

## نموذج الطاقة السعودي

لقياس انبعاثات الكربون، طورنا نموذجًا للطاقة في المملكة العربية السعودية، إذ تم تقسيم المملكة إلى

**الشكل 1.** مناطق التشغيل الأربع في المملكة العربية السعودية.



**ملاحظات:** النقطة 1 = المنطقة الشرقية، النقطة 2 = المنطقة الوسطى، النقطة 3 = المنطقة الغربية، النقطة 4 = المنطقة الجنوبية. توضع الأسهم الارتباط بين خط النقل وتدفقات الطاقة المحتملة.

أربع مناطق تشغيل وفقًا لهيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج، وتم تمثيل كل واحدة منها بعقدة واحدة، كما هو مبين في الشكل 1. وكان يمكن استخدام عدد أكبر من العقد في كل منطقة لتمثيل قطاع الطاقة على نحو أكثر دقة، وقد يكون ذلك ضروريًا للدراسات المعنية بالمواضيع التي تركز على الطاقة، مثل الدراسات المثلى لتدفق الطاقة، على سبيل المثال. ومع ذلك، ولأغراض هذه الورقة البحثية، تحقق عقدة واحدة لكل منطقة التوازن الصحيح بين حجم النموذج أو تعقيده ودقته.

تم تمثيل حوالي 1000 مولد وتجميعهم حسب التكنولوجيا والوقود. إن تقنيات توليد الطاقة الموجودة في المملكة هي عبارة عن دورة مركبة من التوربينات الغازية والتوربينات البخارية ومولدات الديزل. والوقود المستخدم هو الغاز الطبيعي، والنفط الخام، وزيت الوقود الثقيل، والديزل. وقد تمت معايرة حصص الوقود وأسعار الوقود لعام 2017. ويوضح الجدول 3 ملخصًا لمعدل الحرارة لكل تقنية من تقنيات توليد الطاقة، والذي يُعد مقياسًا لكفاءة المولدات، ويعد معدل حرارة المولدات

لقطاع الطاقة في عام 2017، وعوامل الانبعاث المرتبطة بكل وقود. لاحظ أن قيم عوامل الانبعاث تختلف عبر عدة تقارير بعدد قليل من النقاط المئوية.

### تفعيل المركبات الكهربائية والاحتياجات من الطاقة

عند تفعيل المركبات الكهربائية، سيتعين على الشبكة توفير طاقة إضافية لشحن البطاريات، ومن الواضح أن الطاقة الإضافية اللازمة تعتمد على معدل التفعيل والمسافات المقطوعة، ضمن جملة عوامل أخرى. ويستحق هذان المعياران على وجه الخصوص إجراء

الكهربائية والمحتوى الكربوني للوقود معياران أساسيان يلزم معرفتهما لتقدير انبعاثات الكربون.

وكما ذكر سابقاً، فإن مناطق التشغيل مرتبطة بالبنية التحتية للنقل، على النحو المبين في الشكل 1. وتبلغ قدرة الخط الذي يربط بين المنطقتين الوسطى والشرقية 5.2 جيجاوات، وقدرة الخط الذي يربط بين المنطقتين الوسطى والغربية 1.2 جيجاوات، وقدرة الخط الذي يربط بين المنطقتين الغربية والجنوبية 1.5 جيجاوات (Rioux et al. 2017). وقد نُمدجت المقاومة وفقدان المفاعلة لتدفق الطاقة على أساس كل وحدة. ويلخص الجدول 4 أسعار الوقود في المملكة العربية السعودية

**الجدول 3.** معدلات حرارة المحطات الحرارية على النحو المستخدم في النموذج (Matar and Anwer 2017; Rioux et al. 2017).

معدل الحرارة (وحدة حرارية بريطانية/كيلوواط ساعة)	الوقود	تكنولوجيا المولدات
9,213	الغاز الطبيعي	الدورة المركبة
9,676	النفط	توربين غازي
13,237	الغاز الطبيعي	
13,860	النفط	توربين بخاري
12,150	الديزل	
8,804	الغاز الطبيعي	
9,446	النفط	الديزل
8,952	الديزل	
13,000	الديزل	الديزل

**الجدول 4.** عوامل انبعاث الكربون من أنواع الوقود وأسعار الوقود المستخدمة في النموذج

سعر الوقود (بالدولار/مليون وحدة حرارية بريطانية)	عامل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (كجم/جيجاوات ساعة)	الوقود
1.250	56.1	الغاز الطبيعي
1.144	75	النفط الخام
0.600	75	زيت الوقود الثقيل
2.410	74.1	الديزل

المصدر: (Zijlema (2018) ; Elshurafa and Matar (2017)

(2018)، وبناء على هذا المستوى، تم حساب متوسط الحدود العليا والدنيا للكيلومترات المقطوعة باستخدام مركبات محركات الاحتراق الداخلي الأعلى والأدنى كفاءة: تتطلب سيارة سيدان صغيرة بمحرك احتراق داخلي 4 أسطوانات 0.06 لتر لكل كيلومتر، في حين تتطلب سيارة رياضية متعددة الأغراض (SUV) بمحرك 8 أسطوانات 0.15 لتر/كم، ومن هنا فإن الحدين الأعلى والأدنى لإجمالي الكيلومترات التي تقطعها السيارة في المملكة يُحسب بسهولة على أنه  $10^9 \times 549.5$  كم و  $10^9 \times 219.8$  كم. ونظرًا لوجود 15 مليون سيارة في المملكة، فإن المسافة السنوية التي تقطعها كل سيارة تتراوح بين 14653 كم و 36633 كم.

وتتميز نماذج المركبات الكهربائية المختلفة بكفاءات مختلفة، وبالرجوع إلى مختلف قوائم المواصفات توصلنا إلى استنتاج مفاده أن النطاق التمثيلي من الكفاءات العالية والمنخفضة يتراوح بين 0,09 كيلوواط ساعة/كم إلى 0,20 كيلوواط ساعة/كم، وباستخدام قيم الكفاءة هذه، إلى جانب المسافة المقطوعة لكل سيارة، وعدد السيارات التي تم تبنيها؛ حسبنا الطاقة الإضافية التي تحتاج الشبكة إلى توفيرها.

وعلى أقل تقدير، وبافتراض أن المسافة المقطوعة سنويًا هي 14,653 كم بواسطة 25,000 مركبة كهربائية تعمل بكفاءة قدرها 0.09 كيلوواط ساعة/كم، سيتعين على الشبكة أن توفر 32,970 ميجاواط ساعة إضافية سنويًا. وعلى الجانب الآخر، فإن تبني 100,000 من المركبات الكهربائية التي تقطع مسافة 36,633 كم بكفاءة قدرها 0.20 كيلوواط ساعة/كم؛ يُترجم إلى 732,667 ميجاواط ساعة إضافية، سيتعين على الشبكة توفيرها كل عام. ويرد في القسم 3.4 موجز للسيئاريوهات المتبقية. الحد الأدنى للاحتياجات من الطاقة الإضافية سيُنْتَج عن سيناريو تكون فيه مركبات محركات الاحتراق الداخلي هي الأقل كفاءة (أي الأقل من حيث الكيلومترات المقطوعة)، وتكون المركبات الكهربائية هي الأكثر كفاءة (أي الأقل من حيث الكيلوواط ساعة المطلوبة). وعلى العكس من ذلك، فإن

أبحاث مكرسة. وينبغي أن يتم التوصل إلى معدلات التفعيل والمسافات المقطوعة على نحو مثالي، من خلال دراسات مصممة بحيث تراعي تصورات المستهلكين بشأن المركبات الكهربائية مقارنةً بمركبات محركات الاحتراق الداخلي، وأنماط وعادات قيادة المستهلكين. غير أن هذا المسعى يتجاوز نطاق هذه الورقة. وعضًا عن ذلك، درسنا سيناريوهات تفعيل مختلفة وسيناريوهات المسافات المقطوعة لاستخلاص تأثير تفعيل المركبات الكهربائية في انبعاثات الكربون.

وعلى الصعيد العالمي، تتباين حصة مبيعات المركبات الكهربائية تباينًا كبيرًا. على سبيل المثال، في عام 2018، شكلت نسبة مبيعات المركبات الكهربائية حوالي 30%، ونسبة السيارات الهجينة حوالي 18% من إجمالي مبيعات السيارات في النرويج. وفي أرجاء الولايات المتحدة، تراوحت مبيعات المركبات الكهربائية أيضًا بين أقل من 1% إلى أكثر من 5% في عام 2018. وبالنظر إلى أن سعر التجزئة للمركبات الكهربائية لا يزال مرتفعًا نسبيًا بالمقارنة مع مركبات محركات الاحتراق الداخلي من الفئة نفسها، فليس من المستغرب أن نعلم أن أرقام المبيعات هذه كانت مدعومة بأنواع مختلفة من دعم السياسات. ويوجد في المملكة العربية السعودية حوالي 15 مليون سيارة ركاب على الطريق، وفي عام 2017 تم بيع حوالي 685,000 ألف سيارة (Statista 2019). مع الأخذ في الحسبان مستويات الإقبال العالمية على المركبات الكهربائية، تمت دراسة ثلاثة سيناريوهات لتفعيل عدد 25,000 و 50,000 و 100,000 مركبة كهربائية، تمثل تقريبًا نسبة 3.5% و 7% و 14% من مبيعات السيارات السنوية. وفي حين أن سيناريو 14% يمكن اعتباره مبالغ فيه، فقد تم اختياره عن عمد لتقييم كيفية تأثير مستوى التفعيل المرتفع في انبعاثات الكربون.

وتمثل المسافة التي تقطعها المركبات المعيار المهم الآخر الذي يؤثر بشكل كبير في انبعاثات الكربون في المملكة العربية السعودية. في عام 2017، بلغ استهلاك البنزين في المملكة 32.97 مليار لتر (MAAAL

كيلوواط/سيارة = 5 جيجاواط)، وستظل متطلبات الاحتياطي مستوفاة. ومع ذلك، فإن هذه مجرد حالة افتراضية تُستخدم لاختبار الإجهاد للفرضيات والتأكيد أنها منطقية.

لقد توصل القسم السابق إلى الكمية الإضافية من الكهرباء التي ستكون مطلوبة خلال سنة واحدة إذا تم تبني المركبات الكهربائية، وإذا استخدمت طريقة متوسط الانبعاثات، فإنه يمكن الآن حساب الانبعاثات الكربونية الإضافية التي قد تنتج عن تفعيل المركبة الكهربائية، ولكن كما أُشير إلى ذلك سابقًا، نستخدم في هذه الورقة طريقة الانبعاثات الهامشية لقياس الانبعاثات الصافية، ونتيجة لذلك، فإن كمية الكهرباء الإضافية وحدها غير كافية، كما أننا نحتاج إلى معرفة متى يتم الشحن، ومدة دورة الشحن (لا يُشترط شحن البطارية بالكامل)، وقدرة نقطة الشحن.

ومع ذلك، فإن الوصول إلى أنماط الشحن، المشابهة لأنماط القيادة مشكلة تستدعي إجراء دراسة منفصلة، نظرًا لطبيعتها العشوائية (Amini, Kargarian, and Karabasoglu 2016). وبالفعل، درست العديد من الأوراق البحثية موضوع القيادة وأنماط الشحن للتوصل على سبيل المثال إلى استراتيجيات الشحن المثلى (Wei, Liu, and Mei 2016) ووضع محطة الشحن الأمثل (Shahraki et al. 2015)، أو للتأثر بين تفعيل المركبة الكهربائية والطاقة الكهروضوئية (Chaouachi et al. 2016). ويتزايد تعقيد المشكلة سريعًا إذا ما بدأ العمل بتسعير وقت الاستخدام أو بالحوافز في وقت معين كآليات لدعم السياسات للتأثير في أوقات الشحن أو التحكم فيها نوعًا ما (Kim, Kwak, and Chong 2017). الغرض من هذه الورقة ليس استنتاج أنماط القيادة أو مواقف المستهلكين تجاه المركبات الكهربائية، بل قياس كمية الانبعاثات الصافية الناتجة عن تفعيل المركبة الكهربائية.

ومن ثم، وعلى غرار ما تم تنفيذه في قسم التفعيل، يدرس هذا القسم عددًا من سيناريوهات وقت الشحن

الحد الأقصى للاحتياجات من الطاقة، سينتج عن سيناريو تكون فيه مركبات محركات الاحتراق الداخلي هي الأكثر كفاءة (أي الأكثر من حيث الكيلومترات المقطوعة)، وتكون المركبات الكهربائية هي الأقل كفاءة (أي الأكثر من حيث الكيلوواط سعة المطلوبة).

وتجدر الإشارة هنا إلى أن الكفاءة التي أفادت بها الشركات المصنعة لمركبات محركات الاحتراق الداخلي والمركبات الكهربائية تمثل قيمًا نموذجية. وتؤثر ظروف القيادة في المدينة أو على الطرق السريعة بشكل كبير في نطاق القيادة لكلا النوعين من المركبات. فضلًا عن ذلك، فإن درجة الحرارة المحيطة واستخدام أجهزة تكييف الهواء أو السخانات أو كليهما في أثناء القيادة تؤثران أيضًا في نطاق القيادة، ولكن التأثير يكون أكثر وضوحًا في حالة المركبات الكهربائية. ونظرًا إلى مجموعة الاحتمالات التي لا تُحصى من سلوكيات القيادة وأنماطها، فإن استخدام النطاقين الأعلى والأدنى المقدمين يعطي بعض الأفكار المتعمقة عن أفضل السيناريوهات وأسوئها.

### عملية الشحن وأثرها على الأحمال

يمكن تصنيف نقاط الشحن القادرة على شحن بطاريات المركبة الكهربائية عادةً وفقًا لسرعة الشحن الخاصة بها: الوحدات العاجلة والسريعة والبطيئة. وتحدد قدرة هذه النقاط عند حوالي 50 كيلوواط، و22-7 كيلو واط، و3 كيلوواط على التوالي. كما توفر شبكة تيسلا نقطة شحن فائق بقدرة 120 كيلوواط. ولا تتوفر شبكات الشحن العاجل أو الفائق على نطاق واسع مثل الأنواع الأخرى، ولا يمكن استخدامها إلا مع المركبات التي تمتلك القدرة على الشحن السريع (Morrissey, Wel-) (don and O'Mahony 2016). وعلى الرغم من ذلك، وحتى في الحالات المستبعدة للغاية التي تتصل فيها جميع المركبات الكهربائية في ظل أعلى سيناريو لمعدل التفعيل (أي 100,000) بالشبكة لشحنها بقدرة 50 كيلوواط، فإن قدرة توليد الشبكة ستظل قادرة على تلبية هذا الحمل الإضافي (أي 100,000 سيارة × 50

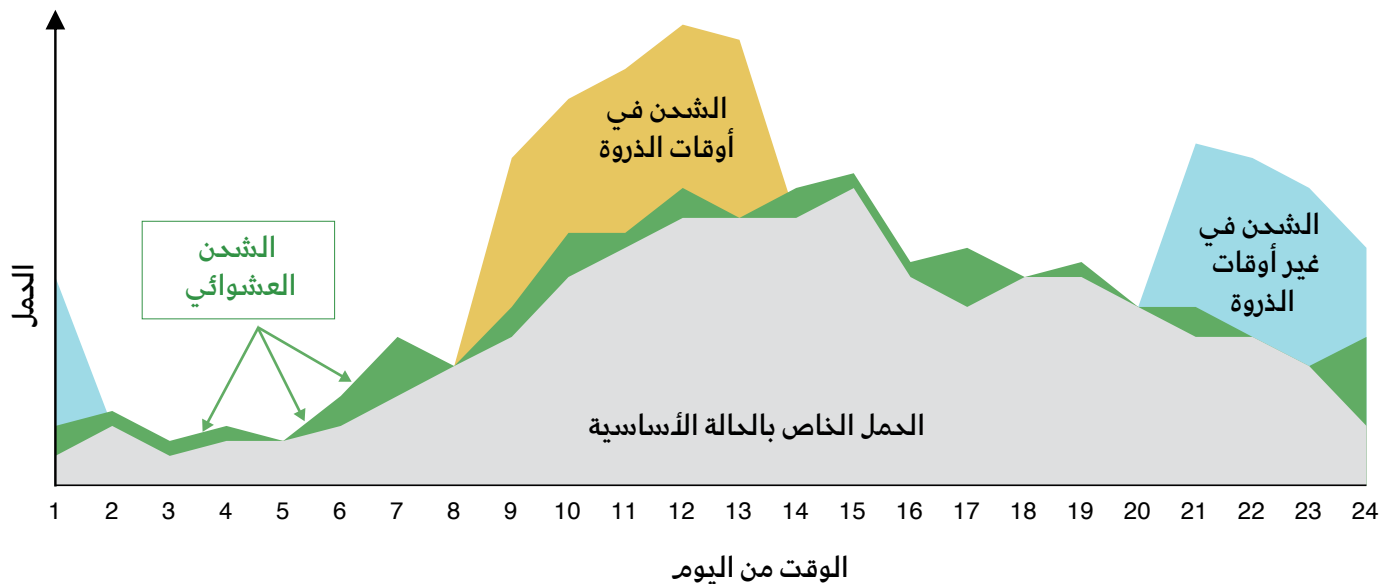
ومقارنتها بالحالة الأساسية. وعلو على ذلك، فإن توزيع سيارات المركبات الكهربائية المتبناة يتبع الجدول 2. ومن ثم فإن الحمل الإضافي الذي توفره الشبكة يتبع أيضًا التوزيع السكاني، فعلى سبيل المثال، نظرًا لأن نسبة 17.8% من السكان السعوديين يقيمون في المنطقة الشرقية، فمن المفترض أن تكون نسبة 17.8% من تبني المركبات الكهربائية في تلك المنطقة، ومن ثم يكون هناك أيضًا حمل إضافي.

لشرح تأثير تفعيل المركبات الكهربائية في أنماط الحمل بشكل أكثر وضوحًا، يوضح الشكل 2 مخططًا تصوريًا تم توفيره لأغراض توضيحية لوصف أنماط الحمل الثلاثة التي تمت محاكاتها بصريًا. يظهر نمط حمل الحالة الأساسية باللون الرمادي، أي السيناريو الذي لا يتم فيه تبني المركبات الكهربائية. ويظهر نمط الحمل للشحن الذروي باللون الأصفر، حيث يقتصر وقت الشحن في هذا

(Sun et al. 2015)، مع مراعاة طريقة حساب الانبعاثات الهامشية. وهناك سيناريو هان يوضحان صلتها الوثيقة بالدراسة، وهما تقييد جميع عمليات الشحن على أوقات الذروة، وتقييد جميع عمليات الشحن على غير أوقات الذروة. وقد اعتمدت هاتان الفئتان في السابق (Mullan et al. 2011) لاحتمال تمثيلهما لحالتين مفترقتين من انبعاثات الكربون الناجمة عن تفعيل المركبة الكهربائية. وهناك سيناريو ثالث، يكمن بين هذين الحالتين المفترقتين، وهو سيناريو يحدث فيه الشحن في أوقات عشوائية (Islam, Mithulananthan, and Hung 2018).

لا ننسى أن المملكة بها أربع مناطق تشغيل، كل منها بأنماط حمل للمركبة الكهربائية التي نشير إليها كحالة أساسية، أي أنه لا يوجد تفعيل للمركبة الكهربائية حتى الآن. ولأنه يتم النظر في ثلاثة سيناريوهات فيما يتعلق بالشحن، أي أوقات الذروة، أو غير أوقات الذروة، أو العشوائية؛ فإنه يتم فحص ثلاثة أنماط حمل جديدة

**الشكل 2.** مخطط تصوري يقارن بين نمط الحمل الخاص بالحالة الأساسية مع السيناريوهات الثلاثة الأخرى: الشحن في أوقات الذروة (باللون الأصفر) والشحن في غير أوقات الذروة (باللون الأزرق) والشحن العشوائي (باللون الأخضر).



**ملاحظات:** تمثل المناطق المظللة بالألوان الصفراء والزرقاء والخضراء الحمل الإضافي اللازم لتلبية متطلبات شحن المركبة الكهربائية. وهذه الألوان الثلاثة لنفس المنطقة لأنها تتوافق مع نفس الحمل، وإن كانت في أوقات مختلفة. ومع تبني المزيد من المركبات الكهربائية، تزداد مساحة هذه المناطق الملونة. هذا الشكل هو لأغراض توضيحية فقط وليس مرسومًا لإجراء قياس معين.

### تلخيص السيناريوهات

وكما هو مبين، فإن السيناريوهات المعروضة أعلاه هي دراسات حالات إفرادية للحدود العليا والدنيا، وتسهم ثلاثة متغيرات رئيسية في عدد السيناريوهات التي تمت محاكاتها، هذه المتغيرات هي:

عدد المركبات الكهربائية المتبناة، والتي تم اختيار ثلاثة سيناريوهات لها.

الوقت الذي يتم فيه شحن هذه المركبات الكهربائية، حيث تم اختيار ثلاثة سيناريوهات.

كفاءة المركبات الكهربائية ومركبات محركات الاحتراق الداخلي، حيث تم اختيار سيناريوهين لكل نوع من المركبات.

وبالتالي، فهناك 18 مجموعة مختلفة ممكنة، تترجم إلى 18 سيناريو يتعين دراستها. ويلخص الجدول 5 هذه السيناريوهات.

السيناريو على ما بين الساعة 9:00 صباحًا و1:00 مساءً. وبالمثل، فإن المنطقة المظللة باللون الأزرق تتوافق مع سيناريو الشحن في غير أوقات الذروة، وتقتصر على ما بين الساعة 9:00 مساءً والساعة 1:00 صباحًا. وأخيرًا يظهر نمط الحمل للشحن العشوائي باللون الأخضر، وكما يوحي الاسم، يمكن أن يتم الشحن في أي وقت. لاحظ أنه بالنسبة لسيناريو الشحن العشوائي من الممكن إحصائيًا عدم شحن أي سيارة في أي لحظة معينة. في مثل هذه الحالة، تتزامن أنماط الحمل لسيناريو الشحن العشوائي مع سيناريو الحالة الأساسية. إن الرسم البياني الوارد في الشكل 2 هو لأغراض توضيحية فقط وليس مرسومًا لإجراء قياس معين. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن المناطق الصفراء والزرقاء والخضراء ينبغي أن تصل مَحصلتها الإجمالية إلى المقدار نفسه، وفضلًا عن ذلك، تتوافق أحجام هذه المناطق الملونة مع عدد المركبات الكهربائية المتبناة.

### الجدول 5. ملخص السيناريوهات المحاكاة.

العدد الإجمالي للسيناريوهات	نظرة عامة عن السيناريو	عدد السيناريوهات	العوامل المتوقع تباينها
18	منخفض: 25,000	3	مستوى تفعيل المركبة الكهربائية
	متوسط: 50,000		
	مرتفع: 100,000		
	أوقات الذروة	3	نمط الحمل، أي عندما يتم الشحن
	في غير أوقات الذروة		
	أوقات عشوائية		
	منخفض: المركبة الكهربائية عند 0.09 كيلوواط ساعة/كم ومركبة محرك الاحتراق الداخلي عند 0.15 لتر/كم	2	يتم الوفاء بالحمل الإضافي المطلوب بناءً على كفاءة الاستهلاك للمركبات الكهربائية ومركبات محركات الاحتراق الداخلي
	مرتفع: المركبة الكهربائية عند 0.20 كيلوواط ساعة/كم ومركبة محرك الاحتراق الداخلي عند 0.06 لتر/كم		



## النتائج المستخلصة من السيناريوهات – الانبعاثات

يؤدي سيناريو التفعيل وكفاءة المركبات ووقت الشحن في نهاية المطاف إلى نمط فريد لكل منطقة في كل سيناريو من السيناريوهات التي تم وضعها، ويعرض الجدول 6 ملخصًا للنتائج الخاصة بكل سيناريو. لاحظ أن النتائج تمثل الانبعاثات الإضافية في قطاع الطاقة فقط بسبب تفعيل المركبة الكهربائية (وليس الانبعاثات الصافية). وعلى هذا الأساس، فإن سيناريو التفعيل المتوسط للمركبات الكهربائية على سبيل المثال، والذي يبلغ 50,000 سيارة، مع انخفاض الحمل الإضافي (أي 65,940 ميغاواط ساعة)، وبافتراض الشحن في أوقات الذروة، ينتج عنه انبعاثات إضافية في قطاع الطاقة قدرها 56,976 طن من ثاني أكسيد الكربون مقارنةً بالحالة الأساسية (أي عدم تبني المركبات الكهربائية).

يناقش هذا القسم نتائج سنة واحدة باستخدام أنماط الحمل الخارجي المنشأ بالساعة لكل منطقة. وقد تم تشغيل النموذج باستخدام معدلات الحرارة وأسعار الوقود وقدرات خطوط النقل المبينة في القسم 2. وتتضمن أنماط الحمل كل من أحمال قطاع الطاقة والمياه، وتم تشغيل النموذج في وضع التوزيع بأقل تكلفة. وفي البداية، وللحصول على نتائج الحالة الأساسية، تم تشغيل النموذج بافتراض عدم تبني أي مركبات كهربائية. وفي الحالة الأساسية، بلغ إجمالي انبعاثات الكربون من مركبات محركات الاحتراق الداخلي 252 مليون طن، مما نتج عنه ما يقرب من 840 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون/ كيلواط ساعة. وتتسق هذه النتائج مع دراسة سابقة أجريت عن انبعاثات الكربون في المملكة العربية السعودية، وأشارت إلى أن إجمالي انبعاثات الكربون من مركبات محركات الاحتراق الداخلي بلغ 249 مليون طن (Wogan, Carey and Cooke 2019).

**الجدول 6.** انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الإضافية في قطاع الطاقة بالأطنان الناتجة عن السيناريوهات الثمانية عشر التي تمت محاكاتها.

سيناريو وقت الشحن			الحمل الإضافي (استنادًا إلى سيناريوهات كفاءة مركبة محرك الاحتراق الداخلي والمركبة الكهربائية)	سيناريو التفعيل
أوقات عشوائية	في غير أوقات الذروة	أوقات الذروة		
28,403	28,689	28,480	منخفض (32,970 ميغاواط ساعة)	منخفض (25,000 مركبة كهربائية)
157,976	159,515	158,399	مرتفع (183,166 ميغاواط ساعة)	
56,948	57,388	56,976	منخفض (65,940 ميغاواط ساعة)	متوسط (50,000 مركبة كهربائية)
316,306	319,018	316,799	مرتفع (366,333 ميغاواط ساعة)	
113,886	114,821	114,021	منخفض (131,880 ميغاواط ساعة)	مرتفع (100,000 مركبة كهربائية)
632,977	638,278	634,222	مرتفع (732,667 ميغاواط ساعة)	

لنلاحظ أن نسبة 50% من السكان يقيمون في المنطقتين الشرقية والوسطى، وكلتا المنطقتين تعمل بشكل أساسي بالغاز الطبيعي، بينما نسبة 50% الأخرى من السكان يقيمون في المنطقتين الغربية والجنوبية، وكلتا المنطقتين تعمل بالوقود السائل. وباستثناء المنطقة الوسطى، لا يوجد فرق كبير بين انبعاثات وحدة الطاقة الهامشية في أوقات الذروة وفي غير أوقات الذروة في جميع المناطق. وعلاوة على ذلك، فإن تدفقات الطاقة بين المناطق، وفقاً للنموذج، لم تُغير بصفة أساسية من مزيج الطاقة في أي منطقة. وعلاوة على ذلك، فإن المنطقة الوسطى تستحوذ على نسبة 31% من المركبات الكهربائية المتبناة، حيث يصبح دور المولد الهامشي واضحاً، ويصبح الفرق في انبعاثات الكربون أكبر إذا تم تبني عدد أكبر من المركبات الكهربائية في المنطقة الوسطى.

ويخلص الجدول 6 انبعاثات الكربون الإضافية الناتجة عن تفعيل المركبات الكهربائية. ولتقييم الانبعاثات الصافية، يتعين أيضاً قياس انبعاثات الكربون المُجَبَّبة. ووفقاً لبوابة الطاقة التابعة للاتحاد الأوروبي فإن مركبات محركات الاحتراق الداخلي الصغيرة ينبعث منها حوالي 0.1 كجم/كم من ثاني أكسيد الكربون، في حين أن السيارات الرياضية المتعددة الأغراض الأكبر حجماً يمكن أن ينبعث منها 0.4 كجم/كم أو أعلى من ذلك. في هذه الورقة، اعتمدنا هذا النطاق ونفترض أن المركبات الكهربائية المتبناة تحل محل مركبات محركات الاحتراق الداخلي بالكامل من حيث العدد ونطاق القيادة. ونظراً لأن وقت الشحن لم يؤثر تأثيراً كبيراً على انبعاثات الكربون المتزايدة، يمكن الآن تقليل عدد السيناريوهات من 18 سيناريو إلى 6 فقط. وتمثل هذه السيناريوهات الستة أفضل السيناريوهات وأسوأها فيما يتعلق بانبعاثات الكربون. وفي أفضل السيناريوهات، تتم إزالة مركبات محركات الاحتراق الداخلي الأعلى انبعاثاً من الطريق واستبدالها بالمركبات الكهربائية الأكثر كفاءة (أي الأكبر انخفاضاً في انبعاثات الكربون). وعلى العكس من ذلك، تتم إزالة مركبات محركات الاحتراق الداخلي الأقل انبعاثاً من الطريق، وتستبدل بالمركبات

وكما يتبين من الجدول 6، فإن انبعاثات الكربون الإضافية في قطاع الطاقة هي الأعلى ضمن سيناريو الشحن في غير أوقات الذروة والأقل ضمن سيناريو الشحن العشوائي. ويمكن تفسير هذه النتائج، بتسليط الضوء على الدور الذي تؤديه المولدات الهامشية في كل منطقة. ونظراً لأنه يتم تلبية جميع احتياجات المنطقتين الغربية والجنوبية من الطاقة تقريباً باستخدام الوقود السائل، فإن وقت الشحن ليس له أي أثر في انبعاثات الكربون، لأن المولد الهامشي يعمل دائماً بالوقود السائل، وبالنسبة للمنطقة الشرقية، فإن المولد الهامشي يعمل دائماً بالغاز الطبيعي.

ومع ذلك، فإن نسبة 30% من الطاقة في المنطقة الوسطى يتم إمدادها باستخدام الوقود السائل، ومن ثم يمكن أن يعمل المولد الهامشي إما بالوقود السائل وإما بالغاز الطبيعي اعتماداً على الحمل. ويستخدم المولد الهامشي الوقود السائل في غير أوقات الذروة. ويتم تلبية الطاقة الإضافية المطلوبة في المنطقة الوسطى في أوقات الذروة من المحطات التي تعمل بالغاز الطبيعي ومن خلال وصلة النقل مع المنطقة الشرقية أو من كليهما. حيث إن مصدر الطاقة المنقولة من المنطقة الشرقية إلى المنطقة الوسطى هو الغاز الطبيعي، ومن ثم فإن سيناريو الشحن في أوقات الذروة (أي أن الغاز الطبيعي يفي بالكيلوواط ساعة الهامشي) سيؤدي إلى انبعاثات أقل في المنطقة الوسطى (والمملكة بشكل عام) مقارنةً بسيناريو الشحن في غير أوقات الذروة.

وفي حين أن طريقة انبعاثات المولد الهامشي يمكن أن تفسر السبب في أن سيناريو الشحن في أوقات الذروة يؤدي إلى انبعاثات أقل مقارنةً بسيناريو الشحن في غير أوقات الذروة، فإن الاختلافات بين سيناريوهات وقت الشحن طفيفة، وجميع الأمور الأخرى متساوية. ويرجع السبب في هذه النتائج المتقاربة إلى:

■ طبيعة مزيج الطاقة و

■ طبيعة تفعيل المركبة الكهربائية كما افترضنا.

الكهربائية الأقل كفاءة (الأقل انخفاضًا في انبعاثات الكربون).

الكهربائية الأكثر كفاءة وعلى الجانب الآخر، ينتج عن أسوأ السيناريوهات ارتفاع في إجمالي الانبعاثات (الأرقام الظاهرة باللون الأحمر). وتتطابق تلك الأخيرة مع الوضع الذي يتم فيه سحب مركبات محركات الاحتراق الداخلي الصغيرة فقط من الطريق، واستبدالها بالمركبات الكهربائية الأقل كفاءة. ومن خلال هذا التحليل، ينبغي أن تساعد الحدود العليا والدنيا لصافي انبعاثات الكربون صناعات السياسات على وضع أهداف

ويرد في الجدول 7 ملخص لأفضل السيناريوهات وأسوأها. لاحظ كيف ينتج عن أفضل السيناريوهات انخفاض في إجمالي الانبعاثات. وتتطابق هذه الحالات مع الأوضاع التي يتم فيها سحب أسطول مركبات محركات الاحتراق الداخلي بأكمله والمؤلف من السيارات الرياضية المتعددة الأغراض، واستبداله بالمركبات

**الجدول 7.** يُحسب صافي الانبعاثات بالطن حسب الفارق بين ثاني أكسيد الكربون الإضافي، المُنبعث بسبب توليد الطاقة الإضافية الناتجة عن تفعيل المركبات الكهربائية، والانبعاثات المُجنبة الناتجة عن استبدال مركبات محرك الاحتراق الداخلي.

التفعيل السيناريو	سيناريو الحمل الزائد (استنادًا إلى سيناريوهات كفاءة مركبة محرك الاحتراق الداخلي والمركبة الكهربائية) <sup>(1)</sup>	ثاني أكسيد الكربون الإضافي المُنْبَعَث من قطاع الطاقة <sup>(2)</sup>	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المُجنبة الناتجة عن سحب مركبات محرك الاحتراق الداخلي وإطلاق المركبات الكهربائية <sup>(3)</sup>	صافي الانبعاثات
منخفض (25,000 مركبة كهربائية)	منخفض (أفضل السيناريوهات)	28,524	-146,530	-118,006
	متوسط	93,577	-160,269	-66,692
	مرتفع (أسوأ السيناريوهات)	158,630	-91,583	67,692
متوسط (50,000 مركبة كهربائية)	منخفض (أفضل السيناريوهات)	57,104	-293,060	-235,956
	متوسط	187,239	-320,538	-133,299
	مرتفع (أسوأ السيناريوهات)	317,374	-183,165	134,209
مرتفع (100,000 مركبة كهربائية)	منخفض (أفضل السيناريوهات)	114,243	-586,120	-471,877
	متوسط	374,701	-641,075	-266,374
	مرتفع (أسوأ السيناريوهات)	635,159	-366,330	268,829

<sup>(1)</sup> "المنخفض" يُمثل أفضل السيناريوهات؛ "المرتفع" يُمثل أسوأ السيناريوهات "المتوسط" يُمثل نقطة واقعية متوسطة.

<sup>(2)</sup> متوسط القيم المحسوبة من الجدول 6.

<sup>(3)</sup> المعايير المستخدمة للسياريو "المنخفض": 14,653 كم بالنسبة للكilometers المقطوعة و 0.4 كجم ثاني أكسيد الكربون/كم بالنسبة لعامل انبعاث مركبة محرك الاحتراق الداخلي. المعايير المستخدمة للسياريو "المرتفع": 36,633 كم بالنسبة للكilometers المقطوعة و 0.1 كجم ثاني أكسيد الكربون/كم بالنسبة لعامل انبعاث مركبة محرك الاحتراق الداخلي. المعايير المستخدمة للسياريو "المتوسط": 25,643 كم بالنسبة للكilometers المقطوعة و 0.25 كجم ثاني أكسيد الكربون/كم بالنسبة لعامل انبعاث مركبة محرك الاحتراق الداخلي.

الوقت. وتُعد أسعار الكهرباء حاليًا أعلى مقارنة بالعام 2017، وهو ما يعني أن العائدات المتوقعة يُفترض أن تكون أعلى. وسيتم توليد عائد سنوي إضافي متوسط بقيمة 3.2 مليون دولار في سيناريو التفعيل المنخفض، ويمكن أن يصل هذا العائد إلى أكثر من 22 مليون دولار في أفضل السيناريوهات. وإذا تساوت جميع الظروف، فإن تفعيل المركبات الكهربائية سينتج عنه استفادة أعلى من إمكانات وحدات التوليد، وبالأخص إذا كان الشحن خارج ساعات الذروة، والحالة الأخيرة تعني أن تكلفة تشغيل الوحدة في هذه الصناعة ستتنخفض.

### المناقشة وتأثيرات السياسة

يوضح التحليل أن تفعيل المركبات الكهربائية سينتج عنه صافي انخفاض في انبعاثات الكربون، كما موضع بالتفصيل في الجدول 7. ورغم ذلك، لنتذكر أن استهلاك 32.97 مليار لتر بنزين عام 2017، بمعدل عامل انبعاثات من أنبوب العادم يبلغ 2.29 كجم/ل، نجد أن إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن نقل الركاب بلغ حوالي 75 مليون طن. وفي حين أن صافي الانبعاثات في الجدول 7 قد يظهر قليلاً مقارنة بإجمالي الانبعاثات، فمن المهم دراسة هذه الأرقام في سياق عدد المركبات الكهربائية التي تم تفعيلها كبديل لمركبات محرك الاحتراق الداخلي.

فإذا كان قد تم تفعيل 25,000 مركبة كهربائية، فإن الحالة المتوسطة تُظهر أن هناك 67,000 طنًا من الكربون سيتم تجنبها (الجدول 7)؛ وهو ما يُترجم إلى انخفاض في الانبعاثات يبلغ 0.089%. قد يبدو هذا الرقم صغيرًا للوهلة الأولى، إلا أنه من المهم ملاحظة أن عدد 25,000 مركبة كهربائية لا يُمثل سوى 0.17% تقريبًا من مركبات محرك الاحتراق الداخلي المستخدمة والبالغ عددها 15 مليون مركبة. بمعنى آخر، نتج عن استبدال 0.17% من الأسطول انخفاض في الانبعاثات بمقدار 0.089%. ويمكن إجراء نفس العملية الحسابية بالنسبة للسيناريوهات الأخرى، لتكون النتيجة كالتالي:

واقعية الآن بعد أن تم قياس قدرة المركبات الكهربائية على خفض الانبعاثات.

وعلى الرغم من أن السيناريوهات الأفضل والأسوأ زاخرة بالمعلومات، فإنه من المستبعد حدوثها نظرًا لوقوعها بين نقيضين. ويرد سيناريو أكثر واقعية في الجدول 7، حيث نعتمد متوسط الحمل المتزايد وعامل انبعاثات مركبة محرك الاحتراق الداخلي قدره 0.25 كجم من ثاني أكسيد الكربون/كم، ومن ثم يتحقق تخفيض في الانبعاثات الصافية في إطار هذا السيناريو المتوسط. وعلى سبيل المثال، فإن الاستعاضة عن 25,000 من مركبات محركات الاحتراق الداخلي بالمركبات الكهربائية من شأنه أن يتفادى حوالي 67,000 طن من الانبعاثات. وتتمثل إحدى مزايا تلخيص النتائج، كما هو مبين في الجدول 7، في أنها توفر تحليل الحساسية بصورة ضمنية، إذ توفر الحدود العليا والدنيا معالم لما يمكن أن تسهم به المركبات الكهربائية فيما يتعلق بتقليل الانبعاثات. وعلاوة على ذلك، حتى في حالة استخدام عامل انبعاثات أقل في المتوسط بالنسبة لمركبات محركات الاحتراق الداخلي (مثلًا، 0.2 كجم من ثاني أكسيد الكربون/كم)، ستظل المحصلة النهائية هي خفض الانبعاثات الصافية.

### النتائج المستخلصة من السيناريوهات – العائدات

يُلخص هذا القسم صافي العائدات التي تنتج عن كل سيناريو من الطاقة الإضافية المُستهلكة بسبب تفعيل المركبات الكهربائية، ولا تشمل التكاليف المُطبقة تكاليف السعة أو تكاليف النقل أو أي تكاليف أخرى، بل تُمثل مكون الوقود فقط. وقد بلغت تكلفة الوقود بالنسبة للحالة الأساسية 3.773 مليار دولار.

النتائج موضحة في الجدول 8، وقد استخدمنا أسعار الكهرباء لعام 2017، وكما هو موضح، سينتج دائمًا عن تفعيل المركبات الكهربائية عائدات صافية إيجابية بالنسبة للشبكة، وذلك على الرغم من الانخفاض النسبي في أسعار الطاقة التي كانت سائدة في السعودية في ذلك

**الجدول 8.** يُحسب صافي العائدات بالدولار الأمريكي حسب الفارق بين تكاليف الوقود الإضافية، التي ستتكبدها الشبكة، والعائد الإضافي الذي ستحصله الشبكة من مصادر أخرى لبيع الطاقة لشحن المركبات الكهربائية.

التفعيل السيناريو	الحمل الإضافي الذي تتحمله الشبكة (استناداً إلى سيناريوهات كفاءة مركبة محرك الاحتراق الداخلي والمركبة الكهربائية) <sup>(1)</sup>	تكلفة الوقود الإضافية <sup>(2)</sup>	العائد الإضافي <sup>(3)</sup>	صافي العائد
منخفض (25,000 مركبة كهربائية)	منخفض	595,505	1,582,560	987,055
متوسط (50,000 مركبة كهربائية)	متوسط	1,948,676	5,187,264	3,238,589
	مرتفع	3,301,846	8,791,968	5,490,122
	منخفض	1,188,397	3,165,120	1,976,723
مرتفع (100,000 مركبة كهربائية)	متوسط	3,897,226	10,374,552	6,477,326
	مرتفع	6,606,055	17,583,984	10,977,929
	منخفض	2,378,074	6,330,240	3,952,166
مرتفع (مركبة كهربائية)	متوسط	7,804,758	20,749,128	12,944,371
	مرتفع	13,231,441	35,168,016	21,936,575

<sup>(1)</sup> "المنخفض" يُمثل أفضل السيناريوهات، "المرتفع" يُمثل أسوأ السيناريوهات، "المتوسط" يُمثل نقطة واقعية متوسطة.

<sup>(2)</sup> النتائج وفقاً لحسابها من نموذج الطاقة.

<sup>(3)</sup> مبيعات الطاقة المُفترضة بسعر تحفظي يبلغ 0.18 ريال سعودي/كيلو وات للساعة، وهو ما يعادل 0.048 دولار/كيلو وات للساعة. وقد تم خصم هذه القيمة بناءً على أسعار التعريفات داخل السعودية خلال العام 2017. التعريفات الحكومية: 0.32 ريال/كيلو وات للساعة، التعريفات الصناعية: 0.18 ريال/كيلو وات للساعة، التعريفات السكنية: تنقسم شرائحها إلى 0.05، و0.10، و0.20، و0.30 ريال/كيلو وات للساعة لمستويات الاستهلاك البالغة 1-2,000، و2,001-4,000، و4,001-6,000، وأكثر من 6,001 كيلو وات للساعة. على التوالي. من المُرجح أن يدفع المستهلكون السكنيون، الذين يملكون مركبات كهربائية، فواتيرهم وفقاً لأعلى الشرائح، التعريفات التجارية: تنقسم شرائحها إلى 0.16، و0.24، و0.30 ريال/كيلو وات للساعة لمستويات الاستهلاك البالغة 1-4,000، و4,001-8,000، وأكثر من 8,001 كيلو وات للساعة، على التوالي. من المُرجح أن يدفع المستهلكون التجاريون فواتيرهم وفقاً لأعلى الشرائح.

سينتج عن أسوأ سيناريو زيادة صافية في الانبعاثات.

تظل هذه الأرقام ذات المستويات العليا مُطبقة ما دام عدد المركبات الكهربائية التي تم تفعيلها قليلاً، وعندما تتعاظم نسبة المركبات الكهربائية، ستتغير ديناميات الشبكة وتشغيلها بشكلٍ جوهري، وينبغي إجراء تحليل جديد بافتراضات مناسبة من أجل تقييم التأثيرات.

في السيناريو المتوسط: استبدال 1% من أسطول مركبات محرك الاحتراق الداخلي، بمركبات كهربائية سينتج عنه انخفاض بنسبة 0.5% في انبعاثات الكربون.

في أفضل سيناريو: استبدال نسبة الـ 1% ذاتها سينتج عنه انخفاض بنسبة 0.9% في انبعاثات الكربون.

### تركيز المركبات الكهربائية على المنطقة الشرقية بشكل مبدئي

بدأت المملكة العربية السعودية مشروعاً للتحويل في قطاع الطاقة كجزء من رؤية "السعودية 2030". وبالالتساق مع هذه الرؤية، توجد تغييرات جوهرية قائمة الوضع الراهن. ومن ضمن هذه التغييرات، استحداث المعيار السعودي لاقتصاد الوقود في المركبات الجديدة (CAFE)، والذي يهدف إلى تحسين كفاءة الوقود الكلية بالمملكة فيما يتعلق بمركبات الركاب لتصل إلى 19 كم/ل بحلول عام 2025 (AAWSAT 2019). ويتمثل الدافع الرئيسي وراء معيار CAFE في تقليل استهلاك الوقود والانبعاثات الكربونية (Zirogiannis et al., 2019). وكما هي الحال مع معظم السياسات الانتقالية، فإن تطبيق معيار CAFE سيتطلب وقتاً. قد تختار المملكة العربية السعودية تفعيل المركبات الكهربائية في المنطقة الشرقية بشكل مبدئي، مع العلم أن المنطقة تعتمد في طاقتها على الغاز، وهو ما يُعد أقل بكثير من الوقود السائل من حيث انبعاثات الكربون. ونظراً لتطور مزيج الوقود ليصبح أكثر صداقة للبيئة في المستقبل القريب، فقد يتم تفعيل المركبات الكهربائية بشكل أكثر كثافة في هذه المناطق المتبقية. ورغم ذلك، فإن تفعيل المركبات الكهربائية في المنطقة الشرقية يمكن أن يكون مكملًا لتطبيق معيار CAFE على مستوى المملكة من أجل المساهمة في تقليل الانبعاثات الكربونية بشكل أكبر.

### تأزر تفعيل الطاقة المتجددة والمركبات الكهربائية

أعلنت المملكة أنها تنوي توليد 60 جيجا وات من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 (40 جيجا وات منها ستكون طاقة شمسية كهروضوئية)، وسيتم تعميم هذه القدرة على مستوى البلاد. واتباع استراتيجية تفعيل المركبات الكهربائية، التي تركز بالأخص على المناطق الغربية والجنوبية، وتتسق مع خطة تفعيل الطاقة المتجددة، يُمكن التأكد من أن المركبات الكهربائية تساعد على تحقيق أكبر قدر من تخفيض انبعاثات الوقود. ووفقاً

لما ذُكر سابقاً، فإن هذه المناطق تعتمد على الوقود السائل، وهو ما يُخفف الأثر المُنتظر للمركبات الكهربائية. إلا أنه إذا تم تفعيل مقدارٍ معقول من الطاقة المتجددة في المناطق الجنوبية والغربية، فإن توليدها الهامشي سيتحول من كونه عالي التلوث إلى توليد خالٍ من الكربون، وبتطبيق هذه السياسة المُنسقة، يُمكن أن توفر الطاقة المتجددة فائدتين مميزتين: تقليل الاعتماد على الوقود السائل وتعظيم مزايا تفعيل المركبات الكهربائية. ولنلاحظ أن الغرض هنا يكمن في تأزر تفعيل الطاقة المتجددة على مستوى المرافق مع تفعيل المركبات الكهربائية. كما يُمكن أيضاً إدراج محطات الشحن متناهية الصغر التي تعمل بالطاقة المتجددة (Yan, Zhang, and Kezunovic 2019).

### تأثيرات التسعير وقت الاستخدام

إن تحصيل الرسوم من المستهلكين بأسعارٍ مختلفة في أوقاتٍ مختلفة من اليوم، المعروف باسم التسعير وقت الاستخدام (TOUP)، أصبح ممارسة شائعة في العديد من البلدان قبل الإقبال على السيارات الكهربائية بزمٍ طويل. والسبب وراء تبني التسعير وقت الاستخدام يكمن بشكلٍ أساسي في تحفيز المستهلكين لنقل بعض أنشطتهم من وقت الذروة إلى خارج وقت الذروة، وهو ما ينتج عنه الاقتصاد في استخدام الكهرباء وقت الذروة وتقليل التكاليف وتقليل الضغط على شبكة الكهرباء، وبالإضافة إلى تقليل الضغط على الشبكة، فإن التسعير وقت الاستخدام يمكن تصميمه بحيث يحفز المستهلكين لشحن مركباتهم الكهربائية عندما يكون التوليد الهامشي أقل تلوئاً (Nilsson, Stoll, and Brandt 2017). إلا أن هذين الهدفين قد لا يكونا تكمليين في بلدان معينة.

ففي السياق السعودي، دائماً ما يعمل المولد الهامشي في المنطقة الشرقية بالغاز، بينما يعمل المولد الهامشي في المناطق الغربية والجنوبية بالوقود السائل. وبناءً عليه، فحتى لو قام مالك السيارة الكهربائية في المنطقتين الأخيرتين بنقل وقت الشحن

المتوسطة يمكن أن تكون مفيدة للتحقق السريع أو إجراءات مسح السياسة الأولية قبل أن يتم إعداد النماذج بمزيج من التفصيل. وبينما يتطور مزيج الطاقة في المملكة، سواء عبر التغيير التقني أو زيادة واردات الطاقة وصادرتها بين المناطق، فإن استخدام منهجية الانبعاثات المتوسطة (على الرغم من تجميع معدلات حرارة المحطات) يمكن أن يكون مؤشراً لتغيير الانبعاثات.

### تأثير درجة الحرارة على نطاقات قيادة المركبات الكهربائية

توفر جهات تصنيع المركبات الكهربائية مواصفات القيادة بناءً على درجات حرارة متوسطة، إلا أن قدرات البطارية وسلوكيات الشحن/التفريغ تتغير في درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة، مما يؤثر في نطاقات القيادة والكفاءة (Yuksele and Michalek 2015) والعمر المتوقع للبطاريات. علاوة على ذلك، فإن درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة تؤدي إلى استخدام التدفئة أو تكييف الهواء للتحكم في درجة حرارة الكابينة، وهو ما يؤدي مرة أخرى إلى تقليل نطاق القيادة (Kambly and Bradley 2015).

وتعد درجات الحرارة في المملكة العربية السعودية عالية بشكل عام معظم أيام السنة، ولذلك من المهم، من جهة السياسة وتوليد الطاقة، توفير تصحيحات للبيئة التي ستعمل فيها المركبات الكهربائية حتى لا تكون هناك استهانة أو مبالغة كبيرة في تقدير متطلبات الطاقة. ويتحسب التحليل المنفذ في هذه الورقة لمثل هذه الاعتبارات من خلال استخدام أسوأ سيناريو للمركبات الكهربائية من حيث الكفاءة. بمعنى آخر، يُعد استخدام رقم مرتفع من حيث الكيلو وات للساعة/كيلو متر تمثيلاً لمركبة كهربائية منخفضة الكفاءة، أو ذات كفاءة متوسطة مما يرجع إلى التأثير السلبي لدرجات الحرارة في أداء المركبة الكهربائية.

إلى خارج ساعات الذروة تجاوباً مع سياسة التسعير وقت الاستخدام، فلن يساهم ذلك في تقليل انبعاثات الكربون، إلا أنه سيعزز شحن المركبة الكهربائية خارج ساعات الذروة بما يفيد الشبكة. وجدير بالذكر أن التسعير وقت الاستخدام في المنطقة الوسطى يمكنه تقليل الانبعاثات وتخفيف الضغط على الشبكة. وينبغي وضع سياسات التسعير وقت الاستخدام بحيث تعكس هيكل التكلفة الرئيسي لمزيج إمدادات الطاقة، بالإضافة أيضاً إلى الأخذ في الحسبان أهداف مخطط التسعير المتعلقة بتقليل الانبعاثات.

### استخدام منهجية الانبعاثات المتوسطة للتقريب

يُركز القسم رقم 2 بشكل مفصل على الفروقات بين المنهجيتين المتوسطة والهامشية لتحديد كمية الانبعاثات. وقد تم التوصل إلى أن منهجية الانبعاثات المتوسطة سهلة التطبيق، ولكنها توفر تقديراً أقل دقة، بينما توفر منهجية الانبعاثات الهامشية تقديراً أكثر دقة، ولكنه يحتاج إلى متطلبات أعلى من حيث البيانات وإعداد النماذج. وبناءً على نتائج إعداد النماذج، تبين أن المولد الهامشي في المنطقة الشرقية (ومعظم المنطقة الوسطى) يعمل بالغاز. وبالمثل، يعمل المولد الهامشي للمناطق الغربية والجنوبية بالوقود السائل، حتى مع مراعاة نقل الطاقة الذي يتم بين هاتين المنطقتين.

من هنا فإن استخدام عامل الانبعاثات المتوسط للمنطقتين الشرقية والوسطى سيوفر تقديراً سريعاً ومعقولاً لواقعي السياسات عند النظر في أمر تفعيل المركبات الكهربائية في هذه المناطق، كما ينطبق المنطق نفسه على الاستفادة من عامل الانبعاثات المتوسط بالنسبة للمناطق الغربية والجنوبية. وبينما لا يمكن استبدال منهجية الانبعاثات المتوسطة بمنهجية الانبعاثات الهامشية لأن المناطق الشرقية/الوسطى منفصلة عن المناطق الغربية/الجنوبية، فإن المنهجية

وبالتبعية، إذا تم تغيير أسطول السيارات بالكامل إلى مركبات كهربائية، فستكون انبعاثات الأسطول نظريًا متوسطة، أو حوالي 35 مليون طن. ورغم ذلك، إذا لم يتم التنفيذ بدقة، فإن تشغيل المركبات الكهربائية في السعودية قد يؤدي في الواقع إلى زيادة في صافي الانبعاثات في حالة استبدال مركبات محرك الاحتراق الداخلي الأكثر كفاءة بمركبات كهربائية أقل كفاءة. يوجد سعي حثيث لزيادة كفاءة نظام الطاقة في السعودية وتقليل الاعتماد على الوقود السائل، بالإضافة إلى أن المملكة تخطط لتفعيل قدر كبير من الطاقة المتجددة، فإذا تمت مراعاة سياسات الطاقة المتجددة أولاً بأول مع سياسات تفعيل المركبات الكهربائية، فستكون العائدات الاجتماعية والاقتصادية ضخمة. بشكلٍ محدد، سيؤدي تفعيل الطاقة المتجددة في المناطق الغربية والجنوبية من المملكة إلى أن يصبح المولد الهامشي لشحن المركبة الكهربائية خاليًا من الكربون. ويحقق هذا التحول هدفين: استبدال الوقود السائل، ومن ثم تقليل انبعاثات الكربون، والمزيد من التعزيز للدور الذي ستلعبه المركبات الكهربائية في تقليل الانبعاثات.

أخيرًا، وبالأخذ في الحسبان مزيج الطاقة وتدفقات الطاقة بين المناطق داخل المملكة، وجدنا أن وقت شحن بطاريات المركبات الكهربائية ليس له تأثير مادي في تقليل الانبعاثات. وعلى الرغم من تأثر أنماط الحمل بسبب ضرورة توليد طاقة إضافية لشحن البطاريات، فإن المولد الهامشي غالبًا ما يظل كما هو في جميع المناطق. ويوحى ذلك بأن تصميم سياسات التسعير وقت الاستخدام يجب أن يُراعى هيكل التكلفة الرئيسي المحلي لمزيج إمدادات الطاقة، بالإضافة أيضًا إلى الأخذ في الحسبان أهداف سياسة التسعير المتعلقة بتقليل الانبعاثات.

تمثلت المساهمة الرئيسية لهذه الورقة البحثية في تقدير الانبعاثات الكربونية الصافية التي قد تنتج عن تفعيل المركبات الكهربائية في المملكة العربية السعودية باستخدام نموذج قطاع الطاقة، ففي حين أن المركبات الكهربائية خالية من انبعاثات أنبوب العادم، فإن الطاقة اللازمة لشحن بطاريات تشغيل هذه المركبات ليست كذلك، فالتأثير الفعلي لصافي الانبعاثات يعتمد على مزيج التوليد الرئيسي في قطاع الطاقة.

هناك منهجيتان مقبولتان على نطاقٍ واسعٍ لتقييم الانبعاثات الكربونية الإضافية في نظام الطاقة المنبعثة من تفعيل المركبات الكهربائية: منهجية الانبعاثات المتوسطة، ومنهجية الانبعاثات الهامشية. تُعرض الأولى تقييمًا عمليًا، ولكنها لا تُقدم سوى تقديرًا تقريبيًا للانبعاثات، بينما تقدم الأخيرة تمثيلًا أكثر دقة للانبعاثات، ولكنها تتطلب قدرًا كبيرًا من إعداد النماذج والبيانات. في هذه الورقة، استخدمنا المنهجية الهامشية، على الرغم مما استلزمته من جهدٍ إضافي، حيث تتطلب استخدام بروتوكول الغازات الدفيئة لسياسة التحليل.

بناءً على النموذج المُعد، وجدنا أن تفعيل المركبات الكهربائية في المملكة سيؤدي، في المتوسط، إلى انخفاض في صافي الانبعاثات الكربونية، فبالنظر إلى مزيج الطاقة (بالنسبة للعام 2017)، إذا تم على سبيل المثال استبدال عدد 100,000 مركبة احتراق داخلي بـ 100,000 مركبة كهربائية (أي نسبة 0.667% من أصل 15 مليون مركبة على الطرق) فستنخفض الانبعاثات الكربونية، في المتوسط، بنسبة 0.35% أو  $310 \times 266$  طن تقريبًا. وبصفةٍ عامة، في مستويات التفعيل المنخفضة فقط، يمكن للمرء افتراض أن كل 1% من مركبات محرك الاحتراق الداخلي يتم استبدالها بمركبات كهربائية بها ستؤدي إلى تقليل الانبعاثات بنسبة 0.5%.



- Alsharq Alawsat (AAWSAT). 2019. "Saudi Vehicle Fuel Efficiency Rate Sees 3.5% Improvement."
- Adepetu, Adedamola, and Srinivasan Keshav. 2017. "The Relative Importance of Price and Driving Range on Electric Vehicle Adoption: Los Angeles Case Study." *Transportation* 44 (2): 353–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9641-y>
- Amini, M. Hadi, Amin Kargarian, and Orkun Karabasoglu. 2016. "ARIMA-Based Decoupled Time Series Forecasting of Electric Vehicle Charging Demand for Stochastic Power System Operation." *Electric Power Systems Research* 140: 378–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.003>
- Balsalobre-Lorente, Daniel, Muhammad Shahbaz, David Roubaud, and Sahbi Farhani. 2018. "How Economic Growth, Renewable Electricity and Natural Resources Contribute to CO2 Emissions?" *Energy Policy* 113: 356–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.050>
- Bonges III, Henry A., and Anne C. Lusk. 2016. "Addressing Electric Vehicle (EV) Sales and Range Anxiety through Parking Layout, Policy and Regulation." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 83: 63–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.011>
- Broekhoff, Derik. 2005. *Guidelines for Quantifying GHG Reductions from Grid-Connected Electricity Projects*. Geneva: World Resource Institute.
- Casals, Lluç Canals, Egoitz Martinez-Laserna, Beatriz Amante García, and Nerea Nieto. 2016. "Sustainability Analysis of the Electric Vehicle Use in Europe for CO2 Emissions Reduction." *Journal of Cleaner Production* 127: 425–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.120>
- Chaouachi, Aymen, Ettore Bompard, Gianluca Fulli, Marcelo Masera, Michele De Gennaro, and Elena Paffumi. 2016. "Assessment Framework for EV and PV Synergies in Emerging Distribution Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 719–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.093>
- Dai, Hancheng, Xuxuan Xie, Yang Xie, Jian Liu, and Toshihiko Masui. 2016. "Green growth: The Economic Impacts of Large-Scale Renewable Energy Development in China." *Applied Energy* 162: 435–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.049>
- Dogan, Eyup, and Fahri Seker. 2016. "Determinants of CO2 Emissions in the European Union: The Role of Renewable and Non-Renewable Energy." *Renewable Energy* 94: 429–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.078>
- Electricity and Cogeneration Regulatory Authority (ECRA). 2017. "Annual Statistical Booklet for Electricity and Seawater Desalination Industries." Riyadh.
- Elshurafa, Amro M., and Walid Matar. 2017. "Adding Solar PV to the Saudi Power System: What is the Cost of Intermittency?" *Energy Transitions* 1 (1): 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41825-017-0002-7>
- Faria, Ricardo, Pedro Marques, Pedro Moura, Fausto Freire, Joaquim Delgado, and Anibal T de Almeida. 2013. "Impact of the Electricity Mix and Use Profile in the Life-Cycle Assessment of Electric Vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 271–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063>
- General Authority for Statistics of Saudi Arabia (GaStat). 2016. "Demographic Survey." Riyadh.
- Hache, Emmanuel, Gondia Sokhna Seck, Marine Simoen, Clément Bonnet, and Samuel Carcanague. 2019. "Critical Raw Materials and Transportation Sector Electrification: A Detailed Bottom-Up Analysis in World Transport." *Applied Energy* 240: 6–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.057>
- Hawkes, A.D. 2010. "Estimating Marginal CO2 Emissions Rates for National Electricity Systems." *Energy Policy* 38 (10): 5977–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.053>
- Hoehne, Christopher G., and Mikhail V. Chester. 2016. "Optimizing Plug-In Electric Vehicle and Vehicle-To-Grid Charge Scheduling to Minimize Carbon Emissions." *Energy* 115: 646–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.057>
- International Energy Agency (IEA). 2018. *World Energy Outlook 2018*. Paris.
- Islam, Md. Shariful, Nadarajah Mithulananthan, and Duong Quoc Hung. 2018. "A Day-Ahead Forecasting Model for Probabilistic EV Charging Loads at Business Premises." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9 (2): 741–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/tste.2017.2759781>

- Jochem, Patrick, Sonja Babrowski, and Wolf Fichtner. 2015. "Assessing CO2 Emissions of Electric Vehicles in Germany in 2030." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 78: 68–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.007>
- Jochem, Patrick, Claus Doll, and Wolf Fichtner. 2016. "External Costs of Electric Vehicles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 42: 60–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.022>
- Jonsson, Daniel K., Bengt Johansson, André Månsson, Lars J. Nilsson, Måns Nilsson, and Hannes Sonnsjö. 2015. "Energy Security Matters in the EU Energy Roadmap." *Energy Strategy Reviews* 6: 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.03.002>
- Jung, Malte F., David Sirkin, Turgut M. Gür, and Martin Steinert. 2015. "Displayed Uncertainty Improves Driving Experience and Behavior: The Case of Range Anxiety in an Electric Car." Paper presented at Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems.
- Kambly, Kiran, and Thomas H Bradley. 2015. "Geographical and Temporal Differences in Electric Vehicle Range Due to Cabin Conditioning Energy Consumption." *Journal of Power Sources* 275: 468–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.142>
- Kim, Yeongjin, Jeongho Kwak, and Song Chong. 2017. "Dynamic Pricing, Scheduling, and Energy Management for Profit Maximization in PHEV Charging Stations." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (2): 1011–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2567066>
- Leach, Gerald. 1992. "The Energy Transition." *Energy policy* 20 (2):116-123. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(92\)90105-b](https://doi.org/10.1016/0301-4215(92)90105-b)
- Letmathe, Peter, and Maria Soares. 2017. "A Consumer-Oriented Total Cost of Ownership Model for Different Vehicle Types in Germany." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 57:314–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.007>
- Lévay, Petra Zsuzsa, Yannis Drossinos, and Christian Thiel. 2017. "The Effect of Fiscal Incentives on Market Penetration of Electric Vehicles: A Pairwise Comparison of Total Cost of Ownership." *Energy Policy* 105: 524–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.054>
- Li, Nan, Jen-Ping Chen, I-Chun Tsai, Qingyang He, Szu-Yu Chi, Yi-Chiu Lin, and Tzung-May Fu. 2016. "Potential Impacts of Electric Vehicles on Air Quality in Taiwan." *Science of The Total Environment* 566: 919–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.105>
- Lorentzen, Erik, Petter Haugneland, Christina Bu, and Espen Hauge. 2017. "Charging infrastructure Experiences in Norway — the World's Most Advanced EV Market." Paper presented at EVS30 symposium. Stuttgart, Germany.
- Lucas, Alexandre, Giuseppe Prettico, Marco Flammini, Evangelos Kotsakis, Gianluca Fulli, and Marcelo Masera. 2018. "Indicator-Based Methodology for Assessing EV Charging Infrastructure Using Exploratory Data Analysis." *Energies* 11 (7): 1869. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071869>
- MAAAL. 2018. "Increase in Gasoline Prices Saves 27 Billion Riyals of Subsidy" [Arabic]. <https://www.maaal.com/archives/20180101/101461>.
- Matar, Walid, and Murad Anwer. 2017. "Jointly Reforming the Prices of Industrial Fuels and Residential Electricity in Saudi Arabia." *Energy Policy* 109: 747–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.060>
- McLaren, Joyce, John Miller, Eric O'Shaughnessy, Eric Wood, and Evan Shapiro. 2016. "CO2 Emissions Associated with Electric Vehicle Charging: The Impact of Electricity Generation Mix, Charging Infrastructure Availability and Vehicle Type." *The Electricity Journal* 29 (5): 72–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.06.005>
- Mittal, Shivika, Hancheng Dai, Shinichiro Fujimori, and Toshihiko Masui. 2016. "Bridging Greenhouse Gas Emissions and Renewable Energy Deployment Target: Comparative Assessment of China and India." *Applied Energy* 166: 301–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.124>
- Moro, Alberto, and Laura Lonza. 2018. "Electricity Carbon Intensity in European Member States: Impacts on GHG Emissions of Electric Vehicles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 64: 5–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012>
- Morris, Craig, and Martin Pehnt. 2014. *Energy Transition: The German Energiewende*. Springer.

- Morrissey, Patrick, Peter Weldon, and Margaret O'Mahony. 2016. "Future Standard and Fast Charging Infrastructure Planning: An Analysis of Electric Vehicle Charging Behaviour." *Energy Policy* 89: 257–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.001>
- Mullan, Jonathan, David Harries, Thomas Bräunl, and Stephen Whitely. 2011. "Modelling the Impacts of Electric Vehicle Recharging on the Western Australian Electricity Supply System." *Energy Policy* 39 (7): 4349–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.052>
- Nealer, R., and T.P. Hendrickson. 2015. "Review of Recent Lifecycle Assessments of Energy and Greenhouse Gas Emissions for Electric Vehicles." *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 2 (3): 66–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0033-x>
- Nilsson, Anders, Pia Stoll, and Nils Brandt. 2017. "Assessing the Impact of Real-Time Price Visualization on Residential Electricity Consumption, Costs, and Carbon Emissions." *Resources, Conservation and Recycling* 124: 152–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.007>
- Onat, Nuri C., Mehdi Noori, Murat Kucukvar, Yang Zhao, Omer Tatari, and Mikhail Chester. 2017. "Exploring the Suitability of Electric Vehicles in the United States." *Energy* 121: 631–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.035>
- Rahman, Syed Masiur, A.N. Khondaker, Md Arif Hasan, and Imran Reza. 2017. "Greenhouse Gas Emissions from Road Transportation in Saudi Arabia — A Challenging Frontier." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69: 812–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.047>
- Rangaraju, Surendraprabu, Laurent De Vroey, Maarten Messagie, Jan Mertens, and Joeri Van Mierlo. 2015. "Impacts of Electricity Mix, Charging Profile, and Driving Behavior on the Emissions Performance of Battery Electric Vehicles: A Belgian Case Study." *Applied Energy* 148: 496–505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.121>
- Requia, Weeberb J., Moataz Mohamed, Christopher D. Higgins, Altaf Arain, and Mark Ferguson. 2018. "How Clean are Electric Vehicles? Evidence-Based Review of the Effects of Electric Mobility on Air Pollutants, Greenhouse Gas Emissions and Human Health." *Atmospheric Environment* 185: 64-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.040>
- Richard, Lucas, and Marc Petit. 2018. "Fast Charging Station with Battery Storage System for EV: Grid Services and Battery Degradation." Paper presented at 2018 IEEE International Energy Conference.
- Rioux, Bertrand, Fernando Oliveira, Axel Pierru, and Nader Alkathiri. 2017. "Restructuring Saudi Arabia's Power Generation Sector: Model-Based Insights." KAPSARC Discussion Paper.
- Shahraki, Narges, Hua Cai, Metin Turkay, and Ming Xu. 2015. "Optimal Locations of Electric Public Charging Stations Using Real World Vehicle Travel Patterns." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 41: 165–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.011>
- Smith, William J. 2010. "Can EV (Electric Vehicles) Address Ireland's CO2 Emissions from Transport?" *Energy* 35 (12): 4514–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.029>
- Squalli, Jay. 2017. "Renewable Energy, Coal as a Baseload Power Source, and Greenhouse Gas Emissions: Evidence from US State-Level Data." *Energy* 127: 479–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.156>
- Statista. 2019. "Number of Passenger Car Sales in Saudi Arabia from 2014 to 2025." Accessed March 25, 2019. <https://www.statista.com/statistics/863181/saudi-arabia-number-of-passenger-car-sales/>
- Sun, Zhebin, Kang Li, Zhile Yang, Qun Niu, and Aoife Foley. 2015. "Impact of Electric Vehicles on a Carbon Constrained Power System — A Post 2020 Case Study." *Journal of Power and Energy Engineering* 3 (04): 114. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2015.34017>
- Teixeira, Ana Carolina Rodrigues, and José Ricardo Sodr . 2016. "Simulation of the Impacts on Carbon Dioxide Emissions from Replacement of a Conventional Brazilian Taxi Fleet by Electric Vehicles." *Energy* 115: 1617–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.095>

- Thomas, C.E. Sandy. 2012. "US Marginal Electricity Grid Mixes and EV Greenhouse Gas Emissions." *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (24): 19231–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.146>
- Van Vliet, Oscar, Anne Sjoerd Brouwer, Takeshi Kuramochi, Machteld van Den Broek, and André Faaij. 2011. "Energy Use, Cost and CO<sub>2</sub> Emissions of Electric Cars." *Journal of Power Sources* 196 (4): 2298–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119>
- Van Vuuren, Detlef P., Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten Van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, and Oreane Y. Edelenbosch. 2017. "Energy, Land-Use and Greenhouse Gas Emissions Trajectories under a Green Growth Paradigm." *Global Environmental Change* 42: 237–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>
- Wei, Wei, Feng Liu, and Shengwei Mei. 2016. "Charging Strategies of EV Aggregator under Renewable Generation and Congestion: A Normalized Nash Equilibrium Approach." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7 (3): 1630–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2477844>
- Weldon, Peter, Patrick Morrissey, and Margaret O'Mahony. 2018. "Long-Term Cost of Ownership Comparative Analysis between Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles." *Sustainable Cities and Society* 39: 578–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.024>
- Wogan, D., Elizabeth Carey, and Douglas Cooke. 2019. "Policy Pathways to Meet Saudi Arabia's Contributions to the Paris Agreement." KAPSARC Discussion Paper. DOI: <https://doi.org/10.30573/ks--2019-dp49>
- Wolfram, Paul, and Nic Lutsey. 2016. "Electric Vehicles: Literature Review of Technology Costs and Carbon Emissions." The International Council on Clean Transportation Working Paper.
- Woo, JongRoul, Hyunhong Choi, and Joongha Ahn. 2017. "Well-to-Wheel Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Electric Vehicles Based on Electricity Generation Mix: A Global Perspective." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 51: 340–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.005>
- Yan, Qin, Bei Zhang, and Mladen Kezunovic. 2019. "Optimized Operational Cost Reduction for an EV Charging Station Integrated with Battery Energy Storage and PV Generation." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (2): 2096–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2788440>
- Yuksel, Tugce, and Jeremy J. Michalek. 2015. "Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States." *Environmental Science & Technology* 49 (6): 3974–80. DOI: <https://doi.org/10.1021/es505621s>
- Zijlema, P.J. 2018. "The Netherlands: List of Fuels and Standard CO<sub>2</sub> Emission Factors." The Hague: Netherlands Enterprise Agency. [https://english.rvo.nl/sites/default/files/2017/04/The\\_Netherlands\\_list\\_of\\_fuels\\_version\\_January\\_2017\\_final.pdf](https://english.rvo.nl/sites/default/files/2017/04/The_Netherlands_list_of_fuels_version_January_2017_final.pdf).
- Zirogiannis, Nikolaos, Denvil Duncan, Sanya Carley, Saba Siddiki, and John D. Graham. 2019. "The Effect of CAFE Standards on Vehicle Sales Projections: A Total Cost of Ownership Approach." *Transport Policy* 75: 70–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.01.006>





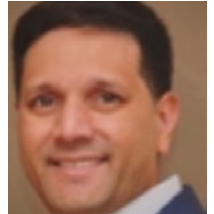
## نبذة عن المؤلفين

### عمرو الشرفاء



زميل باحث يعمل على التحولات في مجال الطاقة، وتتضمن اهتماماته البحثية تصميم نماذج نُظْم الطاقة، والاقتصادات التقنية للطاقة الشمسية الكهروضوئية، وتصميم الشبكات المُصغرة الهجينة وتحسينها. كتب أكثر من 40 ورقة وتقريرًا بحثيًا، وله العديد من براءات الاختراع، كما أنه حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة، أتبعها بعد ذلك بماجستير في التمويل.

### نواز بيربوكس



مدير برنامج تحولات الطاقة والكهربائية، وقبل انضمامه إلى كابسارك، كان كبير اقتصاديين بالشركة السعودية للكهرباء، حيث تولى قيادة مشروع التحول الاستراتيجي، وقدم استشارات في مشكلات التخطيط الاستراتيجي. وقبل عمله في الشركة السعودية للكهرباء، كان نواز مديرًا لاستراتيجية السوق بشركة إنبال، واقتصاديًا أولًا لدى مشغل نظام الكهرباء المستقل في أونتاريو، كندا.

## نبذة تعريفية عن المشروع

نحاول تحديد آثار تفعيل المركبات الكهربائية في المملكة العربية السعودية على انبعاثات الكربون في البلاد من خلال تحليل مزيج الطاقة الكامن وراء إمدادات الكهرباء في المملكة. ولقد طورنا نموذجًا للطاقة في المملكة العربية السعودية باستخدام مجموعة البرمجيات المتاحة تجاريًا، PLEXOS، ودرسنا سيناريوهات مختلفة لاعتماد المركبة الكهربائية وعملية شحنها. ووُضعت السيناريوهات بطريقة يمكن من خلالها تحديد الحدود العليا والدنيا للانبعاثات كميًا، مما يوفر لصناع السياسات حدودًا واقعية لمعايرة توقعاتهم.



مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية  
King Abdullah Petroleum Studies and Research Center

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