

آثار التكلفة والمساحة والموثوقية المترتبة على استخدام الهيدروجين في محطات شحن السيارات الكهربائية المعزولة عن الشبكة: دراسة من خلال نظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض في المملكة العربية السعودية

عمرو الشرفاء وعبد الرحمن محسن
وفرانك فيلدر

عن كابسارك

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

إشعار قانوني

© حقوق النشر 2022 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبته بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية -سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند-أو أي جزء منه- أو أن يفسر كنصيحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة. ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

يتم تحديد آثار التكلفة والمساحة والموثوقية المترتبة على استخدام الهيدروجين في محطات شحن السيارات الكهربائية المعزولة عن الشبكة من خلال نموذج تحسين وتحليلات لنظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض في المملكة العربية السعودية. ويؤخذ في الحسبان التحديات المرتبطة باستخدام طاقة الرياح باعتبارها إحدى تقنيات التوليد المستخدمة في محطات الشحن داخل مراكز المدينة. يقتصر التحليل على التقنيات الخالية من الكربون: الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح والبطاريات والهيدروجين. ويتضح أنه حسب التكاليف الحالية السائدة للتقنية، يمكن للهيدروجين أن يقلل المساحة المطلوبة لمحطات الشحن المعزولة عن الشبكة بنسبة 25% وبزيادة بسيطة في التكلفة دون التأثير على موثوقية الشحن. ومع ذلك فإنه بحلول عام 2030، سيوفر

الهيدروجين مزايا للبصمة والتكلفة في آن واحد. الجدير بالذكر، أنه في حال عدم تلبية الحمل السنوي بنسبة بسيطة تصل إلى 5%، ستقل المساحة المطلوبة لمحطات الشحن بنسبة 60%. ويمكن أن تتراوح قيم التكلفة المستوية للكهرباء ما بين 0.13-0.20 دولار أمريكي/ كيلوواط في الساعة حسب افتراضات منحني التعلم بحلول عام 2030. يتم بعد ذلك إدراج المساحات المحسوبة في خمس فئات لقطع الأراضي في مدينة الرياض: محطات الوقود والمستشفيات ومراكز التسوق والمدارس والجامعات. إن دمج الهيدروجين في محطات الشحن يؤدي إلى زيادة عدد الأراضي التي يمكن أن تضمها بنسبة تتراوح ما بين 15-45% وذلك عن طريق تقليل مصفوفة الألواح الكهروضوئية المطلوبة (أي المساحة).

- تقييم الفوائد التي تقدمها خلايا وقود الهيدروجين لمحطات شحن السيارات الكهربائية المعزولة عن الشبكة
- استخدام نموذج تحسين الكهرباء وتحليلات نظام المعلومات الجغرافية لإجراء التحليل
- يمكن لتقنيات الهيدروجين أن تقلل التكلفة والمساحة المطلوبة لمحطات الشحن بحلول عام 2030
- يمكن للهيدروجين أن يقلل شرط المساحة لمحطات الشحن بنسبة 25%
- يسمح الهيدروجين بأن يضم أكثر من 15-45% من الأراضي لتكون محطات للشحن في مدينة الرياض

تحتاج محطات الشحن المعزولة عن الشبكة والخالية من الكربون إلى مساحات كبيرة جدا (منطقة). ومع ذلك، نجد أن ندرة الأراضي في مراكز المدن تعيق نشر الطاقة الكهروضوئية وأن وجود المباني يعيق نشر طاقة الرياح. يشار إلى أن معظم تصاميم محطات الشحن المعزولة عن الشبكة تركز على تلبية الطلب دون مراعاة الجانب العملي لنشر الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح داخل مراكز المدن مراعاةً كاملة.

ويتم اللجوء إلى طاقة الهيدروجين للتغلب على قيود الأراضي وقيود المناطق الحضرية. فتقنيات الهيدروجين بما في ذلك خلايا الوقود والمحللات الكهربائية تم استخدامها لأكثر من قرن ومع ذلك لا تزال تحظى باهتمام متزايد. وفي حين أنه يوجد مجال كبير لتحسين تقنيات الهيدروجين إلا أنها تعد مكتملة ويمكن استخدامها بأمان وفعالية في العديد من التطبيقات. ومع زيادة كفاءة تقنيات الهيدروجين وانخفاض تكاليفها (Brändle, Schönfish, and Schulte 2021)، ستستمر الزيادة في اعتماد الهيدروجين، علما بأن توليد الطاقة باستخدام الهيدروجين يعتبر خاليا من الكربون.

يتم في هذه الدراسة ولأول مرة تقييم الآثار المالية وآثار المساحة والموثوقية المترتبة على استخدام تقنيات التوليد القائمة على الهيدروجين في محطات الشحن المعزولة عن الشبكة في الرياض عاصمة المملكة العربية السعودية. ويتمثل أحد الجوانب المهمة لهذه الدراسة في أنها تتضمن تحليلا مفصلا باستخدام نظام المعلومات الجغرافية، حيث يتم استخدام بيانات النظام لتحديد مسار الفرضيات اللاحقة المستخدمة في تصميم الشبكات المصغرة لمحطات الشحن من خلال إظهار المساحات المتوفرة داخل قطع الأراضي. تربط هذه الدراسة الأولى من نوعها بين تصميم الشبكة المصغرة والتحليل باستخدام نظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض. ونلاحظ أن التحليل الذي تمت مراعاته في هذه الدراسة يتناسب تماما مع تصريحات

زادت انبعاثات الكربون العالمية بشرية المنشأ بوتيرة سنوية منذ عقود من الزمن، باستثناء السنوات القليلة التي شهدت ركودا اقتصاديا أو جوائح. وبحسب وكالة الطاقة الدولية، زادت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من 20.5 مليار طن في عام 1990 إلى 33 مليار طن في عام 2021. وكان النصيب الأكبر من هذه الانبعاثات ناجم عن قطاعي توليد الكهرباء والنقل. ففي قطاع الكهرباء، يمكن أن تساهم الطاقة المتجددة في خفض الانبعاثات (Razmjoo et al. 2021). أما في قطاع النقل، فيمكن أن تساهم السيارات الكهربائية في تقليل الانبعاثات، بشرط أن يتم شحنها باستخدام تقنية منخفضة الكربون أو خالية منه (Elshurafa and Peerbocus 2020).

وطالما تعلق الأمر بالسيارات الكهربائية، فمن الضروري تقييم خيارات البنية التحتية المحتملة للشحن والضرورية لدعم نشر السيارات الكهربائية. فشحن السيارات الكهربائية يكون إما من خلال الاتصال بالشبكة أو بدونه. وعندما لا تكون محطة الشحن متصلة بالشبكة (أي خارج الشبكة)، فلا بد من توليد الكهرباء في الموقع. لمحطات الشحن المتصلة بالشبكة والمعزولة عنها إيجابيات وسلبيات تم توضيحها بالتفصيل في القسم التالي. نركز في هذه الدراسة فقط على الجوانب الاقتصادية والتقنية لمحطات الشحن المعزولة عن الشبكة الخالية من الكربون التي كانت من المواضيع الأكثر بحثا في العديد من الدول بما في ذلك بنغلاديش (Karmaker et al. 2018) والمملكة المتحدة (Mohamed et al. 2020) وإندونيسيا (Nizam and Wicaksono 2018) وكندا (Hafez and Bhattacharya 2017) وقطر (Al Ekren, Can- Wahedi and Bicer 2020b) وتركيا (Wahedi and Bicer 2020b) وغيرها الكثير. ومع ذلك، لا توجد دراسات حول محطات الشحن في المملكة العربية السعودية.

ومقارنةً بمحطات الشحن التي لا تعمل بالهيدروجين، تبين أن استخدام الهيدروجين يمكنه تقليل المساحة بنسبة 25% مع المحافظة على نفس مستوى موثوقية الشحن. ومع ذلك، نجد أن تقليل المساحة يترتب عليه زيادة طفيفة في التكلفة حسب الأسعار الحالية للتقنية. وستصبح تقنيات الهيدروجين بحلول عام 2030، اقتصاديةً في حد ذاتها، بالنظر إلى انخفاض التكاليف الذي من المحتمل أن تحققه. بمعنى آخر، أنه إضافةً إلى تقليل المساحة، سيكون استخدام الهيدروجين الخيار المفضل من الناحية الاقتصادية الذي يتمتع بنفس المستوى من الموثوقية.

نلاحظ أن حوالي 25% و 22% و 38% من الأراضي المخصصة لإنشاء مستشفيات ومراكز تسوق وجامعات، على التوالي يمكن أن تضم محطات شحن معزولة عن الشبكة. وهذه النسب تفترض أن تتم تلبية الطلب على شحن السيارات الكهربائية بالكامل. أما في حال لم تتم تلبية 5% من الطلب، فيمكن أن يتضاعف عدد الأراضي التي يمكن أن تضم محطات للشحن. أما بالنسبة للأراضي المخصصة لإنشاء محطات للوقود، فيمكن لـ 5% منها كحد أقصى أن يضم محطات للشحن، حتى وإن كانت بمساحات أصغر.

وقد تم تقسيم ما تبقى من الدراسة على النحو التالي: يقدم القسم 2 مراجعة موجزة للأدبيات وتوضيحا لنطاق الدراسة. ويلخص القسم 3 البيانات والفرضيات المستخدمة. ويعرض القسم 4 النتائج ويناقشها. وأخيرا، يختم القسم 5 هذه الدراسة.

شركة لوسيد موتورز "Lucid Motors" الأخيرة - شركة أمريكية للسيارات الكهربائية - بشأن إنشاء مصنع لها في المملكة العربية السعودية في عام 2024 ومع إعلان الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة عن السماح باستيراد السيارات الكهربائية وشواحنها (Saudi Gazette, 2014).

ومع هذه الإعلانات والتصريحات، نجد أن نتائج هذه الدراسة مهمة لإحاطة صانعي السياسات بحجم الاستثمار المطلوب لإنشاء محطات شحن للسيارات الكهربائية. كما أن الوصول إلى تكلفة شحن تجعل من عملية الشحن دون الاتصال بالشبكة مجدية من الناحية المالية على نفس القدر من الأهمية. وقد أعلنت الحكومة السعودية عن أن المستثمرين سيكون لهم الخيار لإنشاء محطات الشحن الخاصة بهم وبيع الكهرباء بالسعر الذي يحدونه (وبحد أقصى تحدهه الجهة التنظيمية). تجدر الإشارة إلى عدم وجود تعارض بين الشحن من خلال الاتصال أو عدم الاتصال بالشبكة. إذ يمكن اعتماد كلا الحلين في وقت واحد ولكن بنسب متفاوتة لدعم نشر السيارات الكهربائية. شملت التقنيات المرشحة التي تم أخذها في الاعتبار أثناء تصميم محطات الشحن المعزولة عن الشبكة كل من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح وتخزين البطاريات والهيدروجين (أي خلايا وقود الهيدروجين وإنتاج الهيدروجين في الموقع من خلال المحللات الكهربائية وتخزين الهيدروجين).

مراجعة الأدبيات

أعلى مقارنة بنظيرتها المتصلة بالشبكة. علاوة على ذلك، تتطلب محطات الشحن المعزولة عن الشبكة مساحات كبيرة لتوليد الطاقة اللازمة، بحسب التقنيات المستخدمة التي قد تكون مزعجة (Xu et al. 2021).

قام كل من الوحيدي وبيسر (2020a) بتصميم محطة شحن مستقلة لدولة قطر باستخدام عدة مصادر: الطاقة الكهروضوئية والرياح والديزل الحيوي والبطاريات والهيدروجين. وتوضح نتائج شحن 50 سيارة يوميا أن الشبكة المصغرة بالسعات التالية حققت الهدف المنشود: 468 كيلوواط من الطاقة الكهروضوئية المركزة و250 كيلوواط من الرياح و10 كيلوواط من الديزل الحيوي و595 كيلوواط في الساعة من التخزين و200 كيلوواط من خلايا الوقود. وكانت تكلفة توفير الطاقة من خلال هذه المحطة أعلى من التعريف السائدة في الدولة، كما هو متوقع. وقد قام نفس المؤلفين بنشر إصدار مختلف من هذه الدراسة (Al Wahedi and Bicer 2020b). الجدير بالذكر أن القطر الدوار لتوربينات الرياح المستخدمة في هذه الدراسات كان 54 مترا، وبالتالي لا يمكن نشرها داخل المدن.

وفي السياق الإسباني، قام غراندي ويحيوي وغوميز (2018) بتقييم الجدوى الاقتصادية والبيئية لمحطات الشحن المعزولة عن الشبكة التي تعمل بالطاقة الكهروضوئية والبطاريات. ولعملية شحن سريعة واحدة احتاج تصميم المؤلفين إلى حوالي 280 كيلوواط من الطاقة الكهروضوئية إلى جانب البطارية. ولإضفاء المرونة إلى التصميم، تم السماح بأن يكون الحمل غير المستوفى في حدود 5-15%. وتبين أن النظام كان مجديا من الناحية التقنية والاقتصادية على حد سواء. لاحظ أنه ومع ذلك تجاوزت أسعار الكهرباء في إسبانيا 0.22 دولار أمريكي/ كيلوواط في الساعة. وقام مهرجردي (2019) بتصميم شبكة شحن أخرى معزولة عن الشبكة لتوفير الأحمال الكهربائية والهيدروجين في المواقع العامة. تم استخدام الديزل في هذا التصميم، مما أدى إلى خفض تكلفة الشحن بنسبة 15% تقريبا.

تركز الأدبيات على الآثار الفنية المترتبة على اتصال محطات الشحن بالشبكة. فداخل شبكة التوزيع، يمكن أن يكون لها العديد من الآثار السلبية، بما في ذلك تقليل جودة الطاقة الكهربائية وزيادة فقدان الحمل الكهربائي أو زيادة انحرافات الجهد (Mozafar, Moradi, and Amini 2017). كما يؤدي ضعف جودة الطاقة الكهربائية في شبكة التوزيع إلى زيادة الحمل على محولات التوزيع وتقليل عمرها التشغيلي (Kha-lid et al. 2019). يتم استخدام الخوارزميات لربط محطات الشحن بشبكات التوزيع بصورة أفضل لتقليل آثارها. علاوة على ذلك، سيكون لشبكة التوزيع سعة قصوى لاستيعاب محطات الشحن (Sugihara and Funaki 2020). يشار إلى أن محطات الشحن المعزولة عن الشبكة تمثل نفسها في الغالب على أنها البديل الوحيد.

تقدم محطات الشحن المعزولة عن الشبكة التي هي محور هذه الدراسة بعض المزايا التي تتفوق بها عن نظيرتها المتصلة بالشبكة. وتشمل ما يلي: (1) تجنب المخاوف المرتبطة بجودة الطاقة الكهربائية والجهد - المذكورة أعلاه - فيما يتعلق بشبكة التوزيع. (2) تأجيل التوليد أو الاستثمار في سعة الشبكة أو زيادتها أو تعزيزها. (3) المساهمة في تحقيق أهداف خفض انبعاثات الكربون إذا كانت الشبكة مملوئة بدرجة كبيرة وكانت إمدادات الكهرباء المعزولة عن الشبكة خالية من الكربون. (4) خدمة مواقع مختلفة نظرا لتحويلها من محطات شحن قائمة على البترول إلى محطات شحن قائمة على الكهرباء (Afshar et al. 2021, Răboacă et al. 2020). وهذا يسمح لمحطات الشحن المعزولة عن الشبكة بأن تكون حلا انتقاليا حتى يتم تحسين الشبكة أو جعلها أقل إصدارا للانبعاثات الكربونية. ومع ذلك، فإن تكلفة الكهرباء لمحطات الشحن المعزولة عن الشبكة ستكون

وبحسب كفاءة اللوح الشمسي، يمكن أن يستوعب كل متر مربع 0.1-0.15 كيلوواط (Elshurafa and Muhsen 2019). وبالتالي سيكون هناك حاجة إلى ما بين 2,500 متر مربع و1,670 متر مربع تقريبا لنشر 250 كيلوواط. وبينما لم تنص بعض الدراسات على ضرورة أن يكون الحد الأقصى للمساحة هو 1,500 متر مربع، لذلك لم يكن هناك أي مبرر لدعم هذا الاختيار العددي المحدد. علاوة على ذلك، فإنه بوجود مساحة تقدر بـ1,500 متر مربع (أي ما يعادل مساحة ثلاثة ملاعب كرة سلة تقريبا) وبافتراض أن تكون المساحة المطلوبة لكل مركبة هي 12.5 متر مربع حسب اللوائح الهولندية لمواقف السيارات المغطاة (Ghotge, van Wijk, and Lukszo 2021)، يجب أن تكون المساحة المتوفرة قادرة على استيعاب 120 مركبة. يعد توفير مثل هذه المساحة أمرا باهظا في العديد من المناطق، لا سيما في مراكز المدن.

ثانيا، لم تتم مراعاة الجانب العملي لتكوين توربينات الرياح التي تصل سعتها إلى 250 كيلوواط فما فوق في جميع الدراسات المشار إليها أعلاه. وكما ذكرنا سابقا، وصل القطر الدوار لأكثر من 50 مترا. ولم يراعي الأخير ارتفاع محور توربينات الرياح. لذا لا يمكن استخدام مثل هذه المقاييس داخل المدن، خاصة مع الأخذ في الاعتبار توصيات موردي توربينات الرياح بأن تكون التوربينات ضعف ارتفاع العوائق المحيطة وأن تكون بعيدة قدر الإمكان عن المباني والأشجار التي قد تحجب الرياح أو تتسبب في حدوث اضطرابات (Lubitz 2014). وقد تكون زيادة ارتفاع المحور حلا للمشكلة الأخيرة إلا أنه مكلف. علاوة على ذلك، قد تكون هناك حاجة إلى الحصول على تصاريح من السلطات المحلية إذا تجاوزت توربينات الرياح أو أي هيكل آخر ارتفاعا معيناً. وترتبط بعض التحديات الأخرى لتوربينات الرياح داخل مراكز المدن بالشكل الجمالي (Colafranceschi, Sala, and Manfredi 2021) وحجم الإزعاج (Xu et al. 2021).

وننوه إلى أنه تم إجراء تحليل مماثل للدنمارك (Bansal et al. 2020)، وفيه كانت طاقة الرياح هي التقنية المفضلة نظرا لوفرة مصادر طاقة الرياح في البلاد. تراوحت سعة التوربينات ما بين 500 كيلوواط و1,500 كيلوواط ووصل ارتفاع المحور إلى ما بين 38 متر و100 متر. وتم افتراض أن يكون منحني الحمل الثابت هو 25 كيلوواط للفترة من 8 صباحا حتى 7 مساء. علاوة على ذلك، توصلت دراسة حالة في تركيا (Ekren, Canbaz, and Güvel 2021) إلى أن شحن خمس سيارات كهربائية كحد أقصى في الساعة يتطلب 250 كيلوواط من الطاقة الكهروضوئية وتوربينات رياح واحدة بسعة 200 كيلوواط، وكل ذلك بتكلفة تقدر بنحو 0.064 دولار أمريكي/كيلوواط في الساعة. ركزت دراسات أخرى على تصميم محطات شحن معزولة عن الشبكة تستخدم الطاقة الكهروضوئية فقط. والسبب في ذلك هو ملاحظة وجود تداخل زمني بين توافر الطاقة الشمسية والشحن أثناء النهار (Ghotge, van Wijk, and Lukszo 2021). كما تم افتراض أن يقوم أصحاب السيارات الكهربائية بركن مركباتهم لفترات طويلة (مثل مواقف الفترات الطويلة في المطارات).

يمكن التوصل إلى بعض الملاحظات بناء على المراجعة المذكورة أعلاه. وتحقيقا لمقاصد هذه الدراسة، قمنا بتبسيط الضوء على ملاحظتين تتعلقان بالتحديات الكامنة والمرتبطة بنشر الطاقة الكهروضوئية والرياح. وبعد تحديد هذه التحديات، تم توضيح الدور الذي يمكن أن يلعبه الهيدروجين في مواجهتها. كل ذلك في سياق محطات الشحن المعزولة عن الشبكة.

تتعلق الملاحظة الأولى بمساحة هذه المحطات المعزولة عن الشبكة. ونشير عموما إلى أن السعة المطلوبة للطاقة الكهروضوئية يجب ألا تقل عن 250 كيلوواط.

التحفيز والنطاق والسياق

تم النظر في الحلول المثلى للدراسات المذكورة أعلاه من جانب تقليل التكلفة. ومع ذلك، فإن التحديات المرتبطة بنشر الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح، كما تمت مناقشتها، لم يتم دمجها. وبالتالي، تم في هذه الدراسة تصميم محطات شحن معزولة عن الشبكة مع مراعاة القيود المتعلقة بنشر الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح. وحرصا على بقاء الشبكة المصغرة خالية من الكربون، تم استبعاد توليد الكهرباء بواسطة الديزل. ومع أخذ ذلك في الاعتبار، من المتوقع أن يلعب الهيدروجين دورا أكبر في التصميم. فخلالها وقود الهيدروجين والمحللات الكهربائية تعتبر خالية من الكربون وتحتاج إلى مساحة أقل مقارنة بالطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح. الجدير بالذكر أنه يمكن تقليل المساحة على حساب زيادة تكاليف توصيل الطاقة. ومع اكتمال تقنية الهيدروجين، ستصبح محطات الشحن المعزولة عن الشبكة التي تستخدم حصصا كبيرة من طاقة الهيدروجين أكثر فعالية من حيث التكلفة. وقد كان تحقيق التوازن بين التكلفة والمساحة والاعتبارات الحضرية الأخرى دافعا أساسيا لإجراء هذه الدراسة.

وبينما تم تصميم محطات شحن معزولة عن الشبكة لمدن مختلفة حول العالم، لم تتطرق أي من الدراسات السابقة لمدينة الرياض. فمصادر الطاقة الشمسية في مدينة الرياض وشبه الجزيرة العربية عموما تعتبر ممتازة. وبإشعاع شمسي أفقي كلي يصل إلى أكثر من 6 كيلوواط ساعة/ متر مربع/ السنة (Zell et al. 2015)،

يمكن أن تسهم مصادر الطاقة الشمسية في تقليل مساحة الألواح الكهروضوئية اللازمة لإنشاء محطات الشحن. يشار إلى أن نقص الدراسات المتعلقة بمدينة الرياض كان عاملا محفزا آخر لإجراء هذه الدراسة.

ولإثراء عملية النمذجة، تم استخدام نظام المعلومات الجغرافية في الدراسة (Bian et al. 2019). ومن الواضح أن اعتبارات المساحة تسترشد بتحليل مفصل لقطع الأراضي واستخداماتها في مدينة الرياض. يمكن من خلال الاستفادة من هذه البيانات التوصل إلى فرضيات أكثر واقعية فيما يتعلق بقدرات الطاقة المستخدمة في محطات الشحن.

علاوة على ذلك، يمكننا تحديد مجموعة الأراضي القادرة على استيعاب محطات الشحن التي تم تصميمها. وعلى حد علمنا، لم يتم إجراء أي دراسة سابقة بنفس هذا النطاق.

وكملاحظة أخيرة تضاف إلى هذا القسم، فإن الاستيعاب الفعلي للسيارات الكهربائية داخل مدينة الرياض، وأنماط القيادة لسكانها، والحوافز ذات الصلة التي قد تختار الحكومة تقديمها، وتطور تكلفة السيارات الكهربائية، وتفضيلات/ سلوك المستهلك نحو شراء سيارة كهربائية يتجاوز نطاق هذه الدراسة، مع العلم بأن هذه الجوانب مهمة وقد تكون بمثابة أساس للدراسات المستقبلية. تركز هذه الدراسة الخاصة بمدينة الرياض على مساهمة الهيدروجين في محطات الشحن المعزولة عن الشبكة، بالنظر إلى قيود الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح التي تم توضيحها أعلاه.

البيانات والفرضيات والنمذجة

وغير ذلك. ويمكن الاطلاع على تحليل مفصل للمساحة القصوى المسموح بنائها على قطعة الأرض في هذه الدراسة (Elshurafa and Muhsen) (2019).

ومع معرفة مساحة قطعة الأرض ونسبة المساحة القصوى المسموح بنائها يمكننا تقريب المساحة التي يمكن تخصيصها لإنشاء محطة شحن. وسوف تكون هذه المساحة مرتبطة أساسا بتوفر مواقف للسيارات. لاحظ أنه بالنسبة للفئات التي وقع عليها الاختيار، بعد حساب المساحة القصوى المسموح بها، سيتم تخصيص جزء كبير من المساحة المتبقية لمواقف السيارات. وهنا نفترض أنه يمكننا استخدام ربع المساحة المتبقية فقط، بعد حساب المساحة القصوى المسموح بنائها، لإنشاء محطة للشحن. ونفترض كذلك أنه يمكننا استخدام 10% فقط من إجمالي مساحة الأرض لإنشاء المحطة إذا كانت نسبة المساحة القصوى المسموح بنائها هي 60%، أي 25% من (1-60%) = 10%.

وبعد تقدير المساحة التي يمكن تخصيصها لإنشاء محطة للشحن، يمكن تقدير سعة الطاقة الكهروضوئية التي يمكن استخدامها. فلكل متر مربع، يمكن استخدام حوالي 110 واط (0.11 كيلوواط) من سعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Elshurafa and Muhsen 2019). ونكتفي هنا بالطاقة الشمسية الكهروضوئية لأنها التقنية المسؤولة بشكل رئيس عن المساحة الإجمالية لمحطة الشحن. ولقد تم تقديم المزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع في الأقسام التالية.

يلخص الجدول 1 عدد قطع الأراضي ومتوسط المساحات اللاحقة لخمس فئات وقع عليها الاختيار. ومن خلال المتوسط، نقوم بحساب المساحة التي يمكن تخصيصها لإنشاء محطة للشحن. وأخيرا، يتم التعرف على سعة الطاقة الكهروضوئية التي يمكن استخدامها.

تحقيقا لمقاصد هذه الدراسة تم جمع كم كبير من البيانات وتنفيذ العديد من الفرضيات وافترض أن تكون بيانات نظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض وفرضيات منحنى العمل أساسا للتحليل اللاحق. تعتبر بيانات نظام المعلومات الجغرافية ومنحنى الحمل عوامل رئيسية تؤثر على نجاح تصميم الشبكة المصغرة من حيث السعة والتكلفة والمساحة. ولذلك سنتطرق لها أولا في هذا القسم. بعد ذلك سيتم عرض جميع البيانات والفرضيات المتعلقة بالتقنيات.

بيانات نظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض وقيود المساحة

تم الحصول على البيانات المكانية لقطع الأراضي في مدينة الرياض من الهيئة الملكية لمدينة الرياض (www.rcrc.gov.sa). تقدم هذه المجموعة من البيانات تمثيلا لكل قطعة أرض في مدينة الرياض، بما في ذلك استخداماتها المخصصة (سكني، تجاري، صناعي، إلخ) ومساحتها. وقد تم إجراء التحليل المكاني باستخدام برنامج "ArcGIS Pro" المتوفر في الأسواق. وتركيزنا في هذا التحليل على خمس فئات هي: المستشفيات والجامعات والمدارس ومراكز التسوق ومحطات الوقود. وقد تم استبعاد المنشآت الصناعية لأنها تقع في الغالب على أطراف المدن.

وعلى الرغم من معرفة مساحات قطع الأراضي واستخداماتها، إلا أن حصة الأراضي التي يمكن استخدامها لنشر محطات الشحن تعتبر مجهولة. ولمعرفة المساحة التي يمكن استخدامها لإنشاء محطة شحن، يتم الاعتماد في المقام الأول على المساحة القصوى المسموح بنائها على قطعة أرض معينة والمحددة بالنسبة المئوية. فعلى سبيل المثال، إذا كانت مساحة قطعة الأرض السكنية 1,000 متر مربع في مدينة معينة، فينص النظام على استغلال 60% من مساحتها في البناء أي يمكن استخدام 600 متر مربع فقط للبناء. ويمكن استخدام المساحة المتبقية وهي 400 متر لمواقف السيارات والمناظر الطبيعية

الجدول 1. الفئات والأعداد ومتوسط المساحات وسعة الطاقة الكهروضوئية التي يمكن تخصيصها لإنشاء محطات للشحن على أراضٍ في مدينة الرياض.

فئة قطعة الأرض	العدد	متوسط المساحة - بالمتر المربع	متوسط المساحة المتوفرة لإنشاء محطة للشحن (أي الطاقة الكهروضوئية) بالمتر المربع	متوسط سعة الطاقة الكهروضوئية التي يمكن استخدامها بالكيلوواط
محطة وقود	1,278	4,328	433	48
مستشفى	114	38,802	3,880	427
مركز تسوق	101	28,521	2,852	314
مدرسة	3,255	7,398	740	81
جامعة	101	58,479	5,848	643

المصدر: تجميع المؤلفين بناء على بيانات الهيئة الملكية لمدينة الرياض.

المتوسطة تحدد توقعاتنا للتكلفة والمساحة المطلوبة. ويعتبر الأخير مهم ومميز لهذه الدراسة مقارنة بالدراسات السابقة في هذا المجال، حيث تم اختيار قيود المساحة بشكل عام دون الاعتماد على توفر مساحة سائدة معينة في المدينة محل الدراسة.

منحنى الشحن

يحتاج تجميع منحنيات الحمل الخاصة بمحطات الشحن إلى أفراد بدراسة مستقلة. إذ يعتمد المنحنى على العديد من العوامل، بما في ذلك على سبيل المثال مستوى نشر السيارات الكهربائية في الدول (Hall and Lutsey 2017) وموقع محطات الشحن (Sun et al. 2020). ويعتبر مستوى الشحن عاملاً مهماً آخر يؤثر على منحنى الحمل. هناك ثلاثة مستويات للشحن وهي تشير إلى تصنيف الطاقة: المستوى الأول مصنف عند أقل من 2 كيلوواط والمستوى الثاني مصنف عند ما بين 2 و20 كيلوواط والمستوى الثالث مصنف عند 50 كيلوواط تقريباً (Khalid et al. 2021). وتحقيقاً للغاية من هذه الدراسة، تم اعتماد المنحنيات التي تم تطويرها مسبقاً في المؤلفات.

يقدم الجدول (1) ثلاث ملاحظات على الأقل تستحق الذكر. الأولى، نلاحظ أن الأراضي المخصصة لإنشاء الجامعات والمستشفيات ومراكز التسوق يمكنها استيعاب معظم سعة الطاقة الكهروضوئية. والثانية، نستنتج أن هناك القليل من الإمكانيات في المتوسط لاستخدام الطاقة الكهروضوئية في محطات الوقود والمدارس. الثالثة، يقدم الجدول القيم العددية الفعلية لسعات الطاقة الكهروضوئية التي تشير إلى متوسط سعة الطاقة الكهروضوئية التي يمكن استخدامها. ومن الناحية النوعية، قد تكون هذه الملاحظات متوقعة. ومع ذلك، فإن القيم العددية الفعلية لا تظهر على الفور.

من المهم أن نؤكد أن القيم الواردة في الجدول (1) هي قيم متوسطة، وبمثابة دليل أولي لسعة الطاقة الكهروضوئية (أي المساحة المطلوبة) عند تصميم الشبكة المصغرة/ محطة الشحن. ومع ذلك، ستكون هناك أراضٍ لها مساحات كبيرة في كل فئة قادرة على استيعاب معظم سعة الطاقة الكهروضوئية. فضلاً عن ذلك، ستتم مراعاة اختلاف المساحات في كل فئة، إلى جانب توزيعها، بشكل أكبر مع التقدم والوصول إلى مرحلتها التصميم والتحسين. ومع ذلك، فإن هذه القيم

تشير إلى الحمل إما من خلال عدد السيارات الكهربائية أو الطاقة (كيلوواط).

نفترض بناء على الجدول (2) أن تخدم محطة الشحن ست سيارات كهربائية. ومع مراعاة مستوى الشحن، تم اختيار تصميم محطة الشحن عند تصنيف المستوى 2 لأنه الأكثر شيوعاً من حيث البنية التحتية (Hall and Lutsey 2017). ونلاحظ أنه ضمن المستوى 2 على وجه التحديد يعتبر تصنيف 11 كيلوواط هو التصنيف الشائع لشحن التيار المتردد في محطات الشحن العامة (Fachrizal et al. 2021).

نسعى في هذه الدراسة إلى اختبار الحالة القصوى، حيث تعمل محطة الشحن بسعتها القصوى طوال الوقت محل الدراسة. ويترجم الأخير شحن ست سيارات عند 11 كيلوواط لكل منها أو 66 كيلوواط من الحمل المستمر من الساعة 9 صباحاً وحتى 6 مساءً. ونؤكد أن عدد السيارات التي يمكن شحنها في وقت واحد وفي محطة معينة عبارة عن دالة تشير إلى مستوى الشحن.

وكما هو موضح في القسم 3.2، فإننا نركز على محطات الشحن التي تخدم مواقف السيارات في المستشفيات والأسواق والمدارس والجامعات ومحطات الوقود في مدينة الرياض. ولا بد من تحديد ثلاثة معايير رئيسية هي: وقت شحن السيارات الكهربائية وعدد السيارات الكهربائية التي تحتاج إلى شحن ومستوى الشحن. وقد توصلنا إلى المعايير السابقة بمساعدة الجدول (2) الذي تم فيه تقديم ملخص للنتائج المنشورة مسبقاً. وعموماً، فإنه من المتوقع أن تكون محطات الشحن في هذه المواقع أكثر ازدحاماً بين الساعة 9:00 صباحاً والساعة 7:00 مساءً. ويؤكد الجدول (2) على هذا التوقع. فيما يعتمد المعياران الآخريان اعتماداً كبيراً على بعضهما البعض (أي عدد السيارات الكهربائية التي تحتاج إلى شحن ومستوى الشحن). فعلى سبيل المثال، إذا تم شحن خمس سيارات كهربائية عند المستوى 1، فعندها سيكون الحمل الذروي هو 10 كيلوواط. ومع ذلك، إذا تم شحن نفس هذه السيارات عند الحد الأعلى للمستوى 2، فعندها سيكون الحمل الذروي هو 100 كيلوواط. ولذلك نجد أن الدراسات

الجدول 2. استعراض للحمل ووقت الشحن في المحطات

المصدر: تجميع المؤلف	الحمل: موضع إما بعدد السيارات الكهربائية المشحونة أو بالكيلوواط	عدد شحن مجموعة كبيرة من السيارات الكهربائية
Al Wahedi and Bicer 2020a	6-1 سيارة كهربائية	10 صباحاً - 7 مساءً
Al Wahedi and Bicer 2020b	9-1 سيارة كهربائية	8 صباحاً - 7 مساءً
Bayram et al. 2016	4-1 سيارة كهربائية	9 صباحاً - 6 مساءً
Grande, Yahyaoui, and Gómez 2018	50 كيلوواط	8 صباحاً - 7 مساءً
Mehrjerdi 2019	50 كيلوواط - 50 كيلوواط	7 صباحاً - 7 مساءً
Bansal et al. 2020	25 كيلوواط	8 صباحاً - 8 مساءً
Wang et al. 2020	50 كيلوواط - 150 كيلوواط	7 صباحاً - 11 مساءً
Fachrizal et al. 2021	40 كيلوواط	8 صباحاً - 6 مساءً

المصدر: تجميع المؤلف

لإسيما في مراكز المدن. تكمن إحدى طرق التغلب على قيود المساحة في تركيب ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية على المظلات (Umer et al. 2019) وبتكلفة رأسمالية أعلى (للتكيب). وقد تم تلخيص الفرضيات المستخدمة للطاقة الكهروضوئية في الجدول 3.

الطاقة الشمسية الكهروضوئية

تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية خالية من الكربون وهي من التقنيات التي تتمتع بتكلفة حدية للتوليد مقاربة للصفر. ومع ذلك، تشغل ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية مساحة كبيرة قد لا تكون متوفرة بالفعل

الجدول 3. الفرضيات المستخدمة لألواح الطاقة الكهروضوئية

المعايير	القيمة
التكاليف الرأسمالية (بما في ذلك المظلة الهيكلية)	1,200 دولار/ كيلوواط
كفاءة الألواح في ظروف الاختبار القياسية	17%
معامل فقد الطاقة حسب درجة الحرارة	0.4%/ درجة مئوية
درجة حرارة تشغيل الخلية الاسمية	47 درجة مئوية
تكاليف التنشغيل والصيانة	5 دولار/كيلوواط/السنة
إجمالي خسائر نظام الطاقة الكهروضوئية	15%
ميلان اللوح من الناحية الأفقية	25 درجة
زاوية البسمت من الشمال	180 درجة
مصدر الطاقة الشمسية	بيانات الإشعاع الشمسي لمدينة الرياض

المصدر : (Elshurafa et al. 2019)

³ تشمل هذه التكلفة تكاليف موازنة محطات الشحن، بما في ذلك أقطاب الشحن والكابلات والعمالة والتصاريف وتجهيز الموقع، إلخ

الرياح

الرياح يجب أن تكون على بعد مسافة معينة من بعضها البعض بحيث لا يؤثر الاضطراب الناتج عن إحداها على الأخرى. كما أننا نؤكد أن نشر توربينات الرياح ينتج عنه آثار متعلقة بالجانب الجمالي والضوضاء لا يتقبلها الناس.

وبالنظر إلى التحديات المرتبطة بتوربينات الرياح، فإننا نحدد ارتفاع محور التوربينة بـ 20 متراً. ويترجم هذا الارتفاع إلى سعة تقدر بـ 25 كيلوواط. علاوة على ذلك، فإننا نقصر عدد التوربينات التي سيتم تركيبها على توربينة رياح واحدة. فمعظم توربينات الرياح لها عمر تشغيلي يصل إلى 25 عاماً. يلخص الجدول 4 أدناه الفرضيات لتقنية الرياح المستخدمة في النمذجة. يشار إلى أن نشر توربينات الرياح حتى مع هذا الارتفاع المحدد قد لا يزال يمثل مشكلة. ونتيجة لذلك، ستراعي تصاميم محطات الشحن الخيارات التي تستبعد طاقة الرياح.

تطورت توربينات الرياح تطوراً كبيراً خلال العقد الماضيين. يصل ارتفاع محاور توربينات الرياح الحديثة بسعة 7 ميغاواط إلى 170 متراً و يبلغ قياس القطر الدوار 160 متراً. ومن الواضح أن هذه المقاييس تناسب فقط استخدامات المرافق/ شركات الكهرباء في مواقع جغرافية معينة- وليس داخل المدينة. ولا بد أن يكون ارتفاع توربينات الرياح ضعف ارتفاع أي عائق قريب (مثل المباني أو الأشجار). والأخير قد لا يكون وجوده ممكناً في المدن حيث أن الحصول على تصاريح من السلطات المحلية قد يكون مطلوباً في حال تجاوز ارتفاع توربينة الرياح أو أي هيكل آخر الحد المسموح به. وللتغلب على قيود الارتفاع، يمكن تركيب توربينتي رياح (عدد 2) أصغر حجماً. وفي حين يبدو أن هذا الحل معقول من حيث المبدأ، إلا أن توربينات

الجدول 4. الفرضيات المستخدمة لتوربينات الرياح

المعايير	القيمة
التكلفة الرأسمالية	1000 دولار/ كيلوواط
تكاليف التشغيل والصيانة	20 دولار/كيلوواط/ السنة
العمر التشغيلي	25 عاماً
الحد الأقصى المسموح به لارتفاع محور توربينة الرياح	20 متر
الحد الأقصى للسعة	50 كيلوواط
إجمالي خسائر نظام الطاقة الكهروضوئية	توربينة واحدة
مصادر طاقة الرياح	بيانات سرعة الرياح لمدينة الرياض

المصدر : (Elshurafa et al. 2021)

تخزين البطارية

القيم النموذجية له بين 10-25% من إجمالي محتوى الطاقة. وبالتالي، لا بد من تعديل محتوى الطاقة السابق البالغ 600 كيلوواط في الساعة ليصبح 670 كيلوواط في الساعة تقريبا، بافتراض أن يكون الحد الأدنى المسموح به لحالة الشحن هو 10%. ومن وجهة نظر عملية، لا يمكن العثور على بطارية بنفس تصنيف الطاقة دائما. وبالتالي يجب على الشخص أن يستخدم الساعات المتوفرة في السوق وهي 1 ميجاواط في الساعة في حالتنا. ومع أخذ المساحة في الاعتبار، نجد أن سعة البطارية تتطلب وجود مساحة متوسطة، أي أقل بكثير من المساحة التي تحتاجها الطاقة الكهروضوئية. تجدر الإشارة إلى أن البطاريات التجارية ذات سعة 1 ميجاواط في الساعة يتم تركيبها في حاويات يصل طولها إلى 20 قدم. يلخص الجدول 5 الفرضيات المستخدمة للبطاريات.

بالنسبة للبطاريات، لا بد من تحديد تصنيفات الطاقة والكهرباء على حد سواء. نختار تصنيف طاقة البطارية بناء على الحمل الذروي البالغ 66 كيلوواط. وبالنسبة لتصنيف الكهرباء، يجب تقدير استقلالية البطارية بالساعات (مدة تلبية البطارية وحدها للطلب). وليوم كامل من الاستقلالية (تسع ساعات) ولنصف يوم من الاستقلالية (أربع ساعات تقريبا)، يجب أن تكون ساعات الطاقة حوالي 600 كيلوواط و 200 كيلوواط، على التوالي. ولأغراض الموثوقية، تم اختيار اليوم الكامل من الاستقلالية في التصميم. ومن الواضح أن الخيار الأخير له آثار من حيث التكلفة لأن حجم البطارية سيكون أكبر.

وللتأكد من استمرار عمل البطاريات بموثوقية، يجب أن يبقى محتوى الطاقة فوق المستوى الأدنى. وهو ما يعرف بالحد الأدنى المسموح به لحالة الشحن. وتتراوح

الجدول 5. الفرضيات المستخدمة للبطاريات

القيمة	المعايير
1,200 دولار/ كيلوواط	التكلفة الرأسمالية ¹
17%	تكاليف التشغيل والصيانة
0.4%/ درجة مئوية	العمر التشغيلي
47 درجة مئوية	الحد الأدنى المسموح به لحالة الشحن
5 دولار/كيلوواط/السنة	كفاءة دورة الشحن والتفريغ

المصدر: (Frith 2021)

¹ تشمل هذه التكلفة تكاليف موازنة محطات الشحن، بما في ذلك أقطاب الشحن والكابلات والعمالة والتصاريف وتجهيز الموقع، إلخ

الهيدروجين

تمت إضافة الهيدروجين المستخدم في توليد الكهرباء إلى التقنيات التي تمت مناقشتها أعلاه. ستحتاج محطات الشحن إلى محلل كهربائي لإنتاج الهيدروجين في الموقع وإلى خلايا وقود الهيدروجين لإنتاج الكهرباء وإلى خزان لتخزين الهيدروجين. وبالنظر إلى أن الحمل الذروي هو 60 كيلوواط تقريبا، لا نتوقع أن تكون قدرة خلية الوقود أكبر من ذلك بسبب وجود تقنيات أخرى. هناك أنواع متعددة من خلايا الوقود يمكن الاختيار منها. وتحقيقا لأغراض ومقاصد هذه الدراسة، تم اختيار خلايا وقود غشاء البوليمر المنحل بالكهرباء التي تمتلك عادة قدرات تقل عن 250 كيلوواط وكفاءات تصل نسبتها إلى 60%. وتمتاز هذه الخلايا بقدرتها على تسريع عمليات التشغيل وتتبع الأحمال. كما يعد هذا النوع من الخلايا مناسباً للطاقة المحمولة وتطبيقات التوليد الموزع (DOE 2015).

يوفر كيلو جرام واحد من الهيدروجين 33.6 كيلوواط في الساعة من الكهرباء. ومع ذلك، فإن بحسب الحمل وكفاءة خلايا الوقود المختارة، وبافتراض أن يكون الهيدروجين المصدر الوحيد للطاقة، سنحتاج إلى حوالي 3 كجم في الساعة لضمان استمرارية التشغيل. بعبارة أخرى، يجب أن يوفر الخزان 30 كجم من الهيدروجين يوميا بافتراض عدم وجود تقنيات أخرى تساهم في توفير الطاقة.

تساعد كمية الهيدروجين المطلوبة في تحديد حجم المحلل الكهربائي المطلوب. وبالنسبة لهذه الدراسة، فإننا نفترض أن تكون نسبة كفاءة المحلل الكهربائي الذي يعمل باستخدام خلايا وقود غشاء البوليمر المنحل بالكهرباء 60% (Buttler and Spliethoff 2018, Kumar and Himabindu 2019). وفي حال كانت هناك حاجة إلى 48 كيلوواط في الساعة من الكهرباء لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين (Caumon et al. 2015)، فعندها سيكون حجم المحلل الكهربائي (الحمل) في نطاق 150 كيلوواط.

وبينما يصل نموذج التحسين إلى القدرات الدقيقة لخلايا الوقود والخزانات والمحللات الكهربائية، نجد أن الحسابات الواردة هنا تسلط الضوء على المساحة المطلوبة. وعموما، فإنه على غرار حالة تخزين البطارية، تعتبر متطلبات جميع المكونات المرتبطة بالهيدروجين معقولة. ويمكن تركيب المحللات الكهربائية التجارية التي تصل قدراتها إلى عدة ميغاواط في حاويات يصل طولها إلى 20 قدم. علما بأن خلايا الوقود الواقعة في حدود 50 كيلوواط تحتاج إلى تركيب حوالي 10 أمتار مربعة. نلاحظ وجود اختلاف كبير بين ما هو مطلوب للطاقة الكهروضوئية وما هو مطلوب للبطاريات أو لتوليد الهيدروجين. يلخص الجدول التالي الفرضيات لمكونات الهيدروجين.

الجدول 6. الفرضيات المستخدمة لمكونات الهيدروجين

المكون	المعيار	القيمة
خلايا وقود الهيدروجين	التكلفة الرأسمالية الكفاءة الحد الأدنى لنسبة الحمل العمر التشغيلي	\$1,500/kW 60% 10% 15 years
المحلل الكهربائي للهيدروجين	التكلفة الرأسمالية تكاليف التشغيل والصيانة ² الكفاءة الحد الأدنى لنسبة الحمل العمر التشغيلي	\$1,100/kW \$14/kW/year 60% 10% 15 years
خزان الهيدروجين	التكلفة الرأسمالية تكاليف التشغيل والصيانة الكفاءة المستوى الأولي للخزان العمر التشغيلي	\$800/kg/year \$3/kg/year Full 25 years

المصادر: (Buttler and Spliethoff 2018, Caumon et al. 2015, Mongird et al. 2020, Nguyen et al. 2019, Zhang et al. 2020).

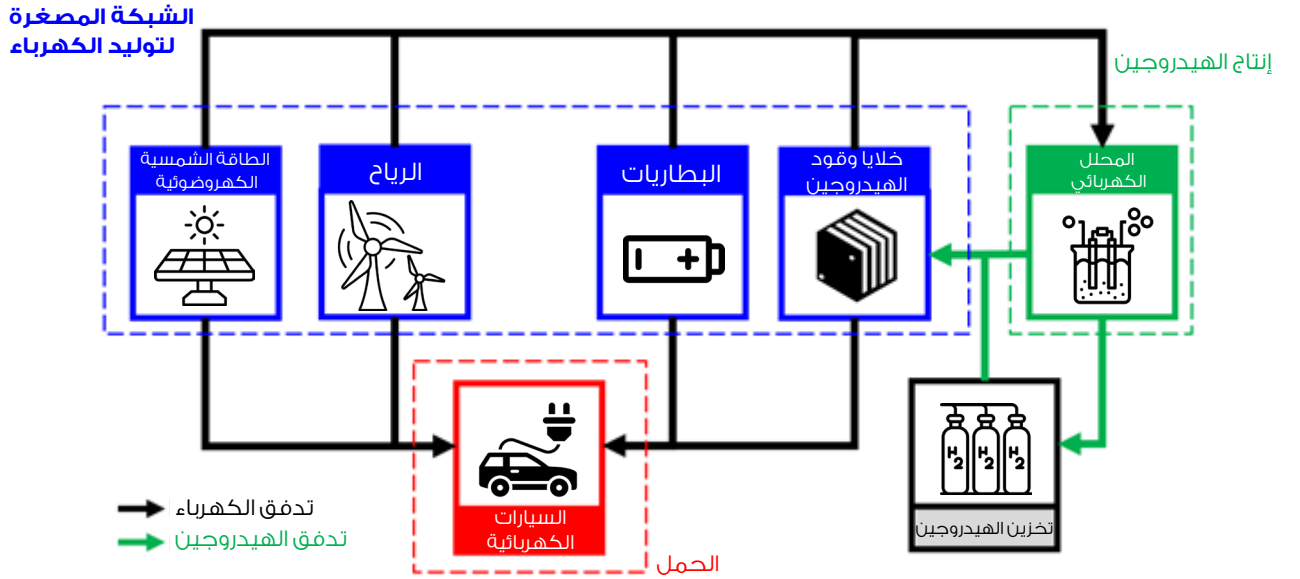
² تكاليف التشغيل والصيانة للمحلل الكهربائي تتضمن تكاليف التشغيل والصيانة لخلايا الوقود

تتم عمليات التحسين والنمذجة باستخدام برنامج "HOMER Pro"، وهو برنامج متوفر في الأسواق، حيث يعمل هذا البرنامج على توفير جميع التركيبات الممكنة الأخرى (أي إمكانات مزج الطاقة) التي تلبي الطلب بالإضافة إلى إيجاد الحل الأقل تكلفة من بين مجموعة التقنيات. وما أن يتم الحصول على هذه الحلول حتى يتم فرزها حسب صافي التكلفة الحالية والتكلفة الرأسمالية والتكلفة المستوية للكهرباء والانبعاثات (إن وجدت) والمساحة، من بين معايير أخرى، لتحقيق الأغراض والأولويات المختلفة.

تكوين الشبكة المصغرة ونموذجها

مع كل الفرضيات المتعلقة بالتقنيات المعروضة، يوضح الشكل 1 كيفية تفاعل هذه التقنيات لاستيفاء الحمل. فتقنيات توليد الكهرباء (أي الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح وتخزين البطارية وخلايا وقود الهيدروجين) تم توضيحها باللون الأزرق. والمحلل الكهربائي، الذي ينتج الهيدروجين، تم توضيحه باللون الأخضر. وبالإضافة إلى الحمل الرئيسي في هذه الشبكة المصغرة وهي السيارات الكهربائية (موضحة باللون الأحمر)، هناك حمل للمحلل الكهربائي يتم استيفائه من خلال الاستعانة بتقنيات توليد الكهرباء. وبمجرد إنتاج الهيدروجين، يمكن لخلايا الوقود أن تستخدمه مباشرة أو يتم تخزينه في خزان الهيدروجين لاستخدامه لاحقاً.

الشكل 1. التخطيط المفاهيمي للشبكة المصغرة محل الدراسة



المصدر: رسم توضيحي للمؤلفين.

تم توضيح تقنيات توليد الكهرباء باللون الأزرق والمحلل الكهربائي المنتج للهيدروجين باللون الأخضر وحمل السيارات الكهربائية باللون الأحمر. لاحظ الفرق بين تدفق الكهرباء (الأسهم السوداء) وتدفق الهيدروجين (الأسهم الخضراء) داخل الشبكة المصغرة كاملة.

نبحث في ثلاثة سيناريوهات: (1) تصميم محطة شحن بتكاليف التقنية السائدة في عام 2022، (2) تصميم محطة شحن بالتكاليف المتوقعة للتقنية لعام 2030، (3) تصميم محطة شحن بالتكاليف المتوقعة للتقنية لعام 2030 والسماح بوجود نقص في السعة بنسبة 5%. علماً أنه في السيناريوهين الأولين يتم تلبية الطلب بالكامل. ومع ذلك، فإننا نسمح في السيناريو الثالث بعدم تلبية 5% من الطلب. بمعنى، أنه تتم المساومة على موثوقية محطة الشحن في السيناريو الثالث. لاحظ أن تعريف الموثوقية هنا هو عدم تلبية الطلب وليس التعريف المعتاد المستخدم في النماذج الوطنية لقطاع الكهرباء (على سبيل المثال احتمالية فقد الحمل/ احتمالية فصل التيار). وكما هو متوقع، فإن ذلك يضفي المرونة للتصميم ويساهم في خفض التكاليف.

نتائج السيناريو (1): تكاليف 2022

تم تلخيص التكوينات الأربعة التي تلي الطلب في كل سيناريو في الجدول 7. كما تم ترتيبها بناءً على صافي القيمة الحالية للتكلفة بالإضافة إلى معايير أخرى. وجرى تلخيص هذه المعايير في صفوف مخصصة. فيتضح بالنسبة للسيناريو (1) أن التكوين الأكثر اقتصاداً حسب صافي القيمة الحالية للتكلفة هو التكوين الذي يتضمن توربينات الرياح والبطاريات والطاقة الكهروضوئية (أي التكوين أ). ومع ذلك، فإن التكوين الأكثر تكلفة حسب صافي القيمة الحالية يتضمن الهيدروجين والبطاريات والطاقة الكهروضوئية (التكوين د).

كما أسلفنا، يتم استخدام برنامج "HOMER Pro" لتحسين الشبكة المصغرة. بالنسبة للأغراض المتعلقة بالتكلفة، فإن الحل الأمثل هو الذي يمتلك أقل صافي لقيمة التكلفة الحالية. يبلغ معدل الخصم المطبق في حسابات صافي القيمة الحالية 5%. أما بالنسبة للمساحة المطلوبة، فقد قمنا فقط بمراعاة حجم السعة الكهروضوئية. تجدر الإشارة إلى أن البطارية والمحلل الكهربائي وخلية الوقود تشغل جزءاً بسيطاً من المساحة في مجمل الشبكة المصغرة مقارنة بحصة مصفوفة الألواح الكهروضوئية. وبالتالي، من الآمن افتراض أن يكون حجم مصفوفة الألواح الكهروضوئية أو ما يعادله من سعة الطاقة الكهروضوئية العامل الرئيس المحدد لمساحة الشبكة المصغرة بالكامل.

التكوينات المثلى: اعتبارات التكلفة والمساحة ونقص الإمدادات

يوجد ما مجمله أربعة تكوينات لتلبية الطلب. ونظراً لبحثنا في أربع تقنيات توليد، يتعين علينا نظرياً أن يكون لدينا $24 = 16$ تكوينات ممكنة لتلبية الطلب. ومع ذلك، من غير الممكن تلبية الطلب بشكل موثوق دون الاستعانة بالطاقة الكهروضوئية والبطاريات. بعبارة أخرى، تعد الطاقة الكهروضوئية والبطاريات دائماً جزءاً من الحل الأمثل في كل تكوين للشبكة المصغرة، وهذا ما يقلل عدد التكوينات الملائمة إلى 4 بعد أن كانت 16.

الجدول 7. ملخص التكوينات والتقنيات والتكاليف وسعة التقنيات ومعايير الترتيب حسب الأسعار في عامي 2022 و 2030 بالإضافة إلى عام 2030 مع السماح بنقص سنوي في الطلب بنسبة 5%.

السيناريوهات

السيناريو 3: تكاليف 2030 مع عدم استيفاء الحمل بنسبة 5%				السيناريو 2: تكاليف 2030				السيناريو 1: تكاليف 2022					
D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	التكوين	
√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	البطاريات	
√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	الطاقة الكهروضوئية	
		√	√			√	√			√	√	الرياح	
√		√		√		√		√		√		الهيدروجين	
177	179	121	121	383, 348	456	212, 207	233	348	456	229, 207	233	السعة الكهروضوئية كيلواط	
5	-	5	-	10, 5	-	5, 10	-	20	-	5, 20	-	سعة الخزان (كجم)	
10	-	10	-	10, 10	-	10, 10	-	30	-	10, 30	-	المحلل الكهربائي كيلواط	
10	-	10	-	30, 10	-	20, 30	-	10	-	10, 10	-	خلايا الوقود (كيلواط)	
0.900	0.885	0.901	0.884	1.07, 1.08	1.10	0.976, 0.979	0.973	1.93	1.91	1.80, 1.85	1.74	صافي القيمة الحالية (مليون دولار)	
0.188	0.185	0.188	0.185	0.215, 0.216	0.221	0.196, 0.196	0.195	0.388	0.382	0.360, 0.370	0.349	التكلفة المستتوية للكهرباء (دولار/كيلواط في الساعة)	
0.488	0.475	0.469	0.455	0.651, 0.628	0.669	0.542, 0.548	0.533	1.07	1.11	0.956, 0.971	0.930	التكلفة الرأسمالية (مليون دولار)	
2	1	2	1	3	4	2	1	4	3	2	1	صافي القيمة الحالية	
2	2	1	1	3	4	1	2	3	4	1	2	مساحة/ سعة الطاقة الكهروضوئية	
1	1	2	2	1	2	3	4	1	2	3	4	محدودية الرياح وسعة/ مساحة الألواح الكهروضوئية	

المصدر: حسابات المؤلفين

ونرى من الجانب النوعي، أن الهيدروجين يوفر فائدة مهمة تتمثل في تقليل المساحة المطلوبة للشبكة المصغرة. وهذا التقليل كبير لا سيما بين التكوينين (ج) و(د). وكما هو موضح في الجدول (7)، يحتاج التكوين (ج) إلى 456 كيلوواط من الطاقة الكهروضوئية مقارنة بـ 348 كيلوواط في التكوين (د). بمعنى أنه في حين أن دمج تقنيات الهيدروجين في تصميم الشبكة المصغرة يزيد من التكاليف، تتم موازنة هذه التكاليف من خلال تقليل إجمالي مساحة الشبكة المصغرة بصورة كبيرة (حوالي 25%). ومع ذلك، فإن ميزة المساحة بين التكوينين (أ) و(ب) بسيطة نظرا لوجود توربينة الرياح.

نقدم مثالا آخر للتسوية بين التكلفة والمساحة من خلال النظر في التكوين (ب)، حيث تم تقديم حلين محتملين (مفصولين بفاصلة). الأول هو الحل الأقل تكلفة والثاني هو الحل الأصغر مساحة. لاحظ مجدداً أنه تم الحصول على مساحة صغيرة بصافي قيمة عالية أعلى قليلاً للتكلفة.

نتائج السيناريو 2: أسعار 2030

في هذا السيناريو، نعيد التحليل ولكن باستخدام التكاليف المتوقعة للتقنية في عام 2030 والملخصة في الجدول 8. علماً أنه جرى تلخيص نتائج هذا السيناريو في الجدول 7 في العمود المقابل.

ومع ذلك، إذا قمنا بتقييم تكوينات الشبكة المصغرة بناءً على المساحة، فعندها سيتغير الترتيب إلى حد ما. وبالإشارة إلى الجدول (7)، نرى أن التكوين الذي سيحتاج إلى أقل مساحة هو التكوين (ب) في حين أن التكوين (ج) يحتاج إلى المساحة الأكبر. وتصل المساحة المطلوبة للتكوين (ج) إلى ضعف المساحة المطلوبة تقريبا للتكوين (ب). ويكمن السبب وراء هذا الاختلاف الكبير في المساحة المطلوبة إلى أن البطاريات في التكوين (ب) يمكن شحنها على مدار اليوم من خلال توربينات الرياح. ومع ذلك، ففي التكوين (ج)، يمكن شحن البطارية من خلال الطاقة الكهروضوئية. ونتيجة لذلك، هناك حاجة إلى مصفوفة أكبر من الألواح الكهروضوئية لتلبية الطلب وشحن البطاريات في آن واحد.

يعتمد معيار الترتيب النهائي على المساحة المطلوبة والتحديات المصاحبة لنشر توربينات الرياح داخل المدينة (يشار إليها بمحدودية الرياح في الجدول). فعند مراعاة هذا المعيار، نجد أن الترتيب يتغير بالكامل مقارنة بالترتيب حسب صافي القيمة الحالية. وكما يوضح الجدول 7، فإن الحل الأكثر جاذبية حسب صافي القيمة الحالية يصبح أقل جاذبية، والعكس صحيح. في معيار الترتيب الأخير، يتذلل التكوينان (أ) و(ب) القائمة لأنهما يحتاجان إلى توربينات الرياح. ومن ثم يتم تطبيق المساحة المطلوبة للألواح الطاقة الكهروضوئية. بعبارة أخرى، سيكون التكوين الأكثر جاذبية هو التكوين الذي يمتلك أقل سعة للطاقة كهروضوئية ولا يمتلك أي توربينة رياح. بينما سيكون التكوين الأقل جاذبية هو التكوين الذي يمتلك أكبر سعة للطاقة الكهروضوئية وتوربينة رياح مركبة.

الجدول 8. التكاليف الرأسمالية المتوقعة للتقنيات في عام 2030

التقنية	الألواح الكهروضوئية ⁴	الرياح	البطاريات ⁵	المحلل الكهربائي	خلايا وقود الهيدروجين	خزان الهيدروجين
التكلفة	\$700/kW	\$800/kW	\$350/kW	\$393/kW	\$854/kW	\$400/kg

⁴ التكاليف تشمل المظلات

⁵ التكاليف تشمل تكاليف المحول وميزان محطة الشحن وأقطاب الشحن والكابلات والتصاريف وتجهيز الموقع، وما إلى ذلك.

المصدر: فرضيات المؤلفين

وبالتالي فإن نقص الطلب بنسبة 5% يعادله نقص في الوقت بنسبة 5%. ويمثل الأخير 27 دقيقة من الحمل اليومي غير المستوفى - في المتوسط - من تسع ساعات متواصلة من الحمل اليومي.

تم توضيح نتيجة هذه المحاكاة في عمود السيناريو (3) من الجدول (7). وبالنظر إلى مرونة استيفاء الحمل في هذا السيناريو، نجد أن السعة الكهروضوئية المطلوبة أقل بكثير مقارنة بالسيناريوهين السابقين. ففي التكوينين (ب) و(د) اللذين تم فيهما استخدام الهيدروجين، كان حجم خلايا الوقود صغيرا.

يوضح الشكل (2) ترحيل الأحمال ليوم مستخدم كمثال لمقارنة تأثير مرونة الموثوقية على التشغيل بشكل أفضل. ويبين الشكل (2أ) ترحيل الأحمال للسيناريو (1) بينما يبين الشكل (2ب) ترحيل الأحمال للسيناريو (3). ويمثل كلا الشكلين التكوين (د). لم يتم تضمين نتائج التكوين (د) في السيناريو (2) لأنها تتشابه من الناحية المفاهيمية مع السيناريو (1). في الشكل (2أ)، تلبى البطاريات الطلب في الأوقات المبكرة من الصباح والمساء. و تلبى الألواح الكهروضوئية جزءا كبيرا من الطلب في منتصف النهار. فضلا عن ذلك، يتم استخدام أي فائض من توليد الطاقة الكهروضوئية في شحن البطارية (من الساعة 12-10). ويعتبر فائض الطاقة الكهروضوئية كبيرا لدرجة أن البطارية يتم شحنها بالكامل عند الساعة 13، ويتم تحويل الفائض إلى المحلل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين (غير موضح تبسيطا للأمور). علاوة على ذلك، نجد أن الهيدروجين يلبي خلال ساعات المساء المبكرة بضع ساعات من الطلب. وهذا الأخير بدوره يؤدي إلى عدم وصول البطارية للحد الأدنى المسموح به للشحن.

ويعتبر دور الطاقة الكهروضوئية في الشكل (2ب) مشابها: فغالبا تلبى الطلب خلال منتصف النهار ويتم استخدام الفائض منها في شحن البطاريات أو إنتاج الهيدروجين. ومع ذلك، فإنه نظرا لصغر مصفوفة الألواح

بالنظر إلى ترتيبات صافي القيمة الحالية لهذا السيناريو، نلاحظ تغير الترتيب مقارنة بالسيناريو (1). ومن الملاحظات المهمة في السيناريو (2)، أن التكوين (ج) يصبح أكثر تنافسية من حيث التكلفة مقارنة بالتكوين (د). بعبارة أخرى، أننا نستفيد في السيناريو (2) بثلاث طرق من نشر الهيدروجين: تقليل المساحة المطلوبة لمحطة الشحن وتقليل التكلفة والمحافظة على نفس المستوى من الموثوقية (أي استيفاء الطلب بالكامل). يعتبر تقليل المساحة بين التكوينين (ج) و(د) أقل في هذا السيناريو إذ يصل إلى 16%. وبالرجوع إلى القسم الفرعي السابق (أي السيناريو 1)، نجد أنه تم تقليل المساحة بتكاليف أعلى. ومع ذلك، فإنه مع مسار التكلفة التنافسي لتقنيات الهيدروجين، يصبح نشر الهيدروجين الخيار المفضل ماليا إذا صعب تركيب توربينات الرياح. ومقارنة بالسيناريو (1)، فإن ساعات خلايا الوقود المستخدمة في النموذج أكبر حجما و صافي القيمة الحالية أقل بكثير في السيناريو (2). ومن الواضح أن قيم صافي القيمة الحالية في السيناريو (2) تعادل نصف القيم في السيناريو (2) تقريبا.

ونلاحظ مجددا وجود تسوية بين التكلفة والمساحة في التكوينين (ب) و(د). ففي هذا السيناريو، تكون التسوية في التكوين (د) أكبر مقارنة بالتكوين (ب). تؤثر هذه الموازنة على أحجام أجهزة تقنية الهيدروجين كذلك. وتجدر الإشارة إلى أن هناك العديد من تكوينات التحجيم لتقنيات الهيدروجين التي حققت صافي قيمة عالية للتكلفة مقارب جدا. وقد تم في الجدول (7) توضيح خيار واحد فقط بغرض الإيجاز.

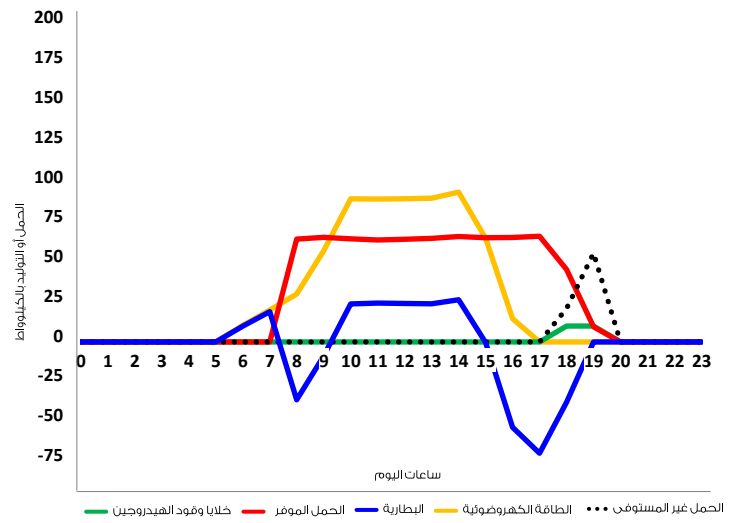
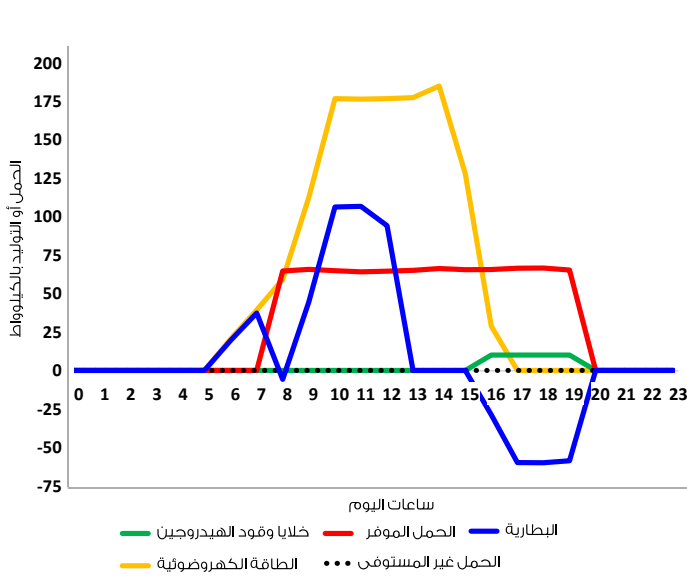
نتائج السيناريو 3: أسعار 2030 وعدم تلبية 5% من الطلب كحد أقصى

لفهم مساهمة الهيدروجين في تصميم محطات الشحن، يتم إجراء محاكاة أقل تقييدا مقارنة بالسيناريوهين السابقين والسماح بعدم تلبية 5% من الطلب كحد أقصى مع المحافظة على ثبات الطلب عند مستوى 66 كيلواط.

اختلاف حجم خزان الهيدروجين بين السيناريوهين 1 و 3). ولذلك نجد أنه بنهاية اليوم لا تتم تلبية جزء من الطلب.

الكهروضوئية، لا يتم شحن البطارية بالكامل. تلبية خلايا وقود الهيدروجين جزءا من الطلب ولساعات أقل (لاحظ

الشكل 2. التوليد ليوم في نوفمبر بهدف توضيح الاختلاف بين (1) المكون "د" في السيناريو (1) و (ب) المكون "د" في السيناريو (3).



المصدر: حسابات المؤلفين.

كيلوواط في الساعة، على التوالي) تعتبر أعلى بكثير من الأسعار السائدة في المملكة العربية السعودية، حتى مع مراعاة المستوى الأكثر تكلفة. وهناك سببان رئيسان وراء هذه التكلفة العالية. يتمثل السبب الأول في ارتفاع تكاليف البطاريات، حيث تبلغ حصة البطارية من تكلفة رأس المال الأولية حوالي 75%. فيما يتمثل السبب الثاني في اتخاذ قرار متعلق بالحفاظ على مستوى شحن موثوق على مدار السنة. ونؤكد أن حجم البطارية كبير نسبياً لأننا اخترنا أن يكون هناك يوم واحد من الاستقلالية لضمان الموثوقية. ومع كبر البطارية، يكون وجود مصفوفة ألواح كهروضوئية كبيرة نسبياً أمراً ضرورياً.

وبالنظر إلى أن البطارية هي المحرك الرئيس للتكلفة، نعيد عملية التحسين بافتراض وجود معدلات تعلم قوية (Cole, Frazier, and Augustine 2021). ونفترض من الناحية الكمية أن تنخفض تكاليف البطارية إلى 200 دولار/ كيلوواط. وبهذه الأسعار تنخفض التكلفة المستوية للكهرباء إلى ما بين 0.13 و 0.15 دولار/ كيلوواط في الساعة حسب التكوين. علماً بأن هذه الأرقام لا تزال أعلى من الأسعار الحالية للكهرباء.

ويتم إجراء محاكاة أخرى حيث تكون فيها الشبكة المصغرة معتمدة على الهيدروجين والطاقة الكهروضوئية فقط. وهذا التكوين يتغلب على تحدي التكلفة الذي يفرضه تضمين البطارية في التصميم. تجدر الإشارة إلى أن قيم التكلفة المستوية للكهرباء كانت ضمن نفس النطاق. وكما هو متوقع، هناك حاجة إلى مصفوفة أكبر من الألواح الكهروضوئية (أكثر من 800 كيلوواط) لأن الرياح ليست تقنية مرشحة في هذا السيناريو.

بناءً على هذه النتائج العددية، ومن منظور مالي بحت نستنتج أن شحن السيارات الكهربائية في محطات معزولة عن الشبكة لا يعد حتى الآن حلاً تنافسياً من حيث التكلفة. ما لم ترتفع أسعار الكهرباء أو تختار الحكومة التشجيع على إنشاء محطات معزولة عن الشبكة، سيكون شحن السيارات الكهربائية من الشبكة

يتضح من السيناريو (3) أن الهيدروجين لا يسهم في تقليل مساحة محطات الشحن ولا في تقليل التكاليف. ويعتبر التكوينان "ب" و "د" (أي مع الهيدروجين) أكثر تكلفة مقارنة بالتكوينين "أ" و "ج" (بدون الهيدروجين). علاوة على ذلك، لا يترتب على التكلفة الإضافية أي زيادة في الموثوقية لأن كل التكوينات لها نفس قيمة النقص في السعة. ولاحظ أن الترتيبات في هذا السيناريو مقصورة فقط على "1" و "2" لأن الاختلافات بسيطة جداً. تقدم نتائج هذا السيناريو، مع تضمين السيناريوهين السابقين، رؤية مهمة أخرى لدور الهيدروجين من حيث الموثوقية.

كما يتضح من السيناريو (2) أنه لا بد من تلبية الحمل بالكامل. ويقدم الهيدروجين ثلاث مزايا فريدة هي: تقليل المساحة وتقليل التكلفة وتجاوز قيود نشر توربينات الرياح. ويتم التمتع بهذه المزايا عند نفس مستوى الموثوقية. ومع ذلك، يوضح السيناريو (3) أن الهيدروجين لا تكون له مزايا إذا لم يتم السماح بتلبية بعض الأحمال. وتعتبر البطاريات والألواح الكهروضوئية كافية لتوفير الطاقة اللازمة. كما تعد عمليات خفض صافي القيمة الحالية والتكاليف الرأسمالية في السيناريوين (2) و (3) كبيرة بيد أن الفائدة القصوى يمكن رؤيتها في مصفوفة الألواح الكهروضوئية المطلوبة. وبمقارنة التكوين (ج) في السيناريوين (2) و (3)، نجد أن سعة مصفوفة الألواح الكهروضوئية يتم تقليلها من 456 كيلوواط إلى 179 كيلوواط- بنسبة 60% تقريباً. ويمكن للمصمم تحقيق هذا التوازن بين الموثوقية والتكلفة والمساحة اعتماداً على الموقف.

شبكة الكهرباء ومقارنات من حيث التكلفة

تتراوح الأسعار الحالية لبئع الكهرباء بالتجزئة لجميع القطاعات في المملكة العربية السعودية ما بين 0.048 دولار و 0.085 دولار/ كيلوواط في الساعة. وكما يتضح من الجدول (7)، فإن قيمة التكلفة المستوية للكهرباء للسيناريوين (1) و (2) (ما يقارب 0.35 و 0.20 دولار/

هناك قيمتان موضحتان في الشكل (3). تمثل الأولى إجمالي عدد الأراضي المناسبة لنشر محطات الشحن حسب تكوين معين (المحور الأيسر) باستخدام مخطط شريطي. أما الثانية فتوضح نسبة هذه الأراضي مقابل إجمالي عدد الأراضي في مدينة الرياض (المحور الأيمن) مع مخطط مبعثر باستخدام نقاط معينة الشكل. وقد تم ترتيب العدد المناسب للأراضي من الأصغر إلى الأكبر.

يمكن شرح الشكل (3) من خلال الاستعانة بمثال لفئة المستشفيات. وكما هو ملاحظ، هناك 21 قطعة أرض مندرجة تحت فئة المستشفيات يمكنها استيعاب محطة شحن بتكوين الطاقة الكهروضوئية/ البطارية (باللون الرمادي). ويرجع ذلك إلى أن هذا التكوين يحتاج إلى مساحة أكبر. ويمثل هذا العدد من الأراضي 18.4% من إجمالي الأراضي المخصصة لإنشاء المستشفيات. في حال تمت إضافة الهيدروجين إلى محطة الشحن، ستقل المساحة. هناك 7 قطع إضافية يمكن أن تستوعب محطة شحن، وبذلك يصل العدد الإجمالي إلى 28 (باللون الأزرق). وبالمثل، فإنه مع تكوين الطاقة الكهروضوئية/ البطارية/ الرياح، تقل المساحة بصورة أكبر مقارنة بالتكوين السابق، ما يؤدي إلى زيادة عدد الأراضي القادرة على استيعاب محطات الشحن. وبذلك، يزداد عدد الأراضي التي يمكنها استيعاب محطات الشحن إلى 37 (باللون الأخضر). وبالانتقال إلى تكوين الطاقة الكهروضوئية/ البطارية/ الرياح/ الهيدروجين مع تسوية الموثوقية، نجد أن هناك 49 قطعة أرض يمكنها استيعاب محطات الشحن (باللون الأصفر). ويمثل هذا العدد من الأراضي 43% من إجمالي القطع المخصصة لإنشاء المستشفيات. وهذا هو أقصى عدد ممكن من الأراضي لاستيعاب محطات الشحن ضمن فئة المستشفيات بسبب قيود التصميم. ويمكن قراءة باقي الشكل بنفس الطريقة.

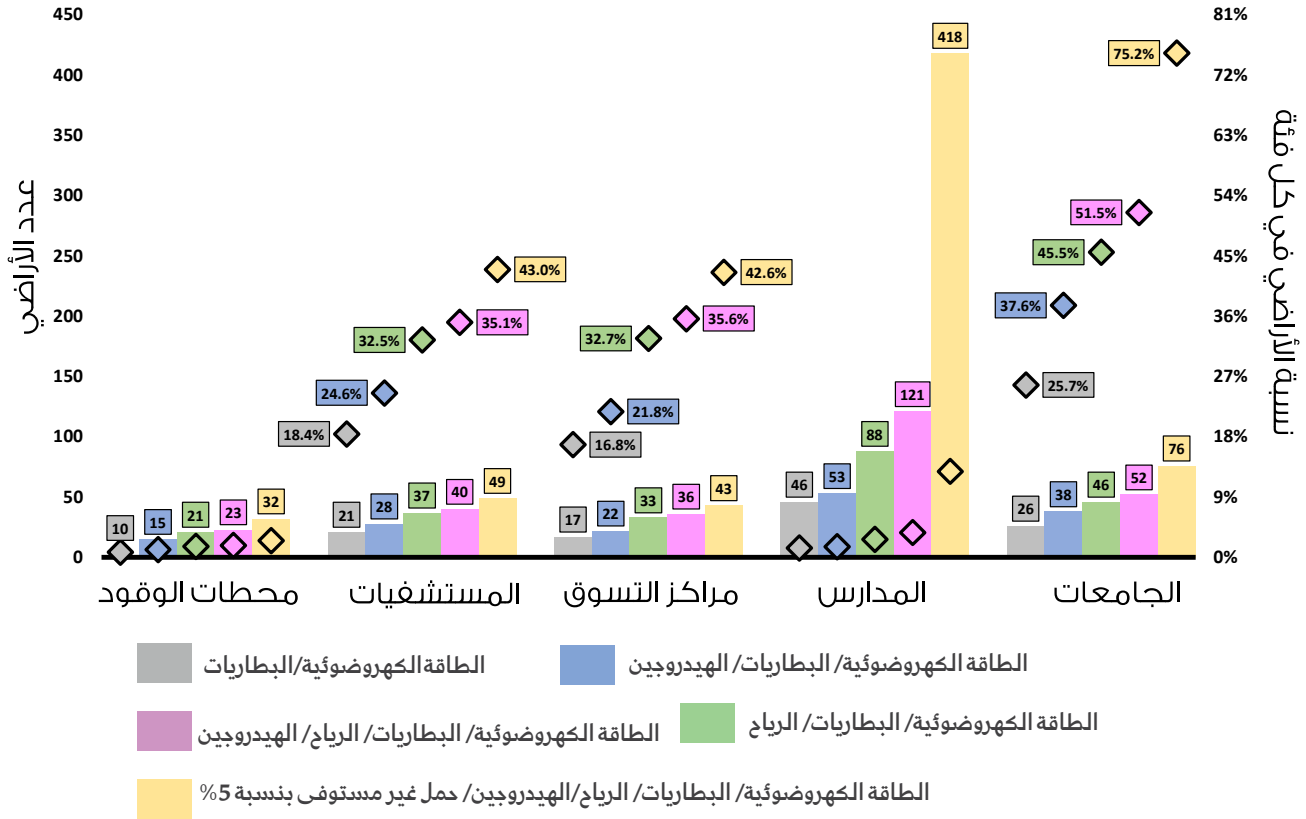
أفضل اقتصاديا للمستهلك. ومع ذلك، لاحظ أنه عند نشر السيارات الكهربائية، قد يحتاج مشغل شبكة التوزيع إلى ترقيةها. وإذا ثبت أن تكلفة الترقية أعلى من الحوافز المرتبطة بتوفير محطة شحن معزولة عن الشبكة، فعندها قد يوصى بإنشاء محطة شحن بدلا من المخاطرة بجودة الجهد داخل الشبكة. ولاحظ أيضا أن شبكة التوزيع ستحكمها القدرة على استضافة السيارات الكهربائية. بمعنى آخر، أنه يجب وضع تكلفة إنشاء محطة شحن معزولة عن الشبكة في سياق التعزيز المطلوب وقدرات الشحن القصوى في حي معين.

الآثار المترتبة على المساحة والسياسة بالنسبة لمدينة الرياض

لقد ثبت أن الهيدروجين يوفر العديد من المزايا فيما يتعلق بنشر محطات الشحن، بما في ذلك تقليل المساحة والتغلب على الصعوبات المرتبطة بنصب توربينات الرياح في مراكز المدن. يقدم الجدول (1) الوارد في القسم (2) ملخصا عالي المستوى لمساحات الأراضي في مدينة الرياض وساعدنا في وضع قيود واقعية. يوفر المزيد من التدقيق بمساعدة الجدول (7) رؤية إضافية حول عدد الأراضي التي يمكن أن تلبى احتياجاتنا. وهذا الأخير ممكن الآن بسبب عمليات المحاكاة المفصلة التي أجريت أعلاه.

يقدم الشكل (3) رؤية قيمة حول التغير في عدد الأراضي المناسبة (أي تلك التي يمكنها استيعاب محطة شحن بسعة 66 كيلوواط) وفقا للتكوين. ولأن التكوينات التي تتضمن الرياح ليست محل تركيزنا، لا نزال ندرجها لتحقيق الشمولية. وبالرجوع إلى النمذجة السابقة، يتضح أن الهيدروجين يقلل المساحة المطلوبة. بمعنى آخر أن عدد الأراضي التي يمكنها استيعاب محطات الشحن يزيد عندما يصبح الهيدروجين جزءا من مزيج توليد الطاقة. أضف إلى ذلك أنه في حال تم تخفيف مستوى الموثوقية، ستقل المساحة بصورة أكبر ويزيد عدد الأراضي التي يمكنها استيعاب محطات الشحن. وقد جرى ترجمة هذه البيانات النوعية إلى وصف كمي في الشكل (3) أدناه.

الشكل 3. ترحيل الحمل ليوم في شهر نوفمبر لتوضيح الفرق بين: (أ) التكوين "د" في السيناريو 1 و (ب) التكوين "د" في السيناريو 3.



المصدر: حسابات المؤلفين.

ومن بين الحالات الموضحة في الشكل (3)، يعد تكوين الطاقة الكهروضوئية/البطاريات/الهيدروجين هو التكوين الأنسب. فهذا التكوين يحقق التوازن بين التكلفة والمساحة والموثوقية ويتغلب على التحديات المرتبطة بنشر واستخدام توربينات الرياح. ومع أخذ ذلك في الاعتبار، نلاحظ أن 25% و 22% و 38% من الأراضي المخصصة لإنشاء مستشفيات ومراكز تسوق وجامعات، على التوالي يمكنها استيعاب محطات الشحن المعزولة عن الشبكة، وهذه نسب كبيرة. ومع ذلك، فإن أقل من 5% من الأراضي المخصصة لإنشاء محطات الوقود والمدارس يمكنها استيعاب مثل هذه المحطات. تتمثل إحدى طرق مواجهة هذا التحدي في تقليل مستوى الشحن من المستوى 2 إلى المستوى 1، أو تقليل الحد الأقصى لعدد السيارات التي يمكن شحنها في وقت واحد أو السماح بعدم تلبية جزء من الطلب.

يمكن التوصل إلى عدد من الملاحظات من خلال الشكل (3). وعلى الأخص، يمكننا ملاحظة أن عدد محطات الوقود المناسبة لاستيعاب محطات الشحن قليل من حيث النسبة المطلقة والنسبة المئوية. وملاحظة أنه في أقل المساحات هناك 32 قطعة أرض فقط مناسبة لإنشاء محطات الشحن. وهذا الرقم يمثل حوالي 3% من إجمالي الأراضي المخصصة لإنشاء محطات الوقود في مدينة الرياض. علاوة على ذلك، نلاحظ أنه ضمن فئة المدارس وفي الحالة القصوى، 15% من الأراضي المخصصة لإنشاء المدارس تعتبر مناسبة لإنشاء محطات شحن معزولة عن الشبكة في الموقع.

نجد أن طاقة الرياح توفر مزايا تتعلق بتقليل التكاليف والمساحات. ومع ذلك، لا تعتبر مثالية للنشر في مراكز المدن.

إن تخفيف متطلبات الموثوقية تخفيفاً طفيفاً، بعدم تلبية 5% من الحمل، يقلل من المساحة بنسبة كبيرة تصل إلى 50%. وفي حال لم تتم المساومة على الموثوقية، فيجب تقليل الحمل. ويمكن تحقيق ذلك إما بتقليل مستوى الشحن مع المحافظة على نفس عدد السيارات (أي زيادة مدة الشحن) أو تقليل عدد السيارات مع المحافظة على مستوى طاقة الشحن. ويمكن لنظام حجز عن طريق الإنترنت (مثلاً من خلال تطبيق على الهاتف المحمول) أن يدير تدفق السيارات وأنماط الشحن بصورة أفضل.

ومن منظور التكلفة المستوية للكهرباء، كانت محطات الشحن المعزولة عن الشبكة أكثر تكلفة من تعريفات الكهرباء الحالية السائدة في المملكة. وهذه النتيجة مهمة للمستثمرين والشركات الوطنية وصانعي السياسات. فالمستثمرون يمكنهم النظر في شراء الكهرباء من الشبكة وتركيب وحدات الشحن فقط بدلاً من بناء محطة كاملة بتقنيات توليد للطاقة. وبالمثل، قد ترغب شركات الخدمات، المسؤولة أيضاً عن التوزيع، في مقارنة التكاليف اللازمة لإنشاء محطة شحن معزولة عن الشبكة بتكاليف معينة لترقية شبكة التوزيع - مع الأخذ في الاعتبار الحد الأقصى لقدرات استضافة السيارات الكهربائية لكل شبكة. لاحظ أن الشبكات المتصلة بالشبكة والمعزولة عنها ليست متعارضة. ويمكن لصانعي السياسات أن يحسنوا تقييم الحوافز اللازمة لجذب المستثمرين نحو إنشاء محطات شحن معزولة عن الشبكة.

أما فيما يتعلق باستخدام الأراضي، فيظهر التحليل وجود نسبة كبيرة من الأراضي المخصصة لإنشاء مستشفيات و مراكز تسوق وجامعات يمكنها استيعاب

أجرت هذه الدراسة تقييماً جديداً لمتطلبات التكلفة المتعلقة باستخدام محطات شحن معزولة عن الشبكة في مدينة الرياض مع مراعاة أربعة جوانب مهمة في التصميم وهي: (1) المساحة المطلوبة و(2) التطبيق العملي لاستخدام توربينات الرياح داخل المدينة و (3) موثوقية الشبكة المصغرة و (4) المساحة الفعلية لقطع الأراضي وتقسيماتها. تم اختيار سعة 11 كيلوواط (أي الشحن من المستوى 2) و تقييد الشبكة المصغرة لتكون خالية من الكربون. وتبين أن الشبكة المصغرة التي تعمل بالطاقة الكهروضوئية/البطارية/ طاقة الرياح سوف تلبى الطلب بأقل تكلفة وبالأسعار الحالية. ومع ذلك، تحتاج الشبكة المصغرة التي تعمل بالطاقة الكهروضوئية/البطارية/ طاقة الرياح/ الهيدروجين إلى أقل مساحة. ويفترض كلا التكوينين إمكانية تركيب توربينة الرياح في مركز المدينة.

ومن المنظور العملي، قد يشكل نصب توربينات الرياح داخل المدينة مشكلة وذلك لعدة أسباب، بما فيها المباني المتجاورة مما يعيق تدفق الرياح، والأنظمة المحلية التي توضع الحد الأقصى لارتفاع المبنى، والمخاوف المتعلقة بالسلامة، والإزعاج، والمظهر الحضاري. ومن خلال تضمين هذا القيد في نموذج التحسين وافترض التكاليف الحالية للتقنية، نجد أن تكوين/ استخدام الطاقة الكهروضوئية والبطارية هو الأكثر فعالية من حيث التكلفة وأن محطة الشحن التي تعمل بالطاقة الكهروضوئية/البطارية/ الهيدروجين تحتاج إلى أقل بصمة/ مساحة. بعبارة أخرى، أن الهيدروجين يوفر ميزة تقليل إجمالي المساحة المطلوبة لإنشاء محطة شحن بنسبة 25% تقريباً، وبتكلفة أعلى إلى حد ما (رأس مال أكبر بنسبة 4%). لاحظ أن المساحة يتم تقليلها مع المحافظة على نفس المستوى من الموثوقية. وبحلول عام 2030، سيسهم الهيدروجين في توفير مساحات أقل وبتكاليف أقل مع المحافظة على نفس المستوى من الموثوقية. ويفترض هذا التوقع أن تتبع تقنيات الهيدروجين منحنيات التعلم المتوقعة. وبشكل عام،

تقليل مصفوفة الألواح الكهروضوئية المطلوبة (أي المساحة). وفي حال الرغبة في نشر المزيد من محطات الشحن، يوصى بتقليل إما مستوى الشحن أو الحد الأقصى للسيارات التي يمكن شحنها في وقت واحد أو كليهما.

محطات الشحن المعزولة عن الشبكة. ومع ذلك، فإن أقل من 5% من الأراضي المندرجة تحت فئة محطات الوقود والمدارس يمكن أن تستوعب محطات الشحن المعزولة عن الشبكة. تجدر الإشارة إلى أن دمج الهيدروجين في تصميم محطة الشحن يزيد من عدد الأراضي التي يمكن أن تستوعب محطات الشحن بنسبة 15-45% عن طريق

Azuara Grande, Luis Santiago, Imene Yahyaoui, and Santiago Arnaltes Gómez. 2018. "Energetic, economic and environmental viability of off-grid PV-BESS for charging electric vehicles: Case study of Spain." *Sustainable Cities and Society*. 37:519-529. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.009>

Afshar, Shahab, Pablo Macedo, Farog Mohamed, and Vahid Disfani. 2021. "Mobile charging stations for electric vehicles—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 152:111654. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111654>

Al Wahedi, Abdulla, and Yusuf Bicer. 2020a. "A Case Study in Qatar for Optimal Energy Management of an Autonomous Electric Vehicle Fast Charging Station with Multiple Renewable Energy and Storage Systems." *Energies* 13 (19):5095. <https://doi.org/10.3390/en13195095>

Al Wahedi, Abdulla, and Yusuf Bicer. 2020b. "Development of an off-grid electrical vehicle charging station hybridized with renewables including battery cooling system and multiple energy storage units." *Energy Reports*.6:2006-2021. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.07.022>

Bansal, Saumya, Yi Zong, Shi You, Lucian Mihet-Popa, and Jinsheng Xiao. 2020. "Technical and economic analysis of one-stop charging stations for battery and fuel cell EV with renewable energy sources." *Energies* 13 (11):2855. <https://doi.org/10.3390/en13112855>

Bayram, Islam Safak, Vahraz Zamani, Ryan Hanna, and Jan Kleissl. 2016. "On the evaluation of plug-in electric vehicle data of a campus charging network." *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. <https://doi.org/10.1109/energycon.2016.7514026>

Bian, Caiyun, Hailong Li, Fredrik Wallin, Anders Avelin, Lu Lin, and Zhixin Yu. 2019. "Finding the optimal location for public charging stations—a GIS-based MILP approach." *Energy Procedia* 158:6582-6588. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.071>

Brändle, Gregor, Max Schönfisch, and Simon Schulte. 2021. "Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen." *Applied Energy* 302:117481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117481>

Buttler, Alexander, and Hartmut Spliethoff. 2018. "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (3):2440-2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>

Caumon, Pauline, Miguel Lopez-Botet Zulueta, Jérémy Louyrette, Sandrine Albou, Cyril Bourasseau, and Christine Mansilla. 2015. "Flexible hydrogen production implementation in the French power system: Expected impacts at the French and European levels." *Energy* 81:556-562. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.073>

Colafranceschi, Daniela, Pere Sala, and Fabio Manfredi. 2021. "Nature of the Wind, the Culture of the Landscape: Toward an Energy Sustainability Project in Catalonia." *Sustainability*.13 (13):7110. <https://doi.org/10.3390/su13137110>

Cole, Wesley, Will Frazier, and Chad Augustine. 2021. Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update. USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://doi.org/10.2172/1786976>

- Ekren, Orhan, Celal Hakan Canbaz, and Çetin Berk Güvel. 2021. "Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software." *Journal of Cleaner Production* 279:123615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123615>
- Elshurafa, Amro M, Hatem Alatawi, Salaheddine Soummane, and Frank A Felder. 2021. "Assessing effects of renewable deployment on emissions in the Saudi power sector until 2040 using integer optimization." *The Electricity Journal* 34 (6):106973. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106973>
- Elshurafa, Amro M, Abdullah M Alsubaie, Ayman A Alabduljabbar, and Shafi A Al-Hsaien. 2019. "Solar PV on mosque rooftops: Results from a pilot study in Saudi Arabia." *Journal of Building Engineering* 25:100809. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100809>
- Elshurafa, Amro M, and Abdel Rahman Muhsen. 2019. "The Upper Limit of Distributed Solar PV Capacity in Riyadh: A GIS-Assisted Study." *Sustainability* 11 (16):4301. <https://doi.org/10.3390/su11164301>
- Elshurafa, Amro M, and Nawaz Peerbocus. 2020. "Electric vehicle deployment and carbon emissions in Saudi Arabia: a power system perspective." *The Electricity Journal* 33 (6):106774. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106774>
- Fachrizal, Reza, Mahmoud Shepero, Magnus Åberg, and Joakim Munkhammar. 2021. "Optimal PV-EV sizing at solar powered workplace charging stations with smart charging schemes considering self-consumption and self-sufficiency balance." *Applied Energy* 307:118139. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118139>
- Ghotge, Rishabh, Ad van Wijk, and Zofia Lukszo. 2021. "Off-grid solar charging of electric vehicles at long-term parking locations." *Energy* 227:120356. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120356>
- Hafez, Omar, and Kankar Bhattacharya. 2017. "Optimal design of electric vehicle charging stations considering various energy resources." *Renewable Energy* 107:576-589. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.066>
- Hall, Dale, and Nic Lutsey. 2017. *Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure*. Washington, USA: International Council on Clean Transportation. https://www.researchgate.net/publication/320211098_Emerging_best_practices_for_electric_vehicle_charging_infrastructure
- Karmaker, Ashish Kumar, Md Raju Ahmed, Md Alamgir Hossain, and Md Mamun Sikder. 2018. "Feasibility assessment & design of hybrid renewable energy based electric vehicle charging station in Bangladesh." *Sustainable Cities and Society* 39:189-202. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.035>
- Khalid, Mohd Rizwan, Mohammad Saad Alam, Adil Sarwar, and MS Jamil Asghar. 2019. "A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid." *I.c.e Transportation* 1:100006. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100006>
- Khalid, Mohd Rizwan, Irfan A Khan, Salman Hameed, MS Jamil Asghar, and Jong-Suk Ro. 2021. "A Comprehensive Review on Structural Topologies, Power Levels, Energy Storage Systems, and Standards for Electric Vehicle Charging Stations and Their Impacts on Grid." *IEEE Access* 9. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3112189>
- Lubitz, William David. 2014. "Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine." *Renewable Energy* 61:69-73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.015>

- Mehrjerdi, Hasan. 2019. "Off-grid solar powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage." *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (23):11574-11583. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.158>
- Mohamed, Khalid, Henok K Wolde, Al Munther S Al-Farsi, Razi Khan, and Salma MS Alarefi. 2020. "Opportunities for an off-Grid Solar PV Assisted Electric Vehicle Charging Station." *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*. <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310376>
- Mongird, Kendall, Vilayanur Viswanathan Jan Alam, Charlie Vartanian, Vincent Sprenkle, and Richard Baxter. 2020. *2020 Grid energy storage technology cost and performance assessment*. Richland, WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory. <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>
- Mozafar, Mostafa Rezaei, Mohammad H Moradi, and M Hadi Amini. 2017. "A simultaneous approach for optimal allocation of renewable energy sources and electric vehicle charging stations in smart grids based on improved GA-PSO algorithm." *Sustainable Cities and Society* 32:627-637. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.007>
- Nguyen, T, Z Abdin, T Holm, and W Mérida. 2019. "Grid-connected hydrogen production via large-scale water electrolysis." *Energy Conversion and Management* 200:112108. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112108>
- Nizam, Muhammad, and FX Rian Wicaksono. 2018. "Design and Optimization of Solar, Wind, and Distributed Energy Resource (DER) Hybrid Power Plant for Electric Vehicle (EV) Charging Station in Rural Area." *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. <https://doi.org/10.1109/icevt.2018.8628341>
- Răboacă, Maria-Simona, Irina Băncescu, Vasile Preda, and Nicu Bizon. 2020. "An optimization model for the temporary locations of mobile charging stations." *Mathematics* 8 (3):453. <https://doi.org/10.3390/math8030453>
- Razmjoo, Armin, L Gakenia Kaigutha, MA Vaziri Rad, Mousa Marzband, A Davarpanah, and M Denai. 2021. "A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO² emissions in a high potential area." *Renewable Energy* 164:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>
- Saudi Gazzette, 2014. "Lucid to start manufacturing electric cars in Saudi Arabia in 2024." *Saudi Gazette*. Accessed January 5, 2022. <https://saudigazette.com.sa/article/610722>.
- Sugihara, Hideharu, and Tsuyoshi Funaki. 2020. "Increasing electric vehicle hosting capacity and equality for fast charging stations using residential photovoltaics in medium - and low-voltage distribution networks." *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 15 (3):364-371. <https://doi.org/10.1002/tee.23064>
- Shiva Kumar, S, and V Himabindu. 2019. "Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review." *Materials Science for Energy Technologies* 2 (3):442-454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

Sun, Zhuo, Wei Gao, Bin Li, and Longlong Wang. 2020. "Locating charging stations for electric vehicles." *Transport Policy* 98:48-54. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.07.009>

Umer, Farhana, Muhammad Shehzad Aslam, Muhammad Shoaib Rabbani, Muhammad Javed Hanif, Nadeem Naeem, and Muhammad Tafseer Abbas. 2019. "Design and optimization of solar carport canopies for maximum power generation and efficiency at Bahawalpur." *International Journal of Photoenergy* 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6372503>

Wang, Yun, Milad Kazemi, Sayyad Nojavan, and Kittisak Jermsittiparsert. 2020. "Robust design of off-grid solar-powered charging station for hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach." *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (38):18995-19006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.098>

Xu, Ziyang, Jing Wei, Shijie Zhang, Zhirou Liu, Xiangqian Chen, Qiang Yan, and Jianpeng Guo. 2021. "A state-of-the-art review of the vibration and noise of wind turbine drivetrains." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 48:101629. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101629>

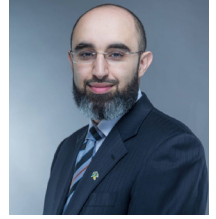
Zell, Erica, Sami Gasim, Stephen Wilcox, Suzan Katamoura, Thomas Stoffel, Husain Shibli, Jill Engel-Cox, and Madi Al Subie. 2015. "Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia." *Solar Energy* 119:422-438. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.031>

Zhang, Cong, Jeffery B Greenblatt, Max Wei, Josh Eichman, Samveg Saxena, Matteo Muratori, and Omar J Guerra. 2020. "Flexible grid-based electrolysis hydrogen production for fuel cell vehicles reduces costs and greenhouse gas emissions." *Applied Energy* 278:115651. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115651>

- Imbs, Jean, and Romain Wacziarg. 2003. "Stages of Diversification." *American Economic Review* 93(1):63–86. DOI: <https://doi.org/10.1257/000282803321455160>
- Johansen, Søren. 1988. "Statistical Analysis of Cointegration Vectors." *Journal of Economic Dynamics and Control* 12(2-3):231–54. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1889\(88\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0165-1889(88)90041-3)
- Johansen, Søren, and Katarina Juselius. 1990. "Maximum Likelihood Estimation and Inference on Cointegration—With Applications to the Demand for Money." *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 52(2):169–210. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x>
- . 1992. "Testing Structural Hypothesis in a Multivariate Cointegration Analysis of the PPP and the UIP for UK." *Journal of Econometrics* 53:211–2. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90086-7)
- Jongwanich, Juthathip. 2010. "Determinants of Export Performance in East and Southeast Asia." *World Economy* 33(1):20–41. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9701.2009.01184.x>
- Juselius, Katarina. 2006. *The Cointegrated VAR Model: Methodology and Applications*. Oxford: Oxford University Press.
- Kalaitzi, Athanasia Stylianou, and Trevor William Chamberlain. 2020. "The Validity of the Export-led Growth Hypothesis: Some Evidence from the GCC." *The Journal of International Trade & Economic Development* 30(2):1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/09638199.2020.1813191>
- Kalcheva, Katerina, and Nienke Oomes. 2007. "Diagnosing Dutch Disease; Does Russia Have the Symptoms?" International Monetary Fund No. 2007/102.
- Kayed, Rasem N., and M. Kabir Hassan. 2011. "Saudi Arabia's Economic Development: Entrepreneurship as a Strategy." *International Journal of Islamic and Middle Eastern Finance and Management* 4(1):52–73. DOI: <https://doi.org/10.1108/17538391111122203>
- Kim, Jaebeom, Masao Ogaki, and Minseok Yang. 2007. "Structural Error Correction Models: A System Method for Linear Rational Expectations Models and an Application to an Exchange Rate Model." *Journal of Money, Credit and Banking* 39(8): 2057–75. DOI: <https://doi.org/10.1108/17538391111122203>
- Leamer, Edward E., and Robert M. Stern. 1970. *Quantitative International Economics*. Boston: Allyn and Bacon.
- Lederman, Daniel, and William F. Maloney. 2003. "Trade Structure and Growth." Policy Research Working Paper No. 3025, The World Bank.
- Limao, Nuno, and Anthony J. Venables. 2001. "Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs and Trade." *The World Bank Economic Review* 15(3):451–79. DOI: <https://doi.org/10.1093/wber/15.3.451>
- Lipschitz, Leslie, and Donogh McDonald. 1992. "Real Exchange Rates and Competitiveness." *Empirica* 19(1):37–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00924805>
- Looney, Robert E. 1989. "Saudi Arabia's Development Strategy: Comparative Advantage vs. Sustainable Growth." Naval Postgraduate School, Monterey C.A.
- Lukonga, Inutu. 1994. "Nigeria's Non-oil Exports: Determinants of Supply and Demand, 1970-90." International Monetary Fund, African Department, No. 94/49.

نبذة تعريفية عن الباحثين

عمرو الشرفاء



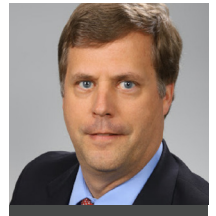
زميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). يتمتع بـ 20 عامًا من الخبرة في مجال الطاقة والتقنية والتي اكتسبها من خلال عمله في ثلاث قارات. يهتم في مجال أبحاثه بسياسات الطاقة المتجددة، ونمذجة نظم الطاقة، وتصميم وتحسين الشبكات المصغرة الهجينة. قاد ونفذ العديد من مبادرات النمذجة الوطنية على نطاق التوزيع والمرافق. واعتمدت شركة بريتيش بتروليوم "BP" بعض جوانب أبحاثه في إنشاء مراجعتها الإحصائية السنوية. نشر أكثر من 40 دراسة وبحث علمي وسجل العديد من براءات الاختراع. وهو حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية، ودرجة ماجستير العلوم في المالية.

عبدالرحمن محسن



زميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). حاصل على شهادة في نظم المعلومات الجغرافي (GISP)، وخبرته تمتد لأكثر من 18 عامًا في مجال نظم المعلومات الجغرافية وإدارة البيانات المكانية. تركز أبحاثه على نمذجة الاقتصاد المكاني لفهم التفاعلات بين الأنشطة الاقتصادية والطلب على الطاقة واستخدام الأراضي والنقل في المدن والتنبؤ بها بشكل أفضل. عمل قبل كابسارك في شركات عالمية مشهورة، مثل أكسنشر "Ac-centure" وإسري "ESRI" في أمريكا الشمالية والشرق الأوسط. وعمل قائدًا تقنيًا ومستشارًا أول، حيث وجّه العملاء في قطاع الطاقة حول كيفية استخراج القيمة من أصول البيانات الجغرافية المكانية واستثمارات نظم المعلومات الجغرافية. وهو حاصل على درجة الماجستير في الهندسة الجيوماتيكية من جامعة كالغاري في كندا.

فرانك فيلدر



مهندس ومحلل لسياسات الطاقة ومدير لبرنامج تحويلات الطاقة والكهرباء. عمل قبل انضمامه لكابسارك أستاذًا باحثًا في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز، ومديرًا لمعهد روتجرز للطاقة ومديرًا لمركز الطاقة والاقتصاد والسياسة البيئية. وقد أجرى بحثًا في مجالات نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية والسياسات المتعلقة بالطاقة النظيفة وتغير المناخ للمؤسسات الأكاديمية والوكالات الحكومية وقطاعات الطاقة. كما عمل مستشارًا اقتصاديًا ومهندسًا نوويًا.

حول المشروع:

يهدف هذا المشروع إلى تحديد الآثار المترتبة على التكلفة والمساحة والموثوقية لاستخدام الهيدروجين في محطات شحن السيارات الكهربائية المعزولة عن الشبكة من خلال الاستعانة بنموذج للتدسين وتحليل من خلال نظام المعلومات الجغرافية لمدينة الرياض في المملكة العربية السعودية.



www.kapsarc.org