

# مرور عام على حادثة انقطاع التيار الكهربائي في ولاية تكساس الأمريكية: الدروس المستفادة لنظم الطاقة الكهربائية الموثوقة والمرنة

ماري بيتيتيت وخالد الحضرمي وفرانك فيلدر

## عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحثاً 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 بحث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

## إشعار قانوني

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

شهدت ولاية تكساس الأمريكية في شهر فبراير من عام 2021 موجة برد شديدة تسببت في انقطاع الكهرباء عن ملايين المنازل، مما أدى إلى وفاة أكثر من مائتي شخص وإلحاق أضرار اقتصادية بلغت قيمتها حوالي 100 مليار دولار. كما تم استخدام حادثة انقطاع الكهرباء في تكساس لدعم العديد من اللدعاءات المتعلقة بالطاقة المتجددة، وأسواق الكهرباء، وتغير المناخ. غير أننا نحدد في هذه الدراسة محركات انقطاع الكهرباء في تكساس، والدروس المستفادة منذ ذلك الحين، وتنطبق هذه الدروس بصفة خاصة على أنظمة الطاقة الكهربائية حول العالم. بما فيها أنظمة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية ومنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.

# 1. المقدمة: حادثة انقطاع الكهرباء في ولاية تكساس 2021

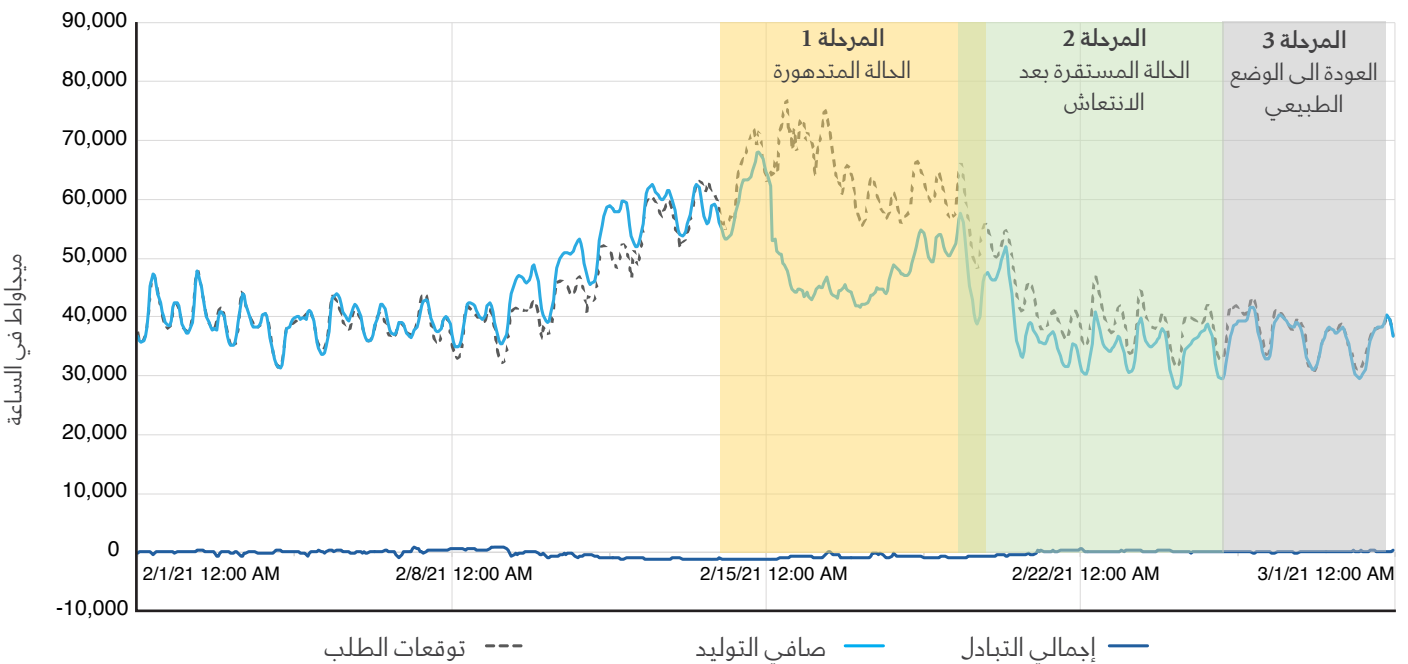
المتوقع (انظر المرحلة 1). بعد ذلك، استقر النظام ولكنه كان لا يزال غير قادر على تلبية الطلب المتوقع (انظر المرحلة 2). وأخيرًا، عاد النظام إلى طبيعته، وتم تلبية الطلب (انظر المرحلة 3).

قدر البنك الاحتياطي الفيدرالي في دالاس الأضرار الاقتصادية الناجمة عن هذه الحادثة بما يتراوح بين 80 و130 مليار دولار من التكاليف المباشرة وغير المباشرة، و4.3 مليار دولار في القيمة الإجمالية للحمل المفقود<sup>1</sup>، وما يتراوح ما بين 10 إلى 20 مليار دولار في تكاليف التأمين (Golding, Kumar and Mertens 2021). كما ارتفعت أسعار البيع بالجملة للغاز والكهرباء: ارتفعت أسعار الغاز الطبيعي بمعامل 40، ووصلت أسعار الكهرباء إلى 9000 دولار لكل ميغاواط في الساعة (الحد الأقصى لسعر سوق مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس)<sup>2</sup>، بزيادة بمعامل 200.

شهدت تكساس في الفترة من 15 إلى 18 فبراير 2021، عواصف شتوية قاسية أدت إلى انقطاعات كبيرة وطويلة الأمد في التيار الكهربائي، مع تقليص ثابت للأحمال بمتوسط يبلغ 14 جيجاواط لما يقارب 70 ساعة (FERC-NERC 2021). وأدى ذلك إلى ترك أكثر من 4.5 مليون أسرة بدون كهرباء (FERC-NERC 2021) بعضها لمدة أربعة أيام، وتسبب ذلك أيضا في 210 حالات وفاة على الأقل (Hauser and Sandoval 2021). كانت العوامل الرئيسية المساهمة في انقطاع التيار الكهربائي تتمثل في الطلب المرتفع على الكهرباء لتلبية احتياجات التدفئة (تم التقليل من الطلب بنسبة 14 ٪)، والفيشل الشامل وغير المتوقع في التوليد بسبب عاصفة الشتاء الشديدة (FERC-NERC 2021).

تميزت المرحلة الأولى من الحدث كما هو موضح في الشكل 1، بوجود تباين كبير بين التوليد الفعلي والطلب

**الشكل 1.** نظرة عامة على الطلب المتوقع وصافي التوليد وإجمالي التغير (بالميغاواط في الساعة) في مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس (ERCOT) في فبراير 2021، بالتوقيت المركزي.



المصدر: المؤلفون، بناءً على بيانات من إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (2021a).

## 1. المقدمة: حادثة انقطاع الكهرباء في ولاية تكساس 2021

مخاوف كبيرة في صيف عام 2021 حول "ارتفاع مخاطر حالات الطوارئ المتعلقة بالطاقة" (NERC 2021a).

خلال انقطاع التيار الكهربائي في تكساس في فبراير 2021، حدد البعض مصادر الطاقة المتجددة بوصفها سبب فشل نظام الكهرباء، مثل بعض وسائل الإعلام وحاكم تكساس جريج أبوت في 14-15 فبراير 2021 (Carlson 2021; Reuters Staff 2021). وجدت تقارير متعددة (FERC-NERC 2021: Energy Institute of the University of Texas at Austin 2021) لاحقاً أن جميع تقنيات التوليد شهدت فشلاً كبيراً بسبب الظروف الجوية القاسية وأن مصادر الطاقة المتجددة لم تكن المشكلة الرئيسية نظراً لأن حصة توليد الطاقة المتجددة تكون في العادة منخفضة خلال هذه الفترة من العام.

يمكن تعلم العديد من الدروس بالنظر إلى شدة انقطاع التيار الكهربائي في تكساس في شهر فبراير من عام 2021 والمناقشات التي بدأتها بشأن أدوار طاقة الرياح والطاقة الشمسية، وهيكلة السوق والفشل السياسي والتنظيمي. تناقش هذه الدراسة الدروس الرئيسية التي تتضمنها لأنظمة الكهرباء الأخرى، بما فيها تلك غير المعرضة للطقس شديد البرودة. وسيكون الجزء المتبقي من هذه الدراسة على النحو التالي. يقدم القسم 2 معلومات أساسية أولية. يقترح القسم 3 ستة دروس رئيسية لأنظمة كهرباء موثوقة ومرنة تنطبق على أنظمة الكهرباء في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك دول مجلس التعاون الخليجي ومنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. وأخيراً، يشمل القسم 4 الخاتمة التي توفر توصيات لصناع السياسات.

لم يكن وقوع حدث البرودة الشديدة هذا الأول من نوعه في ولاية تكساس، إذ وقعت أربعة أحداث أخرى أثرت على جنوب وسط الولايات المتحدة الأمريكية وتكساس على مدار الأربعين عامًا الماضية: وذلك في شهر ديسمبر عام 1983، وشهر ديسمبر من عام 1989، وفبراير 2011، وشهر يناير عام 2018. ويعد فهم آثار هذه الأحداث الجوية ضرورياً لتطوير خطط الاستعداد للطقس البارد وتدابير الحماية لشبكة الكهرباء ومرافق البنية التحتية للغاز الطبيعي. ويقارن الجدول 1 بين هذه الأحداث الخمسة. ويوضح الجدول أن حادثة عام 2021 كانت الأكثر شدة من حيث درجات الحرارة المنخفضة، وسرعة الرياح مقارنة بأحداث أعوام 2011 و2018. ومع ذلك، واجهت منشآت نظام الكهرباء في تكساس مشكلات مماثلة خلال هذه الأحداث، متمثلة في التجميد ومشاكل إمدادات وقود الغاز، التي كان من الممكن أن يساعد جمع البيانات وتحليلها في إعداد النظام بشكل أفضل لمثل هذه الظواهر الجوية الشديدة.

عانت ولاية تكساس في الماضي من ذروة حمل الكهرباء في فصل الصيف، عندما تكون درجات الحرارة مرتفعة ويكون من الضروري استخدام تكييف الهواء. حيث بلغت أعلى ذروة حمل لها 74.8 جيجاواط في شهر أغسطس من عام 2019، وقد تم تجاوزها خلال حادثة انقطاع التيار الكهربائي في شهر فبراير 2021، إذ تم تقدير ذروة الحمل فيها بأنها بلغت 76.8 جيجاواط (FERC-NERC 2021). ومع ذلك، فشلت سلسلة إمداد الكهرباء في توفير ما يكفي من الكهرباء لأن ذروة الحمل حدثت خلال طقس يتسم بالبرودة الشديدة. ولم تشهد تكساس انقطاعاً ملحوظاً للكهرباء يرتبط بموجات الحر، ولكن أثرت

## 1. المقدمة: حادثة انقطاع الكهرباء في ولاية تكساس 2021

**الشكل 1.** نظرة عامة على الطلب المتوقع وصافي التوليد وإجمالي التغيير (بالميجاواط في الساعة) في مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس (ERCOT) في فبراير 2021، بالتوقيت المركزي.

ملاحظات جديرة بالذكر	ذروة هبوب الرياح (كم / ساعة)	درجة الحرارة (C°)	أسباب عدم توفر التوليد	التوليد غير متوفر بسبب الطقس البارد، في أسوأ نقطة (ميجاواط)	حدث الطقس البارد
7 جبهات باردة منفصلة خلال هذا الحدث	55				1983 (ديسمبر 20 - 26)
أبرد شتاء مسجل في منطقة جالفيس تون / هيوستن.	55				1989 (ديسمبر 19 - 25)
حدث انقطاع التيار مع قدرة خفض قصوى للحمل تبلغ 5.4 جيجاواط.	50	9 إلى 20 أقل من المتوسط	مشاكل التجمد، المشاكل الميكانيكية / الكهربائية، مشاكل وقود الغاز الطبيعي	14,702	2011 (فبراير 1 - 6)
كان هذا الحدث الأكثر شدة في شرق تكساس. حدثت إدارة طوعية للحمل فقط.	51	7 إلى 16 أقل من المتوسط	مشاكل التجمد، المشاكل الميكانيكية / الكهربائية، مشاكل وقود الغاز الطبيعي	15,600	2018 (يناير 12 - 18)
الأكثر تشابهاً مع حدث 1983: فترة طويلة من البرد مع جبهات متعددة تؤثر على مساحة واسعة من الولايات المتحدة الأمريكية.	66	22 إلى 28 أقل من المتوسط	مشاكل التجمد، مشاكل إمداد الغاز الطبيعي، المشاكل الميكانيكية / الكهربائية	65,622	2021 (فبراير 12 - 20)

المصدر: المؤلفون، بناءً على بيانات من إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (2021a).

## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

الطلب على الكهرباء في جميع الأوقات تقريبًا. هناك تعريفات متعددة ومتنافسة للموثوقية والمرونة في سياق أنظمة الطاقة الكهربائية (Billinton and Allan 1984; Kahn mouei, Bolandi, and Haghifam 2017; Phillips 2019; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019; Plotnek and Slay 2021). يعرض الجدول 2 تعريفات لبعض المصطلحات من الكتيبات التشغيلية في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا. ورغم أنه لا يتم تعريف المرونة بشكل عام في هذه الكتيبات، إلا أنه يتم استخدام الموثوقية بدلاً من ذلك. في الدراسات السابقة الأكاديمية، تغير تعريف المرونة بشكل كبير بمرور الوقت (Plotnek and Slay 2021).

سلط انقطاع الكهرباء في تكساس 2021 الضوء على أهمية أنظمة الكهرباء الموثوقة والمرنة، وبخاصة في أثناء الظروف الشديدة. وقبل مناقشة الدروس المستفادة من هذا الانقطاع في الكهرباء وغيرها من الدروس الرئيسية، يقدم هذا القسم باختصار المعلومات الضرورية المتعلقة بالأطر التحليلية لموثوقية ومرونة أنظمة الكهرباء. كما يناقش تطوير مصادر الطاقة المتجددة والعواقب المرتبطة بها على أنظمة الكهرباء.

### 1.2. أهمية تحديد الموثوقية والمرونة والمصطلحات الأخرى المرتبطة بها

من الناحية المثالية، تم تصميم أنظمة الكهرباء لتلبية

### الجدول 2. تعريف المصطلحات الرئيسية للموثوقية والمرونة.

التعريف الأوروبي	تعريف الولايات المتحدة الأمريكية	
قدرة النظام الكهربائي على توفير متطلبات إجمالي الطلب على الكهرباء والطاقة للملاءم في جميع الأوقات، مع النظر في الانقطاعات المجدولة والمتوقعة بشكل معقول وغير المجدولة لعناصر النظام. (NERC 2021b; UCTE 2004b)	كفاية	
درجة أداء عناصر منشآت النظام الكهربائي الذي ينتج عنه توصيل الكهرباء للملاءم ضمن المعايير المقبولة وبالكفاءة المطلوبة. يمكن قياسه بالتردد والمدة والحجم (أو الاحتمال) للتأثيرات المعاكسة على إمداد/نقل/توليد الكهرباء. يمكن معالجة موثوقية النظام الكهربائي من خلال النظر في جانبين أساسيين ووظيفيين للنظام الكهربائي، هما الكفاءة والأمان. (UCTE 2004b)	الموثوقية	
قدرة النظام الكهربائي على تحمل الاضطرابات المفاجئة مثل قصر الدائرة الكهربائية أو الفقد غير المتوقع لعناصر النظام. (UCTE 2004b)	الأمن	
قدرة النظام الكهربائي على الحفاظ على حالة توازن أثناء ظروف أو اضطرابات النظام العادية وغير الطبيعية. (NERC 2021b; UCTE 2004b)	الاستقرار	

ملحوظة: NERC تعني مؤسسة الموثوقية الكهربائية لأمريكا الشمالية.

المصادر: المؤلفون، بناءً على (NERC 2007) و (NERC 2021b) وإدارة معلومات الطاقة الأمريكية 2022 للتعريفات الأمريكية و اتحاد تنسيق نقل الكهرباء (UCTE) (2004b) للتعريفات الأوروبية.

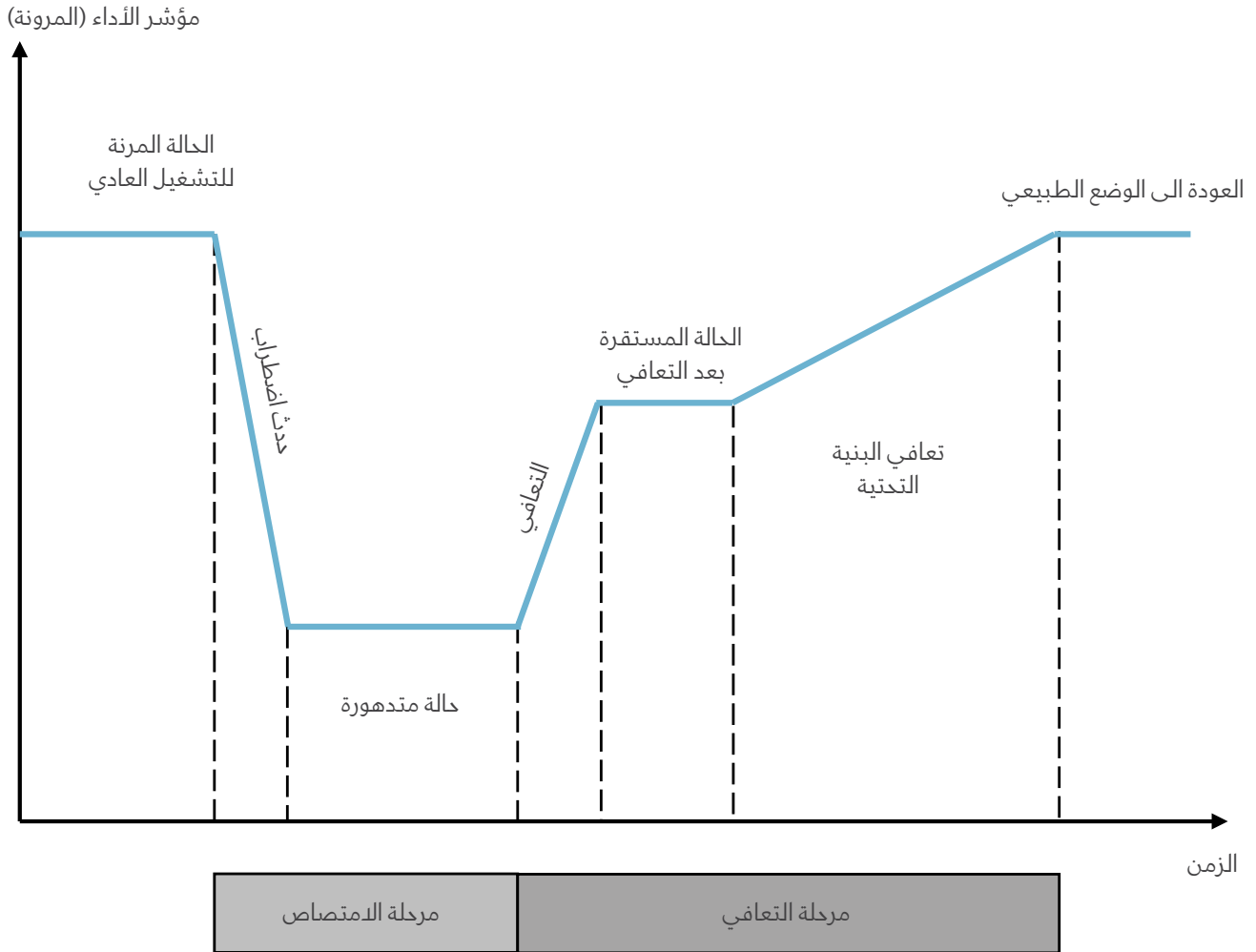
## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

إلى حالة مرونة طبيعية بعد حدوث اضطراب، كما هو موضح في الشكل 2. وتتوافق حالة التشغيل العادية مع وضع مرن يمكن وصفها بأنها قوية ومقاومة (Panteli and Mancarella 2015). بعد حدوث اضطراب حرج، يكون نظام الكهرباء في حالة متدهورة لفترة معينة: مرحلة الامتصاص تكون خلالها المرونة منخفضة. يمكن تقسيم مرحلة التعافي إلى مرحلتين فرعيتين: التعافي السريع للتشغيل الذي يسمح للنظام بالاستقرار عند مستوى مرونة أعلى، ومرحلة أطول ضرورة لتعافي البنية التحتية (على سبيل المثال، أنظمة إمداد الوقود ووحدات التوليد وشبكات النقل والتوزيع).

لتجنب التداخل مع تعريف الموثوقية، يمكن تعريف المرونة على أنها ما يحدث بعد وقوع حدث اضطراب (Phillips 2019)؛ أي قدرة الشبكة على التعافي من حادثة انقطاع التيار الكهربائي غير المنضبط أو المتعاقب أو انقطاع التيار الكهربائي الموزع. يعتمد مستوى المرونة على سياسات المرونة التي يتم اتخاذها بالطبع قبل الانقطاعات. كما تتضمن المرونة القدرة على التعافي من الأحداث الشديدة التي تتميز بتأثيرات عالية واحتمالات منخفضة (EPRI 2022).

بغض النظر عن كيفية تعريف المصطلحات في كتيبات الموثوقية، يظل الهدف ضمان أن تعافي نظام الكهرباء

الشكل 2. حدث مهم والمصطلحات المرتبطة به.



المصدر: المؤلفون، بناءً على (Panteli and Mancarella (2015) و (Umunnakwe et al. (2021).



## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

لتحقيق أنظمة كهرباء موثوقة ومرنة، يتم تطوير تحليلات الموثوقية والمرونة على المديين المتوسط والبعيد، وخطط وسياسات تشغيلية بواسطة مشغلي الشبكات وغيرهم من أجل الحد من تكرار الأحداث المهمة ومدتها الزمنية. وتتبع تحليلاتهم بشكل عام الأهداف والآفاق الموضحة في الجدول 3.

### الجدول 3. التحليلات النموذجية لموثوقية ومرونة أنظمة الكهرباء.

وصف التحليل	المدى	
التوازن بين العرض والطلب، بناءً على سيناريوهات متعددة للطلب على الكهرباء وسعات التوليد المتوقعة. قد تهمل بعض الدراسات قيود الشبكة.	المدى البعيد	كفاية الموارد
الحاجة إلى تطوير الشبكة على نطاقات مكانية مختلفة (الربط البيني، النقل الإقليمي أو التوزيع الإقليمي الفرعي) لتلبية معايير الموثوقية.	المدى البعيد	تخطيط البنية التحتية للنقل والتوزيع
التوازن بين الطلب والعرض في المدى المتوسط، مع التركيز على النقاط الشديدة، مع نمذجة تفصيلية للموازنة الفورية واحتياجات المرونة.	المدى المتوسط	الموثوقية التشغيلية
استقرار الشبكة على المدى المتوسط، مع التركيز على عدد محدود من الساعات في السنة، مع قيود الشبكة التفصيلية والإجراءات الوقائية والعلاجية.	من المدى المتوسط إلى المدى القريب	استقرار الشبكة التشغيلية

المصادر: المؤلفون، بناءً على (EPRI (2022).

## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

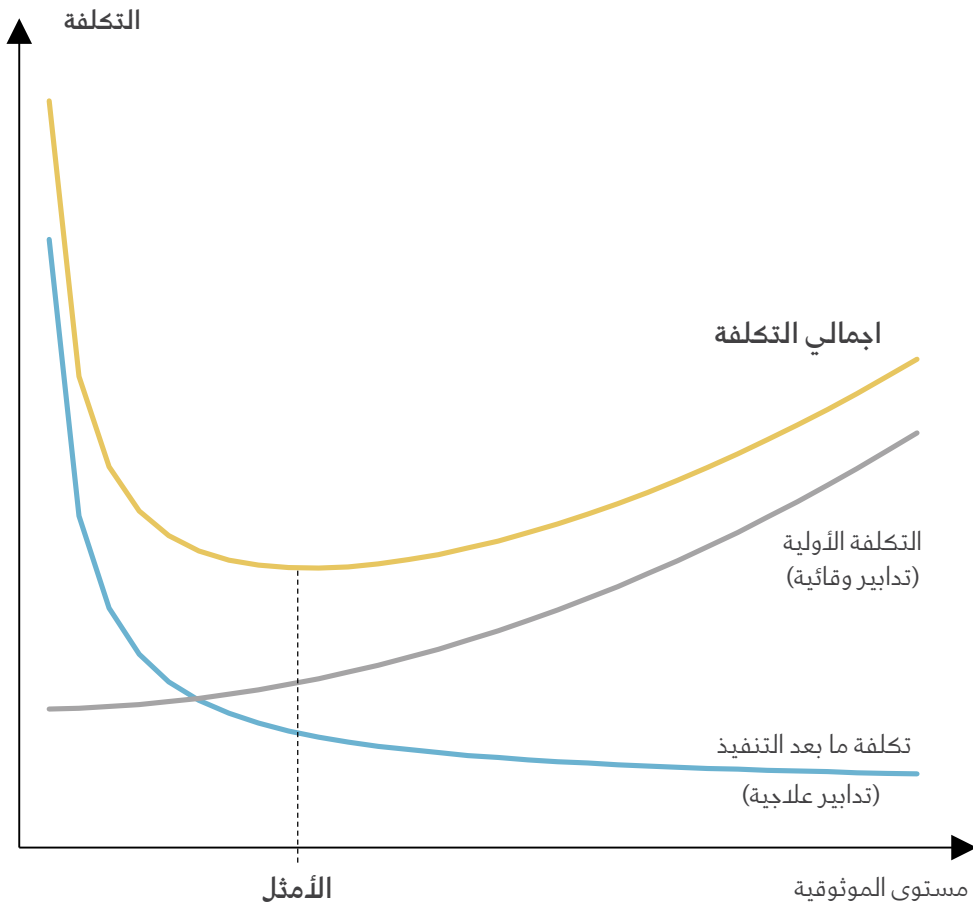
### 2.2. الإطار الهندسي والاقتصادي لموثوقية نظام الكهرباء

لوصف المقايضة بين تكلفة الموثوقية وتكلفة عدم الموثوقية<sup>3</sup> تعتمد هذه المقايضة على مقارنة التكلفة الإضافية لخدمة الطلب على الكهرباء والفوائد الاجتماعية المرتبطة باستهلاك الكهرباء.

تعتمد موثوقية ومرونة أنظمة الكهرباء على الإجراءات والاستثمارات التي تتم قبل حدث مهم (بما في ذلك التدابير الوقائية) والإجراءات المحتملة التي يتم تنفيذها بعد ذلك للتخفيف من الآثار (بما في ذلك التدابير التصحيحية). تحدد المقايضة بين تكلفة هذين العنصرين، الموضحة في الشكل 3، مستوى الموثوقية الأمثل.

عادةً ما تحتوي معايير الموثوقية على حد أقصى لعدد أحداث انقطاع الكهرباء (التكرار، والمدة، والحجم) التي تعتبر مقبولة اجتماعيًا. في السابق، كان الحمل الأقصى المتوقع (معبّرًا عنه بالميجاواط) هو الأكثر أهمية في خطط موثوقية نظام الكهرباء. ومع ذلك، فإنه من المكلف للغاية تصميم نظام كهرباء يكون دائمًا متاحًا لإمداد الحمل الأقصى لأنه سيتطلب كميات هائلة من سعة التوليد الاحتياطية. واستجابة لذلك، تم تطوير الأطر الهندسية والاقتصادية

الشكل 3. المقايضة بين التكلفة الأولية وتكلفة ما بعد التنفيذ لتحديد مستوى الموثوقية الأمثل (توضيحية).



المصدر: المؤلفون، بناءً على (Panteli and Mancarella (2015) و (Umunakwe et al. (2021).

## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

المنخفضة. يعرض الجدول 4 أهداف الكهرباء المتجددة في دول محددة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. كما أعلنت المملكة العربية السعودية عن مدينة ذكية جديدة، نيوم (في منطقة تبوك)، ستكون فيها الكهرباء من مصادر متجددة بنسبة 100٪ (Saudi Vision 2030) (2022).

تقدم مصادر الطاقة المتجددة تحديات تقنية في موازنة العرض والطلب، لأن توليد الكهرباء، بالنسبة للمصادر المهيمنة،<sup>4</sup> غير قابل للتوزيع ومتغير ومتقطع. هناك العديد من الحلول غير الحصرية للطرفين لمعالجة عدم التوزيع، مثل التنوع الجغرافي، وتحسين التوقع، وتخزين الطاقة بما في ذلك السيارات الكهربائية، والخفض والتحكم النشط، والتحكم في الحمل الكهربائي، وتعزيزات النقل، والمكثفات المتزامنة، وتعزيز الترابطات والعمليات المشتركة مع أنظمة الكهرباء المجاورة، والتدفئة والتبريد في المناطق، والمضخات الحرارية، والعدادات الذكية، وتقنية المعلومات والتواصل، وتصميمات السوق المحسنة من بين أشياء أخرى كثيرة. وبالتالي، حتى إذا كانت أنظمة الكهرباء قادرة على التعامل مع كميات كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة، فمن الضروري مع ذلك تقييم موثوقيتها ومرونتها إلى جانب الحلول المستخدمة لمعالجة عدم التوزيع. حيث أن هذا ضروري في الاستعداد للأحداث المحتملة التي تهدد الموثوقية والتي تتميز بتوليد منخفض من مصادر الطاقة المتجددة.

البيانات والافتراضات المطلوبة لتحديد مستوى الموثوقية الأمثل، بما في ذلك التكاليف والطلب التقديري على الكهرباء، واحتمالية الأحداث المهمة (بما في ذلك الأحداث ذات الأسباب المشتركة) ومدتها، والفائدة الاجتماعية لاستهلاك الكهرباء. بالإضافة إلى ذلك، قد تتغير أحداث الطقس المهمة من حيث المدة والتواتر والحجم بسبب تغير المناخ (Seneviratne et al. 2012; Stott 2016). لتجنب انقطاع تيار كهربائي كبير، يجب الاستمرار في تحسين الإطار الهندسي والاقتصادي القياسي من خلال تحسين المنهجيات ومجموعات البيانات. كما يجب أن يتم تزويد إطار العمل بانقطاعات التيار الكهربائي السابقة، مثل الذي حدث في تكساس، وحصول بوابر الحدث، مثل تقلبات الطقس الشديدة (انظر الجدول 1).

### 3.2. التحديات المتعلقة بالكميات الكبيرة من الطاقة المتجددة المتغيرة في أنظمة الكهرباء

في سياق تحولات الطاقة، تتطور أنظمة الكهرباء لتشمل المزيد من مصادر الطاقة المتجددة. في عام 2020، تمت إضافة ما يقارب 115 جيجاواط من الخلايا الكهروضوئية الشمسية (PV) و90 جيجاواط من طاقة الرياح في جميع أنحاء العالم، وهو ما يمثل ما يقارب 83٪ من إجمالي التوليد الجديد للسنة (REN21 2021). من المتوقع أن تلعب الطاقة الشمسية الكهروضوئية، وطاقة الرياح دورًا رئيسيًا في توليد الكهرباء في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا نظرًا لإمكاناتها العالية وتكاليها

## 2. معلومات أساسية عن الموثوقية والمرونة والطاقة المتجددة

**الجدول 4.** أهداف الكهرباء المتجددة في دول محددة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، حسب حصة الكهرباء التي تنتجها مصادر الطاقة المتجددة بالنسبة إلى إجمالي توليد الكهرباء.

2050	2030	2023	
	37% <sup>a</sup>		الجزائر
	35% <sup>a</sup>		مصر
	22.5% <sup>a</sup>		الأردن
	15% <sup>b</sup>		الكويت
	13% <sup>a</sup>		ليبيا
100% <sup>a</sup>	52% <sup>a</sup>		المغرب
		11% <sup>b</sup>	عمان
	50% <sup>c</sup>		المملكة العربية السعودية
100% <sup>a</sup>	30% <sup>a</sup>		تونس
	25% <sup>b</sup>		الإمارات العربية المتحدة - دبي

المصادر: (Timmerberg et al. (2019); Bhatt (2021); Saudi Vision 2030 (2022)

# 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

الأخرى في جميع أنحاء العالم. وكانت بعض حالات انقطاع التيار الكهربائي التي تم النظر فيها مرتبطة بأحداث الطقس، بما في ذلك ظروف الحرارة والرطوبة العالية (Victoria State Government 2018)، بينما نتج البعض الآخر عن أحداث العواصف والفيضانات (Sheppard and DiSavino 2012). كما توفر حالات انقطاع التيار الكهربائي الأخرى غير المرتبطة بالطقس دروسًا رئيسية. وبالأخص، تسلط الضوء على أهمية تحليل الموثوقية والقواعد التشغيلية (مثل معيار N-1)، وممارسات الصيانة (مثل قطع الأشجار المناسب)، والبرمجيات والمراقبة في الوقت الفعلي، والحاجة إلى التنسيق بين مشغلي الشبكة (NERC 2004; UCTE 2004a, 2007; ENTSO-E 2015).

ينتج عن أي انقطاع للتيار الكهربائي بالحجم الذي حدث في تكساس مراجعة كبيرة من قبل حكومة الولايات المتحدة الأمريكية (FERC-NERC 2021) بالإضافة إلى العديد من التقارير والمنشورات الأكاديمية الأخرى (Busby et al. 2021; Energy Institute of the University of Texas at Austin 2021; Littlechild and Kiesling 2021; Levin et al. 2022; Zhang et al. 2022). وبناءً على هذه التقارير وفهم الهندسة والاقتصاد، والاقتصاد السياسي لأنظمة الكهرباء، نقترح ست توصيات (ملخصة في الجدول 5) تنطبق على جميع أنواع أنظمة الكهرباء، بما في ذلك الأنظمة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. كما تضمنت توصياتنا أيضًا دروسًا من حالات انقطاع التيار الكهربائي

## الجدول 5. ملخص لتوصياتنا الست الرئيسية.

1	تعتبر الأحداث عالية التأثير ذات الاحتمالية المنخفضة، بما في ذلك حالات الفشل الشائعة، ذات صلة خاصة بتقييم مرونة أنظمة الكهرباء ويجب تضمينها في تحليلات الموثوقية والمرونة.
2	يجب أن تأخذ تحليلات وسياسات الموثوقية والمرونة في الاعتبار سلسلة امداد الكهرباء بأكملها، بما في ذلك إمدادات الوقود والبنية التحتية ذات الصلة.
3	يعد تنسيق ضوابط وتنظيم السوق لسلسلة إمداد الطاقة الكهربائية بأكملها ضروريًا لضمان الموثوقية والمرونة، ويجب تجنب التنظيم المجزأ.
4	يمكن أن تلعب الروابط والتجارة الفعالة عبر الحدود دورًا في الحد من انقطاعات التيار الكهربائي، بما في ذلك أنظمة الكهرباء ذات الاستخدام العالي للطاقة المتجددة.
5	يمكن أن تخفف القدرة على التكيف وكفاءة الطاقة من الآثار المجتمعية لانقطاع التيار الكهربائي الكبير.
6	يجب تطوير إجراءات توزيع انقطاع التيار الكهربائي المناسبة، بما في ذلك استخدام التقنيات الجديدة، للحد من مدة انقطاع التيار الكهربائي للعملاء.

المصدر: المؤلفون.

#### 3.1. يجب على تحليلات الموثوقية والمرونة النظر في الأحداث ذات الاحتمالية المنخفضة وعالية التأثير، بما فيها حالات الفئتل ذات السبب المشترك

كانت عاصفة تكساس الشتوية عام 2021 حدثًا شديدًا لم يكن قطاع الكهرباء مستعدًا له. وفقًا لدراسات عديدة، من المرجح أن يؤدي تغير المناخ إلى تفاقم أحداث شديدة التأثير كان احتمال حدوثها منخفضًا سابقًا. يجب أن ينظر التحليل في هذه الأحداث (Chandramowli and Felder 2014; Petit et al. 2021; Felder and Petit et al. 2021) بالإضافة إلى الإجراءات التقنية لإدارتها (مثل خطط توزيع انقطاع الكهرباء أو تجهيز المعدات للشتاء). للقيام بذلك، من الضروري جمع وإنشاء مجموعات بيانات مفصلة تمثيلية قدر الإمكان لتوقع الأحداث المهمة في المستقبل، بما في ذلك الأحداث ذات الاحتمالية المنخفضة.

يمكن أن يكون انقطاع التيار الكهربائي ناتجًا عن عدة أحداث مستقلة أو بسبب حالات فشل شائعة (Felder 2001). تشمل حالات الفشل ذات الأسباب الشائعة الطقس القاسي وفشل نظام توصيل الوقود وفشل نظام المراقبة والتحكم والإجراءات الضارة. على الرغم من كونها أقل تكرارًا، إلا أن حالات الفشل الشائعة يمكن أن يكون لها تأثير كبير على أنظمة الكهرباء، كما كانت الحال خلال انقطاع التيار الكهربائي في تكساس عام 2021. بالإضافة إلى ذلك، كما يتضح من انقطاع التيار الكهربائي في تكساس 2021، يمكن أن تؤدي مثل هذه

الأحداث ذات الأسباب الشائعة إلى تضخيم العواقب المجتمعية لانقطاع التيار الكهربائي. خلال هذه الأحداث، تكون الكهرباء ذات قيمة عالية، ويترتب على نقصها آثار مأساوية، بما في ذلك تهديد الصحة والسلامة العامة. ولهذه الأسباب، يجب النظر بعناية في حالات الفشل ذات الأسباب الشائعة التي تزيد أيضًا من تكاليف الانقطاعات – وحالات الفشل ذات الأسباب الشائعة، والمعزز للضرر - في تحليل الموثوقية والمرونة.

يعرض الشكل 4 بعض الأحداث ذات الأسباب الشائعة التي يمكن أن تؤثر على إمدادات الوقود وتوليد الكهرباء وشبكات النقل والتوزيع وقطاعات الحمل. وعلى الرغم من أن حدثًا شديد البرودة مثل الذي لوحظ في تكساس من غير المرجح أن يحدث في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، فإن انقطاع التيار الكهربائي في تكساس يؤكد أن الأحداث ذات الأسباب الشائعة المتعلقة بالطقس الحار تعتبر عديدة أيضًا ويمكن أن تؤثر بشدة على أنظمة الكهرباء في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. على سبيل المثال، في أستراليا، شهدت ولاية فيكتوريا انقطاع التيار الكهربائي خلال موجة الحر في يناير 2018 بسبب زيادة الحمل في أصول الشبكة الناتجة عن ارتفاع الطلب على الكهرباء للتبريد. بناءً على مراجعة أحداث الشبكة المتعلقة بالطقس في الولايات المتحدة الأمريكية، تظهر دراسة أجراها Campbell and Lowry 2012 أن هناك اتجاهًا متزايدًا في عدد أحداث انقطاع التيار الكهربائي، والتي يمكن تفسيرها بتدهور الشبكة ولكن أيضًا زيادة في أحداث الطقس.

### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

الجدول 5. ملخص لتوصياتنا الست الرئيسية.



المصدر: المؤلفون، بناءً على الدراسات السابقة (Campbell and Lowry 2012; Ward 2013; Lubega and Stillwell 2018).

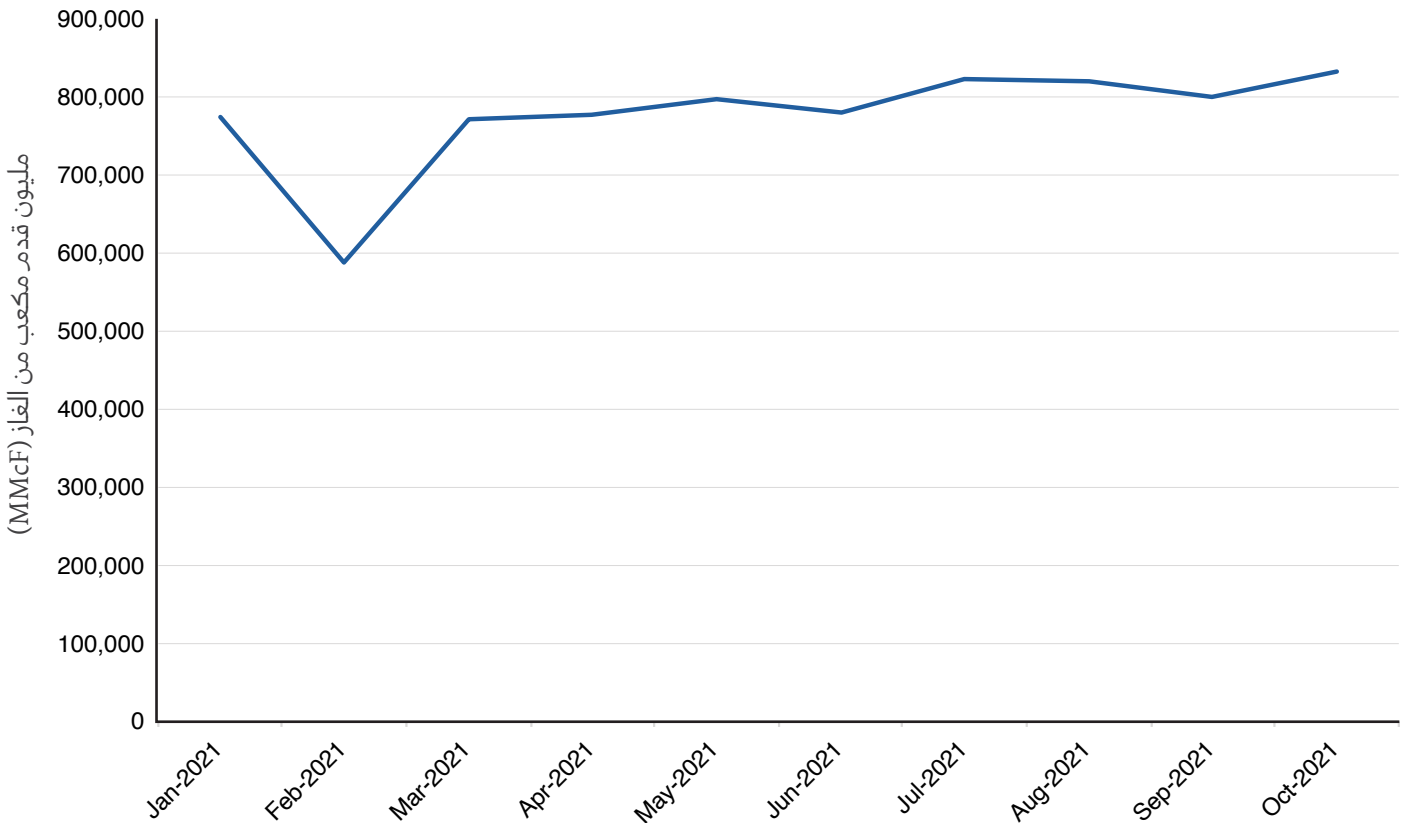
### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

#### 2.3. سلسلة إمداد الكهرباء مهمة بأكملها

يعمل ما يقارب 50 ٪ من وحدات التوليد في تكساس بالغاز الطبيعي (FERC - NERC 2021). خلال انقطاع التيار الكهربائي في عام 2021، فشلت البنية التحتية لتوصيل الوقود في توفير الغاز الطبيعي لوحدات التوليد. انخفض إنتاج الغاز الطبيعي بشكل كبير خلال حدث البرد عام 2021، مما أدى إلى العديد من المشاكل للمولدات القائمة على الغاز بسبب التجميد في أنابيب الإمداد عندما تجمد الماء والسوائل الأخرى في تيار الغاز الطبيعي الخام.

في 17 فبراير 2021، في المنطقة الوسطى من الولايات المتحدة الأمريكية، كان إنتاج الغاز الطبيعي الجاف منخفضًا حيث بلغ 69.7 مليار قدم مكعب في اليوم (bcf/d)، بانخفاض بلغ 18.9 مليار قدم مكعب في اليوم تقريبًا عن الأسبوع المنتهي في 13 فبراير، وهو انخفاض بنسبة 21 ٪. وفي تكساس، انخفض إنتاج الغاز الطبيعي بنسبة 45 ٪ تقريبًا، حيث انخفض من 21.3 مليار قدم مكعب في اليوم خلال الأسبوع المنتهي في 13 فبراير إلى أدنى مستوى يومي له عند 11.8 مليار قدم مكعب في اليوم في 17 فبراير (EIA 2021b). انظر الشكل 5.

الشكل 5. الإنتاج الشهري من الغاز الطبيعي المسوّق في تكساس في عام 2021.



المصدر: المؤلفون، بناءً على بيانات من إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (2021b).



### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

أو انخفاضات مفاجئة في ضغط خطوط أنابيب الغاز الطبيعي، التي يمكن أن تغلق في نفس الوقت العديد من محطات الكهرباء التي تعمل بالغاز الطبيعي (FERC-NERC 2021). يتم تنفيذ هذا الإجراء لحماية خط الأنابيب من الضغط الزائد، ولكنه يمكن أن يقوم في نفس الوقت بتعطيل عدة محطات تعمل بالغاز الطبيعي، وبالتالي يتجاوز قدرة النظام N-1. في بعض دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، يمكن أن تزداد حصة الغاز في مزيج الكهرباء في السنوات القادمة بسبب قدرتها على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنة بوحدة التوليد القائمة على النفط. هذه هي الحال في المملكة العربية السعودية (Saudi Vision 2022 2030)، حيث يعتبر التحول من النفط إلى الغاز حلاً ذا صلة بالتكلفة لإزالة الكربون (Blasquez et al. 2018). في الأردن، يحدث التحول من النفط إلى الغاز في توليد الكهرباء منذ عام 2014، حيث يمثل الغاز 81 ٪ من توليد الكهرباء في عام 2019 مقابل أقل من 10 ٪ في عام 2014 (IEA 2019).

بالإضافة إلى ذلك، يجب إبلاغ مشغلي الشبكات مثل مجلس الموثوقية الكهربائية في ولاية تكساس عن النسبة المئوية لسعة التوليد التي يمكن الاعتماد عليها في أثناء الطقس البارد. في حالة الغاز الطبيعي، يجب على مشغلي المولدات تحديد مخاطر توصيل الوقود المتعلقة بعقودهم لوقود الغاز الطبيعي. حيث سيمكنهم ذلك من التخطيط بشكل أفضل وتوفير رؤية أكبر في أثناء عمليات الطقس البارد لتوقع المشاكل المحتملة. كما أنه سيوفر مزيداً من المهلة الزمنية لعملاء الكهرباء الذين قد يتم فصلهم عن طريق توزيع انقطاع التيار الكهربائي.

وكما ذكرنا سابقاً، يوضع حدث تكساس 2021 إلى أي مدى تكون سلسلة إمداد الكهرباء الكاملة مهمة عند تقييم موثوقيتها. في الواقع، لا يكفي التركيز على توليد الكهرباء والشبكة. وبدلاً من ذلك، يجب أن تكون سلسلة التوريد بأكملها جاهزة للأحداث المهمة، بما في ذلك إمدادات الوقود. بالإضافة إلى ذلك، تعد الكهرباء

في الوقت ذاته، يستخدم الغاز الطبيعي على نطاق واسع لتلبية أحمال التدفئة السكنية، إذ تعتمد أكثر من ثلث الأسر في تكساس على الغاز الطبيعي كوقود أساسي للتدفئة (EIA 2021c). ولذلك، كانت إمدادات الغاز الطبيعي تتنافس على تلبية متطلبات الإمداد لوحدات التوليد والتدفئة السكنية خلال هذا الطقس البارد، مما تسبب في أزمة صحية عامة. ما يقارب ثلاثة من كل خمس أسر في تكساس تستخدم الكهرباء كمصدر رئيس لتدفئة المنزل (EIA 2021c). أدى الطقس شديد البرودة إلى زيادة الطلب على الكهرباء للتدفئة، الأمر الذي أثر أيضاً على سلسلة التوريد بأكملها. وبالطبع، يمكن أن يحدث موقف مشابه خلال موجة الحر، مما سيزيد من الطلب على تكييف الهواء، الذي يعتمد بالكامل على الكهرباء.

يجب مراجعة معايير الموثوقية لتجنب مشاكل إمدادات الوقود في المستقبل، سواء في الغاز الطبيعي أو غيره، مثل مطالبة منشآت الغاز الطبيعي بتنفيذ خطط الاستعداد للطقس البارد بناءً على الأحداث السابقة التي حدثت. يمكن أن تتأثر جميع أنواع الوقود بمشاكل التجميد، بما في ذلك الغاز الطبيعي وكذلك الفحم والنفط (FERC-NERC 2021). قد يتطلب ذلك تحليلاً متعمقاً للتكلفة والربح لتحديد المستوى المناسب للاستعداد لفصل الشتاء، وتغييرات أخرى تتوافق مع التفضيلات الاجتماعية، لأخذ المقايضات المحددة في الشكل 3 في الاعتبار. تقترح التقديرات الأولية أن تكلفة الاستعداد لفصل الشتاء في تكساس أقل من فائدها في تجنب الانقطاع الكهربائي (Golding, Kumar and Mertens 2021). يستغرق استعداد الغاز لفصل الشتاء وقتاً، ووفقاً لبلومبرج (Chediak and Malik 2021)، لا يمكن أن يكون جاهزاً حتى عام 2023، مما يؤكد أهمية دراسات تخطيط الموثوقية.

بالإضافة إلى ذلك، تعد حماية البنية التحتية المهمة للغاز الطبيعي من حدوث الخفض اليدوي أو التلقائي أمر ضروري لأن الفشل في القيام بذلك سيؤثر سلباً على موثوقية الشبكة. ويمكن أن يحدث هذا كارتفاعات

### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

تقديرات قيمة الحمل المفقودة)، مما يوضح كيف يمكن أن تكون أسعار الجملة المرتفعة مشكلة حساسة لصناع السياسات، في حين أن الاقتصاديين أظهروا أن أسعار الكهرباء المرتفعة ضرورية خلال الأحداث المهمة لنقل الحوافز الصحيحة للسعر (Boiteux 1949, 1960).

كما يثير حدث تكساس أيضًا مسألة التنسيق الفعال لتنظيم الغاز والكهرباء. على الرغم من التوصيات التي قدمتها لجنة المرافق العامة (الجهة المنظمة للكهرباء) بعد الحدث البارز لعام 2011 لتجهيز المعدات لفصل الشتاء، فإن هيئة تكساس للسكك الحديدية، التي تشرف على موردي الغاز في تكساس، لم تنفذ بعد معايير الاستعداد للشتاء لقطاع الغاز (Griswold and Kling 2021). بالإضافة إلى ذلك، تم تحديد عدم اكتمال تداول المخاطر في أسواق الكهرباء المحررة (أي صعوبة التحوط من المخاطر عند الاستثمار في أصول الكهرباء) كسبب لنقص الاستثمار في الاستعداد للشتاء (Mays et al. 2022).

لا يزال يتعين على صناع السياسات اكتشاف كيفية تحسين الهيكل التنظيمي للسوق بأكمله للغاز والكهرباء للعمل معًا للحفاظ على الإضاءة. ويمثل هذا تحديًا خاصة إذا كان الهيكل التنظيمي لسلسلة التوريد بأكملها مجزأً عبر العديد من الكيانات التنظيمية.

مع استمرار دول مجلس التعاون الخليجي والشرق الأوسط وشمال إفريقيا في تنفيذ أسواق الكهرباء والتجارة الإقليمية، حيث يمكنهم التعلم والاستفادة من الخبرات في جميع أنحاء العالم. ولضمان موثوقية الأنظمة المترابطة بشكل متزايد في المنطقة، يمكنهم النظر في إنشاء كيان لدول مجلس التعاون الخليجي / الشرق الأوسط وشمال إفريقيا لتنسيق دراسات التخطيط وإبلاغ صناع السياسات. ويمكن لهذا الكيان أن يأخذ دروسًا من مؤسسة الموثوقية الكهربائية لأمريكا الشمالية (NERC) في الولايات المتحدة الأمريكية أو الشبكة الأوروبية لمشغلي أنظمة النقل للكهرباء (ENTSO-E) في أوروبا،<sup>6</sup> ولكن يخصصها لسياق

أحد مكونات البنية التحتية المهمة للمجتمعات الحالية، ولكنها مرتبطة أيضًا بالبنية التحتية المهمة الأخرى بخلاف الغاز الطبيعي، مثل الرعاية الصحية والتمويل والنقل وأنظمة المياه وتقنيات المعلومات والاتصالات (Kröger 2008; Behnert and Bruckner 2018). وفي المستقبل، يمكن أن تتوسع هذه العلاقات المتبادلة أيضًا لتشمل بنية تحتية أخرى مثل الهيدروجين والنقل عبر المركبات الكهربائية. في دول الخليج، يعتمد إنتاج المياه عن طريق تحلية المياه بشكل كبير على الكهرباء (Rambo et al. 2017).

### 3.3 أهمية الأنظمة وتنظيم السوق

يؤكد هذا الانقطاع في التيار الكهربائي أيضًا أهمية الأنظمة وتنظيم السوق في المساعدة على تجنب الانقطاعات. قامت تكساس بتحرير نظام الكهرباء في عام 2002، واعتمدت منذ ذلك الحين على أسواق الطاقة فقط لتحقيق كفاية الموارد. يعتبر العديد من الاقتصاديين ولاية تكساس، أو على الأقل تم اعتبارها حتى انقطاع التيار الكهربائي مؤخرًا، نموذجًا يحتذى به في تصميم السوق. ومع ذلك، فإن انقطاع التيار الكهربائي في تكساس عام 2021 يشكك في قدرة هيكل نظام الكهرباء في تكساس على ضمان الموثوقية، بما في ذلك دور أسواق الكهرباء. من الناحية النظرية، ستساعد أسواق الكهرباء ذات الاستجابة الكافية للطلب أو/و الآليات الفعالة لكفاية الموارد على التوفيق بين العرض والطلب بكفاءة. وكما تمت مناقشته بمزيد من التفصيل في القسم 3.5، يمكن للعدادات الذكية تمكين الاستجابة الفعالة للطلب وبالتالي تسهيل مطابقة الطلب والعرض.

وتقوم تكساس بمراجعة تصميم السوق والهيكل التنظيمي على الرغم من اعتبارها نموذجًا يحتذى به. بعد ما حدث في شهر فبراير 2021، خفّض مجلس الموثوقية الكهربائية في ولاية تكساس مؤقتًا سقف أسعار الجملة للكهرباء من 9000 دولار لكل ميغاواط في الساعة إلى 2000 دولار لكل ميغاواط في الساعة (أقل من العديد من

ميجاواط منخفضة مقارنة بحجم نظام الكهرباء، حيث يزيد الحمل الذروي عن 70 جيجاواط وسعة توليد تبلغ 123 جيجاواط. وتشتمل سعة التوليد الإجمالية المثبتة لمجلس الموثوقية الكهربائية في ولاية تكساس على 31 ميجاواط من طاقة الرياح، و 6 ميجاواط من الطاقة الشمسية، و 64 ميجاواط من الغاز، و 15 جيجاواط من الفحم (FERC-NERC 2021). لتقدير مستوى الربط البيئي لنظام الكهرباء، يمكن مقارنة إجمالي سعة الاستيراد بالحمل الذروي للنظام أو إجمالي سعة التوليد المثبتة. وفي عام 2021، كانت نسبة الربط البيئي إلى ذروة الحمل  $1.6\%$  في ولاية تكساس. وكانت النسبة باستخدام سعة التوليد  $1.0\%$ .

في أوروبا، تم زيادة هدف الربط البيئي للكهرباء، المحدد على أنه سعة استيراد على سعة التوليد المثبتة، والذي يتعين على كل دولة عضو تحقيقه بحلول عام 2030 من  $10\%$  إلى  $15\%$  (European Council 2014)<sup>8</sup>. أكد فريق الخبراء المعني بأهداف الربط الكهربائي (European Commission 2017) أن الفوائد تتجاوز تكلفة زيادة هدف الربط البيئي الأوروبي للتعامل مع استخدام الطاقة المتجددة المتوقع. وفي عام 2020، وصلت جميع الدول الأوروبية باستثناء أربع دول (قبرص وإسبانيا وبولندا والمملكة المتحدة) إلى هدف الربط البيئي بنسبة  $10\%$  (Legislative Train 2022).

ترتبط أنظمة الكهرباء في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا وتشكل ثلاث مناطق متميزة كما هو موضح في الشكل 6. وتتكون المنطقة الغربية من المغرب والجزائر وتونس، التي ترتبط بواسطة خطوط التيار المتناوب، وتشمل المنطقة الوسطى ليبيا ومصر والسودان والأردن والصفة الغربية وغزة ولبنان وسوريا والعراق. تتوافق المنطقة الشرقية مع دول الخليج وهي المملكة العربية السعودية وسلطنة عمان والإمارات العربية المتحدة وقطر والبحرين والكويت. وترتبط هذه الدول غالباً من خلال ناقل هيئة الربط الكهربائي لدول مجلس التعاون الخليجي (GCCIA) بخطوط التيار المباشر. بينما لا يوجد أي ربط بين اليمن ودول الجوار.

المنطقة وهياكل السوق التنظيمية. كما يجب عليهم أيضاً الانتباه إلى سلسلة توريد الكهرباء بأكملها وتجنب الهياكل التنظيمية المجزأة.

### 4.3. يمكن للروابط البيئية والتجارة الفعالة عبر الحدود أن تحد من حالات انقطاع التيار الكهربائي

مجلس الموثوقية الكهربائية في ولاية تكساس هو نظام كهرباء معزول نسبياً بحد أقصى يبلغ 1220 ميجاواط في إجمالي سعة الاستيراد من المناطق المجاورة (FERC-NERC 2021). ويتم الحصول على سعة الاستيراد هذه من خلال خطين للتيار المباشر (DC) مع الربط البيئي لشرق الولايات المتحدة الأمريكية من خلال تجمع الطاقة الجنوبي الغربي وخطين للتيار المباشر مع المكسيك. لا تؤدي أنظمة الكهرباء المترابطة مع خطوط التيار المتناوب أو التيار المباشر إلى النتائج ذاتها من حيث الموثوقية أو العمليات في الوقت الفعلي. ومع موصلات التيار المتناوب، يتم مشاركة التردد بين أنظمة الكهرباء المجاورة، أي أن الأنظمة متزامنة، مما يسمح لنظام واحد بدعم الآخر تلقائياً أثناء أحداث الموثوقية. ومع ذلك، هناك أيضاً خطر من أن يتسبب انقطاع التيار الكهربائي في أحد الأنظمة في حدوث انقطاع في النظام الآخر. اما مع موصلات التيار المباشر فقط، أي أن الأنظمة غير متزامنة، فيقرر مشغلو الشبكة اتجاه تدفق الكهرباء وحجمه عبر الربط البيئي. يتيح ذلك عزل الانقطاع في نظام واحد عن الآخر، لكنه يقلل من قدرة النظام الآخر على تقديم الدعم في الوقت الفعلي (Kundur 2012). بالإضافة إلى ذلك، تتمتع خطوط التيار المباشر بسعة اسمية أعلى، لكنها يمكن أن تتعرض للانقطاع بشكل متكرر أكثر من خطوط التيار المتناوب، مما يؤدي إلى اختلالات كبيرة في الطاقة (Ye et al. 2022). في كلا الحالتين، يجب الاتفاق على الخطط التفصيلية بين المناطق المترابطة من قبل مشغلي الشبكة قبل وقوع حدث مهم والنظر بعناية في طبيعة التيار المتناوب أو التيار المباشر للروابط البيئية.

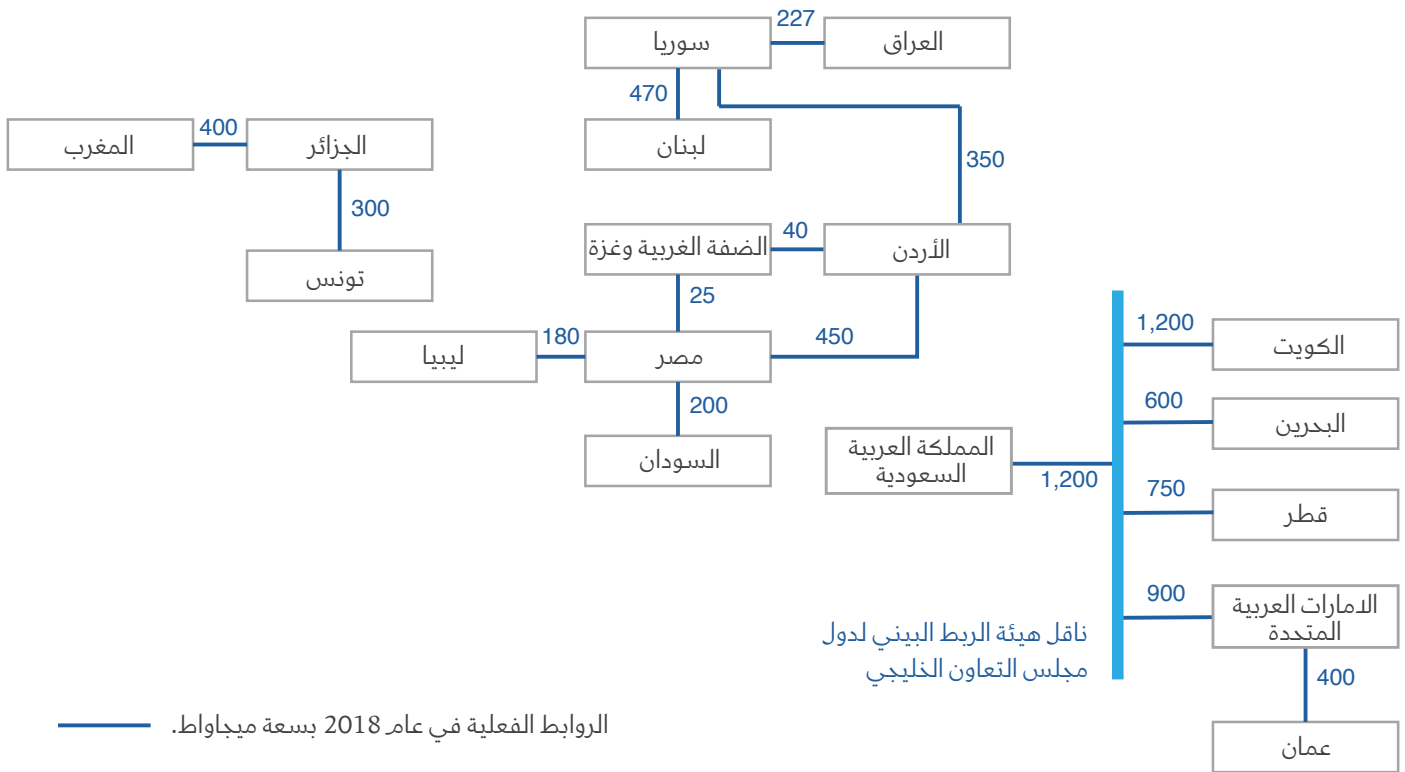
تعد ساعات الربط البيئي في تكساس التي تبلغ 1220

### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

من المتوقع أن يزيد مستوى الربط البيئي لدول منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا في السنوات التالية مع ظهور روابط بينية جديدة للتنشغيل، مثل الرابط بسعة 3 جيجاواط بين مصر والمملكة العربية السعودية. كما ستربط هذه المشاريع المناطق الغربية والوسطى والشرقية.

بناءً على البيانات السابقة لعام 2018 من البنك الدولي (2021)، يقدر الجدول 6 مستوى الربط البيئي لدول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، ويوضح الشكل 7 بشكل بياني مستوى الربط البيئي لسعة التوليد. ويظهر أن بعض أنظمة الكهرباء الصغيرة لديها بالفعل مستوى ربط أعلى من 15 ٪، مثل البحرين والأردن ولبنان وسوريا. وجميع دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا لديها مستوى ربط أقل من 10 ٪.

الشكل 6. الروابط البينية القائمة عبر الحدود في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.



المصدر: المؤلفون، بناءً على (World Bank (2021).

### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

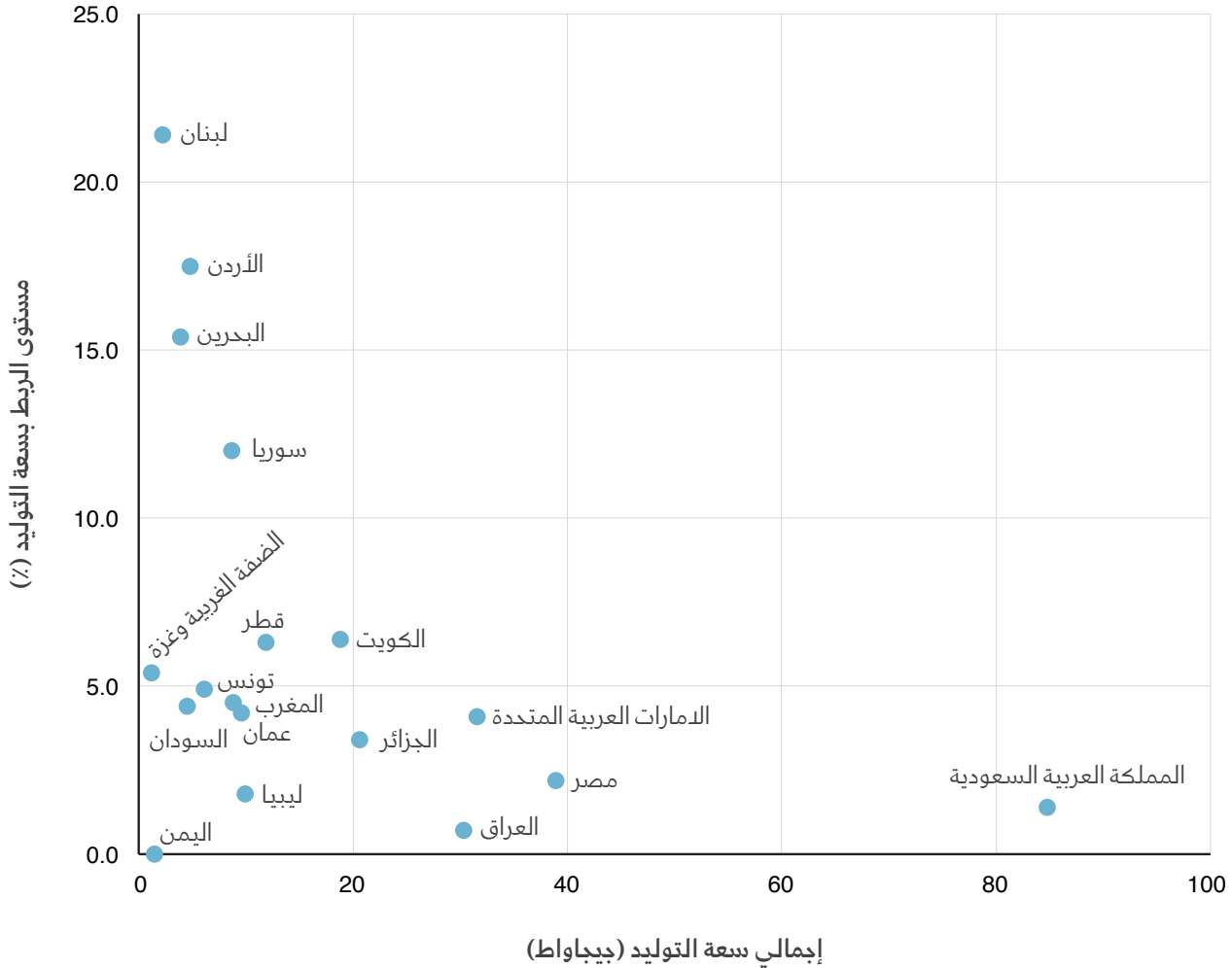
الجدول 6. مستوى الربط البيني المقدر لدول منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا في عام 2018.

الربط البيني لإجمالي سعة التوليد %	الربط البيني لذروة الطلب %	إجمالي سعة الربط البيني جيجاواط GW	إجمالي سعة التوليد جيجاواط GW	ذروة الطلب جيجاواط GW	
3.4	5.4	0.70	20.6	12.9	الجزائر
15.4	16.7	0.60	3.9	3.6	البحرين
2.2	2.7	0.86	38.9	31.6	مصر
0.7	0.9	0.23	30.3	24	العراق
17.5	23.3	0.84	4.8	3.6	الأردن
6.4	8.8	1.20	18.8	13.6	الكويت
21.4	13.1	0.47	2.2	3.6	لبنان
1.8	3.6	0.18	9.9	5	ليبيا
4.5	6.2	0.40	8.8	6.5	المغرب
4.2	5.5	0.40	9.6	7.3	عمان
5.4	4.6	0.07	1.2	1.4	الضفة الغربية وغزة
6.3	9.6	0.75	11.9	7.8	قطر
1.4	1.7	1.20	84.8	69.9	المملكة العربية السعودية
4.4	6.3	0.20	4.5	3.2	السودان
12.0	18.4	1.05	8.7	5.7	سوريا
4.9	7.9	0.30	6.1	3.8	تونس
4.1	5.6	1.30	31.6	23.4	الإمارات العربية المتحدة
0.0	0.0	0.00	1.5	1.4	اليمن

المصدر: ذروة الطلب وإجمالي سعة التوليد وسعة الربط البيني (World Bank 2021).

### 3. الدروس المستفادة لأنظمة كهرباء موثوقة خارج ولاية تكساس

الشكل 7. مستوى الربط البيئي لسعة التوليد المقدره ببيانات 2018.



المصدر: المؤلفون، بناءً على بيانات من (World Bank (2021).

أيضاً أحداثاً حرجة مماثلة في وقت واحد، كما كانت الحال في تكساس في فبراير 2021 (FERC-NERC 2021). في هذه الحالة، يمكن لمشغلي الشبكة أن يقرروا خفض الصادرات وإعطاء الأولوية لمطابقة طلبهم على الكهرباء. يعد توقع كيفية إجراء التبادلات عبر الحدود في حالة الأحداث المهمة المتزامنة في المناطق المجاورة عنصراً أساسياً لموثوقية نظام الكهرباء المترابط، وبالتالي يجب الاتفاق عليه.

يعد مستوى الربط البيئي مفيداً في تحديد الحد الأقصى الذي يمكن أن يدعم فيه نظام الكهرباء من قبل المناطق المجاورة وبالتالي يمكنها الاعتماد على الواردات لتلبية الطلب الداخلي. ومع ذلك، قد لا يتم الوصول إلى هذه السعة القصوى للاستيراد أثناء الأحداث المهمة لعدة أسباب. حيث يمكن أن تكون سعة الاستيراد محدودة أثناء الأحداث المهمة بسبب الأعطال في شبكة النقل الداخلية أو عبر الحدود. ويمكن أن تواجه المناطق المجاورة

في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، تم استخدام العدادات الذكية ومن المتوقع أن تلعب دورًا في تحسين إدارة الطلب على الكهرباء. أكملت المملكة العربية السعودية استخدام 10 ملايين عداد ذكي لجميع عملاء الكهرباء في أبريل 2021 (Arab News 2021; Hasan, Mansouri and Al-Shehri 2021). في عام 2021، أعلنت عُمان أيضًا أنه سيتم تركيب 1.2 مليون عداد ذكي خلال 5 سنوات، تماشيًا مع رؤية عمان 2040 (Utilities Middle East 2021).

### 6.3. يمكن أن تحد إجراءات توزيع انقطاع التيار الكهربائي المناسبة من مدة انقطاع التيار الكهربائي للعملاء

خلال انقطاع التيار الكهربائي عام 2021، واجه المستهلكون من السكان انقطاع التيار الكهربائي في ولاية تكساس لفترات طويلة خلال طقس شديد البرودة. حيث كان الحصول على الكهرباء لبضع ساعات كل يوم من شأنه أن ينقذ حياة بعض الأسر.

يقوم مشغلو الشبكات بالبحث وتحديد الإجراءات (وتركيب المعدات المناسبة) لتنفيذ توزيع انقطاع التيار الكهربائي للمستهلكين النهائيين مع ضمان أمن التشغيل لشبكات النقل والتوزيع. تؤثر هذه الدراسات والإجراءات، التي يجب أن تحدث قبل انقطاع التيار الكهربائي، على الطريقة التي يمكن بها تنفيذ توزيع انقطاع التيار الكهربائي في الوقت الفعلي في حال وقوع حدث مثل عاصفة الشتاء في عام 2021 في تكساس. حددت لجنة تنظيم الطاقة الفيدرالية - مؤسسة الموثوقية الكهربائية للولايات المتحدة الشمالية 2021 (FERC-NERC) بعض الصعوبات التقنية التي حالت دون أداء مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس بكفاءة لحالات توزيع انقطاع التيار بسبب قيود نظام التوزيع. وعلى وجه الخصوص، حددت أنظمة حماية الجهد المنخفض والتردد المنخفض المطبقة في تكساس من خيارات التوزيع المتاحة لمشغلي النظام. يجب تقييم ما إذا كانت هناك تحديات تقنية مماثلة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا ومعالجتها بالطريقة المناسبة.

### 5.3. يمكن للقدرة على التكيف وكفاءة استخدام الطاقة أن تخفف من آثار الانقطاعات الكبيرة للتيار الكهربائي

كانت عواقب انقطاع التيار الكهربائي في ولاية تكساس عام 2021 مدمرة للمستهلكين المقيمين بسبب مدة الحدث وعدم وجود حلول لاستبدال الكهرباء، خاصة للتدفئة.

ومع ذلك، يمكن وضع إستراتيجيات على المدى البعيد للتخفيف من آثار انقطاع التيار الكهربائي على المستهلكين. ويمكن أن تشمل إجراءات لتكيف أنظمة الكهرباء (نشير إلى هذا باسم "قابلية التكيف" لأنظمة الكهرباء)، مثل تحسين عزل المساكن وبناء مراكز التدفئة / التبريد لاستخدامها في حالة الطوارئ، وخاصة في تلك المناطق التي تكون أنظمة التوزيع فيها غير مصممة لتوزيع انقطاع التيار الكهربائي. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تقلل زيادة كفاءة الطاقة من عواقب مثل هذه الأحداث، وخاصة من خلال عزل المباني بشكل أفضل. وعلى نطاق أوسع، ينبغي على صناع السياسات النظر في قدرة أنظمة الكهرباء على التكيف ودعمها كضريبة للحد من عواقب انقطاع التيار الكهربائي (Felder and Petitet 2021).

كما ذكر سابقًا، يمكن للعدادات الذكية أيضًا أن تخفف من آثار الانقطاعات الكبيرة للتيار الكهربائي من خلال توفير الوقت الفعلي والمعلومات المعدلة للموقع للمستهلكين، ومن خلال السماح بالمراقبة في الوقت الفعلي لشبكة التوزيع بالقرب من الحمل. يمتلك مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس ما يقارب 11 مليون عداد ذكي مستخدم (Energy Institute of the University of Texas at Austin 2021)، بما يعادل 40٪ تقريبًا من عملائه. وبينما يستمر استخدام العداد الذكي، فإن القواعد الحالية في تكساس تحد من الوصول إلى البيانات، ويتطلب التحسينات للسماح بالوصول إلى البيانات في الوقت الفعلي (Walton 2020).

أولاً، تؤكد هذه الدروس الحاجة إلى زيادة الاهتمام بالتهديدات التي تهدد الموثوقية والمرونة من الأحداث ذات الأسباب الشائعة مثل الطقس الشديد وتحسين مجموعات البيانات والنماذج التي يمكن أن تأخذ في الاعتبار تقنيات أنظمة الكهرباء الجديدة مثل مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة. ثانياً، تتطلب مرونة وموثوقية أنظمة الكهرباء نهجاً متكاملاً يأخذ في الاعتبار سلسلة إمداد الكهرباء بأكملها وتأثيراتها على الوظائف المجتمعية المهمة مثل السلامة العامة والرعاية الصحية، والاتصالات، والتمويل والنقل. وأخيراً، تعتمد سمات موثوقية ومرونة أنظمة الكهرباء أيضاً على الترابط الإقليمي والدولي، والتجارة عبر الحدود والهيكل التنظيمية المرتبطة بها.

أعادت حادثة انقطاع التيار الكهربائي في تكساس في فبراير 2021 الانتباه إلى أهمية الموثوقية والمرونة في أنظمة الطاقة الكهربائية. بعد مرور عام على هذا الحدث، أدت التقارير والتحليلات إلى تحسين فهمنا للأسباب الأساسية والدروس التي يجب تعلمها. وبناءً على انقطاع التيار الكهربائي هذا وغيره من الانقطاعات الرئيسية، نقدم ست توصيات رئيسية لصناع السياسات لتعزيز موثوقية ومرونة أنظمة الكهرباء. لا تنطبق هذه التوصيات فقط على أنظمة الكهرباء المحددة، مثل التي في تكساس، ولكن أيضاً على جميع أنواع أنظمة الكهرباء، بما فيها الموجودة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.



<sup>1</sup> استندت قيمة حمل الخسارة (VoLL) المستخدمة لتقدير هذا الرقم إلى بيانات عام 2019 البالغة 6,733 دولار لكل ميجاواط في الساعة للصناعات و 6,117 دولار لكل ميجاواط في الساعة للأسر. تجدر الملاحظة أن قيمة حمل الخسارة المقدرة للأسر تبدو منخفضة فيما يتعلق بتأثيرات انقطاع التيار الكهربائي لعام 2021، والتي تتميز بالعواقب الاجتماعية الشديدة والمدة الطويلة.

<sup>2</sup> يشير الرمز المخصص (ERCOT) إلى مجلس الموثوقية الكهربائية في تكساس، ويمثل الكيان الذي يدير سوق الكهرباء بالجملة الذي يغطي ما يقارب 90٪ من حمل الكهرباء في تكساس (FERC-NERC 2021).

<sup>3</sup> تنطبق هذه المقايضة من الناحية المفاهيمية على الأنظمة الأخرى التي لا تعمل بالكهرباء، مثل النقل والرعاية الصحية وما إلى ذلك.

<sup>4</sup> تعد بعض موارد الطاقة المتجددة، مثل منشآت الطاقة الكهرومائية، والكتلة الحيوية، والوقود الحيوي، والطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الشمسية المركزة، قابلة للتوزيع، على الرغم من أن توفرها يعتمد على الظروف المحلية.

<sup>5</sup> قدرة نظام الكهرباء على الاستمرار في العمل بشكل موثوق عند فشل أي مكون، يشير "N" إلى عدد مكونات التوليد والنقل، ويشير "N-1" إلى القدرة على تحمل فشل أحد المكونات والتعافي بسرعة كافية قبل فشل مكون آخر.

<sup>6</sup> تقوم NERC و ENTSO-E بأدوار مماثلة في إجراء دراسات الموثوقية وتقديم التوصيات لتحسين عمليات نظام الكهرباء.

<sup>7</sup> في عام 2021، كان الحمل الأقصى لتكساس 76.8 جيجاواط (FERC-NERC 2021).

<sup>8</sup> على الرغم من أن هدف 10٪ لعام 2020 قد تم تقديره بناءً على النسبة بين صافي سعة النقل للروابط البينية وإجمالي السعة الإنتاجية، يتم تقييم هدف الربط البيني الجديد البالغ 15٪ من خلال مجموعة من ثلاثة معايير فرعية: متوسط فروق سعر الجملة أقل من 2 يورو لكل ميجاواط في الساعة؛ النسبة بين إجمالي سعة النقل الاسمية للروابط البينية والحمل الذروي أعلى من 30٪؛ والنسبة بين إجمالي سعة النقل الاسمية للروابط البينية والسعات المتجددة المثبتة أعلى من 30٪ (European Commission 2017).

- Arab News. 2021. "SEC Deploys 10m Smart Meters in Move Toward Digital." Accessed April 13. <https://www.arabnews.com/node/1842396/corporate-news>
- Behnert, Marika, and Thomas Bruckner. 2018. "Causes and Effects of Historical Transmission Grid Collapses and Implications for the German Power System." *Institute for Infrastructure and Resources Management*. No. 03/2018. Leipzig: Institute for Infrastructure and Resources Management. <http://hdl.handle.net/10419/190501>
- Bhatt, Yagyavalk. 2021. "Renewable Energy Deployment to Stimulate Energy Transition in the Gulf Cooperation Council." *Renewable Energy Transition in Asia: Policies, Markets and Emerging Issues* (2021):161–83. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8905-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8905-8_8)
- Billinton, Roy, and Ronald N. Allan. 1984. "Power-system Reliability in Perspective." *Electronics and Power* 30(3):231–6. <https://doi.org/10.1049/ep.1984.0118>
- Blazquez, Jorge, Baltasar Manzano, Lester C. Hunt, and Axel Pierru. 2018. "The Value of Saving Oil in Saudi Arabia." KAPSARC Discussion Paper. <https://doi.org/10.30573/KS--2018-DP030>
- Blunt, Katherine, and Charles Passy. 2021. "In Texas, Winter Storm Forces Rolling Power Outages as Millions are Without Electricity." *Wall Street Journal*, February 16. Accessed February 20, 2022. <https://www.wsj.com/articles/winter-storm-forces-rolling-power-outages-in-texas-11613407767>
- Boiteux, Marcel. 1949. "La Tarification des Demandes en Pointe." *Revue Générale de l'Electricité* 58:157–79.
- Boiteux, Marcel. 1960. "Peak-load Pricing." *The Journal of Business* 33(2):157–79.
- Busby, Joshua W., Kyri Baker, Morgan D. Bazilian, Alex Q. Gilbert, Emily Grubert, Varun Rai, Joshua D. Rhodes, Sarang Shidore, Caitlin A. Smith, and Michael E. Webber. 2021. "Cascading Risks: Understanding the 2021 Winter Blackout in Texas." *Energy Research & Social Science* 77:102106. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102106>
- Campbell, Richard J., and Sean Lowry. 2012. *Weather-related Power Outages and Electric System Resiliency*. Washington, DC: Congressional Research Service, Library of Congress.
- Carlson, Tucker. 2021. "The great Texas climate catastrophe is heading your way." *Fox News*, February 15. Accessed February 20, 2022. <https://www.foxnews.com/opinion/tucker-carlson-texas-green-new-deal-climate-catastrophe>
- Chandramowli, Shankar, and Frank A. Felder. 2014. "Climate Change and Power Systems Planning—Opportunities and Challenges." *The Electricity Journal* 27(4):40–50. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2014.04.002>
- Chediak, Mark, and Naureen S. Malik. 2021. "Texas Isn't Ready for Another Deep Freeze." *Bloomberg*, October 30. Accessed February 20, 2022. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-30/texas-energy-grid-remains-vulnerable-to-winter-blackouts>
- Electric Power Research Institute (EPRI). 2022. *Enhancing Energy System Reliability and Resiliency in a Net-zero Economy*. Palo Alto, CA: EPRI. <http://mydocs.epri.com/docs/public/EPRI-Report-EnhancingEnergySystemReliability-20210804.pdf>
- Energy Information Administration (EIA). 2021a. "Hourly Electric Grid Monitor." <https://www.eia.gov/electricity/gridmonitor/dashboard/custom/pending>

Energy Information Administration (EIA). 2021b. "Texas Natural Gas Production Fell by Almost Half During Recent Cold Snap." February 25. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46896>

Energy Information Administration (EIA). 2021c. "Texas - State Energy Profile Analysis." Last modified April 15. <https://www.eia.gov/state/analysis.php?sid=TX>

Energy Information Administration (EIA). 2022. "Glossary." <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=R>

Energy Institute of the University of Texas at Austin. 2021. "The Timeline and Events of the February 2021 Texas Electric Grid Blackouts." <https://energy.utexas.edu/sites/default/files/UTAustin%20%282021%29%20EventsFebruary2021TexasBlackout%2020210714.pdf>

European Commission. 2017. "Report of the Commission Expert Group on Electricity Interconnection Targets: Towards a Sustainable and Integrated Europe." [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report\\_of\\_the\\_commission\\_expert\\_group\\_on\\_electricity\\_interconnection\\_targets.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report_of_the_commission_expert_group_on_electricity_interconnection_targets.pdf)

European Council. 2014. "Conclusions of the European Council of 23-24 October 2014." [https://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms\\_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf](https://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf)

European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). 2015. "Report on Blackout in Turkey on 31st March 2015, Final Version 1.0." [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional\\_Groups\\_Continental\\_Europe/20150921\\_Black\\_Out\\_Report\\_v10\\_w.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/20150921_Black_Out_Report_v10_w.pdf)

Federal Energy Regulatory Commission (FERC) and North American Electric Reliability Corporation (NERC) (FERC-NERC). "The February 2021 Cold Weather Outages in Texas and the South Central United States." <https://ferc.gov/media/february-2021-cold-weather-outages-texas-and-south-central-united-states-ferc-nerc-and>

Felder, Frank A. 2001. "An Island of Technicality in a Sea of Discretion": A Critique of Existing Electric Power Systems Reliability Analysis and Policy." *The Electricity Journal* 14(3):21–31. [https://doi.org/10.1016/S1040-6190\(01\)00183-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6190(01)00183-X)

Felder, Frank A., and Amro Elshurafa. 2021. "What Lessons Can KSA Learn from the Texas Blackouts?" KAPSARC Podcast no. 8. <https://www.kapsarc.org/podcast/what-lessons-can-ksa-learn-from-the-texas-blackouts/>

Felder, Frank A., and Marie Petitot. 2021. "Renewables, Reliability and Efficiency in Electricity Markets." KAPSARC Discussion Paper. <https://www.kapsarc.org/research/publications/renewables-reliability-and-efficiency-in-electricity-markets/>

Griswold, Niki, and Karina Kling. 2021. "Winter is Coming: As Texans Fear Future Blackouts, Energy Regulators Work to Ease Concerns." *Spectrum News*, November 11. <https://spectrumlocalnews.com/tx/south-texas-el-paso/news/2021/11/11/winter-is-coming--as-texans-fear-future-blackouts--energy-regulators-work-to-ease-concerns----->

Golding, Garrett, Anil Kumar, and Karel Mertens. 2021. "Cost of Texas' 2021 Deep Freeze Justifies Weatherization." Federal Reserve Bank of Dallas, April 15. <https://www.dallasfed.org/research/economics/2021/0415?topics=Texas+Economy>

Hasan, Shahid, Noura Mansouri, and Thamir Al-Shehri. 2021. "Beyond Smart Meters". KAPSARC Instant Insight. <https://www.kapsarc.org/research/publications/beyond-smart-meters/>

- Hauser, Christine, and Edgar Sandoval. 2021. "Death Toll from Texas Winter Storm Continues to Rise." *The New York Times*, July 14. <https://www.nytimes.com/2021/07/14/us/texas-winter-storm-deaths.html>
- International Energy Agency (IEA). 2019. "Jordan Key Energy Statistics." Available at <https://www.iea.org/countries/jordan>
- Kahnamouei, Ali Shakeri, Tohid Ghanizadeh Bolandi, and M-R. Haghifam. 2017. "The Conceptual Framework of Resilience and Its Measurement Approaches in Electrical Power Systems." Paper presented at the IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017), Birmingham, UK, September 26–28. <https://doi.org/10.1049/cp.2017.0335>
- Kröger, Wolfgang. 2008. "Critical Infrastructures at Risk: A Need for a New Conceptual Approach and Extended Analytical Tools." *Reliability Engineering & System Safety* 93(12):1781–87. <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.03.005>
- Kundur, Prabha. 2012. *Power System Stability and Control*. Third Edition. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Legislative Train. 2022. "Communication on Achieving a 15% Electricity Interconnection Target." <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/api/stages/report/current/theme/resilient-energy-union-with-a-climate-change-policy/file/communication-on-achieving-a-15-electricity-interconnection-target>
- Levin, Todd, Audun Botterud, W. Neal Mann, Jonghwan Kwon, and Zhi Zhou. 2022. "Extreme Weather and Electricity Markets: Key Lessons from the February 2021 Texas Crisis." *Joule* 6(1):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.015>
- Littlechild, Stephen, and Lynne Kiesling. 2021. "Hayek and the Texas Blackout." *The Electricity Journal* 34(6):106969. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106969>
- Lubega, William Naggaga, and Ashlynn S. Stillwell. 2018. "Maintaining Electric Grid Reliability Under Hydrologic Drought and Heat Wave Conditions." *Applied Energy* 210: 538–49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.091>
- Mays, Jacob, Michael Craig, L. Lynne Kiesling, Joshua Macey, Blake Shaffer, and Han Shu. 2022. "Private Risk and Social Resilience in Liberalized Electricity Markets." *Joule* 6(2):369-80. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.01.004>
- North American Electric Reliability Corporation (NERC). 2004. "Technical Analysis of the August 14, 2003, Blackout: What Happened, Why, and What Did We Learn? Report to the NERC Board of Trustees by the NERC Steering Group." [https://www.nerc.com/docs/docs/blackout/NERC\\_Final\\_Blackout\\_Report\\_07\\_13\\_04.pdf](https://www.nerc.com/docs/docs/blackout/NERC_Final_Blackout_Report_07_13_04.pdf)
- North American Electric Reliability Corporation (NERC). 2007. "Definition of 'Adequate Level of Reliability.'" <https://www.nerc.com/docs/pc/Definition-of-ALR-approved-at-Dec-07-OC-PC-mtgs.pdf>
- North American Electric Reliability Corporation (NERC). 2021a. "Announcement – Summer Assessment Warns of Potential Energy Shortfalls." <https://www.nerc.com/news/Headlines%20DL/SRA%20Announcement%2026MAY21.pdf>
- North American Electric Reliability Corporation (NERC). 2021b. "Glossary of Terms Used in NERC Reliability Standards." Version updated June 28. [https://www.nerc.com/files/glossary\\_of\\_terms.pdf](https://www.nerc.com/files/glossary_of_terms.pdf)

- Panteli, Mathaios, and Pierluigi Mancarella. 2015. "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience." *IEEE Power and Energy Magazine* 13(3):58–66. <https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334>
- Petit, Marie, Burçin Ünel, Rolando Fuentes, and Frank A. Felder. 2021. "Climate and Power System Reliability in the Aftermath of the Texas Blackouts." *IAEE Energy Forum* Third Quarter 2021. <https://www.iaee.org/en/publications/newsletterdl.aspx?id=958>
- Phillips, Stephanie. 2019. "Federal Regulation for a Resilient Electricity Grid." *Ecology Law Quarterly* 46(2019)(2):415.
- Plotnek, Jordan J., and Jill Slay. 2001. "Power Systems Resilience: Definition and Taxonomy with a View Towards Metrics." *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 33:100411. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100411>
- Rambo, Khulood A., David M. Warsinger, Santosh J. Shanbhogue, John H. Lienhard V, and Ahmed F. Ghoniem. 2017. "Water-energy Nexus in Saudi Arabia." *Energy Procedia* 105:3837–43. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.782>
- REN21. 2021. "Renewables 2021 Global Status Report." [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf)
- Reuters Staff. 2021. "Fact check: The Causes for Texas' Blackout Go Well Beyond Wind Turbines." *Reuters*, February 19. <https://www.reuters.com/article/uk-factcheck-texas-wind-turbines-explain-idUSKBN2AJ2EI>
- Saudi Vision 2030. 2022. "Renewable Energy Sector in the Kingdom." Accessed February 20, 2022. <https://www.vision2030.gov.sa/thekingdom/explore/energy/>
- Seneviratne, Sonia, Neville Nicholls, David Easterling, Clare Goodess, Shinjiro Kanae, James Kossin, and Yali Luo, Jose Marengo, Kathleen McInnes, Mohammad Rahimi, Markus Reichstein, Asgeir Sorteberg, Carolina Vera, and Xuebin Zhang. 2012. "Changes in Climate Extremes and Their Impacts on the Natural Physical Environment." In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, edited by C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley, 109–230. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, UK: Cambridge University Press. [https://library.harvard.edu/sites/default/files/static/collections/ipcc/docs/AR5\\_WG2\\_n\\_SREX\\_chapters\\_and\\_review/ii\\_SREX/c\\_Final\\_draft\\_SREX/SREX-Chap3\\_FINAL.pdf](https://library.harvard.edu/sites/default/files/static/collections/ipcc/docs/AR5_WG2_n_SREX_chapters_and_review/ii_SREX/c_Final_draft_SREX/SREX-Chap3_FINAL.pdf)
- Sheppard, David, and Scott DiSavino. 2012. "Superstorm Sandy Cuts Power to 8.1 Million Homes." *Reuters* U.S. News, October 30. <https://www.reuters.com/article/us-storm-sandy-powercuts-idUSBRE89T10G20121030>
- Stott, Peter. 2016. "How Climate Change Affects Extreme Weather Events." *Science* 352(6293):1517–18. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7271>
- Timmerberg, Sebastian, Anas Sanna, Martin Kaltschmitt, and Matthias Finkbeiner. 2019. "Renewable Electricity Targets in Selected MENA Countries—Assessment of Available Resources, Generation Costs and GHG emissions." *Energy Reports* (5):1470–87. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.003>

- Umunnakwe, A., H. Huang, K. Oikonomou, and K. R. Davis. 2021. "Quantitative Analysis of Power Systems Resilience: Standardization, Categorizations, and Challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149:111252. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111252>
- Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity (UCTE). 2004a. "Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy." [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/otherreports/20040427\\_UCTE\\_IC\\_Final\\_report.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/otherreports/20040427_UCTE_IC_Final_report.pdf)
- Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity (UCTE). 2004b. "Operation Handbook - Glossary." [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/glossary\\_v22.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/glossary_v22.pdf)
- Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity (UCTE). 2007. "Final Report: System Disturbance on 4 November 2006." <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/otherreports/Final-Report-20070130.pdf>
- Utilities Middle East Staff. 2021. "Oman to Roll Out 1.2 Million Smart Meters in Five Years." Utilities Middle East, April 15. <https://www.utilities-me.com/news/17121-oman-to-roll-out-12-million-smart-meters-in-five-years>
- Victoria State Government, Environment, Land, Water and Planning. 2018. "Post Event Review – Power Outages 28 & 29 January 2018." [https://www.energy.vic.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0021/328260/Post-Event-Review-Power-Outages-28-and-29-January-2018.pdf](https://www.energy.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0021/328260/Post-Event-Review-Power-Outages-28-and-29-January-2018.pdf)
- Walton, Robert. 2020. "Texas Regulators Approve New Smart Meter Rules, Limiting Access to Real-Time Data." *Utility Dive*, Updated April 22. <https://www.utilitydive.com/news/texas-regulators-approve-new-smart-meter-rules-limiting-access-to-real-tim/576093/>
- Ward, David M. 2013. "The Effect of Weather on Grid Systems and the Reliability of Electricity Supply." *Climatic Change* 121(1):103–13. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0916-z>
- World Bank. 2021. "The Value of Trade and Regional Investments in the Pan-Arab Electricity Market: Integrating Power Systems and Building Economies." Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36614>
- Ye, Chengjin, Libang Guo, Yi Ding, Ming Ding, Peng Wang, and Lei Wang. 2022. "Reliability Assessment of Interconnected Power Systems with HVDC Links Considering Frequency Regulation Process." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000491>
- Zappa, William, Martin Junginger, and Machteld van den Broek. 2019. "Is a 100% Renewable European Power System Feasible by 2050?" *Applied Energy* 233:1027–50. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>
- Zhang, Guanglun, Haiwang Zhong, Zhenfei Tan, Tong Cheng, Qing Xia, and Chongqing Kang. 2022. "Texas electric power crisis 2021 warns of a new blackout mechanism." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 8(1):1–9. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.07720>









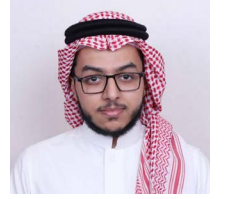
## نبذة عن المؤلفين

### ماري بيتيتيت



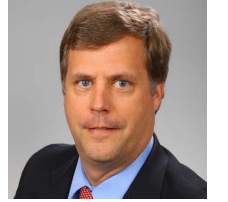
باحث مشارك أول في برنامج تحولات الطاقة والطاقة الكهربائية في كابسارك. تركز أبحاثها الحالية على نمذجة أنظمة الطاقة وتصاميم السوق لتحولات الطاقة. عملت قبل انضمامها إلى كابسارك مهندسة للبحوث في وحدة البحوث والتطوير لمجموعة كهرباء فرنسا في باريس. وخلال مسيرتها في مجموعة كهرباء فرنسا عملت على تصميم سوق الكهرباء على المدى الطويل والقصير، وشبكات النقل على النطاق الأوروبي، وفرص الشحن الذكي للسيارات الكهربائية. كما أنها حاصلة على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة دوفين في فرنسا، ودرجة الماجستير في اقتصاديات البيئة والطاقة من École des Ponts ParisTech في فرنسا، ودرجة الماجستير في الهندسة من ENSTA Institut Polytechnique de Paris في فرنسا.

### خالد الحضرمي



محلل في برنامج تحولات الطاقة والطاقة الكهربائية في كابسارك. وهو مهندس طاقة كهربائية وأجهزة كهربائية حاصل على درجة البكالوريوس من قسم الهندسة الكهربائية بجامعة الملك عبد العزيز. عمل في عدة مشاريع في جامعة الملك عبد العزيز وأثناء فترة تدريبه في كابسارك تتعلق بمصادر الطاقة المتجددة ومجال أنظمة الطاقة الكهربائية، وكان معظمها ضمن شبكة نظام التوزيع.

### فرانك فيلدر



مهندس ومحلل سياسات الطاقة ومدير برنامج تحولات الطاقة والطاقة الكهربائية. عمل قبل انضمامه لكابسارك أستاذًا باحثًا في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز، ومديرًا لمعهد روتجرز للطاقة ومديرًا لمركز سياسة الطاقة والاقتصاد والبيئة. وخلال عمله في مختلف الأدوار، أجرى بحثًا فريدة وتطبيقية. كانت مجالات بحثه في نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية؛ سياسات الطاقة النظيفة؛ وتغير المناخ للمؤسسات الأكاديمية والهيئات الحكومية ومرافق الطاقة. كما عمل مستشارًا اقتصاديًا ومهندسًا نوويًا.

## نبذة عن المشروع

تعد هذه الدراسة جزءاً من مشروع "الابتكارات في أسواق الكهرباء، وأنظمة الشبكات، والاستثمارات والتقنيات منخفضة الكربون" في إطار برنامج كابسارك لتحويلات الطاقة والطاقة الكهربائية. يهدف هذا المشروع إلى تقديم رؤى حول تحول قطاع الكهرباء السعودي. ويتميز هذا التحول بالرغبة في زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة واستبدال الغاز الطبيعي بالوقود السائل. كما يجب أن تضمن التوازن المالي، وتوسيع صادرات الكهرباء، وإنتاج الهيدروجين الأخضر، وتنويع الاقتصاد السعودي من خلال التوطين. يقدم هذا المشروع رؤى لهذا التحول من خلال المناقشة والتعلم من أسواق الكهرباء في جميع أنحاء العالم.



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