سلسلة التمكين المعرفية

اللقاء السادس

الشبكة الكهربائية والمركبة الكهربائية :علاقة تحتاج نماذج تحليلية دقيقة

من سلوك السائق إلى قرارات التخطيط :كيف نبني شبكة كهربائية جاهزة لعصر السيارات الكهربائية

أهلًا بكم في اللقاء السادس

سلسلة التمكين المعرفية هي سلسلة لقاءات علمية تنظمها جمعية تقنيات المركبات الكهربائية، تهدف إلى تبسيط أحدث الأبحاث والتقنيات في مجالات الطاقة المستدامة والمركبات الكهربائية، وربطها بالسياق الوطني ورؤية 2030، لجمهور من الطلاب والباحثين ورواد الأعمال والمهتمين.

د .عبدالعزيز المطيري

دكتوراه في الهندسة الكهربائية والحاسوبية —جامعة واترلو، كندا

باحث في نمذجة شحن المركبات الكهربائية وموثوقية أنظمة الطاقة

هذا اللقاء رحلة معرفية متكاملة :من فهم المشكلة إلى استعراض حلولها، مبنية على تجربة بحثية أصيلة في هذا المجال.

بنهاية هذا اللقاء ستكون قادرًا على...

فهم الصورة الكبرى

إدراك سبب اعتبار شحن المركبات الكهربائية تحديًا حقيقيًا لموثوقية الشبكة الكهربائية، لا مجرد تفصيل تقني.

استيعاب المفاهيم الأساسية

التعرف على مفهوم موثوقية أنظمة القدرة، ومؤشراتها، وكيف تُقاس.

فهم منهجية النمذجة الإحصائية ونتائجها

معرفة كيف تُستخدم البيانات الحقيقية والاحتمالات لبناء نماذج موثوقة، والاطلاع على نتائج فعلية من دراسة تطبيقية.

الوصول إلى الحلول العملية

استعراض أطر الاستجابة الديناميكية وتصميم تعرفة أوقات الاستخدام الذكية، ونتائجها الفعلية في تخفيف الأثر على الموثوقية.

أربعة محاور في رحلة معرفية واحدة

01

لماذا الآن؟

المشهد العالمي والسعودي للمركبات الكهربائية

02

ما الموثوقية؟

المفاهيم والمؤشرات الأساسية لقياس أداء الشبكة

03

ماذا تقول البيانات؟

النمذجة الإحصائية ونتائجها التطبيقية الفعلية

04

ما الحل؟

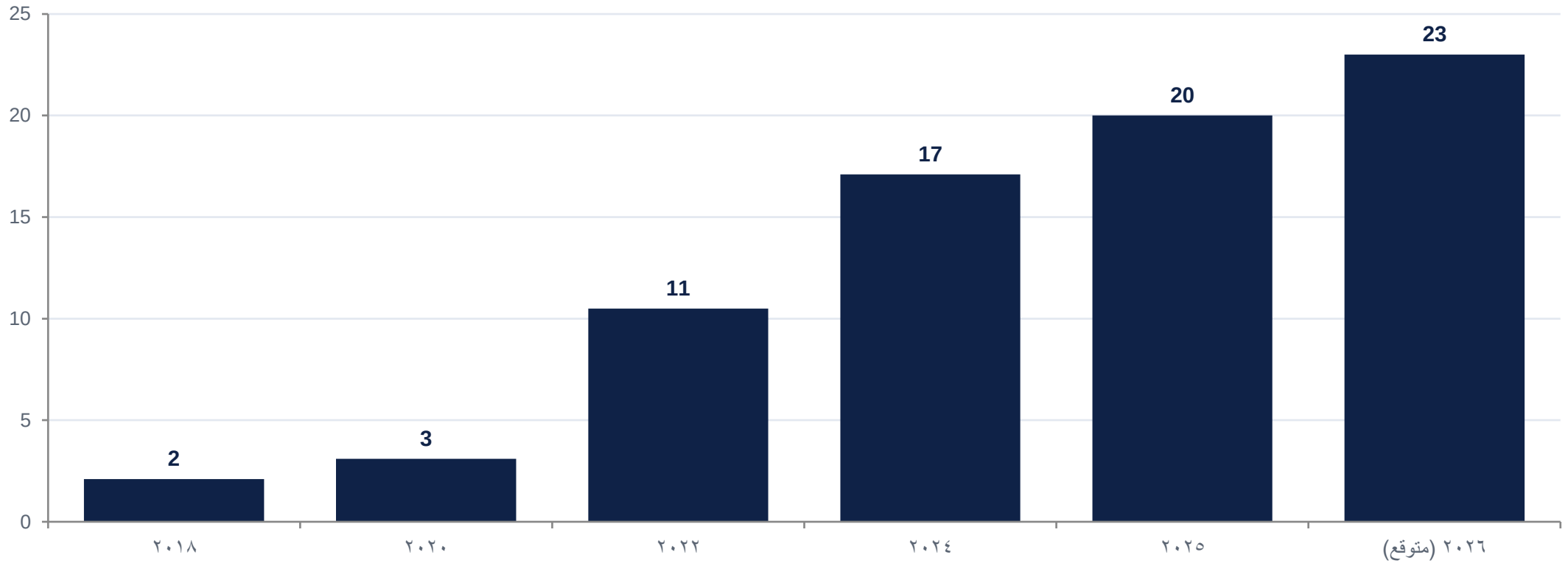
أطر الاستجابة الذكية ونتائجها في تحسين الموثوقية

المحور الأول

لماذا نتحدث عن المركبات الكهربائية اليوم؟

من هامش النقاش إلى قلب استراتيجية الطاقة الوطنية

نمو متسارع لا يمكن تجاهله



المصدر: الوكالة الدولية للطاقة — (IEA) تقرير آفاق المركبات الكهربائية العالمي 2026..

أرقام لافتة

ماذا يعني هذا النمو؟

+450

مليون مركبة كهربائية متوقعة عالميًا بحلول 2035في سيناريو السياسات الحالية

×6

الزيادة المتوقعة في الطلب الكهربائي للشحن بحلول 2035مقارنة بـ2025

28٪

من إجمالي مبيعات السيارات عالميًا متوقع أن تكون كهربائية في 2026

المصدر :الوكالة الدولية للطاقة، تقرير آفاق المركبات الكهربائية العالمي 2026.

المملكة تتحرك بخطى واثقة

رؤية 2030

استهداف رفع حصة المركبات الكهربائية في الرياض إلى 30% ضمن برنامج جودة الحياة وتنويع مصادر الطاقة.

شركة إيفيك (EVIQ)

مشروع مشترك بين صندوق الاستثمارات العامة والشركة السعودية للكهرباء، بخطة لنشر أكثر من 5000 نقطة شحن في نحو 1000 موقع استراتيجي حول المملكة.

التوسع الحالي

عشرات محطات الشحن السريع تعمل بالفعل في الرياض وجدة والدمام، مع تركيز 2026 على ربط الطرق السريعة بين المدن الرئيسية.

منظومة صناعية متكاملة

شركات تصنيع محلية مثل Ceer ولوسيد موتورز إلى جانب مطوري البنية التحتية، تبني سلسلة قيمة وطنية متكاملة.

السيارة الكهربائية ليست وسيلة نقل فقط

هي، من منظور الشبكة الكهربائية، حِمل كهربائي ضخم ومتحرك ينضم فجأة إلى منظومة لم تُصمَّم أصلًا لاستيعابه.

وهذا هو جوهر التحدي الذي بُني عليه هذا البحث.

لماذا يختلف حِمل شحن المركبات الكهربائية؟

١ .الحجم الكبير للحمل

- حمل شحن المركبة الواحدة أكبر بكثير من معظم الأجهزة المنزلية التقليدية
- استهلاك الطاقة المتوقع من المركبات الكهربائية سيمثل ضغطًا ملموسًا على الشبكة
- التأثير يتضاعف مع ارتفاع نسب الانتشار (Penetration Level)

٢ .عدم اليقين المزدوج

- عشوائية جوهرية في سلوك السائق)وقت الوصول، المغادرة، المسافة(
- نقص معرفي حول نسب الانتشار المستقبلية والتقنيات القادمة
- هذا المزيج يجعل التخطيط التقليدي للأحمال غير كافٍ

المحور الثاني

ما هي موثوقية نظام الطاقة؟

لغة مشتركة لفهم مدى قدرة الشبكة على الوفاء بالتزاماتها

موثوقية النظام الكهربائي :تعريف مبسّط

- موثوقية النظام الكهربائي (Power System Reliability) تعني قدرة الشبكة على تزويد المستهلكين بالطاقة الكهربائية بشكل مستمر وبالجودة المطلوبة، حتى في ظل الظروف غير المتوقعة.
- تنقسم الموثوقية إلى بُعدين رئيسيين :كفاية القدرة التوليدية (Adequacy) — أي هل تتوفر طاقة كافية أصلًا؟ —والأمان التشغيلي (Security) — أي هل يستطيع النظام الصمود أمام الأعطال المفاجئة؟
- هذا اللقاء يركز على بُعد الكفاية (Generation Adequacy)، وهو المدخل الذي اعتمده هذا البحث لدراسة أثر شحن المركبات الكهربائية.

المستويات الهرمية لتقييم الموثوقية

HL-III

حتى نقطة التوزيع

هل تصل الطاقة فعليًا إلى كل مستهلك عبر شبكة التوزيع المحلية؟

HL-II

التوليد +النقل

هل تصل الطاقة الكافية عبر شبكة النقل إلى نقاط الاستهلاك الرئيسية؟

HL-I

كفاية التوليد

هل تكفي محطات التوليد لتغطية الحمل الكلي المتوقع على مستوى النظام؟

محور بحثنا اليوم

كيف نقيس الموثوقية رقميًا؟

LOLE — مدة فقدان الحمل المتوقعة

عدد الساعات أو الأيام في السنة التي يُتوقع أن تعجز فيها القدرة التوليدية عن تغطية الحمل .كلما زاد الرقم، ضعفت الموثوقية.

LOEE — الطاقة غير المزوَّدة المتوقعة

كمية الطاقة بالميجاواط ساعة التي يُتوقع عدم توفيرها للمستهلكين خلال العام بسبب نقص القدرة.

لماذا هذه المؤشرات مهمة؟

هي اللغة التي يستخدمها مخططو الشبكات لاتخاذ قرارات الاستثمار :متى نضيف محطة توليد جديدة؟ ومتى نحتاج حلولًا بديلة؟

السؤال الذي انطلق منه هذا البحث

هل البنية التحتية الحالية لشبكاتنا الكهربائية جاهزة فعلًا لاستيعاب ملايين المركبات الكهربائية دون المساس بموثوقية إمداد الكهرباء؟

إجابة هذا السؤال تتطلب أولًا فهم سلوك السائقين، ثم بناء نماذج رياضية موثوقة تُترجم هذا السلوك إلى حِمل كهربائي قابل للقياس.

03

المحور الثالث

من سلوك السائق إلى نموذج رياضي

كيف نحوّل العشوائية اليومية إلى أدوات تخطيط دقيقة

نوعان من عدم اليقين يجب التمييز بينهما

عدم اليقين العشوائي (Aleatory)

- عشوائية جوهرية لا يمكن إزالتها مهما زادت البيانات
- مثال :اختلاف وقت وصول كل سائق إلى المنزل يوميًا
- يُعالَج بالنمذجة الاحتمالية والمحاكاة الإحصائية

عدم اليقين المعرفي (Epistemic)

- ناتج عن نقص في المعرفة الحالية، ويمكن تقليصه بمزيد من الدراسة
- مثال :عدم معرفة نسبة انتشار المركبات الكهربائية بدقة خلال 10سنوات
- يُعالَج بتحديث البيانات ودراسة سيناريوهات متعددة

ثلاثة عوامل تحدد حِمل الشحن

مقدار الطاقة المستهلكة

كمية الكهرباء التي تحتاجها كل مركبة لإعادة شحن بطاريتها، وتعتمد على المسافة المقطوعة يوميًا وسعة البطارية.

مكان الشحن

هل يتم الشحن في المنزل، أم في العمل، أم في محطات عامة؟ لكل موقع نمط تحميل مختلف على الشبكة.

توقيت الشحن

متى يبدأ السائق الشحن فعليًا؟ هذا العامل هو الأكثر تأثيرًا على تزامن الحمل مع ذروة استهلاك الشبكة.

لماذا لا يكفي "التخمين "؟

بيانات فردية متناثرة عن بضع مركبات لا تكفي لتخطيط شبكة تخدم ملايين المستخدمين .
نحتاج نماذج رياضية مبنية على أساس إحصائي متين، قادرة على تمثيل التنوع الحقيقي في سلوك ملايين السائقين.

وهنا يأتي دور دوال التوزيع الاحتمالي .(Probability Distribution Functions)

رحلة البحث الكاملة :من البيانات إلى القرار

هذا اللقاء يغطي جميع الخطوات الخمس —من جمع البيانات وحتى تصميم الحلول ونتائجها الفعلية

1

جمع بيانات سلوك السائقين

2

بناء نماذج احتمالية دقيقة

3

محاكاة سيناريوهات الشحن

4

تقييم الأثر على الموثوقية

5

تصميم حلول الاستجابة للطلب

ثلاثة متغيرات سلوكية في صميم النموذج

وقت الوصول إلى المنزل

اللحظة التي يصل فيها السائق إلى المنزل ويُرجَّح أن يبدأ الشحن —عامل حاسم في تحديد تزامن الحمل مع ذروة الشبكة المسائية.

وقت المغادرة من المنزل

يحدد المدة الفعلية المتاحة للشحن، وبالتالي المرونة الممكنة في جدولة عملية الشحن.

المسافة اليومية المقطوعة

تحدد مباشرة كمية الطاقة المطلوبة لإعادة شحن البطارية، وتتفاوت بشكل كبير بين السائقين.

من أين جاءت البيانات الحقيقية؟

لماذا فئات مركبات محددة؟

- سيارات ركاب (خفيفة، مدمجة، متوسطة، ثقيلة)
- المركبات الرياضية متعددة الأغراض (SUV)
- الشاحنات الصغيرة (Pickup)
- سيارات الفان

هذا التصفية تضمن أن العينة تمثل الفئات الأكثر ملاءمة لتحويلها إلى مركبات كهربائية.

المسح الوطني الأمريكي للتنقل المنزلي (NHTS)

يُعد هذا المسح من أشمل قواعد البيانات المتاحة عالميًا لأنماط التنقل الفردي، ويوفر معلومات دقيقة عن أوقات الوصول والمغادرة، وعدد الرحلات وأطوالها، ومواقع التوقف.

أسرة شملها المسح الأصلي	1,048,576
مركبة ضمن قاعدة البيانات	309,164
مركبة بعد تصفية أربع فئات مركبات رئيسية	~150,000

12 نموذجًا احتماليًا ..واختبار واحد للحكم بينها

12 دالة احتمالية نظرية للاختبار

Beta, Burr, Chi-Squared, Dagum, Exponential, Gamma, Johnson SU, Johnson SB, Log-Gamma, Lognormal, Normal, Rayleigh, Weibull

بعضها استُخدم سابقًا لنمذجة سلوك السائقين (Normal, Lognormal)، وأخرى مرنة شكليًا لم تُختبر من قبل في هذا السياق تحديدًا.

اختبار كولموغوروف-سميرنوف (K-S)

يقيس أكبر فرق رأسي بين التوزيع التراكمي النظري المقترح والتوزيع التراكمي الفعلي المستمَد من البيانات الحقيقية.

القيمة الحرجة عند مستوى ثقة 95% = 0.2693

إذا تجاوزت قيمة الاختبار هذا الحد، تُرفض الدالة إحصائيًا لعدم قدرتها على تمثيل البيانات الحقيقية بدقة.

الحالة الأولى :وقت الوصول إلى المنزل

أُخضعت 12 دالة احتمالية لاختبار K-S على بيانات وقت الوصول الفعلية

الأفضل مطابقةً (أقل قيمة إحصائية K-S)

1 **Dagum**
D = 0.0834

2 **Burr**
D = 0.0894

3 **Johnson-SU**
D = 0.0920

الأضعف مطابقةً (تُستبعد إحصائيًا)

Log-Gamma
D = 0.2032

Rayleigh
D = 0.2625

Exponential
D = 0.4287

القيمة الحرجة — 0.2693 =القيم الثلاث اليمنى فقط هي المرفوضة إحصائيًا في هذه الحالة.

الحالة الثانية :وقت المغادرة من المنزل

نفس المنهجية طُبّقت على بيانات وقت المغادرة الفعلية

الأفضل مطابقةً (أقل قيمة إحصائية K-S)

1. Dagum
2. Burr
3. Johnson-SB

الأضعف مطابقةً (تُستبعد إحصائيًا)

- Normal
- Rayleigh
- Exponential

نتيجة متسقة تمامًا مع الحالة الأولى :Dagum و Burrيتصدران مجددًا، مع تفوّق Johnson-SBهذه المرة على .SU

الحالة الثالثة :المسافة اليومية المقطوعة

اختبار المطابقة على بيانات المسافة اليومية الفعلية لعينة الدراسة

الأفضل مطابقةً)أقل قيمة إحصائية (K-S

1	**Lognormal**	أفضل مطابقة
2	**Burr**	مطابقة قوية
3	**Johnson-SB**	مطابقة جيدة

الأضعف مطابقةً)تُستبعد إحصائيًا(

Chi-Squared	ضعيف
Normal	ضعيف جدًا
Rayleigh	الأضعف

هنا يتصدّر Lognormal تحديدًا — وهو ما يتماشى مع الطبيعة غير المتماثلة لبيانات المسافات اليومية.

خيط مشترك عبر الحالات الثلاث

توزيعا Dagum و Burr يتصدران المطابقة في جميع الحالات الثلاث دون استثناء، بينما يتبدل توزيع Johnson SU أو SB حسب طبيعة كل متغير — و Lognormal هو الأنسب تحديدًا لوصف المسافة اليومية.

هذا الاتساق هو ما يمنح هذه النماذج مصداقيتها العلمية للاستخدام المباشر من قِبل الباحثين والمخططين.

لماذا تهم هذه النتيجة المخطط والباحث؟

- معادلات رياضية جاهزة الاستخدام :بدلًا من جمع بيانات ميدانية مكلفة من جديد، يمكن لأي باحث أو مخطط استخدام هذه الدوال مباشرة لتقدير أنماط شحن واقعية.
- تمثيل دقيق للسلوك الحقيقي :توفر هذه التوزيعات وصفًا واقعيًا للمتغيرات، ما يقود إلى تقديرات أدق للمخاطر ومؤشرات الأداء.
- القدرة على تمثيل الحالات النادرة :تسمح هذه النماذج بتوليد سيناريوهات متطرفة محتملة لم تظهر في العيّنة الأصلية، وهو أمر بالغ الأهمية لتخطيط الطوارئ.

محاكاة مونت كارلو :توليد آلاف الاحتمالات

بدلًا من الاكتفاء بسيناريو واحد "متوسط"، تُستخدم محاكاة مونت كارلو لتوليد آلاف السيناريوهات العشوائية الممكنة لسلوك السائقين، اعتمادًا على النماذج الاحتمالية المختارة.

النتيجة :صورة إحصائية شاملة للمخاطر المحتملة، لا مجرد تقدير نقطي واحد قد يكون مضللًا.

مختبر افتراضي لاختبار النماذج :نظام IEEE-RTS

ما هو نظام IEEE-RTS؟

نظام اختبار موثوقية معياري ومعترف به عالميًا، يُستخدم كـ"مختبر افتراضي "لتجربة نماذج جديدة على بنية شبكة واقعية دون الحاجة للتجربة على شبكة تشغيلية حقيقية.

مولّدًا تقليديًا 400 – 12ميجاواط	32
إجمالي القدرة التوليدية المركّبة	3,405 MW
ذروة الحمل السنوية المرجعية	2,850 MW

مزيج توليدي واقعي ومتنوع

- وحدات بخارية تعمل بالزيت والفحم 350 – 12)م.و(
- وحدات مائية (Hydro)بقدرة 50م.و
- وحدتان نوويتان بقدرة 400م.و لكل منهما
- معدلات أعطال وإصلاح موثقة لكل نوع وحدة

04

المحور الرابع

نتائج تقييم الأثر على الموثوقية

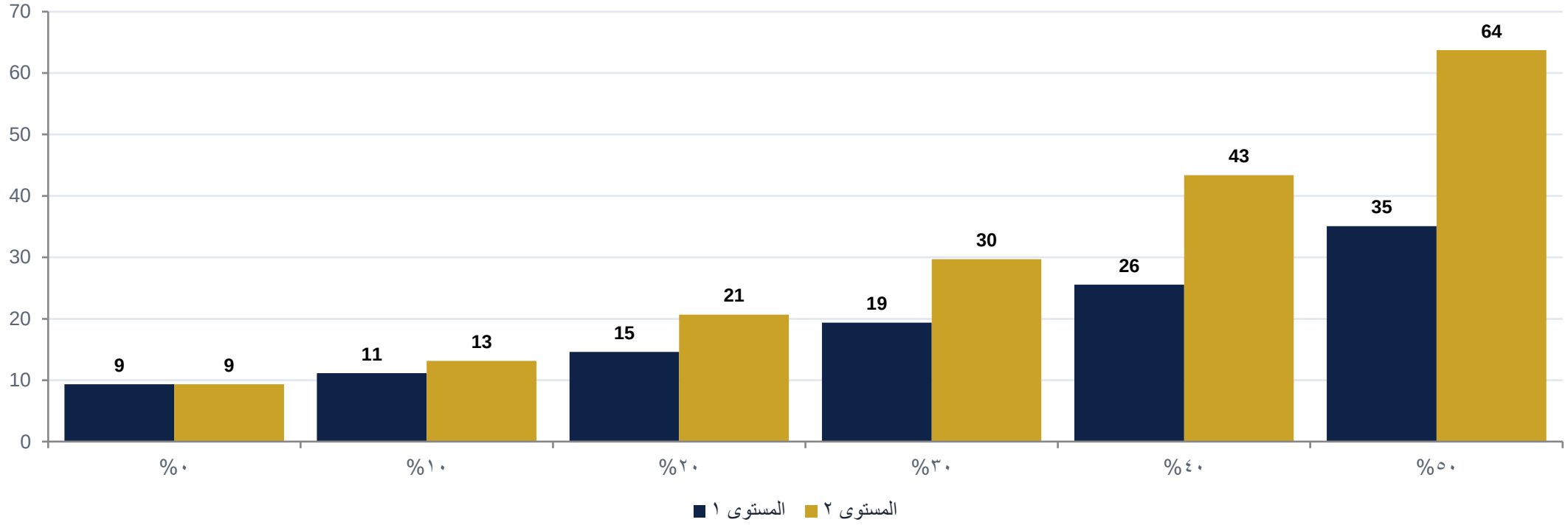
من النموذج الرياضي إلى أرقام حقيقية قابلة لاتخاذ القرار

خمسة سيناريوهات لاختبار الأثر بشكل شامل

نسبة الانتشار	نوع المركبة	مستوى الشحن	استراتيجية الشحن	الحالة
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	1 المستوى	شحن غير متحكَّم به	**1.A**
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	2 المستوى	شحن غير متحكَّم به	**1.B**
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	1 المستوى	TOUاستجابة لتعرفة	**2.A**
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	2 المستوى	TOUاستجابة لتعرفة	**2.B**
متغيّر	كل نوع مركبة على حدة	1 المستوى	شحن غير متحكَّم به	**3**

طُبّقت جميع الحالات على نظام IEEE-RTS باستخدام محاكاة مونت كارلو.

الحالة الأولى :أثر الشحن غير المتحكَّم به على LOLE



LOLE بوحدة ساعة/سنة، بحسب نسبة انتشار المركبات الكهربائية .المصدر :نتائج الدراسة التطبيقية على نظام IEEE-RTS.

نتيجة رئيسية

نمو أسّي ..لا خطي

×7

الزيادة الإجمالية في LOLE عند 50% انتشار بمستوى الشحن 2مقارنة بحالة الصفر

38٪

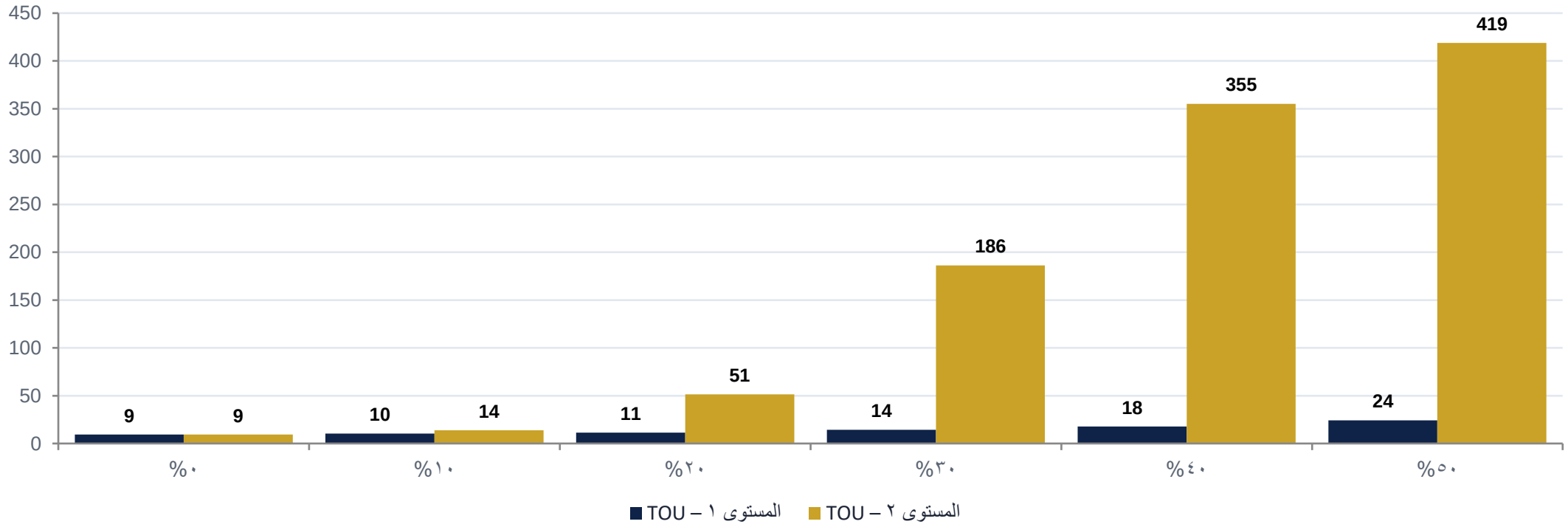
معدل نمو LOLE مع كل زيادة 10% في نسبة الانتشار —عند استخدام المستوى 2

27٪

معدل نمو LOLE مع كل زيادة 10% في نسبة الانتشار —عند استخدام المستوى 1

المفارقة اللافتة :مؤشرات الموثوقية عند 50%انتشار بالمستوى 1قريبة جدًا من مؤشرات 30% انتشار فقط بالمستوى 2.

الحالة الثانية :تعرفة TOU ..حل أم كارثة؟



LOLE بوحدة ساعة/سنة .عند 50% انتشار بالمستوى 2، يصل LOLE إلى 418.91 ساعة/سنة —أعلى بأكثر من 6أضعاف من الشحن غير المتحكَّم به لنفس المستوى.

لماذا تنهار فعالية TOU عند المستوى الثاني؟

عند المستوى 1، تنجح تعرفة TOU في خفض LOLE و LOEE بنحو 30% عند 50% انتشار لكن عند المستوى 2، يبدأ عدد كبير من السائقين الشحن في نفس الساعة بالضبط — لحظة بدء التعرفة المنخفضة — فتتولّد ذروة حمل أضخم من ذروة النظام الأصلية.

الدرس :حافز التسعير وحده، دون تنسيق زمني ذكي، قد يُبدّل المشكلة موقعها بدلًا من حلها.

الحالة الثالثة :هل نوع المركبة يغيّر النتيجة؟

مركبات البطارية الصغيرة (TP)

تعطي أقل تأثير على مؤشرات الموثوقية —نتائج متفائلة جدًا لا تعكس الصورة الكاملة إذا اعتُمدت وحدها.

مركبات ذات بطاريات كبيرة (CV, NL, TS)

تُنتج مؤشرات مخاطر أعلى بوضوح —نوع المركبة عامل حاسم لا يجوز إغفاله في أي دراسة تخطيطية.

نتيجة مفاجئة :البطارية الكبيرة لا تعني بالضرورة أثرًا أكبر بالتناسب

أغلب الرحلات اليومية وفق بيانات NHTS تقل عن 35 ميلًا —مسافة يمكن لجميع الأنواع تغطيتها بسهولة، ما يجعل استهلاكها اليومي متقاربًا رغم تفاوت سعة البطاريات .الفارق الحقيقي يكمن في كفاءة استهلاك الطاقة :نحو 0.45كيلوواط/ساعة لكل ميل لمركبات CV، مقابل 0.32فقط لمركبات NLو.TS

أهم ما تكشفه نتائج الفصل الرابع

- مستوى الشحن، نسبة الانتشار، وسعة البطارية عوامل حاسمة يجب تمثيلها بدقة —تبسيطها المفرط يُنتج تقديرات خاطئة لمخاطر النظام.
- الشحن غير المتحكَّم به عند مستويات انتشار وشحن مرتفعة يمثل تهديدًا جوهريًا لموثوقية الشبكة، بسبب تزامن غالبية السائقين مع ساعة الذروة.
- تعرفة TOU الثابتة التقليدية تنجح جزئيًا عند الشحن البطيء (مستوى 1)، لكنها قد تُفاقم المشكلة بشكل كارثي عند الشحن السريع (مستوى 2 — وهذا يفتح الباب مباشرة أمام حلول أذكى.

05

المحور الخامس

من المشكلة إلى الحل

بنتائج مثبتة رقميًا ..حلّان مبنيان على النمذجة الإحصائية ذاتها

ست فصول ..من فهم المشكلة إلى تصميم الحل

الفصل 6

تصميم TOU ذكي

تعرفة مصمَّمة إحصائيًا ومتوافقة مع سلوك السائقين

الفصل 5

الاستجابة الديناميكية

حل تفاعلي للأحداث الحرجة لحظة بلحظة

الفصل 4

تقييم الأثر

قياس أثر الشحن غير المتحكَّم به و TOUالتقليدية

الفصل 3

نمذجة سلوك السائق

أفضل الدوال الاحتمالية لتمثيل البيانات الحقيقية

الفصل 2-1

الخلفية والدافع

لماذا موثوقية الشبكة تتأثر بالمركبات الكهربائية

إطار الاستجابة الديناميكية للأحداث الحرجة

المرحلة الأولى :تحديد الأحداث الحرجة

تحديد الساعات التي يعجز فيها النظام عن تلبية حمل الشحن بالكامل، وحساب مقدار "الطلب غير الملبى (DNS) "في كل ساعة حرجة —وهو ما يحدد عدد المركبات المطلوب مشاركتها في برنامج الاستجابة.

الأحداث الحرجة محدودة العدد فعليًا —أيام وساعات قليلة نسبيًا في السنة، ما يجعل هذا الحل عمليًا وقابلًا للتطبيق.

المرحلة الثانية :استجابة ضمن حدود الراحة

- الشرط الأول :مدة تواجد المركبة بالمنزل أطول من وقت الشحن المطلوب
- الشرط الثاني :تقاطع وقت الشحن المعتاد مع الساعات الحرجة فعليًا
- عند تحقق الشرطين :مشاركة جزئية أو كاملة في تفادي ساعات الذروة، دون الإخلال بجدول السائق

النتائج :تحسّن جوهري في مؤشرات الموثوقية

نسبة الانتشار	LOLE (1مستوى)دون استجابة	LOLE (1مستوى)مع استجابة ديناميكية	LOLE (2مستوى)مع استجابة ديناميكية
0%	9.36	9.36	9.36
10%	11.14	9.52	9.36
20%	14.60	9.70	9.36
30%	19.37	9.92	9.36
40%	25.54	10.25	9.36
50%	35.09	10.78	9.36

LOLE بوحدة ساعة/سنة .عند المستوى 2مع الاستجابة الديناميكية، تبقى الموثوقية طوال نطاق الانتشار مطابقة تمامًا لحالة عدم وجود مركبات كهربائية أصلًا .(9.36)

الشبكة "لا تشعر "بوجود المركبات الكهربائية

عند تطبيق الاستجابة الديناميكية مع الشحن السريع (المستوى 2)، يبقى مؤشر LOLE ثابتًا تمامًا عند 9.36 ساعة/سنة —بلا أي تدهور —حتى مع وصول نسبة الانتشار إلى 50%.

الدرس الجوهري :المرونة الكامنة في سلوك السائقين، إن استُثمرت بذكاء وضمن حدود راحتهم، كافية لامتصاص أثر المركبات الكهربائية بالكامل تقريبًا.

تصميم تعرفة أوقات استخدام (TOU) ذكية إحصائيًا

I

نماذج عشوائية لكل مكوّن

محاكاة التوليد التقليدي وطاقة الرياح عبر MCMC و-K means والحمل التقليدي معًا

II

تقييم هامش الاحتياطي (SRM)

أسلوب الصندوق (Box-Plot) وقواعد خبراء لتصنيف كل ساعة :منخفضة أو متوسطة أو ذروة

III

التقييم والتحقق

اختبار السيناريوهات المرشَّحة إحصائيًا واختيار الجدول الأمثل وفق مؤشرات الموثوقية

من مليارات الاحتمالات ..إلى عشرات فقط

128

سيناريو لموسم الصيف —الفارق يعكس اختلاف خصائص حمل كل موسم

64

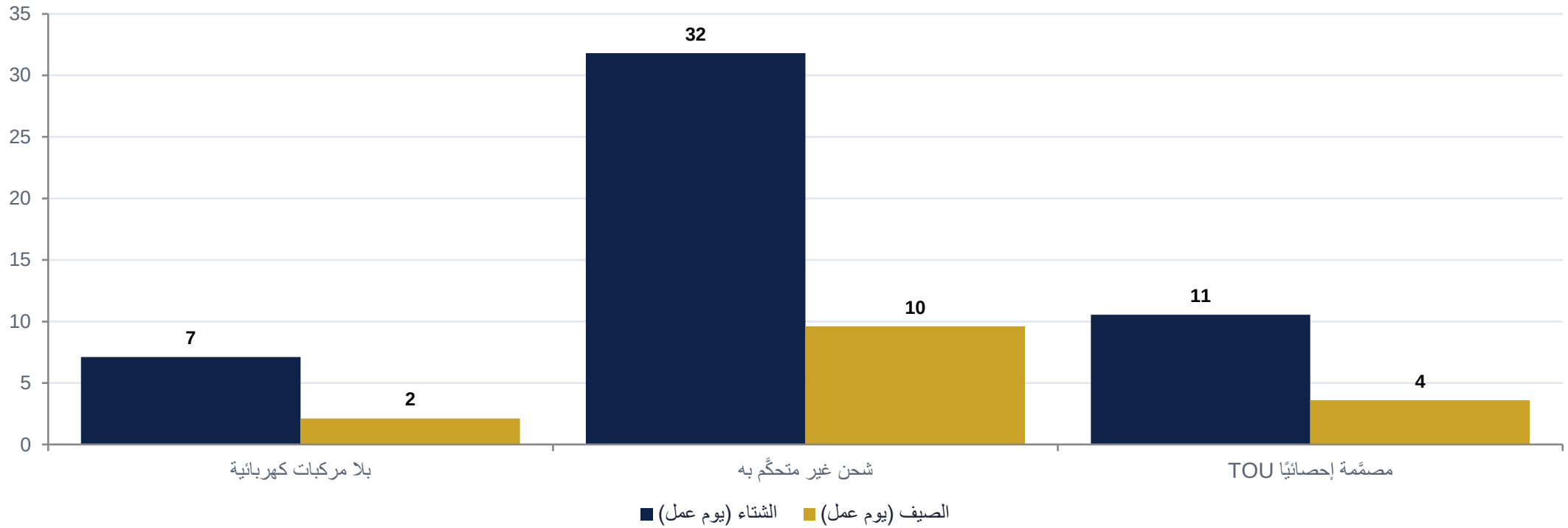
سيناريو فقط بعد تطبيق منهجية Box-Plot وقواعد الخبراء لموسم الشتاء

2.8×10^{11}

إجمالي التوافيق الممكنة لتصنيف 24ساعة ذروة/متوسط/منخفض (دون منهجية)

هذا الاختزال الهائل في عدد السيناريوهات هو ما يجعل تصميم تعرفة TOU مدروسة إحصائيًا أمرًا عمليًا وقابلًا للتنفيذ.

أثر التعرفة الذكية على LOLE: الشتاء والصيف



LOLE بوحدة ساعة/سنة عند 50% انتشار. التعرفة المصمَّمة تُعيد المؤشر قريبًا جدًا من حالة عدم وجود مركبات كهربائية أصلًا.

مقارنة شاملة :قبل التعرفة وبعدها

الحالة	بلا مركبات كهربائية	شحن غير متحكَّم به 50%	المصمَّمة TOUوفق تعرفة 50%
(بلا رياح)	9.36	42.74	15.46
(مع طاقة رياح)	14.53	62.60	21.75

LOLE بوحدة ساعة/سنة على مستوى النظام الكلي .التخفيض يبلغ نحو 64%بلا رياح، ونحو 65%مع إضافة طاقة الرياح —وقد يصل إلى 70%في المواسم الأكثر تأثرًا تحديدًا .

أربع استراتيجيات ..أي منها الأنسب؟

استجابة ديناميكية للأحداث الحرجة

9.36

LOLE ساعة/سنة

يطابق حالة عدم وجود مركبات كهربائية إطلاقًا

تعرفة TOU مصمَّمة إحصائيًا

15.46

LOLE ساعة/سنة

خفض 64%~مقارنة بالشحن غير المتحكَّم به

تعرفة TOU تقليدية

418.91

LOLE ساعة/سنة

قد تُفاقم الأزمة عند الشحن السريع

شحن غير متحكَّم به

63.74

LOLE ساعة/سنة

عند 50% انتشار، مستوى 2

ماذا يعني هذا لأصحاب القرار والباحثين؟

لمشغّلي الشبكة ومخططيها

الاستثمار في البنية التحتية التفاعلية (تصال ثنائي الاتجاه) يمثل أولوية أعلى من التوسع في التوليد التقليدي وحده لاستيعاب المركبات الكهربائية.

لصانعي السياسات التعرفية

أي تعرفة TOU يجب أن تُصمَّم بناءً على تحليل إحصائي لسلوك السائقين الفعلي، لا افتراضات عامة — كما تبيّن من فشل التعرفة التقليدية عند الشحن السريع.

للباحثين وطلاب الدراسات العليا

تخصيص هذه النماذج على بيانات سعودية محلية (بدلًا من NHTS) يمثل فرصة بحثية أصيلة وعالية الأثر.

كيف تخدم هذه الحلول منظومتنا الوطنية؟

الشركة السعودية للكهرباء

يمكن توظيف إطاري الاستجابة الديناميكية وتصميم TOU الذكي في التخطيط لدمج أحمال الشحن ضمن استراتيجيات تعزيز الشبكة الوطنية.

شركة إيفيك ومطورو البنية التحتية

تصميم تعرفة شحن مدروسة إحصائيًا يمكن أن يوجّه سلوك مستخدمي محطات الشحن العامة بما يخدم استقرار الشبكة.

الباحثون ورواد الأعمال

تطوير حلول تقنية محلية (تطبيقات إدارة الشحن الذكي، منصات الاستجابة للطلب) مبنية على هذه الأطر يمثل مجالًا ريياديًا واعدًا في السياق السعودي.

الرحلة الكاملة في ثلاث نتائج

- النمذجة الإحصائية الدقيقة لسلوك السائقين (لا الافتراضات المبسّطة) هي الأساس الذي تُبنى عليه أي دراسة موثوقة لأثر المركبات الكهربائية على الشبكة.
- الشحن غير المتحكَّم به والتعرفة التقليدية غير المدروسة قد يهددان موثوقية الشبكة بشكل جوهري، خصوصًا عند الشحن السريع وارتفاع نسب الانتشار.
- حلول قائمة على البيانات —الاستجابة الديناميكية للأحداث الحرجة، وتصميم TOU ذكي إحصائيًا —قادرة على امتصاص هذا الأثر بشكل شبه كامل، دون الإخلال براحة السائقين.

من المشكلة إلى الحل :ماذا تعلمنا اليوم؟

- المركبات الكهربائية حمل كهربائي ضخم يتطلب إعادة تفكير جذرية في تخطيط الشبكات
- النمذجة الإحصائية الدقيقة (Dagum, Burr, Johnson)أثبتت تفوقها على بيانات حقيقية
- الاستجابة الديناميكية وتصميم TOUالذكي يحققان تحسّنًا يقارب استعادة موثوقية النظام كاملة

لمزيد من النقاش

نرحّب بأسئلتكم ومداخلاتكم حول أي محور من محاور هذا اللقاء، وباستمرار الحوار ضمن مجتمع سلسلة التمكين المعرفية.

سلسلة التمكين المعرفية

كونوا جزءًا من مجتمع الباحثين والمهتمين بتقنيات المركبات الكهربائية والطاقة المستدامة، ضمن جمعية تقنيات المركبات الكهربائية.

شكرًا لحضوركم

المخرجات البحثية:

Reliability-driven time-of-use tariffs for efficient plug-in electric vehicle integration

Assessment and enhancement frameworks for system reliability performance using different PEV charging models

New Plug-in Electric Vehicles Charging Models Based on Demand Response Programs for System Reliability Improvement