



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

أهلاً 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.



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



د. عبدالعزيز المطيري

دكتوراه في الهندسة الكهربائية والحاسوبية — جامعة واترلو،
كندا

باحث في نمذجة شحن المركبات الكهربائية وموثوقية أنظمة الطاقة

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 تعرفه 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؟

التمذجة الإحصائية ونتائجها التطبيقية
الفعلية

04



ما الحل؟

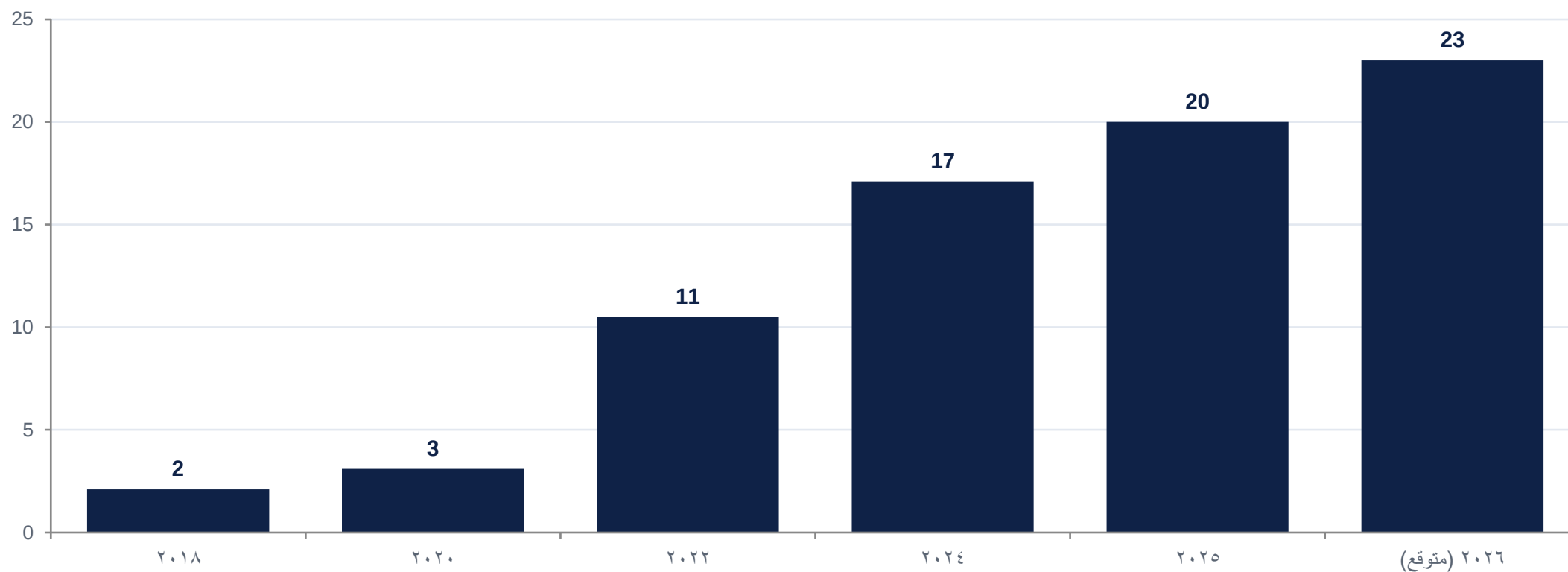
أطر الاستجابة الذكية ونتائجها في تحسين
الموثوقية

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..

ماذا يعني هذا النمو؟

28%

من إجمالي مبيعات السيارات عالميًا متوقع أن تكون كهربائية في 2026

×6

الزيادة المتوقعة في الطلب الكهربائي للشحن بحلول 2035 مقارنة بـ 2025

+450

مليون مركبة كهربائية متوقعة عالميًا بحلول 2035 في سيناريو السياسات الحالية

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

المملكة تتحرك بخطى وثيقة

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، حمل كهربائي ضخم ومتحرك ينضم فجأة إلى منظومة لم تُصمَّم أصلاً لاستيعابه.

وهذا هو جوهر التحدي الذي بُني عليه هذا البحث.

لماذا يختلف حمل شحن المركبات الكهربائية؟

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

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)

المحور الثاني

ما هي موثوقية نظام الطاقة؟

لغة مشتركة لفهم مدى قدرة الشبكة على الوفاء بالتزاماتها

موثوقية النظام الكهربائي: تعريف مبسط

- ▶ 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 أصلاً؟ — 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-I

كفاءة التوليد

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

محور بحثنا اليوم



HL-II

التوليد + النقل

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



HL-III

حتى نقطة التوزيع

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

كيف نقيس الموثوقية رقمياً؟

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 المزودة 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 حلولاً بديلة؟

السؤال الذي انطلق منه هذا البحث



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

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

03

المحور الثالث

من سلوك السائق إلى نموذج رياضي

كيف نحول العشوائية اليومية إلى أدوات تخطيط دقيقة

نوعان من عدم اليقين يجب التمييز بينهما

عدم اليقين المعرفي (Epistemic)



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

عدم اليقين العشوائي (Aleatory)



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

ثلاثة عوامل تحدد حمل الشحن

مقدار الطاقة المستهلكة



كمية الكهرباء التي تحتاجها كل مركبة لإعادة شحن بطاقتها، 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، وتختلف بشكل كبير بين السائقين.

من أين جاءت البيانات الحقيقية؟



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.

1,048,576

أسرة شملها المسح الأصلي

309,164

مركبة ضمن قاعدة البيانات

~150,000

مركبة بعد تصفية أربع فئات مركبات رئيسية



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.

12 نموذجًا احتماليًا.. واختبار واحد للحكم بينها



اختبار كولموغوروف-سميرنوف (K-S)

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

القيمة الحرجة عند مستوى ثقة 0.2693 = 95%

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



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.

الحالة الأولى: وقت الوصول إلى المنزل

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

الأضعف مطابقةً (تُستبعد إحصائيًا)



Log-Gamma

D = 0.2032

Rayleigh

D = 0.2625

Exponential

D = 0.4287

الأفضل مطابقةً (أقل قيمة إحصائية K-S)



Dagum

D = 0.0834

1

Burr

D = 0.0894

2

Johnson-SU

D = 0.0920

3

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

الحالة الثانية: وقت المغادرة من المنزل

نفس المنهجية طُبِّقت على بيانات وقت المغادرة الفعلية

الأضعف مطابقةً (تُستبعد إحصائياً)



Normal

Rayleigh

Exponential

الأفضل مطابقةً (أقل قيمة إحصائية K-S)



Dagum

1

Burr

2

Johnson-SB

3

نتيجة متسقة تمامًا مع الحالة الأولى Dagum و Burr يتصدران مجددًا، مع تفوق Johnson-SB هذه المرة على SU.

الحالة الثالثة: المسافة اليومية المقطوعة

اختبار المطابقة على بيانات المسافة اليومية الفعلية لعينة الدراسة

الأضعف مطابقةً (تُستبعد إحصائيًا)



Chi-Squared

ضعيف

Normal

ضعيف جدًا

Rayleigh

الأضعف

الأفضل مطابقةً (أقل قيمة إحصائية K-S)



Lognormal

أفضل مطابقة

1

Burr

مطابقة قوية

2

Johnson-SB

مطابقة جيدة

3

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

خيط مشترك عبر الحالات الثلاث



توزيعا *Burr* و *Dagum* 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 قبل الباحثين والمخططين.

لماذا تهتم هذه النتيجة المخطط والباحث؟

- ▶ معادلات رياضية جاهزة الاستخدام: بدلاً 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 وصفاً واقعياً للمتغيرات، ما يقود إلى تقديرات أدق للمخاطر ومؤشرات الأداء.
- ▶ القدرة على تمثيل الحالات النادرة: تسمح هذه النماذج بتوليد سيناريوهات متطرفة محتملة لم تظهر في العينة الأصلية، وهو أمر بالغ الأهمية لتخطيط الطوارئ.

محاكاة مونت كارلو: توليد آلاف الاحتمالات



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

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

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.

32

مولّدًا تقليديًا 400 – 12 ميغاواط

3,405 MW

إجمالي القدرة التوليدية المركبة

2,850 MW

ذروة الحمل السنوية المرجعية



مزيج توليدي واقعي ومتنوع

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

04

المحور الرابع

نتائج تقييم الأثر على الموثوقية

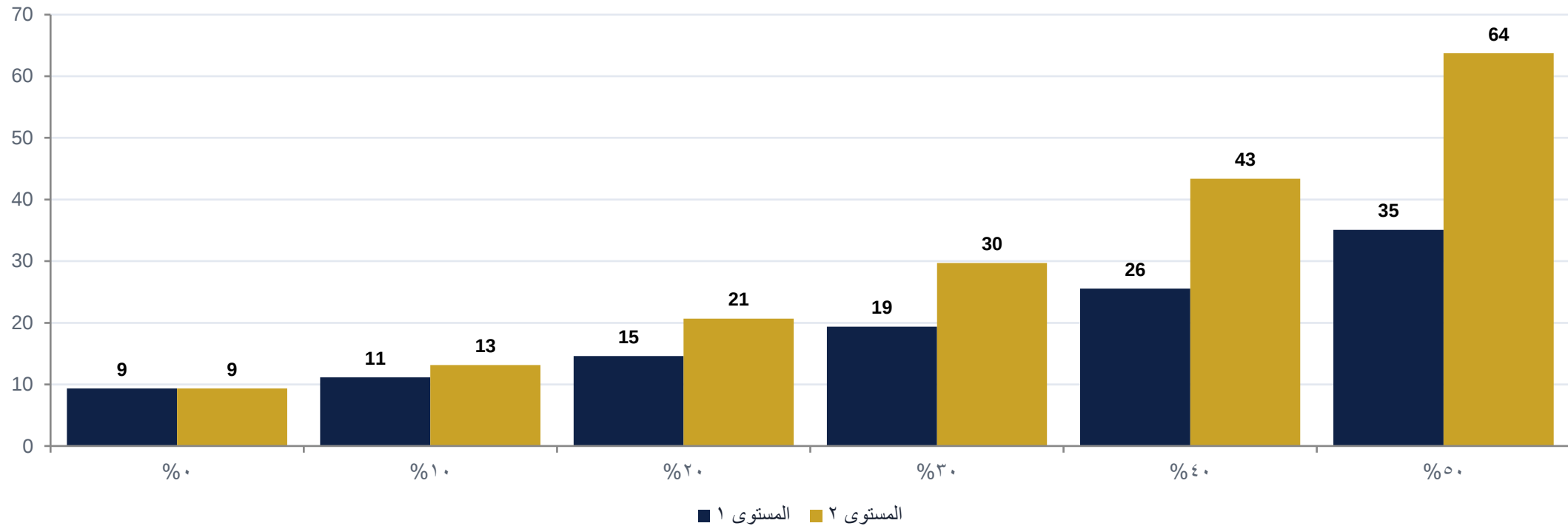
من النموذج الرياضي إلى أرقام حقيقية قابلة لاتخاذ القرار

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 متحكم به	1.A
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	2 المستوى	شحن غير متحكم به	1.B
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	1 المستوى	TOU استجابة لتعرفة	2.A
0% – 50%	توزيع حسب الحصة السوقية	2 المستوى	TOU استجابة لتعرفة	2.B
متغير	كل نوع مركبة على حدة	1 المستوى	شحن غير متحكم به	3

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

الحالة الأولى: أثر الشحن غير المتحكم به على LOLE



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

نمو أسي.. لا خطي

27%

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

38%

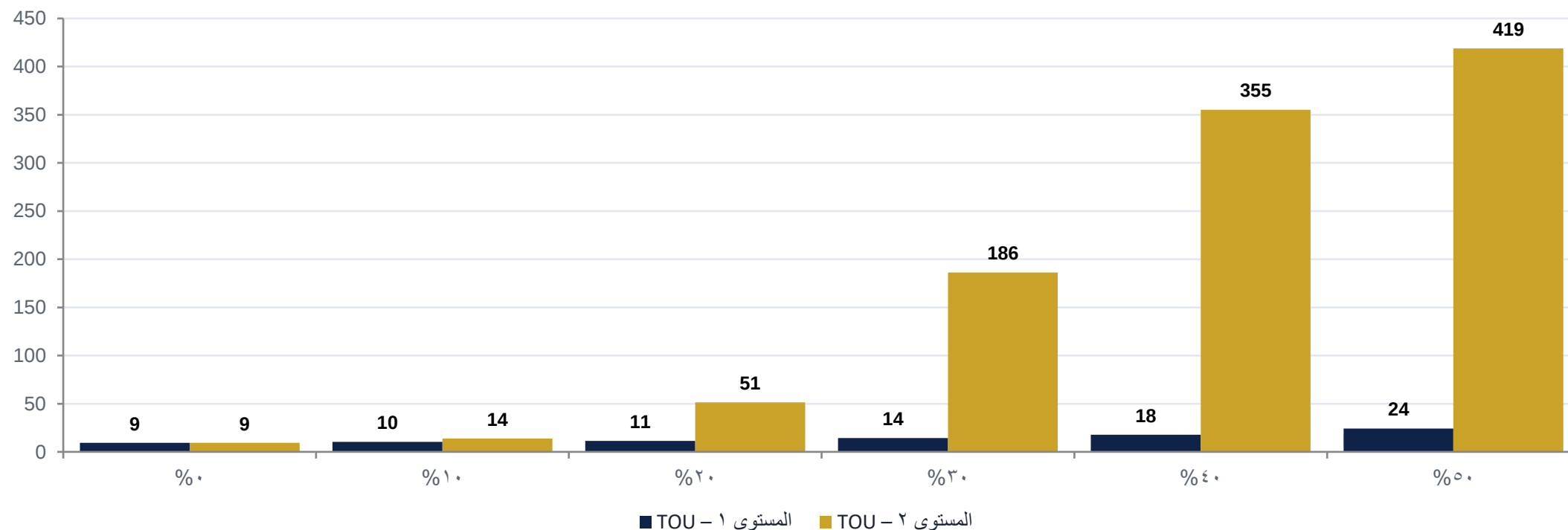
معدل نمو LOLE مع كل زيادة 10% في نسبة الانتشار
— عند استخدام المستوى 2

×7

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

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

الحالة الثانية: تعرفه TOU .. حل أم كارثة؟



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

لماذا تنهار فعالية TOU عند المستوى الثاني؟



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

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

الحالة الثالثة: هل نوع المركبة يغير النتيجة؟

مركبات ذات بطاريات كبيرة (CV, NL, TS) 

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

مركبات البطارية الصغيرة (TP) 

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



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 0.45 كيلوواط/ساعة لكل ميل لمركبات CV، مقابل 0.32 فقط لمركبات TS و NL.

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 المتحكم به عند مستويات انتشار وشحن مرتفعة يمثل تهديدًا جوهريًا لموثوقية الشبكة، بسبب تزامن غالبية السائقين مع ساعة الذروة.
- ▶ تعرفه 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 1-2

الخلفية والدافع

لماذا موثوقية الشبكة تتأثر بالمركبات الكهربائية



الفصل 3

نمذجة سلوك السائق

أفضل الدوال الاحتمالية لتمثيل البيانات الحقيقية



الفصل 4

تقييم الأثر

قياس أثر الشحن غير المتحكم به و TOU التقليدية



الفصل 5

الاستجابة الديناميكية

حل تفاعلي للأحداث الحرجة لحظة بلحظة



الفصل 6

تصميم TOU ذكي

تعرف مضممة إحصائيا ومتوافقة مع سلوك السائقين

إطار الاستجابة الديناميكية للأحداث الحرجة

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

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.

النتائج: تحسّن جوهري في مؤشرات الموثوقية

نسبة الانتشار	(مستوى 1) دون استجابة LOLE	(مستوى 1) مع استجابة ديناميكية LOLE	(مستوى 2) مع استجابة ديناميكية LOLE
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 2 مع الاستجابة الديناميكية، تبقى الموثوقية طوال نطاق الانتشار مطابقة تمامًا لحالة عدم وجود مركبات كهربائية أصلاً. (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 استثمرت بذكاء وضمن حدود راحتهم، كافية لامتناع أثر المركبات الكهربائية بالكامل تقريبًا.

تصميم تعرفه أوقات استخدام (TOU) ذكية إحصائيًا



نماذج عشوائية لكل مكّون

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



تقييم هامش الاحتياطي (SRM)

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



التقييم والتحقق

اختبار السيناريوهات المرشحة إحصائيًا واختيار الجدول
الأمثل وفق مؤشرات الموثوقية

من مليارات الاحتمالات ..إلى عشرات فقط

2.8×10^{11}

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

64

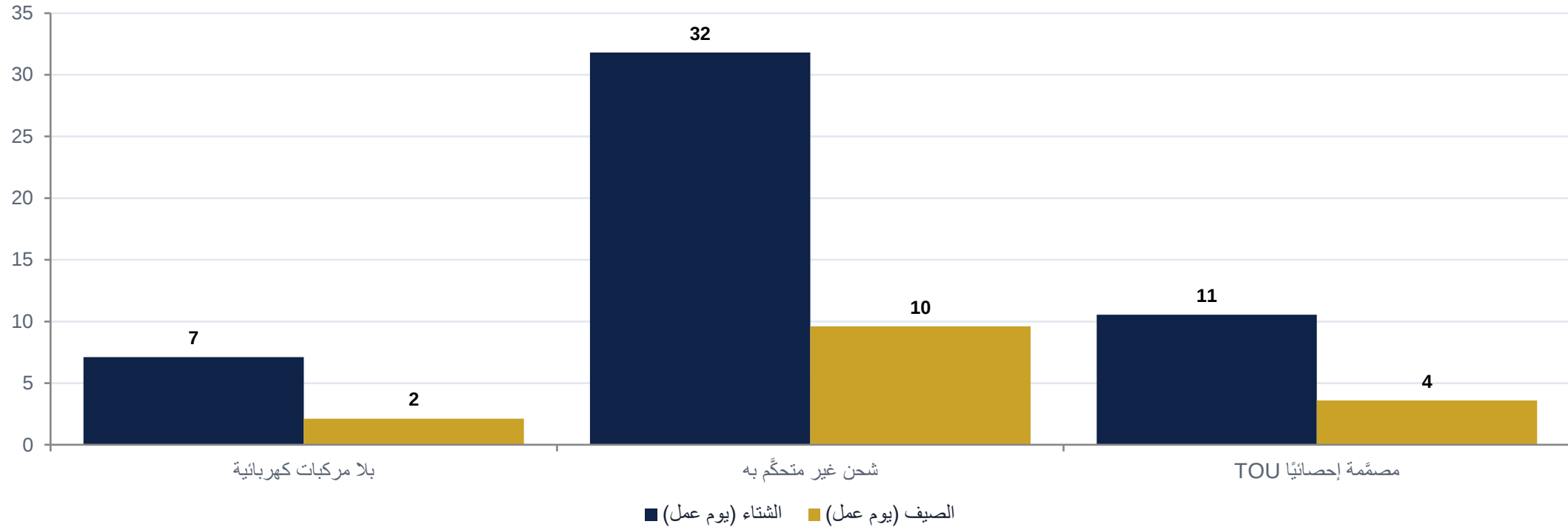
سيناريو فقط بعد تطبيق منهجية Box-Plot وقواعد
الخبراء لموسم الشتاء

128

سيناريو لموسم الصيف — الفارق يعكس اختلاف
خصائص حمل كل موسم

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 المصممة تُعيد المؤشر قريباً جداً من حالة عدم وجود مركبات كهربائية أصلاً.

مقارنة شاملة :قبل التعرفة وبعدها

المصممة TOU وفق تعرفة 50%	شحن غير متحکم به 50%	بلا مركبات كهربائية	الحالة
15.46	42.74	9.36	(بلا رياح)
21.75	62.60	14.53	(مع طاقة رياح)

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 تأثراً تحديداً.

أربع استراتيجيات .. أي منها الأنسب؟

شحن غير متحكم به

63.74

LOLE ساعة/سنة

عند 50% انتشار، مستوى 2

تعرفة TOU تقليدية

418.91

LOLE ساعة/سنة

قد تُفاقم الأزمة عند الشحن السريع

تعرفة TOU مصممة إحصائيًا

15.46

LOLE ساعة/سنة

خفض 64%~ مقارنة بالشحن غير المتحكم به

استجابة ديناميكية للأحداث
الحرجة

9.36

LOLE ساعة/سنة

يطابق حالة عدم وجود مركبات كهربائية
إطلاقًا

ماذا يعني هذا لأصحاب القرار والباحثين؟

لمشغلي الشبكة ومخططيها



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

لصانعي السياسات التعريفية



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

للباحثين وطلاب الدراسات العليا



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

كيف تخدم هذه الحلول منظومتنا الوطنية؟

الشركة السعودية للكهرباء



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

شركة إيفيك ومطورو البنية التحتية



تصميم تعرفه شحن مدروسة إحصائياً 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 مجالاً رياديًا واعدًا في السياق السعودي.

الرحلة الكاملة في ثلاث نتائج

- ▶ النمذجة الإحصائية الدقيقة لسلوك السائقين (لا الافتراضات المبسطة) هي الأساس الذي تُبنى عليه أي دراسة موثوقة لأثر المركبات الكهربائية على الشبكة.
- ▶ الشحن غير المتحكّم 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 TOU الذي يحققان تحسّناً يقارب استعادة موثوقية النظام كاملة



سلسلة التمكين المعرفية

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

شكرًا لحضوركم



لمزيد من النقاش

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

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