ورقة نقاش

كابسارك KAPSARC

unesco Centre Under the auspices of UNESCO

ICAIRE International Center for AI Research & Ethics

الذكاء الاصطناعي والطاقة: مستقبل مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية

خالد الشهري،* مروى محمود الفتني،** ليلى باشمال،*** غالية الشمري****

*زميل باحث، مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك)؛ **زميل باحث في المركز الدولي لأبحاث وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي (ICAIRE)؛
***باحث، جامعة الملك سعود؛ ****زميل باحث، المركز الدولي لأبحاث وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي

مايو 2026 | Doi: 10.30573/KS--2025-DP69

عن كابسارك

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

نبذة عن ICAIRE

المركز الدولي لأبحاث وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي (ICAIRE)، تحت رعاية منظمة الأمم المتحدة للتربية والتعليم والثقافة (اليونسكو)

يُعد المركز الدولي لأبحاث وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي منارة عالمية للنهوض بأخلاقيات الذكاء الاصطناعي. ويكرس المركز جهوده لضمان تطوير تقنيات الذكاء الاصطناعي ونشرها بما يتوافق مع حقوق الإنسان والنزاهة الأخلاقية. ويتحقق ذلك من خلال التعاون الدولي لتنسيق البحث والتطوير في مجال الذكاء الاصطناعي، ورفع الوعي بأخلاقيات الذكاء الاصطناعي، وتنمية المهارات المتخصصة، وتقديم الدعم الاستشاري المتخصص في سياسات الذكاء الاصطناعي.

إشعار قانوني

© حقوق النشر لعام 2026م محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية ("كابسارك") والمركز الدولي لأبحاث وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي ("ICAIRE"). كما لا يجوز استخدام هذا المستند، وما يتضمنه من معلومات أو بيانات أو مواد، (ويُشار إليها مجتمعةً بـ "المستند")، من دون نسبته بشكل صحيح إلى كابسارك وICAIRE. ولا يجوز إعادة إنتاج المستند، كليًا أو جزئيًا، من دون الحصول على إذن خطي مسبق من كابسارك وICAIRE.
ولا يتحملان كابسارك وICAIRE أي ضمانات أو إقرارات أو تعهدات، صريحة كانت أو ضمنية، ولا يتحملان أي مسؤولية قانونية، سواء كانت مباشرة أو غير مباشرة، عن دقة أو اكتمال أو فائدة أي من المعلومات الواردة في المستند، ولا يُشكّل أي مما ورد في هذا المستند ولا يجوز تفسيره على أنه نصيحة أو توصية أو رأي لكابسارك وICAIRE. الآراء ووجهات النظر الواردة في هذه الدراسة هي آراء المؤلفين، ولا تعكس بالضرورة الآراء أو المواقف الرسمية لكابسارك أو ICAIRE.

النقاط الرئيسة

1. قد تتجاوز سعة مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية 4 جيجاواط بحلول عام 2030 في ظل سيناريو النمو المرتفع، مما يؤهلها لتصبح مركزًا إقليميًا للحوسبة في مجال الذكاء الاصطناعي

2. قد تستهلك مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي ما يصل إلى 11% من الكهرباء الوطنية بحلول عام 2030 في ظل سيناريوهات النمو المرتفع

3. تؤثر معدلات الاستخدام وكفاءة الأجهزة في تكاليف مشروعات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي بدرجة أكبر من تعريفات الكهرباء

4. تشكل البنية التحتية الرقمية والبنية التحتية للطاقة في المملكة أساسًا لجاهزية الذكاء الاصطناعي، وسيادة البيانات، والتنويع الاقتصادي

5. المواءمة الإستراتيجية بين سياسات الذكاء الاصطناعي والطاقة تضع المملكة العربية السعودية في موقع تنافسي بوصفها دولة مضيفة للذكاء الاصطناعي تراعي الاعتبارات المناخية

الملخص التنفيذي

يُحدث صعود الذكاء الاصطناعي تحولًا سريعًا في الاقتصاد العالمي، مما يجعل مراكز البيانات المهيأة للذكاء الاصطناعي محركات أساسية لهذا التغيير. على عكس مراكز البيانات التقليدية لتقنية المعلومات العامة، تستخدم المرافق المخصصة للذكاء الاصطناعي رقائق متطورة، وخوادم عالية الكثافة، وأنظمة تبريد سائلة لدعم الحوسبة عالية الأداء. يُسرع هذا التحول الابتكار الرقمي، ولكنه يزيد الضغط على أنظمة الطاقة. في عام 2024، تجاوزت سعة مراكز البيانات العالمية 111,900 ميجاواط، واستحوذت الولايات المتحدة والصين على أكثر من 60% منها. ومن المتوقع أن تتضاعف هذه السعة لتصل إلى 224,000 ميجاواط بحلول عام 2030، مع ارتفاع استهلاك الكهرباء من 854 تيراواط في الساعة في عام 2024 إلى ما يقارب 1,900 تيراواط في الساعة بحلول عام 2030. وتستهلك تطبيقات الذكاء الاصطناعي حاليًا ما بين 5% و15% من هذه الطاقة، وقد تصل هذه النسبة إلى ما بين 35% و50% بحلول نهاية العقد، مما يبرز الترابط المتنامي بين قطاع الطاقة والقطاع الرقمي.

يشهد قطاع مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية نموًا متسارعًا يفوق معظم المناطق، بفضل الاستثمار المنسق في البنية التحتية للذكاء الاصطناعي.

وبحلول عام 2024، بلغ عدد مراكز البيانات العاملة في المملكة 58 مركزًا بسعة إجمالية لتقنية المعلومات تبلغ 290.5 ميجاواط، تتركز أساسًا في الرياض والدمام، اللّتين تستأثران بما يقارب 80% من سعة مراكز البيانات في المملكة. وتبرز مراكز جديدة، من بينها نيوم، لاستضافة مشروعات الذكاء الاصطناعي واسعة النطاق. ويدعم نمو هذا القطاع سياسات رقمية متطورة، مثل سياسة "السحابة أولًا" ولوائح خدمات مراكز البيانات، إلى جانب توسيع البنية التحتية للشبكة وتوفير الطاقة بأسعار منخفضة. هذه القاعدة تجعل من المملكة العربية السعودية أكبر سوق للبنية التحتية الرقمية في الشرق الأوسط، وإحدى الدول القليلة عالميًا التي تطور مجمعات بيانات مهيأة للذكاء الاصطناعي على نطاق واسع.

ومن المتوقع أن يرتفع الطلب على الكهرباء من مراكز البيانات السعودية ارتفاعًا ملحوظًا حتى عام 2030، إلا أن النتائج الفعلية لا تزال غير مؤكدة.

وقد استهلكت مراكز البيانات الوطنية نحو 2.8 تيراواط في الساعة في عام 2024، أي ما يعادل 0.85% من إجمالي استهلاك الكهرباء. وبحلول عام 2030، قد يرتفع هذا الرقم إلى ما بين 10.2 و42.2 تيراواط في الساعة، ما يمثل 2.8% إلى 11.6% من الطلب الوطني المتوقع على الكهرباء. وتعكس هذه الزيادة في الطلب سعة إجمالية مثبتة تبلغ قرابة 2000 ميجاواط في ظل سيناريو النمو المعتدل، وتصل إلى 4100 ميجاواط في ظل سيناريو النمو المرتفع. مع ذلك، يرى العديد من المحللين العالميين أن وتيرة توسع البنية التحتية للذكاء الاصطناعي تنطوي على قدر كبير من الضبابية، وقد تشبه "فقاعة البنية التحتية الرقمية" إذ قد لا ترى بعض المشروعات المعلنة النور أو قد تتأخر. ويظل سيناريو النمو المنخفض (نحو 1050 ميجاواط) أساسًا تخطيطيًا موثوقًا ومتحفظًا.

تكتسب الآثار المترتبة على هذا النمو في قطاعي الطاقة والبيئة أهمية كبيرة وتستدعي إدارة دقيقة.

في ظل مزيج طاقة يهيمن عليه الوقود الأحفوري، قد ترتفع انبعاثات مراكز البيانات من 1.6 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون في عام 2024 إلى ما بين 6 و24 مليون طن بحلول عام 2030. ورغم أن هذه النسبة ضئيلة مقارنةً بإجمالي انبعاثات المملكة، المقدرة حاليًا بنحو 590 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا، إلا أن مسار النمو يوضح ضرورة إدراج الأحمال الرقمية الجديدة ضمن الإستراتيجية الأوسع لإزالة الكربون. ويمكن أن يسهم تحقيق الهدف الوطني المتمثل في توليد 50% من الطاقة من مصادر متجددة في خفض انبعاثات مراكز البيانات بنحو 68%. ويُمكن لتحسينات الكفاءة أن تُخفف من هذا الأثر، بخفض استهلاكها للكهرباء بنسبة 13%، وتوفير ما يصل إلى 5 تيراواط في الساعة سنويًا في سيناريو النمو المرتفع. ومن منظور نظام الطاقة، قد تصبح هذه المرافق مستهلكين أساسيين جدد للطاقة، ويتطلب توسيعها السريع تنسيقًا وثيقًا مع شركات المرافق لضمان موثوقية الشبكة وقدرتها الكافية، ولمنع حدوث اختناقات محلية.

تتمتع المملكة العربية السعودية بمزايا تنافسية ملحوظة من حيث التكلفة، ويمكن تعزيز هذه المزايا من خلال عمليات تشغيل فعالة وإدارة دقيقة للتعريفات.

يُظهر تحليل التكاليف في الدراسة أن تكاليف مشروعات مراكز البيانات في المملكة تتأثر تأثرًا كبيرًا بمعدلات الاستخدام وكفاءة الأجهزة، وتتأثر تأثرًا متوسطًا بتعريفات الكهرباء وفعالية استخدامها (PUE). بفضل التعريفات

التنافسية المنخفضة والبنية التحتية المتوسعة للشبكة، تحافظ المملكة على قدرتها التنافسية عالميًا حتى مع متطلبات التبريد العالية نسبيًا. وتعتمد هذه القدرة التنافسية على استقرار التعريفات، وارتفاع معدلات الاستخدام في المراحل المبكرة، واستخدام أجهزة موفرة للطاقة. وإذا استمرت هذه الأسس، يمكن للمملكة أن تصبح مركزًا إقليميًا للحوسبة بالذكاء الاصطناعي، وتلبي الطلب الرقمي المحلي والدولي. يمكن لصناع السياسات تعزيز القدرة التنافسية من خلال وضع معايير للكفاءة وتشجيع استخدام المعدات عالية الأداء. ويبين التحليل أن معظم مكاسب التكلفة تتحقق مع انتقال مراكز البيانات من الاستخدام الجزئي إلى الاستخدام المستقر، مع تناقص العوائد عند عوامل الحمل العالية، وهو اعتبار مهم لشركات المرافق والمستثمرين الذين يسعون إلى تحسين تكامل الشبكة وكفاءة التكلفة.

تواجه المملكة العربية السعودية مخاطر مماثلة لتلك التي تواجهها الأسواق الأخرى سريعة النمو.

وقد أثار ازدهار مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي عالميًا مخاوف تنظيمية وبيئية ومالية. تتطلب المشروعات مساحات شاسعة من الأراضي، وعمالة محترفة عالية المهارة، ووصولاً آمنًا وموثوقًا إلى الكهرباء والمياه للتبريد. وتزيد تكاليف المعدات المتزايدة، وقيود سلاسل التوريد، والمخاطر الجيوسياسية من حالة الضبابية. من الناحية المالية، يشبه الارتفاع الكبير في الاستثمارات المتعلقة بالذكاء الاصطناعي "حمى الذهب"، حيث يتدفق رأس المال نحو طلب غير مؤكد. بالنسبة للمملكة العربية السعودية، يبرز هذا ضرورة ترتيب المشروعات، ومواءمة التوسع مع توقعات الاستخدام الواقعية، ودمج الأحمال الجديدة في تخطيط الطاقة الوطني لتجنب فائض الطاقة أو الأصول العالقة.

يمكن للإستراتيجيات المستدامة التخفيف من كثير من هذه المخاطر وتعزيز القدرة التنافسية. يمكن لتقنيات مثل التصميم المعياري، والرقائق المُحسنة بالذكاء الاصطناعي، وأنظمة التبريد المتقدمة السائلة أو الخالية من الماء، أن تحسن الكفاءة على نحو كبير. يمكن لجدولة أعباء العمل وإدارة الطاقة القائمة على الذكاء الاصطناعي أن تقلل من الأحمال التشغيلية، في حين يبرز تكامل الطاقة المتجددة من خلال اتفاقيات شراء الطاقة ومطابقة الطاقة الخالية من الكربون على مدار الساعة. ويعزز هذا التكامل مكانة المملكة العربية السعودية بوصفها مركزًا للذكاء الاصطناعي في مجال الطاقة النظيفة، ويوائم نمو البنية التحتية الرقمية مع التحول الأوسع نطاقًا في قطاع الطاقة بالمملكة. وتُظهر الشركات العالمية الرائدة هذا التحول: نظام التبريد بدون ماء من مايكروسوفت، وإمدادات الطاقة الحرارية الأرضية من جوجل، ومشتريات أمازون ويب سيرفيسز (AWS) من الطاقة المتجددة بنسبة 100%، وأنظمة استعادة الحرارة من ميتا، وكل هذا يعد أمثلة لأفضل الممارسات في هذا المجال.

تتجاوز مبررات الاستثمار في مراكز البيانات المهيأة للذكاء الاصطناعي العوائد قصيرة المدى، وتتطلب تحديد الأولويات والتنسيق بدقة.

تُسهم هذه المرافق في خلق آثار رقمية إيجابية تُعزز منظومة الابتكار في المملكة، وسيادة البيانات، والتنويع الاقتصادي. ويعتمد تحقيق قيمة مستدامة على الاستثمار في مناطق مُجهزة للذكاء الاصطناعي تتمتع بمصادر طاقة موثوقة، وتكامل مع مصادر الطاقة المتجددة، واستخدام أمثل للطاقة. ويعد التخطيط المنسق بين الجهات الحكومية، والمطورين من القطاع الخاص، والشركاء التقنيين العالميين أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق أقصى قدر من الفوائد مع ضمان أمن الطاقة ومواءمة المناخ. وبإمكان المملكة العربية السعودية استغلال مزاياها النسبية لتصبح مركزًا رائدًا وفعالًا من حيث التكلفة ومستدامًا للبنية التحتية للذكاء الاصطناعي في المنطقة.

ولتحقيق هذا التوازن، يسلط التحليل الضوء على أربعة مجالات رئيسة لتوجيه السياسات والتخطيط المستقبلي. يمكن للاستثمار المستمر في تقنيات الحوسبة الموفرة للطاقة، مثل وحدات معالجة الرسومات من الجيل التالي، والخوادم المُتقدمة، وأنظمة التبريد المُحسنة، أن يزيد من إنتاجية الحوسبة مع إدارة الطلب على الطاقة. ويمكن لتطوير مناطق استثمارية مجهزة للذكاء الاصطناعي ذات وصلات شبكية موثوقة وتكامل مع مصادر الطاقة المتجددة أن يجذب مستثمرين على المدى البعيد ويعزز مكانة المملكة العربية السعودية. ويعد توسيع نطاق البحوث المحلية في مجال كفاءة مراكز البيانات، والتبريد المتقدم، والتصميم المستدام، إلى جانب التعاون بين الجامعات ومؤسسات البحث العلمي والشركاء التقنيين العالميين، من شأنه أن يدعم نقل المعرفة والتنويع الصناعي. وعلى الصعيد التشغيلي، يمكن تحسين الكفاءة وتكامل الأنظمة من خلال التركيز على الاستخدام الفعال للمرافق الجديدة، وجدولة أحمال عمل الذكاء الاصطناعي بمرونة خلال ساعات انخفاض الطلب، وتعزيز ممارسات إعادة استخدام الموارد مثل استعادة الحرارة وإعادة تدوير المياه. ومن منظور الحوكمة وتخطيط الطاقة، فإن الحفاظ على أسعار كهرباء مستقرة وشفافة، وتشجيع معايير الكفاءة الطوعية، وتنسيق تطوير مراكز البيانات مع مبادرات الطاقة المتجددة وتوسيع الشبكة، من شأنه أن يواءم النمو الرقمي مع أهداف المملكة طويلة المدى في مجال التحول في الطاقة.

وختامًا، تقف المملكة عند مفترق طرق إستراتيجي في ترابط الطاقة والتحول الرقمي. مراكز البيانات مهيأة لتصبح مصدرًا رئيسًا جديدًا للطلب على الكهرباء، ولكن دورها سيعتمد على التخطيط الحكيم، والتوسع المدروس، والكفاءة التشغيلية. ويعد اتباع نهج حذر وموجه نحو الكفاءة -يستند إلى تقييم واقعي للطلب وتنسيق قوي مع التحول الوطني في مجال الطاقة- سيمكن المملكة العربية السعودية من تحقيق القيمة طويلة المدى للنمو الرقمي مع ضمان الموثوقية والقدرة على تحمل التكاليف والاستدامة.

جدول المحتويات

1 المقدمة **09**

2 أساسيات مراكز البيانات للذكاء الاصطناعي **10**

1.2 ما المقصود بمركز بيانات الذكاء الاصطناعي؟ 10

2.2 الطلب المتزايد على مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي 12

3 نظرة عامة على المشهد العالمي لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي **15**

1.3 قدرة الطاقة 15

2.3 الاستثمار الرأسمالي 17

3.3 الطلب على الكهرباء 18

4.3 الانبعاثات 19

5.3 التوقعات الإقليمية (حتى عام 2030) 20

4 مشهد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية **22**

1.4 مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي: التحول المحوري 23

2.4 توقعات الطلب 25

3.4 توقعات الانبعاثات 27

4.4 عوامل التمكين الرئيسة 29

5.4 العوامل المؤثرة في التوقعات 30

5 تحليل تكاليف مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية **32**

1.5 حساب تكاليف مشروعات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي 32

2.5 النتائج الأساسية وتحليل الحساسية 33

3.5 رؤى السياسات 38

6 نظرة عامة عالمية على تحديات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي ومخاطرها **39**

1.6 التحديات 39

2.6 المخاطر 40

7 نحو إنشاء مراكز بيانات ذكاء اصطناعي مستدامة وأكثر كفاءة **32**

1.7 طرق تحسين الكفاءة التشغيلية 32

2.7 خيارات إزالة الكربون 33

3.7 السياسات الإقليمية المحددة 38

جدول المحتويات

8 الخاتمة والتوصيات **50**

المراجع **52**

شكر وتقدير **59**

الملحقات **60**

الملحق أ. إطار عمل قائم على السيناريوهات لتقدير سعة مركز البيانات (2025-2030) 59

الملحق ب. منهجية تقدير الطلب على الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية (2025-2030) 60

الملحق ج. منهجية تقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك مراكز البيانات للكهرباء 62

الملحق د. منهجية تقدير تكاليف مشروع مركز البيانات على مدى عمره الافتراضي 64

الملحق هـ: مسرد المصطلحات 65

نبذة عن المؤلفين **67**

نبذة عن المشروع **69**

01

المقدمة

شهد الذكاء الاصطناعي نموًا هائلًا في السنوات الأخيرة، ليصبح قوة دافعة في مختلف الصناعات والاقتصادات حول العالم. ويتسارع تبني الذكاء الاصطناعي مع ظهور نماذج اللغة الضخمة (LLMs)، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي التوليدي (GenAI)، والأتمتة في التصنيع والخدمات. ومع ازدياد قدرات النماذج واستخدامها على نطاق واسع، تتزايد الحاجة إلى الحوسبة عالية الأداء. ويعتمد تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي المتطورة وخدمتها على معالجات متخصصة، وشبكات ذات نطاق ترددي عالي، ووحدات تخزين كثيفة، مما يدفع التطور السريع للبنية التحتية الرقمية التي تدعم اقتصاد الذكاء الاصطناعي.

وتعد مراكز البيانات محور هذا التحول. إذ يقوم المشغلون بإضافة المزيد من المرافق وتحديث القدرات: تجميع عشرات الآلاف من وحدات معالجة الرسومات (GPUs)، واعتماد وصلات عالية السرعة، واستخدام أنظمة إدارة حرارية متقدمة، ودمج إدارة طاقة أكثر فعالية وخيارات طاقة محلية. أصبحت مراكز البيانات فائقة التوسع والمحسنة للذكاء الاصطناعي المواقع الرئيسة لتدريب النماذج والاستدلال عالي الحجم، بينما تُحدث الشركات مرافق الاستضافة المشتركة للحفاظ على قرب الحوسبة من البيانات، مما يقلل من حركة البيانات وزمن الاستجابة.

لهذا التوسع السريع آثار فورية على الطاقة. إذ إن أحمال عمل الذكاء الاصطناعي أكثر كثافة في استهلاك الطاقة، وغالبًا ما تعمل بكامل طاقتها، مما يزيد من الطلب على الكهرباء واحتياجات تخطيط الشبكة. على سبيل المثال، تشير التقديرات إلى أن تدريب نموذج GPT-4 قد استهلك نحو 42 جيجاواط في الساعة من الكهرباء، ومن المتوقع أن تمثل مراكز البيانات 3% من الطلب العالمي على الطاقة الكهربائية و1% من إجمالي انبعاثات قطاع الطاقة بحلول عام 2030، مع توقع أن تمثل الخوادم المخصصة للذكاء الاصطناعي قرابة نصف نمو الكهرباء في القطاع(Spencer et al. 2025). وفي الوقت نفسه، تصبح إستراتيجيات الكفاءة والاستدامة، مثل الاستخدام الأمثل، وجدولة أحمال العمل، والطاقة المتجددة، وخيارات الطاقة الأساسية منخفضة الكربون، أساسيةً لمراكز البيانات الفعالة. وسيُحدد التوازن بين النمو والاستدامة مسار قطاع الذكاء الاصطناعي وأنظمة الطاقة الوطنية.

تتناول هذه الدراسة مستقبل مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية، بدءًا بنظرة عامة على أساسياتها والاتجاهات العالمية التي تشكل توسعها، وأنماط الاستثمار، والطلب على الكهرباء، وتحديات الاستدامة. ثم تحلل الدراسة الوضع الراهن في المملكة وتحدد سيناريوهات النمو المحتملة للمراكز المخصصة للذكاء الاصطناعي. وتقيم الدراسة -من خلال تحليل مفصل للتكلفة والكفاءة- القدرة التنافسية في ظل ظروف تسعير الكهرباء والبنية التحتية المختلفة. وتناقش الدراسة أيضًا المخاطر الرئيسة المرتبطة بالتوسع السريع، وتقترح تدابير للتخفيف منها، وتستعرض المناهج الدولية لتطوير بنية تحتية مستدامة للذكاء الاصطناعي. وتختتم الدراسة بتوصيات لدعم الأهداف الوطنية للمملكة العربية السعودية وتعزيز مكانتها في اقتصاد مراكز البيانات العالمي.

02

أساسيات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي

يقدم هذا القسم أساسيات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، ويسلط الضوء على أوجه اختلافها عن المرافق التقليدية من حيث التصميم والأداء والغرض. ويستعرض الأنواع الرئيسة لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي المستخدمة حاليًا، ويشرح النمو السريع في الطلب الناتج عن تطبيقات الذكاء الاصطناعي. ويختتم الطرح بدراسة العلاقة بين مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي واحتياجاتها المتزايدة من الطاقة.

1.2 ما المقصود بمركز بيانات الذكاء الاصطناعي؟

مركز بيانات الذكاء الاصطناعي هو مرفق متخصص مصمم للتعامل مع متطلبات الحوسبة المكثفة لأحمال عمل الذكاء الاصطناعي، بما في ذلك تدريب تطبيقات وخدمات الذكاء الاصطناعي ونشرها وتشغيلها. تتميز هذه المراكز ببنى تحتية متطورة للحوسبة والشبكات والتخزين، إلى جانب قدرات قوية في مجال الطاقة والتبريد، لتشغيل خوارزميات الذكاء الاصطناعي بكفاءة وعلى نطاق واسع (IBM 2025). على عكس مراكز البيانات التقليدية، التي تدعم عمليات تقنية المعلومات العامة مثل استضافة المواقع الإلكترونية وتطبيقات المؤسسات وتخزين البيانات، تعد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي مصممة خصيصًا للحوسبة عالية الأداء. على الرغم من أن مراكز البيانات التقليدية ومراكز بيانات الذكاء الاصطناعي تشترك في مكونات أساسية مثل الخوادم والتخزين وإجراءات الأمان، كما هو موضح في الشكل (1)، فإن مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي تختلف اختلافًا كبيرًا في حجم وقدرات أجهزتها وبنيتها.

بعبارة أخرى، مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي هي بيئات محسنة قادرة على إدارة نماذج الذكاء الاصطناعي المعقدة التي تضم مليارات المعلمات، وتقديم استدلالات الذكاء الاصطناعي في الوقت الفعلي عبر نطاق واسع من التطبيقات. يلخص الجدول (1) الفروقات بين مراكز البيانات التقليدية ومراكز بيانات الذكاء الاصطناعي.

تتخذ مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي أشكالًا متعددة، تعكس أحجامًا ونماذج ملكية وتكوينات نشر مختلفة. وفي ما يلي ملخص لأهم فئات مراكز البيانات التي تدعم نمو الذكاء الاصطناعي اليوم، ويُظهر الجدول (2) ملخصًا مقارنًا للأنواع الثلاثة (IBM 2025; Shehabi et al. 2024; Duncan et al. 2024):

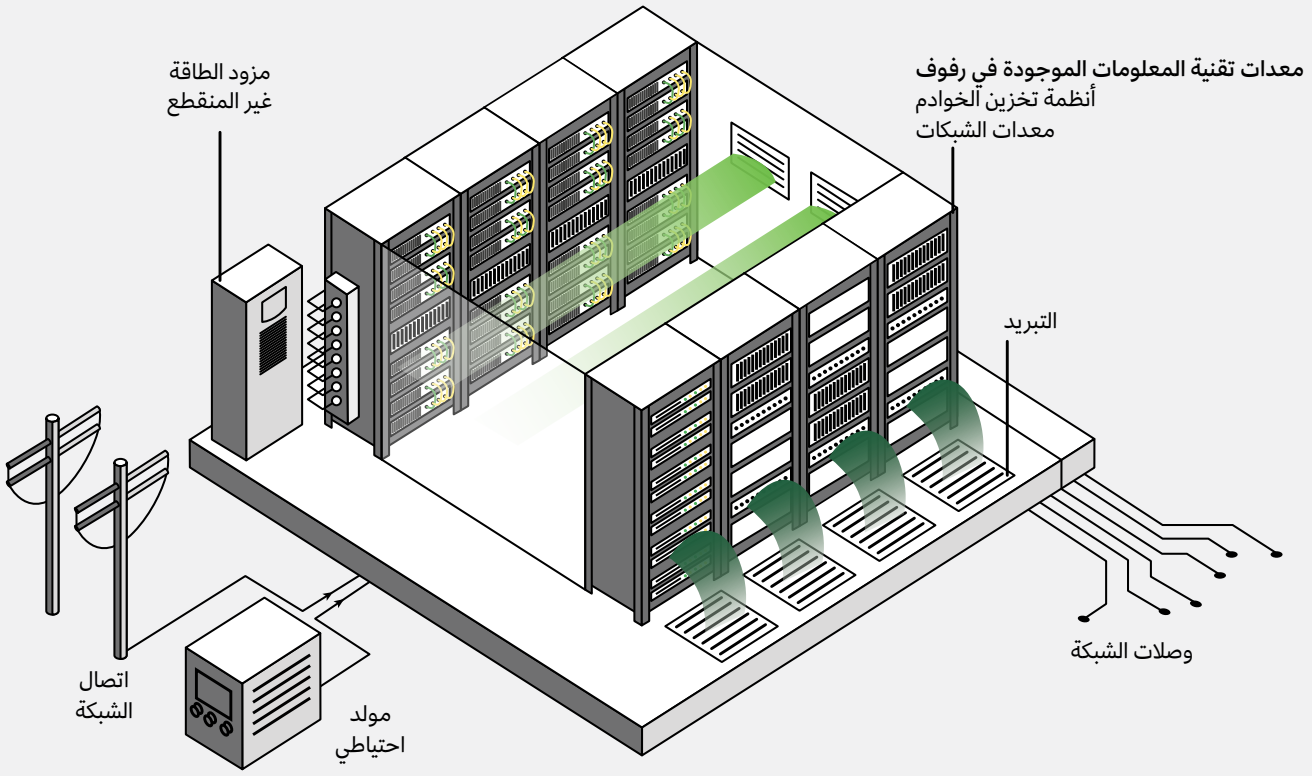
- **مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي فائقة التوسع:** مراكز بيانات ضخمة جدًا، تضم عادةً 5000 خادم، وتمتد على مساحة لا تقل عن 10000 قدم مربع. صُممت هذه المراكز لتوفير قابلية توسع فائقة، وهي مُصممة للتعامل مع أحمال عمل الذكاء الاصطناعي واسعة النطاق، بما في ذلك تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي الرائدة، وتقديم خدمات الذكاء الاصطناعي لملايين المستخدمين. وغالبًا ما تُبنى هذه المرافق وتُشغل من قِبل مزودي خدمات سحابية رئيسين، مثل Amazon Web Services وGoogle Cloud وMicrosoft Azure وMeta.

- **مراكز الاستضافة المشتركة:** مراكز بيانات ضخمة مملوكة ومدارة من قِبل مزودي خدمات خارجيين، يقومون بتأجير المساحة والطاقة واتصال الشبكة لشركات أخرى. يمكن للمزود نشر أو تأجير خوادم جاهزة للاستخدام داخل هذه المرافق. يتيح ذلك للشركات من جميع الأحجام الوصول إلى بنية تحتية متطورة للذكاء الاصطناعي دون تكاليف بناء وصيانة بنيتها الخاصة.

[1] Sq ft = Square feet.

[2] SANs: Storage area networks.

الشكل 1. مكونات مركز البيانات



ملحوظة: رسم تخطيطي لمركز بيانات تقليدي. تربط وصلات الشبكة المركز بالبنية التحتية الرقمية الخارجية، مما يتيح تبادل البيانات باستمرار. توضح العناصر الخضراء الفاتحة تدفق البيانات بين الخوادم الداخلية والشبكات الخارجية. تشير العناصر الخضراء الداكنة إلى أنظمة إمداد الكهرباء والتبريد التي تحافظ على استقرار ظروف التشغيل. يوفر نظام UPS طاقة احتياطية قصيرة الأجل، مما يضمن استمرارية التشغيل خلال تقلبات الشبكة أو انقطاعاتها.
المصدر: الوكالة الدولية للطاقة (2025). أعيد إنتاجه من قبل المؤلفين لتحسين سهولة القراءة.

الجدول 1. أوجه الاختلاف بين مراكز البيانات التقليدية ومراكز بيانات الذكاء الاصطناعي

الخاصية	مراكز البيانات التقليدية	مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي
نوع حمل العمل	الحوسبة العامة، والتخزين، واستضافة المواقع الإلكترونية، وتقنية المعلومات المؤسسية	التدريب والاستدلال في مجال الذكاء الاصطناعي، والحوسبة عالية الأداء (HPC)
التركيز على الأجهزة	استخدام وحدات المعالجة المركزية (CPUs) مع استخدام محدود للمسرعات	وحدات معالجة الرسومات أو وحدات معالجة المصفوفات (TPUs) أو مسرعات الذكاء الاصطناعي (مثل NVIDIA's H100 أو GB200)
تقنية التبريد	التبريد بالهواء	التبريد السائل المتقدم، أو التبريد المباشر على الشريحة، أو التبريد بالغمر
بنية التخزين	محسن للتخزين المنظم: شبكات التخزين على مستوى الكتل وأنظمة قواعد البيانات المرتبطة	أنظمة تخزين متطورة وقابلة للتوسع وعالية الإنتاجية (مثل أنظمة الملفات المتوازية، أو أنظمة التخزين القائمة على NVMe، أو أنظمة تخزين المكونات)
كثافة الطاقة	8-5 كيلوواط لكل رف	أكثر من 30 كيلوواط لكل رف
التواصل	إيثرنت ذو بنى تحتية تتحمل زمن الاستجابة	شبكات ذات نطاق ترددي عالي وزمن استجابة منخفض
قابلية التوسع	متوسط: يمكن توسيعه بإضافة قاعات أو أقفاص مستقلة	قابلية توسع عالية لمجموعات الذكاء الاصطناعي
هندسة المرافق	مباني من طابق واحد أو منخفضة الارتفاع، سقف قياسي بارتفاع 3-4 أمتار، أرضية مرتفعة أو خرسانية	مباني ذات أسقف عالية (6-10 أمتار) أو متعددة الطوابق ذات أرضيات مدعمة، ومشعبات سوائل علوية، وقنوات توزيع كهربائية
سعة الطاقة	10-30 ميجاواط	100-+1000 ميجاواط

الجدول 2. الفروقات بين مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي

النوع	النطاق الفائق	موقع مشترك	المؤسسة
الملكية والاستخدام	عمالقة الحوسبة السحابية	مملوكة لطرف ثالث ويستخدمها مستأجرون متعددون	منظمة واحدة
المساحة الأرضية (قدم مربع)	10,000-1,000,000+	يختلف	5,000-20,000
عدد الخوادم	5,000+	يختلف	500-2,000
الطلب على الطاقة (ميجاواط)	20-100+	يختلف	5-10

- **مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي الخاصة بالمؤسسات:** مرافق تملكها وتديرها مؤسسة واحدة لاستخدامها الخاص، وعادةً ما تكون داخل مقرها أو في مواقع تابعة لها. تحتفظ المؤسسات بهذه المرافق للحفاظ على السيطرة على البيانات الحساسة والامتثال لمتطلبات سيادة البيانات. وتُستخدم هذه المراكز من قِبل المؤسسات التي لديها بيانات بالغة الحساسية، أو تطبيقات حساسة للتأخير، أو احتياجات داخلية واسعة النطاق لنشر بنية تحتية جاهزة للذكاء الاصطناعي داخل مقرها.

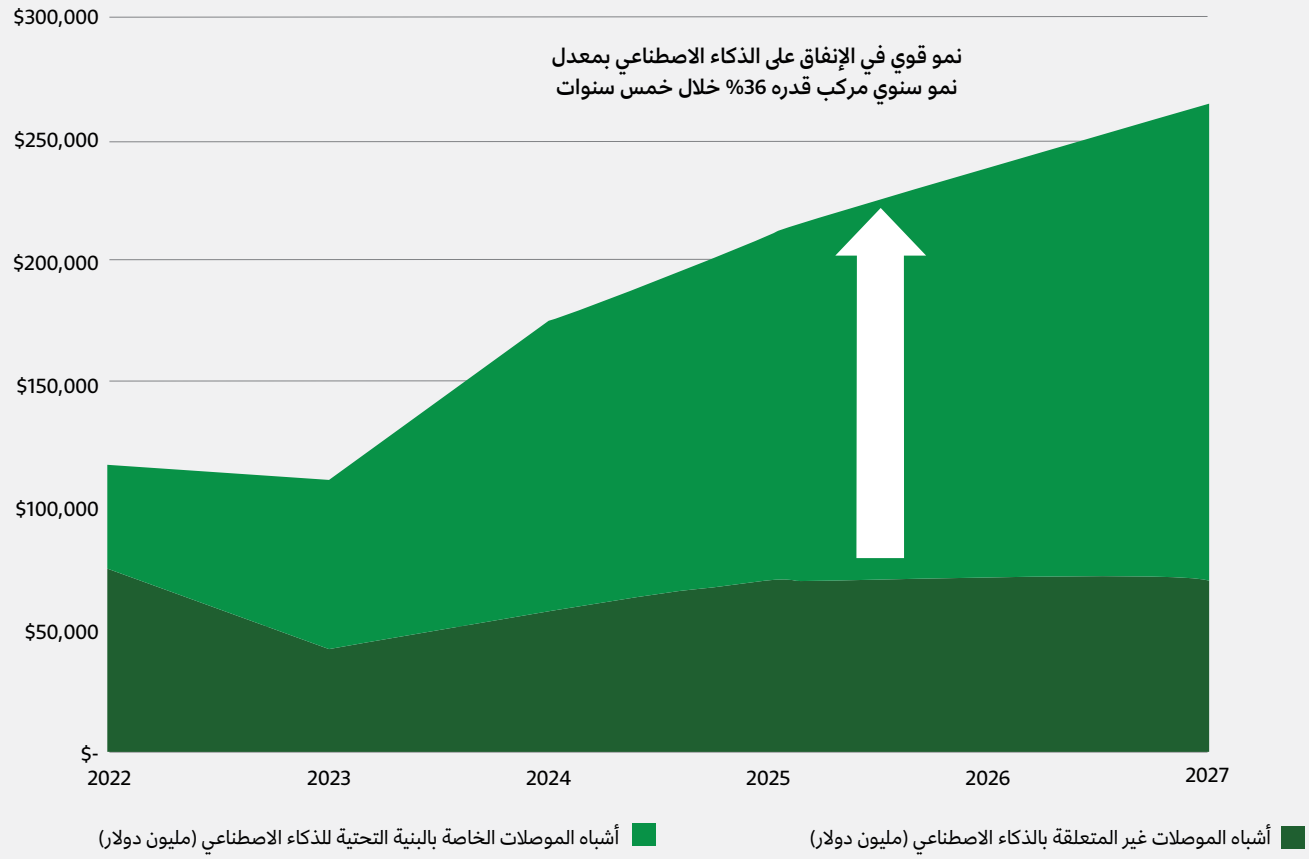
2.2 الطلب المتزايد على مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي

شهد تطوير الذكاء الاصطناعي واعتماده نموًا هائلاً في السنوات الأخيرة، مدفوعًا بالتقدم في مجال التعلم الآلي، ولا سيما التعلم العميق، والانتشار الواسع للبيانات الضخمة. ولم يعد الذكاء الاصطناعي مقتصرًا على مختبرات البحوث، بل أصبح محركًا رئيسًا للنمو الاقتصادي، إذ يعزز الإنتاجية ويقوي القدرة التنافسية على الصعيدين العالمي والوطني. ووفقًا لمؤسسة البيانات الدولية (IDC)، بلغت قيمة سوق الذكاء الاصطناعي العالمي قرابة 235 مليار دولار أمريكي في عام 2024، ومن المتوقع أن تصل إلى ما يقارب 631 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2028 (International Data Corporation 2024). إضافةً إلى ذلك، يمكن أن يساهم الذكاء الاصطناعي بنحو 19.9 تريليون دولار أمريكي في الاقتصاد العالمي بحلول عام 2030، وأن يساهم بنسبة 3.5% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي في ذلك العام (Fioretti et al. 2024).

يعد الذكاء الاصطناعي التوليدي ونماذج اللغة الضخمة من أهم العوامل الدافعة وراء هذا النمو السريع. إذ سهلت هذه التقنيات الوصول إلى الذكاء الاصطناعي، مما أدى إلى معدلات اعتماد قياسية في مختلف الشركات حول العالم. وتشير تقارير ماكينزي إلى أنه بحلول عام 2025، ستستخدم نحو 78% من الشركات الذكاء الاصطناعي في مجال واحد على الأقل من عملياتها، مع استخدام 71% منها للذكاء الاصطناعي التوليدي تحديدًا، وهو معدل تضاعف تقريبًا مقارنةً بنسبة 33% فقط في عام 2023 (Singla et al. 2025). وقد أدى هذا الاحتمال الواضح في الإنتاجية والابتكار إلى طفرة هائلة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي، بدءًا من مساعدي الذكاء الاصطناعي في البرمجيات وصولًا إلى التحليلات المدعومة بالذكاء الاصطناعي، وذلك في قطاعات متنوعة كالتمويل والرعاية الصحية والتعليم والتصنيع.

ومع هذا التوسع، ازدادت الحاجة إلى موارد حاسوبية قوية لدعم ابتكارات الذكاء الاصطناعي. فبين عامي 2012 و2018، تضاعفت القدرة الحاسوبية اللازمة لتشغيل برامج تدريب الذكاء الاصطناعي الرائدة كل 3-4 أشهر تقريبًا (Lohn and Musser 2022)، وعلى الرغم من أن التطورات في الخوارزميات والبنية قد حسنت الكفاءة، فإن ظهور نماذج اللغة الضخمة أبقى الطلب على الحوسبة ينمو بوتيرة مماثلة. ونتيجةً لذلك، تستثمر المؤسسات في مختلف القطاعات، مثل الخدمات المصرفية والرعاية الصحية والتصنيع، بكثافة في بنية تحتية حاسوبية متقدمة لدعم تطوير الذكاء الاصطناعي. تتوقع مؤسسة البيانات الدولية أن يستمر الذكاء الاصطناعي في دفع عجلة الاستثمار في مراكز البيانات، إذ من المتوقع أن ينمو الإنفاق بمعدل نمو سنوي مركب (CAGR) قدره 36% بين عامي 2022 و2027 (Hoff 2024)، كما هو موضح في الشكل (2).

الشكل 2. الإنفاق على مراكز البيانات نتيجةً للذكاء الاصطناعي بين عامي 2022 و2027



المصدر: Hoff (2024). أعاد المؤلفون إنتاجه لسهولة القراءة.

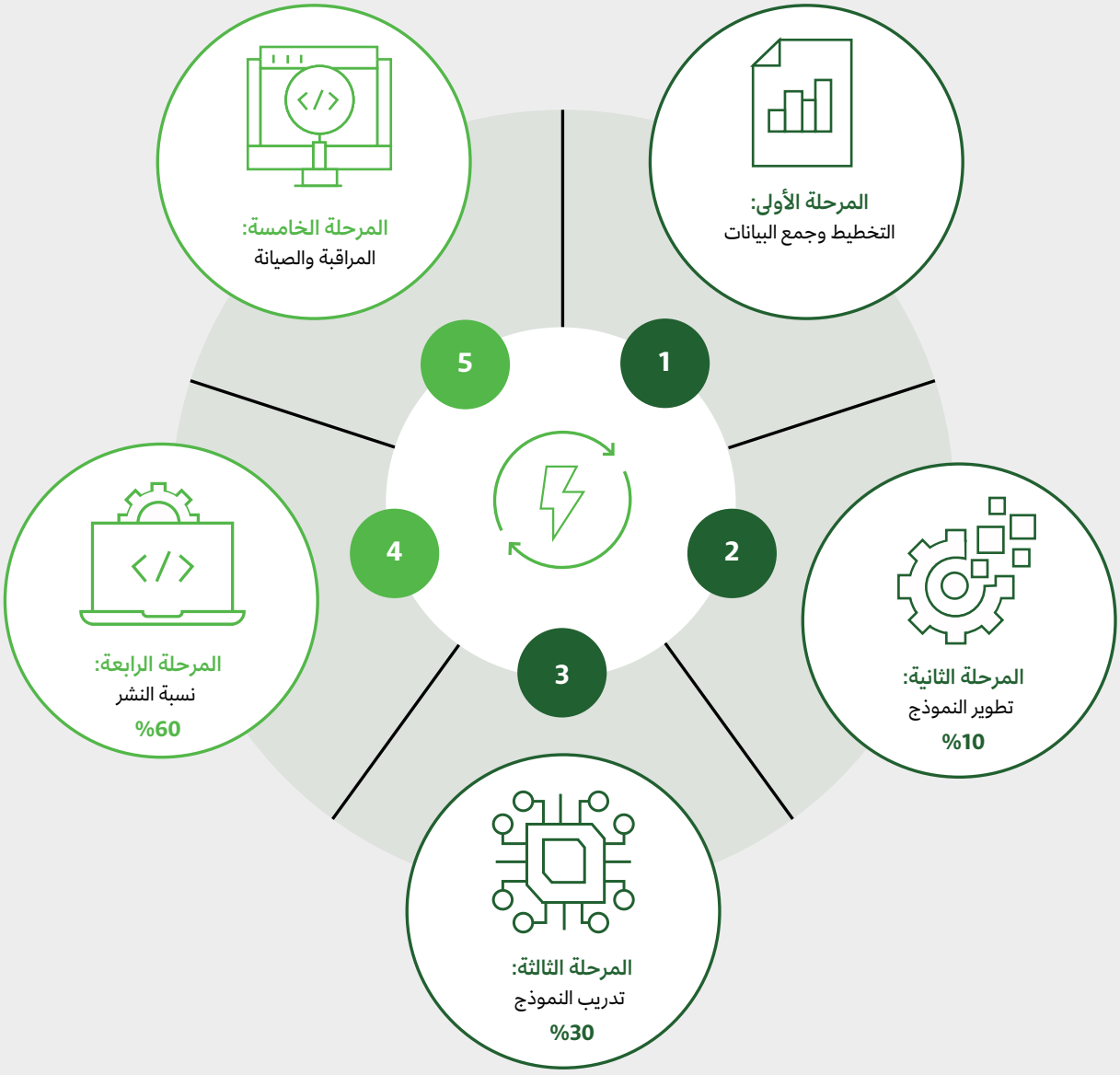
يعيد التبني المتسارع للذكاء الاصطناعي وتزايد أحمال العمل كثيفة الحوسبة تشكيل متطلبات البنية التحتية لمراكز البيانات، من حيث تصميمها، وعدد المرافق المطلوبة، والأحجام التي ينبغي أن تبلغها. ويتيح هذا التحول فرصًا وتحديات للمستثمرين وصناع السياسات. ومن أبرز هذه التحديات الآثار الكبيرة على الطاقة والبيئة. تستهلك الخوادم عالية الكثافة التي تشغل دورات تدريب مستمرة وأحمال عمل استدلالية واسعة النطاق كميات هائلة من الكهرباء. وفي بعض الحالات، قد يستهلك مجمع ذكاء اصطناعي واحد فائق التوسع طاقة تعادل ما تستهلكه مدينة صغيرة.

يبين الشكل (3) أن متطلبات الطاقة تختلف باختلاف مراحل دورة حياة الذكاء الاصطناعي، وتتجاوز باستمرار متطلبات الخدمات الرقمية التقليدية. تُشير التقديرات الأولية إلى أن استدلال الذكاء الاصطناعي التوليدي يستهلك ما يقارب عشرة أضعاف الكهرباء التي يستهلكها البحث التقليدي، حيث يرتفع من نحو 0.3 واط في الساعة (Wh) لعملية بحث في جوجل إلى ما يقارب 2.9 واط في الساعة لطلب ChatGPT (EPRI 2024). وعلى نطاق واسع، قد تشكل هذه الاختلافات ضغطًا على الشبكات المحلية. وتواجه المناطق التي تضم تجمعات من مراكز البيانات قيودًا على السعة، مما يبرز الحاجة الملحة للتخطيط الإستراتيجي.

أصبح فهم الوضع الراهن لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، ومسارات تطورها، واحتياجاتها، ضرورة اقتصادية وبيئية وجيوسياسية. تتيح مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي فرصًا للاستثمار والابتكار والتنافسية الرقمية، ولكنها تشكل أيضًا تحديات في تأمين الكهرباء بموثوقية والحفاظ على الاستدامة. ستكون الدول القادرة على مواءمة نمو البنية التحتية للذكاء الاصطناعي مع مرونة أنظمة الطاقة في وضع أفضل لجني فوائد اقتصاد الذكاء الاصطناعي.

وفي سياق للمملكة العربية السعودية، يعد فهم هذه الديناميكيات والاستفادة منها أمرًا أساسيًا لجذب استثمارات الذكاء الاصطناعي، وتوسيع البنية التحتية الرقمية، وضمان إمدادات طاقة موثوقة. سيكون تحقيق التوازن الفعال بين التوسع الرقمي وتحول الطاقة أمرًا بالغ الأهمية في ترسيخ دور إستراتيجي في اقتصاد الذكاء الاصطناعي العالمي، والنهوض بالأهداف الوطنية للتنويع الاقتصادي، مثل أولويات البحث والتطوير والاتصالات وتقنية المعلومات وأهداف القطاعات الصناعية.

الشكل 3. استهلاك الطاقة خلال دورة حياة الذكاء الاصطناعي



المصدر: Green-Dewasmes وآخرون (2025). أعيد نشره من قبل المؤلفين لتحسين سهولة القراءة.

03

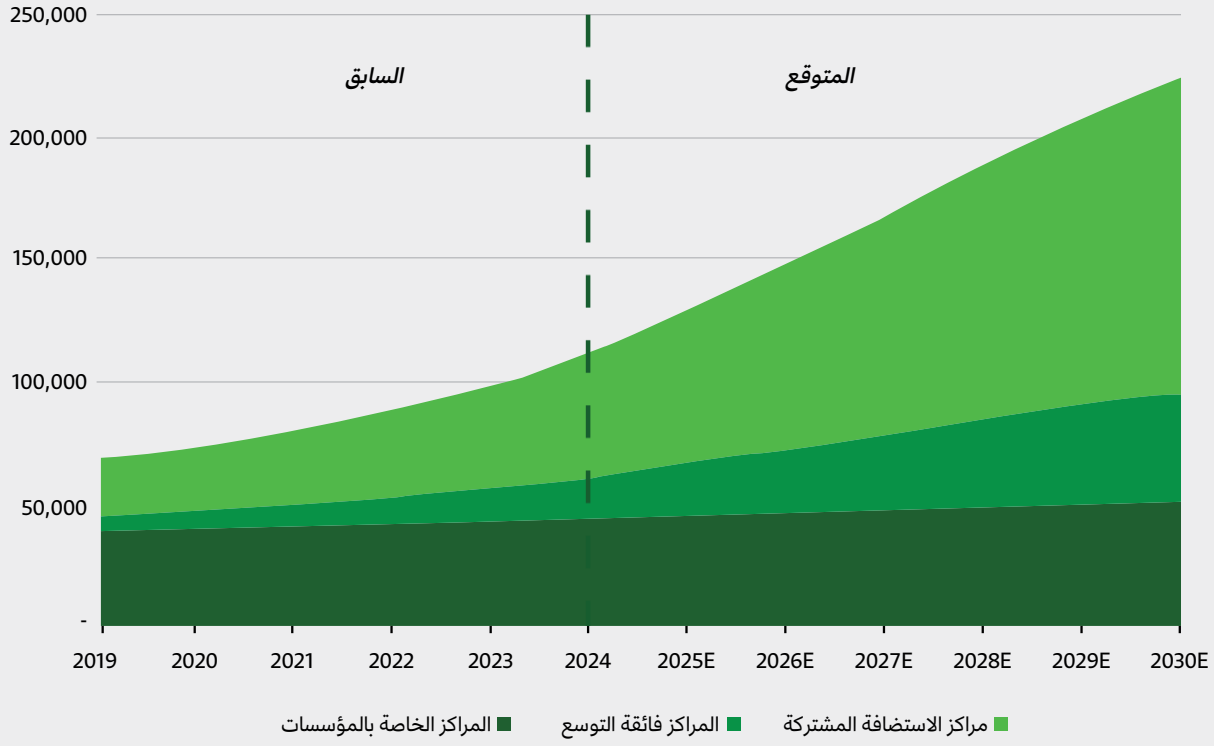
نظرة عامة على مشهد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي العالمية

يصبح صعود الذكاء الاصطناعي المحرك الرئيس للطلب في قطاع مراكز البيانات العالمية، معيدًا تشكيل نمو البنية التحتية، وتدفقات الاستثمار، واستهلاك الطاقة، والأثر البيئي. يلخص هذا القسم حالة مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في جميع أنحاء العالم، ويقيم آثارها على البنية التحتية، والطلب على الطاقة، والجوانب الاقتصادية.

1.3 سعة الطاقة

تشهد مراكز البيانات العالمية توسعًا سريعًا من حيث العدد وسعة الطاقة. في شهر مارس 2024، كان أكثر من 11800 مركزًا قيد التشغيل في جميع أنحاء العالم، أي ما يقارب ضعف العدد قبل خمس سنوات. وتتصدر الولايات المتحدة القائمة بـ 5388 مركز بيانات (قرابة 45% من الإجمالي)، تليها ألمانيا (520) والمملكة المتحدة (512)، ثم الصين (449) وكندا (336) (Fleck 2024). في إطار هذا التوسع الأكبر، ارتفع عدد منصات الحوسبة فائقة التوسع التي تدعم تطبيقات الذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية إلى نحو 1189 مركز بيانات بحلول أوائل عام 2025 (Synergy Research Group 2025). ووفقًا لبيانات S&P العالمية، التي نعتمد عليها اعتمادًا أساسيًا في تحليلاتنا وتوقعاتنا في هذه الدراسة (ما لم يُذكر خلاف ذلك)، قُدرت السعة العالمية المركبة لمراكز البيانات بنحو 111,897 ميجاواط في عام 2024، كما هو موضح في الشكل (4). وبينما ظلت سعة مراكز بيانات المؤسسات مستقرة نسبيًا، فإن التوسع الكبير جاء بسبب مرافق الحوسبة فائقة التوسع ومرافق المواقع المشتركة، التي تمثل ما يقارب 15.6% و44.9% من السعة العالمية، على التوالي، منذ عام 2020.

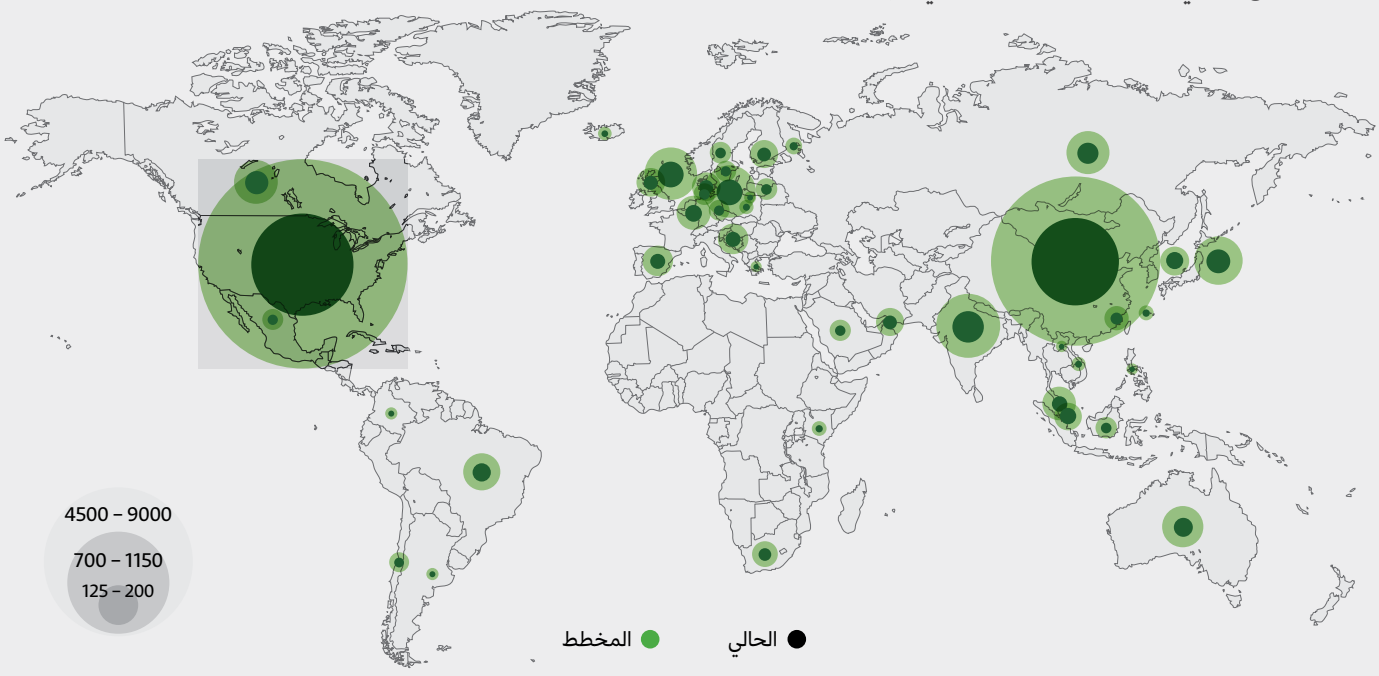
الشكل 4. السعة العالمية المركبة الحالية والمقدرة لمراكز البيانات (ميجاواط)



المصدر: المؤلفون.

يتسم توزيع القدرة الإجمالية للطاقة بالتفاوت على مستوى العالم. ففي الواقع، بحلول عام 2024، تستحوذ الولايات المتحدة والصين على ما يقرب من 60% من هذه القدرة (38,962 ميجاواط و28,639 ميجاواط على التوالي)، بينما يمتلك الاتحاد الأوروبي نحو 20,093 ميجاواط ، كما هو موضح في الشكل (5).

الشكل 5. التوزيع العالمي لسعة مراكز البيانات المثبتة في عام 2025



المصدر: المؤلفون.

وبالنظر إلى المستقبل، قدّرت S&P العالمية أن إجمالي السعة المركبة في مراكز البيانات سيبلغ قرابة 224,360 ميجاواط بحلول عام 2030، كما هو موضح في الشكل (4)، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 12% بين عامي 2024 و2030. ومن المتوقع أن تنمو مراكز البيانات فائقة التوسع ومراكز البيانات المشتركة بمعدل نمو سنوي مركب قدره 17%، بينما لن تتجاوز نسبة النمو 5% لمراكز بيانات المؤسسات. أما بالنظر لسعة تقنية المعلومات الخاصة بالذكاء الاصطناعي، فقد توقعت مؤسسة البيانات الدولية زيادةً في السعة إلى 19,600 ميجاواط بحلول عام 2027، مقارنةً بـ 3,600 ميجاواط في عام 2022 (Graham, Rutten, and Yashkova 2024). ومن جهة أخرى، توقعت شركة ماكينزي أنه في سيناريو متوسط المدى، سيرتفع الطلب على سعة مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي إلى 33% في المتوسط بين عامي 2023 و2030، ما يعني أنه بحلول عام 2030، من المتوقع أن تستحوذ المرافق المجهزة بتقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة على نحو 70% من إجمالي سعة مراكز البيانات، مع تمثيل أحمال عمل الذكاء الاصطناعي التوليدي لما يقرب من 40% من هذه الحصة (Srivathsan et al. 2024). تؤكد كل هذه العوامل تحول القطاع نحو الحوسبة عالية الكثافة والمحسنة للذكاء الاصطناعي.

2.3 الاستثمار الرأسمالي

أدى النمو السريع للذكاء الاصطناعي إلى موجة عالمية من الاستثمار الرأسمالي في البنية التحتية لمراكز البيانات. وهذا جعل الشركات والحكومات تخصص أموالًا لتوسيع سعة مراكز البيانات من خلال إنشاء مبانٍ جديدة (مشروعات جديدة) وتحديث المرافق القائمة (مشروعات قائمة) لتلبية الطلب على أحمال عمل تدريب الذكاء الاصطناعي والاستدلال.

بحسب استطلاع عالمي أجرته مجموعة CBRE، [3] خطط 95% من 92 مستثمرًا رئيسيًا في مراكز البيانات لزيادة إنفاقهم في عام 2025، حيث توقع 41% منهم تخصيص ما بين 500 مليون دولار الى ملياري دولار (أو أكثر)، مقارنةً بـ 30% في عام 2024 (CBRE 2025). وأفادت الوكالة الدولية للطاقة (IEA) أن الاستثمار العالمي في مراكز البيانات قد ازداد بنحو 70% خلال العامين الماضيين (Spencer et al. 2025).

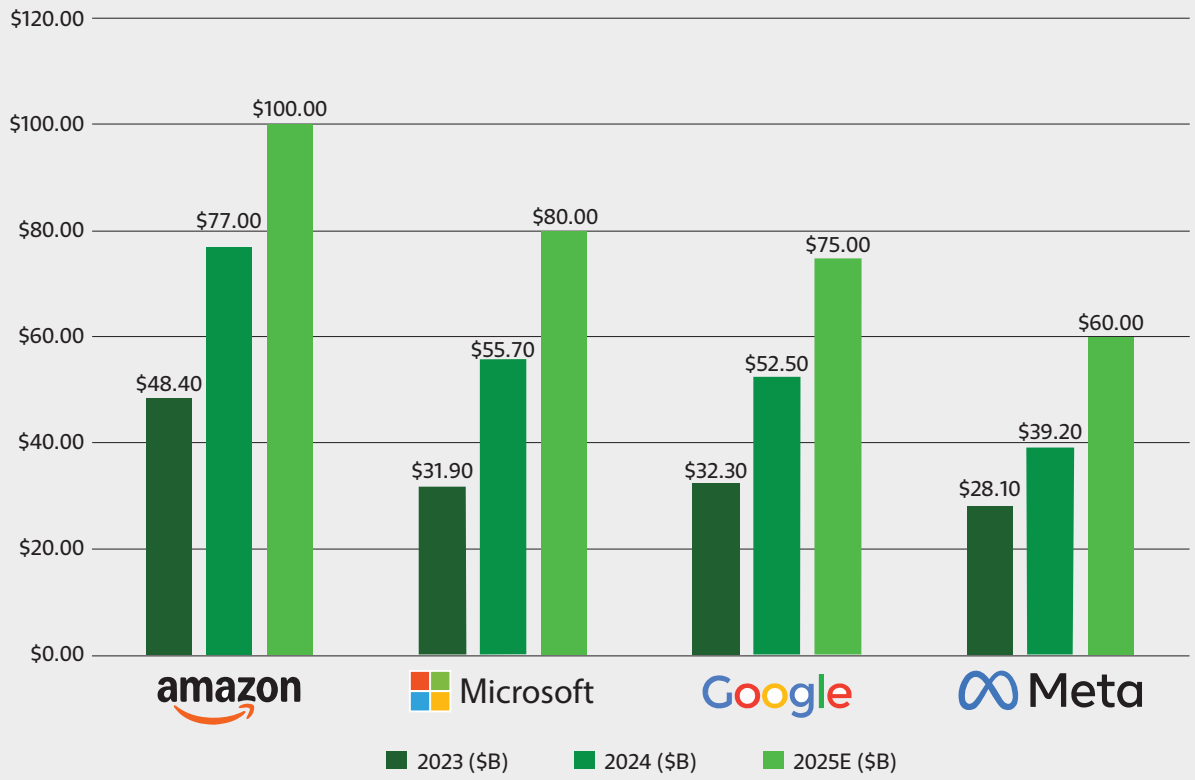
وقد أطلقت حكومات عديدة مبادرات لبناء مراكز البيانات. فعلى سبيل المثال، أطلقت الولايات المتحدة مبادرة Stargate AI في عام 2025 باستثمار قدره 500 مليار دولار يمتد حتى عام 2028. وأطلق الاتحاد الأوروبي مبادرة InvestAI، مخصصًا 207 مليار دولار لبناء "مصانع عملاقة للذكاء الاصطناعي" توفر بنية تحتية حاسوبية أساسية، متضمنة مراكز البيانات (Clemmons and Graham 2025). واستثمرت الصين أكثر من 6.1 مليار دولار أمريكي في عام 2024 لإنشاء ثمانية مراكز حوسبة ضمن مبادرتها الضخمة للبيانات "بيانات الشرق، حوسبة الغرب". وقد أدى ذلك إلى استثمارات إضافية في مراكز البيانات من الحكومات المحلية والشركات التابعة للدولة، حيث بلغت 27 مليار دولار بنهاية العام نفسه، وذلك لتعزيز قدرات الحوسبة في مجال الذكاء الاصطناعي (Stokols 2025). وبالتوازي مع ذلك، أعلنت فرنسا والإمارات العربية المتحدة عن خطة مشتركة لإنشاء مركز بيانات للذكاء الاصطناعي بقدرة 1000 ميجاواط في أوروبا، باستثمار يقدر ما بين 34.8 و58 مليار دولار (Nara-simhan et al. 2025).

ولا تزال شركات الحوسبة السحابية العملاقة المحرك الرئيس للاستثمار في البنية التحتية للذكاء الاصطناعي. وقد خططت شركات جوجل وأمازون وميتا ومايكروسوفت مجتمعةً لإنفاق 320 مليار دولار في عام 2025، بزيادة عن 230 مليار دولار في عام 2024، أي بزيادة قدرها 1.4 ضعف ومعدل نمو سنوي مركب قدره 40.37%. خصصت مايكروسوفت وحدها 80 مليار دولار لمراكز البيانات المدعومة بالذكاء الاصطناعي، بينما توقعت ميتا إنفاق ما بين 60 و65 مليار دولار على الحوسبة الفائقة المدعومة بالذكاء الاصطناعي (Houlihan Lokey 2025)، كما هو موضح في الشكل (6).

إذا استمرت الاتجاهات الحالية، فمن المتوقع أن تدفع النفقات الرأسمالية الضخمة (CAPEX) الاستثمار العالمي السنوي في مراكز البيانات إلى أكثر من تريليون دولار بحلول عام 2029، أي أكثر من ضعف المستوى الحالي. وقدرت شركة ماكينزي حجم الاستثمار المطلوب عالميًا في مراكز البيانات لتلبية الطلب على الذكاء الاصطناعي وحده بنحو 5.2 تريليون دولار، ومن المتوقع أن يصل إلى ما يقرب من 7 تريليون دولار بحلول عام 2030 (Noffsinger et al. 2025). ويعود هذا الارتفاع إلى الطلب المتزايد على الرقائق المتطورة وأنظمة التبريد وتكامل الشبكات، مدفوعًا بالذكاء الاصطناعي، فضلًا عن قيود الطاقة والأراضي.

[3] مجموعة CBRE: Coldwell Banker Richard Ellis.

الشكل 6. إنفاق مزودي خدمات الحوسبة السحابية فائقة التوسع على تطوير مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في 2023-2025



المصدر: Houlihan Lokey (2025). أعيد نشره من قبل المؤلفين لتحسين سهولة القراءة.

3.3 الطلب على الكهرباء

منذ عام 2017، تسارع استهلاك الكهرباء في مراكز البيانات نتيجةً للاتجاهات التقنية، مثل نمو الحوسبة السحابية، واستخدام وسائل التواصل الاجتماعي، والتوسع السريع للذكاء الاصطناعي. بحسب الوكالة الدولية للطاقة، ارتفع معدل استهلاك مراكز البيانات للكهرباء سنويًا من 3% بين عامي 2005 و2015 إلى 10% بين عامي 2015 و2024 (Spencer et al. 2025). في الواقع، قدّرت مؤسسة S&P العالمية أن يصل استهلاك مراكز البيانات العالمية للكهرباء إلى نحو 854 تيراواط في الساعة (TWh) في عام 2024.

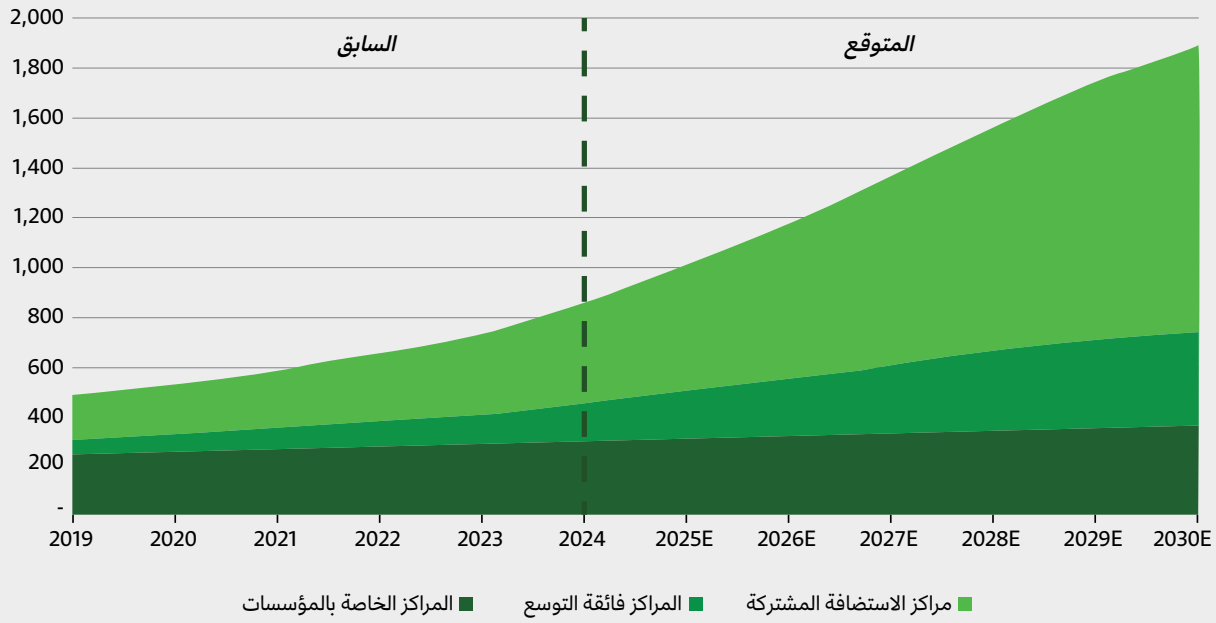
وتعد أحمال عمل الذكاء الاصطناعي المحرك الأهم لهذا الارتفاع. وتشير الدراسات إلى أن مهام الذكاء الاصطناعي لم تستحوذ إلا على 5% إلى 15% من استهلاك الطاقة في مراكز البيانات العالمية في عام 2023، ومن المتوقع أن تستمر في الارتفاع بسرعة لتصل إلى 35% إلى 50% بحلول عام 2030 (Kamiya and Coroamă 2025). وبناءً على ذلك، سيتضاعف الطلب العالمي على الكهرباء في مراكز البيانات بحلول عام 2030 ليصل إلى قرابة 1891 تيراواط في الساعة، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 14%،[4] كما هو موضح في الشكل (7).

على الرغم من هذه الأرقام، فإن التوقعات لا تزال غير مؤكدة، ومن المحتمل ألا تتحقق هذه التوقعات. سيعتمد المسار على عدة عوامل متغيرة، مثل وتيرة استخدام الذكاء الاصطناعي، والتطورات التنظيمية، وجاهزية البنية التحتية للطاقة والشبكات. في العديد من الأسواق، أصبحت معدلات التأخير في تأمين توصيلات الشبكة وفترات الانتظار الطويلة للمحولات عالية السعة من أهم المعوقات، وهذا يؤدي غالبًا إلى تمديد الجداول الزمنية للمشروعات لمدة تصل إلى ثلاث سنوات.

هذه المعوقات، إلى جانب ارتفاع التكاليف، قد تبطئ من وتيرة إنشاء مجمعات الذكاء الاصطناعي واسعة النطاق وتقلل من توقعات النمو على المدى القريب. على سبيل المثال، توقعت مؤسسة البيانات العالمية زيادة في استهلاك الكهرباء في مراكز البيانات بسبب الذكاء الاصطناعي بمعدل نمو سنوي مركب قدره 44.7%، ليصل إلى نحو 146.2 تيراواط في الساعة بحلول عام 2027 (Graham, Rutten, and Yashkova 2024)، بينما توقعت دراسة أن يرتفع استهلاك الطاقة المرتبط بالذكاء الاصطناعي إلى 200 تيراواط في الساعة سنويًا بين عامي 2023 و2030 (Goldman Sachs 2024). حتى مع هذا النمو الأكثر تحفظًا، سيكون للبنية التحتية الرقمية المتنامية آثار بالغة في البيئة وأنظمة الطاقة، مما يبرز أهمية تدابير الكفاءة والاستدامة في تطور هذا القطاع.

[4] مجموعة بيانات S&P العالمية.

الشكل 7. استهلاك الطاقة في السابق وتوقعات استهلاك الطاقة في مراكز البيانات العالمية (تيراواط في الساعة) للفترة 2019-2030



المصدر: المؤلفون.

4.3 الانبعاثات

يُخلّف الارتفاع الكبير في استهلاك الطاقة الناتج عن مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي أثرًا بيئيًا كبيرًا. وقد تشكل انبعاثات الكربون الناتجة عنه تحديًا للأهداف المناخية العالمية في حال عدم اتخاذ تدابير التخفيف المناسبة. تشير تقديرات الوكالة الدولية للطاقة إلى أن مراكز البيانات تساهم حاليًا بنحو 180 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم، أي أقل من 1% من إجمالي الانبعاثات المرتبطة بالطاقة، ومع ذلك فهي من بين أسرع مصادر الانبعاثات نموًا في قطاع الطاقة، ومن المتوقع أن تبلغ ذروتها عند قرابة 320 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2030 (Spencer et al. 2025). وتُقدر شركة أكسنتشر أنه بحلول عام 2030، قد تصل انبعاثات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي إلى 3.4% من الغازات الدفيئة العالمية (مكافئ ثاني أكسيد الكربون)، أي بزيادة تقارب 11 ضعفًا خلال عقد من الزمن (Jamison et al. 2025). في هذه الدراسة، جرى احتساب الانبعاثات بحجم ثاني أكسيد الكربون الناتج عن توليد الكهرباء باستخدام الوقود الأحفوري، واستبعدت الغازات الدفيئة الأخرى. ويمكن أن تصدر البنية التحتية للذكاء الاصطناعي ما بين 300 و350 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا بحلول عام 2030، وهو ما يعادل انبعاثات دولة متوسطة الحجم.

تعهدت معظم شركات مراكز البيانات الكبرى بتحقيق الحياد الصفري في الانبعاثات، السبب الذي يزيد من تعقيد إستراتيجية الطاقة في هذا القطاع. ويتطلب تحقيق هذه الأهداف زيادة حصة الكهرباء من الطاقة المتجددة، إلا أن هذه المصادر متقطعة. ونتيجة لذلك، يعتمد مشغلو مراكز البيانات بشكل متزايد على الغاز الطبيعي أو الطاقة النووية بوصفهما مصدرًا موثوقًا للطاقة، مع تعويض الانبعاثات من خلال شهادات الطاقة المتجددة (RECs). لذا، يعد تطوير أسواق موثوقة لشهادات الطاقة المتجددة، سواءً على الصعيد المحلي أو الدولي، أمرًا بالغ الأهمية، وقد يؤدي عدم نضج هذه الأسواق في الوقت الراهن إلى تأخير المشروعات الجديدة أو زيادة تكاليف الامتثال. وبدلاً من ذلك، قد يلجأ المشغلون إلى أهداف أكثر مرونة للانبعاثات أو جداول زمنية أبطأ للتنفيذ لتحقيق التوازن بين النمو والالتزامات المرتبطة بالاستدامة.

وإلى جانب الكربون، تتزايد الضغوط البيئية الأخرى، خاصة استهلاك المياه والانبعاثات الحرارية. وتعتمد معظم مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي على أنظمة تبريد تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، مثل المياه المبردة وتكييف الهواء، لإزالة الحرارة الكبيرة الناتجة عن الرقائق عالية الأداء. تشير إحدى التقديرات إلى أن تبريد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في عام 2030 سيتطلب 3.02 مليار متر مكعب تقريبًا من المياه العذبة سنويًا، أي أكثر مما تستهلكه دول مثل النرويج أو السويد في عام واحد (Jamison et al. 2025). حتى مراكز البيانات الصغيرة الحجم قد يكون لها بصمة مائية كبيرة، حيث يتطلب كل 1 ميجاواط من سعة مركز البيانات ما بين 25 و30 مليون لتر من الماء سنويًا للتبريد، وهو ما يعادل احتياجات مياه الشرب لقرابة 300 ألف شخص (Spindler, Hahn-Petersen, and Hosseini 2024).

5.3 التوقعات الإقليمية (حتى عام 2030)

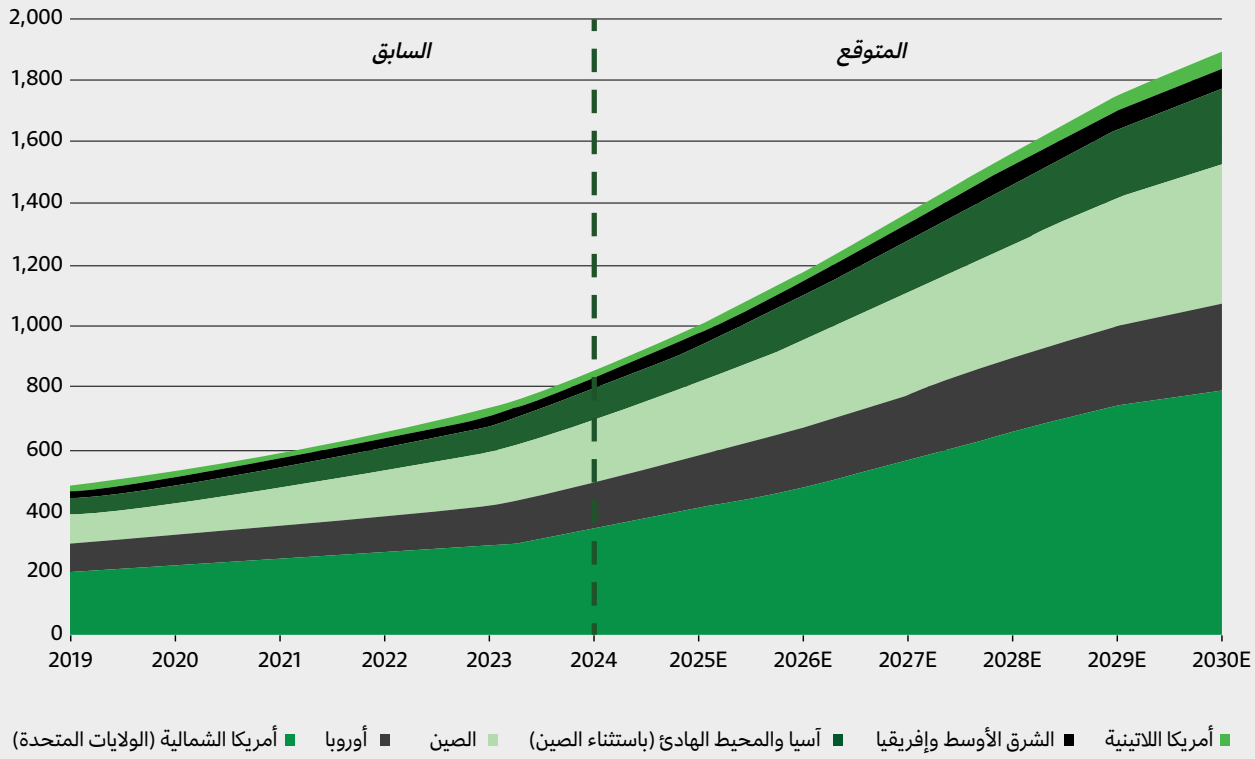
يقدم هذا القسم الوضع الراهن والتوقعات المستقبلية في المناطق الجغرافية الرئيسة، مع تسليط الضوء على الطلب على سعة مراكز البيانات، ومناطق الاستثمار الرئيسة، ونمو استهلاك الكهرباء.

أمريكا الشمالية (الولايات المتحدة)

تتصدر أمريكا الشمالية، وخاصة الولايات المتحدة، العالم في سعة مراكز البيانات وحوسبة الذكاء الاصطناعي، إذ تضم أكبر تجمع لمراكز البيانات فائقة التوسع ومرافق الذكاء الاصطناعي. وتعد شركات الحوسبة السحابية الأمريكية بمثابة البنية التحتية الرئيسة لأنشطة الذكاء الاصطناعي العالمية، حيث ينفذ جزء كبير من مهام الاستدلال والتدريب عالميًا على خوادم في مراكز بيانات تشغلها الولايات المتحدة. وتشمل المراكز الرئيسة الساحل الغربي وتكساس وفرجينيا، حيث تضم شمال فرجينيا، التي يشار إليها غالبًا باسم "ممر مراكز البيانات"، أكبر تجمع منفرد للبنية التحتية للحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي في العالم (Spencer et al. 2025).

ووفقًا لبيانات S&P العالمية، من المتوقع أن تصل سعة مراكز البيانات المركبة في الولايات المتحدة إلى قرابة 89,560 ميجاواط بحلول عام 2030. ولهذا التوسع آثار كبيرة على الطاقة، حيث استهلكت مراكز البيانات الأمريكية ما يقرب من 322 تيراواط في الساعة من الكهرباء في عام 2024، كما هو موضح في الشكل (8). بدأ هذا الارتفاع في عام 2017، بعد فترة استقرار في استهلاك الطاقة بين عامي 2014 و2016 عند نحو 60 تيراواط في الساعة، مدفوعًا بنمو قاعدة الخوادم المثبتة والخوادم المسرعة بوحدات معالجة الرسومات لتطبيقات الذكاء الاصطناعي (Shehabi et al. 2024). وبالنظر إلى المستقبل، من المتوقع أن يرتفع استهلاك الطاقة إلى 769 تيراواط في الساعة تقريبًا بحلول عام 2030 (Green et al. 2024).

الشكل 8. استهلاك الكهرباء المسجل سابقًا والمتوقع لمراكز البيانات الإقليمية (تيراواط في الساعة) للفترة 2019-2030



المصدر: المؤلفون.

الصين

تعد الصين من أبرز الدول المؤثرة في مجال البنية التحتية لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. إذ تستضيف بعضًا من أكبر منشآت مراكز البيانات، وتسعى جاهدةً لتوسيع قدرتها الحاسوبية في هذا المجال. وعلى مدى العقد الماضي، أنشأت الصين شبكة محلية واسعة من مرافق الحوسبة فائقة التوسع، تدعم عمالقة التقنية مثل Alibaba و Tencent و Baidu. وتوجد مبادرات حكومية في مجال الذكاء الاصطناعي. في عام 2024، استضافت الصين نحو 28,639 ميجاواط من سعة مراكز البيانات، ومن المتوقع أن ترتفع إلى أكثر من 54,614 ميجاواط في عام 2030. وتمثل الصين حاليًا قرابة 25% من استهلاك الكهرباء العالمي لمراكز البيانات (Spencer et al. 2025)، أي ما يعادل 201 تيراواط في الساعة من الكهرباء. بدأ قطاع مراكز البيانات في الصين بالتوسع في عام 2015، مع نمو الطلب على الكهرباء بنسبة 15% سنويًا حتى عام 2024 (Spencer et al. 2025). ومن المتوقع أن يستمر هذا النمو حتى عام 2030، مع توقعات بأن يتجاوز الطلب الضعف، كما تظهر بيانات S&P العالمية.

أوروبا

توسع أوروبا حضورها في مجال مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. فبينما كانت متأخرة تاريخيًا عن الولايات المتحدة في مجال الحوسبة السحابية فائقة التوسع، تستثمر المنطقة الآن في قدراتها الحاسوبية الخاصة بالذكاء الاصطناعي وقدراتها الإقليمية. وتشمل المراكز الرئيسة دبلن وفرانكفورت وأمستردام ولندن ودول الشمال الأوروبي. في عام 2024، بلغ إجمالي السعة المركبة في جميع مراكز البيانات داخل المنطقة الأوروبية ما يقارب 20,000 ميجاواط، ومن المتوقع أن يرتفع إلى نحو 33,422 ميجاواط بحلول عام 2030.[5] وتصدرت ألمانيا القائمة بقدرة 3,188 ميجاواط في عام 2024، تلتها المملكة المتحدة بقدرة 2,764 ميجاواط، ثم فرنسا بقدرة 1,374 ميجاواط.

وينبع هذا التوجه من طموح الاتحاد الأوروبي الرقمي لأن يصبح رائدًا عالميًا في مجال الذكاء الاصطناعي من خلال بناء مصانع الذكاء الاصطناعي ومراكز الحوسبة الفائقة في جميع أنحاء الدول الأعضاء، مع خطط لمضاعفة قدرة مراكز البيانات ثلاث مرات خلال السنوات الخمس إلى السبع القادمة (European Commission 2025). استهلكت مراكز البيانات ما يقارب 151 تيراواط في الساعة من الكهرباء في عام 2024، ومن المتوقع أن يرتفع هذا الرقم إلى أكثر من 281 تيراواط في الساعة في عام 2030، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 11%. ويشهد قطاع الحوسبة في دول الشمال الأوروبي اتجاهًا ملحوظًا يتمثل في ازدياد عدد مجمعات مراكز البيانات التي تستهدف عملاء الذكاء الاصطناعي تحديدًا، وذلك من خلال توفير طاقة نظيفة بنسبة 100% وحلول حوسبة عالية الأداء (Duncan et al. 2024).

دول مجلس التعاون الخليجي والشرق الأوسط

يشهد الشرق الأوسط نموًا متسارعًا ليصبح أحد أبرز المراكز العالمية الصاعدة لمراكز البيانات وحوسبة الذكاء الاصطناعي ويعود ذلك إلى إستراتيجيات التنويع الاقتصادي والظروف المواتية للطاقة. وتقود دول مجلس التعاون الخليجي هذا التوجه، مستفيدةً من انخفاض تكلفة الأراضي والطاقة، وموقعها الإستراتيجي الذي يربط آسيا بأفريقيا وأوروبا، فضلاً عن وفرة رأس المال. وعلى الرغم من مناخ المنطقة الحار، الذي يزيد من الحاجة إلى التبريد، تنظر الحكومات إلى مراكز البيانات باعتبارها ركائز أساسية في خططها للتحول الرقمي والاقتصادي. لقد ساهمت الإستراتيجيات الوطنية، مثل رؤية المملكة العربية السعودية 2030، ورؤية الإمارات العربية المتحدة 2031، والكويت الجديدة 2035، وسلطنة عمان الرقمية 2030، في تعزيز سوق مراكز البيانات في الشرق الأوسط (Tohme et al. 2025).

حتى عام 2024، استضافت المنطقة أكثر من 290 مركز بيانات في 17 دولة (Data Center Map.n.d.). وبلغت سعة مراكز البيانات الإجمالية ما يقارب 5311 ميجاواط في عام 2024، ومن المتوقع أن تنمو إلى نحو 8938 ميجاواط في عام 2030. وقد ذكر محللو القطاع أن الشرق الأوسط يعد من أسرع المناطق نموًا في مجال مراكز البيانات (Shiwani, Abbasi, and Levack 2025).

وتجسد المشروعات الرائدة هذا التوجه. في المملكة العربية السعودية، تقود مبادرات كبرى، مثل مصانع الذكاء الاصطناعي التابعة لشركة HUMAIN في الدمام ومجمع Oxagon Green للذكاء الاصطناعي في نيوم، نمو المنطقة، مع خطط للوصول إلى قدرة جيجاواط متعددة بحلول عام 2030. وقد دخلت الإمارات العربية المتحدة في شراكة مع شركات أمريكية لتطوير مجمع مراكز بيانات للذكاء الاصطناعي بقدرة 5000 ميجاواط من خلال شركة G42، بهدف بناء أكبر مجمع مراكز بيانات مخصص للذكاء الاصطناعي خارج الولايات المتحدة. وقد بدأت بالفعل المرحلة الأولى بقدرة 1000 ميجاواط (U.S. Department of Commerce 2025). وتشهد قطر وعُمان والبحرين والكويت توسعًا مماثلًا. فعلى سبيل المثال، أبرمت عُمان شراكة مع شركة Equinix لإنشاء مركز بيانات ضخم في صلالة، وأعلنت الكويت عن إنشاء مجمع مراكز بيانات بقدرة 1000 ميجاواط (Shiwani, Abbasi, and Levack 2025). وخارج منطقة الخليج، تستثمر أسواق ثانوية مثل مصر والمغرب في مجمعات مراكز بيانات جديدة وحوافز لجذب مزودي خدمات الحوسبة السحابية. كشفت بيانات S&P العالمية أن استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في الشرق الأوسط سيرتفع من 38 تيراواط في الساعة في عام 2024، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 11%، إلى قرابة 72 تيراواط في الساعة في عام 2030.

[5] بيانات S&P العالمية.

ويشهد قطاع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي العالمي تحولًا من نموذج يتمحور حول الولايات المتحدة والصين إلى شبكة أكثر انتشارًا من المراكز الإقليمية. ومع تزايد نظرة الدول إلى حوسبة الذكاء الاصطناعي بوصفها أصلًا إستراتيجيًا، تستفيد المناطق من مزاياها الفريدة لبناء قدرات تنافسية في هذا المجال، مثل: النظام البيئي التقني الأمريكي، وحجم الصين ودعمها الحكومي، والبيئة التنظيمية الأوروبية والطاقة النظيفة، وموارد الطاقة في الشرق الأوسط. وبحلول عام 2030، من المرجح أن يتحقق توزيع عالمي أكثر توازنًا، مع مساهمة المناطق الناشئة على نحو أكبر في أحمال عمل الذكاء الاصطناعي.

04

مشهد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية

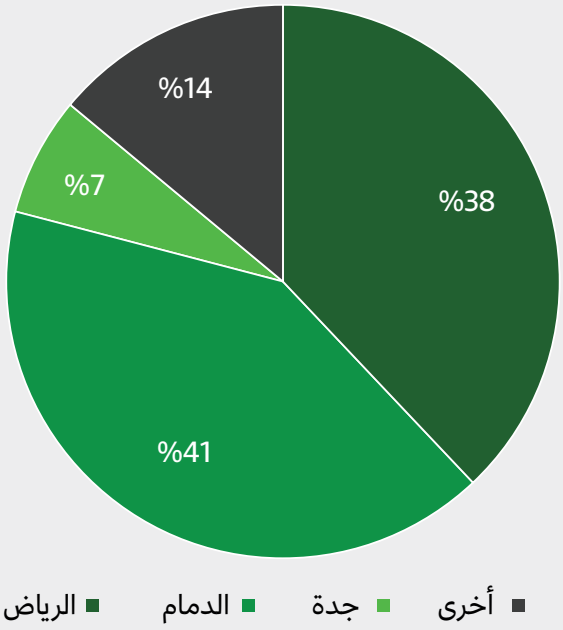
تعد المملكة العربية السعودية من أكثر أسواق مراكز البيانات ديناميكية في الشرق الأوسط إذ تشكل البنية التحتية القائمة على الذكاء الاصطناعي ركيزة أساسية في تحولها الرقمي وقطاع الطاقة. ويعكس النمو السريع في هذا القطاع إستراتيجيات المملكة الرقمية الوطنية، المدعومة بلوائح تنظيمية ملائمة، وإمدادات طاقة موثوقة، واستثمارات حكومية وخاصة قوية. يتناول هذا القسم تطور مراكز البيانات وانتشارها في جميع أنحاء المملكة، والعوامل التي تسهم في نموها، وتأثير ذلك في الطلب على الكهرباء والانبعاثات. ويقدم مجموعة من سيناريوهات النمو للفترة من 2025 إلى 2030 لتقييم كيفية تأثير ظروف التشغيل والكفاءة المختلفة في مساهمة القطاع في تحقيق أهداف المملكة في مجال الطاقة والاستدامة.

ارتبط تطوير مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية بإستراتيجيات التحول الرقمي الأوسع نطاقًا. ففي أوائل العقد الأول من 2000، تولت شركات الاتصالات الوطنية بناء البنية التحتية الأساسية لدعم الجهات الحكومية وقواعد البيانات الوطنية وخدمات الإنترنت الأساسية. ومع تزايد الطلب على الخدمات الرقمية، شهد العقد الثاني من الألفية الجديدة توسعًا في مراكز البيانات المشتركة ومرافق المؤسسات، بفعل نمو القطاع المالي ومبادرات الحكومة الإلكترونية واعتماد الحوسبة السحابية. وشكل إطلاق رؤية 2030 في عام 2016 نقطة تحول، إذ رسخ البنية التحتية الرقمية بوصفها ركيزة أساسية للتنويع الاقتصادي. ومنذ ذلك الحين، تطور القطاع من استضافة عامة الأغراض إلى بنية تحتية متقدمة تدعم الذكاء الاصطناعي، في إطار أهداف المملكة للاقتصاد الرقمي.

وحتى عام 2024، بلغ عدد مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية قرابة 58 مركزًا (CST 2024a). وبين عامي 2022 و2024، تضاعفت القدرة التقنية لهذه المراكز أكثر من ضعفين، من 122.4 ميجاواط (MCIT 2023) إلى 290.5 ميجاواط (MCIT 2024)، ما يعكس معدل نمو سنوي مركب يبلغ نحو 54%، ويضع المملكة بين أسرع أسواق البنية التحتية الرقمية نموًا في الشرق الأوسط. وتتركز مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية في عدد قليل من المناطق الرئيسة. وفقًا لبيانات S&P العالمية، فإن ما يقارب 79% من السعة المركبة في المملكة تقع في مدينتين: الرياض والدمام، كما هو موضح في الشكل (9).

يعكس هذا التمركز المكاني الجغرافيا الاقتصادية للمملكة، وتوفر البنية التحتية الحيوية، كشبكات الكهرباء وشبكات الألياف الضوئية، وقربها من أسواق الشركات. وقد أصبحت الرياض، التي تستحوذ على نحو 38% من إجمالي السعة، المركز الرئيس لمراكز البيانات السحابية العامة ومراكز بيانات الشركات، نظرًا لاستضافتها العديد من الجهات الحكومية ومقرات الشركات. وتستحوذ الدمام على الحصة الأكبر بنحو 41% من السعة. ويعزى نموها السريع بوصفها مركز حوسبة ناشئ إلى موقعها في الممر الصناعي الخليجي، وقربها من الكابلات البحرية وشركات الطاقة الكبرى. وتساهم جدة بنحو 7% من السعة، بينما لا تتجاوز حصة المدن الأخرى، بما فيها المدينة المنورة وبريدة، 1% إلى 3% من إجمالي السعة؛ وتخدم هذه المرافق الأصغر حجمًا احتياجات الحكومة المحلية والشركات.

الشكل 9. توزيع سعة مراكز البيانات في مختلف مناطق المملكة العربية السعودية



المصدر: المؤلفون.

1.4 مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي: التحول المحوري

تشهد المملكة العربية السعودية نموًا سريعًا في سعة مراكز البيانات، لا سيما مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. وحتى عام 2024، صممت معظم هذه المراكز لدعم الخدمات السحابية، واستضافة المؤسسات، والخدمات الحكومية الرقمية. وابتداء من عام 2025، حدث تحول محوري نحو بنية تحتية موجهة نحو الذكاء الاصطناعي.

وكانت الخطوة الأولى الواضحة في هذا الاتجاه هي إطلاق مركز Groq Cloud في الدمام، الذي يعتمد على الاستدلال، مطلع عام 2025، مما يشير إلى تحول المملكة في قطاع مراكز البيانات، حيث بني خصيصًا لتطبيقات الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع (Groq 2025). وفي الوقت نفسه، من المقرر تشغيل المرحلة الأولى من مشروع HUMAIN بقدرة 50 ميجاواط في أواخر عام 2025، مع خطط للتوسع خلال العقد (Techusiness 2025). وتعمل نيوم على تطوير مجمع Oxagon للذكاء الاصطناعي، بدءًا بقدرة 300 ميجاواط في عام 2028 (NEOM 2025). بحلول أوائل العقد القادم، من المتوقع أن تدفع مشروعات من شركتي هيوماين ونيوم وغيرهما القدرة الوطنية إلى نطاق أكبر حجمًا.

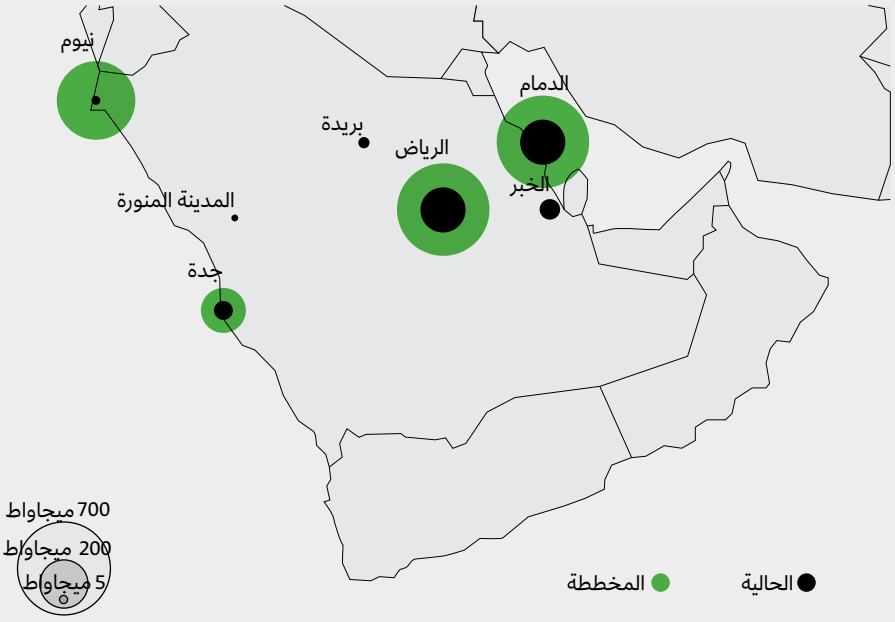
وبحلول منتصف عام 2025، تجاوزت الاستثمارات المعلنة في قطاع مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية 25 مليار دولار، مع توقعات بوصول الالتزامات طويلة المدى إلى ما يقارب 77 مليار دولار بحلول عام 2034 (Saudi Market Research Consulting Firm 2025). وتقود شركة هيوماين جزءًا كبيرًا من هذا النمو، بالتعاون مع شركاء تقنيين دوليين مثل NVIDIA وAMD وAmazon Web Services (AWS) وQualcomm وCisco. ويعد مجمع الذكاء الاصطناعي في نيوم مساهمًا رئيسًا آخر. وإذا ما سارت جميع المشروعات المعلنة قدمًا، فقد تستحوذ المملكة العربية السعودية على ما يصل إلى 7% من القدرة العالمية لتدريب واستنتاج الذكاء الاصطناعي بحلول أوائل العقد القادم (England and Omran 2025). يلخص الجدول (3) أبرز المشروعات الرئيسة حتى منتصف عام 2025. ويمثل هذا التحول نقلة نوعية من أنظمة الحوسبة عالية الأداء السابقة، مثل نظام شاهين التابع لجامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية ونظام الدمام-7 التابع لشركة أرامكو، نحو بنية تحتية تجارية واسعة النطاق للذكاء الاصطناعي، تدعم النمو الاقتصادي الرقمي على المستوى الوطني والعالمي.

ستُوزع مراكز البيانات الحالية والمعلن عنها، وسعاتها، في جميع أنحاء المملكة. وسيشمل ذلك توسيع المراكز القائمة، مثل الرياض والدمام، وإنشاء مراكز جديدة، مثل نيوم في الشمال الغربي، كما هو موضح في الشكل (10). مع ذلك، لم تُحدد مواقع بعض السعات المعلنة بعد.

الجدول 3. أبرز مشروعات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية، استنادًا إلى الإعلانات الرسمية (حتى منتصف عام 2025)

مشروع/ مبادرة	الجدول الزمني	الجهة الرائدة	الاستثمار	هدف القدرة	الأهداف الرئيسة
مركز الاستدلال هيومين-جروك للذكاء الاصطناعي (Groq 2025)	2025-2024	HUMAIN و Groq	1.5 مليار دولار	غير متوفر	مرفق للاستدلال فقط باستخدام وحدات معالجة التعلم من Groq، محسن لأحمال عمل الذكاء الاصطناعي التوليدي ذات زمن الاستجابة المنخفض للغاية
استثمار أوراكل في البنية التحتية (Egbert 2025)	2034-2024	Oracle	14 مليار دولار	غير متوفر	توسيع البنية التحتية للحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي لدعم التحول الرقمي الوطني وخدمات المؤسسات
منطقة هيومين-AWS للذكاء الاصطناعي (Amazon 2025)	2026-2025	HUMAIN و AWS	5 مليار دولار	غير متوفر	منطقة مخصصة للابتكار في مجال الذكاء الاصطناعي متكاملة مع بنية AWS التحتية
مركز الذكاء الاصطناعي التابع لجوجل Cloud-PIF (Google Cloud 2025; PIF 2024)	2027-2025	HUMAIN و Google Cloud	10 مليار دولار	غير متوفر	مركز إقليمي لتطوير الذكاء الاصطناعي وخدمات الحوسبة السحابية، مع التركيز على تطبيقات المؤسسات والجهات الحكومية
البنية التحتية للذكاء الاصطناعي التابع لشركة هيومين-AMD (Techusiness 2025; HUMAIN 2025; Grabein and Stine 2025)	2030-2025	HUMAIN, AMD Cisco	10 مليار دولار	500 ميجاواط (جزء من 1900 ميجاواط بحلول عام 2030؛ 6600 ميجاواط بحلول عام 2034)	استخدام مسرعات AMD MI300 مع شبكات Cisco لبناء بنية تحتية مفتوحة تستهدف المطورين والشركات الناشئة ومشروعات نماذج لغوية كبيرة على المستوى الوطني
مصانع الذكاء الاصطناعي هيومين-NVIDIA (NVIDIA 2025a)	2030-2025	HUMAIN و NVIDIA	10 مليار دولار	500 ميجاواط (جزء من 1900 ميجاواط بحلول عام 2030؛ 6600 ميجاواط بحلول عام 2034)	تشغيل أولي بقدرة 50 ميجاواط باستخدام 18000 وحدة معالجة رسومية من نوع NVIDIA GB300، وتوسع تدريجي إلى 500 ميجاواط باستخدام 180000 وحدة معالجة رسومية
مجمع نيوم-داتا فولت أوكساجون الأخضر للذكاء الاصطناعي (NEOM 2025)	2031-2025	NEOM و DataVolt	5 مليار دولار	1500 ميجاواط	مجمع ذكاء اصطناعي فائق التوسع ويحقق الحياد الصفري في أوكساجون، يعمل بالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وتخزين البطاريات في الموقع ونظام احتياطي للهيدروجين، بالإضافة إلى أنظمة تبريد متطورة
الاستدلال الهجين بين هيومين و Qualcomm (Qualcomm 2025)	2028-2026	HUMAIN و Qualcomm	2 مليار دولار	غير متوفر	منظومة للذكاء الاصطناعي هجينة تمتد من السحابة إلى الحافة، تركز على تنفيذ الاستدلال بكفاءة عالية في استهلاك الطاقة وزمن استجابة منخفض للأجهزة المحمولة والأنظمة المدمجة

الشكل 10. السعات الحالية (2024) والمخطط لها (2030) لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية



ملحوظة: تشمل السعة المخططة (1716 ميجاواط) المشروعات ذات المواقع المحددة فقط.
المصدر: المؤلفون.

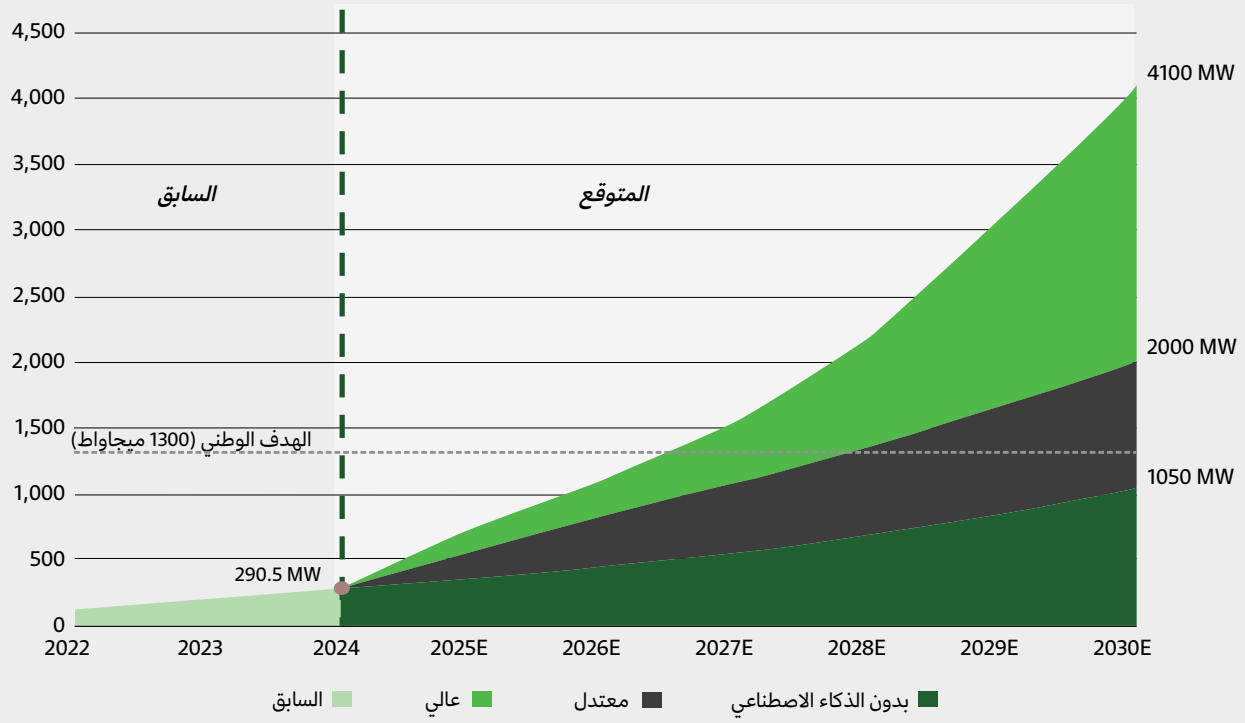
من المتوقع أن يكون لهذا التوسع آثار بالغة على البنية التحتية الرقمية وقطاع الطاقة في المملكة. وستفرض مجمعات الذكاء الاصطناعي الضخمة ضغطًا هائلاً على شبكة الكهرباء السعودية في السنوات القادمة. ويقدم الذكاء الاصطناعي نوعًا جديدًا من أحمال العمل، ألا وهو العمليات المستمرة التي تتطلب معالجة مكثفة لوحدات معالجة الرسومات (GPU)، التي تختلف عن أنشطة مراكز البيانات التقليدية. سيكون فهم الآثار المستقبلية لهذا التحول على استقرار الشبكة ومصادر الطاقة واستدامتها أمرًا بالغ الأهمية لتخطيط وتنسيق المرحلة التالية من نمو البنية التحتية.

2.4 توقعات الطلب

يتطلب فهم التأثير المستقبلي لمراكز البيانات تحليل حجم التوسع المحتمل في السعة والظروف التشغيلية للمرافق. على الرغم من الإعلان عن العديد من المشروعات، فإن تنفيذها النهائي وحجمها وسرعة نشرها لا تزال غير مؤكدة. لمراعاة هذه الضبابية، حُددت ثلاثة سيناريوهات لنمو إجمالي السعة المركبة بحلول عام 2030، كما هو موضح في الشكل (11):

- **السيناريو الأساسي:** يعكس هذا السيناريو استمرار الاتجاهات الحالية، حيث يكون النمو مدفوعًا بمراكز البيانات العامة، دون توسع كبير في المراكز المتعلقة بالذكاء الاصطناعي. ويعد هذا السيناريو نقطة مرجعية لنمو السعة في غياب تحول واسع النطاق نحو الذكاء الاصطناعي.
- **سيناريو النمو المعتدل:** ينظر هذا السيناريو في التوسع المؤكد الموجه نحو الذكاء الاصطناعي، الذي يتضمن مشروعات في مراحل الترخيص أو التنفيذ الأولي، استنادًا إلى تحليل مصادر بيانات متعددة. ويمثل هذا المسار مسارًا واقعيًا وقابلًا للتحقيق لنمو الذكاء الاصطناعي، حيث من المحتمل أن تصل السعة الإجمالية، بالإضافة إلى توسع مراكز البيانات العامة، إلى 2000 ميجاواط بحلول عام 2030.
- **سيناريو النمو المرتفع:** يمثل هذا السيناريو نموًا طموحًا تُنجز فيه جميع مشروعات الذكاء الاصطناعي الضخمة المعلن عنها بحلول عام 2030، مما يضيف قرابة 3050 ميجاواط من السعة الجديدة المحسنة للذكاء الاصطناعي. بالإضافة إلى تطوير مراكز البيانات العامة، سيصل إجمالي السعة المركبة إلى ما يقارب 4100 ميجاواط بحلول عام 2030. ورغم أن هذه المشروعات لا تزال قيد الإنشاء، فإنها تمثل الحد الأعلى للسعة المحتملة في نهاية العقد.

الشكل 11. القدرات المتوقعة لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية (ميجاواط) في ظل ثلاثة سيناريوهات نمو للفترة 2022-2030



ملحوظة: تعرض السعة التاريخية حتى عام 2024 (290.5 ميجاواط). يصل سيناريو عدم استخدام الذكاء الاصطناعي إلى 1050 ميجاواط بحلول عام 2030، بينما يصل النمو المعتدل إلى 2000 ميجاواط، ويصل النمو المرتفع إلى 4100 ميجاواط. يشير الخط الرمادي المتقطع إلى الهدف الوطني البالغ 1300 ميجاواط.
المصدر: المؤلفون.

الجدول 4. سيناريوهات نموذجية لنمو سعة مراكز البيانات والظروف التشغيلية في المملكة العربية السعودية حتى عام 2030

		تقليدي (مؤشر فعالية استخدام الطاقة 1.5-1.7، الانبعاثات كما هي)	مستدام (مؤشر كفاءة استخدام الطاقة 1.3-1.5، مزيج منخفض الكربون)
سيناريو النمو	نمو مرتفع (4100 ميجاواط بحلول عام 2030)	**السيناريو 1: نمو مرتفع، تقليدي** • توسع يعتمد على الذكاء الاصطناعي • استهلاك مرتفع للكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون كما هي	**السيناريو 2: نمو مرتفع، مستدام** • توسع في مجال الذكاء الاصطناعي الأخضر • تحسين الكفاءة بفضل أنظمة التبريد المتقدمة وتصميم الرقائق المتطورة • انخفاض استهلاك الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون
	نمو معتدل (2000 ميجاواط بحلول عام 2030)	**السيناريو 3: نمو معتدل، تقليدي** • توسع مطرد في مجال الذكاء الاصطناعي • تحسينات محدودة في الكفاءة • ارتفاع استهلاك الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون	**السيناريو 4: نمو معتدل، مستدام** • نمو متوازن في مجال الذكاء الاصطناعي • كفاءة محسنة بفضل أنظمة التبريد المتطورة وتحسين أداء الأجهزة • انخفاض استهلاك الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون

بينما تبين هذه السيناريوهات مدى إمكانية توسع سعة مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية بحلول عام 2030، فإن تأثيرها الأوسع يعتمد على كفاءة المرافق واستدامة إمدادات الطاقة. جرى تحديد حالتين تشغيليتين لاستكشاف هذه الديناميكيات:

- **الظروف التشغيلية التقليدية:** تحسينات الكفاءة محدودة، تقنيات التبريد المتقدمة بطيئة لا يمكن اعتمادها، ومعظم الكهرباء تأتي من مصادر الوقود الأحفوري، مما يؤدي عادةً إلى قيم أعلى لفعالية استخدام الكهرباء (PUE)[6].

- **الظروف التشغيلية المستدامة:** كفاءة تشغيلية عالية تتحقق من خلال التبريد المتقدم، وتقنيات التحسين، وممارسات إدارة الطاقة. نسبة كبيرة من الكهرباء تأتي من مصادر متجددة، مما يؤدي إلى انخفاض فعالية استخدام الكهرباء والانبعاثات.

ينتج الجمع بين سيناريوهات النمو المعتدل والعالي مع هذين الظرفين التشغيليين أربعة احتمالات، موضحة في الجدول (4). تقدم هذه السيناريوهات منظورًا فريدًا لتقييم الآثار طويلة المدى لنمو مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي على نظام الكهرباء وأهداف الاستدامة. ومن المهم الإشارة إلى أن هذه السيناريوهات ليست تنبؤات، بل هي تحليلات افتراضية مدروسة لاختبار مدى فعالية السياسات وخيارات الاستثمار.

مع توسع سعة مراكز البيانات، يعد تحويل الأحمال التقنية المثبتة إلى استهلاك للكهرباء أمرًا بالغ الأهمية لتقييم آثار ذلك على شبكة الكهرباء الوطنية. وتعد منهجية "من الأسفل إلى الأعلى" (Masanet, Lei, and Koomey 2024) الأكثر شيوعًا، حيث تحسب استهلاك الكهرباء بناءً على سحب الكهرباء من معدات تقنية المعلومات. وتوفر هذه المنهجية أدق التقديرات، لكنها تعتمد على بيانات فنية مفصلة، غالبًا ما تكون غير متاحة للمشروعات التي لا تزال في مراحل التخطيط. في مثل هذه الحالات، يمكن تقدير الطلب على الكهرباء من سعة تقنية المعلومات المعلنة (ميجاواط) وافتراضات حول كفاءة استخدام الكهرباء ومعدلات الاستخدام. وعلى الرغم من أنها أقل تفصيلًا، إلا أن هذه المنهجية تتيح وضع توقعات دقيقة للطلب المستقبلي.

واستنادًا إلى هذا الإطار، استهلكت مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية ما يقدر بـ 2.8 تيراواط في الساعة في عام 2024، ما يمثل نحو 0.85% من إجمالي استهلاك الكهرباء في المملكة في ذلك العام[7]. وبحلول عام 2030، من المتوقع أن يزداد استهلاك الكهرباء من مراكز البيانات بشكل كبير، حيث تتراوح التقديرات بين 10.16 تيراواط في الساعة و42.23 تيراواط في الساعة سنويًا. يعكس هذا التباين الاختلافات في توسع السعات وتطبيق ممارسات الكفاءة.

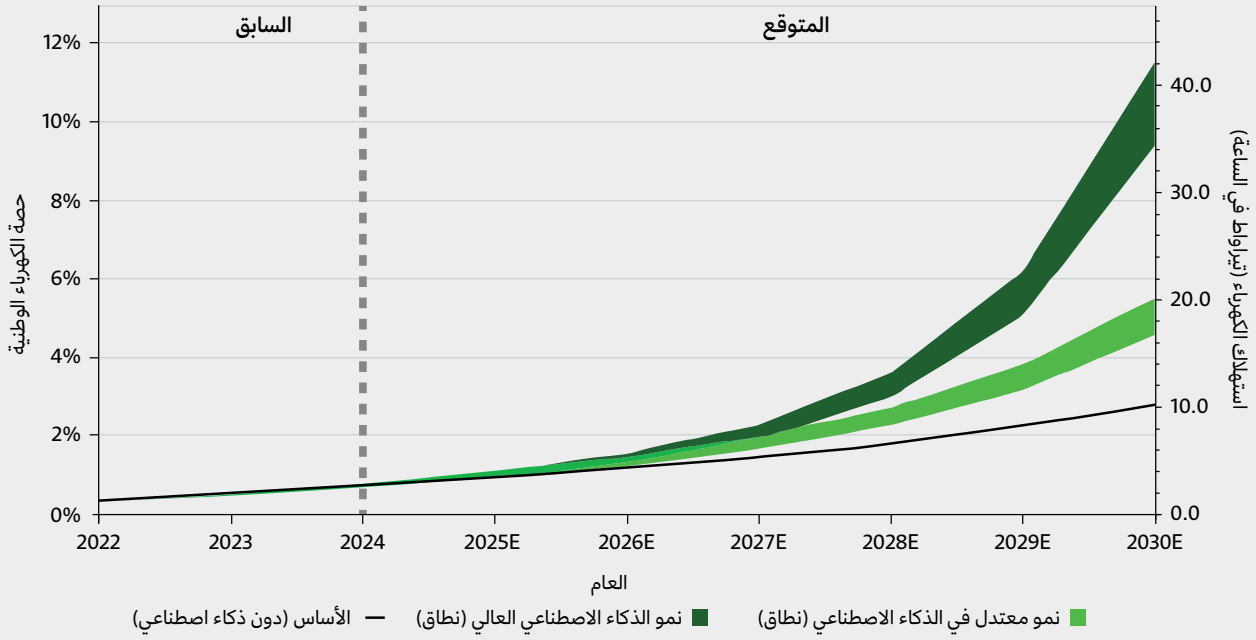
يوضح الشكل 12 أنه في ظل سيناريو النمو الأساسي، حيث يقتصر التوسع على المرافق العامة، قد يصل الاستهلاك السنوي إلى 10.16 تيراواط في الساعة، أي ما يعادل 2.79% من الطلب الوطني، مما يعكس نموًا ثابتًا يمكن التحكم فيه. ويؤدي إدخال المرافق المدعومة بالذكاء الاصطناعي إلى زيادة الطلب زيادة ملحوظة. في ظل سيناريو النمو المعتدل، قد يصل الطلب السنوي المتوقع على الكهرباء إلى 20.15 تيراواط في الساعة

[6] PUE: مقياس لمراكز البيانات يقيس كفاءة الطاقة المستخدمة بواسطة معدات تقنية المعلومات.

[7] بافتراض أن PUE هو 1.7، ومعدل الاستخدام هو 0.65، وأن إجمالي استهلاك المملكة العربية السعودية من الكهرباء في عام 2024 هو 333 تيراواط في الساعة.

بحلول عام 2030. ومع ذلك، يمكن خفض هذا الرقم إلى 17.62 تيراواط في الساعة، أي بنسبة 13%، من خلال استخدام أنظمة تبريد متطورة وممارسات تصميم محسنة. أما سيناريو النمو المرتفع فيؤدي إلى أكبر زيادة، حيث يرتفع الطلب على الكهرباء إلى 42.23 تيراواط في الساعة سنويًا، أي ما يعادل 11.55% من الطلب الوطني المتوقع على الكهرباء. ويمكن خفض هذا الرقم إلى 36.76 تيراواط في الساعة، أي بنسبة 13%، من خلال تطبيق معايير الكفاءة.

الشكل 12. الطلب التاريخي والمتوقع على الكهرباء من مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية، 2022-2030



ملحوظة: يظهر المحور الأيسر نسبة الطلب الوطني على الكهرباء، بينما يظهر المحور الأيمن الاستهلاك المطلق بالجيجاواط في الساعة. وتتوافق الحدود الاعلى للنطاقات المظللة مع ممارسات التشغيل التقليدية، بينما تعكس الحدود الادنى ظروف التشغيل المستدامة، والتفاصيل في الملحق (ب).
المصدر: المؤلفون.

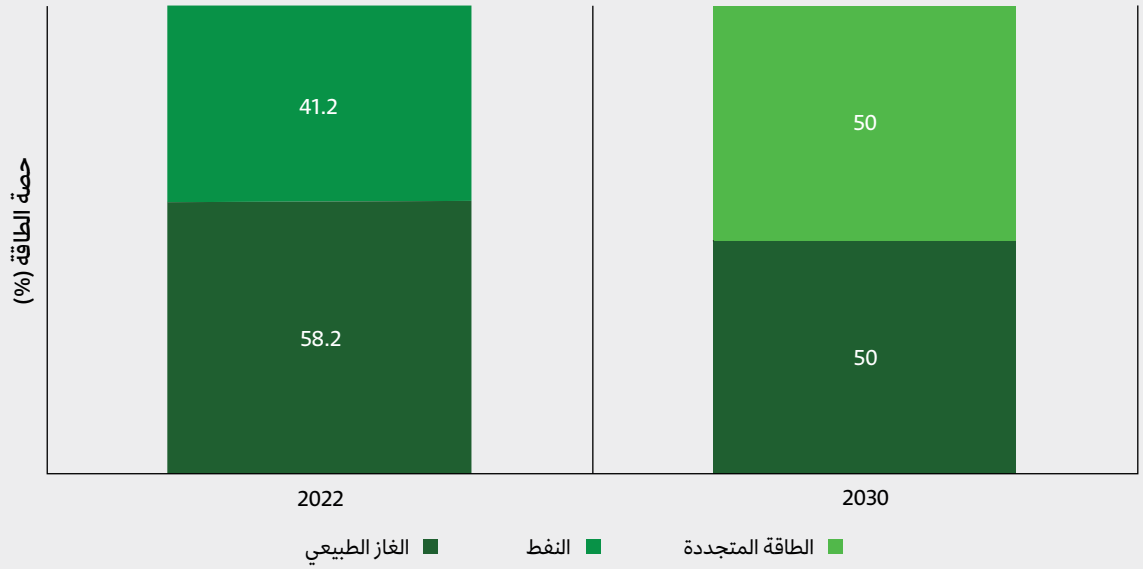
في جميع السيناريوهات، سيرتفع الطلب على الكهرباء من مراكز البيانات خلال العقد القادم. سيعتمد حجم هذه الزيادة على نطاق المشروعات الموجهة نحو الذكاء الاصطناعي ومستوى كفاءة تصميم وتشغيل المرافق. وبغض النظر عن مسار النمو، فإن تبني الممارسات المستدامة يمكن أن يقلل استهلاك الطاقة بنسبة 13% مقارنةً بالأساليب التقليدية.

3.4 توقعات الانبعاثات

يعد استهلاك الكهرباء المحرك الرئيس للبصمة الكربونية لمراكز البيانات، إذ تتحدد كثافة انبعاثات الكربون بتكوين مزيج الطاقة. في المملكة العربية السعودية، حيث يعد النفط والغاز الطبيعي من مصادر الطاقة المهمة، يُعالج هذا التحدي من خلال الالتزام بتحقيق الحياد الصفري في الانبعاثات بحلول عام 2060 بما يتماشى مع اتفاقية باريس ورؤية السعودية 2030(SGI 2025). ويتعزز هذا الطموح من خلال المبادرة الخضراء للسعودية والشرق الأوسط (2025) ومساهمة وطنية محدثة تتعهد بخفض الانبعاثات السنوية بمقدار 278 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2030 (Saudi & Middle East Green Initiatives 2025). يعد البرنامج الوطني للطاقة المتجددة ركيزة أساسية لهذه الإستراتيجية، إذ يهدف إلى رفع حصة الطاقة المتجددة إلى 50% من مزيج الطاقة بحلول عام 2030 (Saudi & Middle East Green Initiatives 2025).

في هذه الدراسة، قُدّرت الانبعاثات وفقًا لسيناريوهين: السيناريو التقليدي الذي يعتمد على مزيج الوقود الأحفوري (41.2% نفط و58.2% غاز طبيعي)، والسيناريو الوطني المستهدف المستدام (50% طاقة متجددة و50% غاز طبيعي)، كما هو موضح في الشكل (13). ولتبسيط الأمر، نفترض تطابق مزيج السعة الإنتاجية مع مزيج توليد الكهرباء. ويتوافق مزيج 50/50 مع التوقعات العالمية، إذ يتوقع تلبية ما يقارب نصف الطلب على الكهرباء من مراكز البيانات من مصادر طاقة متجددة (Spencer et al. 2025).

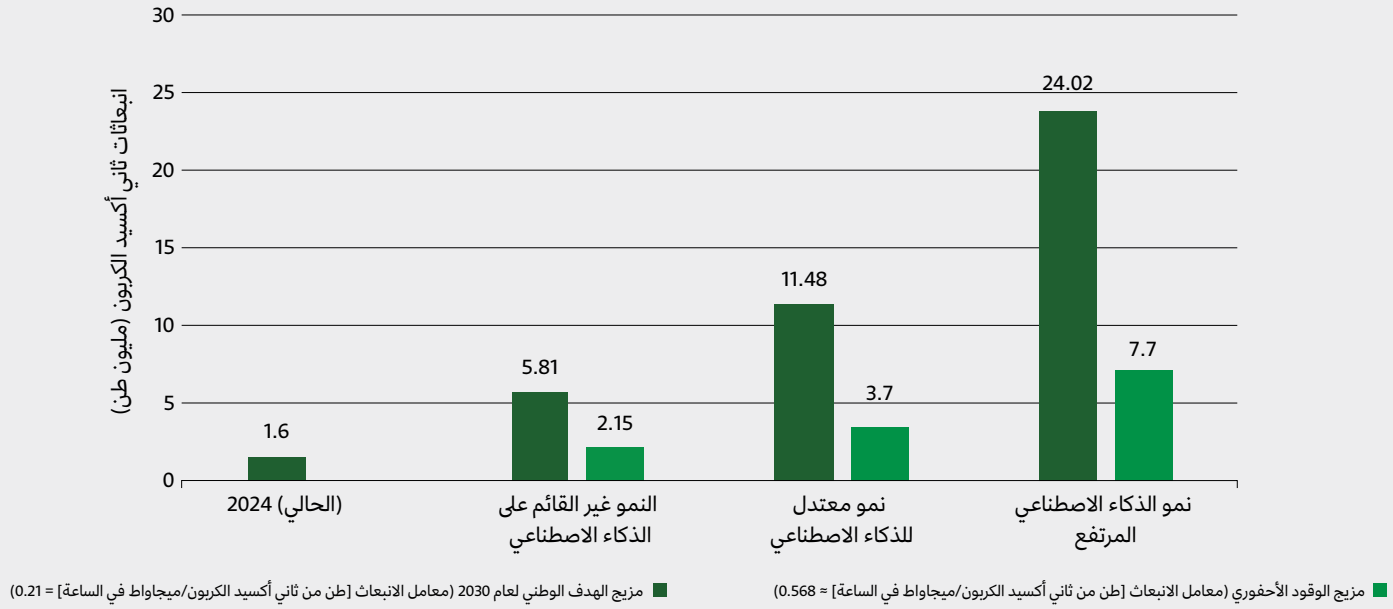
الشكل 13. مزيج الطاقة في المملكة العربية السعودية عام 2022 مقارنةً بالهدف الوطني لعام 2030



المصدر: المؤلفون.

ينتج عن الكهرباء المستخدمة في مراكز البيانات الحالية، في عام 2024، ما يقارب 1.6 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا مع استخدام مزيج الوقود الأحفوري. إذا سار النمو على المسار التقليدي دون الاعتماد على الذكاء الاصطناعي، فقد يرتفع هذا الرقم إلى 5.81 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2030، بينما قد يؤدي سيناريو النمو المعتدل المدعوم بالذكاء الاصطناعي إلى زيادة الانبعاثات إلى 11.48 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون. أما في سيناريو النمو المرتفع، فقد تصل الانبعاثات السنوية إلى 24.02 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون. مع ذلك، فإن التحول إلى مزيج الطاقة المستهدف هذا سيقلل الانبعاثات بنسبة 68% تقريبًا في جميع السيناريوهات، كما هو موضح في الشكل (14). على سبيل المثال، سيؤدي سيناريو النمو المعتدل للذكاء الاصطناعي إلى انبعاث 3.7 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون بدلًا من 11.48 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون ، بينما سينخفض سيناريو النمو المرتفع للذكاء الاصطناعي من 24.02 مليون طن إلى 7.7 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون. تبرز هذه التخفيضات دور تكامل مصادر الطاقة المتجددة في التخفيف من أثر التوسع في البنية التحتية الرقمية على المناخ.

الشكل 14. انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من مراكز البيانات حسب السيناريوهات (مليون طن)



المصدر: المؤلفون.

بالإضافة إلى تقدير إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من مراكز البيانات، من المفيد تتبع كثافة الكربون عبر مؤشر فعالية استخدام الكربون (CUE). يقيس مؤشر فعالية استخدام الكربون كثافة الانبعاثات لكل ميجاواط في الساعة الموصلة إلى معدات تقنية المعلومات (طن من ثاني أكسيد الكربون لكل ميجاواط في الساعة-معدات تقنية المعلومات)، حيث يشير الصفر في المؤشر إلى طاقة متجددة بالكامل أو كهرباء خالية من الكربون. لا يتأثر مؤشر فعالية استخدام الكربون بحجم الحمل، مما يسمح بفصل واضح بين مدى نظافة العمليات وحجم الحمل.

في العمليات التقليدية ذات مؤشر فعالية استخدام الطاقة من 1.5 إلى 1.7 باستخدام مزيج من الوقود الأحفوري يكون مؤشر فعالية استخدام الكربون يتراوح بين 0.85 و0.97 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل ميجاواط في الساعة-معدات تقنيات المعلومات، بينما تُنتج العمليات المستدامة ذات مؤشر فعالية استخدام الطاقة من 1.3 إلى 1.5 لشبكة عام 2030 مؤشر فعالية استخدام الكربون يتراوح بين 0.27 و0.32 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل ميجاواط في الساعة لمعدات تقنيات المعلومات. وهذا يمثل انخفاضًا في كثافة الانبعاثات بمقدار ثلاثة أضعاف تقريبًا. يشير مؤشر فعالية استخدام الكربون إلى أن خفض انبعاثات الكربون في مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي يعتمد أساسًا على كفاءة المنشأة (انخفاض مؤشر كفاءة استخدام الطاقة) وكثافة الكربون في مصدر الطاقة. وتؤدي مسارات النمو السريع إلى زيادة الانبعاثات المطلقة ما لم تقترن بعمليات تنخفض فيها فعالية استخدام الكربون، وهو ما يفسر الانخفاض بنسبة 68% في إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عند تطبيق مزيج الطاقة الأنظف لعام 2030.

4.4 العوامل الممكنة الرئيسة

يدعم نمو مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية إستراتيجية وطنية قوية، ولوائح تنظيمية متقدمة، وموقع جغرافي إستراتيجي، واستثمارات مدعومة من الدولة. ويتميز نظام الطاقة بانخفاض تكلفته النسبية، وموثوقيته، وأهدافه الطموحة في مجال الاستدامة. وتهيئ هذه العوامل الممكنة، إلى جانب أجندة التحول الرقمي للمملكة، بيئة تتيح تطوير البنية التحتية للذكاء الاصطناعي على نحو تنافسي ومستدام. وسنتناول في ما يلي بعض العوامل الممكنة.

الإستراتيجيات الوطنية

تعطي رؤية 2030 الأولوية للتحول الرقمي والذكاء الاصطناعي باعتبارهما عنصرين أساسيين للتنويع الاقتصادي. ومن بين 96 هدفًا للرؤية، يرتبط 66 هدفًا بنحو مباشر أو غير مباشر بالبيانات والذكاء الاصطناعي (SDAIA 2025b). تهدف الإستراتيجية الوطنية للبيانات والذكاء الاصطناعي، التي وضعتها الهيئة السعودية للذكاء الاصطناعي (SDAIA)، إلى وضع المملكة العربية السعودية ضمن أفضل 15 دولة في مجال جاهزية الذكاء الاصطناعي، وجذب استثمارات بقيمة 75 مليار ريال سعودي بحلول عام 2030 (SDAIA 2025a). وفي هذا السياق، نشرت الهيئة الوطنية للأمن السيبراني الإستراتيجية الوطنية للأمن السيبراني (NCA 2018) في عام

2020 لإنشاء بيئة سيبرانية آمنة وموثوقة للبنية التحتية الرقمية. وتتمتع المملكة العربية السعودية أيضًا بأقل تكلفة معدلة في العالم لطاقة الرياح والطاقة الشمسية، إلى جانب أهدافها المتمثلة في الوصول إلى 50% من الطاقة المتجددة، وأهدافها الطموحة في مجال الاستدامة. وهناك تكامل واضح بين سياسات الطاقة والسياسات المتعلقة بالذكاء الاصطناعي، بما يدعم قدرة المملكة على المنافسة في استضافة وتشغيل مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي.

البيئة القانونية والتنظيمية

طورت المملكة العربية السعودية إطارًا قانونيًا شاملًا ومنسقًا لتقنية المعلومات والاتصالات، وحوكمة البيانات، والخدمات السحابية، والاستدامة، وكفاءة الطاقة، ويُنفذ من خلال عدة مؤسسات. تشمل اللوائح الرئيسة قانون الاتصالات وتقنية المعلومات (Bureau of Experts of the Council of Ministers 2022)، وقانون حماية البيانات الشخصية (Bureau of Experts of the Council of Ministers 2021)، وسياسة "الحوسبة السحابية أولًا" (MCIT 2020)، التي تنظم مجتمعةً معالجة البيانات، وعمليات الحوسبة السحابية، وتطوير مراكز البيانات. وتعزز لوائح خدمات مراكز البيانات (CST 2023, 2024b) هذا الإطار من خلال إلزام المشغلين المرخصين بإعداد خطط استدامة تركز على كفاءة الطاقة، وخفض انبعاثات الكربون، وإدارة النفايات الإلكترونية، مع تشجيع حلول الطاقة والتبريد الصديقة للبيئة. إضافةً إلى ذلك، يعد مركز الذكاء الاصطناعي العالمي لكل موقع إلكتروني في القانون المرجعي (Istitlaa 2025) خطوةً مهمة نحو تسهيل اعتماد الذكاء الاصطناعي عبر الحدود من خلال الموثوقية القانونية والمرونة التشغيلية. ويحدد ثلاث فئات لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي: المراكز الخاصة، والمراكز الموسعة، والمراكز الافتراضية، بما يتيح لمزودي الخدمات الدوليين بالعمل في المملكة العربية السعودية وفقًا لترتيبات تنظيمية تتوافق مع قوانين بلدانهم.

الموقع الإستراتيجي، والبنية التحتية الرقمية، والاتصال

يمنح الموقع الجغرافي للمملكة العربية السعودية، عند ملتقى آسيا وأوروبا وإفريقيا، مزايا إستراتيجية لتدفق البيانات على المستويين الإقليمي والعابر للقارات. وترتبط المملكة بشبكة الإنترنت العالمية عبر 16 نظامًا نشطًا للكابلات البحرية الممتدة عبر البحر الأحمر والخليج العربي، مما يوفر نقاط إنزال متعددة في خمس مدن ساحلية (MCIT 2024). وعلى الصعيد المحلي، ساهمت البنية التحتية للألياف الضوئية وشبكات الجيل الخامس، التي تغطي نحو 65% من السكان بحلول عام 2024، في تحسين الاتصال الداخلي، ودعم الحوسبة المتطورة وغيرها من التطبيقات الحساسة للتأخير (MCIT 2024). وتشكل عناصر البنية التحتية هذه مجتمعةً أساسًا تقنيًا قادرًا على دعم مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي المحسنة ذات الأداء الموثوق.

ميزة الطاقة وجاهزية الشبكة

تتمتع المملكة العربية السعودية بميزة فريدة في مجال الطاقة لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، تتميز بانخفاض أسعار الكهرباء، وشبكة كهربائية متنامية، وحصة متزايدة من مصادر الطاقة المتجددة. وتصل تعريفات الكهرباء للحوسبة السحابية إلى 18 هللة لكل كيلوواط في الساعة (قرابة 0.048 دولار لكل كيلوواط في الساعة)، بينما تبلغ التعريفات الصناعية 20 هللة لكل كيلوواط في الساعة (نحو 0.053 دولار لكل كيلوواط في الساعة) (SERA 2025). وتندرج مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي عادةً ضمن فئات التعريفات هذه، [8] مما يسمح للمشغلين بتحقيق تكلفة ملكية إجمالية أقل بنسبة تصل إلى 30% مقارنةً بالأسواق الدولية المماثلة (Techusiness 2025). تشهد شبكة الكهرباء الوطنية توسعًا سريعًا، حيث من المتوقع أن يرتفع طول خطوط النقل من 96,496 كيلومترًا في عام 2024 إلى 160,000 كيلومتر بحلول عام 2030، وأن يرتفع عدد المحطات الفرعية من 1,235 إلى 1,650 محطة (SEC 2025).

تدعم هذه التطورات بالاستثمار المستمر في سعة تخزين البطاريات (بهدف الوصول إلى 48,000 ميجاواط في الساعة) ومشروعات تحديث الشبكة لتعزيز الكفاءة الحرارية ودعم أنظمة احتجاز الكربون المستقبلية (SPA 2024). بالإضافة إلى ذلك، يوفر الإشعاع الشمسي العالي في المملكة وقدرة طاقة الرياح المتنامية إمكانات كبيرة لدمج الطاقة النظيفة. وتعمل المملكة العربية السعودية بنشاط على زيادة قدرتها على توليد الطاقة المتجددة إلى 130,000 ميجاواط بحلول عام 2030، حيث طُرحت مناقصات لمشروعات بقدرة 44,000 ميجاواط، وإضافة 20,000 ميجاواط في عام 2023 (KAPSARC 2025). وقد وضعت المملكة معايير عالمية لتكاليف الطاقة المتجددة، ويتضح ذلك في مشروع الشعيبة للطاقة الشمسية لعام 2024 (Techusiness 2025)، الذي حقق أحد أدنى تكاليف توليد الكهرباء في العالم عند 0.0104 دولار أمريكي لكل كيلوواط في الساعة (Bellini 2021). تحسن هذه التطورات من إمكانية تحقيق استقرار الأسعار على المدى الطويل وخفض انبعاثات الكربون في البنية التحتية للذكاء الاصطناعي كثيفة الاستهلاك للطاقة.

رأس المال الحكومي والتعاون الدولي

يُعزى توسع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة إلى رأس المال المدعوم حكوميًا، والاستثمارات السيادية، والشراكات الدولية الإستراتيجية. ويلعب صندوق الاستثمارات العامة دورًا محوريًا من خلال الاستثمار في مشروع "هيوماين" وغيره من مشروعات البنية التحتية الوطنية للذكاء الاصطناعي. إضافةً إلى ذلك، تسهم الشراكات الإستراتيجية مع رواد التقنية العالميين، مثل NVIDIA وAMD وAWS، في تعزيز القدرات الحاسوبية ونقل التقنية. وتدعم الحكومة هذه المبادرات من خلال عروض جذابة في مجال الطاقة والاستدامة، وتخصيص الأراضي، ودعم البنية التحتية، بهدف استقطاب المستثمرين على المدى الطويل وتسريع وتيرة الاعتماد.

[8] PUE: مقياس لمراكز البيانات يقيس كفاءة الطاقة المستخدمة بواسطة معدات تقنية المعلومات.

4.5 العوامل المؤثرة في التوقعات

سيعتمد الطلب على الكهرباء من مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي حتى عام 2030 على عدة عوامل متداخلة. أهمها نطاق تبني الذكاء الاصطناعي، والتقدم في الأجهزة، وتحسينات البنية التحتية والبرمجيات، وعلى المدى البعيد، نماذج الحوسبة الجديدة. وستحدد هذه العوامل ما إذا كان استهلاك الطاقة سيرتفع ارتفاعًا حادًا أم يمكن موازنته من خلال تحسين الكفاءة. سيشكل نطاق تبني الذكاء الاصطناعي في القطاعات الحكومية والتجارية والمجتمعية محركًا رئيسًا للطلب المستقبلي على الكهرباء في مراكز البيانات. ومع ازدياد استخدام الذكاء الاصطناعي في قطاعات رئيسة، سترتفع الحاجة إلى قدرات حاسوبية فائقة. وسيعتمد استهلاك الطاقة على مدى تعقيد المهام. فالمهام شديدة التعقيد تتطلب طاقة أكبر نظرًا لطول فترات السياق، وعمق سلاسل الاستدلال، وزيادة توليد الرموز. على سبيل المثال، قد يستهلك استعلام بسيط لروبوت محادثة ما يقارب 1.55 واط في الساعة، بينما يتطلب استعلام توليد معزز بالاسترجاع نحو 2.64 واط في الساعة، ويتطلب سير عمل آلي 8.54 واط في الساعة في المتوسط (Desroches et al. 2025).

ستؤدي تحسينات الكفاءة دورًا محوريًا في تحديد الطلب المستقبلي على الطاقة لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. وتشهد هذه التحسينات تطورات على مستويات متعددة:

- **الأجهزة:** توفر الأجيال الجديدة من المعالجات قدرة حاسوبية أكبر بكثير لكل وحدة كهرباء مستهلكة. وتتميز الرقائق المتخصصة المصممة للذكاء الاصطناعي، مثل وحدات معالجة الرسومات (GPUs) ووحدات معالجة المصفوفات (TPUs)، بكفاءة أعلى بكثير من معالجات وحدة المعالجة المركزية التقليدية (CPU). ويزداد كل جيل قوةً مع توسع قدراته. فعلى سبيل المثال، توفر وحدة معالجة الرسومات Blackwell B200 من NVIDIA كفاءة طاقة أفضل من سابقاتها.

- **البنية التحتية:** تعمل مراكز البيانات على تحسين استخدام الكهرباء من خلال أنظمة تبريد أفضل وتصاميم أكثر ابتكارًا. ورغم التقدم الكبير المحرز، يتوقع أن تحقق التحسينات المستقبلية مزيدًا من المكاسب.

- **البرمجيات:** تساعد الخوارزميات الأكثر ذكاءً في تقليل حجم الحوسبة اللازمة لمهام الذكاء الاصطناعي المعقدة، بما يقلل من استهلاك الطاقة مع الحفاظ على الأداء العالي. فعلى سبيل المثال، قلل DeepSeek-R1 من استهلاك الطاقة باستخدام تقنيات تصميم أكثر ذكاءً، مثل تفعيل الأجزاء الضرورية فقط من النموذج، وإجراء العمليات الحسابية بدقة أقل، وموازنة العمل على الأجهزة، مما أدى إلى مكاسب ملحوظة في الكفاءة.

- **نماذج حوسبة جديدة:** بالنظر إلى المستقبل، تتيح التقنيات الناشئة، مثل الحوسبة الكمّية والحوسبة العصبية، إمكانات واعدة لرفع كفاءة الطاقة في تطبيقات محددة للذكاء الاصطناعي. ورغم أن أثرها التجاري ما يزال غير معلوم، فإن هذه التقنيات قد تغير جذريًا مشهد الطاقة في مجال الذكاء الاصطناعي.

- **إدارة استجابة الطلب:** يمكن أن تؤثر مشاركة مراكز البيانات في برامج استجابة الطلب تأثيرًا كبيرًا في استهلاكها للكهرباء. فمن خلال تعديل أحمال الحوسبة غير الحرجة خلال فترات ارتفاع أحمال النظام أو تقلبات الأسعار، يمكن للمشغلين خفض ذروة الاستهلاك دون المساس بموثوقية الخدمة. ومعلوم أن التوسع في استخدام جدولة أحمال العمل الآلية وآليات التسعير الفوري من شأنه أن يخفف من حدة الطلب، ويقلل الضغط على الشبكة، ويخفض بشكلٍ طفيف إجمالي استهلاك الكهرباء السنوي.

في نهاية المطاف، فإن مكاسب الكفاءة، وإن كانت تخفض الطاقة اللازمة لكمية محددة من الحوسبة، فإنها تخفض كذلك تكلفة الحوسبة نفسها. وقد يؤدي ذلك إلى ما يعرف في مجال كفاءة الطاقة بتأثير الارتداد (أو مفارقة جيفونز)، حيث تؤدي الكفاءة المحسنة إلى خفض التكاليف، ومن ثم تحفيز زيادة الطلب واتساع اعتماد تطبيقات الذكاء الاصطناعي. ونتيجة لذلك، قد يستمر إجمالي استهلاك الطاقة في الارتفاع حتى مع ازدياد كفاءة الأنظمة الفردية.

05

تحليل تكاليف مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية

يقدم هذا القسم تحليلًا معمقًا للتكاليف لدعم تقييم نمو الطلب على مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية. ويتناول العوامل الرئيسة المؤثرة في التكاليف، بما فيها أسعار الكهرباء، وكفاءة الطاقة والحوسبة، وغيرها من المعايير التشغيلية التي تحدد القدرة التنافسية. ويبين التحليل إطار النمذجة المستخدم لتقدير تكاليف مراكز البيانات، ثم يطبقه على دراسة حالة تفصيلية لظروف السوق في المملكة العربية السعودية.

1.5 حساب تكاليف مشروعات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي

تتطلب أحمال عمل الذكاء الاصطناعي قدرة حاسوبية كبيرة ومستمرة، مما يجعل تطوير مراكز البيانات عملية مكلفة من الناحية الرأسمالية ومعقدة من الناحية التشغيلية. ولتقييم ما إذا كان توسيع القدرة يضيف قيمة، يحتاج المستثمرون وصناع السياسات إلى فهم واضح للجوانب الاقتصادية لدورة حياة بناء وتشغيل البنية التحتية للذكاء الاصطناعي. ويمكن تحقيق ذلك من خلال إطار تحليل التكلفة المستوية، وهو أسلوب معتمد لحساب التكاليف على مدار عمر المشروع. يحدد هذا الإطار الحد الأدنى للسعر الذي يجب أن تعمل به خدمات الحوسبة لاسترداد النفقات الرأسمالية والتشغيلية، ومن ثم تقييم جدوى المشروع بوجه عام. وتُقيم تكلفة التعادل لكل وحدة حوسبة على مدار عمر المنشأة، مما يسمح بتحليل حساسية العوامل الرئيسة مثل سعر الكهرباء، ومؤشر فعالية استخدام الطاقة، ومعامل الحمل.

ثمة حاجة إلى مقياس أداء اقتصادي قابل للقياس لتقييم بنية مراكز البيانات المخصصة لأحمال عمل الذكاء الاصطناعي (Kristiansen Nøland, Hjelmeland, and Korpås 2024). في هذا التحليل، نقدر متوسط تكلفة كل وحدة حوسبة على مدار العمر التشغيلي للمنشأة. يتضمن ذلك جمع جميع تكاليف الإنشاء والمعدات والكهرباء والصيانة على مدار الوقت، ثم تقسيمها على إجمالي إنتاج الحوسبة. وتظهر النتائج الحد الأدنى للسعر الذي يجب فرضه لكل وحدة من طاقة الحوسبة لكي يحقق المركز نقطة التعادل خلال عمره الافتراضي. ويتبع هذا منطق التكلفة المستوية للطاقة، الذي يقارن المشروعات بقياس تكاليفها على مدار عمرها الافتراضي لكل وحدة إنتاج. يوفر تطبيق هذا المنطق على مراكز البيانات وسيلة متسقة لتقييم الجدوى الاقتصادية طويلة المدى في ظل ظروف تشغيلية وظروف أسواق مختلفة. في هذه الحالة، يقيس التحليل تكلفة وحدة الحوسبة، التي تُقاس عادةً بالدولار لكل عملية حسابية ذات فاصلة متحركة (FLOP/$)، وغالبًا ما تقاس بالدولار لكل عملية حسابية ذات فاصلة متحركة (PFLOP/$) أو الدولار لكل عملية حسابية ذات فاصلة متحركة فائقة (EFLOP/$) نظرًا لحجم إنتاج الحوسبة الكبير[10].

تؤثر عدة عوامل في تكلفة مشروعات مراكز البيانات: مؤشر فعالية استخدام الطاقة، ومعامل الحمل، وكفاءة الحوسبة، والنفقات الرأسمالية (CAPEX)، والنفقات التشغيلية (OPEX)، ومتوسط التكلفة المرجح لرأس المال (WACC). يقدم الجدول 5 نظرة عامة على كل عامل.

[10] وحدة FLOP هي عملية حسابية واحدة للفاصلة المتحركة، وتُستخدم مقياسًا للأداء الحسابي. تمثل FLOP إجمالي عدد عمليات الفاصلة المتحركة التي تُنفذ لإكمال مهمة أو برنامج معين. يُستخدم عدد عمليات FLOP التي يستطيع نظام أو معالج -مثل وحدة المعالجة المركزية أو وحدة معالجة الرسومات أو حاسوب فائق- تنفيذها في الثانية الواحدة بصفتها مقياسًا للأداء الحسابي. بيتا فلوب (petaFLOP) = 10^{15} FLOPs. إكسا فلوب exaFLOP) = 10^{18} FLOPs)

الجدول 5. العوامل المؤثرة في متوسط تكاليف مشروع مركز البيانات على مدار عمره الافتراضي

المعامل	التعريف	الأهمية بالنسبة لمراكز البيانات	القيمة المثالية	أفضل قيمة مسجلة
مؤشر فعالية استخدام الطاقة	نسبة إجمالي الطاقة التي يستهلكها مركز البيانات إلى الطاقة التي تستهلكها معدات تقنية المعلومات فقط	يقيس كفاءة الطاقة الإجمالية	1، إذ يذهب كامل استهلاك الطاقة إلى معدات تقنية المعلومات	1.028، لدى المختبر الوطني للطاقة المتجددة (NREL) (Van Zandt 2023)
معامل الحمل	نسبة متوسط حمل تقنية المعلومات إلى ذروة الحمل في مركز البيانات خلال فترة زمنية محددة	يدل على الكفاءة التشغيلية والاستخدام الأمثل للموارد	%100	~%90
كفاءة الحوسبة	عدد وحدات PFLOPs/كيلوواط	كفاءة أجهزة الذكاء الاصطناعي	-	~7.71 PFLOP/كيلوواط بواسطة شريحة بلاكويل ألترا من إنفيديا (2025)
سعر الكهرباء	سعر وحدة الكهرباء	يحدد تكاليف التشغيل المستمرة	-	-
النفقات التشغيلية	المصاريف التشغيلية والصيانة السنوية بصفتها نسبة مئوية من النفقات الرأسمالية	يمثل التكاليف المتكررة أثناء التشغيل	-	-
النفقات الرأسمالية	تكلفة البناء الليلي	الاستثمار الأولي المطلوب	-	-
متوسط تكلفة رأس المال المرجح	متوسط التكلفة المرجح لرأس المال	يعكس تكلفة التمويل وتوقعات عائد المستثمر	-	-

2.5 النتائج الأساسية وتحليل الحساسية

لتقييم تكلفة مشروع مركز البيانات في المملكة العربية السعودية، يحدد التحليل قيمًا افتراضية لكل عامل. يلخص الجدول 6 هذه القيم، مع تبرير كل اختيار. تجدر الإشارة إلى أن بعض القيم تغيرت في تحليلات الحساسية اللاحقة لاستكشاف رؤى السياسات، وتقييم الحساسية للعوامل الرئيسة، واستكشاف المفاضلات.

الجدول 6. القيم الافتراضية المستخدمة في دراسة الحالة

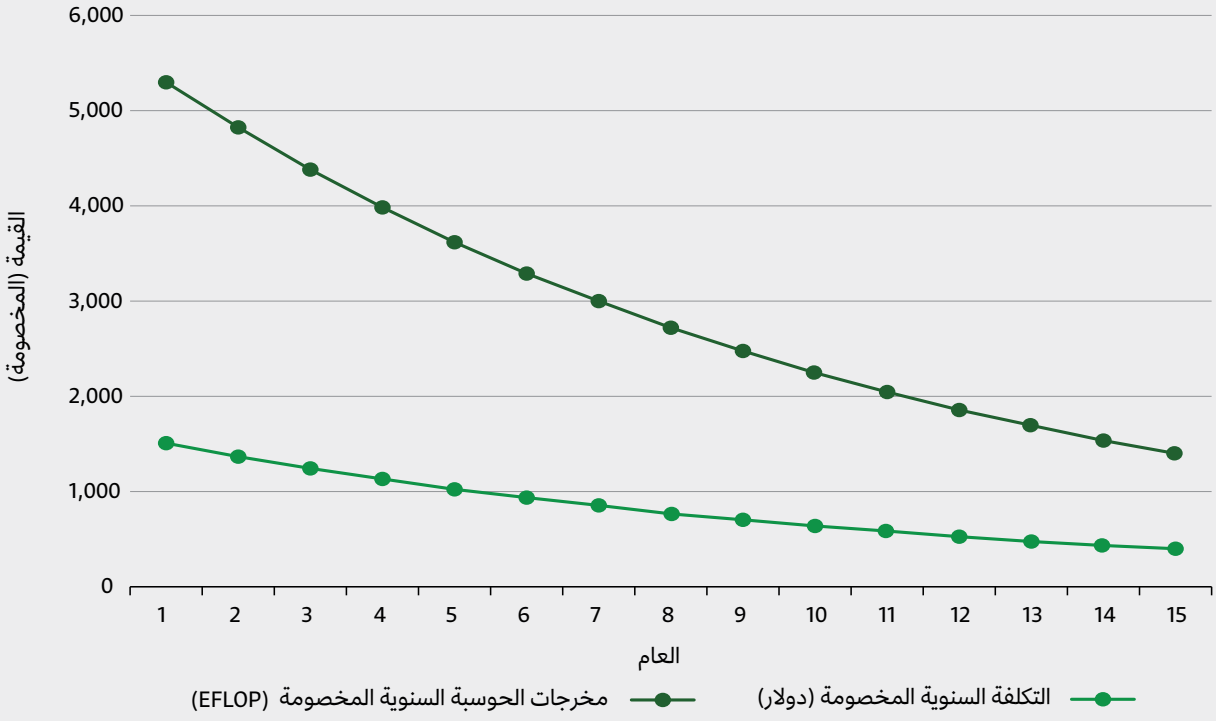
المعامل	القيمة الافتراضية	التبرير
مؤشر فعالية استخدام الطاقة	1.5	متوسط مراكز البيانات الحالية في المملكة العربية السعودية (يتراوح بين 1.5 و1.8) [11]
معامل الحمل	%80	افتراض توضيحي متوسط المدى للمرافق الموجهة نحو الذكاء الاصطناعي (70% - 90% نموذجي، على الرغم من أن الاستخدام الفعلي قد يختلف) (Aterio 2025)
كفاءة الحوسبة	0.21 بيتا فلوب/كيلوواط	القيمة الوسيطة لأجهزة الذكاء الاصطناعي (الجدول 7)
سعر الكهرباء	48 دولارًا/ميجاواط في الساعة	يعادل التعريفة الرسمية للحوسبة السحابية 18 هللة/كيلوواط في الساعة (SERA 2025)*
النفقات الرأسمالية	10000 دولار/كيلوواط	الافتراض الأساسي للدراسة (Kristiansen Nølan, Hjelmeland, and Korpås 2024)، ويشبه مركز بيانات الذكاء الاصطناعي فائق النطاق المخطط له من Equinix (Malik 2025)
متوسط تكلفة رأس المال المرجح	%10	الافتراض الأساسي المستخدم في الدراسة (Kristiansen Nøland, Hjelmeland, and Korpås 2024). من الممكن خفض تكاليف التمويل في ظل الظروف المحلية
تكلفة التشغيل والصيانة السنوية [12]	%10 من النفقات الرأسمالية	
عمر المشروع	15 سنة	

*لم تحدد بعد التعريفة الدقيقة التي ستفرض على مراكز البيانات في المملكة. ومع ذلك نستخدم هذه التعريفة على أنها فرضية لأنها متاحة للعامة.
ملحوظة: تعتمد الحالة الأساسية على معايير تمثيلية مستندة إلى الدراسات السابقة حول عمليات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية. هذه القيم استرشادية وتهدف إلى توضيح حساسية التكاليف، وليست للتنبؤ بنتائج محددة للمشروع. قد يختلف أداء المشروع الفعلي تبعًا لحجم المنشأة، واختيار التقنية، وظروف التمويل، والإستراتيجية التشغيلية.

[11] (S&P Global data).

[12] تكلفة التشغيل والصيانة السنوية: تكلفة التشغيل والصيانة السنوية (OPEX) من إجمالي النفقات الرأسمالية (CAPEX).

الشكل 15. التكلفة السنوية المخصومة ومخرجات الحوسبة بمرور الوقت



المصدر: المؤلفون.

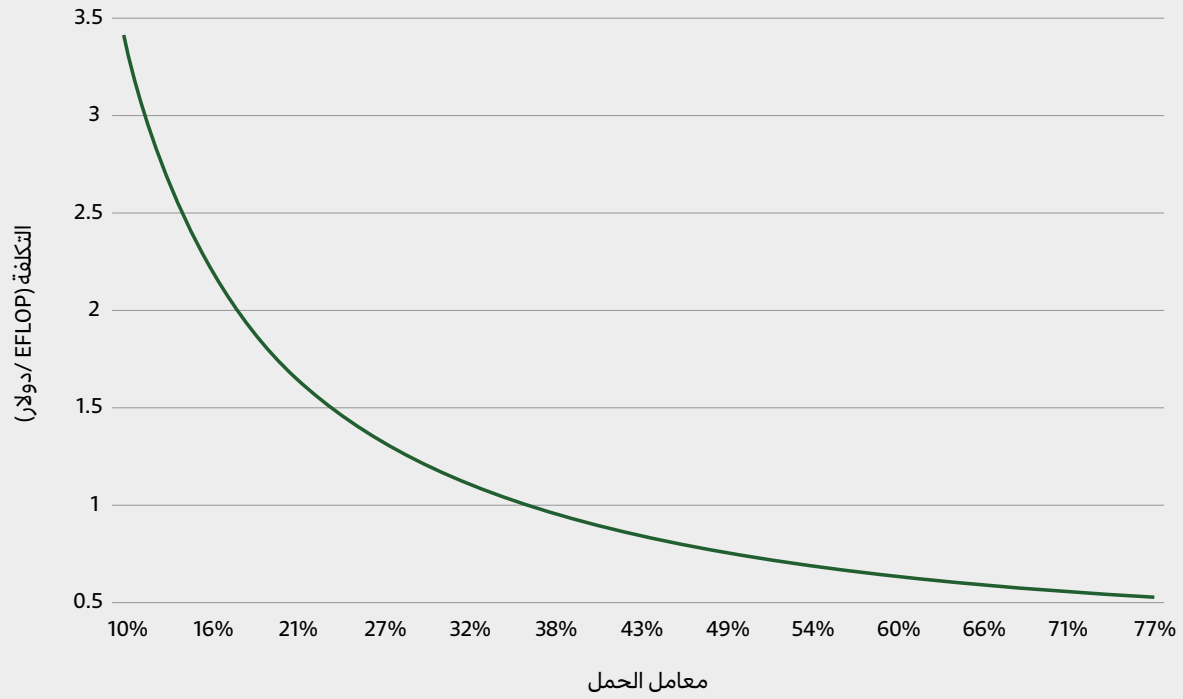
باستخدام القيم الافتراضية، تقدر تكلفة الوحدة الأساسية بـ 0.51 دولار أمريكي/EFLOP، إذ يساوي 1 EFLOP 1000 PFLOP. يمثل هذا متوسط تكلفة الحوسبة على مدار عمر المشروع في ظل ظروف التشغيل السعودية النموذجية، بافتراض مؤشر فعالية استخدام الطاقة (PUE) قدره 1.5، ومعامل حمل 80%، وسعر كهرباء قدره 48 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة. تشير تحليلات مماثلة، مثل دراسة (Kristiansen Nøland, Hjelmeland and Korpåsc 2024)، إلى أن التكاليف المستوية للحوسبة تتراوح بين 1.0 و1.2 دولار أمريكي/EFLOP في ظل أسعار كهرباء أعلى (125-75 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة)، ومؤشر فعالية استخدام الطاقة يبلغ 1.12، وكفاءة الحوسبة تبلغ 0.1 PFLOP لكل كيلوواط. عند تعديل التكلفة وفقًا لهذه الكفاءة، ستكون التكلفة المكافئة في هذه الدراسة تقارب 1.07 دولار أمريكي/EFLOP، مما يضعها دون متوسط هذا النطاق. يشير هذا إلى أن مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية قد تكون قادرة على المنافسة من حيث التكلفة حتى مع قيم مؤشر فعالية استخدام الطاقة الأعلى التي تميز المناخات الدافئة.

لتفسير هذه النتيجة، يقارن الشكل 15 التكلفة السنوية المخصومة مع مخرجات الحوسبة السنوية المخصومة على مدار عمر المشروع. يتناقص كلا المقياسين بمرور الوقت نتيجةً للخصم، مما يقلل القيمة الحالية للنفقات المستقبلية وخدمات الحوسبة. لا يعكس انخفاض مخرجات الحوسبة المخصومة تدهور الأجهزة، بل يمثل تناقص القيمة الحالية للقدرة الحاسوبية المستقبلية.

النتيجة الرئيسة هي أن معظم القيمة الاقتصادية للمشروع تُحقق مبكرًا، عندما يكون الاستخدام الفعال مرتفعًا مقارنةً بالتكلفة. وينطبق هذا خاصة على مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، إذ إن دورات التقنيات السريعة ومعدلات استبدال الأجهزة تجعل الكفاءة التشغيلية المبكرة ضرورية لاسترداد رأس المال قبل أن تصبح الأنظمة قديمة.

يمكن استنتاج تكلفة وحدة الحوسبة في أي سنة معينة من خلال مقارنة التكلفة السنوية المخصومة مع مخرجات الحوسبة المخصومة. بتجميع هذه العلاقة عبر جميع السنوات، نحصل على متوسط تكلفة الحوسبة طوال عمر المشروع. في حين أن هذه العلاقة تعكس ديناميكيات استرداد رأس المال القياسية، فإنها تبرز أيضًا سبب تمتع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي بتأثيرات حمل أولية أقوى من معظم أصول البنية التحتية. إذ إن كثافة رأس المال العالية، وسرعة تطور التقنية، ومكاسب الأداء في السنوات التشغيلية الأولى، تعني أن الاستخدام المحقق في المرحلة الأولية له تأثير غير متناسب على إجمالي استرداد التكلفة. من هذا المنطلق، فإن عوامل التحميل العالية المبكرة والمستدامة ليست مرغوبة فحسب، بل ضرورية للحفاظ على القدرة التنافسية من حيث التكلفة في سوق الحوسبة سريعة التطور.

الشكل 16. تحليل الحساسية لمعامل الحمل



المصدر: المؤلفون.

للحصول على المزيد من الرؤى، بحثنا في العلاقة بين متوسط تكلفة مشروع مركز البيانات على مدار عمره وعوامل متعددة. تشمل هذه العوامل معامل الحمل، وكفاءة الحوسبة، وسعر الكهرباء، ومؤشر فعالية استخدام الطاقة.

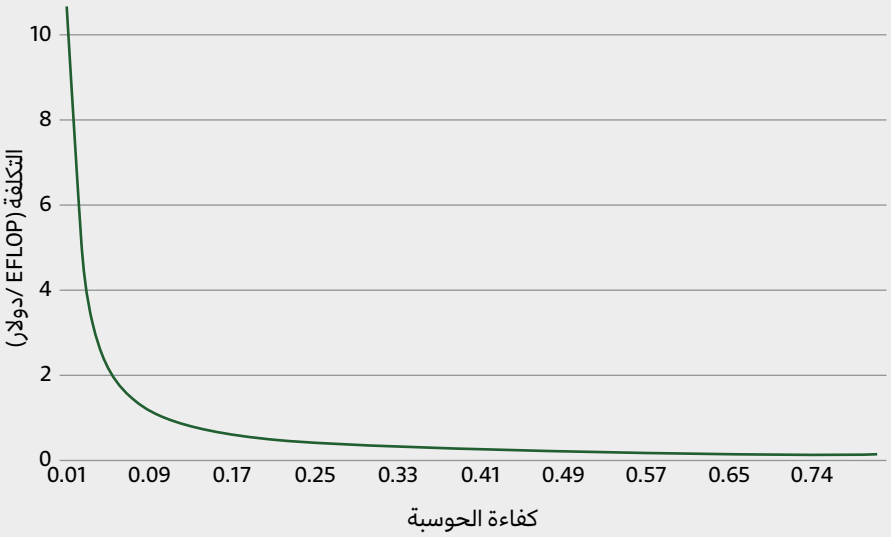
معامل الحمل

مع زيادة معامل الحمل، تنخفض تكاليف الوحدة انخفاضًا حادًا، كما هو موضح في الشكل 16. عند الاستخدام المنخفض، تتجاوز التكاليف 3.40 دولار/EFLOP، ولكن مع ارتفاع معامل الحمل واقترابه من التشغيل المستقر، تنخفض بسرعة إلى نحو 0.5 دولار/EFLOP. يظهر المنحنى تناقصًا في وفورات التكلفة الهامشية عند مستويات الاستخدام العالية، مما يعني أن معظم مكاسب الكفاءة تتحقق عندما تعمل مراكز البيانات بالقرب من طاقتها الاستيعابية الثابتة. يبرز هذا التسطح في منحنى التكلفة أهمية الحفاظ على استخدام مرتفع باستمرار لتحقيق الاستقرار في تكاليف التشغيل واستهلاك الكهرباء. غالبًا ما يحقق المشغلون ذلك من خلال تخفيف تقلبات الطلب قصيرة المدى عبر مهام الحوسبة الخلفية، مثل تدريب النماذج، مما يساعد على ضمان حمل أكثر ثباتًا على الشبكة.

كفاءة الحوسبة

نبحث هنا كيف تؤثر كفاءة الحوسبة -أي مخرجات الحوسبة لكل كيلوواط من كهرباء تقنية المعلومات- في متوسط التكاليف. كما هو موضح في الشكل 17، فإن تحسين كفاءة الحوسبة يخفض التكاليف على نحو ملحوظ. يتراوح المحور السيني بين 0.01 و0.8 PFLOP لكل كيلوواط تقريبًا، وبعد ذلك يصل المنحنى إلى حد التشبع وتصبح تخفيضات التكاليف ضئيلة. وعند انخفاض الكفاءة، تكون التكاليف مرتفعة جدًا، ولكن مع زيادة الكفاءة، تنخفض التكاليف انخفاضًا حادًا وتستقر في النهاية. يتوافق هذا مع اتجاهات الصناعة، إذ يسعى مشغلو مراكز البيانات الضخمة ومصنعو أجهزة الذكاء الاصطناعي إلى تحقيق كفاءة حوسبة أعلى لتحقيق التوازن بين الإنتاجية والقدرة التنافسية من حيث التكلفة. تتوافق هذه النتيجة مع الاهتمام المتزايد من جانب مراكز البيانات الضخمة ومصنعي أجهزة الذكاء الاصطناعي بتحقيق كفاءة حوسبة أكبر، كما هو موضح في الجدول 8. باختصار، لا يؤدي الاستثمار في منصات الحوسبة عالية الكفاءة إلى تحسين الإنتاجية فحسب، بل يعزز أيضًا القدرة التنافسية من حيث التكلفة على المدى البعيد.

الشكل 17. تحليل الحساسية لكفاءة الحوسبة



المصدر: المؤلفون.

الجدول 7. كفاءة الحوسبة لمختلف أجهزة الذكاء الاصطناعي

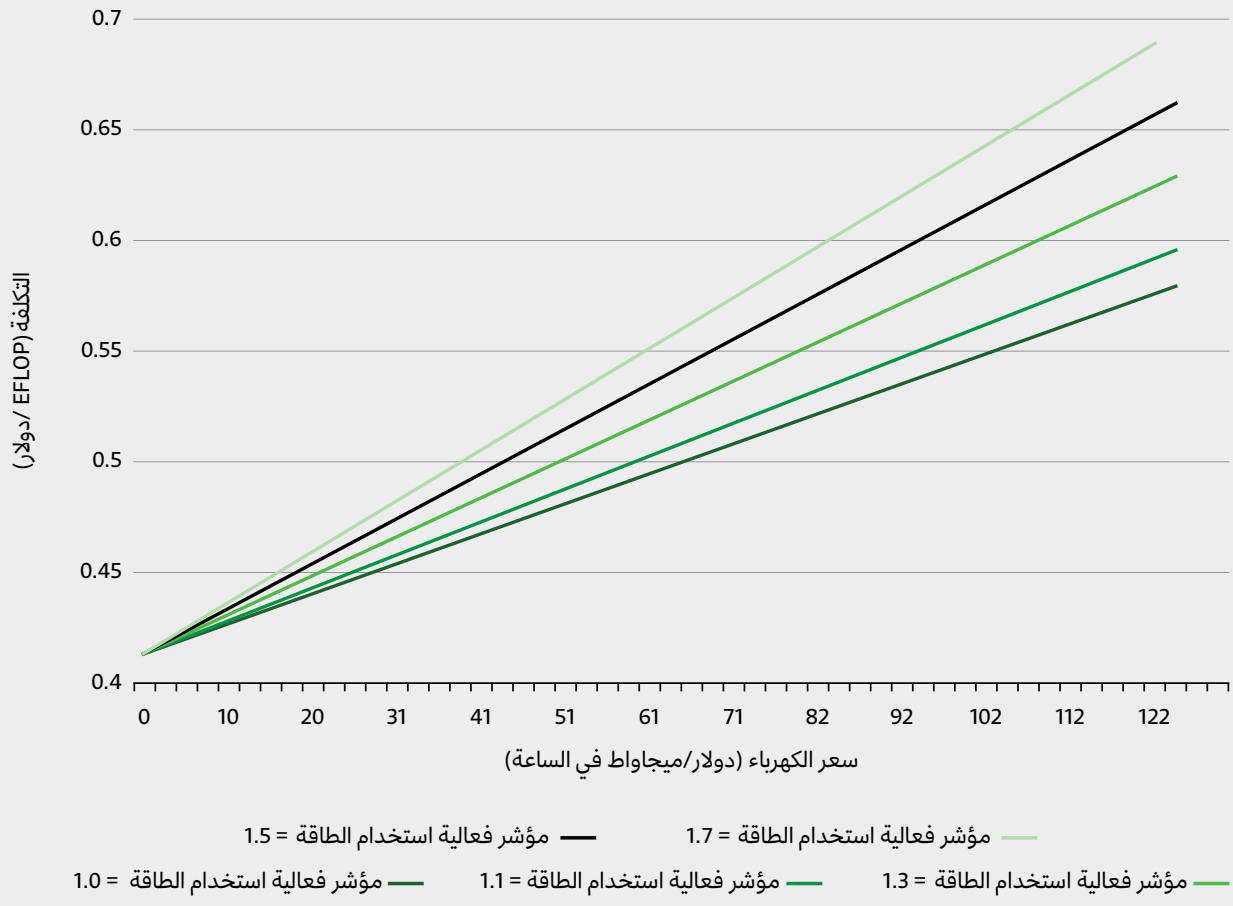
الشركة المصنعة	طراز وحدة معالجة الرسومات	سنة الإصدار	كفاءة الحوسبة (PFLOPs/كيلوواط في الساعة)
Intel	GPU Flex 140	2022	0.107
	GPU Flex 170	2022	0.107
	GPU Max 1100	2022	0.048
	GPU Max 1550	2023	0.049
AMD	Instinct MI300X	2023	0.209
Cerebras (Wang 2024)	CS-3	2024	5.43
NVIDIA	Tesla T4	2018	0.116
	Tesla V100	2017	0.052
	DGX A100	2022	0.769
	DGX H100	2022	3.137
	DGX B200	2024	5.035
	GB200 NVL72	2024	6.000
	Blackwell Ultra	2025	7.71~

سعر الكهرباء ومؤشر فعالية استخدام الطاقة: منحنيات المفاضلة

تتمثل إحدى الأدوات الحساسة للسياسة في المفاضلة بين سعر الكهرباء وفعالية استخدام الطاقة. يوضح الشكل 18 العلاقة بين سعر الكهرباء وتكلفة مشروع مركز البيانات في سيناريوهات مختلفة لمؤشر فعالية استخدام الطاقة، تتراوح من قيمة 1.0 (كفاءة مثالية) إلى 1.7 (كفاءة أقل، مما يعكس زيادة استهلاك التبريد والنفقات العامة). ويعد مؤشر فعالية استخدام الطاقة 1.1 نموذجيًا لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المناطق ذات المناخ البارد، بينما يمثل 1.5 متوسط مؤشر فعالية استخدام الطاقة لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية.

تنطلق جميع السيناريوهات من خط أساس مشترك بتكلفة كهرباء تبلغ صفر، مما يبرز أن التكاليف الثابتة -النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية غير المتعلقة بالكهرباء- تحدد حدًا أدنى لتكاليف الحوسبة. يعكس ميل كل خط مدى حساسية التكاليف لأسعار الكهرباء، إذ يشير الميل الأكثر حدة إلى قيم أعلى لمؤشر فعالية استخدام الطاقة.

الشكل 18. المفاضلة بين مؤشر فعالية استخدام الطاقة وسعر الكهرباء



المصدر: المؤلفون.

هذا يعني أن المرافق الأقل كفاءة تشهد ارتفاعًا أسرع في التكاليف مع ارتفاع أسعار الكهرباء. ورغم تأثر تكلفة مشروع مركز البيانات بأسعار الكهرباء، فإنها أقل حساسية مقارنةً بعوامل أخرى مثل معامل الحمل أو كفاءة الحوسبة.

يبرز الشكل أيضًا جانبًا مهمًا في السياسات ومواقع مراكز البيانات، إذ يتفاعل سعر الكهرباء ومؤشر فعالية استخدام الطاقة تفاعلًا مضاعفًا في تحديد اقتصاديات الحوسبة. على سبيل المثال، حتى مع مؤشر فعالية استخدام الطاقة المرتفع نسبيًا البالغ 1.7، تستطيع مراكز البيانات في المناطق ذات التعريفات الصناعية المنخفضة، مثل المملكة العربية السعودية التي يبلغ سعر الكهرباء فيها قرابة 0.048 دولار أمريكي لكل كيلوواط في الساعة (18 هللة لكل كيلوواط في الساعة)، الحفاظ على تكاليف مشروعات مراكز بيانات تنافسية. وهذا يدل على أن أسواق الكهرباء منخفضة التكلفة تسمح بموازنات في التصميم، مما يمكن المطورين من العمل بمؤشرات فعالية استخدام للطاقة أعلى ضمن قيود مناخية أو قيود تتعلق بالبنية التحتية، مع الحفاظ على التكاليف عند مستوى مقبول.

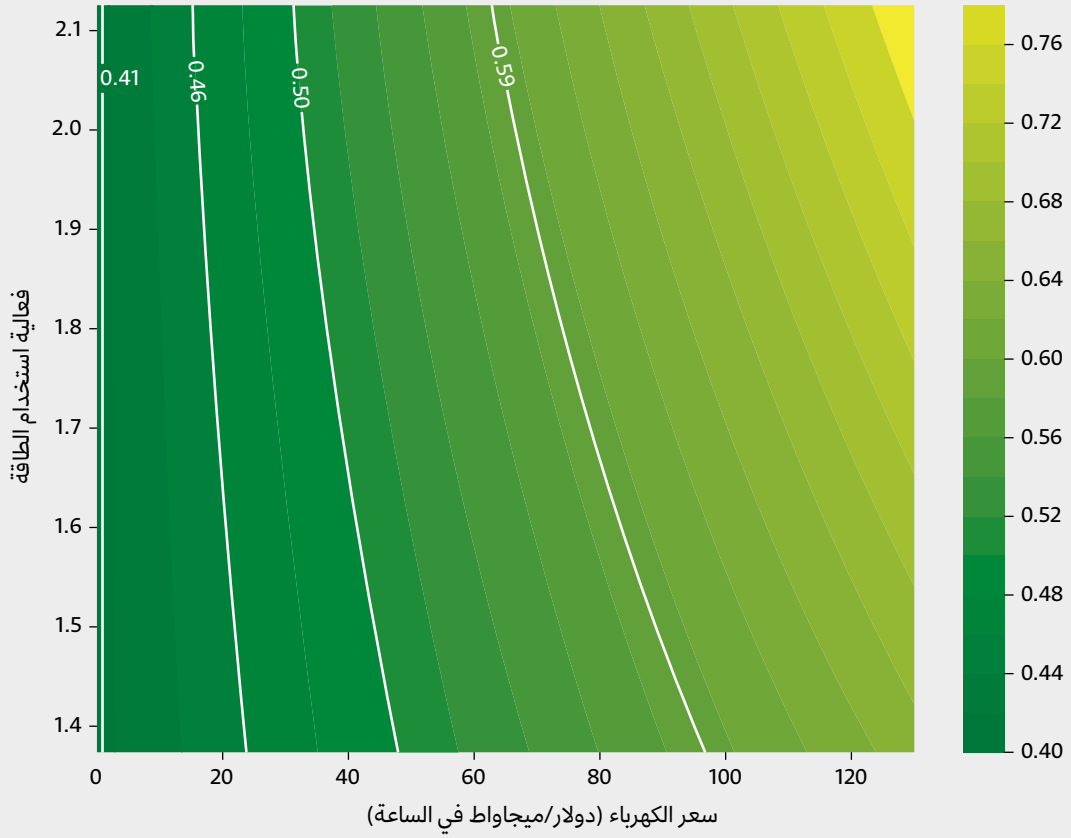
لتوضيح التأثيرات المشتركة لأسعار الكهرباء ومؤشر كفاءة استخدام الطاقة على تكاليف مشروعات مراكز البيانات، يظهر الشكل 19 توزيع التكلفة عبر أسعار الكهرباء ومؤشرات كفاءة استخدام الطاقة المختلفة. عند أسعار منخفضة تتراوح بين 20 و40 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة، حتى مراكز البيانات الأقل كفاءة ذات مؤشر كفاءة استخدام طاقة أعلى من 2 يمكنها الحفاظ على تكلفة منخفضة. على سبيل المثال، عند سعر 24 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة وبمؤشر كفاءة استخدام طاقة أعلى من 2.0، تبقى التكلفة أقل من 0.55 دولار أمريكي/EFLOP. يبين هذا أنه عندما لا تكون أسعار الكهرباء عاملًا محددًا، يمكن للمشغلين تحمل بنية تحتية للتبريد أقل كفاءة دون فقدان ميزتهم التنافسية.

عند المعيار السعودي البالغ 48 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة للحوسبة السحابية، يحقق مرفق بمؤشر كفاءة استخدام طاقة 1.7 تكلفة

تقارب 0.55 دولار أمريكي/EFLOP. مع ذلك إذا تضاعفت أسعار الكهرباء إلى 96 دولار أمريكي لكل ميجاواط في الساعة، سترتفع تكلفة المرفق نفسه إلى أكثر من 0.60 دولار أمريكي/EFLOP، مما يمثل زيادة في التكاليف بنسبة 10% على الأقل. ويؤكد ذلك ضرورة أخذ صناع السياسات والمطورين كلا العاملين معًا في الحسبان.

في المملكة العربية السعودية، يشكل المناخ الحار تحديًا أمام تحقيق مؤشر كفاءة استخدام الطاقة منخفض للغاية، إلا أن أسعار الكهرباء تنافسية. وهذا ما يضع المملكة في "منطقة تنافسية" على الخريطة، حتى مع مؤشر كفاءة استخدام طاقة متوسط (على سبيل المثال، قرابة 1.6-1.8)، تبقى التكاليف منخفضة بالتعريفات الحالية. ويمكن لمصممي مراكز البيانات اختيار حلول تبريد عملية مع الحفاظ على القدرة التنافسية من حيث التكلفة. ومع تخطيط البنية التحتية المستقبلية، سيشكل الحفاظ على تعريفات مواتية وتمكين ممارسات التصميم عالية الكفاءة عنصرين أساسيين لاستدامة هذه الميزة.

الشكل 19. خريطة تحديد التكلفة بصفتها دالة لمؤشر كفاءة استخدام الطاقة وسعر الكهرباء



ملحوظة: يمثل كل خط فاصل قيمة تكلفة ثابتة، ويعكس التظليل تدرج التكلفة.
يتضمن الرسم البياني عدة خطوط مرجعية رأسية لتسهيل التفسير: خط عند 24 دولار/ميجاواط في الساعة (نصف تعريفة الحوسبة السحابية)، وخط عند 48 دولار/ميجاواط في الساعة (التعريفة المرجعية للحوسبة السحابية في المملكة العربية السعودية)، وخط عند 96 دولار/ميجاواط في الساعة (ضعف التعريفة).

3.5 رؤى السياسات

يظهر تحليل التكلفة أن المملكة العربية السعودية تتمتع بمكانة متميزة على الساحة العالمية لتطوير مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. وتعد تعريفات الكهرباء في المملكة من بين الأكثر تنافسية في العالم، وهي مدعومة ببنية تحتية موثوقة للشبكة واستقرار في التكاليف. وتعادل هذه الميزة متطلبات التبريد الأعلى المرتبطة بالمناخات الدافئة، وتوفر أساسًا متينًا للاستثمارات في الذكاء الاصطناعي والبنية التحتية السحابية.

يبين التحليل أن المزيد من التخفيضات في تعريفات الكهرباء لن تحقق سوى فوائد محدودة، في حين أن تحسين كفاءة الطاقة واستخدامها يوفر إمكانات أكبر بكثير لخفض تكاليف الحوسبة الإجمالية. لذلك يعد تحسين أداء التبريد وكفاءة الأجهزة وإدارة الحمل المسار الأكثر فعالية لتعزيز القدرة التنافسية. يمكن أن تركز السياسات على كيفية استخدام الطاقة بدلًا من انخفاض تكلفتها، وذلك من خلال تشجيع التقنيات المتقدمة والممارسات التشغيلية التي تحسن الكفاءة وتضمن استهلاك عالي ومستقر. ومن منظور السياسات، يعد الحفاظ على استقرار أسعار الكهرباء، ووضع معايير واضحة للأداء والكفاءة، وتشجيع استخدام أحدث الأجهزة، من أكثر الوسائل فعالية لضمان القدرة التنافسية على المدى الطويل.

06

نظرة عامة عالمية على تحديات مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي ومخاطرها

يمكن أن يسهم توسع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في خلق فرص اقتصادية وتقنية. ومع ازدياد انتشار هذه المراكز وتزايد قدراتها، لا بد من مراعاة العديد من المخاطر والتحديات. تشير التحديات إلى الصعوبات الهيكلية والتقنية التي تعيق نمو مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، بينما تشير المخاطر إلى النتائج السلبية المحتملة. يحلل هذا القسم كلا البعدين على مستوى العالم، دون ربطه بأي منطقة محددة.

1.6 التحديات

الضغوط التنظيمية والسياساتية

تفرض الحكومات والهيئات التنظيمية بنحو متزايد قواعد جديدة على مراكز البيانات لتحقيق الأهداف البيئية وتلبية متطلبات تخطيط البنية التحتية. في الأسواق الناضجة، توجد قيود على الإنشاءات الجديدة ومتطلبات استدامة ملزمة، مثل الإفصاح عن الاستهلاك السنوي للطاقة والمياه، ومعايير كفاءة أكثر صرامة، والتزامات باستخدام الطاقة المتجددة بنسبة 100%. تعكس هذه السياسات توجهًا تنظيميًا أوسع نطاقًا، إذ يجب على مراكز البيانات التوافق مع الأهداف المناخية الوطنية، وإلا ستواجه عقبات في الحصول على التراخيص وحدودًا قصوى للنمو. وبالنسبة للمشغلين، يؤدي هذا إلى رفع مستوى الامتثال وزيادة التكاليف. ويتطلب الامتثال للقواعد الجديدة استثمارات أكبر في شراء الطاقة المتجددة، وأنظمة تبريد عالية الكفاءة، وأنظمة استعادة الحرارة، وتحسين القياس والإبلاغ.

تلزم بعض لوائح حماية البيانات والتوطين في بعض الدول بتخزين بيانات محددة محليًا. وفي الوقت نفسه، تتزايد آليات الامتثال المتعلقة بالطاقة المتجددة، مثل شهادات الطاقة المتجددة (RECs) ومتطلبات الطاقة النظيفة، مما يلزم مشغلي مراكز البيانات بشراء أو توليد كهرباء متجددة معتمدة لتحقيق أهداف الاستدامة. عمومًا، تتزايد الضغوط التنظيمية في عدة مجالات -تشمل مصادر الطاقة، واستخدام المياه، وانبعاثات الكربون، وحوكمة البيانات- مما يخلق بيئة امتثال أكثر تعقيدًا للمطورين. وقد يؤدي عدم الامتثال لهذه المعايير المتطورة إلى زيادة التكاليف أو إبطاء التوسع، لا سيما في الأسواق التي تشهد تشديدًا للوائح البيئية ولوائح الطاقة.

معوقات استخدام الأراضي والبنية التحتية

مع تزايد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، تصبح البنية التحتية المادية وتوفر الأراضي من أهم المعوقات. لا تحتاج هذه المرافق إلى مساحات مفتوحة فحسب، بل تتطلب شروطًا خاصة في اختيار المواقع، مع إمكانية الوصول إلى شبكات طاقة عالية السعة، وشبكات الألياف الضوئية، وموارد التبريد، والتكوينات الجيولوجية المستقرة. عالميًا، أدى ذلك إلى تركزها في مراكز حضرية رئيسة، مما يسبب غالبًا اختناقات محلية في سعة الشبكة، وتقسيم الأراضي، وتوصيلات الألياف. ورغم أن الأراضي ليست شحيحة بطبيعتها في العديد من الدول، فإن التحدي يكمن في إيجاد مواقع تلبي المعايير الفنية للموثوقية وزمن الاستجابة، ومتطلبات البنية التحتية مثل الوصول إلى محطات التحويل، والنقل البري، وأنظمة التبريد بالماء المبرد. ويتفاقم هذا التحدي عند الحاجة إلى أنظمة طاقة احتياطية ومحطات تبريد.

بالإضافة إلى ذلك، مع دمج مراكز البيانات لمصادر الطاقة المتجددة، قد تصبح المساحة اللازمة لتوليد الطاقة في الموقع -مثل الطاقة

الشمسية الكهروضوئية- عائقًا كبيرًا، لا سيما بالقرب من المناطق الحضرية أو الصناعية. في هذه الحالات، غالبًا ما يكون الاعتماد على ربط الشبكة بمحطات الطاقة المتجددة واسعة النطاق أكثر جدوى وكفاءة في استخدام الأراضي من تطوير توليد الطاقة في الموقع. وهذا يسمح بالحصول على الطاقة المتجددة من محطات الطاقة واسعة النطاق في المناطق الغنية بالموارد مع تقليل آثار استخدام الأراضي والتعقيد اللوجستي في مركز البيانات نفسه.

نقص الكفاءات والقيود المفروضة على القوى العاملة

يواجه قطاع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي نقصًا عالميًا في الكوادر المتخصصة في مجالات مثل الهندسة الكهربائية، والأمن السيبراني، وتصميم الشبكات، والبنية التحتية للذكاء الاصطناعي. وتتوقع الولايات المتحدة وحدها نقصًا يزيد على 300 ألف عامل بحلول عام 2025 (Levine 2025). وتوجد فجوات مماثلة في أوروبا وآسيا، إذ لم تواكب فرص التدريب التطور الهائل لمراكز البيانات.

وبينما تستثمر المملكة العربية السعودية في تنمية المهارات الرقمية والتوطين من خلال رؤية 2030، لا تزال هناك فجوة كبيرة في الكفاءات. فالتدريب المتخصص على أحمال عمل الذكاء الاصطناعي وأنظمة التبريد المتقدمة (مثل التبريد السائل) لم ينتشر على نطاق واسع بعد. وقد يكون الاعتماد على العمالة الأجنبية أمرًا لا مفر منه على المدى القصير، بينما يعتمد النمو على المدى الطويل على تطوير قوى عاملة محلية محترفة. وسيكون توسيع البرامج الجامعية، وإنشاء مراكز مهنية متخصصة في عمليات مراكز البيانات، وتعزيز التعاون بين القطاعين الصناعي والأكاديمي، أمورًا أساسية لضمان استمرارية العمليات ودعم أهداف التوظيف المحلي.

2.6 المخاطر

القيود المفروضة على إمدادات الطاقة

يشكل تزايد عدد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي ضغطًا كبيرًا على شبكات الكهرباء، ويثير مخاوف بشأن قدرة إمدادات الطاقة والبنية التحتية للشبكة على مواكبة هذا الطلب. قد تتطلب المجمعات الضخمة فائقة التوسع 100 ميجاواط أو أكثر، أي ما يعادل استهلاك الطاقة في مصنع للصلب أو مئات الآلاف من المركبات الكهربائية (Spencer and Singh 2024). تشير الوكالة الدولية للطاقة إلى أن تأخيرات ربط الشبكة تمثل خطرًا رئيسًا، ناجمة عن طول إجراءات الترخيص وفترات نقل الطاقة الطويلة. ويبلغ متوسط فترة انتظار الربط في الولايات المتحدة من سنة إلى ثلاث سنوات، وقد تتجاوز سبع سنوات في بعض المناطق مثل شمال فرجينيا (Spencer et al. 2025). وتسلط الدراسة الضوء على "سرعة الوصول إلى الطاقة" كونها مسألة رئيسة لمشغلي مراكز البيانات عند إنشاء مواقع جديدة (Green et al. 2024).

إلى جانب تراخيص الشبكة، تصبح الاختناقات في المعدات وتوليد الطاقة عوائق بالغة الأهمية. زادت فترات تصنيع المحولات الكهربائية إلى أكثر من الضعف منذ عام 2020، إذ يواجه مزودو الخدمات والمطورون الآن فترات انتظار تزيد عن عامين لوحدات الجهد العالي (IEA 2024). وبالمثل تواجه سلاسل توريد توربينات الغاز تراكمات غير مسبوقة، إذ يعطي المصنعون الأولوية للتسليم لمشروعات استقرار الشبكة والمشروعات الصناعية، مما يزيد من تأخير استخدام الطاقة الاحتياطية في الموقع. وتؤدي هذه القيود إلى تفاقم تأخيرات الربط وتزيد من صعوبة مزامنة الوصول إلى الشبكة وتسليم المعدات والجداول الزمنية للبناء.

ويمكن لهذه التحديات مجتمعة أن تؤدي إلى تأخير المشروعات، أو زيادة التكاليف، أو إجبار الشركات على الاعتماد على توليد الطاقة الاحتياطية كثيفة الكربون، مما يقوض أهداف النمو والاستدامة على حد سواء. ويعد تأمين إمدادات كافية من البنية التحتية للشبكة والمكونات الأساسية، إلى جانب عمليات الترخيص الفعالة، ضرورة إستراتيجية لدعم توسع مراكز البيانات في أي منطقة.

البصمة البيئية

يثير نمو مراكز البيانات مخاوف بشأن الاستدامة البيئية. إذ تسهم مراكز البيانات اليوم بنحو 0.5% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراق الوقود على مستوى العالم (حوالي 180 مليون طن)، وتتوقع الوكالة الدولية للطاقة أن ترتفع هذه النسبة إلى نحو 1% بحلول عام 2030، أي ما يعادل نحو 3% من استهلاك الكهرباء العالمي (Spencer et al. 2025). ويرتبط جزء كبير من هذا التأثير البيئي باستهلاك الطاقة في الخوادم وأنظمة التبريد، لا سيما إذا كانت هذه الكهرباء مولدة من الوقود الأحفوري.

يعد استهلاك المياه أيضًا مصدر قلق بشأن الاستدامة نظرًا إلى البصمة المائية الكبيرة لمراكز البيانات. إذ تعتمد معظم مرافق الحوسبة فائقة التوسع على التبريد المائي لتبديد الحرارة الناتجة عن الخوادم. وقد يستهلك مركز بيانات صغير بقدرة 1 ميجاواط ما يصل إلى 25.5 مليون لتر من الماء سنويًا (Mytton 2021)، أي ما يعادل الاستهلاك السنوي لأكثر من 60 أسرة أمريكية (Sharma 2024). وتستهلك مراكز البيانات الأمريكية الكبيرة كميات من المياه تعادل استهلاك مليوني منزل سنويًا (Sharma 2024). وتشكل هذه الاحتياجات مشكلة خاصة في المناطق الجافة. ونظرًا إلى مناخ المملكة العربية السعودية الصحراوي، فمن الضروري تحقيق التوازن بين نمو مراكز البيانات واسعة النطاق واحتياجات التبريد، وبين ممارسات إدارة المياه المستدامة.

الضبابية في الاستثمار

تتدفق استثمارات رأسمالية ضخمة إلى البنية التحتية لمراكز البيانات لتلبية الطلب المتزايد على الذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية. ومع ذلك فإن عوائد هذا القطاع على المدى الطويل غير مضمونة. وقد شُبه

هذا التوسع المدعوم بالذكاء الاصطناعي بـ"حمى الذهب" (Graham, Rutten, and Yashkova 2024)، إذ تتسابق الشركات لبناء مرافق جديدة بناءً على افتراض نمو الطلب بنحو مطرد. ويكمن الخطر في المبالغة في تقدير الطلب المتوقع. فإذا تباطأ الاقتصاد أو فشل الذكاء الاصطناعي في تحقيق القيمة التجارية المتوقعة، يمكن أن يقلل مزودو خدمات الحوسبة السحابية فائقة التوسع من إنفاقهم، مما سيؤدي إلى إبطاء وتيرة التوسع.

ومن المخاوف الأخرى احتمال وجود فائض في العرض. فمع دخول العديد من اللاعبين والمستثمرين الجدد إلى السوق، قد تمتلك بعض المناطق طاقة استيعابية تفوق الحاجة، مما قد يؤدي إلى انخفاض معدلات الإشغال والأسعار. وفي الوقت نفسه، تضيف تكاليف البناء المتزايدة وأسعار الفائدة المرتفعة ضغوطًا مالية على المشروعات الجديدة. والرغم من أن آفاق النمو تبدو واعدة، فإن الربحية طويلة الأجل ومعدلات استخدام مراكز البيانات الجديدة لا تزال غير مؤكدة.

المخاطر الجيوسياسية ومخاطر سلاسل الإمداد

يعد التوفر العالمي للرقائق عالية الأداء، ولا سيما وحدات معالجة الرسومات ووحدات معالجة المصفوفات، عائقًا رئيسًا أمام توسيع مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. تعتمد البنية التحتية للذكاء الاصطناعي على عدد قليل من الاختناقات العالمية: تصنيع أشباه الموصلات أساسًا في تايوان وكوريا الجنوبية والولايات المتحدة، والوصول إلى العناصر الأرضية النادرة والبطاريات التي تُستورد أساسًا من الصين ووسط إفريقيا. وهذا يجعل القطاع عرضة بشدة للتوترات الجيوسياسية، وضوابط التصدير، واضطرابات سلاسل الإمداد، وكلها عوامل قد تؤثر بشدة على توفر وحدات معالجة الرسومات والذاكرة وأنظمة الطاقة الاحتياطية (Spencer et al. 2025).

تظهر عمليات الحظر الأمريكية الأخيرة على تصدير الرقائق عالية الأداء إلى الصين ودول أخرى مدى سرعة تقييد الوصول إليها. على الصعيد العالمي، زادت فترات التسليم لأجهزة مراكز البيانات، إذ تواجه المكونات الأساسية مثل محولات الطاقة تأخيرات تتراوح بين 18 و24 شهرًا (Green et al. 2024). وللتخفيف من هذا الضعف، يمكن للدول تطوير إستراتيجيات شراء متنوعة، وتجميع محلي للأجهزة غير الحساسة، وإبرام عقود طويلة الأجل مع الموردين. كذلك فإن بناء مخزونات إقليمية من المكونات الأساسية أو الاستثمار في برامج مرونة سلاسل الإمداد على مستوى منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا من شأنه أن يعزز مكانة المملكة بصفتها مركزًا آمنًا وموثوقًا لاستضافة البنية التحتية.

07

نحو مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي المستدامة والأكثر كفاءة

يتناول هذا القسم طرقًا مختلفة لخفض انبعاثات الكربون وتعزيز الكفاءة التشغيلية لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي. ويقدم تحليلًا لسياسات مختارة قائمة عالميًا تستهدف اعتماد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي واستخدامها بطريقة أكثر استدامة وكفاءة.

1.7 طرق تحسين الكفاءة التشغيلية

تصميم المرافق والهندسة المعمارية المعيارية

تتحول مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي الحديثة من مبانٍ ضخمة منفردة إلى "وحدات" مسبقة الصنع تُركب معًا بسهولة. تأتي كل وحدة مزودة بتوزيع الطاقة، ونظام التبريد السائل الجاهز للاستخدام، وأجهزة الاستشعار، مما يسمح للمشغلين بإضافة سعة عند ازدياد الطلب. تحافظ مسارات تدفق الهواء المعدة مسبقًا في المصنع على فصل الهواء الساخن عن البارد، وتزيل "المناطق الميتة" التي تهدر الطاقة في القاعات المخصصة. ونتيجةً لذلك، تسجل قاعات الخوادم المعيارية الجديدة قيمًا لمؤشر فعالية استخدام الطاقة تبلغ حوالي 1.2 (EPRI 2024)، أي أفضل بنسبة 30% تقريبًا من المتوسط العالمي البالغ 1.55 في عام 2022 (Duncan et al. 2024).

يمكن أن يساعد استخدام أدوات إدارة البنية التحتية لمراكز البيانات التي تراقب كل رف في الوقت الفعلي وتغير أحمال العمل أو سرعات المراوح في تشغيل كل رف بأفضل أداء ممكن. ويتوقع نصف مديري المرافق الذين شملهم الاستطلاع أن يؤدي ذلك إلى زيادة الكفاءة في غضون خمس سنوات (Donnellan 2023). وعند دمجه مع استخدام الخوادم الافتراضية، التي خفضت عدد الخوادم الفعلية بنسبة 30-40% في المشروعات التجريبية، يمكن أن تنخفض الطاقة غير المستخدمة إلى نسبة ضئيلة من إجمالي حمل تقنية المعلومات (EPRI 2024).

مثال: إعادة تدوير الحرارة في مركز بيانات ميتا في الدنمارك

تهدف شركة ميتا إلى تشغيل مراكز بيانات فعالة ومعتمدة باستخدام طاقة نظيفة ومتجددة بنسبة 100%. اعتبارًا من عام 2024، تجاوزت محفظة ميتا المتعاقد عليها 11,700 ميجاواط من الطاقة المتجددة (Meta 2024)، وأصبح مركز بياناتها فائق التوسع في أودنسه، الدنمارك، نموذجًا رائدًا للابتكار في مجال الطاقة الدائرية. ويرتبط مركز البيانات بشبكة التدفئة المركزية للمدينة، إذ يُوجه الهواء الدافئ من قاعات الخوادم إلى نظام مخصص لاستعادة الحرارة. تنقل الحرارة الفائضة إلى شبكة التدفئة المركزية، ومن ثم توزع على المنازل والشركات عبر أنابيب أودنسه القائمة.

ووفقًا لميتا، يُزود نظام التدفئة المركزية المحلي حاليًا بـ 165,000 ميجاواط في الساعة سنويًا من الحرارة الفائضة من قاعات خوادم أودنسه، ليصل إلى 9,000 منزل (Meta 2025). بالإضافة إلى ذلك، حصل الحرم الجامعي على شهادة LEED® الذهبية، ونال لقب مركز البيانات الأخضر للعام 2021، مما يعكس تصميمًا يركز على الكفاءة ويمكن من احتجاز الحرارة بكفاءة عالية.

الأجهزة المحسنة بالذكاء الاصطناعي: الدوائر المتكاملة الخاصة بالتطبيقات (ASICs) والمسرعات

يمكن تحسين كفاءة استهلاك الطاقة للأجهزة من خلال مسرعات الذكاء الاصطناعي المتخصصة، بما فيها الدوائر المتكاملة الخاصة بالتطبيقات (ASICs) ووحدات معالجة المصفوفات. صممت هذه الرقائق لمهام الذكاء الاصطناعي التي يمكن تنفيذها بالتوازي، مثل ضرب المصفوفات، والتي تهيمن على أحمال عمل التعلم العميق. تشير دراسة أجرتها شركة (Epoch AI) إلى أن كفاءة استهلاك الطاقة لرقائق التعلم الآلي الرائدة تتضاعف تقريبًا كل عامين (Rahman 2024). تشكل هذه المسرعات مجتمعة أساسًا لخطط مستدامة لأجهزة الذكاء الاصطناعي في المشروعات الضخمة، مما يقلل من استهلاك الطاقة (كيلوواط في الساعة) لكل عملية حاسوبية حتى مع ازدياد أحجام النماذج.

تقنيات التبريد المتقدمة

أصبح التبريد الهوائي التقليدي غير كافٍ للحوسبة عالية الكثافة للذكاء الاصطناعي، لا سيما مع وحدات معالجة الرسومات التي تتجاوز استهلاكها 1 كيلوواط من الطاقة لكل شريحة (Spencer et al. 2025). قد يمثل نظام التبريد الهوائي التقليدي ما يصل إلى 40% من استهلاك الكهرباء في مركز البيانات (Duncan et al. 2024). توفر تقنيات التبريد السائل، مثل أنظمة التبريد المباشر للرقاقة وأنظمة الغمر، تحسينات كبيرة في الكفاءة الحرارية وكفاءة الطاقة، مما يقلل استهلاك الكهرباء بأكثر من 50% ويتيح كثافة حوسبة أعلى ومساحة أرضية أقل (Duncan et al. 2024; EPRI 2024). ويمكن لهذه التحسينات أن تخفض مؤشر فعالية استخدام الطاقة إلى أقل من 1.1 (EPRI 2024). ونظرًا لأن أنظمة التبريد السائل غالبًا ما تتطلب كميات كبيرة من المياه، فإنها تثير تحديات تتعلق بالاستدامة. للتخفيف من تلك التحديات، اقتُرح تجميع مياه الأمطار والتبريد الحراري الأرضي بصفتها حلولًا بديلة يمكن أن تقلل من الطلب على الطاقة والمياه لتبريد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي (Stansbury et al. 2025).

مثال: ابتكار مايكروسوفت للتبريد الخالي من الماء

مع تزايد أحمال العمل المتعلقة بالذكاء الاصطناعي، واجهت مايكروسوفت خطرًا متزايدًا على الاستدامة. إذ يستهلك التبريد التقليدي كميات كبيرة من المياه الصالحة للشرب، وهو ما يمثل مشكلة خاصة في المناطق القاحلة ذات المتطلبات المجتمعية والتنظيمية العالية (Solomon 2024). في أغسطس 2024، قدمت مايكروسوفت نظام تبريد "خالٍ من الماء" لمراكز البيانات المحسنة للذكاء الاصطناعي، مستبدلة نظام التبريد السائل المباشر على مستوى الرقاقة في حلقة مغلقة بنظام التبخير التقليدي. وبمجرد تعبئة النظام أثناء الإنشاء، يدور سائل التبريد باستمرار بين الخوادم والمبادلات الحرارية للحفاظ على درجات حرارة دقيقة دون استخدام مياه إضافية. إضافة إلى ذلك، تزود مايكروسوفت هذه الحلقة بمبردات عالية الكفاءة لتقليل استهلاك الطاقة الناتج عن استبدال التبخير التقليدي، وتعمل عند درجات حرارة أعلى لمدخل الخوادم.

من المتوقع أن توفر كل طريقة من هذه الطرق أكثر من 125 مليون لتر من المياه سنويًا مقارنة بالطرق التقليدية، مما يحمي مصادر المياه المحلية ويقلل الاعتماد على إمدادات المياه البلدية (Solomon 2024). وقد حسنت مايكروسوفت باستمرار كفاءة استخدام المياه في مراكز بياناتها لتصل إلى 0.30 لتر لكل كيلوواط في الساعة، أي بتحسن قدره 39% منذ عام 2021، وانخفاض قدره 80% مقارنة بمراكز بياناتها من الجيل الأول في العقد الأول من القرن الحالي. وتحافظ هذه الطريقة على درجات حرارة ثابتة لأحمال الذكاء الاصطناعي الكثيفة مع تقليل استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى، مما يتيح التوسع في المناطق القاحلة، ويقلل من مخاطر الحصول على التراخيص، ويعزز قدرة مايكروسوفت على توسيع نطاق الذكاء الاصطناعي على نحو مستدام.

كفاءة أحمال عمل الذكاء الاصطناعي: منظور النموذج

تُستكمل تحسينات الأجهزة على نحو متزايد بتقنيات خوارزمية ومعمارية تقلل الطاقة المستهلكة لكل عملية تدريب أو استدلال. وتشمل (EPRI 2024):

- **تقليم النموذج:** تقنية لإزالة الأوزان أو الخلايا العصبية غير الضرورية أو الزائدة، أو حتى رؤوس الانتباه بأكملها في الشبكة العصبية المدربة، مما يؤدي إلى تقليل كبير في الحوسبة واستهلاك الكهرباء لكل تكرار.
- **التحويل الكمي:** طريقة لتحويل أوزان النموذج إلى تنسيقات ذات دقة أقل، مثل الأعداد الصحيحة 8 بت. تساعد هذه الطريقة على تسريع الاستدلال وتقليل استهلاك الذاكرة والطاقة على الأجهزة المدمجة.
- **استخلاص المعرفة:** منهجية لتطوير نموذج أصغر وأسهل إدارة يعكس وظائف نموذج أكبر، مما يقلل من متطلبات الحوسبة.

تساعد هذه الأساليب على تقليل وقت الحوسبة وساعات وحدة معالجة الرسومات والانبعاثات دون خسارة كبيرة في الأداء.

كفاءة أحمال عمل الذكاء الاصطناعي: جدولة المهام

يمكن أن يساهم تشغيل بعض مهام الحوسبة -في أوقات أو مواقع مختلفة لمراكز البيانات- في تخفيف الضغط على شبكة الكهرباء. يشير تحليل شركة ديلويت إلى أنه في حال خفضت مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي استهلاكها للكهرباء بنسبة 1% فقط خلال ساعات الذروة، يمكن لمشغلي الشبكة إضافة حوالي 126,000 ميجاواط من أحمال مراكز البيانات الجديدة دون الحاجة إلى ترقيات كبيرة للشبكة (Stansbury et al. 2025). ووفقًا لاستطلاع ديلويت، يقبل 68% من المديرين التنفيذيين في هذا القطاع هذا التخفيض البسيط مقابل تسريع الوصول إلى الشبكة

(Stansbury et al. 2025). ومن خلال دمج أدوات جدولة أحمال العمل التي تستجيب لإشارات أسعار الكهرباء أو الازدحام في الوقت الفعلي، يمكن للمشغلين تجنب التوسعات المكلفة في السعة، وتقليل انبعاثات الكربون، بل وتحقيق إيرادات من استجابة الطلب، مما يجعل مرونة المهام خيارًا قابلًا للتطوير لتحسين الاستدامة.

2.7 خيارات إزالة الكربون

اتفاقيات الطاقة المتجددة طويلة الأجل

يوقع مشغلو مراكز البيانات اتفاقيات شراء طاقة طويلة الأجل مع مولدي الكهرباء الجدد من طاقة الرياح والطاقة الشمسية، مما يضمن لهم تدفقًا ثابتًا من الكهرباء النظيفة بسعر ثابت لفترة محددة، ويساعد المشروعات الجديدة على تأمين التمويل. تدعم اتفاقيات شراء الطاقة للشركات قدرة تبلغ حوالي 120,000 ميجاواط من مصادر الطاقة المتجددة التشغيلية عالميًا، أكثر من 30% منها تغطيها الشركات المشغلة لمراكز البيانات. في الواقع، تغطي هذه الاتفاقيات أكثر من 20% من الطلب العالمي المقدر على الكهرباء لمراكز البيانات في عام 2024، والذي يبلغ 415 تيراواط في الساعة. ويجري تطوير مشروعات إضافية بقدرة 60,000 ميجاواط مرتبطة باتفاقيات شراء الطاقة، وقد بيع جزء كبير منها للقطاع نفسه (Spencer et al. 2025).

مواءمة الإمدادات الخالية من الكربون مع الاستهلاك على مدار الساعة

غالبًا ما تعتمد الأساليب التقليدية على أرصدة الطاقة النظيفة السنوية لموازنة إجمالي الاستهلاك السنوي. يتطلب التحول إلى مواءمة الإمدادات الخالية من الكربون مع الاستهلاك على مدار الساعة حلولًا مرنة، مثل البطاريات التي يمكنها تخزين الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح ونقلها، ومصادر الطاقة النظيفة المستقرة (مثل الطاقة النووية أو الحرارية الأرضية التي تعمل باستمرار)، وفي بعض الحالات، محطات الوقود الأحفوري المجهزة بتقنية احتجاز الكربون وتخزينه (EPRI 2024; Dia-mant 2022). ويجسد مشروع تجريبي واقعي في حرم جوجل ببلجيكا هذا المزيج، إذ يجمع بين ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية المثبتة على السطح بقدرة 2.75 ميجاواط وبطارية ليثيوم أيون 5.5 ميجاواط في الساعة، مما يوفر إمدادًا سلسًا في الموقع ويدعم خدمات تردد الشبكة (Spencer et al. 2025). وبذلك تمكن عملية التتبع لكل ساعة والبطاريات ومحطات الطاقة النظيفة المستقرة المشغلين من مطابقة كل كيلوواط مستهلك في الساعة مع مصدر إمداد خالٍ من الكربون.

المفاعلات المعيارية الصغيرة (SMRs)

تبلغ قدرة المفاعلات المعيارية الصغيرة ما يصل إلى 300 ميجاواط لكل وحدة، أي ما يعادل ثلث قدرة مفاعلات الطاقة النووية التقليدية تقريبًا (Liou 2023). ومن المتوقع أن تضيف المشروعات المعلنة المرتبطة بتزويد مراكز البيانات ما يصل إلى 25000 ميجاواط على مستوى العالم (Spencer et al. 2025)، معظمها في الولايات المتحدة. وتقدم شركات مثل (NuScale) تصاميم بوحدات تتراوح قدرتها بين 250 و600 ميجاواط، وهي صغيرة بما يكفي لتزويد مجمع بيانات ضخم واحد بالطاقة (EPRI 2024).

أنظمة الطاقة الاحتياطية العاملة بخلايا الوقود

تستخدم هذه الأنظمة خلايا وقود الهيدروجين، إذ تحول الطاقة الكيميائية الموجودة في الهيدروجين إلى كهرباء مع القليل من المنتجات الثانوية، مثل الماء والحرارة (EERE 2014). على سبيل المثال، وافقت شركة أمريكان إلكتريك باور على شراء ما يصل إلى 1000 ميجاواط من خلايا الطاقة الحرارية الأرضية الصلبة من إنتاج شركة بلوم إنرجي لعملاء مراكز البيانات، التي ستحل محل مولدات الديزل أثناء انقطاع التيار الكهربائي (Spencer et al. 2025).

الطاقة الحرارية الأرضية المتقدمة

عن طريق الحفر العميق في الصخور الساخنة والجافة، تنقل الحرارة من باطن الأرض بواسطة سائل يتدفق عبر أنابيب محكمة الإغلاق في بئر الحفر إلى توربين على السطح. وبما أن البئر دائرة مغلقة، يمكن وضعها في أي مكان تقريبًا، مما يجعلها خيارًا جذابًا لتوليد الطاقة النظيفة الخالية من الكربون لمجمعات مراكز البيانات (Spencer et al. 2025).

مثال: الطاقة الحرارية الأرضية من جوجل لتوفير طاقة نظيفة مستمرة

تهدف جوجل إلى تزويد مراكز بياناتها بالطاقة النظيفة على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع بحلول عام 2030 (Google 2025). ولأن طاقة الرياح والطاقة الشمسية المتقطعة لا تكفيان وحدهما لتوفير هذه التغطية المستمرة، دخلت جوجل في شراكة مع شركة فيرفو للطاقة عام 2021 في أول اتفاقية بين شركتين في العالم لتطوير مشروع طاقة حرارية أرضية محسن. في نوفمبر 2023، بدأ المشروع تشغيل محطة تجريبية محسنة للطاقة الحرارية الأرضية، إذ تُضخ الكهرباء النظيفة إلى الشبكة المحلية التي تخدم مراكز بيانات جوجل في نيفادا. أظهر اختبار مشروع فيرفو جدوى تجارية، وسجل تدفقًا لمدة 30 يومًا أتاح إنتاج 3.5 ميجاواط من الكهرباء، وذلك من خلال أزواج من الآبار الأفقية، ودرجات حرارة خزانات تبلغ 191 درجة مئوية، ومراقبة فورية عبر الألياف الضوئية. وبناءً على هذا النجاح، وسعت جوجل الشراكة في عام 2024 من خلال التعاقد على 115 ميجاواط من خلال تعريفة التحول النظيف لشركة NV Energy، وهي خطوة من المرحلة التجريبية إلى الاعتماد التجاري الكامل من شأنها أن تعزز توليد الطاقة الحرارية الأرضية بما يقرب من 25 ضعفًا مقارنة بالمرحلة التجريبية.

3.7 السياسات الإقليمية المحددة

مع انتشار مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي عالميًا، تعتمد الحكومات والمؤسسات لوائح تركز على البيئة والاستدامة لمواءمة هذه المراكز مع أهداف المناخ، وذلك باستخدام معايير الأداء، مثل أهداف فعالية استخدام الطاقة، ومتطلبات تقسيم المناطق والإبلاغ، وأنظمة الحوافز. يوضح الجدول 8 السياسات والأطر الرئيسة المتعلقة بمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في الولايات المتحدة الأمريكية، والمملكة المتحدة، وسنغافورة، والصين، والإمارات العربية المتحدة، ودول أخرى.

الولايات المتحدة

تتطور سياسة الولايات المتحدة بشأن مراكز البيانات من خلال مزيج من المبادرات الفيدرالية، والتدابير على مستوى الولايات، والتخطيط الإستراتيجي. في فبراير 2024، قدم المشرعون الأمريكيون قانون الآثار البيئية للذكاء الاصطناعي، الذي يوجه وكالة حماية البيئة والمعهد الوطني للمعايير والتقنية لتقييم الأثر البيئي للذكاء الاصطناعي بالتعاون مع الجهات الأكاديمية والصناعية والمجتمع المدني المعنية. كذلك يتضمن القانون إطارًا طوعيًا للإبلاغ لمطوري ومشغلي الذكاء الاصطناعي كونها خطوة أولى نحو معايير قياس موحدة (Crawford 2024). ورغم عدم وجود تفويض فيدرالي ملزم بشأن الكفاءة، تقود الولايات المتحدة مبادرة الحكومة للحياد الصفري لخفض الانبعاثات التشغيلية الحكومية إلى الحياد الصفري بحلول عام 2050 (Office of the Federal Chief Sustainability Officer 2025).

الشكل 20. أبعاد سياسة مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي المستدامة

معايير كفاءة الطاقة

التحكم في أداء الطاقة من خلال حدود مؤشر فعالية استخدام الطاقة ومعايير البنية التحتية.

تحديد مواقع البنية التحتية ومرونة الشبكة

الحوافز أو القيود القائمة على الموقع لتقليل الضغط على الشبكات والمناطق الحضرية.

الشفافية والإفصاح وإعداد التقارير

الإفصاح الإلزامي عن استخدام الطاقة والانبعاثات وأداء الاستدامة.

إدارة الموارد المائية والبيئية

الاستجابة للجفاف وندرة المياه، والاستدامة الخاصة بكل موقع.

الطاقة المتجددة وحدود الكربون

التحول الإلزامي أو الطوعي لتبني عمليات منخفضة الكربون وتحقيق أهداف خفض الانبعاثات.

إعادة استخدام الطاقة واستعادة الحرارة

تشجيع استعادة الحرارة المهدرة وإعادة استخدامها أو دمجها مع نظام التدفئة المركزية.

ضوابط التنمية وحدود النمو

الحظر المؤقت، أو التعليق المؤقت، أو القيود على تصاريح التوسع في مناطق محددة.

إلى جانب ذلك، تربط خطة عمل الذكاء الاصطناعي الأمريكية، المنشورة في يوليو 2025، القدرة التنافسية للذكاء الاصطناعي بالقدرة على التوسع في البنية التحتية والطاقة واللوائح التنظيمية. ويقترح تسريع إجراءات الترخيص لمراكز البيانات بموجب قانون السياسة البيئية الوطنية (NEPA)، وتوفير المزيد من الأراضي الفيدرالية لمراكز البيانات الصديقة للبيئة، وتحديث الشبكة الوطنية لتلبية احتياجات الأحمال الضخمة للذكاء الاصطناعي، وإعطاء الأولوية لمصادر الطاقة مثل الطاقة النووية والطاقة الحرارية الأرضية لتشغيل البنية التحتية للجيل القادم من الذكاء الاصطناعي (White House 2025).

تختلف السياسات بين الولايات، فبعضها يقدم حوافز ضريبية لمراكز البيانات التي تستوفي معايير عالية لكفاءة الطاقة أو لشراء الطاقة المتجددة، بينما يفرض البعض الآخر قيودًا على انبعاثات مولدات الطاقة الاحتياطية أو استهلاك الطاقة في الشبكات ذات الموارد المحدودة.

على سبيل المثال، منذ عام 2014، تشترط ولاية كاليفورنيا على مراكز البيانات التي تزيد مساحتها عن 1000 قدم مربع الإبلاغ سنويًا عن مؤشر فعالية استخدام الطاقة، ويجب على أي مركز بيانات يزيد مؤشر فعالية استخدامه للطاقة عن 1.5 خفضه بنسبة 10% على الأقل سنويًا حتى يصل إلى 1.5 أو أقل (California Department of General Services 2014). ويضع مشروع قانون مجلس الشيوخ في تكساس رقم 6 (SB6) قواعد صارمة لكبار مستهلكي الكهرباء، بما فيها مراكز البيانات. يتطلب ذلك تخطيطًا شفافًا للأحمال، وتوفير طاقة احتياطية في الموقع، وتقاسم تكاليف تحديثات الشبكة. كذلك يخول مجلس موثوقية الكهرباء في تكساس (ERCOT) إدارة الأحمال أثناء حالات الطوارئ في الشبكة واستخدام إمكانيات الإيقاف عن بعد. والهدف هو حماية موثوقية الشبكة للمستهلكين السكنيين مع تشجيع نمو الأعمال في الوقت نفسه (Paz 2025).

المملكة المتحدة

تواصل المملكة المتحدة تشديد متطلبات الاستدامة لمراكز البيانات تماشيًا مع هدفها المتمثل في الوصول إلى الحياد الصفري في الانبعاثات بحلول عام 2050، والمنصوص عليه في قانون تغير المناخ البريطاني. وتعد اتفاقية تغير المناخ (Environment Agency 2022) آلية سياساتية رئيسة لقطاع مراكز البيانات، وهو برنامج طوعي يمنح إعفاءات ضريبية على الطاقة مقابل تحقيق أهداف الكفاءة، مع فرض عقوبات على عدم الامتثال. وتخضع مراكز البيانات الكبيرة لنظام تداول الانبعاثات في المملكة المتحدة (Department for Energy Security & Net Zero 2025)، الذي يحدد أسعار الانبعاثات ويقدم حوافز مالية لخفض كثافة الكربون.

ويلزم إطار عمل الإبلاغ المبسط عن الطاقة والكربون (Department for Education and Education and Skills Funding Agency 2025) المشغلين بالإفصاح علنًا عن استهلاكهم للطاقة وانبعاثات الكربون، مما يشجع على تبني ممارسات مستدامة مثل تكامل الطاقة المتجددة داخل الموقع وخارجه، وتقنيات التبريد الفعالة، وشراء الطاقة منخفضة الكربون.

الاتحاد الأوروبي

بذل الاتحاد الأوروبي جهودًا تنظيمية متقدمة لمواءمة مراكز البيانات مع أهداف الحياد المناخي وكفاءة الطاقة العالية بحلول عام 2030. ويفرض نظام الاتحاد الأوروبي لعام 2019 بشأن معايير التصميم البيئي للخوادم وتخزين البيانات معايير لكفاءة الطاقة واستخدام المواد المستدامة، من خلال تحسين التصميم لضمان المتانة وسهولة الإصلاح وإعادة التدوير (European Commission 2019).

ويلزم التوجيه الخاص بإعداد تقارير الاستدامة للشركات (CSRD)، الصادر عام 2022، الشركات الكبيرة والمدرجة في البورصة بالإبلاغ عن انبعاثات الغازات الدفيئة، بما فيها الانبعاثات المرتبطة بالبنية التحتية لتقنية المعلومات ومزودي البيانات من الأطراف الثالثة (European Parliament and Council of the European Union 2022). ويلزم توجيه كفاءة الطاقة (EED)، المعدل عام 2023، جميع مراكز البيانات التي تزيد قدرتها عن 500 كيلوواط بالإبلاغ عن مؤشرات الاستدامة التشغيلية، منها استهلاك الطاقة، وفعالية استخدام الطاقة، واستهلاك المياه، وحصة الطاقة المتجددة، وإعادة استخدام الحرارة المهدرة (European Parliament and Council of the European Union 2023). كذلك يلزم المشغلين بتطبيق أنظمة معتمدة لإدارة الطاقة، مثل معيار ISO 50001.

ويحدد قانون جديد للإفصاحات، الصادر عام 2024، نظامًا معياريًا لتصنيف الطاقة وقواعد للشفافية في النشر (European Commission 2024). وتشمل الجهود التكميلية للاتحاد الأوروبي ميثاق سلوك طوعي لكفاءة الطاقة في مراكز البيانات (Acton, Booth, and Paci 2025) يعزز أفضل الممارسات في هذا القطاع، وقواعد التمويل المستدام (European Development Finance Institutions 2024) (تصنيف الاتحاد الأوروبي) التي تُوجه الاستثمارات نحو المشروعات والمبادرات الصديقة للبيئة.

الصين

أطلقت الصين مبادرات رئيسة لترشيد استهلاك الطاقة في بنيتها التحتية الرقمية سريعة النمو. وتهدف مبادرة الحكومة "بيانات الشرق وحوسبة الغرب"، التي طرحت عام 2022، إلى نقل مراكز البيانات إلى المنطقة الغربية، للاستفادة من التبريد الطبيعي والطاقة النظيفة والموارد ذات التكلفة المنخفضة (Zhang et al. 2024). وتشمل هذه المبادرة إنشاء 10 مجموعات من مراكز البيانات عالية الكثافة، وموفرة للطاقة، ومنخفضة الكربون، في ثمانية مراكز رئيسة (Mengzhuo and Zhewen 2024). ومن المتوقع أن يسهم ذلك في خفض الانبعاثات من قطاع مراكز البيانات بنسبة تتراوح بين 16% و20% بحلول عام 2030 (Zhang et al. 2024).

وأصدرت الصين خطة العمل الوطنية للبنية التحتية الحاسوبية الجديدة في أكتوبر 2023، والتي تُعطي الأولوية لبناء أنظمة حوسبة "خضراء ومنخفضة الكربون" (Chinese Ministry of Industry and Information Technology et al. 2023). تتضمن الخطة اعتماد تقنيات تبريد متطورة، مثل التبريد الطبيعي والسائل، وتحسين كفاءة الحوسبة، مما يدعم معًا هدفي الصين المتعلقين بخفض انبعاثات الكربون: الوصول إلى ذروة انبعاثات الكربون بحلول عام 2030، وتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2060 (Xu et al. 2023). وفي منتصف عام 2024، حددت الصين أهدافًا محددة لمراكز البيانات: خفض متوسط مؤشر فعالية استخدام الطاقة إلى أقل من 1.5 بحلول عام 2025، ورفع معدل استخدام الطاقة المتجددة بنسبة 10% سنويًا (Xinhua 2024). وتُطبق هذه الأهداف من خلال معايير كفاءة الطاقة وتحديث المرافق القائمة.

أستراليا

اتخذت أستراليا خطوات مهمة نحو تعزيز استدامة إدارة مراكز البيانات. ويُعد النظام الوطني الأسترالي لتصنيف البيئة المبنية (NABERS)، الذي طبق لأول مرة عام 1998، النظام الوحيد في العالم الذي يلزم بتصنيف أداء الطاقة للمباني، بما فيها مراكز البيانات. بموجب نظام (NABERS)، تُصنف مراكز البيانات من نجمة واحدة إلى ست نجوم، بمقياس مؤشر فعالية استخدام الطاقة يتراوح بين 2.42 (نجمة واحدة) و1.07 (ست نجوم) (Spencer et al. 2025). وتنص إستراتيجية العمليات الحكومية لتحقيق الحياد الصفري على أنه بحلول يوليو 2025، يجب أن تعمل جميع أحمال العمل الحكومية الفيدرالية في مراكز البيانات المصنفة بخمس نجوم على الأقل، أي ما يعادل مؤشر فعالية استخدام الطاقة يبلغ نحو 1.4. ويعد هذا جزءًا من هدف أستراليا لتحقيق استخدام الطاقة المتجددة بنسبة 100% في جميع العمليات الحكومية بحلول عام 2030 (Ghadially 2025).

وفي عام 2025، عززت هيئة سوق الطاقة الأسترالية (AEMC) مرونة شبكة الكهرباء في الدولة من خلال اعتماد قواعد جديدة لتبسيط ربط الطاقة المتجددة وتحديد التزامات الأداء لكبار مستهلكي الطاقة، ولا سيما مراكز البيانات ومشروعات الهيدروجين. وتلزم هذه القواعد مراكز البيانات بالحفاظ على استقرارها أثناء اضطرابات الشبكة ودعم أمن النظام، مما يعكس حصتها المتزايدة من الطلب الوطني على الكهرباء (Ghadially 2025).

سنغافورة

نظرًا لندرة الأراضي وقيود الطاقة، تبنت سنغافورة نهجًا إستراتيجيًا يركز على الاستدامة في تطوير مراكز البيانات. في عام 2019، أوقفت إصدار تراخيص إنشاء مراكز البيانات الجديدة. ثم استؤنف إصدار التراخيص في عام 2022 من خلال إطار تجريبي يشجع المقترحات التي تظهر كفاءة استثنائية في استخدام الطاقة وأداءً متميزًا في مجال الاستدامة (Spen-cer et al. 2025). يجب أن تستوفي مراكز البيانات الجديدة حدًا أقصى لمؤشر فعالية استخدام الطاقة يبلغ 1.3، وأن تحصل على شهادة العلامة الخضراء البلاتينية (BCA-IMDA)، وهي أعلى فئة في نظام تصنيف المباني الخضراء في سنغافورة (Yeo 2022). حدثت سنغافورة معيارها الوطني لمراكز البيانات الخضراء في عام 2020 ليتوافق مع معيار ISO 50001 بهدف توحيد ممارسات إدارة الطاقة (Spencer et al. 2025).

في عام 2024، عُززت شهادة العلامة الخضراء لمراكز البيانات لتشمل معايير استدامة أوسع، مثل كفاءة الطاقة في عمليات تقنية المعلومات، وتكامل الأنظمة الذكية، وإستراتيجيات خفض الانبعاثات الكربونية، والاستعداد للطاقة المتجددة (Building and Construction Authority 2024). بالإضافة إلى ذلك، أطلقت (EMA) خطة مراكز البيانات الخضراء، التي تحدد طموح سنغافورة طويل الأمد للريادة في مجال مراكز البيانات منخفضة الكربون، والمهيأة للعمل في المناخ الاستوائي، والمجهزة للذكاء الاصطناعي، بما فيها ابتكارات مثل الجدولة الذكية للكربون والتحديثات المعيارية (Hui Tian 2024).

الإمارات العربية المتحدة

يعد مركز البيانات للحلول المتكاملة (مورو) في الإمارات العربية المتحدة نموذجًا إقليميًا لتطوير مراكز البيانات المستدامة. وافتتحت هيئة كهرباء ومياه دبي (DEWA) هذا المجمع بقدرة 100 ميجاواط في عام 2022، ويعمل بالكامل بالطاقة الشمسية من مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية، ليسجل بذلك رقمًا قياسيًا في موسوعة غينيس للأرقام القياسية بصفته أكبر مركز بيانات يعمل بالطاقة الشمسية في العالم (In-tel 2025). وقد تحقق ذلك بفضل معايير الاستدامة الاتحادية والمحلية الأساسية، مثل لوائح دبي للمباني الخضراء (Goverment of Dubai 2023)، الصادرة عام 2010 والتي استبدلت عام 2020 بنظام السعفات للمباني الخضراء، الذي وضع معايير أدنى للتصميم الأخضر وكفاءة الطاقة للمباني الجديدة، بما فيها البنية التحتية الرقمية.

وطورت أبوظبي نظام استدامة للتقييم بدرجات اللؤلؤ عام 2010، وهو إطار عمل يهدف إلى تعزيز التنمية الحضرية المستدامة وممارسات البناء، مع التركيز على الجوانب البيئية والاقتصادية والثقافية والاجتماعية (Abu Dhabi Urban Planning Council 2016). ويتكون هذا النظام من خمسة مستويات اعتماد وثماني فئات معيارية، تشمل كفاءة الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة.

وتدعم هذه السياسات مجتمعة مسار الإمارات العربية المتحدة نحو تحقيق الحياد الصفري بحلول عام 2050 لمراكز البيانات.

الدول الأخرى

تتبنى العديد من الدول لوائح محددة لإدارة تأثيرات مراكز البيانات على الطاقة والبيئة والمساحة. ينص قانون كفاءة الطاقة الألماني على أن جميع مراكز البيانات الجديدة يجب أن تحقق مؤشر فعالية استخدام الطاقة عند 1.2 بحلول عام 2026، بينما يجب أن تحقق المنشآت القائمة مؤشر فعالية استخدام الطاقة عند 1.5 بحلول عام 2027، وأن تعمل على تحسينه ليصل إلى 1.3 بحلول عام 2030، إلى جانب التحول الكامل إلى الطاقة المتجددة بحلول عام 2027. وطبقت ألمانيا معامل إعادة استخدام الطاقة، الذي يلزم المشغلين بإعادة استخدام ما لا يقل عن 10% من الطاقة (الحرارة المهدرة) بحلول عام 2026، على أن ترتفع هذه النسبة إلى 15% بحلول عام 2028 (Spencer et al. 2025). يلخص الجدول 8 أهداف مؤشر فعالية استخدام الطاقة في مختلف الدول.

تتبع كوريا الجنوبية نهجًا مختلفًا باستخدام الحوافز المتعلقة بالموقع لتوجيه تطوير مراكز البيانات بعيدًا عن المناطق التي تعاني من ازدحام الشبكة. تقدم الحكومة تخفيضًا بنسبة 50% في تكاليف الكهرباء لمراكز البيانات المنشأة خارج منطقة سيول الكبرى ذات الكثافة السكانية العالية، بهدف تخفيف الضغط على شبكة الكهرباء ودعم التنمية الإقليمية المتوازنة (Spencer et al. 2025).

تحدد السياسة الوطنية للبيانات والحوسبة السحابية في جنوب إفريقيا مناطق لمراكز البيانات المستقبلية، لضمان توافق التوسع مع قدرة الشبكة وأهداف تخطيط البنية التحتية الوطنية.

إلى جانب الحوافز القائمة على الموقع، تفرض عدة دول حظرًا مؤقتًا وسياسات ترخيص أكثر صرامة لإدارة نمو مراكز البيانات. ففي أيرلندا، عندما بلغت مراكز البيانات 21% من استهلاك الكهرباء الوطني بحلول عام 2020، فُرض حظر مؤقت عليها في منطقة دبلن حتى عام 2028 (Duncan et al. 2024). وفرضت هولندا حظرًا مؤقتًا في عام 2019 لإعادة

تقييم إستراتيجياتها المتعلقة بمراكز البيانات نظرًا للنمو السريع في البنية التحتية الرقمية. رُفعت هذه القيود لاحقًا بشروط معدلة فرضت معايير أكثر صرامة لكفاءة الطاقة واستخدام الأراضي.

وتؤثر العوامل البيئية، مثل استخدام المياه، أيضًا على السياسات. في تشيلي، ألغت السلطات جزئيًا ترخيص جوجل لبناء مركز بيانات بسبب مخاوف محلية بشأن ندرة المياه، وهي مشكلة رئيسة في منطقة تعاني من الجفاف. ويجري نقاش مماثل في أوروغواي، إذ حذرت منظمات مجتمعية وبيئية من استهلاك المياه للبنية التحتية واسعة النطاق المخطط إنشاؤها.

الجدول 8. متطلبات مؤشر فعالية استخدام الطاقة في دول محددة

المنطقة	مؤشر فعالية استخدام الطاقة (2023)	طراز وحدة معالجة الرسومات
الولايات المتحدة الأمريكية	~1.4 (متوسط)	-
أستراليا	1.44	1.4 بحلول عام 2025
الصين	1.56	1.5 بحلول عام 2025
فرنسا	1.36	خفض استهلاك الطاقة في المباني بنسبة 40% بحلول عام 2030
ألمانيا	1.42	1.2 (للمراكز الجديدة، 2026)، 1.3 (لجميع المراكز، 2030)
اليابان	1.53	≥ 1.4 منذ عام 2022
كاليفورنيا (الولايات المتحدة الأمريكية)	1.21	≥ 1.5 منذ عام 2014

المصادر: الوكالة الدولية للطاقة (2025)، و(Spencer et al. 2025)، و(Masanet et al. 2024).

08

الخاتمة والتوصيات

يعيد التطور السريع للذكاء الاصطناعي تشكيل المشهد الرقمي العالمي، إذ تعد مراكز البيانات محور هذا التحول. تتطلب أحمال العمل المدعومة بالذكاء الاصطناعي أنظمة حوسبة قوية ومتينة، وطاقة موثوقة، وتصميمًا مستدامًا، مما يخلق فرصًا وتحديات للدول الساعية إلى بناء ريادتها في هذا العصر الجديد.

بالنسبة للمملكة العربية السعودية، يمثل هذا التوجه فرصة فريدة لتصبح مركزًا عالميًا للبنية التحتية الجاهزة للذكاء الاصطناعي. تستفيد المملكة من رؤية وطنية واضحة، وطاقة منخفضة التكلفة، ودعم حكومي قوي. وتظهر المشروعات الضخمة الجارية حاليًا، مثل مصانع الذكاء الاصطناعي التابعة لشركة هيوماين ومجمع أوكساجون في نيوم، مدى سرعة تقدم هذا القطاع. إذا تحققت الخطط الحالية، يمكن للمملكة الاستحواذ على حصة كبيرة من القدرة الحاسوبية العالمية للذكاء الاصطناعي بحلول أوائل ثلاثينيات القرن الحالي، مما يدعم مباشرة الطموحات الرامية إلى دفع عجلة التحول الرقمي وتنويع الاقتصاد.

مع ذلك تظهر هذه الدراسة أيضًا أن الطريق لا يخلو من المخاطر. فمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي تشكل ضغطًا هائلًا على شبكات الكهرباء وموارد المياه. في ظل سيناريو النمو المرتفع، قد يرتفع الطلب على الكهرباء في مراكز البيانات إلى أكثر من عشرة أضعاف بحلول عام 2030، ليصل إلى 11% من إجمالي الطلب الوطني على الكهرباء. ودون ممارسات مستدامة، قد يؤدي هذا التوسع إلى زيادة الانبعاثات واستنزاف الموارد الطبيعية. من خلال تبني أنظمة تبريد متطورة ودمج الطاقة المتجددة، يمكن خفض استهلاك الكهرباء بنسبة تقارب 13% وتقليل انبعاثات الكربون بنسبة 68%، ومن ثم تحقيق النمو دون المساس بالأهداف البيئية.

كذلك يتأثر الوضع الاقتصادي بالقدرة التنافسية من حيث التكلفة. فبفضل الكهرباء بأسعار معقولة والموقع المتميز، تتمتع المملكة العربية السعودية بميزة من حيث التكلفة. وللحفاظ على هذه الميزة، يجب على المملكة مواصلة الاستثمار في كفاءة الطاقة، وتطوير القوى العاملة، والحفاظ على تعريفاتها التنافسية. وتؤكد المخاطر العالمية، مثل نقص الرقائق المتطورة أو التوترات الجيوسياسية، ضرورة التخطيط الدقيق وإقامة الشراكات المتنوعة.

بوجه عام، تقف المملكة العربية السعودية على مفترق طرق. من خلال الجمع بين نقاط قوتها في مجال الطاقة والممارسات المستدامة والاستثمار المتواصل في الابتكار، تستطيع المملكة بناء منظومة مرنة لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، تدعم طموحاتها الاقتصادية وتسهم في التقدم الرقمي العالمي. ويعتمد النجاح على تحقيق التوازن بين ثلاث أولويات: ضمان إمدادات طاقة نظيفة وموثوقة، وبناء بنية تحتية رقمية عالمية المستوى، وتضمين الاستدامة في كل مرحلة من مراحل التطوير.

ولضمان القدرة التنافسية العالمية والتوسع المستدام لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية، بالإضافة إلى تحقيق التوازن بين هذه الأولويات الثلاث، ينبغي النظر في عدة إجراءات ضمن أربعة محاور: الاستثمار، والابتكار والتطوير، والعمليات، والحوكمة والسياسات.

الاستثمار

- **الاستثمار في التقنيات الفعالة:** دعم الأجهزة، مثل وحدات معالجة الرسومات من الجيل التالي والخوادم عالية الكفاءة التي توفر قدرة حاسوبية أكبر لكل وحدة طاقة.

- **إنشاء مناطق استثمارية مهيأة للذكاء الاصطناعي:** تجهيز مواقع مخصصة مزودة بوصلات شبكة موثوقة، ضمن حزمة من الحوافز المالية للمستثمرين الملتزمين بالاستدامة واستخدام مصادر الطاقة المتجددة.

الابتكار والتطوير

- **دعم البحث والتطوير المحلي:** إنشاء مراكز بحثية وطنية متخصصة في مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي، مما يتيح التطوير المحلي لحلول التبريد المتقدمة، وحلول الكفاءة، والبنية التحتية المستدامة المصممة خصيصًا لتلبية احتياجات المملكة العربية السعودية.

- **تعزيز شراكات الابتكار:** إقامة شراكات بين الجامعات ومراكز الأبحاث والشركات الدولية لابتكار حلول جديدة لأنظمة وبنية تحتية فعالة للذكاء الاصطناعي.

العمليات التشغيلية

- **إعطاء الأولوية للاستخدام المبكر:** تعظيم الاستفادة من مراكز البيانات الجديدة في المراحل الأولى، إذ تكون قيمتها الاقتصادية في أعلى مستوياتها خلال السنوات الأولى من الاستخدام والتشغيل.

- **تعظيم الاستخدام الفعال:** إلزام المشغلين بالحفاظ على مستوى عالٍ من الاستخدام على الأقل من خلال تطبيق إستراتيجيات جدولة أحمال العمل على مهام مرنة، مثل تدريب الذكاء الاصطناعي خلال ساعات خارج أوقات الذروة، لتقليل وقت تعطل البنية التحتية.

- **تبني الممارسات المستدامة:** تشجيع المشغلين على إعادة تدوير الحرارة، وإعادة استخدام المياه، واعتماد إستراتيجيات الموارد الدائرية حيثما أمكن ذلك.

الحوكمة والسياسات

- **الحفاظ على القدرة التنافسية من خلال المعايير:** الإبقاء على تعريفات منخفضة للكهرباء، مع ربط الحوافز والتراخيص بمعايير الكفاءة والالتزامات تجاه مصادر الطاقة المتجددة.

- **تحديد أهداف الكفاءة:** اعتماد معايير واقعية (مثل: مؤشر فعالية استخدام الطاقة ≥ 1.5 بحلول عام 2030) مصممة خصيصًا لتلبية احتياجات المملكة العربية السعودية وظروفها.

- **التوافق مع التحول في قطاع الطاقة:** تنسيق توسيع مراكز البيانات مع استثمارات الشبكة الوطنية في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وتخزين الطاقة ونقلها، لضمان إمداد نظيف وموثوق للطاقة.

المراجع

Abu Dhabi Urban Planning Council. 2016. *The Pearl Rating System for Estidama: Public Realm Rating System: Design & Construction, Version 1.0*. December. Abu Dhabi Urban Planning Council. https://www.dmt.gov.ae/-/media/Project/DMT/DMT/E-Library/0001-Manuals/PRRS/PRRS-Version-10.pdf.

Acton, Mark, John Booth, and Daniele Paci. 2025. "2025 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency." JRC Publications Repository. https://doi.org/10.2760/9449356.

Amazon. 2025. "AWS and HUMAIN Announce a More than $5B Investment to Accelerate AI Adoption in Saudi Arabia and Globally." May 13. https://www.aboutamazon.com/news/company-news/amazon-aws-humain-ai-investment-in-saudi-arabia.

Aterio. 2025. "Power Capacity Estimation ML Model." July 2. https://knowledge.aterio.io/data-products/us-data-centers/our-modeling-approach/power-capacity-estimation-ml-model.

Bellini, Emiliano. 2021. "Saudi Arabia's Second PV Tender Draws World Record Low Bid of $0.0104/kWh." *Pv Magazine International*. https://www.pv-magazine.com/2021/04/08/saudi-arabias-second-pv-tender-draws-world-record-low-bid-of-0104-kwh/.

Bizo, Daniel. 2023. "Global PUEs – Are They Going Anywhere?" *Uptime Institute Journal*. https://journal.uptimeinstitute.com/global-pues-are-they-going-anywhere/.

Building and Construction Authority (BCA) and Infocomm Media Development Authority (IMDA). 2024. *GMDC-2024: BCA-IMDA Green Mark for Data Centres (Beta Version)*. https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-buildsg/sustainability/20241008_gmdc2024_ver1.pdf?sfvrsn=407a219c_0.

Bureau of Experts at the Council of Ministers. 2021. "Personal Data Protection Law." Laws.Boe. https://laws.boe.gov.sa/boelaws/laws/lawdetails/b7cfae89-828e-4994-b167-adaa00e37188/1.

Bureau of Experts at the Council of Ministers. 2022. "Telecommunications and IT Act." Laws.Boe. https://laws.boe.gov.sa/BoeLaws/Laws/LawDetails/ae610645-e094-48ef-814e-aeb4009d244f/1.

California Department of General Services. 2014. "Requirements of Data Centers and Server Rooms - 1820.3." https://www.dgs.ca.gov/Resources/SAM/TOC/1800/1820-3.

CBRE Group Inc. 2025. 2025 Global Data Center Investor Intentions Survey. https://mktgdocs.cbre.com/2299/b889db99-6208-4f7f-97a8-55ad8ac1081f-1999143505/Global_Data_Center_Investor_In.pdf.

Chinese Ministry of Industry and Information Technology, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission, Ministry of Education, People's Bank of China, and The State-Owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. 2023. *Action Plan for the High-Quality Development of Computing Power Infrastructure*. CSET. https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0573_compute_plan_EN.pdf.

Citi Group. 2024. "Data Center Powerplay: The Chips Have to Go Somewhere." May 29. https://www.citigroup.com/global/insights/data-center-powerplay-the-chips-have-to-go-somewhere.

Clemmons, Elisabeth, and Sean Graham. 2025. *The Macroeconomic Impacts and Implications of Datacenters: A Comprehensive Assessment*. IDC. https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US53243025.

Climatiq. 2021. "Emission Factor: Electricity Supplied from Grid – Saudi Arabia." https://www.climatiq.io/data/emission-factor/d642f6c8-32d7-4749-ac48-6463f30e0ae7.

Communications, Space and Technology Commission (CST). 2023. "Provision of Data Centers Services Regulation." https://www.cst.gov.sa/en/regulations-and-licenses/regulations/Document-1546.

Communications, Space and Technology Commission (CST). 2024a. *Annual Report 2024*. https://www.cst.gov.sa/en/knowledge-center/reports.

Communications, Space and Technology Commission (CST). 2024b. "CST Announces That the 'Data Center Services Regulations' Document Has Entered Into Force." https://www.cst.gov.sa/en/media-center/news/CST-Announces-that-the-Data-Center-Services-Regulations-Document-has-Entered-Into-Force.

Crawford, Kate. 2024. "Generative AI Is Guzzling Water and Energy." Nature. https://www.nature.com/articles/d41586-024-00478-x.pdf.

Data Center Map. n.d. "Middle East Data Centers – 298 Facilities from Operators." https://www.datacentermap.com/middle-east/.

Department for Education and Education and Skills Funding Agency. 2025. "Streamlined Energy and Carbon Reporting (SECR) for Academy Trusts." GOV.UK. https://www.gov.uk/government/publications/streamlined-energy-and-carbon-reporting-secr-for-academy-trusts.

Department for Energy Security & Net Zero. 2025. "Participating in the UK ETS." GOV.UK. https://www.gov.uk/government/publications/participating-in-the-uk-ets/participating-in-the-uk-ets.

Desroches, Clément, Martin Chauvin, Louis Ladan, Caroline Vateau, Simon Gosset, and Philippe Cordier. 2025. "Exploring the Sustainable Scaling of AI Dilemma: A Projective Study of Corporations' AI Environmental Impacts." arXiv:2501.14334. Preprint, arXiv, January 27. https://arxiv.org/abs/2501.14334.

Diamant, Adam. 2022. *24/7 Carbon Free Energy: Matching Carbon Free Energy Procurement to Hourly Electric Load*. Electric Power Research Institute (EPRI). https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002025290/0/Product.

Donnellan, Douglas. 2023. *Uptime Institute Data Center and IT Spending Survey 2022*. Uptime Institute. https://datacenter.uptimeinstitute.com/rs/711-RIA-145/images/DCSpendingSurvey.Report.01032023.pdf.

Duncan, Glen, Muhd Syafiq, Daniel Thorpe, and Kari Beets. 2024. *Data Centers 2024 Global Outlook*. JLL. https://leadsdell.com/wp-content/uploads/2024/09/jll-data-center-outlook-global-2024.pdf.

Egbert, Michael. 2025. "Oracle's Commitment to Saudi Arabia and President Trump's Vision for Global Prosperity." *Oracle News*. https://www.oracle.com/news/announcement/oracles-commitment-to-saudi-arabia-and-president-trumps-vision-for-global-prosperity-2025-05-13/.

Electric Power Research Institute (EPRI). 2024. *Powering Intelligence: Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption*. https://www.epri.com/research/products/3002028905.

England, Andrew, and Ahmed Al Omran. 2025. "Saudi Arabia Seeks to Use Financial Might to Muscle into Global AI Industry." *Financial Times*, May 28. https://www.ft.com/content/176c7859-fdda-40d2-92a5-15d570f7accf.

Environment Agency. 2022. "Climate Change Agreements." GOV.UK. https://www.gov.uk/guidance/climate-change-agreements--2.

European Commission. 2019. *Commission Regulation (EU) 2019/2020. Official Journal of the European Union*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2020/oj/eng.

European Commission. 2024. "Commission Notice on the Interpretation and Implementation of Certain Legal Provisions of the Disclosures Delegated Act." *Official Journal of the European Union*. https://eur-lex.europa.eu/eli/C/2024/6691/oj/eng.

European Commission. 2025. "Commission Sets Course for Europe's AI Leadership with an Ambitious AI Continent Action Plan." https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_1013.

European Development Finance Institutions. 2024. *The EU Sustainable Finance Rules and Their Implications for Impact Investors*. https://edfi.eu/wp-content/uploads/2024/10/EDFI-Sustainable-Finance-Mapping-Report-FINAL.pdf.

European Parliament and Council of the European Union. 2022. *Directive (EU) 2022/2464 Of The European Parliament and of the Council*. European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng.

European Parliament and Council of the European Union. 2023. *Directive (EU) 2023/1791 on Energy Efficiency and Amending Regulation (EU) 2023/955 (Recast) (Text with EEA Relevance)*. European Union. http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng.

Fioretti, Lapo, Carla La Croce, Andrea Siviero, and Elisabeth Clemmons. 2024. *The Global Impact of Artificial Intelligence on the Economy and Jobs: AI Will Steer 3.5% of GDP in 2030*. IDC. https://shorturl.at/I2BXc.

Fleck, Anna. 2024. "Which Countries Have the Most Data Centers?" Statista Daily Data, September 20. https://www.statista.com/chart/24149/data-centers-per-country.

General Authority for Statistics (GASTAT). 2023. *Electrical Energy Statistics 2023: Total Energy Delivered to Grid Increases by Approximately 5% in 2023*. Riyadh, Saudi Arabia: General Authority for Statistics. https://stats.gov.sa/documents/20117/2435281/Electrical+Energy+Statistics+2023+-+EN.pdf.

Ghadially, Farokh. 2025. "New Data Centre Rules Could Set a Global Standard." *Sustainability Matters Magazine*. https://www.sustainabilitymatters.net.au/content/sustainability/article/new-data-centre-rules-could-set-a-global-standard-545515027.

Goldman Sachs. 2024. "AI is Poised to Drive 160% Increase in Data Center Power Demand." https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-poised-to-drive-160-increase-in-power-demand.

Google. 2025. *Google Environmental Report 2025*. https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2025-environmental-report.pdf.

Google Cloud. 2025. "Google Cloud and PIF Advance AI Hub in Saudi Arabia." Google Cloud Press Corner. https://www.googlecloudpresscorner.com/2025-05-13-Google-Cloud-and-PIF-Advance-AI-Hub-in-Saudi-Arabia.

Goverment of Dubai. 2023. "Al Sa'fat – Dubai Green Building System." Dubai Municipality. https://www.dm.gov.ae/municipality-business/al-safat-dubai-green-building-system/.

Grabein, Aaron, and Liz Stine. 2025. "AMD and HUMAIN Form Strategic, $10B Collaboration to Advance Global AI." AMD. https://ir.amd.com/news-events/press-releases/detail/1250/amd-and-humain-form-strategic-10b-collaboration-to-advance-global-ai.

Graham, Sean, Peter Rutten, and Olga Yashkova. 2024. *AI Datacenter Capacity, Energy Consumption, and Carbon Emission Projections*. IDC: The Premier Global Market Intelligence Company.

Green, Alastair, Humayun Tai, Jesse Noffsinger, Pankaj Sachdeva, Arjita Bhan, and Raman Sharma. 2024. *How Data Centers and the Energy Sector Can Sate AI's Hunger for Power*. McKinsey. https://www.mckinsey.com/industries/private-capital/our-insights/how-data-centers-and-the-energy-sector-can-sate-ais-hunger-for-power.

Greene-Dewasmes, Ginelle, Michael Higgins, and Thapelo Tladi. 2025. *Artificial Intelligence's Energy Paradox: Balancing Challenges and Opportunities*. World Economic Forum (WEF) in collaboation with Accenture. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Artificial_Intelligences_Energy_Paradox_2025.pdf.

Groq. 2025. "Saudi Arabia Announces $1.5 Billion Expansion to Fuel AI-Powered Economy with Groq." https://groq.com/blog/saudi-arabia-announces-1-5-billion-expansion-to-fuel-ai-powered-economy-with-groq.

Hoff, Brandon. 2024. "Semiconductor Spend for Datacenter Infrastructure and a Breakout for AI Networking." International Data Corporation (IDC). https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US52018224.

Houlihan Lokey. 2025. *Real Estate Highlight: Navigating Market Changes in the Data Center Sector*. https://cdn.hl.com/pdf/2025/real-estate-highlight-data-centers-march-2025.pdf.

Hui Tian, Yuen. 2024. *Charting Green Growth Pathways at Scale for Data Centres in Singapore*. Infocomm Media Development Authority (IMDA). https://isomer-user-content.by.gov.sg/38/c49f426a-8053-4c7f-bbaa-8437b743a18f/files-Speeches%202024-1__Factsheet_IMDA_Green_DC_Roadmap.pdf.

HUMAIN. 2025. "Saudi Arabia's New AI Enterprise, HUMAIN, Joins Forces with AMD and Cisco to Launch Groundbreaking AI Infrastructure Collaboration." May 13. https://www.humain.ai/en/news/humain-and-amd-and-cisco/.

IBM. 2025. "What Is an AI Data Center?" https://www.ibm.com/think/topics/ai-data-center.

Intel. 2025. *Case Study: World's Largest Green Data Center*. https://www.intel.com/content/dam/www/central-libraries/us/en/documents/2025-04/moro-hub-case-study.pdf.

International Data Corporation. 2024. "IDC's Worldwide AI and Generative AI Spending – Industry Outlook | IDC Blog." https://blogs.idc.com/2024/08/21/idcs-worldwide-ai-and-generative-ai-spending-industry-outlook/.

International Energy Agency (IEA). 2024. *Emissions Factors 2024*. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2024.

International Energy Agency (IEA). 2025a. *Energy and AI*. IEA, Paris. https://www.iea.org/reports/energy-and-ai.

International Energy Agency (IEA). 2025b. *Building the Future Transmission Grid*. IEA, Paris. https://www.iea.org/reports/building-the-future-transmission-grid.

Istitlaa. 2025. "Global AI Hub Law." https://istitlaa.ncc.gov.sa/en/Transportation/citc/globalailaw/Pages/default.aspx.

Jamison, Stephanie, Sanjay Podder, Adam Burden, Bhaskar Ghosh, Senthil Ramani, Shalabh Kumar Singh, and Matthew Robinson. 2025. *Powering Sustainable AI.* Accenture. https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/corporate/corporate-initiatives/sustainability/document/Powering-Sustainable-AI.pdf.

Kamiya, George, and Vlad C Coroamă. 2025. *Data Centre Energy Use: Critical Review of Models and Results.* IEA-4E. https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/05/Data-Centre-Energy-Use-Critical-Review-of-Models-and-Results.pdf.

King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC). 2023. *Modeling and Projecting Regional Electricity Demand for Saudi Arabia.* June 5. https://www.kapsarc.org/our-offerings/publications/modeling-and-projecting-regional-electricity-demand-for-saudi-arabia/.

King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC). 2025. "Saudi Arabia Renewables Tracker." https://apps.kapsarc.org/appboard/renewableprojects.

Kristiansen Nøland, Jonas, Martin Hjelmeland, and Magnus Korpås. 2024. "Will Energy-Hungry AI Create a Baseload Power Demand Boom?" *IEEE Access* 12: 157824–157836. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3440217.

Levine, Hannah. 2025. "There's a Labor Shortage at Data Centers." JLL. https://www.jll.com/en-us/insights/theres-a-labor-shortage-at-data-centers.html.

Liou, Joanne. 2023. "What Are Small Modular Reactors (SMRs)?" IAEA, September 13. https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs.

Lohn, Andrew, and Micah Musser. 2022. *AI and Compute.* Center for Security and Emerging Technology (CSET). https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/AI-and-Compute-How-Much-Longer-Can-Computing-Power-Drive-Artificial-Intelligence-Progress_v2.pdf.

Malik, Saf. 2025. "What Is Driving Saudi Arabia's $21bn Data Centre Investment Surge?" Capacity Media, March 10. https://www.capacitymedia.com/article/2eir2o1uu11xqfdsdwrgg/news/what-is-driving-saudi-arabias-21bn-data-centre-investment-surge.

Masanet, Eric, Nuoa Lei, and Jonathan Koomey. 2024. "How Will the Electricity Use of AI Data Centers Evolve? To Answer This Question, Energy Analysts Need Better Data." Preprint, ResearchGate. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.11203.00801.

Mengzhuo, Liu, and Lin Zhewen. 2024. "China's East Data West Computing Initiative – Power Infrastructure as the Next Big Thing in the Global AI Race." Premia Partners. https://www.premia-partners.com/sc/insight/china-s-east-data-west-computing-initiative-power-infrastructure-as-the-next-big-thing-in-the-global-ai-race.

Meta. 2024. *For a Better Reality: 2024 Sustainability Report.* https://sustainability.atmeta.com/wp-content/uploads/2024/08/Meta-2024-Sustainability-Report.pdf.

Meta. 2025. *Meta's Odense Data Centre.* Meta. https://datacenters.atmeta.com/wp-content/uploads/2025/02/Metas-Odense-Data-Center.pdf.

Ministry of Communications and Information Technology (MCIT). 2020. *KSA Cloud First Policy.* https://www.mcit.gov.sa/sites/default/files/cloud_policy_en.pdf.

Ministry of Communications and Information Technology (MCIT). 2023. *Annual Report 2022.* https://www.mcit.gov.sa/sites/default/files/2023-07/MCIT_Annual%20Report_2022_En-Web_0.pdf.

Ministry of Communications and Information Technology (MCIT). 2024. *Annual Report 2024.* https://shorturl.at/73psX.

Mytton, David. 2021. "Data Centre Water Consumption." *NPJ Clean Water* 4 (1): 11. https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w.

Narasimhan, Sridhar, Archit Johar, Jay Motani, Santiango Lavin, Abhilash Jain, and Shiven Mahajan. 2025. "AI Data Center Location Attractiveness Index." Kearney. https://www.kearney.com/industry/technology/article/ai-data-center-location-attractiveness-index.

National Cybersecurity Authority (NCA). 2018. *National Cybersecurity Strategy.* https://nca.gov.sa/national_cybersecurity_strategy-en.pdf.

NEOM. 2025. "DataVolt Signs Agreement with NEOM to Design and Develop the Region's First Truly Sustainable, Net-Zero AI Factory Campus in Oxagon ." https://www.neom.com/en-us/newsroom/datavolt-signs-agreement-with-neom.

Noffsinger, Jesse, Mark Patel, Pankaj Sachdeva, and Arjita Bhan. 2025. *The Cost of Compute: A $7 Trillion Race to Scale Data Centers*. McKinsey. https://shorturl.at/H07zW.

NVIDIA Corporation. 2025a. "HUMAIN and NVIDIA Announce Strategic Partnership to Build AI Factories of the Future in Saudi Arabia." NVIDIA Newsroom, May 13. https://nvidianews.nvidia.com/news/humain-and-nvidia-announce-strategic-partnership-to-build-ai-factories-of-the-future-in-saudi-arabia.

NVIDIA Corporation. 2025b. *Blackwell Ultra Datasheet*. NVIDIA. https://resources.nvidia.com/en-us-gpu-resources/blackwell-ultra-datasheet.

Office of the Federal Chief Sustainability Officer. 2025. "Global Initiatives." https://www.sustainability.gov/archive/biden46/federalsustainabilityplan/global-initiatives.html.

Paz, Cassia. 2025. "Texas Senate Bill 6: Data Centers Generator Fuel Plan Becomes Even More Critical." Mansfield. https://mansfield.energy/2025/07/10/texas-senate-bill-6-data-centers-generator-fuel-plan-becomes-even-more-critical.

Public Investment Fund (PIF). 2024. "PIF and Google Cloud to Create Advanced AI Hub in Saudi Arabia." https://www.pif.gov.sa/en/news-and-insights/press-releases/2024/pif-and-google-cloud-to-create-advanced-ai-hub-in-saudi-arabia/.

Qualcomm. 2025. "Qualcomm and HUMAIN to Develop State-of-the-Art AI Data Centers to Deliver Cloud-to-Edge Hybrid AI Services." May 13. https://www.qualcomm.com/news/releases/2025/05/qualcomm-and-humain-to-develop-state-of-the-art-ai-data-centers-.

Rahman, Robi. 2024. "Leading ML Hardware Becomes 40% More Energy-Efficient Each Year." Epoch AI. https://epoch.ai/data-insights/ml-hardware-energy-efficiency.

Saudi & Middle East Green Initiatives. 2025. "SGI Target: Reduce Carbon Emissions by 278 mtpa by 2030." https://www.sgi.gov.sa/about-sgi/sgi-targets/reduce-carbon-emissions.

Saudi Data and AI Authority (SDAIA). 2025a. "National Strategy for Data & AI." https://sdaia.gov.sa/en/SDAIA/SdaiaStrategies/Pages/NationalStrategyForDataAndAI.aspx.

Saudi Data and AI Authority (SDAIA). 2025b. "Saudi Data & AI Authority and Vision 2030." https://sdaia.gov.sa/en/SDAIA/SdaiaStrategies/Pages/sdaiaAnd2030Vision.aspx.

Saudi Electricity Company (SEC). 2025. *Earnings Release – Q1 2025*. May 14. https://www.se.com.sa/-/media/sec/Investors/Earning-Reports/earnings-release-q1-2025.ashx.

Saudi Electricity Regulatory Authority (SERA). 2025. "Consumption Tariff." https://sera.gov.sa/en/consumer/electric-tariff/electric-tariff-categories/consumption-tariff.

Saudi Market Research Consulting Firm. 2025. "Saudi AI Infrastructure Scaling at 30.5% CAGR by 2030." Saudi Market Research | Consulting Firm, July 10. https://saudimarketresearchconsulting.com/insights/articles/saudi-ai-infrastructure-scaling-at-30-5-cagr-by-2030.

Saudi Press Agency (SPA). 2024. "Minister of Energy Inaugurates Saudi Smart Grid Conference." https://www.spa.gov.sa/en/N2228611.

Saudi Telecom Company (STC). 2024. *Sustainability Report 2024*. Riyadh, Saudi Arabia: stc. https://www.stc.com/content/dam/groupsites/stc-annual-report-2024/assets/img/pdfs/sustainability-unsdgs.pdf.

S&P Global Inc. 2025. https://www.marketplace.spglobal.com/en/datasets.

Sharma, Lakshmee. 2024. "AI Data Centers Threaten Global Water Security." Lawfare, December 19. https://www.lawfaremedia.org/article/ai-data-centers-threaten-global-water-security.

Shehabi, Arman, Dale Sartor, Alex Hubbard, Alex Newkirk, Nuoa Lei, Md Abu Bakar Siddik, Billie Holecek, Jonathan Koomey, Eric Masanet, and Dale Sartor. 2024. *2024 United States Data Center Energy Usage Report*. Lawrence Berkeley National Laboratory. https://doi.org/10.71468/P1WC7Q.

Shiwani, Amit, Hani Abbasi, and Alistair Levack. 2025. "Unlocking the Data Centre Opportunity in the Middle East." PwC. https://www.pwc.com/m1/en/media-centre/articles/unlocking-the-data-centre-opportunity-in-the-middle-east.html.

Singla, Alex, Alexander Sukharevsky, Lareina Yee, Michael Chui, and Bryce Hall. 2025. *The State of AI: Global Survey*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business functions/quantumblack/our insights/the state of ai/2025/the-state-of-ai-how-organizations-are-rewiring-to-capture-value_final.pdf.

Solomon, Steve. 2024. “Sustainable By Design: Next-Generation Datacenters Consume Zero Water For Cooling.” The Microsoft Cloud Blog, December 9. Microsoft. https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-cloud/blog/2024/12/09/sustainable-by-design-next-generation-datacenters-consume-zero-water-for-cooling/.

Spencer, Thomas, and Siddharth Singh. 2024. “What the Data Centre and AI Boom Could Mean for the Energy Sector.” https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector.

Spencer, Thomas, Siddharth Singh, Laura Cozzi, Davide D’Ambrosio, Hugh Hopewell, Vincent Jacamon, Alex Martinos, Nicholas Salmon, and Brent Wanner. 2025. *Energy and AI*. International Energy Agency (IEA). https://iea.blob.core.windows.net/assets/601eaec9-ba91-4623-819b-4ded331ec9e8/EnergyandAI.pdf.

Spindler, Wesley, Luna Atamian Hahn-Petersen, and Sadaf Hosseini. 2024. “Why Circular Water Solutions Are Key to Sustainable Data Centres.” World Economic Forum (WEF). https://www.weforum.org/stories/2024/11/circular-water-solutions-sustainable-data-centres/.

Springer, Cecilia, and Ali Hasanbeigi. 2025. *Data Centers in the AI Era: Energy and Emissions Impacts in the U.S. and Key States.* San Francisco, CA: Global Efficiency Intelligence, LLC. https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/67ab1779a68f9a35968e51f9/1739265952473/GEI+data+centers+report-+1.15.2025+clean-E.4.pdf.

Srivathsan, Bhargs, Marc Sorel, Pankaj Sachdeva, Arjita Bhan, Haripreet Batra, Raman Sharma, Rishi Gupta, and Surbhi Choudhary. 2024. *AI Power: Expanding Data Center Capacity to Meet Growing Demand.* McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/ai-power-expanding-data-center-capacity-to-meet-growing-demand.

Stansbury, Martin, Kelly Marchese, Kate Hardin, and Carolyn Amon. 2025. “Can US Infrastructure Keep up with the AI Economy?” Deloitte. https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/data-center-infrastructure-artificial-intelligence.html.

Stokols, Andrew. 2025. “Energy and AI Coordination in the ‘Eastern Data Western Computing’ Plan.” The Jamestown Foundation, March 8. https://jamestown.substack.com/p/energy-and-ai-coordination-in-the.

Synergy Research Group. 2025. “The World’s Total Data Center Capacity Is Shifting Rapidly to Hyperscale Operators.” https://www.srgresearch.com/articles/the-worlds-total-data-center-capacity-is-shifting-rapidly-to-hyperscale-operators.

Techusiness. 2025. *AMD Advancing AI 2025 Keynote By CEO of Humain Tareq Amin*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=8UG92qu0Krg.

Tohme, Hani, Adel Belcaid, Lukas de Sonnaville, Arianna Molino, Rita Carvalho, and Hale De Vera. 2025. “A More Regenerative Digital Age: The Middle East Data Center Opportunity.” Kearney. https://www.kearney.com/service/sustainability/article/a-greener-digital-age-the-middle-east-data-center-opportunity.

Tonomus. 2025. *Compute.* https://tonomus.neom.com/en-us/what-we-do/compute.html.

U.S. Department of Commerce. 2025. “UAE and US Presidents Attend the Unveiling of Phase 1 of New 5GW AI Campus in Abu Dhabi.” https://www.commerce.gov/news/press-releases/2025/05/uae-and-us-presidents-attend-unveiling-phase-1-new-5gw-ai-campus-abu.

U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). 2014. *Early Markets: Fuel Cells for Backup Power.* https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/early-markets-fuel-cells-backup-power.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2024. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2022.* EPA 430-R-24-004. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2022.

Van Zandt, Brooke. 2023. “A Decade of Greener Computing Blooms Inside NREL’s Data Center.” National Renewable Energy Laboratory (NREL) News & Feature Stories, August 2. https://www.nrel.gov/news/detail/program/2023/a-decade-of-greener-computing-blooms-inside-nrels-data-center.

Wang, James. 2024. “Cerebras CS-3 vs. Nvidia B200: 2024 AI Accelerators Compared.” Cerebras, April 12. https://www.cerebras.ai/blog/cerebras-cs-3-vs-nvidia-b200-2024-ai-accelerators-compared.

The White House. 2025. *Americas AI Action Plan.* https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/07/Americas-AI-Action-Plan.pdf.

Xinhua. 2024. “China Sets Green Targets for Data Centers.” The State Council of the People’s Republic of China. https://english.www.gov.cn/news/202407/24/content_WS66a0b167c6d0868f4e8e96ba.html.

Xu, Jing, Liping Li, Bin Zhang, Mingsong Hao, and Fengqiao Mei. 2023. “‘Dual Carbon Goals’ Enhances Policy Integration: Analysing Recent Changes in China’s National Climate Policy.” *Journal of Asian Public Policy* 18(3): 1–18. https://doi.org/10.1080/17516234.2024.2305320.

Yeo, Amelia. 2022. “Singapore New Data Centers.” The International Trade Administration, August 11. https://www.trade.gov/market-intelligence/singapore-new-data-centers.

Zhang, Ning, Huabo Duan, Yuru Guan, Ruichang Mao, Guanghan Song, Jiakuan Yang, and Yuli Shan. 2024. “The ‘Eastern Data and Western Computing’ Initiative in China Contributes to Its Net-Zero Target.” *Engineering* 52: 256–261. https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.08.010.

شكر وتقدير

يتقدم المؤلفون بالشكر الجزيل للسيدة ريما النويصر، التي ساهمت في تحليل التكاليف والترميز وتحليل البيانات، مما كان له أثر بالغ في هذه الدراسة. كذلك يتقدم المؤلفون بالشكر والتقدير لفريق التحرير والتصميم في كابسارك، خاصة بري دي روش، وسيد يونس، وكريستوفر بارتل، على دعمهم في التحرير ومساعدتهم في إعداد النسخة النهائية للمنشور، وكذلك فريق التصميم في سدايا لدعمهم وتعاونهم في مجال التصميم.

الملحق

الملحق أ. إطار عمل قائم على السيناريوهات لتقدير سعة مركز البيانات (2025-2030)

طورنا ثلاثة سيناريوهات للنمو لمراعاة حالة الضبابية في مسار توسع مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية. وتستند هذه التقديرات أساسًا إلى مجموعة بيانات S&P العالمية، مع استكمالها بمعلومات من المشروعات المعلنة.

سيناريوهات النمو

- **السيناريو الأساسي (نمو غير مرتبط بالذكاء الاصطناعي):** بناءً على المنشآت المخطط لها غير المرتبطة بالذكاء الاصطناعي، تتوسع القدرة من 290.5 ميجاواط في عام 2024 إلى حوالي 1050 ميجاواط بحلول عام 2030.

- **سيناريو النمو المعتدل في مجال الذكاء الاصطناعي:** يشمل مشروعات الذكاء الاصطناعي المؤكدة مثل مصنع هيوماين 1 للذكاء الاصطناعي في الدمام (250 ميجاواط)، ومصنع هيوماين 2 للذكاء الاصطناعي (250 ميجاواط)، ومشروع داتا فولت في الرياض (150 ميجاواط)، ومشروع داتا فولت في نيوم (300 ميجاواط). بإضافة هذه المشروعات إلى السيناريو الأساسي، يصل إجمالي القدرة إلى حوالي 2000 ميجاواط بحلول عام 2030.

- **سيناريو النمو المرتفع في مجال الذكاء الاصطناعي:** يفترض هذا السيناريو تنفيذ جميع المشروعات الضخمة المعلنة، بما فيها هدف هيوماين البالغ 1900 ميجاواط بحلول عام 2030، ومجمع نيوم للذكاء الاصطناعي (1150 ميجاواط بحلول عام 2030 من إجمالي قدرته البالغة 1500 ميجاواط). مع تضمين السيناريو الأساسي البالغ 1050 ميجاواط، تصل القدرة الإجمالية إلى حوالي 4100 ميجاواط بحلول عام 2030.

استندت الظروف التشغيلية إلى دراسة "مراكز البيانات في عصر الذكاء الاصطناعي" [13]، التي تتضمن حالتين تشغيليتين: سيناريو "العمل كالمعتاد" إذ تعمل مراكز البيانات بكفاءة تقليدية، وسيناريو "الكفاءة المتقدمة" إذ تُعتمد التقنيات الجديدة وأفضل الممارسات على نطاق واسع. ويؤدي تفاعل سيناريوهات نمو السعة مع الظروف التشغيلية إلى النتائج التالية:

- **نمو مرتفع وتقليدي:** توسع سريع إلى 4100 ميجاواط بحلول عام 2030، مع إعطاء الأولوية للسرعة على حساب الاستدامة. وتبني محدود لتدابير الكفاءة. ينتج عن هذا السيناريو أعلى استهلاك للطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مما يمثل اختبارًا لقوة أنظمة الطاقة والموارد.

- **نمو مرتفع ومستدام:** يحقق أيضًا 4100 ميجاواط بحلول عام 2030، ولكنه يدمج كفاءة الطاقة مع التوسع، ويزيد من استخدام الطاقة المتجددة، مما يقلل استهلاك الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بدرجة كبيرة بفضل ارتفاع الكفاءة التشغيلية.

- **نمو معتدل وتقليدي:** تزداد السعة باطراد إلى حوالي 2000 ميجاواط بنموذج تشغيل تقليدي. والكفاءة محدودة، مما يؤدي إلى بعض الزيادات في استهلاك الطاقة والانبعاثات، ولا يتماشى ذلك مع أهداف الاستدامة.

- **نمو معتدل ومستدام:** تزيد القدرة الإنتاجية إلى 2000 ميجاواط مع تحقيق مكاسب كبيرة في الكفاءة والتوافق مع الأهداف البيئية الوطنية. يتحسن مؤشر فعالية استخدام الطاقة من خلال تبني أفضل الممارسات، ويزداد دمج مصادر الطاقة المتجددة، مما يقلل من استهلاك الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالسيناريوهات التقليدية.

الملحق ب. منهجية تقدير الطلب على الطاقة لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية (2025-2030)

تقدير الطلب على الطاقة لمراكز البيانات

تقدر هذه الدراسة الطلب على الكهرباء لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية للفترة 2025-2030 باستخدام الإطار المقترح في الدراسة (Masanet, Lei, and Koomey 2024)، بدلًا من القياسات التفصيلية من أسفل إلى أعلى على مستوى الخوادم أو الرفوف. وتعتمد طريقتنا في تقدير إجمالي استهلاك الطاقة على سعة تقنية المعلومات المثبتة، مع تعديلها وفقًا لمعدل الاستخدام، ومؤشر فعالية استخدام الطاقة، وساعات التشغيل السنوية. وتُعبر الصيغة العامة لتقدير إجمالي استهلاك الكهرباء لمراكز البيانات Etotal بالجيجاواط في الساعة كما يلي:

[13] (Springer and Hasanbeigi 2025).

الملحق ب. منهجية تقدير الطلب على الطاقة لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية (2025-2030)

تقدير الطلب على الطاقة لمراكز البيانات

تقدر هذه الدراسة الطلب على الكهرباء لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية للفترة 2025-2030 باستخدام الإطار المقترح في الدراسة (Masanet, Lei, and Koomey 2024)، بدلًا من القياسات التفصيلية من أسفل إلى أعلى على مستوى الخوادم أو الرفوف. وتعتمد طريقتنا في تقدير إجمالي استهلاك الطاقة على سعة تقنية المعلومات المثبتة، مع تعديلها وفقًا لمعدل الاستخدام، ومؤشر فعالية استخدام الطاقة، وساعات التشغيل السنوية. وتُعبر الصيغة العامة لتقدير إجمالي استهلاك الكهرباء لمراكز البيانات Etotal بالجيجاواط في الساعة كما يلي:

$$E_{total} = p \times u \times \alpha \times t/1000 \quad (1)$$

حيث تمثل p قدرة تقنية المعلومات الحرجة بالميجاواط، ويشير u إلى متوسط قدرة تقنية المعلومات الحرجة المستخدمة، ويشير α إلى فعالية استخدام الطاقة، و t هي ساعات التشغيل السنوية (8760).

نظرًا لاختلاف أنماط التشغيل بين مرافق الذكاء الاصطناعي والمرافق العامة، فقد اعتمدنا صيغة مفصلة لمعادلة استهلاك الكهرباء، إذ تُحدد فعالية استخدام الطاقة ومعدلات الاستخدام وفقًا لنوع أحمال العمل. ويعبر عن المعادلة الأوسع كما يلي:

$$E_{total} = [(p_{AI} \times u_{AI} \times \alpha_{AI}) + (p_{non-AI} \times u_{non-AI} \times \alpha_{non-AI})] \times t/1000 \quad (2)$$

حيث:

- p_{AI}, p_{non-AI} هما قدرة تقنية المعلومات المركبة بالميجاواط لمنشآت الذكاء الاصطناعي وغير الذكاء الاصطناعي، على التوالي.
- u_{AI}, u_{non-AI} هما معدلا استخدام منشآت الذكاء الاصطناعي وغير الذكاء الاصطناعي، على التوالي.
- α_{AI}, α_{non-AI} هما قيم مؤشر فعالية استخدام الطاقة المفترضة لمنشآت الذكاء الاصطناعي وغير الذكاء الاصطناعي، على التوالي.
- t هو عدد ساعات التشغيل السنوية (8760).

تقدير إجمالي الطلب على الكهرباء بحلول عام 2030

لتقدير حصة مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية من إجمالي الطلب على الكهرباء، استخدمنا التوقعات والإحصاءات المنشورة حول استهلاك الكهرباء على المستوى الوطني. تشير توقعات كابسارك إلى أن الطلب قد يصل إلى 365,400 جيجاواط في الساعة بحلول عام 2030[14]، وذلك في ظل سيناريو نمو اقتصادي معتدل واستقرار الأسعار. أما بالنسبة لعامي 2022 و2023، فقد استخدمنا بيانات استهلاك الكهرباء الفعلية الصادرة عن الهيئة العامة للإحصاء، والتي بلغت 309,524 جيجاواط في الساعة و327,001 جيجاواط في الساعة على التوالي[15]. واستخلصنا قيم الأعوام من 2024 إلى 2029 من خلال الاستيفاء الخطي بين الإحصاءات الرسمية وتوقعات كابسارك، مما أعطانا مسارًا متسقًا نحو تقدير عام 2030.

الجدول ب1. النمو المتوقع في الطلب على الكهرباء في مراكز البيانات وحصته من إجمالي استهلاك الكهرباء على المستوى الوطني

	القدرة (ميجاواط)	استهلاك الطاقة (تيراواط في الساعة سنويًا)	حصة الطلب الوطني على الكهرباء
الحالي (2024)	290.5	2.80	%0.85
السيناريو 0: النمو غير المرتبط بالذكاء الاصطناعي	1,050	10.16	%2.79
السيناريو 1: نمو معتدل وتقليدي	2,000	20.15	%5.52
السيناريو 2: نمو معتدل ومستدام	2,000	17.62	%4.8
السيناريو 3: نمو مرتفع وتقليدي	4,100	42.23	%11.55
السيناريو 4: نمو مرتفع ومستدام	4,100	36.76	%10.1

[14] (KAPSARC 2023).

[15] (GASTAT 2023).

الافتراضات التشغيلية الرئيسة: مؤشر فعالية استخدام الطاقة ومعدل الاستخدام

يعد مؤشر فعالية استخدام الطاقة ومعدل الاستخدام متغيرين حاسمين في نمذجة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات. في المملكة العربية السعودية، تسجل مراكز البيانات قيمًا لمؤشر فعالية استخدام الطاقة تتراوح بين 1.80 و2.10 [16] نظرًا للمناخ الحار، على الرغم من أن البيانات الحديثة تشير إلى متوسط وطني أقرب إلى 1.53 [17]. تسعى المراكز الجديدة، مثل مجمع أوكساجون التابع لنيوم، إلى تحقيق قيم أقل من 1.3 في مرافقها فائقة التوسع [18]، وتسعى بنشاط إلى تحسين الكفاءة.

للتحقق من دور الكفاءة في الطلب على الكهرباء، درسنا حالتين تشغيليتين مختلفتين: التقليدية والمستدامة. في ظل الظروف التقليدية في دراستنا، تعد مراكز البيانات العامة الحالية التي تستخدم تصميمات التبريد الهوائي الأقل كفاءة في استهلاك الطاقة، إذ يبلغ مؤشر فعالية استخدام الطاقة فيها حوالي 1.70، وهو ما يتوافق مع المعايير العالمية للبنية التحتية في المناخات الحارة [19]. وقد حصلت المراكز الموجهة نحو الذكاء الاصطناعي على مؤشر فعالية استخدام طاقة أقل نسبيًا يبلغ 1.50، مما يعكس اعتماد التبريد السائل ولكن مع تحسين محدود على مستوى النظام.

في سيناريو الاستدامة، افترضنا أن تحسينات الكفاءة ستزداد بمرور الوقت، بما يتماشى مع التوجهات العالمية في مجال التبريد المتقدم وإدارة الطاقة. من المتوقع أن تحقق مراكز البيانات الحديثة العامة مؤشر فعالية استخدام الطاقة يبلغ حوالي 1.5، بينما قد تصل مراكز البيانات المحسنة بتقنية الذكاء الاصطناعي والمجهزة بأحدث تقنيات التبريد إلى قيم تقارب 1.30. وكما هو موضح في الجدول ب2، تقر هذه الافتراضات باختلاف خصائص الكفاءة بين مراكز البيانات المخصصة للذكاء الاصطناعي ومراكز البيانات العامة، وذلك بسبب التباينات في كثافة أحمال العمل ومتطلبات التبريد.

تعد معدلات الاستخدام عاملًا رئيسًا آخر في نمذجة الطلب على الكهرباء. تتميز مراكز البيانات المخصصة للذكاء الاصطناعي، ولا سيما المراكز التي تدعم تدريب النماذج واسعة النطاق والاستدلال المستمر، بمعدل استخدام أعلى نظرًا لأحمال العمل طويلة الأمد وكثيفة الحوسبة مع فترات توقف قصيرة. تشير الدراسات الحديثة إلى معدلات استخدام تتراوح بين 75% و85% لأحمال عمل تدريب الذكاء الاصطناعي، مع قيم أقل للاستدلال [20]. تتميز مرافق المؤسسات ومراكز البيانات المشتركة عادة بأحمال عمل أكثر تباينًا، مما يؤدي إلى انخفاض متوسط الاستخدام، والذي يتراوح عادة بين 50% و70% [21]. في هذه الدراسة، حُدد معدل استخدام لمرافق الذكاء الاصطناعي عند 0.80، ولمرافق البيانات الأخرى عند 0.65.

الجدول ب2. قيم مؤشر فعالية استخدام الطاقة ومعدل الاستخدام المفترضة لظروف التشغيل المختلفة وأنواع مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية بحلول عام 2030

السيناريو	نوع مركز البيانات	فعالية استخدام الطاقة (2030)	معدل الاستخدام (2030)
التقليدي	أغراض عامة	1.70	0.65
	الذكاء الاصطناعي	1.50	0.80
المستدام	أغراض عامة	1.50	0.65
	الذكاء الاصطناعي	1.30	0.80

[16] (STC 2024).

[17] مجموعة بيانات S&P العالمية.

[18] (Tonomus 2025).

[19] (Bizo 2023).

[20] (Shehabi et al. 2024).

[21] (Citi Group 2024).

الملحق ج. منهجية تقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك مراكز البيانات للكهرباء

تقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

لتقدير البصمة الكربونية لمراكز البيانات في المملكة العربية السعودية، ربطنا استهلاك الكهرباء المتوقع بمزيج الطاقة الوطني باستخدام أساليب عامل الانبعاثات المعيارية من مجموعة بيانات عوامل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لعام 2024 الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة [22]. ويتبع التقدير المعادلة الأساسية التالية:

$$CO_2\ Emissions\ (Mt) = E_{total} \times F \times 10^{-3} \quad (3)$$

حيث:

- E_{total} هو إجمالي الطلب السنوي على الطاقة لمراكز البيانات بوحدة جيجاواط في الساعة[23].
- F هو معامل انبعاثات الشبكة الذي يمثل متوسط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل ميجاواط في الساعة من الكهرباء المولدة، ويعكس مزيج الطاقة الوطني (طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة).

يختلف معامل انبعاثات الشبكة في المملكة العربية السعودية بناءً على مزيج الطاقة:

- مزيج الوقود الأحفوري: (41.2% نفط، 58.2% غاز طبيعي، أقل من 1% طاقة متجددة) ينتج عنه معامل انبعاثات شبكة قدره 0.568 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة [24]:

$$F = (0.412 \times 0.783\ tCO_2/MWh) + (0.582 \times 0.423\ tCO_2/MWh) = 0.568\ tCO_2/MWh$$

- مزيج الطاقة المستهدف في رؤية 2030: (50% غاز طبيعي، 50% مصادر طاقة متجددة) يقلل من معامل انبعاثات الشبكة إلى 0.21 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة:

$$F = (0.5 \times 0.42\ tCO2/MWh) + (0.5 \times 0\ tCO2/MWh) = 0.21\ tCO2/MWh$$

تقدير فعالية استخدام الكربون

تُحسب فعالية استخدام الكربون (CUE) بوحدة طن من ثاني أكسيد الكربون لكل ميجاواط في الساعة-تقنية المعلومات بوصفها حاصل ضرب فعالية استخدام الطاقة (α) ومعامل انبعاثات الشبكة (F):

$$CUE = \alpha \times F \quad (4)$$

باستخدام عوامل الشبكة ونطاقات مؤشر فعالية استخدام الطاقة التالية:

- التقليدي (مزيج الوقود الأحفوري 0.568 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة، مؤشر فعالية استخدام الطاقة 1.5-1.7): مؤشر فعالية استخدام الكربون = 0.852-0.966 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة-تقنية المعلومات.
- المستدام (مزيج رؤية 2030 يبلغ 0.21 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة، مؤشر فعالية استخدام الطاقة 1.3-1.5): مؤشر فعالية استخدام الكربون = 0.273-0.315 طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة-تقنية المعلومات.

[22] (IEA 2024).

[23] جرد انبعاثات الغازات الدفيئة (EPA 2024).

[24] (Climatiq 2021).

الجدول ج1. ملخص سيناريوهات نمو مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية من الوقت الحالي حتى عام 2030

السيناريو						
المتغير		الحالي (2024)	السيناريو 0 النمو غير المرتبط بالذكاء الاصطناعي	السيناريو 1 النمو المرتفع والتقليدي	السيناريو 2 النمو المرتفع والمستدام	السيناريو 3 النمو المعتدل والتقليدي	السيناريو 4 النمو المعتدل والمستدام
قدرة حمل تقنية المعلومات (ميجاواط)		290.5 ميجاواط	1050 ميجاواط	غير الذكاء الاصطناعي: 1,050 ميجاواط الذكاء الاصطناعي: 3,500 ميجاواط = 4,100 ميجاواط		غير الذكاء الاصطناعي: 1,050 ميجاواط الذكاء الاصطناعي: 950 ميجاواط = 2000 ميجاواط	
نوع أحمال العمل		الأغراض العامة والمؤسسات		التدريب والاستدلال على نماذج الذكاء الاصطناعي بنحو أساسي		متعدد: للأغراض العامة والذكاء الاصطناعي	
فعالية استخدام الطاقة		1.7	1.7	الذكاء الاصطناعي: 1.5 غير الذكاء الصطناعي: 1.7	الذكاء الاصطناعي: 1.3 غير الذكاء الاصطناعي: 1.5	الذكاء الاصطناعي: 1.5 غير الذكاء الاصطناعي: 1.7	الذكاء الاصطناعي: 1.3 غير الذكاء الاصطناعي: 1.5
حصة الطاقة المتجددة (%)		%1	%1	%1	%50	%1	%50
معدل الاستخدام		0.65	0.65	الذكاء الاصطناعي: 0.80 غير الذكاء الاصطناعي: 0.65	الذكاء الاصطناعي: 0.80 غير الذكاء الاصطناعي: 0.65	الذكاء الاصطناعي: 0.80 غير الذكاء الاصطناعي: 0.65	الذكاء الاصطناعي: 0.80 غير الذكاء الاصطناعي: 0.65
المقاييس المشتقة	إجمالي الطلب على الكهرباء (تيراواط ساعة)	2.80	10.16	42.23	36.76	20.15	17.62
	حصة الطلب الوطني على الكهرباء (%)	%0.85	%2.79	%11.55	%10.10	%5.52	%4.80
	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (مليون طن من ثاني أكسيد الكربون/سنة)	1.60	5.81	24.02	7.7	11.48	3.7
	فعالية استخدام الكربون (طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة-تقنية المعلومات)	0.966	0.966	0.852-0.966	0.273-0.315	0.852-0.966	0.273-0.315

ملاحظة: تختلف السيناريوهات باختلاف توسعة القدرة وظروف التشغيل. تشمل المقاييس المشتقة إجمالي الطلب على الكهرباء، وحصة الطلب الوطني، وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

الملحق د. منهجية تقدير تكاليف مشروع مركز البيانات على مدار عمره الافتراضي

يجب أن يأخذ تحليل التكلفة في الحسبان مؤشر فعالية استخدام الطاقة، ومعامل الحمل، وكفاءة الحوسبة، وسعر الكهرباء، والنفقات الرأسمالية، ومتوسط تكلفة رأس المال المرجح. لذا يجب أن تكون صيغته تمثيلًا موحدًا ومخصومًا زمنيًا لإجمالي التكاليف المتكبدة لكل وحدة من مخرجات الحوسبة على مدار العمر التشغيلي لمركز البيانات. الوحدة هي (دولار/ PFLOP)، وصيغتها هي:

(5)

$$DC\ Project\ Cost = \frac{CAPEX + OPEX}{\begin{matrix}Present\ Value\ of\\ Total\ Output\ over\\ Project\ Lifetime\end{matrix}} = \frac{c + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha pkt + dc}{(1+r)^i}}{\gamma \sum_{i=1}^{n-1} \frac{kt}{(1+r)^i}}$$

بوجه عام، هيكل التكلفة يعكس التكلفة المستوية للطاقة، مع تحويل الناتج من توليد الكهرباء إلى الإنتاجية الحاسوبية. ويمثل البسط إجمالي التكاليف المخصومة لمركز البيانات، بينما يمثل المقام إجمالي ناتج الحوسبة المخصوم. نناقش كل مصطلح على حدة أدناه:

- البسط (دولار/كيلوواط):
  - c: التكلفة الأولية الفورية للإنشاء (النفقات الرأسمالية) لكل كيلوواط من حمل تقنية المعلومات.
  - $\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha pkt + dc}{(1+r)^i}$: نفقات التشغيل المخصومة (OPEX) طوال عمر مركز البيانات.
    - αpkt: تكاليف الطاقة، حيث p هو سعر الكهرباء (دولار/ميجاواط في الساعة)، مُقسمًا على معامل الحمل k وكفاءة استخدام الطاقة α، ومضروبًا في متوسط الوقت سنويًا t.
    - dc: نفقات التشغيل غير المتعلقة بالطاقة. هنا، d هي نسبة مئوية من النفقات الرأسمالية c.
    - $\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{(1+r)^i}$: يُستخدم هذا لخصم كل سنة على مدى الزمن محل الاهتمام (عمر المشروع). معامل الخصم r هو متوسط التكلفة المرجح لرأس المال.
- المقام (PFLOP/كيلوواط):
  - γ: كفاءة الحوسبة لأجهزة الذكاء الاصطناعي (PFLOP/كيلوواط).
  - $\sum_{i=1}^{n-1} \frac{kt}{(1+r)^i}$: = ناتج الحوسبة الفعال سنويًا، مخصومًا بمرور الوقت.

المعادلة (5) بديهية للغاية. فكلما زادت كفاءة أجهزة الذكاء الاصطناعي، انخفضت التكلفة، مما يعكس الحوافز لاستخدام أجهزة موفرة للطاقة. ويتوافق هذا أيضًا مع الاتجاه الموضح في الجدول 2، الذي يظهر تحسينات ملحوظة خلال السنوات القليلة الماضية. يؤثر سعر الكهرباء ومؤشر فعالية استخدام الطاقة مباشرة على التكاليف من خلال النفقات التشغيلية كونهما من المساهمين الرئيسين في التكاليف المتعلقة بالطاقة. من السهل ملاحظة أن التكلفة خطية بالنسبة للسعر p ومؤشر فعالية استخدام الطاقة α، ولكنها غير خطية بالنسبة لكفاءة الحوسبة γ لأنها مُقاسة بـ (γ/1). وهي غير خطية بالنسبة لمعامل الحمل k، الذي يؤثر تأثيرًا مباشرًا على النفقات التشغيلية وناتج الحوسبة.

الملحق هـ. مسرد المصطلحات

المصطلح	التعريف
الذكاء الاصطناعي (AI)	مجال في علوم الحاسوب يركز على بناء أنظمة قادرة على أداء المهام التي تتطلب عادة ذكاءً بشريًا، مثل التعلم والاستدلال والتطوير الذاتي.
مركز بيانات متخصص في الذكاء الاصطناعي	منشأة مصممة خصيصًا لأحمال عمل الذكاء الاصطناعي، وتتميز عادة بوحدات معالجة رسومية عالية الأداء، ووحدات معالجة مركزية متقدمة، وبنية تحتية متخصصة لدعم العمليات الكثيفة التي تتطلب حسابات مكثفة.
عبء عمل الذكاء الاصطناعي	فئة من المهام الحاسوبية التي تشمل التعلم الآلي، والتعلم العميق، والذكاء الاصطناعي التوليدي، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي الأخرى كثيفة الموارد.
فعالية استخدام الكربون (CUE)	مقياس معياري لقياس كثافة انبعاثات الكربون لكل ميجاواط في الساعة من الطاقة الموصلة إلى معدات تقنية المعلومات (طن من ثاني أكسيد الكربون/ميجاواط في الساعة-تقنية المعلومات).
وحدة المعالجة المركزية (CPU)	شريحة المعالجة الرئيسة في جهاز الكمبيوتر التي تنفذ المهام العامة وتتحكم في المكونات الأخرى.
معدل النمو السنوي المركب (CAGR)	متوسط معدل النمو السنوي لقيمة ما على مدى فترة زمنية محددة، بافتراض أنها تنمو بمعدل ثابت كل عام.
الحوسبة (في سياق الذكاء الاصطناعي)	يشير هذا المصطلح إلى القدرة الحاسوبية، التي تُقاس عادة بوحدة FLOPS، اللازمة لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي أو تشغيلها. وفي سياق مراكز البيانات، تشمل الحوسبة القدرة المعالجة المجمعة للأجهزة المتخصصة مثل وحدات معالجة الرسومات ووحدات معالجة المصفوفات ومسرعات الذكاء الاصطناعي، والتي تعد أساسية لتنفيذ مهام التعلم الآلي المعقدة على نطاق واسع.
مركز البيانات	منشأة مادية تضم العديد من الخوادم وأجهزة تخزين البيانات المزودة باتصال عالي السرعة لإدارة تطبيقات المؤسسة وبياناتها.
كفاءة البنية التحتية لمراكز البيانات (DCIE)	مؤشر كفاءة الطاقة في مركز البيانات هو مقياس يُحسب على أنه نسبة مئوية للطاقة التي تستخدمها معدات تقنية المعلومات مباشرة من إجمالي استهلاك الطاقة. تشير القيم العالية إلى كفاءة أكبر في الوظائف غير الحاسوبية.
عمليات الفاصلة المتحركة (FLOPs)	إجمالي عدد عمليات الفاصلة المتحركة التي نُفذت لإكمال مهمة أو برنامج معين.
وحدة معالجة الرسومات (GPU)	معالج متخصص مصمم للعمليات المتوازية، كان يستخدم أساسًا لعرض الرسومات ولكنه يستخدم الآن على نطاق واسع في الذكاء الاصطناعي والحوسبة عالية الأداء نظرًا لقدرته على التعامل مع العمليات الحاسوبية المعقدة واسعة النطاق بكفاءة.
الاستدلال	عملية للتنبؤ من خلال تطبيق نموذج مدرب على أمثلة غير مصنفة.
قدرة حمل تقنية المعلومات	الحد الأقصى للطلب على الطاقة (مقاسًا بالميجاواط) من الخوادم ومعدات الشبكة المثبتة في مركز البيانات، باستثناء أنظمة التبريد والأنظمة المساعدة.
مفارقة جيفونز	مبدأ اقتصادي ينص على أن التحسينات في كفاءة الموارد يمكن أن تؤدي بنحو متناقض إلى زيادة الاستهلاك الإجمالي لتلك الموارد، وذلك بسبب انخفاض التكاليف وارتفاع الطلب.
وحدة معالجة اللغة (LPU)	شريحة متخصصة مصممة لتحسين مهام معالجة اللغة الطبيعية مثل الترجمة الفورية، والتعرف على الكلام، وتحليل النصوص. تتميز وحدات معالجة اللغة بكفاءة أعلى في تطبيقات محددة للذكاء الاصطناعي مقارنة بالمعالجات العامة.
تدريب النموذج	عملية تحديد أو تحسين معلمات النموذج بناءً على خوارزمية التعلم الآلي باستخدام بيانات التدريب.
فعالية استخدام الطاقة (PUE)	مؤشر كفاءة استخدام الطاقة في مراكز البيانات، يُحسب على أنه نسبة بين إجمالي الطاقة المستهلكة في المنشأة وطاقة أجهزة الحوسبة. كلما اقترب مؤشر كفاءة استخدام الطاقة من 1.0، زادت الكفاءة.
كثافة الطاقة في الرف	كمية الطاقة المستهلكة لكل رف خادم، تقاس عادة بالكيلوواط. وتعد الكثافات العالية شائعة في بيئات الذكاء الاصطناعي والحوسبة عالية الأداء.
معدل الاستخدام	نسبة سعة تقنية المعلومات المثبتة في مركز البيانات والتي تُستخدم فعليًا. تشير معدلات الاستخدام الأعلى إلى استخدام أكثر كفاءة للبنية التحتية.
أحمال العمل	مجموعة من المهام التي تُشغل على نظام حاسوب معين.

نبذة عن المؤلفين

خالد الشهري

زميل باحث في برنامج خدمات الطاقة والطاقة المتجددة في كابسارك. تركز بحوثه على دمج التقنيات الرقمية في قطاع الطاقة لتحسين تشغيل الشبكات، وتعزيز الكفاءة الاقتصادية، ودعم التحول في قطاع الطاقة. وبفضل خبرته الواسعة في القطاع الحكومي والأكاديمي والصناعي، يستخدم أدوات متقدمة من نظرية الألعاب والتحكم والتحسين لمعالجة التحديات المعقدة في أنظمة الطاقة. حصل في عام 2024 على جائزة كويستروم-سيما (Questrom-CEMA) لأفضل ورقة علمية عن مشاركته في كتابة ورقة بحثية حول التجميع الفعال لموارد الطاقة الموزعة، تقديرًا لمساهماته البارزة في هذا المجال. وهو حاصل على درجة البكالوريوس في هندسة التحكم والقياس من جامعة الملك فهد للبترول والمعادن، ودرجتي الماجستير والدكتوراه في الهندسة الكهربائية وهندسة الحاسبات من جامعة إلينوي في أوربانا-شامبين.

مروى محمود الفتني

باحثة وخبيرة إستراتيجية في مجال التقنية، تتمتع بخبرة تزيد عن 15 عامًا في مجال الذكاء الاصطناعي والتحول الرقمي ودراسات التقنية الوطنية. في أدوارها القيادية الإستراتيجية، قادت مبادرات بحثية تربط بين أبحاث الذكاء الاصطناعي، وتطوير السياسات، والتنفيذ الإستراتيجي، مما ساهم في دفع أجندة التحول الرقمي في المملكة. وقبل ذلك أمضت قرابة عقد من الزمن في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، إذ ساهمت في إعداد أول تقرير لحوكمة الذكاء الاصطناعي في المملكة، وأجرت أبحاثًا تطبيقية في مجالات التعلم الآلي، ومعالجة اللغات الطبيعية، وأنظمة المحاكاة، وتقنيات المنازل الذكية. وهي مخترعة حاصلة على براءة اختراع مسجلة، ولها منشورات محكمة في مجالات الذكاء الاصطناعي، والهوية الرقمية، وتقنيات اللغة العربية. وهي حاصلة على درجة الماجستير في علوم تقنية المعلومات من جامعة الملك سعود، وتواصل تركيزها على الذكاء الاصطناعي المسؤول والابتكار في القطاع العام.

ليلى باشمال

باحثة في مجال الذكاء الاصطناعي، حاصلة على درجة الدكتوراه في هندسة الحاسب الآلي من جامعة الملك سعود. يركز عملها على توظيف أنظمة الذكاء الاصطناعي الموحدة لتطبيقات ذات تأثير كبير، لا سيما في تحليل الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور الطبية. تشمل اهتماماتها البحثية الأوسع نماذج اللغة الكبيرة، والتعلم متعدد الوسائط، ودمج اللغة والرؤية لبناء أنظمة ذكاء اصطناعي أكثر شمولًا وقوة، بالإضافة إلى دراسة كيفية إعادة تشكيل هذه القدرات للبنية التحتية الحاسوبية والتطبيقات العملية.

غالية الشمري

باحثة أولى في الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي (سدايا)، متخصصة في علم البيانات والذكاء الاصطناعي والابتكار التحليلي. يركز عملها على تطوير رؤى قائمة على البيانات تدعم التحول الرقمي الوطني. عملت سابقًا محللًا لتقنية المعلومات في أمانة مجموعة العشرين السعودية. وهي حاصلة على درجة الماجستير في علوم الحاسب الآلي من كلية مدينة نيويورك، ودرجة البكالوريوس في علوم الحاسب الآلي من جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن.

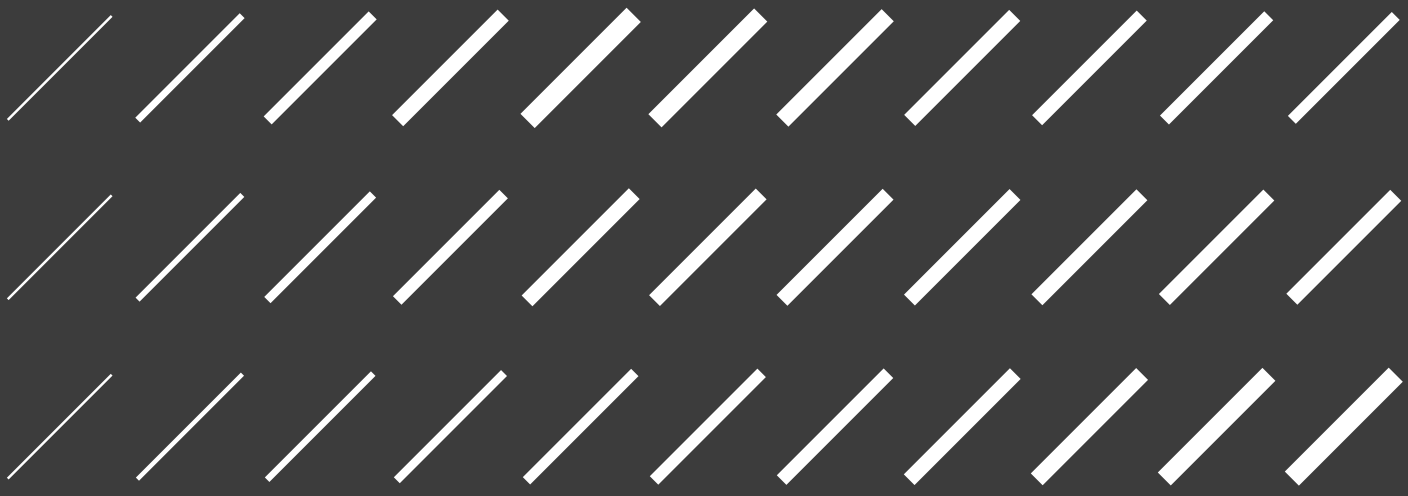
نبذة عن المشروع

تعد هذه الدراسة جزءًا من مشروع 'تقييم قيمة الذكاء الاصطناعي التوليدي (GenAI) لقطاع الطاقة السعودي'. وانطلاقًا من إدراك أن البنية التحتية الرقمية شرط أساسي لتطبيق الذكاء الاصطناعي التوليدي على نطاق واسع، تقدم هذه الدراسة تقييمًا شاملًا أوليًا للوضع الراهن، والطلب على الطاقة، ومعدلات الانبعاثات، وديناميكيات التكلفة لمراكز البيانات الموجهة نحو الذكاء الاصطناعي في المملكة العربية السعودية. وتحدد الدراسة السيناريوهات الرئيسة، والاعتبارات التشغيلية، والعوامل الإستراتيجية الممكنة التي ستشكل قدرة المملكة على دعم تطبيقات الذكاء الاصطناعي التوليدي الناشئة.

unesco
Centre
Under the auspices
of UNESCO

ICAIRE
International
Center for
AI Research & Ethics

كابسارك
KAPSARC



kapsarc.org info@kapsarc.org /kapsarc