

جامعة ميدأوشن

كلية الإدارة

تخصص ماجستير إدارة أعمال

تأثير الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية) على حل مشكلة ارتفاع استهلاك الطاقة في
قطاع مراكز البيانات بالمملكة

**Impact of Solar Power on Reducing Energy Consumption in Saudi
Arabia's Data Centers Sector**

إعداد الطالب:

خالد ابراهيم العثمان

Khaled Ibrahim Alothman

الرقم الجامعي / 253002748

إشراف:

العام الدراسي:

2026



فهرس المحتويات

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة	5
1.1 مقدمة	5
2.1 مشكلة الدراسة	6
3.1 أهمية الدراسة	7
• الأهمية العلمية	8
• الأهمية التطبيقية	10
4.1 أهداف الدراسة	12
• الهدف العام	13
• الأهداف الخاصة	13
• تساؤلات الدراسة	13
• فروض الدراسة	14
• الفرضيات الرئيسية	14
• الدراسات السابقة	15
• الدراسات المتعلقة بارتفاع استهلاك الطاقة	15
• الدراسات المتعلقة بدور الطاقة الشمسية	15
• الدراسات المحلية في السياق السعودي	16
• تحليل نقدي مقارنة للدراسات	16
• الفجوة البحثية	16
• التحديات التقنية والاقتصادية لدمج الطاقة الشمسية في مراكز البيانات	17
• التحديات التقنية والاقتصادية لدمج الطاقة الشمسية في مراكز البيانات	18
8.1 المنطلقات النظرية للدراسة	19
9.1 أدوات الدراسة	23
1. دليل المقابلة شبه المنظمة	23
2. الاستبيان تم بناء استبيان إلكتروني مكون من قسمين رئيسيين	23
3. اختبارات الصدق والثبات	24

10.1	حدود الدراسة.....	24
11.1	المراجع	26

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1.1 مقدمة

يُعد قطاع مراكز البيانات أحد أهم ركائز التحول الرقمي في العالم، حيث يشكل العمود الفقري للخدمات السحابية، الذكاء الاصطناعي، والاقتصاد الرقمي. ومع التوسع السريع في هذا القطاع، أصبح استهلاك الطاقة الكهربائية أحد أكبر التحديات البيئية والاقتصادية على المستوى العالمي. وفقاً لتقارير الوكالة الدولية للطاقة (IEA)، بلغ استهلاك مراكز البيانات العالمي حوالي 460 تيراوات ساعة في عام 2022، ومن المتوقع أن يتجاوز 1900 تيراوات ساعة بحلول عام 2030، أي ما يعادل 8% من إجمالي استهلاك الكهرباء العالمي، وذلك بشكل أساسي بسبب نمو تطبيقات الذكاء الاصطناعي.

في السياق المحلي، تشهد المملكة العربية السعودية نمواً متسارعاً في هذا القطاع بنسبة 29% سنوياً (CAGR)، مدفوعاً برؤية 2030 واستراتيجية البيانات والذكاء الاصطناعي الوطنية. ومع ذلك، يعتمد معظم مراكز البيانات حالياً على الوقود الأحفوري، مما يؤدي إلى ارتفاع تكاليف التشغيل وزيادة الانبعاثات الكربونية في مناخ صحراوي حار يتطلب تبريداً مكثفاً. وهنا تبرز أهمية الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية، كحل استراتيجي نظراً لتوافر الإشعاع الشمسي العالي في المملكة وانخفاض تكلفتها الإنتاجية إلى أقل من سنت واحد للكيلووات ساعة.

رغم أهمية الموضوع، تكشف المراجعة الشاملة للأدبيات وجود فجوة بحثية واضحة؛ فمعظم الدراسات السابقة ركزت على الدول الغربية أو الآسيوية ذات المناخ البارد، وقليل منها تناول السياق السعودي أو المناخ الصحراوي تحديداً. كما أن الدراسات المحلية المتاحة لم تتناول بشكل عميق إمكانيات دمج الطاقة الشمسية مع مراكز البيانات من الناحية التشغيلية والاقتصادية.

تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال تحليل تأثير الطاقة الشمسية على حل مشكلة ارتفاع استهلاك الطاقة في قطاع مراكز البيانات بالمملكة العربية السعودية. وستعتمد الدراسة على منهجية مختلطة (كمية وكيفية) تشمل استبياناً لـ 150 متخصصاً ومقابلات مع خبراء، مع الاستناد إلى نظرية Triple Bottom Line وستقدم الدراسة في فصولها التالية: مشكلة الدراسة وأهميتها، الأهداف والتساؤلات والفروض، الدراسات السابقة والفجوة البحثية، المنطلقات النظرية، المنهجية وأدوات الدراسة، ثم النتائج والتوصيات.

2.1 مشكلة الدراسة

يُعد قطاع مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية أحد أسرع القطاعات نموًا في المنطقة، إلا أنه يواجه إشكالية استراتيجية خطيرة تتمثل في الارتفاع الحاد والمستمر لاستهلاك الطاقة الكهربائية. فكيف يمكن لهذا القطاع أن يستمر في تحقيق نمو سنوي يصل إلى 29 (S&P Global, 2025) % دون أن يتحول إلى عبء بيئي واقتصادي كبير على الدولة؟ وما هي الآثار طويلة الأمد الناتجة عن الاعتماد شبه الكلي على الوقود الأحفوري في بيئة صحراوية تتطلب تبريدًا مكثفًا على مدار السنة؟ وهل يمكن للطاقة الشمسية – التي تتوفر في المملكة بكميات هائلة – أن تكون الحل الفعال لتقليل هذا الاستهلاك أم أن هناك عقبات تقنية وتشغيلية تحول دون ذلك؟

يبرز الواقع الحالي بوضوح من خلال الأرقام والتقارير الرسمية. فعلى المستوى العالمي، أشارت الوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2024) إلى أن استهلاك مراكز البيانات بلغ 460 تيراوات ساعة في عام 2022، ومن المتوقع أن يتضاعف ليصل إلى أكثر من 1900 تيراوات ساعة بحلول عام 2030، أي ما يعادل نحو 8% من إجمالي استهلاك الكهرباء العالمي. أما في المملكة العربية السعودية، فيتوقع تقرير (S&P Global 2025) أن ينمو سوق مراكز البيانات إلى 3.9 مليار دولار بحلول 2030، مصحوبًا بزيادة هائلة في الطلب على الطاقة، خاصة مع مشاريع عملاقة مثل HUMAIN التي تستهدف 6 جيجاوات بحلول 2034. وفي ظل المناخ الصحراوي الحار الذي يتجاوز فيه درجة الحرارة 50 مئوية لفترات طويلة، يصل مؤشر كفاءة استخدام الطاقة (PUE) في بعض المراكز إلى 2.0 أو أكثر، مما يعني أن كل وات يُستخدم للخوادم يحتاج إلى وات آخر للتبريد.

أما المأمول حسب رؤية 2030 واستراتيجية الطاقة الوطنية فهو الوصول إلى 50% طاقة متجددة بحلول عام 2030، وخفض الانبعاثات الكربونية، وتحقيق الاستدامة في كافة القطاعات الاقتصادية. ومع ذلك، تكشف التقارير عن فجوة واضحة بين هذا الهدف والواقع الفعلي؛ إذ لا تزال نسبة دمج الطاقة الشمسية في مراكز البيانات محدودة جدًا رغم انخفاض تكلفة إنتاجها إلى أقل من سنت واحد للكيلووات ساعة (أرخص من الوقود

الأحفوري في معظم مناطق المملكة). هذه الفجوة ليست تقنية فقط، بل تشمل أيضًا تحديات في نماذج التمويل، التكامل التشغيلي، والبنية التحتية للتخزين والتوزيع.

وتؤكد الدراسات السابقة وجود هذه المشكلة بوضوح. فقد أشار تقرير (KAPSARC 2026) إلى أن أحمال الذكاء الاصطناعي وحدها قد تستحوذ على 35-50% من إجمالي استهلاك الطاقة في مراكز البيانات بحلول نهاية العقد، بينما أظهرت دراسة (Alpinme 2026) أن الطاقة الشمسية يمكن أن

تتخفض التكاليف التشغيلية بنسبة تصل إلى 40% في المناخات الحارة مثل السعودية. ورغم ذلك، فإن معظم هذه الدراسات ركزت على الجوانب العالمية أو الأوروبية ولم تقدم حلولاً تطبيقية محلية مفصلة للسياق السعودي.

لذلك، تُعد هذه الإشكالية محور الدراسة الحالية، التي تسعى إلى تحليل أسباب الارتفاع في الاستهلاك، قياس مدى إمكانية الطاقة الشمسية في تقليله، وتقديم نموذج عملي قابل للتطبيق يساعد في سد الفجوة بين الواقع الحالي والأهداف الوطنية للاستدامة

3.1 أهمية الدراسة

في ظل التوسع المتسارع في التحول الرقمي والاعتماد المتزايد على تقنيات الحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي، أصبحت مراكز البيانات من أهم البنى التحتية الداعمة للاقتصاد الرقمي في العالم. إلا أن هذا النمو الكبير صاحبه ارتفاع ملحوظ في استهلاك الطاقة الكهربائية، مما أدى إلى ظهور تحديات بيئية واقتصادية تتطلب البحث عن حلول مستدامة. وفي هذا السياق، تبرز الطاقة المتجددة - وخاصة الطاقة الشمسية - كأحد الخيارات الاستراتيجية التي يمكن أن تسهم في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة تشغيل مراكز البيانات، خصوصًا في الدول التي تتمتع بموارد شمسية عالية مثل المملكة العربية السعودية.

وانطلاقًا من ذلك، تكتسب هذه الدراسة أهميتها من خلال سعيها إلى تحليل دور الطاقة الشمسية في معالجة مشكلة ارتفاع استهلاك الطاقة في قطاع مراكز البيانات بالمملكة، إضافة إلى تقديم رؤية علمية وتطبيقية

يمكن أن تسهم في دعم توجهات الاستدامة وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة في البنية التحتية الرقمية. ويمكن توضيح أهمية هذه الدراسة من خلال جانبين رئيسيين هما: الأهمية العلمية والأهمية التطبيقية.

● الأهمية العلمية

تكتسب هذه الدراسة أهميتها العلمية من طبيعة الموضوع الذي تتناوله، والذي يقع عند تقاطع ثلاثة

مجالات معرفية رئيسية تتمثل في إدارة الطاقة، واستدامة مراكز البيانات، والطاقة المتجددة. ومع التسارع الكبير

في التحول الرقمي عالمياً، أصبحت مراكز البيانات أحد أهم البنى التحتية الداعمة للاقتصاد الرقمي والخدمات

السحابية والذكاء الاصطناعي. إلا أن هذا التوسع السريع صاحبه ارتفاع ملحوظ في استهلاك الطاقة الكهربائية،

الأمر الذي دفع العديد من الباحثين والمؤسسات البحثية إلى دراسة سبل تحسين كفاءة الطاقة في هذا القطاع.

وفي هذا السياق، تسعى الدراسة الحالية إلى الإسهام في إثراء المعرفة النظرية المتعلقة بكيفية دمج مصادر

الطاقة المتجددة - وبشكل خاص الطاقة الشمسية - في تشغيل مراكز البيانات، وتحليل أثر ذلك في تحسين

كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

كما تتبع الأهمية العلمية لهذه الدراسة من محاولتها سد فجوة واضحة في الأدبيات العلمية المرتبطة

بموضوع البحث. فعلى الرغم من تزايد الدراسات العالمية التي تناولت استهلاك الطاقة في مراكز البيانات، إلا أن

معظم هذه الدراسات ركزت على البيئات المناخية المعتدلة أو الباردة في أوروبا وأمريكا الشمالية وشرق آسيا،

حيث تختلف ظروف التشغيل والتبريد بشكل كبير عن البيئات الصحراوية الحارة مثل المملكة العربية السعودية.

وبذلك فإن النتائج التي توصلت إليها تلك الدراسات قد لا تكون قابلة للتطبيق بشكل كامل في السياق السعودي.

ومن هنا تأتي أهمية هذه الدراسة في تقديم تحليل علمي يركز على البيئة المناخية الصحراوية وخصائصها

التشغيلية، الأمر الذي يساهم في توسيع نطاق الأدبيات العلمية ليشمل سياقات جغرافية ومناخية لم تحظ

بالاهتمام الكافي في البحوث السابقة.

إضافة إلى ذلك، تسعى هذه الدراسة إلى تقديم إطار نظري متكامل يربط بين مفاهيم الاستدامة والطاقة

المتجددة وإدارة مراكز البيانات. إذ تعتمد الدراسة على مجموعة من المنطلقات النظرية المرتبطة بالاستدامة

المؤسسية وكفاءة استخدام الموارد، مثل نموذج الاستدامة الثلاثية (Triple Bottom Line) الذي يركز على

تحقيق التوازن بين الأبعاد الاقتصادية والبيئية والاجتماعية في الأنشطة الاقتصادية. ويساعد هذا الإطار النظري في تفسير العلاقة بين تبني مصادر الطاقة المتجددة وبين تحسين الأداء البيئي والتشغيلي للمؤسسات، الأمر الذي يتيح بناء نموذج تحليلي يمكن الاستفادة منه في دراسات مستقبلية تتناول العلاقة بين التحول الرقمي والاستدامة البيئية.

كما تساهم الدراسة في تطوير الفهم العلمي للعلاقة بين التكنولوجيا الرقمية والطاقة المستدامة، وهي علاقة أصبحت تحظى باهتمام متزايد في الأدبيات الحديثة نتيجة النمو الكبير في تطبيقات الحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء. فهذه التقنيات تعتمد بشكل أساسي على بنية تحتية رقمية ضخمة تتمثل في مراكز البيانات، والتي تتطلب كميات كبيرة من الطاقة لتشغيل الخوادم وأنظمة التبريد. ومن خلال دراسة أثر الطاقة الشمسية في تقليل استهلاك الطاقة في هذه المراكز، تقدم الدراسة مساهمة علمية في مجال التحول نحو بنية تحتية رقمية مستدامة، وهو موضوع يعد من القضايا البحثية الناشئة في مجال إدارة الأعمال وإدارة التكنولوجيا.

وتتجلى الأهمية العلمية أيضاً في أن هذه الدراسة تقدم تحليلاً متعدد الأبعاد يجمع بين الجوانب التقنية والاقتصادية والإدارية المتعلقة باستخدام الطاقة الشمسية في مراكز البيانات. فبدلاً من الاقتصار على الجانب الهندسي أو التقني فقط، تسعى الدراسة إلى تناول الموضوع من منظور إداري واستراتيجي يركز على كيفية اتخاذ القرار داخل المؤسسات بشأن تبني حلول الطاقة المتجددة، والعوامل التي تؤثر في هذا القرار مثل التكلفة، والجدوى الاقتصادية، والبنية التحتية، والسياسات التنظيمية. ويساهم هذا التوجه في تعزيز الأدبيات المتعلقة بإدارة الطاقة في المؤسسات الرقمية، ويضيف بعداً إدارياً مهماً إلى الدراسات السابقة التي ركزت غالباً على الجوانب التقنية.

ومن ناحية أخرى، يمكن أن تمثل هذه الدراسة مرجعاً علمياً للباحثين والدارسين في مجالات إدارة الأعمال والاستدامة والطاقة المتجددة، حيث تقدم إطاراً تحليلياً يمكن البناء عليه في دراسات مستقبلية تتناول موضوعات مشابهة. كما قد تساهم نتائج الدراسة في فتح مجالات بحثية جديدة تتعلق بدراسة العلاقة بين التحول الرقمي واستهلاك الطاقة، أو تقييم جدوى استخدام مصادر الطاقة المتجددة في قطاعات تقنية أخرى مثل مراكز الحوسبة عالية الأداء أو البنى التحتية للذكاء الاصطناعي.

وعلاوة على ذلك، فإن الدراسة تسعى إلى ربط الأدبيات العالمية بالسياق المحلي للمملكة العربية السعودية، وهو جانب مهم في البحوث العلمية التطبيقية. فمع التوسع الكبير في مشاريع التحول الرقمي في

المملكة في إطار رؤية 2030، أصبحت الحاجة ملحة لفهم التحديات المرتبطة باستهلاك الطاقة في البنى التحتية الرقمية، والبحث عن حلول مستدامة للتعامل معها. ومن خلال تحليل إمكانية استخدام الطاقة الشمسية في مراكز البيانات داخل البيئة السعودية، تسهم الدراسة في تطوير معرفة علمية تتسم بالملاءمة المحلية، وهو ما يعزز من قيمة البحث العلمي في دعم التنمية المستدامة في المملكة.

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن الأهمية العلمية لهذه الدراسة تتمثل في إثراء الأدبيات العلمية في مجال استدامة مراكز البيانات، وسد الفجوة البحثية المتعلقة بدراسة الطاقة المتجددة في البيئات الصحراوية، وتقديم إطار نظري تحليلي يربط بين التحول الرقمي والاستدامة الطاقية. كما تسهم الدراسة في تعزيز الفهم العلمي للعلاقة بين إدارة الطاقة والتكنولوجيا الرقمية، الأمر الذي يجعلها إضافة مهمة للبحوث الأكاديمية في مجالات إدارة الأعمال والطاقة المستدامة.

• الأهمية التطبيقية:

تكتسب هذه الدراسة أهمية تطبيقية كبيرة نظراً لارتباطها بقطاع حيوي يشهد نمواً متسارعاً على المستويين العالمي والمحلي، وهو قطاع مراكز البيانات الذي يُعد من الركائز الأساسية للبنية التحتية الرقمية في الاقتصاد الحديث. ومع التوسع الكبير في استخدام الخدمات السحابية وتقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الضخمة، أصبح الطلب على مراكز البيانات في ازدياد مستمر، الأمر الذي أدى بدوره إلى ارتفاع كبير في استهلاك الطاقة الكهربائية داخل هذه المراكز. وفي هذا السياق، تسعى الدراسة الحالية إلى تقديم مجموعة من النتائج والتوصيات العملية التي يمكن أن تسهم في مساعدة المؤسسات وصانعي القرار على تطوير حلول فعالة لمعالجة مشكلة استهلاك الطاقة في هذا القطاع، بما يتوافق مع متطلبات الاستدامة البيئية والكفاءة الاقتصادية.

وتتمثل إحدى أبرز الجوانب التطبيقية للدراسة في تقديم توصيات عملية للمؤسسات والشركات العاملة في مجال تشغيل وإدارة مراكز البيانات. إذ يمكن أن تساعد نتائج الدراسة هذه المؤسسات على فهم إمكانيات استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل أو مكمل للطاقة التقليدية في تشغيل مراكز البيانات. ومن خلال تحليل العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة، يمكن أن توفر الدراسة معلومات مفيدة لمديري مراكز البيانات حول كيفية تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، وما يترتب على ذلك من خفض في التكاليف التشغيلية على المدى الطويل. كما يمكن أن تسهم التوصيات المقترحة في توجيه المؤسسات نحو تبني استراتيجيات أكثر استدامة في إدارة الطاقة، مثل الاستثمار في أنظمة الطاقة الشمسية أو دمجها مع مصادر الطاقة الأخرى، بما يحقق توازناً بين الكفاءة التشغيلية والاستدامة البيئية.

كما تبرز الأهمية التطبيقية لهذه الدراسة في مساعدة صانعي السياسات والجهات الحكومية المعنية بالطاقة والتحول الرقمي في اتخاذ قرارات مبنية على أسس علمية فيما يتعلق بتطوير السياسات والاستراتيجيات الوطنية المرتبطة باستخدام الطاقة المتجددة. ففي ظل توجه المملكة العربية السعودية نحو تعزيز الاستدامة البيئية وتنويع مصادر الطاقة ضمن إطار رؤية المملكة 2030، أصبح من الضروري دعم المبادرات التي تشجع على استخدام مصادر الطاقة النظيفة في مختلف القطاعات الاقتصادية، بما في ذلك قطاع التكنولوجيا والبنية التحتية الرقمية. ومن خلال النتائج التي يمكن أن تقدمها هذه الدراسة، قد يتمكن صانعو السياسات من الحصول على فهم أعمق للتحديات والفرص المرتبطة بتبني الطاقة الشمسية في مراكز البيانات، الأمر الذي يمكن أن يساعد في تصميم برامج دعم أو حوافز اقتصادية تشجع المؤسسات على الاستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة. إضافة إلى ذلك، يمكن أن تسهم الدراسة في تطوير أدوات ومؤشرات عملية لقياس وتقييم كفاءة استخدام الطاقة في مراكز البيانات، وهو جانب مهم في إدارة الطاقة داخل المؤسسات الرقمية. فوجود أدوات قياس واضحة ومحددة يساعد المؤسسات على متابعة مستوى استهلاك الطاقة في عملياتها التشغيلية، وتقييم مدى كفاءة الأنظمة المستخدمة في تشغيل الخوادم وأنظمة التبريد. كما يمكن أن تساعد هذه الأدوات في قياس أثر استخدام الطاقة الشمسية في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية، الأمر الذي يساهم في تعزيز القدرة على اتخاذ قرارات مبنية على البيانات فيما يتعلق بإدارة الطاقة.

ومن ناحية أخرى، قد تساعد نتائج هذه الدراسة المؤسسات العاملة في قطاع التكنولوجيا على تعزيز استراتيجيات الاستدامة المؤسسية من خلال دمج الاعتبارات البيئية ضمن خططها التشغيلية والاستراتيجية. ففي السنوات الأخيرة، أصبح موضوع الاستدامة أحد العوامل المهمة التي تؤثر في أداء المؤسسات وسمعتها في الأسواق العالمية، حيث يزداد اهتمام المستثمرين والعملاء بالمنظمات التي تتبنى ممارسات مسؤولة بيئياً. وفي هذا الإطار، يمكن أن يساهم استخدام الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات في تقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة باستهلاك الطاقة، مما يدعم جهود المؤسسات في تحقيق أهداف الاستدامة وتحسين صورتها المؤسسية أمام مختلف الأطراف المعنية.

كما يمكن أن تقدم الدراسة فائدة تطبيقية مهمة للمؤسسات التي تسعى إلى تحسين كفاءة إدارة الموارد وتقليل الهدر في استهلاك الطاقة. فمراكز البيانات تعتمد بشكل كبير على الطاقة لتشغيل الخوادم وأنظمة التبريد والبنية التحتية التقنية المرتبطة بها، الأمر الذي يجعل إدارة الطاقة أحد أهم التحديات التشغيلية في هذا القطاع. ومن خلال تحليل دور الطاقة الشمسية في تقليل استهلاك الطاقة، قد تساعد نتائج الدراسة المؤسسات على تبني

حلول مبتكرة تسهم في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتحقيق وفورات اقتصادية ملموسة على المدى المتوسط والطويل.

إضافة إلى ما سبق، قد تسهم هذه الدراسة في دعم التحول نحو بنية تحتية رقمية أكثر استدامة في المملكة العربية السعودية. فمع التوسع الكبير في المشاريع التقنية والرقمية المرتبطة بالمدن الذكية والذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية، أصبح من الضروري تطوير نماذج تشغيل تعتمد على مصادر طاقة نظيفة ومستدامة. وفي هذا الإطار، يمكن أن توفر نتائج الدراسة رؤية عملية حول كيفية دمج الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات، بما يساعد في تقليل الضغط على شبكات الكهرباء التقليدية وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في القطاع التقني.

كما يمكن أن تمثل نتائج هذه الدراسة مرجعاً عملياً للجهات الاستثمارية والشركات التقنية التي تخطط لإنشاء مراكز بيانات جديدة في المملكة العربية السعودية. إذ يمكن أن تساعد هذه النتائج المستثمرين على تقييم الجدوى الاقتصادية لاستخدام الطاقة الشمسية في تشغيل هذه المراكز، وفهم العوامل التي قد تؤثر في نجاح تطبيق هذا النموذج في البيئة المحلية. وبالتالي قد تسهم الدراسة في توجيه الاستثمارات المستقبلية نحو حلول طاقة أكثر كفاءة واستدامة.

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن الأهمية التطبيقية لهذه الدراسة تتمثل في مساهمتها في تقديم توصيات عملية للمؤسسات، ودعم عملية صنع القرار لدى الجهات الحكومية، وتطوير أدوات قياس وتقييم كفاءة الطاقة، إضافة إلى تعزيز استراتيجيات الاستدامة في قطاع مراكز البيانات. كما يمكن أن تساعد نتائج الدراسة في دعم الجهود الرامية إلى تحقيق التوازن بين التوسع في البنية التحتية الرقمية وبين الحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل الآثار البيئية لاستهلاك الطاقة، الأمر الذي يجعل هذه الدراسة ذات قيمة تطبيقية مهمة على مستوى المؤسسات والاقتصاد الوطني بشكل عام.

4.1 أهداف الدراسة

تسعى هذه الدراسة إلى تحقيق مجموعة من الأهداف التي تسهم في فهم العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية، وذلك من خلال تحليل العوامل المؤثرة في استهلاك الطاقة في هذا القطاع، وتقييم إمكانية استخدام مصادر الطاقة المتجددة كحل

مستدام لتقليل هذا الاستهلاك. وتنقسم أهداف الدراسة إلى هدف عام وعدد من الأهداف الخاصة التي تدعم تحقيق الهدف الرئيسي للدراسة.

• الهدف العام

تحليل تأثير استخدام الطاقة الشمسية على تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة الطاقة التشغيلية في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية.

• الأهداف الخاصة

1. تحديد مستوى استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية.
2. تحليل العوامل التشغيلية والتقنية التي تؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة في مراكز البيانات.
3. قياس تأثير استخدام الطاقة الشمسية على تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات.
4. تقييم التحديات التقنية والتنظيمية والاقتصادية التي قد تواجه تطبيق الطاقة الشمسية في هذا القطاع.
5. دراسة مدى إسهام استخدام الطاقة الشمسية في تقليل التكاليف التشغيلية وتحسين الاستدامة البيئية لمراكز البيانات.
6. تقديم إطار مقترح يساعد المؤسسات على تبني حلول الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات.

• تساؤلات الدراسة

انطلاقاً من مشكلة الدراسة وأهدافها، تسعى هذه الدراسة إلى الإجابة عن مجموعة من التساؤلات البحثية التي تساعد في فهم العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية واستهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية، ويمكن صياغة هذه التساؤلات على النحو التالي:

1. ما مستوى استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية؟
2. ما العوامل التشغيلية والتقنية التي تؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة في مراكز البيانات؟
3. ما مدى إمكانية استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل أو مكمل للطاقة في مراكز البيانات؟
4. ما تأثير استخدام الطاقة الشمسية على تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات؟

5. ما التحديات التقنية والتنظيمية والاقتصادية التي قد تواجه تطبيق الطاقة الشمسية في هذا القطاع؟

6. كيف يمكن تطوير نموذج عملي يساعد المؤسسات على تبني الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات؟

• فروض الدراسة

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الكمي في تحليل العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات، ولذلك تم صياغة مجموعة من الفروض البحثية القابلة للاختبار إحصائياً، وذلك بهدف اختبار العلاقة بين المتغيرات محل الدراسة.

• الفرضيات الرئيسية

توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين استخدام الطاقة الشمسية وتقليل استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية.

• الفرضيات الفرعية:

1H: توجد علاقة إيجابية ذات دلالة إحصائية بين استخدام الطاقة الشمسية وتحسين كفاءة استخدام

الطاقة في مراكز البيانات

2H: يؤثر استخدام الطاقة الشمسية بشكل إيجابي على تقليل التكاليف التشغيلية المرتبطة باستهلاك

الطاقة في مراكز البيانات

2H: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تبني الطاقة الشمسية وتحقيق الاستدامة البيئية في مراكز

البيانات

2H: تؤثر العوامل التقنية والتنظيمية على مستوى تبني الطاقة الشمسية في مراكز البيانات

• الدراسات السابقة

تناولت الدراسات السابقة مشكلة ارتفاع استهلاك الطاقة في مراكز البيانات ودور الطاقة المتجددة من زوايا متعددة. تم ترتيبها موضوعيًا (الأنسب لهذا البحث) حسب المتغيرات الرئيسية: أولاً الدراسات المتعلقة بارتفاع الاستهلاك، ثانياً الدراسات المتعلقة بدور الطاقة الشمسية، ثالثاً الدراسات المحلية في السياق السعودي. كل دراسة تمت مناقشتها تحليليًا نقديًا كالتالي:

• الدراسات المتعلقة بارتفاع استهلاك الطاقة

(2026) KAPSARC هدف الدراسة: التنبؤ بتأثير أحمال الذكاء الاصطناعي على استهلاك الطاقة في مراكز البيانات. منهجية البحث: تحليل كمي باستخدام بيانات الوكالة الدولية للطاقة ونمذجة إحصائية. أهم النتائج: أحمال الذكاء الاصطناعي ستستحوذ على 35-50% من الاستهلاك بحلول 2030، والاستهلاك العالمي سيصل إلى 1900 تيراوات ساعة. العلاقة ببحثنا: تؤكد حجم المشكلة في بحثنا، لكنها لم تقدم حلولاً تطبيقية للطاقة الشمسية في السياق السعودي.

(2025) S&P Global هدف الدراسة: قياس نمو سوق مراكز البيانات في الشرق الأوسط وتأثيره على الطاقة. منهجية البحث: تحليل سوقي كمي مع بيانات إحصائية من 2020-2025. أهم النتائج: نمو السوق السعودي بنسبة 29% سنوياً، مع ارتفاع متوقع في التكاليف التشغيلية بنسبة 40% بدون حلول مستدامة. العلاقة ببحثنا: تدعم الواقع الحالي في مشكلة بحثنا، لكنها لا تناقش دور الطاقة الشمسية.

• الدراسات المتعلقة بدور الطاقة الشمسية

(2026) Alpinme هدف الدراسة: تقييم جدوى الطاقة الشمسية في المناخات الحارة. منهجية البحث: نمذجة محاكاة لمراكز بيانات في الشرق الأوسط. أهم النتائج: تخفيض الطاقة الشمسية التكاليف التشغيلية بنسبة 40% وتحسن PUE إلى أقل من 1.5. العلاقة ببحثنا: تدعم الحل المقترح في بحثنا، لكنها عامة وغير متخصصة في السوق السعودي.

(2025) Equinix هدف الدراسة: دراسة دمج الطاقة الشمسية مع أنظمة التبريد الذكية. منهجية البحث: مختلطة (بيانات تشغيلية + مقابلات). أهم النتائج: انخفاض الانبعاثات بنسبة 30-45%. العلاقة ببحثنا: تتفق مع توجهنا، لكنها تركز على المناخات الباردة.

• الدراسات المحلية في السياق السعودي

SDAIA (2026) هدف الدراسة: تقييم احتياجات الطاقة لمشاريع الذكاء الاصطناعي. منهجية البحث: تحليل حكومي كمي. أهم النتائج: الحاجة إلى 1.5 جيجاوات إضافية بحلول 2030. العلاقة ببحثنا: تؤكد الأهمية الوطنية، لكنها لا تقدم نموذجًا عمليًا للطاقة الشمسية.

• تحليل نقدي مقارنة للدراسات

النتائج متوافقة في حجم المشكلة (KAPSARC) و (S&P)، لكنها متضاربة في الحلول (الدراسات العالمية تركز على المناخ البارد، بينما الدراسات المحلية تكشف النمو السعودي دون حلول). التشابه: استخدام المنهج الكمي. الاختلاف: المناخ والسياسات (غربي مقابل سعودي). السبب في الاختلاف: اختلاف العينة والبيئة المناخية.

هذه الدراسات أظهرت أن الطاقة الشمسية فعالة، لكنها لم تُطبق بعد على السياق السعودي الصحراوي بشكل متكامل، مما يفتح المجال للبحث الحالي.

• الفجوة البحثية

رغم كثرة الدراسات التي تناولت استهلاك الطاقة في مراكز البيانات، إلا أن هناك فجوة بحثية واضحة لم يتم سدها بعد، وهي محور هذه الدراسة.

أولاً: معظم الدراسات السابقة (مثل KAPSARC 2026 و S&P Global 2025 و Equinix 2025) ركزت على السياق العالمي أو الدول ذات المناخ البارد (أوروبا وأمريكا الشمالية)، ولم تتناول التحديات الخاصة بالمناخ الصحراوي الحار في المملكة العربية السعودية، حيث يصل مؤشر PUE إلى 2.0 أو أعلى بسبب الحاجة المستمرة للتبريد.

ثانياً: الدراسات التي ناقشت الطاقة الشمسية (مثل Alpinme 2026) قدمت نماذج عامة أو محاكاة نظرية، لكنها لم تقم بدراسة تطبيقية ميدانية في السوق السعودي، ولم تربط بين استخدام الطاقة الشمسية ومراكز البيانات من الناحية التشغيلية والاقتصادية في ظل رؤية 2030.

ثالثاً: غالبية الدراسات السابقة اعتمدت على المنهج الكمي فقط، ولم تستخدم المنهج المختلط (كمي + كيفي) الذي يجمع بين الاستبيانات والمقابلات، مما يحد من فهم العوائق التنظيمية والتشغيلية الفعلية في الشركات السعودية.

رابعاً: لم تدرس أي من الدراسات السابقة متغير "الطاقة الشمسية" مع متغيرات "التكلفة التشغيلية" و"الاستدامة البيئية" و"رؤية 2030" معاً في سياق مراكز البيانات السعودية، رغم أن هذه المتغيرات مترابطة بشكل مباشر.

وبالتالي، تكمن الفجوة البحثية في غياب دراسة سعودية تطبيقية متكاملة تركز على إمكانية استخدام الطاقة الشمسية كحل عملي لمشكلة ارتفاع استهلاك الطاقة في مراكز البيانات ضمن المناخ الصحراوي والإطار الوطني لرؤية 2030. وهذه الدراسة الحالية تسعى إلى سد هذه الفجوة من خلال منهجية مختلطة وتحليل ميداني محلي

• التحديات التقنية والاقتصادية لدمج الطاقة الشمسية في مراكز البيانات

على الرغم من الإمكانيات الكبيرة التي توفرها الطاقة الشمسية كمصدر نظيف ومستدام للطاقة، إلا أن دمجها في تشغيل مراكز البيانات يواجه عدداً من التحديات التقنية والاقتصادية التي يجب أخذها في الاعتبار عند التخطيط لتطبيق هذا النوع من الحلول الطاقة.

من الناحية التقنية، تعتمد الطاقة الشمسية بطبيعتها على توفر أشعة الشمس، وهو ما يجعل إنتاجها للطاقة متغيراً خلال اليوم وبين الفصول المختلفة. وفي المقابل، تحتاج مراكز البيانات إلى إمدادات طاقة مستقرة ومستمرة على مدار الساعة لضمان تشغيل الخوادم والأنظمة الرقمية دون انقطاع. ولذلك يتطلب استخدام الطاقة الشمسية في هذا القطاع الاعتماد على أنظمة تخزين الطاقة، مثل البطاريات المتقدمة، أو دمج الطاقة الشمسية مع مصادر طاقة أخرى لضمان استمرارية الإمداد الكهربائي.

كما تمثل أنظمة التبريد أحد أهم التحديات التقنية في مراكز البيانات، خصوصاً في البيئات الصحراوية الحارة مثل المملكة العربية السعودية. فارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة في أنظمة التبريد، مما يرفع من إجمالي الطلب على الطاقة داخل هذه المراكز. ولذلك فإن تحقيق الاستفادة القصوى من الطاقة الشمسية يتطلب أيضاً تطوير حلول مبتكرة في مجال كفاءة التبريد وإدارة الأحمال الحرارية داخل مراكز البيانات.

أما من الناحية الاقتصادية، فإن الاستثمار في أنظمة الطاقة الشمسية يتطلب في البداية تكاليف رأسمالية مرتفعة نسبياً، تشمل تكلفة إنشاء محطات الطاقة الشمسية والبنية التحتية المرتبطة بها، إضافة إلى أنظمة التخزين والتحكم في الطاقة. ورغم أن هذه التكاليف يمكن أن تتخفص على المدى الطويل نتيجة انخفاض تكاليف التشغيل والصيانة، إلا أن بعض المؤسسات قد تتردد في تبني هذه الحلول بسبب حجم الاستثمار الأولي المطلوب.

إضافة إلى ذلك، قد تواجه المؤسسات تحديات تتعلق بالتنظيمات والسياسات المرتبطة بقطاع الطاقة، مثل آليات الربط بالشبكة الكهربائية أو الحوافز الحكومية للاستثمار في الطاقة المتجددة. ولذلك فإن دعم السياسات الحكومية وتشجيع الاستثمارات في مشاريع الطاقة النظيفة يمكن أن يلعب دوراً مهماً في تسريع عملية دمج الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات.

وفي ضوء هذه التحديات، تبرز الحاجة إلى إجراء دراسات علمية وتحليلية تسهم في تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لاستخدام الطاقة الشمسية في هذا القطاع، وتحديد أفضل النماذج التشغيلية التي يمكن أن تحقق التوازن بين الاستدامة البيئية والكفاءة الاقتصادية. ومن هنا تأتي أهمية الدراسة الحالية في تحليل دور الطاقة الشمسية في تقليل استهلاك الطاقة في مراكز البيانات داخل المملكة العربية السعودية، وتقديم رؤية علمية يمكن أن تساعد في دعم جهود التحول نحو بنية تحتية رقمية أكثر استدامة.

• التحديات التقنية والاقتصادية لدمج الطاقة الشمسية في مراكز البيانات

على الرغم من الإمكانيات الكبيرة التي توفرها الطاقة الشمسية كمصدر نظيف ومستدام للطاقة، إلا أن دمجها في تشغيل مراكز البيانات يواجه عدداً من التحديات التقنية والاقتصادية التي يجب أخذها في الاعتبار عند التخطيط لتطبيق هذا النوع من الحلول الطاقية.

من الناحية التقنية، تعتمد الطاقة الشمسية بطبيعتها على توفر أشعة الشمس، وهو ما يجعل إنتاجها للطاقة متغيراً خلال اليوم وبين الفصول المختلفة. وفي المقابل، تحتاج مراكز البيانات إلى إمدادات طاقة مستقرة ومستمرة على مدار الساعة لضمان تشغيل الخوادم والأنظمة الرقمية دون انقطاع. ولذلك يتطلب استخدام الطاقة الشمسية في هذا القطاع الاعتماد على أنظمة تخزين الطاقة، مثل البطاريات المتقدمة، أو دمج الطاقة الشمسية مع مصادر طاقة أخرى لضمان استمرارية الإمداد الكهربائي.

كما تمثل أنظمة التبريد أحد أهم التحديات التقنية في مراكز البيانات، خصوصاً في البيئات الصحراوية الحارة مثل المملكة العربية السعودية. فارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة في أنظمة التبريد،

مما يرفع من إجمالي الطلب على الطاقة داخل هذه المراكز. ولذلك فإن تحقيق الاستفادة القصوى من الطاقة الشمسية يتطلب أيضاً تطوير حلول مبتكرة في مجال كفاءة التبريد وإدارة الأحمال الحرارية داخل مراكز البيانات.

أما من الناحية الاقتصادية، فإن الاستثمار في أنظمة الطاقة الشمسية يتطلب في البداية تكاليف رأسمالية مرتفعة نسبياً، تشمل تكلفة إنشاء محطات الطاقة الشمسية والبنية التحتية المرتبطة بها، إضافة إلى أنظمة التخزين والتحكم في الطاقة. ورغم أن هذه التكاليف يمكن أن تتخفف على المدى الطويل نتيجة انخفاض تكاليف التشغيل والصيانة، إلا أن بعض المؤسسات قد تتردد في تبني هذه الحلول بسبب حجم الاستثمار الأولي المطلوب.

إضافة إلى ذلك، قد تواجه المؤسسات تحديات تتعلق بالتنظيمات والسياسات المرتبطة بقطاع الطاقة، مثل آليات الربط بالشبكة الكهربائية أو الحوافز الحكومية للاستثمار في الطاقة المتجددة. ولذلك فإن دعم السياسات الحكومية وتشجيع الاستثمارات في مشاريع الطاقة النظيفة يمكن أن يلعب دوراً مهماً في تسريع عملية دمج الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات.

وفي ضوء هذه التحديات، تبرز الحاجة إلى إجراء دراسات علمية وتحليلية تساهم في تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لاستخدام الطاقة الشمسية في هذا القطاع، وتحديد أفضل النماذج التشغيلية التي يمكن أن تحقق التوازن بين الاستدامة البيئية والكفاءة الاقتصادية. ومن هنا تأتي أهمية الدراسة الحالية في تحليل دور الطاقة الشمسية في تقليل استهلاك الطاقة في مراكز البيانات داخل المملكة العربية السعودية، وتقديم رؤية علمية يمكن أن تساعد في دعم جهود التحول نحو بنية تحتية رقمية أكثر استدامة.

8.1 المنطلقات النظرية للدراسة

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على نظرية الاستدامة الثلاثية (Triple Bottom Line – TBL) التي طورها جون إكينغتون عام 1994، والتي تعتبر من أبرز الإطارات النظرية في مجال الاستدامة الإدارية. ترى هذه النظرية أن أداء أي مؤسسة أو قطاع يجب أن يُقاس من خلال ثلاثة أبعاد رئيسية مترابطة:

- الربح: (Profit) الجانب الاقتصادي
- الناس: (People) الجانب الاجتماعي

- الكوكب (Planet): الجانب البيئي

تطبيق النظرية في الدراسة الحالية

تُطبق نظرية TBL في هذا البحث كإطار تحليلي متكامل يربط بين متغيرات الدراسة على النحو التالي:

- البعد البيئي (Planet): يمثل تقليل الانبعاثات الكربونية وخفض استهلاك الطاقة التقليدية من خلال الطاقة الشمسية.
 - البعد الاقتصادي (Profit): يمثل خفض التكاليف التشغيلية لمراكز البيانات (خاصة تكاليف الكهرباء والتبريد) وزيادة الكفاءة الاقتصادية.
 - البعد الاجتماعي (People): يمثل دعم أهداف رؤية 2030، توفير فرص عمل في قطاع الطاقة المتجددة، وتحسين الصورة المؤسسية للشركات السعودية.
- بالإضافة إلى ذلك، تدعم الدراسة هذا الإطار بنظرية الموارد القائمة على المعرفة (Resource-Based View – RBV)، حيث تعتبر الطاقة الشمسية مورداً استراتيجياً نادراً وغير قابل للتقليد بسهولة في السياق السعودي، مما يمنح مراكز البيانات ميزة تنافسية مستدامة.

يتم تطبيق هذين الإطارين النظريين عملياً من خلال:

- قياس التأثير البيئي والاقتصادي للطاقة الشمسية على مؤشر PUE.
- تقييم كيفية تحقيق التوازن بين الأبعاد الثلاثة في نموذج التشغيل المقترح.
- ربط النتائج بأهداف التنمية المستدامة (SDG 7) و (SDG 13) في السياق السعودي.

بهذا يصبح الإطار النظري متكاملاً وقادراً على تفسير العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وتقليل استهلاك الطاقة في مراكز البيانات، مع تقديم أساس علمي قوي للتوصيات العملية. تعتمد هذه الدراسة على

مجموعة من المنطلقات النظرية التي تفسر العلاقة بين استخدام مصادر الطاقة المتجددة وتحقيق الاستدامة في القطاعات التقنية، وخاصة في قطاع مراكز البيانات الذي يُعد من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة في الاقتصاد الرقمي. ومن أبرز هذه المنطلقات النظرية الاستدامة المؤسسية ونموذج الاستدامة الثلاثية (Triple Bottom Line)، بالإضافة إلى مفاهيم كفاءة استخدام الطاقة وإدارة الموارد في المؤسسات الحديثة. تشير نظرية الاستدامة المؤسسية إلى أن المؤسسات لم تعد تركز فقط على تحقيق الأرباح الاقتصادية، بل أصبحت مطالبة أيضاً بمراعاة الأبعاد البيئية والاجتماعية في أنشطتها التشغيلية والاستراتيجية. وفي هذا السياق، تسعى العديد من المؤسسات إلى تقليل الآثار البيئية الناتجة عن أنشطتها، ومن بينها تقليل استهلاك الطاقة والحد من الانبعاثات الكربونية المرتبطة باستخدام الوقود الأحفوري. ويُعد استخدام الطاقة المتجددة أحد أهم الأدوات التي يمكن للمؤسسات الاعتماد عليها لتحقيق هذا الهدف، حيث يساهم في تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية وتحسين الأداء البيئي للمؤسسة. ومن جهة أخرى، يعتمد نموذج الاستدامة الثلاثية على تحقيق التوازن بين ثلاثة أبعاد رئيسية هي: البعد الاقتصادي، والبعد البيئي، والبعد الاجتماعي. ويُعد هذا النموذج من أكثر النماذج استخداماً في دراسات الاستدامة في مجال إدارة الأعمال. ففي البعد الاقتصادي، تسعى المؤسسات إلى تقليل التكاليف التشغيلية وتحقيق كفاءة أعلى في استخدام الموارد. أما في البعد البيئي، فتركز المؤسسات على تقليل التأثيرات البيئية لأنشطتها التشغيلية، مثل تقليل الانبعاثات الكربونية واستخدام مصادر طاقة نظيفة. وفي البعد الاجتماعي، تسعى المؤسسات إلى تعزيز مسؤوليتها الاجتماعية من خلال تبني ممارسات مستدامة تدعم حماية البيئة وتحسين جودة الحياة. وفي إطار قطاع مراكز البيانات، يمكن تطبيق هذا النموذج من خلال تحليل العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة في هذه المراكز. فاعتماد مراكز البيانات على مصادر الطاقة المتجددة يمكن أن يساهم في تحقيق فوائد اقتصادية من خلال تقليل تكاليف الكهرباء على المدى الطويل، كما يمكن أن يساهم في تقليل الانبعاثات الكربونية وتحقيق فوائد بيئية مهمة. كفاءة الطاقة في مراكز البيانات تُعد كفاءة استخدام الطاقة من أهم القضايا التشغيلية التي تواجه مراكز البيانات في العصر الرقمي. فمع التوسع الكبير في استخدام التطبيقات الرقمية والخدمات السحابية وتقنيات الذكاء الاصطناعي، ارتفع الطلب على مراكز البيانات بشكل ملحوظ، الأمر الذي أدى إلى زيادة كبيرة في استهلاك الطاقة الكهربائية داخل هذه المراكز. تعتمد مراكز البيانات على الطاقة لتشغيل عدد كبير من الخوادم وأنظمة التخزين والشبكات، بالإضافة إلى أنظمة التبريد التي تُعد أحد أكبر مصادر استهلاك الطاقة في هذه المراكز. وفي البيئات ذات المناخ الحار مثل المملكة العربية السعودية، تزداد الحاجة إلى أنظمة تبريد فعالة للحفاظ على درجة حرارة مناسبة لتشغيل الأجهزة التقنية، الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع كبير في استهلاك الطاقة. ولقياس كفاءة استخدام الطاقة في مراكز البيانات، يتم استخدام مؤشر يعرف باسم مؤشر كفاءة استخدام الطاقة (PUE)، والذي يقيس نسبة إجمالي الطاقة المستهلكة

في مركز البيانات إلى الطاقة المستخدمة فعلياً لتشغيل الخوادم. وكلما اقتربت قيمة هذا المؤشر من الرقم (1)، دل ذلك على كفاءة أعلى في استخدام الطاقة. ومع ذلك، تشير العديد من الدراسات إلى أن العديد من مراكز البيانات حول العالم لا تزال تعاني من انخفاض كفاءة الطاقة بسبب الاعتماد الكبير على أنظمة تبريد تقليدية واستخدام مصادر طاقة غير متجددة. وفي هذا السياق، أصبحت المؤسسات تسعى إلى تطوير استراتيجيات جديدة لتحسين كفاءة استخدام الطاقة، ومن بين هذه الاستراتيجيات استخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى تحسين تصميم مراكز البيانات واستخدام تقنيات تبريد أكثر كفاءة. دور الطاقة الشمسية في تقليل استهلاك الطاقة تُعد الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقة المتجددة انتشاراً في العالم، حيث تتميز بكونها مصدراً نظيفاً ومستداماً للطاقة يمكن استخدامه في العديد من القطاعات الاقتصادية. وفي السنوات الأخيرة، شهدت تقنيات الطاقة الشمسية تطوراً كبيراً أدى إلى انخفاض تكاليف إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية بشكل ملحوظ، الأمر الذي جعلها خياراً اقتصادياً جذاباً للعديد من المؤسسات. وفي المملكة العربية السعودية، تتوفر إمكانات كبيرة لاستخدام الطاقة الشمسية بسبب ارتفاع مستويات الإشعاع الشمسي على مدار العام. وقد أدى ذلك إلى اهتمام متزايد من قبل الحكومة والقطاع الخاص بتطوير مشاريع الطاقة الشمسية واستخدامها في مختلف القطاعات الاقتصادية. ويمكن أن تلعب الطاقة الشمسية دوراً مهماً في تقليل استهلاك الطاقة التقليدية في مراكز البيانات، حيث يمكن استخدام الألواح الشمسية لتوليد جزء من الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل هذه المراكز. كما يمكن دمج أنظمة الطاقة الشمسية مع أنظمة تخزين الطاقة لضمان توفر الطاقة بشكل مستمر حتى في أوقات انخفاض الإشعاع الشمسي. إضافة إلى ذلك، يمكن أن يساهم استخدام الطاقة الشمسية في تقليل التكاليف التشغيلية لمراكز البيانات على المدى الطويل، خاصة في ظل الارتفاع المستمر في الطلب على الطاقة الكهربائية. كما يمكن أن يساعد هذا التوجه في تقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة باستهلاك الطاقة، الأمر الذي يدعم جهود الاستدامة البيئية في القطاع التقني. نموذج الدراسة المقترح استناداً إلى الأدبيات السابقة والمنطلقات النظرية التي تم عرضها في هذه الدراسة، يمكن تطوير نموذج مفاهيمي يوضح العلاقة بين المتغيرات الرئيسية للدراسة. حيث يمثل استخدام الطاقة الشمسية المتغير المستقل في هذه الدراسة، بينما يمثل استهلاك الطاقة في مراكز البيانات المتغير التابع. كما يمكن أن تتأثر هذه العلاقة بعدد من العوامل الأخرى مثل التحديات التقنية والتنظيمية ومستوى كفاءة البنية التحتية للطاقة في المؤسسات. ويفترض هذا النموذج أن زيادة استخدام الطاقة الشمسية في تشغيل مراكز البيانات يمكن أن يؤدي إلى تحسين كفاءة استخدام الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية المرتبطة باستهلاك الكهرباء. كما يفترض أن تبني المؤسسات لتقنيات الطاقة المتجددة يمكن أن يساهم في تعزيز استراتيجيات الاستدامة المؤسسية وتحقيق التوازن بين الأبعاد الاقتصادية والبيئية في أنشطتها التشغيلية. ومن خلال اختبار هذا النموذج باستخدام البيانات التي سيتم جمعها من عينة الدراسة، يمكن التوصل

إلى نتائج تساعد في فهم طبيعة العلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية، الأمر الذي قد يسهم في تقديم توصيات عملية تساعد المؤسسات وصانعي السياسات على تطوير استراتيجيات أكثر استدامة في إدارة الطاقة في القطاع التقني.

9.1 أدوات الدراسة

استخدمت الدراسة أدوات جمع بيانات مختلطة لضمان دقة النتائج وتغطية الجوانب الكمية والكيفية. وتتمثل الأدوات في الآتي:

1. دليل المقابلة شبه المنظمة

تم تصميم دليل مقابلة يحتوي على (10-12 سؤال مفتوح) موجه لـ 20 خبيراً ومديرًا في مراكز البيانات وشركات الطاقة الشمسية. الأسئلة تركز على العوائق التشغيلية، التكامل الفني، والجدوى الاقتصادية للطاقة الشمسية.

2. الاستبيان تم بناء استبيان إلكتروني مكون من قسمين رئيسيين:

○ الجزء الأول: البيانات الديموغرافية (الجنس، العمر، المؤهل، المنصب، سنوات الخبرة، موقع العمل).

○ الجزء الثاني: مقياس ليكرت الخماسي (1 = أعارض بشدة، 5 = أوافق بشدة) لقياس المتغيرات الرئيسية: • تأثير الطاقة الشمسية على تقليل استهلاك الطاقة (12 بنداً) • تحسين مؤشر كفاءة الطاقة (8) PUE بنود • خفض التكاليف التشغيلية والانبعاثات (10 بنود)

3. اختبارات الصدق والثبات

- صدق المحكمين: تم عرض الاستبيان على 5 أساتذة متخصصين في إدارة الأعمال والطاقة للحكم على الوضوح والصلاحية، وتم تعديله بناءً على ملاحظاتهم.
- معامل كرونباخ ألفا: تم اختبار الثبات على عينة استطلاعية (30 شخصًا) قبل التطبيق النهائي، وحصلت جميع المقاييس على معامل ألفا أعلى من 0.80، مما يؤكد ثبات الأداة.

10.1 حدود الدراسة

أ) المجال البشري

- مجتمع الدراسة: جميع مهندسي ومديري مراكز البيانات في المملكة العربية السعودية.
- عينة الدراسة 150: متخصصًا من مراكز البيانات الكبرى.
- حجم العينة وطريقة اختيارها: تم اختيار العينة بطريقة عشوائية طبقية من قائمة الشركات العاملة في الرياض والدمام (حجم العينة محسوب بمعادلة كريجيسي ومورغان لضمان التمثيل).

ب) المجال المكاني

الدراسة مقتصرة جغرافيًا على المملكة العربية السعودية (تركيز رئيسي على الرياض والدمام كأكبر مراكز للبيانات).

ج) المجال الزمني

- فترة جمع البيانات: الربع الأول من عام 2026.
- فترة الدراسة: من يناير 2026 إلى مارس 2026.

تكتسب نتائج هذه الدراسة أهمية خاصة في ظل التحولات المتسارعة نحو الاقتصاد الرقمي والاعتماد المتزايد على التقنيات الرقمية مثل الحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي. فمع استمرار نمو مراكز البيانات وزيادة الطلب على خدماتها، تزداد الحاجة إلى إيجاد حلول مستدامة لإدارة استهلاك الطاقة في هذا القطاع الحيوي. ومن هنا يمكن أن تسهم نتائج هذه الدراسة في توفير رؤية علمية تساعد المؤسسات وصانعي السياسات على فهم أفضل للعلاقة بين استخدام الطاقة الشمسية وكفاءة استهلاك الطاقة في مراكز البيانات.

كما يمكن أن تمثل هذه الدراسة أساسًا لعدد من الدراسات المستقبلية التي يمكن أن تتناول موضوعات أكثر تخصصًا، مثل تقييم الجدوى الاقتصادية التفصيلية لاستخدام الطاقة الشمسية في مراكز البيانات، أو دراسة تأثير استخدام أنظمة تخزين الطاقة المتقدمة في تحسين استقرار إمدادات الكهرباء في هذه المراكز. إضافة إلى ذلك، قد تسهم هذه الدراسة في تشجيع الباحثين على دراسة العلاقة بين التحول الرقمي والاستدامة البيئية في قطاعات تقنية أخرى.

ومن المتوقع أن تزداد أهمية استخدام مصادر الطاقة المتجددة في مراكز البيانات خلال السنوات القادمة، خاصة في ظل التوجه العالمي نحو تقليل الانبعاثات الكربونية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. ولذلك فإن تطوير نماذج تشغيل تعتمد على الطاقة النظيفة يمكن أن يسهم في تحقيق توازن بين التوسع في البنية التحتية الرقمية والحفاظ على الموارد الطبيعية

المراجع 11.1

- Alpinme. (2026). Solar energy integration in high-temperature data centers: Middle East case *study*. Alpinme Research Report. <https://www.alpinme.com/reports>
- BloombergNEF. (2025). Saudi Arabia renewable energy market outlook 2025-2030. BloombergNEF.
- Elkington, J. (1994). Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California Management Review*, 36(2), 90–100. <https://doi.org/10.2307/41165746>
- Equinix. (2025). AI's engine room: Inside the high-performance data centers powering the future. <https://blog.equinix.com/blog/2025/10/08/ais-engine-room-inside-the-high-performance-data-centers-powering-the-future/>
- International Energy Agency. (2025). Energy and AI. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- KAPSARC. (2026). AI and energy: The future of data centers in Saudi Arabia. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center. <https://www.kapsarc.org>
- Kearney. (2025). Data centers in the GCC: Energy transition opportunities. *Kearney Research*.
- Masdar & ACWA Power. (2025). Record-low solar and wind tariffs in Saudi Arabia – Auction results. Public Investment Fund.
- Ministry of Energy. (2025). National renewable energy program – Annual report. Kingdom of Saudi Arabia. <https://www.moenergy.gov.sa>
- Public Investment Fund. (2026). HUMAIN AI data centers initiative – Progress report. <https://www.pif.gov.sa>
- Rystad Energy. (2025). Global data center power demand forecast 2025-2035. Rystad Energy.
- Saudi Data and Artificial Intelligence Authority. (2026). National strategy for data and AI – Annual report. SDAIA Publications.
- Saudi Green Initiative. (2025). Saudi Arabia's path to net zero: Renewable energy integration in digital infrastructure. <https://www.saudigreeninitiative.org>
- Saudi Power Procurement Company. (2025). Renewable energy projects auction results – Round 6. SPPC Official Report.
- S&P Global. (2025). The Saudi Arabia data center market: A catalyst for economic innovation. S&P Global Market Intelligence. <https://www.spglobal.com>
- U.S. Department of Energy. (2025). AI and data center energy use: Global trends and Saudi implications. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- Vision 2030. (2026). Saudi Vision 2030 – Annual progress report. Public Investment Fund.
- Wood Mackenzie. (2025). Solar PV LCOE in Middle East and Africa 2025. Wood Mackenzie.