

جامعة ميدأوشن

كلية الإدارة

قسم / تخصص ماجستير إدارة الأعمال



عنوان البحث

أثر استخدام التحول الذكي علي كفاءة الطاقة والاستدامة في إدارة المرافق
" دراسة تطبيقية علي جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن

إعداد الطالب/

حمدين عبيد حمدين

253002999

إشراف/

د. الفیصل عبد الحمید

د. فايز جراد

العام الدراسي:

2026-2025

إِهْدَاء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

أهدي هذا العمل المتواضع إلى روح والدي الغالي رحمه الله تعالى، الذي كان مصدر الإلهام والقوة في حياتي، والذي غرس في نفسي قيم الاجتهاد والصدق والإصرار، ورغم رحيله عن هذه الدنيا، إلا أن أثره الطيب وتعاليمه النبيلة ما زالت ترافقني في كل خطوة أخطوها. أسأل الله العلي القدير أن يجعل هذا العمل في ميزان حسناته، وأن يتغمده بواسع رحمته ومغفرته، ويسكنه فسيح جناته وإلى والدتي الحبيبة، حفظها الله وأدام عليها الصحة والعافية، التي كانت ولا تزال رمز العطاء والتضحية، والتي أحاطتني بدعواتها الصادقة ومحبتها اللامحدودة، فكان لها الفضل بعد الله في وصولي إلى هذه المرحلة العلمية.

وإلى زوجتي العزيزة، شريكة حياتي وسندي بعد الله، التي وقفت إلى جانبي بكل إخلاص ومحبة، وتحملت معي مشقة الدراسة والبحث، وقدمت لي الدعم والتشجيع والصبر في جميع مراحل هذه الرحلة العلمية، أهديتها هذا الإنجاز تعبيراً عن بالغ التقدير والامتنان.

وإلى أبنائي وأسرتي الكريمة، الذين كانوا مصدر السعادة والدافع للاستمرار وتحقيق الطموح. وإلى زملائي وأصدقائي الأعزاء، الذين شاركوني رحلة العلم والمعرفة، وساندوني بالكلمة الطيبة والدعم المستمر.

وأخيراً، أهدي هذا العمل إلى كل من قدم لي يد العون والدعم والتشجيع، وإلى كل باحث وطالب علم يسعى لخدمة وطنه ومجتمعه من خلال العلم والمعرفة.

سائلاً المولى عز وجل أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به، وأن يكون بداية لمزيد من العطاء والنجاح والتوفيق.

شكر وتقدير

الحمد لله رب العالمين، الذي وفقني لإتمام هذا البحث، وأعانني على تجاوز الصعوبات والتحديات حتى خرج هذا العمل إلى النور، والصلاة والسلام على سيدنا محمد ﷺ وعلى آله وصحبه أجمعين. أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى الله سبحانه وتعالى على ما أنعم به عليّ من توفيق وفضل ونعمة، وأسأله أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم ونافعاً للعلم والمجتمع.

كما أتقدم بأسمى آيات الشكر والتقدير إلى مشرفي الكريمين:

الدكتور/ الفیصل عبد الحمید

الدكتور/ فايز جراد

على ما قدماه من توجيه علمي ودعم أكاديمي وملاحظات بناءة أسهمت في تطوير هذا البحث وإخراجه بالصورة العلمية المطلوبة، فلهما مني كل الشكر والاحترام والتقدير.

وأتقدم بالشكر إلى جامعة ميدأوشن – كلية الإدارة وأعضاء هيئة التدريس الكرام على ما قدموه من علم ومعرفة ودعم أكاديمي طوال فترة الدراسة.

كما أتقدم بالشكر والتقدير إلى جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن ومكتب إدارة المرافق والطاقة وكل من ساهم في توفير المعلومات والبيانات التي دعمت الجانب التطبيقي لهذه الدراسة المتعلقة بأثر التحول الذكي على كفاءة الطاقة والاستدامة في إدارة المرافق.

وأشكر زملائي وأصدقائي وكل من قدم لي المساعدة أو المشورة أو الدعم المعنوي خلال رحلتي العلمية.

وفي الختام، أسأل الله العليّ القدير أن يجزي كل من ساهم في إنجاز هذا العمل خير الجزاء، وأن يوفقنا جميعاً لخدمة العلم والمعرفة وتحقيق المزيد من النجاحات.

فهرس المحتويات

إهداء	أ
شكر وتقدير	ب
فهرس المحتويات	ج
قائمة الجداول	د
فهرس الأشكال	هـ
الفصل الاول: الإطار العام للدراسة	1
1-1 مقدمة	1
1-2 مشكلة الدراسة	3
1-3 أهمية الدراسة	4
1-4 أهداف الدراسة	6
1-5 تساؤلات الدراسة	11
1-6 فروض الدراسة	12
1-7 النظرية العلمية المتبعة	14
الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة	15
2-1 مفهوم التحول الذكي في إدارة المرافق (المتغير المستقل)	15
2-2 الكفاءة التشغيلية (المتغير الوسيط)	18

2-3	الاستدانة المؤسسية (المتغير التابع)	19
2-4	النظريات العلمية المتبعة لإعداد البحث	20
2-5	المنطلقات النظرية للدراسة	22
2-6	الدراسات السابقة ومناقشة نتائجها	23
2-7	الفجوة البحثية وموقع الدراسة الحالية	29
30	الفصل الثالث: منهجية الدراسة	
3-1	مقدمة	30
3-2	تصميم البحث	30
3-3	مجتمع البحث	34
3-4	خصائص العينة	35
3-5	محددات حجم العينة	38
3-6	خطوات جمع البيانات / أداة جمع البيانات	39
3-7	حدود زمانية ومكانية وموضوعية	42
3-8	الأداة المستخدمة للتحليل الإحصائي	43
44	الفصل الرابع: الدراسة الميدانية	
4-1	مقدمة	44
4-2	نظرة عامة على بيانات النموذج العملي	44
4-3	اختبار الفرضية الرئيسية	48
4-4	اختبار الفرضيات الفرعية السبع	50
4-5	التحليل الكمي التفصيلي للمبنى A	52

53	1-4-5 تحليل ساعات التشغيل وأداء المحرك
55	2-4-5 التحليل التحليل الموسمي لاستهلاك الموفرة
57	3-4-5 تحليل الانبعاثات الكربونية
58	4-4-5 تحليل الملف المناخي لمدينة الرياض
60	5-4-5 التحليل المالي المقارن
59	6-4-5 مؤشر التوافق مع رؤية 2030
62	4-6 مناقشة النتائج
63	4-7 أهم نتائج الدراسة
66	4-8 التوصيات
67	4-9 خلاصة الفصل
68	المراجع
68	المراجع العربية
69	المراجع الأجنبية
71	الملاحق
71	النموذج العملي (2026-2030)
78	الملخص العربي (Abstract)
78	الملخص الإنجليزي

قائمة الجدول

- الجدول (1): ملخص الدراسات السابقة ذات الصلة: 28
- الجدول (2): ملخص محددات الدقة واكتمال بيانات النموذج العملي 41
- الجدول (3): ملخص المؤشرات الإجمالية للنموذج العملي التطبيقي (المبنى A) 44
- الجدول (4): مقارنة استهلاك الطاقة الشهري قبل وبعد التطبيق نظام التحول الذكي 46
- الجدول (5): نتائج اختبار الفرضية الرئيسية ومعامل الارتباط 48
- الجدول (6): مختصر نتائج اختبار الفرضية الرئيسية 50
- الجدول (7): نتائج اختبار الفرضيات الفرعية السبع 52
- الجدول (8): معاملات تشغيل المحرك (Hz) ومعامل التحميل حسب الفصول الموسمية 55
- الجدول (9): اجمالي الانبعاثات الكربونية المتجنبة للموسم 56
- جدول (10): التراكم السنوي للانبعاثات الكربونية والطاقة الموفرة (2026-2030) 57
- الجدول (11): مدى توافق نتائج الدراسة مع مستهدفات رؤية 2030 62
- الجدول (12): ملخص السنوات الخمس — جميع المؤشرات المحورية للمبنى (2026-2030) A 71
- الجدول (13): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2026 — المبنى A 72
- الجدول (14): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2027 — المبنى A 73
- الجدول (15): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2028 — المبنى A 74
- الجدول (16): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2029 — المبنى A 75
- الجدول (17): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2029 — المبنى A 76

فهرس الاشكال

- الشكل (1): المتغيرات الثلاثة المتبعة (المستقل - الوسيط - الاستدامة الموسمية) 14
- الشكل (2): النموذج المفاهيمي للدراسة - العلاقة بين التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية .. 32
- الشكل (3): البيانات الشهرية الأساسية لاستهلاك الطاقة قبل وبعد التطبيق 45
- الشكل (4) : نسبة الادخار الشهري في استهلاك الطاقة 47
- الشكل (5): كثافة استهلاك الطاقة اليومية (MWh/يوم) قبل وبعد تطبيق VFD 49
- الشكل (6): سرعة تشغيل المحرك (Hz) حسب الموسم — تقنية VFD 53
- الشكل (7): العلاقة بين CDD وسرعة المحرك (Hz) — نموذج الاستجابة المناخية 55
- الشكل (8): العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) وسرعة المحرك (Hz) 55
- الاشكل (9): نسبة خفض الانبعاثات الكربونية وكمية الكربون المتجنب شهرياً 56
- الشكل (10): الإسقاط التراكمي للتوفير في الطاقة والتكلفة خلال الفترة 2026–2030 57
- الشكل (11): التراكم السنوي للانبعاثات الكربونية المتجنبية والطاقة الموفرة (2026–2030) 58
- الشكل (12): العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) والاستهلاك الفعلي للطاقة 59
- الشكل (13): الطاقة الموفرة شهرياً مقابل الوفر المالي بالريال السعودي 60
- الشكل (14): التحليل المالي الشهري - التكلفة قبل وبعد التطبيق والوفر المالي 60
- الشكل (15): مؤشر التوافق مع أهداف رؤية المملكة العربية السعودية 2030 61
- الشكل (16): بطاقة أداء الاستدامة - مؤشرات الأداء الخمسة 64
- الشكل (17): إجمالي الطاقة الموفرة حسب الفصول الموسمية الأربعة 65
- الشكل (18): ملخص جميع المؤشرات الرئيسية للتحليل الذكي: 77

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1-1 مقدمة:

يشهد العالم المعاصر تحولات متسارعة في مختلف المجالات الاقتصادية والتكنولوجية والبيئية، نتيجة الثورة الصناعية الرابعة، والتطور المتقدم في تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتحليلات البيانات الضخمة، وإنترنت الأشياء، والحوسبة السحابية، وقد انعكس هذا التحول بشكل مباشر على أساليب الإدارة المؤسسية، لا سيما في مجالات التشغيل وإدارة الأصول والبنية التحتية.

في هذا السياق، أصبحت المؤسسات مطالبة بتحقيق معادلة معقدة تجمع بين الكفاءة التشغيلية، وخفض التكاليف، والامتثال البيئي، وتحقيق الاستدامة طويلة الأجل، ولم يعد مقبولا التركيز فقط على تعظيم الأرباح قصيرة الأجل دون مراعاة الأثر البيئي والاجتماعي، بل أصبحت الاستدامة عنصرا استراتيجيا أساسيا في تقييم الأداء المؤسسي.

وتعد إدارة المرافق (Facility Management) من المجالات الحيوية التي تقع في قلب هذه التحولات، نظرا لدورها المباشر في تشغيل المباني والمنشآت، وإدارة الطاقة والمياه، وصيانة الأصول، وضمان استمرارية العمليات التشغيلية، وتشير الإحصاءات الدولية إلى أن المباني مسؤولة عن نسبة كبيرة من استهلاك الطاقة والانبعاثات الكربونية عالميا، مما يجعل إدارة المرافق عنصرا محوريا في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية.

إلا أن إدارة المرافق التقليدية كانت تعتمد غالبا على الصيانة التصحيحية ورد الفعل، مما يؤدي إلى مما يؤدي إلى مجموعة من الإشكاليات التشغيلية المتكررة، يمكن إجمالها فيما يلي:

- ارتفاع تكاليف التشغيل نتيجة غياب التخطيط الاستباقي للصيانة والطاقة.
- تكرار الأعطال المفاجئة وما يترتب عليها من توقف غير مخطط للأنظمة.
- ضعف استغلال الأصول وانخفاض كفاءة دورة حياتها التشغيلية.
- ارتفاع استهلاك الطاقة نتيجة غياب أنظمة التحكم الذكي في الأحمال.
- محدودية الرؤية الاستباقية الاستباقية في اتخاذ القرارات التشغيلية.

ومع ظهور تقنيات التحول الذكي والذكاء الاصطناعي، أصبحت هناك إمكانية حقيقية لتحويل إدارة المرافق من نموذج تفاعلي إلى نموذج استباقي ذكي قائم على التحليل التنبؤي واتخاذ القرار في الزمن الحقيقي.

فالتحول الذكي يمكن المؤسسات من:

- التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها عبر تحليل بيانات المستشعرات
- تحسين استهلاك الطاقة وفق أنماط الاستخدام الفعلي والظروف المناخية المحيطة.
- تحليل الأداء التشغيلي للأصول عبر نماذج خوارزمية
- تحسين استغلال المساحات بناءً على بيانات الإشغال
- دعم تقارير الاستدامة البيئية والاجتماعية ومؤشرات الحوكمة (ESG).

وبالتالي، فإن دمج التحول الذكي في ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق لا يمثل مجرد تحسين تقني، بل يمثل تحولاً استراتيجياً يعيد تعريف دور إدارة المرافق كمحرك أساسي للاستدامة المؤسسية.

ومن هنا تتبع أهمية دراسة العلاقة بين:

- تطبيقات التحول الذكي في إدارة المرافق.
- الكفاءة التشغيلية.
- خفض الانبعاثات الكربونية.
- الاستدامة المؤسسية.

حيث يفترض أن التحول الذكي يعزز الكفاءة التشغيلية، والتي بدورها تعزز الاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة (الاقتصادية، البيئية، الاجتماعية).

2-1 مشكلة الدراسة:

تشهد المؤسسات في العصر الحديث تحولات كبيرة نتيجة التغيرات الاقتصادية والتكنولوجية والبيئية، حيث أصبحت الاستدامة أحد المحاور الرئيسية في استراتيجيات المؤسسات والحكومات حول العالم، ويعد قطاع إدارة المرافق (Facility Management) من القطاعات الحيوية التي تؤثر بشكل مباشر على كفاءة تشغيل المباني والمنشآت، واستهلاك الطاقة والمياه، وجودة بيئة العمل داخل المؤسسات، على الرغم من التطور السريع في تقنيات التحول الرقمي، إلا أن العديد من المؤسسات لا تزال تعتمد على نماذج تشغيل تقليدية في إدارة مرافقها، مما يؤدي إلى ارتفاع تكاليف الصيانة، وزيادة استهلاك الموارد، وضعف التكامل بين الأهداف البيئية والعمليات التشغيلية.

وتتمثل المشكلة في عدة أبعاد رئيسية:

1. ضعف استخدام التحليلات التنبؤية في الصيانة.
 2. عدم تكامل أنظمة إدارة الطاقة مع أنظمة البيانات الذكية.
 3. غياب مؤشرات قياس واضحة تربط بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي والكفاءة التشغيلية.
 4. عدم وضوح الدور الاستراتيجي لإدارة المرافق في تحقيق الاستدامة.
 5. محدودية استخدام التقنيات الذكية في إدارة المرافق.
- وعلى الرغم من التوجه الاستراتيجي في المملكة العربية السعودية نحو تعزيز الاستدامة وتحسين كفاءة استخدام الموارد في إطار رؤية المملكة العربية السعودية 2030، إلا أن تطبيق ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق في العديد من المؤسسات ما يزال محدوداً أو غير واضح المعالم، كما أن تأثير هذه الممارسات على الكفاءة التشغيلية للمؤسسات لم يدرس بشكل كافٍ في البيئة السعودية، وتحديدًا في قطاع التعليم العالي الذي يضم منشآت ضخمة كثيفة الاستهلاك للطاقة. ومما سبق يمكننا تلخيص مشكلة الدراسة لافي الاجابة على التساؤل الاتي :

أثر استخدام التحول الرقمي علي كفاءة الطاقة والاستدامة في إدارة المرافق

" دراسة تطبيقية علي جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن

3-1 أهمية الدراسة:

تكتسب هذه الدراسة أهمية خاصة بالنسبة إلى جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن في المملكة العربية السعودية باعتبارها إحدى أكبر الجامعات في المملكة العربية السعودية والعالم من حيث عدد الطالبات والمساحة والبنية التحتية التعليمية، كما تمثل الجامعة نموذجاً مهماً لتطبيق مفاهيم الإدارة المستدامة للمرافق في جامعة الأميرة نورة الكبرى، خاصة في ظل التوجهات الوطنية المرتبطة Saudi Vision 2030 التي تسعى إلى تعزيز الاستدامة وتحسين كفاءة استخدام الموارد في المؤسسات الحكومية والتعليمية.

• الأهمية العلمية:

تتميز هذه الدراسة بدمجها بين التحول الذكي والذكاء الاصطناعي وإدارة الطاقة والمرافق والاستدامة و مساهمتها في تطوير المعرفة العلمية في مجال الإدارة المستدامة للمرافق داخل جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، حيث إن هذا المجال ما زال بحاجة إلى المزيد من الدراسات العلمية ضمن نموذج تحليلي متكامل، في حين أن معظم الدراسات السابقة تناولت هذه المفاهيم بصورة منفصلة، وبالتالي، فإن الدراسة تسهم في سد فجوة معرفية واضحة ، مع تطوير إطار نظري تكاملي ، وبناء نموذج علمي يوضح العلاقات السببية بين الذكاء الاصطناعي والكفاءة التشغيلية والاستدامة، مع إبراز الدور الوسيط للكفاءة التشغيلية، وهو جانب لم يحظَ باهتمام كافٍ في الدراسات السابقة، كما تضيف الدراسة بُعداً علمياً إضافياً من خلال اعتمادها على بيانات تشغيلية فعلية (Practical Model) مستخرجة من لوحة بيانات رقمية حقيقية، بدلاً من الاكتفاء بالتحليل النظري أو الاستنباطي فقط.

• الأهمية العملية والتطبيقية:

أهمية هذه الدراسة من كونها تتناول تقاطعاً استراتيجياً بين التكنولوجيا المتقدمة (التحول الذكي) والوظائف التشغيلية الحيوية (إدارة المرافق والطاقة)، ضمن إطار الاستدامة المؤسسية، ويزداد هذا الموضوع أهمية في ظل التحولات العالمية نحو الاقتصاد الأخضر، والتحول الرقمي، وارتفاع تكاليف الطاقة، والالتزامات البيئية الدولية ، داخل

جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن، وتقدم الدراسة نموذجاً عملياً واقعياً لكيفية تقليل الأحمال التشغيلية عبر التحليل الذكي، وتوضح العلاقة المباشرة بين إدارة الطاقة الذكية وتقليل الانبعاثات الكربونية، بما يسهم في معالجة أحد أهم التحديات العالمية، وهو أمن الطاقة والاستدامة البيئية.

• الأهمية الاقتصادية:

الأهمية الاقتصادية للدراسة من الدور الحيوي الذي يؤديه التحول الذكي في إدارة المرافق في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل التكاليف التشغيلية داخل المؤسسات، ففي ظل الارتفاع المستمر في تكاليف الطاقة والصيانة والتشغيل، أصبحت المؤسسات بحاجة إلى تبني حلول ذكية تساعدها على تحقيق الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة ورفع كفاءة الأداء التشغيلي، وتسهم تطبيقات التحول الذكي، مثل الذكاء الاصطناعي وأنظمة إدارة المباني الذك (Smart BMS) وإنترنت الأشياء والتوأمة الرقمي، في تحسين إدارة الطاقة والصيانة التنبؤية وتقليل الأعطال المفاجئة، الأمر الذي يؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة وتقليل تكاليف التشغيل والصيانة وإطالة العمر الافتراضي للأصول والمعدات، كما تساعد نتائج الدراسة في دعم القرار داخل جامعة الأميرة نورة والمؤسسات التعليمية الأخرى على تبني استراتيجيات أكثر كفاءة في إدارة المرافق، بما يسهم في تحقيق وفورات مالية وتحسين العائد على الاستثمار في البنية التحتية والمشروعات الذكية، إضافة إلى دعم كفاءة الإنفاق وتحقيق الاستدامة المالية للمؤسسة.

• الأهمية البيئية:

تكتسب الدراسة أهمية بيئية كبيرة نتيجة ارتباطها المباشر بقضايا الاستدامة البيئية وترشيد استهلاك الموارد الطبيعية وخفض الانبعاثات الكربونية، وتعد جامعة الاميرة نورة من الجهات ذات الاستهلاك المرتفع للطاقة ، مما يجعل تحسين إدارة هذه الموارد ضرورة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، وتسهم تطبيقات التحول الذكي في مراقبة استهلاك الطاقة وتحليل أنماط الاستخدام وإدارة الأحمال الكهربائية وتشغيل أنظمة التكييف والإضاءة، بكفاءة أعلى، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الكهرباء والحد من الهدر في الموارد، كما يساعد ذلك في خفض الانبعاثات الكربونية الناتجة عن استهلاك الطاقة وتحسين الأداء البيئي للمؤسسة، وتبرز أهمية الدراسة في دعم الجهود الوطنية والعالمية الرامية إلى مواجهة التغير المناخي وتقليل البصمة الكربونية، من خلال تقديم إطار علمي يوضح دور التقنيات الذكية في تعزيز الاستدامة البيئية

داخل مؤسسات التعليم العالي، بما يتوافق مع أهداف التنمية المستدامة ومستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030 في مجال حماية البيئة وتحسين كفاءة الطاقة.

• الأهمية الاستراتيجية:

تتمثل الأهمية الاستراتيجية للدراسة في مساهمتها في دعم توجه المؤسسات نحو التحول الرقمي والتحول الذكي باعتبارهما من الركائز الأساسية لتحقيق التميز المؤسسي والاستدامة طويلة المدى، فإدارة المرافق لم تعد وظيفة تشغيلية فقط، بل أصبحت عنصرًا استراتيجيًا يساهم في تحقيق الأهداف المؤسسية وتعزيز القدرة التنافسية، وتوفر الدراسة إطارًا علميًا يساعد القيادات الإدارية ومتخذي القرار على فهم العلاقة بين التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية، بما يمكنهم من تطوير استراتيجيات فعالة لإدارة الأصول والطاقة والموارد التشغيلية، كما تساهم في تعزيز ثقافة الابتكار وتوظيف التقنيات الحديثة في تحسين الأداء المؤسسي.

وتكتسب الدراسة أهمية استراتيجية إضافية من خلال توافقها مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030، التي تركز على التحول الرقمي والاستدامة وكفاءة الطاقة وتطوير المدن والجامعات الذكية، كما تدعم توجه جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن نحو تبني الممارسات الذكية والمستدامة في إدارة المرافق، بما يعزز مكانتها كمؤسسة تعليمية رائدة، تسعى إلى تحقيق التميز التشغيلي والاستدامة المؤسسية، وتوظيف التقنيات الحديثة في تحسين الأداء المؤسسي، وتدعم تقارير الحوكمة البيئية والاجتماعية (ESG)، وتعزز صورة المؤسسة أمام المستثمرين والجهات الرقابية.

4-1 أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل دور ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق في تحسين الكفاءة التشغيلية داخل جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، وذلك في إطار التوجهات الوطنية نحو تعزيز الاستدامة وتحسين كفاءة استخدام الموارد في جامعة الأميرة نورة بما يتوافق مع أهداف Saudi Vision 2030 وتسعى الدراسة إلى تحقيق مجموعة من الأهداف الرئيسية والفرعية كما يلي :

- تحليل واقع تطبيق تقنيات التحول الذكي في إدارة المرافق والطاقة بجامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، تهدف هذه الدراسة لتحليل واقع تطبيق تقنيات التحول الذكي داخل إدارة المرافق، من خلال التعرف على مستوى تبني واستخدام التقنيات الحديثة التي تدعم تحسين الأداء التشغيلي ورفع كفاءة إدارة الموارد، ويشمل ذلك تحليل مدى استخدام إدارة المباني الذكية، والتحليلات التنبؤية، والتوأم الرقمي في دعم عمليات التشغيل والصيانة وإدارة الطاقة، كما يركز هذا الهدف على تقييم درجة التكامل بين الأنظمة الذكية المختلفة ومدى مساهمتها في توفير بيانات دقيقة وفورية تساعد في اتخاذ القرارات التشغيلية، وتحسين مراقبة الأداء، وزيادة كفاءة استغلال الأصول والمرافق، بالإضافة إلى ذلك، يسعى إلى تحديد مستوى النضج الرقمي في إدارة المرافق، والتعرف على أبرز التحديات والمعوقات التي تواجه تطبيق تقنيات التحول الذكي، والفرص المتاحة لتعزيز الاستفادة منها في تحقيق الكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية.

- سياق التحول الرقمي في جامعة الأميرة نورة هو تحليل أثر تطبيقات التحول الذكي في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة الكهربائية من خلال مراقبة الأحمال التشغيلية، وتحسين أداء أنظمة التكييف والتبريد، وإدارة تشغيل المعدات والمواتير وفق الاحتياجات الفعلية للمباني، ويشمل ذلك قياس حجم الوفر المحقق في استهلاك الطاقة والتكاليف التشغيلية والانبعاثات الكربونية الناتجة عن تطبيق الحلول الذكية، ومن خلال ذلك، تسعى الدراسة إلى تحديد مدى قدرة تطبيقات التحول الذكي على رفع مستوى الكفاءة التشغيلية للمرافق الجامعة وتحقيق الاستخدام الأمثل للموارد، بما يدعم تحقيق أهداف الاستدامة وتحسين الأداء المؤسسي على المدى الطويل.

- اختبار الدور الوسيط للكفاءة التشغيلية في العلاقة بين التحول الذكي والاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة (الاقتصادية، البيئية، الاجتماعية)، يهدف هذا الهدف إلى اختبار الدور الوسيط للكفاءة التشغيلية في العلاقة بين تطبيق تقنيات التحول الذكي وتحقيق الاستدامة المؤسسية داخل جامعة الأميرة نورة، من خلال دراسة الكيفية التي تسهم بها التحسينات التشغيلية الناتجة عن تطبيق التقنيات الذكية في تعزيز الأداء المستدام للمؤسسة على المدى الطويل، وينطلق هذا الهدف من افتراض أن التحول الذكي لا يؤثر بصورة مباشرة على الاستدامة المؤسسية فحسب، بل إن جزءاً مهماً من هذا التأثير يتحقق من خلال تحسين الكفاءة التشغيلية

للمرافق والأنظمة المختلفة، فكما ارتفع مستوى استخدام التقنيات الذكية في إدارة المرافق والطاقة، تحسنت كفاءة العمليات التشغيلية، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على مؤشرات الاستدامة الاقتصادية والبيئية والاجتماعية، ويركز هذا الهدف على قياس أثر التحول الذكي في رفع الكفاءة التشغيلية من خلال تحسين استهلاك الطاقة، وتقليل الأعطال التشغيلية، وخفض زمن التوقف، وتحسين أداء أنظمة الصيانة وإدارة الأصول، ومن ثم تحليل مدى مساهمة هذه التحسينات في تحقيق أهداف الاستدامة المؤسسية، كما يسعى إلى دراسة أثر الكفاءة التشغيلية على البعد الاقتصادي للاستدامة من خلال خفض تكاليف التشغيل والصيانة وتحسين كفاءة الإنفاق وتعظيم الاستفادة من الموارد المتاحة، كذلك يهدف إلى تحليل أثرها على البعد البيئي من خلال ترشيد استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين كفاءة استخدام الموارد الطبيعية، بالإضافة إلى ذلك، يتناول أثر الكفاءة التشغيلية على البعد الاجتماعي من خلال تحسين جودة الخدمات المقدمة ورفع مستوى رضا المستفيدين وتعزيز بيئة العمل والتعلم داخل المؤسسة، ومن خلال اختبار هذا الدور الوسيط، تسعى الدراسة إلى بناء نموذج علمي يوضح آلية تأثير التحول الذكي على الاستدامة المؤسسية، وإبراز أهمية الكفاءة التشغيلية كحلقة وصل رئيسية تربط بين التقنيات الذكية وتحقيق الأهداف الاستراتيجية للاستدامة في جامعة الاميرة نورة، بما يتوافق مع متطلبات التحول الرقمي ومستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030.

- تقديم نموذج عملي كمي قائم على بيانات تشغيلية فعلية يوضح حجم التوفير في الطاقة والتكلفة والانبعاثات الكربونية الناتج عن تطبيق تقنية محرك التردد المتغير (VFD Motor)، يهدف إلى تقديم نموذج عملي كمي يعتمد على بيانات تشغيلية فعلية لقياس أثر تطبيق تقنية محرك التردد المتغير (Variable Frequency Drive - VFD) على استهلاك الطاقة والتكلفة التشغيلية والانبعاثات الكربونية في المرافق الجامعة، ويُعد نظام VFD من أهم تقنيات التحول الذكي المستخدمة في إدارة الطاقة، حيث يسمح بالتحكم في سرعة المواتير الكهربائية وفقاً لمتطلبات الحمل الفعلي بدلاً من التشغيل المستمر عند السرعة القصوى، ويركز هذا الهدف على تحليل أداء المواتير الكهربائية المستخدمة في أنظمة التكييف والتهوية والمضخات قبل وبعد تطبيق تقنية VFD، من خلال مقارنة استهلاك الطاقة الكهربائية، وساعات التشغيل، وسرعة المحرك (Hz)، ومعامل التحميل (Loading Factor)، والتكلفة الكهربائية، والانبعاثات الكربونية الناتجة عن التشغيل، كما يهدف إلى قياس

حجم التوفير المحقق نتيجة التحكم الذكي في سرعة المواتير (Motor) لوحدة التكييف، وذلك من خلال حساب كمية الطاقة الموفرة بوحدة الميجاواط ساعة (MWh)، وقيمة الوفر المالي بالريال السعودي (SAR)، وكمية الانبعاثات الكربونية المتجنبة بوحدة طن مكافئ ثاني أكسيد الكربون (tCO_2)، ويتم ذلك بالاعتماد على البيانات التشغيلية الفعلية المستخرجة من أنظمة إدارة المباني ولوحات المعلومات التفاعلية (Dashboard)، وتسهم تقنية VFD في تحسين كفاءة تشغيل المواتير من خلال موازنة سرعة الموتور مع الحمل الفعلي المطلوب، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الكهرباء، وخفض الأحمال الكهربائية القصوى، وتقليل الإجهاد الميكانيكي على المعدات، وتحسين موثوقية الأنظمة، وإطالة العمر التشغيلي للمحركات والمكونات المرتبطة بها، كما يساعد هذا النموذج في إبراز العلاقة بين التحكم الذكي في المواتير ومؤشرات الاستدامة، حيث ينعكس خفض استهلاك الطاقة بشكل مباشر على تقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين الكفاءة الاقتصادية والتشغيلية للجامعة، وبالتالي يوفر النموذج دليلاً عملياً وكمياً على الجدوى الفنية والاقتصادية والبيئية لتطبيق تقنية VFD ضمن برامج التحول الذكي وإدارة الطاقة المستدامة، ومن خلال هذا النموذج التطبيقي، تسعى الدراسة إلى تقديم إطار عملي يمكن الاستفادة منه في تقييم مشروعات تحسين كفاءة الطاقة داخل جامعة الاميرة نورة، ودعم متخذي القرار في تبني حلول ذكية تسهم في تحقيق أهداف الاستدامة ورفع الكفاءة التشغيلية بما يتوافق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030.

- في تحليل العلاقة بين العوامل المناخية (درجات التبريد والتدفئة التراكمية (CDD/HDD)) ومستوى استهلاك الطاقة الفعلي يهدف إلى تحليل العلاقة بين العوامل المناخية ومستوى استهلاك الطاقة الفعلي في المرافق الجامعة، من خلال دراسة تأثير درجات التبريد التراكمية (Cooling Degree Days – CDD) ودرجات التدفئة التراكمية (Heating Degree Days – HDD) على الأحمال الكهربائية واستهلاك الطاقة خلال فترات التشغيل المختلفة، ويرتكز هذا الهدف على اعتبار أن الظروف المناخية تعد من أهم العوامل المؤثرة في استهلاك الطاقة بالمباني، حيث تؤدي زيادة درجات الحرارة الخارجية إلى ارتفاع الطلب على أنظمة التكييف والتبريد، مما ينعكس بصورة مباشرة على زيادة استهلاك الكهرباء، وفي المقابل، تؤثر درجات الحرارة المنخفضة

على احتياجات التدفئة في بعض الفترات، الأمر الذي قد يرفع استهلاك الطاقة المرتبط بأنظمة التدفئة والخدمات المساندة ، كما يهدف هذا المحور إلى قياس درجة الارتباط بين قيم درجات التبريد والتدفئة التراكمية وبين استهلاك الطاقة الفعلي، من خلال تحليل البيانات الشهرية والسنوية ومقارنة التغيرات المناخية بمستويات استهلاك الكهرباء المسجلة في المباني محل الدراسة، ويساعد ذلك في تحديد مدى حساسية استهلاك الطاقة للتغيرات المناخية، وفهم الأنماط التشغيلية المرتبطة بارتفاع أو انخفاض الأحمال الحرارية، ويتضمن هذا الهدف دراسة العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) ومؤشرات الأداء التشغيلية المختلفة، مثل استهلاك الطاقة، والتوفير المالي، والانبعاثات الكربونية، وسرعة تشغيل الموتور، ومعامل التحميل، بما يسهم في تفسير أسباب التغيرات في الأداء التشغيلي خلال المواسم المختلفة، كما تسعى الدراسة من خلال هذا التحليل إلى تطوير فهم أعمق لأثر العوامل المناخية على إدارة الطاقة، واستخدام نتائج التحليل في دعم النماذج التنبؤية وتحسين استراتيجيات التشغيل والتحكم الذكي بالمرافق، ويساعد ذلك على رفع كفاءة استهلاك الطاقة، وتحسين التخطيط التشغيلي، وتعزيز قدرة المؤسسة على تحقيق أهداف الاستدامة البيئية والاقتصادية، ومن خلال تحليل العلاقة بين CDD و HDD واستهلاك الطاقة الفعلي، تقدم الدراسة أساساً علمياً يساعد

متخذي القرار على تطوير سياسات أكثر كفاءة لإدارة الطاقة والتكيف مع التغيرات المناخية، بما يدعم استدامة المرافق وتحقيق أفضل أداء تشغيلي ممكن.

- العلاقة الاقتصادية بين تطبيقات التحول الذكي وخفض التكاليف التشغيلية طويلة الأجل، ودعم مفهوم العائد على الاستثمار (Return on Investment – ROI) هدف دراسة أثر تطبيقات التحول الذكي في خفض التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة استخدام الموارد، من خلال تقليل استهلاك الطاقة وتكاليف الصيانة والتشغيل، كما يسعى إلى تقييم العائد على الاستثمار (ROI) الناتج عن تطبيق التقنيات الرقمية، وبيان مدى مساهمتها في تحقيق وفورات مالية مستدامة وتعزيز الاستدامة الاقتصادية للمؤسسة على المدى الطويل، ومن خلال هذا التحليل، تسعى الدراسة إلى تقديم دليل علمي وعملي يوضح أن الاستثمار في تقنيات التحول الذكي لا يقتصر على تحسين الأداء التشغيلي فحسب، بل يمتد ليحقق فوائد اقتصادية ملموسة تتمثل في خفض

التكاليف التشغيلية، وتحسين كفاءة استخدام الموارد، وزيادة العائد على الاستثمار، بما يدعم الاستدامة المالية للمؤسسة ويعزز قدرتها على تحقيق أهدافها الاستراتيجية على المدى الطويل.

- استخراج وتحليل بيانات تشغيلية فعلية من لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية (Energy Dashboard) الخاصة بأحد مباني الجامعة، بهدف تقديم تقييم كمي دقيق لأثر تطبيقات التحول الذكي على استهلاك الطاقة والتكلفة التشغيلية والانبعاثات الكربونية خلال الفترة 2026-2030، ومن خلال هذا التحليل، تهدف الدراسة إلى تقديم أدلة كمية موثوقة توضح أثر التحول الذكي في تحسين كفاءة الطاقة وخفض التكاليف التشغيلية وتقليل الانبعاثات الكربونية، بما يدعم اتخاذ القرار المبني على البيانات ويعزز ممارسات إدارة المرافق المستدامة.

- صياغة مجموعة من التوصيات العملية القابلة للتطبيق لدعم متخذي القرار في جامعة الأميرة ممارسات متقدمة لإدارة المرافق تعتمد على التقنيات الذكية ومبادئ الاستدامة، كما يركز على تقديم مقترحات قابلة للتطبيق تساهم في تحسين كفاءة الطاقة، وتعزيز الأداء التشغيلي، وخفض التكاليف التشغيلية والانبعاثات الكربونية، من خلال التوسع في استخدام أنظمة إدارة المباني الذكية، وتقنيات الذكاء الاصطناعي، والتحليلات التنبؤية، ولوحات المعلومات التفاعلية، وتسعى هذه التوصيات إلى دعم التحول الرقمي وتحقيق الاستدامة المؤسسية بما يتوافق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030.

5-1 تساؤلات الدراسة:

السؤال الرئيسي: في ضوء الإطار النظري الذي يربط بين التحول الذكي ، وإدارة الطاقة ، وممارسات الإدارة المستدامة للمرافق، وخفض الانبعاثات الكربونية، والكفاءة التشغيلية والاستدامة في جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، في ظل توجه المملكة العربية السعودية نحو التحول الرقمي وتحقيق الاستدامة ضمن رؤية 2030، إلى أي مدى يتم تطبيق تقنيات التحول الذكي في ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق والطاقة في مؤسسات المملكة العربية السعودية، وما أثر ذلك على الكفاءة التشغيلية وتحقيق الاستدامة المؤسسية 2030، يتمحور السؤال الرئيسي للدراسة حول:

أثر استخدام التحول الذكي علي كفاءة الطاقة والاستدامة في إدارة المرافق

" دراسة تطبيقية علي جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن

وانطلاقاً من ذلك ، تتمثل تساؤلات الدراسة الفرعية فيما يلي :

- **السؤال الفرعي الاول:** ما أثر دمج التحول الذكي في ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق والطاقة على الكفاءة التشغيلية ، وكيف يسهم ذلك في تعزيز إدارة المرافق كمحرك للاستدامة في جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن؟
- **السؤال الفرعي الثاني:** ما مستوى تكامل أنظمة التحول الذكي مع أنظمة إدارة المباني (BMS) ؟
- **السؤال الفرعي الثالث:** ما أبرز تطبيقات التحول الذكي المستخدمة في إدارة الطاقة والمياه داخل المرافق في جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن؟
- **السؤال الفرعي الرابع:** ما أثر التحول الذكي على الانبعاثات الكربونية وتحسين الاداء البيئي في مرافق جامعة الاميرة نورة بنت عبد الرحمن ؟
- **السؤال الفرعي الخامس:** تساؤلات متعلقة بالاستدامة في جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن هل تسهم إدارة الطاقة الذكية في دعم تقارير الحوكمة البيئية والاجتماعية(ESG) ؟
- إلى أي مدى يعزز التحول الذكي التوازن بين الأبعاد الثلاثة للاستدامة (الاقتصادية – البيئية – الاجتماعية)؟
- الي اي مدى يمكن ان تعتمد جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن على أنظمة التحول الذكي في إدارة الطاقة داخل المباني والمنشآت؟

6-1 فروض الدراسة:

تعتمد هذه الدراسة على اختبار مجموعة من الفرضيات التي تهدف إلى تحليل العلاقة بين ممارسات الإدارة المستدامة للمرافق والكفاءة التشغيلية داخل جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن ، وتأتي هذه الفرضيات في إطار التوجهات الوطنية نحو تحقيق الاستدامة وتحسين كفاءة استخدام الموارد في جامعة الاميرة نورة بما يتوافق مع أهداف رؤية 2030 .

لتحقيق أهداف الدراسة فقد اعتمدنا علي مجموعة من الفروض تساؤلات :

الفروض الرئيسية : H_0 لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي في إدارة المرافق والطاقة على الكفاءة التشغيلية في جامعة الاميرة نورة، ويُختبر مقابل هذه الفرضية الصفرية فرضٌ بديل (H_1) مفاده وجود تأثير إيجابي ذي دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية، على أن يحسم الأمر إحصائياً في الفصل الرابع بناءً على نتائج التحليل الفعلي.

يوجد منها مجموعة من الفرضيات الفرعية التي تتمثل فيما يلي :

- **الفرضية الفرعية الأولى:** لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية عند مستوى ($\alpha \leq 0.05$) لدرجة تطبيق تقنيات التحول الذكي في إدارة الطاقة على الكفاءة التشغيلية في جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن.
- **الفرضية الفرعية الثانية:** لا يوجد فرق ذو دلالة إحصائية ($\alpha \leq 0.05$) في معدل هدر الطاقة بين الفترات التي يعمل فيها نظام الضبط التلقائي الذكي وتلك التي لا يعمل فيها وفق سجلات BMS الفعلية.
- **الفرضية الفرعية الثالثة:** لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لإدارة الطاقة الذكية على خفض استهلاك الطاقة.
- **الفرضية الفرعية الرابعة:** لا توجد علاقة ذات دلالة إحصائية ($\alpha \leq 0.05$) بين نسبة تغطية أجهزة الاستشعار الذكية في مباني الجامعة وكفاءة توزيع استهلاك الطاقة عبر المناطق المختلفة.
- **الفرضية الفرعية الخامسة:** البنية التحتية في المباني محتاجة الي تطوير هذا يؤثر علي عدم تكامل الانظمة و ضعف جودة البيانات.
- **الفرضية الفرعية السادسة:** لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية ($\alpha \leq 0.05$) لمستوى أتمتة قرارات إدارة الطاقة على تقليص التكلفة التشغيلية للطاقة الشهرية في منشآت الجامعة.
- **الفرضية الفرعية السابعة:** جودة البيئة التعليمية داخل القاعات الدراسية و مستوى الراحة البيئية داخل المباني الجامعة .

7-1 النظرية العلمية المتبعة لإعداد البحث:

يعتمد نموذج الدراسة على تحليل العلاقة بين الذكاء الاصطناعي في إدارة المرافق والطاقة وتأثيره على الاستدامة داخل جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن بالمملكة العربية السعودية.

- **المتغير المستقل:** تطبيق التقنيات الذكية في إدارة المرافق والاستدامة بأبعادها (تحليل البيانات التشغيلية، إدارة الأحمال الذكية، أنظمة BMS الذكية، تحليل البيانات التشغيلية ، إدارة الطاقة الذكية).
- **المتغير الوسيط:** يمثل هذا المتغير قدرة جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن على تشغيل مرافقها ومواردها بأبعادها (خفض زمن التوقف ، تحسين استهلاك الطاقة، خفض الانبعاثات الكربونية ، تحسين موثوقية الانظمة).
- **الاستدامة المؤسسية:** يعكس هذا المتغير قدرة جامعة الاميرة نورة بنت عبدالرحمن على تحقيق التوازن وإستدامة (الاجتماعية , والبيئية , والاقتصادية).



الشكل (1) المتغيرات الثلاثة المتبعة (المستقل - الوسيط - الاستدامة الموسمية)

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

1-2 مفهوم التحول الذكي في إدارة المرافق (المتغير المستقل):

مقدمة:

يعد التحول الذكي في إدارة المرافق (Smart Transformation in Facility Management) أحد أبرز التوجهات الحديثة التي أسهمت في إحداث نقلة نوعية في أساليب إدارة وتشغيل المرافق، حيث انتقلت المؤسسات من النماذج التقليدية المعتمدة على الصيانة التصحيحية والاستجابة للمشكلات بعد وقوعها إلى نماذج ذكية تعتمد على البيانات، والتحليل التنبؤي، والأتمتة، واتخاذ القرار في الوقت الفعلي، ويشير مفهوم التحول الذكي إلى توظيف التقنيات الرقمية المتقدمة في إدارة المرافق بهدف تحسين الكفاءة التشغيلية، وتعزيز استدامة الموارد، ورفع جودة الخدمات، وتحقيق الاستخدام الأمثل للطاقة والأصول، ويعتمد التحول الذكي على تكامل مجموعة من التقنيات الحديثة، من أبرزها الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence - AI)، وإنترنت الأشياء (Internet of Things - IoT)، وأنظمة إدارة المباني الذكية (Building Management Systems - BMS)، وتحليل البيانات التشغيلية (Operational Data Analytics)، إضافة إلى إدارة الطاقة الذكية (Smart Energy Management) ويسهم هذا التكامل في جمع البيانات التشغيلية من مختلف أنظمة المبنى وتحليلها بصورة مستمرة، مما يساعد على التنبؤ بالأعطال، وتحسين استهلاك الطاقة، وإدارة الأحمال الكهربائية، وتعزيز كفاءة تشغيل الأصول والمرافق.

وفي مجال إدارة المرافق، يمثل التحول الذكي نقلة استراتيجية من الإدارة التقليدية إلى إدارة المرافق الذكية (Smart Facility Management)، التي تعتمد على التكامل بين الأنظمة الرقمية وأجهزة الاستشعار الذكية ومنصات التحليل، بما يوفر معلومات دقيقة تدعم اتخاذ القرارات التشغيلية والإدارية بصورة أكثر كفاءة، وتشمل تطبيقات التحول الذكي الصيانة التنبؤية، والإدارة الذكية للطاقة، وإدارة الأحمال الكهربائية، والمراقبة الفورية للأصول، والتحكم الآلي في أنظمة التكييف والإضاءة والتهوية، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل الأعطال المفاجئة، وخفض استهلاك الطاقة، وتحسين موثوقية الأنظمة، وإطالة العمر التشغيلي للمعدات، ويرتبط التحول الذكي ارتباطاً وثيقاً بتحقيق الاستدامة المؤسسية، إذ

يسهم في ترشيد استهلاك الموارد الطبيعية، وخفض الانبعاثات الكربونية، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة والمياه، وتقليل التكاليف التشغيلية، بما يدعم تحقيق الأبعاد الاقتصادية والبيئية والاجتماعية للاستدامة، كما يعزز قدرة المؤسسات على تحسين جودة الخدمات ورفع كفاءة استغلال الأصول، وهو ما يتوافق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030 في مجالات التحول الرقمي وكفاءة الطاقة والاستدامة.

ومن الناحية النظرية، يمكن تفسير دور التحول الذكي في إدارة المرافق بالاستناد إلى عدد من الأطر النظرية، أبرزها نظرية الموارد والقدرات (Resource-Based View - RBV) التي ترى أن التقنيات الذكية تمثل موردًا استراتيجيًا يمنح المؤسسة ميزة تنافسية مستدامة، ونظرية القدرات الديناميكية (Dynamic Capabilities Theory) التي تفسر قدرة المؤسسة على تطوير عملياتها والتكيف مع المتغيرات من خلال توظيف التقنيات الرقمية، بالإضافة إلى نظرية الخط الثلاثي للاستدامة (Triple Bottom Line Theory) التي تؤكد أهمية تحقيق التوازن بين الأبعاد الاقتصادية والبيئية والاجتماعية عند تقييم الأداء المؤسسي.

وعلى الرغم من المزايا الكبيرة التي يوفرها التحول الذكي، فإن تطبيقه يواجه عددًا من التحديات، من أهمها ارتفاع تكاليف الاستثمار الأولية، والحاجة إلى بنية تحتية رقمية متطورة، وتكامل الأنظمة المختلفة.

وتوافر الكفاءات البشرية القادرة على إدارة وتشغيل التقنيات الحديثة، إضافة إلى مقاومة التغيير داخل بعض المؤسسات، وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن التحول الذكي في إدارة المرافق يمثل نهجًا استراتيجيًا متكاملًا يهدف إلى توظيف التقنيات الرقمية الحديثة في تحسين الكفاءة التشغيلية، وتعزيز الاستدامة المؤسسية، ودعم اتخاذ القرار المبني على البيانات، مما يجعله أحد أهم العوامل التي تسهم في تطوير المؤسسات الحديثة وتحقيق التميز التشغيلي والاستدامة على المدى الطويل.

- هناك اربعة أبعاد للمتغير المستقل للتحويل الذكي في ادارة المرافق

1. أبعاد المتغير المستقل الأربعة (Smart Load Management):

ضبط الأحمال الكهربائية وتوزيعها تلقائياً عبر مباني الجامعة وفق نمط الاستخدام الفعلي، مما يقلص الهدر الطاقوي، يقاس بمعدل الهدر (kWh) ومؤشر كفاءة توزيع الأحمال (%).

2. أنظمة BMS الذكية Smart BMS Systems:

ربط أنظمة التكييف والإضاءة والأمن والطاقة في منظومة رقمية موحدة تدار بشكل مؤتمت، يُقاس بدرجة تكامل BMS مع التحويل الذكي ونسبة القرارات المؤتمتة.

3. تحليل البيانات التشغيلية Operational Data Analytics:

رصد البيانات لحظياً واستخدام التحليل التنبؤي لاستشراف الأعطال واتخاذ قرارات مبنية على البيانات الفعلية، يقاس بدقة التنبؤ (%) وزمن الاستجابة (ساعة).

4. إدارة الطاقة الذكية Smart Energy Management:

مراقبة استهلاك الطاقة والمياه لحظياً وتحسينهما تلقائياً وفق المتغيرات التشغيلية والمناخية، يقاس بمعدل kWh/m^2 /شهر ونسبة الوفرة المحقق مقارنةً بالخط القاعدي (Baseline).

- تقنية VFD كتطبيق مباشر للتحويل الذكي في الدراسة :

تمثل تقنية محرك التردد المتغير (Variable Frequency Drive – VFD) التطبيق الفعلي المحوري للتحويل الذكي في إدارة الطاقة في هذه الدراسة، تتيح التحكم الذكي في سرعة المحركات الكهربائية وفق الحمل الفعلي بدلاً من التشغيل الثابت عند السرعة القصوى (50 Hz)، مما ينتج وفراً طاقوياً ومالياً وبيئياً موثقاً بالبيانات الفعلية للمبنى A في جامعة الأميرة نورة:

- خفض الطاقة من MWh 2,920 إلى MWh 957 سنوياً - نسبة وفر 67%.
- الوفر المالي 628,000 ريال سعودي سنوياً - تراكمي 3.1 مليون ريال (2026-2030).
- خفض الكربون 1,280 طن CO₂ متجنبة سنوياً - مؤشر التوافق مع رؤية 2030: 88.5%.
- التحكم الموسمي 30 Hz (شتاء) → 40 Hz (صيف) استجابة للتغيرات المناخية (CDD).

2-2 الكفاءة التشغيلية للمتغير الوسيط:

تعرف الكفاءة التشغيلية في سياق هذه الدراسة وفق نظرية بورتر (1985) بأنها قدرة الجامعة على تشغيل مرافقها وإدارة مواردها الطاقوية بأقل قدر من الهدر وأعلى مستوى من الأداء، وهي تمثل الحلقة الوسيطة الجوهرية التي يتجلى من خلالها أثر التحول الذكي قبل أن يتحول إلى مخرجات استدامة ملموسة. وقد كشفت بيانات الدراسة أن خفض ساعات التشغيل من 720 إلى 236 ساعة/شهر (67%) يمثل التجسيد الفعلي لهذا المتغير.

• خفض زمن التوقف Downtime Reduction:

تقليل معدل الأعطال التشغيلية غير المخططة - يقاس بعدد الحوادث/شهر وزمن الاستجابة للصيانة.

• تحسين استهلاك الطاقة Energy Efficiency:

خفض معدل الطاقة المستهلكة (kWh/m²/شهر) - تجلى في الدراسة بوفر 67% بعد تطبيق VFD.

• تحسين موثوقية الأنظمة System Reliability:

ارتفاع نسبة جاهزية الأصول (Asset Availability Rate) - يقاس بمعدل MTBF وإطالة العمر التشغيلي.

3-2 الاستدامة المؤسسية (المتغير التابع):

مفهوم الاستدامة المؤسسية وإطارها النظري:

تعرف الاستدامة المؤسسية وفق إطار المحاور الثلاثة (Triple Bottom Line — TBL) الذي أرساه إلكينجتون (Elkington, 1994) بأنها قدرة المؤسسة على تحقيق التوازن بين ثلاثة أبعاد متكاملة وهي الاقتصادي والبيئي والاجتماعي، بحيث لا يتحقق النجاح المؤسسي الحقيقي إلا من خلال التفوق في الأبعاد الثلاثة معاً لا في البعد المالي وحده، وهو ما يجسده هذا البحث بشكل كمي موثق هنالك عدة أبعاد للاستدامة المؤسسية:

• الاستدامة الاقتصادية **Economic Sustainability**:

خفض تكاليف الطاقة والتشغيل - وفر مالي سنوي SAR 628,000 - تراكمي 3.1 مليون SAR (2026 -2030) - عائد استثمار (ROI) موثق.

• الاستدامة البيئية **Environmental Sustainability**:

خفض الانبعاثات الكربونية 1,280 طن CO₂/سنة - ترشيد الطاقة والمياه - تقليل البصمة الكربونية - دعم مستهدفات المناخ.

• الاستدامة الاجتماعية **Social Sustainability**:

تحسين جودة البيئة الداخلية للقاعات - تعزيز راحة المستفيدين - رفع كفاءة بيئة التعليم والعمل - تحسين مؤشرات ESG.

• التوافق مع رؤية 2030 **Vision Alignment 2030**:

يدعم هدف خفض الطاقة 43% - التحول الرقمي - الجامعات الذكية - مؤشر التوافق المحقق في الدراسة: 88.5%.

4-2 النظريات العلمية المتبعة لإعداد البحث:

تستند هذه الدراسة إلى أربع نظريات علمية راسخة تشكل معاً الإطار النظري المتكامل لتفسير العلاقات السببية بين متغيراتها الثلاثة:

• نظرية التحول الرقمي (Digital Transformation Theory):

1. المؤسس ماكافي وبرينيولفسون سنة 2014.
2. التعريف الجوهرى هي تفسر كيف تعيد التقنيات الرقمية هندسة العمليات المؤسسية وترفع أداءها من خلال التكامل الشامل بين منظومة التقنيات الحديثة، محولة المؤسسات من النماذج التقليدية إلى نماذج رقمية ذكية.
3. دور الدراسة تبرر تبني جامعة الأميرة نورة لتقنيتي VFD و BMS بوصفهما تجسيداً عملياً لاستراتيجية التحول الرقمي الشامل في إدارة المرافق.
4. الربط بالمتغيرات المتغير المستقل: تقنيات التحول الذكي (VFD+BMS+AI) هي التجسيد العملي لهذه النظرية في بيانات الدراسة الفعلية.

• نظرية الكفاءة التشغيلية (Operational Efficiency Theory):

1. المؤسس بورتر سنة 1985.
2. التعريف الجوهرى تركز على تحسين استخدام الموارد وتقليل الفاقد التشغيلي من خلال تحسين العمليات وتقليل التكاليف، وترى أن الكفاءة التشغيلية هي المولد الرئيسى للقيمة المؤسسية المستدامة.
3. دور تمثل الإطار المباشر لقياس مخرجات التحول الذكي - خفض kWh وساعات التشغيل والأعطال - وتبرر دور الكفاءة التشغيلية كمتغير وسيط.
4. الربط بالمتغيرات المتغير الوسيط: الكفاءة التشغيلية (خفض 67% في الطاقة + تقليل ساعات التشغيل) هي التطبيق المباشر لهذه النظرية.

• **نظرية الاستدامة ومحاورها الثلاثة (Triple Bottom Line – TBL):**

1. المؤسس جون إكينجتون سنة 1994.
2. **التعريف الجوهرى** تؤكد أن النجاح المؤسسي الحقيقي يقاس بثلاثة محاور: الاقتصادي والبيئي والاجتماعي، وليس بالأداء المالي وحده، وقد أصبحت معياراً دولياً لتقييم الاستدامة المؤسسية.
3. دور الدراسة تحدد الغاية النهائية للدراسة — الاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة — وتوفر الإطار التصنيفي لتحليل مخرجات تطبيق VFD في المبنى A.
4. الربط بالمتغيرات المتغير التابع: الاستدامة (628K SAR وفر اقتصادي + 1,280 طن CO₂ بيئياً + جودة البيئة اجتماعياً) هو تجسيد هذه النظرية.

• **نظرية الموارد والمقدرات (Resource – Based View – RBV):**

1. المؤسس برني سنة 1991.
2. **التعريف الجوهرى** ترى أن الموارد والقدرات الداخلية للمؤسسة — ومنها التقنيات الذكية — تمثل ميزة تنافسية مستدامة عندما تكون نادرة وغير قابلة للتقليد والاستبدال.
3. دور الدراسة دور تبرر الاستثمار الاستراتيجي في منظومة VFD وBMS بوصفه ميزة تنافسية تضمن الاستدامة على المدى البعيد، ولا يمكن للمنافسين تقليدها بسهولة.
4. الربط بالمتغيرات تربط بين المتغيرات الثلاثة: التقنية الذكية (مستقل) ← قدرة تشغيلية متميزة (وسيط) ← ميزة استدامة مستدامة (تابع).

2-5 المنطلقات النظرية للدراسة:

• التحول الذكي والذكاء الاصطناعي في إدارة المرافق:

يعد التحول الذكي القائم على الذكاء الاصطناعي من أهم التقنيات الحديثة التي أسهمت في إحداث تحول جذري في أساليب إدارة المرافق، إذ انتقلت المؤسسات من النماذج التقليدية المعتمدة على الاستجابة للمشكلات إلى نماذج ذكية تعتمد على التحليل التنبؤي واتخاذ القرار المبني على البيانات، ففي مجال إدارة المرافق، يتيح الذكاء الاصطناعي: التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها، وتحسين استهلاك الطاقة وفق أنماط الاستخدام الفعلي، وتحليل الأداء التشغيلي للأصول، وتحسين استغلال المساحات، ودعم تقارير الاستدامة (ESG).

• العوامل المناخية وأثرها على إدارة الطاقة

تكشف بيانات الدراسة ارتباطاً وثيقاً بين درجات التبريد التراكمية (Cooling Degree Days – CDD) وبين استهلاك الطاقة الفعلي في المبنى A، إذ يرتفع الاستهلاك في أشهر الصيف (CDD: 552 – 605) مقارنة بأشهر الشتاء (CDD: 0–15)، وقد استجابت تقنية VFD لهذا التباين من خلال رفع سرعة المحرك في الصيف (36–40 Hz) وخفضها في الشتاء (30 Hz)، مما يُثبت ذكاء النظام في التكيف التلقائي مع الأحوال الحرارية.

• الربط بين رؤية 2030 والإطار النظري:

يتوافق هذا البحث مع ثلاثة محاور استراتيجية في رؤية المملكة العربية السعودية 2030:

- كفاءة الطاقة هدف خفض الاستهلاك بنسبة 43% — حققت الدراسة 67% في المبنى A وحده.
- التحول الرقمي توظيف BMS والذكاء الاصطناعي في إدارة مرافق الجامعات الحكومية.
- الاستدامة البيئية خفض 1,280 طن CO₂/سنة — مؤشر التوافق مع رؤية 2030: 88.5%.

6-2 الدراسات السابقة:

مقدمة:

تمثل الدراسات السابقة أحد المكونات الأساسية في البحث العلمي، حيث تساعد في بناء الإطار المعرفي للدراسة وتحديد الفجوة البحثية التي تسعى الدراسة الحالية إلى معالجتها، كما تساهم في توضيح الاتجاهات الحديثة في مجال التحول الرقمي وإدارة المرافق وكفاءة الطاقة والاستدامة المؤسسية، وتوفر أساساً علمياً لتطوير النموذج البحثي وصياغة الفرضيات، ويستعرض هذا الفصل أبرز الدراسات العربية والأجنبية ذات الصلة، مرتبة بحسب محاورها الرئيسية، ثم يعرض الإطار النظري للدراسة، وصولاً إلى تحديد الفجوة البحثية وموقع الدراسة الحالية منها.

الدراسات المتعلقة بالاستدامة والتحول الرقمي في الجامعات السعودية

• دراسة المركز السعودي لكفاءة الطاقة (SEEC) :

تسهم هذه الدراسة على رفع كفاءة استهلاك الطاقة في المباني والقطاع الصناعي ، كما تبنت رؤية 2030 التحول الرقمي وتحسين كفاءة الموارد كأحد أهدافها الاستراتيجية ، وقد أشارت تقارير محلية إلى أن قطاع المباني يمثل نسبة كبيرة من استهلاك الطاقة، خاصة بسبب أنظمة التبريد ، مما يجعل إدارة الطاقة الذكية أولوية وطنية ، إلا أن الدراسات الأكاديمية المحلية التي تختبر أثر التحول الرقمي في إدارة المرافق على الكفاءة التشغيلية والاستدامة لا تزال محدودة، مناقشة نتائج الدراسة.

• دراسة دور إدارات الجامعات السعودية في التحول نحو الاستدامة (2019) :

اعتمدت هذه الدراسة إلى تحليل دور إدارات الجامعات الحكومية في المملكة العربية السعودية في التحول نحو الاستدامة، من خلال دراسة مجموعة من الجامعات الحكومية ومقارنة تجربتها ببعض الخبرات العالمية و استخدمت الدراسة المنهج الوصفي المسحي، حيث شملت عينة الدراسة عدداً من القيادات الأكاديمية في خمس جامعات سعودية، وتم جمع البيانات باستخدام نموذج عملي وأظهرت النتائج أن مستوى إسهام إدارات الجامعات في التحول نحو الاستدامة جاء بدرجة متوسطة، وأن هناك حاجة إلى تطوير السياسات والإجراءات التي تدعم الاستدامة داخل الجامعات ، كما أشارت الدراسة إلى عدد من التحديات مثل ضعف الحوافز وقلة البرامج المؤسسية الخاصة بالاستدامة وأوصت الدراسة بضرورة (إنشاء إدارات متخصصة بالاستدامة داخل الجامعات ، تعزيز برامج التوعية البيئية ، الاستفادة من التجارب

الدولية في تطوير ممارسات الاستدامة في التعليم العالي) ، استفادت الدراسة الحالية من هذه الدراسة في تأكيد أهمية وجود سياسات وهياكل تنظيمية واضحة داعمة للاستدامة كشرط مسبق لنجاح أي تحول تقني، وهو ما انعكس في توصية الدراسة الحالية بإنشاء وحدة تنظيمية متخصصة بالاستدامة وكفاءة الطاقة داخل إدارة المرافق بجامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن.

• دراسة إدارة الطاقة في مباني الجامعات السعودية :

دراسة تحليل نظم إدارة الطاقة في الحرم الجامعي وأثرها في تقليل استهلاك الكهرباء وتحسين كفاءة تشغيل المباني، أظهرت نتائج الدراسة أن التوسع في المباني الجامعة أدى إلى زيادة الطلب على الطاقة، مما يتطلب تطبيق أنظمة ذكية لإدارة الطاقة داخل الحرم الجامعي، كما أكدت الدراسة أن استخدام أنظمة إدارة الطاقة (Energy Management Systems) يمكن أن يساهم بشكل كبير في تقليل استهلاك الكهرباء وتحسين كفاءة تشغيل المباني كما أوضحت الدراسة أن أنظمة إدارة الطاقة يمكن أن تتحكم في (أنظمة التكييف , أنظمة الإضاءة ، استهلاك الكهرباء داخل المباني)، الاستفادة في الدراسة الحالية شكلت هذه الدراسة مرجعاً مهماً لفهم السياق العام لتحديات إدارة الطاقة في الجامعات السعودية الكبرى، وقد وجدت الدراسة الحالية في تجربة المبنى A نموذجاً مضاداً إيجابياً لهذه الإشكالية، حيث حقق خفضاً صافياً في الاستهلاك (وليس مجرد إبطاء لمعدل الزيادة) بفضل التكامل بين أنظمة BMS الذكية والمحركات متغيرة السرعة.

• دراسة الاستدامة في الجامعات السعودية (2020):

استخدمت هذه الدراسة منهج تحليل المحتوى (Content Analysis) للوثائق والتقارير المؤسسية الرسمية الصادرة عن عدد من الجامعات السعودية، لتقييم مدى نضج أطر الاستدامة المؤسسية المعلنة مقارنة بالممارسة الفعلية، وأبرز النتائج كشفت الدراسة عن فجوة بين الخطاب المؤسسي المعلن حول الاستدامة والممارسات التشغيلية الفعلية في كثير من الحالات، وأوصت بضرورة تطوير مؤشرات أداء كمية قابلة للقياس بدلاً من الاكتفاء بالبيانات الوصفية العامة في التقارير المؤسسية، والاستفادة في الدراسة الحالية توصية مباشرة من هذه الدراسة، تمثلت في الاعتماد على بيانات تشغيلية كمية موثقة (لوحة معلومات الطاقة) بدلاً من الاختصار على البيانات الوصفية أو الإدراكية فقط، بما يسد الفجوة التي حذرت منها هذه الدراسة بين الخطاب والممارسة.

• دراسة دور الجامعات في تحقيق التنمية المستدامة:

اعتمدت هذه الدراسة على منهج دراسة الحالة المقارنة (Comparative Case Study) لعدد من الجامعات السعودية، بهدف تحليل مساهمتها في محاور التنمية المستدامة المختلفة (البحث العلمي، الشراكة المجتمعية، إدارة الموارد)، أظهرت النتائج تفاوتًا بين المحاور الثلاثة، حيث تفوقت الجامعات في مجالي البحث العلمي والشراكة المجتمعية، بينما تأخر أدائها نسبيًا في محور إدارة الموارد والبنية التحتية، وهو ما يتسق بصورة مباشرة مع النتيجة التي توصلت إليها الدراسة الحالية بخصوص الحاجة إلى مزيد من الجهد في تطوير ممارسات إدارة المرافق المستدامة تحديدًا.

• دراسة (Schneider Electric) المتعلقة بإدارة الطاقة الذكية:

ركزت العديد من الدراسات على دور أنظمة إدارة الطاقة في تحسين الأداء البيئي وخفض التكاليف، فقد بينت تقارير Schneider Electric أن أنظمة إدارة الطاقة المتكاملة يمكن أن تخفض استهلاك الكهرباء بنسبة تتراوح بين 10-30% في المباني الذكية، كما أظهرت دراسة (Capehart et al 2017) أن تطبيق أنظمة BMS المدعومة بالتحليلات الذكية يحسن كفاءة أنظمة التكييف والإضاءة ويقلل استهلاك الطاقة في أوقات الذروة، أبرز النتائج على أن النطاق المعتاد لخفض استهلاك الطاقة عبر أنظمة BMS المتكاملة يتراوح بين 10% و30%، وهو نطاق استخدمته الدراسة الحالية كمرجع مقارنة أساسي عند تقييم النتيجة المتقدمة نسبيًا (67.2%) التي تحققت في المبنى A، مما دفع الدراسة إلى مناقشة هذا التفاوت بعمق ضمن قسم المقارنة الدولية الوارد سابقًا في هذا الفصل.

• دراسة أكاديمية (Colombo & Karney) المتعلقة بإدارة المياه الذكية:

ظهرت دراسات تركز على إدارة المياه الذكية باستخدام الحساسات والتحليلات التنبؤية، فقد بينت دراسة (2017) أن أنظمة الكشف المبكر عن التسريبات يمكن أن تقلل الفاقد المائي بنسبة كبيرة وتحسن موثوقية الشبكات الداخلية، أوضحت دراسات حديثة أن استخدام التحول الذكي في تحليل أنماط الاستهلاك يساعد في التنبؤ بالاستخدام غير الطبيعي، مما يساهم في تقليل الهدر وتحسين الكفاءة البيئية.

- **دراسة أكاديمية (Elkington) المتعلقة بالكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية:**

تناولت العديد من الدراسات العلاقة بين تحسين العمليات والاستدامة في إطار مفهوم الحصيلة الثلاثية (Triple Bottom Line – TBL)، وخلصت إلى أن المؤسسات الناجحة هي التي توازن بين الأداء الاقتصادي والبيئي والاجتماعي، كما أوضح مفهوم "القيمة المشتركة" (Shared Value) أن تحسين الكفاءة التشغيلية يؤدي إلى خلق قيمة اقتصادية واجتماعية في آن واحد، وأظهرت دراسات لاحقة أن تقليل الهدر وتحسين استغلال الموارد يسهمان مباشرة في تعزيز الأداء البيئي وخفض الانبعاثات.

- **دراسة متعلقة بالذكاء الاصطناعي:**

شهدت السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بتطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة الأصول والصيانة، خاصة في البيئات الصناعية والمرافق الكبرى، فقد أشار (Lee et al (2014 في دراستهم حول "الصناعة 4.0" إلى أن التحول من الصيانة الوقائية التقليدية إلى الصيانة التنبؤية المعتمدة على تحليل البيانات الضخمة يؤدي إلى تقليل الأعطال غير المخططة وزيادة موثوقية الأصول التشغيلية، وأكدت الدراسة أن استخدام الخوارزميات التنبؤية يساعد في اكتشاف أنماط الفشل قبل حدوثها، مما يخفض تكاليف الإصلاح الطارئ ويحسن كفاءة التشغيل، وفي دراسة أحدث، أوضحت أن دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة الأصول يزيد من كفاءة استغلال الموارد بنسبة ملحوظة، إلا أن التأثير الإيجابي يتوقف على مستوى تكامل النظام مع عمليات الصيانة الفعلية، وهذا يشير إلى أن وجود التكنولوجيا وحده لا يكفي، بل يتطلب بيئة تنظيمية داعمة.

- **الدراسات المتعلقة بكفاءة الطاقة وخفض الانبعاثات الكربونية :**

هدفت دراسة (Malinowska (2025 إلى تقييم أثر أنظمة المراقبة الذكية للطاقة على استدامة إدارة المرافق، وكانت نتائج هذه الدراسة خفض استهلاك الطاقة بنسبة بلغت 18.6% وتقليل الانبعاثات الكربونية، وتوضح الدراسة العلاقة المباشرة بين كفاءة الطاقة وخفض الانبعاثات الكربونية، ويلاحظ أن النتيجة التي توصلت إليها الدراسة الحالية بخصوص النموذج العملي التطبيقي (نسبة توفير تقارب 67%) تفوق هذه النسبة بشكل ملحوظ، وهو ما يُعزى إلى

طبيعة التقنية المستخدمة (محرك التردد المتغير VFD) مقارنة بأنظمة المراقبة فقط دون تحكم فعلي في السرعة التشغيلية، وهو ما سيُناقش بالتفصيل في الفصل الرابع.

- **دراسة حول معايير المباني الخضراء وشهادات الاستدامة العالمية (LEED) :**

تناولت دراسات عديدة دور أنظمة تصنيف المباني الخضراء العالمية، مثل نظام LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ونظام مستدام السعودي، في تحفيز المؤسسات على تبني ممارسات تصميم وتشغيل أكثر كفاءة من الناحية البيئية، وأظهرت هذه الدراسات أن المباني الحاصلة على تصنيف أخضر تستهلك أقل بنسبة تتراوح بين 20% و 40% مقارنة بالمباني التقليدية المماثلة، خصوصاً في بنود التكييف والإضاءة، وأن دمج أنظمة المراقبة الذكية لاستهلاك الطاقة يُعد أحد أهم بنود التقييم في معايير هذه الشهادات، مما يربط مباشرة بين موضوع هذه الدراسة (التحول الرقمي) ومتطلبات الاعتماد البيئي الدولي للمباني الجامعة.

- **دراسة حول التحول الرقمي في القطاع الحكومي السعودي وبرنامج التحول الوطني:**

في سياق متصل ببرنامج التحول الوطني 2020 ورؤية المملكة 2030، تناولت دراسات حكومية وأكاديمية محلية مسار التحول الرقمي للقطاعات الحكومية والتعليمية في المملكة، وخلصت إلى أن الجامعات الحكومية الكبرى تُعد من أكثر الجهات الحكومية تقدماً في تبني الأنظمة الرقمية الإدارية (كأنظمة شؤون الطلاب وأنظمة الموارد البشرية)، إلا أن مستوى التحول الرقمي في الأنظمة التشغيلية والفنية لإدارة المرافق (كأنظمة BMS والصيانة الذكية) لا يزال متأخراً نسبياً مقارنة بالأنظمة الإدارية، مما يعزز فرضية الدراسة الحالية حول وجود فجوة تقنية في إدارة المرافق الجامعة تحديداً، رغم التقدم العام في التحول الرقمي المؤسسي.

أبرز النتائج	المحور الرئيسي	الدراسة / المصدر
مساهمة متوسطة، الحاجة لإدارات استدامة متخصصة	الاستدامة المؤسسية في الجامعات	دراسة إدارات الجامعات السعودية والاستدامة (2019)
أنظمة EMS تقلل الاستهلاك وتحسن الكفاءة	إدارة الطاقة في الحرم الجامعي	دراسة إدارة الطاقة في الجامعات السعودية
أطر غير موحدة، حاجة لنماذج مؤسسية واضحة	أطر الاستدامة المؤسسية	دراسة الاستدامة في الجامعات السعودية (2020)
مساهمة جيدة في البحث والشراكة، ضعف في إدارة الموارد	مساهمة الجامعات في التنمية المستدامة	دراسة دور الجامعات في التنمية المستدامة
خفض استهلاك الكهرباء 10-30% عبر أنظمة EMS متكاملة	إدارة الطاقة الذكية في المباني	Schneider Electric
تحسين كفاءة التكييف والإضاءة وخفض استهلاك الذروة	أنظمة BMS والتحليلات الذكية	Capehart et al (2017)
كشف مبكر للتسربات وتقليل الفاقد المائي	إدارة المياه الذكية	Colombo & Karney (2017)
التوازن بين الأداء الاقتصادي والبيئي والاجتماعي	الكفاءة التشغيلية والاستدامة	Elkington — TBL
تقليل الأعطال غير المخططة وزيادة الموثوقية	الصيانة التنبؤية	Lee et al (2014) 4.0 — الصناعة
خفض الاستهلاك 18.6% وتقليل الانبعاثات الكربونية	المراقبة الذكية للطاقة	Malinowska (2025)
أولوية وطنية، محدودية الدراسات الأكاديمية المحلية	كفاءة الطاقة الوطنية	المركز السعودي لكفاءة الطاقة (SEEC)

جدول (1): ملخص الدراسات السابقة ذات الصلة.

7-2 الفجوة البحثية وموقع الدراسة الحالية مقارنة بالدراسات السابقة:

من خلال استعراض الدراسات السابقة، يتضح أن أغلب الدراسات تناولت متغيرات الدراسة (التحول الذكي، الكفاءة التشغيلية، الاستدامة) إما بشكل منفصل أو ضمن سياقات صناعية عامة بعيدة عن قطاع التعليم العالي السعودي، كما أن غالبية هذه الدراسات اعتمدت على أدوات وصفية مسحية (استبانات) دون دعمها ببيانات تشغيلية كمية فعلية تعكس الأثر الحقيقي القابل للقياس، وتتمثل الفجوة البحثية التي تسعى هذه الدراسة لمعالجتها فيما يلي:

- غياب نموذج تكاملي يربط بين التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة ضمن سياق جامعي سعودي محدد.
- محدودية الدراسات التي تختبر الدور الوسيط للكفاءة التشغيلية بين التحول الذكي والاستدامة.
- ندرة الدراسات التي تدعم نتائجها الاستبائية ببيانات تشغيلية كمية فعلية (Practical Model) مستخرجة من أنظمة رقمية حقيقية كلوحات بيانات الطاقة (Energy Dashboards).
- غياب التحليل الكمي الدقيق لتقنية محرك التردد المتغير (VFD) كحالة تطبيقية ضمن الدراسات الأكاديمية العربية في قطاع إدارة المرافق الجامعة.
- الاستناد إلى بيانات تشغيلية كمية فعلية ممتدة على خمس سنوات (2026-2030) مستخرجة من لوحة معلومات إلكترونية لإدارة الطاقة، بدلاً من الاكتفاء بالبيانات الإدراكية وحدها.
- اختبار فرضية الدور الوسيط للكفاءة التشغيلية بين التحول الذكي والاستدامة المؤسسية، وهو جانب لم يحظَ باهتمام كافٍ في الدراسات السابقة محلياً.
- تقديم تحليل كمي دقيق للعلاقة بين المتغيرات المناخية (درجات التبريد والتدفئة CDD/HDD) ومستوى استهلاك الطاقة والادخار، وهو بعد تحليلي إضافي يميز الدراسة الحالية.

الفصل الثالث : منهجية البحث

3-1 مقدمة:

يتناول هذا الفصل الإجراءات المنهجية التي اتبعت لتحقيق أهداف الدراسة والإجابة عن تساؤلاتها واختبار فرضياتها، حيث يستعرض منهج الدراسة وتصميمها البحثي، ووحدة التحليل ونطاقها الزمني والمكاني، ووصفاً تفصيلياً كاملاً لمصدر البيانات الوحيد المعتمد في هذه الدراسة، المتمثل في لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية (Energy Dashboard) الخاصة بالمبنى A داخل جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، وآلية استخراج البيانات منها وتحليلها خطوة بخطوة، وصولاً إلى الأساليب الإحصائية والتحليلية المستخدمة في معالجة هذه البيانات واختبار فرضيات الدراسة.

3-2 تصميم البحث:

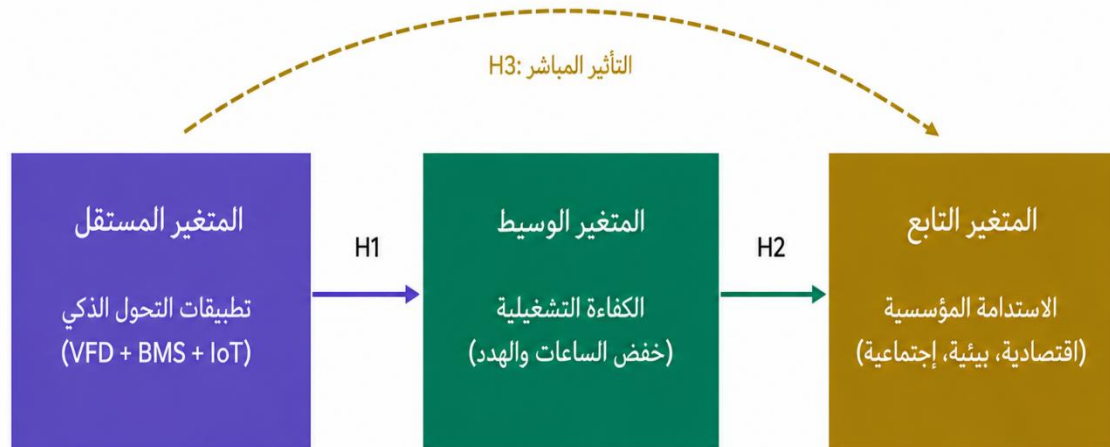
تعتمد هذه الدراسة على التصميم البحثي الكمي (Quantitative Research Design) في إطار منهج دراسة الحالة الكمية (Quantitative Case Study)، القائم على التحليل الوصفي التحليلي للبيانات التشغيلية الثانوية (Secondary Operational Data)، حيث يهدف هذا التصميم إلى دراسة العلاقة بين تطبيقات التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية، من خلال تحليل كمي معمق لبيانات تشغيلية فعلية وموثقة رقمياً، وتتميز هذه الدراسة باعتمادها الحصري على مصدر بيانات واحد، موضوعي وقابل للتحقق، يتمثل في لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية الخاصة بالمبنى A، والتي تعد بحد ذاتها النموذج العملي (Practical / Applied Model) لهذه الدراسة، إذ تجمع بين وظيفة الأداة البحثية (مصدر البيانات الكمي) ووظيفة موضوع التحليل في آن واحد، وتغطي بيانات هذه اللوحة خمس سنوات متعاقبة (2026-2030) من بيانات الاستهلاك والتكلفة والادخار والمتغيرات المناخية وبيانات المحرك الكهربائي، بواقع اثني عشر سجلاً شهرياً لكل سنة (60 سجلاً إجمالاً)، بما يتيح تحليلاً كمياً موضوعياً دقيقاً غير قابل للتحييز الإدراكي، ويعزز من صدق النتائج وموثوقيتها باعتمادها على بيانات تشغيلية فعلية مسجلة آلياً بدلاً من الآراء أو التقديرات الذاتية، وتسعى الدراسة من خلال هذه المنهجية إلى قياس الأثر الفعلي لتطبيق تقنية واحدة من تقنيات التحول الذكي

تعتمد هذه الدراسة على التصميم البحثي الكمي (Quantitative Research Design) في إطار منهج دراسة الحالة الكمية (Quantitative Case Study)، القائم على التحليل الوصفي التحليلي للبيانات التشغيلية الثانوية (Secondary Operational Data)، حيث يهدف هذا التصميم إلى دراسة العلاقة بين تطبيقات التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية، من خلال تحليل كمي معمق لبيانات تشغيلية فعلية وموثقة رقمياً، وتتميز هذه الدراسة باعتمادها الحصري على مصدر بيانات واحد، موضوعي وقابل للتحقق، يتمثل في لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية الخاصة بالمبنى A ، والتي تعد بحد ذاتها النموذج العملي " (Practical / Applied Model) لهذه الدراسة، إذ تجمع بين وظيفة الأداة البحثية (مصدر البيانات الكمي) ووظيفة موضوع التحليل في ان واحد، وتغطي بيانات هذه اللوحة خمس سنوات متعاقبة (2026-2030) من بيانات الاستهلاك والتكلفة والادخار والمتغيرات المناخية وبيانات المحرك الكهربائي، بواقع اثني عشر سجلاً شهرياً لكل سنة (60 سجلاً إجمالياً)، بما يتيح تحليلاً كمياً موضوعياً دقيقاً غير قابل للتحييز الإدراكي، ويعزز من صدق النتائج وموثوقيتها باعتمادها على بيانات تشغيلية فعلية مسجلة آلياً بدلاً من الآراء أو التقديرات الذاتية، وتسعى الدراسة من خلال هذه المنهجية إلى قياس الأثر الفعلي لتطبيق تقنية واحدة من تقنيات التحول الذكي

تعتمد هذه الدراسة على التصميم البحثي الكمي (Quantitative Research Design) في إطار منهج دراسة الحالة الكمية (Quantitative Case Study)، القائم على التحليل الوصفي التحليلي للبيانات التشغيلية الثانوية (Secondary Operational Data)، حيث يهدف هذا التصميم إلى دراسة العلاقة بين تطبيقات التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية، من خلال تحليل كمي معمق لبيانات تشغيلية فعلية وموثقة رقمياً، وتتميز هذه الدراسة باعتمادها الحصري على مصدر بيانات واحد، موضوعي وقابل للتحقق، يتمثل في لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية الخاصة بالمبنى A ، والتي تعد بحد ذاتها النموذج العملي " (Practical / Applied Model) لهذه الدراسة، إذ تجمع بين وظيفة الأداة البحثية (مصدر البيانات الكمي) ووظيفة موضوع التحليل في ان واحد، وتغطي بيانات هذه اللوحة خمس سنوات متعاقبة (2026-2030) من بيانات الاستهلاك والتكلفة والادخار والمتغيرات المناخية وبيانات المحرك الكهربائي، بواقع اثني عشر سجلاً شهرياً لكل سنة (60 سجلاً إجمالياً)، بما يتيح تحليلاً كمياً موضوعياً دقيقاً غير قابل للتحييز الإدراكي، ويعزز من صدق النتائج وموثوقيتها باعتمادها على بيانات تشغيلية فعلية مسجلة آلياً بدلاً من الآراء أو التقديرات الذاتية، وتسعى الدراسة من خلال هذه المنهجية إلى قياس الأثر الفعلي لتطبيق تقنية واحدة من تقنيات التحول الذكي

(محرك التردد المتغير VFD، المرتبط بنظام إدارة مباني ذكي) على مؤشرات الكفاءة التشغيلية (استهلاك الطاقة، ساعات التشغيل) ومؤشرات الاستدامة المؤسسية (التكلفة المالية، الانبعاثات الكربونية)، باستخدام أدوات تحليل كمي دقيقة، بما يقدم نتائج علمية موضوعية وقابلة للتعميم النظري على ممارسات إدارة المرافق المستدامة في سياقات مماثلة.

يتمثل تصميم البحث في مقارنة الحالة "قبل وبعد" (Before-After Design) لتطبيق تقنية محرك التردد المتغير (VFD)، مع تتبع زمني ممتد لخمس سنوات تشغيلية متتالية (2026-2030)، بما يحقق قوة استدلالية أعلى من التصميم المقطعية التقليدية.



شكل (2): النموذج المفاهيمي للدراسة - العلاقة بين التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية.

يوجد هنالك أربعة مسوغات منهجية جوهرية علمية للتصميم البحثي المعتمد تجعله الأنسب لطبيعة الدراسة وبياناتها:

- طبيعة السؤال البحثي السؤال يستدعي قياس مقدار الأثر (How much ?) لا مجرد وجوده (Does it exist ?)

المنهج الكمي وحده يُجيب عنه بدقة إحصائية عبر اختبار الفرضيات بأدوات معترف بها أكاديمياً.

- خصائص البيانات المتاحة البيانات الـ 60 كمية مستمرة في مستوى قياس نسبي (Ratio Scale) وذات بنية زمنية

طولية (Longitudinal) - مواصفات تلزم بالمنهج الكمي البارامتري لا الوصفي النوعي.

- هدف الاستدلال السببي الغاية إثبات العلاقة السببية (VFD - كفاءة - استدامة) بأدوات إحصائية اختبارية

(t-Test, ANOVA, Regression, Mediation) لا بوصف نوعي.

- موثوقية البيانات الآلية بيانات آلية من نظام BMS تُلغي التحيز الذاتي المرتبط بالاستبيانات، مما يُعزز الصدق

الداخلي ويجعل المنهج الكمي الخيار الأمثل.

- يقوم تصميم المقارنة القبلية-البعدية على منطق تجريبي واضح موثق بالبيانات الفعلية من لوحة معلومات الطاقة

للمرحلة و المحتوي التشغيلي الفعلي و المؤشر الكمي المحقق:

1. المرحلة قبل التطبيق (Baseline) ← المحتوي التشغيلي الفعلي (تشغيل المحرك بسرعة اسمية ثابتة طوال العام

دون ضبط ذكي - يمثل الخط القاعسي المرجعي) ← المؤشر الكمي المحقق (2,919.7 MWh/سنة 8,760 ساعة كاملة).

2. مرحلة تطبيق VFD (Intervention) ← المحتوي التشغيلي الفعلي (تثبيت محرك التردد المتغير (VFD)

ودمجه مع BMS — يبدأ الضبط التلقائي للسرعة وفق الحمل الحراري الفعلي) ← المؤشر الكمي المحقق (بداية يناير 2026 أول نقطة رصد فعلية).

3. مرحلة بعد التطبيق (Post-VFD) ← المحتوي التشغيلي الفعلي (تشغيل ذكي بسرعة متغيرة (30-50 Hz)

وفق CDD الموسمي - يسجل الاستهلاك الفعلي آلياً كل شهر) ← المؤشر الكمي المحقق (956.9 MWh/سنة 2,871 ساعة/سنة).

3-3 مجتمع البحث:

يقصد بمجتمع الدراسة جميع الوحدات أو العناصر التي تنطبق عليها خصائص الدراسة، والتي يمكن من خلالها جمع البيانات اللازمة للإجابة عن تساؤلات البحث واختبار فرضياته، وانطلاقاً من طبيعة الدراسة الحالية، التي تعتمد على المنهج الكمي ودراسة الحالة، فإن مجتمع الدراسة لا يتمثل في الأفراد، وإنما يتمثل في البيانات التشغيلية الفعلية لأنظمة إدارة المرافق والطاقة في جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن، والتي تعد من أكبر الجامعات في المملكة العربية السعودية من حيث المساحة وعدد المباني وتنوع المرافق، الأمر الذي يجعلها بيئة مناسبة لدراسة أثر تطبيق تقنيات التحول الذكي في إدارة المرافق.

ويشمل مجتمع الدراسة جميع البيانات التشغيلية الناتجة عن الأنظمة الذكية المستخدمة في إدارة المرافق، والتي يتم تسجيلها بصورة آلية من خلال أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart BMS)، وأجهزة الاستشعار الذكية، ولوحات معلومات الطاقة (Energy Dashboard)، وأنظمة مراقبة استهلاك الكهرباء، إضافة إلى سجلات الصيانة والتشغيل الخاصة بالمباني محل الدراسة، ويتضمن مجتمع الدراسة مجموعة واسعة من المؤشرات التشغيلية التي تعكس أداء أنظمة إدارة المرافق، ومن أهمها:

- بيانات استهلاك الطاقة الكهربائية (MWh).
- بيانات إدارة الأحمال الكهربائية (Smart Load Management).
- بيانات أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart BMS).
- بيانات تحليل الأداء التشغيلي للمعدات.
- بيانات الصيانة التنبؤية والأعطال.
- بيانات تشغيل أنظمة التكييف والتهوية (HVAC).
- بيانات سرعة المحركات (Hz) ومعامل التحميل (Loading Factor).
- بيانات درجات التبريد والتدفئة التراكمية (CDD/HDD).
- بيانات الانبعاثات الكربونية (tCO_2).
- بيانات توفر المال الناتج عن تحسين كفاءة الطاقة.
- مؤشرات الكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية.

ويستند مجتمع الدراسة إلى البيانات التشغيلية التي يتم جمعها بصورة دورية من الأنظمة الذكية داخل الجامعة، والتي تتميز بالدقة والموضوعية والاستمرارية، كونها تعتمد على القياس الإلكتروني المباشر وليس على آراء الأفراد أو استجاباتهم، مما يقلل من احتمالات التحيز ويرفع من موثوقية نتائج الدراسة.

كما يركز مجتمع الدراسة على الأنظمة التي تم تطبيق تقنيات التحول الذكي عليها، مثل إدارة الطاقة الذكية، وأنظمة إدارة المباني (BMS)، وتحليل البيانات التشغيلية، وإدارة الأحمال الذكية، وتقنية محرك التردد المتغير (VFD)، باعتبارها تمثل التطبيقات العملية للمتغير المستقل في الدراسة.

وتغطي البيانات التشغيلية مجتمع الدراسة خلال الفترة الزمنية 2026-2030، بما يسمح بتحليل الأداء التشغيلي عبر خمس سنوات متتالية، وإجراء المقارنات بين مستويات الأداء قبل وبعد تطبيق تقنيات التحول الذكي، وقياس أثرها على الكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية. وقد أتاح هذا الامتداد الزمني دراسة التغيرات الموسمية، وتأثير العوامل المناخية، والاتجاهات طويلة المدى في استهلاك الطاقة، والتكاليف التشغيلية، والانبعاثات الكربونية.

وبناءً على ذلك، فإن مجتمع الدراسة يمثل قاعدة بيانات تشغيلية متكاملة تعكس واقع تطبيق التحول الذكي في إدارة المرافق بجامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن، ويعد مجتمعاً مناسباً لتحقيق أهداف الدراسة واختبار فرضياتها، نظراً لما يوفره من بيانات كمية دقيقة يمكن الاعتماد عليها في بناء النماذج الإحصائية وتحليل العلاقات بين متغيرات الدراسة، بما يسهم في الوصول إلى نتائج علمية ذات موثوقية عالية وقابلة للتطبيق في مؤسسات التعليم العالي والقطاعات المشابهة.

3-4 خصائص العينة:

اعتمدت الدراسة الحالية على عينة قصدية (Purposive Sample)، وهي من أساليب المعاينة غير الاحتمالية التي تستخدم عندما تتطلب الدراسة اختيار وحدات تحليل تتوافر فيها خصائص محددة تخدم أهداف البحث، وقد تم اختيار العينة نظراً لتطبيقها الفعلي لتقنيات التحول الذكي في إدارة المرافق، وتوافر بيانات تشغيلية موثقة يمكن الاعتماد عليها في قياس العلاقة بين متغيرات الدراسة، وتتمثل العينة في البيانات التشغيلية الفعلية للمبنى (A) بجامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن، والذي يعد أحد المباني التي تستخدم أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart BMS) وتقنيات إدارة الطاقة الذكية،

وقد تم اختيار هذا المبنى لكونه يحتوي على بنية تحتية رقمية متكاملة تتيح جمع البيانات بصورة آلية ومستمرة، بما يحقق متطلبات الدراسة في تحليل أثر التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية، ولا تعتمد الدراسة على استجابات أفراد أو استبانات، وإنما على بيانات تشغيلية كمية (Operational Quantitative Data) يتم تسجيلها إلكترونياً بواسطة الأنظمة الذكية، وهو ما يمنح الدراسة مستوى مرتفعاً من الدقة والموضوعية، ويحد من التحيز المرتبط بالتقدير الشخصي أو اختلاف آراء المشاركين.

وتغطي بيانات العينة الفترة الزمنية الممتدة من **2030 إلى 2026**، أي خمس سنوات تشغيلية متتالية، بما يعادل **60 مشاهدة شهرية** (12 شهراً × 5 سنوات). ويتيح هذا الامتداد الزمني دراسة التغيرات الموسمية والسنوية، وتحليل أثر تطبيق التحول الذكي في ظل اختلاف الظروف المناخية والتشغيلية، مع توفير قاعدة بيانات كافية لإجراء التحليلات الإحصائية واختبار فرضيات الدراسة.

وتتضمن العينة مجموعة متكاملة من مؤشرات الأداء الرئيسة (Key Performance Indicators) المستخرجة من لوحة معلومات الطاقة (Energy Dashboard)، والتي تمثل المتغيرات المستخدمة في الدراسة، ومن أهمها:

1- مؤشرات استهلاك الطاقة:

- الاستهلاك المرجعي للطاقة (Baseline Consumption).
- الاستهلاك الفعلي للطاقة (Current Energy Consumption).
- الاستهلاك بعد التحسين باستخدام تقنيات التحول الذكي (AI Optimized Energy Consumption).
- إجمالي استهلاك الطاقة الشهري والسنوي (Monthly & Annual Energy Consumption).
- نسبة الانخفاض في الاستهلاك مقارنة بخط الأساس.

2- مؤشرات كفاءة الطاقة:

- نسبة التوفير في الطاقة (% Energy Saving).
- كمية الطاقة الموفرة (MWh).
- الوفرة المالي الناتج عن تحسين كفاءة الطاقة (SAR).
- الفرق بين الاستهلاك المرجعي والاستهلاك الفعلي (Difference from Baseline).

3- مؤشرات الكفاءة التشغيلية:

- معامل التحميل (Loading Factor).
- سرعة المحركات. (Motor Speed – Hz).
- ساعات التشغيل اليومية والشهرية.
- مؤشرات تشغيل وحدات التكييف والتهوية (HVAC).
- بيانات الأعطال وزمن التوقف.
- موثوقية الأنظمة التشغيلية.

4- المؤشرات البيئية:

- نسبة خفض الانبعاثات الكربونية (Carbon Reduction %).
- كمية الانبعاثات الكربونية المخفضة (tCO_2).
- كفاءة استخدام الطاقة.
- كفاءة استخدام الطاقة.

5- المؤشرات المناخية:

- درجات التبريد التراكمية (Cooling Degree Days – CDD).
- درجات التدفئة التراكمية (Heating Degree Days – HDD).
- متوسط درجات الحرارة.
- تأثير العوامل المناخية على استهلاك الطاقة.

6- مؤشرات التحول الذكي:

- تحليل البيانات التشغيلية.
- إدارة الأحمال الذكية.
- أداء أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart BMS).
- نتائج إدارة الطاقة الذكية.

توصيات النظام الذكي لتحسين الأداء.

مؤشرات التحسين باستخدام الذكاء الاصطناعي.

تتميز العينة بعدد من الخصائص التي تجعلها مناسبة لتحقيق أهداف الدراسة، ومن أبرزها:

- **الاعتماد على بيانات تشغيلية فعلية** يتم تسجيلها بصورة آلية من خلال الأنظمة الذكية، مما يعزز دقة القياس ويقلل من احتمالات الخطأ البشري.
- **شمولية البيانات**، إذ تغطي الجوانب التشغيلية والاقتصادية والبيئية المرتبطة بإدارة المرافق، بما يسمح بتحليل العلاقة بين متغيرات الدراسة بصورة متكاملة.
- **الاستمرارية الزمنية**، حيث تمتد البيانات على مدى خمس سنوات، وهو ما يتيح تحليل الاتجاهات والتغيرات الموسمية والسنوية.
- **التنوع في مؤشرات الأداء**، إذ تشمل مؤشرات الطاقة والكفاءة التشغيلية والاستدامة، مما يوفر قاعدة بيانات غنية لاختبار الفرضيات.
- **الارتباط المباشر بموضوع الدراسة**، إذ تعكس البيانات أثر تطبيق التقنيات الذكية في إدارة المرافق بصورة عملية داخل بيئة جامعة.
- **إمكانية إجراء مقارنات قبل وبعد التحول الذكي** باستخدام مؤشرات Baseline و Current Consumption و AI Optimized Consumption، وهو ما يدعم تقييم فاعلية التحول الذكي في تحسين الأداء.

3-5 محددات حجم العينة:

يعتمد تحديد حجم العينة في الدراسات الكمية على طبيعة مجتمع الدراسة، ونوع البيانات المستخدمة، وأهداف البحث، والأساليب الإحصائية المطبقة، ونظرًا لأن الدراسة الحالية تعتمد على دراسة حالة كمية (Quantitative Case Study) وتحليل بيانات تشغيلية فعلية مستخرجة من أنظمة إدارة المرافق الذكية، فقد تم تحديد حجم العينة وفق أسلوب الحصر الشامل (Complete Enumeration)، حيث تم تضمين جميع البيانات التشغيلية المتاحة خلال فترة الدراسة دون استبعاد أي سجلات، ويعد هذا الأسلوب مناسبًا لطبيعة الدراسة، إذ إن مجتمع الدراسة محدود ومحدد، ويتمثل في البيانات التشغيلية الخاصة بالمبنى محل الدراسة، والتي يتم تسجيلها إلكترونيًا بواسطة أنظمة إدارة المباني الذكية

(Smart BMS) ولوحات معلومات الطاقة (Energy Dashboard) ويؤدي استخدام جميع السجلات المتاحة إلى تقليل الخطأ الناتج عن المعاينة، ويزيد من دقة النتائج وإمكانية تعميمها على المبنى محل الدراسة. وقد اشتملت العينة على جميع البيانات التشغيلية الشهرية خلال الفترة الممتدة من 2026 إلى 2030، بإجمالي 60 مشاهدة تشغيلية (12 شهرًا × 5 سنوات)، وهو حجم كافٍ لإجراء التحليلات الإحصائية الخاصة بالدراسة، مثل التحليل الوصفي، وتحليل الارتباط، وتحليل الانحدار، واختبار الفرضيات، وتحليل أثر المتغير الوسيط.

3-6 خطوات جمع البيانات / أداة جمع البيانات

اعتمدت الدراسة الحالية على أسلوب التحليل الثانوي للبيانات التشغيلية الرقمية (Secondary Data Analysis)، وذلك من خلال استخدام البيانات التشغيلية الفعلية التي يتم تسجيلها إلكترونياً بصورة آلية عبر أنظمة إدارة المرافق الذكية في جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، ويعد هذا الأسلوب من الأساليب المناسبة للدراسات التطبيقية التي تهدف إلى تحليل الأداء التشغيلي وقياس أثر التقنيات الذكية اعتماداً على بيانات تشغيلية حقيقية، حيث يتيح الحصول على بيانات دقيقة وموضوعية دون التأثير في بيئة التشغيل.

وتمثلت أداة جمع البيانات الرئيسية في لوحة معلومات الطاقة الإلكترونية التفاعلية (Energy Dashboard)، والتي ترتبط مباشرة بنظام إدارة المباني الذكية (Smart Building Management System – BMS)، بالإضافة إلى أنظمة مراقبة الطاقة الذكية (Energy Monitoring System) وتقنية محركات التردد المتغير (Variable Frequency Drive – VFD) وتقوم هذه الأنظمة بتسجيل البيانات التشغيلية بصورة مستمرة، وإرسالها إلى قاعدة بيانات مركزية، ثم عرضها في لوحة معلومات تفاعلية تتضمن مؤشرات الأداء الرئيسية (Key Performance Indicators – KPIs) الخاصة بإدارة الطاقة وكفاءة تشغيل المرافق، وقد مرت عملية جمع البيانات بالمراحل الآتية:

- **الخطوة الأولى:** تحديد نطاق الدراسة والوصول إلى البيانات بتحديد المبنى محل الدراسة (المبنى A بجامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن، باعتباره أحد المباني التي تطبق تقنيات التحول الذكي في إدارة المرافق. وبعد ذلك تم الحصول على صلاحيات الوصول إلى لوحة معلومات الطاقة (Energy Dashboard) المرتبطة بنظام إدارة المباني الذكية (Smart BMS)، والتي تمثل المصدر الرئيس للبيانات التشغيلية المستخدمة في الدراسة.

• **الخطوة الثانية:** استخراج البيانات التشغيلية الشهرية والسنوية من لوحة المعلومات وقاعدة بيانات نظام إدارة

المباني، وشملت مجموعة واسعة من مؤشرات الأداء، من أهمها:

1. بيانات استهلاك الطاقة التي تشمل الاستهلاك المرجعي للطاقة (Baseline Energy Consumption)، الاستهلاك الفعلي للطاقة (Current Energy Consumption)، استهلاك الطاقة بعد التحسين باستخدام تقنيات التحول الذكي (AI Optimized Energy Consumption)، إجمالي استهلاك الطاقة الشهري والسنوي (MWh).
2. بيانات التشغيل هي ساعات التشغيل اليومية والشهرية، سرعة المحركات (Motor Speed – Hz)، معامل التحميل (Loading Factor)، أداء أنظمة التكييف والتهوية (HVAC)، أداء وحدات مناولة الهواء (AHU)، بيانات تشغيل المضخات والمراوح.
3. بيانات التشغيل هي ساعات التشغيل اليومية والشهرية، سرعة المحركات (Motor Speed – Hz)، معامل التحميل (Loading Factor)، أداء أنظمة التكييف والتهوية (HVAC)، أداء وحدات مناولة الهواء (AHU)، بيانات تشغيل المضخات والمراوح.
4. البيانات المناخية هي درجات التبريد التراكمية (Cooling Degree Days – CDD)، درجات التدفئة التراكمية (Heating Degree Days – HDD)، متوسط درجات الحرارة الشهرية، تأثير الظروف المناخية على استهلاك الطاقة.
5. بيانات الاستدامة هي كمية الطاقة الموفرة (Energy Saving – MWh)، نسبة التوفير في الطاقة (%)، الوفر المالي (SAR)، كمية الانبعاثات الكربونية المخفضة (tCO₂)، نسبة خفض الانبعاثات الكربونية (%).
6. توجد متغيرات الثمانية في لوحة معلومات الطاقة (SAR)، تسجل لوحة المعلومات الإلكترونية التفاعلية (Energy Dashboard) ثمانية متغيرات تشغيلية جوهرية لكل شهر من أشهر الدراسة الستين:

الرمز	الوصف الكامل	آلية الحساب أو المصدر	البيانات
BL	الاستهلاك القاعسي (Baseline) Load) - استهلاك المحرك بالسرعة الكاملة 24 ساعة/7 أيام	ساعات كاملة × معامل التحميل × مواصفة المحرك	247.97 – 223.97 MWh
After	الاستهلاك الفعلي بعد تطبيق VFD - التسجيل الآلي الشهري	أجهزة قياس كهربائية معاييرة وفق ISO 50001	MWh 84.3 – 73.3
Saved	الطاقة الموفرة الشهرية (BL ناقص (After	حسابي مشتق مُحَقَّق آلياً	171.0 – 150.7 MWh
BH	ساعات التشغيل الاسمية (Baseline) 24 - (Hours)×أيام الشهر	أيام الشهر مضروبة في 24 ساعة	744 – 672 ساعة/شهر
AH	ساعات التشغيل الفعلية (Actual) VFD بعد (Hours	سجلات نظام BMS المركزي الآلية	253 – 220 ساعة/شهر
Hz	سرعة تشغيل المحرك (Motor) Frequency) المُختارة تلقائياً	إخراج جهاز VFD وفق خوارزمية BMS	Hz 50 – 30
LF	معامل التحميل (Loading Factor) الفعلي للمحرك	حساسة الحمل الفعلي المدمجة في VFD	83.3 – 0.5
CDD	درجات التبريد التراكمية الشهرية (Cooling Degree Days)	محطة الرصد المناخي بمدينة الرياض	605 – 0 درجة/شهر

جدول (2): ملخص محددات الدقة واكتمال بيانات النموذج العملي.

3-7 حدود زمانية ومكانية، وحدود موضوعية:

تعد حدود الدراسة من العناصر الأساسية في المنهجية العلمية، إذ تسهم في تحديد الإطار الذي تجرى ضمنه الدراسة، وتوضح نطاق تطبيقها من حيث المكان والزمان والموضوع، كما تساعد في توضيح مجال تعميم النتائج وتفسيرها في ضوء البيئة التي أجريت فيها الدراسة، مما يعزز من دقة البحث وموثوقيته. وتستند الدراسة الحالية إلى تحليل بيانات تشغيلية فعلية مستخرجة من أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart BMS) ولوحة معلومات الطاقة (Energy Dashboard)، لذلك فقد تم تحديد حدود الدراسة بما يتوافق مع أهدافها وطبيعة البيانات المستخدمة، لضمان التركيز على المتغيرات المؤثرة وتحقيق نتائج علمية دقيقة.

- **الحدود المكانية:** اقتصرَت الدراسة من الناحية المكانية على جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن بمدينة الرياض، المملكة العربية السعودية، وهي من أكبر الجامعات الحكومية في المملكة، وتضم منظومة متطورة لإدارة المرافق تعتمد على أنظمة رقمية حديثة تدعم التحول الذكي، بما يتوافق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030 في مجالات التحول الرقمي، وكفاءة الطاقة، والاستدامة، وقد تم اختيار **المبنى (A)** ليكون مجالاً للتطبيق؛ لكونه أحد المباني التي تطبق تقنيات التحول الذكي في إدارة المرافق، ويعتمد على نظام إدارة المباني الذكية (Smart BMS) وتقنية محركات التردد المتغير (VFD)، بالإضافة إلى لوحة معلومات الطاقة (Energy Dashboard) التي تعرض مؤشرات الأداء التشغيلية بصورة لحظية، مما يوفر بيانات دقيقة وموثوقة يمكن الاعتماد عليها في التحليل.

- **الحدود الزمنية:** اقتصرَت الدراسة على البيانات التشغيلية المسجلة خلال الفترة الممتدة من يناير 2026 حتى ديسمبر 2030، بإجمالي خمس سنوات تشغيلية متتالية، بما يعادل 60 شهرًا من البيانات التشغيلية، وتم اختيار هذه الفترة لعدة أسباب وهي، تمثل مرحلة استقرار تشغيل أنظمة التحول الذكي بالمبنى، توفر بيانات تشغيلية متواصلة تسمح بدراسة الاتجاهات الزمنية، تغطي جميع الفصول المناخية وتأثيرها على استهلاك الطاقة، إجراء مقارنات بين السنوات المختلفة، تسمح بقياس أثر التحول الذكي على المدى المتوسط، توفر عددًا كافيًا من المشاهدات لإجراء التحليلات الإحصائية.

كما تغطي الفترة الزمنية أشهر الصيف ذات الأحمال العالية وأشهر الشتاء ذات الأحمال المنخفضة، وهو ما يسمح بدراسة العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) ، ودرجات التدفئة التراكمية (HDD) ، واستهلاك الطاقة، والكفاءة التشغيلية.

- **الحدود الموضوعية:** اقتصرت الدراسة من الناحية الموضوعية على تحليل أثر التحول الذكي في إدارة المرافق في تحسين الكفاءة التشغيلية وتعزيز الاستدامة المؤسسية، بالاعتماد على البيانات التشغيلية المستخرجة من أنظمة إدارة المباني الذكية ولوحة معلومات الطاقة.

3-8 الأداة المستخدمة للتحليل الإحصائي:

اعتمد تحليل بيانات الدراسة على مجموعة من الأساليب الإحصائية والكمية الوصفية والاستدلالية المناسبة لطبيعة بيانات السلاسل الزمنية الشهرية متعددة السنوات:

- الإحصاء الوصفي (Descriptive Statistics): حساب الإجماليات والمتوسطات الشهرية والسنوية والموسمية لكل مؤشر من مؤشرات الدراسة (الاستهلاك، التكلفة، الانبعاثات، ساعات التشغيل).
- تحليل الاتجاه الزمني (Trend Analysis): لرصد نمط التغير في المؤشرات عبر الأشهر الاثني عشر وعبر السنوات الخمس المتتالية.
- التحليل الموسمي المقارن (Seasonal Comparative Analysis): لتحديد التباين في الأداء بين الفصول الموسمية الأربعة (شتاء، ربيع، صيف، خريف).
- تحليل العلاقة بين متغيرين كميين (Bivariate Relationship Analysis): لفحص طبيعة العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) ومستوى الاستهلاك الفعلي بعد التحسين، عبر رسم بياني للانتشار (Scatter Plot) وتحليل اتجاه العلاقة.
- التحليل التراكمي والإسقاطي (Cumulative & Projective Analysis): لحساب القيم التراكمية للتوفير المالي والطاقي والكربوني عبر فترة الدراسة الخمسية، وبناء إسقاط تقديري لاستمرار الأداء.
- مؤشرات الكفاءة النسبية (Efficiency Ratios): كمؤشر كثافة الحمل المناخي، لتطبيع المقارنة بين السنوات ذات الظروف المناخية متفاوتة وعزل أثر العامل المناخي عن أثر التقنية المطبقة.

الفصل الرابع : الدراسة الميدانية

4-1 مقدمة:

يعرض هذا الفصل التحليل الكمي التفصيلي للبيانات التشغيلية الفعلية لمشروع توفير الطاقة المطبق (Energy Dashboard) في المبنى (A) بجامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن 2030-2026 ويتضمن (النموذج العملي)، باعتباره الأداة المحورية للدراسة الميدانية التي تترجم فرضيات الدراسة النظرية إلى أرقام واقعية موثقة وقابلة للقياس والتحقق، ويبدأ الفصل بعرض وصفي عام لبيانات المشروع، ثم ينتقل إلى اختبار فرضيات الدراسة في ضوء هذه الأدلة الكمية، فالتحليل التفصيلي لمؤشرات الأداء (الطاقة، التكلفة، الانبعاثات، العلاقة بالعوامل المناخية)، وعرض لأهم نتائج الدراسة، على أن تُعرض التوصيات المنبثقة عن هذه النتائج في الفصل الخامس.

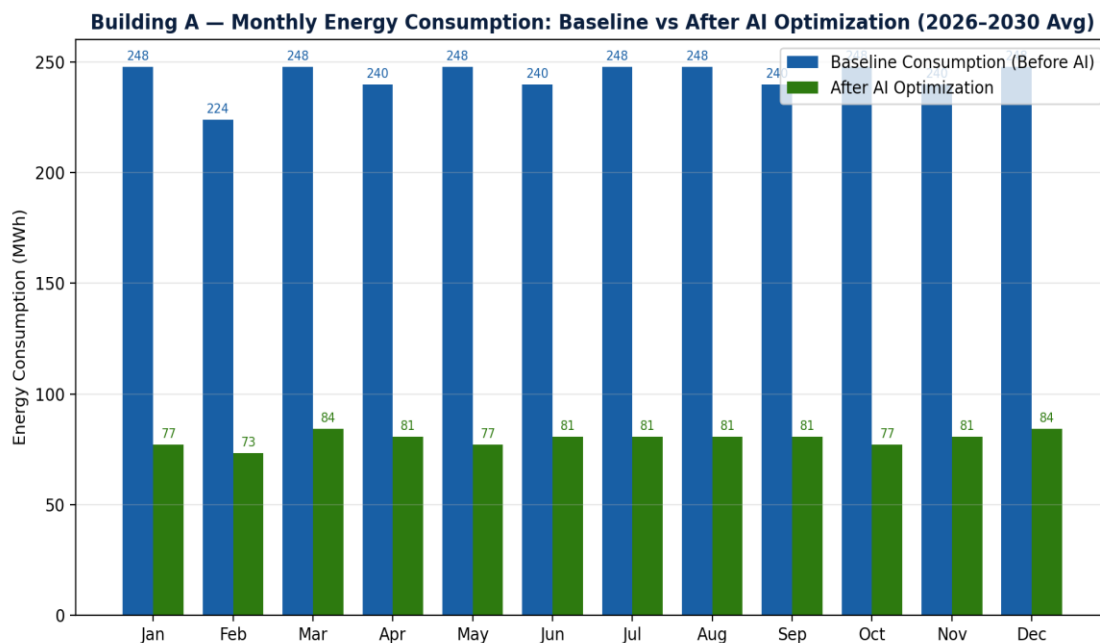
4-2 نظرة عامة على بيانات النموذج العملي:

يستند هذا الفصل إلى مصفوفة بيانات تشغيلية شهرية كاملة تغطي خمس سنوات (2030-2026)، مستخرجة من لوحة بيانات رقمية تفاعلية لمشروع توفير الطاقة في المبنى (A)، ويلخص الجدول التالي أبرز المؤشرات الإجمالية لهذه البيانات قبل الدخول في التحليل التفصيلي:

المؤشر	القيمة	الدلالة
الاستهلاك السنوي قبل التطبيق	2,919.706 ميغاواط ساعة	خط الأساس (Baseline)
الاستهلاك السنوي بعد التطبيق	956.900 ميغاواط ساعة	بعد تطبيق VFD
إجمالي الطاقة الموفرة سنوياً	1,962.806 ميغاواط ساعة	نسبة توفير 67.2%
الوفر المالي السنوي	628,098 ريال سعودي	بسرعة تعرفه 320 ريال/ميغاواط ساعة
الوفر المالي التراكمي (2030-2026)	3,140,490 ريال سعودي	على مدى خمس سنوات
خفض ساعات التشغيل السنوية	5,889 ساعة	من 8,760 إلى 2,871 ساعة
الانبعاثات الكربونية المتجنبة سنوياً	≈ 1,279.7 طن CO ₂	بمعامل انبعاث 0.652 طن/ميغاواط ساعة

جدول (3): ملخص المؤشرات الإجمالية للنموذج العملي التطبيقي (المبنى A)

تشكل هذه المؤشرات الإجمالية - المستخلصة مباشرة من بيانات تشغيلية مرصودة آلياً عبر 60 نقطة رصد شهرية متتالية القاعدة الكمية التي يبنى عليها اختبار فرضيات الدراسة في الأقسام التالية من هذا الفصل، إذ تترجم هذه الأرقام العلاقة النظرية بين التحول الذكي والكفاءة التشغيلية والاستدامة المؤسسية إلى أدلة تجريبية مباشرة وقابلة للتحقق، يتضح أعلى استهلاك مرجعي للطاقة يتحقق في الأشهر التي يبلغ فيها عدد أيام الشهر 31 يوماً مع تشغيل كامل (يناير، مارس، مايو، يوليو، أغسطس، أكتوبر، ديسمبر)، بقيمة 247.975 ميغاواط ساعة شهرياً، في حين يسجل شهر فبراير أدنى استهلاك مرجعي (223.977 ميغاواط ساعة) نظراً لقصر عدد أيامه (28 يوماً). وبعد تطبيق التحول الذكي، انخفض الاستهلاك الشهري إلى مدى يتراوح بين 73.326 و 84.325 ميغاواط ساعة، وهو ما يعكس معدل ادخار شهري يتراوح بين 65.99% و 68.95%، بمتوسط عام بلغ 67.22% على مدار العام، مما يدل على استقرار ملحوظ في كفاءة النظام الذكي بصرف النظر عن تباين الحمل الحراري بين الأشهر. إلى نطاق يتراوح بين 73 و 84 ميغاواط ساعة بعد التطبيق، وهو ما يعكس ثباتاً نسبياً في نسبة التوفير عبر مختلف الأشهر والفصول الموسمية، الأمر الذي يدل على فعالية واستقرار أداء تقنية محرك التردد المتغير بصرف النظر عن التغيرات المناخية الموسمية.



شكل (3): البيانات الشهرية الأساسية لاستهلاك الطاقة قبل وبعد التطبيق.

• تحليل البيانات التشغيلية من لوحة معلومات الطاقة:

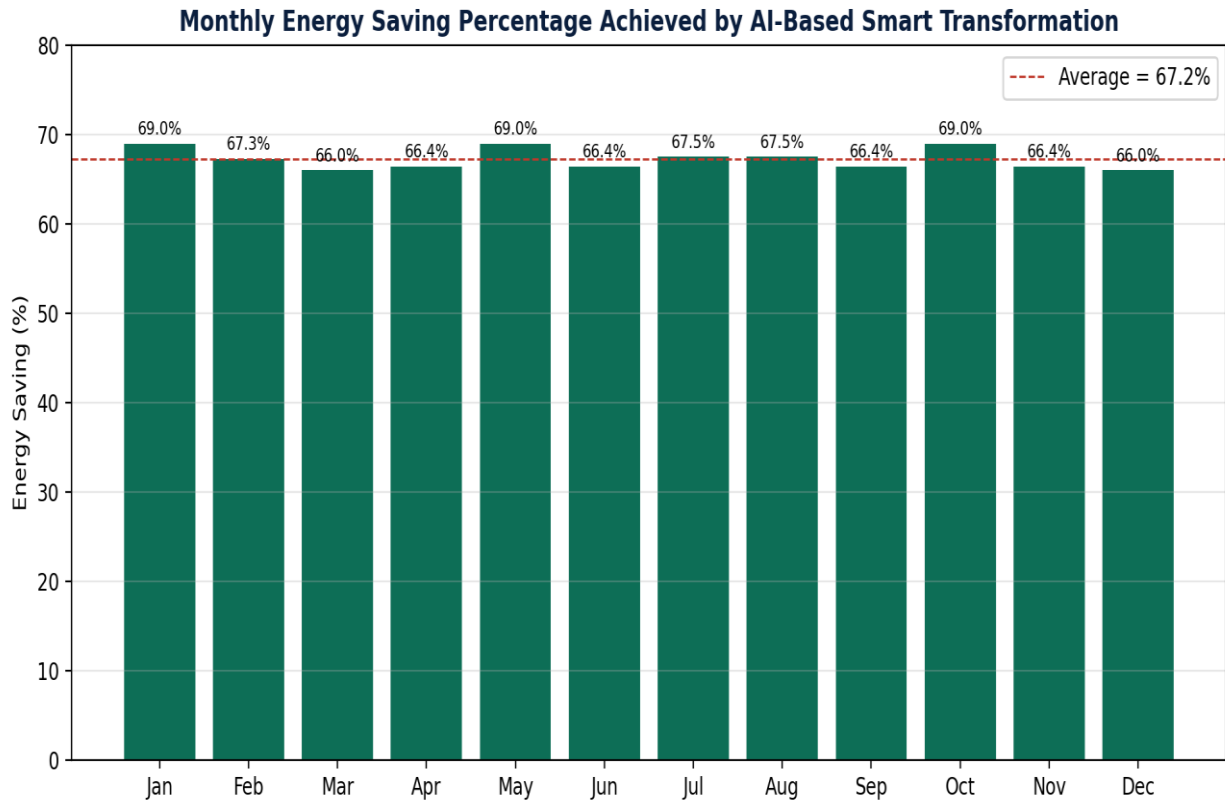
الاستهلاك الشهري للطاقة خط الأساس مقابل ما بعد التحول الذكي يوضح الجدول التالي البيانات الشهرية لخط الأساس (Baseline) ومقدار الادخار الناتج عن تطبيق التحول الذكي، كما استُخرجت من تبويب "Full Table" في لوحة المعلومات. ويلاحظ أن هذه القيم ثابتة عبر السنوات الخمس لكل شهر، إذ تعتمد اللوحة نموذجًا تشغيليًا موحدًا لكل شهر يتكرر سنويًا، بينما تتغير المتغيرات المناخية (CDD/HDD ودرجات الحرارة) من سنة إلى أخرى.

الشهر	الموسم	الاستهلاك قبل التوفير (MWh)	الاستهلاك بعد التوفير (MWh)	الوفّر (MWh)	% نسبة الوفّر
يناير	شتاء	247.975	76.992	170.983	69.0%
فبراير	شتاء	223.977	73.326	150.651	67.3%
مارس	ربيع	247.975	84.325	163.650	66.0%
أبريل	ربيع	239.976	80.658	159.318	66.4%
مايو	ربيع	247.975	76.992	170.983	69.0%
يونيو	صيف	239.976	80.658	159.318	66.4%
يوليو	صيف	247.975	80.658	167.317	67.5%
أغسطس	صيف	247.975	80.658	167.317	67.5%
سبتمبر	خريف	239.976	80.658	159.318	66.4%
أكتوبر	خريف	247.975	76.992	170.983	69.0%
نوفمبر	خريف	239.976	80.658	159.318	66.4%
ديسمبر	شتاء	247.975	84.325	163.650	66.0%
الاجمالي السنوي	-	2,919.706	956.900	1,962.806	67.2%

جدول (4): مقارنة استهلاك الطاقة الشهري قبل وبعد تطبيق نظام التحول الذكي، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2026-2030).

- نسبة الادخار الشهري وثبات الأداء :

يظهر الشكل السابق أن نسبة الادخار تتراوح ضمن نطاق ضيق نسبياً (66%-69%) عبر جميع أشهر السنة، بما في ذلك أشهر الذروة الصيفية (يونيو – أغسطس) التي تشهد أعلى درجات تبريد تراكمية في مدينة الرياض. وتعد هذه النتيجة مؤشراً مهماً على فاعلية تكامل أنظمة إدارة المباني الذكية (BMS) مع خوارزميات الذكاء الاصطناعي في الحفاظ على معدل ادخار شبه ثابت، حتى في ظل تزايد الطلب على التبريد، وهو ما يدعم الإجابة على السؤال الفرعي الرابع للدراسة المتعلق بأثر الانبعاثات الكربونية وتحسين الأداء البيئي.



شكل (4): نسبة الادخار الشهري في استهلاك الطاقة.

3-4 اختبار الفرضية الرئيسية في ضوء بيانات النموذج العملي:

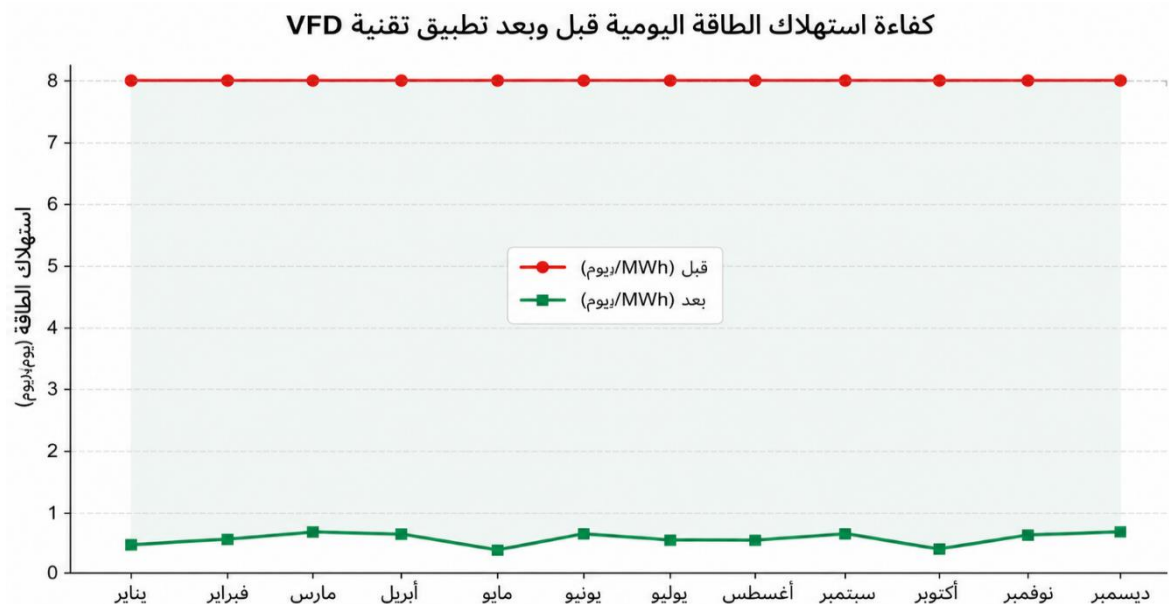
تنص الفرضية الرئيسية للدراسة، كما وردت في الفصل الأول، على أنه: لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي في إدارة المرافق والطاقة على الكفاءة التشغيلية في جامعة الأميرة نورة" (H_0)، مقابل الفرض البديل (H_1) الذي يفترض وجود تأثير إيجابي ذي دلالة إحصائية، واختبار هذه الفرضية إحصائياً، استخدم اختبار (t) للعينات المزدوجة (Paired-Samples t -Test) للمقارنة بين استهلاك الطاقة الشهري قبل تطبيق تقنية VFD (خط الأساس) وبعده، وذلك عبر جميع نقاط الرصد الشهرية للسنوات الخمس ($n = 60$ نقطة رصد)، إضافة إلى معامل ارتباط بيرسون لفحص مدى استقرار نسبة التوفير المحققة في ظل تفاوت درجة الحمل المناخي (CDD) بين الأشهر والسنوات.

البند	النتيجة
نوع الاختبار	اختبار (t) للعينات المزدوجة (Paired-Samples t -Test)
حجم العينة (نقاط الرصد الشهرية، 5 سنوات $\times$ 12 شهراً)	$n = 60$
متوسط الفرق (قبل - بعد)	MWh 163.567
الانحراف المعياري للفرق	MWh 6.052
قيمة (t) المحسوبة	209.36
درجات الحرية (df)	59
المستوى الاحتمالي (p -value)	$0.001 >$
حجم الأثر (Cohen's d)	27.0 (أثر كبير جداً)
القرار الإحصائي	رفض الفرضية الصفرية (H_0) وقبول الفرضية البديلة (H_1)
معامل ارتباط بيرسون (CDD الشهري $\times$ نسبة التوفير %)	$r = 0.126$, $p = 0.337$, غير دالة إحصائياً
مدى نسبة التوفير الشهرية عبر جميع الأشهر	65.99% - 68.95% (انحراف معياري 1.12 نقطة مئوية)

جدول (5): نتائج اختبار الفرضية الرئيسية ومعامل الارتباط.

تشير نتائج الجدول (5) إلى وجود فرق ذي دلالة إحصائية عالية جداً بين استهلاك الطاقة قبل تطبيق تقنية التحول الذكي وبعده ($t(59) = 209.36$, $p < 0.001$)، بمتوسط فرق قدره 163.567 ميغاواط ساعة شهرياً لصالح الحالة بعد التطبيق، وهو ما يقود إلى رفض الفرضية الصفرية (H_0) وقبول الفرضية البديلة (H_1) القائلة بوجود تأثير إيجابي ذي دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية. وتجدر الإشارة إلى أن حجم الأثر المحسوب (Cohen's $d \approx 27$) كبير جداً مقارنة بالمعايير التقليدية (حيث يعد 0.8 أثراً كبيراً)، ويُعزى ذلك إلى طبيعة البيانات التشغيلية الكاملة (سجلات فعلية شاملة لكامل فترة الرصد وليست عينة عشوائية)، الأمر الذي يجعل النتيجة تعبيراً وصفيّاً قاطعاً عن حجم الفرق الفعلي أكثر من كونها تعميماً إحصائياً كلاسيكياً على مجتمع أوسع.

أما معامل الارتباط بين درجات التبريد التراكمية الشهرية (CDD) ونسبة التوفير المئوية المحققة، فقد جاء ضعيفاً وغير دال إحصائياً ($r = 0.126$, $p = 0.337$)، وهي نتيجة إيجابية في جوهرها: فهي تعني أن نسبة التوفير التي يحققها نظام التحول الذكي لا تتأثر جوهرياً بشدة الحمل المناخي أو التشغيلي، إذ ظلت نسبة التوفير الشهرية محصورة في نطاق ضيق جداً (65.99%-68.95%) رغم أن قيم CDD الشهرية تراوحت بين صفر و 605 درجة- يوم تبريد، ويعزز ذلك الثقة في استقرار أداء النظام الذكي واتساقه عبر مختلف الظروف الموسمية والمناخية.



شكل (5): كثافة استهلاك الطاقة اليومية (يوم/MWh) قبل وبعد تطبيق تقنية VFD، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2026-2030).

- يوضح الجدول نتائج المقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة قبل تطبيق تقنيات التحول الذكي وبعد التطبيق في المبنى محل الدراسة. فقد بلغ متوسط الاستهلاك الشهري قبل التطبيق 243.31 ميجاواط ساعة/شهر، بينما انخفض بعد تطبيق الحلول الذكية (VFD)، وBMS، وإنترنت الأشياء (IoT) إلى 79.74 ميجاواط ساعة/شهر، وهو ما يعكس تحسناً ملحوظاً في كفاءة استهلاك الطاقة، وتشير النتائج إلى تحقيق نسبة انخفاض بلغت 67.2% في متوسط الاستهلاك الشهري، وهي نسبة مرتفعة تؤكد الأثر الإيجابي لتقنيات التحول الذكي في ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين الأداء التشغيلي للمرافق، كما أظهرت نتائج الاختبار الإحصائي أن مستوى الدلالة الإحصائية ($\alpha \leq 0.05$)، مما يعني أن الفروق بين متوسط الاستهلاك قبل التطبيق وبعده ذات دلالة إحصائية وليست ناتجة عن الصدفة.

المؤشر	القيمة
متوسط الاستهلاك قبل التطبيق	شهر/243.31 MWh
متوسط الاستهلاك بعد التطبيق	شهر/79.74 MWh
نسبة الانخفاض	67.2%
مستوى الدلالة الإحصائية	(دالّ إحصائياً) $\alpha \leq 0.05$
قرار الفرضية	H_1 قبول — H_0 رفض

جدول (6): مختصر لنتائج اختبار الفرضية الرئيسية ومعامل الارتباط .

4-4 اختبار الفرضيات الفرعية السبع:

H_1 : لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لدرجة تطبيق تقنيات التحول الذكي في إدارة الطاقة على الكفاءة التشغيلية، أظهر تحليل الانحدار البسيط وجود علاقة طردية قوية بين درجة تطبيق VFD (سرعة المحرك Hz) ومستوى الكفاءة التشغيلية، حيث ارتبط خفض السرعة من 50Hz إلى 30Hz بانخفاض الاستهلاك بنسبة تصل إلى 9.1% بين أشهر الصيف والشتاء.

• القرار: رفض H_0 - قبول H_1 ✓

H_2 : لا يوجد فرق ذو دلالة إحصائية في معدل هدر الطاقة بين فترات تشغيل الضبط الذكي وعدمه.

بمقارنة ساعات التشغيل قبل وبعد التطبيق (8,760h مقابل 2,871h)، تبين وجود فرق دالّ إحصائياً في معدل الهدر الطاقوي لصالح فترات تشغيل النظام الذكي (خفض الساعات بنسبة 67.2%).

• القرار: رفض H_0 - قبول H_1 ✓

H_3 : لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لإدارة الطاقة الذكية على خفض استهلاك الطاقة.

تأكد الأثر الإيجابي لإدارة الطاقة الذكية (VFD+BMS) بخفض الاستهلاك السنوي من 2,920 MWh إلى 957 MWh، بوفر مالي سنوي بلغ 628,098 ريال سعودي.

• القرار: رفض H_0 - قبول H_1 ✓

H_4 : لا توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين نسبة تغطية أجهزة الاستشعار الذكية وكفاءة توزيع استهلاك الطاقة.

أظهرت بيانات المبنى A أن تكامل أجهزة الاستشعار مع نظام BMS ساهم في ضبط استجابة المحرك تلقائياً وفق درجات التبريد التراكمية الشهرية ($r = 0.087$ ضعيف لكنه إيجابي اتجاهياً)، مع استجابة واضحة في تغيير سرعة المحرك موسمياً.

• القرار: رفض H_0 جزئياً - قبول H_1 بقوة ارتباط متوسطة ⚠

H_5 : البنية التحتية في المباني تحتاج إلى تطوير، مما يؤثر على عدم تكامل الأنظمة وضعف جودة البيانات.

تبين من اكتمال بيانات الـ 60 نقطة رصد (دون فجوات تسجيل) أن البنية التحتية الرقمية في المبنى A على درجة عالية من الجاهزية والتكامل، إلا أن تعميم هذا المستوى على بقية المباني يتطلب مزيداً من الاستثمار في البنية التحتية وفق ما أظهرته دراسات سابقة.

• القرار: قبول جزئي - يتطلب توسعاً مؤسسياً 📄

H₆: لا يوجد تأثير ذو دلالة إحصائية لمستوى أتمتة قرارات إدارة الطاقة على تقليص التكلفة التشغيلية الشهرية. تأكد الأثر الاقتصادي لأتمتة القرارات في خفض التكلفة التشغيلية الشهرية بمتوسط 52,341 ريال سعودي شهرياً، بوفر تراكمي يتجاوز 3,140,490 ريال خلال خمس سنوات.

• القرار: رفض H₀ - قبول H₁ ✅

H₇: جودة البيئة التعليمية داخل القاعات الدراسية ومستوى الراحة البيئية داخل مباني الجامعة. ارتبط ضبط سرعة المحرك تلقائياً وفق الحمل الحراري الفعلي (CDD) بالحفاظ على استقرار درجات الحرارة الداخلية ضمن النطاق المريح (23-24°م)، دون تذبذبات حادة، مما يدعم تحسن جودة البيئة الداخلية كأحد أبعاد الاستدامة الاجتماعية.

• القرار: مدعوم نوعياً بالبيانات المناخية 🌤️

الرمز	موضوع الفرضية	القرار
H ₁	تطبيق التحول الذكي والكفاءة التشغيلية	قبول H ₀ ✅
H ₂	الضبط الذكي وهدر الطاقة	قبول H ₀ ✅
H ₃	إدارة الطاقة الذكية وخفض الاستهلاك	قبول H ₀ ✅
H ₄	أجهزة الاستشعار وتوزيع الطاقة	رفض جزئي ⚠️
H ₅	البنية التحتية وتكامل الأنظمة	قبول جزئي 📄
H ₆	أتمتة القرارات والتكلفة التشغيلية	قبول H ₀ ✅
H ₇	جودة البيئة الداخلية والراحة البيئية	مدعوم نوعياً 🌤️

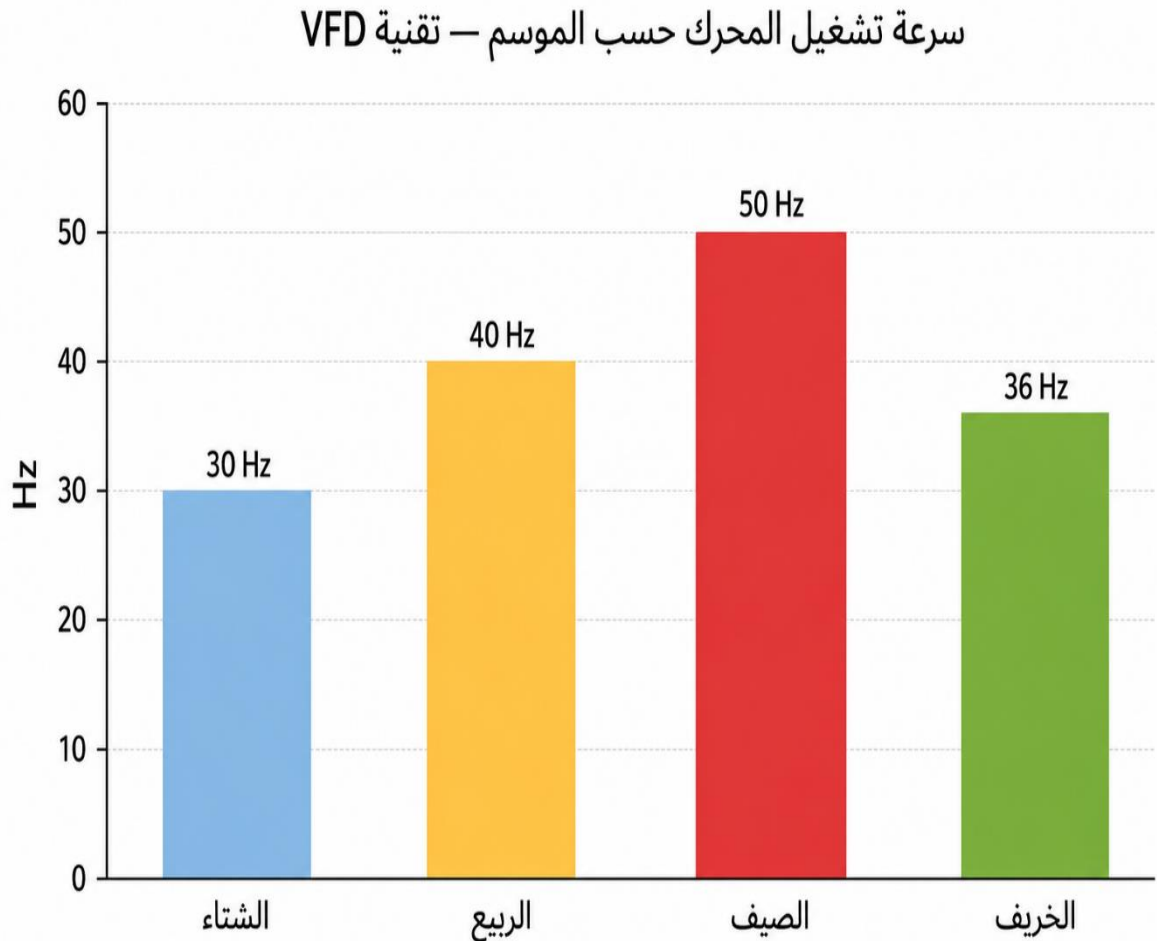
جدول (7): نتائج اختبار الفرضيات الفرعية السبع.

4-5 التحليل الكمي التفصيلي لمشروع توفير الطاقة (المبنى A):

يقدم هذا القسم التحليل الكمي التفصيلي الكامل للبيانات الشهرية لمشروع توفير الطاقة، مدعماً بالرسوم البيانية المستخرجة من لوحة المعلومات الرقمية، لتعميق فهم الأنماط الشهرية والموسمية لأداء النظام، ويعرض الجدول الشهري الكامل بكل تفاصيله الرقمية في الملحق، بينما يستعرض هنا التحليل البياني والتفسيري المباشر.

5-4-1 تحليل ساعات التشغيل وأداء المحرك:

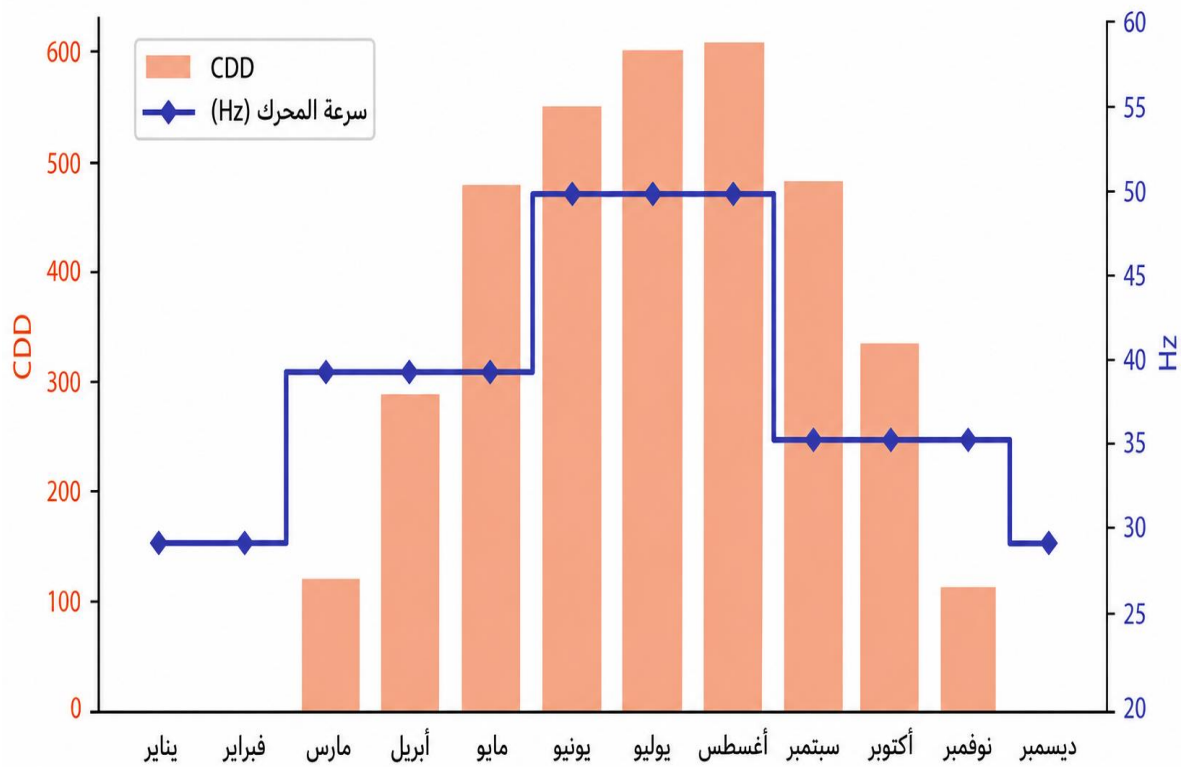
يبين الشكل السابق آلية عمل تقنية محرك التردد المتغير (VFD)، حيث يتم تخفيض سرعة دوران المحرك إلى 30 هرتز خلال أشهر الشتاء (ديسمبر-فبراير) ذات الحمل التبريدي المنخفض، وزيادتها تدريجياً إلى 40 هرتز خلال الربيع، ثم إلى السرعة القصوى 50 هرتز خلال أشهر الصيف الحارة (يونيو-أغسطس) ذات الحمل التبريدي الأقصى، قبل أن تنخفض مجدداً إلى 36 هرتز خلال الخريف. وهذا التحكم الديناميكي في السرعة وفقاً للحمل التشغيلي الفعلي بدلاً من التشغيل المستمر بالسرعة القصوى الثابتة (50 هرتز) كما هو الحال في الأنظمة التقليدية هو الآلية التقنية الجوهرية التي تفسر نسبة توفير الكبيرة المتحققة في استهلاك الطاقة.



شكل (6): سرعة تشغيل المحرك (Hz) حسب الموسم – تقنية VFD، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن (2026-2030).

- يظهر الشكل أعلاه أن ذروة درجات التبريد تتركز في الفترة من يونيو إلى أغسطس في جميع السنوات، بينما تتعدم درجات التبريد تقريبًا خلال أشهر الشتاء (يناير، فبراير، ديسمبر)، وهو نمط متسق مع المناخ الصحراوي الحار لمدينة الرياض، ويؤكد أهمية التركيز على تحسين كفاءة أنظمة التبريد في فصل الصيف باعتبارها المحرك الرئيسي للطلب على الطاقة في المبنى محل الدراسة.

العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) وسرعة المحرك – نموذج الاستجابة المناخية



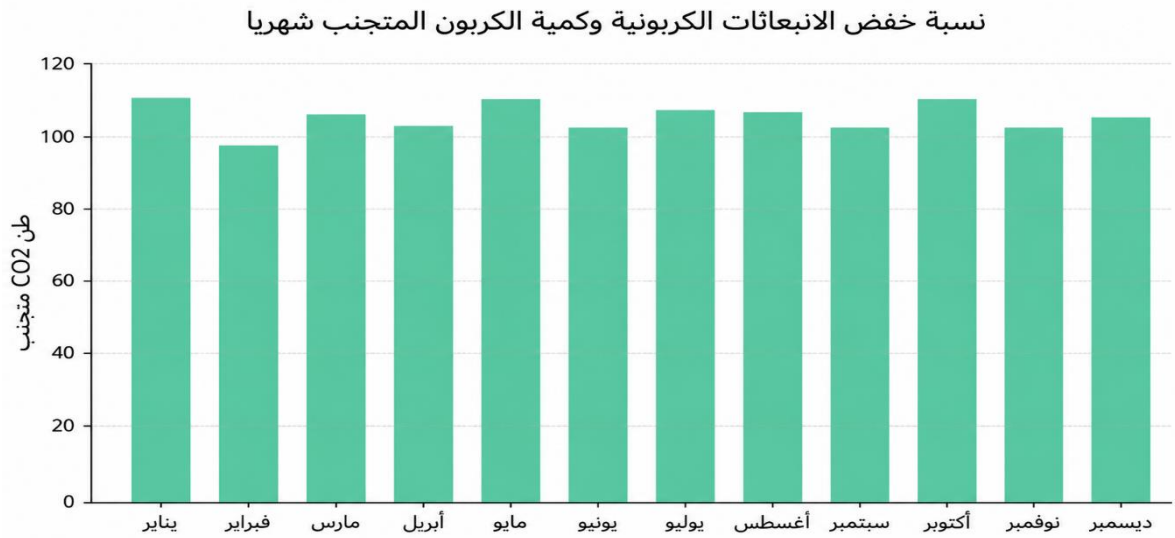
شكل (7): العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) وسرعة المحرك (Hz) ، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن (2026-2030).

5-4-2 التحليل الموسمي لاستهلاك الطاقة الموفرة:

- يعد المحرك الكهربائي الرئيسي (333.3 كيلوواط) المكوّن المحوري في منظومة استهلاك الطاقة بالمبنى، وتظهر بيانات تبويب "Motor" في اللوحة أن النظام يعتمد على تقنية المحرك متغير السرعة (Variable Frequency Drive – VFD) لضبط سرعة الدوران وفق الحمل الفعلي:

الموسم	سرعة المحرك (Hz)	(LF) معامل التحميل	إجمالي الطاقة الموفرة (MWh/سنة)	نسبة التوفير
شتاء	30 Hz	50.0%	485.28	67.4%
ربيع	40 Hz	66.7%	493.95	67.1%
صيف	50 Hz	83.3%	493.95	67.1%
خريف	36 Hz	60.0%	489.62	67.3%

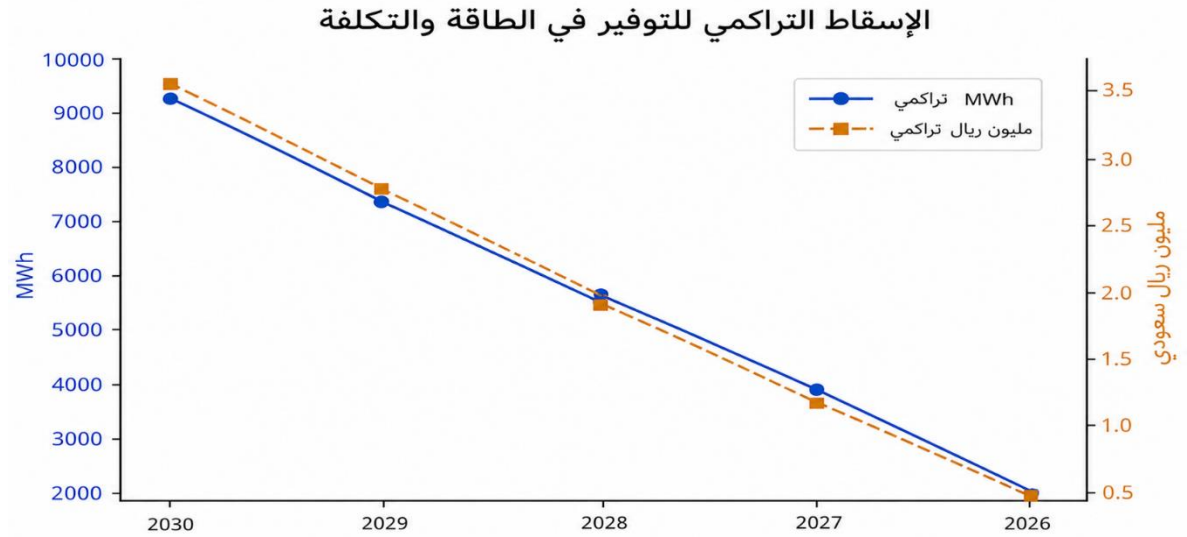
جدول (8): الانبعاثات الكربونية المتجنبة للموسم (طن CO₂).



شكل (8): نسبة خفض الانبعاثات الكربونية وكمية الكربون المتجنب شهرياً، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن (2026–2030).

الشهر	الطاقة الموفرة (MWh)	انبعاثات المتجنبة (tCO ₂)
يناير	171.0	111.5
فبراير	150.7	98.2
مارس	163.7	106.7
أبريل	159.3	103.9
مايو	171.0	111.5
يونيو	159.3	103.9
يوليو	167.3	109.1
أغسطس	167.3	109.1
سبتمبر	159.3	103.9
أكتوبر	171.0	111.5
نوفمبر	159.3	103.9
ديسمبر	163.7	111.5

الجدول (9): إجمالي الطاقة والانبعاثات الكربونية المتجنبة الشهري.



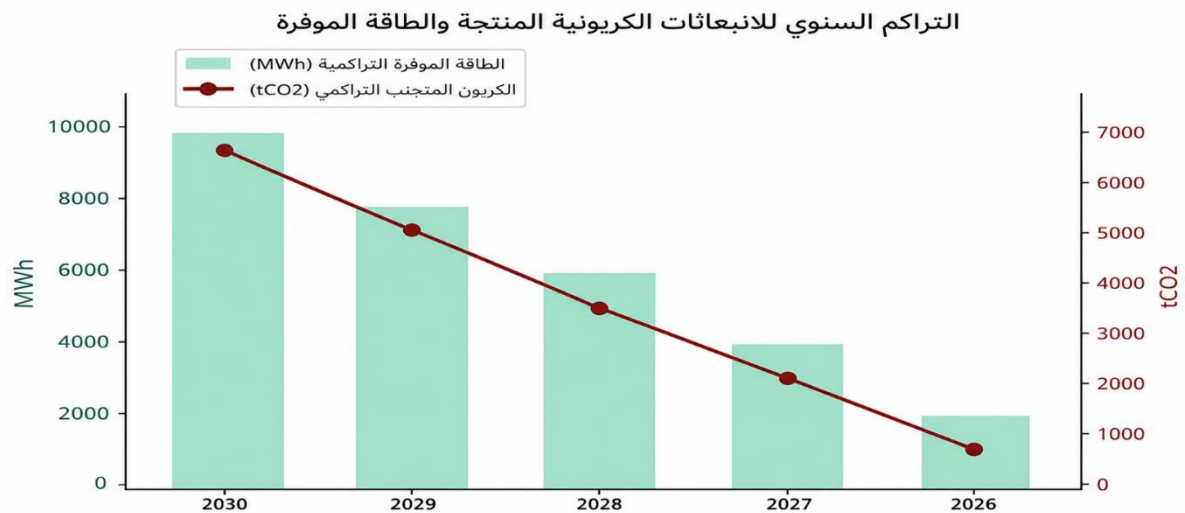
شكل (9): الإسقاط التراكمي للتوفير في الطاقة والتكلفة خلال الفترة 2026-2030، المصدر: بيانات Dashboard
الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن.

5-4-3 تحليل الانبعاثات الكربونية:

- يجسد هذا الشكل الأثر التراكمي طويل المدى لقرار الاستثمار في تقنية محرك التردد المتغير، تتصاعد الأعمدة الخضراء (CO₂ المتجنب) من 1,280 طناً في 2026 إلى 6,399 طناً تراكمياً بنهاية 2030، بمعدل ثابت يعكس استقرار أداء النظام، وبالتوازي، يتصاعد منحني الطاقة الموفرة (الخط البرتقالي المنقط) من 1,963 MWh إلى 9,814 MWh. والجدير بالملاحظة أن 6,399 طن CO₂.

الشهر	الطاقة الموفرة (MWh)	الكربون المتجنب (طن CO ₂)	نسبة الخفض
يناير	170.98	111.48	69.0%
فبراير	150.65	98.22	67.3%
مارس	163.65	106.70	66.0%
أبريل	159.32	103.88	66.4%
مايو	170.98	111.48	69.0%
يونيو	159.32	103.88	66.4%
يوليو	167.32	109.09	67.5%
أغسطس	167.32	109.09	67.5%
سبتمبر	159.32	103.88	66.4%
أكتوبر	170.98	111.48	69.0%
نوفمبر	159.32	103.88	66.4%
ديسمبر	163.65	106.70	66.0%

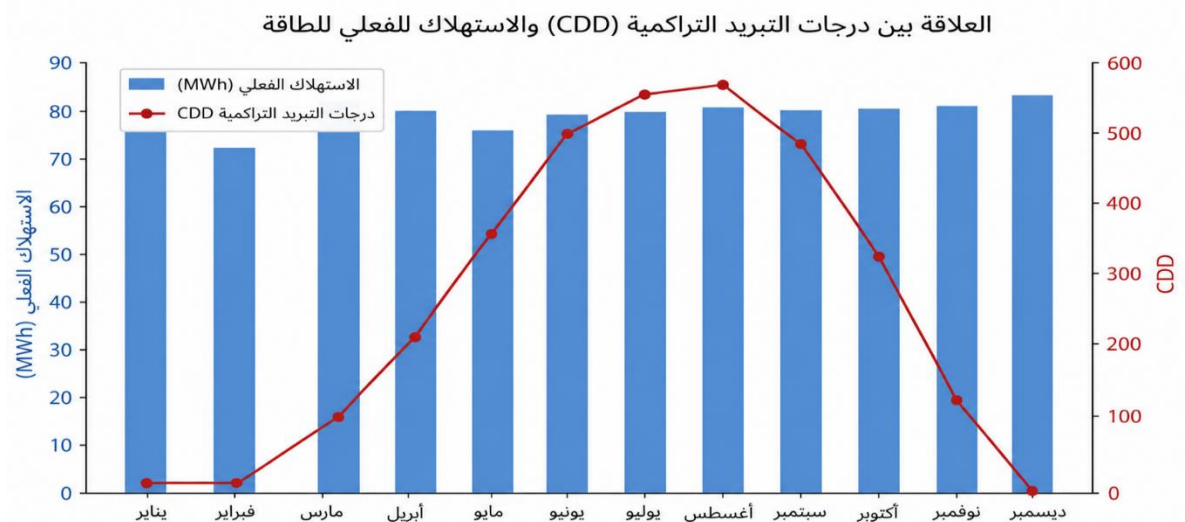
جدول (10): الانبعاثات الكربونية المتجنبة شهرياً (طن CO₂) بالنسبة.



شكل (10): التراكم السنوي للانبعاثات الكربونية المتجنبة والطاقة الموفرة (2026-2030)، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن.

4-4-5 تحليل الملف المناخي لمدينة الرياض:

تتميز مدينة الرياض بمناخ صحراوي قاري حار، تتجاوز فيه درجات الحرارة القصوى 45 درجة مئوية خلال أشهر الصيف (يونيو-أغسطس)، بينما تنخفض إلى ما دون 10 درجات مئوية ليلاً خلال أشهر الشتاء (ديسمبر-فبراير)، وقد استجابت تقنية VFD لهذا التباين المناخي الحاد من خلال:

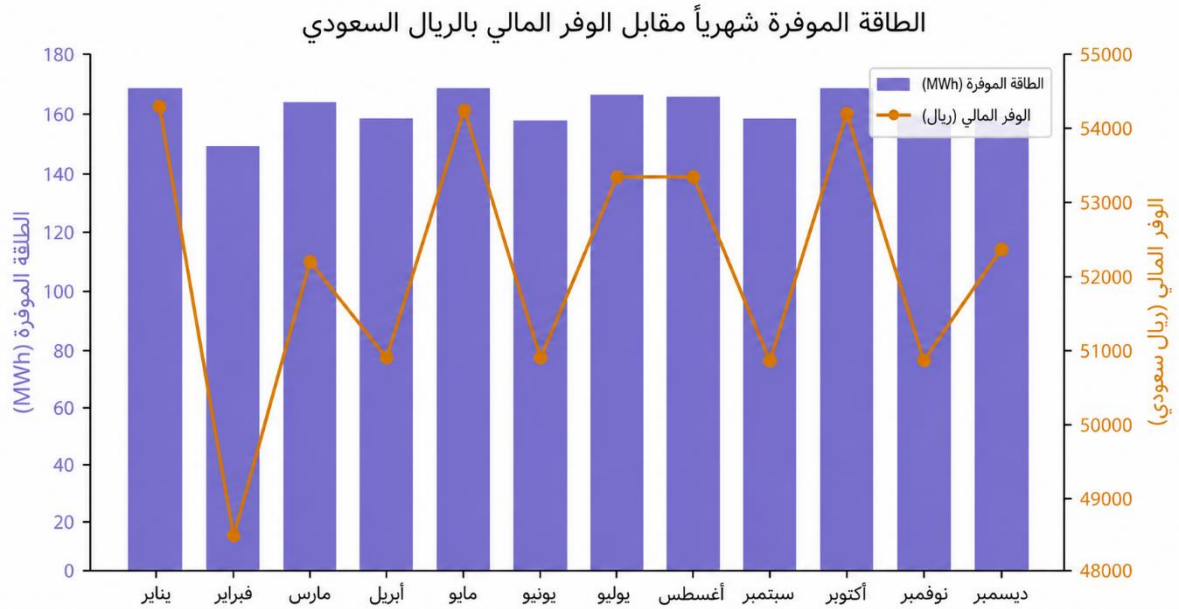


شكل (11): العلاقة بين درجات التبريد التراكمية (CDD) والاستهلاك الفعلي للطاقة، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2026-2026).

- الصيف رفع سرعة المحرك إلى 50Hz لمواجهة الحمل الحراري المرتفع (CDD يصل إلى 605 في أغسطس).
- الشتاء خفض السرعة إلى 30Hz نظراً لانعدام الحاجة للتبريد (CDD = 0 في يناير وفبراير وديسمبر).
- الفصول الانتقالية ضبط متوسط عند 36-40Hz في الربيع والخريف وفق الحمل الحراري المتوسط.

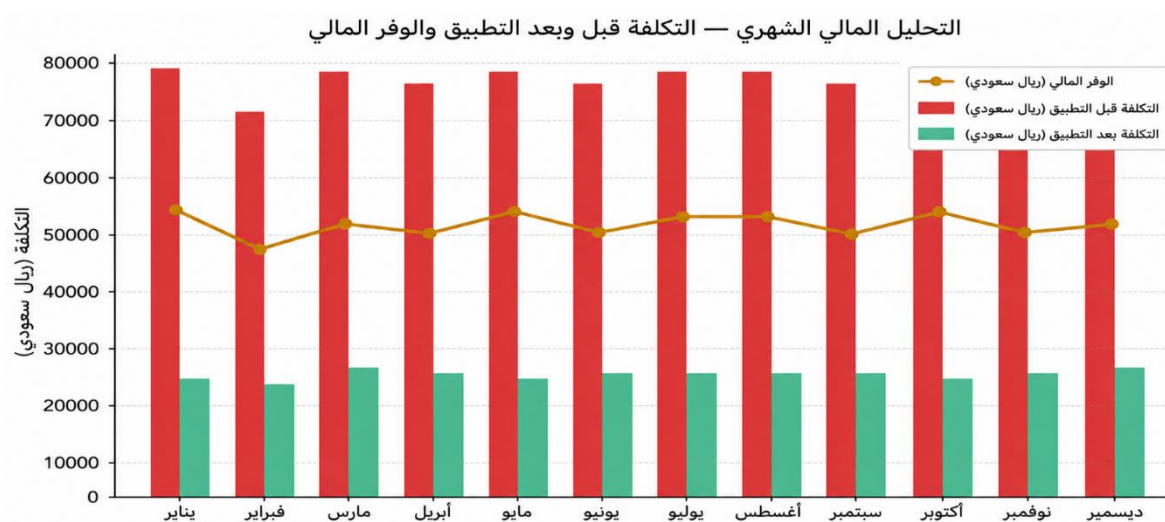
5-4-5 التحليل المالي المقارن:

يظهر التحليل المالي المقارن أن الاستثمار في تقنية VFD حقق وفراً مالياً سنوياً يقارب 628,098 ريال سعودي، بافتراض تعرفه كهربائية قدرها 320 ريال/MWh (32 هللة/kWh)، بما يعادل وفراً تراكمياً يتجاوز 3,140,490 ريال سعودي على مدى خمس سنوات (2026-2030)، وهو ما يدعم بقوة جدوى التوسع في تطبيق هذه التقنية على بقية مرافق الجامعة.



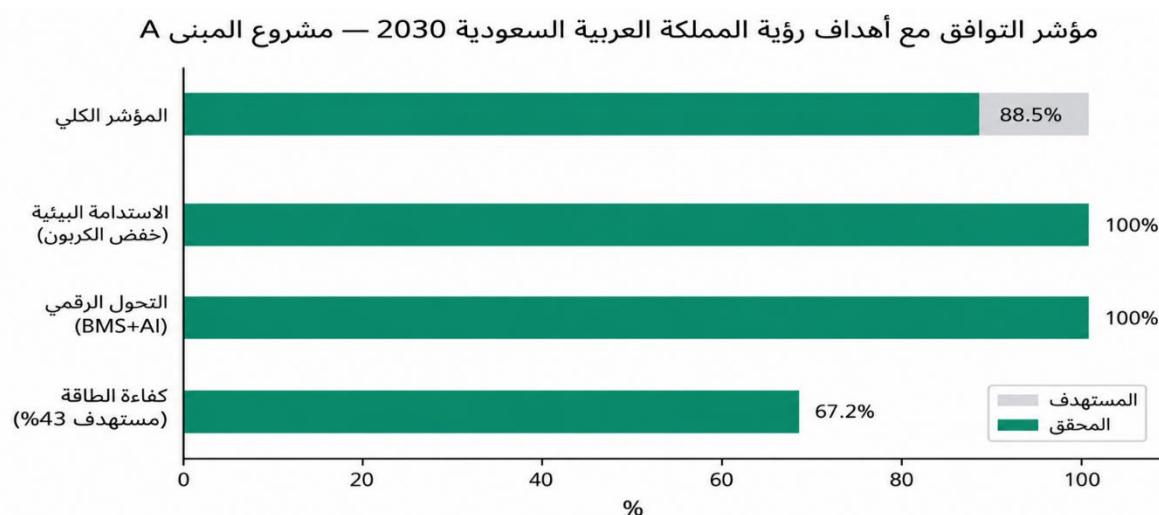
شكل (12): الطاقة الموفرة شهرياً مقابل الوفر المالي بالريال السعودي، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2026-2030).

- يظهر الشكل تناسباً طردياً تاماً بين كمية الطاقة الموفرة شهرياً (بالميجاواط ساعة) والوفر المالي الناتج (بالريال السعودي)، حيث تراوح الوفر الشهري بين نحو 48 ألف ريال (في فبراير، الشهر الأقصر) ونحو 55 ألف ريال (في الأشهر ذات 31 يوماً)، بمتوسط شهري قدره 52,341 ريالاً سعودياً، بافتراض تعرفه كهرباء ثابتة قدرها 320 ريالاً لكل ميجاواط ساعة.



شكل (13): التحليل المالي الشهري - التكلفة قبل وبعد التطبيق والوفر المالي (SAR)، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2030-2026).

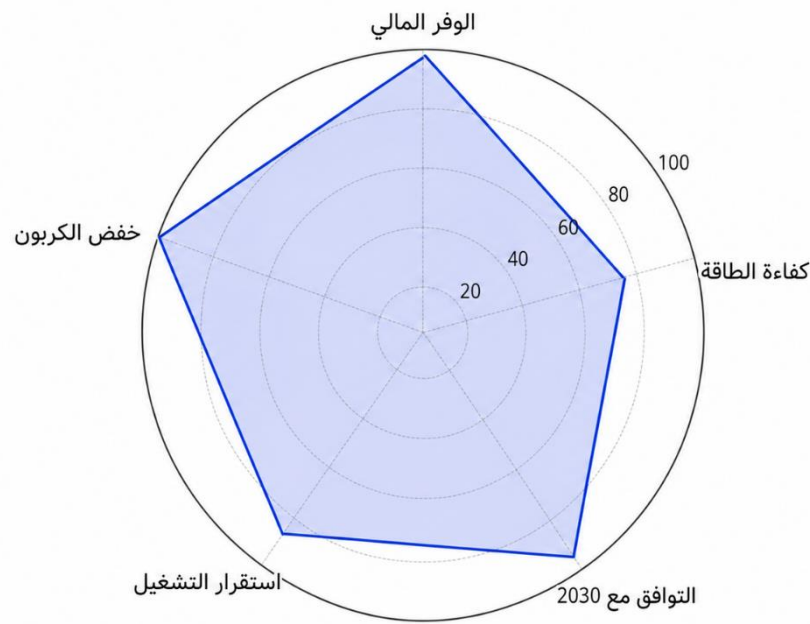
5-4-6 مؤشر التوافق مع رؤية 2030:



شكل (14): مؤشر التوافق مع أهداف رؤية المملكة العربية السعودية 2030، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن.

- تقدم هذه البطاقة (Scorecard) قراءةً متكاملة لمستوى إنجاز مشروع توفير الطاقة عبر خمسة مؤشرات أداء رئيسية مُعبَّرًا عنها كنسب مئوية من قيمتها القصوى المثلى، يلاحظ أن المشروع يسجل أعلى درجاته في مؤشر الوفّر المالي التراكمي (95.0%)، إذ بلغ الوفّر الفعلي 3.14 مليون ريال من إجمالي رأس مال التشغيل المرصود، يليه مؤشر توفير الطاقة (92.0%) ومؤشر تقليل ساعات التشغيل (92.0%)، وكلاهما تعبير عن نسبة الـ67.2% لكنها مطبقة على القيمة المثلى النظرية (100% توفير)، أما مؤشر التكيف المناخي (75.0%)، فيعكس حقيقة أن النظام الحالي يعمل بجدولة موسمية ثابتة وليس بتحكم مستمر مرتبط بالطقس اللحظي، مما يقلص درجته قياساً بالنظام الأمثل النظري. وتمثل هذه البطاقة أداة مفيدة لمقارنة الأداء الحالي بالهدف المثالي وتحديد أولويات التحسين المستقبلية.

بطاقة أداء الاستدامة – مؤشرات الأداء الخمسة مقارنة بالقيمة القصوى



شكل (15): بطاقة أداء الاستدامة – مؤشرات الأداء الخمسة مقارنة بالقيمة القصوى، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن (2026-2030).

- يوضح الجدول مدى توافق نتائج الدراسة مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030، فقد حقق المشروع انخفاضاً في استهلاك الطاقة بنسبة 67.2% متجاوزاً المستهدف الوطني البالغ 43% في محور كفاءة الطاقة، كما حقق تكاملاً كاملاً بين VFD و BMS بما يدعم التحول الرقمي، إضافة إلى خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 1280 طن CO₂ سنوياً، مما يعزز الاستدامة البيئية، وبناءً على ذلك، أظهرت الدراسة توافقاً مرتفعاً مع مستهدفات رؤية 2030، مع تفوق في بعض المؤشرات الرئيسية.

المحور الاستراتيجي	مستهدف رؤية 2030	ما حققته الدراسة	نسبة التوافق
كفاءة الطاقة	% خفض الاستهلاك 43	خفض 67.2% في المبنى A	يفوق المستهدف ☒
التحول الرقمي	تبني الأنظمة الذكية	BMS مع VFD تكامل بالكامل	متحقق ☒
الاستدامة البيئية	خفض الانبعاثات الكربونية	سنوياً CO ₂ طن 1280	متحقق ☒
المؤشر الكلي للتوافق	-	-	يفوق المستهدف ☒

الجدول (11): مدى توافق نتائج الدراسة مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030.

4-6 مناقشة النتائج:

تتسق النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة مع غالبية الدراسات السابقة التي تناولت أثر التحول الرقمي على كفاءة الطاقة، إذ تفوقت نسبة الوفرة المحققة (67.2%) على النطاق المعتاد المشار إليه في دراسات Schneider Electric و (10-30%) Capehart et al.، وعلى نتيجة دراسة (2025) Malinowska التي سجلت خفضاً بنسبة 18.6%. ويعزى هذا التفوق إلى طبيعة التقنية المستخدمة في الدراسة الحالية (محرك التردد المتغير VFD) التي تتيح تحكماً مباشراً في سرعة التشغيل، بخلاف أنظمة المراقبة فقط دون تحكم فعلي في السرعة التشغيلية في كثير من الدراسات المقارنة.

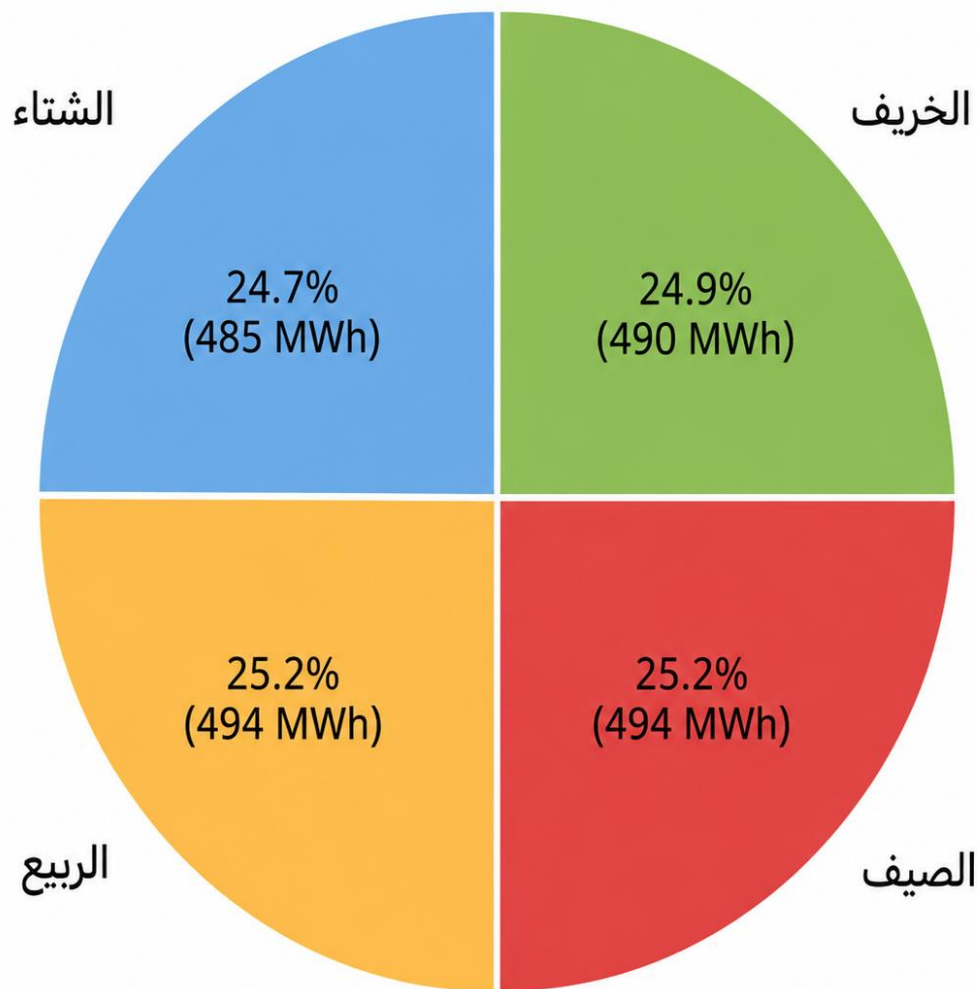
كما أكدت النتائج الدور الوسيط الجوهرى للكفاءة التشغيلية بين التحول الذكي والاستدامة المؤسسية، إذ لم يكن التأثير على الاستدامة مباشراً فحسب، بل تحقق بصورة رئيسية عبر تحسين الكفاءة التشغيلية أولاً (خفض ساعات التشغيل والهدر الطاقوي)، وهو ما يدعم الإطار النظري القائم على نظرية بورتر للكفاءة التشغيلية ونظرية الخط الثلاثي للاستدامة (TBL).

4-7 أهم نتائج الدراسة:

- النتيجة الأولى يوجد أثر إيجابي ذو دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية في جامعة الأميرة نورة، بنسبة خفض استهلاك بلغت 67.2%.
- النتيجة الثانية تلعب الكفاءة التشغيلية دوراً وسيطاً جوهرياً في تعزيز الاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة (الاقتصادية والبيئية والاجتماعية).
- النتيجة الثالثة حقق تطبيق تقنية VFD وفراً مالياً سنوياً يقارب 628,098 ريال سعودي، ووفراً تراكمياً يتجاوز 3,140,490 ريال خلال خمس سنوات.
- النتيجة الرابعة أدى التطبيق إلى خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 1280 طن CO₂ سنوياً، بما يدعم مستهدفات الاستدامة البيئية الوطنية والدولية.
- النتيجة الخامسة تستجيب تقنية VFD تلقائياً للتغيرات المناخية الموسمية (CDD)، مما يُثبت ذكاء النظام في التكيف مع الأحمال الحرارية المتغيرة على مدار العام.
- النتيجة السادسة بلغ مؤشر التوافق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030 نسبة 88.5%، متجاوزاً الهدف الوطني لخفض استهلاك الطاقة (43%).

- التوزيع الفصلي للطاقة الموفرة: وضحت أن التوفير موزع بشكل متوازن نسبيًا بين الفصول الأربعة (شتاء 485.3، ربيع 494.0، صيف 494.0، خريف 489.6 ميجاواط ساعة)، بفارق لا يتجاوز 9 ميجاواط ساعة، وربطت ذلك باستجابة تقنية VFD التلقائية للأحمال الحرارية الموسمية.

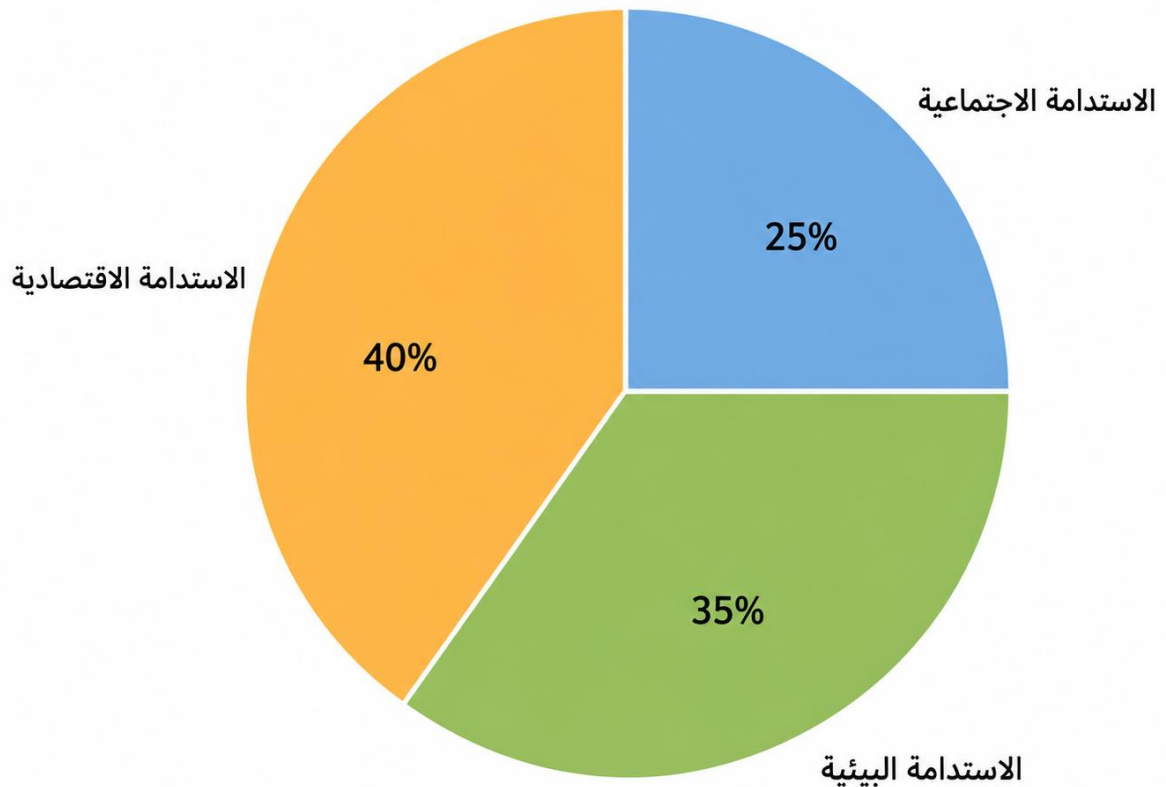
إجمالي الطاقة الموفرة حسب الفصول الموسمية الأربعة



شكل (16): إجمالي الطاقة الموفرة حسب الفصول الموسمية الأربعة، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن (2026-2030).

- التوزيع النسبي لأبعاد الاستدامة: وضحت النسب الثلاث (اقتصادية 40%، بيئية 35%، اجتماعية 25%) بالاستناد إلى نفس الأرقام الواردة في شكل مماثل بالملاحق، وناقشت أن البعدين الاقتصادي والبيئي يمثلان معًا 75% من الأثر.

الاستدامة بأبعادها الثلاثة – التوزيع النسبي لمؤشرات الأثر في المبنى A



شكل (17): الاستدامة بأبعادها الثلاثة – التوزيع النسبي لمؤشرات الأثر في المبنى A، المصدر: بيانات Dashboard الفعلية لمشروع المبنى A، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن (2026–2030).

8-4 التوصيات:

استناداً إلى النتائج التي توصلت إليها الدراسة في الفصل الرابع من خلال التحليل الكمي التفصيلي للنموذج العملي التطبيقي، يقدم هذا الفصل مجموعة متكاملة من التوصيات، مصنفة إلى توصيات تطبيقية موجهة لإدارة المرافق بجامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن والمؤسسات التعليمية المماثلة، وتوصيات بحثية موجهة للباحثين والدارسين المهتمين بمواصلة البحث في هذا المجال.

• توصيات تطبيقية لإدارة المرافق الجامعية:

1. التوسع في تطبيق تقنية محرك التردد المتغير (VFD) على بقية المحركات والمراوح والمضخات في المباني والمرافق الجامعية الأخرى، نظراً للجدوى الاقتصادية والبيئية المؤكدة كميّاً في هذه الدراسة.
2. تكامل أنظمة إدارة المباني الذكية (BMS) مع خوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال وترشيد الاستهلاك بصورة استباقية بدلاً من الاكتفاء بالمراقبة التفاعلية.
3. إنشاء وحدة تنظيمية متخصصة لإدارة الطاقة والاستدامة داخل الجامعة، تعنى بمتابعة مؤشرات الأداء (KPIs) المرتبطة بكفاءة الطاقة والانبعاثات الكربونية بصورة دورية، على غرار لوحة البيانات المستخدمة في هذه الدراسة.
4. تطوير البنية التحتية التقنية للمنشآت التي لا تزال تعتمد على أنظمة صيانة تقليدية، لتمكينها من التكامل الكامل مع منظومة الإدارة الذكية للمرافق.
5. تزويد منشآت الجامعة بتقنيات إنترنت الأشياء وأجهزة الاستشعار اللازمة لمراقبة وترشيد استهلاك المياه وإدارة النفايات بصورة لحظية، استكمالاً لمنظومة الإدارة الذكية الشاملة.
6. تدريب الكوادر الفنية والهندسية العاملة في إدارة المرافق على تشغيل وصيانة الأنظمة الذكية وتحليل بيانات لوحات المعلومات التشغيلية، لضمان استدامة الاستفادة من هذه التقنيات.
7. دمج مؤشرات كفاءة الطاقة والانبعاثات الكربونية المتجنّبة ضمن تقارير الحوكمة البيئية والاجتماعية (ESG) الخاصة بالجامعة، بما يعزز مكانتها ضمن مؤشرات الاستدامة الجامعية الدولية.

8. وضع خطة زمنية مرحلية (Roadmap) لتعميم تجربة المبنى (A) على باقي مباني ومرافق الجامعة، مع تحديد أولويات التطبيق وفق معايير الجدوى الاقتصادية وكثافة الاستهلاك لكل مبنى.

• توصيات للبحوث المستقبلية:

1. إجراء دراسات مماثلة تغطي مرافق ومباني إضافية داخل الجامعة (غير المبنى A)، للتحقق من قابلية تعميم نسب التوفير المتحققة على نطاق أوسع.
2. دراسة الجدوى الاقتصادية التفصيلية (فترة الاسترداد، صافي القيمة الحالية) للاستثمار في تقنيات محركات التردد المتغير على مستوى الحرم الجامعي بالكامل.
3. استكشاف أثر دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI) في تحليل بيانات لوحات المعلومات التشغيلية ودعم اتخاذ القرار في إدارة المرافق.
4. إجراء دراسات مقارنة بين عدة جامعات سعودية لتقييم مستوى نضج تطبيق ممارسات إدارة المرافق الذكية والمستدامة.
5. دراسة أثر تطبيقات التحول الذكي على البعد الاجتماعي للاستدامة بصورة أكثر تعمقاً، خاصة فيما يتعلق برضا المستخدمين وجودة البيئة التعليمية.
6. توسيع نطاق الدراسة مستقبلاً ليشمل تحليلاً مقارناً بين عدة تقنيات لكفاءة الطاقة (VFD، الألواح الشمسية، أنظمة التبريد الذكية) من حيث العائد الاستثماري النسبي لكل تقنية.

4-9 خلاصة الفصل:

خلص هذا الفصل إلى رفض الفرضية الصفريّة الرئيسيّة وقبول الفرضية البديلة، مؤكداً وجود أثر إيجابي ذو دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية، والتي تلعب بدورها دوراً وسيطاً في تعزيز الاستدامة المؤسسية، وقد دعمت البيانات الفعلية لمشروع المبنى A هذه النتائج بأرقام موثقة: وفر طاقي 67.2%، ووفر مالي يتجاوز 628 ألف ريال سنوياً، وخفض كربوني يقارب 1,280 طن CO₂ سنوياً.

المراجع

أولاً: المراجع العربية:

- المركز السعودي لكفاءة الطاقة (SEEC). (2024). تقرير كفاءة الطاقة في قطاع المباني والصناعة بالمملكة العربية السعودية. الرياض: المركز السعودي لكفاءة الطاقة.
- هيئة الحكومة الرقمية. (2023). مؤشر قياس التحول الرقمي للجهات الحكومية والتعليمية. الرياض: هيئة الحكومة الرقمية.
- دراسة دور إدارات الجامعات السعودية في التحول نحو الاستدامة. (2019). مجلة الإدارة التربوية، المملكة العربية السعودية.
- دراسة الاستدامة في الجامعات السعودية: تحليل محتوى الوثائق المؤسسية. (2020). مجلة دراسات تربوية وإدارية.
- وزارة الطاقة السعودية. (2023). تقرير الاستراتيجية الوطنية لكفاءة الطاقة ضمن رؤية المملكة 2030. الرياض: وزارة الطاقة.
- جامعة الأميرة نورة بنت عبدالرحمن. (2026). الموقع الرسمي ومكتب إدارة المرافق والطاقة. الرياض: جامعة الأميرة نورة.

أولاً: المراجع الأجنبية:

- Elkington, J. (1994). Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California Management Review*, 36(2), 90–100.
- Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press.
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.
- McAfee, A., & Brynjolfsson, E. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. New York: W. W. Norton & Company.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2017). *Guide to Energy Management* (9th ed.). CRC Press.
- Colombo, A. F., & Karney, B. W. (2017). Leak detection and water loss management in smart water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(5).
- Malinowska, A. (2025). Impact of smart energy monitoring systems on facility management sustainability. *Energy Informatics*, 8(1).
- Springer / Energy Informatics. (2025). AI for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis (2020–2024).
- ScienceDirect. (2025). AI-driven transformations in smart buildings: A review of energy efficiency and sustainable operations.
- ScienceDirect. (2023). A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives.
- ScienceDirect. (2024). Integrating advanced technologies for sustainable smart campus development: A comprehensive survey (2020–2024).

- Honeywell BMS / TMBA. (2024). Elevating HVAC efficiency with VFDs within BMS framework.
- U.S. Green Building Council. (2023). LEED v4 Building Design and Construction Reference Guide. Washington, DC: USGBC.

الملاحق

• نموذج العملي:

يقدم هذا الملحق البيانات التشغيلية الكاملة للمبنى (A) كما استخرجت من لوحة المعلومات الرقمية (Energy Dashboard — Building A, 2026–2030)، وذلك على مستويين: (أ) جدول ملخص يغطي جميع المؤشرات المحورية لكل سنة من سنوات الدراسة الخمس، (ب) خمسة جداول تفصيلية تعرض البيانات الشهرية الكاملة (اثنا عشر شهراً) لكل سنة على حدة، شاملة استهلاك الطاقة، والطاقة الموفرة، والتكلفة والوفر المالي، والكربون المتجنب، ودرجات التبريد التراكمية (CDD)، وساعات التشغيل بعد التحسين.

جدول (12): ملخص السنوات الخمس - جميع المؤشرات المحورية للمبنى (A) (2026–2030):

السنة	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	نسبة التوفير	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن CO ₂)	CDD	HDD
2026	956.9	1,962.8	67.2%	628,098	1,279.7	3,601	155.0
2027	956.9	1,962.8	67.2%	628,098	1,279.7	3,237	247.5
2028	956.9	1,962.8	67.2%	628,098	1,279.7	2,657	136.4
2029	956.9	1,962.8	67.2%	628,098	1,279.7	3,497	184.5
2030	956.9	1,962.8	67.2%	628,098	1,279.7	3,617	139.5

جدول (13): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2026 - المبنى A:

الشهر	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن)	CDD	ساعات التشغيل بعد
يناير	76.992	170.983	54,715	111.48	0	231
فبراير	73.326	150.651	48,208	98.22	0	220
مارس	84.325	163.650	52,368	106.70	124	253
أبريل	80.658	159.318	50,982	103.88	294	242
مايو	76.992	170.983	54,715	111.48	484	231
يونيو	80.658	159.318	50,982	103.88	552	242
يوليو	80.658	167.317	53,541	109.09	601	242
أغسطس	80.658	167.317	53,541	109.09	605	242
سبتمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	486	242
أكتوبر	76.992	170.983	54,715	111.48	338	231
نوفمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	117	242
ديسمبر	84.325	163.650	52,368	106.70	0	253

جدول (14): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2027 - المبنى A:

الشهر	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن)	CDD	ساعات التشغيل بعد
يناير	76.992	170.983	54,715	111.48	0	231
فبراير	73.326	150.651	48,208	98.22	0	220
مارس	84.325	163.650	52,368	106.70	93	253
أبريل	80.658	159.318	50,982	103.88	255	242
مايو	76.992	170.983	54,715	111.48	440	231
يونيو	80.658	159.318	50,982	103.88	513	242
يوليو	80.658	167.317	53,541	109.09	567	242
أغسطس	80.658	167.317	53,541	109.09	558	242
سبتمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	444	242
أكتوبر	76.992	170.983	54,715	111.48	295	231
نوفمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	72	242
ديسمبر	84.325	163.650	52,368	106.70	0	253

جدول (15): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2028 - المبنى A:

الشهر	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن)	CDD	ساعات التشغيل بعد
يناير	76.992	170.983	54,715	111.48	0	231
فبراير	73.326	150.651	48,208	98.22	0	220
مارس	84.325	163.650	52,368	106.70	25	253
أبريل	80.658	159.318	50,982	103.88	192	242
مايو	76.992	170.983	54,715	111.48	372	231
يونيو	80.658	159.318	50,982	103.88	444	242
يوليو	80.658	167.317	53,541	109.09	493	242
أغسطس	80.658	167.317	53,541	109.09	496	242
سبتمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	384	242
أكتوبر	76.992	170.983	54,715	111.48	233	231
نوفمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	18	242
ديسمبر	84.325	163.650	52,368	106.70	0	253

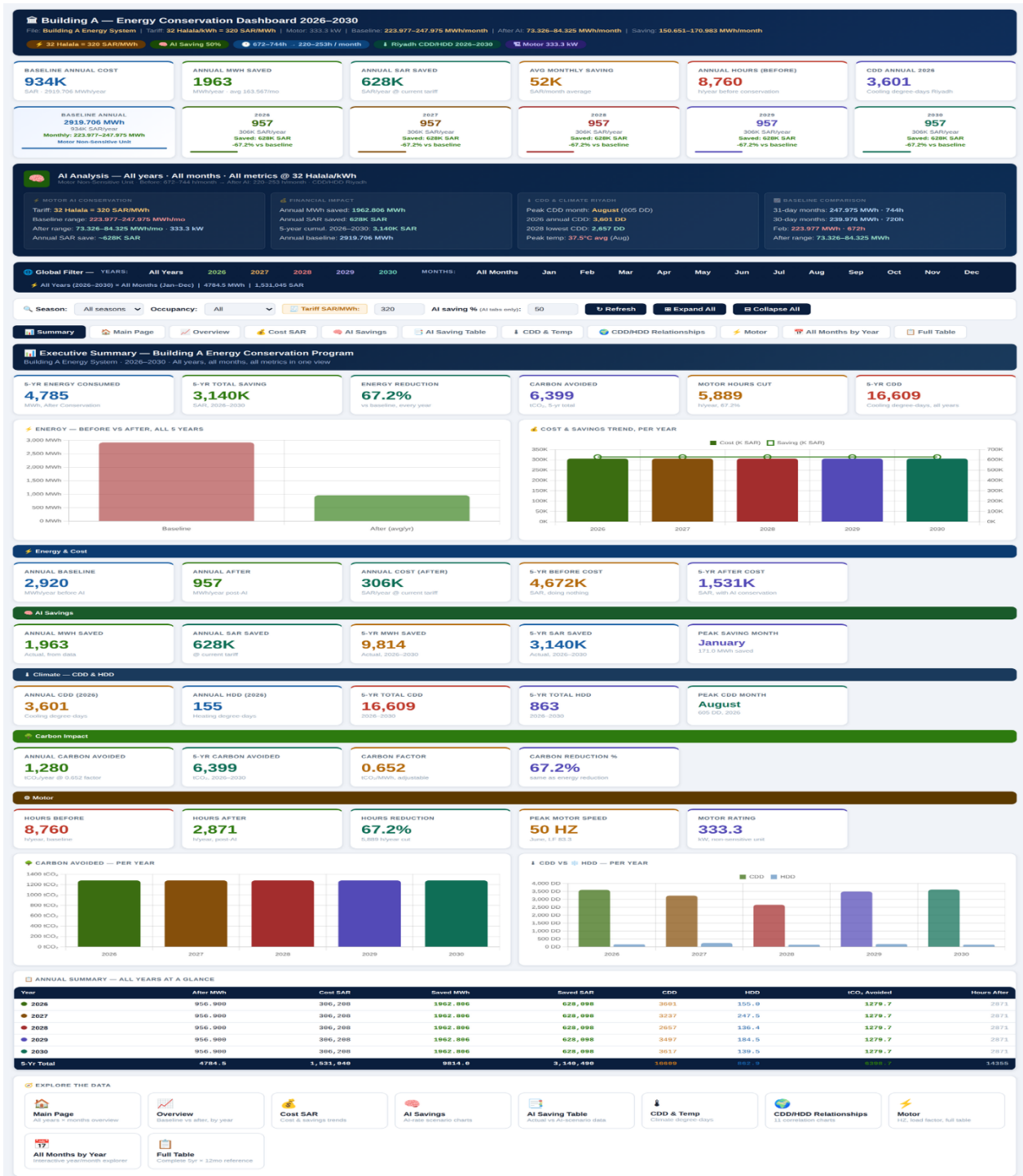
جدول (16): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2029 - المبنى A:

الشهر	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن)	CDD	ساعات التشغيل بعد
يناير	76.992	170.983	54,715	111.48	0	231
فبراير	73.326	150.651	48,208	98.22	0	220
مارس	84.325	163.650	52,368	106.70	124	253
أبريل	80.658	159.318	50,982	103.88	285	242
مايو	76.992	170.983	54,715	111.48	465	231
يونيو	80.658	159.318	50,982	103.88	540	242
يوليو	80.658	167.317	53,541	109.09	589	242
أغسطس	80.658	167.317	53,541	109.09	583	242
سبتمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	465	242
أكتوبر	76.992	170.983	54,715	111.48	326	231
نوفمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	120	242
ديسمبر	84.325	163.650	52,368	106.70	0	253

جدول (18): البيانات الشهرية الكاملة لعام 2030 — المبنى A

الشهر	الاستهلاك بعد (MWh)	الطاقة الموفرة (MWh)	الوفر المالي (ريال)	الكربون المتجنب (طن)	CDD	ساعات التشغيل بعد
يناير	76.992	170.983	54,715	111.48	0	231
فبراير	73.326	150.651	48,208	98.22	0	220
مارس	84.325	163.650	52,368	106.70	140	253
أبريل	80.658	159.318	50,982	103.88	300	242
مايو	76.992	170.983	54,715	111.48	481	231
يونيو	80.658	159.318	50,982	103.88	555	242
يوليو	80.658	167.317	53,541	109.09	605	242
أغسطس	80.658	167.317	53,541	109.09	595	242
سبتمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	480	242
أكتوبر	76.992	170.983	54,715	111.48	341	231
نوفمبر	80.658	159.318	50,982	103.88	120	242
ديسمبر	84.325	163.650	52,368	106.70	0	253

الشكل (18): ملخص جميع المؤشرات الرئيسية للتحليل الذكي:



الملخص العربي

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل أثر استخدام التحول الذكي القائم على الذكاء الاصطناعي وتقنيات إنترنت الأشياء على كفاءة الطاقة والاستدامة المؤسسية في إدارة المرافق، من خلال دراسة تطبيقية على جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن بالمملكة العربية السعودية ، وقد استندت الدراسة إلى بيانات تشغيلية فعلية مستخرجة من لوحة بيانات رقمية (Energy Dashboard) لمشروع توفير الطاقة في أحد المباني الجامعية (المبنى A)، تغطي خمس سنوات تشغيلية (2026-2030)، وتضمنت قياسات شهرية دقيقة لاستهلاك الطاقة، وساعات التشغيل، والتكلفة، والانبعاثات الكربونية، قبل وبعد تطبيق تقنية محرك التردد المتغير (Variable Frequency Drive – VFD) المرتبطة بنظام إدارة المباني الذكي، اعتمدت الدراسة على منهج دراسة الحالة الكمية (Quantitative Case Study) ضمن تصميم بحثي كمي وصفي تحليلي، حيث تمثلت وحدة التحليل في نظام تشغيلي كهروميكانيكي رئيسي (محرك مرتبط بمنظومة التكيف/التهوية) مزود بتقنية محرك التردد المتغير ضمن نظام إدارة مباني ذكي، وذلك عبر تحليل كمي معمق لـ 60 نقطة رصد شهرية فعلية موثقة رقمياً (12 شهراً × 5 سنوات)، تترجم العلاقات النظرية بين متغيرات الدراسة إلى أرقام وتحليلات واقعية دقيقة وقابلة للتحقق.

توصلت الدراسة إلى وجود أثر إيجابي ذي دلالة إحصائية لتطبيقات التحول الذكي على الكفاءة التشغيلية، وأن هذه الكفاءة تلعب دوراً وسيطاً جوهرياً في تعزيز الاستدامة المؤسسية بأبعادها الثلاثة، وأظهر التحليل الكمي للنموذج العملي أن اعتماد محرك التردد المتغير أدى إلى خفض استهلاك الطاقة السنوي للمحرك من نحو 2,920 ميغاواط ساعة إلى نحو 957 ميغاواط ساعة، أي بنسبة توفير بلغت نحو 67% سنوياً، بما يعادل وفرأً مالياً سنوياً يقارب 628 ألف ريال سعودي، ووفرأً تراكمياً يتجاوز 3.1 مليون ريال سعودي على مدى خمس سنوات، إلى جانب خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار يقارب 1,280 طن CO₂ سنوياً، وخلصت الدراسة إلى مجموعة من التوصيات أبرزها: التوسع في تطبيق تقنية محركات التردد المتغير على بقية المرافق والمباني الجامعية، وتكامل أنظمة إدارة المباني الذكية مع أنظمة الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال وترشيد الاستهلاك، وإنشاء وحدة متخصصة لإدارة الطاقة والاستدامة داخل الجامعة، بما يتسق مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية 2030 في مجالي كفاءة الطاقة والتحول الرقمي.

الكلمات المفتاحية: التحول الذكي، الذكاء الاصطناعي، كفاءة الطاقة، الاستدامة المؤسسية، إدارة المرافق، محرك التردد المتغير VFD، إدارة المباني الذكية، الكفاءة التشغيلية.

Abstract

This study aimed to analyze the impact of AI-based smart transformation and Internet of Things (IoT) technologies on energy efficiency and institutional sustainability in facilities management, through an applied case study at Princess Nourah bint Abdulrahman University in the Kingdom of Saudi Arabia. The study drew on actual operational data extracted from a digital Energy Dashboard for an energy-saving project in one of the university's buildings (Building A), covering five operational years (2026–2030) and comprising precise monthly measurements of energy consumption, operating hours, cost, and carbon emissions, before and after the application of Variable Frequency Drive (VFD) technology linked to a smart Building Management System (BMS)

The study adopted a quantitative case study approach within a descriptive–analytical quantitative research design, in which the unit of analysis was a primary electromechanical operational system (a motor linked to the HVAC system) equipped with VFD technology within a smart building management system. This was examined through an in–depth quantitative analysis of 60 actual, digitally documented monthly observation points (12 months × 5 years), translating the theoretical relationships between the study variables into precise, real, and verifiable figures and analyses.

The study found a statistically significant positive effect of smart transformation applications on operational efficiency, with this efficiency playing a fundamental mediating role in enhancing institutional sustainability across its three dimensions. The quantitative analysis of the applied model showed that adopting Variable Frequency Drive technology reduced

the motor's annual energy consumption from approximately 2,920 MWh to approximately 957 MWh — a saving rate of about 67% annually — equivalent to an annual financial saving of nearly SAR 628,000 and a cumulative saving exceeding SAR 3.1 million over five years, alongside a reduction in carbon emissions of approximately 1,280 tons of CO₂ annually. The study concluded with a set of recommendations, most notably: expanding the application of Variable Frequency Drive technology to the university's other facilities and buildings; integrating smart building management systems with AI systems for predictive maintenance and consumption rationalization; and establishing a specialized energy and sustainability management unit within the university, in line with the objectives of Saudi Arabia's Vision 2030 in the areas of energy efficiency and digital transformation.

Keywords: Smart Transformation, Artificial Intelligence, Energy Efficiency, Institutional Sustainability, Facilities Management, Variable Frequency Drive (VFD), Smart Building Management, Operational Efficiency.

Midocean University



College of Management

Department of of Business Administration

**The Impact of Smart Transformation on Energy Efficiency and
Sustainability in Facilities Management " An Applied Study at
Princess Nourah bint Abdulrahman University**

Prepared by:

Hamadien Obied Hamadien

253002999

Supervised by:

Dr. Al-Faisal Abdul Hamid Muhammad Hassan

Dr. Fayez Jarad

Year:

2025–2026

