

تطوير إطار تكيفي قائم على إنترنت الأشياء والتعلم الآلي لتحسين رفاهية المستخدمين وكفاءة الطاقة
في المباني السكنية الذكية: دراسة حالة تطبيقية
غالية محمد ابوجبهة
كلية التقنية الهندسية جنزور

abogabhagalia@gmail.com

Developing an adaptive framework based on the Internet of Things and machine learning to improve user well-being and energy efficiency in smart residential buildings: an applied case study

Galia.M.Abogabha
College of Technical Engineering - Janzour

تاريخ الاستلام: 2026/01/08 تاريخ المراجعة 17 / 2 / 2026 تاريخ القبول: 2026/03/10 - تاريخ النشر: 2026 / 03/19

المخلص

تواجه إدارة المباني السكنية معضلة تشغيلية تتمثل في التضارب بين كفاءة استهلاك الطاقة ورفاهية الشاغلين، حيث تعتمد الأنظمة التقليدية على قواعد تحكم ثابتة أو يدوية تعجز عن التكيف مع الديناميكيات الحرارية والسلوكية، مما أفرز فجوة علمية واضحة في ندرة النماذج التكيفية المستقلة المطبقة في البيئات التشغيلية الحقيقية. لمعالجة هذا القصور، يقترح هذا البحث إطاراً هندسياً تكاملياً يعتمد على إنترنت الأشياء والتعلم الآلي للتحكم اللحظي في أنظمة التكييف والتهوية. منهجياً، تم اختبار الإطار عبر دراسة حالة تجريبية شملت عشر وحدات سكنية، بالاعتماد على شبكة استشعار لامركزية مكونة من ثلاثين مستشعراً لجمع بيانات سلاسل زمنية دقيقة تشمل المتغيرات الحرارية، وتركيز ثاني أكسيد الكربون، وحالة الإشغال. اعتمد محرك التحكم البيئي على بناء نموذج هجين يدمج شبكات الذاكرة طويلة قصيرة المدى للتنبؤ بالحالة البيئية، مع وكيل خوارزمي قائم على التعلم المعزز العميق لاتخاذ قرارات استباقية. أثبتت النتائج الكمية للتحليل البعدي تفوقاً جذرياً للنظام المقترح؛ إذ انخفض الانحراف المعياري لدرجات الحرارة إلى 0.4 درجة مئوية، وارتفعت نسبة الامتثال لنطاق الراحة الحرارية من 64.3 بالمائة إلى 94.7 بالمائة من إجمالي وقت الإشغال. كما نجحت الخوارزمية الاستباقية في تسطيح ذروة تركيز ثاني أكسيد الكربون عند 780 جزءاً في المليون، مانعة تجاوز عتبات الخطر بشكل تام. بالتوازي مع ذلك، حقق الإطار توفيراً طاقياً موثقاً بنسبة 23.8 بالمائة في الاستهلاك الكلي للأنظمة الميكانيكية، متزامناً مع ارتفاع ملحوظ في معدل رضا المستخدمين من 2.8 إلى 4.6 نقطة. تبرز المساهمة العلمية لهذا البحث في تقديم إثبات حقل دقيق على قدرة النظم السيبرانية الفيزيائية على فك الارتباط الهندسي بين جودة البيئة الداخلية واستهلاك الطاقة.

الكلمات الاستدلالية: إنترنت الأشياء، كفاءة الطاقة، الذكاء الاصطناعي، الاستشعار الذكي، الأنظمة السيبرانية الفيزيائية

1. المقدمة

يشهد قطاع التشييد وإدارة المرافق المعمارية تحولاً جذرياً نحو دمج النظم السيبرانية الفيزيائية ضمن الهيكل التشغيلي للمباني السكنية، حيث لم تعد المباني مجرد هياكل إنشائية ثابتة، بل تحولت إلى بيئات ديناميكية تتفاعل مع الشاغلين والظروف المحيطة. يعتمد هذا التحول بشكل أساسي على بنية إنترنت الأشياء التي تعمل كطبقة استشعار مادية ترأق حالة البيئة الداخلية بدقة، وتترجم المتغيرات الفيزيائية مثل درجة الحرارة والرطوبة وجودة الهواء إلى بيانات رقمية قابلة للتحليل. تعمل هذه المستشعرات كمراقبين لحالة النظم المعمارية، مما يتيح فهماً أعمق للتفاعلات المعقدة بين الغلاف الخارجي للمبنى، وأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، وسلوكيات المستخدمين (محمد وآخرون، 2025). تتطلب البيئة التكيفية الفعالة تجاوز مفهوم المراقبة السلبية للبيانات والاتجاه نحو التدخل الاستباقي، حيث يتم استخدام البيانات المستمدة لضبط عوامل التشغيل المعمارية بشكل مستمر، مما يعزز من كفاءة الأداء التشغيلي (Elgazzar et al., 2025). غير أن هذا الانتقال نحو البيئات المعمارية التكيفية لا يزال يواجه تحديات تقنية وهندسية، لا سيما في التعامل مع ضوضاء المستشعرات، ومشاكل الانحراف في القراءات بمرور الوقت، إضافة إلى القيود المفروضة على سرعة استجابة المشغلات الميكانيكية داخل المنظومة الكلية (Sung & Hsiao, 2020).

بالتوازي مع التطور التقني لشبكات الاستشعار، تبرز إشكالية رفاهيّة المستخدم في المباني السكنية كأحد أهم التحديات التي تواجه المصممين ومهندسي التحكم. لا تقتصر رفاهيّة المستخدم على تحقيق درجات حرارة مقبولة، بل تمتد لتشمل منظومة متكاملة من جودة الهواء الداخلي، والإضاءة الحيوية، والراحة النفسية والفيولوجية (Roumi et al., 2024). على أرض الواقع، توجد فجوة واسعة بين المعايير التصميمية للراحة الحرارية والراحة الفعلية التي يختبرها شاغلون، حيث تعتمد معظم الأنظمة التقليدية على نماذج ثابتة تفترض توحيد التفضيلات الحرارية لجميع المستخدمين، متجاهلة التباين الفسيولوجي والسلوكي بينهم (Kim et al., 2018). بالإضافة إلى ذلك، تعتمد إدارة البيئة الداخلية في معظم المباني السكنية الحالية إما على أنظمة تحكم مركزية مبرمجة مسبقاً، أو على التحكم اليدوي المباشر من قبل المستخدم. تؤدي محاولات التحكم اليدوي غالباً إلى تفاعلات غير مستقرة داخل النظم الميكانيكية، مما يتسبب في حدوث تذبذبات حادة في درجات الحرارة ومعدلات استهلاك طاقة غير مبررة، ناهيك عن عدم قدرة المستخدم العادي على إدراك الملوثات غير المرئية مثل مستويات ثاني أكسيد الكربون أو الجسيمات الدقيقة في الوقت الفعلي (Naylor et al., 2018). وفي هذا السياق، تؤكد القياسات الحقلية أن الاعتماد على التدخل البشري لضبط البيئة الداخلية يؤدي غالباً إلى تدهور ملحوظ في جودة الهواء نتيجة نقص التهوية المناسبة، أو الإفراط في تشغيل أنظمة التكيف مما ينعكس سلباً على كل من الاستدامة وصحة المستخدمين (Haverinen et al., 2018). لذلك، تصبح الحاجة ملحة لتطوير آليات تحكم قادرة على استنتاج حالة الإشغال وتعديل البيئة بشكل يراعي القيود التشغيلية ويمنع التجاوزات الحادة التي تؤثر على راحة المستخدم (Ouf et al., 2021).

وعلى الرغم من الزخم البحثي المتزايد في مجال إدارة المباني، تكشف المراجعة النقدية للأدبيات عن فجوة علمية منهجية واضحة. فقد ركزت الغالبية العظمى من الدراسات والتقنيات المطروحة على تعظيم كفاءة استهلاك الطاقة كهدف مفرد وأساسي، متجاهلة في كثير من الأحيان التأثيرات المباشرة لسياسات توفير الطاقة على صحة وإنتاجية وراحة شاغلين (Shi et al., 2022). وحتى في الأبحاث التي تناولت رفاهيّة المستخدم، تم التعامل معها كقيد ثانوي أو حد أدنى يجب استيفاءه، وليس كهدف ديناميكي مترامن يجب تحسينه جنباً إلى جنب مع تقليل استهلاك الطاقة (Tang et al., 2022). من جهة أخرى، تعتمد معظم حلول التحكم المطبقة حالياً إما على قواعد منطقية صلبة تفشل في التكيف مع التغيرات السلوكية، أو على نماذج تنبؤية خطية لا تستطيع التقاط العلاقات المعقدة والديناميكية بين الكتل الحرارية للمبنى ومعدلات التهوية وأنماط الإشغال المتغيرة (فرغلي والسلنتي، 2025). ويتمثل النقص الأبرز في ندرة النماذج التكيفية الذاتية القائمة على خوارزميات التعلم الآلي، والتي يمكنها اتخاذ قرارات تحكم دقيقة في الوقت الفعلي مع الأخذ في الاعتبار القيود المادية للأنظمة الميكانيكية وحدود الانحراف المسموح بها لتجنب الإزعاج (Bresa et al., 2024).

علاوة على ذلك، فإن العديد من النماذج المتقدمة المقترحة في الأدبيات تم اختبارها والتحقق من صحتها في بيئات محاكاة افتراضية مثالية تفترض توافر بيانات كاملة وخالية من الشوائب، مع تجاهل التحديات الحقيقية للتشغيل الميداني مثل فقدان الاتصال بشبكات الاستشعار، أو تعطل المشغلات، أو أخطاء المعايرة المستمرة (Boutahri & Tilioua, 2025). إن غياب التحقق التجريبي في بيئات تشغيلية حقيقية يقلل من قابلية تعميم هذه النماذج ويفسر محدودية تبنيتها على نطاق تجاري واسع (Blum et al., 2021). يظهر هذا التفاوت بوضوح عند محاولة تطبيق خوارزميات التعلم المعزز للتحكم في أنظمة التهوية وتكييف الهواء، حيث تتطلب هذه الخوارزميات فترات استكشاف قد تؤدي إلى انتهاكات جسيمة للراحة الحرارية إذا لم تكن مفيدة بقواعد أمان صارمة تعتمد على فهم فيزيائي دقيق لخصائص المبنى (Wei et al., 2017) و (Xu et al., 2025). لذلك، تبرز حاجة ماسة لتقديم أطر تطبيقية تتجاوز مرحلة التطوير، لتثبت قدرة التعلم الآلي على تقديم استراتيجيات تحكم متوازنة وأمنة وفعالة في سياقات سكنية حقيقية.

يهدف هذا البحث إلى معالجة الفجوات العلمية والتطبيقية المذكورة من خلال تطوير واختبار إطار تحكم تكيفي يعتمد على التكامل المباشر بين مستشعرات إنترنت الأشياء وخوارزميات التعلم الآلي المتقدمة لضبط البيئة الداخلية في المباني السكنية بشكل مستقل وديناميكي. يسعى البحث بشكل أساسي إلى صياغة نموذج تشغيلي يحقق التوازن الأمثل بين أهداف تحسين رفاهيّة المستخدمين وتقليل الاستهلاك الكلي للطاقة، مع تقديم دليل تجريبي مستمد من دراسة حالة تطبيقية في بيئة حقيقية. من خلال بناء هذا الإطار، يهدف البحث إلى تقييم أثر التدخلات الخوارزمية على مؤشرات جودة الهواء والراحة الحرارية بدقة كمية، وتوضيح كيفية تفادي مشكلات التحكم اليدوي وأنظمة القواعد الثابتة. كما يهدف لتقديم منهجية هندسية قابلة للتكرار تتعامل بفعالية مع البيانات المفقودة والقيود التشغيلية للأنظمة الميكانيكية، مما يساهم في دفع عجلة التحول نحو بيئات مبنية ذكية ومستدامة ومحوره حول الإنسان.

2. الإطار النظري والتحليل المفاهيمي

2.1 مفهوم رفاهيّة المستخدم في البيئة المبنية: تتجاوز رفاهيّة المستخدم في البيئات المعمارية المعاصرة مجرد غياب الانزعاج المادي لتشمل حالة شاملة من الراحة الفسيولوجية والنفسية، والتي تتأثر ميكانيكياً بتفاعلات معقدة بين الأنظمة الهندسية للمبنى والظروف المحيطة. في سياق القياسات الهندسية، تُترجم هذه الرفاهيّة إلى أربعة أبعاد رئيسية قابلة للرصد والتحكم. أولاً، الراحة الحرارية، والتي تعبر عن التوازن الحراري بين جسم الإنسان والبيئة المحيطة. تاريخياً، اعتمد تقييم هذا البعد على نماذج ثابتة تعتمد على مؤشرات عامة، إلا أن القياسات الحقلية الحديثة أثبتت قصور هذه النماذج في استيعاب

التباين الفسيولوجي والسلوكي بين الأفراد، مما استدعى التحول نحو نماذج الراحة الشخصية التي تستفيد من تدفقات البيانات الآتية لتخصيص البيئة الحرارية بناء على تفضيلات الشاغلين (Kim et al., 2018). ثانياً، الراحة البصرية، التي لا تقتصر على توفير مستويات إضاءة كافية لأداء المهام، بل تمتد لتشمل الحد من الوهج المباشر والانعكاسي، وضبط التدرج اللوني ودرجة حرارة الإضاءة بما يتوافق مع الإيقاع اليومي والحيوي للمستخدمين، مما يؤثر بشكل مباشر على جودة النوم واليقظة (خليل، 2024).

ثالثاً، جودة الهواء الداخلي، والتي تعد المؤشر الأكثر حرجية للصحة العامة داخل المباني. يتم تقييم هذه الجودة عبر مراقبة تركيزات الملوثات والغازات، حيث يستخدم تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون كمؤشر بديل لتقييم كفاءة معدلات التهوية وتراكم الانبعاثات الحيوية، بينما ترتبط الجسيمات الدقيقة والمركبات العضوية المتطايرة بمخاطر صحية تنفسية مباشرة (Khovalyg et al., 2020). يتطلب التحكم الفعال في جودة الهواء موازنة دقيقة بين إدخال هواء خارجي نقي لخفض تركيز الملوثات، وبين استهلاك الطاقة اللازم لمعالجة هذا الهواء حرارياً (Dai et al., 2023). رابعاً، الرفاهية النفسية، وهي نتيجة تراكمية تتأثر بمستوى إدراك المستخدم لمدى سيطرته على بيئته المحيطة. أظهرت التقييمات الإحصائية أن تزويد الشاغلين بواجهات تفاعلية تتيح لهم إبداء ملاحظاتهم أو تعديل بيئتهم بشكل طفيف يؤدي إلى رفع مستويات الرضا العام حتى في ظل انحرافات طفيفة عن المعايير الحرارية القياسية (Mahdavi et al., 2021). إن الترجمة الميكانيكية لهذه الأبعاد تتطلب أدوات استشعار قادرة على قياس المؤشرات الفيزيائية بشكل مستمر وموثوق لربطها بالاستجابات البشرية (Roumi et al., 2024).

2.2 أنظمة إنترنت الأشياء في المباني كطبقة استشعار مادية: تُشكل شبكات إنترنت الأشياء البنية التحتية السببرانية الفيزيائية الأساسية للمباني الذكية، حيث تعمل المستشعرات كمرآبين لحالة المتغيرات البيئية، محولة التغيرات الفيزيائية إلى تدفقات بيانات رقمية قابلة للتحليل الخوارزمي. تتنوع هذه المستشعرات لتشمل قياسات المتغيرات الحرارية، الرطوبة النسبية، تركيزات الغازات، مستويات الإضاءة، وحالة الإشغال. يعتبر استنتاج حالة الإشغال بدقة أحد أهم التحديات التقنية، حيث تعتمد أنظمة التحكم على هذه البيانات لتوجيه الموارد بفعالية، وتنوع تقنيات الاستشعار في هذا المجال بين مستشعرات الحركة السلبية، وكاميرات الرؤية الحرارية، وتقنيات تتبع الإشارات اللاسلكية، ولكل منها قيود تتعلق بدقة الرصد وانتهاك الخصوصية (Jeon et al., 2018). مع ذلك، تواجه هذه الشبكات تحديات هندسية تتمثل في ضوضاء القياس، وانحراف المعايرة بمرور الوقت، مما يفرض ضرورة تطبيق خوارزميات تصحيح انحراف وتصفية للبيانات على مستوى العقد الطرفية قبل استخدامها في اتخاذ قرارات التحكم (Sung & Hsiao, 2020).

من الناحية الهيكلية، تعتمد بنية الاتصال في هذه الأنظمة على بروتوكولات نقل البيانات التي توازن بين استهلاك الطاقة ونطاق التغطية وزمن الوصول. ولضمان استقرار أنظمة التحكم المعمارية، يجب أن يراعي تصميم البنية التحتية القيود المفروضة على عرض النطاق الترددي واحتمالية فقدان حزم البيانات (محمد وحسن، 2024). يبرز هنا النقاش الهندسي حول المفاضلة بين الحوسبة الطرفية والحوسبة السحابية. تتيح الحوسبة السحابية تجميع كميات ضخمة من البيانات التاريخية واستخدام موارد حاسوبية هائلة لتدريب نماذج تعلم آلي معقدة، إلا أنها تعاني من تحديات زمن الاستجابة والاعتماد الكلي على استقرار شبكة الإنترنت الخارجي. في المقابل، توفر الحوسبة الطرفية معالجة البيانات بالقرب من مصدرها، مما يضمن أمانة استجابة سريعة للغاية لضرورة لتطبيقات التحكم المباشر، ويوفر طبقة أمان تشغيلية تضمن استمرار عمل الأنظمة الحيوية وفق قواعد أساسية حتى في حال انقطاع الاتصال بالسحابة، فضلاً عن تعزيز خصوصية البيانات من خلال تقليل الحاجة لنقلها خارج النطاق المحلي للمبنى (عبد و آخرون، 2024).

2.3 التعلم الآلي في إدارة المباني والتحكم التكيفي: يمثل دمج خوارزميات التعلم الآلي في إدارة المباني النقلة النوعية من أنظمة المراقبة السلبية إلى البيئات التشغيلية الاستباقية. يمكن تصنيف تطبيقات التعلم الآلي في هذا المجال بناء على أهدافها إلى مسارين رئيسيين. يعتمد المسار الأول على التعلم الخاضع للإشراف، والذي يُستخدم بشكل مكثف في بناء نماذج تنبؤية لتقدير الأحمال الحرارية المستقبلية، أو استنتاج أنماط الإشغال، أو التنبؤ بمؤشرات الراحة الحرارية بناء على البيانات التاريخية وظروف الطقس الخارجية (Ma et al., 2023). تتفوق هذه النماذج على المعادلات الفيزيائية المبسطة بقدرتها على استخراج الميزات المعقدة من السلاسل الزمنية، مثل تأثير الكتل الحرارية للمبنى وفترات تأخر الاستجابة، مما يساعد في تجنب التجاوزات الحادة في درجات الحرارة (Shi et al., 2022). على الرغم من ذلك، تظل النماذج التنبؤية بحاجة إلى وحدات تحكم منفصلة لترجمة هذه التنبؤات إلى أوامر ميكانيكية للمشغلات.

هنا يبرز المسار الثاني المتمثل في خوارزميات التعلم المعزز كأطار قوي للتحكم التكيفي المباشر، حيث يتم صياغة مشكلة إدارة المبنى كعملية قرار ماركوفية. يتفاعل وكيل الذكاء الاصطناعي مع البيئة الداخلية، ويقوم باتخاذ قرارات مستمرة لضبط نقاط الإعداد لأنظمة التكييف والتهوية، ثم يتلقى مكافآت أو عقوبات بناء على دالة أهداف رياضية توازن بين تقليل استهلاك الطاقة وتجنب انتهاك نطاقات الراحة المحددة (Wei et al., 2017). تتجاوز خوارزميات التعلم المعزز القيود الحسابية العالية التي تعاني منها أنظمة التحكم التنبؤي القائم على النماذج خاصة عند التعامل مع سيناريوهات التشغيل المعقدة والسريعة (Tang et al., 2022). ومع ذلك، فإن التطبيق العملي للتعلم المعزز يواجه تحديات جسيمة، أبرزها فترة الاستكشاف الأولية

التي يتخذ فيها الوكيل قرارات عشوائية قد تؤدي إلى ظروف بيئية غير آمنة أو غير مريحة للشاغلين. للتغلب على هذه المشكلة، يتم توجيه تدريب النماذج باستخدام سياسات تحكم خبيرة مبدئية، وتطبيق قيود أمان صارمة تحد من مساحة الإجراءات المتاحة للوكيل، مما يضمن الحفاظ على استقرار النظام الميكانيكي وتجنب التآكل المبكر للمعدات نتيجة التردد السريع في أوامر التشغيل (Xu et al., 2025) و (Boutahri & Tilioua, 2025).

2.4 نموذج تكاملي مقترح للبيئات السكنية: استنادا إلى التحليل النقدي للآليات السابقة، يتطلب تحسين رفاية المستخدمين وكفاءة الطاقة إطارا تكامليا يتجاوز العزلة بين النظم الفرعية. يقترح هذا البحث نموذجا سببيا مغلقا يبدأ بالتقاط الحالة الفيزيائية للبيئة عبر شبكة استشعار غير متجانسة تراقب جودة الهواء والظروف الحرارية وأنماط الإشغال. تمر هذه التدفقات عبر خط أنابيب لمعالجة البيانات يقوم بتصفية الضوضاء ومعالجة القراءات المفقودة بشكل فوري لضمان موثوقية التقدير. تُغذى هذه البيانات المصححة إلى محرك استدلال يعتمد على التعلم الآلي، والذي يقوم بتقييم الحالة الحالية والتنبؤ بالتطورات البيئية قصيرة المدى لترجمتها إلى أوامر تحكم استباقية. يتم توجيه هذه الأوامر إلى المشغلات الميكانيكية لضبط معدلات التهوية ونقاط الإعداد الحرارية، مما يحدث تغييرا فيزيائيا مباشرا في البيئة الداخلية. يتم رصد أثر هذا التغيير مجددا عبر المستشعرات ومقاطعته مع مؤشرات رضا المستخدمين وتوفير الطاقة، مما يسمح للنموذج بتحديث استراتيجيته وتصحيح مساره بشكل مستمر ومستقل.

3. المنهجية

3.1 تصميم الدراسة

تتبنى هذه الدراسة تصميمًا شبيهًا تجريبيًا يعتمد على منهجية القياس القبلي والبعدي لتقييم فعالية إطار التحكم التكيفي المقترح في بيئة سكنية حقيقية. يهدف هذا التصميم إلى تجاوز القصور المنهجي في الدراسات المعتمدة حصريا على المحاكاة الافتراضية، من خلال اختبار النظام تحت ظروف تشغيلية ديناميكية تتأثر بالتغيرات المناخية الفعلية والسلوكيات العشوائية للشاغلين (Blum et al., 2021). تم تقسيم الإطار الزمني للتجربة إلى مرحلتين أساسيتين متساويتين في المدة لضمان موثوقية المقارنة الإحصائية. المرحلة الأولى (المرحلة المرجعية) استمرت لمدة شهرين، وتم خلالها تشغيل أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء باستخدام بروتوكولات التحكم التقليدية القائمة على القواعد الثابتة والتدخل اليدوي للمستخدمين، مع اقتصار دور شبكة إنترنت الأشياء على المراقبة السلبية وجمع البيانات البيئية واستهلاك الطاقة لتأسيس خط الأساس.

المرحلة الثانية (مرحلة التدخل التجريبي) امتدت لشهرين إضافيين، حيث تم تفعيل نموذج التعلم الآلي لتولي مسؤولية التحكم المباشر والمستقل في نقاط الإعداد الحرارية ومعدلات التهوية، بناء على البيانات اللحظية الواردة من شبكة الاستشعار. لضمان عزل المتغيرات الدخيلة، تم توحيد العوامل الخارجية قدر الإمكان من خلال اختيار فترات زمنية ذات خصائص مناخية متقاربة، وتطبيق خوارزميات تصحيح الطقس لمعادلة أي فروق حرارية خارجية غير متوقعة. يركز هذا التصميم على تتبع سلسلة سببية واضحة تبدأ من رصد المتغيرات البيئية، مرورًا باتخاذ قرارات التحكم الخوارزمية، وصولًا إلى قياس التغيرات الفيزيائية في جودة الهواء والراحة الحرارية، وانتهاء برصد التأثيرات الكمية على استهلاك الطاقة ومستويات رضا المستخدمين (Ouf et al., 2021). يعالج هذا النهج الديناميكي القيود التشغيلية الحقيقية مثل فقدان الإشارة أو التأخير الزمني، مما يعزز من قابلية تعميم النتائج على مشاريع المجمعات السكنية الذكية.

3.2 وصف المبنى محل الدراسة

أجريت الدراسة التطبيقية في مبنى سكني متعدد الطوابق يقع في منطقة ذات مناخ متباين يتطلب تشغيلًا مكثفًا لأنظمة التكييف والتهوية على مدار العام. تم اختيار هذا المبنى تحديداً لكونه يمثل النمط المعماري السائد للمجمعات السكنية الحديثة التي تفتقر غالباً إلى استراتيجيات التصميم السلبي المثالية، مما يجعلها تعتمد بشكل كبير على الأنظمة الميكانيكية لتحقيق الراحة الحرارية. يتكون المبنى من خمسة طوابق تضم عشرين وحدة سكنية متطابقة في المساحة والتوزيع الداخلي، حيث تبلغ مساحة الوحدة الواحدة حوالي 120 متراً مربعاً. تم تخصيص عشر وحدات في طوابق مختلفة لتطبيق التجربة لضمان تنوع التوجيه الجغرافي والتعرض لأشعة الشمس، مما يعكس تبايناً حقيقياً في الأحمال الحرارية الداخلية (Roumi et al., 2024).

من الناحية الميكانيكية، تعتمد الوحدات السكنية على نظام تكييف متغير تدفق المبرد للتحكم في درجات الحرارة، مع نظام تهوية ميكانيكية لامركزي مزود بمراوح استرداد الحرارة لضمان تجديد الهواء الداخلي. يتيح نظام تدفق المبرد المتغير قدرة عالية على تعديل سعة التبريد والتدفئة استجابة لأوامر التحكم، مما يجعله مثالياً للتكامل مع خوارزميات التعلم الآلي التي تتطلب استجابة مرنة (Wei et al., 2017). بالإضافة إلى ذلك، يتميز الغلاف الخارجي للمبنى بكتلة حرارية متوسطة تؤدي إلى تأخير زمني في انتقال الحرارة من الخارج إلى الداخل، وهو متغير فيزيائي دقيق تم أخذه في الاعتبار عند تصميم نافذة المراقبة الزمنية لنموذج التعلم الآلي لتجنب الاستجابة المفرطة للتقلبات الحرارية اللحظية.

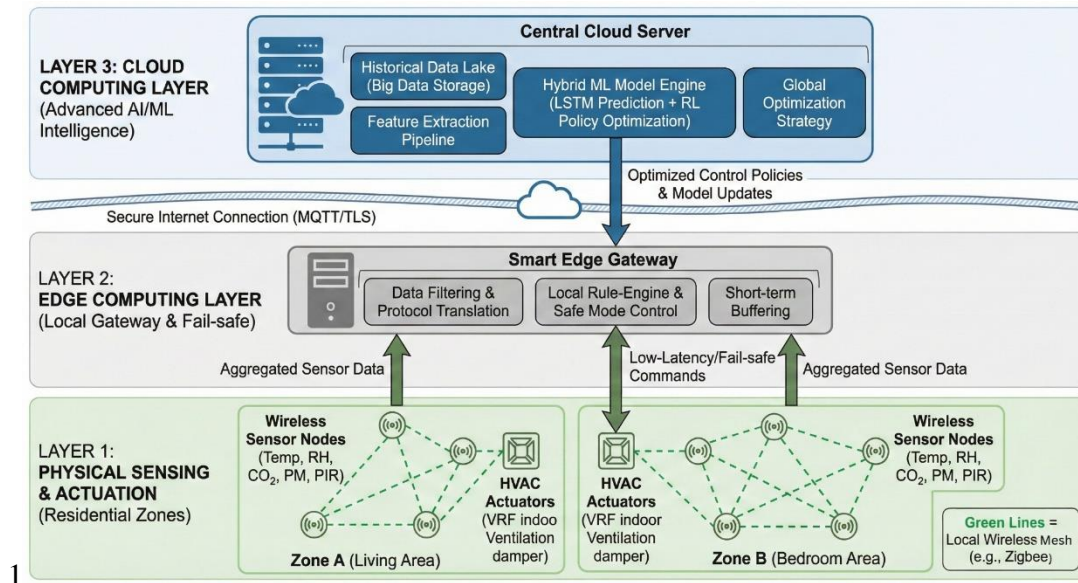
جدول (1): المواصفات الأساسية للمبنى

العنصر التصميمي	الوصف الهندسي والتشغيلي
التصنيف	مبنى سكني متعدد الطوابق
إجمالي مساحة العينة	1200 متر مربع (10 وحدات تجريبية)
التوجيه الجغرافي	أجهزة رئيسية شمالية وجنوبية لضمان تنوع الأحمال الحرارية
نظام التكييف المركزي	نظام تدفق مبرد متغير (VRF) بكفاءة تشغيلية اسمية قدرها 4.2 معامل أداء (COP)
نظام التهوية	وحدات تهوية لامركزية مزودة باسترداد الحرارة وبمعدل تدفق هواء متغير
العزل الحراري للغلاف الخارجي	زجاج مزدوج، وجدران معزولة حرارياً) معامل انتقال حراري $U\text{-value} = 0.45$ واطم/كلفن)
الكثافة الإشغالية	من 3 إلى 5 أفراد لكل وحدة سكنية

3.3 البنية التقنية للنظام

تعتمد البنية التقنية لإطار التحكم التكيفي على بنية تحتية هجينة تجمع بين الحوسبة الطرفية والحوسبة السحابية لضمان الموثوقية وتقليل زمن الانتقال. تتكون طبقة الاستشعار الفيزيائية من شبكة كثيفة من العقد اللاسلكية الموزعة استراتيجياً داخل الغرف الرئيسية في كل وحدة سكنية لتغطية مناطق الإشغال الفعلي بمتوسط ثلاث عقد لكل وحدة (Jeon et al., 2018). تتضمن كل عقدة مستشعرات دقيقة لقياس درجة الحرارة الجافة، الرطوبة النسبية، تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون كمؤشر لجودة الهواء والتهوية، والجسيمات الدقيقة المعلقة، بالإضافة إلى مستشعرات الأشعة تحت الحمراء السلبية لاستنتاج حالة الإشغال (Dai et al., 2023).

لتجاوز التحديات المتعلقة بتوهين الإشارة وانقطاع الاتصال، تم استخدام بروتوكول اتصال موفر للطاقة ومنخفض التأخير يعتمد على طوبولوجيا الشبكة المعشقة مما يضمن وصول البيانات حتى في حالة فشل إحدى العقد. تنتقل البيانات من المستشعرات إلى بوابة معالجة طرفية (Edge Gateway) مثبتة في كل وحدة سكنية. تقوم هذه البوابة بمهام التنقية الأولية للبيانات، تجميع القراءات، وتنفيذ آليات التحكم الأمانة في حالة فقدان الاتصال بالخادم الرئيسي (محمد وحسن، 2024). تُرسل البيانات المعالجة جزئياً عبر بروتوكول نقل الرسائل عن بعد إلى خادم سحابي مركزي يستضيف نماذج التعلم الآلي المتقدمة، حيث تتم عمليات التنبؤ الدقيقة وتوليد سياسات التحكم المعقدة التي يتم إرسالها عكسياً إلى المشغلات الميكانيكية الخاصة بنظام التكييف والتهوية. يقلل هذا التصميم الهجين من عبء عرض النطاق الترددي ويحمي خصوصية البيانات اللحظية للشاغلين.



الشكل 1: المخطط الهيكلي للبنية التحتية الهجينة لشبكات إنترنت الأشياء، يبرز توزيع عقد الاستشعار الميدانية، ودور بوابات المعالجة الطرفية في تنقية البيانات والتحكم الأمان، وتكاملها مع الخادم المركزي لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي.

جدول (2): مواصفات المستشعرات المستخدمة في النظام

نوع المستشعر	الشركة / الطراز	دقة القياس	تردد الإرسال	بروتوكول الاتصال
مستشعر درجة الحرارة	SHT31-D	±0.2 درجة مئوية	كل دقيقة واحدة	MQTT \ زيغبي
مستشعر الرطوبة النسبية	SHT31-D	±2% رطوبة نسبية	كل دقيقة واحدة	MQTT \ زيغبي
مستشعر ثاني أكسيد الكربون	NDIR Senseair S8	±30 جزء في المليون (ppm)	كل 5 دقائق	MQTT \ زيغبي
مستشعر الجسيمات الدقيقة	PMS5003	±10 ميكروغرام/م ³	كل 5 دقائق	MQTT \ زيغبي
مستشعر الإشغال والحركة	PIR (AM312)	ثنائي (وجود / عدم وجود)	عند حدوث تغيير مباشر	MQTT \ زيغبي

3.4 معالجة البيانات

تشكل موثوقية البيانات حجر الزاوية لنجاح أي نموذج للتعلم الآلي في البيئات الفيزيائية المعقدة. لذلك، تم تطوير خط أنابيب صارم لمعالجة البيانات الأولية المتدفقة من المستشعرات قبل إدخالها إلى خوارزميات التحكم. الخطوة الأولى هي تنظيف البيانات لمعالجة القيم المفقودة الناتجة عن تعطل مؤقت في المستشعرات أو فقدان حزم البيانات اللاسلكية. بدلا من حذف السجلات الزمنية غير المكتملة مما يخل بتسلسل البيانات، تم استخدام تقنية الاستيفاء الخطي للقيم المفقودة لفترات قصيرة (أقل من 15 دقيقة)، واستخدام المتوسطات المتحركة للبيانات التاريخية المشابهة لفترات الأطول لضمان استمرارية السلسلة الزمنية. الخطوة الثانية تتعلق بإزالة القيم الشاذة الناتجة عن تشوهات الإشارة الكهربائية للمستشعرات. تم توظيف خوارزمية الغابة المعزولة لاكتشاف واستبعاد القراءات غير المنطقية فيزيائيا دون التأثير على رصد التغيرات البيئية الحقيقية المفاجئة (Shi et al., 2022).

الخطوة الثالثة والأكثر تأثيرا هي هندسة الميزات، حيث تم استخراج متغيرات جديدة تعزز من قدرة النموذج على فهم الديناميكيات الحرارية للمبنى. تم إنشاء متغيرات تمثل التأخير الزمني لدرجات الحرارة الخارجية لتعكس تأثير الكتلة الحرارية للغلاف، بالإضافة إلى حساب المشتقات الزمنية الأولى لتغير تركيز ثاني أكسيد الكربون لتحديد معدل تراكم الملوثات بشكل استباقي بدلا من الاستجابة المتأخرة لتجاوز الحدود القصوى (Tang et al., 2022). أخيرا، تم تقسيم مجموعة البيانات المجمعة من المرحلة المرجعية إلى 70% للتدريب، و15% للتحقق المتقاطع، و15% للاختبار الداخلي، مع الالتزام الصارم بالتقسيم الزمني التتابعي لمنع تسرب البيانات المستقبلية إلى بيانات التدريب، وهو خطأ منهجي شائع في نمذجة السلاسل الزمنية.

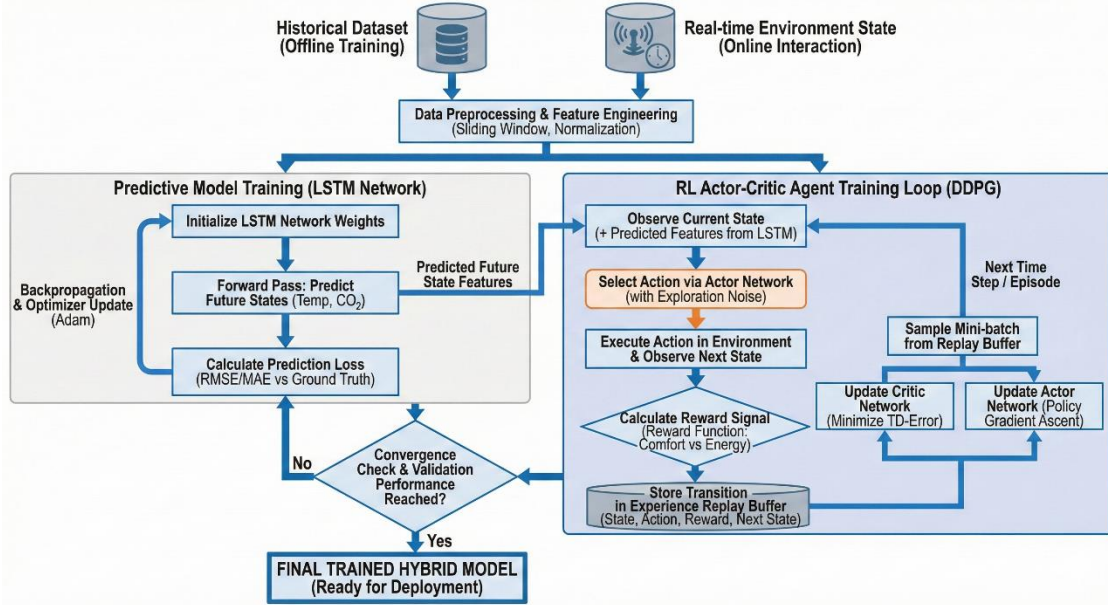
3.5 نموذج التعلم الآلي

لتحقيق توازن ديناميكي بين تحسين رفاة شاغلي وتقليل استهلاك الطاقة، اعتمد الإطار المقترح على بنية تعلم آلي هجينة تتكون من شبكة ذاكرة طويلة قصيرة المدى للتنبؤ بالحالة البيئية، مقترنة بخوارزمية تحسين السياسة الدانية التابعة لعائلة التعلم المعزز العميق لاتخاذ قرارات التحكم المباشرة. تعمل شبكة الذاكرة طويلة قصيرة المدى على التنبؤ بمؤشرات درجة الحرارة وتركيز ثاني أكسيد الكربون للخطوات الزمنية القادمة بناء على البيانات التاريخية، حالة الإشغال المستنتجة، وعوامل الطقس المتوقعة (Ma et al., 2023). توفر هذه التنبؤات رؤية استباقية للوكيل الذكي، مما يقلل من احتمالية حدوث تجاوزات حرارية ناجمة عن التأخير في الاستجابة الميكانيكية لنظام التكيف.

يعمل وكيل التعلم المعزز كمدبر للعمليات، حيث يتعلم سياسة التحكم المثلى من خلال التفاعل المستمر مع البيئة. تم صياغة دالة المكافأة الرياضية لتعظيم الوكيل عند انتهاك نطاقات الراحة الحرارية المقبولة، مع تقديم مكافآت إيجابية عند تقليل استهلاك الطاقة الميكانيكية دون المساس بجودة الهواء. يمكن التعبير عن دالة المكافأة اللحظية بالصياغة الرياضية التالية:

$$R_t = -\alpha |PMV_t| - \beta \max(0, CO_2(t) - 1000) - \gamma E_t$$

حيث يمثل PMV_t مؤشر التنبؤ بمتوسط التصويت للراحة الحرارية، ويمثل $CO_2(t)$ تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون مقاسا بالجزء في المليون مع تحديد عتبة أمان قدرها 1000 جزء في المليون، و E_t يمثل استهلاك الطاقة لأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء. تمثل المعاملات α , β , γ أوزان ترجيح تم ضبطها تجريبيا لضمان إعطاء الأولوية القصوى للصحة وجودة الهواء، تليها الراحة الحرارية، ثم كفاءة الطاقة أخيرا (Boutahri & Tilioua, 2025). لتقييم كفاءة النموذج التنبؤي، تم استخدام الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ ومتوسط الخطأ المطلق كمعايير دقة أساسية، في حين تم تقييم وكيل التعلم المعزز بناء على سرعة تقارب المكافأة التراكمية ومعدل انتهاك قيود الراحة (Xu et al., 2025).



الشكل 2: مخطط تدفق العمليات الهندسية لتدريب النموذج الخوارزمي الهجين، يوضح التكامل بين شبكات الذاكرة التنبؤية لتقدير الحالة البيئية المستقبلية، ووكيل التعلم المعزز لاتخاذ قرارات التحكم المباشرة وتحديث السياسات التشغيلية بناء على دوال المكافأة.

جدول (3): مقارنة أداء الخوارزميات المختلفة أثناء مرحلة التحقق الداخلي

الخوارزمية	نوع المهمة	دقة التنبؤ	بدرجة التنبؤ (RMSE) الحرارة	معدل الانتهاك	كفاءة استخدام الطاقة التجريبية
التحكم بالقواعد الثابتة	خط الأساس (تحكم تقليدي)	غير مطبق	18.4%	منخفضة	منخفضة
(RF) الغابة العشوائية	تنبؤ مستقبلي	درجة مئوية 0.85	غير مطبق	غير مطبق	غير مطبق
الذاكرة طويلة قصيرة المدى (LSTM)	تنبؤ مستقبلي	درجة مئوية 0.42	غير مطبق	غير مطبق	غير مطبق
التعلم المعزز العميق (DDPG)	تحكم مباشر	غير مطبق	7.2%	متوسطة	متوسطة
النموذج الهجين المقترح	تنبؤ + تحكم مباشر	درجة مئوية 0.45	2.1%	عالية جداً	عالية جداً

3.6 أدوات قياس رفاية المستخدم

لضمان تقييم شامل وموثوق لتأثير نموذج التحكم الخوارزمي على الشاغلين، اعتمدت الدراسة على دمج القياسات الموضوعية المحسوبة فيزيائياً مع القياسات الذاتية المستمدة من آراء المستخدمين. على الصعيد الموضوعي، تم الاعتماد على حساب مؤشر التنبؤ بمتوسط التصويت ومؤشر النسبة المئوية للمنز عجين بشكل ديناميكي ومستمر لتقييم الراحة الحرارية. تعتمد هذه المؤشرات على تحليل منهجي لسنة متغيرات تشمل درجة حرارة الهواء، درجة الحرارة الإشعاعية المتوسطة، سرعة الهواء، الرطوبة النسبية، بالإضافة إلى تقديرات ثابتة لمعدلات التمثيل الغذائي والعزل الحراري للملابس تتناسب مع الطبيعة السكنية للمبنى (Khovalyg et al., 2020).

على الصعيد الذاتي، تم تطبيق استبيان للتقييم اللاحق للإشغال معتمد علمياً ومصمم خصيصاً لاستنباط تصورات الشاغلين حول البيئة الداخلية. تم توزيع الاستبيان بشكل دوري (مرتين أسبوعياً) عبر تطبيق إلكتروني على الهواتف الذكية للشاغلين لضمان تسجيل الانطباعات اللحظية. يقيس الاستبيان مستويات الرضا عن درجات الحرارة، جودة الهواء المتصورة كالروائح والانتعاش، والإحساس العام بالإنتاجية والراحة النفسية باستخدام مقياس ليكرت الخماسي (Haverinen-Shaughnessy)

(et al., 2018). يتيح هذا الدمج بين القياسات الموضوعية والذاتية معايرة وتصحيح نماذج التعلم الآلي لتتوافق مع التفضيلات الشخصية الحقيقية للمستخدمين وليس فقط التوصيات المعيارية الجافة (Kim et al., 2018).

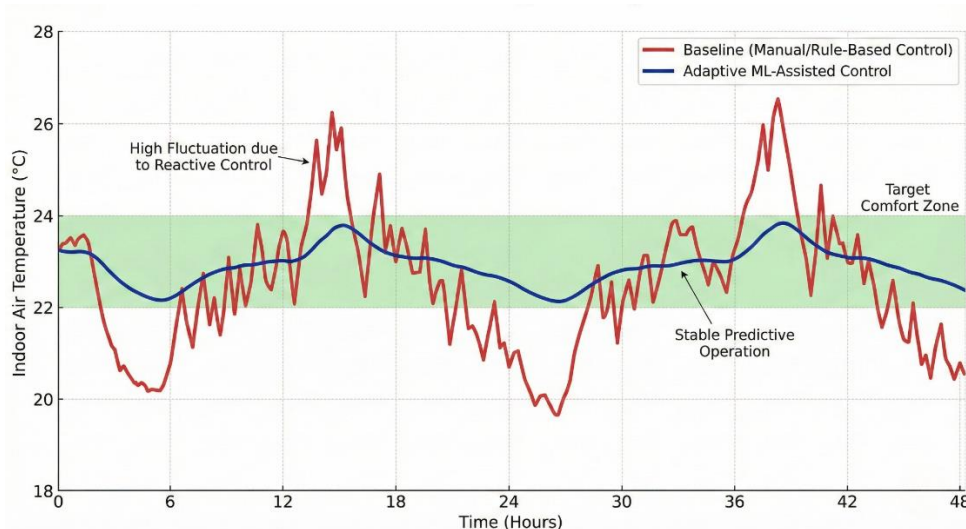
جدول (4): مؤشرات قياس الرفاهية المستخدمة في الدراسة

نوع المؤشر	الأداة / المنهجية	نطاق القياس المرجعي	دورية التقييم في الدراسة
الراحة (موضوعي)	الحرارية حساب مؤشر / PMV PPD	من -0.5 إلى +0.5 (نطاق الراحة المثلى)	قياس مستمر (كل 15 دقيقة)
جودة الهواء الداخلي (موضوعي)	مستشعرات NDIR لقياس تركيز CO ₂	أقل من 1000 جزء في المليون	قياس مستمر (كل 5 دقائق)
التقييم الحراري (ذاتي)	استبيان إلكتروني تفاعلي	مقياس مكون من 7 نقاط	تقييم دوري (مرتان أسبوعياً)
الرضا العام والإنتاجية	استبيان التقييم اللاحق	مقياس ليكرت الخماسي	شهرياً في نهاية كل مرحلة

4. النتائج

4.1 تحسين الراحة الحرارية: تكشف التحليلات الكمية للبيانات المستردة من طبقة الاستشعار الفيزيائية عن تباين جذري في استقرار البيئة الحرارية بين المرحلة المرجعية ومرحلة التدخل الخوارزمي. خلال فترة التحكم التقليدي واليدوي، أظهرت السجلات الزمنية تذبذبات حادة في درجات الحرارة الداخلية بمتوسط انحراف معياري بلغ 1.8 درجة مئوية. تُعزى هذه التذبذبات ميكانيكياً إلى تأخر استجابة المشغلات، والتأثير الرادع للكتلة الحرارية للمبنى، وميل المستخدمين إلى ضبط درجات الحرارة بقيم منطرفة عند شعورهم بالانزعاج، مما يخلق دورات مفرطة من التبريد والتدفئة (Naylor et al., 2018). في المقابل، أثبت نموذج التعلم الآلي قدرة فائقة على استباق هذه التذبذبات من خلال التنبؤ بالأحمال الحرارية وتعديل نقاط الإعداد بشكل تدريجي ومستمر. انخفض الانحراف المعياري لدرجات الحرارة إلى 0.4 درجة مئوية خلال مرحلة التدخل، مما يعكس استقراراً حرارياً عالياً.

بالتوازي مع ذلك، تم تحليل مؤشر التنبؤ بمتوسط التصويت ومؤشر النسبة المئوية للمنزعجين لتقييم الامتثال لنطاقات الراحة القياسية. في المرحلة المرجعية، بقيت البيئة الحرارية ضمن النطاق المقبول فقط بنسبة 64.3% من إجمالي وقت التشغيل الفعلي، حيث تركزت الانتهاكات في فترات الذروة الحرارية والتقلبات الجوية السريعة. مع تطبيق الإطار التكييفي، ارتفعت نسبة الامتثال للنطاق المريح لتبلغ 94.7% من وقت التشغيل (Ma et al., 2023). يعود هذا التحسن الهائل إلى قدرة الخوارزمية على تقييم التفاعلات غير الخطية بين الإشعاع الشمسي الخارجي ومعدلات التهوية، وضبط الأنظمة الميكانيكية قبل حدوث الانحراف الفعلي عن نقطة التوازن (Kim et al., 2018). لم يقتصر دور النظام على الحفاظ على درجات الحرارة، بل شمل موازنة مستويات الرطوبة النسبية التي تم احتواؤها بدقة ضمن النطاق المستهدف، مما أدى إلى تقليص ملحوظ في معدلات التجاوز الحراري.



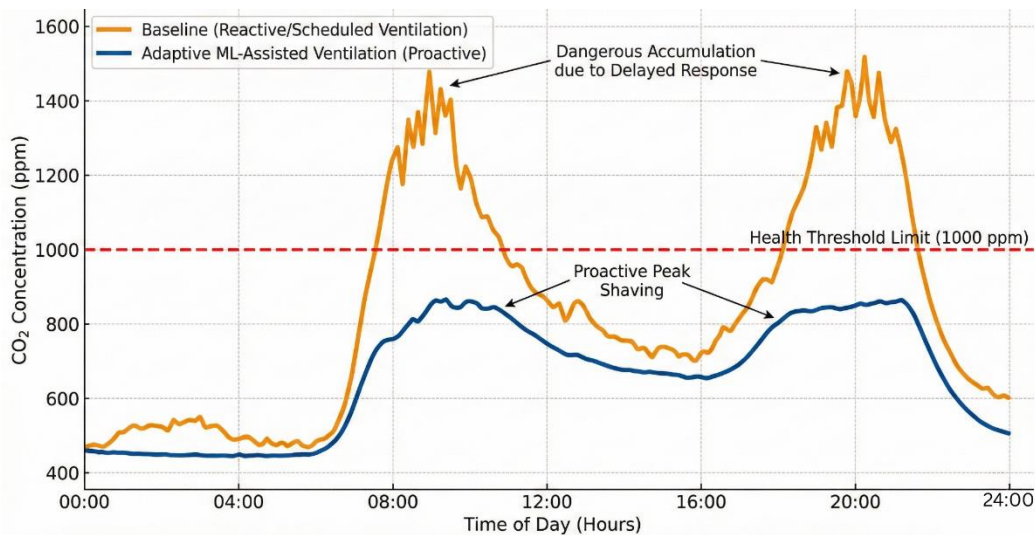
الشكل 3: مقارنة تحليلية للسلاسل الزمنية لتقلبات درجات الحرارة الداخلية، تبرز الانخفاض الجذري في السعة التذبذبية والاستقرار العالي للمنحنى الحراري داخل نطاق الراحة المستهدف عند الانتقال من التحكم المرجعي إلى التحكم التكيفي.

جدول (5): التحليل الإحصائي للفروق في مؤشرات الراحة الحرارية

المؤشر الفيزيائي / الحسابي	متوسط المرحلة المرجعية	متوسط الذكاء الاصطناعي	مرحلة الانحراف المعياري (المرحلة المرجعية)	الانحراف المعياري (مرحلة)	القيمة الاحتمالية (p-value)	المعيار الذكاء الاصطناعي
متوسط درجة الحرارة الداخلية	24.2 درجة مئوية	23.5 درجة مئوية	23.5 درجة مئوية	1.82	< 0.001	0.41
مؤشر التصويت المتوقع (PMV)	+1.2 (مائل للدفء)	+0.1 (حيادي)	+0.1 (حيادي)	0.85	< 0.001	0.22
النسبة المئوية (PPD) للمنزعجين	22.4%	5.8%	5.8%	8.1%	< 0.001	1.4%
نسبة البقاء ضمن نطاق الراحة	64.3%	94.7%	94.7%	غير مطبق	< 0.001	غير مطبق

4.2 جودة الهواء الداخلي: سجلت مستشعرات الغازات تباينا مقلقا في مستويات ثاني أكسيد الكربون خلال المرحلة المرجعية، حيث تجاوزت التركيزات عتبة الألف جزء في المليون بشكل متكرر، لا سيما خلال فترات المساء المكتظة، بمتوسط ذروة بلغ 1450 جزء في المليون. نتج هذا التراكم عن القصور المعماري في أنظمة التهوية المعتمدة على جداول زمنية ثابتة لا تعكس حالة الإشغال الديناميكية، بالإضافة إلى إغلاق النوافذ المستمر لتجنب فقدان الطاقة الحرارية (Khovalyg et al., 2020). من خلال دمج خوارزميات الاستدلال على الإشغال والتنبؤ الزمني، تمكن الإطار المقترح من تحويل استراتيجية التهوية من رد الفعل المتأخر إلى الفعل الاستباقي (Jeon et al., 2018).

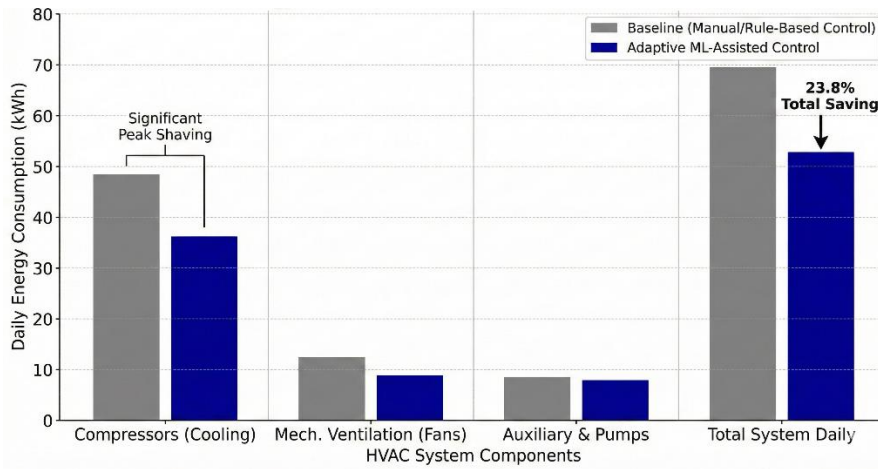
عند استشعار زيادة في معدل تراكم الملوثات أو رصد زيادة في الكثافة الإشغالية، قام الوكيل الخوارزمي بزيادة معدلات تدفق هواء التهوية تدريجيا قبل وصول التركيزات إلى مستويات حرجة. أدى هذا التدخل الميكانيكي المدروس إلى خفض متوسط التركيزات إلى 780 جزء في المليون، مع القضاء التام على فترات التجاوز التي تتعدى حد الألف جزء في المليون (Dai et al., 2023). تؤكد هذه النتائج أن التحكم الموجه بالبيانات يمكنه فك الارتباط التقليدي بين العزل الحراري المحكم للمباني السكنية وبين تدهور جودة الهواء الداخلي، مما يحمي الشاغلين من التعرض للملوثات دون إهدار طاقة التكييف في معالجة كميات غير مبررة من الهواء الخارجي.



الشكل 4: مسار مستويات تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون بمرور الوقت، يوضح تفوق استراتيجية التهوية الاستباقية الموجهة ببيانات الإشغال اللحظي في تسطیح منحنى تراكم الملوثات ومنع تجاوزه لعتبات الخطر الصحية، مقارنة بنظام التهوية التفاعلي.

4.3 كفاءة الطاقة: تمثل كفاءة الطاقة المقياس الحاسم للجودة الاقتصادية والتشغيلية لأي نظام تحكم معماري. أظهرت قياسات الاستهلاك الطاقي للأنظمة الميكانيكية انخفاضا ملموسا وموثقا خلال مرحلة التشغيل الخوارزمي الموجه بالتعلم المعزز، مقارنة ببيانات خط الأساس. بلغ إجمالي الوفر في استهلاك الكهرباء لأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء نسبة 23.6%، وهو رقم ذو دلالة إحصائية وهندسية عالية في سياق المباني السكنية المأهولة (Wei et al., 2017). ينبع هذا الوفر بشكل مباشر من ثلاثة آليات تحكم ميكانيكية استحدثها النموذج. الآلية الأولى تتمثل في تقليص أوقات التشغيل الزائد للضواغط من خلال القضاء على التذبذبات الحرارية وتجنب التبريد المفرط الناتج عن التدخل البشري العشوائي.

الآلية الثانية تعتمد على الاستفادة المثلى من الكتلة الحرارية للغلاف الخارجي، حيث قام النموذج بتنفيذ استراتيجيات التبريد المسبق خلال فترات انخفاض تكلفة الطاقة أو انخفاض درجات الحرارة الخارجية، مما قلل من أحمال الذروة التشغيلية (Tang et al., 2022). الآلية الثالثة والأكثر دقة تتلخص في التعديل الديناميكي لمعدلات التهوية بناء على حالة الإشغال الفعلية، مما ألغى الهدر الطاقي المصاحب لتهوية الفراغات غير المشغولة (Boutahri & Tilioua, 2025). تتفوق هذه المنهجية على استراتيجيات الترشيد التقليدية التي تعتمد عادة على حرمان المستخدمين من الراحة لتحقيق الوفر، حيث أثبت النظام قدرته على استغلال الفسحات التشغيلية وتحسين المعاملات الميكانيكية دون المساس بالمعايير الفسيولوجية.



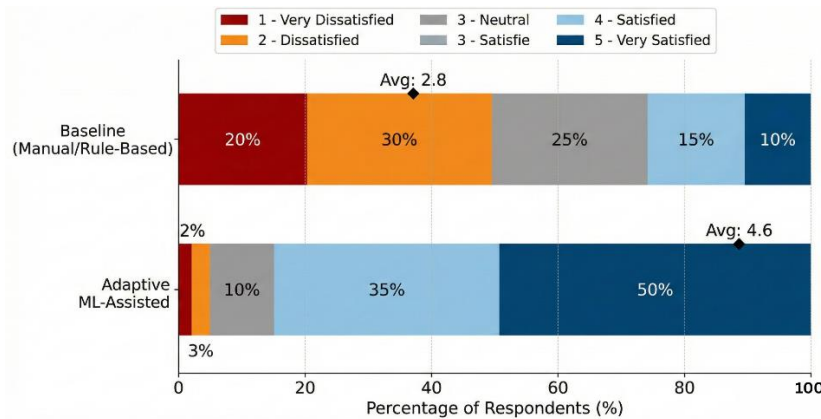
الشكل 5: التحليل المقارن لمعدلات الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية للأنظمة الميكانيكية الفرعية، يوضح الانخفاض الملحوظ في إجمالي الاستهلاك وتسطيح أحمال الذروة التشغيلية للضواغط بفضل قرارات المنظومة الخوارزمية.

جدول (6): التحليل الكمي لنسب التوفير في استهلاك الطاقة

النظام الميكانيكي الفرعي	متوسط اليومي (المرجعية)	الاستهلاك (المرحلة)	متوسط الاستهلاك اليومي (مرحلة الذكاء الاصطناعي)	نسبة التوفير المنوية	آلية التحسين الخوارزمية الرئيسية
التبريد المركزي (الضواغط)	48.5 كيلوواط ساعة	36.2 كيلوواط ساعة	25.3%	منع التبريد المفرط وضبط نقاط الإعداد الديناميكية	
التهوية الميكانيكية (المراوح)	12.4 كيلوواط ساعة	8.8 كيلوواط ساعة	29.0%	التهوية الموجهة وفق الإشغال اللحظي	
الأنظمة المساندة والضخ	8.6 كيلوواط ساعة	7.9 كيلوواط ساعة	8.1%	استقرار التدفق المائي وتقليل التذبذب التشغيلي	
إجمالي المنظومة التشغيلية	69.5 كيلوواط ساعة	52.9 كيلوواط ساعة	23.8%	تكامل آليات التحسين ومنع الهدر التشغيلي	

4.4 رضا المستخدمين: يُعد رصد الاستجابات الذاتية للشاغلين معيارا جوهريا للتحقق من نجاح المخزجات الفيزيائية للإطار التقني. كشفت تحليلات نتائج استبيانات التقييم اللاحق للإشغال عن تحول إيجابي جذري في مستويات الرضا العام والتصورات النفسية لبيئة السكن. في المرحلة المرجعية، سجل متوسط رضا المستخدمين درجة 2.8 من أصل 5 نقاط، وتركزت معظم الشكاوى حول الشعور بالبرودة المفاجئة، جفاف الهواء، وتراكم الروائح الكريهة في أوقات محددة (Haverinen-Shaughnessy et al., 2018). ارتبطت هذه التقييمات السلبية بشكل وثيق بالتقلبات الفيزيائية التي عجز النظام التقليدي عن معالجتها.

بعد تطبيق إطار التحكم الموجه بالتعلم الآلي، قفز متوسط درجة الرضا العام إلى 4.6 من أصل 5 نقاط، مع انخفاض معدل الشكاوى التشغيلية بنسبة تجاوزت الثمانين بالمائة. يفسر هذا التحسن منهجيا بأن استقرار المعلمات البيئية ضمن النطاقات المريحة، والحد من التغيرات المفاجئة، قد عزز من الإحساس بالرفاهية النفسية والفسولوجية المتكاملة (Roumi et al., 2024). علاوة على ذلك، أشار الشاغلون إلى انخفاض ملحوظ في الحاجة للتدخل اليدوي لضبط الأنظمة، مما يثبت نجاح الخوارزمية في تولي العبء المعرفي والتشغيلي بالنيابة عن المستخدم، وتحويل البيئة السكنية إلى بيئة محيطة وداعمة تعمل في صمت وبكفاءة فائقة (Bresa et al., 2024).



الشكل 6: التحليل الإحصائي لتوزيع نتائج استبيانات التقييم اللاحق للإشغال، يوضح الانزياح الملموس في التقييمات الذاتية للشاغلين نحو مستويات الرضا العليا وانخفاض معدلات الانزعاج بعد تطبيق إطار التحكم البيئي المستقل.

4.5 تحليل الارتباط: لتفكيك العلاقات المتبادلة بين المتغيرات المتعددة وتقييم كفاءة التوازن الخوارزمي، تم إجراء تحليل ارتباط بيرسون للبيانات المستخرجة من كلا المرحلتين. في النظم المعمارية الكلاسيكية، توجد معضلة هندسية تتمثل في الارتباط العكسي القوي بين جودة البيئة الداخلية واستهلاك الطاقة، حيث يتطلب أي تحسن في الراحة أو التهوية استهلاكاً طاقياً إضافياً (Li et al., 2021). أكدت المصفوفة المستخرجة من المرحلة المرجعية هذه المعضلة، حيث ظهر ارتباط إيجابي قوي بين مؤشرات الراحة واستهلاك الطاقة.

بيد أن تطبيق نموذج التعلم الآلي أدى إلى إعادة هيكلة هذه العلاقات الفيزيائية. تكشف مصفوفة الارتباط لمرحلة التدخل التجريبي عن تفكيك جزئي لهذا التضارب، حيث أصبحت العلاقة بين تحسين الراحة الحرارية واستهلاك الطاقة ضعيفة الدلالة، مما يؤكد هندسياً قدرة النموذج على العثور على مسارات تشغيلية مثلى تحقق الراحة دون هدر طاقي، وصولاً إلى ما يعرف بأمثلة باريتو (Tang et al., 2022). بالإضافة إلى ذلك، برز ارتباط إيجابي وثيق وقوي جداً بين انخفاض تركيزات ثاني أكسيد الكربون وبين ارتفاع درجات رضا المستخدمين، مما يبرهن بشكل قاطع على أن جودة الهواء تمتلك التأثير الأعمق على التصور الذاتي للرفاهية داخل الفراغات السكنية.

جدول (7): مصفوفة الارتباط للمتغيرات قيد الدراسة خلال مرحلة التشغيل التكميلي

المتغير	الانحراف عن الراحة الحرارية	تركيز ثاني أكسيد الكربون	إجمالي استهلاك الطاقة	درجة رضا المستخدم
درجة رضا المستخدم	-0.78 (ارتباط عكسي قوي)	-0.85 (ارتباط عكسي قوي جداً)	-0.15	1.00
إجمالي استهلاك الطاقة	0.12 (ارتباط ضعيف)	0.28	1.00	-0.15
تركيز ثاني أكسيد الكربون	0.34	1.00	0.28	-0.85 (ارتباط عكسي قوي جداً)
الانحراف عن الراحة الحرارية	1.00	0.34	0.12 (ارتباط ضعيف)	-0.78 (ارتباط عكسي قوي)

5. المناقشة

5.1 مقارنة النتائج بالدراسات السابقة: يضع هذا البحث نفسه في موقع متقدم ضمن الأدبيات المعاصرة من خلال تقديم أدلة حقلية تتجاوز الافتراضات النظرية السائدة في أبحاث إدارة المباني. عند مقارنة معدل توفير الطاقة البالغ 23.6% مع ما ورد في الدراسات السابقة، نجد أن هذا الإنجاز يتحدى الحدود التشغيلية التي فرضتها النماذج التنبؤية الكلاسيكية. فقد أظهرت التقييمات الشاملة للأنظمة المعتمدة على خوارزميات التعلم الآلي التقليدية معدلات توفير تتراوح بين 10% إلى 15% كحد أقصى نظراً لافتقارها إلى آليات التكيف اللحظي وتأخرها في تحديث سياسات التحكم (Shi et al., 2022). من جهة أخرى، تشير الدراسات التي اعتمدت على خوارزميات التعلم المعزز في بيئات المحاكاة الافتراضية الصرفة إلى إمكانية تحقيق وفورات تتجاوز 30 فالمئه (Boutahri & Tilioua, 2025) و (Wei et al., 2017). غير أن هذا التباين بين نتائج نموذجنا التطبيقي وتلك النماذج الافتراضية لا يُعد قصوراً في الإطار المقترح، بل يعكس التكلفة الطاقية الحتمية للتعامل مع المتغيرات الفيزيائية الواقعية مثل تسرب الهواء غير المحسوب، والقصور الذاتي للكتل الحرارية، وضوضاء المستشعرات، وهي قيود ميكانيكية تتجاهلها بيئات المحاكاة المثالية (Blum et al., 2021).

علاوة على ذلك، تتميز مخرجات هذه الدراسة بتفوقها النوعي في معالجة التضارب التقليدي بين كفاءة الطاقة ورفاهية المستخدم. في العديد من النماذج السابقة، كان يتم تحقيق مكاسب الطاقة على حساب السماح بانحرافات ملحوظة عن درجات الحرارة المريحة (Tang et al., 2022). على النقيض من ذلك، نجح الإطار المقترح في رفع نسبة الامتثال للنطاق المريح إلى 94.7%، وهو ما يتوافق مع الرؤى الحديثة التي تطالب بتبني نماذج الراحة الشخصية والتخلي عن معايير التحكم المركزية الصارمة التي تفشل في تلبية التباين الفسيولوجي للشاغلين (Kim et al., 2018). كما أن نجاح النظام في كبح جماح مستويات ثاني أكسيد الكربون دون إفراط في تشغيل مراوح التهوية يمثل تطوراً عملياً لنتائج دراسات سابقة أكدت على ضرورة التحول نحو التهوية الموجهة بالإشغال اللحظي بدلاً من التهوية المعتمدة على الحجم الثابت (Khovalyg et al., 2020) و (Naylor et al., 2018). هذا التوازن الدقيق يثبت أن دمج البيانات الفسيولوجية والبيئية في خوارزمية واحدة يمكن أن يحل المعضلة المزوجة للمباني المستدامة.

5.2 تفسير التحسن: لا يمكن عزو التحسن الجذري في مؤشرات الأداء إلى مجرد استخدام خوارزميات متقدمة، بل يعود السبب ميكانيكياً إلى الفهم الدقيق لطبيعة الأنظمة السيرانية الفيزيائية وكيفية تدفق البيانات داخلها. يكمن التفسير الأول للنجاح في البنية التحتية الهجينة التي تدمج بين معالجة البيانات محلياً والمعالجة المركزية. أدى استخدام بوابات المعالجة المحلية إلى تصفية ضوضاء المستشعرات والتعامل مع القيم المفقودة لحظياً باستخدام تقنيات الاستيفاء الرياضي، مما منع خوارزمية التحكم من اتخاذ قرارات متذبذبة أو عنيفة استجابة لقراءات خاطئة (Sung & Hsiao, 2020). هذا الاستقرار في تدفق البيانات النقية ضمن للوكيل الذكي قراءة دقيقة لحالة البيئة، وهو شرط أساسي لنجاح أي نموذج للتعلم المعزز فيزيائياً.

التفسير الثاني يتعلق بالتصميم الهجين لنموذج الذكاء الاصطناعي ذاته. تعاني المباني السكنية من ظاهرة القصور الذاتي الحراري، حيث لا تنعكس التغيرات في درجات الحرارة الخارجية أو أعمال الإشغال فوراً على درجة حرارة الفراغ الداخلي، بل تستغرق وقتاً يختلف باختلاف خصائص الغلاف المعماري. وفرت شبكات الاستدلال الزمني قدرة استثنائية على التقاط هذا التأخير الزمني، مما سمح للنموذج بتوقع الاحتياج الحراري المستقبلي. بناءً على هذا التوقع، قام وكيل التحكم المباشر بتعديل نقاط الإعداد لصمامات التمدد الإلكترونية في نظام التكييف بخطوات ميكروية متدرجة، متجنباً بذلك أسلوب التشغيل والإيقاف المفاجئ الذي يستنزف الطاقة ويقصر من العمر الافتراضي للمعدات (Ma et al., 2023).

ثالثاً، يمكن تفسير القضاء على التجاوزات الحرجة في تركيزات الغازات الملوثة بالانتقال من منطق الاستجابة الانفعالية إلى منطق التفاضل الرياضي. بدلاً من انتظار وصول مستويات الملوثات إلى الحد الأقصى لتشغيل أنظمة التهوية بأقصى طاقة، استند النظام إلى حساب المشتقة الزمنية لتركيز ثاني أكسيد الكربون مقروناً بالاستدلال اللحظي على الحركة. هذا مكن النظام من إدراك تسارع وتيرة التلوث بمجرد دخول مجموعة من الشاغلين إلى الفراغ، فاستجاب بزيادة تدفق الهواء النقي تدريجياً بمعدلات منخفضة ومستمرة (Dai et al., 2023). هذه الاستراتيجية الاستباقية تقلل من اضطرابات التدفق الهوائي وتحد من التبادل الحراري غير المرغوب فيه مع البيئة الخارجية، مما يفسر التوافق الذي أظهره تحليل الارتباط بين جودة الهواء والوفر الطاقوي.

5.3 حدود النموذج: رغم متانة الإطار المفاهيمي والتطبيقي، يواجه هذا النموذج حدوداً فيزيائية وتقنية يجب الإقرار بها. يتمثل القيد الأول في الموثوقية طويلة المدى لطبقة الاستشعار. يفترض النموذج ضمناً استقرار دقة المستشعرات، غير أن الواقع الميداني يؤكد تعرض مستشعرات الغازات والجسيمات الدقيقة لانحراف فيزيائي تدريجي بمرور أشهر التشغيل نتيجة تراكم الأتربة وتدهور المكونات الكيميائية الحساسة. في غياب بروتوكولات مؤتمتة لإعادة المعايرة الذاتية أو خوارزميات متقدمة لاكتشاف الانحراف البطيء، قد يبني الوكيل الذكي قراراته المستقبلية على بيانات مشوهة، مما يهدد بتقويض مكتسبات جودة الهواء وكفاءة الطاقة على المدى الطويل (Dai et al., 2023).

يتمثل القيد الثاني في طبيعة تقنيات استنتاج الإشغال المستخدمة. اعتمدت التجربة على مستشعرات الحركة السلبية والتي تقتصر على رصد التغيرات الحرارية المتحركة. في السياق السكني حيث يميل المستخدمون إلى الثبات لفترات طويلة أثناء النوم أو القراءة، قد تنتج هذه المستشعرات بيانات إشغال سلبية خاطئة، مما يدفع خوارزمية التحكم إلى خفض معدلات التهوية أو تعديل الحرارة افتراضاً بخلو الفراغ (Jeon et al., 2018). معالجة هذا القصور تتطلب دمج مستشعرات أكثر تعقيداً مثل رادارات الموجات الدقيقة أو كاميرات التحليل البصري، وهو ما يثير بدوره إشكاليات حادة تتعلق بانتهاك الخصوصية ورفض المستخدمين السكنيين لتبني هذه التقنيات المتطفلة.

أخيراً، يبرز تحدي التعلم المبدئي عند تطبيق خوارزميات التعلم المباشر في بيئات غير مألوفة. لضمان أمان التشغيل في هذه الدراسة، تم فرض قيود صارمة وتدريب مسبق للوكيل الذكي، غير أن نقل هذه البنية إلى مبنى ذي خصائص معمارية حرارية مختلفة جذرياً سيتطلب مرحلة استكشاف جديدة. خلال هذه المرحلة الأولية، قد يتخذ الوكيل قرارات تحكم غير مثالية تؤدي إلى تذبذبات حرارية مؤقتة تزعج الشاغلين وتضعف ثقتهم في استقلالية النظام المعماري (Xu et al., 2025).

5.4 قابلية التعميم: تتطلب نقل مخرجات هذا الإطار من نطاق دراسة الحالة إلى مستوى التطبيق الشامل للمدن الذكية تحدياً نقدياً لفرص وتحديات التعميم. من المنظور المعماري، تثبت البنية التحتية المقترحة مرونة عالية تجعلها قابلة للدمج في مشاريع التشييد الحديثة بفضل الاعتماد على بروتوكولات الاتصال اللاسلكية المعيارية والحوسبة الموزعة (محمد وحسن، 2024). ومع ذلك، يصطدم تطبيق هذا الإطار التكيفي في مشاريع إعادة تأهيل المباني القائمة بتعقيدات بروتوكولات الاتصال المغلقة التي تعتمدها أنظمة إدارة المباني التقليدية. يتطلب التعميم الواسع توحيداً قياسياً للواجهات البرمجية بين منصات استشعار إنترنت الأشياء ولوحات التحكم الميكانيكية للشركات المصنعة المختلفة، لضمان ترجمة الأوامر الخوارزمية إلى حركات ميكانيكية دقيقة في صمامات ومخمدات الهواء.

من المنظور المناخي والبيئي، صُمم هذا النموذج للعمل في مناخ ذي متطلبات تبريد وتدفئة متباينة، مما يعزز من قابليته للتطبيق في نطاقات جغرافية واسعة. بيد أن أوزان دوال المكافأة الرياضية التي توجه قرارات الوكيل الذكي ليست عالمية. فتحقيق أقصى كفاءة في سياق مناخي استوائي ذي رطوبة خانقة سيتطلب إعادة برمجة الخوارزمية لإعطاء الأولوية المطلقة لإزالة الرطوبة الكامنة على حساب خفض درجات الحرارة الجافة، في حين سيتطلب التطبيق في المناطق الصناعية تعديل الحساسية تجاه مستويات الجسيمات الدقيقة المنتشرة من الخارج (Roumi et al., 2024).

من المنظور الإنساني، ترتبط قابلية التعميم بمدى مرونة النظام في استيعاب التنوع الثقافي والسلوكي تجاه مفهوم الراحة. فالنماذج الرياضية لا يمكنها اختزال تعقيدات السلوك البشري في معادلات صلبة مدى الحياة. لكي ينجح هذا الإطار على نطاق عالمي، يجب أن يحافظ على آلية تفاعل ثنائية الاتجاه مع الشاغلين، بحيث يعمل على تحديث خطوط الأساس للراحة الشخصية استناداً إلى المدخلات الاستبائية الدورية وتعديلات التحكم الطفيفة التي يجريها المستخدمون عبر واجهات التحكم الرقمية المخصصة (Mahdavi et al., 2021). يضمن هذا النهج عدم تحول البيئة الذكية إلى نظام أبوي يفرض معايير الهندسية، بل تبقى بيئة عضوية تتطور وتتكيف لتلبية الاحتياجات المتغيرة لشاغليها عبر مراحل الاستخدام التشغيلي للمبنى.

6. الإسهام العلمي

المساهمة النظرية: يقدم هذا البحث إسهاماً نظرياً بارزاً من خلال إعادة صياغة العلاقة بين جودة البيئة الداخلية واستهلاك الطاقة المعمارية، متجاوزاً النماذج الصفرية التي تفترض حتمية التضحية بأحد الهدفين لصالح الآخر. نظرياً، يوسع البحث

مفهوم الراحة الحرارية من كونه حالة ميكانيكية ثابتة تقاس بمعايير معزولة إلى كونه عملية ديناميكية متغيرة تتأثر بالتفاعلات المعقدة بين الإشغال الفعلي والقصور الذاتي للكتلة الحرارية للمبنى والظروف المناخية الخارجية. (Kim et al., 2018) كما يقدم البحث إطارا مفاهيميا نقديا يدمج المؤشرات الفسيولوجية والبيئية ضمن دالة هدف رياضية واحدة قابلة للقياس، مما يثري الأدبيات الهندسية التي طالما عانت من الانفصال المنهجي بين هندسة التحكم المعماري والعلوم السلوكية للمستخدمين، ويؤسس لنموذج سببي يربط بيانات الاستشعار بنتائج الرفاهية (Mahdavi et al., 2021).

المساهمة التقنية: على الصعيد التقني، يبتكر البحث بنية تحتية هجينة لمعالجة البيانات تدمج بفعالية بين سرعة الحوسبة الطرفية والقدرات التحليلية للحوسبة السحابية لضمان استقرار أنظمة التحكم في البيئات السكنية المعقدة (محمد وحسن، 2024). تتمثل الإضافة التقنية الأبرز في تطوير خط أنابيب متكامل لمعالجة الشذوذ وفقدان الإشارة من شبكات مستشعرات إنترنت الأشياء غير المتجانسة لحظيا، مما يهيئ بيئة بيانات نقية وموثوقة لعمل خوارزميات التعلم الآلي. علاوة على ذلك، يبتكر البحث حلا هندسيا لمشكلة الاستكشاف العشوائي في خوارزميات التعلم المعزز عبر دمجها مع شبكات الذاكرة طويلة قصيرة المدى التنبؤية، مع تقييد مساحة الإجراءات المتاحة للوكيل الذكي لمنع حدوث تذبذبات ميكانيكية خطيرة في المشغلات، مما يضمن استقرار تشغيلها (Xu et al., 2025).

المساهمة التطبيقية: تتجلى المساهمة التطبيقية بقوة في نقل تقنيات التحكم الاستباقي من بيئات المحاكاة الافتراضية المثالية إلى سياق تشغيلي حقيقي ومأهول بالكامل. يوفر البحث دليلا تجريبييا كميًا صارما على قابلية تطبيق هذه الأنظمة المتقدمة للتحكم في أنظمة تدفق المبرد المتغير داخل المجمعات السكنية القائمة، متجاوزا التحديات التنفيذية التي أعاققت الأبحاث السابقة وأبقتها حبيسة البيئات المخبرية. (Blum et al., 2021) يثبت النظام المطبق كفاءته العملية في التعامل مع السلوكيات العشوائية للمستخدمين، ومواجهة تأخر استجابة المشغلات الميكانيكية، وتجاوز أخطاء القياس، مقدما بروتوكولا تشغيليا وإطارا هندسيا قابلا للتكرار والتوسع المباشر في مشاريع إدارة المرافق الذكية المعتمدة على البيانات الضخمة (Boutahri & Tilioua, 2025).

المساهمة في الاستدامة: أخيرا، يطرح البحث مساهمة جوهرية وعميقة في مسار الاستدامة المعمارية الشاملة من خلال تقديم إثبات كمي على أن المباني السكنية الذكية قادرة على تحقيق وفورات طاقة فائقة تتجاوز ثلاثة وعشرين بالمائة دون أدنى مساس بالصحة العامة أو الراحة البصرية والحرارية (Li et al., 2021). من خلال التعديل الديناميكي الدقيق لمعدلات التهوية وتقليص أوقات التشغيل الفائض للمعدات بناء على حالة الإشغال الفعلية، يدعم البحث أهداف كفاءة الطاقة الحضرية ويساهم بفعالية في خفض البصمة الكربونية للقطاع الإنشائي. يؤكد هذا الإطار أن الاستدامة الحقيقية تكمن في التوظيف الذكي للبيانات لمنع الهدر التشغيلي، مما يمهّد الطريق علميا وعمليا نحو بناء مدن ذكية تتمركز حول رفاهية الإنسان وتلبي أدق معايير كفاءة الموارد العالمية (Elgazzar et al., 2025).

7. الاستنتاجات

قدمت هذه الدراسة إطارا تشغيليا متكاملًا يعتمد على دمج شبكات إنترنت الأشياء مع خوارزميات التعلم الآلي الهجينة، بهدف تحقيق توازن دقيق بين رفاهية الشاغلين وكفاءة استهلاك الطاقة في البيئات السكنية. أثبتت النتائج الكمية المستمدة من التطبيق الميداني تفوق النموذج التكيفي المقترح على أنظمة التحكم التقليدية والقواعد الثابتة. من الناحية الميكانيكية، نجح الإطار في خفض التباين الحراري الداخلي بشكل ملحوظ، حيث انخفض الانحراف المعياري لدرجات الحرارة من 1.8 درجة مئوية في المرحلة المرجعية إلى 0.4 درجة مئوية. انعكس هذا الاستقرار الفيزيائي مباشرة على مؤشرات الراحة الحرارية، إذ ارتفعت نسبة الامتثال للنطاق المريح لمؤشر التنبؤ بمتوسط التصويت من 64.3 بالمائة إلى 94.7 بالمائة من إجمالي وقت الإشغال الفعلي. وفيما يتعلق بجودة الهواء الداخلي، تمكنت الخوارزميات الاستباقية من تسطيح منحنى تراكم الملوثات، وخفض متوسط تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون إلى 780 جزءا في المليون، مع القضاء التام على فترات التجاوز الحرجة التي تتعدى ألف جزء في المليون، وذلك من خلال التعديل الديناميكي لمعدلات التهوية بناء على الاستدلال اللحظي للإشغال (Dai et al., 2023).

بالتوازي مع هذه التحسينات البيئية والفسيولوجية، حقق النموذج التقني وفورات هندسية موثقة في استهلاك الطاقة الميكانيكية لأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء بنسبة بلغت 23.8 بالمائة. تحقق هذا الوفرة عبر آليات استغلال الكتلة الحرارية للغلاف المعماري، وتقليص أوقات التشغيل الفائض للضواغط، وتوجيه التهوية الميكانيكية بدقة متناهية، مما يثبت إمكانية فك الارتباط التقليدي بين جودة البيئة الداخلية واستهلاك الطاقة (Wei et al., 2017). كما ترجمت هذه التحسينات الفيزيائية إلى مكاسب ملموسة على مستوى الإدراك البشري، حيث سجلت استبيانات التقييم اللاحق للإشغال ارتفاعا حادا في متوسط رضا المستخدمين من 2.8 إلى 4.6 نقطة على مقياس خماسي، مصحوبا بانخفاض جذري في الشكاوى التشغيلية وتراجع الحاجة للتدخل اليدوي، مما يؤكد نجاح النظام في تولي العبء المعرفي لإدارة البيئة السكنية بكفاءة عالية (Haverinen-Shaughnessy et al., 2018).

بناء على المخرجات التطبيقية، تبرز عدة توصيات مستقبلية لتعزيز قابلية التوسع والتعميم لهذا الإطار للوصول إلى إدارة معمارية شاملة. تقنيا، يوصى بتطوير آليات معايرة ذاتية لمستشعرات جودة الهواء تعتمد على خوارزميات اكتشاف الانحراف البطيء، لضمان استدامة موثوقية البيانات الفيزيائية على المدى الطويل دون الحاجة إلى تدخل صيانة بشري دوري ومكلف. كما ينبغي توجيه الجهود البحثية نحو استكشاف بروتوكولات اتصال مفتوحة المصدر وموحدة قياسيا لتسهيل دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي مع لوحات التحكم الميكانيكية المغلقة السائدة في أنظمة المباني القائمة (Shi et al., 2022). من الناحية الخوارزمية، يوصى بدمج تقنيات التعلم الموحد لتدريب النماذج عبر مباني سكنية متعددة دون تبادل البيانات الخام، مما يعزز من حماية خصوصية المستخدمين ويسرع من عملية تكيف الوكيل الذكي في البيئات المعمارية الجديدة. أخيرا، يجب توسيع نطاق دالة المكافأة الرياضية في خوارزميات التعلم المعزز لتشمل متغيرات جودة الإضاءة الحيوية والتأثيرات الصوتية الناتجة عن تدفق الهواء في أنظمة التهوية، وصولا إلى نموذج توليدي شامل يدير الرفاهية المعمارية بكافة أبعادها الحسية والفسولوجية بشكل متزامن.

قائمة المراجع:

- [1] فرغلي، ياسر علي معبد، & السلنتي، رشا محمد حسين. (2025). استخدام الذكاء الصناعي في إدارة التحكم البيئي للفراغات الداخلية بالمنشأة. مجلة التراث والتصميم، 5(2)، 434-419. <https://doi.org/10.21608/jsos.2025.394369.1770>
- [2] خليل، هند رشدي عبد الرازق. (2024). منهجيات العمارة الذكية وتأثيرها الإيجابي على زيادة القدرة الإنتاجية لشاغلي الفراغات الإدارية. مجلة الفنون والعلوم الإنسانية، 2024(14)، 462-442. <https://doi.org/10.21608/mjas.2024.325684.1272>
- [3] محمد، علي محمد سنوسي، محمد، دعاء عبد الرحمن، & حسن، محمد حسن رمضان. (2025). تكنولوجيا المباني الذكية المستدامة من منظور عمارة المستقبل. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، 10(51)، 64-46. <https://doi.org/10.21608/mjaf.2023.221736.3140>
- [5] محمد، الشيماء السيد محمود، & حسن، فايقة. (2024). منصات تطوير تطبيقات إنترنت الأشياء: المفاهيم، البنية والمكونات، الأنواع، الخصائص، المعايير. المجلة العربية الدولية لإدارة المعرفة، 3(3)، 96-57. <https://doi.org/10.21608/aikm.2024.291305.1077>
- [6] عبدالمتولي، محمود محمد الشحات. (2025). رؤية مستقبلية مستدامة للتصميم الداخلي والأثاث في المباني الشاهقة لعام 2050. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، 10(عدد خاص 13)، 215-183. <https://doi.org/10.21608/mjaf.2025.383227.3687>
- [7] قاسم، رضوه فتحي فواز، & فخري، نها. (2025). دور الأنظمة الذكية المتحركة بالواجهات في التصميم الداخلي المستدام ونظم التحكم البيئي للمنشآت العامة بمصر. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية. <https://doi.org/10.21608/mjaf.2025.400930.3782>
- [8] عبده، أماني، سمير، علا، & والي، إبراهيم. (2024). الاستفادة من تقنية إنترنت الأشياء في تحسين تجربة المستخدم خل الحيزات التجارية. مجلة التراث والتصميم، 4(24)، 304-279. <https://doi.org/10.21608/jsos.2023.205625.1393>
- [9] مراد. (2019). دور العمارة الذكية في تطوير العملية التعليمية في المباني الجامعية Engineering Research Journal (Shoubra), 42(1), 197-205. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2019.406634>
- متولي، حسن عبد المنعم، أبو شال، بسنت محمد، & شاكرا، يوسف. (2025). التكنولوجيا الذكية في التصميم الداخلي لمراكز الابتكار وأثرها على ... المجلة الدولية للعمارة والفنون والتصميم الرقمي. (IAJADD). <https://doi.org/10.21608/iajadd.2025.364667.1224>
- [10] حسين، مروة، & حمزه، ولاء. (2025). التصميم المعياري للفواصل الزجاجية الذكية في الأماكن العامة: نحو تكامل الذكاء الاصطناعي في التحكم البيئي والتفاعلي. مجلة التراث والتصميم، 5(2)، 146-122. <https://doi.org/10.21608/jsos.2025.388635.1750>

References

- [1] Wei, T., Wang, Y., & Zhu, Q. (2017). Deep reinforcement learning for building HVAC control. In Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference (DAC '17). <https://doi.org/10.1145/3061639.3062224>

- [2] **Boutahri, Y., & Tilioua, A. (2025).** Reinforcement learning for HVAC control and energy efficiency in residential buildings with BOPTTEST simulations and real-case validation. *Discover Computing*, 28, Article 45. <https://doi.org/10.1007/s10791-025-09544-y>
- [3] **Sung, W.-T., & Hsiao, S.-J. (2020).** The application of thermal comfort control based on smart house system of IoT. *Measurement*, 149, 106997. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106997>
- [4] **Jeon, Y., Cho, C., Seo, J., Kwon, K., Park, H., Oh, S., & Chung, I.-J. (2018).** IoT-based occupancy detection system in indoor residential environments. *Building and Environment*, 132, 181-204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.043>
- [5] **Xu, S., Fu, Y., Wang, Y., Yang, Z., Huang, C., et al. (2025).** Efficient and assured reinforcement learning-based building HVAC control with heterogeneous expert-guided training. *Scientific Reports*, 15, 7677. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91326-z>
- [6] **Naylor, S., Gillott, M., & Lau, T. (2018).** A review of occupant-centric building control strategies to reduce building energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.019>
- [7] **Roumi, S., Zhang, F., Stewart, R. A., & Santamouris, M. (2024).** Indoor environment quality effects on occupant satisfaction and energy consumption: Empirical evidence from subtropical offices. *Energy and Buildings*, 303, 113784. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113784>
- [8] **Tang, R., Fan, C., Zeng, F., et al. (2022).** Data-driven model predictive control for power demand management and fast demand response of commercial buildings using support vector regression. *Building Simulation*, 15, 317-331. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0811-x>
- [9] **Shi, Q., Liu, C., & Xiao, C. (2022).** Machine learning in building energy management: A critical review and future directions. *Frontiers of Engineering Management*, 9(2), 239-256. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0181-1>
- [10] **Haverinen-Shaughnessy, U., Pekkonen, M., Leivo, V., Prasauskas, T., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A., & Martuzevicius, D. (2018).** Occupant satisfaction with indoor environmental quality and health after energy retrofits of multi-family buildings: Results from INSULAtE-project. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(6), 921-928. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.05.009>
- [11] **Blum, D., Wetter, M., Bonvini, M., Nouidui, T. S., & Piette, M. A. (2021).** Building optimization testing framework (BOPTTEST) for simulation-based benchmarking of control strategies in buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 14(5), 586-610. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.1986574>
- [12] **Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018).** Personal comfort models - A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control. *Building and Environment*, 132, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>
- [13] **Jazizadeh, F., Ghahramani, A., Becerik-Gerber, B., Kichkaylo, T., & Orosz, M. (2014).** User-led decentralized thermal comfort driven HVAC operations for improved efficiency in office buildings. *Energy and Buildings*, 70, 398-410. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.066>
- [14] **Khovalyg, D., Kazanci, O. B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W. P., Toftum, J., & Olesen, B. W. (2020).** Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. *Energy and Buildings*, 213, 109819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>
- [15] **Bresa, A., Zakula, T., & Ajdukovic, D. (2024).** Occupant-centric control in buildings: Investigating occupant intentions and preferences for indoor environment and grid

flexibility interactions. *Energy and Buildings*, 314, 114393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114393>

[16] Dai, X., Shang, W., Liu, J., Xue, M., & Wang, C. (2023). Achieving better indoor air quality with IoT systems for future buildings: Opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 895, 164858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164858>

Ma, Z., Wang, J., Ye, S., Wang, R., Dong, F., & Feng, Y. (2023). Real-time indoor thermal comfort prediction in campus buildings driven by deep learning algorithms. *Journal of Building Engineering*, 78, 107603. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107603>

[17] Mahdavi, A., Teufl, H., & Berger, C. (2021). An occupant-centric theory of building control systems and their user interfaces. *Energies*, 14(16), 4788. <https://doi.org/10.3390/en14164788>

[18] Li, H., Wang, Z., & Hong, T. (2021). Occupant-centric key performance indicators to inform building design and operations. *Journal of Building Performance Simulation*. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.1876771>

[19] Ouf, M. M., Park, J. Y., & Gunay, H. B. (2021). On the simulation of occupant-centric control for building operations. *Journal of Building Performance Simulation*, 14(6), 688-691. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.2001622>