

Ministry of Higher Education
and Scientific Research
Syrian Virtual University
Program Master of BIMM



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الافتراضية السورية
برنامج نمذجة معلومات البناء
وإدارتها BIMM

**دور نمذجة معلومات البناء في تصميم أنظمة إدارة طاقة المباني BEMS
دراسة حالة: نظام التدفئة والتهوية وتكييف الهواء لمبنى خدمي /**

**“The Role of BIM in the Design of Building Energy Management Systems
(BEMS)**

Case Study: HVAC System for a Service Building”

**بحث مقدم لنيل درجة ماجستير التأهيل والتخصص في إدارة ونمذجة معلومات البناء
BIMM**

إعداد الطالب

اسم الطالبة: يمام شهم ورده

رقم الطالبة: 278820

إشراف الدكتور المهندس

المشرف المشارك:

د.م بلال زعور

المشرف الرئيسي:

د.م ضحى جيد

2024-2025

كلمة شكر

أولاً، أتوجه بحمد الله تعالى وشكراً، الذي وفقني ويسّر لي السبيل للوصول إلى هذه المرحلة، رغم ما واجهته من صعوبات وتحديات. ففي كل مرة كنت أشعر بالتعب أو يتسرّب اليأس إلى نفسي، كان يمدني بالعون، وييهيئ لي من الأشخاص والظروف ما يعينني على مواصلة الطريق.

أتقدم بخالص الشكر والتقدير للكوّنة سونيا أحمد، مديرية برنامج إدارة ونمذجة معلومات البناء، على تعاملها الرأقي، ودعمها وتشجيعها المستمر لنا في هذه الظروف الصعبة. لم تكن بالنسبة لنا مجرد مديرية للبرنامج، بل كانت أمّاً حانية، وأختاً قريبة، وزميلة وصديقة. أسأل الله أن يرفع منزلتها في الدنيا والآخرة.

ومن أعماق قلبي، أخص بالشكر الدكتورة ضحى جديـد، المشرفة على بحثي، التي كانت خير سند وداعمة بكل ما تحمله الكلمة من معنى. شجعتني على الاستمرار رغم العثرات، وغرست في نفسي الصبر والثقة. لم أتردد يوماً في مصارحتها بأخطائي أو مخاوفي، وكانت دوماً تمدنـي بنصائحها وتوجيهاتها القيمة التي ساعدتني على إنجاز الأفضل وتجاوز مشقة الطريق.

كما أتوجه بالشكر الجليل لـدكتور بلال زعـور، المشرف المشارك على بحثي، على نصائحـه الثمينـة، وتشجيعـه المستمر، وما قدمـه من تسهيلـات ودعم خلال مسـيرـتي البحثـية.

ولا يسعـي في هذا المقام إلا أن أعبر عن خالص التقدير والامتنان لأعضـاء لجنةـ الحكم المؤقرـة، على ما بذـلوه من جـهد في تقييمـ هذا الـبحث، وما تفضـلـوا به من ملاحظـات وـتـوجـيهـات بـنـاءـةـ أسـهمـتـ فيـ إـثـرـائـهـ وـتحـسـينـ مـضـمـونـهـ الـعـلـمـيـ.

كما أـعبرـ عنـ اـمـتنـانيـ العـمـيقـ لـجـمـيعـ أـعـضـاءـ الـهـيـئـةـ التـدـريـسـيـةـ فيـ بـرـنـامـجـ مـاجـسـتـيرـ إـدـارـةـ وـنمـذـجـةـ مـعـلـومـاتـ الـبـنـاءـ،ـ الـذـيـ أـثـرـوـنـاـ بـعـلـمـهـ وـخـبـرـاتـهـ،ـ وـمـنـحـوـنـاـ مـنـ وـقـتـهـ وـجـهـدـهـ مـاـ يـعـيـنـنـاـ عـلـىـ المـضـيـ قـدـماـ بـثـقـةـ أـكـبـرـ فـيـ مـسـيرـتـاـ الـعـلـمـيـ وـالـعـمـلـيـةـ.

الأهادئ:

إلى من كانت بجانبي في كل لحظات حياتي الجميلة والصعبة إلى السند الذي يقف خلفي في كل المواقف إلى داعمي في الحياة إلى من يخفف عنني صعوبة الحياة ومشقاتها إلى من كانت كلماتها سبباً في أن أكمل دراستي وأتابع في اللحظات التي أوشكت فيها على التوقف إلى من تحلو الحياة بوجودها وتأنس الروح بحديثها إلى من أشعر بالأمان والقوة حين تكون إلى العظيمة المضحبة والصابرية أطال الله في عمرها وأمدها بالصحة والعافية..

أمي الغالية دلال وردة

إلى مصدر القوة والفخر والأمان، إلى من أفنى عمره وجسده لأكون هنا، أهدي لك هذا العمل بكل حب وامتنان..

أبي العزيز شهم وردة

رفاق الدرج الذين نتقاسم معاً أفراحنا وهمومنا، إلى من تفرح قلوبهم لفرحي ويفخرون بإنجازي..

إخوتي علي، رهام

إلى رفيقي الأولى الأصدق الأنقى والأوفى، إلى أخي الثاني، إلى من يملئ حياتنا بالحب والفرح والضحك..

أختي صبا، صهري إبراهيم زعير، ولديهما عبد الكريم وإيميلي

إلى رفيق الأيام القادمة، إلى من لم يوفر جهداً في سبيل سعادتي وراحةي، إلى من هون عليّ كل اللحظات الصعبة وشاركني لحظات الفرح والحزن..

الغالي نوار

إلى الذين كان حظي سعيداً بمعرفتهم، إلى من قدموا لي النصح ومدّوا يد العون، إلى من شجعوني على مواصلة هذا الطريق، وإلى من لم يبخلا عليّ بوقتهم وجهدهم أهدي هذا العمل عربون وفاء وامتنان..

زملاء الماستر، بلقيس

وأخيراً، أهدي هذا العمل إلى كل من تمنى لي الخير وغمزني بدعوات صادقة، وكان سبباً في ابتسامة أشرقت على وجهي، إلى من منحتي كلماته لحظات تفاؤل وطمأنينة، إلى من قدر انشغالني ووقف بجانبي، وهياً لي ما يعينني على المضي قدماً..

العائلة، زملاء العمل، الرفاق، المعارف

لجنة الحكم:

د.م محمد علي محمد

د.م: هلا أصلان

د.م: ضحى جديد

الملخص:

تشكل المباني الخدمية أحد القطاعات الأكثر استهلاكاً للطاقة على مستوى العالم، حيث تستأثر أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) بما يصل إلى 60% من هذا الاستهلاك. وعلى الرغم من التطور الكبير في أدوات نمذجة معلومات البناء (BIM) وأنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS)، لا تزال هناك فجوة بحثية تتعلق بتوظيف الإمكانيات الديناميكية الكاملة لنماذج BIM الدقيقة لدعم عملية اتخاذ القرار في التصميم المبكر لأنظمة HVAC، وخاصة فيما يتعلق باستخدام البيانات الغنية من نماذج BIM لتحسين التصميم الأولي لأنظمة HVAC وتحليل أدائها الحراري، تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال اقتراح وتطبيق إطار منهجي متكامل يربط بشكل مباشر بين النموذج الرقمي الثلاثي الأبعاد للمبني وتحليل الحمل الحراري لتحديد مواصفات نظام HVAC الأمثل. اعتمد البحث منهجية دراسة حالة تطبيقية باستخدام برنامج Autodesk Revit نمذجة مبني فندي افتراضي بكامل تفاصيله المعمارية والميكانيكية. تم بعدها إجراء تحليل حمل حراري مفصل باستخدام أداة التحليل المدمجة (Revit HVAC Analysis) لمحاكاة أداء النظام تحت ثلاثة سيناريوهات متباينة: (1) السيناريو الأساسي (بدون عزل حراري)، (2) سيناريو كفاءة الطاقة (إضافة عزل حراري من مادة البولي يوريثان بسمك 50 ملم للجدران والأسقف واستبدال الزجاج المفرد بزجاج مزدوج)، (3) سيناريو تغيير الاستخدام الوظيفي للمبني (تغيير إشغال المبني من مطعم إلى صالة رياضية ومن مطبخ إلى غرفة سانا). كشفت نتائج المحاكاة عن انخفاض ملحوظ في الحمل الحراري الكلي للنظام بلغ 2.8 طن (ما يعادل 28.57%) وانخفاض في تدفق الهواء المطلوب بمقدار 602.5 لتر/ثانية (43%) في سيناريو كفاءة الطاقة، مما يؤكد على الأثر الحاسم لخصائص الغلاف الخارجي والذي يمكن تحليله وتقييمه بدقة مبكرة عبر نموذج معلومات المبني. من ناحية أخرى، أظهر سيناريو تغيير الاستخدام الوظيفي للمبني زيادة في الحمل بلغت 4.2 طن (30%) بسبب تغيير كثافة الإشغال والأحمال الداخلية، مما يبرز قدرة النموذج الرقمي على استيعاب التغيرات الجوهرية في استخدام المبني وتوفير بيانات دقيقة لإعادة تقييم متطلبات نظام HVAC، وبالتالي تجنب التكاليف الباهظة لإعادة التصميم بعد التنفيذ.

خلص الدراسة إلى أن الإطار المقترن ليس أداة تحليل طaci فحسب، بل هو منصة لدعم اتخاذ القرار التصميمي القائم على الأداء. تؤكد على أن التكامل العضوي بين BIM وBEMS يمثل نقلة نوعية نحو تشيد مبني ذكية تتسم بالمرنة والاستدامة العالية، وتحث على الاعتماد على هذا النهج كمعيار في المراحل التصميمية الأولى، كما تقترح الأبحاث المستقبلية التوسيع في دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي والتنبؤ الآلي.

الكلمات المفتاحية:

نمذجة معلومات البناء، أنظمة إدارة الطاقة في المبني، أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، تكامل نمذجة معلومات البناء مع أنظمة إدارة طاقة المبني، كفاءة الطاقة.

Abstract:

Service buildings constitute one of the most energy-intensive sectors globally, as Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems account for up to 60% of this consumption. Despite the significant advancement in Building Information Modeling (BIM) tools and Building Energy Management Systems (BEMS), a research gap persists concerning the utilization of the full dynamic potential of precise BIM models to support decision-making processes in the early design stages of HVAC systems, particularly with regard to using rich data from BIM models to improve the initial design of HVAC systems and analyze their thermal performance. This study aims to bridge this gap by proposing and applying an integrated methodological framework that directly links the building's three-dimensional digital model with thermal load analysis to determine the optimal specifications of the HVAC system. The research adopted an applied case study methodology using Autodesk Revit software to model a hypothetical hotel building with full architectural and mechanical details. Subsequently, a detailed thermal load analysis was conducted using the integrated analysis tool (Revit HVAC Analysis) to simulate system performance under three distinct scenarios: (1) the baseline scenario (without thermal insulation), (2) the energy efficiency scenario (by adding 50 mm polyurethane thermal insulation to walls and roofs and replacing single glazing with double glazing), (3) the building functional use change scenario (changing building occupancy from a restaurant to a gymnasium and from a kitchen to a sauna room). Simulation results revealed a significant decrease in the system's total thermal load amounting to 2.8 tons (equivalent to 28.57%) and a reduction in required airflow by 602.5 liters/second (43%) in the energy efficiency scenario, confirming the critical impact of the building envelope's characteristics, which can be accurately analyzed and evaluated at an early stage through the building information model. On the other hand, the building functional use change scenario showed an increase in load amounting to 4.2 tons (30%) due to changes in occupancy density and internal loads, highlighting the digital model's ability to accommodate fundamental changes in building use and provide accurate data to reassess HVAC system requirements, thereby avoiding costly redesigns after construction. The study concludes that the proposed framework is not merely an energy analysis tool, but a platform for supporting performance-based design decision-making. It emphasizes that the organic integration between BIM and BEMS represents a qualitative leap toward constructing intelligent buildings characterized by high flexibility and sustainability, and recommends adopting this approach as a standard in early design phases. It also suggests that future research should expand into integrating artificial intelligence and real-time prediction technologies.

Key word:

Building Information Modeling (BIM), Building Energy Management System (BEMS), Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC), BIM and BEMS, Integration, HVAC and BIM.

فهرس المحتويات:

المحتويات

1	كلمة شكر
1	الإهداء :
2	لجنة الحكم:
3	الملخص:
4	الكلمات المفتاحية:
5	Abstract:
5	Key word:
6	فهرس المحتويات:
9	الفصل الأول: خطة البحث
9	1-1-المقدمة:
10	2-مشكلة البحث:
11	3-أسئلة البحث:
11	4-أهداف البحث:
12	5-فرضيات البحث:
13	6-أهمية البحث:
14	7-منهج البحث:
14	8-أدوات البحث:
15	9-مجتمع الدراسة وعینتها:
15	10-حدود البحث:
16	11-مصطلحات البحث:
18	الفصل الثاني: الإطار النظري
18	2-القسم الأول: الدراسات المرجعية:
18	1-1-الدراسة الأولى:
19	2-الدراسة الثانية:
20	3-الدراسة الثالثة:
22	4-الدراسة الرابعة:
23	5-الدراسة الخامسة:

25	.....	6-1-2 الدراسة السادسة:
26	.....	7-1-2 الدراسة السابعة:
27	.....	8-1-2 الدراسة الثامنة:
29	.....	2-2 القسم الثاني: لمحة عن أنظمة إدارة الطاقة في المباني:
29	.....	1-2-2 مقدمة:
29	.....	2-2-2 تعريف أنظمة إدارة طاقة المباني:
30	.....	3-2-2 التطور التاريخي لأنظمة BEMS:
31	.....	4-2-2 الفرق بين EMS,BAS,BEMS:
33	.....	5-2-2 مكونات نظام إدارة الطاقة:
36	.....	6-2-2 الأقسام الوظيفية الرئيسية في نظام إدارة طاقة المباني(BEMS):
40	.....	7-2-2 الهيكل البنوي لنظام إدارة طاقة المباني(BEMS Architecture):
40	.....	8-2-2 فوائد أنظمة BEMS:
42	.....	9-2-2 التطبيقات العملية لأنظمة إدارة الطاقة في المباني:
43	.....	10-2-2 الاتجاهات المستقبلية في أنظمة BEMS:
45	.....	11-2-2 التحديات الرئيسية التي تواجه أنظمة إدارة طاقة المباني:
45	.....	12-2-2 مصادر الطاقة المتكاملة مع أنظمة إدارة طاقة المباني(BEMS):
47	.....	13-2-2 خطوات تصميم نظام إدارة طاقة المباني(BEMS) :
48	.....	14-2-2 طرق التحكم في نظام إدارة طاقة المباني(BEMS) :
50	.....	2-3-2 القسم الثالث: أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) :
50	.....	1-3-2 مقدمة:
50	.....	2-3-2 تعريف نظام HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning):
51	.....	3-2 المكونات التقنية الأساسية لنظام HVAC :
54	.....	3-2 بيئة التشغيل والتكميل مع الأنظمة الأخرى:
58	.....	3-2 آلية عمل نظام HVAC :
60	.....	3-2 أنواع أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء:
62	.....	3-2 كفاءة الطاقة في أنظمة HVAC :
63	.....	3-2 التحديات المستقبلية في أنظمة HVAC:
65	.....	2-3 التوجهات البحثية الحديثة والمستقبلية:
67	.....	الفصل الثالث:
67	.....	3-1 مدخل نظري:
67	.....	3-2 التكامل بين BEMS و BIM:

3- دور ad HVAC في منظومة استهلاك الطاقة:.....	68
3- دور برنامج Revit في تصميم أنظمة HVAC :.....	68
3- المرونة التصميمية التي يوفرها BIM في أنظمة HVAC :	69
الفصل الرابع: الإطار العملي للدراسة.....	71
□الحالة الأولى: الدراسة تم بدون عازل حراري للجدران والسقف:	72
□الحالة الثانية: الدراسة تم باستخدام عازل من ألواح البوليوريتان سماكة 50 mm للجدران والسقف:	84
□الحالة الثالثة: الدراسة تم بدون عازل حراري للجدران مع تغيير مواصفات الحيزات المعمارية حيث تم استبدال صالة المطعم ب صالة رياضية والمطبخ بغرفة ساونا:.....	94
الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات	106
الاستنتاجات:.....	106
التوصيات:.....	108
المراجع:.....	111

الفصل الأول: خطة البحث

1-1-المقدمة:

يشهد العالم اليوم تزايداً غير مسبوق في استهلاك الطاقة داخل المبني، خاصة في القطاعات الخدمية والتعليمية والطبية التي تعتمد على أنظمة ميكانيكية وكهربائية معقدة. هذا النمو المتتسارع في الطلب الطاقي يشكل تحدياً مباشراً على الشبكات الكهربائية العامة، ويبذر الحاجة إلى حلول أكثر كفاءة واستدامة لإدارة الطاقة. وفي هذا السياق، تُعد المبني الذكي إحدى الاستجابات الأساسية للتطورات التكنولوجية، حيث توفر أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS) آلية فعالة لمراقبة استهلاك الطاقة والتحكم فيه عبر الأنظمة الميكانيكية والكهربائية. (Jamil & Mittal, 2017) غير أن فعالية هذه الأنظمة ترتبط بدرجة تكاملاها مع أدوات رقمية متقدمة قادرة على توفير بيانات دقيقة ومرنة، وهو ما يقدمه مفهوم نمذجة معلومات البناء .(BIM)

تمثل أنظمة التدفئة والتهوية والتبريد (HVAC) محوراً رئيسياً في النقاش حول إدارة الطاقة، إذ إنها تستحوذ على الحصة الأكبر من الاستهلاك الطاقي في المبني، بنسبة تتراوح بين 40-60% (Asim et al., 2022) ورغم أهمية هذه الأنظمة، فإن الدراسات التطبيقية تشير إلى وجود فجوات واضحة في توظيف بيانات نماذج BIM ضمن أنظمة BEMS لدعم تحسين أداء أنظمة HVAC. (Kozlovska et al., 2023) ويتجلّى هذا القصور بشكل خاص في مراحل التصميم المبكر، حيث لا يتم استثمار الإمكانيات الكاملة لنماذج BIM في التتبؤ بالأحمال الحرارية أو محاكاة التغيرات المحتملة في ظروف التشغيل، مما يؤدي إلى ضعف المرونة التشغيلية وارتفاع معدلات الهدر الطاقي.

من هنا تتبع أهمية هذا البحث الذي يسعى إلى استكشاف سبل تعزيز التكامل بين نمذجة معلومات البناء وأنظمة إدارة طاقة المبني، مع تركيز خاص على أنظمة HVAC باعتبارها النظام الأكثر تأثيراً في

استهلاك الطاقة وكفاءة التشغيل. ويهدف البحث إلى إبراز الدور الذي يمكن أن تلعبه نماذج BIM بما توفره من بيانات ثلاثة الأبعاد دقيقة ومحدثة في تحسين قدرة BEMS على التنبؤ، التكيف، والتحكم الذكي في استهلاك الطاقة. كما يسعى إلى تقديم إطار تطبيقي يوضح كيف يمكن استخدام أدوات مثل Autodesk Revit أن يدعم محاكاة الأداء الطاقي، واختبار سيناريوهات مختلفة للتشغيل، و اختيار الحلول الأكثر كفاءة ومرنة. (González et al., 2021)

وبذلك، يضع هذا البحث نفسه ضمن الجهود العلمية الرامية إلى سد الفجوة البحثية بين BIM وبذلك، يضع هذا البحث نفسه ضمن الجهود العلمية الرامية إلى سد الفجوة البحثية بين BIM و BEMS من خلال التركيز على أنظمة HVAC باعتبارها العنصر الأكثر استهلاكاً للطاقة والأكثر استفادة من التكامل الرقمي، بما يعزز الاتجاه نحو تصميم وتشغيل مبانٍ أكثر استدامة وكفاءة. (Petrushevski et al., 2018

2-مشكلة البحث:

تواجه المبني ذات الاستخدامات الكثيفة للطاقة تحديات متزايدة في إدارة استهلاك الطاقة، نتيجة النمو المطرد في الطلب على الكهرباء، مما يفرض ضغطاً متزايداً على الشبكة الكهربائية العامة و يؤثر سلباً على استقرارها وفاعليتها. وعلى الرغم من توفر أنظمة إدارة الطاقة (BEMS) وتقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM)، فإن الاستفادة الكاملة من إمكانياتهما لا تزال محدودة، خاصة في مراحل التصميم المبكر، حيث يفتقر العديد من المشروعات إلى تكامل فعال بين هاتين الأداتين. يبرز هذا القصور بشكل خاص في أنظمة التدفئة والتهوية والتبريد (HVAC) التي تمثل النسبة الأكبر من استهلاك الطاقة في المبني، إذ إن عدم توظيف بيانات الـ BIM بدقة ضمن نظم الإدارة يؤدي إلى صعوبة التنبؤ بالأحمال الحرارية، ويسعف القدرة على التكيف مع التغيرات المفاجئة والمتركرة في أنماط الاستخدام. بالإضافة إلى ذلك، فإن غياب قاعدة بيانات موحدة وشاملة يحد من قدرة أنظمة إدارة الطاقة على التنبؤ والتفاعل بكفاءة مع التغيرات

التشغيلية، ويؤثر بشكل مباشر على تحسين كفاءة استهلاك الطاقة، وتقليل الهدر، ودعم استدامة المبني في بيئة تعتمد بشكل متزايد على الحلول الرقمية والتقنيات الذكية.

٣-١-أسئلة البحث:

١. كيف يمكن تطوير أنظمة إدارة طاقة المبني بحيث تكون أكثر كفاءة واستجابة للنمو المستمر في الطلب على الطاقة، مع الأخذ بعين الاعتبار الدور المحوري لأنظمة التدفئة والتهوية والتبريد (HVAC) في استهلاك الطاقة وتحفيض الضغط على الشبكة الكهربائية العامة؟
٢. كيف تساهم نمذجة معلومات البناء (BIM) في دعم تصميم أنظمة إدارة طاقة مرنة، قادرة على التكيف مع التغيرات المفاجئة أو المتكررة في الأحمال الحرارية والكهربائية، وخاصة تلك المتعلقة بأنظمة HVAC، مع الحفاظ على كفاءة التشغيل واستقرار الأداء؟
٣. إلى أي مدى يمكن توظيف الإمكانيات المتقدمة التي توفرها نمذجة معلومات البناء، من حيث البيانات الدقيقة والمحدثة، في تحسين كفاءة إدارة الطاقة للمبني، خصوصاً من خلال تعزيز أداء أنظمة HVAC وتقليل الهدر الطاقي؟ وما الأدوات التقنية الأنسب لتحقيق ذلك؟
٤. ما هو الدور الذي يمكن أن يلعبه تكامل نمذجة معلومات البناء (BIM) مع نظام إدارة طاقة المبني (BEMS) وأنظمة الفرعية المرتبطة به، وبشكل خاص نظام التدفئة والتهوية والتبريد، في تطوير حلول أكثر كفاءة ومرنة قادرة على الاستجابة للتغيرات المستمرة في الأحمال والظروف التشغيلية للمبني من خلال نماذج قابلة للتعديل والمحاكاة؟

٤-١-أهداف البحث:

١. تحليل واقع استهلاك الطاقة الكهربائية في المبني مع التركيز على أحمال ال HVAC باعتبارها أحد الأنظمة الفرعية الأساسية في أنظمة إدارة المبني وأكثرها استهلاكاً للطاقة.
٢. نمذجة المبني بما يتضمنه من أنظمة (HVAC) باستخدام أدوات BIM، خاصة Revit، بغرض بناء نموذج ثلاثي الأبعاد ديناميكي، يمكن تعديله بسهولة لمواكبة التغيرات في الأحمال، وتقدير أداء نظام إدارة الطاقة من خلال محاكماته.

3. توظيف إمكانيات نمذجة معلومات البناء في تصميم نظام ذكي لإدارة الطاقة، من خلال الاستفادة من بيانات النموذج – بما في ذلك الشكل الثلاثي الأبعاد والخصائص الفيزيائية للمبنى – بهدف تنظيم الأحمال الكهربائية، وتحسين كفاءة التشغيل، وتقليل الاستهلاك، وإجراء محاكاة لأداء نظام بهدف تقييم كفاءته التشغيلية و اختيار السيناريو الأمثل الذي يحقق أعلى كفاءة تشغيلية لأنظمة HVAC وبالتالي أنظمة الـBEMS.

4. دراسة فرص التكامل بين BIM وBEMS وتحليل أثره في تحسين الأداء الطاقي للمبنى، وتقليل الاستهلاك ودعم تصميم أنظمة مرننة لإدارة الطاقة، تستجيب بفعالية للتغيرات المستمرة في الأحمال والظروف التشغيلية للمبنى.

١-٥- فرضيات البحث:

1. يُسهم دمج نمذجة معلومات البناء مع أنظمة إدارة المبني في تطوير أنظمة ذكية لإدارة الطاقة، ترکز بشكل خاص على كفاءة أنظمة (HVAC)، مما يؤدي إلى تقليل الاستهلاك وتحسين الأداء الطاقي.

2. توفر نماذج BIM – وخاصة باستخدام أدوات مثل Revit – قاعدة بيانات دقيقة وشاملة تُستخدم في تصميم ومحاكاة أنظمة HVAC، مما يُمكّن من تقييم أدائها مبكراً و اختيار السيناريو الأمثل من حيث الكفاءة والتكاليف.

3. تُعزز نمذجة معلومات البناء بما تتضمنه من بيانات دقيقة ومحذثة المرونة التصميمية لأنظمة إدارة الطاقة، من خلال تمكين التعديل السريع على التصميم المعماري والتقني، والتنبؤ بتأثير هذه التغيرات على أداء أنظمة HVAC قبل التنفيذ.

4. يُسهم التكامل بين BIM وBEMS في تحسين دقة البيانات التشغيلية والتنبؤية لأنظمة HVAC، مما يُمكّن من استجابة ديناميكية فعالة للتغيرات في الأحمال الحرارية وظروف التشغيل.

5. يمكن لاستغلال بيانات النموذج الرقمي في مراحل التصميم المبكرة أن يقلل من الهدر الطاقي في أنظمة HVAC، ويدعم اتخاذ قرارات هندسية مرننة تُراعي التغيرات المستقبلية في استخدام المبني ومتطلبات الراحة الحرارية.

٦-١-أهمية البحث:

- **الأهمية النظرية (العلمية):** يكتسب هذا البحث أهميته من سدّه لفجوة بحثية تتمثل في ضعف التكامل بين نمذجة معلومات البناء وأنظمة إدارة الطاقة في المبني ، خصوصاً في مراحل التصميم المبكر، حيث تتركز الدراسات السابقة على استخدام BIM في التصميم أو BEMS في التشغيل بشكل منفصل، دون ربط فعال بين النموذج الرقمي والتحكم الذكي. ويعُد من الدراسات القليلة التي تُحلل دور BIM كأداة داعمة للتصميم المرن والمستدير لأنظمة إدارة الطاقة، مع تركيز خاص على أنظمة الـ HVAC - الأكثر استهلاكاً للطاقة. ويُقدم إطاراً نظرياً يربط البيانات الوصفية والهندسية للنموذج الرقمي (BIM) بأداء الأنظمة الفرعية في BEMS، مما يُثيري القاعدة المعرفية حول كيفية استثمار نماذج BIM لتحسين الكفاءة الطاقية قبل التنفيذ. كما يُسهم في تطوير مفهوم "المرونة التصميمية" من خلال إثبات أن نماذج BIM ليست أداة تمثيل فحسب، بل أداة ديناميكية تُمكن من اختبار سيناريوهات متعددة وتحليل تأثير التغيرات في التصميم أو الاستخدام على أداء أنظمة HVAC، وبالتالي اتخاذ قرارات أكثر دقة. إضافةً إلى ذلك، يعزز الفهم النظري للتكامل بين BIM وأنظمة الذكاء (BEMS) من خلال تحليل كيفية تحويل البيانات الثابتة في مرحلة التكامل إلى بيانات تشغيلية قابلة للتطبيق فعلياً، مما يفتح آفاقاً لنماذج ذكية قابلة للتكيف مع الظروف المتغيرة، ويدعم الانتقال نحو مبني أكثر استدامة وكفاءة.
- **الأهمية التطبيقية (العلمية):** تتجلى الأهمية التطبيقية لهذا البحث في إبراز دور نمذجة معلومات البناء كأداة فعالة لتصميم أنظمة إدارة الطاقة، وبخاصة أنظمة الـ HVAC التي تمثل النسبة الأكبر من الاستهلاك الطاقوي. ويُظهر القسم العملي كيف يمكن استخدام نماذج BIM عبر أدوات مثل – Revit لإنشاء نموذج رقمي ديناميكي يُمكن من تقييم أداء أنظمة التبريد والتدفئة، واختبار سيناريوهات تشغيل مختلفة بدقة وسرعة. كما يُبرز البحث المرونة العالية التي يوفرها BIM عند حدوث تغيرات في التصميم أو استخدام المبني، حيث يُمكن تعديل النموذج وإعادة محاكاة تأثيراتها على الأحمال الحرارية دون إعادة التصميم من جديد. ويسهم هذا النهج في تقليل الأخطاء، وتحسين الكفاءة، واتخاذ قرارات مبنية على بيانات

دقيقة قبل التنفيذ، مما يخفض التكاليف ويعزز فعالية الأنظمة. وبالتالي، يُعد النموذج المقترن قابلاً للتطبيق في المشاريع الحقيقية، ويدعم التصميم الذكي والمرن لتحقيق مباني أكثر كفاءة واستدامة.

7-منهج البحث:

يعتمد البحث على منهجية تحليلية-تطبيقية قائمة على النماذج الرقمية، تهدف إلى دراسة دور نماذج معلومات البناء (BIM) في تحسين كفاءة أنظمة إدارة الطاقة، مع تركيز خاص على أنظمة HVAC باعتبارها الأكثر استهلاكاً للطاقة. ويبني البحث على نموذج مبني افتراضي تم تطويره باستخدام برنامج Revit، يضمن تفاصيل معمارية وهندسية دقيقة لأنظمة HVAC ويستخدم النموذج كمنصة ديناميكية لمحاكاة الأداء الطاقي، واختبار تأثير سيناريوهات متعددة تتعلق بمتغيرات في التصميم أو أنماط الاستخدام، بهدف تقييم المرونة التصميمية وتحسين الكفاءة. وتحلّ إمكانات تكامل نموذج BIM مع متطلبات نظام (BEMS) من خلال دراسة تحويل بيانات التصميم إلى مدخلات تشغيلية قابلة للتطبيق. وبهذا، يوظف BIM ليس كأداة تمثيل فحسب، بل كمنصة لدعم التصميم القائم على الأداء، ويبني النتائج على تحليل كمي ونوعي لبيانات المحاكاة لتقدير فعالية النموذج المقترن في تقليل الهدر الطاقي وتعزيز الكفاءة.

8-أدوات البحث:

- **النظرية:** تتمثل في مراجعة وتحليل الأدبيات العلمية والدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع البحث، وذلك من خلال الرجوع إلى الأبحاث المتخصصة، والمقالات العلمية الحديثة المنشورة ضمن الدوريات والمجلات المحكمة الدولية. كما تشمل الأدوات النظرية الاستقادة من قواعد البيانات الأكاديمية الموثوقة مثل (ScienceDirect, IEEE Xplore, Google scholar, Wiley, Elsevier) إضافة إلى البحث والمطالعة في موقع الانترنت المختلفة.

- **التطبيقية:** يعتمد الجانب التطبيقي للبحث على استخدام برنامج Autodesk Revit كأداة رئيسية لنمذجة معلومات البناء حيث يبني نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد دقيق يشمل جميع عناصر المبنى بما فيها أنظمة HVAC ويستفاد من النموذج في تحليل الأداء الطاقي، وتقييم الأحمال الحرارية، ومحاكاة تأثير

التغيرات التصميمية على كفاءة النظام، من خلال استغلال قدرات Revit في التحليل المبكر والتصور البياني. ويرز هذا النهج دور BIM كأداة ديناميكية لدعم التصميم المرن والمستند إلى الأداء، حتى في غياب أدوات محاكاة خارجية، من خلال استفادة كاملة من البيانات المدمجة في النموذج.

1-9-مجتمع الدراسة وعيتها:

• **مجتمع الدراسة:** يشكل مجتمع الدراسة المبني ذات الاستهلاك العالي للطاقة، مثل المبني الإدارية، الطبية، والعلمية، والتي تعتمد بشكل كبير على أنظمة ميكانيكية وكهربائية متقدمة، تُعدّ أنظمة التدفئة والتقوية والتبريد أبرزها من حيث استهلاك الطاقة، حيث تمثل 40-60% من الاستهلاك الكلي. وتُعدّ هذه المبني بيئه مناسبة لدراسة تكامل نمذجة معلومات البناء مع أنظمة إدارة طاقة المبني، نظراً لتعقيد أنظمتها، و حاجتها المستمرة إلى التكيف مع التغيرات في أنماط الاستخدام، ومتطلبات الكفاءة الطاقية واعتمادها على الأنظمة الذكية. كما تتيح فرصاً كبيرة لتحسين الكفاءة الطاقية من خلال دعم التصميم المرن واتخاذ قرارات مبنية على البيانات. وبما أن طبيعة هذه المبني قابلة للتكرار، فإن نتائج البحث يمكن تعميمها لتحسين أداء مشاريع مشابهة، ودعم الانتقال نحو مبني أكثر استدامة وذكاءً.

• **عينة الدراسة:** تمثل عينة الدراسة في مبني نموذجي ذي استهلاك عالٍ للطاقة، تم اختياره كحالة تطبيقية لتصميم وتحليل نظام إدارة طاقة ذكي يرتكز على نمذجة معلومات البناء. تم تطوير نموذج رقمي دقيق لهذا المبني باستخدام برنامج Revit، يتضمن التفاصيل المعمارية والهندسية لأنظمة HVAC كأحد أكبر مكونات الأحمال الكهربائية. ويستخدم النموذج كمنصة ديناميكية لمحاكاة الأداء الطاقي، وتحليل الأحمال الحرارية، واختبار تأثير التغيرات التصميمية والتشغيلية، مما يُبرز دور BIM في دعم المرونة التصميمية واتخاذ قرارات مبنية على الأداء. وبهذا الشكل، تمثل العينة إطاراً عملياً لاختبار كفاءة النموذج المقترن في تحسين إدارة الطاقة قبل التنفيذ.

10-حدود البحث:

• **الحدود الزمنية:** يغطي الإطار الزمني الفترة الممتدة من حزيران 2025 وحتى آب 2025 وهي الفترة التي يتم خلالها جمع المعلومات، بناء النموذج في برنامج Revit، تصميم نظام HVAC، تحليل أدائه

باستخدام نمذجة معلومات البناء وتطبيق سيناريوهات مختلفة لإظهار المرونة التصميمية التي تتمتع بها بيئة BIM.

- **الحدود المكانية:** لا يرتبط البحث بمكان جغرافي محدد، إذ يعتمد على نموذج مبني افتراضي تم تطويره باستخدام برنامج Revit ، يمثل بيئة نموذجية ذات استهلاك عالي للطاقة. ويُستخدم هذا النموذج كأداة تحليلية لدراسة تكامل نمذجة معلومات البناء مع أنظمة إدارة الطاقة، مع تركيز خاص على أداء أنظمة HVAC .
- **الحدود البشرية:** لا يتضمن هذا البحث أي عنصر بشري مباشر في جمع البيانات أو التحليل، حيث لا يعتمد على استبيانات، مقابلات، أو دراسة سلوك المستخدمين. بل يرتكز كلياً على نموذج رقمي افتراضي تم تطويره باستخدام برنامج Revit ، ويركز على التحليل الهندسي والتكنولوجي لأنظمة إدارة الطاقة، وبخاصة أنظمة HVAC ، من خلال توظيف نمذجة معلومات البناء (BIM) لدعم المرونة التصميمية وتحسين الكفاءة الطاقية. وبالتالي، لا يُعد الإنسان موضوعاً للدراسة، وإنما يظهر البعد البشري على مستوى المستفيدين المستقبليين من البحث، وخصوصاً المهندسين والمصممين الذين يمكنهم الاستفادة من هذا النهج في تطوير نماذج ذكية ومرنة لتحسين أداء المبني قبل تنفيذها.

11-1- مصطلحات البحث:

- **BEMS (نظام إدارة طاقة المبني- Building Energy Management System):** نظام ذكي يُستخدم لمراقبة والتحكم في الأنظمة الميكانيكية والكهربائية في المبني، مثل الإضاءة، التكييف، والتدفئة، بهدف تحسين الكفاءة الطاقية، وضمان الراحة الحرارية، وتقليل الاستهلاك. ويعُد نظام إدارة الطاقة جزءاً أساسياً من بيئة المبني الذكي.
- **BIM (نمذجة معلومات البناء- Building Information Modeling):** منهجة رقمية تعتمد على إنشاء وتحليل نموذج ثلادي الأبعاد ذكي يحتوي على بيانات وصفية وهندسية دقيقة عن المبني، تُستخدم عبر دورة حياته من التصميم إلى التشغيل. ويعُد BIM أداة داعمة للتنسيق، المحاكاة، واتخاذ القرار، وخصوصاً في مراحل التصميم المبكر.
- **HVAC (أنظمة التدفئة والتهوية- Heating, Ventilation, and Air Conditioning) :** مجموعة الأنظمة المسؤولة عن تنظيم الظروف الحرارية والهوائية داخل المبني، وتحتوى من أكبر مكونات

الأحمال الكهربائية، حيث تمثل ما بين 40–60% من إجمالي استهلاك الطاقة في المباني التجارية وال المؤسسية. ويركز هذا البحث على HVAC باعتبارها النظام الفرعي الأكثر تأثيراً في أداء BEMS ، والأكثر استفادة من دقة بيانات النموذج الرقمي (BIM) في التنبؤ بالأحمال الحرارية وتحسين الكفاءة.

• **المرونة التصميمية (Design Flexibility):** قدرة النموذج أو النظام على التكيف مع التغيرات في المتطلبات الوظيفية، التوزيع الداخلي، أو أنماط الاستخدام دون الحاجة إلى إعادة التصميم من الصفر. وتعود من المفاهيم المحورية في هذا البحث، حيث يُبرز دور BIM في تمكين التعديلات السريعة وتحليل تأثيرها على أداء أنظمة الـ HVAC.

• **التكامل بين BIM و BEMS:** عملية ربط النموذج الرقمي (BIM) بنظام إدارة المباني (BEMS) لتحويل بيانات التصميم إلى مدخلات تشغيلية فعالة، مما يحسن التنبؤ بالأداء، ويدعم التحكم الذكي، ويعزز الكفاءة عبر دورة حياة المبنى.

• **نموذج معلومات البناء (BIM Model):** الناتج العملي لتطبيق منهجة BIM ، ويتمثل نموذجاً رقمياً ثلاثي الأبعاد غنياً بالبيانات، يشمل العناصر المعمارية، الإنسانية، والميكانيكية، ويستخدم لأغراض المحاكاة، التحليل، والتسيق بين التخصصات وفي هذا البحث، لا يعتبر النموذج مجرد أداة تمثيل، بل أداة تجريبية تُستخدم لاختبار سيناريوهات متعددة، تقييم الأداء الطاقي، وتحليل تأثير التغيرات التصميمية على كفاءة النظام، مما يسهم في تقليل الهدر ودعم الاستدامة.

الفصل الثاني: الإطار النظري

2-1-القسم الأول: الدراسات المرجعية:

لقد سبقت إعداد هذا القسم عملية مراجعة شاملة لعدد كبير من الأوراق البحثية والمقالات العلمية المحكمة المنشورة في مجلات عالمية مرموقة، مع إيلاء اهتمام خاص بأحدث الدراسات المرتبطة بموضوع البحث. وبناءً على التحليل النقدي والمقارنة، تم انتقاء المقالات الأكثر صلة، والتي يتراوح تاريخ نشرها بين عامي 2018 و2024.

1-1-2-الدراسة الأولى:

Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review	اسم البحث:
2024	السنة:
MPDI	الناشر:
Buildings	المجلة:
38	عدد الاستشهادات:
• في إطار السعي نحو تحسين كفاءة الطاقة في المبني، أجرى الباحثون في هذه الدراسة (Alhammad et al., 2024) مراجعة منهجية لدمج تقنيتي BIM و BEM كأداة محورية لتعزيز الأداء الطاقي خلال مراحل التصميم والتنفيذ. وقد أظهرت النتائج أن هذا الدمج لا يقتصر على تبادل البيانات، بل يمكن من توليد نماذج طاقية دقيقة تعتمد على المعلومات الهندسية والوظيفية من نموذج BIM.	
• تناولت المراجعة الدور الداعم لتقنية BIM في تصميم أنظمة BEM، وخاصة أنظمة HVAC. وأشارت إلى أن دمج BIM مع BEM يُمكن المهندسين من محاكاة أداء أنظمة HVAC بدقة عالية من خلال توفير بيانات شاملة حول توزيع المساحات، وخصائص المواد، واتجاه المبني، وأنماط الازدحام. كما أكدت الدراسة أن أدوات مثل Autodesk Insight و Autodesk Green Building Studio تعتمد على نماذج BIM لتوليد	

تحليلات طافية فورية، وتحتاج لمحاكاة استجابة أنظمة HVAC لظروف تشغيل مختلفة، وبالتالي دعم اتخاذ قرارات مبنية على البيانات.

- من أبرز ما ناقشه المراجعة هو المرونة التصميمية التي يوفرها BIM عند حدوث تغيرات في الأحمال الحرارية أو وظائف الغرف أو التصميم المعماري. فقد أوضحت الدراسة أن الاعتماد على نموذج BIM مركزي يسمح بإعادة تقييم الأداء الطاقي بشكل شبه فوري عند أي تعديل في التصميم، مثل تغيير توزيع الفراغات أو استبدال مواد الواجهات. وهذا يمنح فرق التصميم قدرة استجابة عالية، حيث يمكنهم تقييم تأثير كل تغيير على استهلاك الطاقة وعلى أداء نظام HVAC، دون الحاجة إلى إعادة نسخة كاملة من الصفر. كما أشارت الدراسة إلى التحديات في التكامل البيني بين BEM و BIM، مشيرة إلى أن تنسيقات التبادل مثل IFC و gbXML لا تزال تعاني من قيود في نقل بيانات الأنظمة المعقدة، مثل (CHP)، أو Combined Heat and Power (CHP). ومع ذلك، خلص الباحثون إلى أن الاتجاه نحو النماذج الديناميكية والقابلة للتحديث، مثل Digital Twins، يُعد خطوة استراتيجية نحو تحقيق مرونة تامة في التصميم والتشغيل.
- وبالتالي، تُعد هذه المراجعة مرجعاً مهماً يُظهر كيف يمكن لـ BIM أن يتجاوز كونه أداة تصميم معماري ليصبح منصة تكاملية تُسهم في تطوير حلول HVAC أكثر كفاءة ومرنة، وتدعم تحقيق أهداف الاستدامة منذ المراحل المبكرة من المشروع.

2-1-2- الدراسة الثانية:

Optimizing Building Energy Modeling (BEM) Workflow through Integrating HVAC systems Design and Building Information Modeling (BIM)using gbXML Schema Version 6.01	اسم البحث:
2023	السنة:
	الناشر:
Carnegie Mellon University	المجلة:
1	عدد الاستشهادات:

- استعرضت دراسة (Sun) الفجوة الحرجية في سير عمل التصميم المتكامل بين نمذجة معلومات البناء (BIM) ونمذجة أداء المباني (BEM)، مع ترکيز دقيق على قدرة BIM على دعم تصميم أنظمة (HVAC). بيّنت أن الممارسة الشائعة تقصر على استيراد بيانات الهندسة من نماذج BIM إلى أدوات التحليل الطاقي، بينما تُعاد إنشاء تفاصيل أنظمة HVAC يدوياً، مما يُفقد الميزة الأساسية لـ BIM، وهي التماสك والاتساق في تدفق المعلومات. وأشارت إلى أن هذا التدفق غير المكتمل يُسهم في مشكلات شائعة مثل تصميم أنظمة HVAC الأكبر من اللازم (Oversizing)، واستهلاك الطاقة الزائد، وانخفاض معدلات الرضا الحراري.
- حللت الدراسة التحديات التقنية التي تعيق تكامل بيانات HVAC في سير عمل BIM-BEM من خلال تحليل تفصيلي لقواعد رسم الخرائط بين نموذج (IDF) EnergyPlus ومخطط gbXML (الإصدار 6.01). كشف التحليل عن ثلاثة عقبات رئيسية: غياب عناصر تمثيلية لبعض مكونات الأنظمة الحرارية، وصعوبة تفسير منحنيات أداء المعدات، وتعقيد العلاقات المرجعية بين العناصر في مخطط gbXML. ومن ثم، اقترحت إعادة تعريف هذه القواعد بنموذج هرمي من الأسفل إلى الأعلى، يربط المساحات (Spaces) بالمعدات، والمناطق (Zones) بالنظام الأساسي، مما يُبسط عملية التكامل ويجعلها أكثر قابلية للتوثيق.
- تناولت الدراسة بشكل مباشر مفهوم المرونة التصميمية، وربطته بقدرة نموذج البيانات على استيعاب التغيرات. أكدت أن المرونة الحقيقة لا تتحقق إلا من خلال تبادلية كاملة للبيانات، تسمح بأتمتها التحديات. فعندما تتغير وظيفة الغرفة أو يُعدل عزل الغلاف أو تُستبدل معدات HVAC، يجب أن يعكس هذا التغيير تلقائياً في نموذج الأداء. وتم التحقق من هذا المفهوم من خلال دراسة حالة على مبني مكتبي، حيث أدخل نموذج gbXML المحدث (الذي يحتوي على بيانات HVAC واقعية) إلى بيئة OpenStudio/EnergyPlus. أظهرت النتائج تحسيناً في دقة محاكاة استهلاك الطاقة مقارنةً بنموذج يستخدم أنظمة مثالية، مما يثبت إمكانية تحسين دقة التحليل من خلال دمج بيانات أنظمة HVAC من BIM.
- أكدت الدراسة على أن القيمة الجوهرية لـ BIM لا تكمن في النموذج ثلاثي الأبعاد، بل في قدرته على أن يكون نموذجاً معلوماتياً ديناميكياً يُحدث حلقة مغلقة بين التصميم والتحليل. وقدمت إطاراً عملياً لتحويل gbXML من مجرد ناقل للهندسة إلى وسيلة لتبادل كامل للمعلومات، بما في ذلك تفاصيل الأنظمة الحرارية. ورغم أن التحقق كان محدوداً بجزء من بيانات النظام (مثل بيانات الغلاية)، فإن النهج المنهجي لتشخيص المشكلة واقتراح حل موثق يُعد إسهاماً مهماً في تطوير سير عمل تصميم متكامل. وتم التلميح إلى أن إكمال هذا التكامل يتطلب تغطية شاملة لجميع بيانات الأداء، مثل منحنيات كفاءة المضخات والمبردات، وتوسيع نطاق التحليل ليشمل تقييمات الراحة الحرارية الكمية، مثل حساب قيم PMV، وهو ما يفتح المجال لدراسات مستقبلية أكثر شمولًا.

3-1-3- الدراسة الثالثة:

Enhancing Energy Efficiency and Building Performance through BEMS–BIM Integration	اسم البحث:
2023	السنة:
MPDI	الناشر:
Energies	المجلة:
31	عدد الاستشهادات:
<p>• أجرى الباحثون (Kozlovska et al., 2023) مراجعة علمية شاملة لتقدير إمكانات دمج نمذجة معلومات البناء مع أنظمة إدارة الطاقة في المبني، مع التركيز على الدور التأسيسي لـ BIM في دعم تصميم وتشغيل أنظمة BEMS ، لا سيما أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء . أوضح الباحثون أن BIM يتجاوز كونه أداة تصميم معمارية ليشكل العمود الفقري الرقمي لتصميم نظام BEMS ، حيث يتم ربط بيانات نقاط القياس (قراءات المستشعرات واستهلاك الكهرباء) بنموذج BIM الدقيق، الذي يصدر غالباً بتنسيق IFC لضمان التوافق بين الأنظمة. يمكن هذا الدمج مصممي أنظمة BEMS من إجراء تحليلات أداء طاقي مبكرة ودقيقة، مما يسهم في اتخاذ قرارات حاسمة تتعلق بحجم الأنظمة (System Sizing) ، وتوجيه المبني، وتصميم الغلاف، وكلها عوامل تؤثر بشكل مباشر على كفاءة أنظمة HVAC ، وبالتالي يتحول BIM من مجرد نموذج بصري إلى منصة ديناميكية لمحاكاة وتحسين الأداء الطاقي قبل بدء التشغيل.</p>	
<p>• من أبرز الجوانب التي تميز هذه الدراسة هو تأكيدها على المرونة التصميمية والتشغيلية التي يوفرها هذا الدمج. فقد بيّنت أن النظام المتكامل يمكن من التكيف الفعال مع التغيرات في دورة حياة المبني. فعند حدوث تغييرات في الأحمال (مثل تحويل غرفة من مكتب إلى مركز بيانات، أو تغيير أنماط الازدحام)، يمكن لمديري المرافق استخدام نموذج BIM لتحديد تأثير هذه التغيرات على استهلاك الطاقة، وتعديل جداول التحكم في أنظمة HVAC بشكل دقيق. كما أشار الباحثون إلى أن التحديات على النظام (مثل استبدال مستشعرات أو إجراء تجديدات) يمكن إدارتها بسهولة، حيث يتم تحديث النموذج الرقمي بشكل محلي دون الحاجة لإعادة بناء النظام بالكامل، مما يقلل من التعقيد ويوفر الوقت والتكلفة على المدى الطويل.</p>	
<p>• تُعد هذه المراجعة إضافة قيمة للحقل البحثي، حيث تقدم تحليلاً بيبلومترياً دقيقاً يُظهر اتجاهات البحث العالمية، وتقدم نظرة شاملة تجمع بين الجوانب النظرية والتطبيقية من خلال عرض دراسات حالة واقعية (مثل تحويل</p>	

ميناء أنزيو إلى منطقة طاقة صفرية). كما تبرز الدراسة التحديات التقنية والتنظيمية، مثل التوافقية ونوعية البيانات، وتقدم توصيات عملية للتغلب عليها، مما يعزز من مصداقية وقيمة النتائج.

- من جهة أخرى، تُظهر الدراسة تركيزاً قوياً على الجوانب التقنية للدمج، بينما تُبقي على مسافة من مناقشة التحديات البشرية والتنظيمية بشكل عميق، مثل مقاومة التغيير من قبل المشغلين، أو نقص المهارات في الفرق الحالية، وهي عوائق عملية شائعة في التنفيذ. كما أن الإشارة إلى "الاختلافات الدلالية بين التخصصات" كمصدر لعدم اليقين تُقر بوجود فجوة، لكنها لا تُقدم إطاراً مفصلاً لكيفية توحيد المصطلحات والمناهج بين مهندسي HVAC ومهندسي BIM ومشغلي الأنظمة، وهي خطوة ضرورية لضمان سلاسة التعاون. أخيراً، وعلى الرغم من الإشارة إلى أهمية تحليل عدم اليقين، فإن الدراسة لا تُعمق في مناقشة كيفية تضمين هذا التحليل في مرحلة التصميم الأولية لنظام BEMS ، والذي يُعد ضرورياً لضمان موثوقية التنبؤات في ظل ظروف التشغيل المتغيرة.
- وبالتالي، تُقدم هذه المراجعة العلمية تحليلاً قوياً ومتوازناً للإمكانيات التحويلية لدمج BIM-BEMS ، وتوّكّد على الدور المحوري له BIM في توجيه تصميم أنظمة الطاقة، وتتوفر رؤية واضحة حول المرونة التي يوفرها هذا الدمج. ومع ذلك، فإن المجالات التي لم تستكشف بالكامل، مثل التحديات التنظيمية والمنهجيات التفصيلية لتحليل عدم اليقين، تُشير إلى فرص بحثية مهمة يمكن لدراسات لاحقة أن تُساهم في سدها.

٤-١-٤- الدراسة الرابعة:

BIM-based analysis of energy efficiency design of building thermal system and HVAC system based on GB50189-2015 in China	اسم البحث:
2021	السنة:
International Journal of Low-Carbon	الناشر:
academic.oup.com	المجلة:
30	عدد الاستشهادات:

- قام الباحثون (Zhao et al., 2021) في هذه المقالة بدراسة تطبيق الـ (BIM) في تصميم كفاءة الطاقة لأنظمة التدفئة والتهوية والتكييف مع التركيز على تكامل التحليل الطاقي مع عملية التصميم. استخدم الباحثون منهجية محسنة تجمع بين منصة BIM وطريقة الحكم بالمقاييسة (Trade-off) الواردة في المعيار الصيني GB50189-2015، حيث تم دمج نموذج Revit مع برنامج المحاكاة Ecotect لدراسة تأثير معايير الغلاف الخارجي على أحمال التبريد والتدفئة. وقد أظهرت النتائج أن هذه الطريقة تمكن من تحديد التوليفة المثلثة للغلاف، مما يسهم في تحسين كفاءة الطاقة منذ المراحل الأولية للتصميم. بالنسبة لتصميم أنظمة HVAC، بين الباحثون أن توظيف BIM يتيح بيئة تفاعلية لفحص الاتصالات العادي والمنطقية بين عناصر النظام، واكتشاف التصادمات، وتحليل الأداء الهيدروليكي والهوائي. كما أن الطبيعة البارامترية للنموذج تسمح بتحديثات تلقائية في جميع مكونات المشروع عند إجراء أي تعديل، مثل تغيير موقع وحدة تكييف أو تعديل قطر أنبوب، مما يقلل من الحاجة إلى التعديلات اليدوية المتكررة، ويسهل التعامل مع التغيرات في وظائف المساحات أو متطلبات الأحمال. ومع ذلك، لاحظ الباحثون تحديات تتعلق باستقرارية واتساق البيانات عند تبادل النماذج بين برامج مختلفة، حيث أظهرت نتائج المحاكاة تبايناً في بعض الفصول، ما يشير إلى ضعف في تدفق المعلومات. كما أشاروا إلى أن طريقة حساب الأحمال في Revit تعتمد على معايير أمريكية (ASHRAE)، في حين أن التصميم في الصين يخضع لمعيار GB50736-2012، مما يمنع استخدام نتائج المحاكاة مباشرةً في التصميم. بالإضافة إلى ذلك، ركز الباحثون على نقص المكتبات البارامترية (families) في برنامج Revit، حيث يضطر المصممون إلى إنشاء نماذج مخصصة لكل معدات HVAC، مما يزيد من عبء العمل ويقلل من الكفاءة. تقدم هذه الدراسة إطاراً تطبيقياً لكيفية دعم BIM لتصميم أنظمة HVAC بكفاءة، مع التأكيد على أهمية التكامل بين النماذج والمحاكاة، وتحديد التحديات التقنية والتنظيمية التي تواجه تعميم هذه التقنية، خاصة في السياقات الخاضعة لمعايير وطنية محددة.

2-1-5-الدراسة الخامسة:

BIM and BEM Methodologies Integration in Energy-Efficient Buildings Using Experimental Design	اسم البحث:
2021	السنة:
MDPI	الناشر:
Buildings	المجلة:

- انطلق الباحثون (González et al., 2021) في هذه الدراسة من إدراهم لأهمية التكامل بين نمذجة معلومات البناء (BIM) ونمذجة أداء المبنى من حيث الطاقة (BEM) كأحد السبل الفعالة لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المباني السكنية، خاصة في المراحل المبكرة من التصميم. وركزوا على تقييم تأثير عوامل متعددة تشمل كفاءة الإضاءة، استهلاك الأجهزة الكهربائية (الحمل الموصول)، وأنواع أنظمة التبريد والتدفئة والتقوية على مؤشر كثافة استهلاك الطاقة (EUI)، وذلك عبر تطبيق منهجية التصميم التجاري (Experimental Design) على نموذج سكني تم نقله من (Revit) إلى أداة (Insight) لإجراء المحاكاة الطافية، مع تحليل النتائج إحصائياً باستخدام برنامج Minitab، واعتماد تحليل التباين (ANOVA) والانحدار الخطي لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً
- تُعد الدراسة إضافة مهمة إلى أدبيات دمج منهجيتي BIM وBEM، حيث أظهرت كيف يمكن لنموذج BIM أن يتجاوز كونه أداة تمثيل هندسي ليصبح منصة مركزية تُغذى نمذجة الأداء الطافي ببيانات دقيقة ومنظمة، مما يقلل من أخطاء التبادلية التي تُعاني منها الدراسات المعتمدة على نقل يدوي للبيانات أو عبر صيغ مثل gbXML. ويرزق الباحثون الدور المحوري لأنظمة HVAC في استهلاك الطاقة، حيث تُظهر النتائج هيمنة تأثيرها، خاصة في المناخات الحارة مثل دبي، مما يسهم في توجيه التصميم نحو تحسين كفاءة هذه الأنظمة منذ البداية.
- كما تُظهر الدراسة قدرة النموذج الرقمي على التكيف مع تعديلات في معايير التصميم، مثل كفاءة الإضاءة أو حمل الأجهزة أو نوع نظام التكييف، مع تحديث تلقائي للنتائج الطافية. ويدعم هذا التكيف الاعتماد على تصنيف "نوع الفراغ" (Space Type)، الذي يمكن من ربط كل فراغ بكثافات أحمال حرارية وجداول استخدام محددين، مما يسهل التعامل مع التغيرات في وظائف الغرف، ويقلل الجهد اليدوي، ويُظهر كيف يمكن لـ BIM أن يصبح أداة ديناميكية لدعم اتخاذ القرار.
- مع ذلك، تشير الدراسة إلى جانب تتطلب مزيداً من التأمل، منها اقتصار التطبيق على بيئة أتوبيسك ونموذج سكني واحد، ما قد يقلل من قابلية التعميم. كما أن الاعتماد على خصائص مواد من مصادر خارجية، مع غياب المعايير الميدانية، يُبقي مجال التساؤل حول دقة التمثيل الحراري. إضافة إلى تثبيت متغيرات مؤثرة أخرى (كتسبة الفتحات والعزل)، وإغفال تأثير سلوك المستخدمين، رغم أهميته في الأداء الفعلي.
- بشكل عام، تقدم الدراسة إطاراً منهجياً متماسكاً يسهم في تعزيز التكامل بين التصميم والتحليل الطافي، وينظر إلى كيف يمكن لدمج BIM وBEM مع التحليل الإحصائي أن يسهم في تحسين الكفاءة الطافية من خلال قرارات

مبنية على البيانات، خاصة في تقييم أنظمة HVAC. ورغم بعض القيود، فإن المنهجية تمثل خطوة عملية نحو تصميم أكثر تكاملاً واستدامة، وتُشكل نموذجاً قابلاً للتعوييم على مشاريع مختلفة.

6-الدراسة السادسة:

Automatically creating HVAC control strategies based on Building Information Modeling (BIM): Heat provisioning and distribution	اسم البحث:
2020	السنة:
MDPI	الناشر:
Energies	المجلة:
24	عدد الاستشهادات:

- تقدم (Sporr et al., 2020) مساهمة متميزة في مجال تكامل نمذجة معلومات البناء (BIM) مع أنظمة إدارة وتشغيل المبني (BEMS)، حيث تتجاوز الاستخدام التقليدي لـ BIM في التصميم المعماري والهندسي. تركز الدراسة على تصميم أنظمة التحكم في أنظمة (HVAC)، وتبين كيف يمكن استخدام بيانات نموذج BIM القائم على معيار IFC (معيار فئات أساس الصناعة) لإنشاء تلقائي واستخراج لاستراتيجيات التحكم الكاملة، بدءاً من توريد الحرارة (مثل مضخات الحرارة، المراجل الغازية، وأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية) وصولاً إلى نظام التوزيع (مثل التدفئة الأرضية). هذا التحول من نموذج تصميم إلى "مصدر بيانات تشغيلية" يمكن من أتمتة عملية برمجة أنظمة BEMS، مما يقلل بشكل كبير من الجهد اليدوي والتكلفة المرتبطة بمرحلة التكليف، ويرتقي بـ BIM ليصبح أداة محورية في دورة حياة المبني.
- تُظهر الدراسة بوضوح كيف يمكن للنجاح القائم على BIM التكيف بسلاسة مع التغيرات التصميمية. كما يُوضح الباحثون في المقالة فإن الممكن التفاعل بسرعة مع التغييرات في الموصفات عن طريق إعادة تشغيل الخوارزمية بناءً على بيانات النموذج المحدثة هذا يعني أن أي تعديل في أحمال الطاقة، أو تغيير في وظيفة الغرف، أو إعادة هيكلة لنظام التوزيع، يمكن دمجه بسهولة في نموذج BIM، ثم تُستخدم الخوارزمية لاستخلاص استراتيجية تحكم جديدة تلقائياً. هذه القدرة على التكيف الديناميكي تمثل تقدماً كبيراً مقارنةً بالأساليب اليدوية، حيث توفر وقتاً وموارد هائلة خلال مراحل التخطيط التكراري. ومع ذلك، يجب الإشارة إلى أن هذه المرونة تثبت

من خلال محاكاة، ولا تزال بحاجة إلى تحقق من خلال تطبيق عملي على مشاريع حقيقية من مرحلة التصميم إلى التشغيل.

7-1-2 الدراسة السابعة:

Automated HVAC Control Creation based on Building Information Modeling (BIM): Ventilation System	اسم البحث:
2019	السنة:
IEEE access	الناشر:
IEEE explore	المجلة:
34	عدد الاستشهادات:

• قام (Sporr et al., 2019) في دراستهم بطرح منهجية آلية لإنشاء استراتيجيات تحكم لأنظمة التهوية (HVAC) بالاعتماد مباشرةً على بيانات نموذج BIM بصيغة IFC، موسّعين بذلك نطاق تطبيق ad BIM من مرحلة التصميم والبناء إلى مرحلة التشغيل والتحكم. ركز الباحثون على نظام التهوية القائم على جودة الهواء الداخلي، معتمدين على تركيز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) كمؤشر رئيسي، وطوروا تدفق عمل آلي يبدأ باستخراج بيانات الغرف، النوافذ، الأبواب، والمستشعرات والمحركات من ملفات IFC، ثم يُكمل البيانات الناقصة باستخدام معايير وطنية (مثل ÖNORM EN 16798-3) لتقدير عدد الأشخاص، تدفق الهواء، وساعات التشغيل. بناءً على هذه البيانات، تم إنشاء "استراتيجية تحكم أولية" تلقائياً باستخدام مكتبة من وحدات التحكم في بيئة محاكاة (Simulink)، مع نماذج فيزيائية لسلوك انتشار CO_2 .

• ثُبّرَت الدراسة المرونة التصميمية التي يوفرها ad BIM عند حدوث تغييرات في استخدامات المبني، مثل تعديل وظائف الغرف أو أحمال التهوية، حيث يمكن لأي تحديث في نموذج ad BIM أن يترجم تلقائياً إلى تعديل في استراتيجية التحكم دون تدخل يدوي. كما تناول الباحثون إمكانية تحسين النظام لاحقاً باستخدام بيانات التشغيل، مثل اكتشاف أعطال المستشعرات أو تعديل نقاط الضبط ديناميكياً لتحسين الراحة وتقليل استهلاك الطاقة.

- تُعد هذه الدراسة مثلاً مهماً على التكامل بين BIM وBEMS، وتُظهر كيف يمكن للبيانات البنائية أن تكون حجر الأساس في تصميم أنظمة تحكم ذكية وقابلة للتكييف، مع تحقيق مزايا كبيرة في تقليل الأخطاء البشرية، وخفض تكاليف التصميم والصيانة، وتحسين كفاءة الطاقة وراحة المستخدمين.
- رغم ذلك، تواجه الدراسة بعض القيود، منها الاعتماد الكبير على جودة البيانات في نموذج BIM، والتي غالباً ما تكون غير مكتملة أو غير قياسية، خاصةً فيما يتعلق بمكونات HVAC. كما اقتصرت على أنظمة التهوية دون التطرق إلى التدفئة أو التبريد، ولم تأخذ في الاعتبار التغيرات الديناميكية في الأحمال الحرارية.
- إجمالاً، تُعد الدراسة إضافة قيمة في مسار التحول الرقمي للمبني الذكي، وتُظهر إمكانات هائلة لاستخدام BIM كأداة ديناميكية لتصميم وتحديث أنظمة BEMS ، مع الحاجة إلى توحيد دولي أفضل لبيانات HVAC في معايير IFC وتطوير أدوات أكثر ذكاءً للتعامل مع التغيرات التشغيلية.

١-٨- الدراسة الثامنة:

Use Cases for Improved Analysis of Energy and Comfort Related Parameters Based on BIM and BEMS Data	اسم البحث:
2018	السنة:
springer	الناشر:
	المجلة:
13	عدد الاستشهادات:

- تُقدم دراسة (Petrushevski et al., 2018) إطاراً مفاهيمياً لتعزيز كفاءة تشغيل المبني من خلال دمج نموذجة معلومات البناء (BIM) مع أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS)، مع تركيز واضح على تحسين تحليل مؤشرات الطاقة والراحة. تُعد هذه الدراسة مرجعاً مهماً حيث تُظهر كيف يمكن لنموذج BIM أن يتجاوز دوره التقليدي في مراحل التصميم ليصبح أداة دعم قرار فعالة خلال مرحلة التشغيل.
- تُبرز الدراسة أن دورة حياة المبني تشهد تغيرات متكررة في الاستخدام، مما يستدعي أنظمة مرنّة قادرة على التكيف. في هذا السياق، يمكن لنموذج BIM، عند دمجه مع بيانات BEMS، أن يُمكن من تحليل ديناميكي يدعم التكيف مع التغيرات في وظائف المساحات أو في أنماط الاستخدام. ورغم أن الدراسة لا تركز على التفاصيل الهندسية لتصميم أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC)، فإنها تُظهر بوضوح كيف يمكن

لـ BIM دعم تشغيلها وتحسين أدائها. فعلى سبيل المثال، تُستخدم حالات الاستخدام (UC7) و(UC8) لعرض كيفية التحقق من تطابق نظام التهوية مع التصميم الأصلي، أو اقتراح تهيئة جديدة لنظام التحكم عند تغيير وظيفة غرفة. هذه العمليات تمثل شكلاً من أشكال المرونة التصميمية، تعتمد على توفر نموذج BIM غني بالمعلومات الدلالية، يربط بين الكائنات المعمارية ووظائفها ومتطلباتها التشغيلية.

- كما تُظهر الدراسة إمكانية استخدام النموذج الديناميكي (Dynamic BIM) في رصد التغيرات في استهلاك الطاقة أو في اكتشاف الشذوذ عبر عرض بياناتأجهزة الاستشعار في سياقها المكاني (UC1)، أو عبر مقارنة البيانات الحية مع نتائج محاكاة الطاقة (UC3). هذه القدرات تُسهم في اتخاذ قرارات استباقية، خاصة عند حدوث تغيرات في الأحمال الحرارية بسبب إضافة معدات أو تغيير في كثافة الاستخدام.
- مع ذلك، تشير الدراسة إلى أن هذه الإمكانات لا تستغل بالكامل في الممارسة الحالية. فالنماذج غالباً ما تفتقر إلى التفاصيل الدلالية اللازمة لدعم التشغيل، مثل تحديد العلاقة الدقيقة بين صمام معين وغرفة محددة، أو ربط نقطة بيانات في BEMS بموقعها في النموذج. كما أن التكامل بين BIM و BEMS لا يزال يفتقر إلى معايير موحدة، مما يصعب بناء نماذج متكاملة قبل التشغيل التلقائي.
- تُقدم هذه الدراسة رؤية واضحة لاتجاه مستقبلي يُدمج فيه النموذج البناي مع البيانات التشغيلية، لكنها في الوقت نفسه تسلط الضوء على الفجوة بين الإمكانات النظرية والواقع العملي. فالتحول نحو مبني ذكي ومرنة يتطلب تطوير بيئه معلوماتية متكاملة، حيث يُبنى النموذج ليس فقط لعرض الشكل، بل لتمثيل الوظيفة والسلوك، ويُحدث باستمرار ليعكس حالة المبني الحقيقية. وهذا يشكل دعوة للعمل على تطوير نماذج دلالية أكثر ثراءً وبروتوكولات تكامل أكثر كفاءة، لتمكين تحقيق وعود النماذج المعلوماتية للبناء في دعم التصميم والتشغيل الذكين.

2-2 القسم الثاني: لمحـة عن أنظمة إدارة الطـاقة في المـبـاني:

1-2-2 مـقدمة:

من المتوقع أن يزداد الطلب على الطاقة في المبني بأكثر من 40% خلال العقدين المقبلين، مدفوعاً بالنمو العمراني وتوسيع استخدام التقنيات المعتمدة على الكهرباء. وتُعد الكهرباء المصدر الرئيسي للطاقة في المبني، ما يجعل تحسين كفاءتها أولوية ملحة ضمن استراتيجيات الاستدامة. في المبني السكني، يُعزى الجزء الأكبر من الاستهلاك إلى الأجهزة المنزلية، وتسخين المياه، وتدفئة المساحات، في حين تتركز مصادر الاستهلاك في المبني غير السكني على تدفئة المساحات والمعدات التقنية المتنوعة. في هذا الإطار، تبرز أنظمة إدارة طاقة المبني (Building Energy Management Systems) كحل ذكي يتيح تتبع وتحليل وضبط أنماط الاستهلاك الطاقي بكفاءة عالية. وتتوفر هذه الأنظمة إمكانيات متقدمة لتصنيص استراتيجيات الإدارة بما يتلاءم مع طبيعة كل مبني، مما يسهم في تقليل الهدر وتحقيق فورات ملموسة. (Mariano-Hernández et al., 2021)

2-2-2 تعريف أنظمة إدارة طـاقة المـبـاني:

هو منظومة رقمية ذكية تجمع بين تقنيات الاستشعار، والتحكم، والتحليل، بهدف مراقبة وتحسين الأداء الطاقي للمبني بكفاءة واستدامة. يتكون النظام من وحدات مادية (مثل المستشعرات، والمحولات، ووحدات التحكم) ونظم برمجية تعتمد على خوارزميات تحليلية واتخاذ القرار في الزمن الحقيقي. (Ock et al., 2016)

يمكن BEMS من الإدارة المتكاملة لاستهلاك الطاقة عبر جميع أنظمة المبني، مثل التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC)، والإضاءة، والمعدات الكهربائية، والطاقة المتجدد، وذلك استناداً إلى معايير الراحة الحرارية، والجودة البيئية الداخلية، والجدوى الاقتصادية.

ويتمثل هذا النظام أداة استراتيجية محورية في التحول نحو المبني الذكي والمستدامة، إذ يساهم في خفض استهلاك الطاقة والانبعاثات المصاحبة، وتحقيق وفورات تشغيلية ملموسة، مع الحفاظ على كفاءة التشغيل وسلامة المستخدمين. (Digitemie & Ekemezie, 2024)



الشكل (2-1): أنظمة BEMS

2-2-3 التطور التاريخي لأنظمة BEMS :

شهدت أنظمة إدارة طاقة المبني (Building Energy Management Systems – BEMS) تطويراً تدريجياً على مدار العقود الماضية، مدفوعاً بتزايد الوعي بأهمية كفاءة الطاقة، وتطور تقنيات الحوسبة والتحكم، وال الحاجة المتزايدة إلى تقليل الانبعاثات وتحقيق الاستدامة. ويمكن تتبع مراحل تطور هذه الأنظمة على النحو التالي:

- **السبعينات:** انطلقت كرد فعل لأزمة الطاقة 1973، بقدرات محدودة للتحكم في أنظمة HVAC عبر وحدات PLC مرتفعة التكلفة.
- **الثمانينيات-التسعينيات:** ظهرت أنظمة أتمتة المبني (BAS) التي وفرت تحكمًا مركزيًا باستخدام الحساسات والعدادات الرقمية لمتابعة البيانات وتحسين الإدارة إشرافيًا.
- **2000-2010:** تطورت الأنظمة لتشمل التحليل والتوصيات التشغيلية عبر خوارزميات وواجهات رسومية تفاعلية.
- **2010-2020:** تكاملت مع الشبكات الذكية وإنترنت الأشياء، واستخدمت الحوسبة السحابية للتحكم اللحظي والتنبيئي.
- **2020-الآن:** تعتمد على الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي للتنبؤ بالاستهلاك وتكييف التشغيل، وأصبحت أساساً للمبني الذكية والصغرى الطاقة، داعمةً للاستدامة وتقليل الانبعاثات. (Digitemie & Ekemezie, 2024)

4-2-2 الفرق بين EMS, BAS, BEMS :

تشترك أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS) ، وأتمتة المبني (BAS) ، وإدارة الطاقة (EMS) في كونها أنظمة تُستخدم لتحسين أداء المبني والتحكم في استهلاك الطاقة، لكنها تختلف فيما بينها من حيث الوظائف الأساسية، ومستوى التكامل، ونطاق التطبيق. وسنشرح فيما يلي الفروقات بينها:

2-2-1 نظام إدارة طاقة المبني:

(Building Energy Management System – BEMS) هو نظام ذكي يُستخدم خصيصاً لمراقبة وتحليل والتحكم في استهلاك الطاقة داخل المبني بهدف تحسين الكفاءة الطاقية وتقليل الفاقد دون التأثير على الراحة أو السلامة. يعتمد BEMS على أجهزة استشعار، ووحدات تحكم، وبرمجيات تحليلية تعمل في الزمن الحقيقي، لتقديم قرارات تشغيلية فعالة، مثل تعديل أحمال HVAC أو تنظيم أوقات التشغيل. غالباً ما يُدمج BEMS مع أنظمة BAS، إلا أنه يتجاوز مجرد التشغيل الآلي ليُركز على تحسين الأداء الطاقي وتحقيق وفورات مالية وبيئية.

2-4-2-2 نظام أتمتة المبني:

(Building Automation System – BAS) هو النظام المسؤول عن التحكم المركزي والتشغيل الآلي ل مختلف أنظمة المبني، مثل الإضاءة، التكييف، التهوية، المصاعد، أنظمة الأمان، وأجهزة الكشف عن الحريق. يعمل BAS من خلال برمجة منطقية تعتمد على الجداول الزمنية أو مستويات الإشغال، ويهدف إلى تحقيق راحة المستخدمين وكفاءة التشغيل، وليس بالضرورة تحسين كفاءة استهلاك الطاقة. معنى آخر، BAS هو البنية التحتية التقنية التي تتيح التحكم بالأجهزة، بينما يحتاج إلى أنظمة أخرى لإجراء التحليلات الطاقية (O'Grady et al., 2021).

2-4-2-3 نظام إدارة الطاقة:

(Energy Management System – EMS) يُستخدم EMS غالباً في المنشآت الصناعية الكبرى أو على مستوى شبكات الطاقة، ويركز على تخطيط وإدارة استهلاك الطاقة على نطاق واسع. يقوم EMS بوظائف مثل مراقبة الأحمال الكهربائية، تحسين الجدولة بين مصادر الطاقة (مثل الشبكات والمولدات والطاقة المتجددة)، وتنفيذ استراتيجيات إدارة الطلب (Demand Response)، إذ يتعامل مع عدة مبانٍ أو منشآت في وقت واحد، وغالباً ما يكون متصلًا بأنظمة الطاقة الوطنية أو الإقليمية. (O'Grady et al., 2021; Zahraoui et al., 2021)

الجدول (2-1): يوضح الفرق بين أنظمة BEMS وBAS وEMS

إدارة الطاقة EMS	أتمتة المبني BAS	إدارة طاقة المبني BEMS	الهدف الأساسي
إدارة الطاقة على نطاق واسع (شبكات/مرافق)	التشغيل التقائي لأنظمة المبني	تحسين كفاءة استهلاك الطاقة	
شبكة طاقة أو منشآت صناعية متعددة	مبني واحد أو منشأة	مبني واحد (أو مجموعة صغيرة من المبني)	النطاق التشغيلي

إدارة الأحمال ، التوليد ، الشبكات الذكية	تشغيل تلقائي لأنظمة HVAC والإضاءة وغيرها	تحليل بيانات الطاقة، ضبط الأحمال	الوظائف الرئيسية
تركيز عالي يشمل التوليد والتوزيع	تركيز منخفض أو غير مخصص للطاقة	تركيز عالي على كفاءة الطاقة	التركيز على الطاقة
يتكامل مع SCADA ، الشبكات ، والمولدات	يمكن أن يعمل مستقلاً أو مع BEMS	يتكامل عادة مع BAS	التكامل مع الأنظمة الأخرى

2-2-5 مكونات نظام إدارة الطاقة:

2-2-1 المكونات الفيزيائية (المادية):

1. المستشعرات (Sensors)

المستشعرات هي "عيون" النظام، حيث تقيس المتغيرات الفيزيائية وترسلها إلى وحدة التحكم أو النظام المركزي. تشمل:

أ. مستشعرات درجة الحرارة:

- تقيس حرارة الهواء أو الأسطح داخل وخارج المبني.
- تُستخدم للتحكم في التكييف والتدفئة.

ب. مستشعرات الرطوبة (Humidity Sensors):

- تقيس نسبة الرطوبة في الجو.
- مهمة في الأماكن التي تحتاج إلى تحكم دقيق مثل المختبرات أو غرف العمليات.

ج. مستشعرات الضوء (Lux Sensors):

- تقيس شدة الإضاءة الطبيعية داخل المساحات.

- تُستخدم لضبط الإضاءة الاصطناعية تلقائياً لتوفير الطاقة.

د. مستشعرات الحركة / الإشغال (Occupancy/Presence Sensors):

- تحدد وجود الأشخاص في الغرفة أو المنطقة.
- تُستخدم لإطفاء الأنظمة غير الضرورية تلقائياً عند عدم الاستخدام (مثل الإضاءة أو التكييف).

ه. مستشعرات جودة الهواء (IAQ Sensors):

- تقيس مستويات ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، الجسيمات الدقيقة (PM2.5) ، وغيرها.

- تُستخدم لتهوية المبنى بنكاء بناءً على جودة الهواء.

و. مستشعرات استهلاك الطاقة (Energy Meters / Power Sensors):

- تقيس استهلاك الكهرباء باللواط أو الكيلوواط، لكل منطقة أو جهاز.
- تُستخدم لرصد الأداء وتحليل الاستهلاك.

ز. مستشعرات المياه والتدفق

- تقيس تدفق المياه وسرعته ودرجة حرارته (للمياه الساخنة والمبردة).
- مهمة لمراقبة التسريبات أو الكفاءة الحرارية.

ح. مستشعرات الضغط (Differential Pressure Sensors):

- تقيس فرق الضغط بين مناطق مختلفة.

- تُستخدم في أنظمة التهوية لضمان التوازن الهوائي (مثلاً غرف العمليات). (Verma et al., 2019)

2. وحدات التنفيذ (Actuators):

أجهزة تحول الإشارات من وحدة التحكم إلى حركة ميكانيكية (مثلاً فتح صمام، تشغيل محرك، تحريك باباً هواء).

أمثلة:

- صمامات تحكم كهربائية (Motorized Valves)

- مخمدات هوائية (Air Dampers)

- مراوح متغيرة السرعة (VFDs – Variable Frequency Drives)

3. وحدات التحكم (Controllers):

"العقل المحلي" لكل جزء من النظام. تستقبل قراءات المستشعرات وتتخذ قرارات فورية (مثل تشغيل المكيف أو تغيير سرعة المروحة).

توجد أنواع مختلفة:

- تحكم منطقي قوي في العمليات الصناعية: PLC

- مخصصة لأنظمة المباني: DDC

- وحدات الذكية المدعومة بـ AI أحياناً.

4. واجهة المستخدم ومحطات العمل (HMI/Workstations):

عبارة عن حواسيب أو شاشات تعمل باللمس توفر:

- المراقبة الحية.

- الرسم البياني للبيانات.

- إرسال التبيهات.

- تعديل الإعدادات.

- غالباً تكون مرتبطة بسيرفر مركزي أو سحابي.

5. شبكة الاتصالات: (Communication Network)

ترتبط كافة مكونات النظام بعضها البعض وتشمل البروتوكولات التالية:

- BACnet (مفتوح المصدر وواسع الاستخدام).

- Modbus

- KNX

(Digitemie & Ekemezie, 2024) تحدد السرعة، الثبات، وقابلية التكامل بين الأجهزة المختلفة.

2-5-2 المكونات البرمجية: (Software Components)

1. برمجيات الإدارة والتحكم المركزي (Central Management Software – CMS)

تُستخدم لتجميع البيانات من كامل المبني، وتوفير واجهات تحليل ذكية. تشمل المهام التالية:

- تحليل الاستهلاك.
- تحديد مناطق الهدر.
- إنشاء تنبؤات وأحداث عند الخلل.
- تتبع الأداء التاريخي.

2. برمجيات التنبؤ والتحليل: (AI & Analytics Engines)

تستخدم خوارزميات تحليل البيانات أو الذكاء الاصطناعي:

- لتوقع الأحمال المستقبلية.
- التوصية بخطط تحسين.
- تقييم الأداء مقابل مؤشرات KPI.

3. منصات المراقبة السحابية: (Cloud Platforms)

Digitemie & Ekemezie, (2024) تُستخدم للتحكم عن بعد عبر الإنترن特.
يمكن دمجها بتقنيات الموبايل أو الواقع المعزز في المبني الحديثة.

2-6 الأقسام الوظيفية الرئيسية في نظام إدارة طاقة المبني (BEMS):

يتتألف نظام إدارة طاقة المبني (BEMS) من مجموعة من الوحدات الوظيفية المتكاملة، كل منها يعني بإدارة جانب محدد من استهلاك الطاقة في المبني. تعمل هذه الأنظمة ضمن هيكل متراً يعتمد على

البيانات الحية، والتحكم الآلي، والتغذية الراجعة المستمرة لتحقيق أقصى درجات الكفاءة التشغيلية، وضمان بيئة داخلية مريحة ومستدامة.

1. نظام إدارة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء : (HVAC Management System)

أحد أكثر الأنظمة استهلاكاً للطاقة داخل المبني، ويشمل:

- التحكم الذكي في وحدات التكييف والتدفئة بناءً على بيانات درجات الحرارة، الإشغال، والرطوبة.
- جدولة التشغيل وفقاً لأنماط الزمنية (نهار/ليل، صيف/شتاء).
- تقنيات تحسين الحمل الحراري (Thermal Load Optimization) وتوفير التهوية حسب الطلب (Demand–Controlled Ventilation).
- استخدام الخوارزميات التنبؤية لتحسين الكفاءة التشغيلية.

الفائدة: تخفيض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 30% وتحسين عمر النظام (Escrivá-Escrivá et al., 2010).

2. نظام إدارة الإضاءة : (Lighting Management System)

يدير هذا النظام تشغيل الإضاءة الصناعية والطبيعية بنكاء لتحقيق الراحة البصرية وتوفير الطاقة، من خلال:

- أجهزة استشعار الحركة ومستوى الإضاءة الطبيعية لضبط التشغيل تلقائياً.
- دعم تقنيات التعتميم التدريجي.(Dimming Control)
- جدولة زمنية مرنة بناءً على استخدام المناطق أو ساعات الذروة.
- التحكم المركزي والمحلّي لتوزيع الحمل.

الفائدة: تقليل استهلاك الإضاءة بنسبة قد تصل إلى 40% في بعض التطبيقات المكتبية والتعليمية. (Kumar et al., 2017)

3. نظام مراقبة وتحليل استهلاك الكهرباء : (Electricity Monitoring & Analytics System)

يوفر رؤية شاملة للاستهلاك الكلي والجزئي للطاقة، ويضم:

- مراقبة فورية وفصل البيانات حسب المناطق أو الأجهزة أو الأحمال.
- تحديد فترات الذروة (Peak Demand) وتكاليف التشغيل.
- استخدام أنظمة تحليل الطاقة (Energy Analytics) لاكتشاف الفاقد وتحسين الفعالية.

الفائدة: تحسين كفاءة التشغيل وتوجيه استراتيجيات الترشيد بناءً على بيانات فعلية.

4. نظام إدارة الأحمال الكهربائية: (Load Management System)

يركز على تقليل الضغط على الشبكة الداخلية أثناء فترات الأحمال القصوى، عبر:

- تحديد أولويات التشغيل/الإيقاف للأجهزة عالية الاستهلاك.
- الفصل التلقائي للأحمال غير الحيوية في حالات الطوارئ.
- الموازنة الذكية للأحمال بالتكامل مع جداول الاستخدام.

الفائدة: تقليل الرسوم المرتبطة بالطلب العالى وتحقيق الاستقرار الكهربائي داخل المبنى.

5. نظام إدارة الطاقة المتعددة: (Renewable Energy Integration System)

- خاص بالمباني التي تعتمد جزئياً أو كلياً على الطاقة الشمسية أو الهوائية، ويشمل:
- مراقبة إنتاج الطاقة من مصادر متعددة.(PV Panels/Wind Turbines).
- تنظيم استهلاك الطاقة الذاتية مقابل تغذية الشبكة.
- التكامل مع أنظمة تخزين الطاقة (البطاريات) وأنظمة الإدارة الذكية.

الفائدة: تقليل الاعتماد على الشبكة وتحقيق أهداف الاستدامة.(Akinmejiwa et al., 2024)

6. نظام إدارة المياه والطاقة الحرارية: (Water and Thermal Energy Management System)

- يختص برصد استخدام المياه والطاقة الحرارية داخل المبنى، ويشمل:
- مراقبة أداء أنظمة التسخين والتبريد.(Chillers, Boilers).
- تحليل تدفقات المياه ودرجات الحرارة.
- إدارة فعالة لأنظمة إعادة استخدام المياه (Greywater Systems) والأنظمة الهيدروليكيه.

الفائدة: تحسين استغلال الطاقة وتقليل الهدر المائي والحراري.

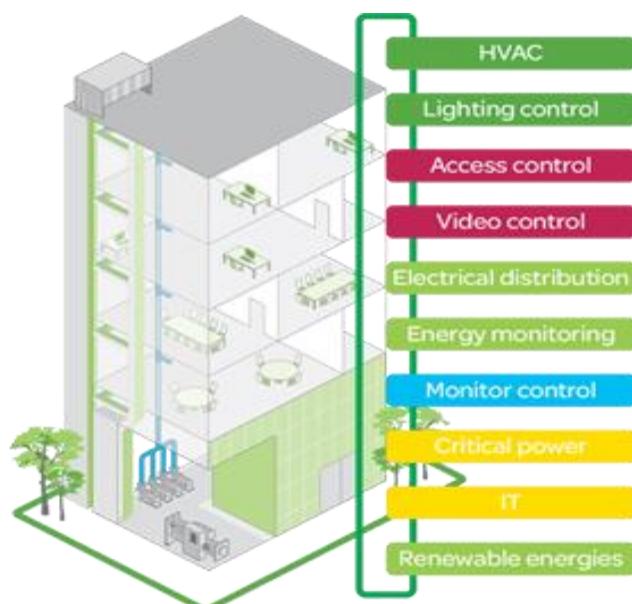
7. نظام الإنذار والصيانة الذكية: (Fault Detection & Predictive Maintenance System)

- يراقب صحة الأنظمة باستمرار، ويستخدم للتقليل من الأعطال المفاجئة، من خلال:
- التبليغ التلقائي عن الأعطال والانحرافات عن الأداء الطبيعي.
- دعم الصيانة التنبؤية باستخدام التحليلات البيانية.
- ربط الإنذارات مع جداول التشغيل وخطط الطوارئ.

الفائدة: تقليل فترات التوقف، وتحسين موثوقية الأنظمة، وخفض تكاليف الإصلاح.

يتميز كل قسم من أقسام BEMS بدور محدد ضمن بنية متكاملة تهدف إلى رفع كفاءة استهلاك الطاقة، تقليل الانبعاثات، وتحقيق بيئة داخلية ذكية وأمنة. وتعمل هذه الأنظمة من خلال وحدة تحكم مركبة تسهل المراقبة واتخاذ القرار بالزمن الحقيقي، مما يجعل BEMS عنصراً محورياً في أي استراتيجية بناء ذكي أو مستدام.

(Bouabdallaoui et al., 2021)



الشكل (2-2): الأقسام الوظيفية الرئيسية لنظام الـ BEMS

2-2-7 الهيكل البنوي لنظام إدارة طاقة المبني (BEMS Architecture) :

يقوم BEMS على هيكل طبقي متكامل يضمن جمع البيانات والتحكم والتحليل بكفاءة، ويكون من أربع طبقات رئيسية:

1. طبقة الحقل (Field Layer): تمثل البنية الفизيائية للنظام وتشمل المستشعرات والمشغلات، حيث يتم جمع البيانات اللحظية (الحرارة، الرطوبة، استهلاك الطاقة) وتتنفيذ أوامر التحكم.

2. طبقة التحكم (Control Layer): تضم وحدات PLC وDDC وتقوم بتحليل بيانات الحقل وتطبيق منطق التحكم الآلي والجدولة الزمنية لضبط الأنظمة ديناميكياً.

3. طبقة الاتصال (Communication Layer): تنقل البيانات والأوامر باستخدام بروتوكولات قياسية مثل KNX، Modbus، BACnet، مما يحقق التشغيل البيني ويعزز مرونة النظام.

4. طبقة الإدارة (Management Layer): تمثل "العقل الاستراتيجي" للنظام، حيث تُستخدم برمجيات تحليلية متقدمة لتوليد تقارير، التبؤ بالاستهلاك عبر AI/ML، توفير واجهات تفاعل (HMI)، وربط النظام بالحوسبة السحابية للتحكم المركزي واللحظي. (Kempf, 2024).

2-2-8 فوائد أنظمة BEMS :

- تقليل استهلاك الطاقة بنسبة تتراوح بين 10% إلى 30% حسب نوع وحجم المبني: تتيح المراقبة والتحكم الفوري في استهلاك الطاقة إمكانية تحقيق وفورات فعالة في الطاقة. الهدف ليس تقليل استخدام الإضاءة أو أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) أو أي أجهزة كهربائية أخرى، بل التركيز على استخدام هذه الأجهزة بطريقة ذكية. على سبيل المثال، يتم تشغيل الأجهزة وفقاً لعدة عوامل مثل مستويات الطلب، ووجود الأشخاص، ومستوى الإضاءة، ومستوى الرطوبة، ووقت اليوم، ودرجة الحرارة، مما يسهم في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة.

- راحة البال: بالإضافة إلى توفير الطاقة، يمنح النظام راحة البال أيضاً. فلا يحتاج المستخدم إلى تشغيل وإيقاف الأجهزة الكهربائية باستمرار، حيث تعمل تلقائياً بناءً على الاحتياجات. يقوم نظام إدارة المبني الذكية بتتبع أنماط استهلاك الطاقة على مدار 24 ساعة في اليوم، ويقوم بإصدار تنبيةات عند الحاجة.

- **خفض التكلفة:** بفضل نظام إدارة الطاقة (BEMS) الذي يراقب ويتحكم باستمرار في استهلاك الطاقة، فإنه يخفض تلقائياً فاتورة الكهرباء. (Jia et al., 2018)
- **الراحة:** بما أن نظام إدارة الطاقة يتحكم في عوامل مثل درجة الحرارة والرطوبة والإضاءة وجودة الهواء والتهوية فإنه يجعل البيئة أكثر راحة للقاطنين فيها. (Dong et al., 2019)
- زيادة عمر المعدات من خلال التشغيل الذكي وتقليل الضغط.
- **رفع القيمة السوقية للمبنى:** مع ارتفاع التوجه العالمي نحو المباني الخضراء الذكية، أصبح دمج نظام (BEMS) من العوامل التي تزيد من جاذبية المبنى في السوق العقارية، سواء للإيجار أو البيع. فالمباني التي تُظهر كفاءة طاقية عالية وتكليف تشغيل منخفضة تُصنف ضمن الفئة الأفضل للأداء البيئي (مثل شهادة LEED أو BREEAM)، مما يرفع تقييمها المالي ويعزز فرص الاستثمار فيها. (Kailas et al., 2012)
- **تحسين أداء أنظمة الطاقة المتعددة:** يتيح نظام (BEMS) التكامل الذكي مع مصادر الطاقة المتعددة (كالطاقة الشمسية أو الرياح) من خلال موازنة الطلب مع العرض، وتخزين الفائض عند توفره، وتحسين توقيت استخدام الطاقة. فعلى سبيل المثال، يمكن للنظام تشغيل الأحمال غير الحرجية أثناء ذروة توليد الطاقة الشمسية، مما يزيد من كفاءة الاستخدام الذاتي للطاقة المنتجة محلياً ويفقد الاعتماد على الشبكة. (Saha et al., 2014)
- **تحقيق أهداف الاستدامة البيئية وتقليل البصمة الكربونية:** تسهم أنظمة (BEMS) بشكل مباشر في تقليل الانبعاثات الناتجة عن استهلاك الطاقة، لا سيما في المباني التي تعتمد على مصادر طاقة أحfoيرية. من خلال تقليل الفاقد وتحسين الكفاءة، تتحفظ كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة، ما يعزز مساهمة المبنى في الالتزام بسياسات المناخ الدولية واتفاقيات تقليل البصمة الكربونية. & (Jamil, Mittal, 2017)

2-2-9 التطبيقات العملية لأنظمة إدارة الطاقة في المباني:

تختلف تطبيقات أنظمة إدارة الطاقة في المباني تبعاً للتصنيف الوظيفي للمبني والمتطلبات التشغيلية لكل قطاع. تتميز هذه الأنظمة بقدرتها على توفير حلول مُخصصة تعزز كفاءة الطاقة، مع الحفاظ على الظروف البيئية المثلى. فيما يلي أبرز التطبيقات:

1. المباني التجارية والإدارية:

تُستخدم أنظمة BEMS في هذه المباني لتحقيق التوازن بين الراحة البيئية والاستهلاك الأمثل للطاقة عبر:

- التحكم الديناميكي في أنظمة الإضاءة والتدفئة والتهوية والتكييف (HVAC) بناءً على أوقات العمل الرسمية، مع إمكانية برمجة جداول تشغيل مُتغيرة وفقاً لأيام الأسبوع أو المناسبات.
- إعداد تقارير تحليلية شهرية تُظهر أنماط استهلاك الطاقة، وتحديد نقاط الهدر، مثل الأجهزة ذات الأحمال الزائدة أو المساحات غير المستغلة بكفاءة.
- رصد الأعطال الآتي في الأنظمة الكهربائية والميكانيكية، مما يقلل من وقت التوقف عن العمل (Macarulla et al., 2017) ويُحسن الصيانة. (Downtime)

2. المنشآت الصحية (المستشفيات والعيادات):

تتطلب هذه المنشآت دقةً عالية في التحكم البيئي بسبب حساسية الأوضاع الصحية، لذا تُركز تطبيقات BEMS على:

- الحفاظ على معايير الراحة الحرارية والتهوية في الغرف الحرجة (مثلاً غرف العمليات والعناية المركزة)، حيث تُراقب أجهزة الاستشعار درجة الحرارة والرطوبة وجودة الهواء بصورة مستمرة.
- المراقبة الآلية لأنظمة التهوية الميكانيكية للكشف عن أي أعطال قد تُهدّد السلامة الصحية، مثل توقف مراوح التهوية أو انخفاض ضغط الهواء في الغرف المعزولة.

3. المؤسسات التعليمية (المدارس والجامعات):

تُطبق أنظمة BEMS في هذا القطاع لتحقيق أهداف تعليمية وتشغيلية مشتركة، مثل:

- إدارة الطاقة وفقاً للتقويم الأكاديمي، مثل إيقاف التشغيل التلقائي لأنظمة التكييف خلال الإجازات أو خارج ساعات الدوام.
- تعزيز الوعي الطابي عبر لوحات عرض تفاعلية تُظهر بيانات الاستهلاك، مما يشجع على تبني ممارسات مستدامة.
- تحليل البيانات التاريخية لمقارنة الأداء بين المباني الجامعية وتحديد الأولويات التطويرية. (Hossain et al., 2020

4. المنشآت الصناعية:

- تلعب أنظمة BEMS دوراً محورياً في القطاع الصناعي بسبب ارتفاع الطلب على الطاقة، عبر:
- مراقبة أداء المعدات الثقيلة (مثل المضخات والضواغط) لتحديد الأجهزة ذات الكفاءة المتدنية أو غير المتوفقة مع معايير الطاقة.
 - التكامل مع أنظمة الصيانة التنبؤية للتبؤ بالأعطال المحتملة بناءً على تحليل أنماط الاهتزاز أو استهلاك الطاقة غير الطبيعي.
 - إدارة الأحمال الكهربائية الذكية لتجنب الذروة وتقليل تكاليف فواتير الطاقة.

2-2-10 الاتجاهات المستقبلية في أنظمة BEMS:

مع تسارع التحول الرقمي في قطاع البناء وزيادة التركيز العالمي على كفاءة الطاقة والاستدامة، تشهد أنظمة إدارة طاقة المباني (BEMS) تطوراً ملحوظاً نحو مزيد من الذكاء، التكيف، والاندماج مع منظومات أوسع مثل المدن الذكية وشبكات الطاقة. وفيما يلي أبرز الاتجاهات المستقبلية:

1. التكامل مع المدن الذكية (Smart Cities Integration)

تُعد أنظمة BEMS جزءاً أساسياً من بنية المدن الذكية، حيث تتيح التفاعل في الزمن الحقيقي مع شبكات الطاقة والبنية التحتية الحضرية. من خلال ربط بيانات المبنى بالبلديات وشركات المرافق، يتم تحقيق تسيير أعلى في إدارة الأحمال الطاقية وتحسين جودة الخدمة والموثوقية.

2. النماذج الرقمية التوأمية (Digital Twin Technology)

توفر تقنية التوأم الرقمي نموذجاً افتراضياً حياً للمبني، يعكس ظروفه التشغيلية والبيئية بشكل ديناميكي. يمكن استخدام هذه النماذج لمحاكاة وتحليل الأداء الطاقي، وتشخيص الأعطال المحتملة، واتخاذ قرارات استراتيجية مبنية على سيناريوهات واقعية، قبل تطبيق أي تغييرات فعلية على أرض الواقع (Hwang et al., 2025).

3. التحليل التنبؤي للطاقة (Predictive Energy Analytics)

من خلال توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم العميق (Deep Learning)، يمكن لأنظمة BEMS التنبؤ بأنماط استهلاك الطاقة المستقبلية، استناداً إلى بيانات الطقس، إشغال المبني، وسلوك المستخدمين. يساهم ذلك في تحسين الجداول التشغيلية وتخفيض الفاقد الطاقي.

4. الاستجابة الذكية للطلب (Smart Demand Response)

تكامل أنظمة BEMS مع مزودي الطاقة لتنفيذ برامج استجابة للطلب، حيث يمكنها تعديل استهلاك المبني تلقائياً خلال ساعات الذروة، مما يخفف الضغط على الشبكة الكهربائية ويخفض التكاليف التشغيلية للمبني. (Ibrar et al., 2024).

5. الربط مع الشبكات الذكية (Smart Grids Integration)

تسمح هذه الإمكانية بأن يكون المبني عنصراً فاعلاً في شبكة الطاقة الذكية، من خلال التوليد الذاتي (مثل الألواح الشمسية)، التخزين (مثل البطاريات)، والمشاركة في موازنة الأحمال. يدعم هذا الربط مرونة أكبر في إدارة الطاقة على المستوى الحضري.

6. المعالجة الحوسبة الطرفية (Edge Computing)

تُستخدم هذه التقنية لتقليل الاعتماد على الحوسبة السحابية، عبر معالجة البيانات محلياً في وحدات تحكم قريبة من المستشعرات والمشغلات. يؤدي ذلك إلى تقليل زمن الاستجابة وتحسين الأمان وسرعة اتخاذ القرار، خصوصاً في الحالات الحرجة.

7. التحكم الذاتي التكيفي (Self-Adaptive Control)

تُدمج خوارزميات تحكم متقدمة تمكّن النظام من تعديل استجاباته تلقائياً بناءً على تغيرات الظروف البيئية أو سلوك المستخدمين، دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر. يعزز هذا من موثوقية الأنظمة وموارتها في البيئات المتغيرة.

2-2-11 التحديات الرئيسية التي تواجه أنظمة إدارة طاقة المبني:

رغم دورها الكبير في تعزيز كفاءة الطاقة وخفض التكاليف، تواجه أنظمة BEMS عدة تحديات تعيق انتشارها، أبرزها:

1. ارتفاع التكلفة الأولية: الحاجة إلى استثمارات ضخمة في الأجهزة، وحدات التحكم، والبنية التحتية يجعل العائد على الاستثمار غير مغرٍ خاصّةً للمبني الصغيرة.

2. صعوبات التكامل مع الأنظمة التقليدية: المبني القديمة غالباً ما تحتوي على تجهيزات غير متوافقة، مما يتطلب حلولاً مكلفة ومعقدة للتكامل.

3. نقص الكفاءات الفنية: تشغيل وصيانة BEMS يحتاج خبرات متعددة في التحكم، الشبكات، الأمان السيبراني، وتحليل البيانات، وهي غير متوفرة دائمًا.

4. مخاطر الأمن السيبراني: الاعتماد على الشبكات والإنترنت يزيد من احتمالية الهجمات الإلكترونية، مما يستلزم استراتيجيات حماية متقدمة.

5. ضعف الجدوى الاقتصادية لبعض المبني: في المرافق ذات الاستهلاك المحدود أو الموسمى قد لا تعيش الوفورات الطاقية تكاليف التركيب والصيانة. (Digitemie & Ekemezie, 2024)

2-2-12 مصادر الطاقة المتكاملة مع أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS) :

تعتمد أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS) الحديثة على التكامل الذكي مع مجموعة متنوعة من مصادر الطاقة، بهدف تحقيق التشغيل الأمثل، وضمان استمرارية الإمداد، وتقليل الاعتماد على الشبكات التقليدية. وتشمل هذه المصادر ما يلي:

1. أنظمة الطاقة الشمسية: (Photovoltaic Panels)

تُعد الخلايا الكهروضوئية مصدراً متجدداً يتيح توليد الكهرباء مباشرةً من أشعة الشمس، ويقوم BEMS بمراقبة إنتاج الطاقة الشمسية ودمجها بشكل ديناميكي في منظومة الطاقة حسب الحاجة والاستهلاك الفعلي. (Barchi et al., 2018)

2. أنظمة تخزين الطاقة: (Battery Storage Systems)

تُستخدم البطاريات لتخزين الفائض من الطاقة المنتجة (خصوصاً من الطاقة الشمسية)، ما يُمكّن من استخدامها لاحقاً أثناء فترات النروءة أو انقطاع الشبكة. يعمل BEMS على إدارة عمليات الشحن والتغريغ بكفاءة عالية لتحقيق التوازن الطاقي. (Barchi et al., 2018)

3. الشبكات الذكية: (Smart Grids)

يتيح الاتصال مع الشبكات الذكية تبادل البيانات والتنسيق اللحظي مع مزودي الخدمة الكهربائية، مما يتيح الاستفادة من التعرفة المتغيرة حسب الوقت، والاستجابة للطلب، وضمان مرنة أعلى في إدارة الأحمال. (Park et al., 2011)

4. المولدات الاحتياطية والتوربينات:

تُستخدم كمصادر طاقة احتياطية تُفعَل تلقائياً في حالات الطوارئ أو عند انقطاع التيار. يمكن لنظام جدولة تشغيلها واستخدامها بنكاء لتقليل الأحمال القصوى أو الحفاظ على استقرار التزويد في BEMS حالات خاصة.

من خلال هذا التكامل متعدد المصادر، يمكن لـ BEMS تحقيق توازن ديناميكي بين العرض والطلب، والاختيار التلقائي للمصدر الأنسب اعتماداً على معايير مثل الكفاءة، التكلفة، وتوفر الطاقة، مما يعزز الاستدامة ويخفض التكاليف التشغيلية بشكل كبير.

١٣-٢-٢ خطوات تصميم نظام إدارة طاقة المباني (BEMS) :

تطلب عملية تصميم نظام BEMS نهجاً منهجياً متعدد المراحل، يجمع بين الدراسة الفنية، والاعتبارات التشغيلية، والتكامل التقني. وفيما يلي عرض للخطوات الأساسية:

١. **تحليل السياق الوظيفي:** تحديد طبيعة المبنى وأنماط الإشغال وأهداف النظام (مثل خفض الاستهلاك أو تحسين جودة الهواء).
٢. **الجرد الطافي التفصيلي:** مسح الأحمال الكهربائية والميكانيكية لبناء خريطة دقيقة للاستهلاك (Energy Profile).
٣. **تحديد نقاط البيانات:** اختيار المتغيرات المراد مراقبتها (حرارة، رطوبة، إشغال...) وتحديد أنواع وأماكن المستشعرات وحدود التتبّيه.
٤. **توزيع وحدات التحكم (DDC/PLC):** وضع وحدات التحكم محلياً حسب المناطق (Zones) لتحقيق مرنة وسرعة استجابة.
٥. **تصميم شبكة الاتصالات:** اعتماد بروتوكولات قياسية (Modbus، BACnet، KNX) مع مراعاة الأمان السيبراني وقابلية التوسيع والتكامل مع أنظمة أخرى.
٦. **اختيار البرمجيات:** تحديد منصة الإدارة التي تدعم المراقبة والتحليل بالذكاء الاصطناعي، إعداد التقارير التفاعلية، وتحصيص واجهات المستخدم (HMI).
٧. **الاختبار والتکلیف (Commissioning):** التحقق من دقة المستشعرات واستقرار الشبكات، ضمان مطابقة الأداء للتصميم، وتدريب المستخدمين مع توثيق النتائج الأولية

سير عمل البيانات (Data Flow) داخل نظام إدارة الطاقة:

- قياس البيانات (درجة الحرارة، تيار كهربائي، ...).
- نقل البيانات إلى وحدة التحكم.
- تحليل البيانات محلياً في وحدة التحكم أو عبر (Edge Computing).
- تنفيذ الإجراءات (تشغيل/إيقاف/تعديل).
- إرسال البيانات للسيفر المركزي.
- تحليل طويل الأجل وإنتاج تقارير أو تنبیهات.
- التفاعل البشري أو الأوتوماتيكي بناء على المخرجات.

2-14-2 طرق التحكم في نظام إدارة طاقة المبني (BEMS):

تمثل أنظمة إدارة طاقة المبني أداة استراتيجية لتقليل استهلاك الطاقة وتحسين الكفاءة التشغيلية عبر التحكم الذي في أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC)، الإضاءة، والمعدات الكهربائية. تتنوع استراتيجيات التحكم بين الطرق التقليدية والمتقدمة والذكية:

2-14-2-1-الطرق التقليدية (Conventional Control)

- التحكم الثابت: إعدادات ثابتة مثل درجة حرارة موحدة، غير متكيفة مع التغيرات.
- التحكم اليدوي: يعتمد على تشغيل/إيقاف يدوي، فعال للطوارئ فقط.
- التحكم بالجداول الزمنية: برمجة تشغيل/إيقاف وفق جداول يومية أو أسبوعية.
- التحكم القاعدي (Rule-Based): منطق شرطي بسيط (If-Then) محدود المرونة (Lu et al., 2021).

- التحكم PID: يحقق دقة عالية عبر تغذية راجعة، لكنه يحتاج معايرة ولا يناسب الأنظمة غير الخطية (Zhang et al., 2022).

2-14-2-2-طرق تطبيقية متقدمة (Applied Control):

- القائم على الاستشعار: يعتمد على بيانات آنية (حرارة، إشغال، رطوبة، CO_2).
- أولويات الأحمال: تقليل الأحمال غير الضرورية عند الضغط أو ارتفاع التكلفة.
- التحكم الحدثي: تشغيل/إيقاف بناءً على أحداث مثل دخول شخص أو فتح نافذة.

2-14-2-3-التحكم المتقدم (Advanced Control):

- التنبؤي النموذجي (MPC): يعتمد على نماذج رياضية للتوقع والتحكم متعدد المتغيرات (Zhang et al., 2022).

- الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN): تحليل بيانات تاريخية للتنبؤ والتكييف مع الأنظمة المعقدة. (Digitemie & Ekemezie, 2024).

- التحكم التكيفي الذاتي: تعديل تلقائي باستخدام خوارزميات تعلم آلي.

4-14-2-4- التحكم اللامركزي والتعاوني:

يعتمد على وحدات محلية (PLC/DDC) تتبادل المعلومات لاتخاذ قرارات جماعية متكاملة، مما يعزز المرونة والاندماج مع الشبكات الذكية.

4-14-2-5- التحكم في الزمن الحقيقي:

باستخدام إنترنت الأشياء (IoT) والحوسبة الطرفية، يتم اتخاذ قرارات لحظية مثل: تعديل الإضاءة وفق إشغال الغرف أو تشغيل التهوية بناء على CO_2 .

4-14-2-6- دور الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات:

- التعلم العميق :للتنبؤ بالأحتمال.
- الخوارزميات التطورية :لتحسين جداول التشغيل.
- التحليل التنبؤي :للكشف المبكر عن الأعطال.

4-14-2-7- اتجاهات حديثة:

- التوأم الرقمي(Digital Twin): محاكاة واقعية لاختبار الاستراتيجيات.
- التحكم السلوكي :تعلم أنماط المستخدمين للتخصيص.
- التحكم السيادي :براعي الطقس، الوقت، وعدد الأشخاص.
- التحكم السحابي :يتيح معالجة متقدمة وتحديثات لحظية.

2-3-القسم الثالث: أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) :

2-3-1 مقدمة:

تُعد أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) من أبرز المكونات التشغيلية في المبني الحديثة، لدورها الحيوي في ضبط درجة الحرارة، التحكم في الرطوبة، وضمان جودة الهواء الداخلي، بما يعزز من راحة المستخدمين وصحتهم. إلا أن هذا الدور الحيوي يأتي بكلفة طاقية مرتفعة؛ إذ تمثل أنظمة HVAC نسبة كبيرة من استهلاك الطاقة الكلي في المبني، قد تتجاوز 40% في بعض البيئات العمرانية، خاصة في الدول الصناعية حسب ما تشير إليه تقارير وكالة الطاقة الدولية (IEA).

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة، بذرت الحاجة إلى تحسين كفاءة هذه الأنظمة، ليس فقط من خلال تطوير تقنياتها الأساسية، وإنما عبر دمجها ضمن منظومات ذكية أوسع لإدارة الطاقة. وهذا يأتي دور أنظمة إدارة طاقة المبني، والتي تعمل على مراقبة وتحليل وضبط استهلاك الطاقة في المبني ككل.

يُعد التكامل بين HVAC و BEMS من أبرز سمات المبني الذكي والمستدامة، حيث يوفر هذا التفاعل منصة مركبة لتحسين الأداء التشغيلي لأنظمة التكييف والتدفئة. تقوم أنظمة BEMS بجمع البيانات البيئية والتشغيلية من نظام HVAC ، وتحليلها في الزمن الحقيقي، ومن ثم اتخاذ قرارات تحكمية مبنية على البيانات لتحسين استهلاك الطاقة، دون التأثير على راحة المستخدمين أو جودة البيئة الداخلية.

2-3-2 تعريف نظام (HVAC) :

نظام HVAC هو نظام هندسي متكامل يختص بتنظيم وتكييف البيئة الداخلية للمبني، ويهدف إلى توفير درجة حرارة ملائمة، رطوبة نسبية مناسبة، وجودة هواء داخلية صحية، بما يحقق مستويات عالية من راحة المستخدمين وكفاءة التشغيل الطاقي. يتتألف النظام من مجموعة من المعدات والتقنيات الميكانيكية والإلكترونية التي تعمل على تنفيذ ثلاثة وظائف رئيسية:

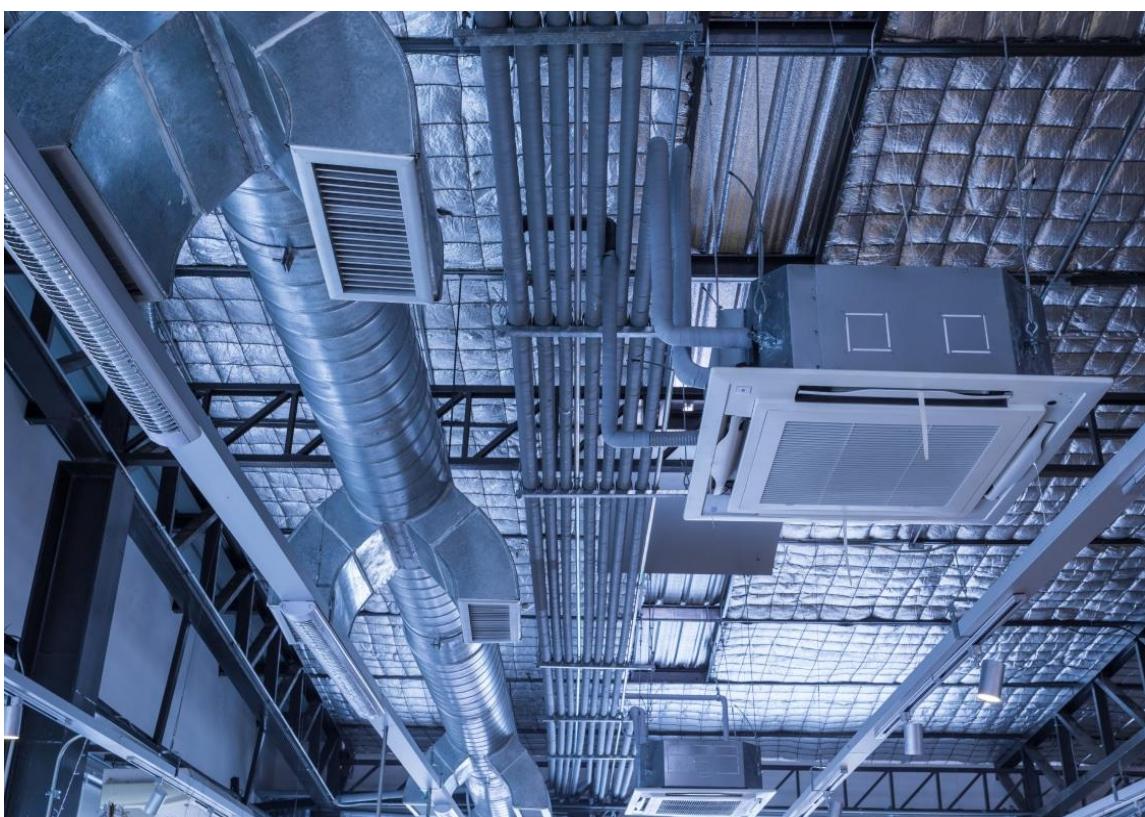
- التدفئة (Heating): رفع درجة حرارة الهواء الداخلي لتوفير الدفء في الطقس البارد.

- التهوية (Ventilation): تجديد الهواء داخل الفراغات من خلال إزالة الهواء الملوث وضخ هواء نقي، مع التحكم بمعدلات التهوية والضغط.
- تكييف الهواء (Air Conditioning): تقليل درجة الحرارة الداخلية ومعالجة الرطوبة للوصول إلى بيئة مريحة وصحية خلال فترات الحر.

يُعد نظام HVAC من أهم الأنظمة التشغيلية في أي مبنى، حيث يُسهم في الحفاظ على الراحة الحرارية، تحسين جودة الهواء، وضمان بيئة آمنة وصحية، إلى جانب كونه من أكثر الأنظمة استهلاكاً للطاقة، مما يجعله محوراً رئيسياً في تطبيقات إدارة طاقة المباني (BEMS) والأنظمة الذكية.

2-3-المكونات التقنية الأساسية لنظام HVAC :

يتكون نظام HVAC من مجموعة من الوحدات والمكونات الميكانيكية والإلكترونية التي تعمل بتكميل لضبط البيئة الداخلية. ومن أبرز هذه المكونات:

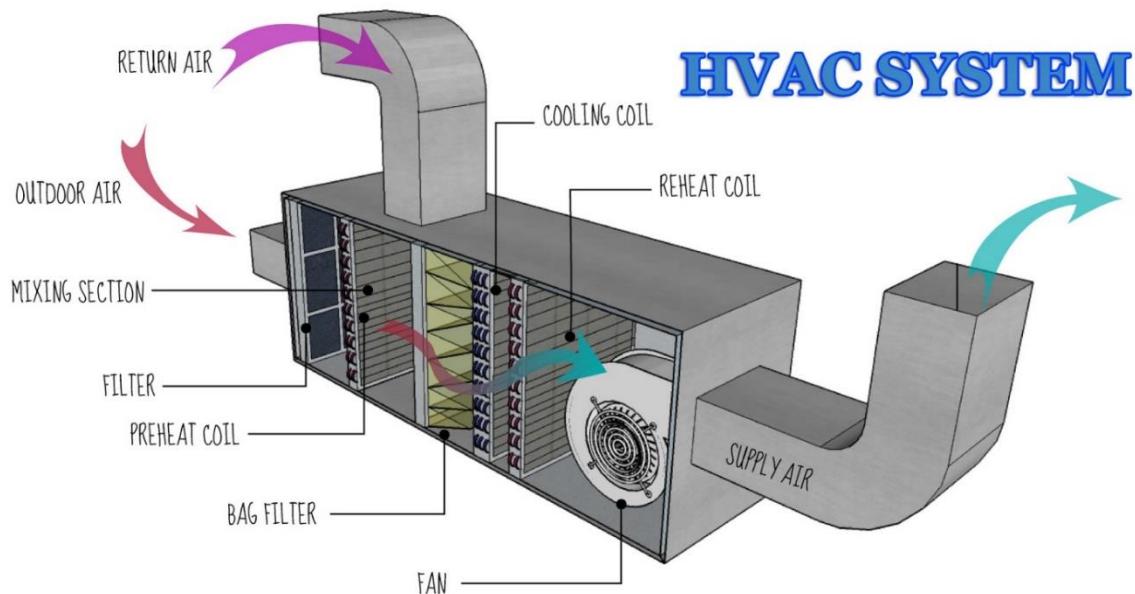


الشكل (2-3): نظام HVAC داخل المبني

٣-٣-٢ وحدات معالجة الهواء : (AHU – Air Handling Units)

تُعد وحدة معالجة الهواء بمثابة القلب المركزي للنظام وظيفتها الأساسية هي سحب الهواء من الخارج أو من داخل المبني، ثم تجفيفه أو تسخينه، قبل ضخه عبر مجاري الهواء. وتتكون عادةً من:

- مرشحات لتنقية الهواء (Filters).
- مراوح الدفع (Blowers).
- ملفات التسخين/التبريد (Heating/Cooling Coils).
- مخدمات الهواء (Dampers).
- أجهزة استشعار لمراقبة درجة الحرارة والرطوبة وجودة الهواء. (Leong, 2019).



الشكل (٤-٢): مخطط يوضح بنية وحدة Air Handling Units

٣-٣-٢ وحدات التبريد والتكييف : (Chillers & Condensers)

- المبردات (Chillers) تُستخدم لتبريد المياه التي تُضخ إلى وحدات توزيع الهواء.
- وحدات التكثيف (Condensers): تقوم بترقيع الحرارة الممتصة من المبني إلى الهواء أو الماء الخارجي، وُتستخدم غالباً في أنظمة التبريد المركزي. (Westphalen & Koszalinski, 2001).



الشكل (5-2): وحدة تكييف مركبة Chiller

3-3-3 أنظمة التهوية (Ventilation Systems)

تشمل:

- مراوح العادم (Exhaust Fans)
- وحدات إدخال الهواء النقي (Fresh Air Intakes)
- مبادلات الحرارة (Heat Recovery Units)

وظيفتها ضمان تداول الهواء النقي وطرد ثاني أكسيد الكربون والرطوبة والروائح والملوثات، وتحقيق التوازن بين الهواء الداخل والخارج.

3-3-4 أنظمة التحكم والتحكم الآلي (HVAC Controls & Automation)

تشمل أجهزة استشعار، وحدات تحكم رقمية (PLCs)، متحكمات منطقية قابلة للبرمجة (DDC)، ترمومترات ذكية، ومشغلات الصمامات والمراوح. وتكون أهميتها في مراقبة أداء النظام وتنظيم تشغيله حسب الظروف الداخلية والخارجية، ما يسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل استهلاك الطاقة.



الشكل (2-6): أجزاء نظام التهوية داخل المبني

2-3-4 بيئة التشغيل والتكامل مع الأنظمة الأخرى:

لا تعمل أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) بمفردها من مكونات المبني، بل تُعد جزءًا من بيئه تشغيلية متكاملة تتدخل فيها العوامل المعمارية، والإنسانية، والكهربائية، والوظيفية. ويشكل هذا التكامل حجر الزاوية في تصميم وتشغيل المبني الذكي والمستدامة، حيث يُسهم في تحقيق كفاءة الطاقة المثلثي، وضمان راحة المستخدمين، وتعزيز مرونة التشغيل والاستجابة للظروف المتغيرة.

2-3-4-1 البيئة التشغيلية لأنظمة HVAC :

تتأثر كفاءة وفعالية نظام HVAC بعدة عوامل بيئية وسياقية داخل المبني، من أبرزها:

- التصميم المعماري للمبني : بما يشمل توزيع الأحجام الداخلية، طبيعة المواد المستخدمة في العزل الحراري، خصائص الواجهات والنواخذة، واتجاهات التعرض لأشعة الشمس.
- الظروف المناخية الخارجية : تؤثر درجة الحرارة، الرطوبة، والرياح على الأحمال الحرارية المطلوبة لتدفئة أو تبريد الفراغات الداخلية.

- كثافة الإشغال وسلوك المستخدمين : تؤثر أنماط الإشغال اليومية ونشاط الأفراد في توليد الحرارة والرطوبة، مما يُغيّر من متطلبات التهوية وجودة الهواء.
- نوع وكفاءة المعدات المستخدمة : تلعب المعدات المتطورة دوراً في تحسين الأداء الطاقي، خاصةً إذا ما تم دمجها مع أنظمة تحكم ذكية قابلة للتكييف.

هذه العوامل تتطلب أن يكون نظام HVAC مرنًا، ديناميكياً، وقدراً على الاستجابة في الزمن الحقيقي، وهو ما يتحقق من خلال التكامل التقني مع الأنظمة الأخرى في المبنى.

2-3-4-2 التكامل مع نظام إدارة طاقة المباني (BEMS) :

يُعد "BEMS العقل المدبر" لمراقبة وتحليل وضبط أداء الأنظمة الفرعية بالمبني، وعلى رأسها HVAC، ويحقق ما يلي:

- **مراقبة مستمرة للأداء** : جمع وتحليل بيانات الحرارة، الرطوبة، ثاني أكسيد الكربون، والإشغال لاتخاذ قرارات تشغيلية ذكية.
- **تحكم ديناميكي وتنبؤي** : تعديل نقاط الضبط وتشغيل الوحدات بحسب الطقس والإشغال والتاريخ التشغيلي.
- **جدولة مرنّة** : برمجة تشغيل HVAC وفق ساعات الذروة، العمل، أو إشغال الغرف لتنقليل استهلاك الطاقة مع الحفاظ على الراحة.
- **الصيانة الاستباقية (Predictive Maintenance)** : التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها لتنقليل فترات التوقف.
- **التحكم بالأحمال الذكية (Smart Load Management)** : تنسيق تشغيل HVAC مع الشبكات الذكية لتخفيض الضغط خلال فترات الطلب العالي.

2-3-4-3 التكامل مع أنظمة الإشغال والإضاءة:

يتفاعل نظام HVAC مع أنظمة كشف الإشغال والإضاءة لتحقيق تشغيل مرن:

- استخدام مستشعرات الإشغال مثل الحساسات الحركية (PIR) ، الكاميرات الذكية، وأنظمة التحكم بالدخول لتشغيل وحدات التكييف والتهوية عند وجود مستخدمين فقط.
- دمج التحكم في الإضاءة والتكييف ضمن استراتيجية التحكم البيئي المتكامل (Integrated Environmental Control)، لتقليل الأحمال الحرارية الناتجة عن الإنارة وتوفير الطاقة.

2-3-4 التكامل مع أنظمة الطاقة الشمسية والتخزين:

- في المبني التي تعتمد على مصادر طاقة متعددة، يتكامل نظام HVAC مع:
- الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV) ينسق BEMS تشغيل وحدات التكييف وفق أوقات توفر الطاقة الشمسية، لتقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية.
 - أنظمة التخزين (البطاريات) يتم شحن البطاريات بطاقة زائدة لتوفير التشغيل في فترات النزوة، أو عند انقطاع الكهرباء، مما يعزز استمرارية الخدمة.

2-3-5 التكامل مع أنظمة السلامة والحريق:

- يتطلب التشغيل الآمن لنظام HVAC التنسيق مع أنظمة الطوارئ والسلامة:
- في حالات الحريق أو تسرب الغاز، يتوقف تشغيل وحدات الهواء تلقائياً أو تُعيد توجيه تدفق الهواء لتقليل انتشار الدخان أو الملوثات.
 - الامتثال للبروتوكولات التنظيمية والمعايير مثل NFPA و ASHRAE لضمان سلامة المستخدمين والمنشأة.

2-3-6 التكامل مع الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي:

- تدعم تقنيات الذكاء الاصطناعي التكامل بين HVAC وأنظمة أخرى، من خلال:
- التنبؤ بالأحمال الطاقية بناءً على بيانات الطقس وسلوك المستخدمين.

- التحكم التكيفي (Adaptive Control): عبر التعلم من البيانات التاريخية وتحسين الاستجابة التشغيلية.
- كشف الأعطال (Fault Detection and Diagnosis – FDD): باستخدام نماذج التعلم الآلي مثل الشجرة العشوائية (Random Forest) لدعم الصيانة الذكية.
- تحسين الراحة الحرارية تلقائياً بناء على الأنماط المكتشفة من استخدام المبنى.

2-3-4-7 التحديات التقنية والتنفيذية:

- رغم فوائد التكامل، توجد تحديات قد تعيق تفريذ الكامل، منها:
- عدم التوافق بين الأنظمة القديمة والحديثة. (Legacy Integration).
 - تكاليف التحديث والبنية التحتية. (Olatunde et al., 2024).
 - مشكلات في الأمان السيبراني (Cybersecurity) نتيجة التوصيل عبر الشبكات. (Devaraj, 2023).
 - ضعف الصيانة أو البرمجة غير المثلث، مما يؤدي إلى نتائج عكسية.

2-3-4-8 أهمية هذا التكامل في تحقيق أهداف الاستدامة:

- يسهم التكامل عالي المستوى بين نظام HVAC والأنظمة الأخرى في تحقيق نتائج جوهرية تشمل:
- رفع كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية.
 - تحسين جودة الهواء الداخلي والراحة الحرارية.
 - إطالة عمر الأجهزة وتحسين الجدوى الاقتصادية للتشغيل.
 - الامتثال لمعايير الاستدامة العالمية مثل LEED ، BREEAM ، ISO 50001.

2-3-4-9 بروتوكولات الاتصال القياسية:

يتم الربط بين هذه الأنظمة المختلفة عبر بروتوكولات اتصال قياسية تسهل التوافق والتشغيل البيني (Interoperability)، ومن أبرزها:

- BACnet: معيار عالمي واسع الاستخدام في التحكم بأنظمة HVAC و BEMS .

- Modbus: يُستخدم في نظم الطاقة، الإضاءة، والعدادات الذكية.
 - KNX: شائع في المباني السكنية الأوروبية.
 - LonWorks: مناسب للبيئات ذات التحكم الموزع.
- اختيار البروتوكول يتوقف على عوامل مثل البنية التحتية، توافق الأجهزة، متطلبات الأمان، وتكليف التنفيذ.

3-5 آلية عمل نظام HVAC :

تعتمد آلية عمل نظام HVAC على سلسلة من العمليات الديناميكية الحرارية والميكانيكية والهيدروليكيّة المصممة بدقة لتوفير بيئة داخلية مريحة وآمنة من حيث درجة الحرارة، الرطوبة، وجودة الهواء. وتقوم هذه الأنظمة على مبادئ تبادل الحرارة، التوصيل الحراري، والانتقال القسري للهواء أو الماء بهدف التحكم في الظروف المناخية داخل الفراغات المعمارية. وتقسام آلية العمل إلى ثلاث وظائف رئيسية: التدفئة (Heating)، التبريد (Cooling)، والتهوية (Ventilation).

1-5 التدفئة (Heating) :

تهدف عملية التدفئة إلى رفع درجة حرارة الهواء داخل المبني لتوفير الراحة الحرارية في البيئات الباردة. وتنفذ عبر إحدى التقنيات التالية:

- **السخانات الكهربائية (Electric Heaters):** تُستخدم في أنظمة HVAC الصغيرة أو المناطق التي تتتوفر فيها الكهرباء بأسعار منخفضة، حيث يتم تسخين الهواء مباشرة عبر ملفات كهربائية مقاومة.
- **الغلايات (Boilers):** تعمل على تسخين الماء باستخدام مصادر طاقة مثل الغاز الطبيعي أو الوقود الحيوي، ثم يُوزع الماء الساخن عبر أنابيب إلى وحدات مثل المشعات (Radiators) أو ملفات التسخين داخل وحدات AHU أو FCU.
- **مضخات الحرارة (Heat Pumps):** أنظمة متقدمة تنقل الحرارة من مصدر خارجي (كالهواء أو الأرض) إلى داخل المبني باستخدام دورة تبريد عكسية. تُعتبر أكثر كفاءة من الغلايات الكهربائية، خاصة في البيئات المعتدلة.

يتم اختيار تقنية التدفئة المناسبة بناءً على عوامل مثل نوع المبني، المناخ، تكلفة الطاقة، وكفاءة التشغيل.

2-3-2 التبريد (Cooling) :

تُستخدم عملية التبريد لتقليل درجة حرارة الهواء الداخلي في فترات الحر، وتحقق عبر الأنظمة التالية:

- **المبردات (Chillers):** تُستخدم لتبريد الماء الذي يُضخ لاحقاً إلى ملفات التبريد في وحدات مناولة الهواء أو وحدات الملف المروحي (FCUs). تنقسم إلى:

- **مبردات مبردة بالهواء (Air-cooled Chillers):** تُستخدم في المباني الصغيرة أو في المناطق التي تتدرب فيها مصادر المياه.

- **مبردات مبردة بالماء (Water-cooled Chillers):** أكثر كفاءة وتحتاج في المباني الكبيرة، وتحتاج أبراج تبريد (Cooling Towers) لتغريغ الحرارة.

- **أنظمة التوسيع المباشر (DX Systems):** يُمرر فيها المبرد مباشرةً عبر ملفات التبريد الداخلية، دون استخدام ماء وسيط، كما في وحدات التكييف المنفصلة (Split Units) أو أنظمة VRF.

تم عملية التبريد من خلال امتصاص الحرارة من الهواء الداخلي عبر المبادلات الحرارية، ثم نقلها إلى الخارج، مما يُخفض درجة الحرارة ويعزز الراحة الحرارية.

2-3-3 التهوية (Ventilation) وتنقية الهواء :

تهدف التهوية إلى الحفاظ على جودة الهواء الداخلي (IAQ) من خلال:

- **إدخال الهواء النقي:** يتم جلب الهواء من الخارج عبر وحدات التهوية وتوزيعه في أنحاء المبني.
- **استخراج الهواء الملوث:** يُزال الهواء المحمل بثاني أكسيد الكربون، الرؤائج، والرطوبة من الأماكن المغلقة كالمطابخ والحمامات.

- **ترشيح وتنقية الهواء:** قبل دخول الهواء إلى المناطق المشغولة، يُمرر عبر مرشحات (Filters) لإزالة الجسيمات، الغبار، والملوثات.

- **استعادة الطاقة:** تستخدم أنظمة التهوية الحديثة مبادلات حرارية مثل (HRV) أو (ERV) لاستعادة جزء من طاقة الهواء المطرود، مما يقلل الحمل الحراري على أنظمة التبريد/التدفئة.

تُمثل التهوية عاملاً رئيسياً في الحفاظ على صحة شاغلي المبني وتقليل تكاليف الطاقة عند تنفيذها بشكل ذكي ومتكملاً مع أنظمة التحكم.

2-3-5-4 التحكم والتكامل في التشغيل:

تعتمد كفاءة عمل النظام على دقة التحكم، الذي ينفذ غالباً عبر:

- المتحكمات المنطقية المبرمجة (PLC/DDC) تتيح تنظيم درجات الحرارة، تدفق الهواء، وضغط الأنظمة.
- المستشعرات (Sensors) لقياس درجة الحرارة، الرطوبة، تركيز ثاني أكسيد الكربون، وجودة الهواء.
- التكامل مع BEMS: يسمح بتحسين استراتيجيات التشغيل، وإدارة الطاقة في الوقت الحقيقي، وإجراء تحكم استباقي يعتمد على الجداول الزمنية أو إشغال الغرف.

2-3-6 أنواع أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء:

تتعدد أنواع أنظمة HVAC تبعاً لطبيعة المبني، متطلبات التشغيل، المساحة المتاحة، وكفاءة الطاقة المستهدفة. ويمكن تصنيف أنظمة HVAC إلى أربع فئات رئيسية بناءً على وسيط نقل الطاقة المستخدم (هواء، ماء، أو مزيج بينهما)، ومستوى المركزية في النظام، وهي: أنظمة الهواء الكامل، أنظمة الماء الكامل، الأنظمة المختلطة، وأنظمة الانقسام المباشر. لكل نوع مزاياه وتحدياته التقنية، كما أن اختيار النظام الأمثل يخضع لمجموعة من المعايير التصميمية والاقتصادية.

2-3-6-1 أنظمة الهواء الكامل (All-Air Systems):

- تعتمد هذه الأنظمة على الهواء ك وسيط وحيد لنقل الحرارة أو البرودة إلى الفراغات الداخلية. يتم معالجة الهواء (تسخينه أو تبريده) مركزيًا في وحدات معالجة الهواء (AHU)، ثم يُوزع إلى المناطق المختلفة عبر شبكة مجاري هوائية.
- أنظمة تدفق الهواء المتغير (Variable Air Volume - VAV) تُعد من أكثر الأنظمة كفاءة، حيث يتحكم النظام في كمية الهواء المزودة تبعاً للأحمال الحرارية الفعلية لكل منطقة.

- أنظمة تدفق الهواء الثابت (Constant Air Volume – CAV): توفر تدفقاً ثابتاً من الهواء بدرجة حرارة متغيرة. تناسب التطبيقات البسيطة التي لا تتطلب تحكماً عالياً بالمنطقة.(Leong, 2019)

- تُستخدم أنظمة الهواء الكامل في المباني التجارية الكبرى والمستشفيات لما تتوفره من قدرة مركبة على معالجة الهواء وجودة تهوية عالية.(Gheji et al., 2016)

:All-Water Systems

- في هذا النوع، يُستخدم الماء كمصدر وحيد لنقل الطاقة الحرارية، دون استخدام مجاري هوائية رئيسية. يتدفق الماء الساخن أو البارد إلى وحدات طرفية داخل المناطق مثل (المراوح الملفية Fan Coil Units)، حيث يتم تبادل الحرارة محلياً.

- تميّز هذه الأنظمة بانخفاض حجم البنية التحتية الميكانيكية (لا حاجة لمجاري هواء واسعة)، ومرنة في التوزيع، لكنها تتطلب تهوية ميكانيكية منفصلة لتلبية احتياجات الهواء النقي.

.(Gheji et al., 2016) :Air-Water Systems

- تجمع هذه الأنظمة بين مزايا الهواء والماء، حيث يُستخدم الهواء لتوفير التهوية والتحكم في الرطوبة، بينما يُستخدم الماء للتدفئة أو التبريد عبر وحدات داخلية.

- تعتبر هذه الأنظمة مناسبة للتطبيقات التي تتطلب تحكماً دقيقاً في جودة الهواء والرطوبة مع كفاءة طاقية عالية، مثل المختبرات والمراكم البحثية.(Gheji et al., 2016)

(Direct Expansion Systems – DX Systems)

- في هذا النوع، يتم تبريد الهواء مباشرة باستخدام وسيط تبريد (Refrigerant) دون الحاجة إلى أنظمة توزيع ماء. وتشمل:

- الوحدات المنفصلة التقليدية (Split Units) حيث يتكون النظام من وحدة داخلية وأخرى خارجية.
- أنظمة تدفق المبرد المتغير (VRF/VRV) وهي أنظمة متقدمة تسمح بالتحكم الفردي في كل منطقة على حدة مع استخدام شبكة توزيع واحدة لوسبيط التبريد.

تتميز هذه الأنظمة بالمرنة في التركيب والتحكم المتقدم في المناطق المتعددة، وتُستخدم في المبني متوسطة الحجم مثل الفنادق والمكاتب متعددة الطوابق (Shao et al., 2023).

2-3-7 كفاءة الطاقة في أنظمة HVAC :

تُعد أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) من أكثر الأنظمة استهلاكاً للطاقة في المبني، إذ تمثل ما نسبته بين 40% إلى 60% من إجمالي الاستهلاك الطاقي في المبني التجاري والسكنية، وفقاً لتقارير الوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2022). وبالتالي فإن أي تحسين في تشغيل أو تصميم هذه الأنظمة ينعكس بشكل مباشر على الكفاءة الطاقية الكلية للمبني.

تعتمد كفاءة الطاقة في نظام HVAC على عدد من العوامل التقنية والوظيفية، من أبرزها:

2-3-7-1 كفاءة المكونات الأساسية:

تشمل الكفاءة الفردية لكل من:

- وحدات التبريد (Chillers): تتحسن كفاءتها باستخدام تقنيات مثل المبردات ذات السرعة المتغيرة (VSD) والمبادلات الحرارية عالية الأداء.
- مراوح AHU والمضخات: الكفاءة تزداد باستخدام محركات كهربائية عالية الكفاءة مزودة بمحولات تردد متغيرة.
- أنظمة التحكم: تمثل الأنظمة الذكية للتحكم عاملًا جوهريًا في تقليل الاستهلاك غير الضروري للطاقة، خصوصاً عند دمجها مع BEMS.

2-3-7-2 استراتيجيات التشغيل المؤقت للطاقة:

تتضمن استراتيجيات توفير الطاقة في أنظمة HVAC ما يلي:

- التشغيل حسب الطلب (Demand-Based Operation): تشغيل النظام وفقاً لمستويات الإشغال الفعلية للمبني، من خلال مستشعرات الحركة وثاني أكسيد الكربون.
- استعادة الحرارة (Heat Recovery): استغلال الحرارة الناتجة من وحدات التهوية أو التبريد لإعادة استخدامها في التسخين أو التسخين المسبق للهواء الخارجي. (Mardiana-Idayu & Riffat, 2012)

- التشغيل الليلي (Night Purge): استخدام الهواء البارد خلال الليل لتقليل الحمل الحراري في الصباح. (Solgi et al., 2016)

- التهوية الطبيعية المدعومة (Hybrid Ventilation): الجمع بين التهوية الطبيعية والميكانيكية لتحسين الكفاءة في الفصول المعتدلة. (Cho et al., 2021)

3-7-3 دور أنظمة BEMS في تحسين الكفاءة:

يلعب نظام إدارة طاقة المباني (BEMS) دوراً محورياً في تحسين كفاءة تشغيل أنظمة HVAC ، من خلال:

- رصد وتحليل بيانات الاستهلاك الفعلي للطاقة.

- ضبط نقاط التحكم (Setpoints) بناءً على الظروف البيئية وسلوك المستخدم.

(Olatunde et al., 2024) استخدام خوارزميات تنبؤية للتشغيل المسبق والتعديل التلقائي لأنظمة.

3-7-4 مؤشرات تقييم الكفاءة:

تشمل المؤشرات القياسية المستخدمة لتقييم كفاءة نظام HVAC :

• (COP) Coefficient of Performance: مقياس لنسبة الطاقة الناتجة إلى الطاقة المستهلكة في وضع التبريد أو التسخين.

• (EER) Energy Efficiency Ratio: مؤشر كفاءة الطاقة في أنظمة التكييف.

• (IPLV) Integrated Part Load Value: يعكس كفاءة النظام في ظروف الحمل الجزئي.

• (SEER) Seasonal Energy Efficiency Ratio: مؤشر كفاءة التشغيل الموسمي، شائع في

تقييم أداء وحدات الانقسام (Split Units). (Nandagopal, 2024)

3-8 التحديات المستقبلية في أنظمة HVAC

رغم التقدم الكبير في تقنيات أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) ، إلا أن هناك عدداً من التحديات المستقبلية التي لا تزال تواجه الباحثين والمهندسين عند تصميم وتنفيذ وتشغيل هذه الأنظمة، لا سيما في ظل الاتجاه العالمي نحو تحقيق الكفاءة الطاقية والاستدامة البيئية. من أبرز هذه التحديات:

1. التوازن بين كفاءة الطاقة وجودة الهواء الداخلي (IAQ)

تقليل استهلاك الطاقة قد يتعارض أحياناً مع متطلبات جودة الهواء الداخلي، خصوصاً في أنظمة التهوية. تقليل معدلات التهوية لتوفير الطاقة قد يؤدي إلى تراكم الملوثات وزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون داخل الفراغات، ما يؤثر سلباً على راحة وصحة المستخدمين. التحدي هنا يكمن في تطوير استراتيجيات تحكم توازن بدقة بين الكفاءة الطاقية والحفاظ على بيئة صحية داخلية.

2. التكامل مع الأنظمة الذكية وأنظمة BEMS

على الرغم من أهمية أنظمة إدارة طاقة المباني (BEMS) في تحسين أداء HVAC ، إلا أن العديد من الأبنية الحالية تعتمد على بنى تحتية قديمة أو أنظمة متفرقة، ما يصعب عملية التكامل. هناك حاجة إلى تطوير بروتوكولات تواصل ومعايير مفتوحة تضمن التكامل السلس بين الأنظمة المختلفة مثل BEMS و HVAC و EMS (أنظمة إدارة الطاقة).

3. تعقيد الصيانة والتحكم في الأنظمة المتقدمة:

مع تزايد تعقيد الأنظمة، خصوصاً في الأبنية الذكية، أصبحت عمليات الصيانة وإعادة المعايرة والتحكم في الأنظمة أكثر تطلبًا من حيث المهارات الفنية والتكليف. هذا يتطلب توفير كوادر مؤهلة وتطوير أدوات تشخيص ذكية تعتمد على التحليل التنبئي. (Olatunde et al., 2024)

4. تغير أنماط الإشغال والسلوك البشري:

أنظمة HVAC التقليدية غالباً ما تعتمد على جداول تشغيل ثابتة، دون الأخذ في الحسبان التغيرات الديناميكية في إشغال المبنى وسلوك المستخدمين. مثل هذا التباين يؤدي إلى تشغيل غير فعال واستهلاك طاقة غير ضروري. من الضروري تطوير أنظمة تعتمد على الاستشعار والذكاء الاصطناعي للتكيف في الزمن الحقيقي مع الظروف المتغيرة.

5. تحديات مرتبطة بالتغيير المناخي:

تغير المناخ يفرض ضغوطاً متزايدة على أداء أنظمة التكييف، خصوصاً في المناطق التي تشهد ارتفاعاً

في درجات الحرارة أو تقواطعاً حرارياً كبيراً. يتطلب الأمر إعادة تصميم الأنظمة لتكون أكثر مرنة وقدرة على العمل في ظروف مناخية مستقبلية غير مستقرة.

2-3-9 التوجهات البحثية الحديثة والمستقبلية:

استجابةً لهذه التحديات، يتجه البحث العلمي والهندسي في مجال HVAC نحو محاور استراتيجية تهدف إلى تحسين الأداء والاستدامة، منها:

- التحكم التنبؤي المعتمد على النماذج (Model Predictive Control – MPC) :
يُعد من أقوى أدوات التحكم المتقدمة، حيث يعتمد على نماذج رياضية تتبع بسلوك النظام وتقوم بضبطه لتحقيق الأداء الأمثل. يتم استخدام MPC في العديد من الدراسات لتقليل استهلاك الطاقة وتحسين جودة البيئة الداخلية مع التفاعل الذكي مع جداول الأحمال وأنماط الإشغال .(Kim et al., 2022)
- استخدام الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي (ML) :
يشهد المجال نمواً سريعاً في تطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات الضخمة الناجمة عن مستشعرات BEMS و HVAC. تكنولوجيات مثل الشبكات العصبية، والشجرة العشوائية، والتعلم المعزز تُستخدم لتطوير أنظمة تحكم ذاتي التكيف وتحسين صيانة الأعطال عبر التشخيص التنبؤي (Ke et al., 2020; Verbert et al., 2017)
- تطوير تقنيات منخفضة الكربون وذات كفاءة عالية:
مثل استخدام المضخات الحرارية المتقدمة، أنظمة التكييف بالتبديد التبخيري، والتكييف الشمسي، وكذلك المبادلات الحرارية الحرارية-أرضية. هذه التقنيات تهدف إلى تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية وتخفيض البصمة الكربونية للمبني.
- التوأم الرقمي (Digital Twin) :
يُستخدم التوأم الرقمي لتمثيل نسخة افتراضية دقيقة لأنظمة HVAC في الزمن الحقيقي، مما يتيح مراقبة

الأداء، اكتشاف الأعطال، وتقدير سيناريوهات تشغيل متعددة قبل تطبيقها فعليًا. هذا يسهم في تحسين الصيانة والتخطيط الطاقي (Xie et al., 2023).

- **التفاعل مع الشبكات الذكية ومرنة الطلب : (Demand Response)**

تزايد الاهتمام بأنظمة HVAC القادرة على التفاعل مع شبكات الكهرباء الذكية لتقليل الأحمال خلال فترات الذروة، مما يحقق توازنًا بين العرض والطلب ويقلل من انبعاثات الكربون.

- **استخدام المواد الذكية وتقنيات العزل المتقدمة:**

من بين التوجهات أيضًا، تحسين غلاف المبنى الحراري باستخدام مواد عازلة متغيرة الخصائص، وأسطح ذكية تعكس الحرارة أو تتصبّح حسب الموسم، ما يقلل العبء الحراري على أنظمة HVAC (Olatunde et al., 2024).

الفصل الثالث:

Dور ال BIM في تحسين كفاءة تصميم وتشغيل أنظمة ال BEMS ونظام ال HVAC

1- مدخل نظري:

أضحت المباني المعاصرة من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة، ولا سيما تلك ذات الكثافة الوظيفية العالية مثل الأبنية التعليمية والتجارية والخدمية والمستشفيات. ويعزى ذلك إلى تعقيد الأنظمة التشغيلية وتزايد الاعتماد على أجهزة التبريد والتدفئة والإضاءة والأنظمة الإلكترونية. ووفق العديد من الدراسات، فإن أنظمة التدفئة والتقوية والتبريد (HVAC) تستأثر بأكبر نسبة من استهلاك الطاقة، إذ تصل في بعض المباني إلى أكثر من نصف الاستهلاك الكلي. هذه الحقيقة تجعل من تحسين تصميم وتشغيل أنظمة ال HVAC أولوية رئيسية في أي مقاربة تسعى إلى تقليل الاستهلاك وتحقيق استدامة المبني.

في هذا السياق برزت أنظمة إدارة طاقة المبني (BEMS) كوسيلة تنظيمية ذكية تهدف إلى مراقبة الطاقة وإدارتها عبر جمع البيانات التشغيلية ومعالجتها من خلال برمجيات تحكم متقدمة. غير أن نجاح BEMS يتوقف على دقة البيانات المرتبطة بالخصائص الهندسية للمبني وبأداء أنظمته الداخلية. وهنا تبرز أهمية نبذة معلومات البناء (BIM)، التي تمثل بيئتاً متكاملاً تربط بين التوصيف الهندسي للمبني وبياناته الفизيائية والتشغيلية في نموذج رقمي واحد.

2- التكامل بين BIM و BEMS :

تشكل BIM إطاراً معلوماتياً غنياً يسمح بتجميع البيانات المعمارية والإنسانية والكهربائية والميكانيكية ضمن نموذج موحد، يمكن تبادله مع مختلف الأطراف المشاركة في دورة حياة المبني. ويمثل هذا التكامل قيمة جوهرية لأنظمة BEMS من عدة نواحي:

1. توفير قاعدة بيانات موثوقة: حيث يحتوي النموذج الرقمي على الخصائص الفيزيائية للمبني (العزل، المواد، المساحات، الفتحات)، ما يتيح إدخالها مباشرة في أنظمة الإدارة دون الحاجة إلى تقديرات تقريبية.
2. تعزيز دقة التنبؤ بالأحمال: عبر ربط بيانات التصميم بمعطيات التشغيل، يمكن تقدير استهلاك الطاقة بدقة، الأمر الذي يعزز من قدرة BEMS على التخطيط المسبق لتوزيع الأحمال.

3. الرابط بين مرحلتي التصميم والتشغيل: إذ لا تقتصر BIM على مرحلة التصميم، بل تمتد لتشكل مرجعاً خلال التشغيل والصيانة، بما يسمح بمواقبة الأداء الفعلي مع الأداء المتوقع.

4. إمكانية المحاكاة والتحليل динاميكي: يمكن اختبار سيناريوهات تشغيل مختلفة في بيئه رقمية قبل اعتمادها فعلياً، مما يقلل من المخاطر التشغيلية.

وبذلك، فإن التكامل بين BIM و BEMS يسهم في تقليل الفجوة التقليدية بين التصميم النظري وإدارة الطاقة الواقعية، من خلال توفير بيانات دقيقة وقابلة للتحديث، ولا سيما فيما يتعلق بأنظمة HVAC.

3-3-دور الـ HVAC في منظومة استهلاك الطاقة:

تتميز أنظمة الـ HVAC بكونها أنظمة ذات أحجام متغيرة ومتأثرة بعده عوامل: الظروف المناخية، جودة العزل الحراري، عدد المستخدمين، وأوقات التشغيل. ويُعدّ تقدير هذه الأحمال بدقة أساساً لتصميم فعال يضمن كفاءة الطاقة.

من هذا المنطلق، يُسهم توظيف BIM في:

- **تحليل عميق للأحمال الحرارية**: استناداً إلى بيانات هندسية دقيقة للمبني، بما يتجاوز الطرق التقليدية المعتمدة على الحسابات البسيطة.
- **الكشف المبكر عن التعارضات التصميمية**: مثل تضارب مجاري الهواء مع العناصر الإنسانية، ما يقلل الحاجة إلى التعديلات الميدانية المكلفة.
- **دمج النظام ضمن النموذج الكلي**: إذ يُمثل نظام HVAC كجزء من النموذج الرقمي للمبني، ما يضمن توافقه مع الأنظمة الكهربائية والمعمارية.

تتيح هذه الإمكانيات بناء نظام HVAC مصمم على أساس علمية، قادر على الارتباط المباشر مع نظام BEMS لتحقيق كفاءة تشغيلية عالية.

3-4-دور برنامج Revit في تصميم أنظمة HVAC :

يُعد Autodesk Revit من أبرز أدوات BIM وأكثرها توظيفاً في مجال تصميم الأنظمة الميكانيكية، ولا سيما HVAC وتتبع أهميته من قدرته على الدمج بين النمذجة ثلاثية الأبعاد والخصائص الوصفية والتشغيلية.

من بين المزايا التي يتيحها البرنامج:

1. **النموذج الرقمية عالية الدقة**: حيث يمكن تمثيل وحدات معالجة الهواء، مجاري الهواء، المضخات، وأجهزة التحكم، ضمن بيئه ثلاثة الأبعاد مرتبطة بقاعدة بيانات تشغيلية.
2. **إجراء التحليل الطافي**: عبر ربط Revit بمنصات تحليل مثل Green Building Studio أو تصدير بياناته بصيغة gbXML إلى برمجيات المحاكاة الطافية.
3. **مرنة التعديلات التصميمية**: إذ يتيح البرنامج تحديث النموذج بشكل ديناميكي عند أي تغيير في معطيات المبنى (مثل إضافة طابق أو تعديل مواد الجدران)، ما يؤدي إلى إعادة حساب الأحمال الحرارية آلياً.
4. **إتاحة سيناريوهات متعددة**: يمكن مقارنة أداء أنظمة بديلة (مياه مبردة مقابل هواء مبرد) أو دراسة أثر تغير ظروف التشغيل، ما يدعم اتخاذ قرارات تصميمية مدققة.
5. **التكامل مع BEMS**: من خلال إمكانية تبادل البيانات باستخدام معايير مثل IFC ، ما يسمح بانتقال بيانات التصميم إلى أنظمة الإدارة الذكية دون فقدان المعلومات.

3-5-المرنة التصميمية التي يوفرها BIM في أنظمة HVAC :

تعتبر المرنة التصميمية أحد أهم المزايا التي يمنحها تطبيق نموذج معلومات البناء (BIM) عند تصميم أنظمة التدفئة والتهوية والتبريد(HVAC) ، لما لهذه الأنظمة من حساسية عالية تجاه أي تغير في خصائص المبنى أو أنماط استخدامه. إذ يُسهم BIM في توفير بيئه ديناميكية قادرة على التكيف مع التغيرات المستمرة في مختلف مراحل دورة حياة المبنى، بدءاً من التصميم المبكر وحتى التشغيل والصيانة. ويمكن تفصيل أبعاد هذه المرنة كما يلي:

1. التكيف مع تغير الأحمال الحرارية:

الأحمال الحرارية في المبني ليست ثابتة، بل تتأثر بعدة عوامل مثل مواد البناء، درجة العزل، مساحة النوافذ، اتجاه الواجهة، وعدد المستخدمين. من خلال BIM ، يمكن إدخال هذه المتغيرات إلى النموذج الرقمي، بحيث يقوم البرنامج تلقائياً بإعادة حساب الأحمال الحرارية وتحديث متطلبات HVAC تبعاً للتغيير. على سبيل المثال، عند تغيير مادة الجدران أو نوع الزجاج، يُظهر النموذج أثر ذلك على كفاءة

العزل، وبالتالي على قدرة وحدات التبريد أو التدفئة المطلوبة. هذه الآلية الديناميكية تقلل من الحاجة إلى إعادة الحساب اليدوي، وتسمح للمصمم بمقارنة عدة خيارات لاختيار الأكثر كفاءة.

2. الاستجابة لتغير أنماط الاستخدام الوظيفي:

المبني قد تتغير وظيفتها أو تتبدل أنماط استخدامها بمرور الوقت، مثل تحويل مبنى إداري إلى مبنى تعليمي أو طبي. مثل هذا التغيير يعني اختلاف جداول إشغال المبني، ساعات الذروة، وعدد المستخدمين، وهو ما يفرض أحتمالاً مختلفة على أنظمة HVAC . يتيح BIM تعديل جداول الإشغال في النموذج بسهولة، ما يعكس فوراً على تصميم النظام. وبالتالي، يمكن تقييم قدرة النظام الحالي على استيعاب هذه المتغيرات أو تحديد الحاجة إلى إعادة التوزيع أو زيادة السعة.

3. محاكاة السيناريوهات المستقبلية:

من خلال بيئة BIM ، يمكن للمصممين محاكاة سيناريوهات مستقبلية مثل ارتفاع درجات الحرارة نتيجة تغير المناخ، أو زيادة عدد المستخدمين بفعل توسيع المبني. تتيح هذه المحاكاة تقييم أداء النظام تحت ظروف تشغيلية غير اعتيادية، وتحديد نقاط الضعف قبل حدوثها. وهذا يُعد أمراً محورياً في التخطيط لمباني مستدامة ومرنة قادرة على التكيف مع متطلبات غير متوقعة.

4. إعادة التكوين الديناميكي للنظام:

توفر أدوات BIM القدرة على اختبار عدة بدائل تصميمية داخل بيئة رقمية متكاملة، مثل تغيير توزيع مجاري الهواء، أو استبدال وحدات التكيف بأخرى ذات كفاءة أعلى، أو تعديل موقع وحدات معالجة الهواء. يتيح ذلك إجراء مقارنات دقيقة بين هذه البدائل وفق معايير مثل كفاءة استهلاك الطاقة، مستويات الراحة الحرارية، والكلفة التشغيلية. والنتيجة هي نظام HVAC مُحسن بعناية وفق معطيات موضوعية وليس تقديرية.

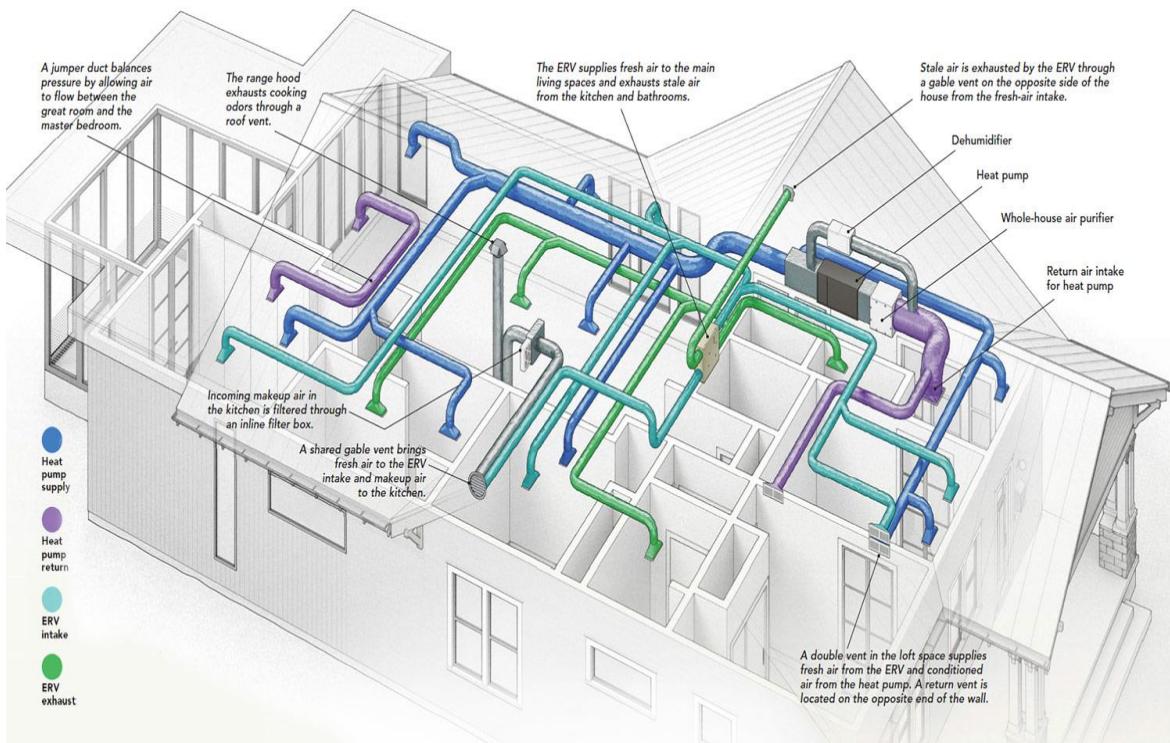
5. التكامل مع أنظمة إدارة الطاقة (BEMS) :

أحد أبرز أوجه المرونة يتمثل في قدرة BIM على توفير بيانات قابلة للربط مباشرة مع أنظمة BEMS . فعند تحديث التصميم أو إدخال تغييرات على النظام، يتم نقل هذه التعديلات بشكل سلس إلى نظام الإدارة، مما يسمح بمزامنة مستمرة بين التصميم والتشغيل. وبهذا الشكل، يصبح النظام قادرًا على التكيف الفوري مع التغييرات التشغيلية وتحديث استراتيجيات التحكم بما يتناسب مع الواقع الجديد.

6. تقليل الهدر الطاقي وتحسين الكفاءة التشغيلية:

المرونة التصميمية التي يوفرها BIM لا تعني فقط القدرة على إدخال تغييرات سريعة، بل تتجاوز ذلك إلى تحسين استهلاك الطاقة بشكل جوهري. فعبر اختبار عدة سيناريوهات قبل التنفيذ، يمكن اختيار الحل الأمثل الذي يوازن بين الراحة الحرارية وتقليل الهدر الطاقي. على سبيل المثال، قد يُظهر التحليل أن تعديل بسيط في توزيع الهواء أو تحسين العزل في منطقة معينة يؤدي إلى تقليل الحمل على النظام بنسبة ملحوظة، وبالتالي تخفيض الاستهلاك الكلي للطاقة.

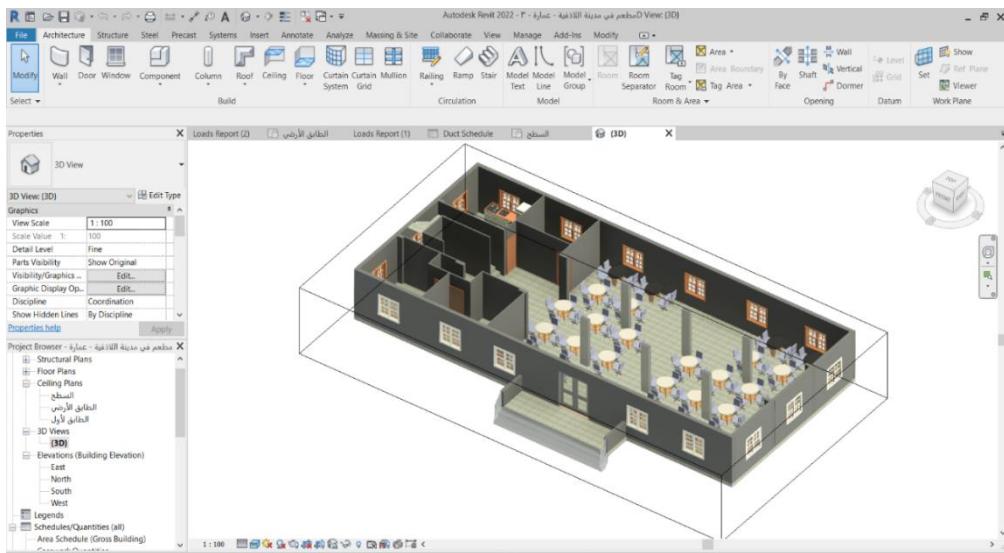
باختصار، تُشكل المرونة التصميمية التي يقدمها BIM في أنظمة HVAC عاملًا حاسماً لتحقيق كفاءة الطاقة والاستدامة. فهي لا تقتصر على تسهيل التعديلات أو تحسين دقة الحسابات، بل تؤسس لنموذج تصميمي وتشغيلي ذكي قادر على التكيف مع الظروف المتغيرة، بما يضمن أداءً متوازناً وفعالاً على المدى الطويل.



الشكل (1-3): نسخة نموذج HVAC في برنامج Revit

الفصل الرابع: الإطار العملي للدراسة

- بغية تطبيق وإيضاح الجانب العملي للمفاهيم النظرية المطروحة في الأقسام السابقة، جرى اختيار مبني فندقي ليكون موضوع الحالة الدراسية، وذلك لإبراز دور تقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) في تصميم أنظمة إدارة المباني (BEMS). وقد تم التركيز على نظام التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) بوصفه أحد أهم الأنظمة الفرعية وأكثرها استهلاكاً للطاقة، فضلاً عن كونه من أكثر الأنظمة شيوعاً واستخداماً في المباني المعاصرة.
- بعد الحصول على النموذج المعماري للمبني، تم إجراء تحليل حراري باستخدام برنامج Revit ، حيث جرى توليد تقرير يتضمن القيم الحرارية الأساسية وأحمال التبريد والتدفئة والتهوية. وبناءً على نتائج هذا التقرير، تمت نمذجة نظام التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) للطابق الأرضي، الذي يضم صالة مطعم بمساحة 190 م²، ومطبخاً 14 م²، وغرفة إدارة 28 م²، إضافةً إلى الحمامات الخاصة بالرجال والنساء. الشكل (1-4).



الشكل (1-4): شكل ثلاثي الأبعاد للمبني

تم تطبيق ثلاثة سيناريوهات أثناء التحليل الحراري للمبني، أعقبها تصميم نظام HVAC لكل سيناريو بناءً على نتائج التحليل. وتهدف هذه السيناريوهات إلى تقييم مرونة بيئة BIM باستخدام برنامج Revit ، من خلال دراسة تأثير التغييرات المختلفة على النظام، بما في ذلك الأحمال المطلوبة للتدفئة والتبريد، وتدفقات الهواء، وحجم النظام المستخدم لكل مساحة. كما تبين النتائج قدرة البرنامج على تسهيل تعديل التصميم وتوفير المرونة اللازمة لإجراء التعديلات، دون الحاجة لإعادة التصميم من الصفر. وسيتم عرض هذه السيناريوهات تباعاً لتوضيح أثر كل سيناريو.

الحالة الأولى: الدراسة تتم بدون عازل حراري للجدران والسقف:

تم في هذه الحالة نمذجة نظام ال HVAC للطابق الأرضي بدون وجود عازل حراري للسقف والجدران كذلك تم استخدام زجاج النوافذ من النوع العادي المفرد.

تركيبة الجدران الخارجية:

λ w/m.k	السماكه mm	المادة
1.53	50	حجر كلاسي
1.4	30	مؤونة اسمنتية
1	200	بلوك من البeton مفرغ
1.4	30	مؤونة اسمنتية

لدينا:

$$R_i = 0.13 \frac{W}{m^2 K} \quad R_o = 0.03 \frac{W}{m^2 K}$$

حيث R_i : المقاومة الحرارية السطحية الداخلية.
 R_o : المقاومة الحرارية السطحية الخارجية ومقاومة الفراغات الهوائية.

معامل انتقال الحرارة للجدران الخارجية:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum \frac{L_i}{\lambda_i} + R_o}$$

$$U = \frac{1}{0.13 + \frac{0.050}{1.53} + 2 * \frac{0.030}{1.4} + \frac{0.200}{1} + 0.03} = 1.14 \frac{W}{m^2 K}$$

تركيبة السقف:

المقطع 1 - 1 :

λ w/m.k	السماكه بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص

0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
1.85	210	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_1 = \frac{1}{Ri + \sum \frac{Li}{\lambda i} + Ro}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.21}{1.85} + 0.03}$$

$$= 1.14 \frac{W}{m^2 K}$$

المقطع 2 - 2

λ w/m.k	السماكه بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص
0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
0.95	150	هوردي
1.85	60	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_2 = \frac{1}{Ri + \sum \frac{Li}{\lambda i} + Ro}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.150}{0.95} + \frac{0.06}{1.85} + 0.03}$$

$$= 0.8 \frac{W}{m^2 K}$$

وكمثال على ذلك، يحسب معامل الانتقال الحراري للسقف البوردي والمبين في الشكل

$$U = \frac{U_1 A_1 + U_2 A_2}{A} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

حيث :

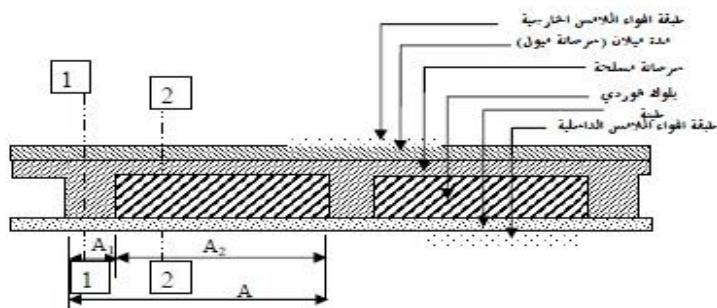
U_1 = معامل الانتقال الحراري لجزء العنصر الذي متقطعه (1-1)

A_1 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (1-1)

U_2 = معامل الانتقال الحراري لجزء العنصر العقدة الذي متقطعه (2-2)

A_2 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (2-2)

. A = مجموع المساحات $(A_1 + A_2)$.



قطع في سقف بوردي

وبالتالي:

$$U = \frac{(1.14 \times 0.16) + (0.8 \times 0.4)}{(0.16 + 0.4)}$$

$$= 0.9 \frac{W}{m^2 K}$$

الأبواب خشبية معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 2.19 \frac{W}{m^2 K}$$

النوافذ من الزجاج العادي المفرد مع المنيوم معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 5.9 \frac{W}{m^2 K}$$

مزودة بستائر قماشية معامل التظليل لها 0.5

نور فيما يلي الأهمال الحرارية للحالة الأولى:

Project Summary

Location and Weather	
Project	Project Name
Address	LATTAKIA
Calculation Time	آب , 27 ٠ 05:04 2025
Report Type	Detailed
Latitude	35.36°
Longitude	35.46°
Summer Dry Bulb	32 °C
Summer Wet Bulb	27 °C
Winter Dry Bulb	4 °C
Mean Daily Range	5 °C

Building Summary

Inputs	
Building Type	Hotel
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	15.7
Peak Cooling Month and Hour	August 01:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	8.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	7.4
Maximum Cooling Capacity (ton)	15.7
Peak Cooling Airflow (L/s)	1,400.5
Peak Heating Load (W)	8,209
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	259.87
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	6.60
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	25.38
Cooling Area / Load (m ² /kW)	3.85
Heating Load Density (W/m ²)	38.67
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41

Level Summary - الطابق الأرضي

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	9.8
Peak Cooling Month and Hour	August 01:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	7.2
Peak Cooling Latent Load (ton)	2.6

Peak Cooling Airflow (L/s)	1,400.5
Peak Heating Load (W)	-5,803
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	162.72
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	6.60
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	40.54
Cooling Area / Load (m ² /kW)	6.15
Heating Load Density (W/m ²)	-27.33
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41

Zone Summary - Default

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Cooling Setpoint	23 °C
Heating Setpoint	21 °C
Supply Air Temperature	12 °C
Number of People	137
Infiltration (L/s)	62.8
Air Volume Calculation Type	VAV - Single Duct
Relative Humidity	48.00% (Calculated)
Psychrometrics	
Psychrometric Message	None
Cooling Coil Entering Dry-Bulb Temperature	30 °C
Cooling Coil Entering Wet-Bulb Temperature	23 °C
Cooling Coil Leaving Dry-Bulb Temperature	12 °C
Cooling Coil Leaving Wet-Bulb Temperature	12 °C
Mixed Air Dry-Bulb Temperature	30 °C
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	15.7
Peak Cooling Month and Hour	August 01:00 ↗
Peak Cooling Sensible Load (ton)	8.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	7.4
Peak Cooling Airflow (L/s)	1,400.5
Peak Heating Load (W)	8,209
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Peak Ventilation Airflow (L/s)	672.7
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	259.87
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	6.60
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	25.38
Cooling Area / Load (m ² /kW)	3.85
Heating Load Density (W/m ²)	38.67
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41
Ventilation Density (L/(s·m ²))	3.17
Ventilation / Person (L/s)	4.9

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	1.6	10.49%	0.3	0.9	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.7	4.67%	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.1	0.73%	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Roof	1.6	10.10%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.5	3.27%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilation	5.7	36.39%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.7	4.53%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.4	2.26%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
People	4.2	26.56%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fan Heat	0.2	0.99%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reheat	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	15.7	100%	0.5	1.3	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)	
Wall	5,853	13.01%	2,171	2,138	751	793	0	0	0	0	0
Window	1,867	4.15%	800	400	400	267	0	0	0	0	0
Door	270	0.60%	0	270	0	0	0	0	0	0	0
Roof	3,295	7.32%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	1,309	2.91%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilation	14,012	31.14%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-2,498	-5.55%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-1,247	-2.77%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
People	14,652	-32.56%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	8,209	100%	2,972	2,807	1,151	1,060	0	0	0	0	0

Default Spaces

Space Name	Area (m ²)	Volume (m ³)	Peak Cooling Load (ton)	Cooling Airflow (L/s)	Peak Heating Load (W)	Heating Airflow (L/s)
1 Space	190	576.03	9.1	1,293.3	-6,728	622.5
2 Space	8	24.90	0.3	37.9	402	37.5
3 Space	14	41.97	0.6	69.3	523	64.0

Space Summary - 1 Space

Input Data	
Area (m ²)	190
Volume (m ³)	576.03
Wall Area (m ²)	280
Roof Area (m ²)	185
Door Area (m ²)	10
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	15
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	2,659
Power Load (W)	1,104
Number of People	133

Sensible Heat Gain / Person (W)	81		
Latent Heat Gain / Person (W)	81		
Infiltration Airflow (L/s)	54.0		
Space Type	Dining Area - Hotel		
Calculated Results			
Peak Cooling Total Load (ton)	9.1		
Peak Cooling Month and Hour	August 01:00 ↗		
Peak Cooling Sensible Load (ton)	6.6		
Peak Cooling Latent Load (ton)	2.5		
Peak Cooling Airflow (L/s)	1,293.3		
Peak Heating Load (W)	-6,728		
Peak Heating Airflow (L/s)	622.5		

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	1.5	16.28%	0.3	0.9	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.6	6.82%	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.1	1.26%	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	1.4	15.73%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.4	4.87%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.6	7.08%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.3	2.94%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	4.1	45.01%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	9.1	100%	0.4	1.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	5,036	17.74%	1,656	2,015	743	622	0	0	0	0
Window	1,467	5.17%	533	400	400	133	0	0	0	0
Door	270	0.95%	0	270	0	0	0	0	0	0
Roof	2,932	10.33%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	1,125	3.96%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-2,259	-7.96%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-938	-3.31%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-14,359	-50.59%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-6,728	100%	2,189	2,685	1,143	756	0	0	0	0

Space Summary - 2 Space

Input Data	
Area (m ²)	8
Volume (m ³)	24.90
Wall Area (m ²)	17
Roof Area (m ²)	9
Door Area (m ²)	2
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	1
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	98

Power Load (W)	134
Number of People	1
Sensible Heat Gain / Person (W)	73
Latent Heat Gain / Person (W)	59
Infiltration Airflow (L/s)	3.4
Space Type	Office - Enclosed
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	0.3
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00 ↗
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.0
Peak Cooling Airflow (L/s)	37.9
Peak Heating Load (W)	402
Peak Heating Airflow (L/s)	37.5

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.1	24.96%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.0	11.72%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.1	28.60%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.0	9.52%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	8.56%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.0	11.67%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	4.97%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.3	100%	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	314	34.77%	243	63	8	0	0	0	0	0
Window	133	14.77%	133	0	0	0	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	135	14.96%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	70	7.75%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-85	-9.47%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-117	-12.91%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-49	-5.38%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	402	100%	377	63	8	0	0	0	0	0

Space Summary - 3 Space

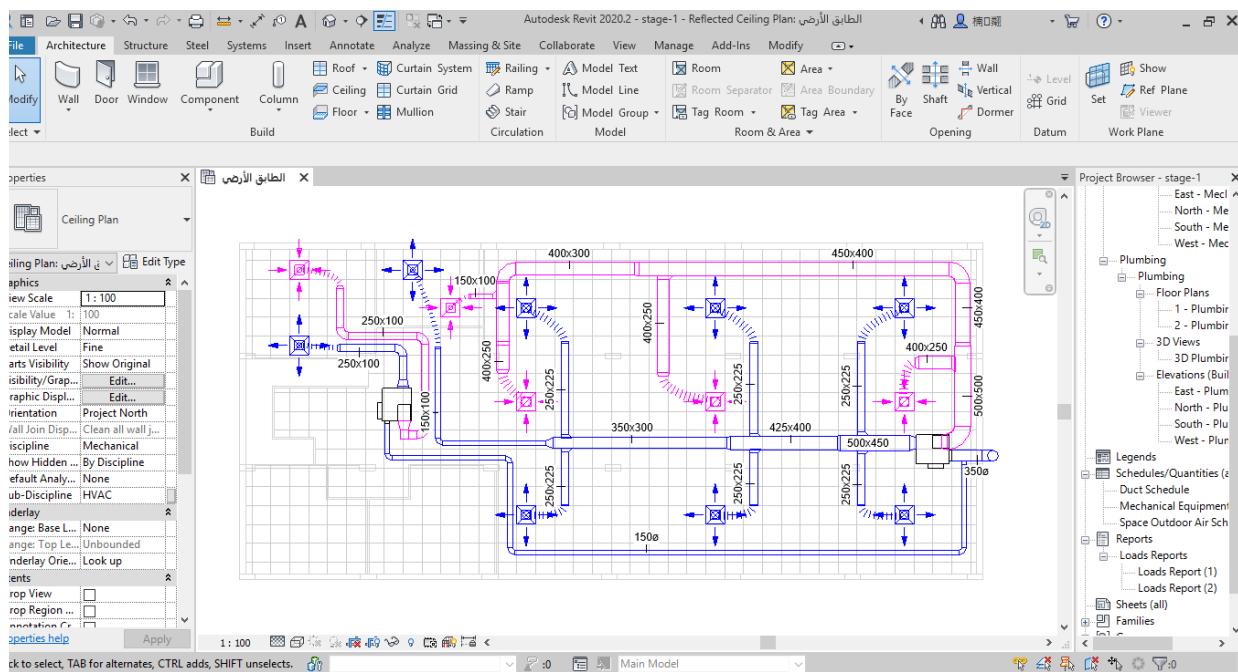
Input Data	
Area (m ²)	14
Volume (m ³)	41.97
Wall Area (m ²)	28
Roof Area (m ²)	14
Door Area (m ²)	2
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	3
Skylight Area (m ²)	0

Lighting Load (W)	181
Power Load (W)	226
Number of People	3
Sensible Heat Gain / Person (W)	73
Latent Heat Gain / Person (W)	59
Infiltration Airflow (L/s)	5.5
Space Type	Food Preparation
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	0.6
Peak Cooling Month and Hour	August 04:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.6
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.0
Peak Cooling Airflow (L/s)	69.3
Peak Heating Load (W)	523
Peak Heating Airflow (L/s)	64.0

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.2	25.02%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.2	27.82%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.1	19.95%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.0	6.99%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	7.06%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.1	8.83%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	4.33%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.6	100%	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	503	29.55%	273	59	0	171	0	0	0	0
Window	267	15.67%	133	0	0	133	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	229	13.43%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	114	6.71%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-154	-9.03%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-192	-11.29%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-244	-14.32%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	523	100%	406	59	0	304	0	0	0	0

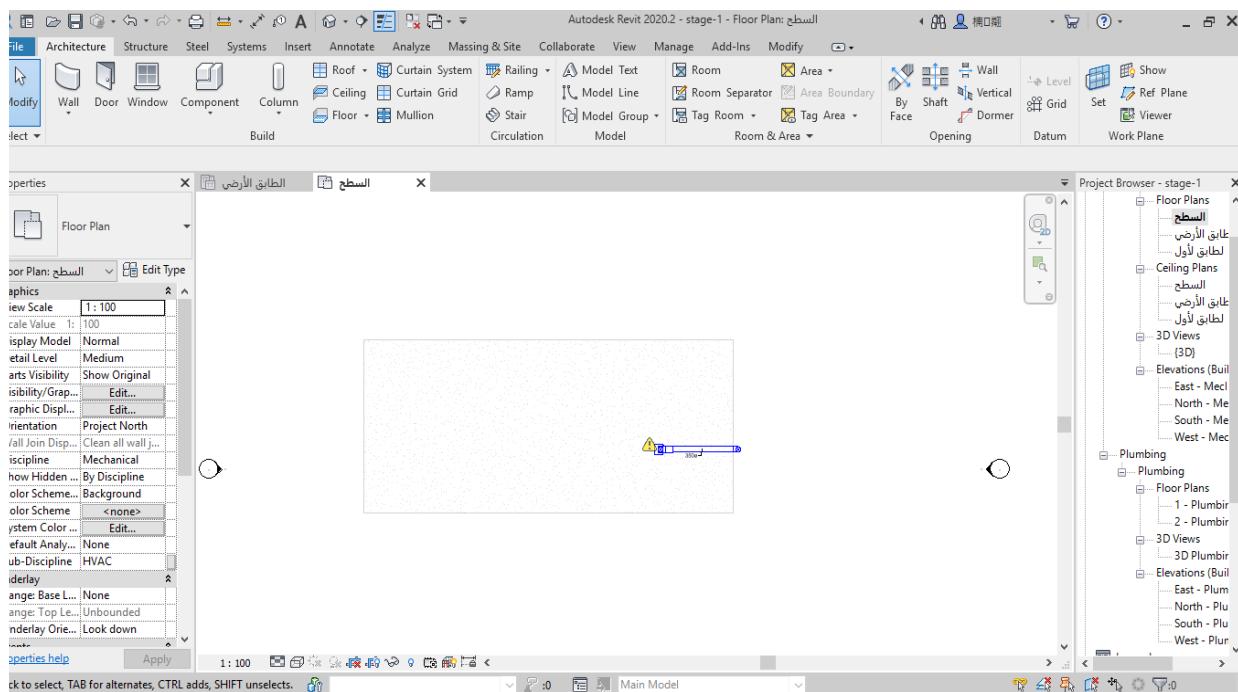
ويبيّن الشكل (4-2) مقطع للطابق الأرضي يظهر تصميم نظام ال HVAC على برنامج Revit حيث تظهر مكونات النظام من وحدات Supply Diffuser و Return Diffuser و Ducts .

:(Supply Air And Return Air)



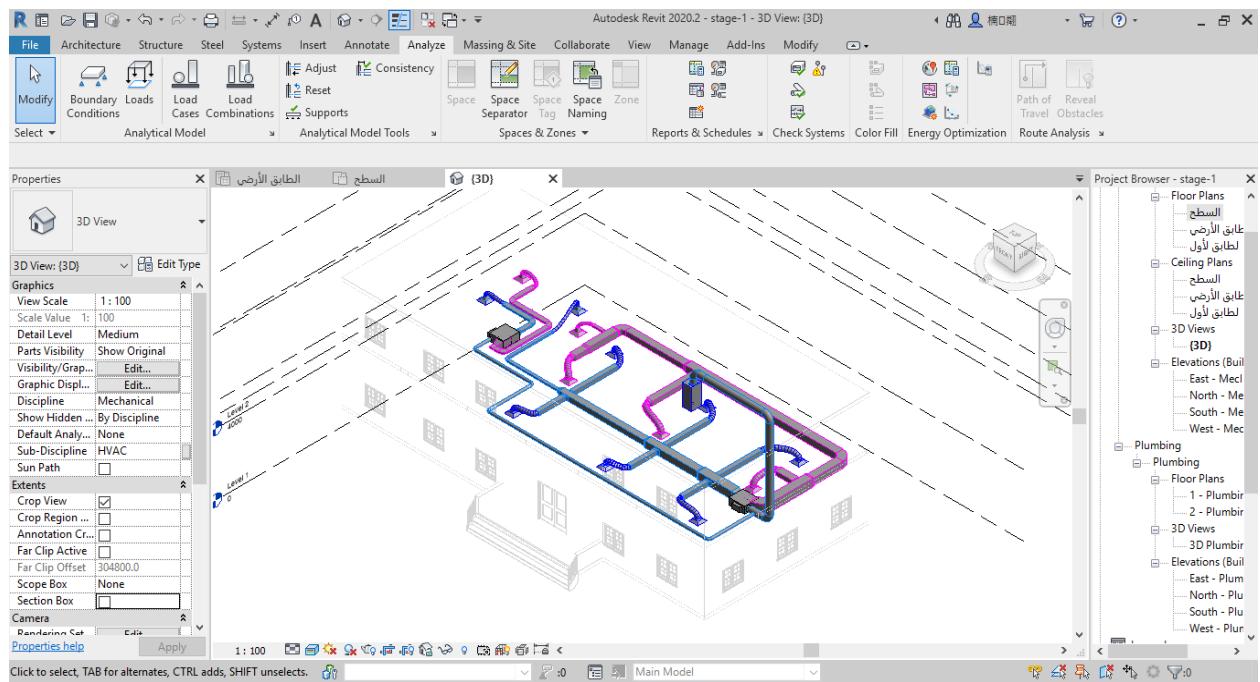
الشكل (4-2): مقطع لطابق الأرضي يظهر تصميم نظام ال HVAC على برنامج Revit

ويبيّن الشكل (3-4) مقطع للسطح يظهر توضع وحدة Air Handling Unit

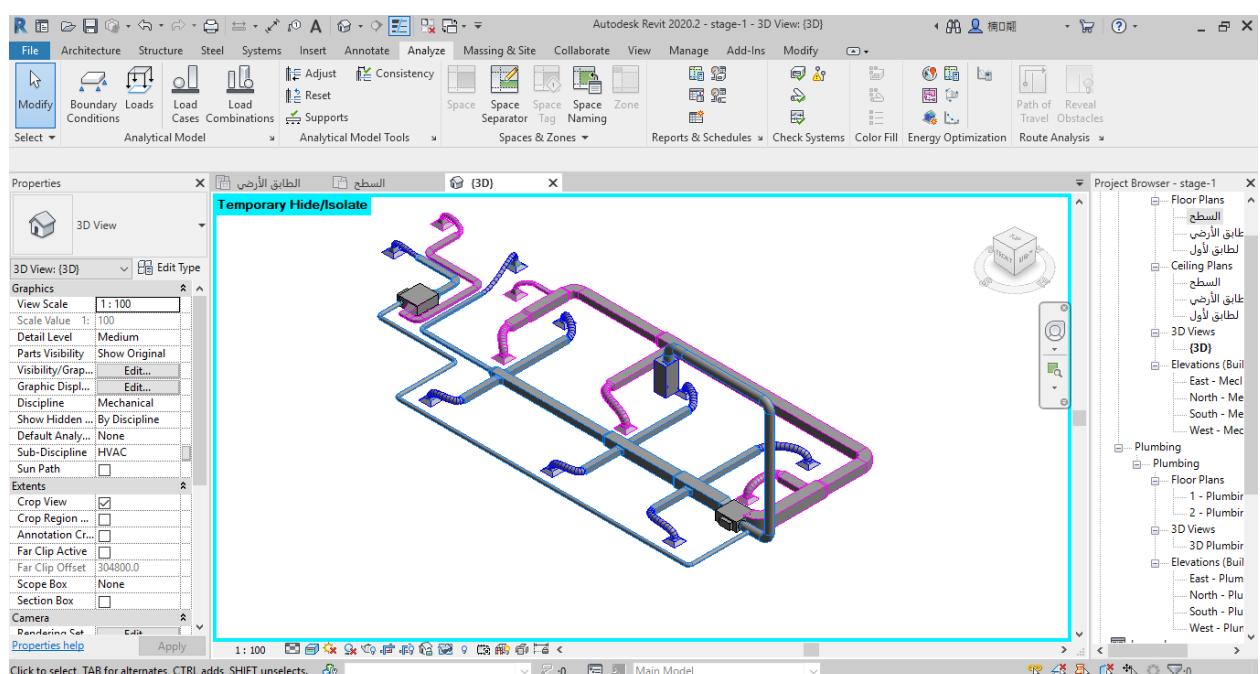


الشكل (4-3): مقطع للسطح يظهر توضع وحدة Air Handling Unit

ويظهر الشكل (4-3) منظور ثلاثي الأبعاد للنظام.



الشكل (4-3): منظور ثلاثي الأبعاد للنظام.



الشكل (4-4): منظور ثلاثي الأبعاد للنظام.

الحالة الثانية: الدراسة تم باستخدام عازل من ألواح البوليوريتان سماكة 50 mm

للجدران والسقف:

في هذا السيناريو، تم إضافة عازل حراري للجدران والسقف، واستخدام زجاج للنوافذ من النوع المزدوج مع ألمينيوم وتم تعديل المدخلات في برنامج Revit بما يتوافق مع ذلك. نتيجةً لذلك، تم تحديث القيم الحرارية، وقام البرنامج تلقائياً بإصدار تقرير جديد لأحمال التبريد والتدفئة والتهوية لكل قسم من المبني. استناداً إلى هذا التقرير، تم تعديل التصميم دون الحاجة للبدء من جديد، كما يتضح من الجداول والصور المرفقة.

تركيبة الجدران الخارجية:

λ w/m.k	السماكة mm	المادة
1.53	50	حجر كلاسي
1.4	30	مؤونة اسمنتية
1	100	بلوك من البيتون مفرغ
0.023	50	ألواح البوليوريتان
1	100	بلوك من البيتون مفرغ
1.4	30	مؤونة اسمنتية

$$Ri = 0.13 \frac{W}{m^2 K}$$

$$Ro = 0.03 \frac{W}{m^2 K}$$

معامل انتقال الحرارة للجدران الخارجية:

$$U = \frac{1}{Ri + \sum \frac{Li}{\lambda_i} + Ro}$$

$$U = \frac{1}{0.13 + \frac{0.050}{1.53} + 2 * \frac{0.030}{1.4} + \frac{0.05}{0.023} + \frac{0.200}{1} + 0.03} = 0.35 \frac{W}{m^2 K}$$

تركيبة السقف:

المقطع ١ - ١ :

λ w/m.k	السماكة بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص
0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
0.023	50	ألواح البوليوريتان
1.85	210	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_1 = \frac{1}{R_i + \sum \frac{L_i}{\lambda i} + R_o}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.05}{0.023} + \frac{0.21}{1.85} + 0.03}$$

$$= 0.38 \frac{W}{m^2 K}$$

المقطع ٢ - ٢ :

λ w/m.k	السماكة بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص
0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
0.023	50	ألواح البوليوريتان

0.95	150	هوردي
1.85	60	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{1}{R_o}}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.150}{0.95} + \frac{0.05}{0.023} + \frac{0.06}{1.85} + 0.03}$$

$$= 0.369 \frac{W}{m^2 K}$$

وكمثال على ذلك، يحسب معامل انتقال الحراري للسقف الهوردي والمبين في الشكل

$$U = \frac{U_1 A_1 + U_2 A_2}{A} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

حيث :

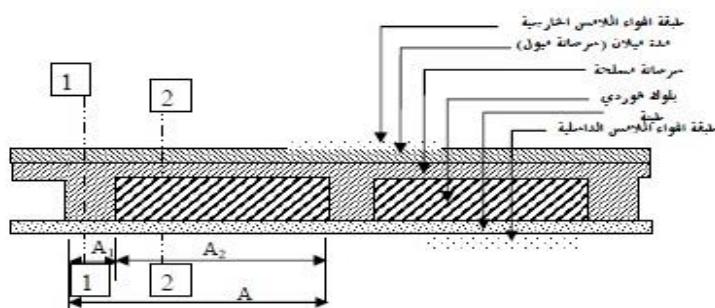
U_1 = معامل انتقال الحراري لجزء العنصر الذي متقطعه (1-1)

A_1 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (1-1)

U_2 = معامل انتقال الحراري لجزء العنصر العقدة الذي متقطعه (2-2)

A_2 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (2-2)

A = مجموع المساحات $(A_1 + A_2)$.



مقطع في سقف هوردي

وبالتالي:

$$U = \frac{(0.38 \times 0.16) + (0.369 \times 0.4)}{(0.16+0.4)}$$

$$= 0.324 \frac{W}{m^2 K}$$

الأبواب خشبية معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 2.19 \frac{W}{m^2 K}$$

النوافذ من الزجاج المزدوج مع المنيوم معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 1.98 \frac{W}{m^2 K}$$

مزودة بستائر قماشية معامل التظليل لها 0.5

نورد فيما يلي الأحمال الحرارية للحالة الثانية:

Project Summary

Location and Weather	
Project	Project Name
Address	LATTAKIA
Calculation Time	28 م 02:44 2025 آب,
Report Type	Detailed
Latitude	35.36°
Longitude	35.46°
Summer Dry Bulb	32 °C
Summer Wet Bulb	27 °C
Winter Dry Bulb	4 °C
Mean Daily Range	5 °C

Building Summary

Inputs	
Building Type	Hotel
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	11.1
Peak Cooling Month and Hour	August 01:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	5.2
Peak Cooling Latent Load (ton)	5.8
Maximum Cooling Capacity (ton)	11.0
Peak Cooling Airflow (L/s)	798.0
Peak Heating Load (W)	-373

Peak Heating Airflow (L/s)	672.7
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	183.53
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	3.76
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	20.48
Cooling Area / Load (m ² /kW)	5.45
Heating Load Density (W/m ²)	-1.76
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.17

الطابق الأرضي - Level Summary

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	7.0
Peak Cooling Month and Hour	August 12:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	4.1
Peak Cooling Latent Load (ton)	2.9
Peak Cooling Airflow (L/s)	798.0
Peak Heating Load (W)	-14,385
Peak Heating Airflow (L/s)	672.7
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	116.31
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	3.76
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	32.32
Cooling Area / Load (m ² /kW)	8.60
Heating Load Density (W/m ²)	-67.76
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.17

Zone Summary - Default

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Cooling Setpoint	23 °C
Heating Setpoint	21 °C
Supply Air Temperature	12 °C
Number of People	137
Infiltration (L/s)	62.8
Air Volume Calculation Type	VAV - Single Duct
Relative Humidity	62.00% (Calculated)
Psychrometrics	
Psychrometric Message	None
Cooling Coil Entering Dry-Bulb Temperature	31 °C
Cooling Coil Entering Wet-Bulb Temperature	26 °C
Cooling Coil Leaving Dry-Bulb Temperature	12 °C
Cooling Coil Leaving Wet-Bulb Temperature	13 °C
Mixed Air Dry-Bulb Temperature	31 °C
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	11.0
Peak Cooling Month and Hour	August 12:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	5.1
Peak Cooling Latent Load (ton)	5.9
Peak Cooling Airflow (L/s)	798.0

Peak Heating Load (W)	-373
Peak Heating Airflow (L/s)	672.7
Peak Ventilation Airflow (L/s)	672.7
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	182.72
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	3.76
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	20.57
Cooling Area / Load (m ² /kW)	5.47
Heating Load Density (W/m ²)	-1.76
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.17
Ventilation Density (L/(s·m ²))	3.17
Ventilation / Person (L/s)	4.9

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.3	2.33%	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.5	4.70%	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.38%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.1	1.22%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.5	4.66%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilation	3.9	35.54%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.6	5.77%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.3	2.87%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	4.6	41.72%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Fan Heat	0.1	0.81%	-	-	-	-	-	-	-	-
Reheat	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	11.0	100%	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	1,793	4.63%	665	655	230	243	0	0	0	0
Window	628	1.62%	269	135	135	90	0	0	0	0
Door	270	0.70%	0	270	0	0	0	0	0	0
Roof	1,152	2.98%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	1,309	3.38%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilation	14,012	36.21%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-2,240	-5.79%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-1,112	-2.87%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-16,186	-41.82%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-373	100%	935	1,059	365	333	0	0	0	0

Default Spaces

Space Name	Area (m ²)	Volume (m ³)	Peak Cooling Load (ton)	Cooling Airflow (L/s)	Peak Heating Load (W)	Heating Airflow (L/s)
1 Space	190	576.03	6.6	752.7	-14,320	602.1
2 Space	8	24.90	0.2	14.1	53	26.3
3 Space	14	41.97	0.4	31.2	-118	44.3

Space Summary - 1 Space

Input Data	
Area (m ²)	190
Volume (m ³)	576.03
Wall Area (m ²)	280
Roof Area (m ²)	185
Door Area (m ²)	10
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	15
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	2,659
Power Load (W)	1,104
Number of People	133
Sensible Heat Gain / Person (W)	81
Latent Heat Gain / Person (W)	81
Infiltration Airflow (L/s)	54.0
Space Type	Dining Area - Hotel
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	6.6
Peak Cooling Month and Hour	August 12:00
Peak Cooling Sensible Load (ton)	3.8
Peak Cooling Latent Load (ton)	2.8
Peak Cooling Airflow (L/s)	752.7
Peak Heating Load (W)	-14,320
Peak Heating Airflow (L/s)	602.1

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.2	3.56%	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.4	6.72%	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.64%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.1	1.80%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.4	6.67%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.6	8.72%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.2	3.62%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	4.5	68.27%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	6.6	100%	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	1,543	6.64%	507	617	228	191	0	0	0	0
Window	494	2.13%	180	135	135	45	0	0	0	0
Door	270	1.16%	0	270	0	0	0	0	0	0
Roof	1,025	4.41%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	1,125	4.84%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-2,032	-8.75%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-844	-3.63%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-15,900	-68.44%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-14,320	100%	687	1,022	362	236	0	0	0	0

Space Summary - 2 Space

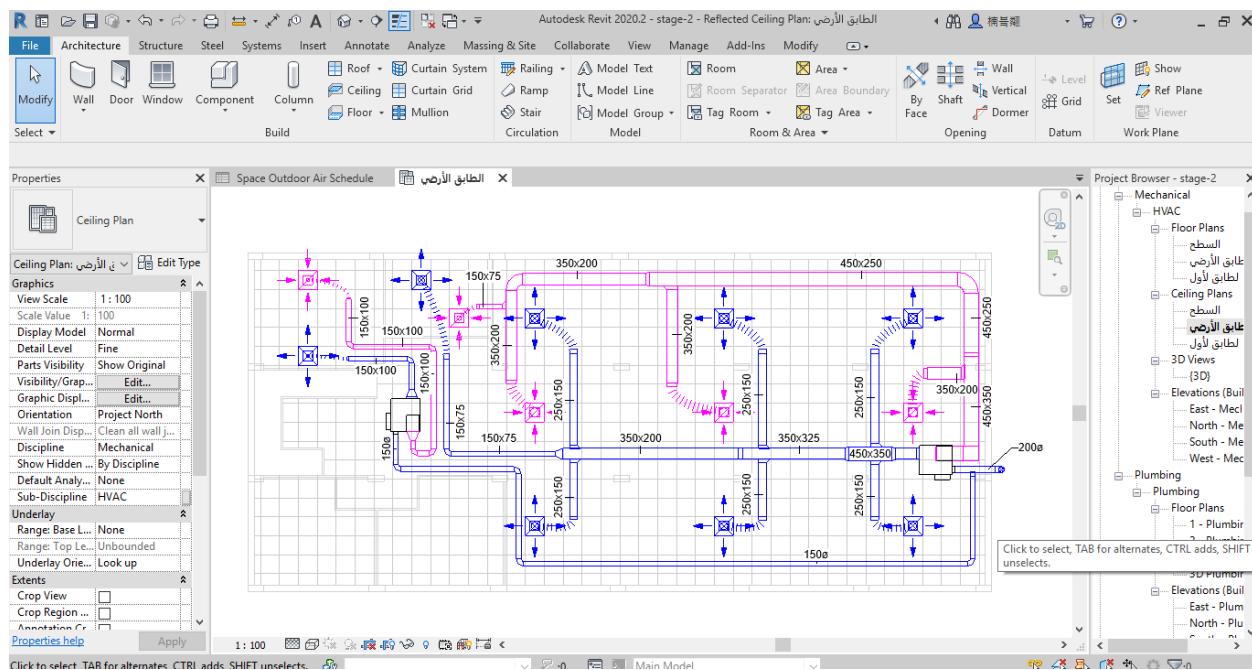
Input Data	
Area (m ²)	8
Volume (m ³)	24.90
Wall Area (m ²)	17
Roof Area (m ²)	9
Door Area (m ²)	2
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	1
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	98
Power Load (W)	134
Number of People	1
Sensible Heat Gain / Person (W)	73
Latent Heat Gain / Person (W)	59
Infiltration Airflow (L/s)	3.4
Space Type	Office - Enclosed
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	0.2
Peak Cooling Month and Hour	August 04:00 ↗
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.1
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.0
Peak Cooling Airflow (L/s)	14.1
Peak Heating Load (W)	53
Peak Heating Airflow (L/s)	26.3

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.0	12.19%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.0	13.80%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.0	8.89%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.0	17.99%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	15.98%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.0	21.79%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	9.37%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.2	100%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	96	20.74%	74	19	2	0	0	0	0	0
Window	45	9.68%	45	0	0	0	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	47	10.18%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	70	15.09%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-77	-16.49%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-104	-22.49%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-25	-5.33%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	53	100%	119	19	2	0	0	0	0	0

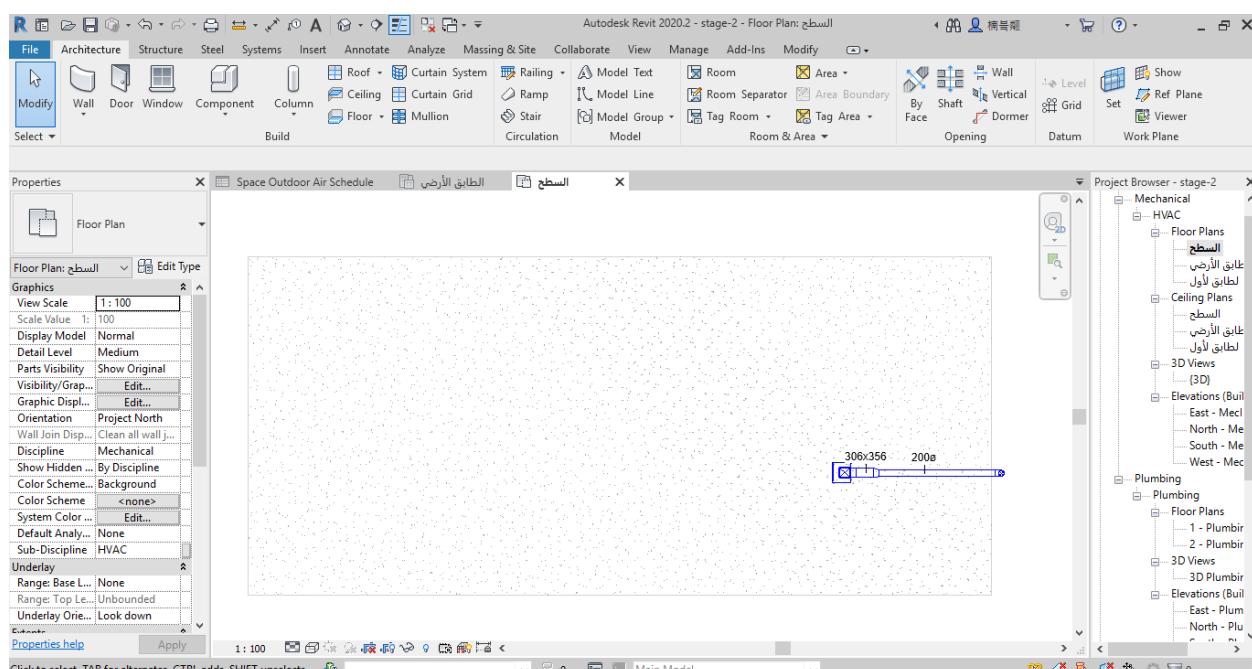
Space Summary - 3 Space

Input Data	
Area (m ²)	14
Volume (m ³)	41.97
Wall Area (m ²)	28
Roof Area (m ²)	14
Door Area (m ²)	2
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	3
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	181
Power Load (W)	226
Number of People	3
Sensible Heat Gain / Person (W)	73
Latent Heat Gain / Person (W)	59
Infiltration Airflow (L/s)	5.5
Space Type	Food Preparation
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	0.4
Peak Cooling Month and Hour	August 05:00
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.1
Peak Cooling Airflow (L/s)	31.2
Peak Heating Load (W)	-118
Peak Heating Airflow (L/s)	44.3

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.0	10.44%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.1	38.03%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.0	6.61%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.0	12.42%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	8.40%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.0	10.51%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	13.58%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.4	100%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	154	15.50%	84	18	0	52	0	0	0	0
Window	90	9.03%	45	0	0	45	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	80	8.04%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	114	11.49%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-131	-13.20%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-164	-16.49%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-261	-26.26%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-118	100%	128	18	0	97	0	0	0	0



الشكل (4-5): مسقط للطابق الأرضي يظهر تصميم نظام ال HVAC في الحالة الثانية



الشكل (4-6): مسقط للسطح يظهر توضع وحدة ال AHU في الحالة الثانية

الحالة الثالثة: الدراسة تم بدون عازل حراري للجدران مع تغيير مواصفات الحيزات

المعمارية حيث تم استبدال صالة المطعم ب صالة رياضية والمطبخ بغرفة ساونا:

في هذا السيناريو، تم دراسة تأثير تطبيق تغيير في نمط استخدام المبنى، حيث شمل التغيير تعديل استخدام المساحات الموجودة في الطابق الأرضي وتحديث قيم المعاملات الحرارية ذات الصلة. استناداً إلى هذه التعديلات، قام برنامج Revit بإنتاج تقرير جديد يحتوي على أحمال التدفئة والتبريد، وتدفقات الهواء HVAC المطلوبة، وغيرها من القيم الحرارية المهمة. بناءً على نتائج هذا التقرير، تم تعديل تصميم نظام الـ HVAC داخل البرنامج، مما يتيح تقييم حجم التغيير وتأثيره على أداء النظام قبل تنفيذ أي تعديل فعلي في الموقع. كما توضح الجداول والصور المرفقة التغيرات الناتجة في الأحمال والتصميم بشكل دقيق.

تركيبة الجدران الخارجية:

λ w/m.k	السمك mm	المادة
1.53	50	حجر كلي
1.4	30	مؤونة اسمنتية
1	200	بلوك من البيتون مفرغ
1.4	30	مؤونة اسمنتية

$$R_i = 0.13 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_o = 0.03 \frac{W}{m^2 K}$$

معامل انتقال الحرارة للجدران الخارجية:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum \frac{L_i}{\lambda_i} + R_o}$$

$$U = \frac{1}{0.13 + \frac{0.050}{1.53} + 2 * \frac{0.030}{1.4} + \frac{0.200}{1} + 0.03} = 1.14 \frac{W}{m^2 K}$$

تركيبة السقف:

المقطع 1 - 1 :

λ w/m.k	السماكة بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص
0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
1.85	210	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_1 = \frac{1}{R_i + \sum \frac{L_i}{\lambda_i} + Ro}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.21}{1.85} + 0.03}$$

$$= 1.14 \frac{W}{m^2 K}$$

المقطع 2 - 2 :

λ w/m.k	السماكة بـ mm	المادة
1.6	20	بلاطة بحص
0.3	30	رمل
1.4	20	مونة اسمنتية
0.95	150	هوردي
1.85	60	بيتون مسلح
1.4	20	مونة اسمنتية

معامل انتقال الحرارة عبر السقف:

$$U_2 = \frac{1}{Ri + \sum \frac{Li}{\lambda i} + Ro}$$

$$= \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{1.6} + \frac{0.030}{0.3} + 2 * \frac{0.02}{1.4} + \frac{0.150}{0.95} + \frac{0.06}{1.85} + 0.03}$$

$$= 0.8 \frac{W}{m^2 K}$$

وكمثال على ذلك، يحسب معامل الانتقال الحراري للسطح الموردي والمبين في الشكل

$$U = \frac{U_1 A_1 + U_2 A_2}{A} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

حيث :

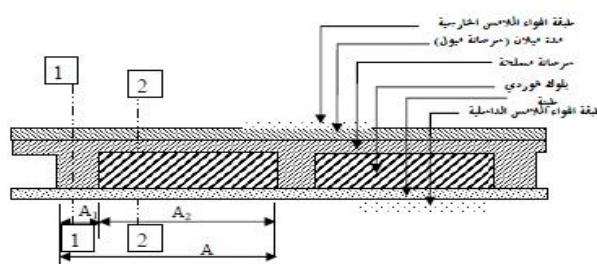
U_1 = معامل الانتقال الحراري لجزء المتصل الذي متقطعه (1-1)

A_1 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (1-1)

U_2 = معامل الانتقال الحراري لجزء المتصل العدة الذي متقطعه (2-2)

A_2 = مجموع مساحة الجزء الذي متقطعه (2-2)

A = مجموع المساحات ($A_1 + A_2$)



مقطع في سقف موردي

وبالتالي:

$$U = \frac{(1.14 \times 0.16) + (0.8 \times 0.4)}{(0.16 + 0.4)}$$

$$= 0.9 \frac{W}{m^2 K}$$

الأبواب خشبية معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 2.19 \frac{W}{m^2 K}$$

النوافذ من الزجاج العادي المفرد مع المنيوم معامل انتقال الحرارة لها:

$$U = 5.9 \frac{W}{m^2 K}$$

مزودة بستائر قماشية معامل التظليل لها 0.5

نورد فيما يلي الأهمال الحرارية للحالة الثالثة:

Project Summary

Location and Weather	
Project	Project Name
Address	LATTAKIA
Calculation Time	28 آب, 04:10 2025
Report Type	Detailed
Latitude	35.36°
Longitude	35.46°
Summer Dry Bulb	32 °C
Summer Wet Bulb	27 °C
Winter Dry Bulb	4 °C
Mean Daily Range	5 °C

Building Summary

Inputs	
Building Type	Gymnasium
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	17.5
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	10.4
Peak Cooling Latent Load (ton)	7.1
Maximum Cooling Capacity (ton)	17.5
Peak Cooling Airflow (L/s)	2,514.2
Peak Heating Load (W)	-8,852
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	289.47
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	11.84
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	40.91
Cooling Area / Load (m ² /kW)	3.45
Heating Load Density (W/m ²)	-41.69
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41

Level Summary - الطابق الأرضي

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	14.0
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00 م
Peak Cooling Sensible Load (ton)	9.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	4.7
Peak Cooling Airflow (L/s)	2,514.2

Peak Heating Load (W)	-15,122
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	231.88
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	11.84
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	51.07
Cooling Area / Load (m ² /kW)	4.31
Heating Load Density (W/m ²)	-71.23
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41

Zone Summary - Default

Inputs	
Area (m ²)	212
Volume (m ³)	642.90
Cooling Setpoint	23 °C
Heating Setpoint	21 °C
Supply Air Temperature	12 °C
Number of People	59
Infiltration (L/s)	62.8
Air Volume Calculation Type	VAV - Single Duct
Relative Humidity	58.00% (Calculated)
Psychrometrics	
Psychrometric Message	None
Cooling Coil Entering Dry-Bulb Temperature	24 °C
Cooling Coil Entering Wet-Bulb Temperature	19 °C
Cooling Coil Leaving Dry-Bulb Temperature	9 °C
Cooling Coil Leaving Wet-Bulb Temperature	10 °C
Mixed Air Dry-Bulb Temperature	24 °C
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	17.5
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00 ↗
Peak Cooling Sensible Load (ton)	10.4
Peak Cooling Latent Load (ton)	7.1
Peak Cooling Airflow (L/s)	2,514.2
Peak Heating Load (W)	-8,852
Peak Heating Airflow (L/s)	724.0
Peak Ventilation Airflow (L/s)	301.0
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	289.47
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	11.84
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	40.91
Cooling Area / Load (m ² /kW)	3.45
Heating Load Density (W/m ²)	-41.69
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	3.41
Ventilation Density (L/(s·m ²))	1.42
Ventilation / Person (L/s)	5.1

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	2.3	12.91%	0.5	1.1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.9	5.40%	0.3	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.1	0.79%	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	2.0	11.65%	-	-	-	-	-	-	-	-

Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.7	4.26%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilation	3.2	18.29%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.8	4.45%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.4	2.09%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
People	6.7	38.56%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fan Heat	0.3	1.60%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reheat	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	17.5	100%	0.8	1.5	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)	
Wall	5,853	12.57%	2,171	2,138	751	793	0	0	0	0	
Window	1,867	4.01%	800	400	400	267	0	0	0	0	
Door	270	0.58%	0	270	0	0	0	0	0	0	
Roof	3,295	7.07%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Infiltration	1,309	2.81%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ventilation	6,270	13.46%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lighting	-2,738	-5.88%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Power	-1,284	-2.76%	-	-	-	-	-	-	-	-	
People	23,694	-50.87%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total	-8,852	100%	2,972	2,807	1,151	1,060	0	0	0	0	0

Default Spaces

Space Name	Area (m ²)	Volume (m ³)	Peak Cooling Load (ton)	Cooling Airflow (L/s)	Peak Heating Load (W)	Heating Airflow (L/s)
1 Space	190	576.03	12.9	2,322.1	-16,115	622.5
2 Space	8	24.90	0.3	61.8	397	37.5
3 Space	14	41.97	0.8	130.4	597	64.0

Space Summary - 1 Space

Input Data	
Area (m ²)	190
Volume (m ³)	576.03
Wall Area (m ²)	280
Roof Area (m ²)	185
Door Area (m ²)	10
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	15
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	2,863
Power Load (W)	1,104
Number of People	57
Sensible Heat Gain / Person (W)	208
Latent Heat Gain / Person (W)	319
Infiltration Airflow (L/s)	54.0

Space Type	Playing Area Gymnasium	
Calculated Results		
Peak Cooling Total Load (ton)	12.9	
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00	
Peak Cooling Sensible Load (ton)	8.3	
Peak Cooling Latent Load (ton)	4.6	
Peak Cooling Airflow (L/s)	2,322.1	
Peak Heating Load (W)	-16,115	
Peak Heating Airflow (L/s)	622.5	

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	2.0	15.31%	0.4	1.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.7	5.60%	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.1	1.07%	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	1.8	13.82%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.6	4.94%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.7	5.51%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.3	2.12%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	6.7	51.63%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	12.9	100%	0.6	1.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	5,036	13.33%	1,656	2,015	743	622	0	0	0	0
Window	1,467	3.88%	533	400	400	133	0	0	0	0
Door	270	0.71%	0	270	0	0	0	0	0	0
Roof	2,932	7.76%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	1,125	2.98%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-2,505	-6.63%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-966	-2.56%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-23,474	-62.14%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-16,115	100%	2,189	2,685	1,143	756	0	0	0	0

Space Summary - 2 Space

Input Data		
Area (m ²)	8	
Volume (m ³)	24.90	
Wall Area (m ²)	17	
Roof Area (m ²)	9	
Door Area (m ²)	2	
Partition Area (m ²)	0	
Window Area (m ²)	1	
Skylight Area (m ²)	0	
Lighting Load (W)	98	
Power Load (W)	134	
Number of People	1	

Sensible Heat Gain / Person (W)	73
Latent Heat Gain / Person (W)	59
Infiltration Airflow (L/s)	3.4
Space Type	Office - Enclosed
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (ton)	0.3
Peak Cooling Month and Hour	August 03:00 ↗
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.3
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.0
Peak Cooling Airflow (L/s)	61.8
Peak Heating Load (W)	397
Peak Heating Airflow (L/s)	37.5

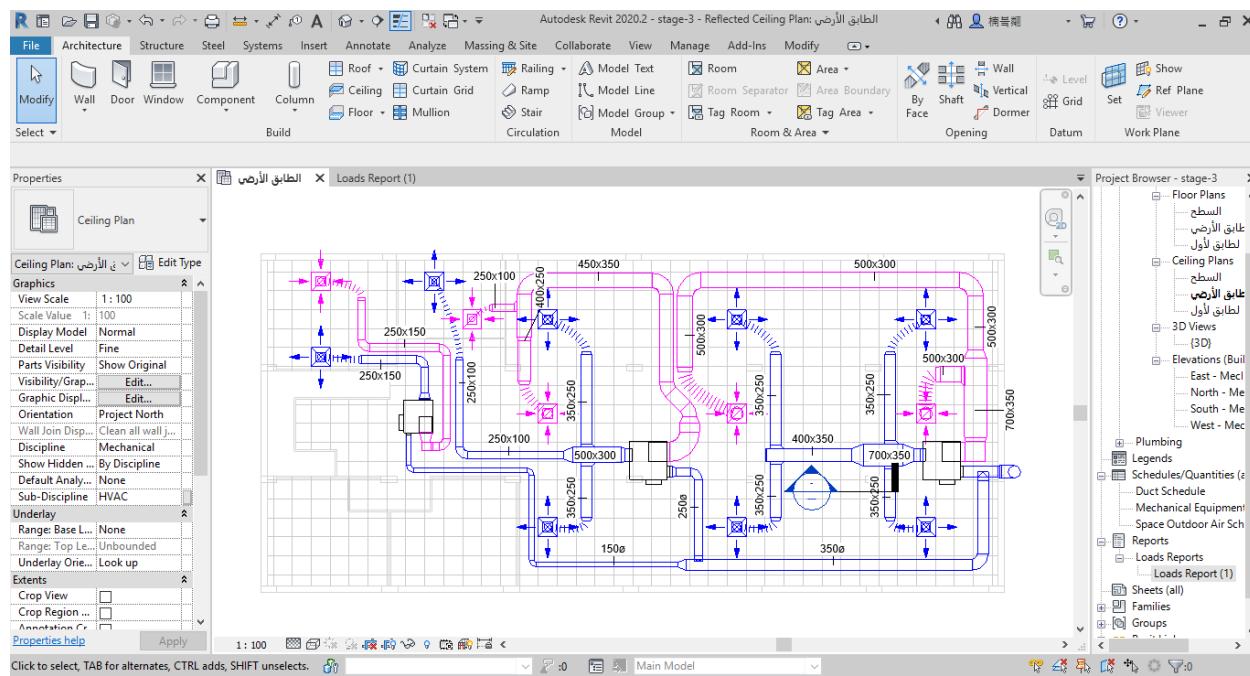
Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.1	27.69%	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.0	12.69%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.1	26.90%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.0	11.57%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	7.18%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.0	9.79%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	4.17%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.3	100%	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	314	34.58%	243	63	8	0	0	0	0	0
Window	133	14.69%	133	0	0	0	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	135	14.87%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	70	7.71%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-87	-9.56%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-118	-13.04%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-50	-5.56%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	397	100%	377	63	8	0	0	0	0	0

Space Summary - 3 Space

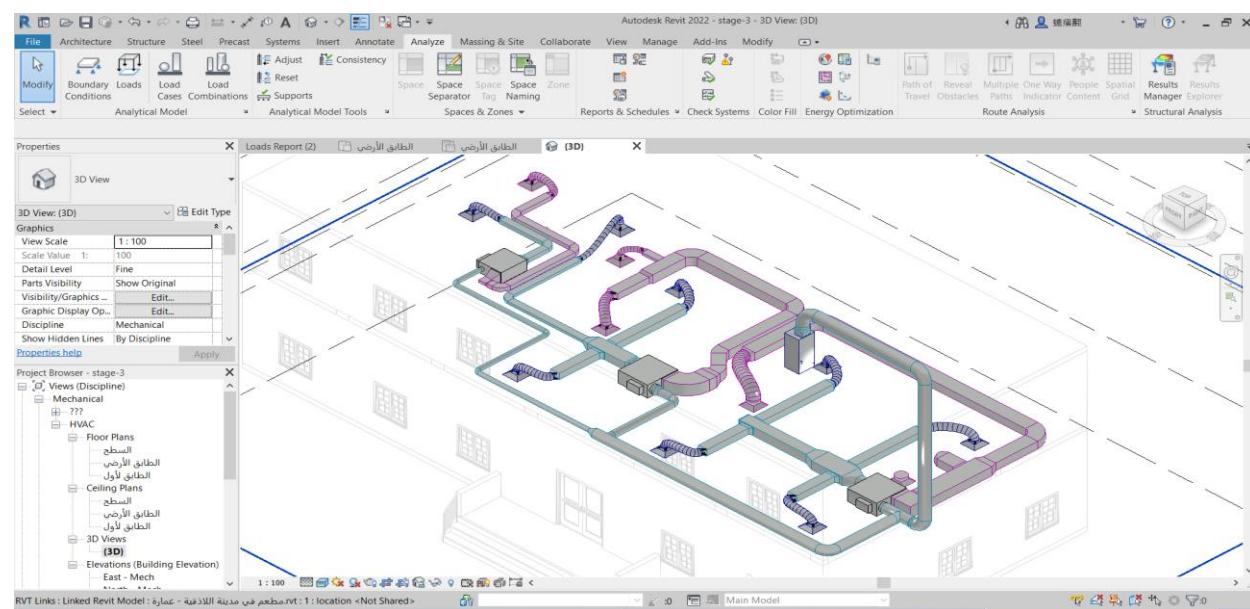
Input Data	
Area (m ²)	14
Volume (m ³)	41.97
Wall Area (m ²)	28
Roof Area (m ²)	14
Door Area (m ²)	2
Partition Area (m ²)	0
Window Area (m ²)	3
Skylight Area (m ²)	0
Lighting Load (W)	166
Power Load (W)	226
Number of People	2
Sensible Heat Gain / Person (W)	73

Latent Heat Gain / Person (W)	59		
Infiltration Airflow (L/s)	5.5		
Space Type	Restrooms		
Calculated Results			
Peak Cooling Total Load (ton)	0.8		
Peak Cooling Month and Hour	August 04:00 ↗		
Peak Cooling Sensible Load (ton)	0.7		
Peak Cooling Latent Load (ton)	0.1		
Peak Cooling Airflow (L/s)	130.4		
Peak Heating Load (W)	597		
Peak Heating Airflow (L/s)	64.0		

Cooling Components	Total (ton)	Percentage	North (ton)	South (ton)	East (ton)	West (ton)	Northeast (ton)	Southeast (ton)	Northwest (ton)	Southwest (ton)
Wall	0.2	25.85%	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Window	0.2	26.11%	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Door	0.0	0.00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	0.2	20.53%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	0.1	8.41%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0.0	5.41%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	0.1	7.38%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	0.0	6.32%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0.0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.8	100%	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Heating Components	Total (W)	Percentage	North (W)	South (W)	East (W)	West (W)	Northeast (W)	Southeast (W)	Northwest (W)	Southwest (W)
Wall	503	30.88%	273	59	0	171	0	0	0	0
Window	267	16.38%	133	0	0	133	0	0	0	0
Door	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Roof	229	14.04%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partition	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Skylight	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltration	114	7.01%	-	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	-146	-8.99%	-	-	-	-	-	-	-	-
Power	-200	-12.25%	-	-	-	-	-	-	-	-
People	-170	-10.44%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	597	100%	406	59	0	304	0	0	0	0



الشكل (7-4): مسقط للطابق الأرضي يظهر تصميم نظام الـ HVAC في الحالة الثالثة



الشكل (8-4): منظور ثلاثي الأبعاد للنظام في الحالة الثالثة

ملخص واستنتاجات القسم العلمي:

أظهرت المقارنة بين الصور والجداول المدرجة في الحالات الثلاث وجود فروق واضحة في أبعاد مجاري الهواء وتدفقات الهواء المطلوبة. ففي الحالة الأولى والثانية بُرِز الاختلاف نتيجة انخفاض الحمل الحراري الناجم عن استخدام العزل الحراري، مما انعكس على أبعاد الدكّات وكثافات التدفق. أما في الحالة الثالثة، فقد كانت التغييرات أكثر شمولاً، إذ شملت بالإضافة إلى تعديل أبعاد مجاري الهواء والحمل الحراري وتدفق الهواء المطلوب، إدراج وحدة VAV جديدة.

وقد أتاح استخدام البرنامج إجراء هذه التعديلات بسهولة، الأمر الذي ساعد على تكوين تصور دقيق لحجم النظام الجديد والتغييرات المطلوبة قبل التنفيذ الفعلي، وبالتالي إمكانية تقدير التكاليف وتحديد حجم العمل اللازم بشكل مبكر. عليه، يتضح أن لتقنية الـ BIM دوراً محورياً في تسهيل تصميم مثل هذه الأنظمة ورفع كفاءتها منذ المراحل الأولى للمشروع.

وهنا لابد من التنوية إلى:

1. يُوفّر البرنامج إمكانية إدخال القيم الحرارية الخاصة بكل عنصر من عناصر المبني بصورة دقيقة، حيث تختلف هذه القيم تبعاً لخصائص المواد المستخدمة في الجدران والأبواب والزجاج، فضلاً عن نمط استخدام البناء ونسبة التسرب الحراري. ويتم ذلك عبر تبويب Analyze باستخدام أداة Heating and Cooling Loads، التي تُمكّن من إدراج هذه المعطيات وتحليلها ضمن بيئة النماذج.
2. بعد تحديد نوع المبني والمعاملات الحرارية لجميع مكوناته، يتم الانتقال إلى كل فراغ (Space) على حدة لتحديد نمط الاستخدام والقيم المرتبطة به. وبناءً على هذه المدخلات، يقوم البرنامج بحساب عدد الأشخاص المتوقع وجودهم في الفراغ والأحمال الكهربائية المرتبطة به، اعتماداً على المساحة والبيانات المدخلة.
3. يتيح البرنامج مرونة عالية في تعديل مدخلات الاستخدام، مثل أوقات تواجد الأشخاص وأعدادهم، بما يتلاءم مع ظروف التشغيل الفعلية. غير أنه في هذه الدراسة تم الاعتماد على القيم الافتراضية التي يوفرها البرنامج، وذلك نظراً لكونها مبنية على معايير عالمية معتمدة، مما يعزز موثوقية النتائج ودقتها.
4. ينتج عن إدخال جميع البيانات إنشاء تقارير تفصيلية لكل فراغ من المبني، تتضمن قيم أحمال التبريد والتدفئة بالوحدات المحددة مسبقاً. وتعُد هذه التقارير أداة أساسية في بناء النموذج الحراري و اختيار المعدات

المناسبة بما يتوافق مع النتائج التصميمية، الأمر الذي يختصر الوقت والجهد المبذول في الحسابات اليدوية التقليدية.

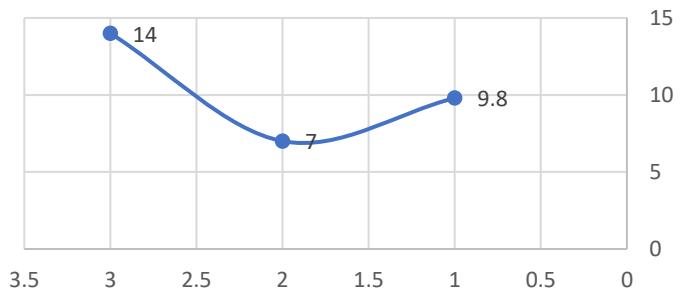
5. يسهم البرنامج في تبسيط العملية التصميمية من خلال أتمتة الحسابات المعقدة وتوفير نتائج دقيقة، مما يقلل من احتمالية الوقوع في أخطاء التصميم. كما يتيح دمج النموذج المعماري مع النظام الحراري، وهو ما يساعد في تحديد موقع مكونات نظام HVAC بدقة عالية، بالإضافة إلى إنشاء بعض هذه المكونات بصورة أوتوماتيكية وتوليد سيناريوهات تصميمية متعددة يمكن مقارنتها واختيار الأنسب منها.

6. تكشف التقارير الصادرة عن البرنامج عن التأثير المباشر لكل عنصر من عناصر المبنى على الحمل الكلي وتدفق الهواء المطلوب، وهو ما يتتيح فهماً أعمق للعلاقة بين خصائص بناء مواد البناء وأداء النظام الحراري. وبذلك يسهم البرنامج في تحسين دقة التحليل، ورفع كفاءة التصميم، وتقليل استهلاك الطاقة، مما يعزز من استدامة المبنى وجودة أدائه الوظيفي.

ومن أجل التوضيح نأخذ قيم حمل التبريد المطلوب وتدفقات الهواء المطلوبة للطابق الأرضي في الحالات الثلاثة من أجل تصور حجم التغيير وتأثيره على نظام الـ HVAC وذلك من خلال المخططات البيانية:



مخطط ٢ اختلاف أحجام التبريد في السيناريوهات الثلاثة



الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

- أنجزت هذه الدراسة تحقيقاً شاملاً حول الدور الجوهرى لمنصة معلومات البناء (BIM) كحجر أساس في تصميم أنظمة إدارة طاقة المباني (BEMS)، متخدنةً من نظام التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) دراسة حالة محورية لكونه العصب الأكثر استهلاكاً للطاقة في المباني الخدمية. انطلق البحث من إشكالية واضحة وهي الفجوة بين الإمكانيات النظرية لـ (BIM) والتطبيق العملي المحدود في المراحل التصميمية المبكرة لأنظمة (BEMS)، مما يؤدي إلى أنظمة أقل كفاءة وأكثر هدرًا للطاقة.
- اعتمدت المنهجية على نموذج تطبيقي افتراضي لمبنى خدمي (فندق) تمت نماذجه وتحليله باستخدام برنامج (Autodesk Revit) لمحاكاة ثلاثة سيناريوهات مختلفة: السيناريو الأول (بدون عزل)، والسيناريو الثاني (بإضافة عزل حراري)، والسيناريو الثالث (بتغيير استخدام المبنى إلى صالة رياضية). ومن خلال نتائج المحاكاة ظهرت قوة وقيمة التكامل بين BIM وتصميم نظام HVAC الذي هو جزء من أنظمة الـ .BEMS

يمكن استخلاص الاستنتاجات الرئيسية التالية، والتي تشكل إجابة وافية على أسئلة البحث وفرضياته:

1. التكامل بين (BIM) و (BEMS) ليس رفاهية تقنية بل ضرورة استراتيجية لتحقيق الاستدامة أثبتت الدراسة أن الدمج العميق بين المنصتين ليس مجرد نقل بيانات، بل هو عملية تحويلية ترفع من مستوى الذكاء والكفاءة التشغيلية. لقد حقق هذا التكامل وفورات طاقية ملموسة، حيث أدى استخدام العزل الحراري في السيناريو الثاني إلى خفض الحمل الحراري الكلي للتبريد بنسبة 28.57% (من 9.8 طن إلى 7 طن) وتقليل تدفق الهواء المطلوب بنسبة 43%， مما يعكس إيجاباً على تقليل سعة المعدات وخفض تكاليف التشغيل الرأسمالية والتشغيلية.
2. يوفر الـ BIM أساساً للمرونة في التصميم ويدعم اتخاذ القرار القائم على الأدلة: يمكن الاستنتاج الأبرز في أن نماذج معلومات البناء (BIM) لم تعد تُستخدم كأداة ساكنة لتمثيل النماذج، بل تطورت لتصبح منصة تفاعلية ديناميكية تُسهم في دعم قرارات التصميم والإدارة. لقد أظهر السيناريو الثالث (تحويل المطعم إلى

صالحة رياضية) كيف أن النموذج الرقمي مُكِّن من إعادة حساب الأحمال وتعديل تصميم النظام HVAC بشكل آني تقريباً استجابة لتغير المتطلبات الوظيفية. هذه المرونة التي كانت مستحيلة بالطرق التقليدية تقلل من الهدر في إعادة التصميم وتحمِّل المهندس من تقييم الخيارات واختيار الأمثل منها بناءً على محاكاة دقة قبل التنفيذ الفعلي.

3. جودة الغلاف البنايِّي للمبني هي عامل مضاعف للكفاءة ولا تقل أهمية عن كفاءة النظام الميكانيكي نفسه: على الرغم من تركيز الدراسة على النظام الميكانيكي، فإن النتائج سلطت ضوءاً قوياً على الأهمية الحاسمة للتصميم المعماري المرتكز على كفاءة الطاقة. كان الانخفاض الهائل في الأحمال عند إضافة العزل دليلاً واضحاً على أن توفير الطاقة يبدأ من الغلاف (العزل، التوافذ، التوجيه) قبل أن يبدأ من الآلة. يجب أن يكون التصميم الميكانيكي الفعال نتاجاً لتصميم معماري مستدام، وليس محاولة لتصحيح أخطائه.

4. أظهر تطبيق تقنية الـ BIM دوراً محورياً في إتاحة التعديلات التصميمية بشكل من، خصوصاً في الحالتين الثانية والثالثة اللتين شهدتا تغييرًا في أبعاد مجاري الهواء (Ducts) ومكونات النظام. فقد مُكِّن استخدام هذه التقنية من إجراء التعديلات الازمة دون الحاجة إلى إعادة التصميم من البداية، إضافةً إلى اقتراح عدة سيناريوهات بديلة لتوزيع مكونات النظام ومسارات مجاري الهواء. وأسهم ذلك في تحليل أثر التعديلات على الحمل الحراري وتوزيع تدفق الهواء، فضلاً عن الكشف المبكر عن الأخطاء التصميمية والتعارضات المحتملة مع العناصر الإنسانية والمعمارية الأخرى. ونتيجة لذلك، تحقق تصميم أكثر دقة وجودة، مع خفض التكلفة وتقليل استهلاك الطاقة، مما يعزز من استدامة النظام وكفاءته التشغيلية.

5. إمكانية التعميم والتطبيق العملي في مشاريع مماثلة: على الرغم من أن الدراسة اعتمدت على نموذج افتراضي، فإن النهج المُتبَّع قابل للتطبيق على مشاريع حقيقة، خاصة في المباني الخدمية والتجارية التي تتميز باستهلاك عالٍ للطاقة. كما أن النتائج تُسهم في دعم الامتثال لمعايير الاستدامة العالمية مثل LEED وBREEAM و ISO 50001 من خلال تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية.

الوصيات:

انبثقت عن هذه الاستنتاجات مجموعة من التوصيات الموجهة لفئات مختلفة من المعنيين:

أولاً: للتطوير المهني والممارسة العملية (المهندسين، المصممين، المقاولين):

1. الانتقال من النماذج البصرية إلى النماذج التحليلية: اعتماد (BIM) كمنصة تحليلية إلزامية في المراحل التصميمية الأولى للمشاريع متوسطة وكبيرة الحجم، وعدم الاكتفاء باستخدامه كأداة للرسم والتوثيق.
2. تبني ثقافة محاكاة السيناريوهات: استغلال القدرة التحليلية لأدوات مثل (Revit) لاختبار مجموعة واسعة من الخيارات التصميمية (مواد العزل، أنظمة الـ HVAC المختلفة، أنماط الإشغال) لتحديد الحل الأمثل اقتصادياً وبietenياً قبل الشروع في التنفيذ.
3. التخطيط للتكامل المستقبلي مع BEMS أثناء التصميم: اختيار المعدات والأنظمة التي تدعم بروتوكولات الاتصال المفتوحة (مثل BACnet, Modbus) لتسهيل دمجها لاحقاً في نظام إدارة طاقة مركزي وذكي.
4. دمج التحليلات الطاقية في سير العمل: يجب تضمين خطوات تحليل الطاقة وإدارة الأحمال كجزء لا يتجزأ من عملية التصميم باستخدام BIM ، وليس كعملية منفصلة أو لاحقة.

ثانياً: للبحث العلمي والتطوير الأكاديمي:

1. تعميق البحث في معايير التبادل البياناتي الدلالي (Semantic Data Interoperability): هناك حاجة ماسة لأبحاث تركز على تطوير معايير ونماذج تبادل (مثـل IFC) قادرة على نقل البيانات التشغيلية والأدائية لأنظمة الـ HVAC بشكل كامل ودقيق بين منصات (BIM) و (BEMS) لتجاوز مشاكل عدم التوافق الحالية.
2. التوجـه نحو نماذج التـوأم الرقمـي الدينامـيكـية: دراسـة الـ اـتجـاهـاتـ وـالـتطـورـاتـ الـمحـتمـلةـ لـأـبـحـاثـ مـسـتقـبـلـةـ تـدـمـجـ بـيـنـ نـمـوذـجـ (BIM) وـبـيـانـاتـ الـمـسـتـشـعـرـاتـ الـلـحـظـيـةـ (IOT) وـأـنـظـمـةـ التـحـكـمـ (BEMS) لـإـنـشـاءـ توـأـمـ رـقـميـ حـيـ يـمـكـنـ مـاـحـاكـاـةـ وـتـوـقـعـ أـلـدـاءـ فـيـ الـوقـتـ الفـعـلـيـ ،ـ وـالـتـحـسـينـ الـمـسـتـمرـ لـكـفـاءـةـ الطـاـقـةـ.

3. دراسات الجدوى الاقتصادية الشاملة: إجراء أبحاث تكميلية تحسب العائد على الاستثمار (ROI) الدقيق للتكامل بين (BIM) و (BEMS) على مدى دورة الحياة الكاملة للمبنى، مع الأخذ في الاعتبار التكاليف الأولية والوفورات التشغيلية وتكاليف الصيانة.

4. تطوير نماذج BIM أكثر دقة: هناك حاجة لتطوير نماذج BIM قادرة على محاكاة سلوك المستخدمين بشكل أكثر دقة، حيث أن هذا العامل له تأثير كبير على استهلاك الطاقة كما أظهرته (User Behavior) الدراسة.

5. دراسة تأثير تقنيات الذكاء الاصطناعي: يوصى بإجراء مزيد من الأبحاث حول دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي مع أنظمة BEMS لتطوير استراتيجيات تحكم تنبؤية وتكيفية أكثر ذكاءً وفعالية.

6. توسيع نطاق الدراسة: يمكن توسيع نطاق هذه الدراسة لتشمل أنواعاً أخرى من المباني (سكنية، صناعية) وأنظمة طاقة أخرى (الإضاءة، الطاقة المتعددة) لتقديم فعالية BIM في إدارة الطاقة بشكل شامل.

ثالثاً: لواضعي السياسات والجهات المعاشرة:

1. إدراج متطلبات التكامل (BIM-BEMS) في شهادات الاستدامة: تطوير أطر معايرية محلية (مثل كود البناء السعودي أو المعايير الخليجية) تحفز على هذا التكامل، من خلال منح نقاط إضافية في أنظمة التقييم مثل (LEED, BREEAM, MOSTADAM) للمشاريع التي تتبناه.

2. دعم تطوير مكتبات قياسية لمكونات MEP: تشجيع وتنسيق الجهود بين المطوريين والمصنعين لإنشاء مكتبات قياسية غنية وموثوقة للمكونات الميكانيكية والكهربائية (MEP) ضمن منصات (BIM)، تحتوي على جميع بيانات الأداء اللازم لإجراء تحليلات دقيقة.

3. تشجيع أو إلزام باستخدام BIM: يجب على الجهات الحكومية تشجيع أو حتى إلزام استخدام BIM في المشاريع العامة والخاصة الكبرى، خاصة تلك التي تتعلق بالبنية التحتية والمباني الخدمية، نظراً لفوائدها الكبيرة في تحسين الكفاءة وتقليل الهدر.

4. وضع معايير للتكامل: يجب وضع معايير ومواصفات فنية واضحة لتسهيل التكامل بين نماذج BIM وأنظمة BEMS، لضمان التوافقية وتبادل البيانات بسلاسة.

5. تقديم حواجز : يمكن تقديم حواجز ضريبية أو مالية للمطوريين والمالكين الذين يبنون مباني عالية الكفاءة في استخدام الطاقة باستخدام تقنيات BIM وBEMS.

ختاماً، تتجاوز هذه الأطروحة التحليل التقني لنقدم رؤية مستقبلية لصناعة البناء، حيث يتحول التركيز من مجرد الإنشاء إلى تحقيق الأداء الأمثل، ومن الاجتهاد الفردي إلى القرارات الدقيقة، ومن الممارسات التقليدية غير المنظمة إلى منهجيات ذكية قائمة على المعرفة. إن اعتماد النموذج المقترن يمثل خياراً استراتيجياً ذا أبعاد تقنية وأخلاقية واقتصادية، يسهم بشكل مباشر في تعزيز استدامة ومرونة البيئة المبنية.

المراجع:

1. Akinmejiwa, O., Gbadega, P., & Ajibola, A. (2024). Synergizing Renewable Energy Integration for Enhanced Energy Management and Control in Smart Grids: A Review. 2024 IEEE 5th International Conference on Electro-Computing Technologies for Humanity (NIGERCON),
2. Alhammad, M., Eames, M., & Vinai, R. (2024). Enhancing building energy efficiency through building information modeling (BIM) and building energy modeling (BEM) integration: A systematic review. *Buildings*, 14(3), 581 .
3. Asim, N., Badiei, M., Mohammad ,M., Razali, H., Rajabi, A., Chin Haw, L., & Jameelah Ghazali, M. (2022). Sustainability of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in buildings—An overview. *International journal of environmental research and public health*, 19(2), 1016 .
4. Barchi, G., Miori, G., Moser, D., & Papantoniou, S. (2018). A small-scale prototype for the optimization of PV generation and battery storage through the use of a building energy management system. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) ,
5. Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). Predictive maintenance in building facilities: A machine learning-based approach. *Sensors*, 21(4), 1044 .
6. Cho, H., Cabrera, D., Sardy, S., Kilchherr, R., Yilmaz, S., & Patel, M. K. (2021). Evaluation of performance of energy efficient hybrid ventilation system and analysis of occupants' behavior to control windows. *Building and Environment*, 188, 107434 .
7. Devaraj, S. M. (2023). The future of hvac systems: ai, cloud, and the internet of things (iot). *Technology (ijcet)*, 14(2), 269-278 .
8. Digitemie, W. N., & Ekemezie, I. O. (2024). A comprehensive review of Building Energy Management Systems (BEMS) for improved efficiency. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 829-841 .
9. Dong, B., Prakash, V., Feng, F., & O'Neill, Z. (2019). A review of smart building sensing system for better indoor environment control. *Energy and Buildings*, 199, 29-46 .
10. Escrivá-Escrivá, G., Segura-Heras, I., & Alcázar-Ortega, M. (2010). Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems. *Energy and Buildings*, 42(11), 2 .2267-258
11. Gheji, S., Kamble, K., Gavde, A., & Mane, S. (2016). Basic classification of HVAC systems for selection guide. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(4), 6077-6086 .
12. González, J., Soares, C. A. P ,Najjar, M., & Haddad, A. N. (2021). BIM and BEM methodologies integration in energy-efficient buildings using experimental design. *Buildings*, 11(10), 491 .

13. Hossain, M., Weng, Z., Schiano-Phan, R., Scott, D., & Lau, B. (2020). Application of IoT and BEMS to visualise the environmental performance of an educational building. *Energies*, 13(15), 4009 .
14. Hwang, J., Kim, J., & Yoon, S. (2025). DT-BEMS: Digital twin-enabled building energy management system for information fusion and energy efficiency. *Energy*, 3 .136162 ,26
15. Ibrar, M., Abishu, H. N., Seid, A. M., Márquez-Sánchez, S., Fernandez, J. H., Corchado, J. M., & Erbad, A. (2024). Survey on demand response in the landscape of adaptive and intelligent building energy management systems. *2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 1203-1209 .
16. Jamil, M., & Mittal, S. (2017). Building energy management system: A review. *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON)* ,
17. Jia, R., Jin, B., Jin, M., Zhou, Y., Konstantakopoulos, I. C., Zou, H., Kim, J., Li, D., Gu, W., & Arghandeh, R. (2018). Design automation for smart building systems. *Proceedings of the IEEE*, 106(9), 1680-1699 .
18. Kailas, A., Cecchi, V., & Mukherjee, A. (2012). A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2012(1), 932181 .
19. Ke, J., Qin, Y., Wang, B., Yang, S., Wu, H., Yang, H., & Zhao, X. (2020). Data-Driven Predictive Control of Building Energy Consumption under the IoT Architecture. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020(1), 8849541 .
20. Kempf, J. (2024). Automating Building Energy Management for Accelerated Building Decarbonization: System Architecture and the Network Layer .
21. Kim ,D., Lee, J., Do, S., Mago, P. J., Lee, K. H., & Cho, H. (2022). Energy modeling and model predictive control for HVAC in buildings: A review of current research trends. *Energies*, 15(19), 7231 .
22. Kozlovska, M., Petkanic, S., Vranay, F., & Vranay, D. (2023).Enhancing energy efficiency and building performance through BEMS-BIM integration. *Energies*, 16(17), 6327 .
23. Kumar, A., Kar, P., Warrier, R., Kajale, A., & Panda, S. K. (2017). Implementation of smart LED lighting and efficient data management system for buildings. *Energy Procedia*, 143, 173-178 .
24. Leong, C. Y. (2019). Fault detection and diagnosis of air handling unit: A review. *MATEC Web of Conferences* ,
25. Lu, F., Yu, Z., Zou, Y., & Yang, X. (2021). Cooling system energy flexibility of a nearly zero-energy office building using building thermal mass: Potential evaluation and parametric analysis. *Energy and Buildings*, 236, 110763 .

26. Macarulla, M., Casals, M., Forcada, N., & Gangolells, M. (2017). Implementation of predictive control in a commercial building energy management system using neural networks. *Energy and Buildings*, 151, 511-519.
27. Mardiana-Idayu, A., & Riffat, S. (2012). Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1241-1255.
28. Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., & García, F. S. (2021). A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*, 33, 101692.
29. Nandagopal, N. S. (2024). HVAC systems and equipment. In *HVACR Principles and Applications* (pp. 305-356). Springer.
30. O'Grady, T., Chong, H.-Y., & Morrison, G. M. (2021). A systematic review and meta-analysis of building automation systems. *Building and Environment*, 195, 107770.
31. Ock, J., Issa, R. R., & Flood, I. (2016). Smart building energy management systems (BEMS) simulation conceptual framework. *2016 winter simulation conference (WSC)*,
32. Olatunde, T .M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 6(02), 012-020.
33. Park, K., Kim, Y., Kim, S., Kim, K., Lee, W., & Park, H. (2011). Building energy management system based on smart grid. *2011 IEEE 33rd international telecommunications energy conference (INTELEC)*,
34. Petrushevski, F., Montazer, M., Seifried, S., Schiefer, C., Zucker, G., Preindl, T., Suter, G & Kastner, W. (2018). Use cases for improved analysis of energy and comfort related parameters based on BIM and BEMS data. *Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering*,
35. Saha, A., Kuzlu, M., Khamphanchai, W., Pipattanasomporn ,M., Rahman, S., Elma, O., Selamogullari, U., Uzunoglu, M., & Yagcitekin, B. (2014). A home energy management algorithm in a smart house integrated with renewable energy. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*,
36. Shao, J., Huang, Z., Chen, Y., Li, D., & Xu, X. (2023). A practical application-oriented model predictive control algorithm for direct expansion (DX) air-conditioning (A/C) systems that balances thermal comfort and energy consumption. *Energy*, 269, 126748.
37. Solgi, E., Fayaz, R., & Kari ,B. M. (2016). Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. *Renewable Energy*, 85, 725-731.

- 38.Sporr, A., Zucker, G., & Hofmann, R. (2019). Automated HVAC control creation based on building information modeling (BIM): Ventilation system. *IEEE access*, 7, 74747-74758 .
- 39.Sporr, A., Zucker, G., & Hofmann, R. (2020). Automatically creating HVAC control strategies based on Building Information Modeling (BIM): Heat provisioning and distribution. *Energies*, 13(17), 4403 .
- 40.Sun, R. Optimizing Building Energy Modeling (BEM) Workflow through Integrating HVAC systems Design and Building Information Modeling (BIM) using gbXML Schema Version 6.01 Carnegie Mellon University .[
- 41.Verbert, K., Babuška, R., & De Schutter, B. (2017). Combining knowledge and historical data for system-level fault diagnosis of HVAC systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 59, 260-273 .
- 42.Verma, A., Prakash, S., Srivastava, V., Kumar, A., & Mukhopadhyay, S. C. (2019). Sensing, controlling, and IoT infrastructure in smart building: A review. *IEEE Sensors Journal*, 19(20), 9036-9046 .
- 43.Westphalen, D., & Koszalinski, S. (2001). Energy consumption characteristics of commercial building hvac systems volume I :Chillers, refrigerant compressors, and heating systems. Final Report to the Department of Energy (Contract No. DE-AC01-96CE23798) .
- 44.Xie, X., Merino, J., Moretti, N., Pauwels, P., Chang, J. Y., & Parlikad, A. (2023). Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems. *Automation in Construction*, 146, 104695 .
- 45.Zahraoui, Y., Alhamrouni, I., Mekhilef, S., Basir Khan, M. R., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., & Horan, B. (2021). Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability*, 13(19), 10492 .
- 46.Zhang, H., Seal, S., Wu, D., Bouffard, F., & Boulet, B. (2022). Building energy management with reinforcement learning and model predictive control: A survey. *IEEE access*, 10, 27853-27862 .
- 47.Zhao, T., Qu ,Z., Liu, C., & Li, K. (2021). BIM-based analysis of energy efficiency design of building thermal system and HVAC system based on GB50189-2015 in China. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(4), 1277-1289 .