

کاربرد هوش مصنوعی در صنعت ساختمان

چالش‌ها و راهکارها

احسان باجلان، حامد خاکسار *

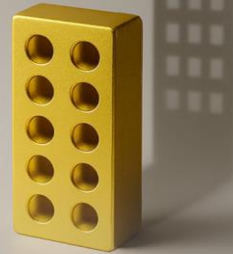
۱- احسان باجلان، ehsanbajelan0089@gmail.com

۲- حامد خاکسار، Hamedkhaksar@gmail.com

چکیده

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان انتشارهای مرتبط با انرژی در جهان است و سهم قابل توجهی از رشد تقاضای انرژی نیز به آن مربوط می‌شود. بر اساس داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، عملیات ساختمان‌ها حدود ۳۰٪ مصرف نهایی انرژی جهانی و ۲۶٪ انتشارهای مرتبط با انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین گزارش‌های IEA نشان می‌دهند که بخش مسکونی حدود ۷۰٪ تقاضای انرژی ساختمان‌ها را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین مسکونی‌ها بزرگ‌ترین میدان اثر برای فناوری‌های مدیریت انرژی و بهره‌برداری هوشمند محسوب می‌شوند. هوش مصنوعی (AI) با تکیه بر داده‌های طراحی (BIM)، داده‌های ساخت تصویر (Reality Capture)، و داده‌های بهره‌برداری ترموستات، حسگرهای IAQ، کنترلر هوشمند، (BMS) می‌تواند تصمیم‌سازی را در سه محور کلیدی مسکونی تقویت کند: (۱) کاهش انرژی با حفظ آسایش، (۲) بهبود کیفیت هوای داخل و سلامت، (۳) کاهش خرابی‌ها و هزینه نگهداشت—خصوصاً در ساختمان‌های چندواحدی. این مقاله با رویکرد مرور نیمه‌نظام‌مند، چارچوب «داده→مدل→تصمیم→اثر» را برای مسکونی ارائه می‌دهد و سپس نمونه‌های موفق جهانی (با شواهد ارزیابی مستقل و یا پیاده‌سازی صنعتی) را تحلیل می‌کند. از جمله گزارش ارزیابی RCT مسابقه SENS بریتانیا در مورد ترموستات هوشمند، برنامه داده‌اشتراکی Donate Your Data شرکت ecobee، پژوهش‌های RL برای کنترل HVAC مسکونی با BOPTEST و اعتبارسنجی واقعی، چارچوب DT-BEMS و نگهداشت پیش‌بین تجهیزات مشترک نمونه (KONE).

واژگان کلیدی: ساختمان مسکونی، خانه هوشمند، BIM، دوقلوی دیجیتال، BEMS، یادگیری تقویتی، NILM، IAQ، نگهداشت پیش‌بین، حریم خصوصی



۱- مقدمه (بیان مسئله مسکونی محور)

۱-۱ چرا ساختمان‌های با کاربری مسکونی مهم‌ترین میدان اثر AI هستند؟

سه دلیل اصلی وجود دارد:

- سهم انرژی بالا: ساختمان‌های با کاربری مسکونی حدود ۷۰٪ تقاضای انرژی در بخش ساختمان را تشکیل می‌دهند؛ یعنی بیشترین پتانسیل صرفه‌جویی در همین جاست.
- رشد برق مصرفی ساختمان‌ها IEA: گزارش می‌کند مصرف برق ساختمان‌ها در ۲۰۲۴ بیش از ۶۰۰ TWh (حدود ۵٪) رشد کرده و سهم بزرگی از رشد برق جهانی را شامل می‌شود؛ رشد تهاویه مطبوع یکی از محرک‌های مهم است.
- شکاف عملکردی (Performance Gap): بسیاری از ساختمان‌ها در عمل، مصرف و کیفیت عملکردی متفاوت از پیش‌بینی‌های طراحی دارند؛ در ساختمان‌های مسکونی این شکاف به رفتار ساکنین، کیفیت نصب و مدیریت بهره‌برداری گره می‌خورد و دقیقاً همین‌ها با رویکرد داده‌محور قابل مدیریت‌تر می‌شوند.

۱-۲ مسکونی با غیرمسکونی چه تفاوتی دارد؟

- در ساختمان‌های مسکونی، رفتار انسان (حضور، عادت تهویه، تنظیم ترموستات، زمان خواب/بیداری) یک متغیر بسیار تعیین‌کننده است.
- داده‌ها معمولاً پراکنده‌تر و حساس‌ترند (حریم خصوصی).
- در چندواحدی‌ها، علاوه بر واحدها، تجهیزات مشترک داریم (آسانسور، پمپ‌ها، موتورخانه، هیت پمپ مرکزی) که نگهداشت پیش‌بین در آن‌ها ROI سریعی دارد.

۲- مبانی نظری و مفاهیم کلیدی

۲-۱ تعریف عملیاتی AI در ساختمان مسکونی

در این مقاله، AI یعنی هر روشی که با داده‌های ساختمان کار کند و به یکی از این خروجی‌های عملی منجر شود:

- پیش‌بینی مصرف/بار، خرابی، (IAQ)
- تشخیص/طبقه‌بندی حضور، ناهنجاری، خطا
- بهینه‌سازی/کنترل تنظیم setpoint، برنامه‌ریزی، کنترل تطبیقی (HVAC)
- توصیه تصمیم (Recommendation) و تولید گزینه‌ها



۲-۲ خانواده روش‌ها و جایگاهشان در مسکونی

- یادگیری هاشین کلاسیک (ML) برای پیش‌بینی‌های سریع، تحلیل ویژگی‌ها، مدل‌های قلیل توضیح‌تر (در پروژه‌هایی که به تفسیرپذیری نیاز دارند).
- یادگیری عمیق (DL): برای سری‌های زمانی پیچیده، NILM، و کاربردهای مبتنی بر سیگنال.
- یادگیری تقویتی (RL): یکی از جدی‌ترین گزینه‌ها برای کنترل HVAC. مرور جامع RL-HVAC از ۲۰۱۹ به بعد، این حوزه را از نظر الگوریتم‌ها، محیط‌های شبیه‌سازی، معیارهای آسایش و چالش‌های پیاده‌سازی جمع‌بندی کرده است.
- Digital Twin + BEMS: برای ساختمان‌های مسکونی‌های چند واحدی، DT-BEMS به‌عنوان یک مسیر برای همجوشی اطلاعات و افزایش کارایی انرژی مطرح شده است.

۳- روش پژوهش

۳-۱ استراتژی مرور و انتخاب منابع

این مقاله ترکیبی از:

- مرورهای علمی برای چارچوب و (Taxonomy)
- مطالعات کاربردی/اعتبارسنجی به‌ویژه (RL و IAQ و NILM)
- گزارش‌های ارزیابی مستقل (برای سنجش اثر واقعی محصولات مسکونی)
- اسناد صنعتی رسمی (برای نگهداشت پیش‌بین تجهیزات مشترک) است.

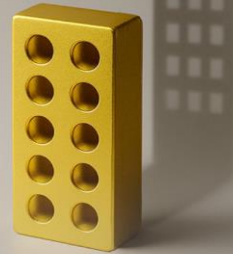
نمونه منابع کلیدی:

- IEA Buildings & Energy Efficiency ۲۰۲۵ برای سهم‌ها و روندها
- گزارش‌های رسمی SENS بریتانیا + گزارش Trial-Level SEN-ST
- مرور NILM در ۲۰۲۵ Energy & Buildings
- مرور IAQ با (Energies ۲۰۲۵) AI/ML
- DT-BEMS (Energy ۲۰۲۵)
- منابع رسمی KONE درباره AI-based analytics و ۷/۲۴ Connected Services

۴- چارچوب مفهومی: «داده→مدل→تصمیم→اثر» مخصوص ساختمان‌های مسکونی

۴-۱ چرا این چارچوب؟

چون در ساختمان مسکونی، «هوشمندی» اگر به اثر قابل اندازه‌گیری ختم نشود، معمولاً به شکست می‌انجامد (عدم پذیرش ساکن، هزینه بی‌اثر، یا مشکلات حریم خصوصی). چارچوب چهارلایه‌ای کمک می‌کند هر کاربرد AI را دقیق و قابل ارزیابی توضیح دهیم.



۴-۲ مدل چهار لایه

- لایه ۱ - داده: ترموستات، کنتور، IAQ، حضور، رخدادهای تعمیرات، (در پروژه‌های بزرگ) BIM
- لایه ۲ - مدل: پیش‌بینی/تشخیص RL/NILM/DT
- لایه ۳ - تصمیم: تغییر setpoint، زمان‌بندی، هشدار خرابی، پیشنهاد تهویه، برنامه سرویس
- لایه ۴ - اثر: کاهش kWh گاز، حفظ آسایش، کاهش شکایات IAQ، کاهش downtime تجهیزات

۵ کاربردهای AI در طراحی ساختمان‌های مسکونی

نکته: در ساختمان‌های مسکونی، ارزش AI در طراحی معمولاً در «سرعت بررسی سناریوها» و «کاهش خطاهای پرهزینه» نمایان می‌شود.

۵-۱ طراحی مولد برای تیپ واحدها و پلان طبقات

در انبوه‌سازی، تیپ‌بندی فضاها تکرار شونده است. طراحی مولد می‌تواند برای:

- تولید گزینه‌های متعدد پلان واحد (با قیود حداقل نورگیری، حداقل ابعاد، همجواری‌ها)
 - بهینه‌سازی سطح مفید به ناخالص (NFA/GFA)
 - بررسی سریع سناریوهای چیدمان هسته، راهرو، و ترکیب واحدها
- به کار رود. خروجی مهم در سطح کارفرما/طراح: **trade-off**: شفاف بین اهداف (نورگیری/تراکم/هزینه ساخت/کیفیت فضایی).

۵-۲ مدل‌های جانشین انرژی در طراحی (Surrogate for Simulation)

در طراحی مسکونی، پوسته و سیستم HVAC بیشترین اثر را دارند. به جای اجرای هزاران شبیه‌سازی سنگین، می‌توان:

۱. یک مجموعه شبیه‌سازی محدود تولید کرد؛
 ۲. یک مدل ML/DL به‌عنوان surrogate آموزش داد
 ۳. سپس هزاران سناریو را سریع‌تر ارزیابی کرد.
- این رویکرد خصوصاً برای تصمیم‌های Conceptual (ضخامت عایق، پنجره، سایه‌بان، نوع سیستم) مؤثر است.

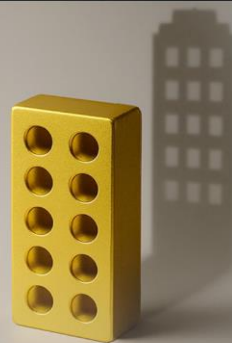
۵-۲ برای کاهش خطاهای طراحی و سازگاری با اجرا BIM+AI

- مرور نظام‌مند ادغام AI و BIM نشان می‌دهد که جهت‌گیری پژوهش‌ها به سمت استفاده عملیاتی از داده‌های BIM و اتوماسیون گردش کار پیش می‌رود، اما چالش‌های استانداردسازی، کیفیت داده و انتقال به پروژه واقعی همچنان باقی است

۶- کاربردهای AI در ساخت/اجرا در پروژه‌های مسکونی (Construction)

۶-۱ چرا اجرا در مسکونی «بهترین جا برای کنترل کیفیت داده‌محور» است؟

چون مسکونی‌ها خصوصاً در نازک‌کاری، بیشترین حجم خطاهای ریز ولی پرهزینه را دارند. اگر این خطاها دیر کشف شوند، هزینه دوباره‌کاری بالا می‌رود و زمان تحویل به هم می‌ریزد.



۲-۶ (Reality Capture) برای تحویل واحد-به-واحد Punch List دیجیتال

در پروژه‌های چندواحدی، یک سناریوی بسیار عملی این است:

- برداشت منظم تصویر ۳۶۰° هفتگی یا در نقاط (milestone)
- اتصال به نقشه/زون‌بندی/لیست آیتم‌ها
- تولید گزارش نقص‌ها با شواهد (حتی اگر تحلیل کاملاً AI نباشد، همین مستندسازی "استاندارد" اثر بزرگی دارد). در گام بعدی، AI می‌تواند تشخیص نقص‌های تکراری را نیمه‌خودکار کند.

۳-۶ پایش ایمنی در انبوه‌سازی

در ساختمان‌های چندطبقه، ریسک سقوط و داربست پررنگ است. بینایی ماشین برای پایش PPE و هشدار خطر، در ادبیات علمی یکی از مسیرهای بالغ‌تر است (هرچند در مسکونی باید با سیاست‌های حریم خصوصی و مجوزهای قانونی همخوان شود).

۷- کاربردهای AI در بهره‌برداری و نگهداشت ساختمان‌های مسکونی (Operation & Maintenance)

این بخش «قلب» مقاله مسکونی است.

۱-۷ کنترل هوشمند (HVAC از Rule-based تا RL) با نگاه واقع‌گرایانه

الف) سطح ۱ Rule-based: پایه

زمان‌بندی ثابت، کاهش دما شبانه (setback)، حالت سفر

ب) سطح ۲ MPC: کنترل پیش‌بین

پیش‌بینی رفتار حرارتی و بهینه‌سازی تصمیم با قیود آسایش

ج) سطح ۳ RL: یادگیری تقویتی

یادگیری سیاست کنترل از تعامل با محیط برای کمینه‌سازی انرژی با قید آسایش

مرور RL-HVAC به‌روشنی نشان می‌دهد که RL در کنترل HVAC رشد کرده، اما چالش‌های پیاده‌سازی مانند ایمنی، تعمیم‌پذیری و sim-to-real همچنان تعیین‌کننده‌اند.

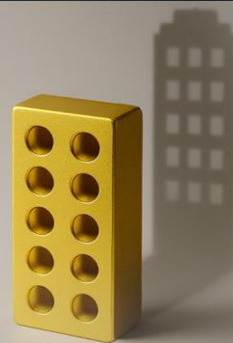
۲-۷ در ساختمان‌های مسکونی + BOPTEST: اعتبارسنجی واقعی به همراه نمونه موردی

یک نمونه ۲۰۲۵ درباره کنترل HVAC مسکونی با RL، از شبیه‌سازی BOPTEST استفاده کرده و اعتبارسنجی واقعی هم گزارش می‌کند؛

این دقیقاً همان چیزی است که بسیاری از کارها فاقد آن‌اند (فقط شبیه‌سازی).

درس آموخته: مسیر صنعتی شدن RL معمولاً این است:

شبیه‌سازی استاندارد (۲) → کنترل با قیود ایمنی (۳) → آزمایش محدود واقعی (۴) → استقرار تدریجی



۷-۳ ترموستات هوشمند در دنیای واقعی: نقش ارزیابی مستقل (SENS – UK)

گزارش Trial-Level مربوط به SEN-ST (منتشر شده توسط دولت بریتانیا) ساختار مطالعه، داده‌های کنترل/مداخله و تحلیل‌های رگرسیونی را ارائه می‌کند و نشان می‌دهد اثرگذاری فناوری باید در محیط واقعی و با روش ارزیابی معتبر سنجیده شود، نه صرفاً با ادعاهای بازاری. در ساختمان‌های مسکونی، حتی اگر الگوریتم عالی باشد، “اثر” می‌تواند به رفتار ساکنین و کیفیت نصب وابسته باشد، بنابراین مدل ارزیابی (RCT) یا طرح‌های شبه تجربی بخشی از خود فناوری است.

۷-۴ تشخیص حضور (Occupancy) در خانه: اهرم اصلی کنترل انرژی، گلوگاه اصلی حریم خصوصی

حضور، بهترین سیگنال برای کنترل HVAC و روشنایی بدون افت آسایش است؛ اما داده‌ای حساس است.

راهبردهای مناسب جهت ساختمان‌های مسکونی:

- استفاده از حسگرهای کم‌تهاجمی (PIR/CO₂) در-پنجره
- پردازش روی دستگاه (Edge) و ارسال داده تجمیع شده
- سیاست شفاف نگهداری داده

5-7 (NILM): تفکیک مصرف لوازم از روی مصرف کل (بدون سنسور اضافی)

NILM برای مسکونی جذاب است چون:

- نصب سنسور روی تک‌تک وسایل را دور می‌زند
 - امکان بازخورد رفتاری به ساکن می‌دهد
- می‌تواند ناهنجاری‌های مصرف (مثلاً یخچال در آستانه خرابی) را آشکار کند.

مرور ۲۰۲۴ در *Energy & Buildings* روش‌ها و چالش‌های NILM مبتنی بر DL را در زمینه مسکونی جمع‌بندی کرده است.

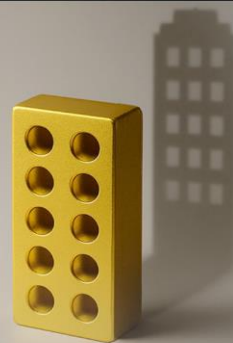
۷-۶ (IAQ) هوشمند در خانه: پیوند سلامت و انرژی

IAQ مثل CO₂، PM، رطوبت هم به سلامت و هم به انرژی وابسته است (تهویه/تصفیه/گرمایش-سرمایش). مرور جامع ۲۰۲۵ در *Energies* نشان می‌دهد پیش‌بینی IAQ با AI/ML در محیط‌های مختلف از جمله مسکونی، به سمت مدل‌های مقیاس‌پذیر، قابل توضیح و انرژی‌آگاه حرکت می‌کند. همچنین مطالعات ۲۰۲۵ در *Building and Environment* نشان می‌دهند می‌توان تحلیل انرژی و IAQ را همزمان با ML انجام داد و عوامل اثرگذار را برای تصمیم‌سازی “قابل فهم” کرد.

۷-۷ (Digital Twin-enabled BEMS) برای مجتمع‌های مسکونی چندواحدی

DT-BEMS در پژوهش ۲۰۲۵ به‌عنوان راهکاری برای همجوشی اطلاعات و ارتقای کارایی انرژی معرفی شده است و به محدودیت‌های BEMS سنتی

(مدیریت داده پیچیده، قابلیت اعتماد، نبود نگاه کل‌نگر) پاسخ می‌دهد.



۷-۸ نگهداشت پیش‌بینی تجهیزات مشترک (آسانسور، پمپ‌ها، فن‌ها)

برای ساختمان‌های چند واحدی، این بخش بسیار اقتصادی است. KONE در صفحه رسمی ۷/۲۴ Connected Services توضیح می‌دهد تجهیزات به سرویس ابری متصل می‌شوند و از تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تصمیم‌های نگهداشت پیش‌بینی شده استفاده می‌شود.

۸-نمونه‌های موفق جهانی (مسکونی‌محور) به همراه تحلیل

۸-۱ SENS (UK) – SEN-ST۱: (اثر واقعی) در خانه واقعی

- نوع شواهد: گزارش رسمی + ارزیابی مستقل
- نشان می‌دهد فناوری مسکونی باید با KPI واقعی و کنترل‌شده سنجیده شود.

۸-۲ ecobee Donate Your Data: حل گلوگاه داده مسکونی

- ecobee برنامه Donate Your Data را به‌عنوان اشتراک داده ناشناس ترموستات برای پژوهشگران معرفی می‌کند.
 - همچنین یک زیرمجموعه از این داده‌ها در OSTI مستند شده است.
- بسیاری از شکست‌ها در AI مسکونی از نبود داده کافی می‌آیند، این کیس نشان می‌دهد «اکوسیستم داده» خودش یک نوآوری کلیدی است.

۸-۳ RL-HVAC: مسکونی با اعتبارسنجی واقعی

نمونه‌هایی که شبیه‌سازی استاندارد (BOPTTEST) و تست واقعی را ترکیب می‌کنند، یک قدم بزرگ به سمت صنعتی شدن هستند.

۸-۴ DT-BEMS (Energy ۲۰۲۵)

DT-BEMS به‌عنوان چارچوبی برای همجواری اطلاعات و تولید بینش عملیاتی پیشنهاد شده است.

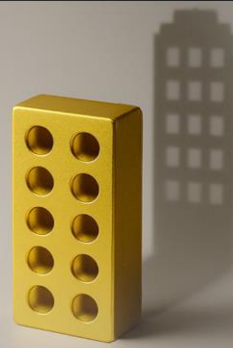
۸-۵ نگهداشت پیش‌بینی KONE

- بیانیه رسمی درباره AI-based analytics و هدف “شناسایی مسئله قبل از مشکل
- اسناد بروشوری نیز مفهوم «سیستم AI که از داده یاد می‌گیرد و نگهداشت را پیش‌دستانه می‌کند» را توضیح می‌دهند.

۹-چالش‌ها و الزامات با شرح بیشتر

۹-۱ کیفیت داده: بزرگ‌ترین عامل شکست

- سنسورها ممکن است drift داشته باشند، نصب غلط باشد، یا داده قطع شود.



- داده‌های چندبرندی (Vendor lock-in) در مسکونی رایج است.

راهکار: استاندارد داده، کالیبراسیون دوره‌ای، و ثبت متادیتا (نوع سنسور، محل نصب).

۹-۲ حریم خصوصی و اعتماد ساکن (مسکونی‌ترین چالش)

ساکن اگر احساس رصد شدن کند، حتی بهترین سیستم را خاموش می‌کند.
راهکارهای طراحی:

- (Minimize) کمینه‌سازی داده
- (Edge processing) پردازش روی دستگاه
- (Transparency) شفافیت: چه داده‌ای، چرا، تا چه مدت

۹-۳ امنیت سایبری

اتصال ترموستات، قفل و حسگر به شبکه، سطح حمله ایجاد می‌کند. در مسکونی این مسئله با امنیت فیزیکی هم گره می‌خورد.

۹-۴ ارزیابی اثر (Measurement & Verification)

درس SENS روشن است: اثرگذاری باید با چارچوب‌های ارزیابی معتبر سنجیده شود.

۱۰- نقشه‌راه اجرایی پیشنهادی (توسعه یافته و عملیاتی)

مرحله ۱: پایش حداقلی و KPI محور (۰ تا ۳ ماه)

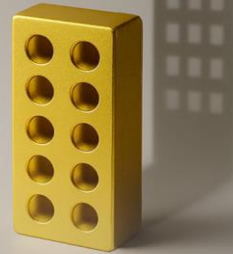
- کنترل/داده مصرف (ساعتی یا روزانه)
- ترموستات/کنترلر
- RH₂: CO₂ پایه IAQ
- KPI: خط پایه مصرف + شکایات آسایش/رطوبت/کپک

مرحله ۲: مدل‌های پایه (۳ تا ۶ ماه)

- پیش‌بینی مصرف کوتاه‌مدت
- anomaly detection برای مصرف IAQ
- داشبورد مدیر مجتمع برای چندواحدی‌ها

مرحله ۳: کنترل پیشرفته با ریسک کم (۶ تا ۱۲ ماه)

- MPC یا RL ابتدا در حالت (Recommendation) پیشنهاد



- سپس نیمه‌خودکار در ساعات کم‌ریسک
- ارجاع: مسیر RL-HVAC و چالش‌های آن در مرورهای تخصصی روشن شده است .

مرحله ۴: Digital Twin و نگهداشت پیش‌بین (۱۲ ماه به بعد)

- برای مجتمع: تجهیزات مشترک، آسانسور، پمپ‌ها
- الگوبرداری از سرویس‌های متصل صنعتی (KONE)

۱۱- نتیجه‌گیری:

در ساختمان‌های مسکونی، AI بیشترین اثر را در سه خوشه دارد:

کنترل انرژی HVAC با قید آسایش (ML/RL)

۱. (IAQ هوشمند) پیش‌بینی و مدیریت سلامت انرژی

۲. نگهداشت پیش‌بین تجهیزات مشترک در چندواحدی‌ها (ROI) بالا

اما شرط موفقیت این است که پروژه از ابتدا KPI محور باشد و ارزیابی اثر واقعی (مثل RCT و چارچوب‌های رسمی) جدی گرفته شود. چیزی که در گزارش‌های SENS به‌خوبی دیده می‌شود .

نمونه کاربردی:

۱- سؤال /هدف پروژه

در یک مجتمع ۱۵۰ واحدی، می‌خواهیم با داده‌های حداقلی و کنترل‌های کم‌ریسک بررسی کنیم آیا می‌توان:

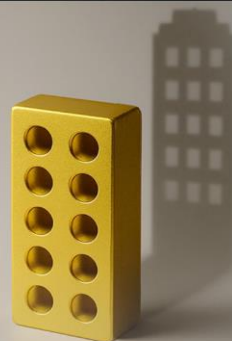
۱. مصرف گاز موتورخانه را کم کرد،
۲. شکایت‌های دمایی را کاهش داد،
۳. پایداری آب‌گرم مصرفی (DHW) را بهتر کرد،
۴. و خرابی‌های ناگهانی را کمتر نمود،
بدون اینکه آسایش و آب‌گرم افت کند.

۲-محدوده کنترل (اهرم‌هایی که واقعاً در موتورخانه قابل اجرا هستند)

تصمیم‌ها باید به چند اهرم روشن تبدیل شوند:

۱. → Supply temperature reset تنظیم دمای رفت گرمایش بر اساس وضعیت بیرون و داخل

۲. → Boiler staging چند دیگ روشن باشد و با چه توالی



۳. → Pump operation (کنترل پمپ‌ها) اگر VFD هست: سرعت ΔP ؛ اگر نیست: زمان‌بندی

۴. → DHW schedule زمان شارژ مخزن و مدیریت پمپ سیرکولاسیون برای کاهش اتلاف شبانه

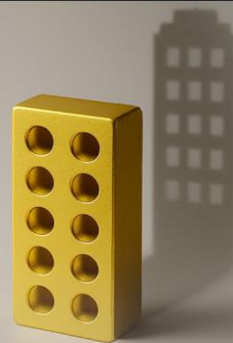
۳- برنامه داده — (Tag List)

هدف: با کمترین سنسور اضافه، بتوان هم پایش کرد، هم عیب‌یابی و هم پیشنهاد تنظیمات داد.

جدول ۱ - فهرست داده‌های پیشنهادی برای موتورخانه و ساختمان

نکته اجرایی	چرا مهم است؟ (ساده)	محل نصب/منبع	نمونه برداری پیشنهادی	واحد	تگ/پارامتر
منبع ثابت باشد	محرک اصلی بار گرمایش	بیرون/اسرویس ثابت	۵-۱۵ دقیقه	°C	دمای هوای بیرون (OAT)
معمولاً ۴۰-۸۰ (بسته به سیستم)	اهرم اصلی کنترل	کلکتور رفت	۵-۱۵ دقیقه	°C	دمای رفت گرمایش (Heat_Supply_T)
برای بالانس خیلی مهم	نشان می‌دهد گرما چقدر جذب شده	کلکتور برگشت	۵-۱۵ دقیقه	°C	دمای برگشت گرمایش (Heat_Return_T)
ΔT خیلی کم = اتلاف/جریان زیاد	شاخص سریع سلامت توزیع	نرم‌افزار	محاسباتی	°C	اختلاف دما (Heat_DeltaT)

نکته اجرایی	چرا مهم است؟ (ساده)	محل نصب/منبع	نمونه برداری پیشنهادی	واحد	تگ/پارامتر
اگر موجود بود عالی	استیجینگ دقیق‌تر	کنترلر	۱ دقیقه	%	مدولاسیون دیگ (اختیاری)
ساعتی هم کفایت می‌کند	KPI اصلی هزینه	کنتور	۱ ساعت-۱۵ دقیقه	m ³ /kWh	کنتور گاز (Gas_Meter_BoilerPlant)
برای آلام و گزارش	زمان کارکرد/خطا	تابلو	۱ دقیقه	۱/۰	وضعیت پمپ اصلی (Pump_Main_Status)
در بهینه‌سازی کلیدی	کاهش برق و بهبود توزیع	اینورتر	۱ دقیقه	%	سرعت پمپ (اگر VFD) (Pump_Main_Speed)
برای VFD عالی	پایداری توزیع	سنسور ΔP	۵-۱۵ دقیقه	kPa	اختلاف فشار (اختیاری) (Loop_DP)



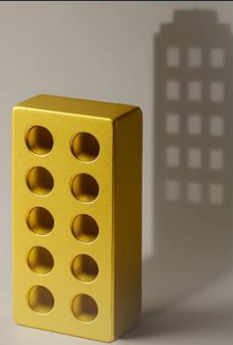
DHW (DHW_Tank_T) دمای مخزن	°C	۵-۱ دقیقه	مخزن	رضایت + سلامت	حداقل ها طبق ضوابط
DHW (DHW_Return_T) دمای برگشت	°C	۵-۱ دقیقه	برگشت سیرکولاسیون	شاخص اصلی اتلاف DHW	بالا بودن شبانه = اتلاف
DHW وضعیت پمپ (DHW_Recirc_Pump_Status)	۱/۰	۱ دقیقه	تابلو پمپ	زمان بندی کاهش اتلاف	با رعایت ایمنی
برق موتورخانه (Elec_Meter_BoilerRoom)	kWh	۱ ساعت-۱۵ دقیقه	زیرکنتور	KPI برق پمپها	اگر نبود: تخمین اولیه
Indoor_T_Zone_* دمای داخلی زونها	°C	۵-۱۵ دقیقه	راهرو/لابی	توضیح شکایتها	۴ تا ۸ نقطه کافی
دمای واحد نمونه (اختیاری)	°C	۵-۱۵ دقیقه	۱۵-۱۰ واحد	کالیبراسیون	فقط با اجازه ساکن
تعداد شکایت روزانه	تعداد	روزانه	فرم/تیکت	KPI آسایش	فرم ساده کافی
رخداد های نگهداشت	نوع/تعداد	رویدادی	دفترچه/اکسل	پیشگیری خرابی	حتی اکسل هم کافی



۴- الگوهای خطا/اتلاف و اقدام سریع (Actionable)

جدول ۲- الگوهای رایج مشکل در موتورخانه مرکزی

اقدام معمول	چک سریع (۱۰-۳۰ دقیقه)	احتمالاً یعنی چی؟	چیزی که می‌بینید
کاهش سرعت/بالانس/بررسی بای‌پس	سرعت پمپ، بای‌پس، بالانس	جریان زیاد/بالانس بد/بای‌پس	ΔT رفت-برگشت پایین ولی گاز بالاست
تنظیم استیجینگ + حداقل زمان روشن	نمودار وضعیت دیگ‌ها و دمای رفت	استیجینگ غلط یا دمای رفت زیاد	خاموش/روشن دیگ‌ها زیاد (cycling)
بالانس رایزرها/هواگیری/شیرها	مقایسه سنسور زون‌ها	عدم تعادل توزیع	زون‌های شمالی سرد، جنوبی خوب
بررسی پمپ/شیر مخلوط/شبکه	دمای برگشت DHW نزدیک شکایت	مشکل سیرکولاسیون/شیر مخلوط	شکایت آب گرم صبح‌ها، مخزن OK
زمان‌بندی شبانه (ایمن) + عایق	ترند شبانه برگشت DHW	اتلاف به خاطر سیرکولاسیون دائم	برگشت DHW شب‌ها بالاست
کالیبراسیون/بازگشت تنظیم/ثبات تغییر	تغییرات اخیر + صحت سنسور	سنسور بد/کنترل دستی/تنظیم اشتباه	با هوای مشابه گاز ناگهان بالا رفت
بررسی فیلتر/شیر/سلامت پمپ	ارتباط زمان کارکرد با ΔT و دمای داخل	خرابی پمپ/گرفتگی/شیر گیر کرده	پمپ زیاد کار می‌کند ولی اثر کم
تعمیر/تعویض + قانون کیفیت داده	مقایسه با سنسور نزدیک	خرابی سنسور/سیم‌کشی	سنسور ثابت یا پرش شدید
محدودیت شیب تغییر/عقب‌گرد	زمان شکایت VS زمان تغییر	کنترل تهاجمی/تغییر سریع	بعد از تغییرات شکایت زیاد شد



۵- برنامه ۳۰ روز اول (هفته به هفته)

هفته ۱: راه‌اندازی و شروع خط پایه

- بررسی نقاط موجود در تابلو/کنترلر
- تکمیل حداقل سنسورها: رفت/برگشت، DHW مخزن/برگشت، دمای بیرون، گاز
- شروع ذخیره داده
- راه‌اندازی فرم ساده شکایت

خروجی: نقشه سیستم + Tag List + داده در حال ورود

هفته ۲: کیفیت داده و نمودارهای پایه

- هم‌زمان‌سازی زمان‌ها، رفع گپ‌ها
- ۴ نمودار پایه:

۱. گاز در برابر دمای بیرون (روزانه)

۲. رفت/برگشت گرمایش

۳. مخزن و برگشت DHW

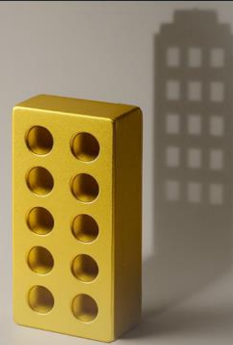
۴. تعداد روشن/خاموش دیگ‌ها

خروجی: خط پایه تصویری + پیدا کردن اتلاف‌های واضح

هفته ۳: توصیه‌های کم‌ریسک (بدون کنترل خودکار)

- گزارش هفتگی یک صفحه‌ای
- ۳ توصیه کم‌ریسک:
 - اصلاح کوچک دمای رفت
 - کاهش cycling با تنظیم استیجینگ
 - کاهش اتلاف DHW شبانه (در صورت ایمن بودن)

خروجی ۳: پیشنهاد عملی + روش سنجش اثر هر کدام



هفته ۴: سنجش اثر و تثبیت فرایند

- تغییرات پلکانی و یکی‌یکی
 - پایش ۴۸-۷۲ ساعت بعد از هر تغییر
 - ثبت همه تغییرات در Change Log
- خروجی: اولین مقایسه قبل/بعد + نقشه راه ماه بعد

۶- داشبورد ساده (فقط چیزهای مهم)

۱. گاز تعدیل‌شده با آب‌وهوا
۲. شاخص cycling دیگ‌ها
۳. شکایت‌ها (تعداد/هفته + سردترین زون)
۴. (پایداری) DHW مخزن/برگشت + شکایت آب گرم
۵. (هشدارهای کلیدی) سنسور خراب، ΔT غیرعادی، برگشت DHW شبانه بالا

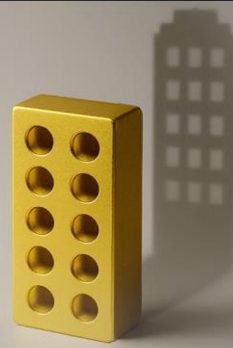
۷- نمونه گزارش هفتگی (پر شده با داده‌های فرضی واقع‌گرایانه)

گزارش هفتگی عملکرد موتورخانه و آسایش ساکنین

مجمع: رزیدنس آفتاب - ۱۵۰ واحد
هفته گزارش: ۰۷/۱۰/۱۴۰۴ تا ۰۱/۱۰/۱۴۰۴
تهیه‌کننده: تیم بهره‌برداری — نسخه 1.0

A: خلاصه مدیریتی

- مصرف گاز: (نسبت به خط پایه، ۸٪ کمتر) با تعدیل اثر آب‌وهوا.
- شکایت‌ها: ۲۸ مورد سرد: ۱۸ | گرم: ۳ | آب گرم: ۷.
- اقدام کلیدی هفته بعد: کاهش اتلاف DHW شبانه با زمان‌بندی پمپ سیرکولاسیون (پایش ۷۲ ساعته).



KPI:B انرژی

- گاز هفته: $12,450 \text{ m}^3$
- میانگین دمای بیرون: 6.5°C
- شاخص سردی هفته (HDD): ۱۰۵
- گاز تعدیل شده: $118.6 \text{ m}^3/\text{HDD}$
- خط پایه تعدیل شده: $129.0 \approx \rightarrow \text{m}^3/\text{HDD}$ ۸٪ بهبود

آسایش

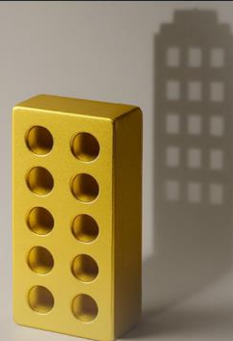
- شکایت‌ها: ۲۸
- زمان پرتکرار: ۶-۹ صبح و ۱۹-۲۲
- زون پرتکرار: نمای شمالی بلوک B طبقات ۵ تا ۷

DHW

- شکایت آب گرم: ۷
- یافته: برگشت DHW در ۲-۵ بامداد بالا → اتلاف شبانه محتمل

C: یافته‌های کلیدی

۱. ΔT اغلب ۵-۶° → C احتمال جریان زیاد یا بالانس نامناسب
۲. cycling دیگ‌ها: ۴۵ بار/روز → نیاز به تنظیم استیجینگ
۳. برگشت DHW شبانه بالا → مناسب برای زمان‌بندی شبانه (ایمن)



Action List:D

موضوع	شاهد	احتمال علت	اقدام
ΔT پایین	$5-6^{\circ}\text{C}$ طولانی	بالانس/بای پس	بررسی بای پس و بالانس، کاهش تدریجی پمپ اگر VFD
cycling زیاد	start/day ۴۵	staging نامناسب	تنظیم + staging حداقل زمان روشن
اتلاف DHW	برگشت $> 45^{\circ}\text{C}$ شبانه	recirc دائم	زمان بندی شبانه (ایمن) و پایش
شکایت زون شمالی	تمرکز شکایت	عدم تعادل توزیع	بازدید زون، هواگیری، بالانس رایزر

E: اقدامات انجام شده این هفته

- کاهش 9°C دمای رفت در بازه ۱۲ تا ۱۶
- محدودیت تغییر دمای رفت: حداکثر 9°C هر ۳۰ دقیقه

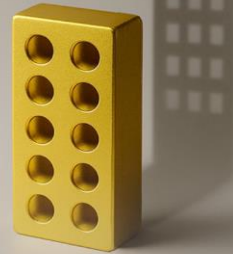
F: برنامه هفته آینده

- تنظیم استیجینگ برای کاهش cycling پایش ۷۲ ساعت
- آزمایش زمان بندی پمپ DHW در ۲-۵ بامداد (با رعایت حداقل ایمن)
- بازدید و بالانس زون شمالی بلوک B

۸- فرم ثبت تغییرات تنظیمات — (Change Log) آماده استفاده

Change Log موتورخانه

زمان بازبینی	ریسک/ملاحظه	انتظار اثر	دلیل کوتاه	بعد	قبل	مورد تغییر	انجام دهنده	تاریخ/ساعت
۴۸ ساعت	شکایت سردی	گاز ↓	کاهش اتلاف	$^{\circ}\text{C}$...	$^{\circ}\text{C}$...	دمای رفت گرمایش	...	...
۷۲ ساعت	افت گرما	پایداری ↑	کاهش cycling	...	...	استیجینگ دیگ‌ها	...	...



...	...	زمان بندی DHW	...	...	کاهش اتلاف شبانه	گاز ↓	آب گرم صبح	۷۲ ساعت
...	...	سرعت پمپ VFD /	...%	...%	کاهش برق	برق ↓	عدم بالانس	۴۸ ساعت
...	...	پمپ سیرکولاسیون	...	...	کاهش اتلاف	گاز ↓	ایمنی / بهداشت	۷۲ ساعت

قانون اجرایی: همزمان بیش از یک تغییر اصلی انجام نشود؛ بعد از هر تغییر ۴۸-۷۲ ساعت پایش؛ در صورت جهش شکایت/افت DHW، بازگشت کنترل شده و ثبت.

۹- چک لیست روزانه اپراتور موتورخانه:

تاریخ ... : شیفت ... : اپراتور ... :

بخش ۱: وضعیت کلی (۱ دقیقه)

- دمای بیرون °C ... (OAT):
- آلارم فعال روی تابلو/کنترلر: ☐ ندارد ☐ دارد (شرح: ...)

بخش ۲: گرمایش (۲ دقیقه)

- دمای رفت | °C ... : دمای برگشت °C ... | ΔT : °C ... :
- پمپ اصلی: ☐ روشن ☐ خاموش | اگر VFD سرعت % ... :
- اگر ΔT خیلی پایین شد (مثلاً زیر ۵): ☐ ثبت و گزارش (بالانس/بای پس)

بخش ۳: DHW (۱ دقیقه)

- دمای مخزن | °C ... : دمای برگشت °C ... DHW:
- پمپ سیرکولاسیون: ☐ روشن ☐ خاموش
- اگر برگشت DHW شبانه بالا بود: ☐ ثبت اتلاف احتمالی

بخش ۴: ثبت کوتاه (۱ دقیقه)

- کنتور گاز/مصرف روزانه ثبت شد... :
- شکایت‌های ۲۴ ساعت گذشته: ... مورد (سرد / ... گرم / آب گرم ...)
- اگر تغییری انجام شد: ☐ در Change Log ثبت شد

قانون طلایی: دو تغییر اصلی همزمان ممنوع؛ بعد از هر تغییر ۴۸-۷۲ ساعت پایش؛ در صورت بدتر شدن شکایت‌ها، برگشت و ثبت.