به نام خدا

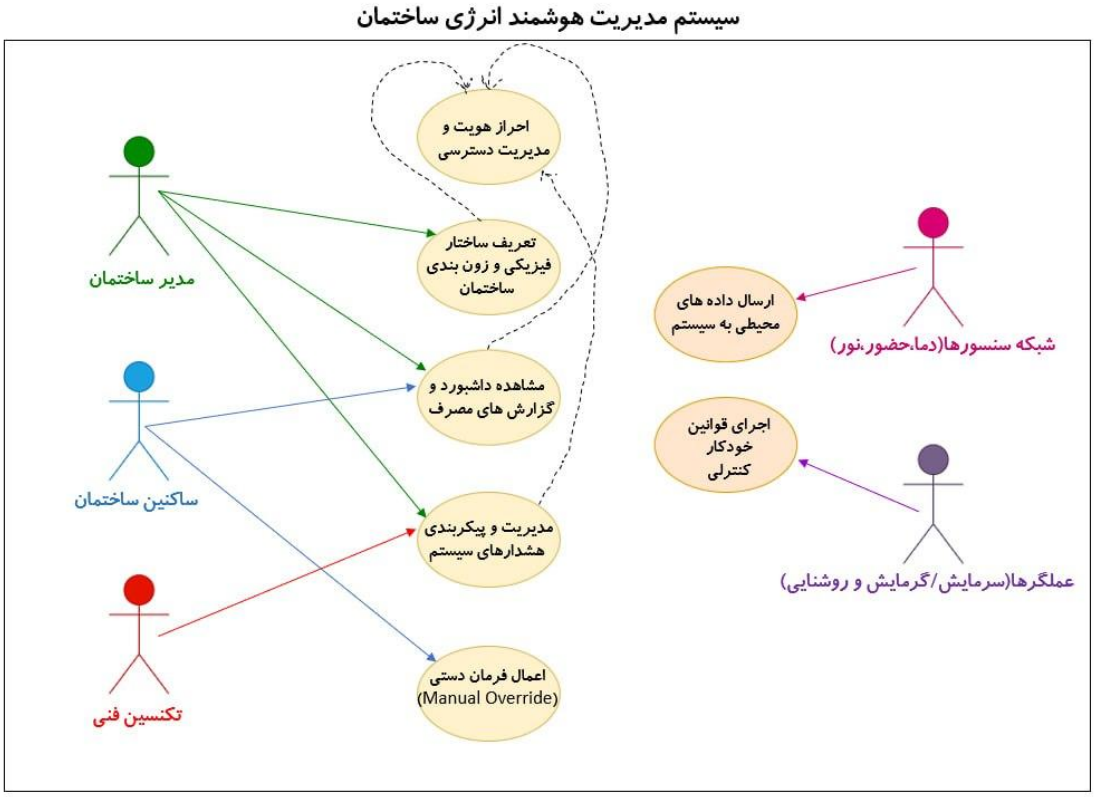
سیستم های مدیریت هوشمند انرژی ساختمان‌ها

هستی قمشی ، تانیا اسدی شهمیرزادی، ریحانه استادغلامی

فاز ۲: مدل سازی و مصورسازی سیستم

در این فاز، برای تبیین کامل سیستم از زبان مدل‌سازی یکپارچه (UML) استفاده شده است. ابتدا با نمودار مورد کاربر (Use Case)، مرز سیستم و نیازمندی‌های وظیفه‌مندی از دیدگاه ذینفعان بیرونی مشخص می‌شود. سپس با نمودار کلاس دامنه(Domain Class Diagram) ، ساختار داده‌ای و مفاهیم دنیای واقعی پایگاه داده تبیین می‌گردد. در نهایت، با استفاده از نمودار توالی(Sequence Diagram) ، رفتار دینامیک و پله‌پله سیستم در مواجهه با سناریوهای بحرانی و بومی (مانند قطعی اینترنت و پیک مصرف برق) به تصویر کشیده می‌شود تا صحت عملکردی سیستم پیش از پیاده‌سازی تضمین گردد.

نمودار مورد کاربرد (Use Case)



نمودار Use Case سیستم مدیریت هوشمند انرژی ساختمان، تعامل میان کاربران و سیستم را نمایش می‌دهد و مهم‌ترین قابلیت‌های سامانه را از دید بازیگران مختلف مشخص می‌کند.

در نمودارUse Case ، هر فلش نشان‌دهنده تعامل مستقیم یک بازیگر (Actor) با یکی از قابلیت‌های سیستم است. این ارتباط‌ها بیان می‌کنند که کدام بازیگر آغازکننده یک فرآیند است، از خدمات سیستم استفاده می‌کند یا در اجرای آن نقش دارد. در ادامه، علت برقراری هر یک از این ارتباط‌ها تشریح شده است.

مدیر ساختمان (Building Manager) مهم‌ترین بازیگر سیستم است و بیشترین ارتباط را با قابلیت‌های مختلف دارد. فلش متصل به «مدیریت ساختمان» نشان می‌دهد که مدیر مسئول تنظیم و نظارت بر عملکرد کلی سامانه است و می‌تواند تنظیمات سیستم را تغییر دهد. ارتباط مدیر با «داشبورد مدیریتی» به این دلیل است که تمامی اطلاعات مربوط به وضعیت ساختمان، مصرف انرژی، عملکرد تجهیزات و هشدارهای سیستم از طریق این داشبورد در اختیار او قرار می‌گیرد. همچنین مدیر با بخش «مدیریت هشدارها» نیز در ارتباط است، زیرا پس از تشخیص هرگونه وضعیت غیرعادی یا بروز خطا، سیستم هشدارها را برای او ارسال می‌کند تا بتواند تصمیم مناسب را اتخاذ کند. علاوه بر این، مدیر مجاز است کاربران سیستم را مدیریت کرده، سطوح دسترسی را تعیین کند و عملکرد کلی ساختمان را کنترل نماید؛ بنابراین طبیعی است که بیشترین تعداد ارتباط‌ها در نمودار به این بازیگر اختصاص داده شده باشد.

ساکن (Resident) به عنوان یکی از کاربران عادی سیستم، تنها به قابلیت‌هایی دسترسی دارد که مستقیماً با محیط زندگی او مرتبط هستند. فلش متصل به ساکن نشان می‌دهد که او می‌تواند وضعیت تجهیزات یا شرایط محیطی محل سکونت خود را مشاهده کند و در صورت مجاز بودن، برخی تجهیزات مانند روشنایی یا دمای محیط را در محدوده تعیین‌شده کنترل کند. محدود بودن ارتباط‌های ساکن نسبت به مدیر ساختمان، بیانگر اعمال سیاست کنترل دسترسی و حفظ امنیت سیستم است.

تکنسین فنی (Technician) وظیفه نگهداری، عیب‌یابی و تعمیر تجهیزات را بر عهده دارد. به همین دلیل فلش‌های مربوط به این بازیگر به بخش‌هایی مانند مدیریت تجهیزات، بررسی وضعیت سنسورها و مدیریت خطاها متصل شده‌اند. زمانی که سیستم خرابی یک سنسور یا عملگر را تشخیص می‌دهد، گزارش خطا برای تکنسین ارسال می‌شود تا وضعیت تجهیزات را بررسی کرده و اقدامات لازم برای تعمیر یا بازیابی آن‌ها را انجام دهد. بنابراین ارتباط تکنسین بیشتر جنبه پشتیبانی و نگهداری سیستم را نشان می‌دهد.

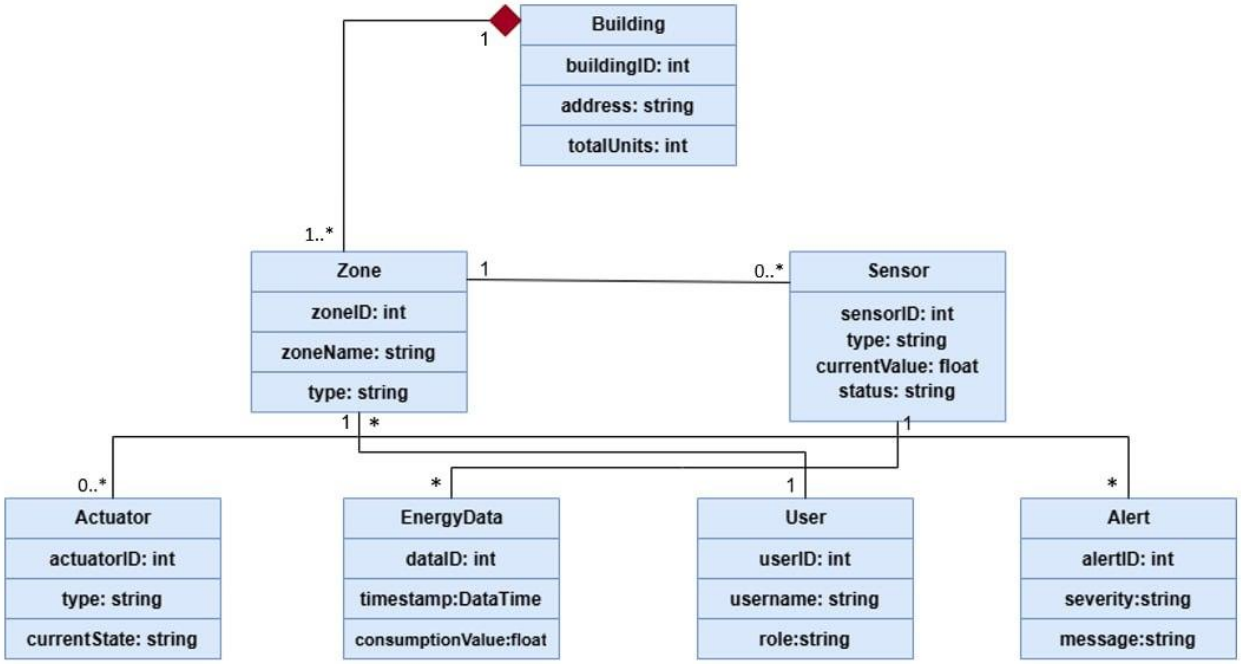
سنسورها (Sensors) برخلاف کاربران انسانی، یک بازیگر خارجی سخت‌افزاری محسوب می‌شوند. فلش‌های متصل به سنسورها نشان‌دهنده ارسال مستمر داده‌های محیطی به سیستم است. سنسورها اطلاعاتی مانند دما، رطوبت، شدت نور، حضور افراد و میزان مصرف انرژی را اندازه‌گیری کرده و برای پردازش به سامانه ارسال می‌کنند. این اطلاعات ورودی اصلی موتور قوانین هستند و بدون آن‌ها سیستم قادر به تحلیل وضعیت ساختمان و اتخاذ تصمیمات هوشمند نخواهد بود. به همین دلیل ارتباط سنسورها با بخش دریافت و پردازش داده‌ها، یکی از مهم‌ترین ارتباط‌های نمودار محسوب می‌شود.

عملگرها (Actuators) نیز مانند سنسورها بازیگران سخت‌افزاری هستند، اما نقش آن‌ها برعکس سنسورها است. در حالی که سنسورها اطلاعات را به سیستم ارسال می‌کنند، عملگرها فرمان‌های صادرشده توسط سیستم را دریافت و اجرا می‌کنند. به همین دلیل فلش متصل به عملگرها نشان می‌دهد که پس از تحلیل اطلاعات توسط موتور قوانین، فرمان‌هایی

مانند روشن یا خاموش کردن سیستم روشنایی، تنظیم تجهیزات سرمایشی و گرمایشی (HVAC) یا کنترل سایر تجهیزات الکتریکی برای عملگرها ارسال می‌شود. در واقع عملگرها بخش اجرایی سیستم هستند و تصمیمات هوشمند سامانه را در محیط واقعی پیاده‌سازی می‌کنند.

به طور کلی، ارتباط‌های موجود در نمودار Use Case بیانگر جریان تبادل اطلاعات و فرمان میان کاربران، تجهیزات سخت‌افزاری و سامانه مرکزی هستند. کاربران انسانی بیشتر نقش نظارت، مدیریت و تصمیم‌گیری را بر عهده دارند، در حالی که سنسورها وظیفه جمع‌آوری اطلاعات و عملگرها وظیفه اجرای فرمان‌های کنترلی را انجام می‌دهند. این تعامل منسجم باعث می‌شود سیستم مدیریت هوشمند انرژی ساختمان بتواند به صورت خودکار، پایدار و کارآمد وظایف خود را انجام دهد.

نمودار کلاس دامنه (Domain Class Diagram)



نمودار کلاس دامنه (Domain Class Diagram) ساختار ایستای سیستم مدیریت هوشمند انرژی ساختمان را نمایش می‌دهد و مفاهیم اصلی موجود در دامنه مسئله را مدل‌سازی می‌کند .در نمودار کلاس دامنه تمرکز صرفاً بر موجودیت‌های اصلی سیستم، ویژگی‌های آن‌ها و روابط میان این موجودیت‌ها است به همین دلیل بخش مربوط به متدها (Operations) در تمامی کلاس‌ها خالی در نظر گرفته شده و تنها نام کلاس‌ها، ویژگی‌ها (Attributes) و نوع داده هر ویژگی (Data Type)نمایش داده شده است. این نمودار پایه‌ای برای طراحی پایگاه داده و مراحل بعدی توسعه سیستم محسوب می‌شود. چیدمان کلاس‌ها به صورت سلسله‌مراتبی از بالا به پایین طراحی شده است. در بالاترین سطح، موجودیت اصلی یعنی ساختمان قرار دارد و سایر کلاس‌ها به تدریج بر اساس وابستگی منطقی و عملکردی در سطوح پایین‌تر قرار گرفته‌اند. این ساختار علاوه بر افزایش خوانایی نمودار، باعث شده است روابط بین کلاس‌ها بدون تداخل و به شکلی کاملاً شفاف نمایش داده شوند.

کلاس Building نمایانگر ساختمان یا مجتمع تحت پوشش سیستم است و به عنوان ریشه اصلی مدل شناخته می‌شود. این کلاس شامل ویژگی‌های buildingID به عنوان شناسه یکتا از نوعInteger ، address برای ذخیره آدرس ساختمان از نوع String و totalUnits برای مشخص کردن تعداد واحدهای موجود در ساختمان از نوع Integer است. تمامی بخش‌های دیگر سیستم به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به این موجودیت وابسته هستند.

در سطح بعدی، کلاس Zone قرار دارد که ساختمان را به بخش‌های کوچکتر تقسیم می‌کند. هر زون می‌تواند معرف یک واحد مسکونی، موتورخانه، پارکینگ یا هر فضای فیزیکی مستقل دیگری باشد. این کلاس دارای ویژگی‌های zoneID، zoneName و type است که به ترتیب شناسه زون، نام ناحیه و نوع آن را مشخص می‌کنند. وجود این کلاس باعث می‌شود مدیریت تجهیزات و داده‌ها برای هر بخش از ساختمان به صورت مستقل انجام شود.

کلاس Sensor تجهیزات اندازه‌گیری و پایش محیط را مدل می‌کند. این کلاس دارای ویژگی‌های sensorID، type، currentValue و status است. شناسه سنسور برای شناسایی هر تجهیز، نوع سنسور برای مشخص کردن عملکرد آن (مانند سنسور دما، رطوبت، حضور یا شدت نور)، مقدار فعلی برای ذخیره آخرین داده اندازه‌گیری‌شده و وضعیت سنسور برای نمایش سلامت عملکرد آن در نظر گرفته شده است.

در کنار سنسورها، کلاس Actuator تجهیزات کنترلی سیستم را نمایش می‌دهد. این کلاس شامل ویژگی‌های actuatorID، type و currentState است. عملگرها وظیفه اجرای فرمان‌های صادرشده توسط سیستم را بر عهده دارند و می‌توانند تجهیزاتی مانند سیستم روشنایی، تجهیزات سرمایشی و گرمایشی(HVAC) ، رله‌ها و سایر تجهیزات کنترلی را شامل شوند.

کلاس EnergyData مسئول نگهداری داده‌های مصرف انرژی است. این کلاس شامل ویژگی‌های dataID، timestamp و consumptionValue است که به ترتیب شناسه رکورد، زمان دقیق ثبت اطلاعات و مقدار مصرف انرژی را ذخیره می‌کنند. تمامی داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط سنسورها در قالب این کلاس در پایگاه داده ثبت می‌شوند تا امکان تحلیل، گزارش‌گیری و بررسی روند مصرف انرژی فراهم شود.

کلاس User کاربران سیستم را نمایش می‌دهد و شامل ویژگی‌های userID، username و role است. نقش کاربر می‌تواند مدیر ساختمان، ساکن یا تکنسین فنی باشد و سطح دسترسی هر کاربر بر اساس همین ویژگی تعیین می‌شود.

در نهایت، کلاس Alert برای ثبت هشدارها و رویدادهای غیرعادی سیستم در نظر گرفته شده است. این کلاس دارای ویژگی‌های alertID، severity و message است که به ترتیب شناسه هشدار، سطح اهمیت یا شدت هشدار و توضیح مربوط به رویداد ثبت‌شده را نگهداری می‌کنند. این اطلاعات در اختیار مدیر یا تکنسین قرار می‌گیرد تا اقدامات لازم برای رفع مشکل انجام شود.

تشریح روابط و کاردینالیتی‌ها(Multiplicity)

۱- رابطه Building و Zone

ارتباط بین کلاس Building و Zone از نوع Composition است که با لوزی توپر در سمت کلاس Building نمایش داده شده است. علت استفاده از این رابطه آن است که زون‌ها بخشی از ساختمان محسوب می‌شوند و به تنهایی هویت مستقلی ندارند. به عبارت دیگر، هر زون تنها در قالب یک ساختمان معنا پیدا می‌کند و اگر ساختمان حذف شود، تمام زون‌های مربوط به آن نیز از بین خواهند رفت.

کاردینالیتی این رابطه ۱ در سمت Building و ۱..* در سمت Zone است. این موضوع نشان می‌دهد که هر ساختمان باید حداقل یک زون داشته باشد و می‌تواند شامل چندین زون باشد، اما هر زون تنها به یک ساختمان تعلق دارد.

۲- رابطه Zone و User

بین کلاس Zone و User یک رابطه از نوع Association برقرار شده است. دلیل این ارتباط آن است که کاربران سیستم برای انجام وظایف خود باید به زون‌های مختلف ساختمان دسترسی داشته باشند. برای مثال، مدیر ساختمان می‌تواند وضعیت چندین زون را مشاهده و مدیریت کند و تکنسین نیز ممکن است مسئول نگهداری چند زون باشد.

در این نمودار، کاردینالیتی رابطه به گونه‌ای تعریف شده است که هر کاربر می‌تواند با چندین زون در ارتباط باشد، اما هر زون تحت نظارت یک کاربر قرار می‌گیرد .

۳- رابطه Zone وSensor

هر زون برای پایش شرایط محیطی خود به سنسور نیاز دارد؛ بنابراین بین کلاس Zone و Sensor یک رابطه انجمنی برقرار شده است. این رابطه نشان می‌دهد که سنسورها در محل مشخصی از ساختمان نصب می‌شوند و اطلاعات همان زون را جمع‌آوری می‌کنند.

کاردینالیتی این ارتباط ۱ به ۰ *.. است، یعنی هر زون می‌تواند هیچ سنسوری نداشته باشد یا دارای چندین سنسور باشد، اما هر سنسور تنها در یک زون نصب می‌شود.

٤- رابطه Zone وActuator

عملگرها تجهیزاتی هستند که فرمان‌های صادرشده توسط سیستم را اجرا می‌کنند؛ به همین دلیل هر عملگر باید به یک زون مشخص تعلق داشته باشد تا تجهیزات همان قسمت را کنترل کند.

کاردینالیتی این رابطه نیز **۱** به ۰ *.. است. یعنی ممکن است در یک زون هیچ عملگری نصب نشده باشد یا چندین عملگر برای کنترل روشنایی، سیستم سرمایش و گرمایش یا سایر تجهیزات وجود داشته باشد، اما هر عملگر تنها به یک زون تعلق دارد.

۵- **رابطه Zone وAlert**

هشدارها برای یک زون مشخص ثبت می‌شوند؛ زیرا هر رخداد غیرعادی مربوط به بخش خاصی از ساختمان است. به عنوان مثال، افزایش دما، خرابی یک سنسور یا مصرف غیرعادی انرژی همگی به یک زون مشخص مربوط هستند.

به همین دلیل، کاردینالیتی این ارتباط **۱ به ۰ *..** در نظر گرفته شده است؛ یعنی یک زون ممکن است هیچ هشداری نداشته باشد یا در طول زمان تعداد زیادی هشدار برای آن ثبت شود، اما هر هشدار تنها مربوط به یک زون خواهد بود.

٦- **رابطه Sensor وEnergyData**

بین کلاسSensor و Energy Data نیز یک رابطه انجمنی وجود دارد. علت این ارتباط آن است که داده‌های ثبت‌شده در سیستم مستقیماً توسط سنسورها تولید می‌شوند. هر بار که یک سنسور عملیات اندازه‌گیری انجام می‌دهد، یک رکورد جدید در کلاس Energy Data ایجاد می‌شود.

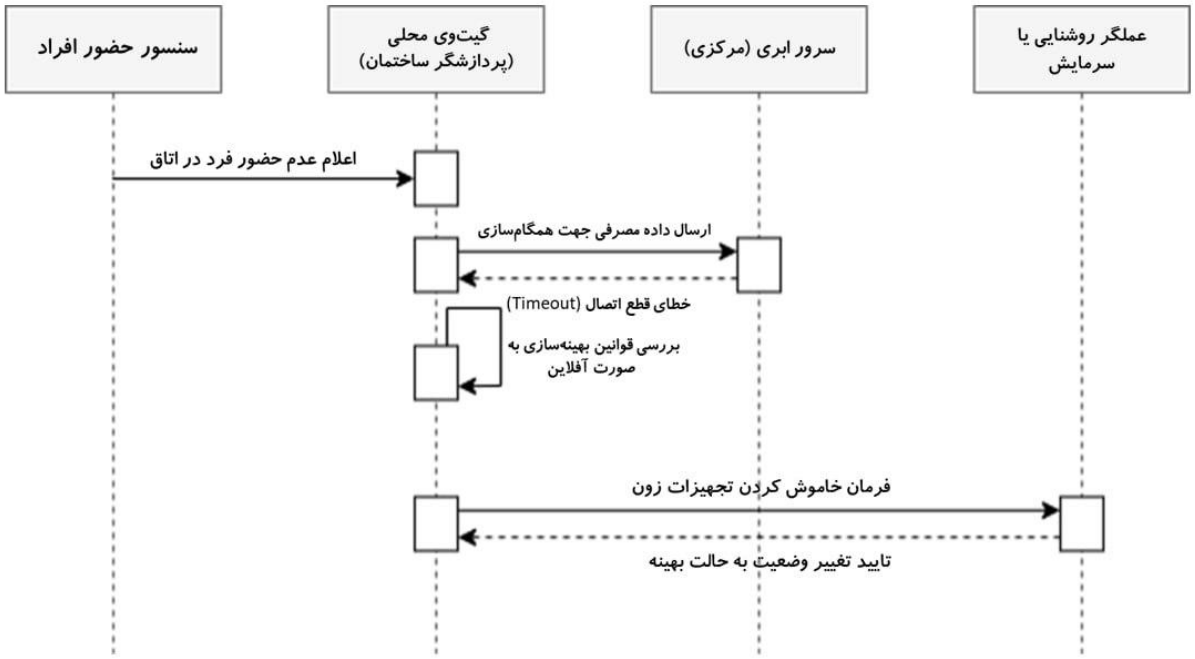
کاردینالیتی این رابطه **۱ به *** است، یعنی هر سنسور در طول زمان می‌تواند تعداد بسیار زیادی داده تولید کند، اما هر رکورد ذخیره‌شده تنها توسط یک سنسور ایجاد شده است. این طراحی باعث می‌شود منشأ هر داده به‌طور دقیق مشخص باشد و امکان تحلیل و ردیابی اطلاعات در سیستم فراهم شود.

تحلیل و تشریح تفصیلی نمودارهای توالی(Sequence Diagrams)

در مهندسی نرم‌افزار، نمودار توالی (Sequence Diagram) تعاملات رفتاری و دینامیک سیستم را از منظر «پیام‌رسانی میان اشیاء همگام و ناهمگام» در یک خط زمانی خطی (از بالا به پایین) بررسی می‌کند. در این نمودارها، چند مفهوم کلیدی وجود دارد که در تحلیل سناریوها به آن‌ها استناد شده است:

- **خط عمر(Lifeline)** : خط‌چین‌های عمودی که نماینده یک شیء (Instance) مستقل یا یک اکتور (Actor) در طول اجرای سناریو هستند.
- **جعبه فعال‌سازی(Activation Bar/Focus of Control)** : ستطیل‌های باریکی که روی خطوط عمر قرار می‌گیرند و نشان‌دهنده بازه زمانی دقیق تسلط آن شیء بر پردازش و جریان کنترل است.
- **پیام همگام (Synchronous Message)** : با فلش خط صاف و نوکِ توپر نشان داده می‌شود؛ فرستنده پیام را ارسال کرده و تا زمانی که پاسخ (Reply) را دریافت نکند، منتظر می‌ماند (بلاک می‌شود).
- **پیام بازگشتی(Reply/Return Message)** : با فلش خط‌چین و نوکِ باز نشان داده می‌شود و نتیجه پردازش یا مقدار برگشتی را به شیء فراخوان بازمی‌گرداند.
- **پیام به خود (Self-Message)** : فلش عصایی‌شکلی که از یک شیء شروع شده و به خود همان شیء برمی‌گردد و نشان‌دهنده فراخوانی یک متد داخلی (Internal Method) بدون نیاز به تعامل با اشیاء دیگر است.

سناریوی ۱: عملکرد آفلاین در شرایط قطعی شبکه مرکزی(Edge Computing)



۱- فلسفه و هدف مهندسی سناریو

این سناریو مستقیماً پاسخگوی دغدغه کلیدی فاز اول پروژه در حوزه پایداری و تاب‌آوری سیستم است. از آنجا که سیستم مدیریت هوشمند انرژی بر پایه اینترنت اشیاء (IoT) بنا شده، وابستگی مطلق به سرور ابری (Cloud) در زمان قطع اینترنت محلی یا کشوری، یک نقطه شکست واحد (Single Point of Failure) ایجاد می‌کند. هدف این سناریو، مدل‌سازی **محاسبات لبه‌ای (**Edge Computing**)** است که در آن، گیت‌وی ساختمان (Edge Gateway) به عنوان یک حاکم محلی، نقش پردازشگر جایگزین را ایفا می‌کند تا آسایش ساکنین و فرآیند بهینه‌سازی انرژی حتی در بدترین شرایط زیرساختی متوقف نشود.

۲- اجزای شرکت‌کننده در سناریو(Lifelines)

- Sensor : شیء سنسور حضور فیزیکی افراد که در زون مستقر است.
- Edge Gateway : سخت‌افزار و ماشین پردازشی محلی مستقر در ساختمان (مجهز به موتور قوانین سبک).
- Cloud Server : هسته پردازش ابری و مرکزی سیستم مدیریت انرژی.
- Actuator : عملگرهای فیزیکی (مانند سیستم سرمایش/گرمایش یا رله‌های روشنایی).
-

۳ .تشریح گام‌به‌گام و پله‌پله زمان تعاملات(Execution Steps)

- **گام اول (فرستنده :Sensor → گیرنده: Edge Gateway)**

در اولین پله زمانی، سنسور حضور پس از پایش محیط، یک پیام همگام (Synchronous) با عنوان **«اعلام عدم حضور فرد در اتاق »** به سمت گیت‌وی محلی ارسال می‌کند. در این لحظه، جعبه فعال‌سازی گیت‌وی محلی باز می‌شود تا مدیریت داده را بر عهده بگیرد.

- **گام دوم (فرستنده : Edge Gateway → گیرنده :Cloud Server)**

گیت‌وی محلی طبق پروتکل استاندارد، تلاش می‌کند داده دریافتی را برای همگام‌سازی دیتابیس ابری بالا بفرستد. بنابراین پیام همگام **« ارسال داده مصرفی جهت همگام‌سازی »** را به سمت Cloud Serverشلیک می‌کند.

- **گام سوم (فرستنده: Cloud Server → گیرنده:Edge Gateway)**

به دلیل قطعی شبکه یا عدم پاسخ‌گویی زیرساخت اینترنت، سرور ابری قادر به پردازش نیست. در نتیجه رویداد انقضای زمان رخ داده و یک پیام بازگشتی (Reply) خط‌چین با عنوان **« خطای قطع اتصال (Timeout) »** به گیت‌وی برمی‌گردد. کنترل دوباره به لایه محلی واگذار می‌شود.

- **گام چهارم (تعامل داخلی -Self-Message روی Edge Gateway)**

گیت‌وی محلی با دریافت سیگنال خطا، بلافاصله مکانیزم سوئیچ به حالت اضطراری را فعال می‌کند. یک فلش عصایی روی خودش می‌چرخد و متد داخلی **« بررسی قوانین بهینه‌سازی به صورت آفلاین»** را فراخوانی می‌کند. در این گام، قوانین محلی ذخیره شده در حافظه غیرفرار گیت‌وی (مانند سناریوی خاموشی در صورت عدم حضور) وارد مدار تصمیم‌گیری می‌شوند.

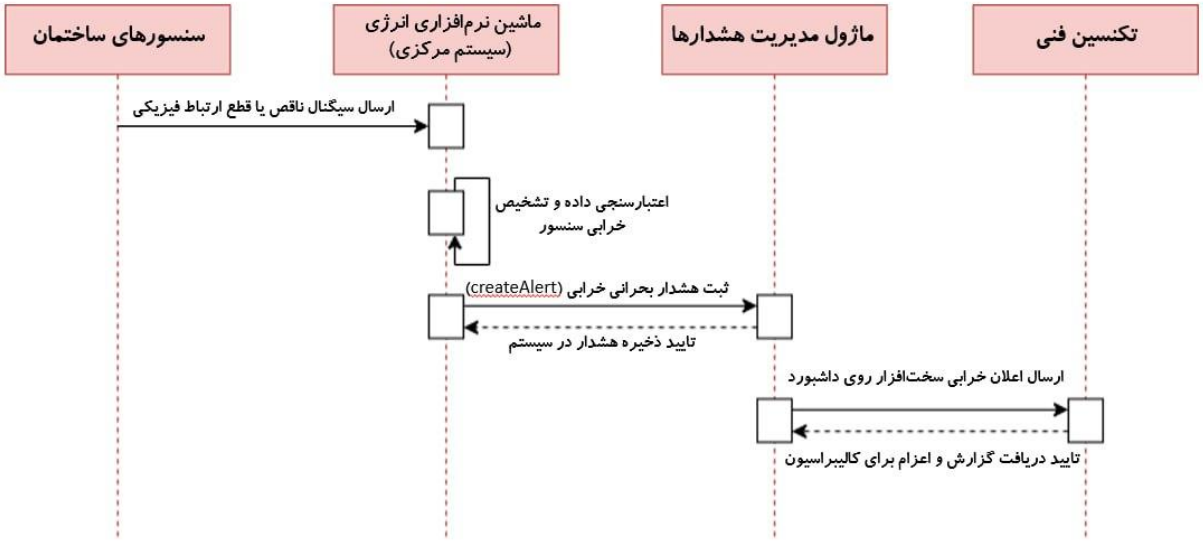
- **گام پنجم (فرستنده: Edge Gateway → گیرنده:Actuator)**

پس از پردازش محلی قوانین، گیت‌وی بدون نیاز به کسب تکلیف از سرور ابری، فرمان اجرایی را صادر می‌کند. پیام همگام با عنوان **« فرمان خاموش کردن تجهیزات زون»** به خط عمر عملگر فیزیکی صادر می‌شود و جعبه فعال‌سازی عملگر روشن می‌گردد.

- **گام ششم (فرستنده: Actuator → گیرنده: Edge Gateway)**

عملگر فیزیکی رله مربوطه را قطع کرده و پس از اطمینان از تغییر وضعیت سخت‌افزار، پیام بازگشتی خط‌چین با عنوان **«تایید تغییر وضعیت به حالت بهینه»** را به گیت‌وی محلی پس می‌دهد. با این پیام، جعبه‌های فعال‌سازی بسته شده و سناریوی کنترل آفلاین با موفقیت پایان می‌یابد.

سناریوی ۲: سیستم هشدارهای هوشمند و اعلان خرابی سخت‌افزار (تحقق نیازمندی FR-05)



۱ .فلسفه و هدف مهندسی سناریو

تجهیزات اینترنت اشیاء به مرور زمان دچار استهلاک، نویزهای الکترونیکی یا قطع فیزیکی می‌شوند. این سناریو به طور اختصاصی جهت پوشش **نیازمندی عملکردی** FR-05 (مدیریت خطا و هشدارهای هوشمند) طراحی شده است. اهمیت این سناریو در معماری نرم‌افزار این است که سیستم را از حالت انفعالی (منتظر ماندن تا زمانی که انسان خرابی را بفهمد) به حالت پیش‌کنترلی و خودکار **(Proactive)** ارتقا می‌دهد؛ به طوری که خود سیستم، خرابی قطعاتش را کشف کرده و فرآیند زنجیره‌ای ارجاع به تکنسین را مدیریت می‌کند.

۲ .اجزای شرکت‌کننده در سناریو(Lifelines)

- Building Sensors: شبکه سنسورهای فیزیکی ساختمان که وضعیت محیطی را گزارش می‌دهند.
- Energy Software Engine: هسته پردازشی و ماشین نرم‌افزاری مدیریت انرژی سیستم مرکزی.
- Alert Management Module: ماژول فرعی و مستقل مسئول مدیریت، فیلترینگ و توزیع هشدارهای سیستم.
- Technician: اکتور یا کاربر انسانی (تکنسین فنی نگهداری ساختمان).

۳ .تشریح گام به‌گام و پله‌پله زمان تعاملات(Execution Steps)

- **گام اول (فرستنده: Building Sensors →گیرنده: Energy Software Engine)**

سنسور فیزیکی دچار نقص سخت‌افزاری یا قطع کابل می‌شود و یک فریم داده مخدوش یا سیگنال فرکانسی ناقص تحت عنوان **»ارسال سیگنال ناقص یا قطع ارتباط فیزیکی «**به سمت هسته نرم‌افزاری سیستم مخابره می‌کند.

- **گام دوم (تعامل داخلی- Self-Message روی Energy Software Engine)**

ماشین نرم‌افزاری انرژی با دریافت این سیگنال نامتعارف، یک فرآیند تحلیل داخلی (با فلش عصایی متصل به خود) با عنوان **«اعتبارسنجی داده و تشخیص خرابی سنسور»** آغاز می‌کند. سیستم با بررسی متدهای آماری متوجه می‌شود که این داده نویز نیست، بلکه یک خطای سخت‌افزاری قطعی است.

- **گام سوم (فرستنده: Energy Software Engine →گیرنده: Alert Management Module)**

هسته سیستم بلافاصله فرمان ثبت رسمی این خطا را صادر می‌کند. پیام همگام با عنوان متد ساختاری **createAlert (ثبت هشدار بحرانی خرابی)** به ماژول مدیریت هشدارها ارسال می‌شود. این پیام حاوی شناسه سنسور و درجه اهمیت بحرانی (Severity = Critical) است.

- **گام چهارم (فرستنده:Alert Management Module →گیرنده:Energy Software Engine)**

ماژول مدیریت هشدارها رویداد را در دیتابیس پایدار سیستم ثبت کرده و برای آزادسازی نخ پردازشی (Thread) هسته اصلی، پیام بازگشتی خط‌چین با عنوان **« تایید ذخیره هشدار در سیستم»** را به ماشین انرژی برمی‌گرداند.

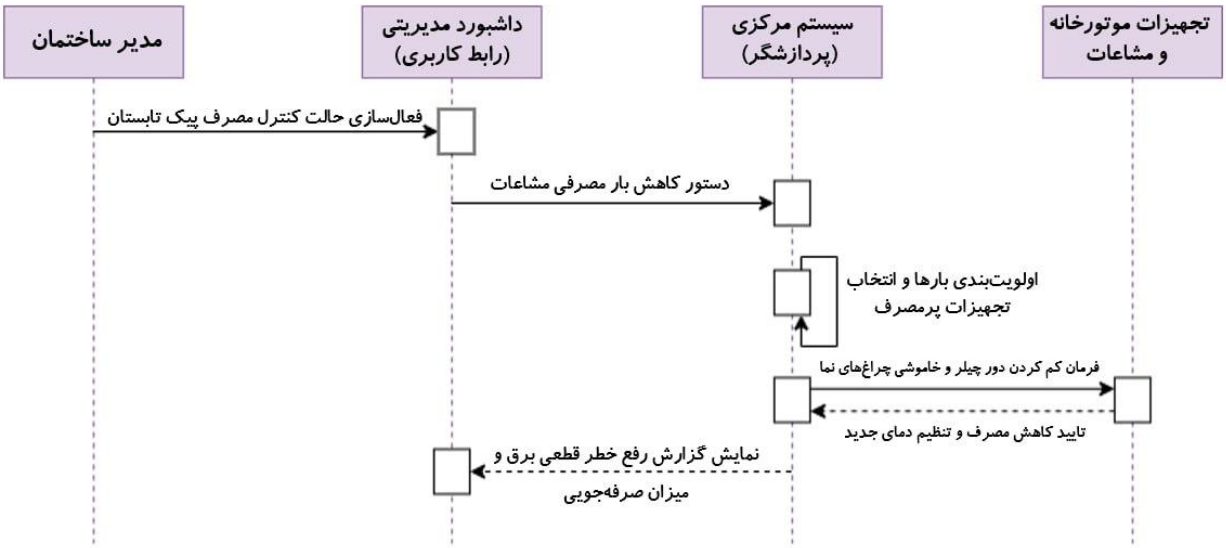
- **گام پنجم (فرستنده:Alert Management Module →گیرنده:Technician)**
-

ماژول هشدار بر اساس نقش‌های سیستم، تکنسین شیفت زون مربوطه را شناسایی کرده و از طریق سرویس ویس ردیابی یا اعلان آنی، پیام همگام **« ارسال اعلان خرابی سخت‌افزار روی داشبورد »**را به واسط کاربری تکنسین می‌فرستد. کادر فعال‌سازی داشبورد تکنسین فعال شده و شروع به چشمک زدن می‌کند.

- **گام ششم (فرستنده:Technician →گیرنده:Alert Management Module)**

تکنسین فنی اعلان بحرانی را روی مانیتور خود مشاهده کرده، دکمه تایید (Acknowledge) را می‌فشارد. با این کار، پیام بازگشتی خط‌چین با متن **« تایید دریافت گزارش و اعزام برای کالیبراسیون»** به ماژول هشدار بازمی‌گردد. سیستم وضعیت هشدار را از "جدید" به "در حال تعمیر فیزیکی" تغییر داده و خط زمانی تعامل به پایان می‌رسد.

سناریوی ۳: مدیریت بار مصرفی و پیک‌سایی در ساعات اوج مصرف (پیک تابستان)



۱ .فلسفه و هدف مهندسی سناریو

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بومی مدیریت مجتمع‌های بزرگ در کشور، ناترازی شبکه توزیع برق در فصل تابستان و ریسک قطع شدن برق کل مجتمع به دلیل مصرف بالای تجهیزات سرمایشی مشاعات است. این سناریو یک مکانیزم **مدیریت بحران (Crisis Management)** را مدل‌سازی می‌کند که در آن، سیستم به جای قطع کردن کل سیستم‌ها یا خاموشی مطلق، یک الگوریتم هوشمند پیک‌سایی (Peak Shaving) را پیاده می‌کند تا با فدا کردن بارهای کم‌اهمیت‌تر، پایداری کلان شبکه ساختمان را حفظ کند.

۲ .اجزای شرکت‌کننده در سناریو(Lifelines)

- Building Manager: اکتور مدیر ساختمان که تصمیم‌گیرنده کلان است.
- Management Dashboard: واسط کاربری و داشبورد گرافیکی مدیر.
- Central Syste: پردازشگر مرکزی و هسته منطقی مدیریت ساختمان.
- Facility & Utilities: تجهیزات موتورخانه مرکزی، چیلرهای سرمایشی فرعی و سیستم‌های روشنایی مشاعات.

۳ .تشریح گام‌به‌گام و پله‌پله زمان تعاملات(Execution Steps)

- **گام اول (فرستنده:Building Manager → گیرنده:Management Dashboard)**

با اعلام اخطار از سوی شبکه توزیع برق یا رسیدن مصرف ساختمان به مرز بحرانی، مدیر ساختمان رویداد اضطراری را با فشردن دکمه مخصوص فعال می‌کند. این تعامل با پیام همگام« **فعال‌سازی حالت کنترل مصرف پیک تابستان** » به داشبورد مدیریتی فرستاده می‌شود.

- **گام دوم (فرستنده:Management Dashboard → گیرنده:Central System)**

داشبورد گرافیکی این درخواست را ساختاردهی کرده و پیام همگام لایه کاربردی با عنوان »**دستور کاهش بار مصرفی مشاعات** «را به سمت سیستم مرکزی (پردازشگر اصلی) هدایت می‌کند.

- **گام سوم(تعامل داخلی - Self-Message روی Central System)**

سیستم مرکزی وارد یک فاز پردازشی فشرده روی خط عمر خود می‌شود. با استفاده از فلش عصایی متصل به خود، متد داخلی »**اولویت‌بندی بارها و انتخاب تجهیزات پرمصرف** «را صدا می‌زند. در این گام، سیستم طبق جدول اولویت‌ها، مصارف غیرضروری (مانند چراغ‌های تزیینی نما و فن‌کویل‌های لابی‌های خالی) و چیلرهای فرعی را برای کاهش دیماند انتخاب می‌کند.

- **گام چهارم (فرستنده:Central System → گیرنده:Facilitys & Utilitie)**

پس از مشخص شدن لیست بارهای حذفی یا کاهشی، سیستم مرکزی فرمان‌های دیجیتال و ناهمگام کنترلی را صادر می‌کند. پیام با عنوان »**فرمان کم کردن دور چیلر و خاموشی چراغ‌های نما** «به خط عمر تجهیزات مشاعات و موتورخانه شلیک می‌شود.

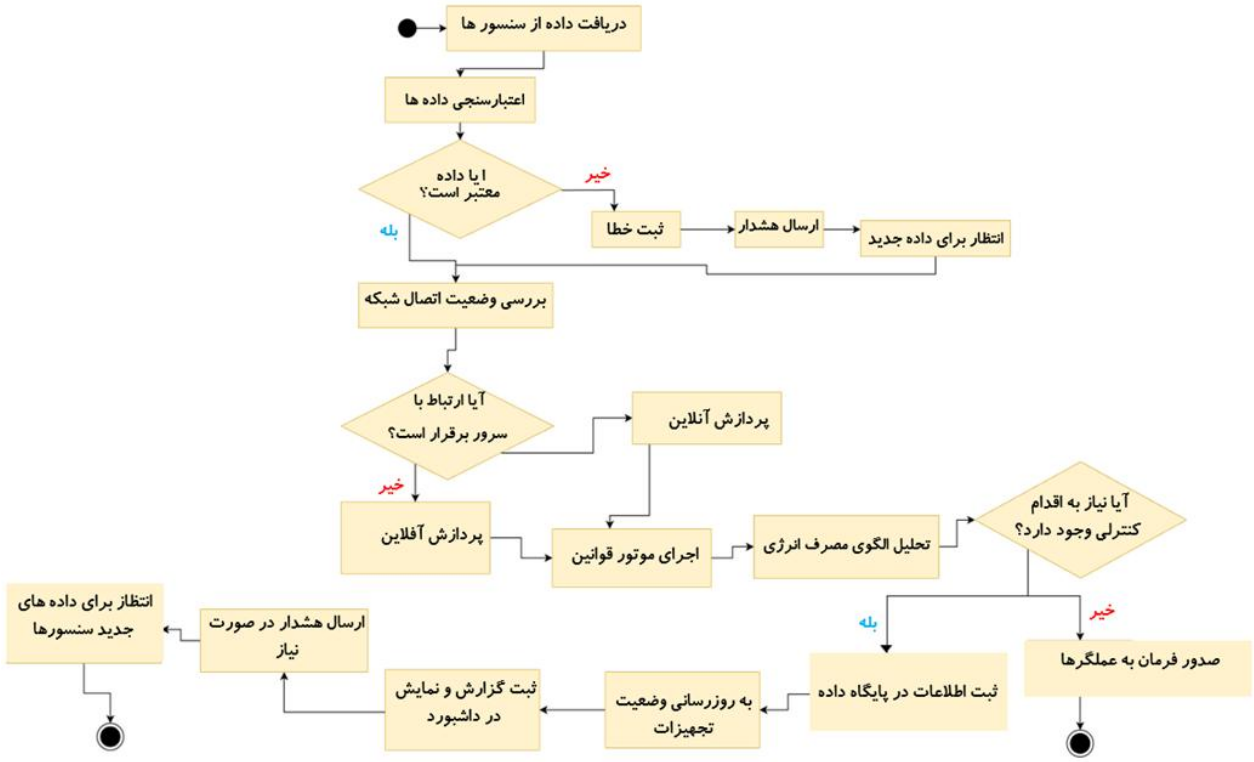
- **گام پنجم (فرستنده:Facilitys & Utilitie → گیرنده:Central System)**

سخت‌افزار موتورخانه و رله‌های هوشمند فرامین را اعمال کرده (دور چیلرها را کاهش داده و خطوط روشنایی نما را قطع می‌کنند) و پس از ثبت افت جریان الکتریکی، پیام بازگشتی خط‌چین با عنوان »**تایید کاهش مصرف و تنظیم دمای جدید** «را به سیستم مرکزی پس می‌دهند.

- **گام ششم (فرستنده:Central System → گیرنده:Management Dashboard)**

سیستم مرکزی میزان دقیق صرفه‌جویی لحظه‌ای (بر حسب کیلووات ساعت) و وضعیت جدید شبکه ساختمان را محاسبه کرده و در آخرین پله عمودی زمان، پیام بازگشتی نهایی با متن **»نمایش گزارش رفع خطر قطعی برق و میزان صرفه‌جویی «**را روی داشبورد مدیر چاپ می‌کند تا وی را از مهار بحران باخبر سازد. با این گزارش، تعامل خاتمه می‌یابد.

نمودار فعالیت (Activity Diagram)



نمودار ترسیم‌شده، فرآیند محوری «پایش داده‌های محیطی، تحلیل پایداری شبکه و مدیریت هوشمند عملگرهای سرمایش و روشنایی» را مدل‌سازی کرده است که در ادامه به صورت پله‌پله و بر اساس خط سیر فرآیند، تشریح تفصیلی می‌گردد:

گام اول: نقطه آغازین و دریافت داده(Entry Notification & Data Ingestion)

توضیح فنی: فرآیند با اکتساب یا فراخوانی دوره زمانی نمونه‌برداری از سوی شبکه سنسورها (دما، حضور و نور) آغاز می‌شود. نقطه آغازین (Initial Node) که با یک دایره توپر مشکی مشخص شده است، توکن اجرایی را به گام «دریافت داده از

شبکه سنسورها» هدایت می‌کند. در این مرحله، داده‌های فیزیکی به متغیرهای دیجیتال تبدیل شده و در لایه اولیه بافر می‌شوند.

گام دوم: ارزیابی صحت سیگنال و مدیریت خطا(Signal Validation & Fault Injection)
توضیح فنی: جریان فرآیند بلافاصله وارد اولین لوزی شرطی یعنی «وضعیت سیگنال؟» می‌شود. این گام به عنوان یک فیلتر حفاظتی عمل می‌کند:

مسیر فرعی (خطای سخت‌افزاری): در صورت تشخیص سیگنال ناقص، نویز شدید یا عدم پاسخ‌دهی(Timeout) ، جریان به سمت گام «تشخیص خرابی سنسور توسط گیت‌وی» منشعب می‌شود. متعاقباً با فراخوانی متدهای سیستمی، فرآیند «ثبت هشدار بحرانی خرابی در سرور مرکزی» و «ارسال اعلان به داشبورد تکنسین» فعال شده و با «اعزام تکنسین جهت تعمیر و کالیبراسیون»، توکن اجرایی به نقطه پایانی خطا (Final Node) هدایت می‌شود تا امنیت فیزیکی سیستم حفظ گردد.

مسیر اصلی (داده معتبر): در صورت تایید اصالت و پایدار بودن سیگنال، توکن اجرایی وارد مرحله «اعتبارسنجی داده و حذف نویز» شده و سیگنال‌های محیطی جهت پردازش نهایی آماده‌سازی می‌شوند.

گام سوم: ارزیابی زیرساخت شبکه و معماری محاسبات لبه‌ای(Network Topology & Edge Routing)
توضیح فنی: داده‌های پالایش‌شده به دومین لوزی شرطی تحت عنوان «وضعیت اتصال؟» می‌رسند. این گام پیاده‌سازی صوری نیازمندی پایداری عملکرد در شرایط بحران (FR-04) است:

انشعاب آفلاین(Offline Branch) : در صورت قطع ارتباط با زیرساخت ابری، سیستم دچار توقف (Halt) نشده و جریان کار به ماژول «بررسی قوانین بهینه‌سازی در «Edge Gateway منتقل می‌شود تا محاسبات لبه‌ای (Edge Computing) در سطح ساختمان مدیریت مصرف را بر عهده بگیرد.

انشعاب آنلاین(Online Branch) : در وضعیت نرمال و وجود شبکه، پیام «ارسال داده به سرور مرکزی جهت همگام‌سازی» صادر شده و سناریوها توسط «پردازش قوانین در سیستم مرکزی» هدایت می‌شوند.

نکته معماری: هر دو مسیر در یک گره همگرایی (Merge Node) دوباره به یکدیگر متصل شده و داده‌ها را به لایه تصمیم‌گیری نهایی هدایت می‌کنند.

گام چهارم: تحلیل گره حضور و بهینه‌سازی مصرف انرژی(Decision Logic & Context-Awareness)

توضیح فنی: در این مرحله، توکن اجرایی وارد لوزی تصمیم‌گیری سوم یعنی «تحلیل حضور؟» می‌شود تا بر اساس پایش زون‌ها اقدام کند:

مسیر حفظ وضعیت: در صورت تایید حضور افراد در زون، سیستم اولویت را بر آسایش ساکنین قرار داده و گام «حفظ وضعیت فعلی تجهیزات» را اجرا می‌کند و فرآیند بدون دستکاری عملگرها به پایان می‌رسد.

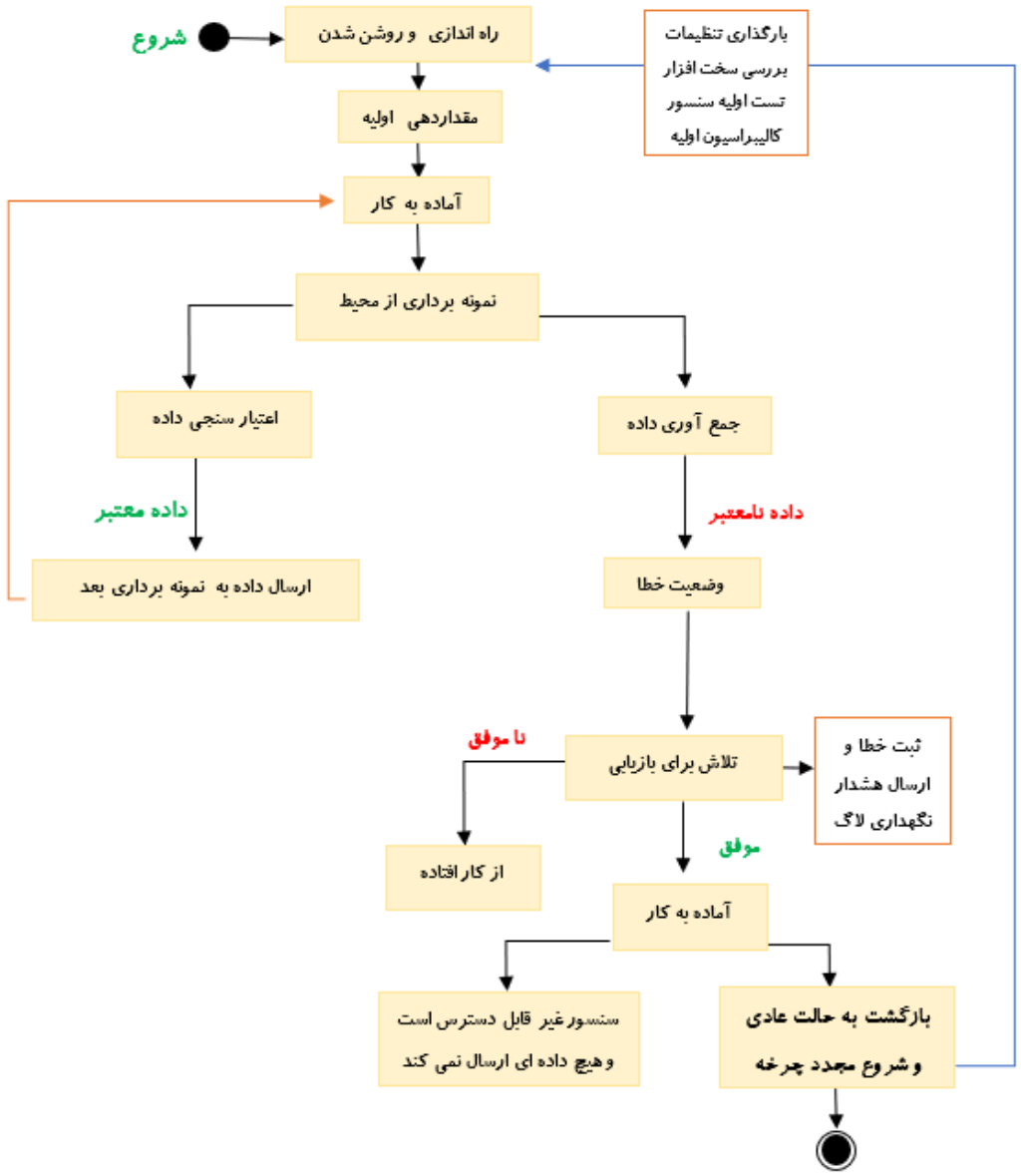
مسیر بهینه‌سازی(Eco-Mode) : در صورت عدم حضور افراد در اتاق یا زون مشخص، سیستم سناریوی فعالِ کاهش دیماند مصرفی را آغاز کرده و گام «صدور فرمان خاموشی یا «Eco-Mode را فعال می‌سازد.

گام پنجم: لایه محرک‌های فیزیکی و بازخورد سیستمی(Actuation Layer & State Synchronization)
توضیح فنی: پس از تایید عدم حضور، دستور دیجیتال به سخت‌افزار منتقل شده و گام «اجرای تغییر وضعیت توسط عملگر» (مانند قطع رله روشنایی یا کاهش دور چیلر سرمایشی) اعمال می‌شود. پس از فرستادن سیگنال فیزیکی، گام «تایید تغییر وضعیت و بروزرسانی دیتابیس» اجرا می‌شود تا وضعیت جدید شیء عملگر در پایگاه داده با واقعیت فیزیکی ساختمان همگام (Synchronize) شود. در نهایت، توکن به نقطه پایانی فرآیند (Activity Final Node) می‌رسد.

تحلیل انطباق معماری(Architectural Compliance Analysis)
۱ .تحقق نیازمندی‌های غیرعملکردی(NFR-01) : تفکیک لوزی شرطیِ «وضعیت اتصال» به دو لایه ابری و لبه‌ای (Edge)، اثبات‌کننده معماری ضد آسیب (Fault-Tolerant) سیستم است که پایداری کلان پروژه را تضمین می‌کند.

۲. انسجام فرآیندی (High Cohesion): این نمودار فعالیت، پیوند مستقیمی با نمودار وضعیت (State) عملگرها و سنسورها دارد؛ به طوری که تمام اکشن‌های مستطیلی این نمودار، رویدادهای اصلی (Events) تغییر وضعیت در لایه شیءگرایی فاز دوم پروژه هستند.

نمودار وضعیت (State Diagram)



تشریح پله‌پله و تفصیلی چرخه حیات عملگر(State Lifecycle & Transitions)

۱ .وضعیت پیش‌فرض و پیکربندی اولیه(Off State)

توضیح فنی :نقطه آغازین نمودار (Initial Pseudo-State) با یک دایره توپر مشکی مشخص شده است که مستقیماً به کادر وضعیت Offاشاره می‌کند. این حالت نشان‌دهنده نصب فیزیکی عملگر در مدار زون ساختمان است در حالی که هنوز هیچ ولتاژ یا دیتایی از سوی گیت‌وی دریافت نکرده و در وضعیت مصرف صفر فیزیکی (PowerSave) قرار دارد.

گذارهای کلیدی(Transitions) : پس از راه‌اندازی سخت‌افزاری و اجرای متد سیستمی کالیبراسیون و زون‌بندی (Initialize) توسط تکنسین، عملگر با یک فلش جهتدار از حالت Offخارج شده و وارد فاز آمادگی و حالت عملیاتی Readyمی‌شود.

۲ .لایه کنترل هوشمند و وضعیت فعال(Ready Sub-States)

حالت Readyیک ابروضعیت (Composite State) است که رفتار عملیاتی و روزمره عملگر را مدیریت می‌کند. این کادر بزرگ شامل دو زیروضعیت و دو چرخه تعاملی داخلی است:

حالت آماده‌به‌کار (Standby) : عملگر روشن است اما منتظر دریافت دستور از موتور قوانین یا کاربر می‌ماند تا انرژی بیهوده تلف نشود.

حالت فعال عملیاتی (Active): به محض دریافت رویداد و متد turnOnاز سوی سیستم، عملگر فعال شده و وارد کادر زیرین یعنی Active می‌شود. برعکس، با فرستادن متد turnOff، دوباره به حالت Standby بازمی‌گردد.

۳ .منطق رفتاری زون‌ها در فاز عملکرد(Active Composition)

زمانی که عملگر در ابروضعیت Active(روشن بودن فیزیکی تجهیزات) قرار دارد، بر اساس داده‌های دریافتی از سنسور حضور، بین دو وضعیت کادردار زیر سوئیچ می‌کند:

حالت وضعیت اقتصادی (EcoMode): این حالت زمانی فعال است که سنسور، عدم حضور افراد در زون را تایید کرده باشد. عملگر با کاهش توان یا دور کاری (مثلاً کم کردن دور چیلر یا دیمر نور روشنایی)، مصرف انرژی را به بهینه‌ترین سطح ممکن می‌رساند.

حالت حداکثر توان (FullCapacity): به محض ورود فرد به زون فیزیکی یا تغییر سناریو توسط مدیر، رویداد تغییر وضعیت صادر شده و عملگر به حالت FullCapacity می‌رود تا آسایش و رفاه محیطی ساکنین تأمین شود. با خروج افراد، سیستم مجدداً به صورت خودکار به EcoMode برمی‌گردد.

۴ .مکانیزم حفاظت سخت‌افزاری و مدیریت ریسک(Overheated & Emergency Shutdown)

یکی از ویژگی‌های برجسته این نمودار، مدل‌سازی رفتار ایمنی قطعات در مواجهه با اضافه بار یا افزایش دمای سخت‌افزار است:

گذار به حالت خطای بحرانی :(Overheated) اگر در هر یک از مراحل کاری سیستم در بخش Ready، دمای فیزیکی رله‌ها یا موتور عملگر از آستانه مجاز فراتر رود(Overload) ، فورا یک گذار اولویت‌دار فعال شده و سیستم وارد کادر خطای Overheated می‌شود.

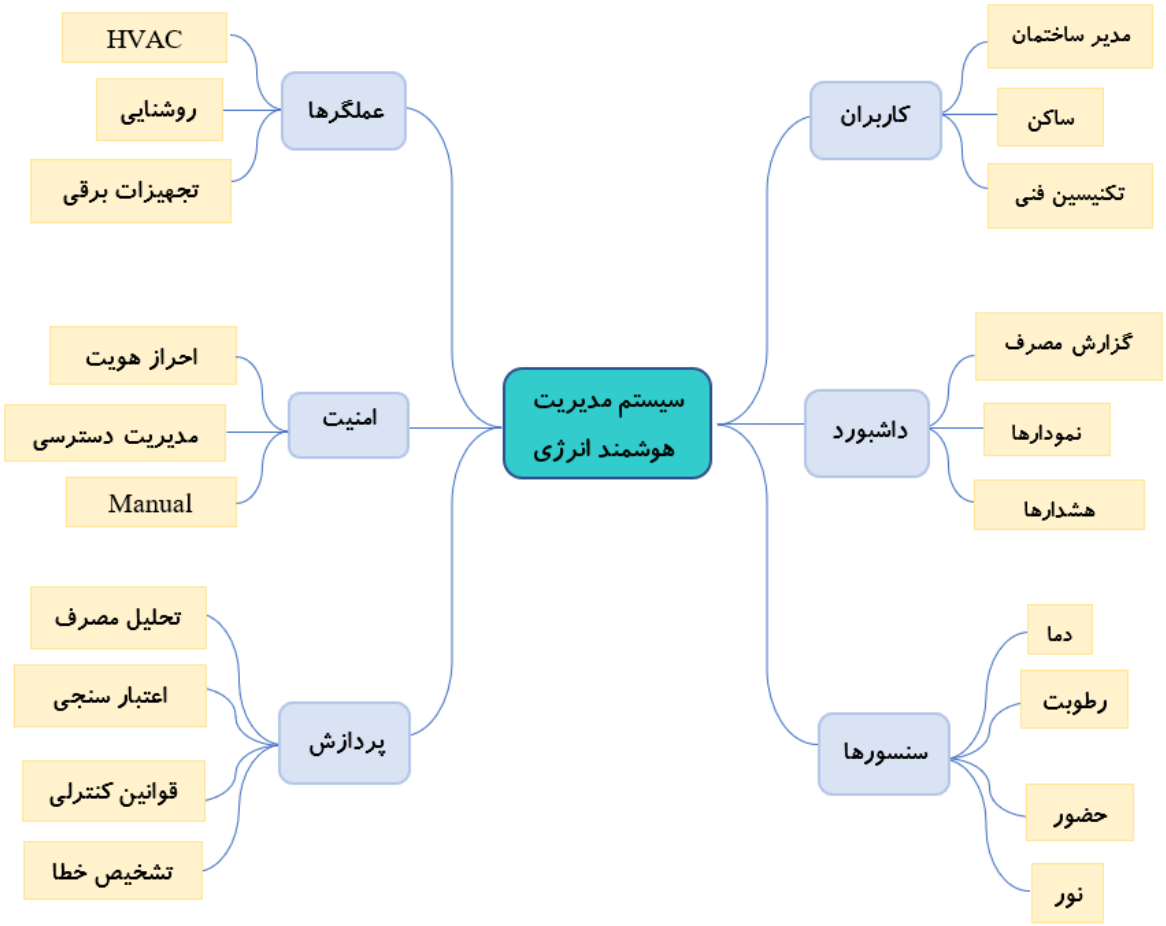
زیروضعیت‌های مدیریت بحران :در داخل این کادر، ابتدا متد خودکار و بی‌پاسخ Emergency Shutdown(قطع اضطراری منبع تغذیه) جهت جلوگیری از آتش‌سوزی یا سوختن قطعه صادر شده و سپس وضعیت شیء به Awaiting Repair (انتظار برای تعمیر) تغییر می‌یابد تا ماژول هشدارها تکنسین را باخبر کند.

بازگشت به چرخه :پس از عیب‌یابی، تعویض قطعه یا کالیبراسیون مجدد توسط تکنسین فنی، عملگر با رویداد تعمیر به حالت اولیه Off بازمی‌گردد تا چرخه عمر خود را مجدداً از ابتدا آغاز کند.

۵ .خروج قطعی از شبکه(Terminated)

در صورتی که عملگر به دلیل خرابی کامل اسقاط شود، یا ساختار فیزیکی زون ساختمان تغییر کند، سیستم با یک گذار مستقیم از تمامی حالات (Ready, Disconnected, Malfunctioning) به حالت پایانی و نهایی Terminatedهدایت شده و شیء از حافظه زنده سیستم حذف (Destroy) می‌شود.

نقشه ذهنی(Mind Map)



در بخش بالایی و سمت راست نمودار، تمرکز اصلی بر روی کاربران و نحوه تعامل آن‌ها با مانیتورینگ سیستم است. در زیرسیستم **کاربران**، نقش‌های عملیاتی به طور دقیق تفکیک شده‌اند؛ مدیر ساختمان به عنوان ناظر ارشد بر کل فرآیندها احاطه دارد، ساکن به عنوان ذینفع اصلی از خدمات رفاهی استفاده می‌کند و تکنسین فنی مسئولیت نگهداری سخت‌افزار را بر عهده می‌گیرد. این کاربران داده‌های مورد نیاز خود را از طریق زیرسیستم داشبورد دریافت می‌کنند، جایی که اطلاعات به صورت گزارش‌های عددی مصرف و نمودارهای تجسمی در اختیارشان قرار می‌گیرد و سیستم با ارسال هشدارها، آن‌ها را از وضعیت‌های غیرعادی باخبر می‌سازد.

در بخش پایینی و سمت راست، لایه فیزیکی دریافت اطلاعات از محیط از طریق زیرسیستم سنسورها مدل‌سازی شده است. این بخش با پایش مستمر دما و رطوبت، شرایط اقلیمی زون‌ها را می‌سنجد و با استفاده از حسگرهای حضور و نور، موقعیت فیزیکی ساکنان و میزان روشنایی طبیعی محیط را برای اتخاذ تصمیمات بعدی به لایه‌های بالاتر می‌فرستد.

در سمت چپ نمودار، فرآیندهای محاسباتی، حفاظتی و اجرایی سیستم قرار گرفته‌اند. زیرسیستم **پردازش** به عنوان مغز متفکر نرم‌افزار، ابتدا با اعتبارسنجی داده‌ها نویزهای محیطی را حذف کرده و با تشخیص خطا، سلامت سنسورها را مانیتور می‌کند؛ سپس با تحلیل الگوی مصرف و اعمال قوانین کنترلی، فرامین لازم را صادر می‌نماید. این فرامین پیش از اجرا باید از فیلتر زیرسیستم **امنیت** عبور کنند که وظیفه احاطه بر احراز هویت کاربران، مدیریت سطح دسترسی آن‌ها و پشتیبانی از اعمال تغییرات به صورت دستی (Manual) را بر عهده دارد. در نهایت، خروجی این زنجیره تصمیم‌گیری به زیرسیستم عملگرها ختم می‌شود که با کنترل فیزیکی تجهیزات برقی، مدارات روشنایی و سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی (HVAC)، چرخه مدیریت هوشمند انرژی ساختمان را تکمیل می‌کند.

نام مأخذ در نقشه ذهنی	اکتور / یوزکیس متناظر	کلاس متناظر در دیتابیس	اکشن متناظر در نمودار فعالیت	حالت متناظر در نمودار وضعیت
تکنسین فنی	اکتور تکنسین فنی / مدیریت هشدارها	کلاس `User` (role)	اکشن فرعی "ارسال هشدار"	خروجی حالت تلاش برای بازیابی
سنسورها	شبکه سنسورها / ارسال داده‌های محیطی	کلاس Sensor (current Value)	اکشن "دریافت داده از سنسورها"	تامین‌کننده رویدادهای نمونه‌برداری محیط
عملگرها (HVAC/ روشنایی)	عملگرها / اجرای قوانین خودکار	کلاس Actuator (current State)	اکشن "صدور فرمان به عملگرها"	حالات آماده به کار / وضعیت خطا
هشدارها	یوزکیس مدیریت و پیکربندی هشدارها	کلاس Alert (severity)	اکشن "ارسال هشدار در صورت نیاز"	خروجی‌های متصل به بخش ثبت خطا

جدول بالا به عنوان سند نهایی یکپارچگی، ردیابی قطعی عناصر را در تمامی ۵ نمودار طراحی شده اثبات می‌کند.