J. Oceanography (JOC). Volume16 (61): 118-129, winter 2025

Journal of Oceanography
Homepage: joc.inio.ac.ir

ORIGINAL RESEARCH PAPER

The Role of Cloud Computing in Optimizing the Performance of BMS Systems in Ports and Offshore Infrastructures

S. Akbari [1], ***M. Monajati*** [2,*]

[1] *Department of Electrical and computer engineering, Faculty of telecommunication and electronic engineering, Graduate University of advanced technology, Kerman, Iran*

[2] *Department of Electrical and computer engineering, Faculty of telecommunication and electronic engineering, Graduate University of advanced technology, Kerman, Iran*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 2025/06/7
Revised: 2025/09/7
Accepted: 2025/09/6

Keywords:
Cloud Computing
Building Management System
Ports
Edge and Fog Computing
IaaS Architecture
Infrastructures Intelligence

*Corresponding author:
M.monajati@khut.ac.ir

Doi: 10.52547/joc.16.61.9

ORID:0000-0001-9611-7534

ABSTRACT

Background and Objectives: With the rapid expansion of maritime and commercial activities in ports and offshore regions, the need for intelligent systems to monitor and manage infrastructure resources has become increasingly critical. Building Management Systems (BMS) are recognized as key technologies in enhancing energy efficiency, safety, and smart port infrastructure. However, traditional BMS architectures are often inadequate for addressing real-time processing, distributed decision-making, data security, and scalability requirements in complex port environments. In this context, cloud computing and its related architectures (edge, fog, and cloud) offer transformative capabilities for reengineering BMS systems. This study aims to investigate the role of cloud computing in optimizing the performance, resilience, and efficiency of BMS systems in port and offshore infrastructures.

Methods: In this study, a new cloud computing-based model has been designed and proposed through extensive literature review, conceptual analysis, and comparison of traditional and modern architectures. Within this framework, a multi-layer architecture incorporating edge, fog, and cloud computing has been developed using microservices and Infrastructure as a Service (IaaS). The model's components include data collection units, real-time analysis, storage, a management dashboard, and intelligent alerting. Tools such as Zabbix and Nagios have been employed for data gathering, and comparative analyses have been conducted based on criteria such as scalability, processing speed, security, and cost.

Findings: The results demonstrate that the proposed cloud-based architecture significantly outperforms traditional BMS in reducing processing latency, optimizing energy consumption, improving system scalability, enhancing data security, and enabling centralized resource management. Comparative analysis reveals that, in addition to real-time monitoring, the proposed model supports parallel processing, multi-cloud service provider integration, and intelligent data-driven analysis. The use of microservices architecture also leads to increased operational flexibility, higher accuracy in data log analysis, proactive alerting, and efficient system responsiveness to anomalies.

Conclusion: The proposed multi-layered cloud computing architecture—divided into edge, fog, and cloud layers—offers an effective framework for intelligent, scalable, and resilient BMS deployment in port infrastructures. It proves particularly beneficial in high-data, unstable network environments typical of offshore facilities. The study confirms that this approach supports digital transformation by improving responsiveness, operational efficiency, and system sustainability. Furthermore, it emphasizes the importance of developing localized AI algorithms, enhancing data protection, fostering inter-organizational collaboration, and integrating emerging technologies such as blockchain and digital twins. Despite its benefits, initial implementation costs, technical training requirements, and cybersecurity concerns remain as limitations to be addressed in future system designs.

NUMBER OF TABLES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF REFERENCES
3	3	26

مقاله پژوهشی

نقش رایانش ابری در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های BMS در زیرساخت‌های بندری و فراساحلی

شادی اکبری [۱]، مهرناز مناجاتی [۲*]

[۱] گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۲] گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۷.
تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۶/۱۶.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۵

واژگان کلیدی:
رایانش ابری
سیستم مدیریت ساختمان (BMS)
بنادر
رایانش لبه و مه
معماری IaaS
هوشمندسازی زیرساخت

*نویسنده مسئول
M.monajati@kgut.ac.ir

Doi: 10.52547/joc.16.61.9

ORID:0000-0001-9611-7534

چکیده

پیشینه و اهداف: با رشد سریع فعالیت‌های دریایی و تجاری در بنادر و مناطق فراساحلی، لزوم بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند برای مدیریت منابع زیرساختی بیش از پیش احساس می‌شود. سیستم‌های مدیریت ساختمان (BMS) به عنوان ابزارهایی کلیدی در ارتقای بهره‌وری انرژی، افزایش ایمنی و هوشمندسازی زیرساخت‌های بندری شناخته شده‌اند. با این حال، معماری‌های سنتی BMS، به‌ویژه در محیط‌های عملیاتی پیچیده و بحرانی نظیر بنادر، در پاسخ به نیازهای بلادرنگ، پردازش توزیع شده، امنیت داده و مقیاس‌پذیری عملکرد مطلوبی ندارند. در این میان، رایانش ابری و معماری‌های مبتنی بر آن (لبه، مه و ابر) ظرفیت‌های جدیدی برای بازمهندسی سیستم‌های BMS فراهم آورده‌اند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش رایانش ابری در بهینه سازی عملکرد، امنیت، انعطاف‌پذیری و کارایی سامانه‌های BMS در محیط‌های بندری و فراساحلی است.

روش‌ها: در این تحقیق با مرور متون تخصصی، تحلیل مفهومی و مقایسه معماری‌های سنتی و نوین، مدل جدیدی مبتنی بر رایانش ابری طراحی و پیشنهاد شده است. در این چارچوب، معماری چندلایه شامل رایانش لبه، مه و ابر با بهره‌گیری از میکروسرویس‌ها و زیرساخت به‌عنوان خدمت (IaaS) طراحی شده است. اجزای مدل شامل واحدهای جمع‌آوری داده، تحلیل بلادرنگ، ذخیره‌سازی، داشبورد مدیریتی و هشداردهی هوشمند هستند. ابزارهایی همچون Zabbix و Nagios برای گردآوری داده‌ها به‌کار رفته و تحلیل‌های مقایسه‌ای بر اساس معیارهایی چون مقیاس‌پذیری، سرعت پردازش، امنیت و هزینه‌ها صورت گرفته است.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که معماری پیشنهادی ابری نسبت به سیستم‌های سنتی BMS، دارای برتری قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش تاخیر پردازش، بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش مقیاس‌پذیری، ارتقای امنیت اطلاعات و مدیریت یکپارچه منابع است. تحلیل مقایسه‌ای با ابزارهای رایج نشان داد که مدل پیشنهادی علاوه بر نظارت بلادرنگ، از قابلیت پردازش موازی، پشتیبانی از چند ارائه‌دهنده خدمات ابری و تحلیل‌های داده‌محور نیز برخوردار است. همچنین بهره‌گیری از معماری میکروسرویس‌ها منجر به کاهش پیچیدگی، افزایش دقت تحلیل، هشداردهی هوشمند و واکنش سریع به رخدادهای غیرعادی شد.

نتیجه‌گیری: معماری چندلایه مبتنی بر رایانش ابری، با تفکیک وظایف بین لایه‌های لبه، مه و ابر، بستر مؤثری برای مدیریت هوشمند و مقیاس‌پذیر ساختمان‌ها در بنادر فراهم می‌کند. این معماری به‌ویژه در محیط‌هایی با زیرساخت‌های ارتباطی ناپایدار و داده‌های حجیم، از کارایی بالایی برخوردار است. نتایج پژوهش حاکی از آن است که بهره‌گیری از این رویکرد، گامی مؤثر در مسیر تحول دیجیتال تأسیسات فراساحلی است. پژوهش، همچنین بر توسعه الگوریتم‌های بومی هوش مصنوعی، تقویت امنیت داده‌ها، ارتقاء همکاری میان‌سازمانی و استفاده از فناوری‌های نوظهور نظیر بلاک‌چین و دوقلوی دیجیتال در نسل آینده سامانه‌های BMS تأکید دارد. محدودیت‌های اجرایی شامل هزینه اولیه استقرار، نیاز به آموزش تخصصی و ملاحظات امنیتی در محیط‌های بحرانی است، که باید در طراحی آینده سامانه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

مقدمه

با رشد فزاینده فعالیت‌های دریایی، لجستیکی و تجاری در بنادر و مناطق فراساحلی، لزوم بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند جهت پایش، کنترل و مدیریت منابع زیرساختی به‌طور روزافزون احساس می‌شود. در این میان، سیستم‌های مدیریت ساختمان[1] (BMS) به‌عنوان یک فناوری محوری در ارتقای بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهبود ایمنی و افزایش دوام تجهیزات در سازه‌های بندری و تأسیسات فراساحلی، نقشی بنیادین ایفا می‌کنند. سامانه‌های BMS با پایش و کنترل هوشمند اجزایی همچون تهویه مطبوع، روشنایی، کنترل دسترسی، سامانه‌های اعلام و اطفای حریق و مدیریت مصرف انرژی، امکان بهره‌برداری پایدار از زیرساخت‌های حیاتی را فراهم می‌آورند [۱-۳].

محیط‌های دریایی و بندری با چالش‌های خاصی از جمله شرایط اقلیمی متغیر، رطوبت و خوردگی بالا، نوسانات شدید مصرف انرژی و وابستگی به زیرساخت‌های ارتباطی ناپایدار مواجه‌اند. از سوی دیگر، بهره‌برداری همزمان از تجهیزات الکترومکانیکی سنگین، انبارهای کالا، ساختمان‌های عملیاتی، و پایانه‌های مسافری و باری در بنادر، نیازمند سیستم‌های مدیریتی منعطف، مقیاس‌پذیر و آنی است .سیستم‌های سنتی BMS که عمدتاً بر زیرساخت‌های متمرکز[2]، ایستا و فاقد توان پردازش توزیع‌شده[3] استوار بودند، در چنین محیط‌هایی کارایی لازم را نداشته و پاسخگوی الزامات پویای عملیاتی نیستند .

در این میان، رایانش ابری با ایجاد بستری پویا و مقیاس‌پذیر برای پردازش، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌های تولیدشده توسط سامانه‌های BMS، زمینه‌ساز تحولی بنیادین در معماری‌های این سامانه‌ها شده است. بهره‌گیری از معماری‌های چندلایه نظیر ترکیب محاسبات لبه[4]، مه[5] و ابر[6]، امکان انجام پردازش‌های بلادرنگ در محل (سطح لبه)، پردازش‌های تطبیقی و تجمیعی در لایه میانی (سطح مه)، و تحلیل‌های پیشرفته مبتنی بر ابر را فراهم کرده است. این تعامل میان سطوح مختلف، به‌ویژه در بنادر که با حجم بالای داده‌های عملیاتی و تجهیزات ناهمگون مواجه هستند، موجب به افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی سامانه‌های سیستم‌های BMS شده است [۴, ۵].

مطالعه حاضر با هدف بررسی اثرات و قابلیت‌های رایانش ابری در توسعه و بهینه‌سازی سیستم‌های مدیریت ساختمان در بنادر تدوین شده است. در ابتدا، سیر تحول تاریخی سامانه‌های BMS و چالش‌های ساختاری آن‌ها در محیط‌های سنتی تحلیل می‌شود. سپس با تبیین مفاهیم کلیدی معماری ابری و مرور نمونه‌های موفق در صنایع وابسته، مزایا، محدودیت‌ها و فرصت‌های این فناوری در پیاده‌سازی BMSهای نسل جدید در حوزه بندری بررسی خواهد شد. در پایان، راهکارهایی برای بهبود طراحی و توسعه آتی این سامانه‌ها در بستر رایانش ابری ارائه می‌شود.

پیشینه پژوهش

سیستم‌های مدیریت ساختمان (BMS) در مراحل ابتدایی توسعه خود، بر پایه زیرساخت‌های سنتی و غالباً ایزوله طراحی می‌شدند. در این سامانه‌ها، ارتباط بین زیرسیستم‌هایی چون تهویه مطبوع، روشنایی، امنیت و انرژی به‌صورت محدود، غیریکپارچه و عمدتاً دستی برقرار بود [۵, ۶]. این محدودیت‌ها عمدتاً ناشی از نبود استانداردهای ارتباطی جامع، توان پردازشی پایین و زیرساخت‌های سخت‌افزاری ناکافی بود.

پیشینه مفهومی رایانش ابری به دهه ۱۹۵۰ بازمی‌گردد، زمانی که کاربران داده‌های خود را از طریق ترمینال‌هایی متصل به رایانه‌های مرکزی پردازش می‌کردند. این شیوه پرهزینه و دشوار بود و تنها شرکت‌های بزرگ توان استفاده از آن را داشتند. در سال ۱۹۶۱، جان مک‌کارتی پیشنهاد کرد که محاسبات رایانه‌ای در آینده به‌صورت عمومی و مانند یک ابزار خدماتی عرضه شود [۶]. نخستین جرقه‌های اتوماسیون خانگی نیز به سال ۱۹۶۶ بازمی‌گردد، زمانی که سیستم ECHO IV توسط جیم ساترلند برای کنترل دما و تجهیزات خانگی توسعه یافت [۷]. با پیشرفت فناوری، به‌ویژه از سال ۱۹۹۸ به بعد، کاربرد این سیستم‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی رشد قابل توجهی یافت [۸].

مطالعات متعددی در حوزه یکپارچه‌سازی رایانش ابری و اینترنت اشیا با BMS انجام شده‌اند. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴، کاربرد فناوری‌های داده‌محور در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها بررسی و تأکید شد که ادغام داده‌های حسگری و سیستم‌های هوشمند می‌تواند منجر به کاهش مصرف و پایداری بیشتر عملیات ساختمان شود [۹].

در پژوهشی دیگر، باترا و همکاران پنج مولفه کلیدی برای بهره‌وری انرژی مبتنی بر داده را شناسایی کردند: ابزارسازی هوشمند، ارتباط بین زیرسیستم‌ها، تصمیم‌گیری استنباطی، تعامل کاربران و عملیات خودکار. آن‌ها بیان کردند که ترکیب این عوامل منجر به عملکرد هوشمند در سطوح عملیاتی می‌گردد [۱۰].

رحمانی و همکاران با طراحی یک معماری مبتنی بر رایانش ابری برای BMS، قابلیت‌های مقیاس‌پذیر و تطبیق‌پذیر این معماری را در کنترل مؤثر سیستم‌های ساختمانی نشان دادند [۱۱].

سالیخوف و همکاران با معرفی معماری مبتنی بر میکروسرویس‌ها برای BMS، توانایی این سیستم را در پردازش همزمان داده‌های حسگر و اجرای همزمان چند برنامه کاربردی در محیط‌های هوشمند ساختمان نشان دادند [۱۲].

سمبرویز و همکاران چارچوبی برای یک معماری نوین اینترنت اشیا ارائه کردند که تمرکز آن بر امنیت، ارتباطات و پردازش داده‌های در مقیاس ساختمانی بود [۱۳].

در پژوهشی دیگر، تامر و همکاران با استفاده از ترکیب سامانه‌های BMS، MAS[7] و EBMS[8]، بهینه‌سازی مصرف انرژی و پیش‌بینی قیمت برق را ممکن ساختند. آن‌ها با بهره‌گیری از یادگیری ماشین و نرم‌افزار متلب[9]،

1 Building Management System
2 Centralized Infrastructure
3 Distributed Computing
4 Edge computing
5 Fog computing
6 Cloud computing
7 Multi-Agent System
8 Enterprise Business Management System
9 MATLAB

چارچوبی برای بهبود کیفیت خدمات[1] (QoS) در محیط‌های IoT ارائه کردند [۱۴].

چاماری و همکاران به بررسی رویکردی مبتنی بر وب برای یکپارچه‌سازیBMS، BIM و IoT پرداختند. این مطالعه نشان داد که چگونه می‌توان از این فناوری‌ها در مدیریت دیجیتال ساختمان‌های صنعتی نظیر بنادر بهره گرفت [۱۵].

غباقلو در پژوهش خود تأثیر اینترنت اشیا بر تحول دیجیتال در مدل‌های کسب‌وکار را بررسی کرد و بیان داشت که این فناوری می‌تواند منجر به توسعه تصمیم‌گیری هوشمند مبتنی بر تحلیل داده‌های عملیاتی شود [۱۶].

اشرف و همکاران با تمرکز بر معماری نوین IoT در ساختمان‌های هوشمند که مسائل امنیت، پردازش داده و ارتباطات را بررسی می‌کند. این تحقیق چارچوبی برای کاربرد عملی سیستم‌های هوشمند در مقیاس ساختمان ارائه داده است [۱۷].

نوران و همکاران، چگونگی ترکیب پلتفرم های مختلف مانند اینترنت اشیا و نرم افزار های پیشرفته بیان کرده و راه حل های مدیریتی و تطبیقی کارآمدتری را ارائه داده‌اند. آنها همچنین برافزایش ادغام بین سیستم ها برای افزایش عملکرد ساختمان و بهره وری عملیاتی تاکید کرده‌اند [۱۸].

همچنین، در برخی پژوهش‌ها به بررسی تکامل سیستم‌های BMS در تعامل با فناوری‌های نوین پرداخته شده است. از جمله می‌توان به توسعه مدل‌های اطلاعاتی، ادغام فناوری‌های پیشرفته نرم‌افزاری [۱۹] و بهره‌گیری از معماری‌های نوین IoT برای اتوماسیون و مدیریت پیشرفته منابع در ساختمان‌ها [۱۳, ۲۰] اشاره کرد.

سیستم‌های سنتی و چالش‌های آن‌ها

در تأسیسات حساس و گسترده‌ای همچون ساختمان‌های عملیاتی بنادر، پایانه‌های کانتینری[2]، مراکز کنترل ترافیک دریایی[3] (VTS) و تأسیسات اقامتی در سکوهای فراساحلی، مدیریت متمرکز و کارآمد زیرساخت‌های مکانیکی، الکتریکی و ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم‌های مدیریت ساختمان در گذشته اغلب به‌شکل ایزوله و بر اساس معماری‌های متمرکز طراحی می‌شدند که در آن، هر زیرسیستم نظیر تهویه مطبوع، روشنایی، کنترل تردد، سامانه‌های حفاظتی و اطفاء حریق به‌صورت مستقل و بدون هماهنگی با سایر اجزا عمل می‌کرد.

در محیط‌های بندری و فراساحلی که اغلب در شرایط سخت اقلیمی و عملیاتی قرار دارند، کارآمدی و تاب‌آوری سامانه‌های مدیریتی حیاتی است. اما در ساختارهای سنتی، وابستگی به سخت‌افزارهای اختصاصی و مرکزیت داده‌ها موجب بروز چالش‌هایی جدی می‌شد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

یکپارچه نبودن سامانه‌ها: در تأسیسات بندری، نیاز به هماهنگی میان سامانه‌های تهویه انبارها، کنترل تردد کارکنان و امنیت سکوهای تخلیه‌بار بسیار بالاست. اما سیستم‌های سنتی فاقد زیرساخت لازم برای تجمیع داده‌ها و تصمیم‌گیری جامع در زمان واقعی بودند [۲۱].

محدودیت توان پردازشی در محیط‌های عملیاتی حساس: تجهیزات متمرکز در برابر داده‌های حجیم حاصل از حسگرها و کنترلرهای پخش‌شده در محیط‌های بندری کارایی لازم را نداشتند، و این مسئله در شرایط بحرانی می‌توانست منجر به تأخیر در پاسخ‌دهی و افزایش ریسک عملیاتی شود [۴].

عدم مقیاس‌پذیری و انعطاف در توسعه: در زیرساخت‌های بندری و فراساحلی که نیازمند توسعه‌پذیری مداوم و تطبیق با فناوری‌های نوین هستند، سامانه‌های قدیمی به دلیل ماهیت سخت‌افزارمحور و غیرماژولار خود، امکان پشتیبانی از تحولات آتی را نداشتند[۴].

علاوه بر این، در محیط‌های دریایی و مرطوب، چالش‌های نگهداری و تعمیر سخت‌افزارهای سنتی به دلیل خوردگی، نوسانات دمایی و شرایط نامساعد محیطی، افزایش هزینه‌های نگهداشت و کاهش پایداری سامانه‌ها را به همراه دارد. این شرایط لزوم بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته همچون اینترنت اشیا، رایانش ابری و معماری‌های محاسباتی توزیع‌شده[4] را برجسته می‌سازد. به‌کارگیری این فناوری‌ها امکان بهینه‌سازی فرآیند پایش، افزایش قابلیت مقیاس‌پذیری، بهبود انعطاف‌پذیری و مقاومت سیستم‌های مدیریت ساختمان را فراهم کرده و نقش مهمی در مدیریت کارآمد تأسیسات بندری و فراساحلی ایفا می‌کند.

ظهور فناوری اینترنت اشیا زمینه‌ای را فراهم آورد تا سیستم‌های BMS بتوانند از ارتباطات بی‌سیم و سنسورهای هوشمند بهره ببرند [۲۲]. ادغام IoT با سیستم‌های BMS منجر به شکل‌گیری سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند ساختمان[5] (BEMS) شد که قابلیت‌هایی نظیر مدیریت بهینه انرژی، کنترل از راه دور، و تحلیل رفتار مصرف‌کنندگان را فراهم می‌آورد [۲۱].

به طور کلی سیستم مدیریت هوشمند ساختمان شامل نرم افزار، سرور با پایگاه داده ،حسگر های هوشمند متصل به شبکه اینترنت هستند. این فناوری با فراهم آوردن زیرساخت‌های مقیاس‌پذیر، انعطاف‌پذیر و مبتنی بر اینترنت، راهکارهای متعددی برای بهبود عملکرد، کنترل و نظارت بر سامانه‌های مدیریتی ساختمان ارائه می‌دهد.

در همین راستا، فناوری‌های محاسبات لبه و محاسبات مه نقش مهمی در کاهش تاخیرهای ارتباطی و بهینه‌سازی انتقال داده‌های بزرگ ایفا می‌کنند. بهره‌گیری از این فناوری‌ها امکان پردازش داده‌ها در نزدیکی محل تولید و در دستگاه‌های توزیع‌شده را فراهم کرده است، که این امر موجب کاهش مصرف پهنای باند و افزایش سرعت پاسخگویی می‌شود [۴].

تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از معماری‌های ابری در مدیریت ساختمان، بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های نگهداری را به همراه دارد .نمونه‌های موفق شامل سیستم‌های مدیریت انرژی بیمارستانی [۲۳]، چارچوب‌های PaaS[6] برای ارائه خدمات IoT در مدیریت ساختمان [۵]، و مدل‌های مدیریت باتری‌های BMS به کمک رایانش ابری

[1] Quality of Service
[2] Container Terminals
[3] Vessel Traffic Services
[4] Distributed Architectures
[5] Building Energy Management System
[6] Platform as a Service

[۲۴] هستند. این فناوری‌ها قابلیت مقیاس‌پذیری، چندمستاجری و مدیریت هوشمند منابع را فراهم کرده‌اند و تأثیر قابل‌توجهی بر بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی داشته‌اند.

با گذر زمان، توجه بیشتری به معماری‌های مبتنی بر رایانش ابری برای تجمیع و پردازش داده‌ها از چندین دستگاه IoT معطوف شده است. این مدل‌ها با بهره‌گیری از منابع محاسباتی قدرتمند و مقیاس‌پذیر، امکان ارائه خدمات مبتنی بر داده‌های بلادرنگ و تحلیل‌های پیشرفته را فراهم می‌کنند [۵].

روش پژوهش

۱. رایانش ابری در سیستم‌های مدیریت ساختمان‌های بندری

معماری‌های نوین رایانش ابری در سامانه‌های مدیریت ساختمان، به‌ویژه در محیط‌های بندری و فراساحلی، راهکار مؤثری برای مقابله با پیچیدگی‌های عملیاتی، نیازهای بلادرنگ و الزامات امنیتی ارائه می‌دهند . شرایط اقلیمی و عملیاتی خاص تأسیسات ساحلی و دریایی، ساختارهای سنتی مدیریت ساختمان را با چالش‌هایی در زمینه پاسخ‌دهی سریع، مقیاس‌پذیری و سازگاری با محیط‌های توزیع‌شده مواجه کرده است .در مقابل، رویکرد چندلایه‌ی رایانش ابری که شامل سطوح لبه، مه و ابر است، امکان پردازش توزیع‌شده، واکنش سریع و تصمیم‌گیری هوشمند را در بسترهای بندری فراهم می‌کند.

۱-۱ معماری چندلایه: لبه، مه و ابر

در این معماری، سیستم BMS بر پایه یک چارچوب سه‌لایه طراحی شده که تفکیک وظایف پردازشی و مدیریت منابع را بهینه می‌سازد. این رویکرد شامل لایه لبه، مه و ابر است که هر یک نقش مشخصی در پردازش داده‌ها و تصمیم‌گیری ایفا می‌کنند.

لایه لبه به طور مستقیم به تجهیزات محلی و سنسورهای نصب‌شده در نقاط مختلف بندر، مانند ترمینال‌های بار، اسکله‌ها، سردخانه‌ها و ساختمان‌های عملیاتی متصل است. داده‌هایی نظیر دما، رطوبت، مصرف انرژی و هشدارهای ایمنی ابتدا در محل پردازش شده و تنها اطلاعات ضروری و فیلترشده به لایه‌های بالاتر ارسال می‌شود. این فرآیند باعث کاهش بار شبکه و کاهش تأخیر در تصمیم‌گیری می‌شود [۴].

لایه مه واسطی میان زیرسیستم‌های محلی و سامانه‌های مرکزی است. در محیط‌های بندری، این لایه اغلب در ساختمان‌های کنترلی یا مراکز داده محلی قرار دارد و وظایفی مانند ذخیره‌سازی موقت داده‌ها، هماهنگ‌سازی بین تجهیزات، پردازش‌های میان‌مرحله‌ای و تحلیل‌های اولیه مبتنی بر هوش مصنوعی را انجام می‌دهد [۴]. اهمیت این لایه به‌ویژه در محیط‌هایی با محدودیت ارتباطی با مرکز ابری، مانند سکوهای فراساحلی برجسته است.

در لایه ابر، داده‌های تجمیع‌شده از تأسیسات بندری یا دریایی در یک مرکز داده قدرتمند پردازش می‌شوند. رایانش ابری امکان اجرای تحلیل‌های پیچیده، پیش‌بینی وضعیت، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت پیشگیرانه نگهداری را فراهم می‌کند. این لایه نقش کلیدی در پایش جامع، گزارش‌دهی و تصمیم‌گیری در سطح کل بندر ایفا می‌کند [۵].

۲-۱ ویژگی‌های فنی معماری‌های ابری در محیط‌های دریایی

استفاده از معماری ابری در سامانه‌های BMS برای بنادر و تأسیسات فراساحلی، با قابلیت‌های فنی متعددی همراه است که آن را به یک راهکار راهبردی برای تحول دیجیتال این محیط‌ها تبدیل می‌کند.

- کاهش تاخیر در پردازش داده‌ها:

با توزیع بار محاسباتی میان لایه‌های لبه و مه، بسیاری از عملیات حیاتی مانند کنترل تهویه در سردخانه‌های بندری یا مدیریت ایمنی در انبارهای مواد خطرناک بدون نیاز به اتصال دائم با مرکز ابری انجام می‌شود [۴]. این ویژگی، به‌ویژه در شرایط بحرانی یا مناطق با ارتباط شبکه‌ای ناپایدار، مانند سکوهای فراساحلی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

- افزایش مقیاس‌پذیری و انعطاف‌پذیری سامانه

معماری ابری امکان گسترش تدریجی زیرساخت‌ها را بدون نیاز به تغییرات اساسی در ساختار فراهم می‌کند. با افزایش تجهیزات اینترنت اشیا، سامانه به‌طور پویا و خودکار توسعه می‌یابد. استفاده از پلتفرم‌هایی مانند PaaS به بهینه‌سازی منابع محاسباتی، حافظه و ابزارهای تحلیلی کمک می‌کند [۵].

- تقویت امنیت و یکپارچگی داده‌ها

در محیط‌هایی با تبادل گسترده داده‌ها، مانند پایانه‌های کانتینری یا مناطق ویژه اقتصادی، استفاده از پروتکل‌های سبک و ایمن مانند MQTT[1] در کنار رمزنگاری‌های پیشرفته، امنیت اطلاعات را تضمین می‌کند. همچنین، کنترل سطح دسترسی به منابع ابری از نفوذهای سایبری و تهدیدهای داخلی جلوگیری می‌کند [۴].

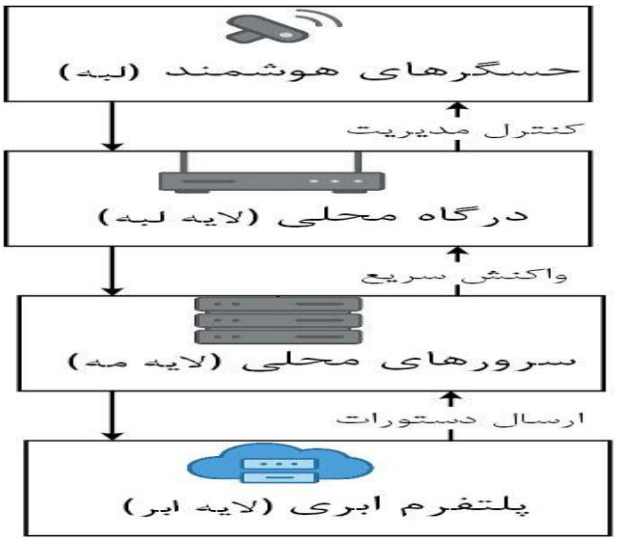
- تحلیل بلادرنگ و تصمیم‌گیری هوشمند

در لایه ابری، داده‌های دریافتی از سیستم‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌صورت بلادرنگ تحلیل شده و برای بهینه‌سازی تهویه، روشنایی و نگهداری پیشگیرانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بنادر بزرگ، این قابلیت موجب کاهش مصرف انرژی، جلوگیری از اختلالات عملیاتی و افزایش بهره‌وری کلی می‌شود [۲۵].

۳-۱ ساختار سیستم‌های ابری BMS

نمودار معماری چندلایه سیستم‌های BMS، در شکل ۱ ارائه شده است. این نمودار جریان داده‌ها را از حسگرهای هوشمند مستقر در لایه لبه تا انتقال داده به لایه‌های مه و ابر نشان می‌دهد. در این ساختار، ابتدا داده‌ها در لایه لبه تحت پردازش اولیه قرار می‌گیرند، سپس در لایه مه، تحلیل میان‌بازه انجام شده و در نهایت در لایه ابری پردازش‌های پیچیده و تصمیم‌گیری نهایی را بر عهده دارد [۴].

[1] Message Queuing Telemetry Transport



شکل۱: معماری چند لایه سیستم های BMS

۱-۴ مقایسه سیستم‌های سنتی و ابری در مدیریت ساختمان

جدول ۱ به‌طور خلاصه به مقایسه ویژگی‌های کلیدی میان سیستم‌های سنتی و مبتنی بر رایانش ابری در مدیریت ساختمان می‌پردازد. آن‌گونه که مشاهده می‌شود، معماری‌های ابری با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین همچون اینترنت اشیا، رایانش لبه، و خدمات ابری، موجب بهبود عملکرد، افزایش یکپارچگی، کاهش تأخیر، ارتقاء امنیت و تسهیل در مقیاس‌پذیری زیرسیستم‌ها می‌شوند. این مزیت‌ها به‌ویژه در تأسیسات ساحلی و فراساحلی نظیر اسکله‌ها، پایانه‌های کانتینری و سکوهای نفتی که نیازمند واکنش سریع، مدیریت بلادرنگ و انعطاف عملیاتی هستند، از اهمیت دوچندان برخوردارند.

۱-۵ مزایا و چالش‌های بهره‌گیری از رایانش ابری در سیستم‌های مدیریت ساختمان

رایانش ابری به عنوان یک فناوری نوین، امکانات گسترده‌ای برای بهینه‌سازی مدیریت ساختمان فراهم می‌کند. این فناوری با فراهم‌سازی بسترهایی برای پردازش توزیع‌شده، ذخیره‌سازی انعطاف‌پذیر و تحلیل بلادرنگ داده‌ها، نقش مهمی در بهبود عملکرد و بهره‌وری ساختمان‌های هوشمند ایفا می‌کند. با این حال، پیاده‌سازی مؤثر رایانش ابری در این حوزه، مستلزم در نظر گرفتن مجموعه‌ای از مزایا و چالش‌های فنی، امنیتی و سازمانی است. در ادامه، مهم‌ترین این موارد بررسی شده‌اند.

جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های کلیدی سیستم‌های سنتی و ابری BMS

ویژگی	سیستم های سنتی	سیستم‌های مبتنی بر رایانش ابری
یکپارچگی زیرسیستم‌ها	پیاده‌سازی مجزا و ناهماهنگ	یکپارچه‌سازی از طریق IoT و پروتکل‌های استاندارد [۲۱]
تاخیر در پردازش	بالا، به دلیل تمرکزگرایی پردازشی	پایین، با توزیع بار بین لایه‌های لبه و مه [۴]
مقیاس پذیری	محدود به زیرساخت فیزیکی و هزینه‌بر	توسعه‌پذیر و منعطف در بستر ابری [۵]
امنیت اطلاعات	آسیب‌پذیر در برابر حملات سایبری	استفاده از رمزنگاری و کنترل دسترسی پیشرفته [۴]
تحلیل بلادرنگ	ناکارآمد و محدود	تحلیل پیشرفته بلادرنگ با هوش مصنوعی [۲۵]

- مقیاس‌پذیری و انعطاف‌پذیری بالا

زیرساخت‌های ابری امکان افزودن تجهیزات جدید، حسگرها و سرویس‌ها را بدون ایجاد اختلال در عملکرد سیستم فراهم می‌کنند. این ویژگی برای پایانه‌های دریایی که به‌طور مداوم در حال توسعه و تغییر کاربری هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵].

- کاهش تاخیر و افزایش سرعت پاسخ‌دهی

توزیع وظایف پردازشی بین لایه‌های لبه و مه باعث واکنش سریع‌تر در برابر تغییرات محیطی و عملیاتی می‌شود. این مسئله به‌ویژه در سیستم‌های تهویه، روشنایی اضطراری و مدیریت دسترسی اهمیت دارد، زیرا پردازش‌های سریع و بهینه در این لایه‌ها می‌توانند کارایی سیستم را افزایش داده و تأخیرهای ارتباطی را کاهش دهند [۴].

- تحلیل بلادرنگ و تصمیم‌گیری هوشمند

بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در لایه ابری امکان تحلیل دقیق داده‌ها و پیش‌بینی وضعیت‌های آتی را فراهم می‌کند. این قابلیت در تأسیسات حساس دریایی از جمله زیرساخت‌های نفتی و ایستگاه‌های پایش کیفیت آب اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده می‌توانند ایمنی و عملکرد سیستم‌ها را بهبود بخشند [۲۵].

- مدیریت یکپارچه و کاهش هزینه‌های نگهداری

تمرکز داده‌ها در یک سکوی مرکزی ابری امکان پایش جامع، ارزیابی عملکرد و کاهش هزینه‌های نگهداری سیستم را فراهم می‌کند .این ساختار به سازمان‌ها اجازه می‌دهد تا مدیریت یکپارچه و بهینه‌ای بر منابع خود داشته باشند، در حالی که دسترسی سریع و تصمیم‌گیری دقیق‌تر را نیز تسهیل می‌کند [۲۱].

- ارتقای سطح امنیت و یکپارچگی اطلاعات

استفاده از پروتکل‌های امن ارتباطی (مانند MQTT)، الگوریتم‌های رمزنگاری و سامانه‌های کنترل دسترسی نقش بسزایی در حفاظت از داده‌ها در برابر تهدیدات سایبری ایفا می‌کند [۴].

۱-۶ چالش‌های موجود در پیاده‌سازی رایانش ابری در سیستم‌های BMS

با وجود مزایای فنی و عملیاتی فراوان، پیاده‌سازی سیستم‌های ابری در محیط‌های خاصی مانند بنادر و تأسیسات فراساحلی با چالش‌هایی نیز همراه است.

- ملاحظات امنیتی و حفاظت از داده‌ها

انتقال اطلاعات حساس نظیر داده‌های پایش زیست‌محیطی یا کنترل تجهیزات حیاتی به فضای ابری، مستلزم استفاده از مکانیزم‌های پیشرفته امنیت سایبری مانند فایروال‌های هوشمند، سامانه‌های تشخیص نفوذ[1] (IDS)، و الگوریتم‌های رمزنگاری پیشرفته است [۲۶].

- هزینه‌های پیاده‌سازی و زیرساخت اولیه

[1] Intrusion Detection System

انتقال از سیستم‌های سنتی به معماری‌های ابری ممکن است هزینه‌های اولیه بالا و زمان بر داشته باشد. ایجاد زیرساخت‌های مناسب و آموزش نیروهای فنی برای مدیریت سیستم‌های ابری از مهم‌ترین موانع در این مسیر به‌شمار می‌رود[۵].

- تضمین کیفیت خدمات[1] (QoS):

در محیط‌های ابری، تضمین سطح توافق‌شده‌ی خدمات، به‌ویژه در شرایط بار بالا یا نوسانات شبکه، نیازمند پیاده‌سازی سیاست‌های پیشرفته توزیع بار و مدیریت منابع است [۲۶].

- چالش‌های پذیرش فناوری در سازمان

تغییر نگرش سنتی نسبت به مدیریت ساختمان و پذیرش فناوری‌های نوظهور همچون رایانش ابری نیازمند فرهنگ‌سازی، آموزش و بازنگری در ساختارهای مدیریتی سازمانی است [۵].

جدول۲: مقایسه عملکرد و مصرف انرژی میان سیستم های سنتی و سیستم های ابری مدیریت ساختمان

معیار ارزیابی	سیستم‌های سنتی	سیستم‌های ابری
زمان پاسخ‌دهی	دارای تاخیر بالا به‌دلیل وابستگی به پردازش متمرکز	پاسخ‌دهی سریع با بهره‌گیری از پردازش بلادرنگ در لایه‌های لبه و مه [۴]
بهینگی مصرف انرژی	مصرف غیرهمگون و ناکارآمد انرژی	کاهش مصرف انرژی از طریق بهینه‌سازی فرآیندها و کنترل هوشمند منابع انرژی [۲۳]
کارایی سیستم	محدود به ظرفیت‌های ایستا و فناوری‌های قدیمی	کارایی بالا به‌واسطه مقیاس‌پذیری و استفاده از تحلیل‌های پیشرفته مبتنی بر داده [۵]
هزینه‌های عملیاتی	هزینه‌های بالای نگهداری، پشتیبانی و بروزرسانی سامانه	کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق مدیریت متمرکز، نگهداری آسان و پایش مستمر در بستر ابری [۵]

در مجموع، حرکت به‌سوی پیاده‌سازی BMS ابری در زیرساخت‌های بندری و فراساحلی، به‌رغم برخی چالش‌های فنی و اجرایی، یک مسیر نویدبخش برای ارتقای بهره‌وری، تاب‌آوری عملیاتی و هوشمندسازی مدیریت تأسیسات دریایی به‌شمار می‌رود.

۷-۱ مقایسه عملکرد و مصرف انرژی در سیستم‌های سنتی و ابری مدیریت ساختمان

در این بخش، عملکرد عملیاتی و الگوی مصرف انرژی در سیستم‌های مدیریت ساختمان سنتی در مقایسه با معماری‌های مبتنی بر رایانش ابری مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۲ به‌صورت خلاصه به مقایسه معیارهای کلیدی از جمله زمان پاسخ‌دهی، بهینگی مصرف انرژی، کارایی کلی سیستم و هزینه‌های عملیاتی بین این دو رویکرد می‌پردازد. بر اساس یافته‌های مطالعات اخیر، به‌کارگیری رایانش ابری در سامانه‌های BMS منجر به کاهش محسوس در زمان پاسخ‌گویی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، بهبود کارایی سامانه و کاهش هزینه‌های پشتیبانی می‌شود.

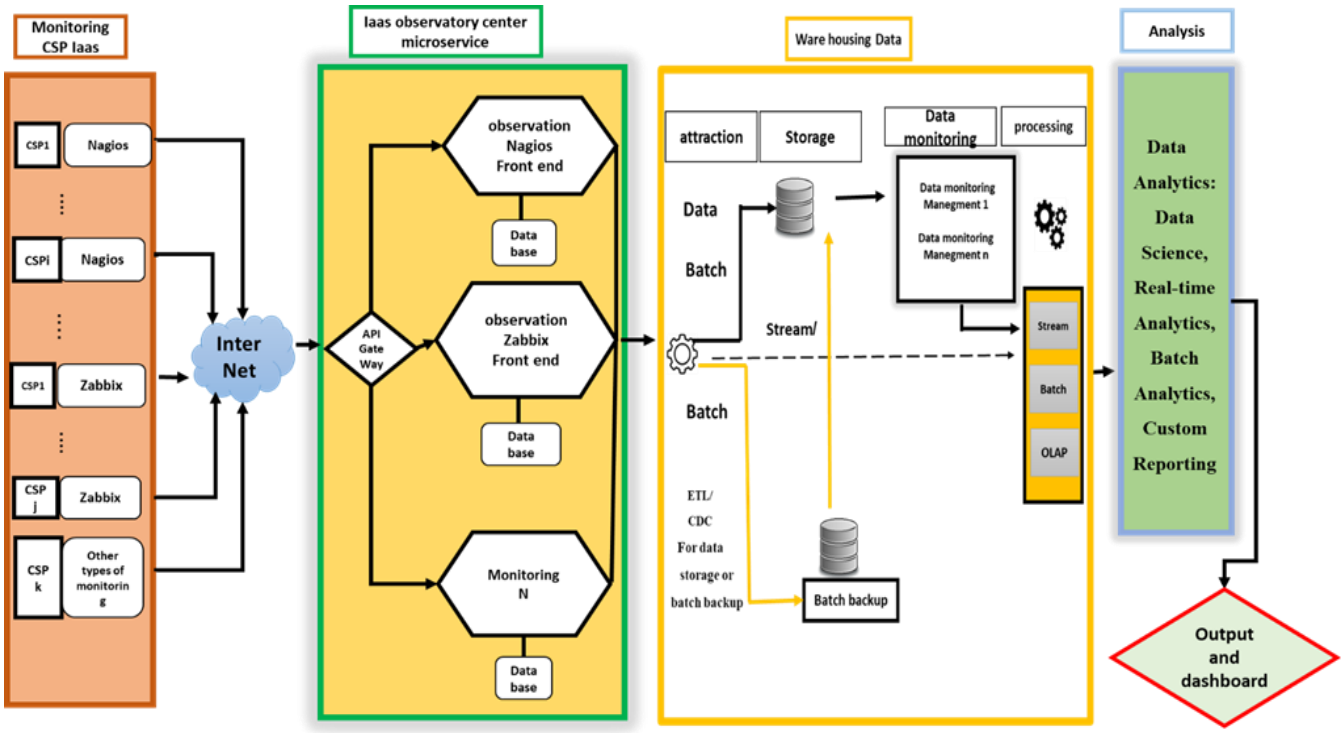
۲. روش پیشنهادی

با توجه به پیچیدگی‌های عملیاتی و نیاز روزافزون به مدیریت یکپارچه زیرساخت‌های بندری و فراساحلی، بهره‌گیری از معماری‌های مبتنی بر رایانش ابری، به‌ویژه در سطح زیرساخت به‌عنوان خدمت[2](IaaS) ، می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد و پایداری سیستم‌های مدیریت ساختمان باشد.

در محیط‌های فراساحلی که با محدودیت منابع، شرایط محیطی دشوار و الزامات امنیتی بالا مواجه هستند، سیستم‌های BMS باید انعطاف‌پذیر، مقیاس‌پذیر و قابلیت نظارت بلادرنگ داشته باشند. ازاین‌رو، معماری پیشنهادی در این پژوهش بر پایه میکروسرویس‌ها و ابزارهای تحلیل داده‌های بزرگ طراحی شده است تا ضمن کاهش پیچیدگی عملیاتی، سرعت پاسخ‌گویی بالاتر، دقت بیشتر در پایش تجهیزات و هشداردهی هوشمند را فراهم کند.

معماری ارائه‌شده با هدف پشتیبانی از نظارت بلادرنگ منابع ابری و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های BMS در بستر بنادر طراحی شده است. با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل دسته‌ای و جریانی[3]، این معماری توان پردازشی مناسبی را برای محیط‌های پرترافیک فراهم می‌آورد. در ادامه، اجزای مختلف این معماری تشریح شده و مزایا و برتری آن نسبت به ابزارهای رایج مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

[1] Quality Of Service
[2] Infrastructure as a Service
[3] Batch & Stream



شکل ۲: ساختار معماری پیشنهادی سرویس IaaS برای مدیریت سیستم‌های BMS در بنادر

۲-

۱ معماری پیشنهادی سرویس IaaS برای نظارت بر سیستم‌های مدیریت ساختمان

شکل ۲، معماری کلان پیشنهادی مبتنی بر مدل IaaS را برای نظارت بر سامانه‌های مدیریت ساختمان نمایش می‌دهد. در این ساختار، داده‌های مربوط به منابع پردازشی، ذخیره‌سازی و شبکه ارائه‌دهندگان خدمات ابری[1] (CSP)از طریق ابزارهای نظارتی همچون Nagios و Zabbix جمع‌آوری و به میکروسرویس‌های اختصاصی ارسال می‌شوند. هر میکروسرویس مسئول پایش و پردازش داده‌های مرتبط با یک CSP است و اطلاعات جمع‌آوری‌شده را در پایگاه داده محلی ذخیره می‌کند. این معماری امکان نظارت بلادرنگ، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و مدیریت کارآمد منابع ابری را فراهم می‌آورد.

در مرحله بعد، داده‌ها به‌صورت دسته‌ای[2] یا جریانی[3] به واحد انبارش داده‌ها منتقل می‌شوند .پس از آن، واحد پردازش و تحلیل داده‌ها با بررسی اطلاعات، نتایج را در قالب داشبورد مدیریتی به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. همچنین، یک ماژول هشداردهی به‌طور مستمر وضعیت داده‌ها را پایش کرده و در صورت بروز هرگونه اختلال یا انحراف از معیارهای تعیین‌شده، هشدارهای لازم را به مدیران سامانه ارسال می‌کند.

این معماری، با بهره‌گیری از پردازش‌های ترکیبی دسته‌ای و جریانی، امکان تحلیل داده‌های عظیم با کارایی بالا را فراهم می‌کند و در نتیجه، بار پردازشی کلی سیستم را کاهش می‌دهد.

یافته‌ها و پیشنهادها

۱. مزایای معماری پیشنهادی مبتنی بر میکروسرویس‌ها

معماری پیشنهادی مبتنی بر میکروسرویس‌ها از قابلیت مقیاس‌پذیری بالا برخوردار است و امکان نظارت و مدیریت همزمان بر تعداد زیادی از ساختمان‌های بندری را فراهم می‌سازد. در این معماری، هر میکروسرویس به‌طور مستقل وظیفه تحلیل و پایش داده‌های مرتبط با یک CSP را بر عهده دارد، که این ویژگی موجب افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود کارایی عملیاتی کل سامانه می‌شود. از دیگر مزایای کلیدی این معماری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نظارت بلادرنگ: ارسال فوری داده‌ها به پایگاه داده و تحلیل آنی شاخص‌های عملکردی
- دقت بالا در تحلیل لاگ‌ها: تحلیل دقیق لاگ فایل‌ها و تشخیص سریع رویدادهای غیرعادی
- پشتیبانی از بار ورودی بالا: توانایی جمع‌آوری و پردازش حجم زیادی از داده‌ها در زمان واقعی
- نمایش گرافیکی داشبورد مدیریتی: ارائه‌ی خروجی‌های به‌روز و دقیق به مدیران سیستم

[1] Cloud Service Provider
[2] Batch
[3] Stream

- هشدارهای خودکار: ارسال هشدارهای فوری در صورت عبور شاخص‌ها از آستانه‌های تعیین‌شده
- تحلیل جامع عملکرد: پشتیبانی از یکپارچه‌سازی داده‌های نظارتی و تحلیل آن‌ها در واحدOLAP

۲. مقایسه معماری پیشنهادی با ابزارهای نظارتی متداول در BMS بنادر

جدول ۳ مقایسه‌ای بین ویژگی‌های کلیدی معماری پیشنهادی و برخی از ابزارهای نظارتی رایج، از جمله Zabbix، Nagios، Ganglia و ManageEngine ارائه می‌دهد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که معماری پیشنهادی، در مقایسه با ابزارهای متداول، از مزایای قابل توجهی برخوردار است؛ این مزایا شامل مقیاس‌پذیری بالا، پردازش موازی، پشتیبانی از چندین ارائه‌دهنده خدمات ابری و سیستم هشداردهی هوشمند است، که همگی به بهبود عملکرد و کارایی نظارت بر زیرساخت‌های فناوری اطلاعات کمک می‌کنند.

جدول ۳: مقایسه معماری پیشنهادی با ابزارهای نظارتی رایج در سیستم‌های مدیریت ساختمان بندری

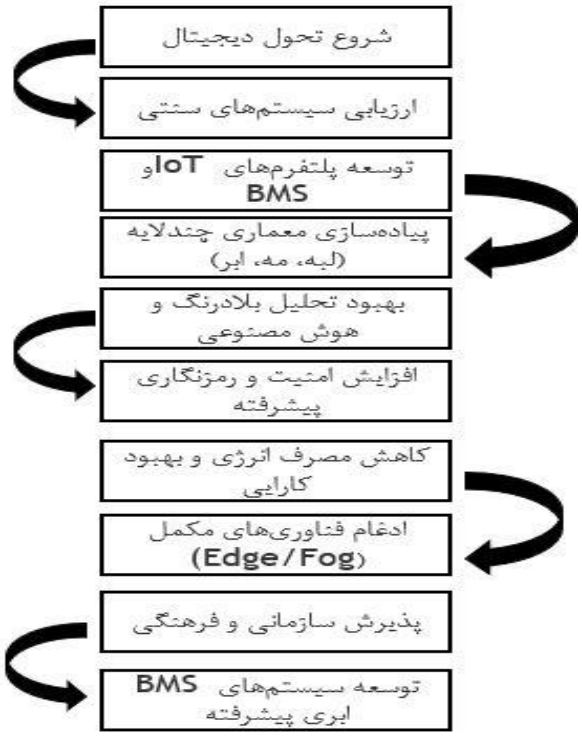
ویژگی‌ها	Zabbix	Nagios	Ganglia	Manage Engine	پیشنهادی
نظارت بلادرنگ	بله	بله	بله	بله	بله
مقیاس‌پذیری بالا	متوسط	متوسط	متوسط	بله	بله
هشدارهای خودکار	بله	بله	خیر	بله	بله
پردازش موازی	خیر	خیر	خیر	خیر	بله
پشتیبانی از چندین CSP	خیر	خیر	خیر	خیر	بله

۳. پیشنهادهایی برای ارتقای سامانه‌های BMS ابری در آینده

شکل ۳ روند تکامل سیستم‌های مدیریت ساختمان ابری را در بستر تحول دیجیتال به تصویر می‌کشد. این نمودار با تمرکز بر مراحل پیاده‌سازی و توسعه فناوری، نشان می‌دهد که فرآیند ارتقای سیستم‌های BMS از ارزیابی سیستم‌های سنتی آغاز شده و تا دستیابی به ساختارهای ابری پیشرفته ادامه می‌یابد.

در این مسیر، ابتدا با توسعه زیرساخت‌های IoT و طراحی معماری‌های چندلایه (شامل رایانش لبه، مه و ابر)، بستر لازم برای جمع‌آوری و پردازش بلادرنگ داده‌ها فراهم می‌شود. سپس، به‌کارگیری تحلیل‌های پیشرفته و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، موجب افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری خودکار خواهد شد. همچنین، با تقویت لایه‌های امنیتی از طریق رمزنگاری پیشرفته و مدیریت ریسک، قابلیت اطمینان سیستم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی عملکرد و ادغام فناوری‌های مکمل مانند رایانش لبه و مه، از دیگر گام‌های مهم در مسیر بلوغ این سامانه‌ها هستند. در نهایت، پذیرش سازمانی و فرهنگی این تحولات، زمینه‌ساز توسعه جامع و پایدار سیستم‌های BMS ابری خواهد بود که به عنوان نقطه اوج این روند در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: روند ارتقا سیستم های BMS ابری

با توجه به روند رو به رشد دیجیتال‌سازی در زیرساخت‌های بندری و نیاز روزافزون به سیستم‌های هوشمند، پایدار و تاب‌آور، توسعه سامانه‌های مدیریت ساختمان مبتنی بر رایانش ابری باید در چارچوبی راهبردی، واقع‌بینانه و منطبق با ظرفیت‌ها و محدودیت‌های فنی و محیطی دنبال شود. در این راستا، پیشنهادهای زیر به‌منظور ارتقای آتی این سامانه‌ها ارائه می‌گردد:

- تقویت امنیت داده‌ها و تاب‌آوری سایبری:

با افزایش اتصال‌پذیری تجهیزات و انتقال داده‌ها به بسترهای ابری، حفاظت اطلاعات حیاتی در برابر تهدیدات سایبری اهمیت مضاعفی می‌یابد. پیشنهاد می‌شود طراحی BMS های آتی با استفاده از رمزنگاری چندلایه، سامانه‌های تشخیص نفوذ، و پروتکل‌های سبک و امن نظیر MQTT با احراز هویت پیشرفته انجام گیرد. همچنین تاب‌آوری سایبری سیستم باید با بهره‌گیری از اصول امنیت در طراحی ضمین شود.

- توسعه هوش مصنوعی بومی:

استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، به‌ویژه در قالب مدل‌های بومی‌شده برای محیط‌های بندری، می‌تواند در پیش‌بینی بار مصرف انرژی، تشخیص رفتارهای غیرعادی و مدیریت بهینه منابع نقش حیاتی ایفا کند. تمرکز بر توسعه مدل‌های یادگیرنده با قابلیت تطبیق‌پذیری با محیط‌های مرطوب، ناپایدار یا پراکندگی بالا پیشنهاد می‌شود.

- بهبود قابلیت همکاری میان‌سازمانی و بین‌فناوری

پایداری و مقیاس‌پذیری سیستم‌های BMS آتی نیازمند همکاری مؤثر میان نهادهای بندری، شرکت‌های فناوری و نهادهای تنظیم‌گر استاندارد است. پیشنهاد می‌شود چارچوب‌های استاندارد باز برای تبادل داده، تعامل‌پذیری میان پلتفرم‌ها و توسعهAPI های میان‌افزار (Middleware) در اولویت قرار گیرد.

- ترکیب کارآمد رایانش لبه، مه و ابر

برای بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش تأخیر در پاسخ‌گویی، طراحی معماری‌های ترکیبی که از توان پردازشی لبه برای عملیات بلادرنگ، مه برای پردازش میانی، و ابر برای تحلیل‌های سنگین بهره بگیرند، توصیه می‌شود. این ترکیب موجب تعادل میان سرعت، هزینه و دقت تحلیل خواهد شد.

- یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوظهور

در چشم‌انداز میان‌مدت، تلفیق BMS با فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین برای ثبت غیرقابل‌تغییر داده‌ها، مدل‌های دوقلوی دیجیتال[1] برای شبیه‌سازی رفتار ساختمان، و پردازش کوانتومی برای تحلیل سریع داده‌های پیچیده، می‌تواند مسیر آینده را ترسیم کند. به‌کارگیری آزمایشی این فناوری‌ها در پروژه‌های پایلوت بندری پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نقش رایانش ابری در تحول و بهینه‌سازی سیستم‌های مدیریت ساختمان در بنادر بررسی و تحلیل شد. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که معماری‌های سنتی BMS، به‌ویژه در محیط‌های عملیاتی پیچیده و بحرانی نظیر بنادر، قادر به پاسخ‌گویی مؤثر به نیازهای نوین نظارت، کنترل، امنیت و بهره‌وری انرژی نیستند. در پاسخ به این کاستی‌ها، رایانش ابری با ارائه زیرساختی منعطف، مقیاس‌پذیر و قابل توسعه، بستر مناسبی برای بازمهندسی و هوشمندسازی سیستم‌های مدیریت ساختمان فراهم می‌سازد.

مدل پیشنهادی در این مقاله، مبتنی بر معماری چندلایه (لبه، مه، ابر) و چارچوب میکروسرویس‌های مستقل، امکان تحلیل بلادرنگ داده‌ها، هشداردهی هوشمند، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی را فراهم می‌نماید. همچنین، مقایسه عملکرد معماری پیشنهادی با ابزارهای رایج نظارتی نظیر Zabbix و Nagios نشان داد که این مدل در حوزه‌هایی مانند پردازش موازی، پشتیبانی از چندین ارائه‌دهنده خدمات ابری و مدیریت بلادرنگ عملکرد منابع، برتری چشم‌گیری دارد.

مسیر آینده توسعه سیستم‌های BMS در بنادر مستلزم تقویت امنیت داده‌ها، بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیش‌بینی و یادگیری ماشین، استانداردسازی زیرساخت‌های ارتباطی و ترکیب هوشمندانه فناوری‌های مکمل نظیر رایانش لبه و مه خواهد بود. پیاده‌سازی این راهکارها می‌تواند به شکل‌گیری نسل جدیدی از زیرساخت‌های هوشمند بندری منجر شده و نقش مهمی در پایداری، تاب‌آوری و بهره‌وری تأسیسات فراساحلی ایفا کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

[1] A. K. Kalyanam, "Building Management System (BMS) an In-Depth Overview (Understanding BMS, Its Operation, Necessity, and the Role of IoT)," *IJAIDR-Journal of Advances in Developmental Research*, vol. 12, no. 1, 2021.

[2] M. Borhani Afoosi and M. Zoghi" ,Wi-Fi-based indoor positioning system for energy management in smart buildings. ," 2019 (In Persian).

[3] W. He *et al.*, "Accelerating efficient installation and optimization of battery energy storage system operations onboard vessels," *Energies*, vol. 15 ,no. 13, p. 4908, 2022.

[4] F.-J. Ferrández-Pastor, H. Mora, A. Jimeno-Morenilla, and B. Volckaert, "Deployment of IoT edge and fog computing technologies to develop smart building services," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 3832, 2018.

[5] F. Li, M .Vögler, M. Claeßens, and S. Dustdar, "Efficient and scalable IoT service delivery on cloud," in *2013 IEEE sixth international conference on cloud computing*, 2013: IEEE, pp. 740-747 .

[6] A. Oludele, E. C. Ogu, K. Shade, and U. Chinecherem, "On the evolution of virtualization and cloud computing: A review," *Journal of Computer Sciences and Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 40-43, 2014.

[7] S. Tristan, S. Sharma, and R. Gonzalez, "Alexa/google home forensics," *Digital Forensic Education: An Experiential Learning Approach*, pp. 101-121, 2020.

[8] G. M. Toschi, L. B. Campos, and C. E. Cugnasca, "Home automation networks: A survey," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 50, pp. 42-54, 2017.

[9] A. De Paola, M. Ortolani, G. Lo Re, G. Anastasi, and S. K. Das, "Intelligent management systems for energy efficiency in buildings: A survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 47, no. 1, pp. 1-38, 2014.

[10] N. Batra, A. Singh, P. Singh, H. Dutta, V. Sarangan, and M. Srivastava, "Data driven energy efficiency in buildings," *arXiv preprint arXiv:1404.7227*, 2014.

[11] A.-M. Rahmani *et al.*, "Smart e-health gateway: Bringing intelligence to internet-of-things based ubiquitous healthcare

[1] Digital Twin

(BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends," *Automation in construction*, vol ,۱۰۱ .pp. 127-139, 2019.

[20] I. Aimé, F. Berger-Remy, and M.-E. Laporte, "Lessons from nearly a century of the brand management system," *Journal of Historical Research in Marketing*, vol. 10, no. 4, pp. 420-450, 2018.

[21] A. Rezaei and B. Moradi, "Optimization of electrical energy consumption based on behavioral patterns of residents in a smart home using a data mining algorithm using a smart grid system and renewable energy sources," *Computational Intelligence in Electrical Engineering (Persian)*, vol ,۱۲ .no. 2, pp. 1-14, 2021 (In Persian).

[22] O. Eseosa and F. Temitope, "Review of smart based building management system," *World J Innov Res*, vol. 7, no. 2, pp. 14-23, 2019.

[23] H. Rashidi Aghdam, L. Yarmohammadi, and S. H. Malakooti, "Investigating different methods of smart hospital control to optimize energy consumption," *Building Engineering and Housing Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 57-63, 2017 (In Persian).

[24] F. Naseri, Z. Kazemi, P. G. Larsen, M. M. Arefi, and E. Schaltz, "Cyber-physical cloud battery management systems: Review of security aspects," *Batteries*, vol. 9, no. 7, p. 382, 2023.

[25] A. H. A. Al-Jumaili, R. C. Muniyandi, M. K. Hasan, J. K. S. Paw, and M. J. Singh, "Big data analytics using cloud computing based frameworks for power management systems: Status, constraints, and future recommendations," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 2952, 2023.

[26] L. Wang, J. Zhan, W. Shi, and Y. Liang, "In cloud, can scientific communities benefit from the economies of scale," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 296-303, 2011.

systems," in *2015 12th annual IEEE consumer communications and networking conference (CCNC)*, 2015: IEEE, pp. 826-834 .

[12] K. Khanda, D. Salikhov, K. Gusmanov, M. Mazzara, and N. Mavridis, "Microservice-based iot for smart buildings," in *2017 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)* :۲۰۱۷ , IEEE, pp. 302-308 .

[13] D. Sembroiz, S. Ricciardi, and D. Careglio, "A novel cloud-based IoT architecture for smart building automation," in *Security and resilience in intelligent data-centric systems and communication networks*: Elsevier, 2018, pp. 215-233.

[14] U. Tomer and P. Gandhi, "IoT Framework for Quality-of-Service Enhancement in Building Management System," in *International Conference on Innovations in Data Analytics*, 2022: Springer, pp. 431-437 .

[15] L. Chamari, E. Petrova, and P. Pauwels, "A web-based approach to BMS, BIM and IoT integration: a case study," in *14th REHVA HVAC World Congress, CLIMA 2022*, 2022 .

[16] M. Ghobakhloo, "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0 Journal of Manufacturing Technology Management. 29 (6). 910936. doi: 10.1108," JMTM-02-2018-0057, 2018 .

[17] M. K. Ashraf, I. Adly, and K. A. Shehata, "IoT-BASED SMART BUILDING MANAGEMENT SYSTEM," *The International Conference on Electrical Engineering*, vol. 11, no. 11th International Conference on Electrical Engineering ICEENG 2018, pp. 1-15, 2018, doi: 10.21608/iceeng.2018.30149.

[18] O. Noran, I. Sota, and P. Bernus, "Towards next generation building management systems," in *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 111: EDP Sciences, p .۰۵۰۰٤ .

[19] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, "A review of building information modeling

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Akbari, S., MSc., Department of Telecommunication and Electronic Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

✉ *shadi.akbari2826@gmail.com* ---

Monajati, M. Assistant Professor, Department of Telecommunication and Electronic Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

✉ **M.monajati@khut.ac.ir** 0000-0001-9611-7534

HOW TO CITE THIS ARTICLE

http://doi.org/10.52547/joc.16.61.9

http://joc.inio.ac.ir/article-1-1864-fa.html

https://orcid.org/0000-0001-9611-7534

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.