



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Cognitive foundations of structural health monitoring Rereading Capabilities for environmental hazard conditions

Mohammadbagher Kabirsaber 

Faculty of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Iran. Email: kabirsaber@ut.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Article Article History: Received: 29 April 2025 Revised: 30 May 2025 Accepted: 10 June 2025 Published: 17 June 2025 Keywords: Environmental hazard, Reliability, Structural health monitoring, Structural safety.	System health management and its sub-discipline, building health monitoring, are efficient engineering concepts that focus on monitoring and evaluating structural systems to optimize their behavior in both normal conditions and environmental hazard events. Monitoring the health of structures and infrastructure is a requirement for the management of progressive societies, as life in these societies depends on advanced structural systems that have been in place for a long time since their design. Since it is not economically feasible to replace these systems with new ones, Effective strategies are developed that facilitate the detection of structural weaknesses and then programming to improve them. The structural health monitoring method is one of the most effective approaches in this field. The importance of this engineering approach is especially important for countries that are at risk of actual and potential natural hazards. Therefore, it is important to conduct targeted research to introduce the principles and concepts of this engineering discipline. Method: This research is qualitative, and in conducting it, the causal method has been adopted to survey the relationships and causes between building health management and the quality of its technical performance. Results: The article begins with an analytical discussion of basic concepts and definitions, aiming to establish a common language for disseminating the subject to the country's scientific and engineering discourses. It also discusses the factors that determine the optimal strategy for applying these concepts, explaining the principle that the building health approach is based on the use of developed techniques for comprehensive structural monitoring and assessment of buildings. In other words, building health management is a set of engineering processes and technologies to improve the safety and reliability of building systems. This article also discusses the point that building health engineering is an efficient method for continuous monitoring of structures and infrastructures that allows for early detection of damage and timely repair and replacement of defective components at the lowest cost. Building health engineering is effective in saving money, time, and improving safety. In addition to these aspects, it leads to increased knowledge about the safety status of buildings, which is an effective factor in improving structural standards as well as the safe design of structures in the future. Conclusions: Structural health monitoring is a management method based on technologies and engineering processes to continuously monitor building systems to improve their safety and reliability. This engineering approach focuses on evaluating the health of structural systems to optimize their behavior both under normal conditions and under environmental hazards. This engineering method is interdisciplinary and is the result of the integration of science and technology, so it is essential to hold discussions in which experts in related fields can express their experiences on the latest scientific and technological achievements. The success of experts in this field is in updating their knowledge by knowing the latest scientific findings related to basic and applied issues in this field.

Cite this article: Kabirsaber, M. (2025). Cognitive foundations of structural health monitoring; Rereading Capabilities for environmental hazard conditions. *Environmental Hazards Management*, 12 (1), 19-34. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.394340.878>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.394340.878>

Introduction

Structural health monitoring is an interdisciplinary approach to monitoring, evaluating, and managing building systems to optimize their behavior in two situations: normal conditions and the occurrence of environmental hazards. For about four decades, this method has been used in the discourse of building engineering, and its effectiveness in preserving and improving the quality of structures is explicit. Therefore, addressing this issue is important for countries that are exposed to actual and potential risks of various natural hazards. Conducting purposeful research is important to introduce the principles and concepts of this engineering discipline. This article is based on research that surveyed the philosophy of building systems health, in which the foundations of this engineering approach are analyzed. The main objective of the article is to explain the principles and concepts of building health engineering discourse, and the secondary objective is to explain the practical relationship between the teachings of this engineering method and the knowledge of environmental risk management. The questions that the research has been formulated in response to are: a) What components does the nature of building health engineering result from? b) What mechanisms does the method of operation of this engineering thought rely on? c) What is the relationship between building health engineering and system health management? d) Under what conditions are building health engineering services effective?

Method

The research from which this article is derived is qualitative research, and in conducting it, the causal method has been adopted in order to survey the relationships and causes between building health management and the quality of its technical performance.

Results

In this article, a systematic range of topics related to structural health monitoring is compiled for discussion. It is obvious that in practice, creating a balance in this range of topics in a logical and complete manner is a difficult and challenging task. However, the result of the discussion is presented in a way that is understandable to professionals working in implementation. System health management, as a scientific thought and discipline, focuses on planning to improve the quality of structural system management, operational management, life cycle management of the building system and its other subsystems, to maintain the nominal behavior and performance of the system and also ensure the safety and effectiveness of the mission in non-nominal conditions. The building health monitoring approach has both effective technical and managerial capabilities that can provide the necessary preparations for both normal conditions and natural hazard conditions for the building and its operators. Monitoring building health and detecting damage at its earliest stages plays a key role in preventing damage from growing and spreading. Early detection of potential and actual disturbances in building systems is vital for the safety of the building and the users and resources that are located in it. It also reduces the occurrence of more severe damage in cases of natural hazards that apply unwanted loads to the building. In the engineering method discussed, executive actions depend on technical equipment and tools, as well as network and computer systems, and there is a direct relationship between the accuracy of process results and the accuracy of the tools. One of the achievements of the research is the investigation of an argument about the nature of building health engineering, which results from its interdisciplinary approach. The scientific discipline of this specialty is the result of the cooperation and synergy of different but related scientific aspects, and therefore, it has a distinctive efficiency that other specialties do not have independently. For this reason, in evaluating building health and the effectiveness of its processes, understanding the type and extent of technical interactions between building engineering and other sciences is crucial.

Conclusion

Structural health management is a category of technologies and processes that work together to improve the safety and reliability of building systems. The main role of this engineering method is to focus on monitoring and evaluating structural systems to optimize their behavior both in normal conditions and in environmental hazard events. It is obvious that the success of professionals in this field is in updating their knowledge by studying the latest scientific findings related to the basic and applied issues of this field. Since this specialized field is interdisciplinary and its scientific discipline is

the result of the integration of sciences, it is essential to hold discussions in which different experts can express their experiences and opinions on the latest scientific and technological achievements.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest. Declare conflicts of interest or state “The authors declare no conflict of interest.” Authors must identify and declare any personal circumstances or interest that may be perceived as inappropriately influencing the representation or interpretation of reported research results.

References

1. Der Kiureghian, A. (2022). *Structural and System Reliability*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108991889>.
2. Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. John Wiley & Sons.
3. Johnson, S. B. (2014). *System health management. Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications*, 131-143.
4. Limongelli, M. P., & Çelebi, M. (Eds.). (2019). *Seismic structural health monitoring: from theory to successful applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6>
5. Moghimi, E. (2022). Hazards science strategy Does Hazards science have a strategy? *Environmental Management Hazards*, 9(1), 45-54. doi: 10.22059/jhsci.2022.345598.730 (in Persian).



مبانی معرفتی مهندسی پایش سلامت سازه‌ها بازخوانی قابلیت‌ها برای شرایط مخاطرات محیطی

محمدباقر کبیرصابر

دانشکده معماری، دانشکده‌های هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: kabirsaber@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

کلیدواژه:

ایمنی ساختاری،
پایش سلامت سازه،
قابلیت اطمینان،
مخاطرات محیطی.

نوشتار حاضر، حاصل پژوهشی در خصوص پایش سلامت سیستم‌های ساختمانی است که در آن به تحلیل مبانی معرفتی این روش مهندسی پرداخته شده است. پایش سلامت سازه، روشی کارآمد برای نظارت، ارزیابی و مدیریت سیستم‌های ساختمانی، به‌منظور بهینه کردن رفتار آنها در وضعیت عادی و همچنین در شرایط مخاطرات محیطی است. حدود دو دهه است که در جوامع صنعتی، این رویکرد در گفتمان مهندسی ساختمان تعمیم یافته، نتایج مؤثر آن در حفظ و بهبود سرمایه‌های کالبدی عیان شده و اینک به روشی موجه تبدیل شده است. با این حال، این موضوع در ایران که کشوری در معرض کنش‌های بالقوه و بالقوه انواع مخاطره طبیعی است، چندان رواج نیافته است. از این گذشته، در بدنه مهندسی کشور، خلأهای دانشی زیادی در این زمینه وجود دارد. پرسش‌هایی که پژوهش، در پاسخ به آنها تدوین یافته، عبارت‌اند از (الف) ماهیت مهندسی سلامت سازه منتج از چه مؤلفه‌هایی است؟ (ب) شیوه عمل این تفکر مهندسی، مبتنی بر چه سازوکارهایی است؟ (ج) چه نسبتی میان مهندسی سلامت سازه و مدیریت سلامت سیستم وجود دارد؟ (د) تمهیدات مهندسی سلامت سازه در چه شرایطی اثربخش‌تر است؟

اهداف: هدف اصلی پژوهش، تبیین اصول و مفاهیم روش مهندسی پایش سلامت ساختمان و هدف فرعی، تبیین ارتباط کاربردی آموزه‌های آن با دانش مدیریت مخاطرات محیطی است.

روش پژوهش: این مطالعه از نوع پژوهش‌های کیفی است و در اجرای آن، به دلیل بررسی روابط علت و معلولی بین مدیریت سلامت سازه‌ها و کیفیت عملکرد فنی آن، از روش علی بهره گرفته شده است.

یافته‌ها: پژوهش ناظر به بررسی بنیان‌های نظری موضوع است تا امکان ایجاد زبان مشترک برای تسری این رویکرد به گفتمان‌های علمی و اجرایی کشور فراهم آید. از این رو دستاوردهای پژوهش معطوف به تبیین مؤلفه‌هایی است که راهبرد بهینه برای کاربست مفاهیم مذکور را تعیین می‌کند.

نتیجه‌گیری: روش مهندسی پایش سلامت سازه، از دو قابلیت فنی و مدیریتی در تقلیل خسارات و تلفات برخوردار است که می‌تواند اقدامات لازم برای شرایط عادی را انجام دهد و همچنین شرایط مخاطرات طبیعی برای ساختمان‌ها و بهره‌برداران آنها را فراهم آورد. این فرایند نظارتی، موجب تشخیص عوامل مخل در بدو ظهور می‌شود و اثر مهمی در پیشگیری از رشد و تسری آسیب‌ها دارد. تشخیص به موقع اختلالات بالقوه و بالفعل سیستم‌های ساختمانی، امری حیاتی برای ایمنی ساختمان، کاربران و منابع مستقر در آن است و هنگام وقوع مخاطرات طبیعی بارهای ناخواسته به ساختمان وارد می‌شود، از خسارات سنگین‌تر می‌کاهد.

استناد: کبیرصابر، محمدباقر (۱۴۰۳). مبانی معرفتی مهندسی پایش سلامت سازه‌ها؛ بازخوانی قابلیت‌ها برای شرایط مخاطرات محیطی. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲، (۱)، ۳۴-۱۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.394340.878>

© نویسندگان
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.394340.878>



مقدمه

نظارت اصولی بر ساختارهای مهندسی، از ضروریات هر جامعه پیشرفته است؛ زیرا زندگی در این جوامع، وابستگی عمیق به سیستم‌های سازه‌ای جدید همچون فرودگاه‌ها، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، ساختمان‌ها و پل‌ها دارد که اغلب زمان زیادی را از زمان طراحی اولیه سپری کرده‌اند و در حال نزدیک شدن به پایان عمر خود هستند. از آنجا که این سیستم‌ها را به لحاظ اقتصادی نمی‌توان به آسانی با سیستم‌های جدید جایگزین کرد، سعی می‌شود با اتکا بر فناوری‌های نوین، برنامه‌های کارآمدی برای تشخیص و رفع ضعف‌های ساختاری آنها تدبیر و تمهید شود تا عمرشان افزایش یابد و بهره‌برداران بتوانند با اطمینان از آنها استفاده کنند.

رویکرد مدیریت سلامت سیستم^۱ و زیرشاخه^۲ آن، مهندسی سلامت سازه^۳ نوعی شیوه فنی مبتنی بر پایش و ارزیابی سیستم‌های ساختمانی، با هدف بهینه کردن رفتار آنها در «حالت عادی» و همچنین شرایط «رخداد مخاطرات محیطی» است. به دلیل نتایج سودمند این روش مهندسی که با مرور تجارب، بیشتر نیز عیان می‌شود، اقبال فزاینده به آن در جوامع صنعتی مشهود است (Johnson, 2015). با افزایش شمار ساختمان‌های دارای طراحی‌های پیچیده و ساختارهای بزرگ، نیاز به سیستم‌های نظارتی کاراتر هم بیشتر می‌شود و در نتیجه باید روش‌های سلامت سازه نیز به‌روز شوند و ارتقا یابند.

بر این اساس، پژوهشی با رویکرد ماهیت‌شناسی مهندسی سلامت سیستم‌های سازه‌ای انجام گرفت که نوشتار حاضر، مستخرج از آن است. در شروع پژوهش، برخی خلأهای دانشی، در بدنه مهندسی کشور خودنمایی کرد که علت آن، رواج‌نیافتگی موضوع مذکور در گفتمان مهندسی در ایران است؛ این خلأ نسبی، با بررسی منابع فارسی قابل فهم است. بر این اساس، جهت‌گیری نوشتار حاضر، تحلیل مبانی معرفتی مهندسی سلامت سازه و به تبع آن، هدف اصلی نوشتار، تبیین اصول و مفاهیم این گفتمان مهندسی است. هدف فرعی نیز، تبیین ارتباط کاربردی آموزه‌های این رویکرد مهندسی با دانش مدیریت مخاطرات محیطی است. پژوهش در پاسخ به این پرسش‌ها شکل گرفته است: الف) ماهیت مهندسی سلامت سازه منتج از چه مؤلفه‌هایی است؟ ب) شیوه عمل این تفکر مهندسی، مبتنی بر چه سازوکارهایی است؟ ج) چه نسبتی میان مهندسی سلامت سازه و مدیریت سلامت سیستم وجود دارد؟ د) تمهیدات مهندسی سلامت سازه در چه شرایطی اثربخش‌تر است؟ ضرورت اجرای پژوهش ناظر به خلأهای معرفتی است که در خصوص این موضوع در ایران وجود دارد؛ کشوری که در معرض کنش‌های بالفعل و بالقوه انواع مخاطره طبیعی است. با این حال، مهندسی سلامت سازه، توانمندی مؤثر در مدیریت بهینه ساختارهای مهندسی در مواجهه با مخاطرات احتمالی است، هرچند که در جامعه ما کمتر شناخته شده است.

این نوشتار با بررسی تحلیلی مفاهیم و تعاریف اساسی آغاز شده و مقصود از آن، ایجاد زبان مشترک برای تسری موضوع به گفتمان‌های علمی و مهندسی کشور است؛ همچنین در این نوشتار به بیان عواملی پرداخته شده که راهبرد بهینه برای به‌کارگیری مفاهیم مذکور را تعیین می‌کنند. از یافته‌های پژوهش، تبیین این اصل است که مهندسی سلامت سازه، مبتنی بر استفاده از فنون توسعه‌یافته برای نظارت و سنجش ساختاری فراگیر ساختمان‌هاست. به عبارت دقیق‌تر، مدیریت سلامت سازه، مجموعه‌ای از فرایندها و فناوری‌های مهندسی برای بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های سازه‌ای است. همچنین در این نوشتار به این نکته پرداخته شده که مهندسی سلامت سازه، روشی کارآمد برای نظارت مستمر بر ساخته‌ها و زیرساخت‌هاست که با کمترین هزینه، امکان تشخیص زودهنگام آسیب‌ها و ترمیم و تعویض به‌موقع اجزای معیوب را فراهم می‌کند. مضاف آنکه مهندسی سلامت سازه، به دلیل صرفه‌جویی در هزینه، زمان و بهبود ایمنی، کارایی زیادی دارد و نیز سبب افزایش دانش درباره وضعیت ایمنی ساختمان‌ها می‌شود که عاملی مؤثر در بهبود استانداردهای سازه‌ای و طراحی ایمن سازه‌ها در آینده است.

روش پژوهش

این تحقیق، پژوهشی کیفی است و در اجرای آن، به دلیل بررسی روابط علت و معلولی بین مدیریت سلامت سازه و کیفیت عملکرد فنی آن، از روش علی بهره گرفته شده است. جمع‌آوری اطلاعات پایه از طریق بررسی‌های کتابخانه‌ای، مراکز اسنادی و سایت‌های علمی انجام گرفت.

پیشینه پژوهش

در مورد مهندسی سلامت سازه، دیدگاه‌هایی در منابع خارجی طرح شده و قابل بررسی است. ولی مسئله این است که در گفتمان علمی ایران، منابع مکتوب فارسی که به‌طور صریح به این موضوع پرداخته و مبانی و مبادی آن را شرح داده باشند، در دسترس نیست. البته باید اذعان داشت که در برخی پایان‌نامه‌های دانشگاهی یا نوشته‌های علمی به کاربرد فنون این روش مهندسی پرداخته شده، ولی درباره مبانی معرفتی موضوع کمتر سخن گفته شده است. در ادامه به منابع مرتبط با رویکرد نوشتار حاضر اشاره می‌شود.

پژوهش‌های خارجی

در منابع خارجی، مطالبی با رویکردهای مختلف درباره موضوع سلامت سازه منتشر شده است که در اینجا فقط به برخی از مهم‌ترین آنها که مرتبط با بحث هستند اشاره می‌شود. در نوشتاری با نام «پایش سلامت سازه‌ها براساس تکنیک‌های هوش مصنوعی» به بررسی قابلیت‌هایی پرداخته شده که به‌سبب رهیافت‌های جدیدی مانند هوش مصنوعی، سبب ارتقای کارکردی روش پایش سلامت سازه می‌شوند (Smarsly et al., 2007). در بحثی با عنوان «پایش سلامت سازه‌ای» و با رویکرد مفهوم‌شناختی، مطالبی استدلالی در خصوص کاربردهای این روش مهندسی در بهبود سیستم‌های ساختمانی بیان شده است (Balageas et al., 2010). در کتاب *پایش سلامت ساختاری: دیدگاه یادگیری ماشینی*، رویکردی یکپارچه^۱ به موضوع طرح شده است (Farrar & Worden, 2012). کتاب مذکور حاصل تجارب حرفه‌ای و آموزشی مؤلفان است و در آن، نظارت بر سلامت سازه را با طرح مسئله در چارچوب الگوی یادگیری ماشینی و تشخیص الگوی آماری مطرح کرده‌اند و هدف کتاب، ارائه چارچوبی جامع برای توسعه راه حل‌های مسائل مهندسی سلامت سازه است. در فصلی از کتاب پشتیبانی مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای کاربردهای مهندسی سیستم‌ها با بررسی وجوه تفاوت و نیز تطابق دو رویکرد، یعنی مدیریت سلامت سازه (SHM) و سیستم امنیت (SoSs) به موضوع پرداخته و بر استفاده از ابزارهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای دستیابی به پاسخ تأکید کرده است (Johnson, 2015). در مقاله‌ای با نام «پایش سلامت سازه در ایالات متحده آمریکا» با اشاره به پیشرفت دانشی در عرصه‌های GPS، فناوری محاسباتی و انتقال داده، تأکید دارد که با اتکا به دستاوردهای این علوم، سیستم پایش لرزه‌ای هر ساختمان در جمع‌آوری و ارزیابی داده‌های پاسخ در طول یک مخاطره، باید سریع اقدام کند تا بعد از پیکربندی و پیاده‌سازی داده‌های مذکور، در زمینه سلامت سازه و ایمنی ساکنان آن ساختمان تصمیم‌گیری مؤثر و آگاهانه به عمل آید (Çelebi, 2019). یکی دیگر از منابع مرتبط با بحث، نوشتاری با عنوان «گذشته، حال و آینده پایش سلامت سازه‌ها: مروری بر سه دوره» است. در این نوشتار، افزون‌بر تبارشناسی تحلیلی روش پایش سلامت سازه، به بررسی چشم‌اندازی پرداخته شده که در برابر این موضوع قرار دارد (Farrar et al., 2025).

پژوهش‌های داخلی

استفاده از الگوریتم ژنتیک در پایش سلامت سازه‌ها در مقاله‌ای مطرح و نقش آن در تشخیص خرابی‌های ساختمانی همچون فرسودگی المان‌های سازه‌ای بررسی شده است. نتایج روش مذکور در ایمن‌سازی و بهسازی سیستم‌های سازه‌ای، موضوعی تعمیم‌پذیر بیان شده است (چناقلو و سلیمان‌بیگی، ۱۳۸۱). در مقاله‌ای از دیدگاه حوزه مهندسی مکانیک به موضوع پرداخته شده است. رویکرد بحث، ناظر بر کارایی روش فراصوتی، به‌عنوان یکی از روش‌های تشخیص سلامت سازه‌ها در حوزه سیستم‌های مکانیکی است (محرمی و همکاران، ۱۳۹۴). در مقاله‌ای با موضوع شناسایی ترک در سازه‌های مصالح بنایی، به کاربرد روش بینایی رایانه‌ای در پایش سازه‌ها اشاره کرده‌اند؛ روشی که یکی از قابلیت‌های هوش مصنوعی و مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشن^۲ است (موسوی و بخشی، ۱۴۰۱). در تحقیقی دیگر، از دیدگاه حوزه مهندسی الکترونیک به بررسی مزیت و قابلیت شبکه‌های حسگر بی‌سیم در سیستم‌های پایش سلامت سازه پرداخته و اهمیت این ابزار را در کارکرد مطلوب‌تر سیستم‌های

1. Integrated System Health Management (ISHM)
2. Convolutional Neural Networks

نظارت سازه‌ای استدلال کرده و نتیجه گرفته‌اند که هزینه و درصد خطا در حسگرهای بی‌سیم نسبت به حسگرهای سیمی کمتر است (نقیب هاشمی و همکاران، ۱۴۰۰).

در جمع‌بندی مطالب مربوط به پیشینه پژوهش شایان ذکر است که منابع موجود، از دیدگاه عددی و محاسباتی به موضوع پرداخته‌اند و تمرکز آنها بر کاربرد الگوریتم‌ها در ارزیابی سلامت سازه‌هاست. با درک این مطلب، نوشتار حاضر رویکردی متفاوت دارد و برعکس، شواهد ریاضی از موضوع بحث ارائه نمی‌کند. بر این اساس - همان‌گونه که پیشتر نیز اهداف نوشتار بیان شد - جهت‌گیری بحث به سمت تبیین مفاهیم اساسی و رویکردهاست تا درک حکمت وجودی و کارکردی این روش مهندسی و همچنین فایده‌های آن برای جامعه علمی کشور امکان‌پذیر شود.

چارچوب نظری

پیدایش و موضوعیت

مدیریت سلامت سازه (SHM) جزو ایده‌های به‌نسبت نوظهور مهندسی است که از اوایل دهه ۱۹۹۰ در مهندسی ساختمان رواج یافته است (Farrar, Dervilis, & Worden, 2025). اما پیشتر و در حوزه‌های مهندسی دیگر به‌ویژه هوافضا، مدیریت سلامت سیستم شروع شده و دستاوردهای چشمگیری کسب کرده است. حقیقت آن است که گفتمان مدیریت سلامت سیستم، طی چند دهه گذشته راه درازی را پیموده تا نظریه و مفاهیم پایه‌ای خود را توسعه دهد و از لحاظ اجرا مقرون به صرفه شود. هرچند که در اوایل، از موفقیت به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته در حوزه مدیریت سلامت سیستم در بهبود عملکرد ساختارهای مهندسی، گزارش‌های کمتری منتشر می‌شد؛ اما این رویکرد مهندسی به‌سرعت در حوزه‌های مختلف، به‌ویژه مهندسی ساختمان، روند توسعه خود را پیموده و اینک صاحب یک انسجام علمی کارآمد است (Balageas et al., 2010). در مجامع علمی، گاهی گفته می‌شود که این رویکرد، به یک رشته خاص دانشگاهی تبدیل شود و این درخواست به‌دلیل اهمیت امر و موفقیت ارزیابی نتایج آن در حوزه‌های مهندسی است.

در مورد تسری تفکر مدیریت سلامت سیستم به حوزه‌های دیگر، به این نکته نیز باید اشاره کرد که مفاهیم آن، در حالی برای مصنوعاتمانند رایانه‌های شخصی و خودروها کاربرد دارد که در حوزه‌های خطیر و مهم‌تری چون مهندسی ساختمان و مهندسی هوافضا نیز کاربرد دارد، حوزه‌هایی که در صورت اهمال، پیامدهای دشوار و خطرناک‌تر را در پی خواهند داشت.

سرشت وجودی

در شناخت ماهیت مهندسی سلامت سازه، باید دو مطلب بنیادی روشن شود؛ نخست آنکه اگرچه اصول این روش فنی، در حوزه مهندسی عمران پذیرفته شده و کاربرد دارد، نظریه‌ها و روش‌های بسط‌یافته در آن، قابلیت اجرا در برخی دیگر از حوزه‌های مهندسی را دارد. مطلب دیگر ماهیت معرفتی این تفکر مهندسی است که اشتراک مباحث با حوزه‌های متفاوت، ولی مرتبط را فراهم می‌کند. بنیان مطالبی که مطرح شد، ریشه در آن دارد که مدیریت سلامت سازه، دانشی میان‌رشته‌ای است و از این‌رو اظهار نظر درباره هر رکن از ارکان آن، نیازمند تخصص مستقل است و باید توسط متخصص مربوط نظر داده شود. بنابراین در فرایندهای برنامه‌ریزی سلامت سازه، تعدد و تنوع تخصص‌ها به نوع سیستم ساختمانی بستگی دارد. ولی در حالت معمول برای تدوین برنامه‌ها به کارشناسان چندان زیادی نیاز نیست، مگر آنکه یک ساختمان ویژگی‌هایی داشته باشد که حضور تخصص‌های متکثر را الزام کند. بر این اساس، چون فناوری‌های مختلف در مدیریت سلامت سازه دخیل‌اند، از این‌رو هیچ فردی نمی‌تواند در همه جنبه‌های این رشته متخصص باشد.

مطالب بیان‌شده خصوصیات هستند که در روابط دیگر دانش‌های میان‌رشته‌ای نیز مشهود است. در زمینه بحث، توجه به این نکته مهم است که تخصص‌های میان‌رشته‌ای، ابزاری قوی برای حل مسائل پیچیده در حوزه‌های مهندسی هستند و ثمربخشی آنها مشروط به این است که در رویکردی بین‌دانشی، به تحلیل مناسبات حاکم بر فرایند تکوین مسئله پرداخته شود. سیاق دانشی مهندسی سلامت سازه نیز از این قاعده پیروی می‌کند و مانند پلی است که بین چند گستره تخصصی کشیده شده تا تعامل دانشی جدیدی رقم خورد. «در دوره معاصر و در نظام روابط علمی نوین، رویکردهای میان‌رشته‌ای یکی از لوازم ذاتی توسعه

محسوب می‌شوند؛ این اقبال ناشی از آن است که چنین رویکردهایی افزون بر ایجاد زمینه‌های جدید برای رفع جهل، نتایج کاربردی‌تری را نیز به همراه دارند» (کبیرصابر، ۱۳۹۴). تسری این سخن به موضوع بحث روشن است، زیرا مهندسی سلامت سازه برپایه قابلیت‌هایش توانسته است پیوند ژرفی بین عرصه‌های علمی مختلف یعنی مهندسی سازه با الکتروتکنیک، الکترونیک، اپتیک و غیره برقرار کند.

ماهیت کارکردی

در حقیقت، اساس مدیریت سلامت سازه، تعامل بین مهندسی و مدیریت است؛ زیرا تخصصی است که در آن، پیوند منطقی بین عرصه‌های فنی و شیوه‌های عملیاتی و شیوه‌های مدیریتی برقرار است. این اصل در مدیریت سلامت سازه نیز صادق است و به‌عنوان یکی از اصول مهندسی که عهده‌دار نظارت بر سلامت کیفی و کمی ساختمان‌هاست، باید برنامه منطقی برای حفظ کارکرد اسمی سیستم‌های ساختمانی و نیز اطمینان از اثربخشی مأموریت آنها در شرایط غیراسمی ارائه کند. بنابراین میزان تسلط کارشناسان و تکنیسین‌های حوزه مدیریت سلامت سازه به معیارهایی چون «چرخه عمر»، «ایمنی»، «قابلیت اطمینان» و «بهره‌وری» جزو ارقام شایستگی منابع انسانی این حوزه محسوب می‌شود. حاصل سخن این است که کُنشگران این حوزه در پیوند بین مهندسی و مدیریت، باید دانش و مهارت ویژه را داشته باشند تا تعیین کنند که فرایندها و فناوری‌های سلامت سیستم چه نقشی در بهینه کردن معیارهای یادشده دارند تا تصمیم مؤثر اتخاذ شود.

سلامت سازه‌ای

در بین روابط و نظام‌های مختلفی که در موجودیت ساختمان‌ها دخیل‌اند، اصلی‌ترین نظام وجودی که ایستایی و پایداری ساختمان را در برابر مخاطرات تعیین می‌کند، نظام سازه‌ای است و بدین دلیل نظارت مستمر بر هنجار ساختاری و کیفیت ایستایی ساختمان‌ها، تأثیر مهمی در مدیریت سلامت آنها دارد. اهمیت مطلب در این است که تحقق هر مؤلفه مثبت دیگر برای ساختمان، چون پایداری^۱ و ماندگاری^۲ و غیره در گرو سلامت ساختار سازه‌ای آن است و به‌عبارتی، سلامت دیگر نظامات ساختمان منوط به آن است.

نظارت بر سلامت سازه‌ای

نظارت (پایش) ساختاری، به فرایند سازمان‌یافته‌ای گفته می‌شود که به‌طور مدام، گستره‌ای از اطلاعات را از وضعیت یک سازه فراهم می‌کند و راهبرد آن، مبتنی بر تشخیص آسیب است. مراحل «پایش و سنجش مدام»، «جمع‌آوری داده‌ها»، «ترکیب و یکپارچه کردن داده‌ها» و در نهایت، تولید و طبقه‌بندی اطلاعات است (Abdelbarr et al., 2017). بنابراین، وظیفه اصلی سیستم‌های سلامت سازه، ارزیابی عملکرد سازه، تشخیص آسیب و نیز نظارت بر آن است که از طریق اندازه‌گیری مستمر تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی سازه‌ها عمل می‌کند. به‌طور معمول، به لحاظ نتیجه، چند انتظار اساسی از فرایندهای این روش مهندسی وجود دارد که اهم آنها عبارت است از: الف) شناسایی (آگاهی از وجود آسیب)؛ ب) مکان‌یابی (کشف محل آسیب)؛ ج) تشخیص نوع آسیب.

بر اساس مطالب یادشده، دو موضوع آشکار می‌شود. نخست آنکه نظارت ساختاری باید کل سیستم سازه‌ای را پوشش دهد و ناظر بر همه مؤلفه‌های خطر برای ساختمان باشد. دوم، توجه به این نکته است که نظارت ساختاری، فرایندی است که تولید پیش‌آگهی می‌کند تا امکان تصمیم‌گیری به‌موقع برای رفع خطر یا نگهداری مبتنی بر شرایط^۳ ایجاد شود.

در جمع‌بندی این بخش، شایان ذکر است که باوری اساسی در حوزه مدیریت سلامت سازه وجود دارد و اینکه اگر خرابی‌ها یا اختلالات در ساختارهای فنی اجتناب‌ناپذیرند، می‌توان با توسل به فرایندهای نظارتی، آنها را پیش‌بینی و شناسایی کرد Farrar

1. Stability

2. Durability

3. Condition-based maintenance

(Worden, 2012). با این حال، باید توجه داشت که همه برنامه‌های مدیریت سلامت سازه به دلایل مختلف، با چالش‌ها و محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند و از این‌رو در مواردی که انتظارات را برآورده نمی‌کنند، باید ارزیابی انتقادی شوند و ارتقا یابند.

ساختار عملکردی سیستم نظارت

شیوه کار سیستم‌های نظارت سلامت سازه، مبتنی بر پایش، سنجش و ارزیابی مستمر پارامترهای فنی ساختمان‌هاست و بدیهی است که این اقدامات، به ابزارهای مخصوص نیاز دارد تا با تشخیص زودهنگام آسیب‌ها، از گسترش آنها پیشگیری شود و اقدامات لازم صورت گیرد. در هر برنامه اجرایی نظارت، ابتدا حسب ارزیابی‌های مهندسی، در نقاط خاصی از ساختمان، حسگر به تعداد لازم نصب می‌شود تا به‌طور مداوم داده‌هایی از وضعیت فیزیکی ساختمان جمع‌آوری شود و سپس با تجزیه و تحلیل آنها، رفتارهای نامتعارف ساختاری شناسایی می‌شود. از این طریق، اطلاعات جامعی از وضعیت فیزیکی ساختمان به دست می‌آید که شرایط آن را از نظر الگوهای تغییر شکل و امکان حرکت و جابه‌جایی و مشخصه‌های دینامیکی سازه روشن می‌کند. شبکه تجهیزاتی که به‌منظور پایش ساختمان تدارک و تنظیم می‌شود، باید به‌عنوان یک سیستم عملیاتی پایدار، از عهده مسئولیت خود در برنامه عملیاتی روزانه و همچنین در مواقع اضطراری برآید.

شرایط موجود سازه‌ای

اقدامات نظارت سلامت سازه، بر مشاهدات استوار است و اطلاعات خود را از بررسی شهودی وضع موجود کسب می‌کند. داده‌های کسب‌شده از وضع موجود ساختمان، سپس در مرحله پردازش، همراه با اطلاعات مندرج در نقشه‌ها و دفترچه‌های محاسبات اولیه ساختمان بررسی می‌شوند؛ زیرا انتظار می‌رود در محاسبات فنی ساختمان - به‌ویژه ساختمان‌هایی که در سال‌های اخیر ساخته شده‌اند - مخاطرات طبیعی و بالطبع ضرایب ایمنی پیش‌بینی شده باشد. زیرا حسب دستورالعمل‌های قانونی، مهندسان باید حدی از ریسک مخاطرات (مانند زلزله، توفان و غیره) را در محاسبه منظور کنند. از این‌رو ساختمان‌های جدید، البته به‌شرط رعایت قواعد مهندسی در سه مرحله طراحی، محاسبه و اجرا، باید دارای دامنه‌ای از ایمنی باشند که تأثیر بارهای ناشی از مخاطرات طبیعی را به حداقل برسانند و از فروپاشی کلی سیستم جلوگیری کنند. اما در واقعیت، متأسفانه برخی ساختمان‌ها این ویژگی را ندارند و به ضعف ذاتی ناشی از محاسبه غلط یا اجرای غلط دچارند و اشکالاتی دارند که اغلب پس از بهره‌برداری نمایان می‌شود. فارغ از مسائل برخی ساختمان‌های جدید، مسئله دیگر، ساختارهای تاریخی هستند که اینک تحت عنوان میراث معماری شناخته می‌شوند و مراقبت از آنها که یک ضرورت ملی است شامل دستورالعمل‌های ویژه است.

با همه این توصیفات، واقعیت وجودی ساختمان‌ها به‌گونه‌ای است که با گذشت زمان، دچار کهنوت می‌شوند و ضعف ساختاری پیدا می‌کنند. زیرا عناصر شکل‌دهنده ساختمان‌ها، کیفیت خود را در گذر زمان تحت تأثیر «عوامل محیطی»، «نحوه ساخت»، «نحوه بهره‌برداری» و غیره از دست می‌دهند و فرسوده می‌شوند. به همین دلیل، یکی از رویکردهایی که اینک در بررسی فنی ساختمان‌ها در بسیاری از جوامع به‌ویژه ژاپن پیگیری می‌شود، بررسی و ارزیابی فرایندهای فرسایش و خرابی سیستم‌های ساختمانی است. این اقدامات، یک تلاش علمی واقع‌گرا برای درک چگونگی کهنوت و فرسایش عناصر ساختمانی و پیش‌بینی زمان خرابی آنهاست تا نتایج منطقی و نظام‌مند برای مدیریت به‌موقع و کم‌هزینه ساختمان‌ها حاصل شود (Glade & Nadim, 2014).

شیوه ابزار پایه

فرایندهای مهندسی نظارت سلامت، متکی به تجهیزات و «ابزار پایه» هستند که حسب نیاز، گستره وسیعی از روش‌های کلاسیک تا پیشرفته را به خدمت می‌گیرد. بدیهی است که دقت فرایندها و نتایج، به کیفیت کارکردی ابزارها و تجهیزات مرتبط وابسته است. در این بحث، توجه به این نکته ضرورت دارد که بیشتر تدابیر اندیشیده‌شده در تصمیمات و اقدامات مهندسی سلامت، متکی به یک فناوری نیستند، بلکه مجموعه‌ای از فرایندها و فناوری‌هاست که قابلیت‌های سیستم را ایجاد می‌کنند.

در حال حاضر، فنون نوینی مانند حسگرهای هوشمند، شبکه‌های حسگر، امواج هدایت‌شونده، ارتعاش‌سنج‌های لیزری، پردازش سیگنال، سنج‌های غیرمخرب (مانند ابزارهای دقیق و حتی مدل‌های فیزیکی) در برنامه‌های سلامت سازه استفاده می‌شوند و طبعاً انتخاب هر روش، به ویژگی‌های ساختمان تحت پایش وابسته است. از نکات شایان ذکر در این خصوص، نحوه بهره‌برداری از ابزار و حتی مکان تعبیه آنهاست، زیرا هر نوع کم‌توجهی در مدیریت ابزار، سبب افت توانایی تشخیص و تمایز نیافتن درست داده‌ها می‌شود.

با این حال، اگرچه امروزه پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری‌های مدیریت سلامت در همه زمینه‌های نظارتی، ارزیابی، پیش‌آگهی^۱ و فیزیک خرابی اجزای ساختمان وجود دارد، همچنان استقرار فناوری‌های جدید برای ساختمان‌ها همچون یک دهه پیش چالش‌برانگیز است. زیرا تجربه اندکی از کیفیت عملکردی ابزارهای جدیدتر وجود دارد و هنوز کاملاً پذیرفته‌شده نیستند و داده‌های عملیاتی بسیار کمی از آنها وجود دارد که بتوان اطلاعات آماری معناداری به دست آورد. با این حال، نشانه‌های قوی وجود دارد که سرمایه‌گذاری در حوزه مدیریت مهندسی سلامت در چند دهه اخیر، سبب بهبود شرایط و ایجاد تفاوت‌های اساسی نسبت به قبل شده و این به دلیل تأکید بر ارتقای سطح فناوری در این حوزه مهندسی است (Farrar & Worden, 2012).

مطلب مهم این است که حتی برجسته‌ترین فناوری‌های نظارت، در صورتی که نتوانند نیازهای مسئله سلامت را در یک ساختمان تأمین کنند و خطر را کاهش دهند، برای استقرار در طرح سلامت آن ساختمان کاربرد نخواهند داشت. همان‌طور که از منظر توانمندی منابع انسانی نیز موفقیت متخصصان این حوزه مهندسی، در به‌روز کردن اطلاعات خود از طریق مطالعه درباره آخرین یافته‌های علمی در عرصه‌های مبنایی و اجرایی است.

هوش مصنوعی و سلامت سازه

پیشرفت‌های اخیر در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین موجب شده که گستره‌ای از فرصت‌ها و امکانات برای توسعه نسل آینده سیستم‌های نظارت بر سلامت ساختمان گشوده شود. در مفهوم کلی، اجرای مکرر الگوریتم‌های هوش مصنوعی، روش‌های بی‌سابقه‌ای را برای پیوند سیگنال‌های نظارتی به تصمیم‌گیری فراهم می‌کند (نقیب هاشمی و همکاران، ۱۴۰۰)؛ به‌ویژه برنامه‌های هوش مصنوعی فیزیک‌پایه که امکان اعمال اطلاعات مهندسی و نتایج بازرسی‌های میدانی را در فرایندهای تصمیم‌گیری ممکن می‌کنند. از مزایای چنین برنامه‌هایی، پیشگامی در رویکرد «نگهداری مبتنی بر شرایط» است؛ به‌خصوص برای ساختارها یا زیرساخت‌هایی که دارایی‌های کلیدی جامعه محسوب می‌شوند و افزون‌بر ارزش فنی، از ارزش‌های اجتماعی، اقتصادی و حیاتی برخوردارند (Smarsly et al., 2007).

اعتبار روش‌های کلاسیک

در حال حاضر یکی از شاخه‌های مهندسی ساختمان، حوزه «تعمیر و نگهداری» است که انتظارات عملکردی مخصوص به خود را برآورده می‌کند و تمایز آن با حوزه جدید، یعنی مهندسی سلامت ساختمان، تفاوت در رویکردهاست. به این معنا که ذات مهندسی سلامت، نظارت بر سیستم‌های ساختمانی است و آن را نمی‌توان جایگزین روش‌هایی فرض کرد که مسئولیت واکنش فوری دارند. موضوع تعمیر و نگهداری، ناظر بر رفع ایرادهای ساختمان، برای استمرار فعالیت و بهره‌برداری از آن است و گاهی، اقدامات آن باید سریع و بی‌درنگ انجام گیرد. اما برعکس، دامنه فرایندهای مهندسی سلامت، چندان به اقدام بی‌درنگ طی نمی‌شود، بلکه در اصل، متوجه موضوعات نظارتی از ابتدای طراحی و عملیات ساخت تا بهره‌برداری است. بنابراین مدیریت سلامت ساختمان، هرگز جایگزین روش‌های کلاسیک مهندسی برای تأمین ایمنی نیست، هرچند که برای توسعه و بهبود روش‌های خود، به رویکردهای سنتی توجه دارد و حتی برخی از قواعد آن را پذیرفته و گسترش می‌دهد؛ اما هدف‌های خاص خود را دنبال می‌کند.

انتخاب مدل تحلیل

در روند فرایندهای نظارتی، بعد از مرحله جمع‌آوری داده‌ها و در مرحله تشخیص، با اتخاذ تحلیل‌های مناسب، اقدام به پردازش داده‌ها و بیان آنها می‌شود. در این مرحله، افزون‌بر روش‌های پیشرفته‌ای چون الگوهای آماری، شبیه‌سازی‌های عددی و الگوریتم‌های ویژه، گاهی نیز از آزمایش‌های کنترل‌شده و حتی آزمایش نمونه‌هایی به‌صورت شبیه‌سازی در آزمایشگاه استفاده می‌شود که طبقاً هر یک از این روش‌ها قادر به تأمین حدی از دقت هستند. امروزه کارشناسان برای یافتن «مدل‌های معادل» برای تحلیل داده‌ها، یکی از روش‌های «مدل فیزیکی» یا «مدل عددی» را بسته به نوع مسئله انتخاب می‌کنند و در مواردی نیز همزمان از هر دو روش مدل فیزیکی (آزمایشگاهی) و روش مدل عددی اقدام می‌شود.

مدل فیزیکی

در روش آزمایشگاهی، مدل فیزیکی مقیاس‌شده، تحت شرایط شبیه‌سازی قرار می‌گیرد تا آشکار شود که ساختمان در مواجهه با مخاطراتی چون زلزله، توفان و غیره، چه ضعف و قوتی دارد؟ در این روش، رابطه بین مدل مقیاس‌شده و مدل واقعی حائز اهمیت است و کارشناسان، نتایج حاصل از این روش را با استفاده از «آنالیز ابعادی» بازبینی می‌کنند تا از صحت نتایج مطمئن شوند. با اینکه مدل‌سازی فیزیکی با استفاده از تجهیزاتی چون میز زلزله، تونل باد و غیره اطلاعات سودمندی به دست می‌دهد، استفاده از نتایج آن برای ارزیابی قطعی سلامت ساختمان ممکن نیست؛ زیرا دچار اشکالاتی مانند محدودیت تحقق خرابی است. بعضی نتایج فقط هنگامی صحیح‌اند که زمان واقعی بر آزمایش حاکم باشد، اما در روش یادشده، مسئله عدم اعمال مؤلفه زمان بر شروع و بروز آسیب‌ها وجود دارد. چراکه پدید آمدن بسیاری از آسیب‌ها وابسته به زمان است و عملاً شامل یک بُعد زمانی طولانی است. مسئله دیگر در مدل‌سازی فیزیکی، تدقیق مدل است که عملاً چندان توجهی به پیچیدگی هندسی سیستم‌های ساختمانی نمی‌شود؛ دیگر آنکه تأثیر تنوع محیطی و کارکردی ساختمان‌ها که مؤلفه‌هایی تعیین‌کننده در فرسایش تدریجی هستند منظور نمی‌شود. بدین سبب، هرچند روش‌های کلاسیک مانند مدل‌سازی فیزیکی، به واقعیت نزدیک‌اند، اکتفا به آنها لزوماً تأمین‌کننده دقت و حساسیتی که از سیستم‌های مدیریت سلامت ساختمان انتظار می‌رود نیست.

مدل عددی

امروزه برای پیاده‌سازی داده‌ها، شبیه‌سازی به روش‌های عددی مورد توجه است و پردازش‌ها به اتکای تشخیص الگوی آماری، طبقه‌بندی الگو و الگوریتم‌ها صورت می‌گیرد. البته نباید تصور شود که رویکردهای جدید که قابلیت مبتنی بر تحلیل‌های عددی دارند، استفاده از روش‌های قبلی مانند مدل‌های فیزیکی را نفی می‌کنند. زیرا بررسی به‌کمک مدل‌های فیزیکی، پایه اصلی تحقیقات مهندسی است و اگر مدل‌های فیزیکی تأییدشده در دسترس باشند، می‌توان براساس بینش به‌دست‌آمده از آنها، برای بهبود دریافت‌های رایانه‌ای از مسئله اقدام کرد. به‌طور کلی، حتی در تشخیص‌ها و نتیجه‌گیری‌های رایانه‌ای نیز بهتر است نتیجه‌گیری صرفاً به شکلی خاص از مدل محدود نشود، زیرا باید اذعان کرد که بیشتر نرم‌افزارهای تخصصی که در این زمینه کاربرد دارند، هنوز در درجه اطمینان کافی نیستند (Perelmuter & Slivker, 2013).

شاخص‌های ایمنی و قابلیت اطمینان در سلامت سازه‌ای

شاخص ایمنی

ایمنی ساختاری یکی از ملاحظات اصلی در بررسی سلامت هر سازه مهندسی است و به همان نسبت که وابستگی انسان به ساخته‌ها و زیرساخت‌های عمرانی افزایش می‌یابد، علاقه‌مندی به ایمن بودن ساخت‌وساز نیز بیشتر می‌شود. اما چنین خواسته‌ای همیشه محقق نیست و گاهی فاجعه‌هایی رخ می‌دهند که هزینه‌های هنگفت و تلفات زیاد دارند. ایمن نبودن سازه‌ها، اغلب به عللی مانند خطای مهندسی، عیب مصالح، ایراد اجرایی و بهره‌برداری غیراصولی است که سبب ضعف سازه‌ها و کاهش ایمنی آنها می‌شود (Farrar et al., 2001). مسئله فقط به «شرایط عادی» ختم نمی‌شود، بلکه بزرگ‌ترین چالش پیش روی ساختارهای مهندسی، ایمن بودن آنها در «شرایط مخاطرات محیطی» است. با وجود چنین مسائلی، می‌توان با رعایت دستورالعمل‌هایی که با

مطالعه الگوی صدمات و شکست‌های گذشته - به‌عنوان مبنایی برای پیش‌بینی مخاطرات آینده - تدوین شده‌اند، ایمنی ساختمان‌ها را تا حد ممکن افزایش داد.

شاخص قابلیت اطمینان

در بحث‌های مهندسی، به‌طور معمول از دو مؤلفه ایمنی^۱ و قابلیت اطمینان^۲ در کنار هم سخن گفته می‌شود، ولی این دو متفاوت‌اند و هدف واحدی ندارند (Nowak & Collins, 2012). «قابلیت اطمینان» در یک ساختمان، به‌طور غیرمستقیم با ایمنی ساختاری آن مرتبط است، اما به‌طور مستقیم با پارامترهایی از محاسبات ساختمان مرتبط است که عدم قطعیت دارند. البته بسیاری از بن‌مایه‌های عدم قطعیت در طراحی سازه ذاتی‌اند. زیرا علی‌رغم تصورات موجود، توان بارگذاری و ظرفیت تحمل عناصر سازه‌ای، هرگز کمیت‌های قطعی یا کاملاً شناخته‌شده نیستند؛ بلکه در عمل، متغیرهای تصادفی نیز وجود دارند و بنابراین در محاسبات نمی‌توان به ایمنی مطلق یا احتمال شکست صفر دست یافت (Mann, 2023). به این دلیل، سخن از قطعیت ذاتی شاخص «قابلیت اطمینان» در یک ساختمان ممکن نیست و در نتیجه، سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که عملکرد خود را با احتمال شکست محدود انجام دهند.

بر اساس آنچه بیان شد، بروز متغیرهای تصادفی در تحلیل فنی ساختمان‌ها، امری محتمل است. بدین سبب، اتکا به نظریه احتمالات، یکی از ابزارهای مورد استفاده در روش‌های تحلیلی است که به‌طور معمول در روش‌های شبیه‌سازی برای حل مسائل مرتبط با قابلیت اطمینان لحاظ می‌شود (Der Kiureghian, 2022). باید توجه داشت که یافته‌های این محاسبات، در برنامه‌ریزی برای مهندسی سلامت ساختمان‌ها تعیین‌کننده است؛ زیرا نتایج آن، پاسخ‌های ثبت‌شده‌ای تلقی می‌شوند که هم برای مدیریت شرایط اضطراری ساختمان و هم برای نیازهای تعمیر و نگهداری معمولی آن قابلیت مناسبی دارند.

ارزیابی چرخه عمر ساختمان

در برخی مباحث مهندسی، بین دو موضوع نظارت سلامت سازه‌ها و ارزیابی عمر سازه‌ها^۳، دامنۀ مشترک ایجاد می‌شود، حال آنکه این دو موضوع تفاوت ماهوی دارند؛ هرچند در مواردی، نتایج این دو فرایند، در تکمیل نتیجه دیگری مدنظر قرار می‌گیرد. با این حال، مأموریت اصلی نظارت سلامت ساختمان، مقایسه و سنجش «مشخصات سازه‌ای ساختمان در وضعیت سالم» با «مشخصات همان ساختمان در وضعیت معیوب» است. اما موضوع ارزیابی عمر سازه‌ها، مسئله دیگری است. زیرا بحث درباره چرخه عمر ساختمان، ناظر به ملاحظات از مرحله تولد تا برجیده شدن آن است و به‌عبارت دقیق‌تر، بازۀ پیوسته‌ای از مراحل «طرح و ساخت»، «بهره‌برداری» و در نهایت «تخریب» و «بازیافت اجزا»ی ساختمان است. در این چرخه زمانی، بیشترین دوره زمانی به بهره‌برداری یا خدمت‌دهی ساختمان اختصاص دارد که دوره‌ای است که در آن افزون‌بر سیستم سازه‌ای، دیگر زیرسیستم‌ها همچون الکتریکی، مکانیکی، بهداشتی، مراقبتی، تأسیساتی و غیره تحت تأثیر چالش‌های مختلف پیش‌بینی شده و حتی پیش‌بینی نشده قرار دارند (Ibrahim, 2017).

علی‌رغم اهمیت مؤلفه چرخه عمر و ارزیابی آن برای حفظ سرمایه‌های مادی و انسانی، متأسفانه در مدیریت سیستم‌های ساختمانی به آن کمتر توجه می‌شود. حال آنکه ارزیابی چرخه عمر^۴ یکی از بهترین سازوکارها برای درک سطح سلامت ساختمان و سنجش آمادگی آن در شرایط مخاطرات طبیعی است. همچنین نتایج ارزیابی چرخه عمر، به‌مثابه یک گزارش فنی می‌تواند دلایل مؤثری در یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌هایی باشد که نسبت به وضعیت کالبدی یا کارکردی ساختمان‌ها ایجاد می‌شوند (Sarja, 2002). در کل، همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد، در برخی تصمیم‌گیری‌های مهم برای ساختمان‌ها، بررسی دوسویه بین نتایج فرایندهای «ارزیابی چرخه عمر» و «نظارت سلامت ساختمان» به عمل می‌آید.

1. safety

2. reliability

3. Structural Life Assessment

4. LCA

بحث

از ضروریات زیست در جامعه ایمن، افزایش آمادگی در برابر مخاطرات طبیعی است. امروزه بسیاری از کشورها پایداری خود در برابر مخاطرات محیطی را ارزیابی کرده و از برنامه‌ریزی برای اقدامات پیشگیرانه و کاهش‌دهنده برای کاهش تلفات و خسارات استفاده می‌کنند (مقیم، ۱۴۰۳). زیرا هر سرزمینی به اقتضای ویژگی‌های طبیعی خود، استعدادهای بالقوه و بالفعل برای بروز گونه‌هایی از مخاطرات محیطی را دارد که سلامت و بقای ساختارهای مهندسی را تهدید می‌کنند. بدین سبب، برنامه‌ریزی برای افزایش آمادگی، می‌تواند فرصت تصمیم‌گیری‌های بهتر را فراهم کند تا خسارات و تلفات هنگام بروز مخاطرات کاسته شود. در حوزه مهندسی ساختمان، افزایش آمادگی به این معناست که ساخته‌ها و زیرساخت‌ها در حدی از سلامت ساختاری باشند که بتوانند در برابر بارهای ناخواسته و رفتارهای نامتعارف مخاطرات محیطی، انسجام کالبدی خود را حفظ کنند. رویکرد این مقاله در خصوص مدیریت سلامت ساختاری، روشی برای دستیابی به چنین هدفی است؛ یعنی افزایش ایمنی سیستم‌های سازه‌ای و دیگر زیرسیستم‌های ساختمانی که به‌منظور افزایش آمادگی در برابر هر خطری از جمله مخاطرات محیطی انجام می‌گیرد.

علی‌رغم سودمندی ملاحظات که بیان شد، مسئله‌ای فراگیر در جامعه وجود دارد و آن بی‌میلی به اتخاذ تدبیرهای کاربردی برای افزایش آمادگی در برابر مخاطرات آینده است. در گذشته، جوامع صاحب تمدنی مانند ایران در برابر چنین مسائلی، سنجیده‌تر عمل می‌کردند. «هنگامی که محیط زندگی و سرگذشت جوامع و تجربه انسان‌ها از درک مخاطرات را مطالعه می‌کنیم، مشاهده می‌شود که درک مخاطرات صرفاً به مثابه قلمروی مفهومی تصور نمی‌شود، بلکه توانایی بشر برای تبدیل فکر به عمل نیز در آن نهفته است» (مقیم، ۱۴۰۱). مثالی روشن برای این سخن، زمین‌لرزه‌های مهیب شمال غرب کشور، به‌ویژه در منطقه تبریز است که در گذشته، معماران بومی منطقه با تحلیل و بررسی آثار ویرانی‌ها، آموزه‌های جدیدی برای بهبود سیستم‌های ساختمانی کسب می‌کردند و یکی از فنونی که در این زمینه پیشرفت داده بودند، فن تسلیح ساختمان‌ها به شبکه مهندسی‌شده چوبی (کلاف‌های چوبی) بود (کبیرصابر، ۱۳۹۲). این گونه روش‌های خردمدار، در واقع ناشی از فرهنگی بود که افزایش شعور مهندسی را از طریق بازخوانی تأثیرات مخاطرات طبیعی بر ساخته‌های مهندسی توصیه می‌کرد. از این‌رو به‌موازات اقدامات فنی، باید فعالیت‌های فرهنگی نیز برای ارتقای آگاهی عمومی انجام گیرد تا زمینه پذیرش و اقبال اجتماعی به موضوع مهمی چون نظارت بر سلامت ساختمان‌ها فراهم شود.

در این نوشتار، طبق نظمی که برای بحث تدوین شده بود، گستره‌ای منطقی از موضوعات مرتبط بیان شد. بدیهی است که در عمل، ایجاد تعادل در پرداخت منطقی و کامل به این گستره از موضوعات، کاری دشوار و چالش‌برانگیز است. لکن ارتقای آگاهی درباره موضوع در جامعه کارشناسی کشور می‌تواند، از دشواری و پیچیدگی مسئله بکاهد. در این بخش، جمع‌بندی‌ای کاربردی از بحث ارائه می‌شود تا کارشناسان و تصمیم‌گیران مهندسی به درکی آسان از موضوع دست یابند.

الف) مدیریت سلامت سازه، به‌عنوان نوعی تفکر و دیسیپلین علمی، به برنامه‌دهی برای کیفیت بخشیدن به مدیریت سیستم سازه‌ای، مدیریت بهره‌برداری، مدیریت چرخه عمر سیستم ساختمانی و بقیه زیرسیستم‌های آن، با هدف حفظ رفتار و عملکرد اسمی سیستم و همچنین اطمینان از ایمنی و اثربخشی مأموریت در شرایط غیر اسمی توجه دارد؛

ب) رویکرد نظارت بر سلامت سازه، از دو قابلیت فنی و مدیریتی مؤثر در تقلیل خسارات و تلفات برخوردار است که می‌تواند آمادگی‌های لازم را هم در شرایط متعارف و هم در مخاطرات طبیعی برای ساختمان و بهره‌برداران آن فراهم سازد؛

ج) نظارت بر سلامت سازه و تشخیص عوامل مخل در بدو ظهور، اثر زیادی در پیشگیری از رشد و تسری آسیب‌ها دارد؛

د) تشخیص به‌موقع اختلال‌های بالقوه و بالفعل سیستم‌های ساختمانی، امری حیاتی برای ایمنی ساختمان و کاربران و منابع مستقر در آن است و در مواقع مخاطرات طبیعی که بارهای ناخواسته به ساختمان اعمال می‌شود نیز از بروز خسارات سنگین‌تر می‌کاهد؛

ه) در این رویکرد، اقدامات اجرایی وابسته به تجهیزات و ابزار فنی و همچنین سیستم‌های شبکه‌ای و رایانه‌ای است و رابطه مستقیمی بین صحت نتایج فرایندها و دقت ابزارها برقرار است؛

و) از رهیافت‌های پژوهش، بررسی استدلالی ماهیت مهندسی سلامت سازه است که منتج از رویکرد میان‌رشته‌ای آن است. انضباط علمی این تخصص، برآمده از همکاری و هم‌افزایی سویه‌های علمی متفاوت، ولی مرتبط است و بدین سبب، کارایی متمایزی دارد که دیگر تخصص‌ها، به‌طور مستقل از آن برخوردار نیستند. از این‌رو در ارزیابی اقدامات مهندسی سلامت سازه و نیز سنجش میزان ثمربخشی فرایندهای آن، فهم نوع و میزان مراودات فنی بین «مهندسی ساختمان» و دیگر دانش‌ها تعیین‌کننده است؛

ز) این پژوهش در قلمرو محدود خود، به تحلیل و تبیین مبانی موضوع پرداخت، اما برای دستیابی به آگاهی‌های اجرایی و کاربردی، به پژوهش‌های هدفمند دیگری نیاز است تا با جمع‌بندی نتایج، امکان اثرگذاری بر کاهش تلفات و خسارات فراهم آید. از این‌رو یافته‌های این پژوهش، اغلب معطوف به درک «جایگاه این تخصص علمی و شناخت اصول و مبانی آن» و همچنین «اثربخشی نتایج آن در شرایط مخاطرات طبیعی» است.

نتیجه

مقاله حاضر، مستخرج از پژوهشی معرفت‌شناختی درباره مهندسی سلامت سیستم‌های سازه‌ای به‌منظور بازشناسی کاربردهای آن در شرایط مختلف است که با هدف تبیین بنیان‌های نظری این رویکرد مهندسی نگاشته شده است. ضرورت پرداختن به این موضوع، برخی خلأهای معرفتی در خصوص ماهیت آن در گفت‌وگوهای مهندسی کشور است. در برخی فعالیت‌های دانشگاهی به این موضوع توجه می‌شود، اما اغلب از دیدگاه عددی و محاسباتی به موضوع پرداخته می‌شود و تمرکز بر کاربرد الگوریتم‌ها در ارزیابی سلامت سازه‌هاست. اما نوشتار حاضر رویکردی متفاوت دارد و از شواهد ریاضی در آن استفاده نشده است. زیرا جهت‌گیری بحث به‌سمت تبیین و تنویر مفاهیم و مبانی موضوع است تا امکان درک حکمت وجودی و کارکردی این روش مهندسی و همچنین فایده‌های آن آشکارتر شود. اهمیت امر، آن است که ایران به‌عنوان یکی از کشورهای در معرض کنش‌های بالفعل و بالقوه مخاطرات محیطی مختلف، به چنین رویکردهایی برای افزایش آمادگی ساخته‌ها و زیرساخت‌ها نیاز دارد تا امکان بهره‌برداری اصولی از آنها - هم در شرایط عادی و هم شرایط مخاطرات - فراهم باشد. برحسب تجارب اثبات‌شده در طی دو دهه گذشته، روش مهندسی سلامت سازه، نوعی توانمندی مؤثر در مدیریت بهینه ساختارهای مهندسی در مواجهه با مخاطرات احتمالی محسوب می‌شود. این رویکرد مهندسی، مجموعه‌ای از فناوری‌ها و فرایندهای مهندسی برای بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های ساختمانی است. بدیهی است که موفقیت این روش مهندسی و متخصصان آن، در به‌روز کردن اطلاعات و دانش از طریق بررسی مدام آخرین یافته‌های علمی مرتبط با موضوعات مبنایی و اجرایی این تخصص است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر حمایت مالی نداشته است.

منابع

- [۱] چناقلو، محمدرضا؛ و سلیمان‌بیگی، ناصر (۱۳۸۱). پایش سلامتی سازه‌ها، اولین کنفرانس ایمن‌سازی و بهسازی سازه‌ها، تهران، <https://civilica.com/doc/581>
- [۲] زارع، مهدی؛ و مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۱). گونه‌شناسی مخاطرات در علم مخاطره‌شناسی (آیا علم مخاطره‌شناسی گونه‌های خاصی دارد؟)، مدیریت مخاطرات محیطی، ۹(۴)، ۳۸۳-۳۹۰. doi: 10.22059/jhsci.2023.356665.770
- [۳] کبیرصابر، محمدباقر (۱۳۹۲). رهیافت‌های معماری سنتی تبریز برای ساخت‌وساز ایمن پس از زلزله (مطالعه موردی: کاربست کلاف‌های چوبی در معماری خانه‌های قاجاری). نامه معماری و شهرسازی، ۶(۱۱)، ۵۹-۷۰. doi: 10.30480/aup.2013.111
- [۴] کبیرصابر، محمدباقر (۱۳۹۴). مفهوم شناسی واژه «سازه» در گفتمان معماری معاصر ایران، سبک‌شناسی نظم و نثر فارسی (بهار ادب)، ۱۸(۱)، ۳۹۳-۴۰۴. https://bahareadab.com/article_id/223
- [۵] محرمی، رسول؛ بیات، امیرحسین؛ و آقائی، سروش (۱۳۹۴). اصول و کاربرد پایش سلامت سازه‌ها، صوت و ارتعاش، ۴(۸)، ۳-۱۷.
- [۶] مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۱). استراتژی علم مخاطره‌شناسی: آیا علم مخاطره‌شناسی استراتژی دارد؟. مدیریت مخاطرات محیطی، ۹(۱)، ۴۵-۵۴. doi: 10.22059/jhsci.2022.345598.730
- [۷] مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۳). رویکرد جدید به مخاطرات محیطی و توسعه پایدار در ایران، مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱(۱)، ۷۳-۸۴. doi: 10.22059/jhsci.2024.378814.830
- [۸] موسوی، محمد؛ و بخشی، علی (۱۴۰۱). شناسایی ترک در سازه‌های مصالح بنایی به کمک بینایی کامپیوتر براساس یادگیری عمیق، مجله مهندسی عمران شریف، ۲۳۸(۱،۲)، ۹۹-۱۰۸. doi: 10.24200/j30.2022.59496.3055
- [۹] نقیب هاشمی، سیدسهند؛ اصغری توچائی، سیدامیر؛ و بینش مروستی، محمدرضا (۱۴۰۰). تصمیم‌گیری منفعلانه هوشمند برای حسگرهای بیدارشونده در پایش سازه‌ای، مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ۱۹(۳)، ۱۷۰-۱۸۲.
- [10] Abdelbarr, M., Chen, Y. L., Jahanshahi, M. R., Masri, S. F., Shen, W. M., & Qidwai, U. A. (2017). 3D dynamic displacement-field measurement for structural health monitoring using inexpensive RGB-D based sensor. *Smart materials and structures*, 26(12), 125016. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa9450>.
- [11] Balageas, D., Fritzen, C. P., & Güemes, A. (Eds.). (2010). *Structural health monitoring*, 90. John Wiley & Sons.
- [12] Çelebi, M. (2019). SHM of Buildings in USA. In: Maria Pina Limongelli, Mehmet Çelebi. *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6>.
- [13] Chenaghlou, M.R & Soleimanbeigi, N. (2002). *Structural health monitoring*. 1st conference on seismic retrofitting of structures, Amirkabir University of Technology. Tehran. <https://civilica.com/doc/581>. (in Persian).
- [14] Der Kiureghian, A. (2022). *Structural and System Reliability*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108991889>.
- [15] Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. John Wiley & Sons.
- [16] Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Nix, D. A. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 131-149. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0717>.
- [17] Farrar, C.R., Dervilis, N. & Worden, K. (2025). The Past, Present and Future of Structural Health Monitoring: An Overview of Three Ages. *Strain*, 61(1), p.e12495. <https://doi.org/10.1111/str.12495>.
- [18] Glade, T., & Nadim, F. (2014). Early warning systems for natural hazards and risks. *Natural Hazards*, 70, 1669-1671. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1000-8>.
- [19] Ibrahim, R. A. (2017). *Handbook of structural life assessment*. John Wiley & Sons.
- [20] Johnson, S.B. (2015). *System Health Management*. In: Larry B. Rainey, Andreas Tolk. Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications. John Wiley and Sons. 131-143.
- [21] Kabirsaber, M. B. (2013). Traditional principals for safe construction after earthquake in old Tabriz (wooden coil technique in Qajariieh era residential architecture). *Journal of Architecture and Urban Planning*, 6(11), 59-70. doi: 10.30480/aup.2013.111 (in Persian).
- [22] Kabirsaber, Mohammadbagher., (2015). The concept of “Sazeh” term in discourse of Iranian contemporary architecture. *Journal of the Stylistic of Persian Poem and Prose*, 8(1), 393-404. https://bahareadab.com/article_id/223. (in Persian).
- [23] Mann, A. (2023). *Structural safety: theory & practice*. Whittles Publishing

- [24] Moghimi, E. (2022). Hazards science strategy Does Hazards science have a strategy? *Environmental Management Hazards*, 9(1), 45-54. doi: 10.22059/jhsci.2022.345598.730 (in Persian).
- [25] Moghimi, E. (2024). A new approach to environmental hazards and sustainable development for Iran. *Environmental Management Hazards*, 11(1), 73-84. doi: 10.22059/jhsci.2024.378814.830 (in Persian).
- [26] Moharrami, R., Bayat, AH., Aghaei, S. (2016). Fundamental of Structural Health Monitoring. *Iranian Journal of Sound and Vibration*, 8(4), 3-17. (in Persian)
- [27] Mousavi, M. & Bakhshi, A. (2022). Crack detection in masonry structures using computer vision based on deep learning. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 38.2(2.1), 99-108. doi: 10.24200/j30.2022.59496.3055 (in Persian).
- [28] Naghib hashemi, S., Asghari, S. A., & Binesh Marvasti, M. R. (2022). Autonomous Controlling System for Structural Health Monitoring Wireless Sensor Networks. *Nashriyyah-i Muhandisi-i Barq va Muhandisi-i Kampyutar-i Iran*, 90(3), 170. (in Persian).
- [29] Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2012). *Reliability of structures*. CRC press.
- [30] Perelmuter, A., & Slivker, V. (2013). *Numerical Structural Analysis: Methods, Models and Pitfalls*. Springer Science & Business Media.
- [31] Sarja, A. (2002). *Integrated life cycle design of structures* (142). London: Spon Press.
- [32] Zare, M. & Moghimi, E. (2023). Hazards typology in hazards science (Does hazards science have special types?). *Environmental Management Hazards*, 9(4), 383-390. doi: 10.22059/jhsci.2023.356665.770. (in Persian).
- [33] Smarsly, K., Lehner, K., & Hartmann, D. (2007). Structural health monitoring based on artificial intelligence techniques. In *Computing in Civil Engineering*. 111-118.