Journal of Structural and Construction Engineering, 9(5), 2022, pp. 78-93

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Evaluation of structural health monitoring system in reducing the cost of maintenance and repair of buildings in high seismic areas

Sepideh Rahimi[1]*

1 - Assistant professor, civil engineering. Islamic Azad university of Nour branch, Nour, Iran

ABSTRACT

Today, the structural health monitoring system based on various non-destructive analysis and tests has been greatly expanded in order to better performance and prevent further damage to the structure especially in areas with high seismicity. Given that, various structural health monitoring systems have been introduced. On the other hand, the discussion of maintenance costs with these methods can be helpful in choosing the most optimal method for this purpose. To this end, five new systems for health monitoring of structures, including the method of examining changes in basic information; Finite element model upgrade method, acoustic and ultrasonic method, magnetic field method and thermal field method were selected in 5 categories: management, technical, economic, human source and safety along with 20 sub-criteria in the field of maintenance. Then, through the pairwise comparison questionnaire of analytic hierarchy process method and receiving the opinions of experts in this field, different structural health monitoring systems were evaluated and prioritized to select the optimal system based on the most important criteria of building maintenance. The results showed that the structural health monitoring system by finite element model method has gained the first rank in all 5 main factors of management, technical, economic, human source and safety.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 June 2021
Revise Date: 10 September 2021
Accept Date: 14 November 2021

Keywords: *Health monitoring*
Finite element method
Maintenance
Analytic hierarchy process
High seismic areas

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.290663.2473

*Corresponding author: Sepideh Rahimi.
Email address: rahimi@iaunour.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

ارزیابی سیستم پایش سلامت سازه‌ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای

سپیده رحیمی[1*]

۱-استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

چکیده

امروزه سیستم پایش سلامت سازه بر پایه تحلیل و آزمایش‌های مختلف غیرمخرب بخصوص در مناطق با لرزه خیزی بالا، بمنظور عملکرد بهتر و جلوگیری از بوجود آمدن آسیب‌های بیشتر در سازه، بسیار گسترش یافته است. با توجه به اینکه تاکنون سیستم‌های مختلف پایش سلامت سازه معرفی گردیده است و از سوی دیگر بحث هزینه نگهداری و تعمیرات با این روشها می‌تواند در انتخاب روش بهینه‌تر برای این منظور راهگشا باشد، لذا در این تحقیق به بررسی بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه ای پرداخته شد. بدین منظور پنج سیستم نوین پایش سلامت سازه ها شامل روش بررسی تغییر در اطلاعات پایه‌ای؛ روش به‌روزرسانی مدل المان محدود، روش آکوستیک و اولتراسونیک، روش میدان مغناطیسی و روش میدان حرارتی، در ۵ دسته مدیریتی و فنی و اقتصادی و نیروی انسانی و ایمنی به همراه ۲۰ زیر معیار در حوزه تعمیر و نگهداری انتخاب گردید. سپس از طریق پرسشنامه مقایسات زوجی روش تحلیل سلسله مراتبی و دریافت نظرات متخصصین و خبرگان در این زمینه، به سنجش و اولویت سیستم‌های مختلف پایش سلامت سازه جهت انتخاب سیستم بهینه بر اساس مهمترین معیارهای تعمیر و نگهداری ابنیه پرداخته شد. نتایج نشان داد که سیستم پایش سلامت سازه به روش مدل المان محدود در همه ۵ عامل اصلی مدیریتی، فنی-اجرایی، اقتصادی، نیروی انسانی، ایمنی، رتبه اول ارجحیت را کسب نموده است.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه، روش المان محدود، تعمیر و نگهداری، تحلیل سلسله مراتبی، مناطق پرخطر لرزه‌ای.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۰/۳/۲۴	۱۴۰۰/۶/۱۹	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۱/۵/۰۱	doi: https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.290663.2473
					10.22065/JSCE.2021.290663.2473

***نویسنده مسئول:** سپیده رحیمی
پست الکترونیکی: s_rahimi@iaunour.ac.ir

۱- مقدمه

از گذشته تعیین وضعیت سلامت سازه‌ها و میزان آسیب دیدگی آنها، مخصوصاً تاسیسات و ابنیه دارای اهمیت زیاد همچون پل‌ها، سدها، تونل‌ها، ساختمان‌های با تعداد ساکنان بالا و یا دارای تجهیزات گران قیمت، ساختمان‌های مهم با قابلیت بهره برداری بی وقفه، ساختمان‌های تاریخی و غیره، همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. از همین رو مبحث پایش سلامت سازه (SHM[1]) چند دهه‌ای است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و محققین صنعت ساخت در سراسر دنیا قرار گرفته است [۱-۵]. به طور کلی لفظ پایش سلامت سازه‌ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی اطلاق می‌گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضا) یک سیستم سازه‌ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد به عنوان آسیب تعریف می‌شود [۶]. وقوع خرابی در سیستم‌های سازه‌ای در طول عمر سازه امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. تاکنون نمونه های بسیاری از انواع خرابی‌ها در سازه‌های مختلف مهندسی به ثبت رسیده که در پی وقوع آنها، خسارات جانی و مالی فراوانی به بار آمده است. بیشتر چنین خرابی‌هایی را می‌توان با بررسی‌های اولیه از وضعیت موجود سازه‌ها، اصلاح و ترمیم نمود و بدین ترتیب از گسترش خرابی در سازه‌ها و فرو ریختن ساختمان‌ها جلوگیری کرد [۷]. در زمینه پایش سلامت سازه‌ها، آزمایش‌ها و سیستم‌های سنجش به عنوان ابزاری برای ارائه تشخیص در نظر گرفته شده‌اند که به اپراتور تسهیلات امکان می‌دهد تا یک برنامه تعمیر و نگهداری کارآمد را تدوین کند یا به اقدامات فوق العاده‌ای روی یک ساختار نیاز داشته باشد. از مطالعات انجام شده در زمینه پایش سلامت سازه‌ها می‌توان به تحقیق انجام شده توسط Cawley اشاره کرد. ایشان در تحقیق خود به بررسی پایش سلامت سازه از منظر بستن شکاف بین تحقیق و استقرار صنعتی پرداخته است. در این مقاله دلایل آهسته بودن انجام تحقیقات گسترده در زمینه کاربرد عملی پایش سلامت سازه شامل عدم توجه به چالش‌های اقتصادی، عدم توجه کافی به نحوه برخورد با جریان‌های بزرگ داده و عدم اعتبارسنجی عملکرد در سازه‌های واقعی در محیطهای صنعتی مورد بحث قرار گرفته و راهکارهای پیش رو در راستای بهبود بهره گیری از سیستم پایش سلامت سازه پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این مقاله نشان داد که پایش سلامت سازه این پتانسیل تبدیل شدن به یک تکنولوژی برتر در آینده صنعت ساخت را دارد [۸]. همچنین Metaxa و همکاران در تحقیق خود به مروری بر روشهای پایش سلامت سازه برای مواد کامپوزیتی پرداخته‌اند. در تحقیق مذکور، سیستم‌های پایش سلامت سازه و تکنیک‌های ارزیابی ایمنی عملیاتی زیرساخت‌های مهم تولید انرژی با توجه به وضعیت فعلی، مزایا، معایب و روند توسعه آینده سیستم‌ها و تکنیک‌های موجود سنجش، جمع آوری داده‌ها و انتقال، عملکرد کلی و نگهداری و تعمیرات آنها درخصوص مواد کامپوزیتی مور مطالعه قرار گرفته است [۹]. Alla و Asadi در تحقیق خود اقدام به ارائه یک روش یکپارچه پایش سلامت سازه برای سازه‌های عمرانی نموده‌اند. به طور کلی سیستم‌های پایش سلامت سازه را می‌توان به سیستم‌های مبتنی بر مدل و پایگاه داده تقسیم کرد. مورد اول عمدتاً براساس پارامترهای فیزیکی سازه تحت تأثیر آسیب سازه ایجاد شده است. وقتی داده‌های بدست آمده درخصوص آسیب پذیری سازه دنبال و بررسی شود، از اختلافات موجود در طول دوره تشخیص می‌توان برای اطمینان بیشتر سازه در آینده استفاده نمود. به همین ترتیب، سیستم پایش سلامت سازه مبتنی بر پایگاه داده از روشهای مختلفی برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای استفاده می‌کند. در این روش داده‌های پردازش شده از سازه ممکن است به مدل پایش مبتنی بر فیزیک مسئله سازه مراجعه نکنند. هر دو مدل پایش سلامت سازه طرفداران خاص خود را داشته و جوانب مثبت و منفی آنها هنوز در حال بررسی است. در تحقیق مذکور، با در نظر گرفتن روش پایش سلامت سازه مبتنی بر ارزیابی پایگاه داده، روشهای مختلف ارائه شده در این خصوص در سازه‌های عمرانی در مناطق صنعتی، مسکونی، سواحل و مناطق پرخطر لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۱۰].

از جمله مطالعات داخلی در این زمینه می‌توان به رازانی و دانایی در سال ۱۳۹۳ اشاره کرد. در این مطالعه میزان تاثیر بکارگیری سیستم پایش سلامت در پیشگیری و پیش آگاهی مخاطرات آتی و هزینه‌های محتمل تعمیر و نگهداری آینده و نقش بکارگیری پایش سلامت سازه در تقلیل میزان کاهش تلفات جانی و مالی احتمالی مربوطه مورد بحث قرار گرفته است [۱۱]. نگهدار و همکاران در سال ۱۳۹۶، ابتدا به بررسی مفاهیم پایه‌ای نظارت بر سلامت سازه پرداخته و سپس انواع آسیب‌های سازه‌ای و الگوریتم‌های ارائه شده جهت

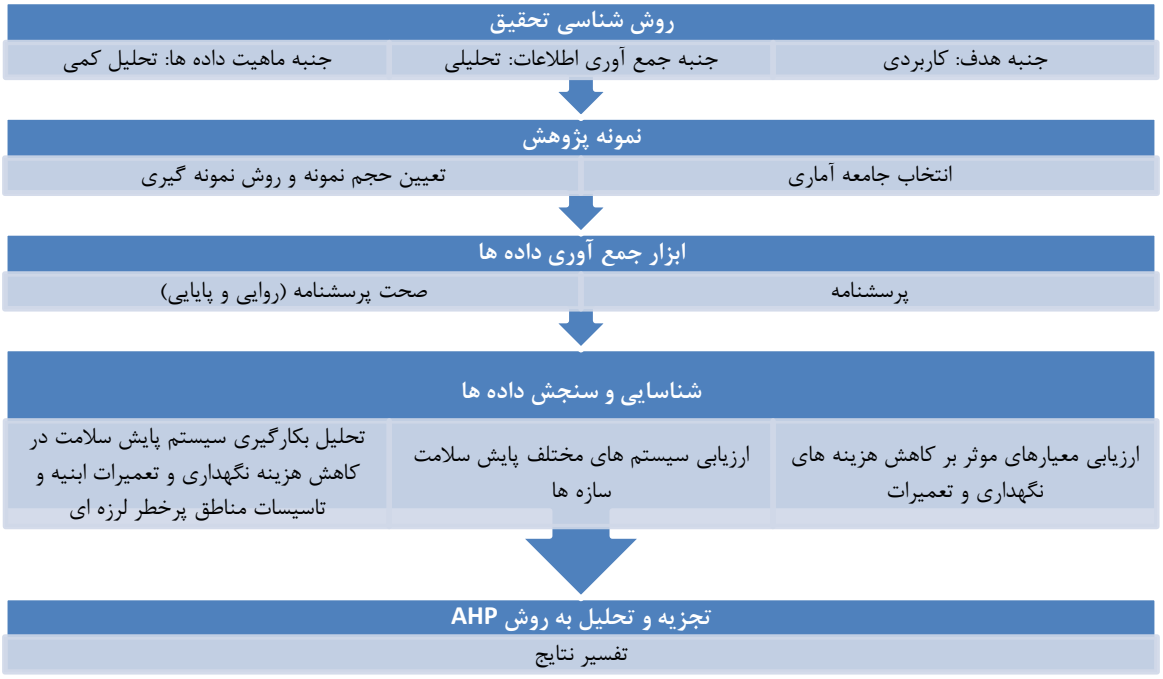
1

کنترل و نظارت بر موارد اجرایی در راستای سلامت سازه‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. همچنین با ارائه ساختارهای سنتی جهت تعمیر و نگهداری سازه‌ها، به بررسی و مقایسه این ساختارها، با ساختارهای نوین و صنعتی در جهت صرفه جویی در زمان، هزینه تعمیر و نگهداری سازه‌ها پرداخته‌اند. علاوه بر این، تغییرات اساسی ایجاد شده توسط سیستم‌های نوین پایش سلامت سازه که جهت تعمیر و نگهداری سازه‌ها راه اندازی گردیده، مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت مکانیزم و عملکرد انواع تکنیک‌ها و سیستم‌های نوین در پایش سلامت سازه مقایسه و شناسایی شده‌اند [۱۲]. حاجی محمد رضایی و نادرپور در سال ۱۳۹۷ به ارزیابی روش‌های پایش سلامت و شناسایی خرابی در سازه‌های بتنی پرداخته‌اند. هدف اصلی این تحقیق بررسی و ارزیابی روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تشخیص خرابی سازه‌ها می‌باشد که در سال‌های اخیر مطرح شده اند. همچنین مطالبی در خصوص توجه به مبحث پایش سلامت سازه و انواع روش‌های پایش سلامت سازه ارائه شده است [۱۳]. رجبی و همکاران در سال ۱۳۹۹، در پژوهش خود به بررسی روش‌های پایش سلامت سازه‌ای در پل‌ها پرداخته‌اند. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های پایش سلامت سازه پل‌ها عدم تحلیل و تفسیر مناسب داده‌های عظیم حاصل از پایش سلامت سازه‌ای به علت محدودیت‌های توانایی محاسباتی و روش‌های تحلیل داده‌ها است. در سال‌های اخیر روش‌های هوش مصنوعی به عنوان روش‌های امیدبخشی برای حل این مسئله در تفسیر داده‌ها به کار گرفته شده است. هدف این مقاله آشنایی با به کارگیری روش‌های کلان داده و هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه‌ای و ارائه آخرین پیشرفت‌های علمی در به کارگیری این روشها برای تشخیص آسیب سازه‌ای در پایش سلامت سازه‌ای است. همچنین در تحقیق مذکور، در مورد چالش‌های پیش رو در این حوزه بحث می‌شود [۱۴].

بر اساس مطالعات ذکر شده، عواملی مانند بالا بودن هزینه‌های تعمیر و مرمت سازه‌های آسیب دیده و همین طور هزینه‌های نگهداری و بازرسی سازه‌های جدیدتر در حجم بالا، قرارگیری ایران در یک منطقه‌ی زلزله‌خیز، بررسی خسارات سازه‌ها ناشی از وقوع زلزله، مسائل شناسایی سیستم‌ها، توسعه سازه‌های هوشمند و پایش سلامت سازه‌ای و بخصوص پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های عمرانی کشور، ضرورت بهره‌گیری از رویکرد پایش سلامت سازه در مسئله تعمیر و نگهداری را بیش از پیش نمایان می‌سازد. مطالعه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که موضوع پایش سلامت سازه‌ها در تحقیقات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. اما تاکنون موضوعی که به صورت هدفمند و منسجم، به بررسی مسئله تحلیل بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای و ارائه یک مدل اولویت بندی برای انتخاب سیستم بهینه بپردازد، مورد بررسی قرار نگرفته و تحقیق جامعی در این خصوص انجام نشده است.

با توجه به مطالب مذکور در تحقیق حاضر تلاش خواهد شد تا با استفاده از روش توصیفی- تحلیلی به بررسی و تحلیل بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای پرداخته شود. بر این اساس ابتدا انواع مختلف روش‌های سیستم پایش سلامت سازه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت و سپس با تعیین مهمترین معیارهای کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای، اقدام به انتخاب روش بهینه پایش سلامت سازه با استفاده از روش‌های تصمیم گیری چندمعیاره خواهد شد.

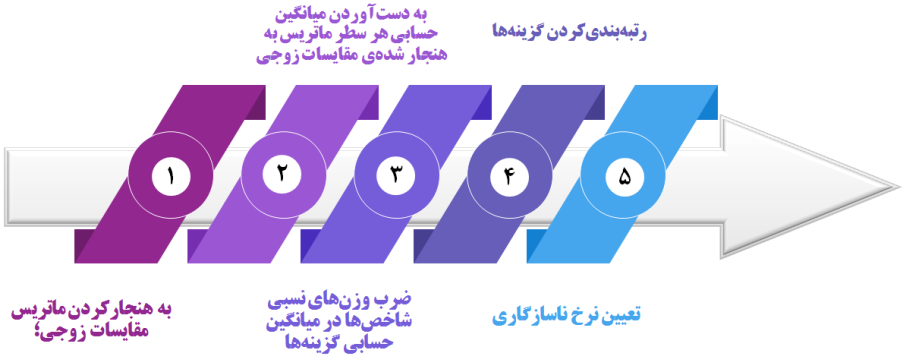
هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تحلیل بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه به منظور کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای و ارائه یک مدل اولویت بندی برای انتخاب سیستم بهینه در این خصوص می‌باشد. بر این اساس، در ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، سیستم‌های مختلف پایش سلامت سازه‌ها و همچنین معیارهای موثر بر کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شناسایی گردید. در ادامه با استفاده از مطالعات میدانی و ابزار پرسشنامه و دریافت نظرات متخصصین و خبرگان در این زمینه، به سنجش سیستم‌های مختلف پایش سلامت سازه بر اساس روش‌های تصمیم گیری چندمعیاره مدیریتی مبتنی بر روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، جهت انتخاب سیستم بهینه بر اساس مهمترین معیارهای تعمیر و نگهداری ابنیه پرداخته شد. گام‌های مختلف اجرایی مورد نیاز جهت دستیابی به اهداف تحقیق حاضر به شرح فلوچارت شکل (۱) ارائه شده است.



شکل۱ : ساختار مدل مفهومی تحقیق

۲- روش تحقیق

در این پژوهش برای سنجش افراد جامعه از ابزار پرسشنامه و تجزیه و تحلیل با استفاده از AHP پرداخته شده است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از جامع و در عین حال متداول‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم گیری با معیارهای چندگانه است. این تکنیک می‌تواند فرموله کردن مسئله تصمیم گیری به صورت یک سلسله مراتب را انجام دهد. و همچنین ساختار و چارچوبی منسجم و یکپارچه جهت همکاری و مشارکت گروهی از متخصصین به منظور تصمیم گیری در ارتباط با دسته‌های زیاد و متنوعی از چالش‌ها و راه حل‌ها ارائه کرده و علاوه بر این بر مبنای این روش، امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی در تحلیل مسئله به راحتی امکان پذیر است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی در هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و معیار تصمیم‌گیری روبروست می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح‌شده می‌توانند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم‌ساختن درخت سلسله مراتب تصمیم‌گیری کار تحلیل را شروع می‌کند. در سطح صفر هدف تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد و در سطح اول شاخص‌ها (معیارها) و در سطح دوم نیز گزینه‌ها جهت اولویت‌بندی قرار دارند، که ممکن است با توجه به نوع مساله تعداد سطوح معیارهای اصلی و فرعی بیشتر باشد. مراحل روش سلسله مراتبی AHP در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل۲ : مراحل روش سلسله مراتبی AHP

با توجه به کمبود وجود متخصصین پایش سلامت سازه‌ها جامعه هدف پژوهش حاضر با تعداد محدود در نظر گرفته شده است. افراد انتخاب شده به عنوان جامعه هدف، خبرگانی هستند که به چهار خصوصیت اصلی یعنی (۱) دانش و تجربه، (۲) تمایل برای شرکت در نظرسنجی، (۳) زمان کافی و (۴) مهارت‌های ارتباطی مجهز هستند. همچنین نحوه انتخاب افراد مطلع در پژوهش حاضر به صورت نمونه گیری گلوله برفی براساس تجربه شخصی محقق و تجربه خبرگان در این پژوهش و با توجه به دسترس بودن افراد جامعه هدف می‌باشد. در تحقیقات، نمونه گیری "گلوله برفی" به تکنیکی اطلاق می شود که در آن افراد موجود در مطالعه افراد بعدی را معرفی می کنند. بنابراین گروه نمونه به نظر شبیه به یک گلوله برفی غلتان رشد می‌کند. همچنان که نمونه ساخته می‌شود اطلاعات کافی برای استفاده در تحقیق جمع آوری می‌گردد. این تکنیک نمونه‌گیری اغلب در جمعیت‌هایی که در دسترس به آنها برای محقق مشکل است یا تعداد آنها بسیار محدود است، به کار می‌رود. در این تحقیق پس از نمونه‌های اولیه شناسایی شده (۳ نفر از متخصصین در مصاحبه اول) و با معرفی سایر افراد توسط آنها، در مجموع تعداد شرکت کنندگان، ۱۰ نفر تعیین شد. از نظر محقق، در نظر گرفتن این تعداد به عنوان نمونه آماری، منجر به کسب و دریافت اطلاعات کافی شد و از سوی دیگر پرسشنامه مقایسات زوجی روش AHP نیاز به تعداد خبره محدود در حد ۵ الی ۱۰ نفر داشته و این تعداد بر مقایسات زوجی کفایت می‌کند.

۲-۱- اعتبارسنجی

با توجه به اینکه تحقیق حاضر از نوع پژوهش های میدانی بوده و تحلیل نتایج آن براساس نظرات خبرگان و متخصصین صنعت ساخت و ساز کشور به انجام خواهد رسید، لذا بهترین شیوه برای دستیابی به اعتبارسنجی نتایج حاصله، تعیین روایی و پایایی ابزار مورد استفاده در تحقیق پیمایشی می‌باشد. این صحت سنجی کمک می‌کند که در صورت عدم تایید و عدم دقت کافی سوالات مندرج در ابزار براساس نظرات کارشناسان، محقق اقدام به تنظیم مجدد آن نماید. در بخش ابزار مصاحبه در این تحقیق برای تعیین روایی بدین صورت عمل شده است که پیش از شروع مصاحبه های اصلی با خبرگان، سوالات با یکی از متخصصان صنعت ساخت کنترل شد که دارای تجربه کافی در زمینه خدمات مشاوره بوده است. این مصاحبه نشان داد که برخی سوالات باید از وضوح بیشتری برخوردار باشند و از اینرو روایی پرسش‌ها مجدداً مورد بازبینی قرار گرفت. همچنین مشخص شد که معیارهای شبیه بهم نباید پرسش شوند، زیرا هم سبب خستگی مصاحبه شونده و طولانی شدن روند مصاحبه شده و مصاحبه شونده نمی‌تواند مجددا ذهن خود را برای بررسی علل مختلف مشکل متمرکز کند. همچنین در این پژوهش برای تعیین روایی محتوایی ابزار پرسشنامه از روش *CVR*، استفاده شده است. برای تعیین *CVR* از مصاحبه شوندگان درخواست شد تا اهمیت هر یک از آیتم‌های شناسایی شده را براساس نظرسنجی مبتنی بر طیف سه قسمتی شامل "ضروری است"، "مفید است، ولی ضرورتی ندارد" و "ضرورتی ندارد" تعیین نمایند. سپس طبق نظرات متخصصین مبتنی بر پاسخگویی با طیف سه قسمتی مذکور، از فرمول (۱) برای تعیین آن استفاده گردید:

$$CVR = \frac{n_E - (N/2)}{N/2} \qquad (۱)$$

به طوری که در این رابطه، n_E تعداد متخصصان با نظر ضروری و N نیز تعداد کل متخصصان پاسخگو می‌باشند. اگر مقدار محاسبه شده از مقدار ارائه شده در جدول (۱) بزرگتر باشد، اعتبار محتوای آن آیتم پذیرفته می‌شود.

جدول۱ : جدول تصمیم گیری در مورد روایی محتوایی براساس مقدار ضریب CVR

پانل(خبرگان) افراد تعداد	CVRمقدار	پانل(خبرگان) افراد تعداد	CVRمقدار	پانل(خبرگان) افراد تعداد	CVRمقدار
۵	۰,۹۹	۱۱	۰,۵۹	۲۵	۰,۳۷
۷	۰,۹۹	۱۳	۰,۵۴	۳۵	۰,۳۱
۸	۰,۸۵	۱۴	۰,۵۱	۴۰	۰,۲۹
۹	۰,۷۸	۱۵	۰,۴۹		
۱۰	۰,۶۲	۲۰	۰,۴۲		

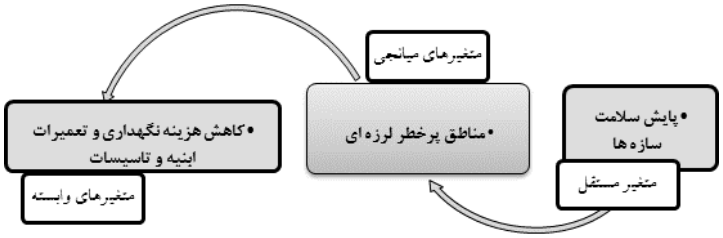
همچنین در این تحقیق به منظور تعیین پایایی درونی آزمون (درستی و خوب بودن)، از روش پایایی ترکیبی (CR) استفاده شده است. برتری این روش نسبت به سایر روش‌های تعیین پایایی همچون ضریب آلفای کرونباخ، این است که پایایی عوامل نه به صورت مطلق، بلکه با توجه به همبستگی عوامل با یکدیگر محاسبه می‌گردد. مقدار CR از یک نسبت کسری مطابق رابطه (۲) حاصل می‌شود:

$$CR = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} Factor\ Rate\right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} Factor\ Rate\right)^2 + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} Factor\ Rate\right)^2} \qquad (۲)$$

طبق رابطه (۲)، در صورت این کسر، واریانس بین یک عامل با سایر عوامل و در مخرج کسر، واریانس عامل با سایر عوامل به اضافه مقدار خطای اندازه گیری می‌آید. مقدار برابر و بیشتر از ۰/۷ برای CR نشان از پایایی درونی مناسب برای مدل‌های اندازه گیری دارد.

۲-۲- متغیرهای تحقیق

با توجه به هدف اصلی تعریف شده در پژوهش حاضر یعنی تحلیل بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه‌ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای با روش تصمیم گیری چند معیاره سلسله مراتبی، پارامترهای شناسایی شده موثر بر این فرآیند معرفی می‌شود. می‌توان متغیرهای مورد بررسی در تحقیق حاضر را به سه دسته متغیرهای مستقل، میانجی و وابسته به شرح الگوی شکل (۳) دسته بندی شده است.



شکل ۳: ساختار مدل مفهومی تحقیق

پس از مطالعات و بررسی‌های گسترده در زمینه پایش سلامت سازه‌ها به منظور کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای، ۵ روش مهم و نوین انتخاب شد که در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین معیارهای موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در راستای بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه نیز گرداوری و در جدول (۳) بصورت ۵ دسته اصلی (مدیریتی، فنی و اجرایی، اقتصادی، نیروی انسانی، ایمنی) و ۲۰ پارامتر فرعی معرفی شده است (جدول ۳). ذکر این نکته ضروری است که به منظور سهولت در روند محاسبات و همچنین عدم تداخل متن، اقدام به نامگذاری هر یک از روش‌ها با نماد و حروف انگلیسی (S1 تا S5) و نامگذاری معیارها با شاخص‌های C1 تا C20 شده است.

جدول۲ : متغیرهای شناسایی شده مؤثر بر جریان تحقیق حاضر

انواع روش پایش سلامت	شاخص
روش ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای	S1
روش به‌روزرسانی مدل المان محدود	S2
روش‌های آکوستیک و اولتراسونیک	S3
روش‌های میدان مغناطیسی	S4
روش‌های میدان حرارتی	S5

جدول ۳ : پارامترهای موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در راستای بکارگیری سیستم پایش سلامت سازه

عامل اصلی	زیرعامل (فرعی)	شاخص
مدیریتی Management	برنامه‌ریزی منسجم و دوره‌ای برای انجام تعمیرات	C1
	بهینه‌سازی زمان برای فعالیت‌های تعمیرات	C2
	ثبت جزئیات اطلاعاتی در چک‌لیست‌های کنترل نگهداری و تعمیرات انجام شده	C3
	تهیه انواع گزارش‌های عملیاتی و استفاده از نرم‌افزارهای به‌روز و موجود در بازار	C4
	تهیه گزارش‌های عملیاتی و مدیریتی از روند نگهداری و تعمیرات	C5
فنی و اجرایی Technical	در نظر گرفتن روند خرابی	C6
	مدت زمان توقف تأسیسات در صورت بروز خرابی	C7
	استفاده، رؤیت و ویرایش نقشه‌های تهیه‌شده در کاتالوگ‌ها	C8
	افزایش مقاومت و کیفیت سازه	C9
	کنترل آلاینده‌های زیست محیطی	C10
	افزایش کارایی کل اعضای سازه	C11
اقتصادی Economical	تامین منابع مالی و فیزیکی مورد نیاز جهت انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات	C12
	میزان هزینه چرخه حیات	C13
	آنالیز فنی اقتصادی نگهداری و تعمیرات انجام شده	C14
	میزان هزینه انرژی مصرفی	C15
	افزایش قابلیت اطمینان دستگاه ها و تجهیزات سازه	C16
نیروی انسانی Human source	ابزار و نیروی انسانی لازم برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات	C17
	نیاز به نیروی کار متخصص	C18
ایمنی Safety	پیروی از دستورالعمل‌ها و استانداردهای ایمنی در نصب، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات	C19
	نصب هشدارهای خودکار بر روی تأسیسات	C20

مطابق جدول (۲)، روش اول، ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای به بررسی تغییرات ناشی از اطلاعات پایه‌ای مودال همچون تغییر فرکانس‌ها، تغییر شکل‌های مودی، تغییر در نرمی سازه، تغییر انحنا و کرنش مودها و تغییر در میرایی مودها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در روش دوم، به روز رسانی مدل المان محدود، ابتدا پاسخ سازه با استفاده از حسگرهای مختلف نصب شده در اجزا و نقاط مختلف سازه جمع آوری و پس از تحلیل سازه، بر اساس پاسخ بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی و یا آنالیز مودال، به کمک یک الگوریتم پایش سلامت، عملیات آسیب یابی و رفع نقص در جزئی از سازه که دچار آسیب شده، انجام می‌شود. در روش سوم، آکوستیک و اولتراسونیک، ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی جزئی از سازه تحت بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرد و با کنترل تغییر مکان‌های ایجاد شده در آن جزء، به تحلیل پیوسته انتشار امواج آکوستیک ناشی از شکست مصالح و یا وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک، رفتار ترک خوردگی و مواردی از این دست پرداخته می‌شود. سپس، سیگنال‌های آکوستیک از طریق یک شبکه نامتراکم از طریق حسگرهای آکوستیک تعبیه شده بر روی جزء سازه‌ای مورد بررسی، انتشار یافته و پس از دریافت آن توسط جزء سازه و برداشت پیوسته سیگنال‌های خروجی در طول آزمایش، پارامتر غربال و پایش سلامت سازه انتخاب می‌گردد. در روش چهارم، میدان مغناطیسی، با مغناطیسی کردن ماده مورد بررسی، ناپیوستگی مغناطیسی (خرابی) را می‌توان شناسایی کرد. بنابراین، حضور ناپیوستگی بوسیله ذرات فرومغناطیسی که با ظرافت تقسیم بندی شده‌اند، شناسایی خواهد شد. در نهایت این ترکیب ذرات مغناطیسی شده تشکیل یک برجستگی در محل ناپیوستگی(خرابی) می‌دهند، که سبب مشخص نمودن اندازه، شکل، مکان و گستردگی خرابی در عضو مورد بررسی می‌کنند. در روش پنجم، میدان حرارتی، از دستگاه‌هایی برای اندازه گیری دمای سازه استفاده می‌شود و بر اساس آن وضعیت خرابی سازه و میزان آن تجزیه و تحلیل می‌گردد.

پس از تعیین روش‌ها و پارامترهای موثر در انتخاب روش بهینه سیستم پایش سلامت سازه‌ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه ای، در ادامه تلاش شده است تا یک الگوی اجرایی از منظر مدیریت ساخت و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ارائه گردد. برای این منظور پس از ادغام روشهای مختلف و پارامترهای موثر در انتخاب روش بهینه، اقدام به انجام مقایسه زوجی بین همه روشهای و معیارهای شناسایی شده نسبت به هم انجام شده است. مقایسات توسط متخصصان و برای

۲۰ معیار انتخاب شده در ۵ روش انجام یافته است. تحلیل‌های لازم روی این نظرات انجام شده و نتایج وزن نهایی در ادامه در قالب جداول ارائه می‌گردد.

۳- تجزیه و تحلیل

با توجه به اینکه اطلاعات جمعیت شناختی خبرگان انتخاب شده به عنوان نمونه آماری تحقیق مشتمل بر ۱۰ نفر (متناسب با نیاز روش AHP) از متخصصین در حوزه امور پایش سلامت سازه، در چهار پارامتر اصلی شامل سابقه کار عمرانی، حوزه و سمت کاری در پروژه و میزان تحصیلات مورد سنجش قرار گرفته است که در جدول (۴)، نتایج مربوط به فراوانی این پارامترها براساس مولفه های مختلف ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۴)، ۱۰۰ درصد خبرگان تحصیلات بیش از مقطع لیسانس دارند و همچنین ۸۰ درصد افراد تجربه کاری بیش از پنج سال در زمینه پایش سلامت سازه برخوردارند و در بخش سمت کاری نیز مشاهده می‌شود که خبرگان شامل ۶۰٪ مهندس پروژه و و ۳۰٪ مدیر پروژه و ۱۰٪ نیز پیمانکار دارای تحصیلات سازه‌ای می‌باشند که به بررسی داده‌های تحقیق پرداخته‌اند. بدین وسیله، ویژگی های نمونه آماری تحقیق، پاسخ‌ها قابل اعتماد بوده و می‌تواند در دستیابی به هدف نقش موثرتری داشته باشد.

جدول ۴ : جدول ۴-۴ فراوانی پارامترهای جمعیت شناختی خبرگان

پارامتر	مؤلفه	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجمعی
سابقه کار پروژه پایش سلامت سازه	کمتر از ۵ سال	۲	۲۰	۲۰
	۵ تا ۱۰ سال	۳	۳۰	۵۰
	۱۰ تا ۱۵ سال	۳	۳۰	۸۰
	بیش از ۱۵ سال	۲	۲۰	۱۰۰
سمت کاری	مهندس پروژه	۶	۶۰	۶۰
	مشاور پروژه	۳	۳۰	۹۰
	کارفرما	۰	۰	۹۰
	پیمانکار	۱	۱۰	۱۰۰
میزان تحصیلات	فوق دیپلم	۰	۰	۰
	لیسانس	۳	۳۰	۳۰
	فوق لیسانس	۵	۵۰	۸۰
	دکترا	۲	۲۰	۱۰۰

گام‌های تحلیل داده‌ها به روش AHP بدین صورت است که ابتدا وزن عوامل اصلی از طریق ماتریس‌های مقایسات زوجی حاصل و سپس وزن تک تک عوامل فرعی در دسته مخصوص به خود از طریق ماتریس‌های مقایسات زوجی حاصل می‌شود. در مرحله سوم اهمیت هر سیستم از ۵ مورد سیستم پایش سلامت سازه در ۲۰ عامل فرعی بصورت مقایسات زوجی بررسی و سپس یافته های حاصل از این مرحله، اولویت روش‌ها در هر عامل فرعی و همچنین هر عامل اصلی و اولویت نهایی نسبت به هدف مشخص می‌گردد. جداولی که در ادامه آمده است، میانگین حسابی نظرات خبرگان پاسخ دهنده به جداول مقایسات زوجی را نشان می‌دهد. در حالت کلی می توان گفت که میزان قابل قبول ناسازگاری یک ماتریس یا سیستم، به تصمیم گیرنده بستگی دارد و معمولاً عدد ۱۰ درصد به عنوان حد قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. یعنی چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از ۱۰ درصد باشد، بهتر است در قضاوت ها تجدید نظر صورت پذیرد.

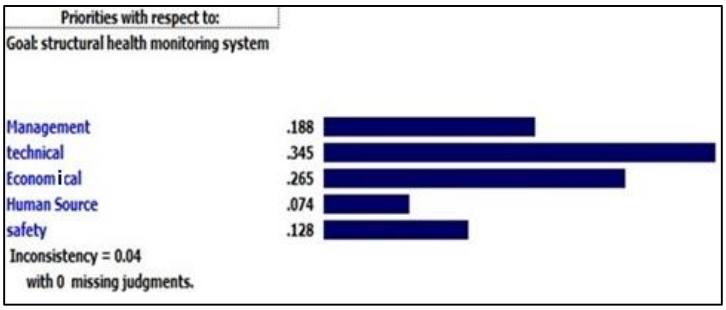
جهت محاسبه وزن در ابتدا برای به‌دست آوردن اهمیت معیارها و زیرمعیارها، کلیه آنها توسط ماتریس مقایسه زوجی با یکدیگر مقایسه می‌شوند و با روش‌های مختلفی، وزن تک تک معیارها و زیرمعیارها به‌دست می‌آید که به آنها وزن نسبی گفته می‌شود. به منظور

مقایسه و تعیین وزن نسبی هر معیار و زیرمعیار نسبت به دیگری از روش ارزش گذاری شدت ارجحیت مقایسه‌های زوجی شاخص‌ها منطبق بر جدول (۵) استفاده شده است.

جدول (۵): ارزش گذاری شدت ارجحیت مقایسات زوجی شاخص‌ها نسبت به هم در تحلیل AHP

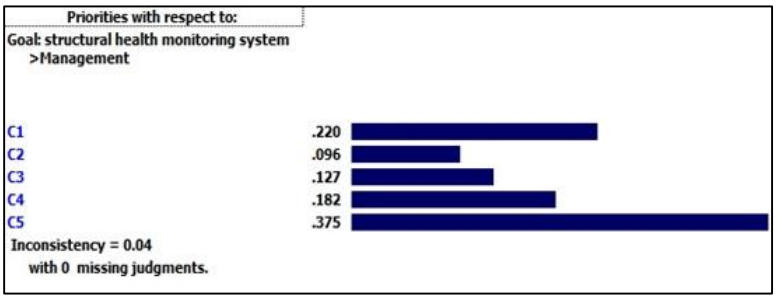
مقیاس	رتبه عددی	معکوس
ترجیح به شدت قوی	9	1/9
ترجیح خیلی زیاد تا بشدت قوی	8	1/8
ترجیح خیلی زیاد	7	1/7
ترجیح زیاد تا خیلی زیاد	6	1/6
ترجیح زیاد	5	1/5
ترجیح متوسط تا زیاد	4	1/4
ترجیح متوسط	3	1/3
ترجیح برابر تا یکسان	2	1/2
ترجیح یکسان یا برابر	1	1

به منظور تعیین وزن عوامل اصلی نسبت به هم، مقایسات زوجی آنها توسط خبرگان انجام شد. وزن نهایی عوامل اصلی در نمودار شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ سازگاری مقایسات کمتر از ۰,۱ می‌باشد که نشان از سازگاری پاسخ‌ها است.



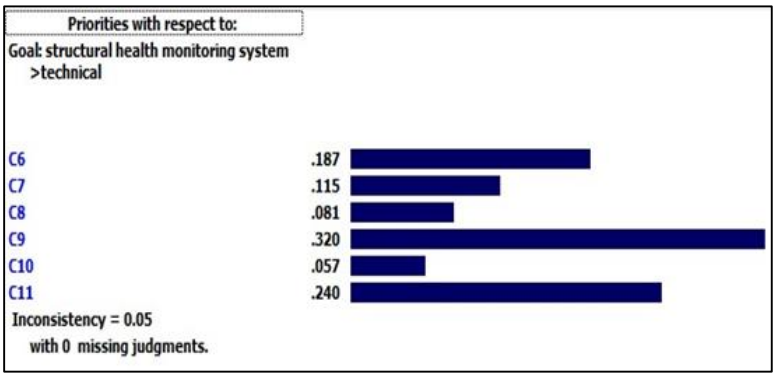
شکل۴: وزن عوامل اصلی موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج اولویت بندی عوامل اصلی نشان می‌دهد که در بین عوامل اصلی موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای، رتبه اول به عامل فنی و اجرایی با وزن ۰,۳۴۵ و رتبه دوم به عامل اقتصادی با وزن ۰,۲۶۵ و رتبه سوم به عامل مدیرتی با وزن ۰,۱۸۸ اختصاص یافته است. پس از برآورد نظرات کارشناسان براساس مقایسات زوجی حاصل از روش AHP، محاسبات لازم بر روی عوامل فرعی هر کدام از معیارهای اصلی انجام شده است. وزن نهایی عوامل فرعی در نمودار شکل‌های (۵) تا (۹) ارائه گردید.



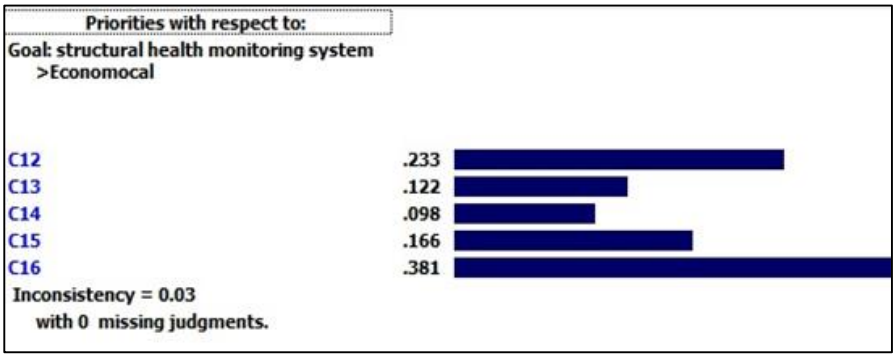
شکل ۵: وزن عوامل مدیریتی موثر بر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج نشان می‌دهد در بین عوامل مدیریتی، عامل تهیه گزارش‌های عملیاتی و مدیریتی از روند نگهداری و تعمیرات با وزن ۰,۳۷۵ رتبه اول، عامل برنامه‌ریزی منسجم و دوره‌ای برای انجام تعمیرات، با وزن ۰,۲۲۰ رتبه دوم و عامل تهیه انواع گزارش‌های عملیاتی و استفاده از نرم‌افزارهای به‌روز و موجود در بازار، با وزن ۰,۱۸۲ رتبه سوم را کسب نموده است.



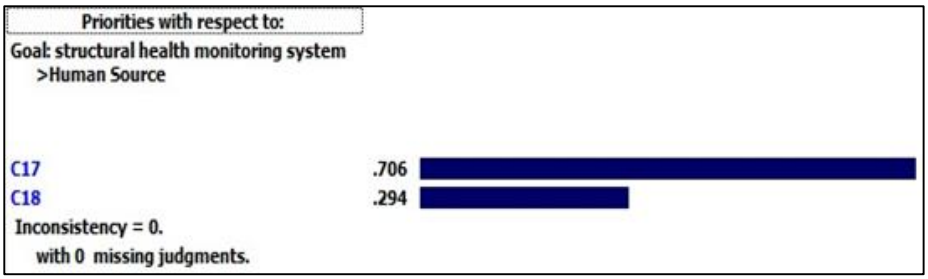
شکل ۶: وزن عوامل فنی و اجرایی موثر بر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج نشان می‌دهد که در بین عوامل فنی و اجرایی، عامل افزایش مقاومت و کیفیت سازه با وزن ۰,۳۲۰ رتبه اول، عامل افزایش کارایی کل اعضای سازه ، با وزن ۰,۲۴۰ رتبه دوم و عامل در نظر گرفتن روند خرابی، با وزن ۰,۱۸۷ رتبه سوم را کسب نموده است.



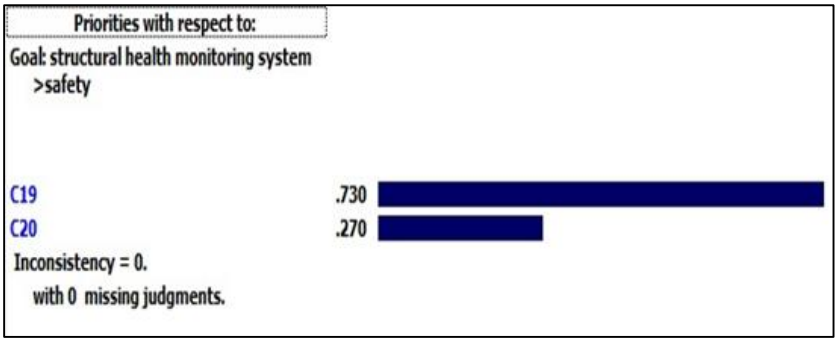
شکل ۷: وزن عوامل اقتصادی موثر بر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج وزن نهایی طبق نمودار شکل (۷) نشان می‌دهد که در بین عوامل اقتصادی، عامل افزایش قابلیت اطمینان دستگاه ها و تجهیزات سازه با وزن ۰,۳۸۱ رتبه اول، عامل تامین منابع مالی و فیزیکی مورد نیاز جهت انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات " با وزن ۰,۲۳۳ رتبه دوم و عامل میزان هزینه انرژی مصرفی" با وزن ۰,۱۶۶ رتبه سوم را کسب نموده است.



شکل ۸: وزن عوامل نیروی انسانی موثر بر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج وزن نهایی طبق نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که در بین عوامل نیروی انسانی، عامل ابزار و نیروی انسانی لازم برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات با وزن ۰,۷۰۶ رتبه اول، عامل نیاز به نیروی کار متخصص " با وزن ۰,۲۹۴ رتبه دوم را کسب نموده است.



شکل ۹: وزن عوامل ایمنی موثر بر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای

نتایج وزن نهایی طبق نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که در بین عوامل نیروی انسانی، عامل پیروی از دستورالعمل‌ها و استانداردهای ایمنی در نصب، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات با وزن ۰,۷۳۰ رتبه اول، عامل نصب هشدارهای خودکار بر روی تأسیسات " با وزن ۰,۲۷۰ رتبه دوم را کسب نموده است.

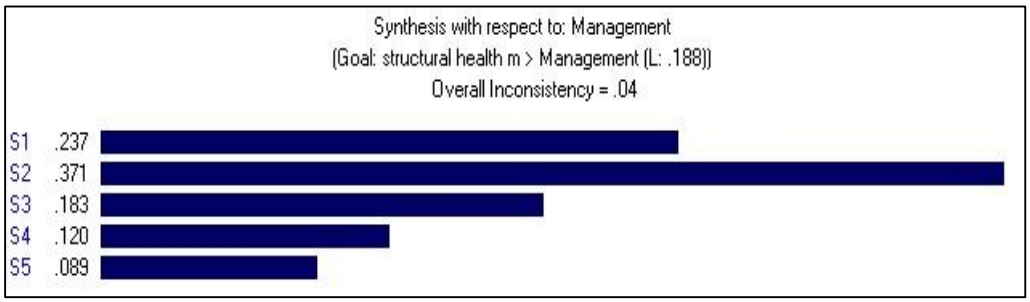
در ادامه به بررسی مقایسات زوجی اولویت هر سیستم از ۵ مورد معرفی شده در جدول (۲)، در هر عامل فرعی (۲۰ عامل فرعی) جدول (۳) پرداخته شده است. به صورت خلاصه رتبه اول و دوم این مقایسات در جدول (۶) ارائه گردید.

پس از تحلیل داده‌ها و بررسی همه ۲۰ عامل فرعی موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای در ۵ گزینه پیشنهادی سیستم پایش سلامت سازه، وزن نهایی همه انواع سیستم‌ها در عوامل اصلی مدیریتی، فنی، اقتصادی، نیروی انسانی، ایمنی تحلیل شد. نتایج در نمودار شکل (۱۰) تا (۱۴) ارائه شده است.

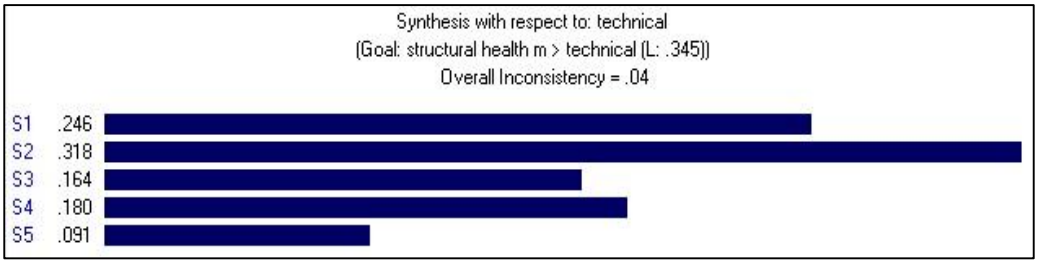
جدول (۶): رتبه اول و دوم روشهای پایش سلامت نسبت به ۲۰ عامل فرعی

عامل	رتبه اول	رتبه دوم
برنامه‌ریزی منسجم و دوره‌ای برای انجام تعمیرات	**مدل المان محدود** با وزن ۰,۳۸۳	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه با وزن ۰,۲۸۵
بهینه‌سازی زمان برای فعالیت‌های تعمیرات	**ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای** با وزن ۰,۳۵۴	آکوستیک و التراسونیک با وزن ۰,۲۴۴
ثبت جزئیات اطلاعاتی در چک‌لیست‌های کنترل نگهداری و تعمیرات انجام شده	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۴۰۸	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه ای با وزن ۰,۲۵۳
تهیه انواع گزارش‌های عملیاتی و استفاده از نرم‌افزارهای به‌روز و موجود در بازار	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۴۳۴	آکوستیک و اولتراسونیکا با وزن ۰,۲۱۸
تهیه گزارش‌های عملیاتی و مدیریتی از روند نگهداری و تعمیرات	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۸۰	آکوستیک و اولتراسونیک با وزن ۰,۲۰۲
در نظر گرفتن روند خرابی	**میدان مغناطیسی** با وزن ۰,۳۴۱	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۴۳
مدت زمان توقف تأسیسات در صورت بروز خرابی	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۴۳	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۶۶
استفاده، رؤیت و ویرایش نقشه‌های تهیه‌شده در کاتالوگ‌ها	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۴۱۳	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۳۳
افزایش مقاومت و کیفیت سازه	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۵۷	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۳۵
کنترل آلاینده‌های زیست محیطی	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۴۷	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۵۹
افزایش کارایی کل اعضای سازه	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۲۵	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۵۴
تامین منابع مالی و فیزیکی مورد نیاز جهت انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات	میدان حرارتی با وزن ۰,۳۳۵	میدان مغناطیسی با وزن ۰,۲۳۱
میزان هزینه چرخه حیات	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۸۹	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۴۴
آنالیز فنی اقتصادی نگهداری و تعمیرات انجام شده	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۹۲	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۵۹
میزان هزینه انرژی مصرفی	مدل المان محدود با وزن ۰,۳۶۶.	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۶۹
افزایش قابلیت اطمینان دستگاه ها و تجهیزات سازه	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۵۴	میدان مغناطیسی با وزن ۰,۲۵۴
ابزار و نیروی انسانی لازم برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۷۱	میدان مغناطیسی با وزن ۰,۲۴۸
نیاز به نیروی کار متخصص	مدل المان محدود با وزن ۰,۳۴۳.	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای با وزن ۰,۲۴۸

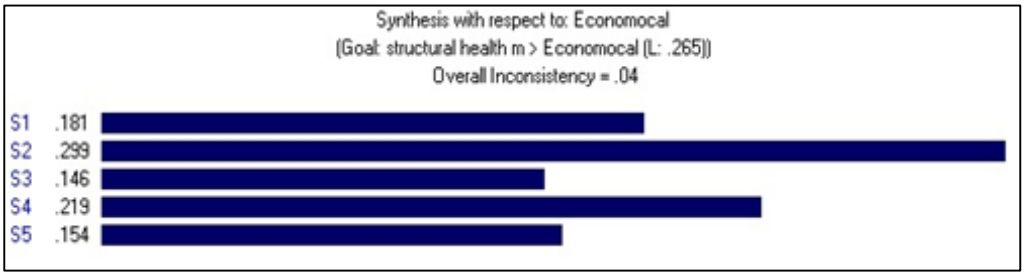
پیروی از دستورالعمل‌ها و استانداردهای ایمنی در نصب، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۸۱	ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای را با وزن ۰.۲۵۴
نصب هشدارهای خودکار بر روی تأسیسات	مدل **المان محدود** با وزن ۰,۳۶۶	آکوستیک و اولتراسونیک با وزن ۰,۲۹۷



شکل ۱۰: نمودار وزن ۵ سیستم پایش سلامت سازه در عامل اصلی مدیریتی

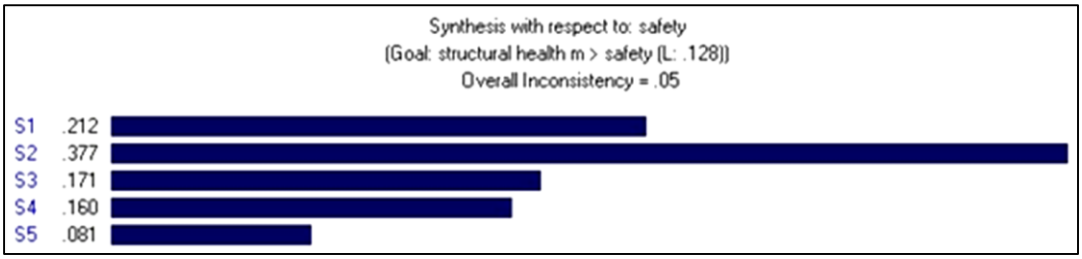


شکل ۱۱: نمودار وزن ۵ سیستم پایش سلامت سازه در عامل اصلی فنی و اجرایی



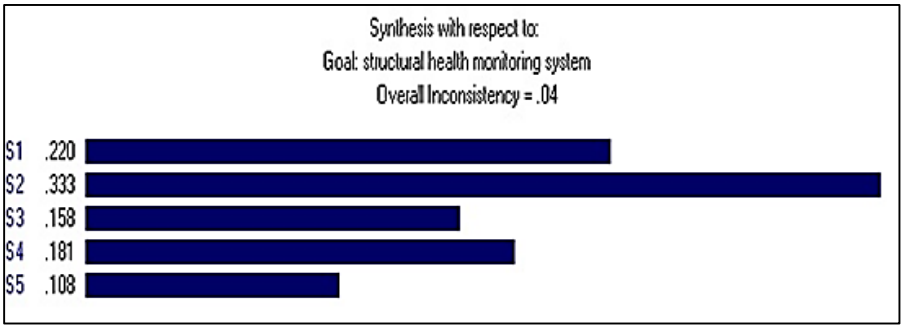
شکل ۱۲: نمودار وزن ۵ سیستم پایش سلامت سازه در عامل اصلی اقتصادی

شکل ۱۳: نمودار وزن ۵ سیستم پایش سلامت سازه در عامل اصلی نیروی انسانی



شکل ۱۴: نمودار وزن ۵ سیستم پایش سلامت سازه در عامل اصلی ایمنی

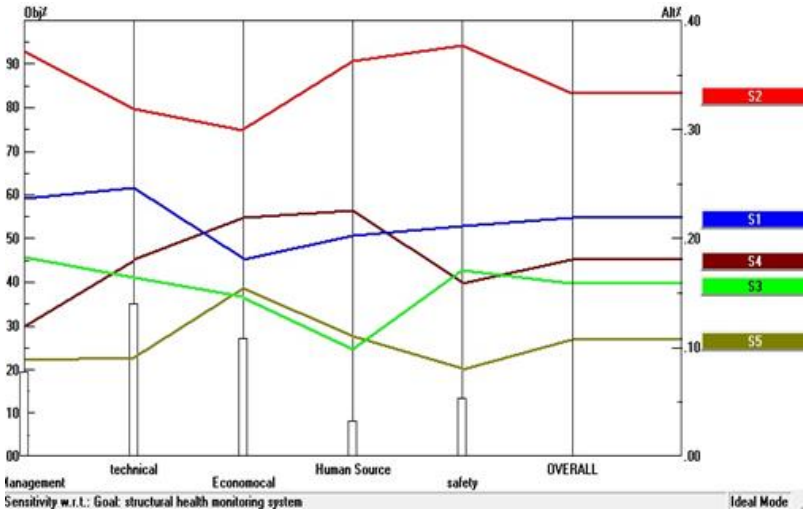
مطابق نتایج نمودارها، سیستم پایش سلامت سازه به روش مدل المان محدود در همه ۵ عامل اصلی مدیریتی، فنی-اجرایی، اقتصادی، نیروی انسانی، ایمنی، رتبه اول ارجحیت را کسب نموده است. پس از مجموع فرایند تحلیل‌های نهایی همه عوامل اصلی و فرعی موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای در سیستم‌های پایش سلامت سازه، نتایج اولویت بندی و ارجحیت در نمودار شکل (۱۵) ارائه شده است.



شکل ۱۵: وزن نهایی اولویت بندی بکارگیری سیستم‌های پایش سلامت سازه در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای

مطابق نتیجه ارائه شده در نمودار شکل (۱۵)، اولویت بندی سیستم های پایش سلامت سازه در هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه ای مربوط به روش مدل المان محدود است.

این رتبه بندی در نمودار آنالیز حساسیت سیستم‌های پایش سلامت سازه نیز قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۱۶). در واقع آنالیزهای حساسیت انجام شده بر روی گره هدف حساسیت گزینه‌ها را نسبت به تمام معیارهای موجود در زیر هدف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است سیستم دوم که مربوط به مدل المان محدود می‌باشد در مجموع حساسیست بالاتری را کسب نموده است.



شکل ۱۶: نمودار آنالیز حساسیت سیستم ها

۴- نتیجه گیری

پس از مطالعات و بررسی‌های گسترده در زمینه پایش سلامت سازه‌ها به منظور کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای، ۵ روش مهم و نوین انتخاب شد. این روش‌ها شامل ارزیابی تغییرات در اطلاعات پایه‌ای، روش به‌روزرسانی مدل المان محدود، روش آکوستیک و اولتراسونیک، روش میدان مغناطیسی، روش میدان حرارتی است. نتایج بررسی پارامترهای موثر بر کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات در مناطق پرخطر لرزه‌ای نشان داد که می‌توان ۵ عامل اصلی و ۲۰ عامل فرعی بدین منظور درنظر گرفت. بدین منظور عامل مدیریتی با ۵ زیرعامل، عامل فنی و اجرایی با ۶ زیرعامل، عامل اقتصادی با ۵ زیرعامل، عامل نیروی انسانی با ۲ زیرعامل و عامل ایمنی با ۲ زیرعامل دنظر گفته شد. پس از تعیین روش‌ها و پارامترهای موثر در انتخاب روش بهینه سیستم پایش سلامت سازه ها در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای، یک الگوی اجرایی از منظر مدیریت ساخت و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ارائه گردید. مقایسات زوجی AHP توسط متخصصان و برای ۲۰ معیار انتخاب شده در ۵ روش انجام یافت. متخصصان شامل ۱۰ خبره در زمینه پایش سلامت سازه بودند که ۸۰ درصد افراد تجربه کاری بیش از پنج سال در زمینه پایش سلامت سازه برخوردار بوده و ۱۰۰ درصد خبرگان تحصیلات بیش از مقطع لیسانس داشتند. نتایج ماتریس های مقایسات زوجی نشان داد که ۱۰ خبره به نحوی به مقایسات زوجی پاسخ داده اند که تمام پاسخ ها سازگار بوده و در تمام ماتریس‌ها نرخ ناسازگاری کمتر از ۰,۱ حاصل شده است. نتایج حاصله به شرح زیر است:

- سیستم پایش سلامت سازه به روش مدل المان محدود در همه ۵ عامل اصلی مدیریتی، فنی-اجرایی، اقتصادی، نیروی انسانی، ایمنی، رتبه اول ارجحیت را کسب نموده است.
- در سه عامل مدیریتی، فنی-اجرایی و ایمنی رتبه دوم به سیستم ارزیابی تغییرات اطلاعات پایه‌ای اختصاص یافته و در عامل نیروی انسانی و اقتصادی رتبه دوم را عامل میدان مغناطیسی کسب نموده است.
- رتبه سوم در عامل مدیریتی و ایمنی به سیستم آکوستیک و اولتراسو.نیک و در عامل فنی اجرایی به سیستم میدان مغناطیسی و در عامل اقتصادی و نیروی انسانی به سیستم ارزیابی تغییرات اطلاعات پایه‌ای اختصاص یافته است.
- اولویت بندی سیستم‌های پایش سلامت سازه در هزینه نگهداری و تعمیرات ابنیه و تاسیسات مناطق پرخطر لرزه‌ای عبارتست از:

۱) رتبه اول: سیستم پایش سلامت سازه به روش مدل المان محدود (S1) با وزن ۰,۳۳۳

۲) رتبه دوم: سیستم پایش سلامت سازه به روش چک کردن تغییر اطلاعات پایه ای(S2) با وزن ۰,۲۲۰

۳) رتبه سوم: سیستم پایش سلامت سازه به روش میدان مغناطیسی (S3) با وزن ۰,۱۸۱

۴) رتبه چهارم: سیستم پایش سلامت سازه به روش آکوستکی و اولتراسونیک (S4) با وزن ۰,۱۵۸

۵) رتبه پنجم: سیستم پایش سلامت سازه به روش میدان حرارتی(S5) با وزن ۰,۱۰۸

در نتیجه روش به روز رسانی المان محدود بیشترین تاثیر را در ارزیابی پایش سلامت سازه و همچنین کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری سازه داراست. از اینرو نیاز به تمرکز و صرف زمان بیشتر بر روی این روش، جهت پایش سلامت سازه‌های بخصوص مهم می‌باشد.

مراجع

[1]Cunh, A., Caetano, E., Calçada, R, De Roeck, G., and Peeters, B., (2012). Dynamic measurements on bridges: design, rehabilitation and monitoring. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Bridge Engineering*, 156(3), 135-148.

[2] Farhidzadeh, E., Dehghan-Niri, A., Salamone, S., Luna, B., and Whittaker, A., (2013). Monitoring Crack Propagation in Reinforced Concrete Shear Walls by Acoustic Emission, *Journal of Structural Engineering*, 139(12), 176-188.

[3] Kim, S. and Frangopol, D.M. (2010). Optimal planning of structural performance monitoring based on reliability importance assessment, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 25, 86-98.

[4] Lin, R.M., (2015). Health Monitoring of Reinforced Concrete Shear Walls Using Smart Aggregates, *Springer Science+Business Media Dordrecht*, 51(9), 2027-2044.

[5] Yan, S., Sun, W., Song, G., Gu, H., Huo, L.S., Liu, B., and Zhang, Y.G. (2009). Modelling, detection and identification of flexural crack damages in beams using frequency response functions, *Smart Materials and Structures*, 18(4), 370-385.

[6] Moaveni, B. (2007). *Dissertation title*. Academic Level of the Author. Name of University, College, or Institution.

[7] Capellari, G. Chatzi, E. and Mariani, S. (2018). Cost–Benefit Optimization of Structural Health Monitoring Sensor Networks, *Sensors (Basel)*, 18(7), 2174-2190.

[8] Cawley, P. (2018). Structural health monitoring: Closing the gap between research and industrial deployment, *Structural Health Monitoring*, 17(5), 1225-1244.

[9] Metaxa, S., Kalkanis, K., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S.D. and Ioannidis, G. (2019). A review of structural health monitoring methods for composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 22, 369-375.

[10] Alla, S. and Asadi, S.S. (2020). Integrated methodology of structural health monitoring for civil structures. *Materials Today: Proceedings* , 27(2), 1066-1072.

[11] Razani, R. and Danaiee, M. (2015). Comparsion of structural health monitoring methods in structures, Sixth Conference on National Building Regulations, Shiraz, (in Persian).

[12] Negahdar, N., Noorizadeh, M.H. and Hosein, H. (2017). The health monitoring of the structure in order to prevent defects and increase the life of the structure, 2rd National Conference on New Research and Educational Findings in Urban Architecture, Planning and Environment of Iran, Tehran, (in Persian).

[13] Haji Mohammad Rezaiee, R. and Naderpoor, H. (2018). Evaluation of health monitoring methods and identification of failure in concrete structures, 10th National Concrete Conference in Iran, Tehran., (in Persian).

[14] Rajabi, M.S., Moeinifar, P. and Bitaraf, M. (2020). A review of the application of artificial intelligence in health monitoring of bridge, 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran, Tehran., (in Persian).