# تعیین تکنیک بهسازی بهینه ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده با روش‌های AHPو TOPSIS

عبدالرضا سروقد مقدم[i]; نوید رهگذر[ii]

## چکیده

**بهبودپایداری ساختمان‌های آسیب‌پذیر در مقابل خرابی پیشرونده با هدف استمرار خدمت رسانی و حفظ سلامت نیروهای انسانی، توسط تکنیک‌های بهسازی مختلفی قابل دستیابی است. با انتخاب تکنیک بهسازی بهینه، میزان خسارت به ساختمان‌های موجود وتلفات احتمالی نیروی انسانی ناشی از آن را می‌توان با در نظرگیری ملاحظات فنی و اقتصادی کاهش داد. در این مقاله،روالی برای تعیین تکنیک بهینه بهسازی در مقابل خرابی پیشرونده توسط روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس ارائه شده است. با کاربرد موردی روش‌های توسعه داده شده، گزینهٔ "افزودن دیواربرشی" به عنوان مناسب‌ترین گزینهٔ بهسازی برای تیپی از ساختمان‌های مهّم بتنی در برابر خرابی پیشرونده تعیین شد.**

**کلمات کلیدی:تکنیک‌های بهسازی، شاخص‌های بهسازی، خرابی پیشرونده، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، روش تاپسیس (TOPSIS).**

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۵/۳۰

[i]استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله:Moghadam@iiees.ac.ir.

[ii]نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه عمران:n.rahgozar@srbiau.ac.ir.

## ۱- مقدمه

طراحی وبهسازی ساختمان‌هادر مقابل خرابی پیشرونده پس از حادثهٔ ۱۱ سپتامبر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت. در این مدت، درمراکزتحقیق وتوسعه، تکنیک-های بهسازی متعددی برای ایجاد ساختمان‌هایی مقاوم و شکل‌پذیر در مقابل خرابی پیشرونده معرفی شده است. در پروژه‌های بهسازی، انتخاب تکنیک‌بهسازی مختص هر ساختمان از بین تکنیک‌های متعدد موجود، کاری پیچیده و دشوار است. امروزه برای تصمیم‌گیری و انتخاب سریع، ساده و دقیق تکنیک بهینه، روش‌های تصمیم‌گیری متعددی معرفی شده است. روش‌های تحلیل چند معیاره (MADM)، تحلیل تصمیم (DA)، تئوری مطلوبیت چند مشخصه (MAUT)، تصمیم‌گیری چند شاخصه (MCDM)، تحلیل هزینه- سود (CBA)، تحلیل تصمیم-گیری (K-T)،تئوری قضاوت اجتماعی (SJT) نمونه‌هایی از روش‌های تصمیم‌گیری مورد کاربرد محققین هستند. در این مقاله برای انتخاب تکنیک بهینه بهسازی ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ (MADM) تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تاپسیس (TOPSIS)استفاده شده است. در بند (۲) مقاله، الگوریتم کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای بهسازی ساختمان‌ها ارائه می‌شود و سپس با توسعه الگوریتم مذکور در بندهای (۳)و (۴)، تیپی از ساختمان‌های مهم به طور نمونه، در بند ۵ مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

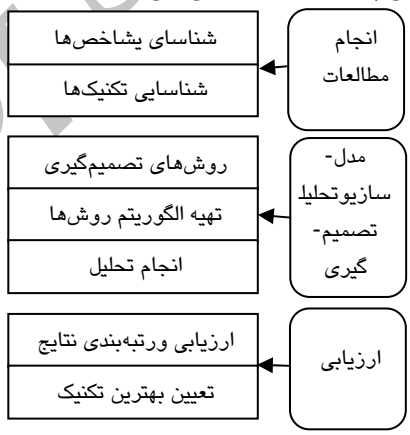
## ۲- الگوریتم کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری

تصمیم‌گیری و انتخاب نامناسب به دلایلی چون



Archive of SID
www.SID.ir

کمبودتجهیزات،مصالح،نیروی انسانی، تخصص وبرگشت-ناپذیربودن سرمایه درپروژه‌های بهسازی، غیرقابل قبول است. در این پروژه‌ها تصمیم‌گیری و انتخاب مناسب با توجه به تعدد تکنیک‌های بهسازی و پیچیدگی شاخص‌های کمی وکیفی موثر بر بهسازی بسیار دشوار است. برخی از محققین[۳]- [۴]- [۹] با کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری، روال‌های ساده‌ای برای کاهش خطای انتخاب مسئولان و تصمیم‌گیرندگان پروژه‌های عمرانی ارائه نموده‌اند. به نظر فورمن [۵] روال‌های تصمیم‌گیری، تکنیک‌ها و شاخص‌های موثر در مسائل را از طریق یک تئوری قوی و با فرموله کردن و ترکیب ارتباط بین آن‌ها الویت‌بندی می‌کند. چارچوب کلی نحوه کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای بهسازی ساختمان‌ها، درشکل (۱) ارائه شده است. این الگوریتم دارای سه سطح اصلی انجام مطالعات، مدل‌سازی- تحلیل و ارزیابی مسئله است که در ادامه هر یک از آن‌ها برای انتخاب تکنیک بهینه بهسازی در مقابل خرابی پیشرونده بررسی می‌شود.




شکل (۱): الگوریتم کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری

## ۳- مطالعات بهسازی

انجام مطالعات بهسازی از مهمترین بخش‌های تصمیم-گیری در پروژه‌های بهسازی می‌باشد. در این سطح، با شناسایی و دسته‌بندی شاخص‌ها و تکنیک‌های بهسازی، اطلاعات لازم برای تحلیل‌های تصمیم‌گیری بدست می‌آید. در ادامه، شاخص‌هاو تعدادی از تکنیک‌های نوین موثر بر بهسازی ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده ارائه می-شوند.

### ۳-۱- شاخص‌های بهسازی

انتخاب تکنیک بهینه بهسازی ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده به شاخص‌های کمی وکیفی متعددی وابسته است. شناخت، جمع‌آوری و دسته‌بندی شاخص‌ها، نقش کلیدی برای تصمیم‌گیری و تمیز ضعف و قوت تکنیک‌ها بهسازی دارد. دراین مقاله، برای درنظرگیری شاخص‌های موثر بر بهسازی ساختمان‌ها، پنج گروه اصلی شرایط موجود ساختمان، درجه اهمیت ساختمان، هدف بهسازی، شرایط فنی بهسازی و ملاحظات اقتصادی بهسازی درنظر گرفته شد.

گروه اول شاخص‌ها، شناخت از شرایط سازه‌ای و معماری موجود ساختمان است که با بررسی عملکردمواردی چون وضعیت باربری، مسیر انتقال بار، اتصال و پیوستگی المان‌های باربر، کیفیت اعضا و مصالح ساختمان در برابر انفجار قابل دستیابی است. گروه دوم شاخص‌ها، درجه اهمیت ساختمان‌ها،براساس نوع کاربری، تعداد ساکنین، تعداد طبقات، مساحت بنا، ارزش فعلی و سرمایه درون آن تعیین می‌گردد. گروه سوم، تعیین هدف بهسازی است که بر اساس سطح خطر انفجار و سطح عملکرد مد نظر کارفرما تعیین می‌گردد. میزان کیفیت طرح و اجرای تکنیک‌های بهسازی به عنوان گروه چهارم شاخص‌ها براساس سطح دانش و تجربه طراحان و مجریان، وجود راهنماهای بهسازی، فناوری و تجهیزات ساخت، وجود دستورالعمل اجرا ووجود مصالح خاص پروژه حاصل می‌گردد. ملاحظات اقتصادی نیز به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌ها برای کافرمایان،به هزینه و سودحاصل از بهسازی وابسته است. بطوریکه تکنیک بهسازی بهینه بیشترین نسبت سود به هزینه را دارد.

### ۳-۲- تکنیک‌های بهسازی

دومین بخش از مطالعات تصمیم‌گیری، شناسایی و انتخاب مجموعه‌ای از تکنیک‌های بهسازی مرتبط با پروژه بهسازیاست. تاکنون تکنیک‌های بهسازی متنوعی در سراسر جهان معرفی شده است که هر یک از این روش‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که بدون شناخت از نحوه عملکرد آن‌ها انتخاب تکنیک بهینه امکان-پذیر نمی‌باشد. در این مطالعه شش تکنیک در قالب دو دسته اصلی برای بهبود شرایط موجود ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده درنظر گرفته شده است.

دسته اول شامل تکنیک‌های افزودن دیوار برشی، تقویت ستون با پوشش‌های فلزی، تقویت دیوارهای با پروفیل‌های فولادی است. این تکنیک‌ها براساس سطح خطر انفجار و هدف بهسازی به منظور ممانعت از خرابی


Archive of SID
www.SID.ir

المان‌های کلیدی طراحی می‌شوند و با تامین مقاومت و شکل‌پذیری موضعی از خسارت اولیه در المان‌ها و گسترش خرابی در ساختمان جلوگیری می‌کنند. تکنیک "افزودن دیوار برشی"، مقاومت کلی و نامعینی ساختمان را افزایش می‌دهد. دیوارها با داشتن وزن و حجم زیاد در برابر بارهای غیرعادی به نحو مناسبی رفتار می‌کنند و با عملکرد قوسی، مسیرهای انتقال بار را افزایش می‌دهند. تکنیک "تقویت ستون با پوشش‌های فلزی"، با ممانعت از تخریب کامل ستون‌ها، پایداری سقف‌ها را تامین می‌کنند. این تکنیک با کاهش انتقال امواج به ستون از احتمال شکست ناگهانی ووقوع خرابی پیشرونده در ساختمان جلوگیری می‌کند. کاربرد "پروفیل‌های فولادی" در داخل دیوارهای پیرامونی نیز با اتصال به دیافراگم،از بخش‌های داخلی ساختمان محافظت می‌کند. دیوارهای تقویت شده، قابلیت تغییر شکل زیاد و استهلاک بارهای دینامیکی شدید می‌باشند.

دسته دوم تکنیک‌ها بهسازی، شامل تکنیک‌های تقویت سقف با استفاده از کابل‌های پس تنیده، محافظت سازه با قاب‌های بتنی در پیرامون ساختمان و تقویت دینامیکی اتصال با سیستم‌های الاستیک (EDRS) است.این تکنیک‌هابه طور غیرمستقیم و مستقل از شدت، میزان و نوع بارگذاری، پایداری ساختمان‌ها را در مقابل خرابی پیشرونده تامین می‌کنند. بگونه‌ای در صورت ایجاد خسارت موضعی در المان‌ها کلیدی، با افزایش مسیرهای جایگزین انتقال بار، بارهای متمرکز در محدوده خرابی را به شیوه‌ای مناسب به محدوده سالم ساختمان انتقال می‌دهند. تکنیک "تقویت دیافراگم با کابل‌های پس تنیده"، با ایجاد مسیر جایگزین بار،تخریبدال‌ها را حداقل واز خرابی پیشرونده جلوگیری می‌کند. کابل‌های با قابلیت فرم‌پذیری انحنایی مطلوب در برابر تغییر شکل‌های برشی و خمشی، دیافراگم‌هایی مقاوم و منسجم ایجاد می‌کنند. کابل‌ها با باربرداری از قسمت آسیب‌دیده، بارهای تشدید شده را به المان‌های سالم انتقال می‌دهد و یکپارچگی ساختمان را جهت بازتوزیع نیروها بهبود می‌دهند. تکنیک "افزودن قاب‌های بتنی" نیز چون محافظی عظیم با اجرا در پیرامون ساختمان، خسارت وارد بر اعضای سازه را در برابر بارهای و ضربه مستقیم کاهش می‌دهد. این تکنیک علاوه بر جلوه‌های معماری، مشخصه‌های فنی ساختمان‌های آسیب‌پذیر را برای بازتوزیع بارهای ثقلی تشدید شده بهبود می‌بخشد. تکنیک "تقویت اتصال با سیستم الاستیک (EDRS)"نیز از روش‌های نوین بهسازی است که با بهبود ظرفیت‌های دورانی و کششی اتصالات المان‌ها، یکپارچگی ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد. این تکنیک با ایجاد اتصالی مقاوم و شکل‌پذیر، عملکرد زنجیره‌ای خمشی در المان‌ها بار بهبود و احتمال وقوع خرابی پیشرونده ساختمان را کاهش می‌دهد.

## ٤- مدل‌سازی و تحلیل تصمیم‌گیری

تحلیل، تصمیم‌گیری و انتخاباز مهمترین مشخصه‌های انسانی است [۲]. روش‌های تصمیم‌گیری ابزاری مناسب برای تحلیل مسائل پیچیده‌است. بگونه‌ای که فرد تصمیم-گیرنده را قادر به مدل‌سازی و تحلیل مساله می‌سازد. در این مقاله از روش‌های تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تاپسیس (TOPSIS) استفاده شده است.

### ٤-١- روش تحلیل سلسه مراتبی

روش تحلیل سلسله مراتبی، سازگاری زیادی با نحوه تفکر و فرآیند ذهنی انسان دارد و الگوریتم آن بر اساس منطق کلاسیک ریاضی توسط توماس الساعتی برای نخستین باردرسال ۱۹۸۰ مطرح شد [۱]، [۷]. تحلیل سلسله مراتبی، تصمیم‌گیری‌ها و قضاوت‌های ذهنی رابه شیوه‌ای منطقی ترکیب می‌نماید. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و کاربرد آن بر سه اصل ۱- برپایی ساختار سلسله مراتبی برایمساله، ۲- الویت‌بندی از طریق مقایسه‌های زوجی و ۳- برقراری سازگاری منطقی از اندازه‌گیری‌ها استوار است. در این مقاله با در نظرگیری این سه اصل اساسی، تکنیک بهینهٔ بهسازی توسط تحلیل سلسله مراتبی در دو مرحلهٔ ۱- تشکیل درخت سلسله مراتبی مسئله و ۲- الویت‌بندی شاخص‌ها و تکنیک‌های بهسازی تعیین شده است.

در مرحله اول، با تشکیل درخت سلسله مراتب، مسئله به بخش‌های کوچکتر تجزیه شد. این کار کمک شایانی به تصمیم‌گیرنده در فهم ساده‌تر مسئله و دقت بیشتر در تحلیل و درنظرگیری نکات و ظرافت‌های آن می‌کند [۸]. درخت سلسله مراتب مطالعه مطابق شکل (۲)، در سه سطح ۱- هدف مسئله یعنی تعیین تکنیک بهینه در مقابل



Archive of SID

www.SID.ir

خرابی پیشرونده، ۲- شاخص‌های و ۳- تکنیک‌های بهسازی تشکیل شده است. دومین مرحله تصمیم‌گیری، محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها نسبت به هدف و تکنیک-های بهسازی نسبت به هر یک از شاخص‌ها می‌باشد. این مرحله دارایپنجقسمت ۱- برپایی ماتریس‌های زوجی شاخص‌ها نسبت به هدف و تکنیک‌های بهسازی نسبت به هریک از شاخص‌ها، ۲- بررسی سازگاری ماتریس‌های زوجی، ۳- محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها نسبت به هدف، ۴- محاسبه وزن نسبی تکنیک‌های بهسازی نسبت به هر کدام از شاخص‌ها و سرانجام ۵- الویت‌بندی نهایی تکنیک-های بهسازی نسبت به هدف است. در این مطالعه برای مقایسهٔ شاخص‌ها نسبت به هدف و مقایسهٔ تکنیک‌های بهسازی نسبت به هر یک از شاخص‌ها به ترتیب جداول (۱) و (۲) استفاده شده است.

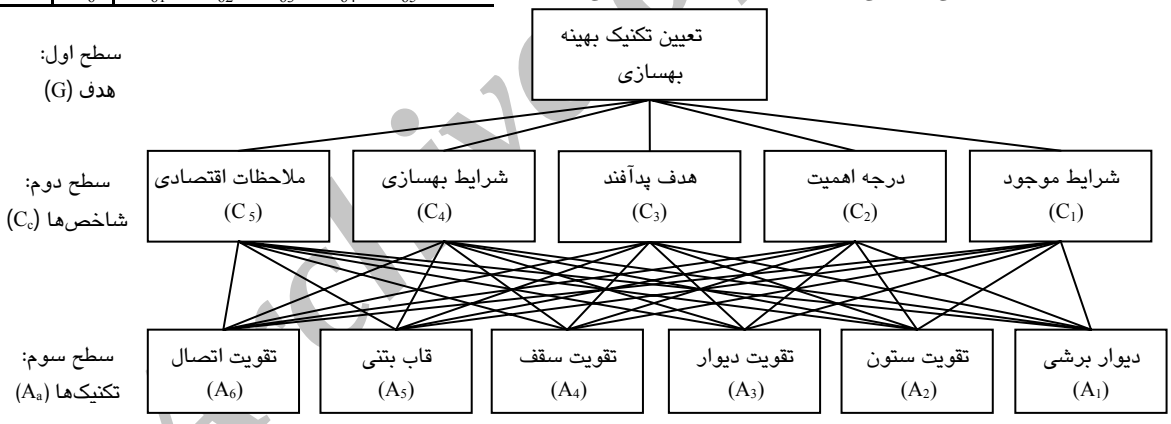
شایان ذکر است مقادیر کمی مندرج در ماتریس‌های زوجی با مشخصه‌های $r_{ij}$ و $R_{ij}$ بیانگر قضاوت زوجی کلامی کارشناسان از مقایسه شاخص‌ها یا تکنیک‌های $i$ام به شاخص‌ها یا تکنیک‌های $j$ام است که ساعتی برای کمی-سازی ارجحیت‌های کیفی کلامی کارشناسان، مقادیر کمی مندرج در جدول (۳)را پیشنهاد نموده است. همچنین در صورتیکه ارجحیت کمی شاخص $C_{(c=ij)}$ و تکنیک $A_{(a=ij)}$به ترتیب برابر $r_{ij}$ و $R_{ij}$ باشند، مقدار ارجحیت شاخص $C_{(c=ji)}$ و تکنیک $A_{(a=ji)}$به ترتیب برابر نسبت‌های $\frac{1}{r_{ij}}$ و $\frac{1}{R_{ij}}$ هستند.

جدول (۱): ماتریس زوجی شاخص‌ها نسبت به هدف شاخص‌ها $(C_{(c=i)})$

| نسبت به هدف | | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| شاخص‌ها $(C_{(c=j)})$ | $C_1$ | 1 | $r_{12}$ | $r_{13}$ | $r_{14}$ | $r_{15}$ |
| | $C_2$ | $r_{21}$ | 1 | $r_{23}$ | $r_{24}$ | $r_{25}$ |
| | $C_3$ | $r_{31}$ | $r_{32}$ | 1 | $r_{34}$ | $r_{35}$ |
| | $C_4$ | $r_{41}$ | $r_{42}$ | $r_{43}$ | 1 | $r_{45}$ |
| | $C_5$ | $r_{51}$ | $r_{52}$ | $r_{53}$ | $r_{54}$ | 1 |

جدول (۲): ماتریس زوجی تکنیک‌ها نسبت به شاخص$i$ام تکنیک‌های بهسازی$(A_{(a=i)})$

| نسبت به شاخص$c$ام$(C_c)$ | | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تکنیک‌های بهسازی $(A_{(a=j)})$ | $A_1$ | 1 | $R_{12}$ | $R_{13}$ | $R_{14}$ | $R_{15}$ | $R_{16}$ |
| | $A_2$ | $R_{21}$ | 1 | $R_{23}$ | $R_{24}$ | $R_{25}$ | $R_{26}$ |
| | $A_3$ | $R_{31}$ | $R_{32}$ | 1 | $R_{34}$ | $R_{35}$ | $R_{36}$ |
| | $A_4$ | $R_{41}$ | $R_{42}$ | $R_{43}$ | 1 | $R_{45}$ | $R_{46}$ |
| | $A_5$ | $R_{51}$ | $R_{52}$ | $R_{53}$ | $R_{54}$ | 1 | $R_{56}$ |
| | $A_6$ | $R_{61}$ | $R_{62}$ | $R_{63}$ | $R_{64}$ | $R_{65}$ | 1 |




شکل(۲): درخت سلسله مراتبی تعیین تکنیک بهسازی بهینه

جدول (۳): مقادیر عددی قضاوت کارشناس‌ها[۲]

| تعریف کلامی ترجیحات | مقادیر عددی ترجیحات |
|---|---|
| کاملا مطلوبتر | 9 |
| مطلوبیت خیلی قوی | 7 |
| مطلوبیت قوی | 5 |
| کمی مطلوبتر | 3 |
| مطلوبیت یکسان | 1 |
| ترجیحات بین فواصل فوق | 8،6،4،2 |

میزان دقت قضاوت کارشناسان در تشکیل ماتریس-های زوجی با تعیین شاخص ناسازگاری امکان‌پذیر است. ساعتی برای محاسبه میزان شاخص ناسازگاری روابط(۱) تا (۳) را ارائه نموده است. معیار پذیرش قابل قبول میزان شاخص ناسازگاری برابر ۰.۱است.

$$\lambda_{max} = \max(\det([M] - \lambda[I]) = 0) \qquad (۱)$$

$$I.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad (۲)$$

$$I.R. = \frac{I.I.}{I.I.R} \le 0.1 \qquad (۳)$$

در (۱)، *[M]* ماتریس زوجی شاخص‌ها و یا تکنیک‌هاو *[I]* ماتریس قطری واحد است. در (۲)، $\lambda_{max}$و $n$ به ترتیب بزرگترین مقدار ویژه و بعد ماتریس زوجی هستند و در (۳)، *I.I.R* شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی است(جدول (۴)).



www.SID.ir

جدول (۴): شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی [۱۷]

| n | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I.I.R | 0 | 0.9 | 1.24 | 1.41 | 1.49 | 1.54 | 1.57 |

پس از تشکیل ماتریس‌های زوجی، وزن نسبی هریک از شاخص‌ها نسبت به هدف و هر یک از تکنیک‌های بهسازی نسبت به هر کدام از شاخص‌ها محاسبه شد. شکل (۳)، شمای کلی نحوه نمایش وزن‌های نسبی شاخص‌ها و تکنیک‌ها را نشان می‌دهد. وزن نسبی شاخص‌ها و تکنیک‌ها را نشان می‌دهد. وزن نسبی شاخص‌ها $W_c(G)$ و تکنیک‌های بهسازی $W_a(C)$با روش‌های متنوعی چون حداقل مربعات ساده و لگاریتمی، بردار ویژه و روش‌های تقریبی قابل محاسبه است. در این مقاله از روش حداقل مربعات لگاریتمی بدلیل سازگاری مناسب با روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. در این روش‌اوزان نسبی با حداقل کردن میانگین هندسی قضاوت کارشناسان، طبق روابط (۴)و (۵) تعیین می‌شود.

$$Min\ Z=\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5}(\mathrm{Lnr_{ij}}-\mathrm{Ln}\frac{W_{(c=i)}}{W_{(c=j)}})^2 \qquad (۴)$$

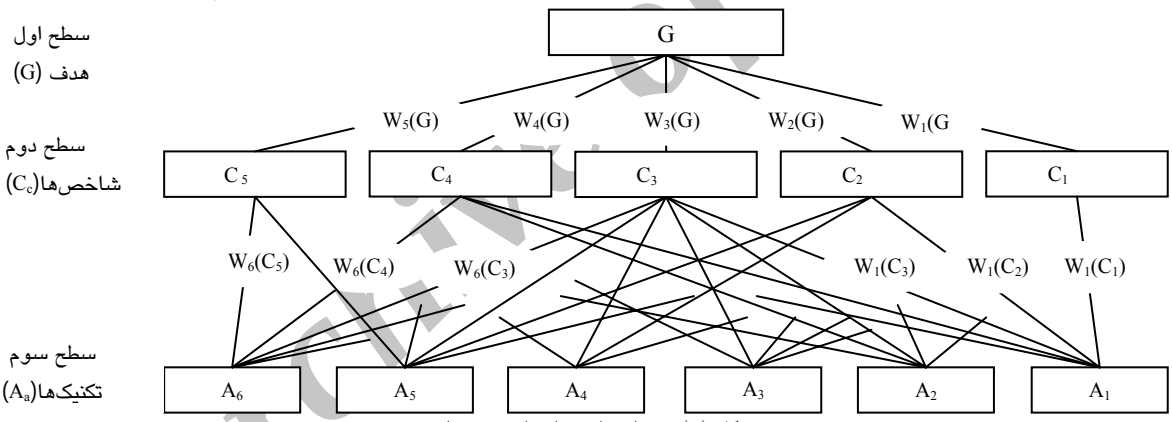
$$Min\ Y=\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6}(\mathrm{LnR_{ij}}-\mathrm{Ln}\frac{W_{(a=i)}}{W_{(a=j)}})^2 \qquad (۵)$$

در این روابط $Z$ و $Y$توابع مربعات لگاریتمی میانگین خطاها است؛ $r_{ij}$ و $R_{ij}$به ترتیب ارجحیت نسبی شاخص یا روش iام به شاخص یا روش jام می‌باشند وً$W_c$وً$W_a$ به ترتیب اوزان نسبی شاخص‌ها و روش‌ها هستند.

سرانجام وزن نهایی هر یک از تکنیک‌ها نسبت به هدف با ترکیب وزن نسبی شاخص‌ها و تکنیک‌های بهسازی با ضرب و جمع سلسله مراتبی وزن‌های نسبی توسط رابطه (۶) تعیین شد. بدین ترتیب، با تعیین بیشترین مقدار حاصل از اوزان تکنیک‌های بهسازی، برترین تکنیک بهسازی مشخص شد.

$$W_a(G)=\sum_{a=1}^{6}\sum_{c=1}^{5}\mathrm{W_a(C)}\times\mathrm{W_c(G)} \qquad (۶)$$

در این رابطه $W_a(G)$وزن نسبی تکنیک $a$ام نسبت به هدف، $W_a(C)$ وزن نسبی تکنیک aام نسبت شاخص $c$ام و$W_c(G)$وزن نسبی شاخص $c$ام نسبت به هدف هستند.



شکل (۳): شمایی از ساختار وزن‌های نسبی

## ٤-۲- روش تاپسیس

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس بر پایه نظریهٔ قوی ریاضی، اولین بار توسط هوانگ و یون [۶] در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این روش قابلیت درنظرگیری نوع شاخص‌ها از لحاظ اثرگذاری مثبت و یا منفی را در الویت‌بندی تکنیک‌ها را دارد. در این مقاله با روش هندسی تاپسیس، تکنیک بهینه بهسازی طی دو گام ۱- محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها ۲- محاسبه وزن نهایی تکنیک‌ها تعیین شد.

در گام اول، وزن نسبی شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون محاسبه شد. در روش آنتروپی وزن نسبی شاخص‌ها طی چهار گام ۱- تشکیل ماتریس بی‌بعد تصمیم‌گیری، ۲- محاسبه مقدار آنتروپی، ۳- محاسبه درجه انحراف شاخص‌ها و ۴- محاسبه وزن نسبی براساس درجه انحراف شاخص‌ها تعیین می‌شود. در این روش هر چه پراکندگی مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص وزن بیشتری دارد. در گام اول، ماتریس تصمیم‌گیریاز طریق مقایسه نسبی و ارزش‌گذاری تکنیک‌های بهسازی نسبت به یکدیگر مطابق جدول (۵)تشکیل و سپس ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد $[P_{ij}]_{۵\times۶}$ برای معنادار شدن محاسبات و نتایج تحلیل طبق تعریف ریاضی رابطه (۷) تشکیل شد.


www.SID.ir

$$P_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sum_{j=1}^{6} I_{ij}} \qquad (۷)$$

در (۷) و جداول (۵)و (۶)، $I_{ij}$مقدارارزش تکنیک jام نسبت به شاخص iام،$p_{ij}$ مقادیر بی‌بعد شدهٔ ماتریس تصمیم‌گیری، $A_a$تکنیک و $C_c$ شاخص‌های ماتریس تصمیم هستند.

جدول (۵): ماتریس تصمیم‌گیری

تکنیک‌های بهسازی($A_{(a=j)}$)

| شاخص‌ها($C_{(c=i)}$) | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | $I_{11}$ | $I_{12}$ | $I_{13}$ | $I_{14}$ | $I_{15}$ | $I_{16}$ |
| $C_2$ | $I_{21}$ | $I_{22}$ | $I_{23}$ | $I_{24}$ | $I_{25}$ | $I_{26}$ |
| $C_3$ | $I_{31}$ | $I_{32}$ | $I_{33}$ | $I_{34}$ | $I_{35}$ | $I_{36}$ |
| $C_4$ | $I_{41}$ | $I_{42}$ | $I_{43}$ | $I_{44}$ | $I_{45}$ | $I_{46}$ |
| $C_5$ | $I_{51}$ | $I_{52}$ | $I_{53}$ | $I_{54}$ | $I_{55}$ | $I_{56}$ |

جدول (۶): ماتریس بی‌بعد تصمیم‌گیری ($[P_{ij}]_{۵\times۶}$)

تکنیک‌های بهسازی($A_{(a=j)}$)

| شاخص‌ها($C_{(c=i)}$) | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | $p_{11}$ | $p_{12}$ | $p_{13}$ | $p_{14}$ | $p_{15}$ | $p_{16}$ |
| $C_2$ | $p_{21}$ | $p_{22}$ | $p_{23}$ | $p_{24}$ | $p_{25}$ | $p_{26}$ |
| $C_3$ | $p_{31}$ | $p_{32}$ | $p_{33}$ | $p_{34}$ | $p_{35}$ | $p_{36}$ |
| $C_4$ | $p_{41}$ | $p_{42}$ | $p_{43}$ | $p_{44}$ | $p_{45}$ | $p_{46}$ |
| $C_5$ | $p_{51}$ | $p_{52}$ | $p_{53}$ | $p_{54}$ | $p_{55}$ | $p_{56}$ |

با بی‌بعدسازی خطی ماتریس تصمیم‌گیری $[P_{ij}]_{۵\times۶}$، مقدار آنتروپی هر یک از شاخص‌ها ($E_i$) با رابطه (۸) محاسبه می‌شود. همچنین درجه انحراف اطلاعات موجود هر یک از شاخص‌ها از مقدار آنتروپی آن شاخص و مقدار اوزان نسبی($w_i$) هر یک از آن‌ها به ترتیب توسط روابط (۹) و (۱۰)محاسبه می‌شود.ماتریس قطری$[w_{ij}]_{۵\times۵}$متشکل از اوزان نسبی شاخص‌ها($w_i$) در جدول (۷)نمایش داده شده است.

$$E_i = -\frac{1}{Ln(m)} \sum_{j=1}^{6} P_{ij} Ln(P_{ij}) \qquad (۸)$$

$$d_i = 1 - E_i \qquad (۹)$$

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^{5} d_i} \qquad (۱۰)$$

در (۸) تا (۱۰)،$P_{ij}$عناصر بی‌بعد شده ماتریس تصمیم توسط روش خطی،$m$تعداد تکنیک‌ها،$E_i$ میزان آنتروپی، $d_i$درجه انحراف شاخص‌ها و $w_i$وزن نسبی شاخص‌ها هستند.

گام دوم تصمیم‌گیری با روش تاپسیس، محاسبه وزن و الویت‌بندی تکنیک‌های بهسازی می‌باشد. این موضوع طی پنج مرحله ۱- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد، ۲- وزن‌دار نمودن ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد، ۳- تعیین جواب‌های ایده‌آل، ۴- محاسبه فاصله نسبی شاخص‌ها با جواب‌های ایده‌آل و ۵- رتبه‌بندی تکنیک‌هاتعیین می‌شود.در این مقاله برای انجام عملیات جبری از تعریف بی‌بعدسازی نرم‌برداری طبق رابطه (۱۱)استفاده شده است. ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد $[n_{ij}]_{۵\times۶}$در جدول (۸) نشان داده شده است.

$$n_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sqrt{\sum I_{ij}^2}} \qquad (۱۱)$$

جدول (۷): ماتریس وزن شاخص‌ها

شاخص‌ها ($C_{(c=i)}$)

| شاخص‌ها($C_{(c=i)}$) | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | $w_1$ | · | · | · | · |
| $C_2$ | · | $w_2$ | · | · | · |
| $C_3$ | · | | $w_3$ | · | · |
| $C_4$ | · | · | · | $w_4$ | · |
| $C_5$ | · | · | · | · | $w_5$ |

جدول (۸): ماتریس بی‌بعد تصمیم‌گیری ($[n_{ij}]_{۵\times۶}$)

تکنیک‌های بهسازی($A_{(a=i)}$)

| شاخص‌ها($C_{(c=i)}$) | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | $n_{11}$ | $n_{12}$ | $n_{13}$ | $n_{14}$ | $n_{15}$ | $n_{16}$ |
| $C_2$ | $n_{21}$ | $n_{22}$ | $n_{23}$ | $n_{24}$ | $n_{25}$ | $n_{26}$ |
| $C_3$ | $n_{31}$ | $n_{32}$ | $n_{33}$ | $n_{34}$ | $n_{35}$ | $n_{36}$ |
| $C_4$ | $n_{41}$ | $n_{42}$ | $n_{43}$ | $n_{44}$ | $n_{45}$ | $n_{46}$ |
| $C_5$ | $n_{51}$ | $n_{52}$ | $n_{53}$ | $n_{54}$ | $n_{55}$ | $n_{56}$ |

در (۱۱)و جدول (۷)، $n_{ij}$مقادیر بی‌بعد شده ماتریس تصمیم‌گیری متشکل از اعدادی بین صفر و یک، $I_{ij}$مقدار ارزش تکنیک jام نسبت به شاخص iام، $\sqrt{\sum I^2{}_{ij}}$ بردار نرم هر یک از بردارهای ارزش‌گذاری حاصل از تکنیک $A_a$، شاخص $C_c$ماتریس تصمیم‌گیری هستند.

در روش تاپسیس برای درنظرگیری تاثیر وزن شاخص‌ها از ماتریس $[v_{ij}]_{۵\times۶}$ ، حاصل از ضرب ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد $[n_{ij}]_{۵\times۶}$ در ماتریس قطری$[w_{ij}]_{۵\times۵}$ طبق رابطه (۱۲) استفاده می‌گردد. ماتریس تصمیم‌گیری وزن-دار شده در جدول (۹) نشان داده شده است.

Archive of SID



www.SID.ir

$$[v_{ij}]_{5\times6} = [w_{ij}]_{5\times5} \times [n_{ij}]_{5\times6} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه، $v_{ij}$مقادیر ماتریس بی‌بعد وزن‌دار شده، $w_{ij}$مقادیرماتریس وزن شاخص‌ها و $n_{ij}$ مقادیر ماتریس بی-بعدتصمیم‌گیری هستند.

برای تعیین جواب‌های ایده‌آل مثبت (بهترین) و منفی (بدترین) هر شاخص به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مختص هر شاخص ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد وزن‌دار طبق روابط (۱۳)و (۱۴) انتخاب شده است.جواب‌های ایده-آل در جدول (۹) نشان داده شده است.

$$A_i^+ = \{A_1^+, A_2^+, A_3^+, A_4^+, A_5^+\} = \{\max(v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j}) \mid j = 1,2,3,4,5,6\} \qquad (۱۳)$$

$$A_i^- = \{A_1^-, A_2^-, A_3^-, A_4^-, A_5^-\} = \{\min(v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j}) \mid j = 1,2,3,4,5,6\} \qquad (۱۴)$$

در (۱۲) تا (۱۴)، $v_{ij}$ عناصر ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار، $A^+_i$ و $A^-_i$جواب‌های ایده‌آل مثبت و منفی‌ام هستند.

جدول (۹): ماتریس وزن‌دار شده و جواب‌های ایده‌آل

| شاخص‌ها ($C_{a(a=j)}$) | تکنیک‌های بهسازی ($A_{a(a=j)}$) | | | | | | $A^+_i$ | $A^-_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ | max $C_i$ | min $C_i$ |
| $C_1$ | $v_{11}$ | $v_{12}$ | $v_{13}$ | $v_{14}$ | $v_{15}$ | $v_{16}$ | $v^+_{1j}$ | $v^-_{1j}$ |
| $C_2$ | $v_{21}$ | $v_{22}$ | $v_{23}$ | $v_{24}$ | $v_{25}$ | $v_{26}$ | $v^+_{2j}$ | $v^-_{2j}$ |
| $C_3$ | $v_{31}$ | $v_{32}$ | $v_{33}$ | $v_{34}$ | $v_{35}$ | $v_{36}$ | $v^+_{3j}$ | $v^-_{3j}$ |
| $C_4$ | $v_{41}$ | $v_{42}$ | $v_{43}$ | $v_{44}$ | $v_{45}$ | $v_{46}$ | $v^+_{4j}$ | $v^-_{4j}$ |
| $C_5$ | $v_{51}$ | $v_{52}$ | $v_{53}$ | $v_{54}$ | $v_{55}$ | $v_{56}$ | $v^+_{5j}$ | $v^-_{5j}$ |

با تعیین فاصله اقلیدسی گزینهٔ $A_j$ با مولفه‌های $v_{ij}$، از بردارهای جواب‌های ایده‌آل مثبت $A^+_i$ با مولفه‌های $v^+_{ij}$ و جواب‌های ایده‌آل‌منفی با مولفه‌های $v^-_{ij}$، میزان فاصله تکنیک‌های بهسازی با جواب‌های ایده‌آل طبق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه شده است.

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{5} (v_{ij} - A_i^+)^2} \rightarrow j = 1,2,3,4,5,6 \qquad (۱۴)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{5} (v_{ij} - A_i^-)^2} \rightarrow j = 1,2,3,4,5,6 \qquad (۱۵)$$

در این روابط$D^+_j$ و $D^-_j$به ترتیب فاصله اقلیدسی روش ژام از ایده‌آل مثبت و منفی هستد.

سرانجام رتبه هر تکنیک با محاسبه فاصله نسبی تکنیک‌های تصمیم‌گیری طبق رابطه (۱۶) تعیین شد. براساس این رابطه، تکنیک بهینه دارای بیشترین مقدار فاصله نسبی نسبت به سایر تکنیک‌هااست.

$$CL_j^+ = \frac{D_j^+}{D_j^+ + D_j^-} \rightarrow j = 1,2,3,4,5,6 \qquad (۱۶)$$

در این رابطه$D^+_j$ و $D^-_j$به ترتیب فاصله اقلیدسی تکنیک ژام از ایده‌آلمثبت و منفی و $CL^+_j$ فاصله نسبی هر تکنیک با روش ایده‌آل است.

## ۵- مطالعه موردی

در این بخش نتایج توسعه روش‌های تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس، برای یک نمونه از ساختمان‌های تیپ مهم کشور ارائه و ارزیابی می‌شود. تعدادی از مشخصات و ویژگی‌هایی این ساختمان در جدول (۱۰)ارائه شده است.

جدول (۱۰): مشخصات ساختمان مورد مطالعه

| | | | |
|---|---|---|---|
| درجه اهمیت | کلیدی | تعداد ساکنین یا شاغلین | هزار نفر |
| شهر | تهران | نوع قاب سازه | بتنی خمشی |
| تعداد طبقات | پنج طبقه | جمعیت و توزیع منطقه | کلان شهر |
| مساحت | هزار | موقعیت شهر | غیر مرزی |
| کاربری | اداری | هدف بهسازی مد نظر | ویژه |
| شکل سازه‌ای | منظم | هندسه ساختمان | مسطح |
| وضعیت | آسیب‌پذیر | بازشوها در ارتفاع | ۳۰ درصد |
| نوع پی | گسترده | همجواری با تاسیسات | غیر همجوار |

به طور متوسط در این ساختمان پنج طبقه اداری حدود هزار نفر مشغول فعالیت هستند. این ساختمان در شرق استان تهران و دور از مراکز حساس و تاسیسات نظامی واقع است. ارزیابی اولیه این ساختمان بتنی نشاندهنده آسیب‌پذیری سازه و فونداسیون این ساختمان در مقابل خرابی پیشرونده است. کارشناسان با توجه به شرایط آسیب‌پذیر موجود معماری و سازه‌ای ساختمان، محدوده تلفات انسانی و خسارت‌های ناشی از خرابی ساختمان را زیاد برآورد نموده‌اند.

با توجه به نیاز این ساختمان به بهسازی، شش روش بهسازی معرفی شده در بند (۳)، برای دستیابی به برترین تکنیک بهسازی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور برای مقایسهٔ نسبی شاخص‌ها و تکنیک-



Archive of SID

www.SID.ir

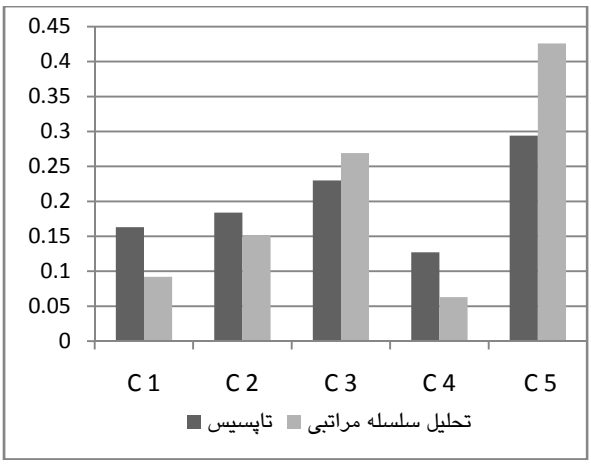
های بهسازی، از روش‌های فرآیند سلسله مراتبی و تکنیک تاپسیس مطابق روال توضیح داده شده در بند (۴) استفاده شد. نتایج رتبه‌بندی، وزن و درصد اهمیت هریک از شاخص‌ها و تکنیک‌های بهسازیدر جداول (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. شایان ذکر است، وزن نسبی شاخص‌ها در روش سلسله مراتبی به وسیلهٔ روش حداقل مربعات لگاریتمی و در روش تاپسیس توسط روش آنتروپی تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد شاخص اقتصادی برای ساختمان مورد مطالعه از اهمیت بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر برخوردار است. وزن نهایی تکنیک‌های بهسازی نیز در روش سلسله مراتبی بر اساس ترکیب وزن نسبی شاخص‌ها و تکنیک‌ها و در روش تاپسیس بر اساس فاصله نسبی تکنیک‌ها از جواب‌های ایده‌آل حاصل شده است. نتایج تحلیل تصمیم‌گیری نشان می‌دهد تکنیک افزودن دیوار برشی، مناسب‌ترین تکنیک بهسازی ساختمان مورد مطالعه در مقابل مقابل خرابی پیشرونده است. نمودارهای میله‌ای (۴) و (۵) به ترتیب مقایسه‌ای از وزن نسبی شاخص‌ها و وزن نهایی تکنیک‌های بهسازی حاصل از دو روش تصمیم‌گیری را نشان می‌دهند.

جدول (۱۱): وزن نسبی شاخص‌ها توسط دو روش سلسله مراتبی و تاپسیس

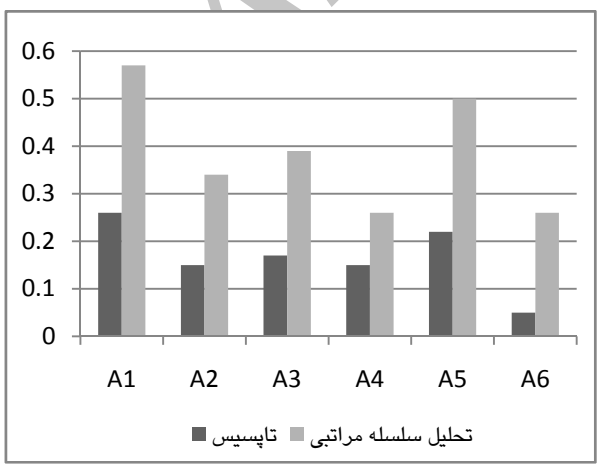
| | شاخص‌ها | وزن نسبی | | درصد اهمیت نسبی | | رتبه شاخص‌ها | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | تاپسیس | سلسله مراتبی | تاپسیس | سلسله مراتبی | تاپسیس | سلسله مراتبی |
| $C_1$ | شرایط موجود ساختمان | ۰.۱۶ | ۰.۰۹ | ۱۶ | ۹ | ۴ | ۴ |
| $C_2$ | درجه اهمیت ساختمان | ۰.۱۸ | ۰.۱۵ | ۱۸ | ۱۵ | ۳ | ۳ |
| $C_3$ | هدف تکنیکهای | ۰.۲۳ | ۰.۲۶ | ۲۳ | ۲۶ | ۲ | ۲ |
| $C_4$ | شرایط طراحی و اجرای بهسازی | ۰.۱۲ | ۰.۰۶ | ۱۲ | ۶ | ۵ | ۵ |
| $C_5$ | ملاحظات اقتصادی بهسازی | ۰.۲۹ | ۰.۴۲ | ۳۰ | ۴۲ | ۱ | ۱ |

جدول (۱۲): اوزان و رتبه‌بندی تکنیک‌های بهسازی ساختمان مورد مطالعه با روش‌های تاپسیس و سلسله مراتبی

| | گزینه‌ها | وزن نهایی | | درصد اهمیت نسبی | | رتبه شاخص‌ها | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | تاپسیس | سلسله مراتبی | تاپسیس | سلسله مراتبی | تاپسیس | سلسله مراتبی |
| $A_1$ | افزودن دیوار برشی | ۰.۵۷ | ۰.۲۶ | ۲۲ | ۲۶ | ۱ | ۱ |
| $A_2$ | تقویت ستون با پوشش‌های فلزی | ۰.۳۴ | ۰.۱۵ | ۱۳ | ۱۵ | ۴ | ۴ |
| $A_3$ | تقویت دیوارهای با پروفیل‌های فولادی(CFSD) | ۰.۳۹ | ۰.۱۷ | ۱۸ | ۱۷ | ۳ | ۳ |
| $A_4$ | تقویت سقف با کابل پس تنیده (CC) | ۰.۲۶ | ۰.۱۵ | ۱۲ | ۱۵ | ۵ | ۴ |
| $A_5$ | قاب‌های فضایی در خارج ساختمان | ۰.۵۰ | ۰.۲۲ | ۲۴ | ۲۲ | ۲ | ۲ |
| $A_6$ | بهسازی دینامیکی اتصال(EDRS) | ۰.۲۶ | ۰.۰۵ | ۱۱ | ۵ | ۶ | 5 |




شکل (۴):وزن نسبی شاخص‌های ساختمان مورد مطالعه




شکل (۵):اوزان نهایی تکنیک‌های بهسازی ساختمان مورد مطالعه



www.SID.ir

## ۶- نتیجه‌گیری

بهسازی ساختمان‌های مهم آسیب‌پذیر در مقابل خرابی پیشرونده، با توجه به اهمیت فراوان آن‌ها در زمان جنگ و صلح امری ضروری است. استفاده از تکنیک‌های بهسازی در این ساختمان‌ها، به طور چشمگیری آسیب‌پذیری، خسارت‌های مالی و تلفات جانی را کاهش می‌دهد. در این مقاله الگوریتم کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند معیارهٔ سلسله مراتبی و تاپسیس برای بهسازی ساختمان‌ها ارائه شد. این الگوریتم در قالب یک چارچوب علمی و در کم-ترین زمان و هزینه، کارشناسان را قادر به تصمیم‌گیری، تحلیل و انتخاب دقیق تکنیک بهینه می‌کند. براساس مطالعه حاضر، تکنیک بهسازی بهینه در مقابل خرابی پیشرونده برای بهبود شرایط موجود و ایجاد فضایی ایمن برای یک تیپ از ساختمان مهم تعیین شد. نتایج مطالعه موردی نشان داد، "افزودن دیوار برشی"، تکنیک بهینه بهسازی برای کاهش میزان خسارات وتلفات ناشی از بارهای در این ساختمان‌هااست.

## ۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی " امکان سنجی بهینه سازی ساختمان های موجود در برابر اثرات انفجار و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب" انجام پذیرفته است.

## ۸- مراجع

[۱] آذر، عادل؛ رجب زاده، علی؛ تصمیم‌گیری‌های کاربردی، انتشارات نگاه دانش، ویرایش سوم، ۱۳۸۸.

[۲] قدسیپور، سید حسن؛ مباحثی درتصمیم‌گیری چند معیاره: فرآیندتحلیل سلسله مراتبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش هفتم، ۱۳۸۸.

[۳] Azmoodeh, B.M.; Moghadam, A.S.; "*An investigation on the value-based evaluation: optimum rehabilitation process of the unreinforced masonry buildings*", civil engineering and environmental systems, vol. 122, p.p. 98-114, 2008.

[۴] Azmoodeh, B. M.; Moghadam, A. S.; "*Optimum Seismic Retrofitting Technique for Buildings*", civil engineering and environmental systems, vol. 148, p.p. 12-24, 2010.

[۵] Forman, E.H.; "*Decision support for Executive Decision Makers*", *Information Strategy*, vol. 32, p.p. 4-14, 1885.

[۶] Hwang, C.L.; *Yoon, K.;* "*Multiple Attribute Decision Making: Methods a and Applications*", Springer-Verlag: New York, vol. 37, p.p. 23-32, 1981

[۷] Saaty, T.L.; *Decision Making for Leaders*, 1nd Edition, RWS Publication, 1991.

[۸] Saaty, T.L.; "*Highlights and Critical Points in the Theory and Application of the Analytical Hierarchy Process*", European Operational Research, vol. 74, p.p. 426-447, 1994.

[۹] Smyth, A.W.; "*Probabilistic benefit–cost analysis for earthquake damage mitigation: Evaluating measures for apartment in turkey*", Earthquake Spectra, vol. 20, p.p. 171-203, 2004.

Archive of SID



www.SID.ir