

تعیین تکنیک بهسازی بهینه ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده با روش‌های AHP و TOPSIS

عبدالرضا سروقد مقدم^۱؛ نوید رهگذر^۲

چکیده

بهبود پایداری 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 و تلفات 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، گزینه "افزودن دیواربرشی" به عنوان مناسب‌ترین گزینه بهسازی برای تپیی از ساختمان‌های مهم 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

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

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

۱- مقدمه

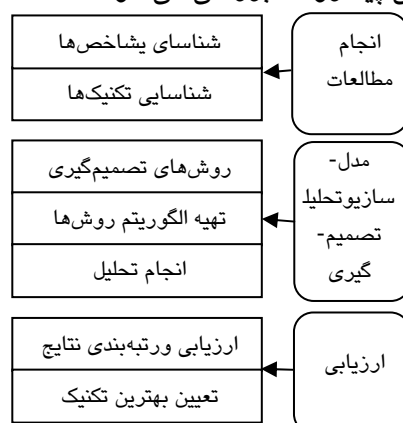
طراحی و بهسازی ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده پس از حادثه ۱۱ سپتامبر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت. در این مدت، در مراکز تحقیق و توسعه، تکنیک‌های بهسازی متعددی برای ایجاد ساختمان‌هایی مقاوم و شکل‌پذیر در مقابل خرابی پیشرونده معرفی شده است. در پروژه‌های بهسازی، انتخاب تکنیک بهسازی مختص هر ساختمان 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 تصمیم‌گیری (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 چندمعیاره (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)، تپیی 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

کمبود تجهیزات، مصالح، نیروی انسانی، تخصص و برگشت- ناپذیر بودن سرمایه در پروژه‌های بهسازی، غیرقابل قبول است. در این پروژه‌ها تصمیم‌گیری و انتخاب مناسب با توجه به تعدد تکنیک‌های بهسازی و پیچیدگی شاخص‌های کمی و کیفی 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، در شکل (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

۳-۲- تکنیک‌های بهسازی

دومین بخش از مطالعات تصمیم‌گیری، شناسایی و انتخاب مجموعه‌ای از تکنیک‌های بهسازی مرتبط با پروژه بهسازی است. 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 امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این مطالعه شش تکنیک در قالب دو دسته اصلی برای بهبود شرایط موجود ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده در نظر 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

مقابل خرابی پیشرونده در نظر 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

۳-۳- مطالعات بهسازی

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

۳-۱- شاخص‌های بهسازی

انتخاب تکنیک بهینه بهسازی ساختمان‌ها در مقابل خرابی پیشرونده به شاخص‌های کمی و کیفی متعددی وابسته

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 و وقوع 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.

۴- مدل‌سازی و تحلیل تصمیم‌گیری

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

۴-۱- روش تحلیل سلسله 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 بار در سال 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 برای مساله، 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 بهینه‌سازی توسط تحلیل سلسله مراتبی در دو مرحله 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 در نظرگیری 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

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 و وقوع 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 تکنیک‌ها به 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، تخریب‌دها را حداقل و از 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

مدرج 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 Γ_{ij} باشند، مقدار ارجحیت شاخص $C_{(c=ji)}$ و تکنیک $A_{(a=ji)}$ به ترتیب برابر نسبت های $\frac{1}{R_{ij}}$ و $\frac{1}{\Gamma_{ij}}$ هستند.

جدول (۱): ماتریس زوجی شاخصها نسبت به هدف

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

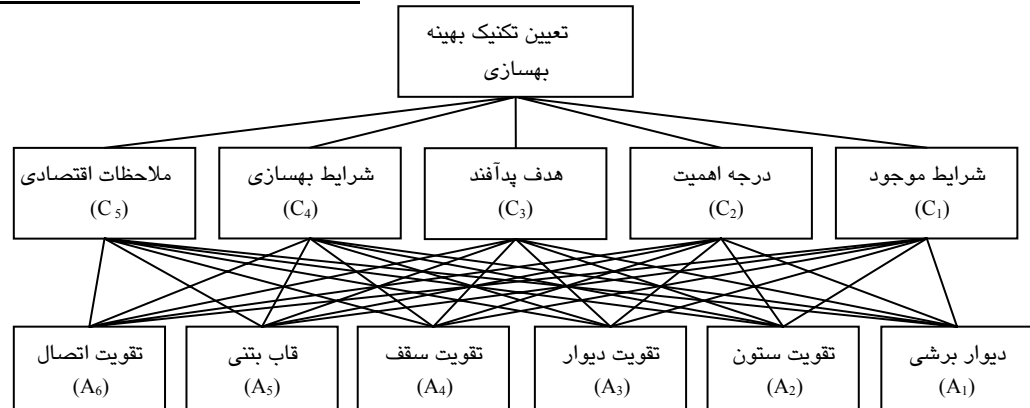
جدول (۲): ماتریس زوجی تکنیکها نسبت به شاخص نام

نسبت به شاخص نام (C_c)		تکنیکهای بهسازی $(A_{(a=i)})$					
		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

سطح اول:
(G)

سطح دوم:
شاخصها (C_c)

سطح سوم:
تکنیکها (A_a)



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

قبول میزان شاخص ناسازگاری برابر ۰.۱ است.

$$\lambda_{\max} = \max(\det([M] - \lambda[I]) = 0) \quad (1)$$

$$I.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$I.R. = \frac{I.I.}{I.I.R} \leq 0.1 \quad (3)$$

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

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 می باشد. این مرحله دارایینقسمت ۱- برپایی ماتریسهای زوجی شاخصها نسبت به هدف و تکنیکهای بهسازی نسبت به هر یک 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- الویت بندی نهایی تکنیک-های بهسازی نسبت به هدف است. در این مطالعه برای مقایسه شاخصها نسبت به هدف و مقایسه تکنیکهای بهسازی نسبت به هر یک از شاخصها به ترتیب جداول (۱) و (۲) استفاده شده است.

شایان ذکر است مقادیر کمی مدرج در ماتریسهای زوجی با مشخصه های R_{ij} و Γ_{ij} بیانگر قضاوت زوجی کلامی کارشناسان از مقایسه شاخصها یا تکنیکهای نام به شاخصها یا تکنیکهای نام است که ساعتی برای کمی سازی ارجحیتهای کیفی کارشناسان، مقادیر کمی

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

تعریف کلامی ترجیحات	مقادیر عددی ترجیحات
کاملاً 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 ماتریسهای زوجی با تعیین شاخص ناسازگاری امکان پذیر است. ساعتی برای محاسبه میزان شاخص ناسازگاری روابط (۱) تا (۳) را ارائه نموده است. معیار پذیرش قابل

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 هر یک 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 روش اوزان نسبی با حداقل کردن میانگین هندسی قضاوت کارشناسان، طبق روابط (۴) و (۵) تعیین می‌شود.

$$Min Z = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \left(\ln r_{ij} - \ln \frac{W_{(c=i)}}{W_{(c=j)}} \right)^2 \quad (4)$$

$$Min Y = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \left(\ln R_{ij} - \ln \frac{W_{(a=i)}}{W_{(a=j)}} \right)^2 \quad (5)$$

در این روابط Z و Y توابع مربعات لگاریتمی میانگین خطاها است؛ r_{ij} و R_{ij} به ترتیب ارجحیت نسبی شاخص یا روش نام به شاخص یا روش نام می‌باشند و W_c و 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.

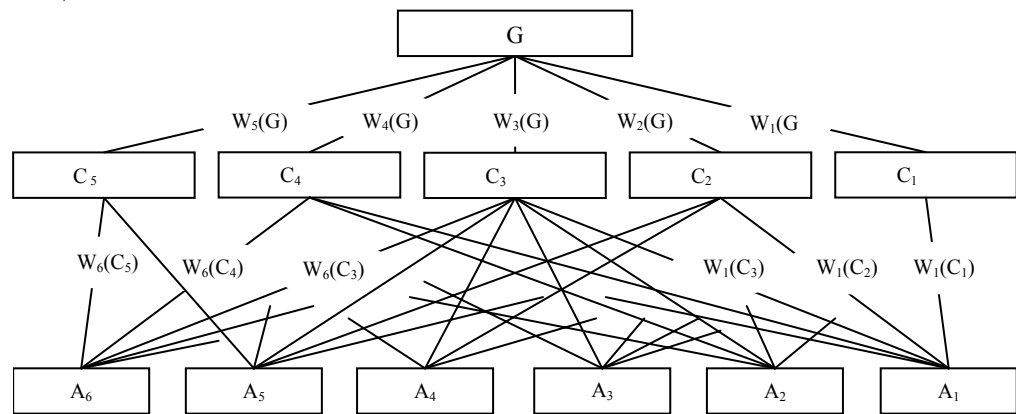
$$W_a(G) = \sum_{a=1}^6 \sum_{c=1}^5 W_a(C) \times W_c(G) \quad (6)$$

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

سطح اول
هدف (G)

سطح دوم
شاخص‌ها (C)

سطح سوم
تکنیک‌ها (A)



شکل (۳): شمایی از ساختار وزن‌های 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 $[P_{ij}]_{5 \times 6}$ برای معنادار شدن محاسبات و نتایج تحلیل طبق تعریف ریاضی رابطه (۷) تشکیل شد.

۴-۲-

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس بر پایه نظریه قوی ریاضی، اولین بار توسط هوانگ و یون [۶] در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این روش قابلیت در نظرگیری 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

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 تکنیک‌ها تعیین می‌شود. در این مقاله برای انجام عملیات جبری از تعریف بی‌بعدسازی نرم‌بردار طبق رابطه (۱۱) استفاده شده است. ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد $[n_{ij}]_{5 \times 6}$ در جدول (۸) نشان داده شده است.

$$n_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sqrt{\sum I_{ij}^2}} \quad (11)$$

جدول (۷): ماتریس وزن شاخص‌ها

		شاخص‌های $(C_{(a=i)})$				
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
شاخص‌های $(C_{(a=i)})$	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 $([n_{ij}]_{5 \times 6})$

		تکنیک‌های بهسازی $(A_{(a=i)})$					
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
شاخص‌های $(C_{(a=i)})$	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 I_{ij} نسبت به شاخص I_{ij} نام، $\sqrt{\sum I_{ij}^2}$ بردار نرم هر یک از بردارهای ارزش‌گذاری حاصل از تکنیک A_a شاخص C_c ماتریس تصمیم‌گیری هستند.

در روش تاپسیس برای در نظرگیری تاثیر وزن شاخص‌ها از ماتریس $[v_{ij}]_{5 \times 6}$ ، حاصل از ضرب ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد $[n_{ij}]_{5 \times 6}$ در ماتریس قطری $[w_{ij}]_{5 \times 5}$ طبق رابطه (۱۲) استفاده می‌گردد. ماتریس تصمیم‌گیری وزن‌دار شده در جدول (۹) نشان داده شده است.

$$P_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sum_{j=1}^6 I_{ij}} \quad (7)$$

در (۷) و جداول (۵) و (۶)، I_{ij} مقدار ارزش تکنیک I_{ij} نسبت به شاخص I_{ij} نام، P_{ij} مقادیر بی‌بعد شده ماتریس تصمیم‌گیری، A_a تکنیک و C_c شاخص‌های ماتریس تصمیم‌گیری هستند.

جدول (۵): ماتریس تصمیم‌گیری

		تکنیک‌های بهسازی $(A_{(a=i)})$					
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
شاخص‌های $(C_{(a=i)})$	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 $([P_{ij}]_{5 \times 6})$

		تکنیک‌های بهسازی $(A_{(a=i)})$					
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
شاخص‌های $(C_{(a=i)})$	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 $[P_{ij}]_{5 \times 6}$ ، 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 $[w_{ij}]_{5 \times 5}$ متشکل از اوزان نسبی شاخص‌ها (w_i) در جدول (۷) نمایش داده شده است.

$$E_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{j=1}^6 P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (8)$$

$$d_i = 1 - E_i \quad (9)$$

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^5 d_i} \quad (10)$$

در (۸) تا (۱۰)، P_{ij} عناصر بی‌بعد شده ماتریس تصمیم‌گیری، m تعداد تکنیک‌ها، E_i میزان آنتروپی، d_i درجه انحراف شاخص‌ها و w_i وزن نسبی شاخص‌ها

$$[v_{ij}]_{5 \times 6} = [w_{ij}]_{5 \times 5} \times [n_{ij}]_{5 \times 6} \quad (12)$$

در این رابطه، v_{ij} مقادیر ماتریس بی بعد وزن دار شده، w_{ij} مقادیر ماتریس وزن شاخص ها و n_{ij} مقادیر ماتریس بی بعد تصمیم گیری هستند.

برای تعیین جواب های ایده آل مثبت (بهترین) و منفی (بدترین) هر شاخص به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مختص هر شاخص ماتریس تصمیم گیری بی بعد وزن دار طبق روابط (13) و (14) انتخاب شده است. جواب های ایده آل در جدول (9) نشان داده شده است.

$$A_i^+ = \{A_1^+, A_2^+, A_3^+, A_4^+, A_5^+\} \\ = \{\max(v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j})\} \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (13)$$

$$A_i^- = \{A_1^-, A_2^-, A_3^-, A_4^-, A_5^-\} \\ = \{\min(v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j})\} \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (14)$$

در (12) تا (14) عناصر ماتریس بی مقیاس وزن دار، A_i^+ و A_i^- جواب های ایده آل مثبت و منفی نام هستند.

جدول (9): ماتریس وزن دار شده و جواب های ایده آل

	$(A_{a(a=j)})$						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 گزینه A_j با مولفه های v_{ij} ، از بردارهای جواب های ایده آل مثبت A_i^+ با مولفه های v_{ij}^+ و جواب های ایده آل منفی با مولفه های v_{ij}^- ، میزان فاصله تکنیک های بهسازی با جواب های ایده آل طبق روابط (14) و (15) محاسبه شده است.

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (v_{ij} - A_i^+)^2} \rightarrow j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (14)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (v_{ij} - A_i^-)^2} \rightarrow j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (15)$$

در این روابط D_j^+ و D_j^- به ترتیب فاصله اقلیدسی روش زام از ایده آل مثبت و منفی هستند.

سرانجام رتبه هر تکنیک با محاسبه فاصله نسبی

تکنیک های تصمیم گیری طبق رابطه (16) تعیین شد. براساس این رابطه، تکنیک بهینه دارای بیشترین مقدار فاصله نسبی نسبت به سایر تکنیک ها است.

$$CL_j^+ = \frac{D_j^+}{D_j^+ + D_j^-} \rightarrow j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (16)$$

در این رابطه D_j^+ و D_j^- به ترتیب فاصله اقلیدسی تکنیک زام از ایده آل مثبت و منفی و CL_j^+ فاصله نسبی هر تکنیک با روش ایده آل است.

5- مطالعه موردی

در این بخش نتایج توسعه روش های تصمیم گیری تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس، برای یک نمونه از ساختمان های تپ مهم کشور ارائه و ارزیابی می شود. تعدادی از مشخصات و ویژگی هایی این ساختمان در جدول (10) ارائه شده است.

جدول (10): 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 سازه ای	منظم	هندسه ساختمان	مسطح
وضعیت	آسیب پذیر	بازشوها در ارتفاع	۳۰ درصد
نوع پی	گسترده	همجواری با تاسیسات	غیر همجواری

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 نشان دهنده آسیب پذیری سازه و فونداسیون این ساختمان در مقابل خرابی پیش رونده است. کارشناسان با توجه به شرایط آسیب پذیر موجود معماری و سازه ای ساختمان، محدوده تلفات انسانی و خسارت های ناشی از خرابی ساختمان را زیاد برآورد نموده اند.

با توجه به نیاز این ساختمان به بهسازی، شش روش بهسازی معرفی شده در بند (3)، برای دستیابی به برترین تکنیک بهسازی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور برای مقایسه نسبی شاخص ها و تکنیک-

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.

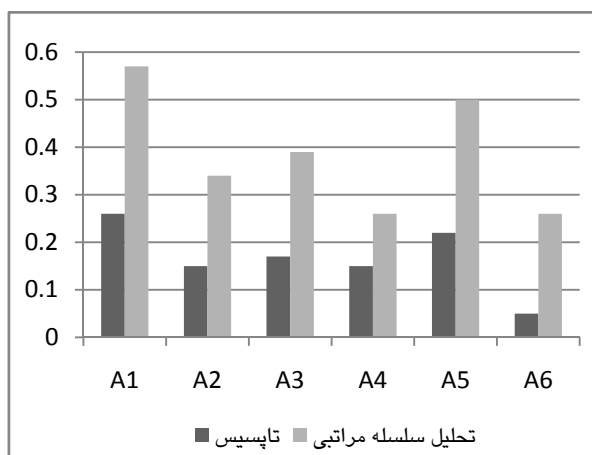
های بهسازی، از روش‌های فرآیند سلسله مراتبی و تکنیک تاپسیس مطابق روال توضیح داده شده در بند (۴) استفاده شد. نتایج رتبه‌بندی، وزن و درصد اهمیت هر یک از شاخص‌ها و تکنیک‌های بهسازیدر جداول (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. شایان ذکر است، وزن نسبی شاخص‌ها در روش سلسله مراتبی به وسیله روش حداقل مربعات لگاریتمی و 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

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

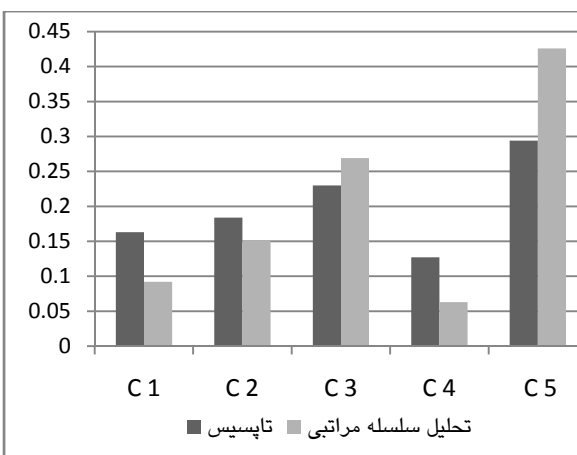
شاخص‌ها	وزن نسبی		درصد اهمیت نسبی		رتبه شاخص‌ها	
	تاپسیس	سلسله مراتبی	تاپسیس	سلسله مراتبی	تاپسیس	سلسله مراتبی
C ₁ شرایط موجود ساختمان	۰.۱۶	۰.۰۹	۱۶	۹	۴	۴
C ₂ درجه اهمیت ساختمان	۰.۱۸	۰.۱۵	۱۸	۱۵	۳	۳
C ₃ هدف تکنیک‌های	۰.۲۳	۰.۲۶	۲۳	۲۶	۲	۲
C ₄ شرایط طراحی و اجرای بهسازی	۰.۱۲	۰.۰۶	۱۲	۶	۵	۵
C ₅ ملاحظات اقتصادی 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	۴	۵
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	۵	۵



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



شکل (۴): وزن نسبی شاخص‌های ساختمان مورد مطالعه

۸- مراجع

- [۱] آذر، عادل؛ رجب زاده، علی؛ تصمیم‌گیری‌های کاربردی، انتشارات نگاه دانش، ویرایش سوم، ۱۳۸۸.
- [۲] قدسیپور، سید حسن؛ مباحثی در تصمیم‌گیری 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.
- 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 معیاره 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 و تلفات ناشی از بارهای در این ساختمان‌هاست.

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.