



# Optimizing the Life Cycle of Residential Buildings by Combining Hierarchical Analysis and Value Engineering Methods with the Classic and Widely Used AHP Analysis Model

Masoud Mahdavi<sup>1\*</sup>, Seyyedreza Hosseini<sup>2</sup>, Abbas Babaafjeei<sup>3</sup>, Saba Chaghakaboodi<sup>4</sup>, Farzaneh Ghasemi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Structures, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2,3</sup>Master's Student, Department of Structures, Faculty of Civil Engineering, Khajeh K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>4</sup>PhD Student, Department of Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>5</sup>Master's Degree, Department of Aeronautical Structures, Faculty of Aerospace, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

Received: 11.22.2023

Revised: 07.22.2024

Accepted: 09.11.2024

### Keyword:

Optimization  
Residential Building Life Cycle  
Hierarchical Analysis  
Value Engineering  
Proposed Algorithm

### \*Corresponding Author:

Masoud Mahdavi

Email:

[dr.civil.book@gmail.com](mailto:dr.civil.book@gmail.com)

## ABSTRACT

The life cycle of residential buildings means increasing the maximum level of performance and reducing costs. In the current research, the opinions of 35 university professors and doctoral students in the fields of structure and construction management were collected with a researcher-made questionnaire including the objective, 5 criteria and 15 sub-criteria. The questionnaire used pairwise comparisons, the average scores of which were input data to the Expert Choice software and analyzed using the Analytical Hierarchy (AHP) method. The results were redesigned with the method of value engineering, review and indicators, and a proposed algorithm was presented to optimize the life cycle. The results showed that the criteria of "improving seismic performance", "reducing implementation cost", "increasing structural safety", "increasing structure size" and "reducing structure weight" with influence coefficients of 0.486, 0.312 and 0.102, 0.062 and 0.039, ranked 1 to 5 in the order mentioned were the most influential on the optimization process. The sub-criteria of "equipment of the structure to energy consumption systems (earthquake)", "reduction of wages", "use of modern structural systems" and "use of prefabricated technology" with influence coefficients of 0.318, 0.204, 0.127 and 0.078 were the most effective sub-criteria in optimizing the life cycle of residential buildings due to having higher influence coefficients than the numerical average in all sub-criteria (0.067). The criterion of "structure weight reduction" and the sub-criterion of "formation volume reduction" were the least effective parameters on the life cycle of residential buildings with impact coefficients of 0.039 and 0.003, respectively.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Building optimization is one of the most important topics that civil engineers pay attention to. Some engineers believe that building optimization will lead to building materials (especially steel and concrete) being less used. Others believe that increasing the amount of materials used increases the strength of the structure. However, the stated items have deviated from the original and correct concept of building optimization. The minimum possible consumption of building materials while maintaining the strength of the structure is the correct concept of optimization. The growing importance of economic indicators in today's world is the main reason for civil engineers to pay attention to building optimization. Thus far, in the studies conducted in Iran, no algorithm has been proposed to increase the effectiveness of effective parameters in the optimization of residential buildings. In this research, an attempt was made to solve this defect and propose an algorithm to optimize the life cycle of residential buildings.

### Methodology

In the present study, a researcher-made questionnaire including goals, 5 criteria and 15 sub-criteria (with a classical model in the hierarchical analysis process (AHP)) was created. The initial questionnaire was created by conducting library studies and by researchers. Then, with the help of university professors, it was modified and prepared for presentation to the target community. Then, using a researcher-made questionnaire (confirmed with the opinions of university professors and mathematical methods), the opinions of 35 professors and doctoral students (in the field of civil engineering - structure and construction management) were collected. The scores provided by the statistical population were entered into the Expert Choice software as the same weighted average. After hierarchical analysis, the results were prioritized in a stepwise manner. Then, the output results were removed by the value engineering method, and the desired factors were removed from the set of indicators (in the criteria and sub-criteria section). Then, the proposed algorithm for optimizing residential buildings was created by using all the research findings and combining hierarchical analysis and value engineering methods.

### Results and discussion

The results showed that the "seismic performance improvement" criterion with a weight of 0.486 had the greatest effect on the optimization of residential buildings. The criteria of "reducing the cost of implementation" and "increasing the safety of the structure" were ranked second and third in terms of the greatest impact on optimization with weights of 0.312 and 0.102, respectively. In addition, the criteria of "increasing the size of the structure" and "reducing the weight of the structure" had the least effect on optimization with weights of 0.062 and 0.039, respectively. The sub-criteria were also checked and weighted by the AHP analysis method. The sub-criteria of "equipment of the structure with energy depreciation systems", "reduction of wages" and "use of new structural systems" had the greatest impact on the optimization of residential buildings with weights of 0.318, 0.204 and

0.127, respectively. The sub-criteria of "reduction of molding volume", "possibility of removing shear wall" and "reduction of concreting consumption" had the least impact with weights of 0.003, 0.006 and 0.008 respectively. In the optimization of residential buildings, various analyses including sensitivity, dynamics and gradient were performed in the existing sub-criteria so that the research results were valid and practical.

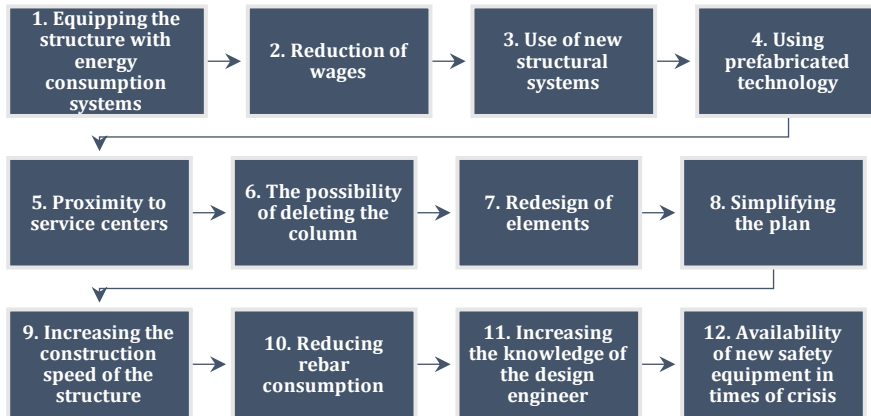


Figure 1. The proposed algorithm of the current paper in optimizing the life cycle of residential buildings.

## Conclusion

The results demonstrated that the criterion of "seismic performance" with a statistical weight of 0.486 was the most important factor affecting the optimization of residential buildings. Furthermore, the findings indicated that the "reduction of construction costs" criterion was three times more important than the "structure safety" criterion in optimizing residential buildings. The most important reason for this conclusion was the increase in the importance of economic indicators and obtaining appropriate profits in construction projects. Finally, the results illustrated that the reduction of focus on the optimization of indicators including "formwork", "shear wall" and "volume of concrete consumed", due to the lower impact in the optimization process, compared to other effective parameters in the optimization of residential buildings, had better impact.



## بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی با ترکیب روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و مهندسی ارزش با مدل کلاسیک و پر کاربرد تحلیل AHP

مسعود مهدوی<sup>۱\*</sup>، سیدرضا حسینی<sup>۲</sup>، عباس باباجایی<sup>۳</sup>، صبا چقاابودی<sup>۴</sup>، فرزانه قاسمی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کهن، طوسی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه کهن طوسی، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۵- کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های هوانوردی، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی کهن، طوسی، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دوره حیات ساختمان‌های مسکونی، به معنای افزایش حداکثری سطح عملکرد و کاهش هزینه هاست. در پژوهش حاضر با پرسش‌نامه محقق‌ساخته شامل هدف، ۵ معیار و ۱۵ زیرمعیار، نظر ۳۵ نفر از استادان دانشگاه و دانشجویان دکتری در گرایش‌های سازه و مدیریت ساخت گردآوری شد. پرسش‌نامه دارای سؤالاتی با مقایسه زوجی است که میانگین امتیازها، به‌عنوان داده ورودی به نرم‌افزار Expert Choice می‌باشد و با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) آنالیز شد. نتایج با روش مهندسی ارزش، بازنگری و شاخص‌ها بازطراحی شدند و الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی دوره حیات ارائه شد. نتایج نشان داد که معیارهای «بهبود عملکرد لرزه‌ای»، «کاهش هزینه اجرا»، «افزایش ایمنی سازه»، «افزایش متراژ سازه» و «کاهش وزن سازه»، با ضرایب تأثیر ۰/۴۸۶، ۰/۳۱۲، ۰/۱۰۲، ۰/۰۶۲ و ۰/۰۳۹، در رتبه‌های ۱ تا ۵ بیشترین تأثیرگذاری بر فرایند بهینه‌سازی قرار دارند. زیرمعیارهای «تجهیز سازه به سیستم‌های استهلاک انرژی (زلزله)»، «کاهش دستمزدها»، «استفاده از سیستم‌های سازه‌ای نوین» و «استفاده از فناوری پیش‌ساخته» با ضرایب تأثیر ۰/۳۱۸، ۰/۲۰۴، ۰/۱۲۷ و ۰/۰۷۸ مؤثرترین زیرمعیارها در بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی، به دلیل داشتن ضرایب تأثیر بالاتر از میانگین عددی در تمام زیرمعیار (۰/۰۶۷) هستند. معیار «کاهش وزن سازه» و زیرمعیار «کاهش حجم قالب‌بندی» با ضرایب تأثیر ۰/۰۳۹ و ۰/۰۰۳ به‌عنوان کم‌اثرترین پارامترها بر دوره حیات ساختمان‌های مسکونی معرفی می‌شوند.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

### کلید واژگان:

بهینه‌سازی  
دوره حیات ساختمان مسکونی  
تحلیل سلسله‌مراتبی  
مهندسی ارزش  
الگوریتم پیشنهادی

\*نویسنده مسئول: مسعود مهدوی

پست الکترونیکی:

[dr.civil.book@gmail.com](mailto:dr.civil.book@gmail.com)



## مقدمه

بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان، از موضوعات مهمی است که امروزه مهندسان سازه به آن بسیار توجه می‌کنند. برخی مهندسان بر این باورند که بهینه‌سازی موجب کاهش حجم مصالح مصرفی در احداث ساختمان می‌شود اما برخی از مهندسان معتقدند که کاهش مقدار مصالح مصرفی در بهینه‌سازی موجب کاهش استحکام سازه و تأثیرات ثانویه بر ساختمان خواهد شد. به‌طور کلی، نظرات مهندسی بیان‌شده، از مفهوم صحیح بهینه‌سازی سازه، بسیار دور است. معنای صحیح بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان عبارت از مصرف حداقل ممکن از مصالح ساختمانی، همراه با حفظ استحکام و عملکرد لرزه‌ای است [۱]. بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان به معنای استفاده از روش‌های نوین علمی است که در بخش‌های مختلف اعم از طراحی و اجرای ساختمان به‌کار گرفته می‌شود. هدف از انجام بهینه‌سازی ساختمان، دستیابی به اهداف مختلفی اعم از افزایش سطح ایمنی، عملکرد لرزه‌ای و بازده اقتصادی و کاهش خطرات نیروهای انسانی حین کار، زمان احداث ساختمان و مصالح مصرفی است [۲]. نگرین<sup>۱</sup> و همکاران [۳] به ترکیب روش‌های مختلف بهینه‌سازی ساختمان برحسب ساختار پیشنهادی پرداختند. در این پژوهش، ۸ متغیر شامل وزن ساختمان، بازده اقتصادی، المان‌های سازه‌ای مختلف و عملکرد زیست‌محیطی در بهینه‌سازی مؤثر بودند. نتایج نشان داد که استفاده از روش پیشنهادی، موجب کاهش مصالح مصرفی و هزینه‌های اجرایی ساختمان شده است. البلتاگی<sup>۲</sup> و همکاران [۴] توانستند تا با استفاده از روش پیشنهادی نوین، مدلی را برای بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌ها ارائه دهند. نتایج نشان داد که استفاده از مدل پیشنهادی، موجب کاهش ۲۵ درصد مصرف انرژی در ساختمان می‌شود و ارتقای عملکرد سبز ساختمان را به همراه دارد. ژو<sup>۳</sup> و همکاران [۵] توانستند تا روشی پیشنهادی برای بهینه‌سازی و ارتقای حیات آن از دیدگاه زیست-محیطی ارائه دهند. نتایج نشان داد که با انجام بهینه‌سازی، ۴۷/۶ درصد از تأثیرات نامناسب زیست‌محیطی ساختمان کاهش یافته است. آروخو<sup>۴</sup> و همکاران [۶] به افزایش دوره حیات ساختمان بر اساس روش پیشنهادی پرداختند. آن‌ها از روش بهینه‌سازی چندهدفه برای انجام مطالعه استفاده کردند. در این پژوهش، تأثیرات عوامل مختلف شامل معیار اقتصادی، وزن سازه و ابعاد المان‌ها در روش پیشنهادی لحاظ شده است. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی موجب ۶۰ درصد کاهش در مصرف انرژی ساختمان و افزایش عمر مفید سازه می‌شود. کوواچیچ و زولر<sup>۵</sup> [۱] به ایجاد روش‌های بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان در مراحل اولیه طراحی پرداختند. در گام نخست (طراحی سازه)، پتانسیل بهینه‌سازی با هزینه بسیار کم مقدور است. در مراحل بعدی، امکان تغییرات دلخواه، به سرعت و با افزایش هم‌زمان هزینه‌ها کاهش می‌یابد از این‌رو در این پژوهش، تمرکز بر گام نخست از فرایند ساخت سازه بوده است. نتایج نشان داد که امکان بهینه‌سازی ساختمان در گام نخست آن مقدور است، با این شرط که برای هر سازه باید روش‌هایی متناسب با شرایط کلی آن ایجاد گردد. لونگو<sup>۶</sup> و همکاران [۷] به انجام بهینه‌سازی دوره حیات عملکردی ساختمان‌ها پرداختند. آن‌ها با استفاده از ترکیب ۱۲ پارامتر سعی کردند تا تأثیر عوامل مؤثر بر بهینه‌سازی ساختمان را با بیشترین دقت ممکن مدل‌سازی کنند. نتایج نشان داد که پارامترهای نوع مصالح، ضخامت پوشش دیوار و سقف، استفاده از فناوری‌های تجدیدپذیر و میزان سطح اشغال بنا، مهم‌ترین عوامل در روابط پیشنهادی برای بهینه‌سازی ساختمان محسوب می‌شوند. مونتانا<sup>۷</sup> و همکاران [۸] اقدام به بهینه‌سازی چندهدفه در عملکرد چرخه دوره حیات ساختمان (مطالعه موردی: نوسازی مسکن در شمال اروپا) پرداختند. این پژوهش در کشور دانمارک انجام شد و نتایج نشان داد که بهبود پوشش سقف و دیوار خارجی به عنوان

---

<sup>1</sup> Negrin

<sup>2</sup> Elbeltagi

<sup>3</sup> Zhou

<sup>4</sup> Araujo

<sup>5</sup> Kovacic & Zoller

<sup>6</sup> Longo

<sup>7</sup> Montana

عایق ساختمان موجب شد تا میزان مصرف سالانه انرژی از ۱۶۶/۴ به ۸۳/۷-۷۶/۵ کیلووات ساعت کاهش یابد. والتر<sup>۱</sup> و همکاران [۹] به ارزیابی دوره حیات ساختمان‌های هوشمند پرداختند. طی این مطالعه موردی، اصول ارزیابی چرخه دوره حیات ساختمان‌های هوشمند و روش‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در آن‌ها بیان شده است. یو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۰] به بهینه‌سازی چندمعیاره عملکرد دوره حیات ساختمان در مراحل اولیه طراحی پرداختند. این پژوهش، مطالعه‌ای موردی روی ساختمان موزه کاپسیم<sup>۳</sup> در شمال چین است. نتایج نشان داد که هندسه سازه و نوع مصالح مصرفی، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در بهینه‌سازی ساختمان هستند. لو و اویدله<sup>۴</sup> [۱۱] به انجام بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های اداری با اعمال اثر تغییرات اقلیمی پرداختند. تغییرات آب و هوایی تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد انرژی ساختمان دارد. در این مطالعه، یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی و مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین نیازهای گرمایشی و انرژی الکتریکی آینده برای ساختمان مورد مطالعه ایجاد شده است. نجار<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] به بهینه‌سازی ساختمان با مدل‌سازی داده‌های آن و ارزیابی دوره حیات برای تولید ساختمان‌های با بازده انرژی بالا پرداختند. آن‌ها تمرکز مطالعه را بر ارتقای پوشش اجزای ساختمان به‌عنوان معیار اصلی ارتقای دوره حیات آن قرار دادند. نتایج نشان داد که بهسازی پوشش اجزا موجب کاهش ۴۵ درصد مصرف انرژی سالیانه و شاخص پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از تأثیرات ساختمان را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. مستوی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] به توسعه روش جدیدی برای بهینه‌سازی هزینه دوره حیات ساختمان، رضایت ساکنان و آثار زیست‌محیطی آن پرداختند. برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، یک الگوریتم مبتنی بر جستجوی هارمونی، استفاده شده است. همچنین، برای شناسایی سطح رضایت حرارتی ساختمان، یک شاخص آسایش حرارتی مبتنی بر نظریه ابزار جدید، تعریف و محاسبه شده است. نتایج بیانگر کاربردی بودن روش پیشنهادی در این پژوهش است. پال<sup>۷</sup> و همکاران [۱۴] توانستند تا یک روش پیشنهادی برای ارزیابی دوره حیات چندهدفه در طراحی ساختمان‌ها (مطالعه موردی: ساختمانی در فنلاند) ارائه کنند. بهینه‌سازی در یک خانه شهری در فنلاند با ۳ جایگزین سازه‌ای شامل بتن مسلح، فولاد و تخته چندلایه (CLT)<sup>۸</sup> انجام شد. گزینه‌های مختلف برای ضخامت عایق انواع دیوار خارجی، سقف، کف و پنجره به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد زیرا دامنه مطالعه بر روی پوشش ساختمان است. اهداف بهینه‌سازی در این پژوهش شامل کاهش انرژی چرخه زندگی (LCE)<sup>۹</sup> و هزینه‌های دوره حیات (LCC)<sup>۱۰</sup> است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی کاربردی است و بر تغییرات ضخامت پوشش به‌عنوان راهکار مناسب برای ارتقای دوره حیات ساختمان تأکید دارد. لئو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی روش بهینه‌سازی دوهدفه مصرف انرژی دوره حیات به‌منظور صرفه‌جویی با الگوریتم ژنتیک پرداختند. این روش برای طراحی یک ساختمان اداری کوچک در شهر شیآن کشور چین اعمال شد که با کمک ۷ معیار طراحی و ۲ زیرمعیار (دمای سرمایش و گرمایش) مربوط به تمایل به صرفه‌جویی در انرژی کاربران بهینه شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند مصرف انرژی را به میزان ۱۵/۱-۱۸/۸ درصد و هزینه را ۲/۲-۱۰/۱ درصد در طول دوره حیات ساختمان کاهش دهد.

---

<sup>1</sup> Walter

<sup>2</sup> Yu

<sup>3</sup> Campus Museum

<sup>4</sup> Lou & Oyedele

<sup>5</sup> Najjar

<sup>6</sup> Mostavi

<sup>7</sup> Pal

<sup>8</sup> Cross Laminated Timber (CLT)

<sup>9</sup> life Cycle Energy (LCE)

<sup>10</sup> Life Cycle Costs (LCC)

<sup>11</sup> Lou

امروزه عوامل مختلفی همچون افزایش جمعیت نیازمند مسکن، کاهش زمین‌های مناسب برای احداث ساختمان‌های مسکونی و افزایش اهمیت بازده اقتصادی در پروژه‌های ساختمانی، موجب شده است تا اهمیت افزایش دوره حیات ساختمان‌های مسکونی بیش از گذشته وجود داشته باشد. این مسئله به‌طور خاص در کشورهای صنعتی و رو به رشدی همچون ایران، اهمیت بیشتری دارد. از این‌رو در پژوهش حاضر سعی شده است تا با ترکیب روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و مهندسی ارزش، عوامل مؤثر بر دوره حیات ساختمان مسکونی، تفکیک و ضمن تعیین وزن آماری آن‌ها با روش‌های نوین، الگوریتمی پیشنهادی برای افزایش تأثیر آن‌ها پیشنهاد شود. در این راستا، با استفاده از پرسش‌نامه محقق‌ساخته سعی شده است تا نظرات ۳۵ نفر از استادان دانشگاه و دانشجویان مقطع دکتری، گردآوری و بررسی شود. در نهایت با استفاده از روش‌های مهندسی و آماری، الگوریتم پیشنهادی پژوهش حاضر برای افزایش دوره حیات ساختمان مسکونی ارائه شده است.

## مبانی نظری

### مهندسی ارزش

در این روش، سعی می‌شود تا با ساختاری هدفمند و مدون، تمام فعالیت‌های انجام‌شده در طول پروژه بررسی شود که این روش مهندسی، یکی از کارآمدترین و کاربردی‌ترین روش‌های اقتصاد مهندسی در عرصه فعالیت‌های ساختمانی جهان محسوب می‌شود. مهندسی ارزش در ساختار مدیریت پروژه، ضمن توجه به تمامی اجزای آن، هیچ قسمت از پروژه را مسلم و حتمی فرض نمی‌کند. هدف اصلی در مهندسی ارزش، حصول زمان کمتر برای نیل به اتمام پروژه، بدون نیاز به افزایش هزینه‌های کلی احداث ساختمان که موجب کاهش سطح کیفیت پروژه نشود [۱۶]. ساختار مهندسی ارزش شامل ۳ گام زیر است:

- (۱) **پیش‌مطالعه:** کارهای ابتدایی اعم از ایجاد بستر مناسب برای تعیین اعضای گروه همکاری، تعیین اهداف نهایی پروژه، ارزیابی نیازهای کارفرما، مشتریان و سایرین، تکمیل داده‌های لازم، تبادل افکار و نظر با عوامل حاضر در پروژه و تعیین محدوده مطالعاتی است.
- (۲) **انجام مطالعات ارزش:** این گام، پس از کامل شدن گام اول و متدولوژی ارزش انجام می‌شود. مطالعات ارزش از ۶ بخش متفاوت تشکیل شده است که عبارتند از: (الف) تبیین و تشریح داده‌ها، (ب) تحلیل عملکرد و بسط آن، (ج) خلاقیت و ابتکار، (د) ارزیابی و سنجش عوامل، (و) توسعه فکری و اجرایی و (ه) ارائه پیشنهاد.
- (۳) **پس‌مطالعه با انجام مطالعات تکمیلی و جامع:** هدف از این گام، حصول اطمینان از اجرای تغییرات موردنظر در گام دوم است که شامل انجام تغییرات در اجرای ایده پایانی است که گروه مهندسی ارزش یا سایر خبرگان مورد تأیید مدیر و با هماهنگی با مدیریت گروه مهندسی ارزش، بر روند چگونگی اجرای گام سوم، ناظر هستند. مجموعاً باید گفت که تمامی گام‌های مهندسی ارزش، به‌صورت متوالی و بدون امکان حذف هیچ کدام از آن‌ها، انجام می‌شود. در شکل ۱، نمودار هزینه-ارزش یک پروژه ساختمانی ارائه شده است که می‌توان مشاهده کرد که در آن، چهار حالت مختلف برای یک ساختمان ممکن است و گزینه مناسب، هزینه پایین و ارزش بالاست که در این شرایط، بازده اقتصادی پروژه، بالاترین مقدار ممکن است [۱۶].



شکل ۱. نمودار مایلز: انواع حالات هزینه-ارزش در یک پروژه ساختمان مسکونی و تعیین گزینه مناسب (مربع سبزرنگ) با روش مهندسی ارزش [۳؛ ۱۶].

### تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

این روش را توماس ال. ساعتی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۰ ابداع کرد و تا امروز، به‌عنوان روشی کاربردی و فراگیر مطرح است. این روش در گروه تصمیم‌گیری چندمعیاره جای دارد که با کمک آن می‌توان مسائل دشوار مهندسی و مدیریت پروژه را در سطوح مختلف اجرایی تحلیل کرد. روش AHP، مشاهده‌ها و افکار درونی فرد تصمیم‌گیر را به‌صورت منسجم و هدفمند، بر اساس مقایسه‌های زوجی، تحلیل و به فرد مسئول کمک می‌کند تا جوانب کلی و جزئی مسائل موردنظر را در قالب سلسله‌مراتب سازمان‌دهی کند [۱۶]. مزایای مهم تحلیل AHP شامل (الف) ارزیابی سازگاری قضاوت‌های مسئولان امر، (ب) انجام مقایسه‌های زوجی در انتخاب راهکارهای بهینه، (ج) امکان اعمال معیارها و زیرمعیارهای مختلف در ارزیابی هدف پروژه و (د) ایجاد امکان نیل به شاخص‌های مؤثر بر هدف به کمک انجام مقایسه‌های زوجی تمام شاخص‌هاست. به‌طور کلی، تحلیل AHP چهار ساختار اجرایی دارد که در جدول ۱ ارائه شده است. مدل کلاسیک، کاربردی‌ترین روش موجود در تحلیل AHP است که شامل هدف، معیار و زیرمعیار است [۱۶].

جدول ۱. انواع مدل‌های موجود در روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) [۱۶].

ردیف	شاخص		هدف	معیار	زیرمعیار	گزینه
	مدل ۱	نوع مدل				
۱	مدل ۱	دارد	دارد	دارد	-	-
۲	مدل ۲	دارد	دارد	دارد	دارد	-
۳	مدل ۳	دارد	دارد	دارد	-	دارد
۴	مدل ۴	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد

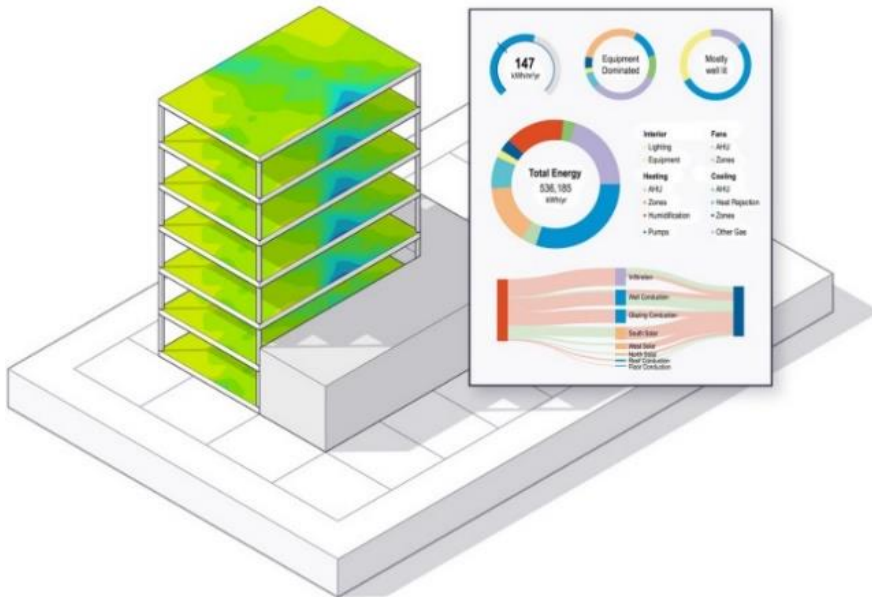
<sup>۱</sup> Analytical Hierarchy Process (AHP)

<sup>۲</sup> Thomas L. Saaty

### مدیریت انرژی توسط روش‌های تحلیلی و نرم‌افزاری با به‌کارگیری BIM و REVIT

مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM<sup>۱</sup>) از نوآوری‌های مهم در صنعت ساختمان است که تحول زیادی ایجاد کرده است. از جمله امکانات موجود در این روش، وجود ذخیره‌سازی داده‌های قسمت‌های مختلف ساختمان، پروژه اجرایی و ارزیابی محاسبات انرژی است. این ساختار به مهندسان عمران کمک می‌کند تا ضمن صرف زمان و هزینه‌های کمتر، به مشخصات لازم برای محاسبه بازده انرژی ساختمان دست یابند. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند تا محاسبات انرژی ورودی-انرژی مفید را در لحظه انجام و مدل‌سازی گرافیکی آن را انجام دهد تا قابل رؤیت باشد. پژوهش‌ها نشان داد که در سال ۲۰۰۱، بیش از ۵/۵ میلیارد دلار (۳۸ درصد مصرف انرژی جهان)، به صنعت ساختمان اختصاص دارد که این مقدار در سال ۲۰۲۰ به حدود ۶/۱۵ میلیارد دلار رسید. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در نرم‌افزارهای مختلفی شامل REVIT و ARCHICAD قابل انجام است [۱۷]. برخی از مهم‌ترین برنامه‌های تحلیل انرژی عبارتند از:

- **IES<sup>۲</sup>**: از برنامه‌های ابتدایی در تحلیل انرژی است که دقت مناسبی در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان دارد. تحلیل تمام بخش‌ها به‌صورت محیطی و تمام اجزا، پیچیده و دارای هزینه زیادی هستند.
- **Energy Plus**: از بهترین و کاربردی‌ترین برنامه‌های تحلیل و مدیریت انرژی در جهان است. برنامه کاملاً رایگان است و در سال ۲۰۰۱ میلادی وارد صنعت ساختمان شده است. مصرف آب و مدیریت انرژی، در این برنامه گنجانده شده و به بهبودسازی دوره حیات ساختمان کمک زیادی می‌کند. در شکل ۲، نمونه‌ای از تحلیل انرژی در برنامه Energy Plus ارائه شده است [۱۷].



شکل ۲. نمونه‌ای از تحلیل انرژی در برنامه Energy Plus [۱۷].

<sup>۱</sup> Building Information Modeling (BIM)

<sup>۲</sup> Integrated Environmental Solutions (IES)

## روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر، مدل کلاسیک و پرکاربرد تحلیل AHP شامل هدف، معیار و زیرمعیار، برای ارزیابی عوامل مؤثر بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان مسکونی استفاده شد. بنابراین از ۵ معیار و ۱۵ زیرمعیار برای ایجاد درخت سلسله‌مراتبی پژوهش بهره گرفته شد که این پارامترها بر اساس نظرات استادان دانشگاه، کارشناسان و خبرگان امر در مهندسی ساختمان تعیین شد. در ابتدا، با استفاده از مصاحبه حضوری با ۱۰ نفر از استادان دانشگاه، عوامل مؤثر بر روند بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان مسکونی تعیین شد. سپس درخت پژوهش برای انجام اصلاحات لازم، نزد استادان مجرب دانشگاهی دارای سابقه اجرایی در نظارت و اجرای پروژه‌های ساختمانی، تحویل شد. آن‌ها با بررسی پرسش‌نامه، ۱ معیار (افزایش ایمنی سازه) و زیرمعیارهای آن را به درخت سلسله‌مراتبی افزودند و ساختار نهایی ایجاد شد. با کمک درخت سلسله‌مراتبی، پرسش‌نامه محقق‌ساخته شامل سؤال‌های زوجی (دودویی) ایجاد شد. بنابراین برای تعیین وزن معیارها، زیرمعیارها و اولویت‌بندی نهایی آن‌ها، از مقایسه‌های زوجی بین معیارها و زیرمعیارها استفاده شد. همچنین، شایان ذکر است که برای امتیازدهی در مقایسه‌های زوجی بین شاخص‌ها، از مقیاس ۹ درجه‌ال‌ساعتی (ارائه‌شده در جدول ۲) استفاده شد. پرسش‌نامه محقق‌ساخته، دارای ۳ بخش شامل (الف) معرفی کلی ساختار پرسش‌نامه برای پرسش‌شوندگان، (ب) مشخصات فردی و (ج) مقایسه‌های زوجی است.

جدول ۲. طیف ۹ درجه‌ال‌ساعتی در امتیازدهی سؤال‌های پرسش‌نامه طی پژوهش حاضر [۱۶].

ردیف	ارزش اعمالی	وضعیت مقایسه عامل (الف) نسبت به عامل (ب)	توضیح
۱	۱	ترجیح یکسان (Equally Preferred)	عامل (الف) و (ب) اهمیت یکسان دارند.
۲	۳	اندکی مرجح (Moderately Preferred)	عامل (الف) از (ب) کمی مهم‌تر است.
۳	۵	خیلی مرجح (Strongly Preferred)	عامل (الف) از (ب) مهم‌تر است.
۴	۷	بسیار زیاد مرجح (Very Strongly Preferred)	عامل (الف) از (ب) خیلی مهم‌تر است.
۵	۹	کاملاً مرجح (Extremely Preferred)	عامل (الف) از (ب) کاملاً مهم‌تر است.
۶	۲-۴-۶-۸	میانه (Middle)	مقادیر ارزش میانی را بیان می‌کند.

برای اعتماد به پرسش‌نامه، روایی (اندازه‌گیری و بیان خصیصه و ویژگی موردنظر) و پایایی (میزان توانایی ابزار اندازه‌گیری در ایجاد نتایج یکسان در شرایط مشابه) آن تعیین شد. در پژوهش، از ضریب آلفای کرونباخ، در بررسی پایایی پرسش‌نامه استفاده شد که فرمول مرتبط با آن در رابطه ۱ ارائه شده است:

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left( 1 - \sum \frac{S_i^2}{S^2} \right) \quad (1)$$

پارامترها در رابطه ۱ بدین شرح است:

K: تعداد پارامترها،  $S_i^2$ : واریانس در پارامتر  $i$  و  $S^2$ : واریانس کل آزمون (واریانس مجموع نمره‌های پارامترها). پس از انجام محاسبه روی داده‌های گردآوری‌شده توسط پرسش‌نامه، ضریب آلفای کرونباخ ۰/۹۸ تعیین شد که مقدار عددی بسیار خوبی بوده و معتبر است بنابراین پایایی پرسش‌نامه، کاملاً تأیید شد. همچنین، روایی پرسش‌نامه با روش محتوایی بررسی شد که نظرات استادان دانشگاهی گردآوری و اصلاحات لازم برای روایی پرسش‌نامه انجام شد. جامعه آماری پژوهش شامل استادان دانشگاه و دانشجویان مقطع دکتری در مهندسی عمران-گرایش‌های سازه و مدیریت ساخت بودند که در دانشگاه‌های سطح شهر تهران فعال هستند. جامعه آماری به‌طور تصادفی انتخاب شد. با توجه به

نامحدود بودن حجم جامعه آماری، در انجام نمونه‌گیری از جامعه هدف، از فرمول کوکران استفاده شد [۱۶] که به شرح زیر است (رابطه ۲):

$$n = \frac{(Z_{\alpha}^2 \times S^2)}{d^2} \quad (2)$$

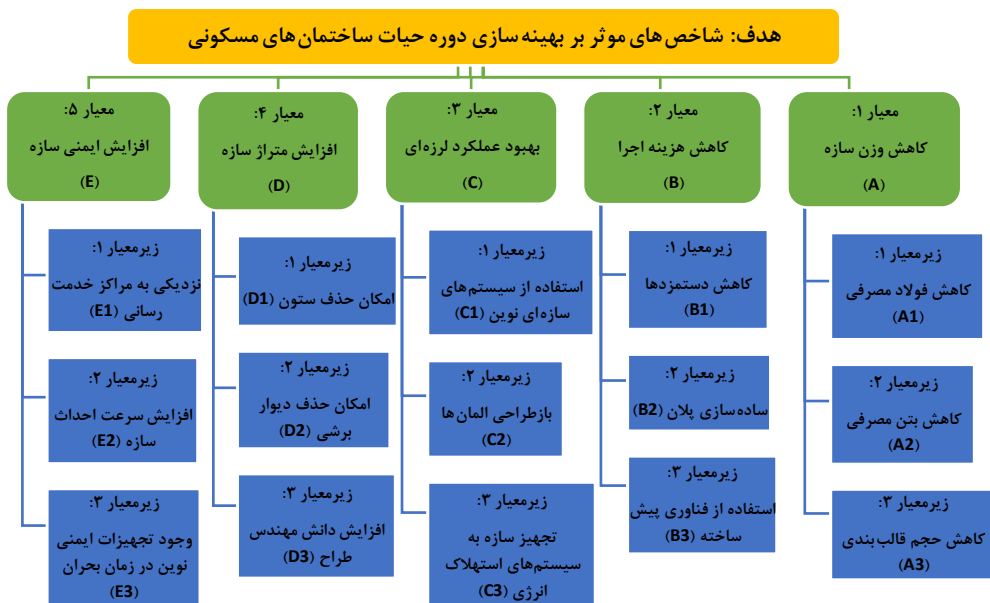
پارامترها در رابطه ۲ بدین شرح است:

$Z_{\alpha}^2$ : مقدار آن در سطح خطای ۰/۰۵ برابر ۱/۹۶ است که در پژوهش حاضر نیز چنین است.

S: حاصل ضرب پارامترهای p (احتمال موفقیت) و q (احتمال عدم موفقیت) که معمولاً برابر ۰/۵ است.

d: خطای محاسبات که برابر ۰/۰۵ لحاظ شد. برحسب فرمول کوکران برای جوامع نامعین، n (تعداد نمونه) برابر

۳۴/۵۷ به دست آمد بنابراین تعداد نهایی نمونه در پژوهش حاضر برابر ۳۵ نفر تعیین شد. سپس پرسش‌نامه در جامعه آماری، توزیع و امتیازات آن‌ها با وزن دهی یکسان، تعیین و گردآوری شد. میانگین نمره‌های جامعه آماری، به‌عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار Expert Choice است. داده‌ها با تحلیل AHP، پردازش و وزن آماری آن‌ها، تعیین و سپس اولویت‌بندی شدند. سپس نتایج با روش مهندسی ارزش و ساختار خلاقانه و امکان افزایش دوره حیات ساختمان‌های مسکونی از جنبه‌های مختلف اعم از سازه‌ای، زیست‌محیطی و اقتصادی بازطراحی شد. در نهایت نمودار FAST مهندسی ارزش ترسیم و نتایج منجر به الگوریتم پیشنهادی پژوهش شد. در شکل ۳، درخت سلسله‌مراتبی پژوهش حاضر ارائه شده است.



شکل ۳. درخت سلسله‌مراتبی پژوهش حاضر.

## ارائه و تحلیل یافته‌ها

## نتایج حاصل از به‌کارگیری روش AHP

در این بخش، ماتریس مقایسه‌های زوجی برای معیارها و زیرمعیارهای پژوهش که با استفاده از نظر کارشناسان انجام و توسط روش AHP تحلیل گردیده، در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. ماتریس مقایسه‌های زوجی و وزن آماری معیارهای پژوهش.

معیار	A	B	C	D	E	وزن حاصل از AHP
A	۱	-۸	-۹	-۲	-۳	۰/۰۳۹
B	۰	۱	-۲	+۵	+۴	۰/۳۱۲
C	۰	۰	۱	+۸	+۵	۰/۴۸۶
D	۰	۰	۰	۱	-۲	۰/۰۶۲
E	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۱۰۲

نکته: اعداد مثبت بیانگر وزن آماری برتر و اعداد منفی بیانگر وزن آماری ضعیف‌تر، در مقایسات زوجی (دو به دو) است.

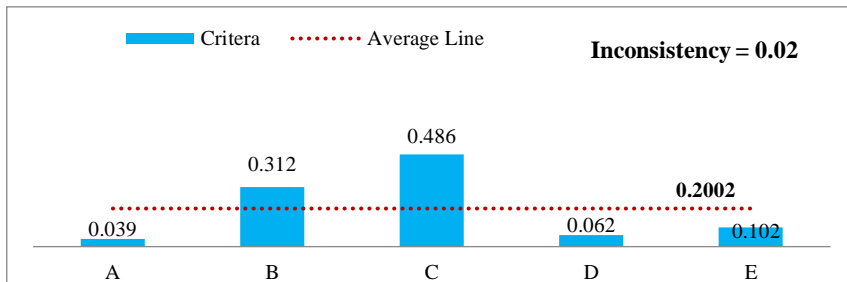
جدول ۴. ماتریس مقایسه‌های زوجی و وزن آماری زیرمعیارهای پژوهش.

زیرمعیار	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	وزن حاصل از AHP
A1	۱	+۴	+۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۵
A2	۰	۱	+۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۸
A3	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۳
B1	۰	۰	۰	۱	+۶	+۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۰۴
B2	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۳
B3	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۷۸
C1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	+۴	-۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۲۷
C2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳۸
C3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳۱۸
D1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	+۵	+۳	۰	۰	۰	۰/۰۰۴
D2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۴	۰	۰	۰	۰/۰۰۶
D3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰/۰۱۸
E1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	+۳	+۵	۰/۰۶۷
E2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	+۳	۰/۰۲۷
E3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۰۱۱

نکته: اعداد مثبت بیانگر وزن آماری برتر و اعداد منفی بیانگر وزن آماری ضعیف‌تر، در مقایسات زوجی (دو به دو) است.

### ارزیابی معیارها

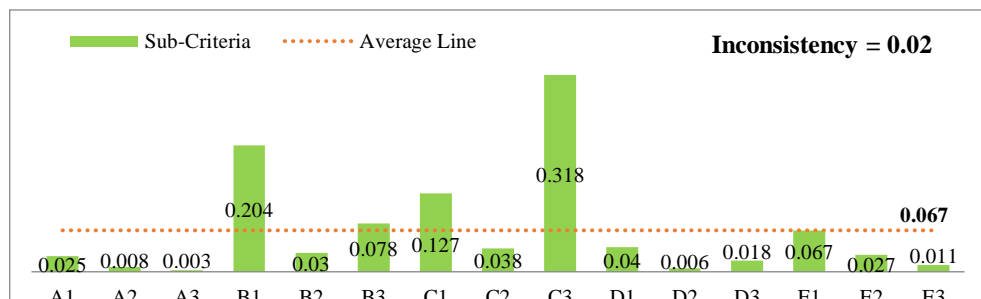
شکل ۴ نشان می‌دهد که معیارهای «بهبود عملکرد لرزه‌ای» با وزن ۰/۴۸۶، بیشترین تأثیر را بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان مسکونی دارد. معیارهای «کاهش هزینه اجرا» و «افزایش ایمنی سازه» به ترتیب با اوزان ۰/۳۱۲ و ۰/۱۰۲ در رده‌های دوم و سوم بیشترین تأثیرگذاری بر هدف قرار دارند. معیارهای «افزایش متراژ سازه» و «کاهش وزن سازه»، با اوزان ۰/۰۶۲ و ۰/۰۳۹ کمترین تأثیر را بر هدف دارند.



شکل ۴. وزن‌دهی معیارهای پژوهش طی تحلیل AHP خروجی نرم‌افزار Expert Choice

### ارزیابی زیرمعیارها

نتایج نشان داد که زیرمعیارهای «تجهیز سازه به سیستم استهلاک انرژی»، «کاهش دستمزدها» و «استفاده از سیستم‌های سازه‌ای نوین» به ترتیب با اوزان ۰/۳۱۸، ۰/۲۰۴ و ۰/۱۲۷، دارای بیشترین وزن آماری در بین تمام زیرمعیارها هستند. همچنین، زیرمعیارهای کاهش حجم قالب‌بندی، امکان حذف دیوار برشی و کاهش بتن مصرفی به ترتیب با اوزان ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۸، کمترین اثرگذاری را در بین تمام زیرمعیارها دارند. زیرمعیارهای «استفاده از فناوری پیش-ساخته»، «نزدیکی به مراکز خدمت‌رسانی»، «امکان حذف ستون»، «بازطراحی المان‌ها»، «ساده‌سازی پلان»، «افزایش سرعت احداث سازه»، «کاهش فولاد مصرفی»، «افزایش دانش مهندس طراح» و «وجود تجهیزات ایمنی نوین در زمان بحران» به ترتیب با اوزان ۰/۰۷۸، ۰/۰۶۷، ۰/۰۴، ۰/۰۳۸، ۰/۰۳، ۰/۰۲۷، ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۱، در رتبه‌های ۴ تا ۱۲ هستند. تناقض داده‌ها<sup>۱</sup> معادل ۰/۰۲ است که مقادیر عددی کمتر از ۰/۱ قابل قبول هستند.

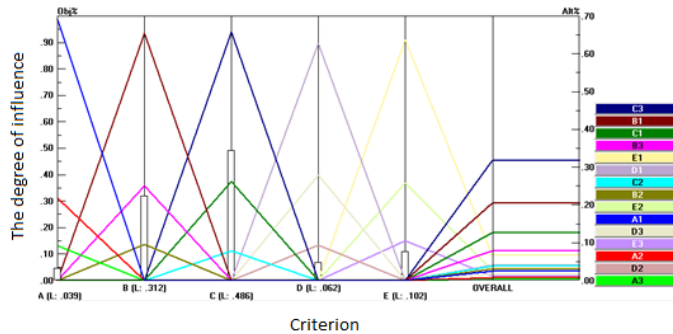


شکل ۵. وزن‌دهی زیرمعیارهای پژوهش طی تحلیل AHP خروجی نرم‌افزار Expert Choice

<sup>1</sup> Inconsistency

## تحلیل حساسیت

در شکل ۶، نمودار تحلیل حساسیت زیرمعیارها ارائه شده است. در سمت راست نمودار، زیرمعیارها بر اساس ضریب تأثیر قرار دارند. ترتیب قرارگیری زیرمعیارها (از بالا به پایین)، بیانگر نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در زیرمعیارها است که در واقع بیانگر آن است که به ازای تغییر وزن زیرمعیارها، اولویت‌بندی زیرمعیارهای تأثیرگذار بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان مسکونی، چگونه و به چه میزان خواهد بود.

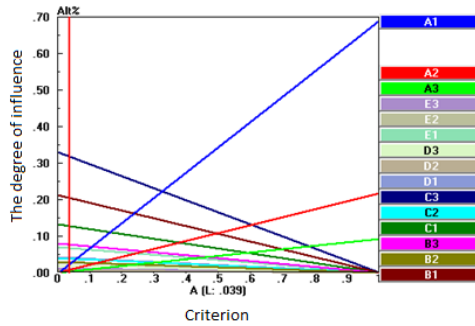


شکل ۶. تحلیل حساسیت بر روی زیرمعیارهای ۱۵گانه پژوهش تحت تحلیل AHP.

شکل ۶ نشان داد که زیرمعیار تجهیز سازه به سیستم‌های استهلاک انرژی با وزن آماری معادل ۰/۳۱۸، بیشترین تأثیرگذاری را بر تحلیل حساسیت دارد. تغییر در این شاخص می‌تواند تأثیرات بسیار زیادی در دوره حیات ساختمان مسکونی داشته باشد بنابراین طراحان و مجریان سازه باید بر ارتقای سیستم استهلاک انرژی همچون مهاربند، میراگر انرژی و جداساز پایه در ساختمان دقت کنند. نتایج نشان داد که کاهش حجم قالب‌بندی با وزن آماری ۰/۰۰۳، کمترین نرخ حساسیت را دارد.

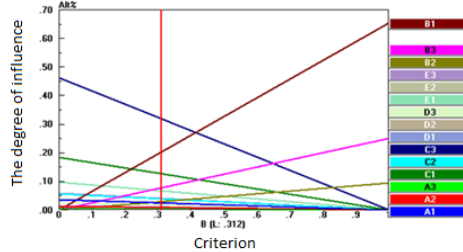
## تحلیل گرادیان

در این بخش به تفکیک معیارهای پژوهش، نمودارهایی رسم شده است که محور افقی آن نشانگر معیار و محور عمودی بیانگر وزن آماری در تحلیل AHP و با قیاس نمودارها، میزان اثرگذاری شاخص بر دوره حیات ساختمان مسکونی تعیین می‌شود. خطوط مورب رسم شده از مبدأ به زیرمعیاری خاص و با همان رنگ نشانگر زیرمعیار، در واقع میزان تغییرات زیرمعیار در تحلیل AHP را نشان می‌دهد. در نمودار گرادیان، امکان قیاس زیرمعیارهای هر بخش، بر اساس شیب خطوط مورب زیرمعیار، ممکن است و خط قرمز قائم، بیانگر وزن آماری معیار است. در شکل‌های ۷ تا ۱۱، نمودار گرادیان در معیارهای مختلف ارائه شده است.



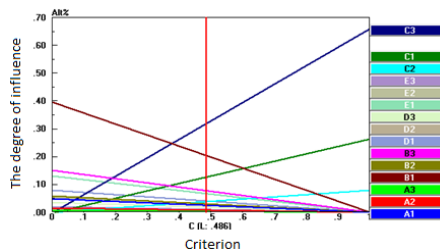
شکل ۷. نمودار گرادیان در معیار کاهش وزن سازه طی تحلیل AHP.

شکل ۷ نشان داد که زیرمعیار «کاهش فولاد مصرفی» که در معیار «کاهش وزن سازه» قرار دارد، دارای گرادیان بیشتر در مقایسه با زیرمعیارهای «کاهش بتن مصرفی» و «کاهش قالب‌بندی» است. این نتیجه می‌تواند به مهندسان سازه در باطراحی مناسب در افزایش دوره حیات ساختمان‌های مسکونی کمک کند.



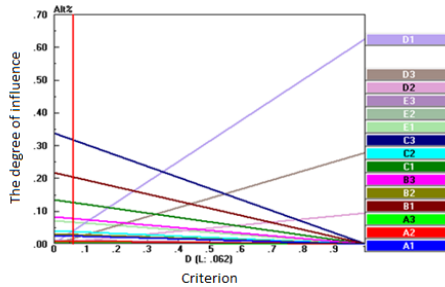
شکل ۸. نمودار گرادیان در معیار کاهش هزینه اجرا طی تحلیل AHP.

شکل ۸ نشان داد که زیرمعیار «کاهش دستمزدها» که جزو معیار «کاهش هزینه اجرا» است، دارای گرادیان بیشتری در مقایسه با زیرمعیارهای «فناوری پیش‌ساخته» و «ساده‌سازی پلان» است. شیب خط، بیانگر میزان اثرگذاری پارامتر موردنظر بر شاخص بالادستی است و هرچه شیب دارای مقدار بیشتری باشد، میزان اثرگذاری آن پارامتر بر شاخص بالادستی، بیشتر و بالعکس آن نیز برقرار است.



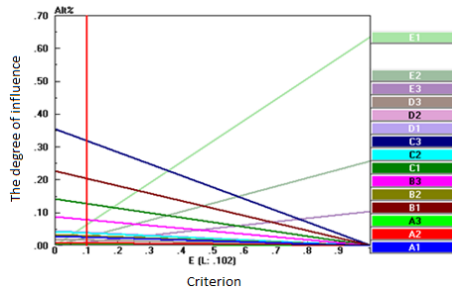
شکل ۹. نمودار گرادیان معیار بهبود عملکرد لرزه‌ای طی تحلیل AHP.

شکل ۹ نشان داد که زیرمعیار «تجهیز سازه به سیستم‌های استهلاک انرژی» که جزوی از معیار بهبود عملکرد لرزه‌ای است، دارای گرادیان حرکتی بسیار بیشتری در مقایسه با زیرمعیارهای «استفاده از سیستم‌های سازه‌ای نوین» و «بازطراحی المان‌ها» است.



شکل ۱۰. نمودار گرادیان معیار افزایش مترائز سازه طی تحلیل AHP.

شکل ۱۰ نشان داد که زیرمعیار «امکان حذف ستون» گرادیان بسیار بیشتری در مقایسه با زیرمعیارهای «استفاده از سیستم‌های سازه‌ای نوین» و «بازطراحی المان‌ها» دارد.



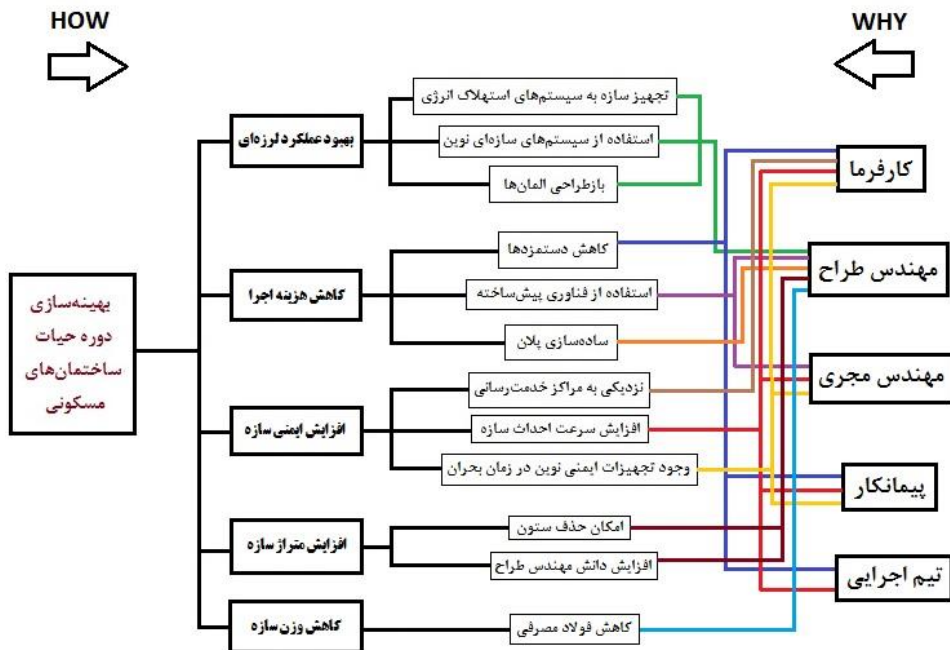
شکل ۱۱. نمودار گرادیان معیار افزایش ایمنی سازه در تحلیل AHP.

شکل ۱۱ نشان داد که زیرمعیار «نزدیکی به مراکز خدمت‌رسانی» که در معیار «افزایش ایمنی سازه» قرار دارد، دارای گرادیان بسیار بیشتری در مقایسه با زیرمعیارهای «افزایش سرعت احداث سازه» و «وجود تجهیزات ایمنی نوین در زمان بحران» است.

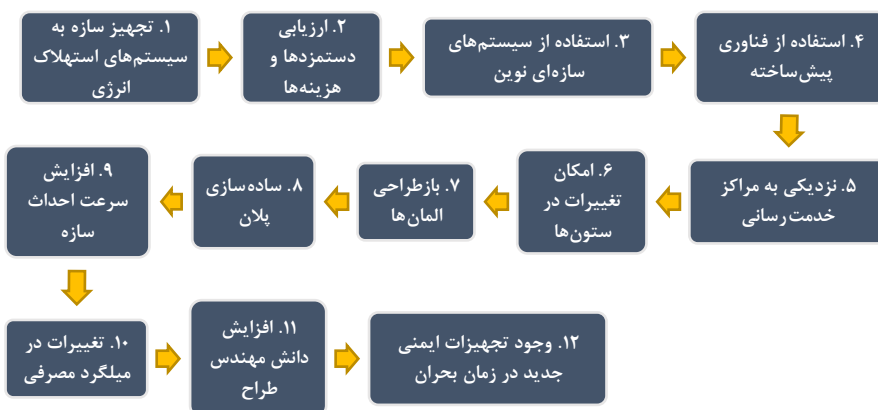
## مهندسی ارزش

با ارزیابی نتایج، مشاهده شد که برخی از پارامترهای موجود در تحلیل سلسله‌مراتبی بر اساس پرسش‌نامه محقق-ساخته، برحسب نظر کارشناسان امر و نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی، دارای تأثیر بسیار کمی بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی است از این رو می‌توان از تأثیر آن‌ها بر روند انجام بهینه‌سازی چشم‌پوشی کرد و از لیست پارامترهای کلی پژوهش حذف شوند. مجموعاً پارامترهای کاهش حجم قالب‌بندی (با ضریب تأثیر ۰/۰۳)، امکان برداشتن دیوار برشی (با ضریب تأثیر ۰/۰۶) و کاهش حجم بتن‌ریزی (با ضریب تأثیر ۰/۰۸) که کمترین ضرایب تأثیر را در مقایسه با سایر زیرمعیارها دارند، از لیست پارامترهای پژوهش حذف شدند. بنابراین تعداد زیرمعیارها از ۱۵ به ۱۲ مورد کاهش یافت. فرایند حذف زیرمعیارهای کم‌تأثیر، به‌عنوان فرایند خلاق در روش مهندسی ارزش محسوب می‌شود. با توجه به لیست جدید پارامترها و انجام تحلیل مناسب با مهندسی ارزش، نمودار FAST پیشنهادی پژوهش حاضر در

شکل ۱۲ ارائه شده است که در آن روند انجام مهندسی ارزش از ابتدا تا انتهای فرایند ارزش آفرینی، برای رسیدن به شاخص‌های دلخواه و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها برای بهبودسازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی ارائه شده است. همچنین، با ارزیابی نتایج حاصل از مطالعه و اولویت‌بندی پارامترها و انجام مهندسی ارزش در نتایج تحلیل AHP، الگوریتم بهبودسازی دوره حیات ساختمان مسکونی ایجاد گردید (شکل ۱۳).



شکل ۱۲. نمودار FAST حاصل مهندسی ارزش در بهبودسازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی.



شکل ۱۳. الگوریتم پیشنهادی مقاله حاضر در بهبودسازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی.

## نتیجه گیری

ساختمان‌های مسکونی با توجه به اهمیت زیاد از نظر اسکان جامعه بشری و ایجاد احساس آرامش و امنیت در محیط اجتماعی، تأثیر بسیار زیادی بر جوامع انسانی دارند. امکان افزایش دوره حیات ساختمان‌های مسکونی با استفاده از انواع روش‌های علمی و مهندسی موجود، موجب ارتقای ایمنی و عملکرد سازه‌ای، محیط زیستی، شخصیت انسان‌ها و ایجاد آرامش دارد. پژوهش حاضر موجب افزایش دوره حیات ساختمان مسکونی و افزایش سلامت فکری و جسمی جامعه می‌شود. در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن معرفی روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و مهندسی ارزش، با ایجاد الگوریتمی نوین، بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان مسکونی، ساده‌سازی گردد که از نوآوری‌های مقاله حاضر به‌شمار می‌آید و موجب می‌شود تا مهندسان طراح و مجری ساختمان بتوانند روند بهتری برای انجام بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی ایجاد کنند. با ترکیب تحلیل سلسله‌مراتبی و مهندسی ارزش در ارتباط با بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی و انجام پژوهش حاضر، نتایجی حاصل شد که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

۱- با ارزیابی جامع معیارهای پژوهش، مشخص شد که شاخص «عملکرد لرزه‌ای» دارای ضریب تأثیر (وزن آماری) معادل با ۰/۴۸۶ است. عملکرد لرزه‌ای ساختمان می‌تواند تأثیر بسزایی بر بخش‌های مختلف سازه اعم از پارامترهای رفتاری سازه (تغییر مکان، شتاب، دریفت طبقات و ...)، روش طراحی ساختمان (ASD<sup>1</sup> و LRFD<sup>2</sup>)، روش‌های اجرای ساختمان و ... داشته باشد بنابراین شاخص «عملکرد لرزه‌ای» در نظر جامعه آماری پژوهش، به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی شناخته شده است. ضریب تأثیر معیار «عملکرد لرزه‌ای» (۰/۴۸۶) در مقایسه با میانگین ضرایب تأثیر سایر معیارها (۰/۲۰۰۲)، حدوداً ۲/۴۳ برابر است از این‌رو این تفاوت بارز بیانگر تأثیر بسیار زیاد این معیار بر دوره حیات ساختمان‌های مسکونی است.

۲- با ارزیابی جامع زیرمعیارهای پژوهش مشخص شد که شاخص «تجهیز سازه به سیستم‌های استهلاک انرژی» با ضریب تأثیر (وزن آماری) معادل با ۰/۳۱۸، مؤثرترین پارامتر موجود بر دوره حیات ساختمان‌های مسکونی در بین تمامی زیرمعیارهای پژوهش است. استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی مناسب می‌تواند تا نیروهای ناشی از زلزله و طوفان را کاهش دهد و از بروز آسیب‌های جزئی و گسترده در ساختمان جلوگیری کند. با توجه به زلزله‌خیز بودن کشور ایران و فرارگیری بر روی کمر بند لرزه‌ای آلپ- هیمالیه، استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی در ساختمان‌های مسکونی در سطح کشور می‌تواند دوره حیات آن را بسیار افزایش دهد و به استحکام بنای ساختمان در طول مدت بهره‌برداری از آن، کمک بسیار زیادی کند. از این‌رو این زیرمعیار در نظر جامعه آماری، مؤثرترین زیرمعیار شناسایی و معرفی شد. میانگین ضرایب تأثیر زیرمعیارها معادل با ۰/۰۶۷ محاسبه شد که ضریب تأثیر زیرمعیار «تجهیز سازه به سیستم‌های استهلاک انرژی» (۰/۳۱۸)، حدوداً ۴/۷۵ برابر آن است که تفاوت عددی زیادی را نشان می‌دهد که بیانگر اهمیت زیاد این زیرمعیار بر دوره حیات ساختمان‌های مسکونی است.

۳- با ارزیابی جامع تمام پارامترهای مدون در پژوهش مشخص شد که معیار «کاهش وزن سازه» و زیرمعیار «کاهش حجم قالب‌بندی» به ترتیب با ضرایب تأثیر برابر با ۰/۰۳۹ و ۰/۰۰۳، کمترین تأثیر را بر بهینه‌سازی دوره حیات ساختمان‌های مسکونی دارند. بنابراین در بخش طراحی و اجرای ساختمان‌های مسکونی، تمرکز بر تقلیل یا بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند تا ضمن حفظ شرایط فعلی پروژه از دیدگاه‌های مختلف سازه‌ای، زیست‌محیطی و غیره، امکان کاهش هزینه‌ها را نیز به همراه داشته باشد.

<sup>1</sup> Allowable Stress Design (ASD)

<sup>2</sup> Load and Resistance Factor Design (LRFD)

## References

- [1] Kovacic, I., & Zoller, V. (2015). Building life cycle optimization tools for early design phases. *Energy*, 92, 409-419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.027>
- [2] Tazowski, P., Blachowski, B., & Lógó, J. (2021). Topology optimization of elasto-plastic structures under reliability constraints: A first order approach. *Computers & Structures*, 243, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106406>
- [3] Negrin, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023). Metamodel-assisted design optimization in the field of structural engineering: A literature review. *Structures*, 52(8), 609-631. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.006>
- [4] Elbeltagi, E., Wefki, H., & Khallaf, R. (2023). Sustainable Building Optimization Model for Early-Stage Design. *Buildings*, 13(1), 74. <https://doi.org/10.3390/buildings13010074>
- [5] Zhou, Y., Tam, V. W. Y., & Le, K. N. (2023). Developing a multi-objective optimization model for improving building's environmental performance over the whole design process. *Building and Environment*, 246, 110996. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110996>
- [6] Araújo, G. R., Gomes, R., Ferrão, P., & Gomes, M. G. (2024). Optimizing building retrofit through data analytics: A study of multi-objective optimization and surrogate models derived from energy performance certificates. *Energy and Built Environment*, 5(6), 889-899. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.002>
- [7] Longo, S., Cellura, M., & Montana, F. (2023). *Life-cycle optimization of building performance: a collection of case studies*. IEA. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7468477>
- [8] Montana, F., Kanafani, K., Wittchen, K. B., Birgisdottir, H., Longo, S., Cellura, M., & Riva Sanseverino, E. (2020). Multi-Objective Optimization of Building Life Cycle Performance. A Housing Renovation Case Study in Northern Europe. *Sustainability*, 12(18), 7807. <https://doi.org/10.3390/su12187807>
- [9] Walter, S., Chavez-Okhuysen, D., Achour, M., Dia, A., Avril, L., & Makhoul, N. (2024). Life Cycle Assessment of a Smart Building: Energy Optimization Integration. In M. Ben Ahmed, A. A. Boudhir, R. El Meouche, & İ. R. Karas (Eds.), *Innovations in Smart Cities Applications Volume 7* (pp. 481-496). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53824-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53824-7_44)
- [10] Yu, H., Yang, W., & Li, Q. (2019, September 11-14). *Multi-objective optimization of building's life cycle performance in early design stages* [Conference session]. Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science, Graz, Austria. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012116>
- [11] Luo, X. J., & Oyedele, L. O. (2022). Life cycle optimisation of building retrofitting considering climate change effects. *Energy and Buildings*, 258, 111830. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111830>
- [12] Najjar, M., Figueiredo, K., Hammad, A. W. A., & Haddad, A. (2019). Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings. *Applied Energy*, 250, 1366-1382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.101>
- [13] Mostavi, E., Asadi, S., & Boussaa, D. (2017). Development of a new methodology to optimize building life cycle cost, environmental impacts, and occupant satisfaction. *Energy*, 121, 606-615. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.049>
- [14] Pal, S. K., Takano, A., Alanne, K., Palonen, M., & Siren, K. (2017). A multi-objective life cycle approach for optimal building design: A case study in Finnish context. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1021-1035. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.018>

- [15] Luo, Z., Lu, Y., Cang, Y., & Yang, L. (2022). Study on dual-objective optimization method of life cycle energy consumption and economy of office building based on HypE genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 256(9), 111749. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111749>
- [16] Mahdavi, M., Hosseini, S., & Bahaafjaji, A. (2023). Modelling and Comparison of Plastic Performance in Ten Types of New Steel Braces under Pushover Analysis. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 6(2), 79-97. <https://doi.org/10.22115/cepm.2023.428826.1262>
- [17] Cui, X., Lee, M., Koo, C., & Hong, T. (2024). Energy consumption prediction and household feature analysis for different residential building types using machine learning and SHAP: Toward energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, 309, 113997. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113997>