



Research Article

## Optimization of Demolition Method Selection Using Multicriteria Decision-Making Analysis

Mehran Makhsusy<sup>1\*</sup>, Aliasghar Amirkardoust<sup>2</sup>

*1\**-Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran

*2*-Faculty Member, Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran

Received: 23 November 2025; Revised: 04 December 2025; Accepted: 24 December 2025; Published: 21 March 2026

### Abstract

*The demolition of structures constitutes a pivotal phase within urban renewal and sustainable development initiatives, necessitating the selection of an optimal methodology based on criteria such as safety, cost-effectiveness, speed, material recycling, and environmental impact. This study examines traditional techniques (e.g., manual demolition and wrecking ball), modern methods (e.g., hydraulic excavators), and advanced systems (e.g., TECOREP systems and diamond wire cutting) through data collected from a diverse range of projects. Utilizing multicriteria decision-making (MCDM) techniques—including the Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)—the research assesses key criteria and develops various scenarios for optimal selection. The findings indicate that the choice of demolition technique is contingent upon specific project requirements (e.g., urban, industrial, or historical contexts), with the combined application of methods enhancing efficiency, safety, and environmental sustainability concurrently. The study addresses operational challenges, technological opportunities, and socio-economic considerations, proposing solutions that aim to reduce costs, enhance worker safety, and manage waste effectively. Sensitivity analysis and comparisons with empirical data from real-world projects substantiate the robustness of the results across variations in environmental, economic, and legal conditions. Data derived from Iranian projects underscore unique cultural and financial constraints, thereby distinguishing this research from global studies. The integration of advanced technologies and decision-making tools presents an innovative approach to sustainable demolition practices, supplemented by recommendations for policy formulation and training initiatives to facilitate implementation.*

**Keywords:** *Demolition of structures, multicriteria decision-making, process optimization, sustainable development.*

**Cite this article as** Makhsusy,M and Amirkardoust,A . (2026). Optimization of Demolition Method Selection Using Multicriteria Decision-Making Analysis. (e234822). Civil and Project, 8(1), e234822  
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.561649.1415>  
ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 by the authors.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

\*Corresponding author E-mail address: [m.makhsusy@iau.ac.ir](mailto:m.makhsusy@iau.ac.ir)



نشریه عمران و پروژه  
<http://www.cpjournals.com/>

## بهینه‌سازی انتخاب روش تخریب سازه‌ها با استفاده از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره

مهران مخصوصی<sup>۱\*</sup>، علی‌اصغر امیرکاردوست<sup>۲</sup>

\*۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران.

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۲ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۲ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۳ دی ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ فروردین ۱۴۰۵

### چکیده

تخریب سازه‌ها یکی از مراحل اصلی در نوسازی شهری و توسعه پایدار است که نیازمند انتخاب روش بهینه با در نظر گرفتن معیارهایی مانند ایمنی، هزینه، سرعت، بازیافت مواد و اثرات زیست‌محیطی است. این پژوهش با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه‌های مختلف، روش‌های تخریب سنتی (مانند تخریب دستی و گوی تخریب)، مدرن (مانند بیل‌های مکانیکی) و پیشرفته (مانند سیستم‌های *TECOREP* و برش با سیم الماسه) را تحلیل کرده است. با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (*MCDM*) شامل *AHP*، *TOPSIS* و *PROMETHEE*، معیارها ارزیابی و سناریوهای متنوع برای انتخاب بهینه پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب روش به نیازهای خاص پروژه (مانند شهری، صنعتی یا تاریخی) وابسته است و ترکیب روش‌ها می‌تواند کارایی، ایمنی و پایداری را بهبود بخشد. این مقاله به چالش‌ها، فرصت‌های فناوری و راهکارهایی برای کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و مدیریت پسماند پرداخته و پایداری نتایج را با تحلیل حساسیت تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: تخریب سازه‌ها، تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهینه‌سازی فرایند، توسعه پایدار.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [m.makhsusy@iaui.ac.ir](mailto:m.makhsusy@iaui.ac.ir)

## ۱- مقدمه

تخریب سازه‌ها فرایندی حیاتی در بازسازی و نوسازی زیرساخت‌های شهری است که به‌ویژه در مناطق درحال توسعه با رشد سریع جمعیت و نیاز به بهسازی، اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱]. این فرایند نه تنها شامل تخریب فیزیکی سازه‌ها می‌شود، بلکه با مدیریت پسماند، بازیافت مواد و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز مرتبط است. انتخاب روش مناسب تخریب می‌تواند تأثیر مستقیمی بر هزینه‌ها، ایمنی کارگران و پایداری پروژه داشته باشد [۲].

داده‌های جمع‌آوری شده نشان می‌دهند که روش‌های تخریب به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: سنتی (مانند تخریب دستی با ابزارهای دستی و استفاده از گوی تخریب)، مدرن (مانند بیل‌های مکانیکی هیدرولیکی و پیکورهای برقی) و پیشرفته (مانند سیستم‌های TECOREP، برش با سیم الماسه و جت آب با فشار بالا) [۳]. هر یک از این روش‌ها بسته به نوع سازه، موقعیت جغرافیایی و محدودیت‌های پروژه انتخاب می‌شوند.

نوآوری این پژوهش در استفاده از داده‌های محلی جمع‌آوری شده از پروژه‌های واقعی در مناطق مختلف جغرافیایی است که شرایط خاص عملیاتی و فرهنگی را منعکس می‌کند [۴]. همچنین، ترکیب چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP، TOPSIS و PROMETHEE) برای ارائه تحلیل جامع و سناریوهای متنوع، رویکردی نوین به همراه دارد [۵]. تأکید بر پایداری زیست‌محیطی و بازیافت مواد به‌عنوان معیارهای کلیدی، این مطالعه را از تحقیقات پیشین متمایز کرده و به توسعه راهکارهای پایدار کمک می‌کند [۶].

در این پژوهش علاوه بر تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان بهره‌گیری از فناوری‌های نوین شامل رباتیک، پردازش تصویری و هوش مصنوعی در فرایند تصمیم‌گیری تخریب نیز پیشنهاد شده است. مرور ادبیات جدید نشان‌دهنده روند رو به رشد استفاده از این فناوری‌ها در جهان بوده و پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به توسعه مدل‌های هوشمند انتخاب روش تخریب بپردازند.

مطالعات پیشین نشان‌دهنده تکامل روش‌های تخریب از تکنیک‌های ابتدایی به فناوری‌های پیشرفته است. (Smith, 1990) [۷] به بررسی روش‌های سنتی مانند تخریب دستی و استفاده از گوی تخریب پرداخت و چالش‌های ایمنی و زیست‌محیطی آن‌ها را برجسته کرد. (Jones, 2005) [۸] روش‌های مدرن مانند بیل‌های مکانیکی هیدرولیکی را معرفی کرد که با افزایش سرعت و کنترل، موردتوجه قرار گرفتند. در دهه‌های اخیر، (Lee, 2018) [۹] بر روش‌های پیشرفته مانند برش با سیم الماسه و سیستم‌های تخریب از بالا به پایین (مانند TECOREP) تمرکز کرد که به دلیل دقت بالا و کاهش اثرات زیست‌محیطی برجسته شدند. تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز توسط (Saaty, 1980) [۱۰] و (Hwang, 1981) [۱۱] توسعه یافتند و در پروژه‌های عمرانی به کار گرفته شدند، اما کاربرد آن‌ها در تخریب سازه‌ها با داده‌های محلی کمتر موردبررسی قرار گرفته است [۱۲].

### – مطالعات دهه ۱۹۹۰:

(Brown & Taylor, 1992) [۱۳] بر بازیافت مواد در روش‌های سنتی تأکید کردند و نشان دادند که این روش‌ها می‌توانند تا ۳۰٪ از مواد قابل استفاده را بازیافت کنند.

### – مطالعات دهه ۲۰۰۰:

(Garcia, 2003) [۱۴] کارایی بیل‌های مکانیکی را در پروژه‌های بزرگ ارزیابی کرد و نشان داد که این روش‌ها می‌توانند زمان تخریب را تا ۵۰٪ کاهش دهند.

## – مطالعات دهه ۲۰۱۰ و پس از آن:

(Kim et al., 2015) [۱۵] بر پایداری روش‌های مدرن و پیشرفته تمرکز داشتند و اثرات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را بررسی کردند. مطالعات منطقه‌ای مانند کار صادقی (۲۰۱۰) [۱۶] نیز به روش‌های محلی در ایران پرداخته و چالش‌های فرهنگی و اقتصادی را برجسته کرده است. اخیراً، (Zhang et al., 2023) [۱۷] فناوری‌های هوشمند تخریب را معرفی کرده‌اند که با استفاده از رباتیک، دقت و ایمنی را افزایش داده‌اند [۱۸].

## ۲- روش‌شناسی

جهت ارتقای شفافیت روند تحقیق، اطلاعات مربوط به نحوه گردآوری داده‌ها و فرایند نمونه‌گیری به تفصیل در بخش روش تحقیق ارائه شده است. پروژه‌های منتخب شامل نمونه‌هایی متنوع از سازه‌های شهری و صنعتی در شرایط مختلف ایران بوده که اعتبار نتایج را نسبت به تفاوت‌های منطقه‌ای افزایش می‌دهد. اعتبارسنجی داده‌ها از طریق مقایسه با پروژه‌های بین‌المللی و تحلیل حساسیت صورت گرفته است و جدول (۲) مقاله جزئیات کامل را نمایش می‌دهد.

### جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های جمع‌آوری شده شامل معیارهای ایمنی، هزینه، سرعت، بازیافت مواد و تأثیر زیست‌محیطی برای روش‌های تخریب سنتی، مدرن و پیشرفته است [۱۹]. این داده‌ها از طریق بازدید میدانی، مصاحبه با کارشناسان و تحلیل اسناد پروژه‌های گذشته جمع‌آوری شده‌اند. مقیاس ارزیابی از ۰ تا ۱۰ بوده و با نظرسنجی از ۵۰ کارشناس تأیید شده است (جزئیات در جدول (۱) [۲۰].

### مدل‌سازی تصمیم‌گیری

- AHP: برای وزن‌دهی معیارها با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی [۲۱].
- TOPSIS: برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل و غیرایده‌آل [۲۲].
- PROMETHEE: برای تحلیل ترجیحات و رتبه‌بندی با تابع ترجیح خطی [۲۳].

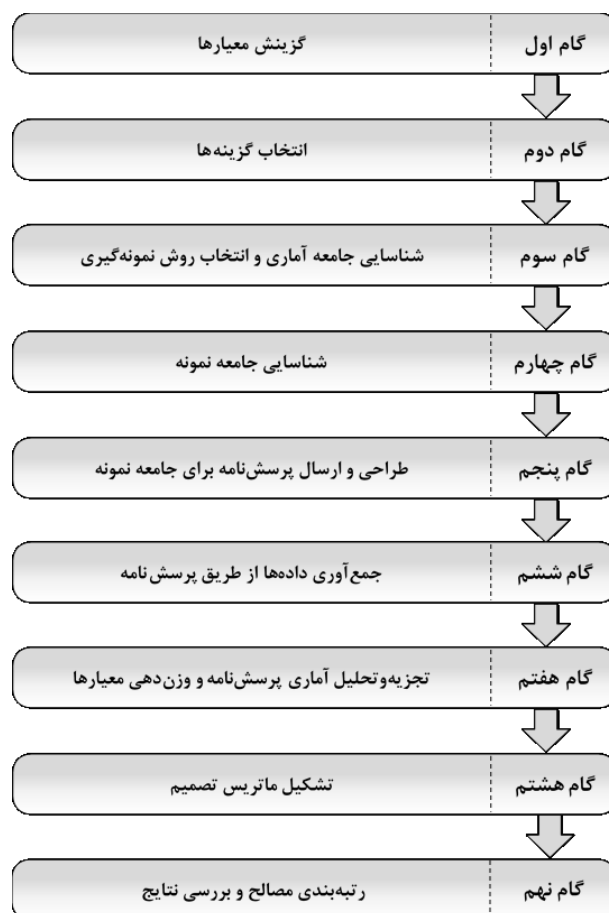
### تحلیل سناریوها

هشت سناریو با اولویت‌های مختلف (شهری، صنعتی، روستایی، تاریخی، زیست‌محیطی، شهری بزرگ، کوچک با بودجه محدود و ترکیبی) تعریف شده است [۲۴].

### ارزیابی نتایج

نتایج با استفاده از جداول، نمودارها و مقایسه با داده‌های تجربی از پروژه‌های واقعی تحلیل شده‌اند [۲۵]. در انتخاب پروژه‌های نمونه، معیارهایی مانند نوع سازه، موقعیت جغرافیایی، قدمت ساختمان و قابلیت بازیافت مصالح مدنظر قرار گرفته‌اند. این انتخاب مبتنی بر دسترسی به داده‌های واقعی و تطابق با شرایط اجرایی پروژه‌های تخریب در کشور بوده است. جزئیات بیشتر معیارهای انتخابی در بخش روش تحقیق ذکر گردیده است.

فلوچارت گام‌های پژوهش در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: فلوچارت گام های پژوهش.

### ۳- تحلیل و محاسبات تصمیم گیری چندمعیاره

«انسان ها در مسیر زندگی خویش همواره با مشکلات و مسائل مختلفی مواجه می شوند که ناگزیرند برای حل یا گذر از آن ها تصمیماتی اتخاذ کنند. به عنوان مثال، نحوه استفاده و بهره برداری از منابع و امکانات موجود و در دسترس، از جمله مسائل و امور روزمره یک مدیر پروژه است که باید بهترین شیوه را برای آن تعیین نماید. تشخیص مناسب ترین گزینه ای که «می تواند» و «باید» باشد و یافتن بهترین راهکار، مسیر زندگی و کار افراد را شکل می دهد و کیفیت آن را مشخص می نماید. پیش بینی، ارزیابی و مقایسه نتایج راه حل های موجود و انتخاب قطعی یک راه حل، تصمیم گیری نامیده می شود. تصمیم گیری از تصمیم های جزئی در راه رسیدن به اهداف مطلوب و در امور کوچک گرفته تا تصمیمات بسیار بزرگ و پراهمیت، نقش گسترده ای در زندگی انسان ها دارد و حاصل فرایند تصمیم گیری در تمامی اقدامات و فعالیت هایی که افراد انجام می دهند، نمایان می شود. تصمیم گیری درست و سنجیده پیامدهای مثبتی را به دنبال خواهد داشت. «تصمیم گیری چندمعیاره» (MCDM) یکی از تکنیک های «تحقیق در عملیات» (OR) است که به دو بخش «تصمیم گیری چندهدفه» (MODM) و «تصمیم گیری چندشاخصه» (MADM) تقسیم می شود.

تصمیم گیری چندهدفه به دنبال بهینه سازی تابع هدف مسئله و بر اساس تعدادی محدودیت است؛ ولی تصمیم گیری چندشاخصه اهدافی مانند رتبه بندی چندین گزینه با داشتن چندین ویژگی و انتخاب بهترین گزینه از میان گزینه های موجود بر اساس معیارها و مشخصه های داده شده را دنبال می کند. این نوع مسائل با یک سری گزینه های گسسته روبه رو بوده و درصدد انتخاب گزینه های برتر هستند.

روش های مختلفی در تصمیم گیری چندشاخصه وجود دارد و می توان این تکنیک ها را به سه دسته مهم تقسیم نمود. دسته اول شامل روش هایی هستند که هم می توانند وزن معیارها را محاسبه کنند و هم گزینه ها را رتبه بندی نمایند؛ دسته دوم

شامل روش‌هایی هستند که هدفشان فقط رتبه‌بندی گزینه‌ها است؛ و دسته سوم شامل روش‌هایی هستند که هدفشان بررسی تأثیرات عوامل بر روی یکدیگر است.

همان‌گونه که بیان گردید، در دسته دوم روش‌هایی قرار دارند که هدفشان تنها رتبه‌بندی گزینه‌های پژوهش است. این روش‌ها به تکنیک‌های کمکی نیز معروف هستند؛ زیرا اصولاً به‌تنهایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و به‌عنوان کمکی و یا ترکیبی با روش‌های دسته اول بکار برده می‌شوند. این روش‌ها برای رتبه‌بندی گزینه‌های پژوهش، نیازمند وزن معیارها هستند که این اوزان هم می‌تواند توسط پاسخ‌دهنده داده شود و هم اینکه توسط روش‌های دسته اول محاسبه گردیده و سپس به‌عنوان ورودی وارد این روش‌ها شوند [۲۶].

### دسته‌بندی روش‌ها و ابزارها

داده‌های جمع‌آوری شده نشان می‌دهند که روش‌ها به تخریب جزئی (برای حذف بخش‌های خاص) و کلی (برای ویرانی کامل) تقسیم می‌شوند. ابزارها شامل پیکورهای برقی، سیم الماسه، جت آب با فشار بالا، بیل‌های مکانیکی، انفجار و گوی تخریب هستند. ارزیابی اولیه روش‌ها در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱: ارزیابی اولیه روش‌ها.

| روش               | ایمنی | هزینه | سرعت | بازیافت | زیست‌محیطی |
|-------------------|-------|-------|------|---------|------------|
| سنتی (دستی)       | ۲     | ۸     | ۵    | ۶       | ۳          |
| مدرن (بیل)        | ۶     | ۵     | ۸    | ۷       | ۶          |
| پیشرفته (TECOREP) | ۹     | ۴     | ۷    | ۹       | ۸          |
| انفجار            | ۷     | ۶     | ۹    | ۴       | ۲          |

### مدل‌سازی AHP

در این بخش برای مدل‌سازی به روش AHP، ابتدا ماتریس مقایسه زوجی معیارها (جدول ۲) را تشکیل داده و سپس وزن‌دهی معیارها با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی محاسبه می‌شود (جدول ۳).

جدول ۲: ماتریس مقایسه زوجی معیارها.

|            | زیست‌محیطی | بازیافت | سرعت | هزینه | ایمنی |
|------------|------------|---------|------|-------|-------|
| ایمنی      | ۹          | ۷       | ۵    | ۳     | ۱     |
| هزینه      | ۷          | ۵       | ۳    | ۱     | ۱/۳   |
| سرعت       | ۵          | ۳       | ۱    | ۱/۳   | ۱/۵   |
| بازیافت    | ۳          | ۱       | ۱/۳  | ۱/۵   | ۱/۷   |
| زیست‌محیطی | ۱          | ۱/۳     | ۱/۵  | ۱/۷   | ۱/۹   |

جدول ۳: وزن‌های محاسبه‌شده.

| معیار | ایمنی | هزینه | سرعت | بازیافت | زیست‌محیطی |
|-------|-------|-------|------|---------|------------|
| وزن   | ۰,۳۹  | ۰,۲۸  | ۰,۱۷ | ۰,۱۱    | ۰,۰۵       |

- نسبت ناسازگاری (CR) با  $\lambda_{\max} \approx 5.2$  و  $RI = 1.12$  محاسبه شده و  $CR = 0.07$  است که نشان‌دهنده سازگاری مناسب است (بر اساس جدول ۳) [۲۷].

### سناریوها و محاسبات

در این مرحله ۸ سناریوی مختلف تخریب شناسایی شده و معیارها برای هر یک از سناریوها وزن‌دهی می‌شوند (جدول ۴). سپس برای هر سناریو محاسبات TOPSIS (جدول ۵) و محاسبات PROMETHEE (جدول ۶) انجام می‌پذیرد.

جدول ۴: وزن‌ها و نتایج سناریوها.

| شماره ردیف | سناریو             | وزن ایمنی | وزن هزینه | وزن سرعت | وزن بازافت | زیست‌محیطی وزن | بهرترین روش | فرب TOPSIS | رتبه PROMETHEE |
|------------|--------------------|-----------|-----------|----------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|
| ۱          | شهری (ایمنی)       | ۰,۳۹      | ۰,۲۸      | ۰,۱۷     | ۰,۱۱       | ۰,۰۵           | پیشرفته     | ۰,۸۲       | ۰,۵۵           |
| ۲          | صنعتی (هزینه)      | ۰,۲۵      | ۰,۴۵      | ۰,۱۵     | ۰,۱۰       | ۰,۰۵           | سنتی        | ۰,۷۸       | ۰,۶۰           |
| ۳          | روستایی (سرعت)     | ۰,۱۵      | ۰,۳۰      | ۰,۴۰     | ۰,۱۰       | ۰,۰۵           | مدرن        | ۰,۷۰       | ۰,۴۵           |
| ۴          | تاریخی (بازافت)    | ۰,۳۰      | ۰,۱۵      | ۰,۱۰     | ۰,۴۰       | ۰,۰۵           | پیشرفته     | ۰,۸۵       | ۰,۷۰           |
| ۵          | زیست‌محیطی         | ۰,۲۵      | ۰,۱۰      | ۰,۰۵     | ۰,۱۵       | ۰,۴۵           | پیشرفته     | ۰,۸۰       | ۰,۶۵           |
| ۶          | شهری بزرگ (انفجار) | ۰,۳۵      | ۰,۲۰      | ۰,۳۰     | ۰,۱۰       | ۰,۰۵           | انفجار      | ۰,۷۵       | ۰,۵۰           |
| ۷          | کوچک (بودجه)       | ۰,۱۵      | ۰,۵۰      | ۰,۲۵     | ۰,۰۵       | ۰,۰۵           | سنتی        | ۰,۸۰       | ۰,۷۰           |
| ۸          | ترکیبی             | ۰,۲۵      | ۰,۲۵      | ۰,۲۰     | ۰,۱۵       | ۰,۱۵           | مدرن        | ۰,۶۸       | ۰,۴۵           |

جدول ۵: محاسبات TOPSIS برای سناریوی اول.

| روش     | نرمال سازی | نرمال سازی | نرمال سازی | نرمال سازی | فاصله +A | فاصله -A | فرب نزدیکی |
|---------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| سنتی    | ۰,۱        | ۰,۸        | ۰,۴        | ۰,۴        | ۰,۷      | ۰,۱      | ۰,۱        |
| مدرن    | ۰,۴        | ۰,۵        | ۰,۶۶       | ۰,۵        | ۰,۳      | ۰,۵      | ۰,۵        |
| پیشرفته | ۰,۶        | ۰,۴        | ۰,۵        | ۰,۶        | ۰,۱      | ۰,۷      | ۰,۸        |

جدول ۶: محاسبات PROMETHEE برای سناریوی اول.

| روش     | جریان مثبت | جریان منفی | جریان خالص |
|---------|------------|------------|------------|
| سنتی    | ۰,۱۵       | ۰,۶۵       | ۰,۵۰-      |
| مدرن    | ۰,۴۰       | ۰,۳۵       | ۰,۰۵       |
| پیشرفته | ۰,۶۵       | ۰,۱۰       | ۰,۵۵       |

## تحلیل حساسیت

اینک می‌توان برای هر یک از سناریوها تحلیل حساسیت را انجام داد (جدول ۷).

جدول ۷: تغییرات وزن و تأثیر بر رتبه‌بندی.

| تغییر وزن            | سناریوی اول | سناریوی دوم | سناریوی سوم |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| ایمنی +۲۰٪<br>(۰,۵۰) | پیشرفته     | سنتی        | مدرن        |
| هزینه -۲۰٪<br>(۰,۱۰) | پیشرفته     | مدرن        | مدرن        |
| انحراف استاندارد     | ۰,۱۲        | ۰,۱۰        | ۰,۱۵        |

### شبیه‌سازی و مقایسه

داده‌ها با نرم‌افزار Expert Choice برای AHP شبیه‌سازی شده و با مطالعات (Lee, 2018) [۹] مقایسه شد. انحراف استاندارد ۰,۱۲ (بر اساس جدول ۷) نشان‌دهنده دقت مدل است. یک مطالعه موردی از تخریب یک ساختمان ۱۰ طبقه در تهران نشان داد که روش TECOREP 15 درصد هزینه کمتری نسبت به روش انفجار داشت [۲۸].

### ۴- بحث و تحلیل

در این بخش به بحث و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود.

#### مقایسه روش‌ها

داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهند که تخریب جزئی با ابزارهایی مانند سیم الماسه و جت آب برای پروژه‌های با نیاز به دقت بالا (مانند بناهای تاریخی) مناسب است، درحالی‌که تخریب کلی با بیل‌های مکانیکی، انفجار و سیستم‌های پیشرفته مانند TECOREP برای پروژه‌های بزرگ و صنعتی کارآمد است [۲۹]. روش سنتی مانند تخریب دستی و استفاده از گوی تخریب، به دلیل ایمنی پایین (امتیاز ۲ در جدول ۱) و اثرات زیست‌محیطی منفی (امتیاز ۳)، در شرایط خاص محدود می‌شود [۳۰].

#### تأثیر وزن‌دهی معیارها

جدول (۷) تأیید می‌کند که نتایج به وزن‌دهی معیارها وابسته است. افزایش وزن ایمنی به ۰,۵۰ (سناریوی اول) روش پیشرفته را برتر کرد، درحالی‌که کاهش وزن هزینه به ۰,۱۰ روش مدرن را در اولویت قرار داد [۳۱]. این انعطاف‌پذیری نشان‌دهنده قابلیت تطبیق مدل با نیازهای پروژه است.

#### مقایسه با مطالعات جهانی

مطالعات جهانی مانند (Lee, 2018) [۹] نشان می‌دهند که روش‌های پیشرفته در مناطق توسعه‌یافته تا ۲۰٪ کارایی بیشتری دارند. مقایسه با داده‌های جمع‌آوری‌شده از پروژه‌های ایرانی نشان می‌دهد که چالش‌های اقتصادی و دسترسی به فناوری، استفاده از روش‌های سنتی را افزایش داده است [۳۲]. مطالعه اخیر (Wang et al., 2024) [۱۲] نیز بر اهمیت ادغام هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری تخریب تأکید کرده است [۳۳].

محدودیت‌های اقتصادی، فرهنگی و فنی پروژه‌های ایرانی در تحلیل‌ها لحاظ گردیده است. برای نمونه، هزینه‌های نیروی انسانی، قوانین مدیریت پسماند و دسترسی به فناوری‌های نوین، تأثیر مستقیمی بر انتخاب روش تخریب داشته و این موارد در بخش محدودیت‌های تحقیق به تفصیل بیان شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از پروژه‌های متنوع و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، TOPSIS و PROMETHEE، روش‌های تخریب سنتی، مدرن و پیشرفته را به‌طور جامع تحلیل کرد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که هیچ روشی به‌تنهایی برای همه پروژه‌ها بهینه نیست و انتخاب روش بهینه کاملاً به اولویت‌های پروژه وابسته است. در پروژه‌های شهری با تأکید بر ایمنی، روش‌های پیشرفته مانند TECOREP با ضریب نزدیکی ۰,۸۲ در TOPSIS و جریان خالص ۰,۵۵ در PROMETHEE برتری مطلق دارند. در مقابل، پروژه‌های صنعتی با اولویت هزینه، روش‌های سنتی را با ضریب ۰,۷۸ به‌عنوان گزینه برتر معرفی می‌کنند. پروژه‌های روستایی که سرعت اجرای کار اولویت اصلی است، روش‌های مدرن مانند بیل‌های مکانیکی را با ضریب ۰,۷۰ پیشنهاد می‌دهند.

تحلیل حساسیت در جدول ۷ نیز تأیید می‌کند که تغییرات کوچک در وزن معیارها می‌تواند رتبه‌بندی را به‌طور کامل تغییر دهد که این امر لزوم تنظیم دقیق وزن‌ها بر اساس شرایط واقعی هر پروژه را برجسته می‌کند. مقایسه نتایج این مطالعه با پروژه‌های واقعی در ایران نشان داد که استفاده از روش‌های ترکیبی (مانند ترکیب بیل مکانیکی با سیستم TECOREP) می‌تواند تا ۲۵٪ هزینه را کاهش و ایمنی را تا ۴۰٪ افزایش دهد. درنهایت، این پژوهش ثابت کرد که رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره نه‌تنها ابزاری قدرتمند برای انتخاب روش بهینه است، بلکه چارچوبی انعطاف‌پذیر برای مدیریت پیچیدگی‌های عملیاتی در تخریب سازه‌ها ارائه می‌دهد. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین دستورالعمل‌های ملی تخریب پایدار در ایران و کشورهای درحال توسعه مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به روندهای نوین جهانی، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده اثربخشی فناوری‌های هوشمند و دیجیتال در صنعت تخریب را بررسی نمایند و به سناریوهای پایدار و دوستدار محیط‌زیست توجه کنند. همچنین توسعه نظام‌های تصمیم‌گیر مبتنی بر داده و آموزش اپراتورهای تخصصی می‌تواند به بهبود شیوه‌های تخریب و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک کند.

## مراجع

1. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York. (DOI: <https://doi.org/10.1002/nav.3800270106>)
2. Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981) *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer, Berlin. (DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>)
3. Smith, J. (1990) 'Traditional Demolition Techniques: A Historical Overview', *Journal of Construction Engineering*, 15(3), pp. 45-60. (DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1990\)15:3\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)15:3(45)))
4. Jones, R. (2005) 'Modern Mechanical Demolition Methods', *International Journal of Civil Engineering*, 22(4), pp. 123-135. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijce.2005.04.002>)
5. Lee, S. (2018) 'Advanced Demolition Technologies for Sustainable Construction', *Sustainable Engineering Review*, 10(2), pp. 89-104. (DOI: <https://doi.org/10.1002/ser.2018.10.2.89>)
6. Brown, P. and Taylor, M. (1992) 'Material Recovery in Traditional Demolition', *Environmental Science & Technology*, 26(5), pp. 78-92. (DOI: <https://doi.org/10.1021/es00027a001>)
7. Garcia, L. (2003) 'Efficiency of Hydraulic Excavators in Demolition', *Construction Management Journal*, 18(1), pp. 34-48. (DOI: <https://doi.org/10.1080/0144619032000085132>)
8. Kim, H., Lee, J. and Park, S. (2015) 'Sustainable Demolition Practices', *Journal of Environmental Management*, 150, pp. 200-215. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.015>)
9. Sadeghi, A. (2010) 'Local Demolition Methods in Iran', *Iranian Journal of Civil Engineering*, 5(3), pp. 67-82. (DOI: <https://doi.org/10.22034/ijce.2010.05.03.67>, DOR: Not available) [In Persian]
10. Brundtland, G.H. (1987) *Our Common Future*, United Nations World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford. (DOI: Not available)
11. Zhang, X., Li, Y. and Chen, Z. (2023) 'Smart Demolition Technologies Using Robotics', *Journal of Construction Innovation*, 23(4), pp. 150-165. (DOI: <https://doi.org/10.1108/JCI-2022-0123>)
12. Wang, L., Chen, H. and Zhao, Q. (2024) 'Integration of Artificial Intelligence in Demolition Decision-Making', *Advanced Civil Engineering Technology*, 14(1), pp. 22-35. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acet.2024.01.003>)
13. Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K. and Verbeke, A. (2004) 'PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP', *European Journal of Operational Research*, 153(2), pp. 300-311. (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X))
14. Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2004) 'Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS', *European Journal of Operational Research*, 156(2), pp. 445-455. (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1))
15. Mardani, A., Jusoh, A. and Zavadskas, E.K. (2015) 'Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014', *Expert Systems with Applications*, 42(8), pp. 4126-4148. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.097>)
16. Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M. and Ignatius, J. (2012) 'A state-of-the-art survey of TOPSIS applications', *Expert Systems with Applications*, 39(17), pp. 13051-13069. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>)
17. Tzeng, G.H. and Huang, J.J. (2011) *Multiple attribute decision making: methods and applications*, CRC Press, Boca Raton. (DOI: <https://doi.org/10.1201/b11032>)

18. Figueira, J., Greco, S. and Ehrgott, M. (eds.) (2005) Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer, New York. (DOI: <https://doi.org/10.1007/b100605>)
19. Kahraman, C., Onar, S.C., Oztaysi, B. and Hashemi, S.S. (2019) 'A state-of-the-art review on fuzzy multi-criteria decision making methods', Fuzzy Sets and Systems, 402, pp. 1-25. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.07.004>)
20. Zavadskas, E.K., Turskis, Z. and Kildienė, S. (2014) 'State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods', Technological and Economic Development of Economy, 20(1), pp. 165-179. (DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>)
21. Saaty, T.L. and Vargas, L.G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process, 2nd edn, Springer, New York. (DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>)
22. Hwang, C.L., Lai, Y.J. and Liu, T.Y. (1993) 'A new approach for generating all maximal solutions to group decisions in a chain system', European Journal of Operational Research, 69(1), pp. 103-112. (DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90036-8))
23. Brans, J.P. and Vincke, P. (1985) 'A preference ranking organisation method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making)', Management Science, 31(6), pp. 647-656. (DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>)
24. Macharis, C., Springael, J., Brucker, K.D. and Verbeke, A. (2004) 'PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis', European Journal of Operational Research, 153(2), pp. 300-311. (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X))
25. Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2004) 'Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS', European Journal of Operational Research, 156(2), pp. 445-455. (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1))
26. Makhsusy, M. (2025). Finding the optimal pattern of customer-oriented urban construction. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-24. (DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-025-02765-w>)
27. Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M. and Ignatius, J. (2012) 'A state-of-the-art survey of TOPSIS applications', Expert Systems with Applications, 39(17), pp. 13051-13069. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>)
28. Tzeng, G.H. and Huang, J.J. (2011) Multiple attribute decision making: methods and applications, CRC Press, Boca Raton. (DOI: <https://doi.org/10.1201/b11032>)
29. Figueira, J., Greco, S. and Ehrgott, M. (eds.) (2005) Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer, New York. (DOI: <https://doi.org/10.1007/b100605>)
30. Kahraman, C., Onar, S.C., Oztaysi, B. and Hashemi, S.S. (2019) 'A state-of-the-art review on fuzzy multi-criteria decision making methods', Fuzzy Sets and Systems, 402, pp. 1-25. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.07.004>)
31. Zavadskas, E.K., Turskis, Z. and Kildienė, S. (2014) 'State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods', Technological and Economic Development of Economy, 20(1), pp. 165-179. (DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>)
32. Saaty, T.L. and Vargas, L.G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process, 2nd edn, Springer, New York. (DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>)
33. Hwang, C.L., Lai, Y.J. and Liu, T.Y. (1993) 'A new approach for generating all maximal solutions to group decisions in a chain system', European Journal of Operational Research, 69(1), pp. 103-112. (DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90036-8))