

Research Paper

Scenario-Based Evaluation of Foresight Methods for Smart Seismic Systems Using an Integrated SWARA–VIKOR Model under Fuzzy-Grey Uncertainty

Shahin Lale Arefi*, *Department of civil engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran*

Mahdi Bitarafan, *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran*

Received: 07 March 2026

Received in revised form: 02 June 2026

Accepted: 18 June 2026

pp:325-352

<https://doi.org/10.22034/scj.2026.2096608.1267>

Abstract

The rapid development of smart seismic systems has made future-oriented decision-making increasingly complex, particularly when technological uncertainty, implementation constraints, and resilience requirements must be considered simultaneously. This study develops a scenario-based framework for evaluating four foresight methods; actor analysis, brainstorming, bibliometric analysis, and patent analysis for supporting strategic decisions on smart seismic systems. The assessment was based on the judgments of 12 experts and eight criteria grouped into two categories: process-related criteria and resilience-oriented criteria. Criterion weights were derived using the Fuzzy-Grey SWARA method, while the alternatives were ranked through Fuzzy-Grey VIKOR under three decision scenarios: baseline, supportive, and resource-constrained. The robustness of the results was further examined using sensitivity analysis and 100,000-iteration Monte Carlo simulations. The findings show that adaptability, robustness, and rapidity are the most influential criteria, with resilience-related criteria accounting for 63% of the total model weight. Bibliometric analysis ranked first in all three scenarios, followed by patent analysis. Monte Carlo results indicated that bibliometric analysis retained the first rank with a probability above 99.8% in every scenario, whereas the probability of satisfying VIKOR's acceptable-advantage condition was 46.7% in the baseline scenario, 77.5% in the supportive scenario, and only 12.1% under resource constraints. These results show that rank stability should not be interpreted as decisive superiority. A robust foresight decision should therefore consider not only the final ranking, but also the strength of separation between leading alternatives and the stability of that separation under uncertainty.

Keywords: Foresight; Smart seismic systems; Resilience; Fuzzy-Grey, SWARA-VIKOR; Scenario analysis; Monte Carlo simulation.

*Corresponding author: sh.arefi@esfarayen.ac.ir

Introduction

Smart seismic systems are evolving from isolated monitoring tools into integrated platforms that combine sensing, structural health monitoring, adaptive control, data analytics, artificial intelligence, digital twins, and real-time decision support. This transition has made long-term planning more difficult because technological change, implementation constraints, and resilience requirements must be considered at the same time. In this context, selecting an appropriate foresight method is not a trivial procedural step; it directly shapes how future technological pathways are identified, interpreted, and translated into strategic decisions.

This study evaluates four foresight methods—actor analysis (MACTOR), brainstorming, bibliometric analysis, and patent analysis—for application to smart seismic systems. Rather than asking only which method ranks first, the study examines whether the leading option remains defensible under changing decision conditions and uncertainty. This distinction is important because a stable first rank does not necessarily imply a strong or decisive advantage over competing alternatives.

Methodology

The analysis was based on the judgments of 12 experts, including specialists in structural engineering, earthquake engineering, and construction management. Eight evaluation criteria were defined in two groups: process-related criteria (information accessibility, efficiency and acceptance, implementation cost, and implementation time) and resilience-oriented criteria (robustness, redundancy, adaptability, and rapidity). Criterion weights were derived using Grey–Fuzzy SWARA, and the four foresight methods were ranked using Grey–Fuzzy VIKOR.

The ranking was performed under three decision scenarios. The baseline scenario retained the original expert-derived weights. The supportive scenario increased the importance of information accessibility and efficiency/acceptance while reducing the emphasis on cost and time. The resource-constrained scenario applied the opposite change. To test robustness, sensitivity analysis was conducted for different weight-variation levels and VIKOR strategy settings, followed by Monte Carlo simulation with 100,000 iterations for each scenario.

Results and Discussion

The weighting results showed a clear preference for resilience-related criteria. Adaptability received the highest final weight (0.20), followed by robustness (0.18) and rapidity (0.16). In total, resilience-oriented criteria accounted for 63% of the model weight, while process-related criteria accounted for 37%. This pattern suggests that, from the experts' perspective, the value of a foresight method depends more on its ability to support stable and adaptive decision-making than on speed or low implementation cost alone.

Table 1. Scenario-based VIKOR results for the four foresight methods

Alternative	Q (S0)	Rank	Q (S+)	Rank	Q (S−)	Rank
Bibliometric analysis (A3)	0.000	1	0.000	1	0.000	1
Patent analysis (A4)	0.336	2	0.446	2	0.220	2
Actor analysis / MACTOR (A1)	0.625	3	0.590	3	0.660	3
Brainstorming (A2)	1.000	4	1.000	4	1.000	4

Across all three scenarios, bibliometric analysis ranked first, followed by patent analysis, actor analysis, and brainstorming. Although the ranking order remained unchanged, the distance between the two leading alternatives varied noticeably. Under supportive conditions, bibliometric analysis maintained a clearer advantage over patent analysis. Under resource constraints, however, the gap became smaller, indicating that the superiority of the first-ranked method was less decisive.

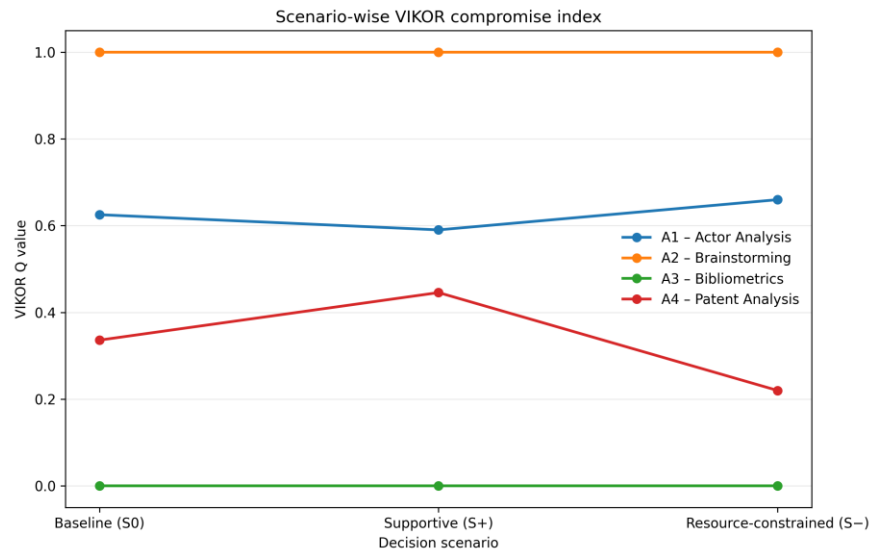


Figure 1. Scenario-wise VIKOR compromise index for the four foresight methods

Figure 1 illustrates the scenario-based behavior of the VIKOR compromise index. The chart confirms that bibliometric analysis consistently retains the lowest Q value, while the position of patent analysis remains second in all three scenarios. The main variation lies in the degree of separation between these two options rather than in a change of the ranking order itself.

Sensitivity and simulation analyses added an important layer of interpretation. Monte Carlo results showed that bibliometric analysis preserved the first rank with a probability above 99.8% in every scenario. However, the probability of satisfying VIKOR's acceptable-advantage condition was 46.7% in the baseline scenario, 77.5% in the supportive scenario, and only 12.1% in the resource-constrained scenario. This means that the first rank of bibliometric analysis is highly stable, but its decisive superiority over patent analysis is much more dependent on decision conditions.

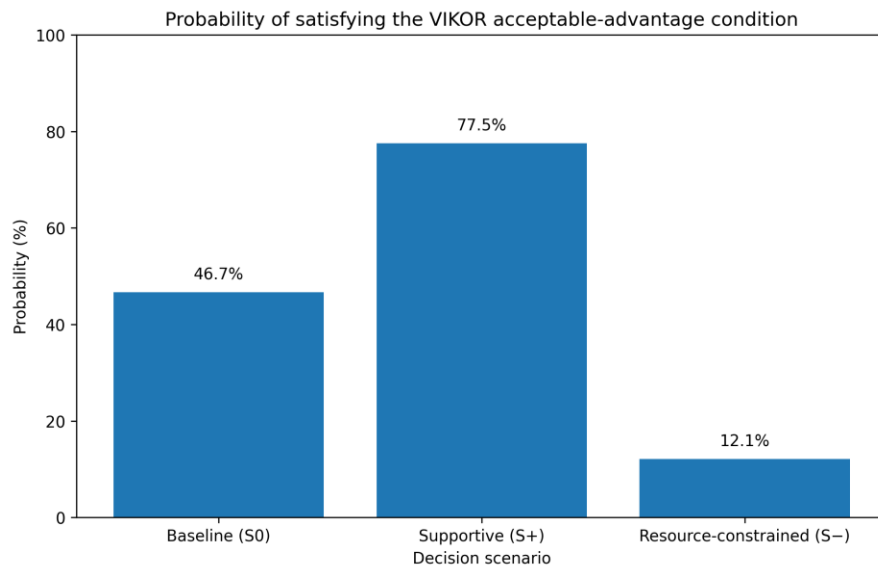


Figure 2. Probability of satisfying the VIKOR acceptable-advantage condition under the three decision scenarios

Figure 2 clearly highlights this distinction. Supportive conditions strengthen the case for bibliometric analysis as a stand-alone compromise solution, while resource limitations sharply reduce the likelihood of a sufficiently large gap between the first and second alternatives. From a practical standpoint, this suggests that bibliometric analysis can serve as a reliable core method for monitoring smart seismic systems, whereas patent analysis becomes a particularly valuable complement when technology maturation and implementation feasibility gain importance.

Conclusion

The study shows that bibliometric analysis is the most robust foresight method for smart seismic systems within the adopted framework, and patent analysis is its closest competitor. At the same time, the results demonstrate that rank stability should not be confused with decisive superiority. A method may consistently occupy the first position while still lacking a sufficiently strong margin over the next best alternative under some decision environments. Therefore, the proposed scenario-based Fuzzy–Fuzzy and SWARA–VIKOR framework offers a more realistic basis for foresight-method selection by combining ranking, robustness, and uncertainty analysis in a single decision structure.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



انجمن علمی دانشجوین ایران

نشریه علمی شهر ایمن

شاپا الکترونیکی: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی سناریو محور روش های آینده پژوهی برای سامانه های هوشمند لرزه ای با استفاده

از مدل یکپارچه SWARA-VIKOR تحت عدم قطعیت Fuzzy-Grey

شاهین لعل عارفی* - گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، خراسان شمالی، اسفراین، ایران
مهدی بیطرفان - پژوهشکده مدیریت خطرپذیری و بحران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸ ص.ص: ۳۵۲-۳۲۵

<https://doi.org/10.22034/scj.2026.2096608.1267>

چکیده

توسعه سامانه های هوشمند لرزه ای، تصمیم گیری درباره مسیرهای آینده فناوری را به مسئله ای چندمعیاره و همراه با عدم قطعیت تبدیل کرده است؛ مسئله ای که در آن انتخاب یک روش آینده پژوهی صرفاً بر اساس سهولت اجرا یا دسترسی به داده کافی نیست. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی سناریو محور چهار روش تحلیل بازیگران، طوفان فکری، کتاب سنجی و تحلیل ثبت اختراع انجام شد. ارزیابی ها بر پایه قضاوت ۱۲ متخصص و هشت معیار در دو گروه فرایندی و تاب آوری صورت گرفت. وزن معیارها با روش خاکستری-فازی-سوارا تعیین و گزینه ها با روش خاکستری-فازی ویکور در سه سناریوی پایه، حمایتی و محدودیت منابع رتبه بندی شدند. برای سنجش استحکام نتایج نیز تحلیل حساسیت و شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰,۰۰۰ تکرار به کار رفت. یافته ها نشان داد سازگاری پذیری، استحکام و سرعت ارزیابی مهم ترین معیارهای تصمیم هستند و معیارهای تاب آوری ۶۳ درصد از وزن مدل را تشکیل می دهند. کتاب سنجی در هر سه سناریو رتبه نخست و تحلیل ثبت اختراع رتبه دوم را حفظ کرد. شبیه سازی مونت کارلو نشان داد احتمال حفظ رتبه نخست کتاب سنجی در تمام سناریوها بیش از ۹۹.۸ درصد است، در حالی که احتمال تحقق شرط مزیت قابل قبول در سناریوهای پایه، حمایتی و محدودیت منابع به ترتیب ۴۶.۷، ۷۷.۵ و ۱۲.۱ درصد به دست آمد. نتایج نشان می دهد ثبات رتبه با قدرت برتری یکسان نیست و ارزیابی روش های آینده پژوهی باید علاوه بر جایگاه نهایی، فاصله گزینه های برتر و پایداری تصمیم را نیز در نظر گیرد. چارچوب پیشنهادی می تواند مبنایی برای انتخاب واقع بینانه تر و قابل دفاع تر روش های آینده پژوهی در سامانه های هوشمند لرزه ای فراهم کند.

واژگان کلیدی: آینده پژوهی، سامانه های هوشمند لرزه ای، تاب آوری، Fuzzy-Grey، SWARA-VIKOR.

تحلیل سناریو، مونت کارلو.

* نویسنده مسئول: sh.arefi@esfarayen.ac.ir

۱- مقدمه

آینده‌پژوهی در سال‌های اخیر از یک فعالیت صرفاً معطوف به پیش‌بینی روندها فاصله گرفته و به ابزاری برای درک بهتر عدم قطعیت و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در محیط‌های پیچیده تبدیل شده است. در این نگاه، آینده یک مسیر از پیش تعیین شده نیست که بتوان آن را تنها پیش‌بینی کرد، بلکه مجموعه‌ای از وضعیت‌ها و مسیرهای محتمل است که شناخت آن‌ها می‌تواند تصمیم‌های امروز را واقع‌بینانه‌تر و سنجیده‌تر کند. به همین دلیل، در بسیاری از حوزه‌های فناوری و مهندسی، توجه از پیش‌بینی یک آینده واحد به سمت رصد روندها، شناسایی نشانه‌های تغییر، تحلیل رفتار بازیگران، بررسی مسیر رشد فناوری‌ها و مقایسه سناریوهای مختلف سوق یافته است. این تحول باعث شده آینده‌پژوهی به بخشی از فرایند تصمیم‌سازی راهبردی تبدیل شود؛ به‌ویژه در حوزه‌هایی که سرعت تغییر فناوری بالاست و تصمیم‌های امروز می‌توانند پیامدهای بلندمدتی به همراه داشته باشند (پورتر و همکاران، ۲۰۰۴؛ پاپر، ۲۰۰۸).

هم‌زمان با گسترش کاربرد آینده‌پژوهی، تنوع روش‌های آن نیز افزایش یافته است. برخی روش‌ها بر قضاوت و تعامل خبرگان تکیه دارند، برخی بر شناخت بازیگران و منافع آن‌ها متمرکزند و گروهی دیگر از داده‌های علمی، فناوریانه و اسنادی برای شناسایی روندهای در حال ظهور استفاده می‌کنند. در نتیجه، مسئله فقط انتخاب یک روش آینده‌پژوهی نیست، بلکه انتخاب روشی است که با ماهیت مسئله، نوع داده‌های موجود، افق زمانی، محدودیت‌های اجرایی و نوع تصمیم مورد انتظار تناسب داشته باشد. روشی که برای شناسایی روندهای پژوهشی مناسب است، الزاماً در تحلیل روابط میان ذی‌نفعان یا تولید ایده‌های جدید همان کارایی را ندارد. از این منظر، انتخاب روش آینده‌پژوهی خود به یک مسئله چندمعیاره تبدیل می‌شود که در آن باید نقاط قوت و محدودیت‌های هر روش به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود. این مسئله در حوزه سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. توسعه حسگرهای هوشمند، سامانه‌های پایش سلامت سازه، کنترل فعال و نیمه‌فعال، پردازش بلادرنگ داده‌ها، مدل‌های پیش‌بینی آسیب و ابزارهای هوشمند پشتیبان تصمیم، به تدریج ساختار سنتی مدیریت خطر زلزله را تغییر داده است. با این حال، همه این فناوری‌ها با سرعت یکسان و در سطح مشابهی از بلوغ توسعه نمی‌یابند. برخی از پشتوانه علمی قابل توجهی برخوردارند اما هنوز با محدودیت‌های اجرایی مواجه‌اند، برخی به مرحله توسعه صنعتی و ثبت اختراع نزدیک شده‌اند و برخی دیگر بیش از آنکه به خود فناوری وابسته باشند، تحت تأثیر عواملی مانند پذیرش سازمانی، هزینه، زمان اجرا و هماهنگی میان بازیگران قرار دارند. در چنین شرایطی، تصمیم‌گیری درباره مسیر توسعه یک سامانه هوشمند لرزه‌ای نمی‌تواند تنها بر یک منبع اطلاعاتی یا یک رویکرد آینده‌نگر متکی باشد. چهار روش مورد بررسی در این پژوهش، یعنی تحلیل بازیگران، طوفان فکری، کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع، هر یک بخش متفاوتی از این مسئله را پوشش می‌دهند. تحلیل بازیگران می‌تواند روابط میان ذی‌نفعان، هم‌گرایی‌ها و تعارض‌های احتمالی را آشکار کند؛ طوفان فکری امکان استفاده از تجربه جمعی و تولید ایده‌های جدید را فراهم می‌سازد؛ کتاب‌سنجی برای شناسایی روندهای علمی، حوزه‌های رو به رشد و ساختار تولید دانش مناسب است؛ و تحلیل ثبت اختراع می‌تواند تصویری از جهت حرکت فناوری، بلوغ نوآوری و فاصله میان تولید دانش و کاربرد صنعتی ارائه دهد. بنابراین، نمی‌توان انتظار داشت یک روش در همه شرایط و برای همه اهداف بر سایر روش‌ها برتری داشته باشد. ارزش هر روش زمانی روشن می‌شود که در ارتباط با نیاز واقعی تصمیم‌گیری ارزیابی شود.

در عین حال، ارزیابی روش‌های آینده‌پژوهی در حوزه سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای نباید فقط بر توان آن‌ها در تولید اطلاعات متمرکز باشد. هدف نهایی چنین سامانه‌هایی افزایش توان سازه، زیرساخت یا سیستم شهری برای مواجهه با اختلال، حفظ سطحی از عملکرد، سازگار شدن با شرایط متغیر و بازگشت سریع‌تر به وضعیت قابل قبول است. به همین دلیل، مؤلفه‌های تاب‌آوری باید در کنار معیارهای اجرایی و فرایندی آینده‌پژوهی قرار گیرند. در این پژوهش، معیارها در دو گروه در نظر گرفته شده‌اند: گروه نخست شامل دسترسی به اطلاعات، کارایی و پذیرش، هزینه و زمان اجراست و گروه دوم بر استحکام، افزونگی، سازگاری‌پذیری و سرعت بازایی تمرکز دارد. این ترکیب باعث می‌شود ارزیابی از این پرسش ساده که «کدام روش ارزان‌تر یا سریع‌تر است؟» فراتر رود و به این پرسش نزدیک شود که «کدام روش، در شرایط مختلف، پشتیبانی مؤثرتری از تصمیم‌گیری تاب‌آور فراهم می‌کند؟»

بیان مسئله پژوهش از همین نقطه شکل می‌گیرد. بسیاری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، پس از تعیین وزن معیارها، گزینه‌ها را در یک وضعیت ثابت رتبه‌بندی و در نهایت یک گزینه را به‌عنوان گزینه برتر معرفی می‌کنند. این رویکرد زمانی قابل قبول است که شرایط تصمیم نسبتاً

پایدار باشد؛ اما در محیطی مانند سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای، اهمیت معیارها می‌تواند با تغییر شرایط تغییر کند. ممکن است در یک وضعیت، دسترسی به داده و پذیرش سازمانی اهمیت بیشتری داشته باشد و در وضعیت دیگر، محدودیت مالی و فوریت زمانی تعیین‌کننده‌تر باشند. در چنین شرایطی، اگر رتبه‌بندی تنها بر یک مجموعه ثابت از وزن‌ها استوار باشد، مشخص نیست که برتری گزینه نخست واقعاً پایدار است یا صرفاً حاصل یک ترکیب خاص از مفروضات. موضوع زمانی مهم‌تر می‌شود که بدانیم حفظ رتبه نخست نیز به‌تنهایی برای قضاوت کافی نیست. ممکن است یک گزینه در سناریوهای مختلف همچنان در جایگاه نخست باقی بماند، اما فاصله آن با گزینه دوم آن‌قدر کاهش یابد که معرفی آن به‌عنوان تنها راه‌حل قابل دفاع نباشد. از این‌رو، باید میان «ثبات رتبه» و «قدرت برتری» تفاوت قائل شد. این تمایز در شرایط عدم قطعیت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا وزن معیارها و ارزیابی عملکرد گزینه‌ها معمولاً تحت تأثیر قضاوت‌های انسانی، داده‌های ناقص و شرایط متغیر قرار دارند و نمی‌توان آن‌ها را کاملاً قطعی فرض کرد.

ضرورت انجام این پژوهش نیز از همین محدودیت ناشی می‌شود. توسعه سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای با تصمیم‌هایی همراه است که اثر آن‌ها ممکن است در بلندمدت آشکار شود. انتخاب نامناسب روش آینده‌پژوهی می‌تواند باعث تمرکز بر روندهای کم‌اهمیت، نادیده گرفتن فناوری‌های نوظهور، تخصیص نامناسب منابع یا برداشت ناقص از رفتار ذی‌نفعان شود. در مقابل، استفاده از چارچوبی که علاوه بر رتبه‌بندی، رفتار نتیجه را در برابر تغییر شرایط و عدم قطعیت نیز بررسی کند، می‌تواند تصمیم را از یک انتخاب مقطعی به یک تصمیم قابل دفاع‌تر و انعطاف‌پذیرتر تبدیل کند. این موضوع در حوزه زلزله اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تصمیم‌های مرتبط با تاب‌آوری مستقیماً با تداوم عملکرد، سرعت بازیابی و نحوه استفاده از منابع محدود در ارتباط‌اند.

بر همین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی و مقایسه سناریومحور روش‌های منتخب آینده‌پژوهی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا اهمیت معیارهای فرایندی و تاب‌آوری تعیین می‌شود و سپس چهار روش تحلیل بازیگران، طوفان فکری، کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع در چند وضعیت تصمیم‌گیری مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه، بررسی می‌شود که تغییر شرایط از وضعیت پایه به شرایط حمایتی یا محدودیت منابع چه اثری بر فاصله میان گزینه‌ها دارد و آیا گزینه پیش‌تاز در برابر تغییر پارامترهای مدل، تغییر وزن معیارها و عدم قطعیت هم‌زمان ورودی‌ها همچنان جایگاه خود را حفظ می‌کند یا خیر. در نهایت، هدف پژوهش تنها معرفی یک رتبه نهایی نیست، بلکه شناسایی گزینه‌ای است که برتری آن در برابر تغییر شرایط از پایداری کافی برخوردار باشد و در صورت کاهش فاصله میان گزینه‌ها، بتوان مجموعه‌ای واقع‌بینانه از راه‌حل‌های مصالحه را در اختیار تصمیم‌گیر قرار داد. برای پاسخ به این مسئله، پژوهش از چارچوب ترکیبی خاکستری-فازی سوارا-ویکور، همراه با تحلیل سناریو، تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌کند. ویژگی اصلی این چارچوب آن است که آینده‌پژوهی، تاب‌آوری و عدم قطعیت را به‌صورت موضوعاتی جدا از یکدیگر در نظر نمی‌گیرد، بلکه آن‌ها را در یک ساختار تصمیم یکپارچه به هم پیوند می‌دهد.

۲- پیشینه پژوهش و جایگاه مطالعات مرتبط

ادبیات آینده‌پژوهی نشان می‌دهد که این حوزه طی چند دهه اخیر از پیش‌بینی نسبتاً مستقیم روندها به سمت شناخت آینده‌های بدیل و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت حرکت کرده است. پورتر و همکاران (۲۰۰۴) این تحول را در قالب تحلیل آینده فناوری توضیح دادند و نشان دادند که پیش‌بینی فناوری، رصد روندها، ارزیابی فناوری، نقشه‌راه و آینده‌پژوهی را می‌توان به‌عنوان اجزای مکمل یک فرایند تصمیم‌ساز در نظر گرفت. مطالعات بعدی نیز بر همین جهت‌گیری تأکید کرده‌اند و آینده‌پژوهی را بیش از آنکه ابزاری برای پیش‌گویی آینده بدانند، روشی برای بهبود آمادگی و کیفیت تصمیم‌های راهبردی معرفی کرده‌اند (ایدن و همکاران، ۲۰۱۷؛ گوردون و همکاران، ۲۰۲۰). با گسترش این حوزه، مسئله انتخاب روش مناسب نیز اهمیت بیشتری پیدا کرده است. پاپر (۲۰۰۸) نشان داد که انتخاب روش آینده‌پژوهی به عواملی مانند ماهیت مسئله، افق زمانی، نوع اطلاعات، میزان مشارکت خبرگان، منابع در دسترس و نوع خروجی مورد انتظار وابسته است. بنابراین، نمی‌توان یک روش را برای همه مسائل مناسب دانست. برخی روش‌ها بر دانش و تعامل خبرگان تکیه دارند، برخی برای تحلیل بازیگران و روابط میان آن‌ها مناسب‌ترند و گروهی دیگر امکان استخراج روندها از داده‌های علمی و فناوری را فراهم می‌کنند. همین تفاوت، ضرورت مقایسه نظام‌مند روش‌ها را به‌جای انتخاب سلیقه‌ای آن‌ها تقویت می‌کند.

در میان روش‌های مورد توجه این پژوهش نیز چنین تفاوتی دیده می‌شود. روش تحلیل بازیگران برای بررسی منافع، تعاملات و تعارض‌های میان ذی‌نفعان توسعه یافته است (گوده، ۱۹۹۱)، در حالی که طوفان فکری بیشتر بر تولید ایده و استفاده از تجربه جمعی تمرکز دارد. در مقابل،

کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع به داده‌های مستند علمی و فناوریانه متکی‌اند و می‌توانند برای شناسایی روندهای پژوهشی، موضوعات نوظهور و مسیرهای توسعه فناوری به کار روند. دایم و همکاران (۲۰۰۶) نیز نشان دادند که ترکیب اطلاعات علمی و داده‌های ثبت اختراع می‌تواند شناخت کامل‌تری از روند فناوری‌های نوظهور فراهم کند. بنابراین، چهار روش بررسی‌شده در این پژوهش در واقع چهار شیوه متفاوت برای تولید و تفسیر اطلاعات درباره آینده را نمایندگی می‌کنند.

در حوزه سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای، مطالعات گذشته نیز نشان داده‌اند که انتخاب فناوری و راهکار مناسب ماهیتی چندمعیاره دارد. بیطرفان و همکاران (۲۰۱۳) در ارزیابی سناریوهای طراحی سازه‌های هوشمند پل نشان دادند که تصمیم درباره فناوری‌های لرزه‌ای تنها به عملکرد فنی محدود نیست و هزینه، سرعت اجرا، قابلیت توسعه و شرایط آینده نیز در آن نقش دارند. در ادامه، بیطرفان و همکاران (۲۰۱۴) در ارزیابی حسگرهای هوشمند پایش سلامت پل‌ها، معیارهای فنی و اجرایی را به‌صورت هم‌زمان وارد تصمیم کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای ذاتاً در محیطی شکل می‌گیرند که چند معیار و چند محدودیت به‌طور هم‌زمان بر تصمیم اثر می‌گذارند. از سوی دیگر، ادبیات تاب‌آوری نیز به‌تدریج از ارزیابی صرف آسیب‌پذیری فیزیکی فاصله گرفته و به سمت سنجش توان سیستم برای حفظ عملکرد، سازگاری و بازیابی حرکت کرده است. مطالعات بیطرفان و همکاران در زمینه مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت شهری، تاب‌آوری در برابر زلزله و سایر تهدیدات، نشان داده‌اند که ارزیابی تاب‌آوری به ترکیبی از معیارهای فنی، فضایی، مدیریتی و محیطی نیاز دارد (بیطرفان و امینی‌حسینی، ۲۰۲۳؛ بیطرفان و همکاران، ۲۰۲۳؛ بیطرفان و همکاران، ۲۰۲۶). این جهت‌گیری برای پژوهش حاضر اهمیت دارد، زیرا روش آینده‌پژوهی مطلوب باید علاوه بر قابلیت تولید اطلاعات، توان پشتیبانی از تصمیم‌هایی را داشته باشد که به حفظ و بازیابی عملکرد سیستم کمک می‌کنند. هم‌زمان، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مدیریت چنین پیچیدگی‌هایی گسترش یافته است. روش سوارا امکان تعیین اهمیت نسبی معیارها را بر اساس قضاوت خبرگان فراهم می‌کند (کرسولینه و همکاران، ۲۰۱۰) و روش ویکور با تمرکز بر راه‌حل مصالحه، تعادلی میان مطلوبیت کلی و نامطلوب‌ترین وضعیت هر گزینه برقرار می‌سازد (اپریکوویچ و ترنگ، ۲۰۰۴). مطالعات مرتبط نویسنده نیز سابقه استفاده از روش‌های سوارا، فازی و خاکستری را در مسائل مهندسی، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری نشان می‌دهند (نخعی و همکاران، ۲۰۱۶؛ هاشمی‌نسب و همکاران، ۲۰۱۹؛ بیطرفان و همکاران، ۲۰۲۳). این پیشینه، استفاده از چارچوب ترکیبی خاکستری-فازی در پژوهش حاضر را از نظر روش‌شناختی پشتیبانی می‌کند. با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات چندمعیاره همچنان نتیجه را در قالب یک رتبه نهایی ارائه می‌کنند، در حالی که تغییر وزن معیارها یا شرایط تصمیم می‌تواند فاصله میان گزینه‌ها را تغییر دهد. مطالعات جدیدتر به همین دلیل به سمت تحلیل سناریو، حساسیت و شبیه‌سازی عدم قطعیت حرکت کرده‌اند. برای نمونه، میکائیلی و همکاران (۲۰۲۶) اثر سناریوهای مختلف را بر اولویت‌بندی گزینه‌ها بررسی کردند و نعمتی و همکاران (۲۰۲۶) با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، پایداری رتبه‌ها را تحت عدم قطعیت ارزیابی کردند. این مسیر نشان می‌دهد که در تصمیم‌های پیچیده، دانستن رتبه نخست به‌تنهایی کافی نیست و میزان پایداری آن نیز باید مشخص شود.

در مجموع، مطالعات پیشین سه حوزه اصلی را به‌خوبی توسعه داده‌اند: انتخاب و ترکیب روش‌های آینده‌پژوهی، تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل لرزه‌ای و تاب‌آوری، و مدیریت عدم قطعیت در رتبه‌بندی گزینه‌ها. با این حال، در مطالعات بررسی‌شده این سه حوزه کمتر در یک چارچوب واحد به یکدیگر متصل شده‌اند. به‌ویژه، ارزیابی مستقیم روش‌های آینده‌پژوهی برای سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای بر اساس معیارهای فرایندی و تاب‌آوری، همراه با بررسی رفتار رتبه‌ها در شرایط مختلف تصمیم‌گیری و تحت عدم قطعیت، همچنان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس، پژوهش حاضر تلاش می‌کند این فاصله را با ترکیب وزن‌دهی خاکستری-فازی سوارا، رتبه‌بندی ویکور، تحلیل سناریو، تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت‌کارلو پوشش دهد. تفاوت اصلی این پژوهش با مطالعات پیشین در آن است که به‌جای ارزیابی مستقیم یک فناوری یا راهکار سازه‌ای، روش‌هایی را ارزیابی می‌کند که قرار است فرایند شناخت آینده و تصمیم‌گیری درباره فناوری‌های هوشمند لرزه‌ای را پشتیبانی کنند. در نتیجه، علاوه بر رتبه گزینه‌ها، پایداری رتبه نخست و قدرت فاصله آن از گزینه‌های رقیب نیز به بخشی از ارزیابی تبدیل می‌شود.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- طرح پژوهش و چارچوب تحلیلی

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه روش‌های منتخب آینده‌پژوهی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای طراحی شده است. با توجه به اینکه انتخاب یک روش آینده‌پژوهی به مجموعه‌ای از عوامل اطلاعاتی، اجرایی و مرتبط با تاب‌آوری وابسته است، مسئله پژوهش در قالب یک ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره تحت عدم قطعیت صورت‌بندی شد.

فرایند پژوهش از چند مرحله به‌هم‌پیوسته تشکیل شده است. در مرحله نخست، گزینه‌های مورد بررسی و معیارهای ارزیابی مشخص شدند. چهار روش تحلیل بازیگران، طوفان فکری، کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع به‌عنوان گزینه‌های تصمیم در نظر گرفته شدند. معیارهای ارزیابی نیز در دو گروه اصلی شامل معیارهای فرایندی و معیارهای تاب‌آوری سازمان‌دهی شدند تا علاوه بر ملاحظات اجرایی هر روش، توان آن در پشتیبانی از تصمیم‌گیری تاب‌آور نیز در ارزیابی لحاظ شود. در مرحله بعد، قضاوت‌های خبرگان برای تعیین اهمیت معیارها و ارزیابی عملکرد گزینه‌ها گردآوری و به یک ساختار قابل استفاده در مدل تصمیم تبدیل شد. از آنجا که بخش مهمی از این ارزیابی‌ها مبتنی بر قضاوت انسانی است، چارچوب پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شد که ابهام و عدم قطعیت موجود در داده‌ها را نیز در محاسبات در نظر بگیرد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، وزن معیارها با استفاده از روش خاکستری-فازی سوارا تعیین شد و سپس گزینه‌ها با روش خاکستری-فازی ویکور مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفتند. برای آنکه نتیجه فقط به یک وضعیت ثابت وابسته نباشد، رتبه‌بندی در سه وضعیت تصمیم شامل سناریوی پایه، شرایط حمایتی و محدودیت منابع انجام شد. در ادامه، پایداری نتایج از دو منظر بررسی شد. ابتدا اثر تغییر پارامترهای مدل و وزن معیارها از طریق تحلیل حساسیت ارزیابی شد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، رفتار رتبه‌ها در شرایطی که چند منبع عدم قطعیت به‌طور هم‌زمان وارد مدل می‌شوند مورد بررسی قرار گرفت. این مرحله امکان می‌دهد مشخص شود که گزینه برتر صرفاً در یک ترکیب مشخص از مفروضات رتبه نخست را کسب کرده است یا در برابر تغییر شرایط نیز جایگاه خود را حفظ می‌کند. در مجموع، چارچوب پژوهش یک مسیر پیوسته از تعریف گزینه‌ها و معیارها، گردآوری و جمع‌آوری قضاوت‌ها، وزن‌دهی معیارها، طراحی سناریوها، رتبه‌بندی گزینه‌ها و ارزیابی پایداری نتایج را دنبال می‌کند. هدف از این ساختار آن است که نتیجه نهایی تنها به معرفی یک گزینه برتر محدود نشود، بلکه میزان اتکالپذیری آن در برابر تغییر شرایط تصمیم و عدم قطعیت نیز مشخص شود. منطلق پژوهش بر این فرض استوار بود که انتخاب یک روش آینده‌پژوهی برای سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای نباید صرفاً بر ظرفیت آن برای تولید اطلاعات یا شناسایی روندهای فناوری متکی باشد، بلکه لازم است توان آن در پاسخ‌گویی به الزامات تاب‌آوری، محدودیت‌های اجرایی و شرایط متفاوت تصمیم‌گیری نیز به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شود. بر این اساس، فرایند تحلیل در چند مرحله متوالی سازمان‌دهی شد. در مرحله نخست، معیارهای ارزیابی در دو گروه اصلی شامل معیارهای مرتبط با فرایند آینده‌پژوهی و معیارهای مرتبط با تاب‌آوری دسته‌بندی شدند. گروه نخست دسترسی به اطلاعات، کارایی و پذیرش، هزینه اجرا و زمان اجرا را دربر گرفت و گروه دوم شامل استحکام، افزونگی، سازگاری‌پذیری و سرعت بازیابی بود. قضاوت‌های خبرگان درباره اهمیت نسبی معیارها و عملکرد گزینه‌ها ابتدا به متغیرهای زبانی و سپس به نمایش‌های فازی و Grey تبدیل شدند.

در مرحله دوم، وزن نسبی معیارها با استفاده از روش Fuzzy- Grey SWARA تعیین شد. سپس گزینه‌ها با استفاده از روش Fuzzy- Grey VIKOR و بر پایه دو شاخص مطلوبیت گروهی و بیشینه تأسّف فردی ارزیابی شدند. برای بررسی اثر تغییر شرایط تصمیم‌گیری، تحلیل در سه سناریوی پایه (S^0)، حمایتی (S^+) و محدودیت منابع (S^-) انجام گرفت. در ادامه، پایداری نتایج از طریق تحلیل حساسیت پارامتر V ، تحلیل حساسیت وزن‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شد. در شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم قطعیت به‌طور هم‌زمان به وزن معیارها و مقادیر ماتریس عملکرد اعمال شد و شاخص‌های VIKOR در هر تکرار مجدداً محاسبه شدند. در نهایت، علاوه بر مقادیر Q_i ، توزیع رتبه‌ها و احتمال قرارگیری هر گزینه در رتبه‌های مختلف نیز استخراج شد.

۳-۲- گردآوری داده‌ها و تجمیع نظرات خبرگان

با توجه به ماهیت تخصصی موضوع، داده‌های مورد نیاز پژوهش با استفاده از قضاوت خبرگان گردآوری شد. پنل خبرگان شامل ۱۲ نفر بود که از میان متخصصان حوزه‌های مرتبط انتخاب شدند؛ به‌طوری‌که ۵ نفر دارای مدرک دکتری مهندسی عمران-سازه، ۳ نفر دارای مدرک دکتری مهندسی عمران-زلزله و ۴ نفر دارای مدرک دکتری مهندسی عمران-مدیریت ساخت بودند. این ترکیب به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که ارزیابی گزینه‌ها از منظر عملکرد سازه‌ای، رفتار لرزه‌ای و ملاحظات اجرایی و مدیریتی به‌طور هم‌زمان پوشش داده شود. ابزار گردآوری داده‌ها بر اساس گزینه‌ها و معیارهای تعریف‌شده در پژوهش تنظیم شد. در بخش نخست، اهمیت نسبی معیارها مورد ارزیابی قرار گرفت و در بخش دوم، عملکرد هر یک از چهار روش آینده‌پژوهی در برابر معیارهای مورد مطالعه توسط خبرگان سنجیده شد. برای کاهش تفاوت برداشت میان پاسخ‌دهندگان، تعاریف معیارها و گزینه‌ها به‌صورت یکسان در اختیار همه اعضای پنل قرار گرفت.

پیش از ورود داده‌ها به مرحله تحلیل، پایایی ابزار گردآوری اطلاعات بررسی شد. مقدار آلفای کرونباخ برابر با ۰.۷۴ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی قابل قبول پرسشنامه و انسجام مناسب میان گویه‌های مورد استفاده بود. بر این اساس، داده‌های حاصل برای ادامه تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که قضاوت خبرگان در چنین مسائلی همواره با درجاتی از ابهام همراه است، ارزیابی‌ها در قالب عبارات زبانی دریافت و سپس برای استفاده در مدل به مقادیر قابل محاسبه تبدیل شدند. به‌کارگیری هم‌زمان منطق فازی و نظریه خاکستری این امکان را فراهم کرد که

عدم قطعیت موجود در قضاوت‌ها به‌طور کامل حذف نشود و در مراحل بعدی تحلیل نیز انعکاس یابد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، پاسخ‌ها از نظر کامل بودن و قابلیت استفاده بررسی و سپس قضاوت‌های فردی در سطح هر معیار و هر گزینه جمع‌شدند. خروجی این مرحله شامل دو مجموعه داده اصلی بود: نخست، داده‌های مورد نیاز برای تعیین اهمیت نسبی معیارها و دوم، داده‌های مربوط به ارزیابی عملکرد گزینه‌ها و تشکیل ماتریس تصمیم. این دو مجموعه در مراحل بعدی به‌ترتیب در مدل خاکستری-فازی سوارا و خاکستری-فازی ویکور مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-۳- دامنه فناوری‌های هوشمندسازی در سامانه‌های لرزه‌ای

در این پژوهش، سامانه هوشمند لرزه‌ای به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و ابزارهایی اطلاق می‌شود که با اتکا به حسگرها، پردازش داده، کنترل تطبیقی و سامانه‌های پیش‌بینی و پشتیبان تصمیم، امکان پایش وضعیت، تشخیص تغییرات، واکنش مناسب و ارزیابی سریع‌تر شرایط سازه یا زیرساخت را در ارتباط با مخاطره زلزله فراهم می‌کنند. بر این اساس، هوشمندسازی لرزه‌ای به یک فناوری منفرد محدود نمی‌شود و طیفی از فناوری‌های مرتبط با پایش، کنترل، تحلیل و تصمیم‌گیری را دربر می‌گیرد.

یکی از مهم‌ترین مسیرهای این تحول، حسگرهای هوشمند و پایش سلامت سازه است. توسعه حسگرهای فیبر نوری، پیزوالکتریک، سامانه‌های MEMS و شبکه‌های حسگری، امکان ثبت پیوسته پاسخ سازه و شناسایی تغییرات رفتاری را فراهم کرده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ادغام حسگرهای هوشمند با سامانه‌های پایش سلامت سازه، حرکت از بازرسی‌های دوره‌ای به سمت جمع‌آوری مستمر داده و تشخیص زودهنگام آسیب را تقویت کرده است (سیواسوریان و همکاران، ۲۰۲۴). در مطالعات پیشین نیز استفاده از حسگرهای هوشمند برای پایش سلامت پل‌ها به‌عنوان یک مسئله چندمعیاره مورد توجه قرار گرفته است (بیطرفان و همکاران، ۲۰۱۴). مسیر دوم به سامانه‌های کنترل فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی مربوط می‌شود. این سامانه‌ها با استفاده از تجهیزات قابل کنترل و الگوریتم‌های بازخورد، پاسخ سازه را متناسب با شرایط تحریک تغییر می‌دهند. در مقایسه با سامانه‌های غیرفعال، کنترل‌های فعال و نیمه‌فعال قابلیت سازگاری بیشتری با تغییرات پاسخ سازه دارند و به همین دلیل در توسعه سامانه‌های هوشمند کاهش ارتعاش و پاسخ لرزه‌ای جایگاه مهمی پیدا کرده‌اند (اسپنسر و ناگاراچایا، ۲۰۰۳؛ سونگ و اسپنسر، ۲۰۰۰). گروه سوم شامل هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های سازه‌ای است. افزایش حجم داده‌های حاصل از پایش، استفاده از روش‌های داده‌محور را برای تشخیص آسیب، شناسایی الگوهای غیرعادی، پیش‌بینی پاسخ سازه و پشتیبانی از تصمیم‌گیری گسترش داده است. در این رویکرد، داده‌های حسگری تنها برای ثبت رفتار سازه به کار نمی‌روند، بلکه به ورودی مدل‌هایی تبدیل می‌شوند که قادرند وضعیت سیستم را تفسیر کرده و تغییرات احتمالی را پیش‌بینی کنند. مرورهای اخیر نیز نشان داده‌اند که پیوند میان حسگرهای هوشمند، تحلیل داده و هوش مصنوعی به یکی از جهت‌گیری‌های اصلی تحول پایش سلامت سازه تبدیل شده است (سیواسوریان و همکاران، ۲۰۲۴).

مسیر دیگر، دوقلوهای دیجیتال و مدل‌های به‌روزشونده سازه است. در این رویکرد، داده‌های واقعی حاصل از پایش با یک مدل دیجیتال از سازه یا زیرساخت پیوند داده می‌شود تا مدل متناسب با تغییرات سیستم واقعی به‌روز شود. این پیوند امکان ارزیابی مستمر وضعیت، پیش‌بینی رفتار و برنامه‌ریزی هدفمندتر برای مداخله و نگهداری را فراهم می‌کند. به همین دلیل، دوقلوهای دیجیتال را می‌توان مرحله‌ای فراتر از پایش صرف دانست که در آن داده، مدل و تصمیم در یک چرخه به‌هم‌پیوسته قرار می‌گیرند. در کنار این فناوری‌ها، سامانه‌های هشدار سریع زلزله و پشتیبانی بلادرنگ از تصمیم نیز بخش مهمی از هوشمندسازی لرزه‌ای را تشکیل می‌دهند. این سامانه‌ها با تشخیص سریع رخداد، پردازش اطلاعات و انتقال هشدار می‌توانند علاوه بر اطلاع‌رسانی، برخی اقدامات حفاظتی خودکار مانند توقف تجهیزات حساس، کاهش سرعت قطارها یا ایمن‌سازی بخش‌هایی از زیرساخت را فعال کنند. سامانه ShakeAlert نمونه‌ای عملی از این رویکرد است که اطلاعات هشدار را برای افراد و سامانه‌های خودکار فراهم می‌کند و می‌تواند به کاهش پیامدهای فوری زلزله کمک کند (دی‌گروت و همکاران، ۲۰۲۵).

۳-۴- تحلیل شواهد و انتخاب روش‌های آینده‌پژوهی

پیش از ورود به مرحله ارزیابی چندمعیاره، لازم بود مشخص شود که تحولات آینده سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای از چه ابعادی قابل رصد است و برای شناخت هر یک از این ابعاد به چه نوع اطلاعاتی نیاز داریم. به همین منظور، شواهد علمی و فناوریانه مرتبط با هوشمندسازی در مهندسی زلزله مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی حوزه‌هایی مانند حسگرهای هوشمند و پایش سلامت سازه، سامانه‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، دوقلوهای دیجیتال، هشدار سریع و سامانه‌های پشتیبان تصمیم بلادرنگ را دربر گرفت. هدف این مرحله، رتبه‌بندی فناوری‌های موجود نبود؛ بلکه تلاش شد ساختار تحولات حوزه و انواع شواهدی که برای مطالعه آینده آن ضروری است، شناسایی شود.

بررسی مطالعات نشان داد که هوشمندسازی لرزه‌ای یک مسیر فناورانه واحد را دنبال نمی‌کند. بخشی از تحولات در محیط علمی و از طریق گسترش موضوعات پژوهشی شکل می‌گیرد، بخشی در قالب توسعه و بلوغ فناوری به سمت کاربرد عملی حرکت می‌کند و بخشی دیگر به رفتار و تصمیم بازیگران، سازمان‌ها و بهره‌برداران وابسته است. در کنار این موارد، ایده‌ها و نشانه‌های اولیه‌ای نیز وجود دارند که ممکن است هنوز انعکاس گسترده‌ای در انتشارات علمی یا اسناد رسمی فناوری نداشته باشند، اما بتوانند جهت تحولات آینده را تحت تأثیر قرار دهند. بر این اساس، شواهد مورد بررسی در چهار بعد اطلاعاتی اصلی سازمان‌دهی شدند: تحول دانش علمی، توسعه و بلوغ فناوری، محیط نهادی و تعامل بازیگران، و ایده‌ها و نشانه‌های نوظهور. این چهار بعد به‌عنوان چهار منبع مکمل برای شناخت آینده سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای در نظر گرفته شدند. چنین تفکیکی از آن جهت اهمیت دارد که اتکا به یک نوع داده می‌تواند تنها بخشی از مسیر تحول را آشکار کند؛ برای مثال، افزایش تعداد مقالات درباره یک فناوری الزاماً به معنای بلوغ آن برای کاربرد عملی نیست و توسعه یک فناوری نیز بدون در نظر گرفتن پذیرش سازمانی و رفتار ذی‌نفعان قابل تفسیر کامل نخواهد بود.

در گام بعد، روش‌های آینده‌پژوهی از منظر تناسب آن‌ها با این نیازهای اطلاعاتی بررسی شدند. هدف در این مرحله انتخاب روش‌هایی بود که علاوه بر ارتباط با مسئله پژوهش، از نظر نوع شواهد و زاویه تحلیل تا حد امکان مکمل یکدیگر باشند. بر این مبنا، کتاب‌سنجی برای رصد ساختار و جهت حرکت دانش علمی، تحلیل ثبت اختراع برای بررسی توسعه و بلوغ فناوری، تحلیل بازیگران برای شناخت نقش و روابط ذی‌نفعان و طوفان فکری برای استخراج دانش ضمنی، ایده‌های جدید و نشانه‌های اولیه تغییر انتخاب شدند.

بنابراین، انتخاب این چهار روش به معنای برتری مطلق آن‌ها بر سایر روش‌های آینده‌پژوهی نیست. منطق انتخاب بر پوشش چهار بعد متفاوت از فضای آینده استوار است. در واقع، هر روش یک پنجره تحلیلی متفاوت ایجاد می‌کند و کنار هم قرار گرفتن آن‌ها امکان مقایسه رویکردهای مبتنی بر داده علمی، شواهد فناورانه، ساختار بازیگران و دانش خبرگی را فراهم می‌سازد. از این مرحله به بعد، برتری یا ضعف نسبی این روش‌ها نه بر اساس انتخاب اولیه، بلکه در چارچوب ارزیابی چندمعیاره پژوهش تعیین می‌شود.

جدول ۱. نگاهت نیازهای اطلاعاتی به روش‌های منتخب آینده‌پژوهی

بعد اطلاعاتی	نیاز اصلی برای شناخت آینده	روش منتخب	خروجی مورد انتظار
تحول دانش علمی	شناسایی روندهای پژوهشی، موضوعات رو به رشد و ساختار تولید دانش	کتاب‌سنجی	نقشه تحولات و جهت حرکت دانش
توسعه و بلوغ فناوری	تشخیص مسیر نوآوری و نزدیک شدن فناوری به کاربرد	تحلیل ثبت اختراع	روند توسعه و بلوغ فناوری
محیط نهادی و بازیگران	شناخت نقش، منافع و روابط ذی‌نفعان اثرگذار	تحلیل بازیگران	ساختار نفوذ، تعامل و تعارض بازیگران
ایده‌ها و نشانه‌های نوظهور	کشف موضوعات جدید و استفاده از دانش ضمنی خبرگان	طوفان فکری	ایده‌ها، مسائل و مسیرهای بالقوه آینده

۳-۵- تعریف و عملیاتی‌سازی معیارهای ارزیابی

پس از انتخاب چهار روش آینده‌پژوهی، مرحله بعد به تعریف معیارهایی اختصاص یافت که بتوانند تفاوت میان این روش‌ها را به‌صورت منظم و قابل مقایسه نشان دهند. معیارها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که فقط سهولت اجرای یک روش را نسجند، بلکه توان آن در پشتیبانی از تصمیم‌گیری مرتبط با تاب‌آوری نیز منعکس شود. بر همین اساس، هشت معیار در دو گروه اصلی شامل معیارهای فرایندی و معیارهای تاب‌آوری در نظر گرفته شدند.

گروه نخست، شرایط اجرای روش را پوشش می‌دهد و شامل دسترسی به اطلاعات، کارایی و پذیرش، هزینه اجرا و زمان اجراست. این معیارها نشان می‌دهند هر روش تا چه اندازه از نظر دسترسی به داده، امکان استفاده عملی، منابع مورد نیاز و سرعت دستیابی به نتیجه برای تصمیم‌گیر مناسب است. گروه دوم بر ظرفیت روش در پشتیبانی از تصمیم‌های تاب‌آور تمرکز دارد و چهار مؤلفه استحکام، افزونگی، سازگاری‌پذیری و سرعت بازیابی را شامل می‌شود. نکته مهم آن است که مؤلفه‌های تاب‌آوری در این پژوهش برای اندازه‌گیری مستقیم تاب‌آوری یک ساختمان یا زیرساخت به کار نمی‌روند. در اینجا، این مؤلفه‌ها بیانگر آن هستند که هر روش آینده‌پژوهی تا چه اندازه می‌تواند اطلاعات و بینشی فراهم کند که تصمیم‌گیری

درباره حفظ عملکرد، انطباق با تغییرات و بازیابی سریع تر سامانه های هوشمند لرزه ای را پشتیبانی کند. این تعریف عملیاتی باعث می شود معیارهای تابآوری با شاخص های مستقیم عملکرد لرزه ای اشتباه نشوند.

از نظر جهت ترجیح، شش معیار F1، F2 و R1 تا R4 ماهیت سودی دارند و مقدار بیشتر آن ها مطلوب تر است. در مقابل، F3 و F4 معیارهای هزینه ای هستند و مقادیر کمتر آن ها ترجیح داده می شود. این تفاوت در مرحله نرمال سازی ماتریس تصمیم و محاسبه عملکرد نسبی گزینه ها لحاظ شد.

تعریف معیارها پیش از اجرای ارزیابی در اختیار خبرگان قرار گرفت تا همه پاسخ دهندگان برداشت نسبتاً یکسانی از مفهوم هر معیار داشته باشند. این موضوع به ویژه برای مؤلفه های تابآوری اهمیت داشت، زیرا هدف از آن ها ارزیابی تابآوری خود روش آینده پژوهی نبود، بلکه سنجش توان روش در پشتیبانی از تصمیم گیری تاب آور بود. در مجموع، ساختار معیارها به گونه ای تنظیم شد که ارزیابی روش ها میان دو ملاحظه اصلی تعادل برقرار کند: از یک سو، قابلیت اجرای واقعی روش و از سوی دیگر، توان آن در پشتیبانی از تصمیم های پایدارتر و سازگارتر در حوزه سامانه های هوشمند لرزه ای.

جدول ۲. معیارهای مورد استفاده در ارزیابی روش های آینده پژوهی

کد	معیار	تعریف عملیاتی	نوع معیار
F1	دسترسی به اطلاعات	میزان سهولت دستیابی به داده ها، اسناد و اطلاعات لازم برای اجرای روش	سود
F2	کارایی و پذیرش	میزان قابلیت استفاده از خروجی روش و پذیرش آن توسط خبرگان و تصمیم گیران	سود
F3	هزینه اجرا	منابع مالی و اجرایی مورد نیاز برای گردآوری داده، اجرای روش و تحلیل نتایج	هزینه
F4	زمان اجرا	مدت زمان مورد نیاز برای اجرای کامل روش و دستیابی به خروجی قابل استفاده	هزینه
R1	استحکام	توان روش در فراهم کردن اطلاعات و نتایجی که در برابر تغییر شرایط از ثبات مناسبی برخوردار باشند	سود
R2	افزونگی	توان روش در استفاده از منابع یا مسیرهای اطلاعاتی مکمل و کاهش وابستگی به یک منبع واحد	سود
R3	سازگاری پذیری	قابلیت روش در انطباق با اطلاعات جدید، تغییر شرایط و تغییر نیازهای تصمیم گیری	سود
R4	سرعت بازیابی	توان روش در فراهم کردن اطلاعات لازم برای واکنش و بازتنظیم سریع تصمیم پس از بروز اختلال	سود

۳-۶- وزن دهی معیارها با روش خاکستری-فازی سوآرا

پس از تعریف معیارهای ارزیابی، اهمیت نسبی آن ها با استفاده از روش خاکستری-فازی سوآرا تعیین شد. روش سوآرا بر این منطق استوار است که خبرگان ابتدا معیارها را بر اساس اهمیت ادراک شده مرتب می کنند و سپس اهمیت هر معیار را نسبت به معیار بلافاصله قبل از آن می سنجند. به این ترتیب، برخلاف روش هایی که به مقایسه های زوجی گسترده نیاز دارند، فرایند وزن دهی با تعداد کمتری قضاوت انجام می شود و امکان دنبال کردن منطق ترجیحات خبرگان نیز فراهم است (کرشولینه و همکاران، ۲۰۱۰).

از آنجا که ارزیابی معیارهایی مانند سازگاری پذیری، استحکام یا کارایی همواره با مرزهای دقیق عددی قابل بیان نیست، قضاوت خبرگان ابتدا در قالب عبارات کیفی دریافت شد. منطق فازی برای بازنمایی ابهام موجود در این عبارات و نظریه خاکستری برای حفظ دامنه عدم قطعیت ناشی از اطلاعات ناقص مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب این دو رویکرد اجازه می دهد ترجیحات خبرگان پیش از تبدیل شدن به وزن های نهایی، به صورت یک مقدار کاملاً قطعی ساده سازی نشوند؛ رویکردی که با توسعه های خاکستری روش سوآرا در تصمیم گیری گروهی نیز سازگار است (زاده، ۱۹۶۵؛ دنگ، ۱۹۸۲؛ استاونیکچ و همکاران، ۲۰۲۱).

در گام نخست، ارزیابی های ۱۲ خبره تجمیع و معیارها بر اساس اهمیت گروهی آن ها از بیشترین به کمترین مرتب شدند. سپس، از معیار دوم به بعد، اهمیت نسبی هر معیار نسبت به معیار قبلی تعیین شد. اگر S_j بیانگر اهمیت مقایسه ای معیار j نسبت به معیار $j-1$ باشد، ضریب تعدیل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k_1 = 1 ; \quad k_j = 1 + s_j , \quad j = 2, \dots, n \quad (1)$$

در ادامه، اهمیت بازتنظیم‌شده هر معیار به‌صورت بازگشتی محاسبه شد:

$$q_1 = 1 ; \quad q_j = \frac{q_{j-1}}{k_j} , \quad j = 2, \dots, n \quad (2)$$

که در آن q_j وزن بازتنظیم‌شده معیار j پیش از نرمال‌سازی است. در نهایت، وزن نهایی هر معیار از طریق نرمال‌سازی مقادیر q_j به دست آمد:

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3)$$

به‌طوری‌که:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (4)$$

در این روابط، n تعداد معیارها و w_j وزن نهایی معیار j است. بنابراین، وزن‌های حاصل مستقیماً میزان سهم نسبی هر معیار را در مرحله رتبه‌بندی گزینه‌ها نشان می‌دهند. برای حفظ عدم‌قطعیت قضاوت‌های گروهی، مقادیر زبانی پیش از اجرای روابط اصلی سوآرا در قالب مقادیر فازی-خاکستری تجمیع شدند و تنها در مرحله محاسبه وزن نهایی به مقادیر قابل استفاده در مدل تصمیم تبدیل شدند. به این ترتیب، اختلاف دیدگاه خبرگان در همان ابتدای فرایند حذف نشد و بخشی از دامنه عدم‌قطعیت آن‌ها در فرایند وزن‌دهی باقی ماند. استفاده از اعداد خاکستری در توسعه سوآرا نیز با همین هدف، یعنی وزن‌دهی معیارها در شرایطی که اطلاعات به‌طور کامل مشخص نیست، پیشنهاد شده است (استانویکیچ و همکاران، ۲۰۲۱؛ رحمان و همکاران، ۲۰۲۱). وزن‌های نهایی حاصل از این مرحله در مرحله بعد به‌عنوان ورودی مدل رتبه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند. با این حال، از آنجا که اهمیت معیارها می‌تواند با تغییر شرایط تصمیم تغییر کند، وزن‌های پایه به‌عنوان مقادیر ثابت و قطعی برای تمام شرایط فرض نشدند؛ بلکه در بخش بعد، رفتار آن‌ها تحت سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۷- طراحی سناریوهای تصمیم‌گیری

برای بررسی حساسیت ساختار تصمیم نسبت به تغییر شرایط، سه سناریوی تصمیم‌گیری شامل سناریوی پایه، سناریوی حمایتی و سناریوی محدودیت منابع تعریف شد. هدف از این سناریوها پیش‌بینی آینده نبود، بلکه ایجاد مجموعه‌ای از شرایط کنترل‌شده برای آزمون رفتار مدل در برابر تغییر اولویت‌های تصمیم‌گیری بود.

جدول ۳. ضرایب تعدیل سناریومحور اوزان معیارها در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری

معیار	S_0	S_+	S_-
F1 دسترسی به اطلاعات	1.00	1.20	0.80
F2 کارایی و پذیرش	1.00	1.20	0.80
F3 هزینه اجرا	1.00	0.80	1.20
F4 زمان اجرا	1.00	0.80	1.20
R1 استحکام	1.00	1.00	1.00
R2 افزونگی	1.00	1.00	1.00

1.00	1.00	1.00	R3 سازگاری پذیری
1.00	1.00	1.00	R4 سرعت بازیابی

در سناریوی پایه (S0)، وزن‌های حاصل از روش خاکستری-فازی سوآرا بدون تغییر وارد مدل شدند. این سناریو به‌عنوان وضعیت مرجع در نظر گرفته شد و مبنای مقایسه با دو سناریوی دیگر قرار گرفت. در سناریوی حمایتی (S+) فرض شد شرایط دسترسی به اطلاعات و پذیرش اجرایی مساعدتر است و فشار ناشی از محدودیت هزینه و زمان کاهش می‌یابد. بر این اساس، ضرایب تعدیل معیارهای دسترسی به اطلاعات و کارایی و پذیرش افزایش و ضرایب معیارهای هزینه و زمان اجرا کاهش داده شدند. در مقابل، سناریوی محدودیت منابع (S-) شرایطی را بازنمایی می‌کند که در آن محدودیت‌های مالی و زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند و دسترسی به اطلاعات و ظرفیت اجرایی با محدودیت بیشتری روبه‌رو است. در این وضعیت، ضرایب معیارهای هزینه و زمان افزایش و ضرایب معیارهای دسترسی به اطلاعات و کارایی و پذیرش کاهش داده شدند. برای اعمال تغییرات سناریویی، وزن پایه هر معیار در ضریب متناظر سناریو ضرب شد:

$$\tilde{w}_j^S = w_j^0 \times m_j^S \quad (5)$$

سپس وزن‌های تعدیل‌شده مجدداً نرمال شدند:

$$w_j^S = \frac{\tilde{w}_j^S}{\sum_{i=1}^n \tilde{w}_i^S} \quad (6)$$

به‌طوری‌که:

$$\sum_{j=1}^n w_j^S = 1 \quad (7)$$

که در آن w_j^0 وزن پایه معیار j ، m_j^S ضریب تعدیل سناریویی و $w_j^{(S)}$ وزن نهایی معیار در سناریوی S است.

ضرایب $\pm 20\%$ در این پژوهش به‌عنوان یک آزمون تنش متقارن تعریف شدند و صرفاً برای ایجاد تغییر کنترل‌شده در اولویت معیارها به کار رفتند. این ضرایب بیانگر احتمال وقوع سناریوها یا پیش‌بینی کمی از آینده نیستند.

۳-۸- رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش خاکستری-فازی ویکور

پس از تعیین وزن معیارها و تنظیم آن‌ها در سناریوهای مختلف، رتبه‌بندی چهار روش آینده‌پژوهی با استفاده از روش خاکستری-فازی ویکور انجام شد. ویکور برای مسائلی مناسب است که چند معیار با جهت ترجیح متفاوت وجود دارد و هدف، شناسایی گزینه‌ای است که بتواند نوعی مصالحه میان عملکرد کلی و نامطلوب‌ترین وضعیت هر گزینه ایجاد کند. در این روش، بهترین گزینه الزاماً گزینه‌ای نیست که در تمام معیارها بیشترین عملکرد را داشته باشد، بلکه گزینه‌ای است که در مجموع فاصله کمتری از وضعیت مطلوب داشته و در عین حال از ضعف شدید در یک معیار خاص نیز برخوردار نباشد (اپریکوویچ و تزنگ، ۲۰۰۴). در نخستین گام، ارزیابی‌های تجمیع‌شده خبرگان برای هر گزینه در برابر هر معیار در قالب ماتریس تصمیم وارد مدل شدند:

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (8)$$

که در آن x_{ij} بیانگر ارزیابی گزینه i نسبت به معیار j ، m تعداد گزینه‌ها و n تعداد معیارهاست. برای حفظ منطق ترجیحات، جهت معیارها نیز در محاسبات در نظر گرفته شد؛ به‌گونه‌ای که معیارهای F1، F2 و R1 تا R4 ماهیت سودی و معیارهای F3 و F4 ماهیت هزینه‌ای داشتند. برای هر معیار، بهترین و بدترین مقدار مرجع تعیین شد. در معیارهای سود:

$$f_j^* = \max_i(x_{ij}) \quad (9)$$

$$f_j^- = \min_i(x_{ij}) \quad (10)$$

و برای معیارهای هزینه‌ای:

$$f_j^* = \min_i(x_{ij}) \quad (11)$$

$$f_j^- = \max_i(x_{ij}) \quad (12)$$

که در آن f_j^* بهترین مقدار قابل مشاهده و f_j^- نامطلوب ترین مقدار معیار j است.
در ادامه، فاصله نرمال شده هر گزینه از وضعیت مطلوب محاسبه شد. برای معیارهای سودی، این فاصله به صورت زیر تعریف شد:

$$d_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (13)$$

و برای معیارهای هزینه ای:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - f_j^*}{f_j^- - f_j^*} \quad (14)$$

با این تبدیل، مقدار کمتر d_{ij} نشان دهنده نزدیکی بیشتر گزینه به وضعیت مطلوب است.
سپس دو شاخص اصلی ویکور برای هر گزینه محاسبه شد. شاخص نخست، یعنی مطلوبیت گروهی، فاصله وزنی کلی گزینه از وضعیت مطلوب را نشان می دهد:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j^{(s)} d_{ij} \quad (15)$$

در مقابل، شاخص پشیمانی فردی بیشترین فاصله وزنی گزینه در میان معیارها را نشان می دهد:

$$R_i = \max_j [w_j^{(s)} d_{ij}] \quad (16)$$

به این ترتیب، S_i عملکرد کلی گزینه را منعکس می کند، در حالی که R_i حساسیت گزینه به ضعیف ترین عملکرد آن را در میان معیارها نشان می دهد.

در گام بعد، شاخص نهایی ویکور برای هر گزینه محاسبه شد:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (17)$$

که در آن:

$$S^* = \min_i(S_i), S^- = \max_i(S_i) \quad (18)$$

$$R^* = \min_i(R_i), R^- = \max_i(R_i) \quad (19)$$

پارامتر v میزان تأکید بر مطلوبیت کلی گروه را نشان می دهد، در حالی که $1-v$ سهم پشیمانی فردی را در تصمیم مشخص می کند. در تحلیل پایه، مقدار $v=0.5$ در نظر گرفته شد تا میان این دو دیدگاه توازن برقرار باشد. رفتار رتبه بندی در برابر تغییر این پارامتر نیز در بخش تحلیل حساسیت به طور جداگانه بررسی شد.

در نهایت، گزینه ها بر اساس مقدار Q_i مرتب شدند؛ به طوری که مقدار کمتر نشان دهنده نزدیکی بیشتر به راه حل مصالحه ای است. با این حال، انتخاب گزینه نهایی تنها بر اساس کمترین مقدار Q_i انجام نشد و شرایط پذیرش راه حل مصالحه نیز در مرحله بعد مورد بررسی قرار گرفت. این تفکیک اهمیت دارد، زیرا ممکن است گزینه ای رتبه نخست را کسب کند، اما فاصله آن با گزینه بعدی برای معرفی یک راه حل منفرد کافی نباشد. این بخش فقط روش محاسبه رتبه ها را توضیح می دهد و هیچ مقدار S_i ، R_i یا Q_i یا رتبه واقعی گزینه ها در آن گزارش نمی شود؛ همه این موارد در بخش نتایج ارائه خواهند شد.

۳-۹- شروط پذیرش در روش ویکور

رتبه بندی گزینه ها بر اساس مقدار Q_i به تنهایی برای معرفی یک گزینه به عنوان راه حل نهایی کافی نیست. در روش ویکور، گزینه ای که کمترین مقدار Q را به دست می آورد زمانی می تواند به عنوان یک راه حل مصالحه ای قابل اتکا معرفی شود که دو شرط تکمیلی نیز برقرار باشند. این شروط از انتخاب گزینه ای جلوگیری می کنند که اگرچه در رتبه نخست قرار گرفته، فاصله معناداری با گزینه بعدی ندارد یا برتری آن تنها حاصل

یکی از مؤلفه‌های مدل است (اپریکوویچ و تزنگ، ۲۰۰۴). ابتدا گزینه‌ها بر اساس مقدار Q_i به صورت صعودی مرتب می‌شوند. اگر $A^{(1)}$ گزینه دارای کمترین مقدار Q و $A^{(2)}$ گزینه دوم باشد، شرط نخست، مزیت قابل قبول است:

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ \quad (20)$$

که در آن آستانه مزیت قابل قبول از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$DQ = \frac{1}{m-1} \quad (21)$$

در این رابطه، m تعداد گزینه‌های تصمیم است. از آنجا که در پژوهش حاضر چهار روش آینده‌پژوهی مقایسه می‌شوند، مقدار این آستانه بر مبنای تعداد گزینه‌ها تعیین می‌شود. این شرط بررسی می‌کند که فاصله میان گزینه نخست و دوم به اندازه‌ای باشد که معرفی یک گزینه منفرد از نظر روش ویکور قابل توجیه باشد.

شرط دوم، پایداری قابل قبول در تصمیم است. بر اساس این شرط، گزینه $A^{(1)}$ باید علاوه بر کسب رتبه نخست بر اساس Q ، در حداقل یکی از دو شاخص S یا R نیز جایگاه نخست را داشته باشد. به بیان دیگر:

$$A^{(1)} = \arg \min S_i \quad (22)$$

یا

$$A^{(1)} = \arg \min R_i \quad (23)$$

این شرط از آن جهت اهمیت دارد که شاخص Q ترکیبی از مطلوبیت کلی و بیشترین پشیمانی است. بنابراین، گزینه نخست زمانی از پایداری بیشتری برخوردار است که برتری آن دست کم در یکی از این دو مؤلفه اصلی نیز مشاهده شود.

اگر هر دو شرط برقرار باشند، گزینه دارای کمترین مقدار Q به عنوان راه حل مصلحه‌ای منفرد در نظر گرفته می‌شود. در مقابل، اگر شرط مزیت قابل قبول برقرار نباشد، فاصله گزینه‌های برتر برای انتخاب یک گزینه واحد کافی تلقی نمی‌شود و مجموعه‌ای از گزینه‌های نزدیک به یکدیگر به عنوان راه حل‌های مصلحه‌ای گزارش می‌شوند. این مجموعه تا گزینه $A^{(M)}$ گسترش می‌یابد که رابطه زیر را ارضا کند:

$$Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ \quad (24)$$

اگر شرط پایداری قابل قبول برقرار نباشد، دو گزینه نخست $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ به صورت هم‌زمان در مجموعه مصلحه قرار می‌گیرند. به این ترتیب، در پژوهش حاضر میان رتبه نخست و پذیرش گزینه نخست به عنوان یک راه حل منفرد تفاوت قائل شده‌ایم. ممکن است یک روش آینده‌پژوهی در یک سناریو کمترین مقدار Q را داشته باشد، اما فاصله آن با گزینه بعدی برای معرفی آن به عنوان تنها انتخاب قابل دفاع کافی نباشد. این تفکیک، امکان تفسیر واقع‌بینانه‌تر نتایج را در شرایطی فراهم می‌کند که چند گزینه عملکرد نزدیک به یکدیگر دارند.

۳-۱- تحلیل حساسیت

برای بررسی میزان وابستگی نتایج به مفروضات مدل، تحلیل حساسیت در دو سطح انجام شد. هدف این مرحله آن بود که مشخص شود رتبه‌بندی گزینه‌ها تا چه اندازه در برابر تغییر دیدگاه تصمیم‌گیر و تغییر وزن معیارها پایدار می‌ماند. بنابراین، تحلیل حساسیت به عنوان بخشی از ارزیابی استحکام مدل در نظر گرفته شد و نه ابزاری برای تولید یک رتبه‌بندی جدید. در سطح نخست، حساسیت نتایج نسبت به پارامتر راهبردی v در روش ویکور بررسی شد. این پارامتر تعادل میان مطلوبیت کلی گروه و بیشترین پشیمانی فردی را کنترل می‌کند. در تحلیل پایه مقدار $v=0.5$ در نظر گرفته شد؛ با این حال، برای جلوگیری از وابستگی نتیجه به یک مقدار منفرد، v در کل دامنه صفر تا یک و با گام‌های ۰.۰۱ تغییر داده شد:

$$v \in \{0, 0.01, 0.02, \dots, 0.99, 1\} \quad (25)$$

برای هر مقدار v ، شاخص Q_i مجدداً محاسبه شد:

$$Q_i(v) = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (26)$$

این تحلیل برای هر سه سناریوی تصمیم‌گیری به صورت جداگانه انجام شد تا مشخص شود تغییر نگرش تصمیم‌گیر از تأکید بیشتر بر عملکرد کلی به تأکید بیشتر بر نامطلوب‌ترین عملکرد، چه اثری بر ساختار رتبه‌بندی و شرایط راه حل مصلحه دارد.

در سطح دوم، حساسیت نتایج نسبت به وزن معیارها بررسی شد. از آنجا که وزن‌ها از قضاوت خبرگان به دست آمده‌اند، در نظر گرفتن آن‌ها به عنوان مقادیر کاملاً ثابت می‌تواند تصویری بیش از حد قطعی از تصمیم ایجاد کند. به همین دلیل، سه دامنه تغییر شامل ± 10 ، ± 20 و ± 30 درصد برای وزن‌ها در نظر گرفته شد. برای هر معیار، وزن پایه با یک ضریب تغییر تصادفی تعدیل شد:

$$w_j = w_j(1 + \varepsilon_j) \quad (27)$$

که در آن:

$$\varepsilon_j \sim U(-\delta, \delta) \quad (28)$$

و مقدار δ بسته به سطح تحلیل برابر با ۰.۱۰، ۰.۲۰ یا ۰.۳۰ در نظر گرفته شد. پس از اعمال تغییرات، وزن‌ها دوباره نرمال شدند:

$$w'_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (29)$$

به طوری که:

$$\sum_{j=1}^n w'_j = 1 \quad (30)$$

در هر سطح حساسیت، تغییر وزن معیارها به صورت هم‌زمان انجام شد؛ بنابراین تحلیل تنها اثر تغییر یک معیار منفرد را بررسی نمی‌کند، بلکه تغییرات احتمالی در ساختار کلی ترجیحات را نیز در نظر می‌گیرد. پس از هر تغییر، شاخص‌های S_i ، R_i و Q_i دوباره محاسبه و ترتیب گزینه‌ها و شروط راه حل مصلحه مجدداً ارزیابی شدند.

برای هر یک از سه دامنه تغییر وزن، ۱۰۰،۰۰۰ تکرار انجام شد. در هر تکرار، مجموعه جدیدی از وزن‌ها ایجاد و نرمال شد و مدل ویکور از ابتدا اجرا گردید. در این مرحله ماتریس عملکرد گزینه‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر تغییر وزن معیارها به صورت مستقل قابل بررسی باشد. عدم قطعیت هم‌زمان وزن‌ها و مقادیر ماتریس تصمیم در مرحله بعد و در قالب شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی می‌شود. در نتیجه، تحلیل حساسیت این پژوهش دو منبع متفاوت از وابستگی مدل را بررسی می‌کند: نخست، تغییر نگرش تصمیم‌گیر از طریق پارامتر V ، و دوم، تغییر ساختار ترجیحات از طریق وزن معیارها. نتایج این تحلیل‌ها در بخش یافته‌ها گزارش می‌شوند و در این بخش صرفاً نحوه اجرای آن‌ها تشریح شده است.

۳-۱۱- شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل پذیرش رتبه

پس از تحلیل حساسیت، برای بررسی عدم قطعیت هم‌زمان ورودی‌های مدل از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. تفاوت این مرحله با تحلیل حساسیت بخش قبل در آن است که در تحلیل حساسیت، اثر تغییر وزن معیارها در حالی بررسی شد که ماتریس عملکرد گزینه‌ها ثابت بود؛ اما در شبیه‌سازی مونت کارلو، هم وزن معیارها و هم مقادیر ماتریس تصمیم به طور هم‌زمان تغییر داده شدند. این کار امکان می‌دهد رفتار رتبه‌بندی در شرایطی نزدیک‌تر به عدم قطعیت واقعی قضاوت‌های خبرگان بررسی شود.

در هر تکرار، وزن‌های مربوط به سناریوی مورد بررسی با یک اغتشاش تصادفی حول مقدار پایه تغییر داده شدند. برای این منظور، ضریب تغییر وزن‌ها از توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار ۰.۱۰ نمونه‌گیری شد:

$$w_{j,adj}^t = w_j^s(1 + \eta_j^t) \quad (31)$$

که در آن:

$$\eta_j^t \sim N(0, 0.10^2) \quad (32)$$

مقادیر منفی احتمالی پیش از نرمال‌سازی حذف شدند و وزن‌های تولیدشده در هر تکرار مجدداً مقیاس‌بندی شدند تا مجموع آن‌ها برابر یک باقی بماند:

$$w_j^t = \frac{w_{j,adj}^t}{\sum_{j=1}^n w_{j,adj}^t} \quad (33)$$

به‌طور هم‌زمان، مقادیر ماتریس تصمیم نیز در اطراف مقادیر پایه تغییر داده شدند. برای هر درایه، یک تغییر تصادفی یکنواخت در بازه ۰.۰۵ تا ۰.۰۵ + اعمال شد:

$$x_{ij}^t = x_{ij} + \xi_{ij}^t \quad (34)$$

که در آن:

$$\xi_{ij}^t \sim U(-0.05, 0.05) \quad (35)$$

از آنجا که ماتریس تصمیم نرمال شده در بازه صفر تا یک تعریف شده بود، مقادیر حاصل پس از ایجاد تغییر تصادفی به همین دامنه محدود شدند:

$$x_{ij}^t = \min[1, \max(0, x_{ij} + \xi_{ij}^t)] \quad (36)$$

پس از تولید وزن‌ها و ماتریس تصمیم جدید، مراحل روش ویکور در هر تکرار از ابتدا اجرا شد و مقادیر Q_i و R_i همچنین ترتیب رتبه گزینه‌ها مجدداً محاسبه شدند. مقدار پارامتر راهبردی در این مرحله برابر $v=0.5$ ثابت نگه داشته شد تا عدم قطعیت حاصل از وزن‌ها و عملکرد گزینه‌ها مستقل از تغییر این پارامتر بررسی شود.

شبیه‌سازی برای هر یک از سه سناریوی تصمیم‌گیری با ۱۰۰,۰۰۰ تکرار انجام شد. به‌جای اتکا به یک رتبه قطعی، فراوانی قرار گرفتن هر گزینه در رتبه‌های مختلف ثبت شد. بر این اساس، احتمال تجربی قرار گرفتن گزینه i در رتبه r از رابطه زیر محاسبه شد:

$$b_i^r = \frac{N_i^r}{N} \quad (37)$$

که در آن N_i^r تعداد دفعاتی است که گزینه i در رتبه r قرار گرفته و N تعداد کل تکرارهای شبیه‌سازی است. به این ترتیب، مقدار b_i^r نشان می‌دهد یک گزینه در چه سهمی از شرایط شبیه‌سازی شده رتبه نخست را به دست آورده است.

علاوه بر پذیرش رتبه، در هر تکرار شروط راه‌حل مصالحه ویکور نیز دوباره بررسی شد. به این ترتیب، امکان برآورد احتمال تجربی تحقق شرط مزیت قابل قبول فراهم شد:

$$P_{AA} = \frac{N_{AA}}{N} \quad (38)$$

که در آن N_{AA} تعداد تکرارهایی است که شرط مزیت قابل قبول برقرار بوده است.

برای نمایش دامنه عدم قطعیت شاخص‌های حاصل نیز صدک‌های تجربی ۲.۵ و ۹۷.۵ درصد توزیع شبیه‌سازی به‌عنوان بازه عدم قطعیت ۹۵ درصدی گزارش شدند. این بازه به‌عنوان فاصله اطمینان پارامتریک تفسیر نمی‌شود، بلکه دامنه‌ای تجربی از خروجی مدل تحت تغییرات تعریف‌شده ورودی‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش، شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بازسازی توزیع واقعی قضاوت تک‌تک خبرگان به کار نرفته است؛ بلکه عدم قطعیت پیرامون ورودی‌های تجمیع‌شده مدل را بررسی می‌کند. بنابراین، نتایج این مرحله بیانگر میزان استحکام رتبه‌بندی در برابر تغییر هم‌زمان وزن معیارها و ارزیابی گزینه‌هاست.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- نتایج وزن‌دهی معیارها

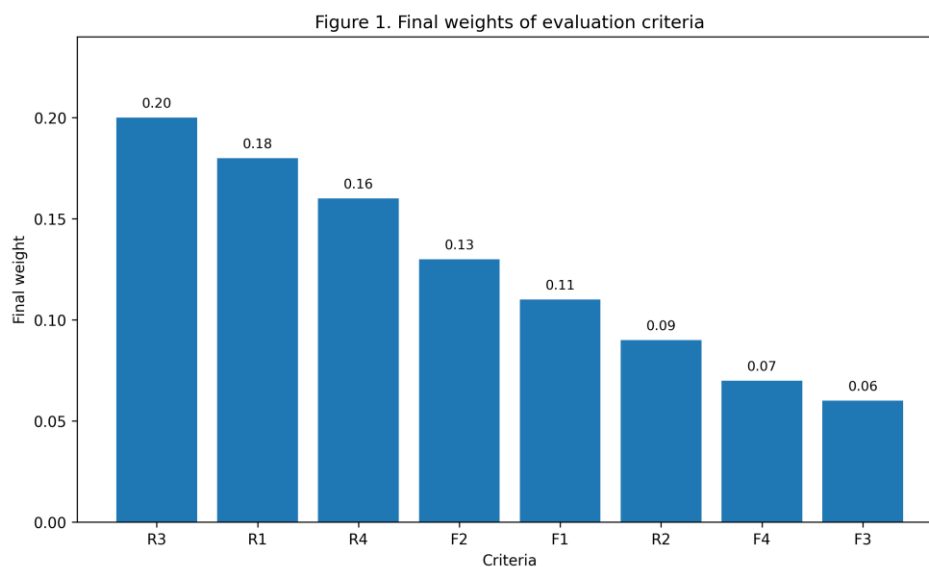
نتایج حاصل از اجرای روش خاکستری-فازی سوآرا نشان داد که همه معیارهای ارزیابی از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند و الگوی وزن‌دهی، ترجیح خبرگان به معیارهای مرتبط با تاب‌آوری را به‌خوبی آشکار می‌کند. در میان هشت معیار بررسی‌شده، سازگاری‌پذیری (R3) با وزن ۰.۲۰ بالاترین جایگاه را به دست آورد. پس از آن، استحکام (R1) با وزن ۰.۱۸ و سرعت بازیابی (R4) با وزن ۰.۱۶ قرار گرفتند. این آرایش نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، یک روش آینده‌پژوهی زمانی ارزش بیشتری دارد که بتواند در برابر تغییر شرایط پایدار بماند، خود را با اطلاعات و نیازهای جدید تطبیق دهد و از تصمیم‌گیری مؤثر در شرایط اختلال پشتیبانی کند.

جدول ۵. وزن‌های نهایی و اولویت‌بندی معیارهای ارزیابی حاصل از روش فازی-خاکستری سوآرا

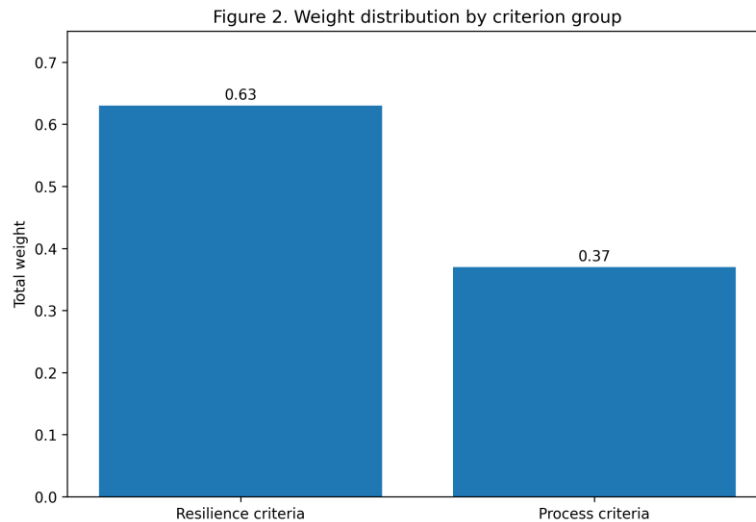
رتبه	وزن نهایی	معیار	کد
1	0.20	سازگاری‌پذیری	R3

2	0.18	استحکام	R1
3	0.16	سرعت بازیابی	R4
4	0.13	کارایی و پذیرش	F2
5	0.11	دسترسی به اطلاعات	F1
6	0.09	افزونگی	R2
7	0.07	زمان اجرا	F4
8	0.06	هزینه اجرا	F3

در سطح بعدی، کارایی و پذیرش (F2) با وزن ۰.۱۳ و دسترسی به اطلاعات (F1) با وزن ۰.۱۱ قرار گرفتند. جایگاه این دو معیار نشان می دهد که ملاحظات اجرایی و قابلیت استفاده عملی همچنان در تصمیم نقش دارند، اما اهمیت آن ها کمتر از معیارهایی است که مستقیماً با توان روش در پشتیبانی از تصمیم گیری تاب آور ارتباط دارند. به بیان دیگر، خبرگان صرفاً به این توجه نداشته اند که کدام روش آسان تر یا سریع تر قابل اجراست، بلکه بیشتر به این موضوع اهمیت داده اند که خروجی روش تا چه اندازه در شرایط متغیر قابل اتکا باقی می ماند.



شکل ۱. وزن نهایی معیارهای ارزیابی



شکل ۲. توزیع وزن معیارها در دو گروه فرایندی و تاب‌آوری

۴-۲- نتایج رتبه‌بندی سناریویی روش‌های آینده‌پژوهی

نتایج ویکور نشان داد که ترتیب کلی گزینه‌ها در هر سه سناریوی تصمیم‌گیری ثابت باقی ماند، اما فاصله میان گزینه‌های برتر در سناریوهای مختلف یکسان نبود. در هر سه وضعیت، کتاب‌سنجی (A3) کمترین مقدار Q را به دست آورد و در رتبه نخست قرار گرفت. تحلیل ثبت اختراع (A4)، تحلیل بازیگران (A1) و طوفان فکری (A2) نیز به ترتیب رتبه‌های دوم تا چهارم را به خود اختصاص دادند.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های ویکور و رتبه گزینه‌ها در سه سناریوی تصمیم‌گیری

سناریو	گزینه	S_i	R_i	Q_i	رتبه
پایه S_0	کتاب‌سنجی - A3	0.2907	0.0900	0.0000	1
	تحلیل ثبت اختراع - A4	0.4531	0.1300	0.3360	2
	تحلیل بازیگران - A1	0.6142	0.1600	0.6254	3
	طوفان فکری - A2	0.8174	0.2000	1.0000	4
حمایتی S_+	کتاب‌سنجی - A3	0.2807	0.0916	0.0000	1
	تحلیل ثبت اختراع - A4	0.4518	0.1526	0.4457	2
	تحلیل بازیگران - A1	0.5927	0.1566	0.5903	3
	طوفان فکری - A2	0.8417	0.1957	1.0000	4
محدودیت منابع S_-	کتاب‌سنجی - A3	0.3011	0.0920	0.0000	1
	تحلیل ثبت اختراع - A4	0.4545	0.1063	0.2199	2
	تحلیل بازیگران - A1	0.6366	0.1636	0.6600	3
	طوفان فکری - A2	0.7920	0.2045	1.0000	4

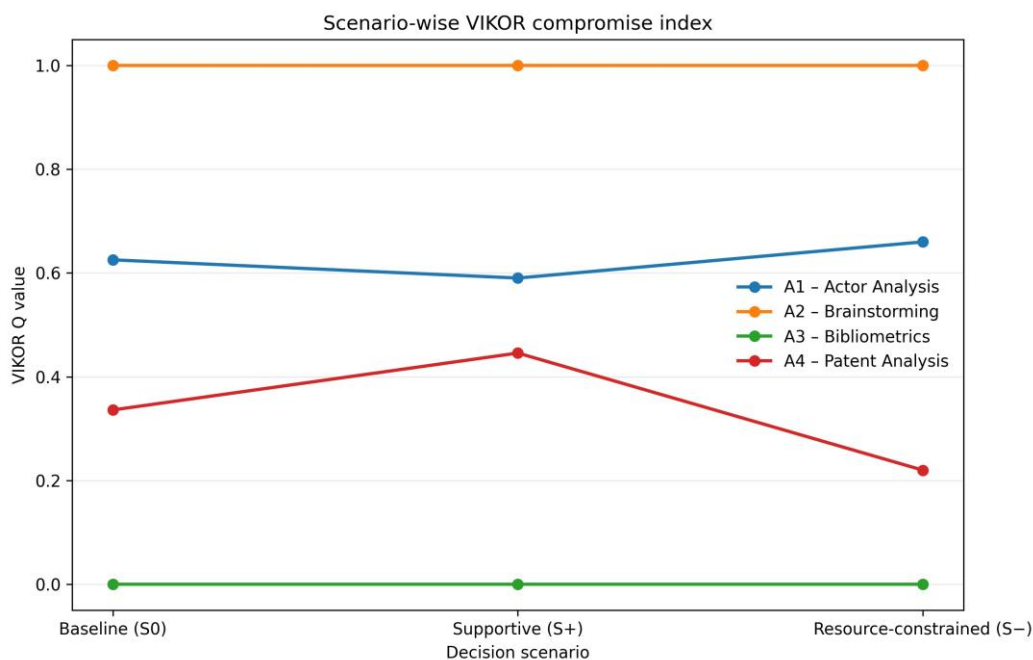
در سناریوی پایه، مقدار Q برای کتاب‌سنجی صفر و برای تحلیل ثبت اختراع حدود ۰.۳۳۶ به دست آمد. این فاصله نشان می‌دهد که کتاب‌سنجی در شرایط مرجع برتری مشخصی دارد، هرچند تحلیل ثبت اختراع نیز نسبت به دو گزینه دیگر فاصله قابل توجهی ایجاد کرده است.

در سناریوی حمایتی نیز رتبه‌ها تغییر نکردند، اما فاصله میان دو گزینه نخست افزایش یافت؛ به‌طوری‌که مقدار Q تحلیل ثبت اختراع به حدود ۰.۴۴۶ رسید. این وضعیت نشان می‌دهد که در شرایطی که دسترسی به اطلاعات و پذیرش اجرایی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، موقعیت کتاب‌سنجی نسبت به گزینه دوم تقویت می‌شود.

در مقابل، در سناریوی محدودیت منابع، فاصله دو گزینه نخست کاهش یافت و مقدار Q تحلیل ثبت اختراع به حدود ۰.۲۲۰ رسید. بنابراین، هرچند کتاب‌سنجی همچنان رتبه نخست را حفظ کرد، قدرت برتری آن نسبت به تحلیل ثبت اختراع کاهش یافت. این تفاوت اهمیت تمایز میان ثبات رتبه و قدرت برتری را نشان می‌دهد؛ زیرا یک گزینه می‌تواند در همه سناریوها رتبه نخست باقی بماند، اما فاصله آن با گزینه دوم تحت شرایط مختلف تغییر کند.

بررسی شروط ویکور نیز همین تفاوت را تأیید کرد. در سناریوهای پایه و حمایتی، کتاب‌سنجی به‌عنوان راه‌حل مصالحه‌ای منفرد قابل شناسایی بود؛ اما در سناریوی محدودیت منابع، فاصله میان دو گزینه نخست برای تحقق شرط مزیت قابل قبول کافی نبود. از این‌رو، در این سناریو کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع به‌صورت مشترک در مجموعه راه‌حل مصالحه قرار گرفتند.

در شکل ۳، مقدار Q چهار گزینه در سه سناریو مقایسه شده است. ساختار نمودار نشان می‌دهد که کتاب‌سنجی در همه شرایط کمترین مقدار را حفظ کرده است، در حالی که فاصله تحلیل ثبت اختراع با گزینه نخست بیش از سایر گزینه‌ها تحت تأثیر تغییر سناریو قرار می‌گیرد. این الگو نشان می‌دهد که تغییر شرایط تصمیم، بیشتر بر شدت برتری گزینه نخست اثر گذاشته است تا بر ترتیب کلی رتبه‌ها.



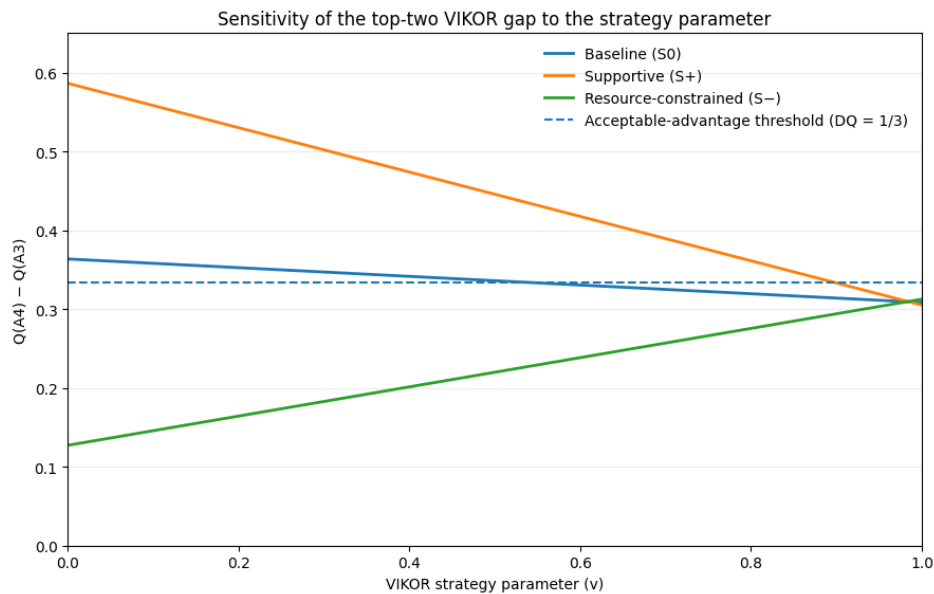
شکل ۳. تغییر شاخص مصالحه ویکور برای روش‌های آینده‌پژوهی در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری

۳-۴- نتایج تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت نشان داد که پایداری نتیجه را نمی‌توان تنها با ثابت ماندن رتبه نخست قضاوت کرد. در تمام دامنه تغییر پارامتر راهبردی V ، ترتیب کلی گزینه‌ها در هر سه سناریو بدون تغییر باقی ماند و کتاب‌سنجی ($A3$) همچنان در رتبه نخست، تحلیل ثبت اختراع ($A4$) در رتبه دوم، تحلیل بازیگران ($A1$) در رتبه سوم و طوفان فکری ($A2$) در رتبه چهارم قرار گرفتند. با این حال، فاصله میان دو گزینه برتر و در نتیجه امکان معرفی یک راه‌حل مصالحه‌ای منفرد، نسبت به مقدار V حساس بود.

در سناریوی پایه، شرط مزیت قابل قبول تا حدود $v=0.55$ برقرار ماند. به این معنا که با افزایش تأکید بر مطلوبیت گروهی، فاصله میان کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع به تدریج کاهش یافت و پس از این نقطه، فاصله دو گزینه برای معرفی کتاب‌سنجی به عنوان تنها راه حل مصالحه‌ای کافی نبود. این وضعیت نشان می‌دهد که رتبه نخست کتاب‌سنجی در سناریوی پایه پایدار است، اما قدرت برتری آن به نحوه ایجاد تعادل میان مطلوبیت کلی و پشیمانی فردی وابسته است.

در سناریوی حمایتی، وضعیت متفاوت بود. شرط مزیت قابل قبول در بخش عمده دامنه v برقرار ماند و تنها در مقادیر نزدیک به انتهای بازه، تقریباً پس از $v=0.90$ ، فاصله دو گزینه نخست از آستانه مورد نیاز کمتر شد. بنابراین، شرایط حمایتی نه تنها رتبه نخست کتاب‌سنجی را حفظ کرد، بلکه در بخش گسترده‌تری از فضای تصمیم امکان دفاع از آن به عنوان یک راه حل مصالحه‌ای منفرد را فراهم ساخت. در مقابل، در سناریوی محدودیت منابع، اگرچه کتاب‌سنجی در تمام دامنه v رتبه نخست خود را حفظ کرد، فاصله آن با تحلیل ثبت اختراع در هیچ نقطه‌ای به آستانه مزیت قابل قبول نرسید. این نتیجه اهمیت تفاوت میان ثبات رتبه و استحکام برتری را به خوبی نشان می‌دهد. در این سناریو، دانستن اینکه رتبه نخست است به تنهایی کافی نیست؛ زیرا $A4$ آن قدر به گزینه نخست نزدیک است که تصمیم‌گیر باید هر دو را در مجموعه راه حل‌های مصالحه در نظر بگیرد.



شکل ۴. حساسیت فاصله دو گزینه برتر ویکور نسبت به تغییر پارامتر راهبردی v

در شکل ۴، خط افقی نقطه چین آستانه مزیت قابل قبول $DQ=1/3$ را نشان می‌دهد. قرار گرفتن فاصله $Q(A4)-Q(A3)$ بالاتر از این خط به معنای تحقق شرط مزیت قابل قبول است. نمودار نشان می‌دهد که سناریوی حمایتی بیشترین ظرفیت را برای حفظ این شرط دارد، در حالی که سناریوی محدودیت منابع در تمام دامنه پارامتر v پایین‌تر از آستانه قرار می‌گیرد.

تحلیل تغییر وزن معیارها نیز تصویر مشابهی ارائه کرد. حتی با افزایش دامنه تغییر هم‌زمان وزن‌ها از $\pm 10\%$ به $\pm 30\%$ درصد، احتمال حفظ رتبه نخست کتاب‌سنجی بسیار بالا باقی ماند. با این حال، پایداری کامل ترتیب چهار گزینه و احتمال تحقق شرط مزیت قابل قبول نسبت به شدت تغییر وزن‌ها و نوع سناریو حساس‌تر بود.

جدول ۶. تحلیل پایداری رتبه‌بندی در سناریوهای مختلف

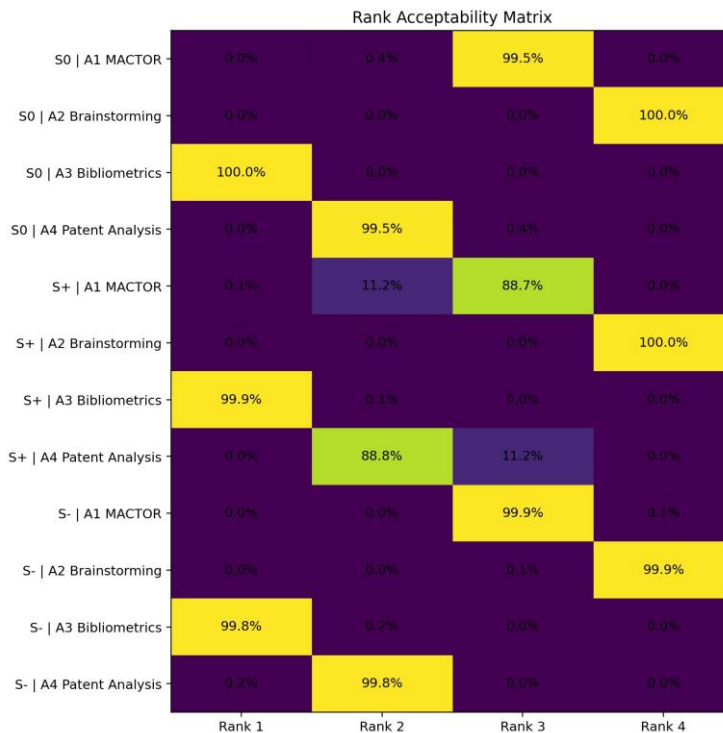
سناریو	دامنه تغییر وزن	A3 حفظ رتبه نخست (%)	حفظ کامل ترتیب رتبه‌ها (%)	(%) تحقق مزیت قابل قبول
S ₀ پایه	$\pm 10\%$	100.000	100.000	51.126
	$\pm 20\%$	100.000	99.628	47.100

43.481	95.113	99.941	±30%	S ₊ حمایتی
99.800	98.091	100.000	±10%	
84.030	84.949	100.000	±20%	
66.869	78.814	100.000	±30%	
0.003	100.000	100.000	±10%	S ₋ محدودیت منابع
5.427	99.923	99.998	±20%	
11.768	96.680	99.256	±30%	

نکته قابل توجه این است که پایداری گزینه نخست بسیار بیشتر از پایداری فاصله آن با گزینه دوم بود. حتی در شدیدترین سطح تغییر وزن ها، احتمال حفظ رتبه نخست کتاب سنجی در هر سه سناریو بیش از ۹۹ درصد باقی ماند. در مقابل، احتمال تحقق مزیت قابل قبول رفتار بسیار متفاوتی داشت. در سناریوی حمایتی این احتمال در سطح ۱۰ ± درصد تقریباً کامل بود، اما با افزایش دامنه تغییر وزن ها کاهش یافت. در سناریوی محدودیت منابع، احتمال تحقق این شرط حتی با وجود ثبات بسیار بالای رتبه نخست، همچنان پایین باقی ماند. در مجموع، تحلیل حساسیت نشان می دهد که نتیجه اصلی رتبه بندی از استحکام بالایی برخوردار است، اما میزان فاصله گزینه نخست از رقیب اصلی آن به شرایط تصمیم و ساختار وزن ها وابسته است. بنابراین، گزارش صرف رتبه ها می تواند بخشی از رفتار واقعی مدل را پنهان کند. بررسی هم زمان رتبه، فاصله گزینه ها و شروط راه حل مصالحه تصویر دقیق تری از میزان اطمینان به تصمیم فراهم می کند.

۴-۴- نتایج شبیه سازی مونت کارلو و پذیرش رتبه

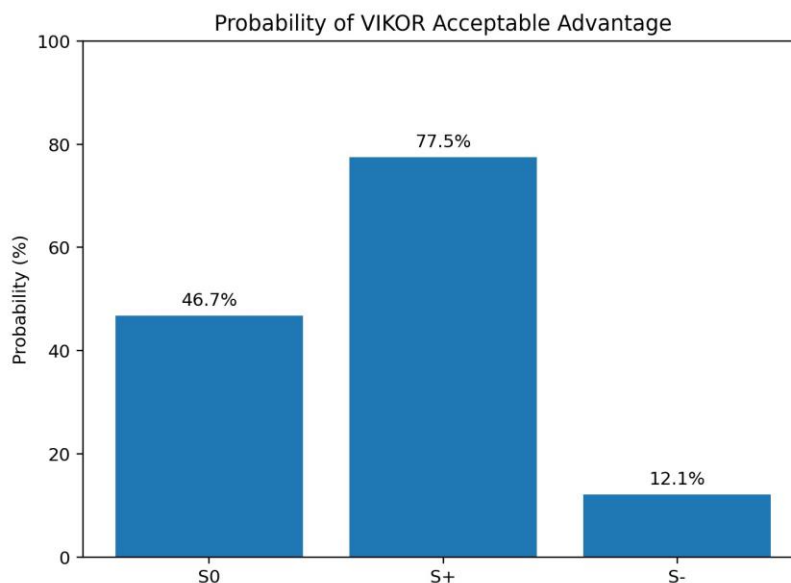
برای ارزیابی استحکام رتبه بندی در شرایطی که عدم قطعیت وزن معیارها و مقادیر ماتریس تصمیم به طور هم زمان وارد مدل می شود، همانطور که گفته شد شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰,۰۰۰ تکرار برای هر یک از سه سناریوی تصمیم گیری انجام شد. برخلاف تحلیل حساسیت بخش قبل که عمدتاً اثر تغییر پارامتر V و وزن معیارها را بررسی می کرد، در این مرحله هر دو منبع عدم قطعیت به صورت هم زمان وارد فرایند محاسبه شدند. نتایج نشان داد که کتاب سنجی (A3) در هر سه سناریو با احتمال بسیار بالایی رتبه نخست را حفظ کرده است. احتمال قرار گرفتن این گزینه در رتبه اول در سناریوی پایه ۹۹.۹۹۴ درصد، در سناریوی حمایتی ۹۹.۹۳۵ درصد و در سناریوی محدودیت منابع ۹۹.۸۰۵ درصد بود. این اعداد نشان می دهند که رتبه نخست A3 حتی در حضور تغییرات هم زمان ورودی های مدل از پایداری بسیار بالایی برخوردار است. در مقابل، رفتار رتبه دوم نسبت به شرایط تصمیم حساس تر بود. تحلیل ثبت اختراع (A4) در سناریوی پایه با احتمال حدود ۹۹.۵۵۰ درصد و در سناریوی محدودیت منابع با احتمال حدود ۹۹.۸۰۰ درصد رتبه دوم را به خود اختصاص داد. در سناریوی حمایتی، این احتمال به حدود ۸۸.۷۰۰ درصد کاهش یافت و در بخشی از تکرارها، تحلیل بازیگران (A1) به رتبه دوم منتقل شد. این جابجایی نشان می دهد که اگرچه رتبه نخست تقریباً ثابت است، مرز میان گزینه های میانی تحت برخی شرایط انعطاف پذیرتر می شود.



شکل ۵. ماتریس پذیرش رتبه گزینه‌ها در سه سناریوی تصمیم‌گیری

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع احتمال رتبه‌ها در بیشتر موارد بسیار متمرکز است. کتاب‌سنجی تقریباً در تمام تکرارها رتبه نخست را حفظ می‌کند و طوفان فکری عمدتاً در رتبه چهارم قرار می‌گیرد. بیشترین جابه‌جایی مربوط به سناریوی حمایتی است که در آن تحلیل بازیگران و تحلیل ثبت اختراع بخشی از احتمال رتبه‌های دوم و سوم را میان خود تقسیم می‌کنند. بنابراین، عدم قطعیت ورودی‌ها بیش از آنکه جایگاه گزینه نخست را تغییر دهد، بر فاصله و ترتیب گزینه‌های میانی اثر می‌گذارد. برای تکمیل این تحلیل، احتمال تحقق شرط مزیت قابل قبول ویکور نیز در هر تکرار محاسبه شد. نتایج نشان داد این احتمال در سناریوی پایه ۴۶.۷ درصد، در سناریوی حمایتی ۷۷.۵ درصد و در سناریوی محدودیت منابع تنها ۱۲.۱ درصد است.

این نتیجه از نظر تفسیری اهمیت زیادی دارد. در سناریوی حمایتی، علاوه بر پایداری بالای رتبه نخست، احتمال وجود فاصله کافی میان گزینه اول و دوم نیز نسبتاً زیاد است. در مقابل، در سناریوی محدودیت منابع، اگرچه کتاب‌سنجی تقریباً همیشه رتبه نخست را حفظ می‌کند، تنها در حدود یک‌هشتم تکرارها فاصله آن با گزینه دوم به اندازه‌ای بوده که شرط مزیت قابل قبول برقرار شود. به بیان دیگر، ثبات رتبه نخست الزاماً به معنای برتری قاطع آن نیست. نتایج توزیع شاخص Q نیز همین برداشت را تقویت می‌کند. مقدار میانگین Q برای کتاب‌سنجی در هر سه سناریو بسیار نزدیک به صفر باقی ماند، در حالی که تحلیل ثبت اختراع در موقعیت دوم قرار داشت و دامنه عدم قطعیت آن در سناریوهای مختلف تغییر کرد. این موضوع نشان می‌دهد که $A3$ از نظر موقعیت نسبی خود پایداری بالایی دارد، اما قدرت جدایی آن از $A4$ به شرایط تصمیم وابسته است. در مجموع، شبیه‌سازی مونت کارلو دو نتیجه مکمل را آشکار می‌کند. نخست، رتبه نخست کتاب‌سنجی در برابر عدم قطعیت هم‌زمان وزن‌ها و ارزیابی گزینه‌ها بسیار مقاوم است. دوم، توان معرفی آن به‌عنوان تنها راه‌حل مصالحه‌ای به سناریوی تصمیم وابسته باقی می‌ماند. بنابراین، تحلیل احتمالاتی از رتبه‌ها تصویر دقیق‌تری نسبت به یک رتبه‌بندی قطعی ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که پایداری رتبه و قدرت برتری باید به‌صورت جداگانه تفسیر شوند.



شکل ۶. احتمال تحقق شرط مزیت قابل قبول ویکور در سناریوهای مختلف

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه روش‌های منتخب آینده‌پژوهی برای سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای انجام شد؛ مسئله‌ای که در آن صرفاً شناخت یک روش برتر کافی نیست و باید مشخص شود این برتری تا چه اندازه در برابر تغییر شرایط تصمیم و عدم قطعیت پایدار می‌ماند. برای این منظور، چهار روش تحلیل بازیگران، طوفان فکری، کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع در یک چارچوب ترکیبی خاکستری-فازی سوارا-ویکور ارزیابی شدند و رفتار رتبه‌ها در سه سناریوی تصمیم‌گیری، تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شد. نتایج وزن‌دهی نشان داد که معیارهای مرتبط با تاب‌آوری نقش پررنگ‌تری در ساختار تصمیم دارند. سازگاری‌پذیری، استحکام و سرعت بازیابی سه معیار نخست بودند و در مجموع بیش از نیمی از وزن کل مدل را به خود اختصاص دادند. همچنین مجموع وزن معیارهای تاب‌آوری به ۰.۶۳ رسید، در حالی که سهم معیارهای فرایندی ۰.۳۷ بود. این الگو نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، ارزش یک روش آینده‌پژوهی فقط به سهولت اجرا، هزینه یا زمان وابسته نیست؛ بلکه توان آن برای پشتیبانی از تصمیم‌های پایدار، قابل انطباق و قابل اتکا اهمیت بیشتری دارد. در رتبه‌بندی ویکور، کتاب‌سنجی در هر سه سناریوی پایه، حمایتی و محدودیت منابع جایگاه نخست را حفظ کرد و تحلیل ثبت اختراع در رتبه دوم قرار گرفت. با این حال، فاصله میان دو گزینه برتر در همه شرایط یکسان نبود. در سناریوی حمایتی، برتری کتاب‌سنجی نسبت به گزینه دوم بیشتر شد، در حالی که در سناریوی محدودیت منابع، تحلیل ثبت اختراع به آن نزدیک‌تر شد. این رفتار نشان می‌دهد که ثبات رتبه نخست الزاماً به معنای برتری قاطع در همه شرایط نیست.

تحلیل حساسیت نیز همین نکته را تأیید کرد. تغییر پارامتر راهبردی ویکور و تغییر هم‌زمان وزن معیارها تأثیر محدودی بر جایگاه نخست داشتند، اما بر فاصله میان گزینه‌های برتر و تحقق شرط مزیت قابل قبول اثر بیشتری گذاشتند. در شدیدترین سطح تغییر وزن‌ها نیز احتمال حفظ رتبه نخست کتاب‌سنجی در هر سه سناریو بیش از ۹۹ درصد باقی ماند. بنابراین، رتبه اول از استحکام بالایی برخوردار بود، اما قدرت فاصله آن از گزینه دوم به شرایط تصمیم وابسته باقی ماند.

نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو این تفاوت را روشن‌تر کرد. احتمال قرار گرفتن کتاب‌سنجی در رتبه نخست در سناریوهای مختلف بیش از ۹۹.۸ درصد بود، اما احتمال تحقق شرط مزیت قابل قبول در سناریوی پایه حدود ۴۶.۷ درصد، در سناریوی حمایتی ۷۷.۵ درصد و در سناریوی محدودیت منابع تنها ۱۲.۱ درصد به دست آمد. این نتیجه یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش است، زیرا نشان می‌دهد در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره باید میان پایداری رتبه و قدرت برتری تفاوت قائل شد. ممکن است یک گزینه تقریباً همیشه رتبه نخست را حفظ کند، اما فاصله آن با گزینه دوم در بسیاری از شرایط برای معرفی یک راه‌حل منفرد کافی نباشد. از منظر کاربردی، کتاب‌سنجی به دلیل دسترسی گسترده به داده‌های علمی، قابلیت به‌روزرسانی و امکان رصد مستمر تحولات، می‌تواند مبنای مناسبی برای پایش آینده سامانه‌های هوشمند لرزه‌ای باشد. با این حال، تحلیل ثبت

اختراع به‌ویژه زمانی اهمیت پیدا می‌کند که تمرکز تصمیم از تولید دانش به سمت بلوغ فناوری و امکان کاربرد عملی حرکت کند. بنابراین، نتیجه این پژوهش نباید صرفاً به «برتری کتاب‌سنجی» تقلیل داده شود. در شرایطی که فاصله دو گزینه کاهش می‌یابد، استفاده مکمل از کتاب‌سنجی و تحلیل ثبت اختراع می‌تواند تصویر کامل‌تری از مسیر تحول فناوری فراهم کند. در عین حال، رتبه پایین‌تر تحلیل بازیگران و طوفان فکری به معنای کم‌ارزش بودن این روش‌ها نیست. این دو روش نوع متفاوتی از دانش را تولید می‌کنند و می‌توانند در مسائل مرتبط با رفتار ذی‌نفعان، دانش ضمنی و شناسایی موضوعات نوظهور نقش مهمی داشته باشند. جایگاه پایین‌تر آن‌ها در این پژوهش بیشتر بیانگر آن است که تحت مجموعه معیارهای حاضر و در مقایسه هم‌زمان با روش‌های داده‌محور، عملکرد کلی ضعیف‌تری داشته‌اند.

از نظر روش‌شناختی، ارزش اصلی پژوهش در این است که انتخاب روش آینده‌پژوهی را از یک رتبه‌بندی قطعی فراتر برده و آن را در شرایط متغیر و همراه با عدم قطعیت بررسی کرده است. ترکیب سناریو، تحلیل حساسیت و مونت کارلو نشان داد که گزارش یک رتبه نهایی به‌تنهایی برای تصمیم‌گیری کافی نیست و لازم است میزان پایداری رتبه و فاصله آن با گزینه‌های رقیب نیز هم‌زمان بررسی شود. با وجود این، نتایج باید با توجه به محدودیت‌های پژوهش تفسیر شوند. محاسبات بر پایه ماتریس تجمیع‌شده و وزن‌های ثبت‌شده در پژوهش انجام شده و داده‌های خام قضاوت فردی خبرگان در دسترس نبوده است. بنابراین، شبیه‌سازی مونت کارلو عدم قطعیت پیرامون ورودی‌های تجمیع‌شده را بررسی می‌کند و بازسازی توزیع واقعی دیدگاه‌های فردی خبرگان نیست. همچنین ضرایب سناریویی به‌عنوان یک آزمون تنش متقارن تعریف شده‌اند و نباید به‌عنوان پیش‌بینی احتمالاتی از شرایط آینده تفسیر شوند. در مطالعات آینده می‌توان چارچوب حاضر را با داده‌های طولی، تعداد بیشتری از روش‌های آینده‌پژوهی، گروه‌های متنوع‌تر خبرگان و اطلاعات واقعی‌تر از بلوغ فناوری توسعه داد. همچنین ترکیب هم‌زمان داده‌های انتشارات علمی، ثبت اختراع، شبکه بازیگران و داده‌های عملیاتی سامانه‌های هوشمند می‌تواند تصویر جامع‌تری از آینده فناوری‌های لرزه‌ای و ظرفیت آن‌ها برای پشتیبانی از تاب‌آوری فراهم کند.

۶- منابع

- Bitarafan, M., Amini Hosseini, K., & Hashemkhani Zolfani, S. (2023). Identification and assessment of man-made threats to cities using integrated Grey BWM–Grey MARCOS method. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(2), 581–599. doi:10.31181/dmame622023747.
- Bitarafan, M., Amini Hosseini, K., Hashemkhani Zolfani, S., & Ziari, K. (2026). Evaluating earthquake resilience in urban areas: A novel fuzzy RANCOM approach. *Environment, Development and Sustainability*, 28(1), 2483–2520. doi:10.1007/s10668-025-06393-z.
- Bitarafan, M., Hashemkhani Zolfani, S., Lale Arefi, S., Zavadskas, E. K., & Mahmoudzadeh, A. (2014). Evaluation of real-time intelligent sensors for structural health monitoring of bridges based on SWARA-WASPAS: A case in Iran. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(4), 333–340. doi:10.3846/bjrbe.2014.40.
- Bitarafan, M., Lale Arefi, S., Hashemkhani Zolfani, S., & Mahmoudzadeh, A. (2013). Selecting the best design scenario of the smart structure of bridges for probably future earthquakes. *Procedia Engineering*, 57, 193–199. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.027.
- Daim, T. U., Rueda, G., Martin, H., & Gerdri, P. (2006). Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(8), 981–1012. doi:10.1016/j.techfore.2006.04.004.
- de Groot, R. M., McBride, S. K., Vinci, M. J., Lotto, G. C., Anderson, M. L., Sumy, D. F., & Terbush, B. (2025). *ShakeAlert—Communication, education, outreach, and technical engagement strategic vision*. U.S. Geological Survey Circular 1561. doi:10.3133/cir1561.
- Deng, J. L. (1982). Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1(5), 288–294. doi:10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
- Ghaffarian, S., Shafapourtehrany, M., Lagap, U., Batur, M., Özener, H., Kılıcı, R. E., & Karaman, H. (2025). Earthquake-based multi-hazard resilience assessment: A case study of Istanbul, Turkey (neighborhood level). *npj Natural Hazards*, 2, 15. doi:10.1038/s44304-025-00065-8.
- Godet, M. (1991). Actors' moves and strategies: The MACTOR method: An air transport case study. *Futures*, 23(6), 605–622. doi:10.1016/0016-3287(91)90082-D.
- Gordon, A. V., Ramic, M., Rohrbeck, R., & Spaniol, M. J. (2020). 50 years of corporate and organizational foresight: Looking back and going forward. *Technological Forecasting and Social Change*, 154, 119966. doi:10.1016/j.techfore.2020.119966.
- Hasheminasab, H., Hashemkhani Zolfani, S., Bitarafan, M., Chatterjee, P., & Abhaji Ezabadi, A. (2019). The role of façade materials in blast-resistant buildings: An evaluation based on fuzzy Delphi and fuzzy EDAS. *Algorithms*, 12(6), 119. doi:10.3390/a12060119.
- Iden, J., Methlie, L. B., & Christensen, G. E. (2017). The nature of strategic foresight research: A systematic literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 116, 87–97. doi:10.1016/j.techfore.2016.11.002.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243–258. doi:10.3846/jbem.2010.12.
- Ko, B. K., & Yang, J. S. (2024). Developments and challenges of foresight evaluation: Review of the past 30 years of research. *Futures*, 155, 103291. doi:10.1016/j.futures.2023.103291.
- Mikaeili, O., Ranjbar Shah Koohi, S., & Bitarafan, M. (2026). Scenario-calibrated prioritization of office building materials: A SWARA–SMART multi-criteria framework. *Journal of Safe City*. doi:10.22034/ispdrc.2025.2073844.1217.
- Nakhaei, J., Bitarafan, M., Lale Arefi, S., & Kapliński, O. (2016). Model for rapid assessment of vulnerability of office buildings to blast using SWARA and SMART methods (A case study of Swiss Re Tower). *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(6), 831–843. doi:10.3846/13923730.2016.1189457.
- Nemati, A., Mikaeili, O., Bitarafan, M., & Lale Arefi, S. (2026). Material selection for multi-hazard resilient buildings using an uncertainty-aware, interpretable decision-support framework. *Journal of Building Engineering*, 117247. doi:10.1016/j.jobbe.2026.117247.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. doi:10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
- Popper, R. (2008). How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62–89. doi:10.1108/14636680810918586.
- Porter, A. L., Ashton, W. B., Clar, G., Coates, J. F., Cuhls, K., Cunningham, S. W., Ducatel, K., van der Duin, P., Georghiou, L., Gordon, T., Linstone, H., Marchau, V., Massari, G., Miles, I., Mogee, M., Salo, A., Scapolo, F., Smits, R., & Thissen, W. (2004). Technology futures analysis: Toward integration of the field and new methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(3), 287–303. doi:10.1016/j.techfore.2003.11.004.

- Rahimi, F., Sadeghi-Niaraki, A., Ghodousi, M., & Choi, S. M. (2025). Spatial-temporal modeling of urban resilience and risk to earthquakes. *Scientific Reports*, 15, 8321. doi:10.1038/s41598-025-92365-2.
- Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Devarajan, P., Stefańska, A., Dixit, S., Podlasek, A., Sitek, W., & Koda, E. (2024). Emerging trends in the integration of smart sensor technologies in structural health monitoring: A contemporary perspective. *Sensors*, 24(24), 8161. doi:10.3390/s24248161.
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2000). Active, semi-active and hybrid control of structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 387–402. doi:10.5459/bnzsee.33.3.387-402.
- Spencer, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845–856. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845).
- Utkarsh, Tanwar, R., Chaudhary, S., & Gaur, C. P. (2025). Advanced methodologies to assess the seismic resilience of structural systems: A short review. *Structures*, 77, 109148. doi:10.1016/j.istruc.2025.109148.
- Wang, Q., Huang, B., Gao, Y., & Jiao, C. (2025). Current status and prospects of digital twin approaches in structural health monitoring. *Buildings*, 15(7), 1021. doi:10.3390/buildings15071021.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.