KMANPUB | Decision Science and Intelligent Systems Vol. 2 No. 2 (2025): 1-25

Article history:
Received 02 June 2025
Revised 30 August 2025
Accepted 05 September 2025
Published online 11 September 2025

Risk Assessment of Deep Excavation in Construction Projects Using a Combined SWARA-COPRAS Approach in a Fuzzy Environment

Elmira Jafarzadeh[1], Mehdi Yazdani[2*], Adel Pourghader Chobar[2]

[1] Master's in Industrial Engineering, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

*** Corresponding author email address**: mehdi_yazdani2007@yahoo.com

A r t i c l e I n f o

Article type:
Original Research

How to cite this article:
Jafarzadeh, E., Yazdani, M., & Pourghader Chobar, A. (2025). Risk Assessment of Deep Excavation in Construction Projects Using a Combined SWARA-COPRAS Approach in a Fuzzy Environment. *Decision Science and Intelligent Systems. 2(2), 1-25.*

© 2025 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

A B S T R A C T

Nowadays, with the expansion of urban life across the world, the development of construction activities in various urban sectors—ranging from high-rise building projects to the expansion of subway lines—has become highly tangible and, indeed, inevitable. This study was conducted to assess the risks associated with deep excavation in construction projects. In this study, a combined SWARA and COPRAS approach within a Fuzzy logic environment was used to identify risk assessment indicators and to rank the risks associated with the project. The research setting was the deep excavation project of Atieh Gharb Hospital in Tehran, and the required data were collected from experts involved in this project during the excavation phase. Based on the analysis of the study data in its two distinct stages, it was first determined that 11 risk assessment indicators constitute the most important indicators for measuring the risks of deep excavation activities. Among these indicators, risk analysis capability, the degree of risk uniqueness, and the level of project vulnerability to risk were identified as the most critical indicators for assessing the risks of deep excavation projects. Moreover, based on the second stage of the analysis, it was found that the deep excavation project of Atieh Gharb Hospital involves 12 key and major risks. The fuzzy COPRAS approach revealed that among these risks, three key risks were identified as safety management in the project, the presence of massive surrounding buildings, and the availability of skilled workers. Following these, three other important factors—namely the presence of a complex transportation network near the project, project financing, and potential computational errors—were also identified as other significant risks in this project. Finally, recommendations and strategies were provided, based on expert opinions and existing standards, to reduce the risks of similar future deep excavation projects.

Keywords: *Deep excavation, construction projects, fuzzy SWARA, fuzzy COPRAS, risk management*

Extended Abstract

Introduction

The construction industry is widely recognized as one of the most hazardous sectors in terms of workplace accidents, injuries, and associated costs, which makes risk management an indispensable element of project success. Risks in construction projects are uncertain events or conditions that, if they occur, can have positive or negative impacts on project objectives. The Project Management Institute defines project risk as an uncertain event or condition that, if it occurs, has a positive or negative effect on at least one project objective, such as scope, schedule, cost, or quality (PMBOK Guide, 2017).

In particular, deep excavation activities—commonly required in high-rise building projects and underground infrastructure such as metro lines—pose substantial risks due to soil instability, proximity to neighboring structures, and complex geotechnical conditions. As noted by Hong et al. (2024), the trend toward taller buildings and multi-level underground parking facilities has increased the depth of required excavation, consequently amplifying the scale and diversity of associated risks. The lack of proper risk identification and management during such high-risk phases can result in severe human and financial losses, project delays, and reputational damage.

Previous research has emphasized the high-risk nature of excavation. Valipour et al. (2017) identified excavation and substructure construction as the most hazardous phases of construction projects, highlighting their susceptibility to both geotechnical and operational failures. Similarly, Zhou et al. (2011) observed that as excavation depth increases, the magnitude and variety of risks grow significantly, underscoring the need for advanced risk assessment methods.

Recent studies have introduced multi-criteria decision-making (MCDM) methods under Fuzzy logic conditions to handle uncertainty in risk assessment. For example, Wang et al. (2018) applied fuzzy-based approaches to identify risk indicators in excavation projects, while Pan et al. (2025) proposed a hybrid FAHP-DGDT-CM model to manage heterogeneous soil settlement risk in Shanghai metro projects. Li et al. (2024) further advanced this by integrating Bayesian networks and Dempster–Shafer theory to address complex uncertainties in deep excavation risk assessment.

Within this context, the present study focuses on identifying and ranking the risk indicators of deep excavation in construction projects using a hybrid SWARA-COPRAS approach in a fuzzy environment. The aim is to establish a systematic framework that enables prioritizing risks to support decision-making and enhance project safety and efficiency.

Methods and Materials

This descriptive-survey study was conducted on the deep excavation project of Atieh Gharb Hospital in Tehran. Data were collected from seven experts from Bespaar Pey Iranian Company, all of whom were directly involved in the hospital's deep excavation project.

The study employed a four-questionnaire design. The first questionnaire validated and rated 21 risk indicators identified from literature. The second and third questionnaires applied the fuzzy SWARA method to determine the relative weights of the 11 top-ranked risk indicators. The fourth questionnaire used the fuzzy COPRAS method to rank 12 identified excavation-related risks based on the weighted indicators. Data analysis was performed using Microsoft Excel, with defuzzification applied to transform fuzzy numbers into crisp values for ranking calculations.

Findings

Initial expert evaluation selected 11 risk indicators from an original list of 21. The fuzzy SWARA analysis revealed that the most important indicators were: risk identification and resolution probability (C1, weight 0.4347), risk analysis capability (C5, weight 0.2466), risk uniqueness (C6, weight 0.1551), and project vulnerability to risk (C11, weight 0.0964).

Subsequently, 12 key risks were identified for the deep excavation project, including: ground heaving (R1), groundwater control (R2), excessive excavation speed (R3), project financing (R4), safety management (R5), availability of skilled workers (R6), inadequate pre-project investigations (R7), diverse hydro-geological conditions (R8), adverse geological conditions (R9), presence of massive surrounding buildings (R10), computational errors (R11), and a complex nearby transportation network (R12).

The fuzzy COPRAS ranking revealed the top three risks as: safety management (R5, score 0.07584), presence of massive surrounding buildings (R10, score 0.07061), and availability of skilled workers (R6, score 0.06929). These were followed by the presence of a complex transportation network (R12, score 0.06922), project financing (R4, score 0.0683), and computational errors (R11, score 0.06714). The lowest-ranked risks were adverse geological conditions (R9, score 0.05974) and diverse hydro-geological conditions (R8, score 0.06236).

Discussion and Conclusion

This study contributes to the body of knowledge on construction risk management by providing an empirically validated framework for assessing and prioritizing deep excavation risks using an integrated SWARA-COPRAS approach within a fuzzy environment. The results confirmed the findings of prior studies asserting that deep excavation is among the most hazardous phases of construction, requiring meticulous risk assessment and management (Valipour et al., 2017; Zhou et al., 2011; Hong et al., 2024).

By emphasizing risk analysis capability, risk uniqueness, and project vulnerability as key risk indicators, this study aligns with the argument of Zegordi et al. (2012) that these factors significantly influence the probability and severity of construction project failures. The use of fuzzy SWARA enabled the effective weighting of qualitative expert judgments, while fuzzy COPRAS facilitated a robust ranking of diverse risk factors, consistent with the approach of Vesković et al. (2018) in similar infrastructure contexts.

Practically, the study highlights safety management, surrounding structures, and skilled workforce availability as the most critical risks requiring proactive mitigation strategies in deep excavation projects. This prioritization can guide project managers to allocate resources and safety measures more effectively, thereby minimizing delays, cost overruns, and accidents.

In conclusion, integrating fuzzy SWARA and fuzzy COPRAS provides a powerful methodological framework for risk assessment in high-risk construction phases. The approach's ability to handle uncertainty and multi-criteria decision-making makes it highly applicable to complex projects like deep excavations. Future research may extend this framework by incorporating real-time monitoring data, expanding the expert panel size, and validating the model across diverse geographic and geotechnical settings.

علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند دوره ۲، شماره ۲ (۱۴۰۴): ۲۵-۱

تاریخچه مقاله
دریافت شده در تاریخ ۱۲ خرداد ۱۴۰۴
اصلاح شده در تاریخ ۸ شهریور ۱۴۰۴
پذیرفته شده در تاریخ ۱۴ شهریور ۱۴۰۴
منتشر شده در تاریخ ۲۰ شهریور ۱۴۰۴

ارزیابی ریسک گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی با رویکرد ترکیبی سوارا-کوپراس در محیط فازی

المیرا جعفرزاده[۱]، مهدی یزدانی[۲*]، عادل پورقادر چوبر[۲]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
۲. گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: mehdi_yazdani2007@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:
جعفرزاده، المیرا.، یزدانی، مهدی.، و پورقادر چوبر، عادل. (۱۴۰۴). ارزیابی ریسک گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی با رویکرد ترکیبی سوارا-کوپراس در محیط فازی. *علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند*، ۲(۲)، ۲۵-۱.

© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

چکیده

امروزه و با توسعه زندگی شهری در اقصی نقاط جهان، توسعه فعالیت‌های ساخت‌وساز در بخش‌های مختلف شهری اعم از پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی تا پروژه‌های توسعه خطوط مترو، امری به‌شدت ملموس و البته اجتناب‌ناپذیر است. این پژوهش در جهت ارزیابی ریسک گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی انجام گرفته است. در این مطالعه به‌منظور شناسایی شاخص‌های ارزیابی ریسک و نیز رتبه‌بندی ریسک‌های مرتبط با پروژه، از رویکرد ترکیبی سوارا و کوپراس در محیط فازی استفاده گردیده است. محیط پژوهش پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب در شهر تهران بوده و داده‌های مورد نیاز از خبرگان این پروژه در فاز گودبرداری گردآوری شده است. مبتنی بر تحلیل داده‌های پژوهش در دو گام مختلف آن، نخست معین گردید که ۱۱ شاخص ارزیابی ریسک، مهمترین شاخص‌ها در زمینه سنجش ریسک‌های فعالیت‌های گودبرداری عمیق را شکل می‌دهند که در میان این شاخص‌ها، شاخص‌های قابلیت تحلیل ریسک، میزان منحصربه‌فرد بودن ریسک و میزان آسیب‌پذیری پروژه از ریسک به‌عنوان مهمترین شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری عمیق شناسایی گردید. به‌علاوه مبتنی بر گام دوم تحلیل، این‌گونه شناسایی گردید که پروژه گودبرداری بیمارستان آتیه غرب دربردارنده ۱۲ ریسک کلیدی و اصلی می‌باشد. رویکرد کوپراس فازی نشان می‌دهد که در میان این ریسک‌ها، سه ریسک مدیریت ایمنی در پروژه، وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه و توانمندی کارگران ماهر به‌عنوان سه ریسک کلیدی شناسایی گردیده و بعد از این عوامل نیز سه عامل مهم دیگر شامل وجود شبکه پیچیده حمل‌ونقل در نزدیکی پروژه، تأمین مالی پروژه و خطاهای محاسباتی احتمالی از دیگر ریسک‌ها مهم در این پروژه بودند. در ادامه نیز پیشنهادها و راهکارهایی در جهت کاستن از ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری مشابه در آینده مبتنی بر نظرات خبرگان و استانداردهای موجود ارائه شده است.

کلیدواژگان: *گودبرداری عمیق، پروژه‌های ساختمانی، سوارای فازی، کوپراس فازی، مدیریت ریسک*

مقدمه

صنعت ساخت و ساز همواره یکی از خطرناک‌ترین صنایع از نظر خسارات و تلفات کاری و نرخ آسیب دیدگی منابع انسانی می‌باشد. در این صنعت، صدمات مربوط به از کارافتادگی، فوت، آسیب‌های جدی شغلی و زمان و هزینه‌های اضافی به دلیل توقف پروژه‌ها جزئی از طبیعت آن بوده و به دلیل همین ماهیت پرخطر، مدیریت ریسک فعالیت‌های مختلف در پروژه‌های ساخت و ساز دارای اهمیتی حیاتی و کلیدی برای صاحبان پروژه می‌باشد. از این رو اهمیت کلیدی مطالعه حاضر در شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های مربوط به یکی از پرخطرترین فازهای ساختمان‌سازی یعنی گودبرداری آن می‌باشد. از این‌رو مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت و ساز نقشی کلیدی در اثربخشی و کارایی برونداد این دست پروژه‌ها بازی می‌نماید. در این میان فعالیت‌های گودبرداری عمیق که مرتبط با پروژه‌های ساخت آسمان خراش‌ها و بلندمرتبه-سازی می‌گردند یکی از فازهای کلیدی و مهم این پروژه‌ها بوده و افزایش پی در پی در ارتفاع برج‌ها و نیازهایی چون پارکینگ‌های طبقه‌ای زیرزمینی و... مرتباً بر عمق پی و اهمیت و حیاتی بودن انجام اصولی پی‌سازی می‌افزاید (هونگ[1] و همکاران، ۲۰۲۴). عدم توجه پیمانکاران ساختمانی و دیگر مسئولین به موضوع عوامل پرخطر در فعالیت‌های گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی و عدم وجود درک و بینش کافی در زمینه ریسک‌های پرتکرار شناسایی شده از طریق مطالعاتی چون مطالعه حاضر در این‌گونه فعالیت‌ها می‌تواند منجر به بروز پیامدهایی منفی جانی و مالی در پروژه‌های آتی ساختمانی و از دست رفتن زمان و هزینه به دلیل سهل‌انگاری مجریان پروژه‌ها گردد. در این زمینه پژوهش حاضر مبتنی بر پژوهش‌هایی چون ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۷) که فعالیت‌های گودبرداری و بسترسازی برای ساخت پی ساختمان را به عنوان پرریسک‌ترین و خطرناک‌ترین مرحله از مراحل اجرای پروژه‌های ساختمانی می‌دانند، به دنبال ارائه مدلی ترکیبی در راستای مدیریت ریسک این فعالیت‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری در محیط فازی خواهد بود.

تمرکز اصلی پژوهش حاضر بر شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های ریسک در فعالیت‌های گودبرداری عمیق در پروژه‌های ساختمانی بوده است. مطالعاتی چون ژو[2] و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که هرچه بر عمق گودبرداری مورد نیاز برای پی افزوده شود، سطح، میزان و تنوع ریسک‌های موجود مرتبط با این فعالیت‌ها نیز افزایش می‌یابد. بدین منظور در پژوهش حاضر، پژوهشگر نخست مبتنی بر ادبیات موجود در حیطه پروژه‌های ساختمانی، معیارهای کلی ایجادکننده ریسک در این پروژه‌ها را شناسایی کرده است. این معیارهای کلی در مقاله بیس و دیگر مقالات آورده شده است. پژوهشگر مبتنی بر رویکردی سوارای فازی[3] و نظرات خبرگان، معیارهای کلی ریسک در صنعت ساختمان را وزن‌دهی نمود. این اوزان اهمیت در بخش‌های بعدی به عنوان وزن معیارهای ریسک مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آن مبتنی بر ادبیات موجود همچون وانگ[4] و همکاران (۲۰۱۸)، شاخص‌های ریسک موجود در فعالیت‌های گودبرداری و به خصوص گودبرداری عمیق را شناسایی، استخراج و دسته‌بندی کرد. پس از آن مبتنی بر رویکرد کوپراس فازی[5] و وزن‌های شناسایی شده از مرحله سوارای فازی، شاخص‌های ریسک گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی را رتبه‌بندی نموده تا بدین ترتیب مهمترین ریسک‌های بالقوه در فعالیت‌های گودبرداری عمیق را شناسایی نماید.

در ادامه، در بخش دوم به بررسی مبانی نظری و ادبیات تحقیق پرداخته شده است. در بخش سوم روش تحقیق پژوهش تشریح شده است. در بخش چهارم تحلیل داده و نتایج پژوهش انجام شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات ارایه گردیده است.

[1]. Hong
[2]. Zhou
[3]. Fuzzy SWARA
[4]. Wang
[5]. Fuzzy COPRAS

مبانی نظری و ادبیات تحقیق

ریسک در پروژه، رویدادها یا وضعیت‌های ممکن الوقوع نامعلومی هستند که در صورت وقوع به صورت پیامدهای منفی یا مثبت بر اهداف پروژه موثر می‌باشند. هر یک از این رویدادها یا وضعیت‌ها دارای علل مشخص و نتایج و پیامدهای قابل تشخیص هستند. پیامدهای این رویدادها مستقیما در زمان، هزینه و کیفیت پروژه موثر می‌باشند. بنابراین شناسایی ریسک و تعیین میزان پیامدهای مثبت و منفی آن بر اهداف پروژه از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف نهایی مدیریت ریسک افزایش احتمال و یا تاثیر ریسک‌های مثبت و کاهش احتمال و یا تاثیر ریسک‌های منفی برای بالابردن موفقیت پروژه می‌باشد (راهنمای PMBOK، ۲۰۱۷).

با وجود تمام تعاریف مختلفی که از مدیریت ریسک وجود دارد، همه تعاریف موافقند که هدف مدیریت ریسک ماکزیمم نمودن فرصت‌ها و حداقل کردن نتایج ریسک بر پروژه ساختمانی است. ریسک‌های پروژه‌های ساختمانی پس از شناسایی در شش دسته فنی و تکنولوژیکی، موقعیت کار، ساخت، اقتصادی و مالی، اداری و سازمانی، اجتماعی و فرهنگی قرار می‌گیرد.

فدایی و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیق خود به شناسایی و تعیین اهمیت ریسک‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها در پروژه‌های سدسازی، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره پرومته و آنالیز گایا پرداخته‌اند. ریسک‌ها با استفاده از داده‌های پژوهش‌های پیشین و همچنین مصاحبه با کارشناسان حوزه سدسازی استخراج شده است. انتخاب نهایی ریسک‌ها به وسیله غربال‌گری از طریق روش دلفی فازی انجام شده است. سپس با روش پرومته و آنالیز گایا، رتبه ریسک‌ها تعیین و تأثیر آن‌ها بر پروژه تعیین شده است. نتایج تحقیق نشان داده ریسک‌های تغییر نرخ ارز، تحریم، شرایط ژئوتکنیکی، روگذری و شکست سد، دارای بیشترین اهمیت در پروژه‌های سدسازی هستند. همچنین نتایج بیانگر این بوده که استفاده از روش پرومته و آنالیز گایا می‌تواند با دقت به رتبه‌بندی ریسک پروژه‌های سدسازی و سایر پروژه‌های عمرانی پرداخت.

امامقلی‌زاده و حسینی (۱۳۹۹)، به شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های ایمنی در پروژه‌های ساختمانی با رویکرد ترکیبی FUZZY FMEA و FUZZY TOPSIS پرداخته‌اند. این مطالعه به صورت موردی روی پروژه احداث شهرک قصردریا واقع در شهرستان محمودآباد در سال ۱۳۹۴ پرداخته شده است. جمع‌آوری داده‌ها از طریق میدانی روی جامعه آماری شامل مدیران پروژه, مهندسان ناظر و مجری و متخصصان در زمینه ایمنی ساختمان انجام گردید. مهم‌ترین ریسک‌های شناسایی شده صنعت ساختمان از دو روش,, شامل سقوط افراد از لبه گودبرداری، لغزیدن و سقوط از روی رمپ راه پله و سقوط از روی داربست، جایگاه‌های کار، برخورد بازوی جرثقیل با ساختمان و لغزیدن و سقوط افراد از روی رمپ راه پله ارایه شده است.

علیزاده و فیلی (۱۳۹۷) پژوهشی با عنوان مدیریت ریسک در گودبرداری‌های شهری انجام دادند. در این پژوهش عنوان شده است که پروژه‌های گودبرداری عمیق شهری کشور به جهت تامین پارکینگ انبوه، فضای تاسیسات و سایر کاربردهایی که قابلیت بهره‌برداری در طبقات زیرزمینی را دارند، با تقاضای قابل توجه رو به رو است. با این وجود، این پروژه‌ها در دستیابی به اهداف پیش‌بینی شده از جمله هزینه، زمان، کیفیت با چالش‌های جدی روبرو هستند که ریشه در ریسک‌های متعدد آن‌ها دارد. پروژه‌ها ذاتاً با عدم قطعیت‌های فراوانی روبرو هستند. از طرف دیگر شرایط مشخصات خاک و عوارض موجود در آن نیز با عدم قطعیت‌های فراوانی روبرو است. بنابراین، پروژه‌های مرتبط با کار در زیر سطح زمین نوعاً با ریسک بالا محسوب می‌شوند. البته ریسک‌های مورد اشاره منحصر به ریسک‌های ژئوتکنیکی و فنی نبوده و در برگیرنده ریسک‌های متنوعی از جمله ریسک‌های قانونی، مالی، قراردادی، ایمنی زیست محیطی می‌باشند. در این پژوهش ضمن تعریف مفهوم مدیریت ریسک، سطوح ریسک در پروژه‌های گودبرداری عمیق شهری معرفی می‌گردد. پس از آن نیز ضمن بیان روش‌های شناسایی ریسک، اهم ریسک‌های شناسایی شده در این پروژه‌ها طبقه‌بندی شده‌اند. در انتها ضمن جمع‌بندی مباحث مطرح شده، زمینه‌های پژوهش‌های آتی در این راستا نیز بیان شده است.

اسدی و همکاران (۱۳۹۶) پژوهشی با عنوان شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه‌های برج سازی با رویکرد (FMEA) در شهر تهران انجام دادند. در این پژوهش بیان شده که برج سازی در فضای شهری چالشی جدی است و ریسک‌های فراوانی دارد. فضای ناکافی، ازدحام ترافیکی پیرامون ساختمان‌ها، به خصوص در محل‌های پرجمعیت از آن جمله است. در این تحقیق به رتبه‌بندی ریسک‌های ساختمان‌های بلندمرتبه با استفاده از روش FMEA پرداخته شده است. روش تحقیق روش آماری است و با استفاده از پرسشنامه‌های مخصوص این روش انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ریسک‌های تجاری و ریسک‌های کنترل و نظارت دارای بیشترین اولویت هستند.

پان و همکاران (۲۰۲۵)، یک مدل ارزیابی ریسک جدید را برای نشست ناهمگون زمین ناشی از گودبرداری‌ها و تأثیر آن بر سازه‌های مجاور، معرفی کرده اند. این مدل با ترکیبFAHP ، CMوDGDT ، به مدیریت عدم قطعیت و علیت آن پرداخته است. این مدل در یک پروژه واقعی مترو در شانگهای تأیید شده و نشان داده است که می‌تواند به طور مؤثر شرایط و مکان‌های پرخطر را شناسایی کند، به ویژه در لایه‌های خاک نرم، و در نتیجه به تصمیم‌گیری‌های قابل اطمینان‌تر برای کنترل ریسک کمک کند.

لی و همکاران (۲۰۲۴)، در مطالعه خود یک روش نوین برای ارزیابی ریسک گودبرداری‌های عمیق ارائه داده اند که با ترکیب شبکه‌های بیزی فازی و نظریه بهبودیافته دِمپستر-شافر، عدم قطعیت‌های پیچیده را مدیریت می‌کند. یک سیستم جامع شاخص ریسک، شامل عوامل محیطی، طراحی، ساخت و مدیریت، از داده‌های حوادث گذشته و دانش تخصصی استخراج شده است. این روش در یک مطالعه موردی واقعی در گوانگژو و سه پروژه دیگر با موفقیت به کار گرفته اند و با روش‌های جایگزین مقایسه شده است که برتری و قابلیت اطمینان آن را تأیید کرده است.

شن و همکاران (۲۰۲۳)،. در پژوهش خود یک رویکرد مبتنی بر مدل ابری را برای ارزیابی وضعیت ریسک حفاری ارائه کرده‌اند. توسعه رویکرد شامل سه مرحله بوده: جمع‌آوری اطلاعات چند منبعی، ساخت مدل ابری معیار (BCM) و مدل ابری شناسایی شده (ICM) و تعیین سطح ریسک. تعیین وزن دو مرحله‌ای برای جمع آوری اطلاعات چند منبع توسعه یافته است. نتایج با وضعیت میدانی سازگار بود. عوامل حساسیت نسبت به نتایج وضعیت ریسک برآورد شده از طریق تجزیه و تحلیل همبستگی شناسایی شدند. این رویکرد پیشنهادی روش جدیدی برای درک وضعیت خطر حفاری و دستورالعمل‌هایی برای مدیریت ریسک ارائه کرده است.

ژانگ و لی (۲۰۲۲)، یک روش جدید ارزیابی ریسک ساخت و ساز را برای پروژه‌های گودبرداری عمیق پیشنهاد داده‌اند. یک سیستم شاخص ارزیابی ریسک ساخت و ساز بر اساس یک ماتریس ساختار خرابی-ریسک برای مقابله با خطرات پیچیده ساخت و ساز گودبرداری عمیق ارایه داده‌اند. روش پیگیری طرح‌ریزی بهینه شده با بهینه سازی ازدحام ذرات برای استخراج ویژگی‌های ساختاری از داده‌های ارزیابی برای به دست آوردن وزن‌های شاخص هدف استفاده بوده است. نتایج نشان داده که ریسک ساخت و ساز قابل قبول بوده و در طول دوره ساخت و ساز کاهش یافته است که با شرایط واقعی مطابقت دارد که نشان دهنده اثربخشی این روش جدید است. مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک (فرایند سلسله مراتبی تحلیلی، روش وزن آنتروپی، ارزیابی جامع فازی، روش خوشه‌بندی خاکستری، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان) نشان داده است.

لین و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل ارزیابی ریسک برای یک سیستم حفاری شامل تکنیک برای اولویت سفارش با مجموعه‌های فازی ترکیبی توسعه داده‌اند. مدل پیشنهادی شامل سه مرحله است: ۱) ساخت سلسله مراتب تصمیم، ۲) یکپارچه سازی داده‌های چند منبعی و ۳) شناسایی عوامل پرخطر. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن قضاوت کارشناسان و داده‌های پایش پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان داده که مدل توسعه یافته می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری برای مدیران پروژه برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی ریسک ساخت و ساز استفاده شود.

هاتفی و تاموشایتین[1](۲۰۱۹)، مطالعه‌ای در زمینه مدلی یکپارچه از روش‌های دیماتل[2] فازی و فرایند تحلیل شبکه‌ای[3] فازی را به‌منظور ارزیابی پروژه‌های ساختمانی به انجام رساندند. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی پروژه‌های ساختمانی، روابط تعاملی میان شاخص‌های ریسک از طریق بکارگیری روش دیماتل فازی مورد توجه قرار گرفت. هدف از این پژوهش، از یک سو شناسایی ساختار شبکه‌ای میان عوامل ریسک و از سوی دیگر وزن‌دهی و اولویت‌گذاری بر عوامل ریسک پروژه‌های ساختمانی مبتنی بر روش فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی می‌باشد. در این زمینه، ساختار پیشنهاد شده در پنج پروژه ساختمانی در کشور روسیه مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصله نشان دادند که ریسک‌های زمانی، هزینه‌ای و ایمنی مهم‌ترین عوامل در میان عوامل ریسک پروژه‌های ساختمانی محسوب می‌گردند.

چاترجی[4] و همکاران (۲۰۱۸)، پژوهشی در زمینه بکارگیری رویکردی ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه به‌منظور مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی را به انجام رساندند. در این پژوهش هدف شناسایی و دسته‌بندی شاخص‌های ریسک در پروژه‌های ساختمانی انبوه سازی و پس از آن وزن‌دهی به معیارها و شاخص‌های ریسک در این پروژه‌ها می‌باشد. بدین منظور پژوهشگران از رویکرد ترکیبی دیماتل و فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط فازی استفاده نمودند. در این پژوهش نخست شاخص‌های ریسک پروژه‌های ساختمانی از ادبیات شناسایی و دسته‌بندی و مبتنی بر روش دیمتل فازی، ساختار روابط علی و معلولی میان این عوامل شناسایی گردید. سپس مبتنی بر این ساختار شبکه‌ای و روش فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی، عوامل و شاخص‌های مربوط به هر عامل وزن‌دهی گردیده و بدین ترتیب مهمترین و اساسی‌ترین عوامل و شاخص‌های اثرگذار بر بروز ریسک در پروژه‌های ساختمانی شناسایی شدند.

وسکوویچ[5] و همکاران (۲۰۱۸)، پژوهشی در زمینه ارزیابی ریسک پروژه‌های حفاری مرتبط با راه آهن را با استفاده از مدلی ترکیبی از روش‌های دلفی، اسوارا و کوپراس در محیط فازی به انجام رساندند. در این زمینه هدف از این پژوهش نخست شناسایی ریسک‌های موجود در حیطه فعالیت‌های حفاری به‌منظور ریل‌گذاری و سپس اولویت‌بندی عوامل و شاخص‌های ریسک می‌باشد. بدین منظور پژوهشگران نخست با استفاده از مرور ادبیات شاخص‌های ریسک را شناسایی نموده و با استفاده از روش دلفی، به تقریبی مطلوب در زمینه شاخص‌های ریسک پروژه‌های حفاری در بخش راه آهن دست یافتند. پس از آن مبتنی بر رویکرد ترکیبی اسوارا و کوپراس فازی نخست معیارهای ریسک اولویت‌بندی شده و سپس شاخص‌های ریسک مربوط به هر اولویت رتبه‌بندی شدند. بدین ترتیب شاخص‌های شناسایی شده و عوامل کلی رتبه‌بندی گردیدند.

تورسکیس[6] و همکاران (۲۰۱۶)، مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی روش‌ها و گزینه‌های ساخت پی در پروژه‌های ساختمانی را مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه به انجام رساندند. هدف از این پژوهش ارائه روشی به‌منظور انتخاب روش مناسب انجام پروژه‌های ساخت پی در پروژه‌های ساختمانی مبتنی بر رویکرد ترکیبی وسپاس[7] و فرایند تحلیل سلسله مراتبی[8] در محیط فازی می‌باشد. در این زمینه پژوهش حاضر مبتنی بر روش وسپاس فازی به عنوان روش وزن دهی به شاخص‌ها و معیارها، شاخص‌های مرتبط با گزینش و ارزیابی عملکرد روش‌های مربوط به گودبرداری، این شاخص‌ها را وزن‌دهی نمود. سپس مبتنی بر روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در محیط فازی، روش‌ها و گزینه‌های متنوع گودبرداری در پروژه‌های ساختمانی را اولویت‌بندی نمود. بدین ترتیب در این پژوهش از یک سو شاخص‌های گزینش روش گودبرداری در ساختمان شناسایی و وزن‌دهی گردید و از سوی دیگر، روش‌های مختلف گودبرداری مبتنی بر این شاخص‌ها اولویت‌بندی شدند.

---

1. Hatefi and Tamosaitiene
2. DEMATEL
3. ANP
4. Chatterjee
5. Veskovic
6. Turskis
7. WASPAS
8. AHP

تایلان[1] و همکاران (۲۰۱۴)، پژوهشی در زمینه گزینش و ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی را با استفاده از رویکرد ترکیبی فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و تاپسیس[2] فازی به انجام رساندند. در این زمینه هدف از این پژوهش از یک سو شناسایی و وزن‌دهی به شاخص‌های ریسک در پروژه‌های ساختمانی و از سوی دیگر رتبه‌بندی پروژه‌های مختلف ساختمانی مبتنی بر شاخص‌های ریسک می‌باشد. بدین منظور پژوهشگران از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌منظور وزن‌دهی به شاخص‌های شناسایی شده ریسک در پروژه‌های ساختمانی استفاده نمودند. این شاخص‌ها در قالب ۵ معیار کلی ریسک یعنی زمان، هزینه، کیفیت، ایمنی و محیط زیست قرار گرفتند. همچنین به‌منظور ارزیابی و انتخاب بهترین پروژه‌های ساختمانی، ۳۰ پروژه مورد نظر قرار گرفته و با استفاده از شاخص‌های ریسک وزن‌دهی شده و روش تاپسیس فازی، این پروژه‌ها رتبه‌بندی گردیدند.

روش تحقیق

این پژوهش از روش‌های مطالعه کتابخانه‌ای، براساس ماهیت و روش، تحقیقی توصیفی است، از نظر گردآوری داده‌ها از نوع پیمایشی می‌باشد و از نظر اینکه مشخصاً ارزیابی ریسک گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی با رویکرد ترکیبی سوارا-کوپراس در محیط فازی بررسی شده است. داده‌ها مبتنی بر نظرات خبرگان شرکت بسپار پی ایرانیان است که در پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب حضور داشته‌اند. ابزار تحقیق در مطالعه حاضر مبتنی بر چهار پرسشنامه خبرگان می‌باشد. پرسشنامه نخست به منظور امتیازدهی خبرگان به شاخص‌های ریسک شناسایی شده از ادبیات و رد و تأیید این شاخص‌ها اختصاص داشته، پرسشنامه دوم نیز نخستین پرسشنامه روش سوارای فازی بوده و پرسشنامه نظرات خبرگان در زمینه رتبه‌بندی شاخص‌ها با توجه به شاخص‌های ریسک شناسایی و تأیید شده در حیطه گودبرداری عمیق پروژه‌های ساختمانی می‌باشد. پرسشنامه سوم نیز دومین پرسشنامه روش سوارای فازی بوده و به مقایسات دو به دوی شاخص‌های سنجش ریسک مبتنی بر رتبه‌بندی آن‌ها اختصاص دارد. پرسشنامه چهارم که به عنوان تنهاترین پرسشنامه روش کوپراس فازی مطرح می‌گردد، پرسشنامه معیار گزینه بوده و میزان اهمیت هر ریسک پروژه گودبرداری عمیق را نسبت به تک تک معیارهای سنجش ریسک مبتنی بر نظرات خبرگان می‌سنجد. در زمینه نرم‌افزار تحلیل داده‌های گردآوری شده از نرم‌افزار اکسل به‌منظور تحلیل داده‌های مربوط به روش‌های سوارای فازی و کوپراس فازی استفاده می‌نماید. خروجی فاز سوارای فازی، اوزان اهمیت شاخص‌های سنجش ریسک بوده و خروجی فاز کوپراس نیز رتبه‌بندی ریسک‌های مربوط به پروژه‌های گودبرداری عمیق مبتنی بر اوزان اهمیت شناسایی شده برای شاخص‌های سنجش ریسک می‌باشد.

در این مطالعه جهت پیشبرد اهداف پژوهش و همچنین جمع‌آوری اطلاعات لازم اولیه در مورد موضوع کار برای انجام مصاحبه و اخذ نظرات خبرگان، عوامل موجود یعنی شاخص‌های سنجش ریسک پروژه‌های گودبرداری و ساختمانی در ادبیات شناسایی شد. پژوهشگر پس از مطالعه و بررسی و جمع‌آوری دقیق و هدفمند تمامی متغیرها و مولفه‌های اصلی پژوهش، شاخص‌های اولیه سنجش ریسک اصلی پژوهش به تعداد ۲۱ شاخص را شناسایی و تدوین نمود. لازم به ذکر است که در این مطالعه از نظرات ۷ خبره شاغل در شرکت بسپار پی ایرانیان در شهر تهران و دفتر مرکزی آن استفاده گردید. این خبرگان همگی درگیر پروژه پی‌سازی و گودبرداری بیمارستان آتیه غرب در شهر تهران بودند و زمینه فکری خود را مبتنی بر این پروژه گودبرداری عظیم تنظیم نمودند. در زمینه گردآوری نظرات خبرگان در زمینه اهمیت شاخص‌های سنجش ریسک، در این پژوهش از امتیاز ۱ تا ۵ برای هر شاخص سنجش ریسک استفاده شد. بدین ترتیب که هر خبره امتیازی از ۱ تا ۵ به هر شاخص سنجش ریسک اعطا نموده و میانگین این امتیازات، شکل‌دهنده به نمره کلی آن شاخص می‌باشد. نهایتاً ۵۰ درصد شاخص‌های ارزیابی ریسک با بالاترین میانگین گزینش می‌گردند. همچنین از جدول شماره ۱ به‌منظور گردآوری نظرات خبرگان در پرسشنامه سوم یعنی

[1]. Taylan
[2]. TOPSIS

مقایسات دوبه‌دوی شاخص‌های ارزیابی ریسک استفاده گردید. به علاوه از جدول شماره ۲ که مقایسات کلامی می‌باشد نیز به‌منظور گردآوری نظرات خبرگان در پرسشنامه چهارم استفاده گردید.

جدول ۱

مقیاس‌های کلامی (ماوی و همکاران، ۲۰۱۷)

مقادیر کلامی	عبارات کلامی
(۱، ۱، ۱)	دارای اهمیتی برابر
(۱/۵، ۱، ۰/۶۷)	تقریباً کم اهمیت
(۰/۶۷، ۰/۵، ۰/۴)	کم اهمیت
(۰/۴، ۰/۳۳، ۰/۲۹)	بسیار کم اهمیت
(۰/۲۹، ۰/۲۵، ۰/۲۲)	کاملاً کم اهمیت

جدول ۲

مقیاس‌های کلامی (کلمنیس و همکاران، ۲۰۱۱)

اعداد فازی مثلثی	قضاوت کلامی
(۹، ۹، ۸)	خیلی زیاد
(۸، ۷، ۶)	بینابین
(۷، ۶، ۵)	زیاد
(۶، ۵، ۴)	بینابین
(۵، ۴، ۳)	متوسط
(۴، ۳، ۲)	بینابین
(۳، ۲، ۱)	کم
(۲، ۱، ۰)	بینابین
(۱، ۰، ۰)	خیلی کم

روش سوارای[1] فازی

روش سوارای فازی به عنوان یکی از روش‌های شناسایی اوزان اهمیت شاخص‌ها در نظر گرفته می‌شود. در مسائل تصمیم‌گیری، شاخص‌ها به عنوان منابع مهم کسب اطلاعات درنظر گرفته می‌شوند. به واقع وزن و اهمیت شاخص‌ها می‌تواند منعکس کننده شدت و میزان مهم بودن آن‌ها از منظر پاسخ‌گویان به‌منظور کاربرد در شناسایی عملکردهای یک سازمان و یا تأمین‌کنندگان آن و یا انجام یک فعالیت با توجه به این شاخص‌ها باشد. این وزن و اهمیت نشان دهنده میزان اطلاعات موجود در هرکدام از شاخص‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشد. این اوزان اهمیت به عنوان اوزان اهمیت ذهنی نیز شناخته می‌شوند. روش سوارا یا تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی یکی از روش‌های تصمیم گیری چند شاخصه است که هدف آن محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها است(ماوی و همکاران، ۲۰۱۷).

[1]. SWARA

روش کوپراس فازی

در سال ۱۹۹۶، محققان دانشگاه تکنیکال ویلنیوس، روشی را با عنوان کوپراس[1] ابداع نمودند. این روش برای ارزیابی چندمعیاره هم حداکثرسازی و هم حداقل‌سازی ارزش معیارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بیشتر برای ارزیابی فرایندهای پیچیده به‌وسیله روش‌های چندمعیاره کمی استفاده شده است. در این روش تأثیر حداکثرسازی و حداقل‌سازی معیارها برروی ارزیابی نتیجه به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از روش کوپراس به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه زیاد شده است و دلیل آن سادگی محاسبه، رتبه بندی کامل گزینه‌ها و درنظر گرفتن معیارهای مثبت و منفی می‌باشد. در روش کوپراس کلاسیک، وزن‌های شاخص‌ها و رتبه‌بندی گزینه‌ها مبتنی بر مقادیر و ارزش‌های قطعی محاسبه می‌گردند(زاوادسکاس و کاکلوسکاس، ۱۹۹۶).

تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش به پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، در قالب ارزیابی ریسک‌های کلیدی پروژه‌های گودبرداری عمیق با تمرکز بر پروژه گودبرداری بیمارستان آتیه غرب در شهر تهران پرداخته می‌شود. این بیمارستان به عنوان یکی از بزرگترین بیمارستان‌های تهران دربردارنده پروژه‌های مهندسی پیچیده‌ای در راستای توسعه زیرساخت‌های خود بوده و یکی از کلیدی‌ترین این پروژه‌ها، گودبرداری عمیق آن می‌باشد. در این پژوهش به‌طور کلی به‌منظور گزینش شاخص‌های ارزیابی ریسک گودبرداری عمیق، تعیین اوزان اهمیت شاخص‌های ریسک گزیده شده و نهایتاً رتبه‌بندی ریسک‌های مهم پروژه فوق مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی ریسک پروژه‌های گودبرداری از نظرات کارشناسان و خبرگان شرکت بسپار پی ایرانیان به عنوان مجری پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب استفاده گردیده شد. در بخش نخست از نظرات ۱۰ خبره و در بخش دوم از نظرات ۷ کارشناس خبره فعال در این شرکت استفاده گردید. در ادامه رویکردهای مختلف در جهت شناسایی شاخص‌های ارزیابی ریسک و نیز ریسک‌های پروژه و نهایتاً وزن‌دهی به شاخص‌های سنجش و رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه پیاده‌سازی می‌گردند.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

گام اول- معین نمودن شاخص‌های ارزیابی ریسک در پروژه‌های گودبرداری مبتنی بر ادبیات: در این گام پژوهشگر ضمن بررسی مطالعات معتبر بین‌المللی در حیطه ارزیابی و مدیریت ریسک در صنعت ساختمان به خصوص مدیریت ریسک در پروژه‌های گودبرداری عمیق، شاخص‌های ارزیابی ریسک را از این مطالعات استخراج و تحت پرسشنامه نخست خود در اختیار خبرگان قرار داد. جدول شماره ۳ لیست شاخص‌های ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی و نیز گودبرداری عمیق مستخرج از ادبیات را نشان می‌دهد:

جدول ۳

شاخص‌های ارزیابی ریسک در پروژه‌های ساختمانی و گودبرداری عمیق

شاخص‌های ارزیابی ریسک	منابع
میزان آسیب پذیری پروژه از ریسک‌ها	هونگ و همکاران (۲۰۱۳) – ژنگ و همکاران (۲۰۱۶)- زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)
تهدیدات ناشی از ریسک نسبت به اهداف پروژه	بورکار و همکاران (۲۰۱۶)- زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)
پیامدهای ناشی از ریسک	ولی پور و همکاران (۲۰۱۵)- فنگ و جونیان (۲۰۱۱)
منحصر به فرد (دارای موارد مشابه اندک بودن) بودن ریسک	وانگ و همکاران (۲۰۱۰)- زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)
ابهامات موجود در یک ریسک	زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)- وانگ و همکاران (۲۰۱۰)
قابلیت تکرار ریسک	وانگ و همکاران (۲۰۱۰)
میزان تأثیرگذاری بر دیگر ریسک‌ها	زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)

[1]. Complex Proportional Assessment (COPRAS)

میزان تأثیرپذیری ریسک از دیگر ریسک‌ها	هونگ و همکاران (۲۰۱۳)- زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)
احتمال شناسایی و رفع ریسک	فنگ و جونیان (۲۰۱۱)
قابلیت واکنش در برابر ریسک	زاوادسکاس و همکاران (۲۰۱۰)
مدیریت ریسک	ولی پور و همکاران (۲۰۱۵) – زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)- فنگ و جونیان (۲۰۱۱)
احتمال وقوع ریسک	هونگ و همکاران (۲۰۱۳)- زاوادسکاس و همکاران (۲۰۱۰)
پیش‌بینی پذیری زمان و مکان ریسک	فنگ و جونیان (۲۰۱۱)
قابلیت تحلیل ریسک	زگوردی و همکاران (۲۰۱۲)- زاوادسکاس و همکاران (۲۰۱۰)
میزان اثرات بلندمدت ریسک	ولی پور و همکاران (۲۰۱۵)
وجود امکانات کاهش احتمال وقوع ریسک	وانگ و همکاران (۲۰۱۰)
درون زاد بودن ریسک	زاوادسکاس و همکاران (۲۰۱۰)
برون زاد بودن ریسک	زگوردی و همکاران (۲۰۱۲) - وانگ و همکاران (۲۰۱۰)
پارامترهای دخیل در بروز ریسک	فنگ و جونیان (۲۰۱۱)
قابلیت بازیابی پیامدهای ناشی از ریسک	ولی پور و همکاران (۲۰۱۵)- هونگ و همکاران (۲۰۱۳)
آستانه تحمل پروژه در برابر ریسک	هونگ و همکاران (۲۰۱۳)- وانگ و همکاران (۲۰۱۰)

همان‌گونه که قابل مشاهده است، پژوهشگر مبتنی بر بررسی جامع ادبیات موجود در زمینه مدیریت ریسک در صنعت ساختمان، ۲۱ شاخص مختلف در زمینه ارزیابی ریسک را از مطالعات استخراج نمود.

گام دوم- گزینش شاخص‌های ارزیابی ریسک برتر مبتنی بر نظرات خبرگان: در این زمینه پرسشنامه شاخص‌ها تهیه و در اختیار خبرگان قرار گرفت. خبرگان به هر شاخص ارزیابی ریسک امتیازی بین ۱ تا ۵ داده و نهایتاً مبتنی بر میانگین امتیازی هر شاخص، برترین شاخص‌ها معین گردید. در این مطالعه ۵۰ درصد شاخص‌ها با بالاترین میانگین امتیازی گزینش گردید که در بردارنده ۱۱ شاخص ارزیابی ریسک می‌باشد.

جدول ۴

میانگین امتیازی خبرگان به شاخص‌های سنجش ریسک

ابعاد کلی	شاخص‌های ارزیابی ریسک	میانگین امتیازی
احتمالات	احتمال شناسایی و رفع ریسک	۴/۳
	احتمال وقوع ریسک	۳/۸
قابلیت‌ها و توانمندی‌ها	قابلیت واکنش در برابر ریسک	۴
	قابلیت تحلیل ریسک	۴/۱
	وجود امکانات کاهش احتمال وقوع ریسک	۴
	مدیریت ریسک	۳/۷
	آستانه تحمل پروژه در برابر ریسک	۳/۷
	قابلیت بازیابی پیامدهای ناشی از ریسک	۳/۵
	قابلیت تحلیل ریسک	۴/۱
ماهیتی	منحصر به فرد (دارای موارد مشابه اندک بودن) بودن ریسک	۴
	قابلیت تکرار ریسک	۳/۹
	درون‌زاد بودن ریسک	۳/۵
	برون‌زاد بودن ریسک	۳/۴
پیچیدگی	ابهامات موجود در یک ریسک	۳/۸
	پیش‌بینی‌پذیری زمان و مکان ریسک	۳/۹

	پارامترهای دخیل در بروز ریسک	۳/۷
تعاملی	میزان تأثیرگذاری بر دیگر ریسک‌ها	۴
	میزان تأثیرپذیری ریسک از دیگر ریسک‌ها	۳/۵
	میزان اثرات بلندمدت ریسک	۳/۵
آسیب رسانی	میزان آسیب‌پذیری پروژه از ریسک‌ها	۴
	تهدیدات ناشی از ریسک نسبت به اهداف پروژه	۳/۱
	پیامدهای ناشی از ریسک	۳/۳

در جدول ۵ شاخص‌های ارزیابی ریسک نهایی و نامگذاری سمبولیک آن‌ها آورده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، ۱۱ شاخص به عنوان شاخص‌های ارزیابی ریسک نهایی گزینش شدند.

جدول ۵

شاخص‌های سنجش ریسک منتخب

ابعاد کلی	شاخص‌های ارزیابی ریسک	میانگین امتیازی
احتمالات	احتمال شناسایی و رفع ریسک (C۱)	۴/۳
	احتمال وقوع ریسک (C۲)	۳/۸
قابلیت‌ها و توانمندی‌ها	قابلیت واکنش در برابر ریسک (C۳)	۴
	وجود امکانات کاهش احتمال وقوع ریسک (C۴)	۴
	قابلیت تحلیل ریسک (C۵)	۴/۱
ماهیتی	منحصر به فرد (دارای موارد مشابه اندک بودن) بودن ریسک (C۶)	۴
	قابلیت تکرار ریسک (C۷)	۳/۹
پیچیدگی	ابهامات موجود در یک ریسک (C۸)	۳/۸
	پیش‌بینی‌پذیری زمان و مکان ریسک (C۹)	۳/۹
تعاملی	میزان تأثیرگذاری بر دیگر ریسک‌ها (C۱۰)	۴
آسیب رسانی	میزان آسیب‌پذیری پروژه از ریسک‌ها (C۱۱)	۴

وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی ریسک

در این مطالعه به‌منظور شناسایی اوزان اهمیت شاخص‌های ارزیابی ریسک پروژه‌های گودبرداری عمیق از روش سوارای فازی استفاده گردید. این رویکرد مانند تمام روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه دربردارنده الگوریتمی است که مبتنی بر آن، شاخص‌ها رتبه‌بندی و وزن‌دهی می‌گردند.

گام اول- مرتب‌سازی شاخص‌های ریسک از نظر اهمیت مبتنی بر نظر خبرگان و تجمیع نظرات خبرگان در این زمینه:

بدین منظور از ۱۰ خبره حاضر در پژوهش که از مدیران پروژه فعال در بخش خاک و پی و نیز خبرگان دارای تجربه در بخش گودبرداری شرکت بسپار پی ایرانیان بودند درخواست شد که ۱۱ شاخص ارزیابی ریسک فوق را رتبه‌بندی از ۱ تا ۱۱ نمایند. بدین ترتیب که در پرسشنامه لیست شاخص‌های فوق به همراه ستونی خالی ارائه گردید تا در ستون به هر کدام از شاخص‌ها مبتنی بر اهمیت مدنظر ایشان عددی از ۱ تا ۱۱ تعلق گیرد. در جدول ۶ رتبه‌بندی خبرگان و میانگین این امتیازات را نشان می‌دهد:

جدول ۶

رتبه‌بندی شاخص‌ها توسط خبرگان

شاخص‌ها	خبره ۱	خبره ۲	خبره ۳	خبره ۴	خبره ۵	خبره ۶	خبره ۷	خبره ۸	خبره ۹	خبره ۱۰	میانگین
C۱	۳	۱	۳	۸	۹	۱	۵	۱	۱	۱۰	۴.۲
C۲	۱۱	۴	۹	۹	۸	۳	۴	۷	۸	۳	۶.۶
C۳	۷	۳	۷	۷	۶	۹	۱	۵	۳	۱۱	۵.۹
C۴	۶	۲	۲	۱۱	۱۰	۵	۲	۳	۷	۶	۵.۴
C۵	۵	۶	۸	۲	۵	۲	۶	۶	۲	۲	۴.۴
C۶	۴	۷	۴	۳	۴	۴	۷	۴	۴	۵	۴.۶
C۷	۹	۸	۱	۱	۳	۱۱	۸	۱۱	۱۰	۱۱	۷.۳
C۸	۱۰	۹	۱۰	۶	۷	۱۰	۱۱	۹	۵	۴	۸.۱
C۹	۸	۱۰	۱۱	۱۰	۱۱	۸	۹	۱۰	۱۱	۸	۹.۶
C۱۰	۲	۱۱	۶	۵	۲	۷	۱۱	۲	۶	۱	۵.۳
C۱۱	۱	۵	۵	۴	۱	۶	۳	۸	۹	۹	۵.۱

هرچه میانگین کسب شده توسط شاخصی پایین‌تر باشد آن شاخص در رتبه بالاتری قرار می‌گیرد. در ادامه و در جدول ۷ گام‌های روش سوارای فازی پیاده‌سازی می‌گردد. مراحل بعدی بدین ترتیب است که نخست شاخص‌ها را بر حسب امتیاز رتبه‌بندی کسب شده از بالاترین امتیاز (کمترین میانگین) تا پایین‌ترین امتیاز (بالاترین میانگین) مرتب می‌نماییم.

گام دوم- محاسبه اهمیت نسبی تجمیع شده شاخص‌ها: مبتنی بر جدول عبارات کلامی فازی جدول شماره ۲ و مبتنی بر نظرات خبرگان، میزان اهمیت نسبی هر شاخص با شاخص بلافاصله پایین‌تر از خودش مقایسه گردیده و این مقایسات مبتنی بر فرمول ۳-۱۰ تجمیع می‌گردند. این فرمول الگوریتم معرفی شده توسط چانگ و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد. حاصل در ستون S_J قرار می‌گیرد. در این زمینه از خبره پرسیده می‌شود که میزان اهمیت شاخص الف نسبت به شاخص ب در زمینه سنجش ریسک‌ها در پروژه‌های حفاری عمیق چگونه است؟

گام سوم- محاسبه ضریب $\tilde{k}_j$: این ضریب در زمینه محاسبه وزن اولیه هر شاخص ریسک به کار برده می‌شود. میزان این ضریب برای شاخص دارای بالاترین وزن، یک بوده و برای مابقی شاخص‌ها برابر است با حاصل جمع S_J با عدد یک.

گام چهارم- محاسبه وزن اولیه شاخص‌ها یا $\tilde{q}_j$: این گام اوزان خام اولیه مربوط به هر شاخص ارزیابی ریسک را ارائه می‌دهد. این وزن اولیه برای عنصر رتبه اول برابر یک و برای سایر عناصر در دیگر رتبه‌ها برابر است با حاصل تقسیم مقادیر اهمیت نسبی تجمیع شده شاخص با یک رتبه بالاتر تقسیم بر ضریب k شناسایی شده برای شاخص.

گام پنجم- محاسبه اوزان اهمیت نسبی یا $\widetilde{W}_j$

گام ششم- دی‌فازی نمودن اوزان اهمیت نسبی فازی و تعیین اوزان نهایی

مبتنی بر این توضیحات، گام‌های سوارای فازی در جدول ۷ خلاصه سازی شده است:

جدول ۷

نتایج حاصل از روش سوارای فازی

شاخص‌ها	$\tilde{s}_j$	$\tilde{k}_j$	$\tilde{q}_j$	$\widetilde{W}_j$		W
C۱	-	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۵۹۴۳، ۰/۴۴۵۴، ۰/۲۵۳۷)		۰/۴۳۴۷
C۵	(۰/۴، ۰/۹۳۳، ۱/۵)	(۱/۴، ۱/۹۳۳، ۲/۵)	(۰/۴، ۰/۵۱۷۳، ۰/۷۱۴۲)	(۰/۴۲۴۴، ۰/۲۳۰۴، ۰/۱۰۱۵)		۰/۲۴۶۶
C۶	(۰/۲۹، ۰/۸۳۵، ۱/۵)	(۱/۲۹، ۱/۸۳۵، ۲/۵)	(۰/۵۵۳۷، ۰/۲۸۱۹، ۰/۱۶)	(۰/۳۲۹۰، ۰/۱۲۵۵، ۰/۰۴۰۶)		۰/۱۵۵۱
C۱۱	(۰/۴، ۰/۸۷۰، ۱/۵)	(۱/۴، ۱/۸۷۰، ۲/۵)	(۰/۳۹۵۵، ۰/۱۵۰۷، ۰/۰۶۴)	(۰/۲۳۵۰، ۰/۰۶۷۱، ۰/۰۱۶۲)		۰/۰۹۶۳۵
C۱۰	(۰/۲۹، ۰/۷۲۷، ۱/۵)	(۱/۲۹، ۱/۷۲۷، ۲/۵)	(۰/۳۰۶۵، ۰/۰۸۷۲، ۰/۰۲۵۶)	(۰/۱۸۲۱، ۰/۰۳۸۸، ۰/۰۰۶۴)		۰/۰۶۶۵
C۴	(۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۲۲)	(۱/۳۲۹، ۱/۶۷، ۱/۲۲)	(۰/۲۵۱۲، ۰/۰۶۵۶، ۰/۰۱۵۳)	(۰/۱۴۹۲، ۰/۰۲۹۲، ۰/۰۰۳۸)		۰/۰۵۲۸
C۳	(۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۲۲)	(۱/۳۲۵، ۱/۶۷، ۱/۲۲)	(۰/۲۰۵۹، ۰/۰۴۹۵، ۰/۰۰۹۱)	(۰/۱۲۲۳، ۰/۰۲۲۰، ۰/۰۰۲۳)		۰/۰۴۲۱
C۲	(۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۲۲)	(۱/۳۲۹، ۱/۶۷، ۱/۲۲)	(۰/۱۶۸۷، ۰/۰۳۷۲، ۰/۰۰۵۴)	(۰/۱۰۰۲، ۰/۰۱۶۵، ۰/۰۰۱۳)		۰/۰۳۳۶
C۷	(۰/۲۲، ۰/۴۶۶، ۱/۵)	(۱/۲۲، ۱/۴۶۶، ۲/۵)	(۰/۱۳۸۳، ۰/۰۲۵۴، ۰/۰۰۲۱)	(۰/۰۸۲۱، ۰/۰۱۱۳، ۰/۰۰۰۵)		۰/۰۲۶۳
C۸	(۰/۲۲، ۰/۳۵۳، ۱/۵)	(۱/۲۲، ۱/۳۵۳، ۲/۵)	(۰/۱۱۳۴، ۰/۰۱۸۷، ۰/۰۰۰۸)	(۰/۰۶۷۳، ۰/۰۰۸۳، ۰/۰۰۰۲)		۰/۰۲۱۰
C۹	(۰/۲۲، ۰/۶۱۵، ۱/۵)	(۱/۲۲، ۱/۶۱۵، ۲/۵)	(۰/۰۹۲۹، ۰/۰۱۱۶، ۰/۰۰۰۳)	(۰/۰۵۵۲، ۰/۰۰۵۱، ۰)		۰/۰۱۶۳

مبتنی بر نتایج حاصل شده از روش سوارا و گام‌های مرتبط با آن، شاخص ارزیابی ریسک احتمال شناسایی و رفع ریسک به عنوان مهمترین شاخص ارزیابی شناسایی گردید. پس از این شاخص نیز شاخص‌های قابلیت تحلیل ریسک، میزان منحصر به فرد بودن ریسک و میزان آسیب‌پذیری پروژه از ریسک به عنوان مهمترین شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری عمیق شناسایی گردیدند. در جدول شماره ۸ اوزان اهمیت شاخص‌های ارزیابی ریسک قابل مشاهده می‌باشد. به علاوه در این جدول جنس این شاخص‌ها به لحاظ مثبت یا منفی بودن نیز آورده شده است. بدین معنا که افزایش کدام معیار و یا کاهش کدام معیار برابر است با بهبود کلی و یا ایجاد شرایط مطلوب‌تر برای پروژه.

جدول ۸

اوزان اهمیت شاخص‌های ارزیابی ریسک

شاخص‌های ارزیابی ریسک	وزن شاخص‌ها	جنس معیارها
احتمال شناسایی و رفع ریسک (C۱)	۰/۰۴۳۴۷	P
احتمال وقوع ریسک (C۲)	۰/۰۳۳۶	N
قابلیت واکنش در برابر ریسک (C۳)	۰/۰۴۲۱	P
وجود امکانات کاهش احتمال وقوع ریسک (C۴)	۰/۰۵۲۸	P
قابلیت تحلیل ریسک (C۵)	۰/۲۴۶۶	P
منحصر به فرد (دارای موارد مشابه اندک بودن) بودن ریسک (C۶)	۰/۱۵۵۱	N
قابلیت تکرار ریسک (C۷)	۰/۰۲۶۳	N
ابهامات موجود در یک ریسک (C۸)	۰/۰۲۱۰	N
پیش‌بینی پذیری زمان و مکان ریسک (C۹)	۰/۰۱۶۳	P
میزان تأثیرگذاری بر دیگر ریسک‌ها (C۱۰)	۰/۰۶۶۵	N
میزان آسیب پذیری پروژه از ریسک‌ها (C۱۱)	۰/۰۹۶۴	N

رتبه‌بندی ریسک با کوپراس فازی

رتبه‌بندی گزینه‌ها مبتنی بر شاخص‌های وزن داده شده می‌باشد. در این پژوهش گزینه‌ها شامل ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری عمیق بود و شاخص‌ها نیز شامل شاخص‌های سنجش ریسک در پروژه‌های ساختمانی به‌صورتی کلی می‌باشد. در گام پیشین و با استفاده از روش سوارای فازی اوزان اهمیت ۱۱ شاخص سنجش ریسک معین گردید. در این گام با استفاده از این شاخص‌ها و وزن‌های شناسایی شده از آن‌ها، ریسک‌های مربوط به پروژه‌های گودبرداری عمیق رتبه‌بندی می‌گردند. در گام اول می‌بایست گزینه‌ها یعنی ریسک‌های گودبرداری عمیق معین گردد. در این زمینه ادبیات موجود، ریسک‌های مختلفی را معین نموده‌اند که ممکن است در پروژه‌های مختلف گودبرداری ایجاد شوند. در این زمینه نخست هر کدام از خبرگان، ریسک‌های مدنظر خود را در چک لیست خود تیک زده و در انتها ریسک‌های تیک خورده مشترک گزینش گردیدند. بدین ترتیب ۱۰ ریسک به عنوان ریسک‌های مشترک مدنظر خبرگان به‌عنوان ریسک‌های مدنظر در این پژوهش برگزیده شدند. به علاوه ۴ ریسک وجود داشتند که حداقل ۵ خبره از ۷ خبره آن‌ها را حائز اهمیت دانسته بودند. از این میان ۲ ریسک با بحث و تبادل نظر میان خبرگان این پروژه برگزیده شدند. به واقع این ۲ ریسک نیز به دلیل این‌که ۵ خبره بدان‌ها اشاره داشته و آن‌را در چک لیست خود تیک زده بودند به علاوه این‌که بر اهمیت آن‌ها توافقی جمعی حاصل گردید، برگزیده شدند. از این‌رو در مجموع ۱۲ریسک پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب تهران به عنوان گزینه‌های کلیدی برگزیده شدند تا مبتنی بر شاخص‌های سنجش ریسک و روش کوپراس فازی رتبه‌بندی گردند. ریسک‌های گودبرداری عمیق برآمده از ادبیات در جدول ۹ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین ریسک‌های نهایی در جدول شماره ۹ قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۹

ریسک‌های مربوط به پروژه‌های گودبرداری عمیق

ردیف	ابعاد کلی ریسک	ریسک‌های پروژه
۱	ریسک‌های امنیتی	خشکی بیش از حد دیواره‌ها
۲		استقامت دیواره‌ها
۳		بالا آمدن کف زمین (به دلیل فشارهای دیواره)
۴		فرونشست زمین
۵	ریسک‌های ساختمانی	رویکرد گودبرداری
۶		پلن ساختمان
۷		کیفیت مواد بکاررفته در سازه
۸		کنترل آب‌های زیرزمینی
۹		پایش مطلوب گام‌های گودبرداری
۱۰		استفاده از تکنیک‌های بسیار جدید (و نچندان مطمئن)
۱۱		عملکرد غیراستاندارد
۱۲		سرعت عمل بیش از حد بالا در گودبرداری
۱۳	ریسک‌های اقتصادی	تأمین مالی پروژه
۱۴		عملکرد طرفین قرارداد
۱۵	ریسک‌های مدیریتی	مدیریت ایمنی در پروژه
۱۶		توانمندی کارگران ماهر
۱۷		پرسنل مدیریت پروژه
۱۸		تجربه مدیریتی تیم ارشد
۱۹		ارتباطات بین تیم‌های مدیریتی و عملیاتی
۲۰		سیستم مدیریت و اداری
۲۱	ریسک‌های تحقیقی	خطا در فعالیت‌های تحقیقی پیش پروژه
۲۲		عمق و حجم تحقیقات پیش پروژه
۲۳		روش‌های تست و تحلیل
۲۴		خطاهای محاسباتی
۲۵		تنوع شرایط آبی و خاکی محیط
۲۶	ریسک‌های محیطی	شرایط نامطلوب زمین شناختی
۲۷		وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه
۲۸		شبکه لوله کشی پیچیده زیر زمین پروژه
۲۹		وجود شبکه پیچیده حمل و نقل در نزدیکی پروژه
۳۰	ریسک‌های طراحی	عدم توجه کافی به آب‌های زیرزمینی و سازه‌های اطراف
۳۱		عدم وجود ساختارهای حفاظتی و نگهدارنده از سازه
۳۲		کمبود تجربه عملیاتی

جدول ۱۰

ریسک¬های منتخب پروژه گودبرداری بیمارستان آتیه غرب در تهران

ردیف	ریسک‌های پروژه	نام نمادین
۱	بالا آمدن کف زمین (به دلیل فشارهای دیواره)	R۱
۲	کنترل آب‌های زیرزمینی	R۲
۳	سرعت عمل بیش از حد بالا در گودبرداری	R۳
۴	تأمین مالی پروژه	R۴
۵	مدیریت ایمنی در پروژه	R۵
۶	توانمندی کارگران ماهر	R۶
۷	عمق و حجم تحقیقات پیش پروژه	R۷
۸	تنوع شرایط آبی و خاکی محیط	R۸
۹	شرایط نامطلوب زمین شناختی	R۹
۱۰	وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه	R۱۰
۱۱	خطاهای محاسباتی	R۱۱
۱۲	وجود شبکه پیچیده حمل و نقل در نزدیکی پروژه	R۱۲

در ادامه، گام‌های روش کوپراس فازی پیاده‌سازی می‌گردد. گام نخست دریافت نظرات خبرگان در زمینه میزان اهمیت و ارزش هر ریسک منتخب با توجه به شاخص‌های ۱۱گانه سنجش ریسک می‌باشد. در این زمینه پرسشنامه استاندارد روش کوپراس در قالب ماتریس شاخص گزینه این سؤال را از خبرگان پرسید که از نظر شما ریسک گودبرداری عمیق الف چه درجاتی از شاخص‌های سنجش ریسک را در برخواهد داشت؟ گام بعد گام تجمیع این نظرات فازی در قالب یک ماتریس شاخص گزینه می‌باشد. تجمیع نظرات خبرگان مبتنی بر میانگین حسابی فازی به دست می‌آید:

جدول ۱۱

ماتریس تجمیع نظرات خبرگان

ریسک‌ها	C۱	C۲	C۳	....	C۱۰	C۱۱
R۱	(۰ ،۳/۳۶ ،۹)	(۱ ،۴/۳۸ ،۷)	(۰ ،۳/۶۷ ،۸)	.....	(۰ ،۲/۹۴ ،۷)	(۱ ،۳/۸۰ ،۷)
R۲	(۰ ،۲/۸۲ ،۶)	(۱ ،۳/۸۱ ،۷)	(۰ ،۳/۷۱ ،۷)	.....	(۱ ،۳/۵۳ ،۷)	(۱ ،۴/۲۳ ،۹)
R۳	(۱ ،۳/۳۹ ،۷)	(۱ ،۳/۱۷ ،۷)	(۲ ،۴/۵۸ ،۸)	.....	(۱ ،۴/۳۲ ،۸)	(۱ ،۴/۰۵ ،۸)
...	.....	....	....	....	....	....
R۱۱	(۲ ،۴/۹۴ ،۸)	(۰ ،۳/۵۲ ،۸)	(۱ ،۴/۵۰ ،۸)	.....	(۳ ،۴/۵۱ ،۷)	(۱ ،۴/۷۹ ،۹)
R۱۲	(۱ ،۴/۹۷ ،۸)	(۱ ،۳/۰۴ ،۶)	(۱ ،۳/۷۹ ،۶)	.....	(۲ ،۴/۵۷ ،۸)	(۲ ،۴/۲۵ ،۸)

پس از تجمیع نظرات خبرگان در قالب یک ماتریس شاخص- گزینه فازی، گام بعد در روش کوپراس فازی، دی‌فازی نمودن این ماتریس و تبدیل آن به یک ماتریس غیرفازی متشکل از درایه‌های قطعی می‌باشد. جدول ۱۲ ماتریس تجمیع نظرات دی‌فازی شده را نشان می‌دهد. هدف از دی‌فازی نمودن ماتریس تجمیع نظرات خبرگان، تسهیل در انجام محاسبات پیش رو می‌باشد. زیرا آنچه که نیاز به دریافت

دقیق آن بود یعنی نظرات خبرگان مبتنی بر اعداد فازی گردآوری و تجمیع گردیده و زین پس می‌توان مبتنی بر حالت کلاسیک باقی گام‌ها را پیاده‌سازی نمود.

جدول ۱۲

ماتریس تجمیع نظرات خبرگان دی‌فازی

ریسک‌ها	C۱	C۲	C۳	....	C۱۰	C۱۱
R۱	۳/۹۳۱۲۵	۴/۱۹۱۸	۲/۹۷۲۳۶	.....	۳/۲۲۲۳۶	۳/۹۰۱۸۶
R۲	۲/۹۱۳۰۷	۳/۹۰۵۲۳	۳/۶۰۶۲۵	.....	۳/۷۶۸۰۱	۴/۶۱۵۸۵
R۳	۳/۶۹۶۸۲	۳/۵۸۶۶۳	۴/۷۹۰۴۹	.....	۴/۴۱۱۵۹	۴/۲۷۹۳۷
...	.....	....	....	....	....	....
R۱۱	۴/۹۷۳۸۳	۳/۷۶۰۹۱	۴/۵۰۳۷۱	.....	۵/۱۸۷۴۶	۴/۸۹۷۷۳
R۱۲	۴/۷۳۸۲۹	۳/۲۷۰۰۵	۳/۶۴۵۴۲	.....	۴/۷۸۷۸۸	۴/۶۲۶۸۷

پس از دی‌فازی نمودن ماتریس تجمیع نظرات خبرگان فازی، گام بعد در روش کوپراس، نرمال نمودن درایه‌های ماتریس تجمیع نظرات می‌باشد. علت نرمال نمودن این ماتریس، بی‌بعدسازی شاخص‌ها و ریسک‌ها و منطقی نمودن مقایسات میان آن‌ها می‌باشد. زیرا جنس شاخص‌ها و ریسک‌ها متفاوت بوده و به‌منظور انجام عملیات منطقی بر روی آن‌ها نیاز است تا از طریق نرمال‌سازی، عوامل این ماتریس بی‌بعد گردند. بدین منظور ابتدا هر عنصر یک ستون را بر مجموع آن ستون تقسیم کرده و حاصل را در وزن ستون (ون شاخص) ضرب می‌نماییم. به بیان دیگر، ابتدا حاصل جمع تمام ستون‌های ماتریس تجمیع نظرات دی‌فازی شده را محاسبه کرده و سپس تک تک عناصر هر ستون را بر مجموع آن ستون تقسیم می‌نماییم. حاصل کار را نیز در وزن آن ستون که همان وزن شاخص ارزیابی ریسک است ضرب می‌کنیم. بدین ترتیب ماتریس تجمیع نظرات دی‌فازی نرمال شده حاصل می‌گردد. این ماتریس در جدول شماره ۱۳ قابل مشاهده است.

جدول ۱۳

ماتریس تجمیع نظرات نرمال شده

ریسک‌ها	C۱	C۲	C۳	....	C۱۰	C۱۱
R۱	۰/۰۰۳۶۳	۰/۰۰۲۹۷	۰/۰۰۳۱۷	.....	۰/۰۰۴۲۴	۰/۰۰۷۱۷
R۲	۰/۰۰۲۶۹	۰/۰۰۲۷۶	۰/۰۰۲۹۸	.....	۰/۰۰۴۹۶	۰/۰۰۸۴۸
R۳	۰/۰۰۳۴۲	۰/۰۰۲۵۴	۰/۰۰۳۹۵	.....	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۷۸۶
...	.....	....	....	....	....	....
R۱۱	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۳۷۲	.....	۰/۰۰۶۸۲	۰/۰۰۹
R۱۲	۰/۰۰۴۳۸	۰/۰۰۲۳۱	۰/۰۰۳۰۱	.....	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۸۵

پس از این مرحله، S_jهای مثبت و منفی معین گردیدند. لازم به ذکر است که در این مطالعه با توجه به این که شاخص‌های سنجش ریسک می‌توانند مثبت یا منفی باشند بنابراین هیچ کدام از دو کمیت صفر نمی‌گردد. به علاوه این کمیت‌ها به مجموع شاخص‌های مثبت و مجموع شاخص‌های منفی برای هر گزینه اشاره دارند. مبتنی بر توضیحات، مرحله نهایی مشخص کردن آلترناتیوی است که بهترین وضعیت را در بین معیارها دارد که با افزایش یا کاهش رتبه هر آلترناتیو درجه اهمیت آن نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. آلترناتیوهایی که بهترین وضعیت

را به لحاظ معیارها داشته باشند، با بالاترین درجه اهمیت Nj مشخص می‌شوند که Nj برابر با ۱۰۰ درصد است. مقدار کلی درجه اهمیت هر معیار که محاسبه می‌شود از ۰ تا ۱۰۰ درصد است که در میان این دامنه، بهترین و بدترین آلترناتیو تعیین می‌شوند.

جدول ۱۴

مقادیر SJ ها

S_{J-}	S_{J+}
۰/۰۳۱	۰/۰۲۹
۰/۰۳۱	۰/۰۲۸
۰/۰۳۲	۰/۰۳۱
۰/۰۳۲	۰/۰۳۴
۰/۰۲۸	۰/۰۳۶
۰/۰۳۹	۰/۰۴۱
۰/۰۳۴	۰/۰۳۲
۰/۰۳۶	۰/۰۳۲
۰/۰۳۴	۰/۰۲۸
۰/۰۳۲	۰/۰۳۶
۰/۰۳۴	۰/۰۳۵
۰/۰۳۷	۰/۰۴۰

جدول ۱۵

مقادیر مربوط به رتبه‌بندی گزینه‌ها

رتبه	N_i ها	Q_i ها	ریسک‌های پروژه	نام نمادین
۸	۸۵/۱۳۷۱	۰/۰۶۴۵۶	بالا آمدن کف زمین (به دلیل فشارهای دیواره)	R۱
۱۰	۸۳/۵۳۱۵	۰/۰۶۳۳۵	کنترل آب‌های زیرزمینی	R۲
۷	۸۶/۸۵۵۴	۰/۰۶۵۸۷	سرعت عمل بیش از حد بالا در گودبرداری	R۳
۵	۹۰/۰۶۴۸	۰/۰۶۸۳	تأمین مالی پروژه	R۴
۱	۱۰۰	۰/۰۷۵۸۴	مدیریت ایمنی در پروژه	R۵
۳	۹۱/۳۷۱۷	۰/۰۶۹۲۹	توانمندی کارگران ماهر	R۶
۹	۸۴/۲۴۰۴	۰/۰۶۳۸۸	حجم ناکافی تحقیقات پیش پروژه	R۷
۱۱	۸۲/۲۳۰۹	۰/۰۶۲۳۶	تنوع شرایط آبی و خاکی محیط	R۸
۱۲	۷۸/۷۷۳۸	۰/۰۵۹۷۴	شرایط نامطلوب زمین شناختی	R۹
۲	۹۳/۱۱۵	۰/۰۷۰۶۱	وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه	R۱۰
۶	۸۸/۵۴۰۵	۰/۰۶۷۱۴	خطاهای محاسباتی	R۱۱
۴	۹۱/۲۸۰۱	۰/۰۶۹۲۲	وجود شبکه پیچیده حمل و نقل در نزدیکی پروژه	R۱۲

جدول ۱۶

رتبه‌بندی گزینه‌ها

رتبه	ریسک‌های پروژه	نام نمادین
۱	مدیریت ایمنی در پروژه	R۵
۲	وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه	R۱۰
۳	توانمندی کارگران ماهر	R۶
۴	وجود شبکه پیچیده حمل و نقل در نزدیکی پروژه	R۱۲
۵	تأمین مالی پروژه	R۴
۶	خطاهای محاسباتی	R۱۱
۷	سرعت عمل بیش از حد بالا در گودبرداری	R۳
۸	بالا آمدن کف زمین (به دلیل فشارهای دیواره)	R۱
۹	حجم ناکافی تحقیقات پیش پروژه	R۷
۱۰	کنترل آب‌های زیرزمینی	R۲
۱۱	تنوع شرایط آبی و خاکی محیط	R۸
۱۲	شرایط نامطلوب زمین شناختی	R۹

مبتنی بر آنچه در جداول فوق محاسبه گردید، نخست مقادیر حاصل جمع شاخص‌های سنجش ریسک مثبت و منفی برای هر سطر یا ریسک محاسبه می‌گردد. سپس مبتنی بر فرمول معرفی شده، مقدار کیو و ان به عنوان شاخص کوپراس تعیین می‌شود. میزان بزرگتر برابر است با رتبه بهتر. در جدول شماره ۱۶ رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها مبتنی بر شاخص‌های سنجش ریسک پروژه‌های گودبرداری عمیق قابل مشاهده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، سه ریسک مدیریت ایمنی در پروژه، وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه و توانمندی کارگران ماهر به عنوان سه ریسک کلیدی در پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب در شهر تهران شناسایی گردید. بعد از این عوامل نیز سه عامل مهم دیگر شامل وجود شبکه پیچیده حمل و نقل در نزدیکی پروژه، تأمین مالی پروژه و خطاهای محاسباتی احتمالی از دیگر ریسک‌ها مهم در این پروژه بودند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در سال‌های اخیر با افزایش تراکم و تعداد طبقات و نیاز به تأمین پارکینگ و سایر سطوح خدماتی در ساختمان‌ها، عمق گودبرداری نیز بیشتر شده است. اما در بیشتر موارد از همان روش‌های سنتی مورد استفاده در گودهای کم عمق گذشته استفاده می‌شود. عدم آشنایی به اصول فنی، سهل‌انگاری و یا سودجویی غیرمسئولانه منجر به ایجاد حادثه می‌شود. در این مطالعه به‌منظور شناسایی شاخص‌های ارزیابی ریسک و نیز رتبه‌بندی ریسک‌های مرتبط با پروژه، از رویکرد ترکیبی سوارا و کوپراس در محیط فازی استفاده گردید. محیط پژوهش پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب در شهر تهران بوده و داده‌های مورد نیاز از خبرگان این پروژه در فاز گودبرداری گردآوری گردید. مبتنی بر تحلیل داده‌های پژوهش در دو گام مختلف آن، نخست معین گردید که ۱۱ شاخص ارزیابی ریسک، مهمترین شاخص‌ها در زمینه سنجش ریسک‌های فعالیت‌های گودبرداری عمیق را شکل می‌دهند که در میان این شاخص‌ها، شاخص‌های قابلیت تحلیل ریسک، میزان منحصربه‌فرد بودن ریسک و میزان آسیب‌پذیری پروژه از ریسک به‌عنوان مهمترین شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری عمیق شناسایی گردیدند. به‌علاوه مبتنی بر گام دوم تحلیل، این‌گونه شناسایی گردید که پروژه گودبرداری بیمارستان آتیه غرب دربردارنده ۱۲ ریسک کلیدی و اصلی می‌باشد. رویکرد کوپراس فازی نشان داد که در میان این ریسک‌ها، سه ریسک مدیریت ایمنی در پروژه، وجود ساختمان‌های عظیم در اطراف پروژه و

توانمندی کارگران ماهر به‌عنوان سه ریسک کلیدی شناسایی گردیده و بعدازاین عوامل نیز سه عامل مهم دیگر شامل وجود شبکه پیچیده حمل‌ونقل در نزدیکی پروژه، تأمین مالی پروژه و خطاهای محاسباتی احتمالی از دیگر ریسک‌ها مهم در این پروژه بودند.

در این بخش تلاش می‌شود تا بر مبنای نتایج حاصل‌شده از ریسک‌های کلیدی و اصلی پروژه گودبرداری عمیق بیمارستان آتیه غرب که به عنوان یکی از بزرگترین پروژه‌های گودبرداری کشور به‌شمار آمده و شاخص‌های ریسک آن می‌توانند به عنوان شاخص‌هایی کلیدی در پروژه‌های متعددی مدنظر قرار گیرند، پیشنهاداتی کاربردی در جهت کاستن از بروز این ریسک‌ها و یا کاستن از خطرات احتمالی مواجهه با این ریسک‌ها ارائه نمود. لازم به ذکر است که این پیشنهادات برامده از تجربیات تیم گودبرداری عمیق پروژه بیمارستان آتیه غرب تهران و نیز استانداردهای مرتبط با ریسک‌های مهم این پروژه می‌باشد.

- با توجه به وجود شریان‌های کوچک و بزرگ رفت و آمد خودروها در اکثر پروژه‌های گودبرداری عمیق در نواحی شهری، در صورت لزوم باید با هماهنگی دستگاه‌های ذی‌ربط، اقدامات ترافیکی مناسبی انجام داد. در این صورت باید با هماهنگی دستگاه‌های مسئول، مسیرهای عبور ایمن و موقتی را برای ترافیک سواره یا پیاده ایجاد کرد. در این گونه موارد باید از علائم آگاهی دهنده و هشدار دهنده کافی در فواصل کافی از محل ورود به مسیرهای موقت مزبور و نیز در محدوده آن‌ها نصب نمود.
- معمولاً در بیشتر گودبرداری‌ها، سیستم روشنایی متداول و معارف معابر برای روشن کردن محدوده اطراف گودبرداری کافی نیست. علاوه بر آن امکان خاموش بودن و یا سوختن لامپ‌های آن‌ها نیز وجود دارد و این امر عموماً از کنترل مدیران کارگاه‌های ساختمانی خارج است. لذا باید در این گونه موارد از سیستم روشنایی موقت و کافی علاوه بر چراغ‌های هشدار دهنده و اخطار دهنده استفاده نمود.
- علاوه بر اجرای کلیه تمهیدات لازم برای جلوگیری از ریزش دیواره گود و بروز هرگونه حادثه مطابق ضوابط و اصول مهندسی، باید باز هم احتمال وقوع حوادث را مد نظر قرار داده و پیش‌بینی‌ها و برنامه‌ریزی‌های لازم برای انجام عملیات امداد و نجات را صورت داد.
- همواره باید این نکته را مد نظر قرار داد که رعایت موارد فوق به هیچ وجه جایگزین اجرای سازه نگهبان و رعایت سایر ضوابط ژئوتکنیکی و سازه‌ای حفاظت دیواره گود و پایدارسازی گود نمی‌شود و به هیچ وجه از مسئولیت مدیران و مسئولان کارگاه‌های ساختمانی در این خصوص نمی‌کاهد.
- کارفرما باید اطمینان حاصل کند که کلیه کارگران دارای مهارت و تجربه کافی در زمینه گودبرداری و ایمنی در حین کار هستند و یا اینکه کارگران فعالیت‌هایشان را زیر نظر یک سرپرست با مهارت و اطلاعات کافی انجام می‌دهند و در عین حال نیز اطلاعات و مهارت‌شان در حدی است که زیر نظر سرپرست مزبور می‌تواند کار را به گونه‌ای ایمن به پیش برند.
- در پروژه‌های گودبرداری عمیق کلیه پرسنل باید تحت آموزش‌های کافی در زمینه‌های مختلف ایمنی قرار گیرند. از جمله این زمینه‌های ایمنی عبارتند از: ایمنی عمومی کارگاه، ایمنی گودبرداری عمیق، ایمنی در کار با ماشین‌آلات و ابزار، ایمنی در کار با مصالح مختلف، به کارگیری لباس‌ها و پوشش‌های ایمنی.
- یکی از مهمترین اصول کاهش ریسک در پروژه‌های گودبرداری عمیق شامل بررسی ساختمان‌های مجاور می‌باشد. در این زمینه بازرسی ساختمان‌های مجاور گود، صدور دستورات لازم برای تخلیه آب استخرها و کالاهای انبارها، به ویژه کالاهای سنگین یا قابل اشتعال (قابل آتش گرفتن)، در صورت لزوم و با رعایت ضوابط حقوقی و قانونی باید همواره مدنظر قرار گیرد.

- اجتناب از تخلیه مصالح ساختمانی، نخاله‌های ساختمانی و خاک‌های مازاد حاصل از گودبرداری عمیق در لبه گود و نیز اجتناب از قرار دادن اشیاء سنگین و یا ناپایدار در لبه گود یکی از کلیدی‌ترین و حیاتی‌ترین اقدامات در جهت کاستن از ریسک‌های جانی و مالی در پروژه‌های گودبرداری عمیق می‌باشد.
- انتخاب مجریان و مهندسان ناظر ذی‌صلاح گودبرداری‌های عمیق و پایش (بررسی و مشاهده و ارزیابی وضع) مستمر دیواره‌های گود، ساختمان‌های مجاور و معابر مجاور گود پیش از انجام عملیات گودبرداری و در حین آن توسط این مجریان و مهندسان متخصص و ذی‌صلاح.
- بررسی و مطالعه نقشه ساختمان‌های مجاور محل گودبرداری به ویژه سیستم سازه‌ای و بارهای آن‌ها در صورت امکان و نیز بررسی وجود باغچه یا زمین زراعی دایر در مجاورت گود به‌منظور کاستن از ریسک ریزش سازه‌های مجاور و نیز کاستن از خطر ریزش دیواره‌های محوطه گودبرداری شده اقدامی حیاتی و کلیدی پیش و حین گودبرداری می‌باشد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

Akintoye, A. S., & MacLeod, M. J. (1997). Risk analysis and management in construction. International Journal of Project Management, 15(1), 31–38.

Alizadeh Derakhshi, A., & Ardalan Feili, A. (2018). Risk management in urban excavation. In Proceedings of the First International Congress on the Construction Industry with a Focus on New Technologies in the Construction Industry (Tabriz, Iran). East Azerbaijan Young Engineers Association.

Asadi, M. R., Zoghi, H., & Habibi, M. (2017). Identification and ranking of high-rise building project risks using the FMEA approach in Tehran. In Proceedings of the Second National Conference on Applied Research in Civil Engineering (Structural Engineering and Construction Management). Sharif University of Technology.

Chapman, C., & Ward, S. (2003). Project risk management: Processes, techniques and insights. John Wiley & Sons.

Chatterjee, K., Zavadskas, E., Tamošaitienė, J., Adhikary, K., & Kar, S. (2018). A hybrid MCDM technique for risk management in construction projects. Symmetry, 10(2), 46.

Emamgholizadeh, S., & Hosseini, S. A. (2020). Identification and ranking of safety risks in construction projects using combined FMEA and fuzzy TOPSIS approach. Occupational Medicine, 12(1), 13–23. https://sid.ir/paper/959094/fa

English Sources

Fadaei, F., Ajdari Moghadam, M., & Shahreki, M. R. (2022). Risk assessment of dam construction projects using the PROMETHEE and GIAIA methods. Journal of Structural and Construction Engineering, 9(8), 117–137. https://doi.org/10.22065/jsce.2022.299099.2526

Fazli, M., Afshari, A. J., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018, May). Identification and ranking of risks in green building projects using the hybrid SWARA-COPRAS method. In Proceedings of the International Conference of Iranian Operations Research Society (pp. 2–4). Kermanshah, Iran.

General Directorate of Engineering Services of the Tehran Province Construction Engineering Organization. (n.d.). General guide for supervising engineers: Familiarity with operational steps in effective project supervision (pp. 5–6).

Hatefi, S. M., & Tamošaitienė, J. (2019). An integrated fuzzy DEMATEL-fuzzy ANP model for evaluating construction projects by considering interrelationships among risk factors. Journal of Civil Engineering and Management, 25(2), 114–131.

Hong, Q. K., Wang, J. B., Ge, J., & Chen, P. (2013). Research on the risk of deep foundation excavation engineering management based on RBS and AHP. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 438, pp. 1010–1014). Trans Tech Publications.

Huang, Z., Cao, C., & Zhang, W. (2024). Risk assessment method of deep foundation pit construction based on two-dimensional cloud model. Journal of Northeastern University (Natural Science), 45(10), 1504.

Lei, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Gu, F., Zan, Z., Mei, Y., ... & Zhou, D. (2024). Advanced risk assessment for deep excavation in karst regions using improved Dempster–Shafer and dynamic Bayesian networks. Buildings, 14(9), 3022.

Lin, S. S., Zhang, N., Zhou, A., & Shen, S. L. (2022). Risk evaluation of excavation based on fuzzy decision-making model. Automation in Construction, 136, 104143.

Mashhudi, S. (1997). High-rise construction in Tehran and required guiding and preventive regulations. In Proceedings of the First National Conference on High-Rise Buildings in Iran (Vol. 2). Iran University of Science and Technology.

Mavi, R. K., Goh, M., & Zarbakhshnia, N. (2017). Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(5–8), 2401–2418.

Ministry of Housing and Urban Development of Iran. (2006). Iran National Building Regulations: Topic 12 — Safety and protection during construction. Office for Compilation and Promotion of National Building Regulations, Tehran.

Ministry of Housing and Urban Development of Iran. (2007). Iran National Building Regulations: Topic 7 — Foundations and substructures. Office for Compilation and Promotion of National Building Regulations, Tehran.

Olfat, L., Khosravani, F., & Jalali, R. (2010). Identification and prioritization of project risks based on the PMBOK standard with a fuzzy approach. Journal of Industrial Management Studies, 8(19), 147–163.

Pan, Y., Zhou, X., Chen, J. J., & Hong, Y. (2025). Temporal-spatial-fusion-based risk assessment on the adjacent building during deep excavation. Information Fusion, 114, 102653.

Project Management Institute. (2008). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide) (4th ed.). Maryland, USA.

Project Management Institute. (2017). PMBOK® Guide (6th ed., pp. 263–266).

Puller, M. (2003). Deep excavations: A practical manual (2nd ed.). Thomas Telford Limited.

Shen, S. L., Lin, S. S., & Zhou, A. (2023). A cloud model-based approach for risk analysis of excavation system. Reliability Engineering & System Safety, 231, 108984.

Tah, J., & Carr, V. (2001). Towards a framework for project risk knowledge management in the construction supply chain. Advances in Engineering Software, 32(10–11), 835–846. https://doi.org/10.1016/S0965-9978(01)00035-7

Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M., & Kabli, M. R. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. Applied Soft Computing, 17, 105–116.

Turskis, Z., Daniūnas, A., Zavadskas, E. K., & Medzvieckas, J. (2016). Multicriteria evaluation of building foundation alternatives. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 31(9), 717–729.

Valipour, A., Yahaya, N., Md Noor, N., Antuchevičienė, J., & Tamošaitienė, J. (2017). Hybrid SWARA-COPRAS method for risk assessment in deep foundation excavation project: An Iranian case study. Journal of Civil Engineering and Management, 23(4), 524–532.

Vesković, S., Stević, Ž., Stojić, G., Vasiljević, M., & Milinković, S. (2018). Evaluation of the railway management model by using a new integrated model DELPHI-SWARA-MABAC. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 1(2), 34–50.

Wang, J., Lin, W., & Huang, Y. H. (2010). A performance-oriented risk management framework for innovative R&D projects. Technovation, 30(11–12), 601–611.

Wang, N., Xu, C. S., Du, X. L., & Zhang, M. J. (2018). A risk assessment method of deep excavation based on Bayesian analysis and expert elicitation. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 9(2), 452–466.

Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). Pastatų sistemotechninis įvertinimas [Multicriteria evaluation of building]. Technika.

Zhang, L., & Li, H. (2022). Construction risk assessment of deep foundation pit projects based on the projection pursuit method and improved set pair analysis. Applied Sciences, 12(4), 1922.

Zhou, H. B., & Zhang, H. (2011). Risk assessment methodology for a deep foundation pit construction project in Shanghai, China. Journal of Construction Engineering and Management, 137(12), 1185–1194.