



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Identification and Prioritization of Deep Excavation Risks in Tehran via Structural Equation Method

Mohammad Reza Naderi¹, Majid Safehian^{2*}

1- Master's student, Department of Civil Engineering. Islamic Azad university, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2*- Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Islamic Azad university, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: 14 May 2026; Revised: 10 June 2026; Accepted: 19 June 2026; Published: 23 August 2026

Abstract

Nowadays due to the population expansion, buildings are constructed with more depths, in order to compensate the limitation in increasing the area. During deep excavation, a vast amount of soil is removed from the ground. Considering the nature of the soil, the more depth excavated, the more tendencies would be to replace the empty space, and what happens, may act as a trigger for adjacent walls to collapse. Unfortunately, this type of accident causes high rates of annual morbidities and financial loss. To prevent such calamities, it appears to be a necessity to identify contributed risk factors and the efficacy of supportive preparations in case of deep excavations.

In this research, after investigating previous related studies, a 27-question questionnaire was designed, using the Likert model. Questions were deducted from different risk factors of deep excavation to fit into eight categorizes including Geotechnics, Design, Management, Environment, Economic, Time, Laws, and Stability. The questionnaire was then completed by 137 individuals, and analyzed by structural equation modeling (SEM), via Lisrel application.

Based on the attained results, amongst several factors, the "Design" was considered to play the most important role in stabilizing the deep excavation. The quality of the materials used for stabilizing the deep excavation, had the highest level of importance upon related questions of the "Design" factor. Geotechnical factors, Time, Management, Environmental and Economic issues, took next stages. At last, the depth of the excavation and the stabilization method highlighted lower importances.

In conclusion, by considering the importance of risk factors in deep excavations and stabilization methods, a brighter future with fewer rates of constructional accidents is promised.

Keywords: Deep Excavation, Risk, Prioritization, Lisrel, Structural Equation Modeling (SEM), Likert.

Cite this article as Naderi, M. R. and Safehian, M. (2026). Identification and Prioritization of Deep Excavation Risks in Tehran via Structural Equation Method. (e245866). Civil and Project, 8(6), e245866 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.586591.1452>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

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

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

*Corresponding author E-mail address: safehian@iaui.ir



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

شناسایی و اولویت بندی ریسک های گودبرداری عمیق در شهر تهران با روش معادلات ساختاری

محمدرضا نادری^۱، مجید صافحیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۲۰ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۲۹ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۵

چکیده

گسترش ساخت و سازهای شهری، محدودیت توسعه مساحت شهر تهران و نیاز به بهره‌برداری از فضاهای زیرسطحی، موجب افزایش اجرای گودبرداری‌های عمیق در سال‌های اخیر شده است. با افزایش عمق گودبرداری، احتمال ناپایداری دیواره‌ها و بروز خسارات جانی و مالی ناشی از ریزش گود افزایش می‌یابد؛ از این‌رو شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر کاهش ریسک این پروژه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این پژوهش، شناسایی و رتبه‌بندی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ریسک گودبرداری‌های عمیق در شهر تهران با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری است. در این راستا، پس از بررسی مطالعات پیشین و شناسایی عوامل اثرگذار، پرسشنامه‌ای مشتمل بر ۲۷ سؤال در قالب هشت گروه ریسک شامل عوامل ژئوتکنیکی، طراحی، مدیریتی، محیطی، اقتصادی، زمانی، قانونی و پایداری‌سازی تدوین شد. داده‌های پژوهش از طریق تکمیل پرسشنامه توسط ۱۳۷ نفر از متخصصان و فعالان حوزه ساخت و ساز جمع‌آوری گردید. سپس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار لیزرل و روش مدل‌سازی معادلات ساختاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد عامل طراحی بیشترین تأثیر را بر کاهش ریسک و افزایش پایداری گودهای عمیق دارد. پس از آن، عوامل ژئوتکنیکی، زمانی، مدیریتی، محیطی و اقتصادی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین در میان شاخص‌های مرتبط با طراحی، کیفیت مصالح مورد استفاده در سازه نگهبان مهم‌ترین عامل مؤثر بر پایداری گود شناخته شد. یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که تمرکز بر بهبود فرآیند طراحی، کنترل کیفیت مصالح و توجه به شرایط ژئوتکنیکی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش حوادث ناشی از گودبرداری‌های عمیق ایفا کند.

کلمات کلیدی: گودبرداری عمیق، ریسک، رتبه بندی، لیزرل، مدل‌سازی معادلات ساختاری، لیکرت.

۱- مقدمه

رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی در دهه‌های اخیر، همراه با محدودیت توسعه مساحت شهرها و محدودیت‌های موجود در افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، موجب افزایش بهره‌برداری از فضاهای زیرسطحی و در نتیجه افزایش اجرای گودبرداری‌های عمیق در مناطق شهری شده است. همزمان با توسعه این فعالیت‌ها، وقوع حوادث ناشی از ناپایداری گودها به یکی از چالش‌های مهم پروژه‌های عمرانی تبدیل شده است. هر ساله ریزش گودهای ساختمانی خسارات مالی قابل توجهی را به پروژه‌ها و ساختمان‌های مجاور تحمیل می‌کند و در مواردی نیز منجر به آسیب دیدگی یا فوت کارگران و شهروندان می‌شود. از این رو، تأمین پایداری دیواره‌های گود در طول دوره اجرای پروژه و تا زمان تکمیل سازه نهایی، از مهم‌ترین الزامات فنی و ایمنی در پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌رود.

گودبرداری یکی از پرریسک‌ترین فعالیت‌های اجرایی در صنعت ساخت‌وساز است. رفتار خاک در حین حفاری تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که بسیاری از آن‌ها ماهیتی متغیر و غیرقابل پیش‌بینی دارند. خاک به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود، پس از برداشت بخشی از توده خاک، تمایل به جابه‌جایی و پر کردن فضای خالی ایجاد شده دارد و این تمایل با افزایش عمق گودبرداری تشدید می‌شود. علاوه بر این، تغییرات رطوبتی ناشی از بارندگی، نشت تأسیسات آب و فاضلاب، تغییر سطح آب زیرزمینی یا وجود قنوات می‌تواند موجب تغییر خواص مکانیکی خاک و در نتیجه تغییر رفتار آن در برابر بارگذاری و حفاری شود.

در محیط‌های شهری، شرایط پیچیده‌تر نیز می‌شود. وجود تأسیسات مدفون نظیر خطوط آب، فاضلاب، گاز و کابل‌های برق، فرسودگی زیرساخت‌های شهری، حضور ساختمان‌های مجاور و اعمال بارهای استاتیکی و دینامیکی ناشی از ترافیک و فعالیت‌های کارگاهی، از جمله عواملی هستند که می‌توانند پایداری گود را تحت تأثیر قرار دهند. علاوه بر عوامل فنی و ژئوتکنیکی، کیفیت طراحی، روش اجرای سازه نگهبان، تخصص عوامل اجرایی، کیفیت مصالح مصرفی، شرایط مدیریتی پروژه و محدودیت‌های اقتصادی نیز در میزان موفقیت عملیات گودبرداری و پایداری نقش تعیین‌کننده‌ای دارند.

با توجه به تعدد عوامل مؤثر بر ایمنی و پایداری گودهای عمیق، شناسایی و اولویت‌بندی این عوامل برای برنامه‌ریزی صحیح، تخصیص بهینه منابع و کاهش ریسک‌های پروژه ضروری است. در بسیاری از پروژه‌ها، محدودیت منابع مالی و اجرایی وجود دارد و تصمیم‌گیری در خصوص محل تمرکز اقدامات کنترلی، نیازمند شناخت میزان اهمیت نسبی عوامل خطر است. از این منظر، اولویت‌بندی ریسک‌ها می‌تواند به کاهش خسارات مالی، افزایش ایمنی و بهبود مدیریت پروژه‌های گودبرداری کمک کند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هرچند عوامل مؤثر بر پایداری گود و مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمانی در پژوهش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری برای شناسایی و رتبه‌بندی همزمان عوامل مؤثر بر ریسک گودبرداری‌های عمیق در شهر تهران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های مؤثر بر گودبرداری‌های عمیق در شهر تهران و با بهره‌گیری از مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار لیزرل انجام شده است.

شکاف اصلی پژوهش حاضر در دو بعد قابل بیان است. نخست، تاکنون مطالعه‌ای که به طور مشخص ریسک‌های مؤثر بر پایداری گودهای عمیق شهری در شهر تهران را با رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری بررسی و اولویت‌بندی کرده باشد، مشاهده نشد. دوم، در اغلب مطالعات مهندسی عمران و مدیریت ساخت، روش معادلات ساختاری کمتر برای تحلیل ریسک‌های اجرایی پروژه‌های ساختمانی به کار گرفته شده است؛ در حالی که این روش امکان بررسی همزمان متغیرهای پنهان، ارزیابی خطای اندازه‌گیری، تحلیل روابط علی میان سازه‌ها و تعیین میزان تأثیر مستقیم عوامل مختلف بر متغیر هدف را فراهم می‌سازد.

از این رو، نوآوری پژوهش حاضر در تلفیق مفاهیم مدیریت ریسک گودبرداری با مدل سازی معادلات ساختاری و به کارگیری نرم افزار لیزرل برای تحلیل و اولویت بندی عوامل مؤثر بر پایدارسازی گودهای عمیق شهری است. این رویکرد علاوه بر شناسایی عوامل ریسک، امکان تبیین ساختار روابط میان عوامل ژئوتکنیکی، طراحی، مدیریتی، محیطی، اقتصادی و زمانی و تعیین میزان اثرگذاری هر یک بر پایدارسازی گود را فراهم کرده است

در نهایت، برخلاف روش های متداول رتبه بندی ریسک که صرفاً به تعیین اهمیت عوامل می پردازند، مدل معادلات ساختاری امکان بررسی همزمان مدل اندازه گیری و مدل ساختاری، کنترل خطای اندازه گیری و تحلیل روابط علی میان عوامل ریسک را فراهم می کند.

۲- مرور ادبیات

مطالعات انجام شده در حوزه گودبرداری های عمیق نشان می دهد که پایداری گود و کنترل ریسک های مرتبط با آن تحت تأثیر مجموعه ای از عوامل ژئوتکنیکی، اجرایی، مدیریتی و محیطی قرار دارد. بخش قابل توجهی از تحقیقات بر نقش ویژگی های مکانیکی و هیدرولیکی خاک در عملکرد سازه های نگهبان متمرکز بوده اند.

آئینی (۱۳۹۵) نشان داد که خصوصیات شیمیایی خاک و پدیده سیمان تاسیون بین ذرات می تواند موجب افزایش چسبندگی و مقاومت برشی خاک شده و در نتیجه پایداری شیب ها و گودها را بهبود بخشد (Aini, 2016). همچنین، کروپا و پراساد (۲۰۲۲) افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را از عوامل مؤثر در کاهش تغییر شکل دیواره و افزایش ضریب ایمنی سیستم های میخ کوبی شده معرفی کردند (Krupa & Prasad, 2022). نتایج تحقیقات فرخزاد و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داد که کاهش چسبندگی خاک، به ویژه در اثر نفوذ آب، می تواند منجر به افزایش جابه جایی جانبی و کاهش ایمنی گود شود (Farokhzad et al., 2020).

عامل آب زیرزمینی و شرایط زهکشی نیز در بسیاری از پژوهش ها به عنوان یکی از مهم ترین عوامل خطر شناخته شده است. قاسمی تبار (۱۳۹۵) نشان داد که افزایش تراز آب زیرزمینی موجب کاهش ضریب اطمینان گود شده و آثار منفی آن حتی با افزایش تعداد و طول میخ ها نیز به طور کامل جبران نمی شود (Ghasemi-Tabar, 2016). همچنین اعتمادی نیا و افشاری (۱۴۰۲) در مطالعه پروژه های گودبرداری شهری مشهد، جریان های آب زیرسطحی، چاه ها و آبراهه های مدفون را از مهم ترین ریسک های مؤثر بر پروژه معرفی کردند (Etemadi-Nia & Afshari, 2023). بودانیا و آرورا (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که کارایی روش نیلینگ در شرایط دارای نشت زیاد آب یا خاک های نامناسب با محدودیت هایی مواجه است (Budania & Arora, 2016).

وانگ، گوئو، لین و ژائو (۲۰۲۴) در یک مطالعه مروری جامع، فناوری های مدیریت ریسک در گودبرداری های عمیق واقع در مناطق دارای سطح آب زیرزمینی بالا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حضور آب زیرزمینی و برهم کنش همزمان میدان تنش و جریان تراوش، یکی از مهم ترین عوامل افزایش ریسک در گودبرداری های عمیق محسوب می شود. نویسندگان بیان کردند که مدیریت ریسک این پروژه ها بر سه محور اصلی شامل شناسایی ریسک، ارزیابی ریسک و کنترل ریسک استوار است و تأکید نمودند که توسعه مدل های ارزیابی ریسک مبتنی بر روابط علی میان عوامل خطر، استفاده از سیستم های پایش لحظه ای و به کارگیری فناوری های هوشمند می تواند نقش مؤثری در کاهش حوادث و بهبود ایمنی گودبرداری ها داشته باشد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که عوامل ژئوتکنیکی، شرایط هیدروژئولوژیکی، عملکرد سیستم زهکشی و کنترل تغییر شکل های ناشی از گودبرداری از مهم ترین مؤلفه های مؤثر بر ایمنی پروژه های گودبرداری عمیق هستند (Wang et al., 2024).

بخش دیگری از مطالعات به بررسی عملکرد سازه های نگهبان و پارامترهای طراحی اختصاص یافته است. قره و ظریف راد (۱۳۹۳) اهمیت تعیین دقیق پارامترهای مقاومتی خاک از جمله چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را در طراحی سیستم های نیلینگ و انکراژ مورد تأکید قرار دادند (Ghareh & Zarif-Rad, 2014). همچنین صابرمهانی و غلامی نیا (۱۳۹۶) نشان دادند

که طول میخ، زاویه استقرار و آرایش میخ‌ها از عوامل تعیین‌کننده در افزایش ضریب ایمنی و کاهش تغییرشکل دیواره گود هستند (Sabermahani & Gholaminia, 2017). غفارپور جهرمی و همکاران (۲۰۲۲)، پارامترهایی نظیر استحکام پیوند دوغاب، فاصله میخ‌ها و مقاومت کششی اعضا را در عملکرد سیستم‌های پایدارسازی مؤثر دانستند (Ghaffarpour Jahromi et al., 2022).

از منظر ایمنی و مدیریت ریسک، پژوهش‌های متعددی بر ضرورت شناسایی و اولویت‌بندی عوامل خطر تأکید کرده‌اند. در این راستا، اردشیر و مهاجری (۱۳۹۵) گودبرداری را یکی از پرریسک‌ترین فعالیت‌های صنعت ساخت‌وساز معرفی کردند (Ardeshir & Mohajeri, 2016). عبادتی و برمایه‌ور (۱۳۹۷) نیز ریسک‌های فنی، اجرایی و ایمنی را مهم‌ترین عوامل خسارت‌زا در مرحله گودبرداری دانسته و نقش شرایط خاک، بارهای دینامیکی و ساختمان‌های مجاور را برجسته کردند (Ebadati & Barmayehvar, 2018). همچنین سلامی (۱۴۰۰) وجود تأسیسات زیرزمینی و خطر ریزش خاک را از مهم‌ترین مخاطرات پروژه‌های گودبرداری شهری گزارش کرد (Salami, 2021).

مطالعات مرتبط با حوادث گودبرداری نشان می‌دهد که عوامل مدیریتی و سازمانی نیز سهم قابل توجهی در بروز حوادث دارند. نقشبندی و احمدی (۱۴۰۴) مدیریت ریسک، ارزیابی صلاحیت عوامل اجرایی، نظارت مستمر، آموزش نیروی انسانی و استقرار نظام HSE را از مهم‌ترین عوامل کاهش حوادث معرفی کردند (Naghshbandi & Ahmadi, 2025). همچنین شریفی و همکاران (۱۴۰۴) نشان دادند که عدم توجه کافی به شرایط لرزه‌خیزی منطقه، تأسیسات زیرزمینی و محل انباشت مصالح از مهم‌ترین شکاف‌های موجود در مدیریت ریسک پروژه‌های گودبرداری است (Sharifi et al., 2025).

در سطح کلان، گل‌احمر و هروی (۱۳۹۵) ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری را در گروه‌های فنی-ایمنی، مدیریتی، اقتصادی-مالی، محیط‌زیستی، حقوقی و تأسیسات شهری طبقه‌بندی کردند که بیانگر ماهیت چندبعدی ریسک در این پروژه‌ها است (Golshahmar & Haravi, 2016). همچنین داربور و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه پروژه متروی تبریز، ریسک‌ها را در شش حوزه ژئوتکنیکی، طراحی، منابع انسانی، ماشین‌آلات، مدیریت و مراحل اجرایی دسته‌بندی کردند که بر ضرورت نگرش جامع به مدیریت ریسک پروژه‌های زیرزمینی تأکید دارد (Darbor et al., 2025).

برخی پژوهش‌ها بر توسعه فناوری‌های نوین و ارتقای ایمنی متمرکز بوده‌اند. میخائیلوف و باگیوبرین (۲۰۲۶) استفاده از حسگرهای لیدار در ماشین‌آلات حفاری را عاملی مؤثر در کاهش خطاهای عملیاتی و بهبود تشخیص مخاطرات معرفی کردند (Mikhailov & Bouguebrine, 2026). همچنین خوش‌ظاهر و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی، استفاده از الیاف بازافزایی در شاتکریت مسلح را راهکاری مناسب برای کاهش هزینه‌های اجرایی و حفظ عملکرد فنی سیستم‌های نگهداری دانستند (Khoshzaher et al., 2025).

در مجموع، مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پایداری گود حاصل برهم‌کنش پیچیده عوامل ژئوتکنیکی، هیدرولوژیکی، سازه‌ای، اجرایی و مدیریتی است. با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه شناسایی و ارزیابی ریسک‌های گودبرداری، مطالعات محدودی روابط متقابل این عوامل را به‌صورت همزمان و با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری بررسی کرده‌اند. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که ریسک گودبرداری نتیجه اثر متقابل مجموعه‌ای از عوامل طراحی، اجرایی، مدیریتی و محیطی است و بررسی جداگانه هر عامل نمی‌تواند تصویر کاملی از وضعیت ریسک پروژه ارائه دهد (Huang et al., 2025). از طرفی، به دلیل ماهیت چندبعدی و عدم قطعیت موجود در پروژه‌های گودبرداری، استفاده از مدل‌های تحلیلی پیشرفته برای تلفیق عوامل مختلف و ارزیابی جامع ریسک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (An et al., 2025). با وجود توسعه مدل‌های نوین ارزیابی ریسک، همچنان نیاز به روش‌هایی وجود دارد که بتوانند روابط علی و میزان اثرگذاری نسبی عوامل مختلف را به‌صورت همزمان تحلیل کنند؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است (He et al., 2025). بنابراین، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد مدلیابی معادلات ساختاری در شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های گودبرداری عمیق، تلاش می‌کند بخشی از این خلأ پژوهشی را پوشش دهد.

۳- روش انجام تحقیق

به منظور شناسایی عوامل ریسک مؤثر بر پروژه‌های گودبرداری عمیق، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای گسترده‌ای بر روی مقالات علمی، پایان‌نامه‌ها، آیین‌نامه‌های فنی، دستورالعمل‌های اجرایی و گزارش‌های مرتبط با حوادث گودبرداری انجام شد. در این مرحله، مجموعه‌ای اولیه از ریسک‌های مطرح‌شده در مطالعات پیشین استخراج گردید.

در گام بعد، فهرست اولیه ریسک‌ها توسط گروهی از خبرگان شامل متخصصان ژئوتکنیک، مهندسان عمران، مدیران پروژه و افراد دارای سابقه اجرایی در پروژه‌های گودبرداری مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مرحله، ارزیابی میزان ارتباط، اهمیت و کاربرد عوامل شناسایی‌شده در شرایط پروژه‌های گودبرداری عمیق شهر تهران بود. بر اساس نظرات خبرگان، برخی شاخص‌ها حذف، تعدیل یا ادغام شده و در نهایت مجموعه‌ای از شاخص‌های نهایی برای استفاده در پژوهش تعیین گردید.

پس از نهایی‌سازی شاخص‌ها، عوامل ریسک در قالب سازه‌های اصلی شامل عوامل ژئوتکنیکی، طراحی، مدیریتی، محیطی، اقتصادی، زمانی و عوامل مرتبط با عملیات پایدارسازی طبقه‌بندی شدند. سپس پرسشنامه پژوهش بر اساس این سازه‌ها طراحی گردید. روایی محتوایی پرسشنامه از طریق بررسی و تأیید خبرگان حوزه تخصصی ارزیابی شد و پس از اعمال اصلاحات لازم، نسخه نهایی پرسشنامه جهت جمع‌آوری داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

در نهایت، داده‌های گردآوری‌شده از پاسخ‌دهندگان با استفاده از روش مدل‌یابی معادلات ساختاری و نرم‌افزار لیزرل تحلیل شد تا ضمن ارزیابی مدل اندازه‌گیری، میزان اثرگذاری و اولویت هر یک از عوامل ریسک بر پایدارسازی گودهای عمیق تعیین گردد. فرایند شناسایی و استخراج شاخص‌ها در جدول ۱ آمده‌است.

جدول ۱: جدول فرآیند استخراج شاخص‌ها

مرحله	شرح فعالیت
۱	مرور ادبیات، مقالات، پایان‌نامه‌ها و آیین‌نامه‌های مرتبط
۲	استخراج اولیه عوامل ریسک گزارش‌شده در مطالعات پیشین
۳	بررسی عوامل توسط ۱۰ نفر از خبرگان
۴	حذف، ادغام یا اصلاح شاخص‌های مشابه
۵	طبقه‌بندی شاخص‌ها در سازه‌های اصلی
۶	تدوین پرسشنامه نهایی
۷	بررسی روایی و پایایی پرسشنامه
۸	تحلیل داده‌ها با مدل‌یابی معادلات ساختاری

طبقه بندی ریسک های پروژه گودبرداری

ریسک های یک پروژه را می توان از زوایای مختلفی بررسی کرد. یکی از این تقسیم بندی ها شامل موارد ذیل است.

ریسک های فنی و مهندسی^۱

ریسک ناپایداری خاک^۲: احتمال ریزش دیواره های گودبرداری به دلیل عدم مقاومت کافی خاک و یا ناشی از نوع خاک محل گودبرداری.

ریسک آب های زیرزمینی^۳: نفوذ آب به داخل گود و ایجاد مشکلاتی مانند شسته شدن خاک یا افزایش فشار هیدرواستاتیک.

ریسک طراحی سیستم پایداری^۴: خطا در طراحی سیستم های مهاربندی یا دیواره های دیافراگمی و یا خطای طراحی در هریک از روشهای گودبرداری.

ریسک ناشی از کیفیت مصالح^۵

ریسک ناشی از عدم دقت در اجرای روش پایداری^۶

ریسک ناشی از تجهیزات و ماشین آلات مورد استفاده^۷

ریسک های ایمنی^۸

ریسک ریزش دیواره ها^۹: خطر ریزش ناگهانی دیواره های گودبرداری که می تواند منجر به آسیب های جانی و مالی شود.

ریسک سقوط اشیا یا افراد^{۱۰}: سقوط مصالح یا افراد به داخل گود.

ریسک گازهای خطرناک^{۱۱}: وجود گازهای سمی یا قابل اشتعال در عمق گود

ریسک های محیطی^{۱۲}

ریسک آلودگی خاک و آب^{۱۳}: انتشار آلاینده ها به دلیل گودبرداری در مناطق آلوده.

ریسک ارتعاشات و لرزش ها^{۱۴}: ایجاد لرزش های ناشی از عملیات گودبرداری که می تواند به سازه های مجاور آسیب برساند.

ریسک تغییرات آب و هوایی^{۱۵}: تأثیر باران های شدید یا سیل بر پایداری گود.

ریسک ناشی از فاصله گود از سازه های مجاور^{۱۶}

ریسک آلودگی صوتی و گرد و غبار^{۱۷}

¹Technical and Engineering Risks

²Soil Instability Risk

³Groundwater Risk

⁴Stabilization System Design Risk

⁵The quality of the materials Risk

⁶Accuracy in the implementation of the stabilization method

⁷Equipment and machinery Risk

⁸Safety Risk

⁹Collapse Risk

¹Falling Objects/Personnel Risk

¹Hazardous Gases Risk

¹Environmental Risks

¹Soil and Water Contamination Risk

¹Vibration Risk

¹Weather Risk

¹The distance of the pit from the adjacent structures Risk

¹Noise and Dust pollution Risk

ریسک‌های مالی و زمانی^۱

ریسک افزایش هزینه‌ها^۲: افزایش غیرمنتظره هزینه‌ها به دلیل مشکلات فنی یا تاخیر در اجرا.

ریسک تاخیر در پروژه^۳: تأخیر در پیشرفت پروژه به دلیل مشکلاتی مانند شرایط نامناسب خاک یا آب‌های زیرزمینی.

ریسک خسارت به سازه‌های مجاور^۴

ریسک مربوط به بودجه تخصیصی به پروژه^۵

ریسک‌های قانونی و قراردادی^۶

ریسک عدم رعایت مقررات^۷: عدم رعایت قوانین و استانداردهای ایمنی و محیط زیست.

ریسک اختلافات قراردادی^۸: اختلاف با پیمانکاران یا ذینفعان پروژه

ریسک‌های انسانی و مدیریتی^۹

ریسک خطای انسانی: اشتباهات پرسنل در اجرای عملیات گودبرداری.

ریسک کمبود نیروی متخصص^{۱۰}: عدم وجود نیروهای ماهر برای اجرای صحیح پروژه.

ریسک مربوط به تجربه و مهارت پیمانکار و نیروی انسانی^{۱۱}

ریسک نظارت و کنترل کیفیت پروژه^{۱۲}

ریسک رعایت استاندارد های ایمنی^{۱۳}

قلمرو موضوعی، زمانی و مکانی پژوهش

قلمرو موضوعی پژوهش شامل شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های گودبرداری عمیق است. پژوهش حاضر در محدوده شهر تهران انجام شده است و داده‌های پژوهش در سال ۱۴۰۴ گردآوری شده و بررسی ریسک‌ها بر اساس تجربیات حاصل از پروژه‌های اجرا شده طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ صورت گرفته است.

روش پژوهش

¹Financial and Schedule Risks

²Cost Overrun Risk

³Project Delay Risk

⁴Damage to nearby structures Risk

⁵Budget allocated to the project Risk

⁶Legal and Contractual Risks

⁷Regulatory Compliance Risk

⁸Contractual Dispute Risk

⁹Human and Management Risks

¹Human Error Risk

¹Lack of Skilled Personnel Risk

¹Experience and skill of the contractor and manpower Risk

¹Monitoring and quality control of the project Risk

¹Compliance with safety standards Risk

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش گردآوری داده‌ها، توصیفی - پیمایشی است. همچنین از منظر تحلیل داده‌ها، پژوهش حاضر از روش مدلیابی معادلات ساختاری برای بررسی روابط میان متغیرهای پژوهش استفاده می‌کند.

جامعه آماری و نمونه پژوهش

جامعه آماری پژوهش شامل متخصصان، مشاوران، پیمانکاران، مدیران پروژه و کارشناسان فعال در حوزه گودبرداری عمیق شهر تهران بود. با توجه به استفاده از روش مدلیابی معادلات ساختاری، تعیین حجم نمونه کافی برای برآورد پایدار پارامترهای مدل ضروری است. بر اساس توصیه‌های هیر و همکاران (Hair et al., 2019) و کلاین (Kline, 2023)، حداقل حجم نمونه در مدل‌های معادلات ساختاری می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ برابر تعداد شاخص‌های مشاهده‌پذیر در نظر گرفته شود. از آنجا که پرسشنامه پژوهش شامل ۲۷ گویه بود، حداقل حجم نمونه مورد نیاز برابر با ۱۳۵ نفر (۲۷×۵) برآورد گردید.

علاوه بر این، کومری و لی (Comrey & Lee, 2013) حجم نمونه ۱۰۰ نفر را ضعیف، ۲۰۰ نفر را قابل قبول و ۳۰۰ نفر را مناسب برای تحلیل‌های عاملی معرفی کرده‌اند. بنابراین حجم نمونه مورد استفاده در این پژوهش از حداقل مقدار پیشنهادی برای اجرای مدل معادلات ساختاری فراتر بوده و برای انجام تحلیل عاملی تأییدی و برآورد روابط ساختاری کفایت داشته‌است.

در نهایت تعداد ۱۳۷ پرسشنامه قابل استفاده جمع‌آوری و تحلیل شد که از حداقل حجم نمونه مورد نیاز فراتر بوده و شرایط لازم برای اجرای تحلیل عاملی تأییدی و برآورد مدل معادلات ساختاری را فراهم کرده است. همچنین با توجه به معناداری اغلب ضرایب عاملی و روابط ساختاری مدل، می‌توان نتیجه گرفت که حجم نمونه گردآوری‌شده برای دستیابی به برآوردهای قابل قبول و تفسیر نتایج پژوهش کفایت داشته است. نمونه‌گیری در مرحله نخست به صورت هدفمند و از میان افراد دارای تجربه تخصصی در زمینه گودبرداری عمیق انجام شد. سپس برای افزایش حجم نمونه از روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی استفاده گردید.

گردآوری داده‌ها

در این مرحله از کتب تخصصی، مقالات علمی، استانداردها و آئین‌نامه‌های مرتبط با گودبرداری و مدیریت ریسک استفاده شد. به منظور تکمیل فهرست ریسک‌ها و بررسی تناسب گویه‌های پرسشنامه، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با متخصصان حوزه گودبرداری انجام شد. در نهایت، ابزار اصلی گردآوری داده‌ها پرسشنامه براساس ریسک‌های استخراج‌شده از مطالعات کتابخانه‌ای و نظرات خبرگان تدوین گردید. سوالات پرسشنامه بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت تنظیم شد.

روایی و پایایی ابزار پژوهش

به منظور بررسی روایی محتوا، پرسشنامه در اختیار ۱۰ نفر از متخصصان حوزه گودبرداری قرار گرفت و شاخص روایی محتوا CVR^۱ محاسبه شد. و روایی محتوایی پرسشنامه، تأیید شد. فرمول CVR در رابطه ریاضی (۱) آمده‌است.

$$CVR = \frac{n_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه، n_e تعداد متخصصانی است که به گزینه ی ضروری پاسخ داده اند و N تعداد کل متخصصان است.

¹ Content Validity Ratio

برای سنجش پایایی پرسشنامه از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد و اعتبار سازه‌ها با استفاده از تحلیل عاملی تاییدی CFA^۱ و با کمک نرم افزار لیزرل کنترل گردید.

روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش داده‌ها در دو سطح توصیفی و استنباطی مورد تحلیل قرار گرفتند. در بخش توصیفی از شاخص‌هایی نظیر فراوانی، درصد، میانگین و انحراف معیار استفاده شد. در بخش استنباطی، مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار لیزرل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مدل از شاخص‌های بار عاملی، آماره t ، کای دو بهنجار (χ^2/df)، RMSEA و سایر شاخص‌های برازش مدل استفاده شد. پس از تأیید مدل اندازه‌گیری، روابط بین سازه‌های پژوهش بررسی و ریسک‌های مؤثر بر پروژه‌های گودبرداری عمیق اولویت‌بندی شدند.

۴- نتایج و تحلیل داده‌ها

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان

در این پژوهش، ۱۳۷ پرسشنامه معتبر جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت. پرسشنامه شامل ۲۷ گویه بود که بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت از «کاملاً مخالفم» تا «کاملاً موافقم» طراحی شده بود. در جدول ۲ اطلاعات آمار توصیفی آورده شده است.

نتایج آمار توصیفی نشان داد ۸۰ درصد پاسخ‌دهندگان مرد و ۲۰ درصد زن بودند. همچنین بیشترین فراوانی سنی مربوط به گروه ۳۵ تا ۴۵ سال و کمترین فراوانی مربوط به افراد کمتر از ۲۵ سال بود. از نظر سابقه کاری، ۳۵٫۸ درصد از مشارکت‌کنندگان بیش از ۲۰ سال سابقه فعالیت حرفه‌ای داشتند که نشان‌دهنده برخورداری نمونه آماری از تجربه کافی در زمینه موضوع پژوهش است.

از نظر سطح تحصیلات، بیشترین فراوانی مربوط به افراد دارای مدرک کارشناسی ارشد (۵۱٫۱ درصد) و پس از آن کارشناسی (۴۱٫۶ درصد) بود. همچنین عمده پاسخ‌دهندگان دارای سابقه فعالیت در حوزه پیمانکاری و مشاوره بودند که مجموعاً بیش از ۷۰ درصد جامعه نمونه را تشکیل می‌دادند.

¹ Confirmatory Factor Analysis

جدول ۲: اطلاعات آمار توصیفی شرکت کنندگان

متغیر مورد بررسی	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجمعی
جنسیت	مرد	۱۱۰	۸۰
	زن	۲۷	۲۰
سن	زیر ۲۵ سال	۶	۴,۴
	از ۲۵ تا ۳۵ سال	۳۶	۲۶,۳
	از ۳۵ تا ۴۵ سال	۴۰	۲۹,۲
	از ۴۵ تا ۵۵ سال	۲۴	۱۷,۵
	بیش از ۵۵ سال	۳۱	۲۲,۶
سابقه کار	زیر ۵ سال	۱۸	۱۳,۱
	از ۵ تا ۱۰ سال	۳۰	۲۱,۹
	از ۱۰ تا ۱۵ سال	۱۲	۸,۸
	از ۱۵ تا ۲۰ سال	۲۸	۲۰,۴
	بیش از ۲۰ سال	۴۹	۳۵,۸
مدرك تحصیلی	کاردانی	۴	۲,۹
	کارشناسی	۵۷	۴۱,۶
	کارشناسی ارشد	۷۰	۵۱,۱
	دکتری	۶	۴,۴
تجربه کاری	پیمانکار	۸۷	۴۲,۰
	مشاور	۶۱	۲۹,۵
	کارفرما	۱۸	۸,۷
	مجری	۳۱	۱۵
	سایر (دانشجو، محقق...)	۱۰	۴,۸

معرفی سازه‌های پژوهش

بر اساس مطالعات پیشین و بررسی ادبیات موضوع، متغیرهای اصلی شامل عوامل ژئوتکنیکی (GEO)، عوامل طراحی (DSN)، عوامل مدیریتی (MNG)، عوامل محیطی (ENV)، عوامل اقتصادی (ECN)، عوامل زمانی (TIM) و عوامل قانونی و قراردادی (LAW) به عنوان متغیرهای مستقل و سازه پایداری گود (STBL) به عنوان متغیر وابسته در مدل تحقیق تعریف شدند. هر یک از متغیرهای مکنون توسط مجموعه‌ای از متغیرهای مشاهده‌پذیر (گویه‌های پرسشنامه) اندازه‌گیری شدند. متغیرهای مکنون و متغیرهای مشاهده‌پذیر در جدول ۳ آورده شده‌است.

جدول ۳: معرفی و نامگذاری متغیرهای مکنون و متغیرهای مشاهده‌پذیر

شماره سوال	موضوع	متغیر مشاهده‌پذیر	موضوع	متغیر مکنون	ردیف
۱	نوع خاک	geo1	موارد ژئوتکنیک (Geotechnic)	GEO	۱
۲	مقاومت خاک محل	geo2			
۳	پایین بودن سطح آب زیرزمینی	geo3			
۴	لایه‌های زمین	geo4			
۵	افزایش عمق	dsn1	موارد طراحی (Design)	DSN	۲
۶	روش گودبرداری	dsn2			
۷	کیفیت مصالح	dsn3			
۸	تجربه و مهارت افراد	mng1	موارد مدیریتی (Managements)	MNG	۳
۹	نظارت صحیح	mng2			
۱۰	کنترل کیفی	mng3			
۱۱	استفاده از ماشین‌آلات صحیح	mng4			
۱۲	جلوگیری از نفوذ آب‌های سطحی	env1	شرایط محیطی (Environment)	ENV	۴
۱۳	دوری از ترافیک و ارتعاشات آن	env2			
۱۴	شرایط آب‌وهوایی	env3			
۱۵	هزینه‌های جبران خسارت به سازه‌های مجاور	ecn1	شرایط اقتصادی (Economic)	ECN	۵
۱۶	بودجه تخصیصی	ecn2			
۱۷	افزایش هزینه پروژه به دلیل وقوع ریسک‌های ناشناخته	ecn3			
۱۸	جلوگیری از ریسک غیرمنتظره در جلوگیری از تاخیر پروژه	tim1	اثر زمان (Time)	TIM	۶
۱۹	تاخیر در تامین مصالح	tim2			
۲۰	تاخیر در تامین نیروی انسانی	tim3			
۲۱	تاخیر در تامین منابع مالی	tim4			
۲۲	رعایت استانداردها و قوانین	law1	اثر موارد قانونی (Law)	LAW	۷
۲۳	توجه به قراردادهای پیمانکاران	law2			
۲۴	دقت در اجرا	stb1	پایداری سازه گود (Stability)	STBL	۸
۲۵	استفاده از پیمانکار ماهر	stb2			
۲۶	فاصله گود از سازه‌های مجاور	stb3			
۲۷	تاخیر در اجرا	stb4			

ارزیابی مدل اندازه‌گیری

برای ارزیابی روایی سازه‌ها، تحلیل عاملی تأییدی (CFA) با استفاده از نرم‌افزار لیزرل انجام شد. شاخص‌های برازش، بارهای عاملی استاندارد و مقادیر آماره t برای هر یک از سازه‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که پس از اصلاح مدل، تمامی سازه‌ها از برازش قابل قبول برخوردار بودند. مقادیر آماره t برای اغلب گویه‌ها بیشتر از مقدار بحرانی ۱٫۹۶ بوده و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بودند.

در میان سازه‌های مورد بررسی، گویه $tim1$ به دلیل عدم معناداری آماری ($t < 1.96$) از مدل حذف شد. همچنین سازه عوامل قانونی و قراردادی (LAW) به دلیل عدم همگرایی مدل و ناکافی بودن تعداد گویه‌ها از تحلیل نهایی کنار گذاشته شد.

در جدول ۴، مقدار بارهای عاملی λ (لامبدا)، مقدار خطای مشاهده پذیر ε (اپسیلن) و مقدار T -value به تفکیک متغیرهای مکنون و مشاهده‌پذیر آورده شده‌است.

عوامل ژئوتکنیکی

نتایج تحلیل عاملی تأییدی نشان داد که تمامی گویه‌های سازه ژئوتکنیکی دارای بار عاملی معنادار هستند. بیشترین بار عاملی مربوط به «مقاومت خاک محل» ($\lambda = 0.92$) بود که بیانگر اهمیت بالای این عامل در پایداری گود است.

عوامل طراحی

در سازه طراحی، «کیفیت مصالح» با بار عاملی ۰٫۶۷، بیشترین تأثیر را در تبیین این سازه داشت. سایر گویه‌ها نیز از معناداری آماری برخوردار بودند.

عوامل مدیریتی

در بین عوامل مدیریتی، «نظارت صحیح بر اجرا» ($\lambda = 0.84$) و «کنترل کیفی مراحل اجرا» ($\lambda = 0.81$) مهم‌ترین شاخص‌های این سازه بودند.

عوامل محیطی

نتایج نشان داد که «شرایط آب‌وهوایی و بارندگی» ($\lambda = 0.76$) بیشترین نقش را در تبیین عوامل محیطی مؤثر بر پایداری گود دارد.

عوامل اقتصادی

هر سه گویه اقتصادی دارای بار عاملی معنادار بودند. در این میان «بودجه تخصیصی پروژه» مهم‌ترین شاخص این سازه محسوب شد.

عوامل زمانی

پس از حذف گویه $tim1$ ، مدل زمانی از برازش مطلوب برخوردار شد. نتایج نشان داد که «تأخیر در تأمین مصالح» و «تأخیر در تأمین نیروی انسانی» بیشترین نقش را در تبیین این سازه دارند.

پایداری

در پایداری، گویه‌های «استفاده از پیمانکار ماهر» ($\lambda=0.84$) و «دقت در اجرای پایداری» ($\lambda=0.66$) بیشترین سهم را در تبیین متغیر وابسته داشتند. گویه «فاصله گود از سازه‌های مجاور» به دلیل مقدار پایین آماره t از قدرت تبیین کمتری برخوردار بود.

جدول ۴: مقادیر بارهای عاملی، مقادیر خطا و مقادیر T-Value به تفکیک متغیرها

متغیر مکنون	متغیر مشاهده‌پذیر	موضوع	λ (لامبدا)	ε (اپسین)	T-Value
GEO	geo1	نوع خاک	۰,۲۹	۰,۸۵	۴,۱۵
	geo2	مقاومت خاک محل	۰,۹۲	۰,۱۵	۷,۹۱
	geo3	پایین بودن سطح آب زیرزمینی	۰,۲۶	۰,۸۷	۳,۸۵
	geo4	لایه‌های زمین	۰,۵۹	۰,۶۶	۵,۸۸
DSN	dsn1	اثر افزایش عمق گودبرداری	۰,۶۰	۰,۶۴	۴,۶۰
	dsn2	اثر روش پایداری	۰,۴۲	۰,۸۳	۳,۸۰
	dsn3	نقش کیفیت مصالح	۰,۶۷	۰,۵۵	۴,۸۱
MNG	mng1	اثر تجربه و مهارت افراد	۰,۴۵	۰,۸	۴,۹۹
	mng2	تاثیر نظارت صحیح بر اجرا	۰,۸۴	۰,۲۹	۸,۵۲
	mng3	تاثیر کنترل کیفی مراحل	۰,۸۱	۰,۲۴	۸,۲۹
	mng4	استفاده از ماشین‌آلات مناسب	۰,۴۸	۰,۷۷	۴,۷۱
ENV	env1	تاثیر جلوگیری از نفوذ آب‌های سطحی	۰,۴۷	۰,۷۸	۴,۶۷
	env2	اثر دوری از ترافیک و تردد وسایل نقلیه	۰,۶۲	۰,۶۱	۵,۶۰
	env3	تاثیر شرایط آب‌وهوایی مانند بارندگی	۰,۷۶	۰,۴۲	۶,۲۵
ECN	ecn1	اثر جبران هزینه خسارت به سازه‌های مجاور	۰,۵۷	۰,۶۸	۳,۶۰
	ecn2	اثر بودجه تخصیصی پروژه	۰,۴۵	۰,۸۰	۳,۳۱
	ecn3	اثر کاهش هزینه ریسک‌های شناسایی شده	۰,۴۲	۰,۷۹	۳,۳۳
TIM	tim2	اثر تاخیر در تامین مصالح	۱,۱۴	۰,۳۱	۱۰,۲۷
	tim3	اثر تاخیر در تامین نیروی انسانی	۰,۵۵	۰,۷۰	۵,۹۹
	tim4	تاثیر تاخیر در تامین منابع مالی	۰,۵۶	۰,۶۹	۶,۰۸
STBL	stbl1	اثر دقت در اجرای پایداری	۰,۶۶	۰,۵۶	۴,۹۵
	stbl2	اثر استفاده از پیمانکار ماهر در پایداری	۰,۸۴	۰,۲۹	۵,۴۰
	stbl3	اثر رعایت فاصله گود از سازه‌های مجاور	۰,۳۵	۰,۸۸	۱,۳۱
	stbl4	اثر تاخیر در اجرای پایداری	۰,۳۲	۰,۹۰	۲,۲۵

در جدول ۵ ارزیابی روایی سازه بر اساس تحلیل عاملی تأییدی ارائه گردیده‌است. معیار پذیرش، بار عاملی $\lambda > 0.30$ و مقدار آماره t به صورت $t > 1.96$ می‌باشد.

جدول ۵: ارزیابی روایی سازه بر اساس تحلیل عاملی تأییدی

سازه	تعداد گویه	دامنه بارهای عاملی γ (گاما)	دامنه T-Value	وضعیت معناداری
GEO	۴	۰,۲۶ تا ۰,۹۲	۷,۹۱ تا ۳,۸۵	تأیید شد
DSN	۳	۰,۴۲ تا ۰,۶۷	۴,۸۱ تا ۳,۸۰	تأیید شد
MNG	۴	۰,۴۵ تا ۰,۸۴	۸,۵۲ تا ۴,۷۱	تأیید شد
ENV	۳	۰,۴۷ تا ۰,۷۶	۶,۲۵ تا ۴,۶۷	تأیید شد
ECN	۳	۰,۴۲ تا ۰,۵۷	۳,۶۰ تا ۳,۳۱	تأیید شد
TIM	۳	۰,۵۵ تا ۱,۱۴	۱۰,۲۷ تا ۵,۹۹	تأیید شد
STBL	۴	۰,۳۲ تا ۰,۸۴	۵,۴۱ تا ۱,۳۱	تأیید نسبی

نتایج نشان داد که اغلب گویه‌های پژوهش دارای بار عاملی مثبت و معنادار هستند و مقادیر آماره t برای اکثر روابط از مقدار بحرانی ۱,۹۶ فراتر رفته است. این نتایج بیانگر کفایت روایی سازه و تأیید ارتباط معنادار بین متغیرهای مشاهده‌پذیر و سازه‌های پنهان مدل است.

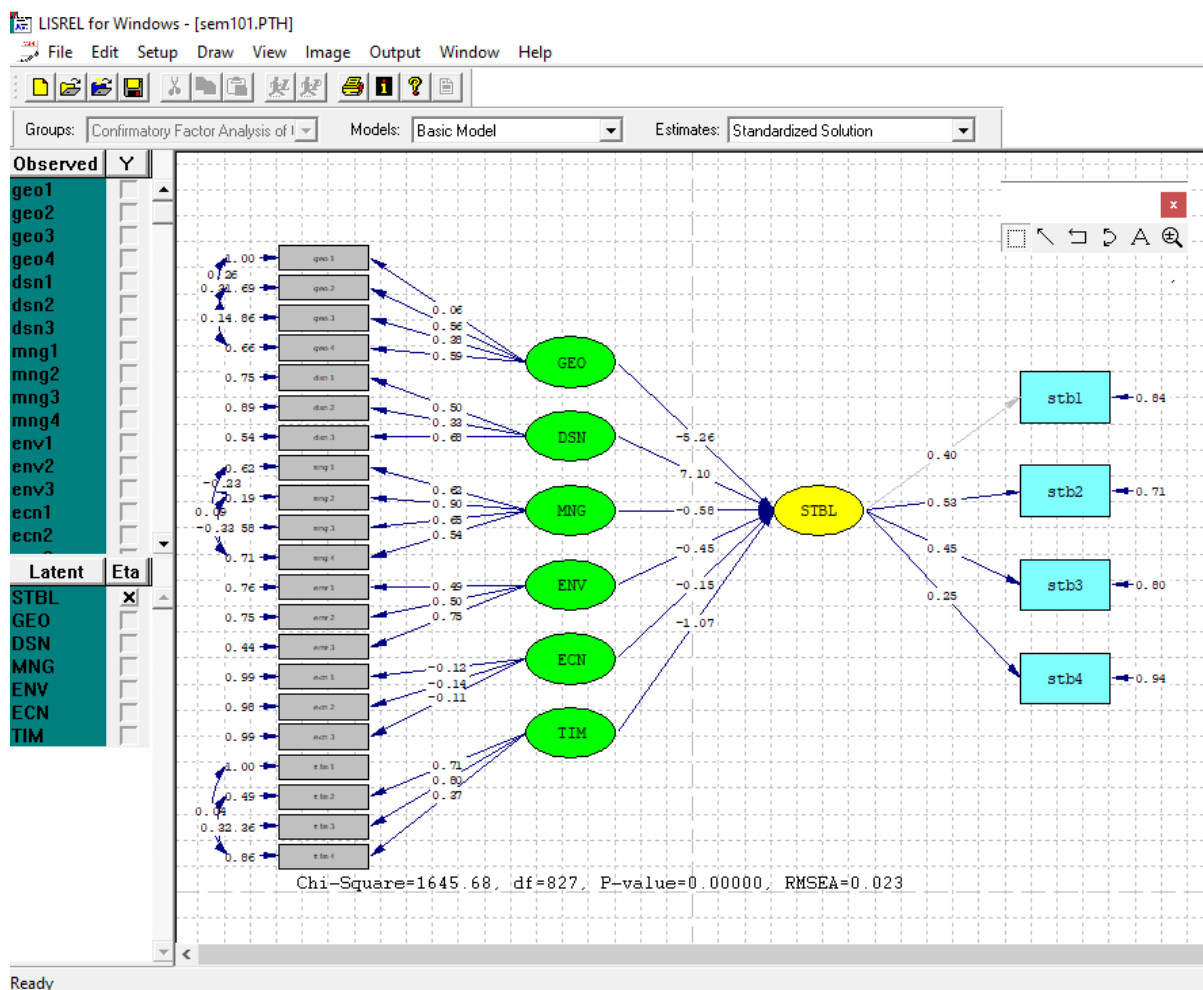
بررسی بارهای عاملی نشان داد که اکثر شاخص‌ها دارای ضرایب قابل قبول بوده و بیشترین سهم را در تبیین سازه‌های مربوطه داشته‌اند. تنها برخی از شاخص‌ها دارای بار عاملی نسبتاً پایین بودند که با وجود این، به دلیل معنادار بودن ضرایب مربوطه در مدل حفظ شدند. در مجموع نتایج تحلیل عاملی تأییدی، روایی سازه مدل اندازه‌گیری را مورد تأیید قرار می‌دهد.

ارزیابی مدل ساختاری

پس از تأیید مدل اندازه‌گیری، مدل ساختاری پژوهش به منظور بررسی تأثیر عوامل ژئوتکنیکی، طراحی، مدیریتی، محیطی، اقتصادی و زمانی بر پایداری گودهای عمیق مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل اولیه از برازش مناسبی برخوردار نبود؛ به‌طوری‌که مقدار RMSEA برابر با ۰,۱۹۴ و نسبت χ^2/df برابر با ۶,۱۳ به دست آمد که هر دو نشان‌دهنده عدم برازش مناسب مدل بودند. بنابراین، بر اساس شاخص‌های تعدیل و با در نظر گرفتن همبستگی بین برخی جملات خطا، مدل اصلاح گردید. پس از اصلاح مدل، شاخص‌های برازش بهبود یافتند و مقدار RMSEA به کمتر از ۰,۰۵ کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل نهایی است.

همچنین نتایج آزمون معناداری مسیرها نشان داد که تقریباً تمامی ضرایب مسیر دارای مقادیر t بزرگ‌تر از ۱,۹۶ بوده و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار هستند. تنها برخی گویه‌ها از جمله $geo1$ و $stbl4$ از قدرت تبیین کمتری نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار بودند. مدل ساختاری بهبود یافته پس از تعدیل در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.

شکل ۱: مدل ساختاری بهبود یافته پس از تعدیل



ارزیابی ابزارهای پژوهش

به منظور بررسی پایایی ابزار پژوهش، از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. ضریب آلفای کرونباخ کل پرسشنامه برابر با ۰,۸۴۱ به دست آمد که بیانگر همسانی درونی مطلوب ابزار اندازه‌گیری در سطح کلان است. با این حال، مقادیر آلفای کرونباخ برخی سازه‌های منفرد کمتر از مقدار پیشنهادی ۰,۷۰ مشاهده شد. این موضوع را می‌توان به محدود بودن تعداد گویه‌های برخی سازه‌ها (سه یا چهار گویه) و ماهیت چندبعدی عوامل مؤثر بر ریسک‌های گودبرداری نسبت داد. از آنجایی که در پژوهش‌های مبتنی بر مدل‌یابی معادلات ساختاری، اتکای صرف به ضریب آلفای کرونباخ برای قضاوت درباره اعتبار سازه‌ها توصیه نمی‌شود، نتایج تحلیل عاملی تأییدی نیز مورد توجه قرار گرفت. از این رو، علاوه بر بررسی آلفای کرونباخ، روایی سازه از طریق تحلیل عاملی تأییدی و بررسی بارهای عاملی و مقادیر آماره t ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اکثر شاخص‌ها دارای بارهای عاملی معنادار بوده و روابط بین متغیرهای مشاهده‌پذیر و سازه‌های پنهان در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید شده است. بنابراین، با وجود پایین بودن آلفای برخی سازه‌ها، شواهد حاصل از مدل اندازه‌گیری از کفایت نسبی ابزار پژوهش برای تحلیل ساختاری حمایت کرد. در جدول ۶ نحوه ارزیابی ابزارهای پژوهش منعکس شده است.

جدول ۶: ارزیابی ابزار پژوهش

نوع ارزیابی	شاخص	مقدار	نتیجه
روایی محتوا	CVR	۰,۸	تائید شد
پایایی کل	آلفای کرونباخ	۰,۸۴۱	تائید شد
روایی سازه‌ها	CFA	محاسبات کامل در جدول	تائید شد
معناداری گویه‌ها	T-value	اغلب $< 1,96$	تائید شد
برازش مدل	RMSEA نهایی	۰,۰۲۳	تائید شد
برازش مدل	χ^2/df	۱,۹۸	تائید نسبی

ارزیابی برازش مدل

به منظور ارزیابی برازش مدل معادلات ساختاری، از مجموعه‌ای از شاخص‌های برازش مطلق، تطبیقی و مقتصد استفاده شد. نتایج مدل نهایی نشان داد که مقدار آماره کای‌دو برابر با ۱۶۴۵,۶۸ و درجه آزادی برابر با ۸۲۷ است. با توجه به حساسیت آماره کای‌دو به حجم نمونه، نسبت کای‌دو به درجه آزادی نیز محاسبه شد که مقدار آن برابر با ۱,۹۹ به دست آمد. از آنجا که این مقدار کمتر از ۳ است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل از برازش قابل قبولی برخوردار است.

همچنین مقدار ریشه میانگین مجذورات خطای تقریب (RMSEA) برابر با ۰,۰۲۳ به دست آمد که کمتر از آستانه ۰,۰۵ بوده و نشان‌دهنده برازش بسیار مطلوب مدل با داده‌های مشاهده‌شده است. افزون بر این، شاخص برازش (GFI=0.947) و شاخص برازش تعدیل‌شده (AGFI=0.936) هر دو بیشتر از مقدار پیشنهادی ۰,۹۰ بوده و حاکی از کیفیت ساختار مدل هستند. همچنین مقادیر شاخص برازش هنجار شده (NNFI=0.948) و شاخص برازش هنجار نشده (NNFI=0.948) نشان دادند که مدل پژوهش در مقایسه با مدل مستقل از برازش مناسبی برخوردار است.

در مجموع، بررسی شاخص‌های برازش بیانگر آن هستند که مدل نهایی از برازش مناسب و قابل قبول برخوردار بوده و بنابراین می‌توان روابط میان سازه‌های پژوهش را با اطمینان مورد تفسیر و آزمون قرار داد. در جدول ۷ مقادیر شاخص‌های برازش آورده شده‌است.

جدول ۷: بررسی شاخص‌های برازش

شاخص	مقدار	معیار پذیرش	نتیجه
χ^2	۱۶۴۵,۶۸	—	—
df	۸۲۷	—	—
χ^2/df	۱,۹۹	< 3	مطلوب
RMSEA	۰,۰۲۳	< 0.08	بسیار مطلوب
GFI	۰,۹۴۷	> 0.90	مطلوب
AGFI	۰,۹۳۶	> 0.90	مطلوب
NFI	۰,۹۵۷	> 0.90	مطلوب
NNFI (TLI)	۰,۹۴۸	> 0.90	مطلوب

نتایج تحلیل روابط ساختاری

نتایج تحلیل مسیر نشان داد که عوامل طراحی بیشترین تأثیر را بر پایداری گودهای عمیق دارند. پس از آن، عوامل ژئوتکنیکی، زمانی، مدیریتی، محیطی و اقتصادی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

نتایج همچنین نشان داد که تمامی روابط ساختاری اصلی از نظر آماری معنادار بوده و مقدار آماره t برای آن‌ها خارج از بازه $[-۱,۹۶ + ۱,۹۶]$ است؛ بنابراین فرضیه‌های پژوهش مورد تأیید قرار گرفتند. مقادیر بارهای عاملی و مقادیر T-Value در مسیر متغیرهای مکنون و متغیر پایداری در جدول ۸ آورده شده‌است.

جدول ۸: مقادیر بارهای عاملی و مقادیر T-Value برای متغیرهای مکنون و پایداری در مدل ساختاری

مسیر	موضوع	مقدار بارهای عاملی γ (گاما)	T-Value	نتیجه
GEO → STBL	اثر عوامل ژئوتکنیک	-۵,۲۶	-۵۸,۵۳	معنادار
DSN → STBL	اثر عوامل طراحی	۷,۱۰	۷۰,۲۷	معنادار
MNG → STBL	اثر عوامل مدیریت	۰,۵۸	-۴,۹۵	معنادار
ENV → STBL	اثر عوامل محیطی	-۰,۴۵	-۵,۸۵	معنادار
ECN → STBL	اثر عوامل اقتصادی	-۰,۱۵	-۵,۹۶	معنادار
TIM → STBL	اثر عوامل زمان	-۱,۰۷	۱۲,۴۱	معنادار

تحلیل مدل معادلات ساختاری

نتایج تحلیل مسیر نشان داد که تمامی سازه‌های اصلی دارای اثر معنادار بر متغیر پایداری هستند. در میان عوامل مورد بررسی، عامل طراحی بیشترین تأثیر را بر پایداری گودهای عمیق داشت. پس از آن عوامل ژئوتکنیکی، زمانی، مدیریتی، محیطی و اقتصادی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. معادله ساختاری نهایی به صورت زیر به دست آمد:

$$STBL = -5.259(GEO) + 7.101(DSN) - 0.581(MNG) - 0.454(ENV) - 0.152(ECN) - 1.074(TIM)$$

۵- مقایسه نتایج پژوهش با مطالعات پیشین

نتایج مدل معادلات ساختاری نشان داد که عوامل طراحی بیشترین تأثیر را بر پایداری سازی گود دارند و پس از آن به ترتیب عوامل ژئوتکنیکی، زمانی، مدیریتی، محیطی و اقتصادی قرار می گیرند. به منظور ارزیابی اعتبار یافته ها، نتایج پژوهش حاضر به صورت نظام مند با مطالعات پیشین در جدول ۹ مقایسه شده است.

جدول ۹: مقایسه نظام مند مطالعات پیشین با پژوهش حاضر

منبع	مهم ترین یافته مطالعه	ارتباط با پژوهش حاضر	میزان همسویی	تبیین شباهت یا تفاوت
راویندرا بودانیا و آرورا (۲۰۱۶)	طراحی و انتخاب روش پایداری سازی تعیین کننده در عملکرد سیستم نگهدارنده دارد.	عامل طراحی در پژوهش حاضر مهم ترین عامل مؤثر بر پایداری سازی گود شناسایی شد.	همسو	در هر دو مطالعه تصمیمات طراحی به عنوان مبنای کنترل سایر ریسک های پروژه شناخته شده است.
قره و ظریف راد (۱۳۹۳)	کیفیت طراحی و انتخاب سیستم نگهداری بر ایمنی گود مؤثر است.	طراحی بیشترین اثر را در مدل ساختاری داشت.	همسو	هر دو پژوهش اهمیت مرحله طراحی را در کاهش ریسک های اجرایی تأیید می کنند.
صابر ماهانی و غلامی نیا (۱۳۹۶)	عوامل مرتبط با طراحی در موفقیت پروژه های گودبرداری نقش کلیدی دارند.	عامل طراحی بالاترین اولویت را کسب کرد.	همسو	نقش پیشگیرانه طراحی مناسب در کنترل مخاطرات گودبرداری در هر دو مطالعه تأیید شده است.
کروپا و پراساد (۲۰۲۲)	ویژگی های خاک و شرایط زمین از عوامل اصلی پایداری گود هستند.	عامل ژئوتکنیک دومین عامل اثرگذار بود.	همسو	هر دو مطالعه بر اهمیت شناخت رفتار خاک و شرایط زمین تأکید دارند.
فرخزاد و همکاران (۲۰۲۰)	پارامترهای ژئوتکنیکی نقش تعیین کننده در ایمنی گود دارند.	مقاومت خاک مهم ترین شاخص ژئوتکنیکی پژوهش حاضر بود.	همسو	اثر مستقیم ویژگی های خاک بر ظرفیت باربری و تغییر شکل دیواره گود علت این همسویی است.
غفارپور جهرمی و همکاران (۲۰۲۲)	شرایط زمین و خصوصیات ژئوتکنیکی از عوامل اصلی ریسک هستند.	عامل ژئوتکنیک در رتبه دوم اهمیت قرار گرفت.	همسو	هر دو مطالعه نقش بنیادین شرایط زمین را در مدیریت ریسک تأیید می کنند.
وانگ و همکاران (۲۰۲۴)	عوامل ژئوتکنیکی، آب زیرزمینی و مدیریت ریسک بیشترین اثر را بر ایمنی گود دارند.	عوامل ژئوتکنیکی و مدیریتی از عوامل مهم مدل حاضر بودند.	همسو	هر دو پژوهش نقش مدیریت ریسک و شناخت شرایط زمین را در کاهش احتمال ناپایداری تأیید می کنند.

تفاوت ناشی از روش تحقیق است؛ مطالعه مذکور از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده، در حالی که پژوهش حاضر روابط علی را با SEM بررسی کرده است.	در پژوهش حاضر عوامل محیطی اولویت پایین‌تری نسبتاً متفاوت داشتند.	وضعیت خاک، بارهای ترافیکی و شرایط سازه‌های مجاور مهم‌ترین ریسک‌ها هستند.	عبادتی و برمایه‌ور (۱۳۹۷)
تفاوت به دلیل تفاوت هدف پژوهش‌ها است؛ مطالعه سلامی بر شناسایی مخاطرات متمرکز بوده ولی پژوهش حاضر اثر نسبی عوامل را مدل‌سازی کرده است.	عوامل ژئوتکنیکی و محیطی در پژوهش حاضر نیز مطرح بودند اما اولویت کمتری داشتند.	تأسیسات زیرزمینی و ریزش خاک و سنگ مهم‌ترین مخاطرات شناسایی شدند.	سلامی (۱۴۰۰)
هر دو پژوهش از چارچوب طبقه‌بندی عوامل ریسک استفاده کرده‌اند، اما مطالعه مذکور اولویت‌بندی کمی ارائه نکرده است.	همسو از نظر مفهومی سازه‌های پژوهش حاضر نیز بر مبنای طبقه‌بندی عوامل ریسک شکل گرفتند.	مخاطرات گودبرداری در سطوح مختلف طبقه‌بندی شدند.	گل‌احمر و هروی (۱۳۹۵)

به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر با بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین همخوانی دارد و به‌ویژه نقش محوری عوامل طراحی و ژئوتکنیکی را تأیید می‌کند. تفاوت‌های مشاهده‌شده نیز عمدتاً ناشی از تفاوت در روش‌های تحلیلی، نوع پروژه‌های بررسی‌شده، شرایط محیطی و اهداف پژوهش‌ها است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه عوامل مؤثر بر پایدارسازی گود در مطالعات مختلف مشابه هستند، اما میزان اهمیت و اولویت آن‌ها می‌تواند متناسب با شرایط پروژه و رویکرد ارزیابی تغییر کند.

۶- نتیجه‌گیری

۱. نتایج مدل‌یابی معادلات ساختاری نشان داد که عوامل مؤثر بر ریسک پایدارسازی گودهای عمیق از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند و سهم عوامل فنی و مهندسی به‌مراتب بیشتر از عوامل اقتصادی و محیطی است. در میان متغیرهای بررسی‌شده، عامل طراحی با بیشترین ضریب اثر، مهم‌ترین نقش را در تبیین موفقیت یا شکست عملیات پایدارسازی ایفا می‌کند. این یافته بیانگر آن است که بخش عمده ریسک‌های گودبرداری پیش از آغاز عملیات اجرایی و در مرحله تصمیم‌گیری‌های مهندسی شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر، انتخاب نامناسب روش پایدارسازی، عدم تناسب طراحی با شرایط واقعی زمین و استفاده از مصالح نامرغوب می‌تواند حتی در صورت اجرای صحیح پروژه، احتمال بروز ناپایداری را افزایش دهد. از این رو، مدیریت ریسک در پروژه‌های گودبرداری باید از مرحله طراحی آغاز شود و صرفاً به کنترل‌های اجرایی محدود نگردد.

۲. در میان شاخص‌های طراحی، کیفیت مصالح بیشترین بار عاملی را به خود اختصاص داد. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد سیستم‌های پایدارسازی وابستگی مستقیمی به کیفیت اجزای سازه‌ای و مصالح مصرفی دارد. در پروژه‌های شهری متراکم نظیر تهران، که کوچک‌ترین تغییر شکل می‌تواند به سازه‌های مجاور آسیب وارد کند، کیفیت مصالح نه تنها یک عامل اقتصادی یا اجرایی، بلکه بخشی از ایمنی ژئوتکنیکی پروژه محسوب می‌شود.

۳. عامل ژئوتکنیک به عنوان دومین عامل اثرگذار شناسایی شد. اهمیت بالای مقاومت خاک محل نشان می‌دهد که عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی همچنان یکی از مهم‌ترین منابع ریسک در پروژه‌های گودبرداری هستند. این نتیجه تأیید می‌کند که انجام مطالعات ژئوتکنیکی دقیق، شناسایی لایه‌های خاک و ارزیابی صحیح پارامترهای مقاومتی پیش از طراحی، نقش اساسی در کاهش ریسک دارد. در واقع، کیفیت طراحی تا حد زیادی تابع کیفیت اطلاعات ژئوتکنیکی اولیه است و این دو عامل به صورت مکمل بر ایمنی پروژه اثر می‌گذارند.
۴. نتایج همچنین نشان داد که عامل زمان در رتبه بعدی قرار دارد. اهمیت بالای تأخیر در تأمین نیروی انسانی و مصالح بیانگر آن است که ریسک پایدارسازی تنها یک مسئله فنی نیست و اختلال در برنامه‌ریزی اجرایی می‌تواند شرایط ناپایدار را برای مدت طولانی‌تری در پروژه حفظ کند. افزایش مدت زمان باز بودن گود، احتمال تأثیر عوامل محیطی و وقوع حوادث پیش‌بینی نشده را افزایش می‌دهد و در نتیجه سطح ریسک پروژه را بالا می‌برد.
۵. در حوزه مدیریت اجرا، نظارت صحیح بر عملیات اجرایی مهم‌ترین شاخص شناخته شد. این یافته نشان می‌دهد که حتی در صورت وجود طراحی مناسب و شناخت کافی از شرایط زمین، عدم کنترل دقیق عملیات اجرایی می‌تواند موجب فاصله گرفتن عملکرد واقعی پروژه از مفروضات طراحی شود. بنابراین، نظارت فنی مستمر حلقه اتصال میان طراحی و عملکرد واقعی سیستم پایدارسازی محسوب می‌شود.
۶. عوامل محیطی و اقتصادی در مقایسه با سایر متغیرها اثر کمتری نشان دادند. با این حال، پایین بودن ضرایب این عوامل به معنای بی‌اهمیت بودن آنها نیست. در واقع، نتایج نشان می‌دهد که این عوامل عمدتاً از طریق تأثیرگذاری بر تصمیمات طراحی، زمان‌بندی و فرآیند اجرا نقش خود را ایفا می‌کنند و اثر مستقیم آنها بر پایداری گود نسبت به عوامل فنی کمتر است. به‌ویژه در مورد عامل اقتصادی، نتایج حاکی از آن است که تخصیص منابع مالی به تنهایی تضمین‌کننده کاهش ریسک نیست و اثربخشی هزینه‌ها به نحوه به‌کارگیری آنها در مطالعات ژئوتکنیکی، طراحی و کنترل اجرایی وابسته است.
۷. بهبود قابل توجه شاخص‌های برازش مدل پس از اصلاح ساختار و کاهش مقدار RMSEA از ۰,۱۹۴ به ۰,۰۵ در مدل نهایی، بیانگر آن است که مدل توسعه‌یافته توانسته است روابط میان متغیرهای مؤثر بر پایدارسازی گود را با دقت مناسبی تبیین کند. این موضوع اعتبار کاربرد مدل معادلات ساختاری را برای تحلیل مسائل پیچیده مهندسی عمران و مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمانی نشان می‌دهد.
۸. از منظر کاربردی، نتایج پژوهش حاکی از آن است که راهبردهای کاهش ریسک در گودهای عمیق باید در درجه نخست بر ارتقای کیفیت طراحی، انجام مطالعات ژئوتکنیکی دقیق و تقویت نظام نظارت اجرایی متمرکز شوند. تمرکز صرف بر کنترل هزینه‌ها یا عوامل محیطی، بدون توجه به عوامل فنی اصلی، نمی‌تواند به کاهش مؤثر ریسک منجر شود.

۷- محدودیت‌های پژوهش

اجرای این پژوهش با برخی محدودیت‌ها همراه بود. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌ها می‌توان به تعداد محدود متخصصان فعال در حوزه گودبرداری‌های عمیق، دشواری دسترسی به اطلاعات اجرایی و تجربیات پروژه‌های واقعی، و محدودیت دسترسی به برخی منابع علمی و نرم‌افزارهای تخصصی اشاره کرد. با وجود این محدودیت‌ها، تلاش شد با استفاده از نظرات خبرگان و انجام تحلیل‌های آماری مناسب، اعتبار نتایج حفظ شود.

۸- پیشنهادات آینده

پیشنهادهای کاربردی

- توجه ویژه به کیفیت طراحی و مطالعات ژئوتکنیکی در مراحل اولیه پروژه‌های گودبرداری.
- انتخاب روش پایدارسازی متناسب با شرایط زمین و عمق گودبرداری.
- استفاده از مصالح با کیفیت و اعمال کنترل‌های کیفی مستمر در مراحل اجرا.
- تقویت نظام نظارت فنی و مدیریت اجرایی به منظور کاهش احتمال وقوع ریسک‌های مرتبط با گودبرداری.

پیشنهادهای پژوهشی آینده

- بررسی عوامل شناسایی شده با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مقایسه نتایج با مدل معادلات ساختاری.
- مطالعه نقش متغیرهای میانجی و تعدیل‌گر در روابط بین عوامل مؤثر بر پایدارسازی گود.
- توسعه مدل‌های ارزیابی ریسک با در نظر گرفتن عوامل مدیریتی، برنامه‌ریزی، پایش و کنترل پروژه.
- انجام پژوهش‌های مشابه در شهرها و شرایط ژئوتکنیکی متفاوت به منظور تعمیم‌پذیری بیشتر نتایج.

سپاسگزاری

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- An, Y., Li, L., Gao, H., Luo, Z., & He, Y. (2025). Fusing multiple source data for foundation excavation risk assessment based on cloud model and Dempster Shafer evidence theory. *Scientific Reports*, 15(1), 9894.
- Ardeshtir, A., & Mohajeri, M. (2016). Analysis of construction safety risks using the integrated AHP–DEA method. *Civil Engineering Journal*, 48(3), 217–226. (Persian)
- Aini, M. (2016). *Evaluation of stability factors in deep excavations: Case study of Modarres Street excavation in Kermanshah*. Razi University. (Persian)
- Budania, R., & Arora, R. P. (2016). Soil nailing for slope stabilization: An overview. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(12).
- Comrey, A. L., & Lee, H. B. (2013). *A first course in factor analysis*. Psychology press.
- Darbor, M., Chakeri, H., Tabarmaye, M., Baghali, H., & Talebinejad, A. (2025). Risk analysis and reducing measures in the tunneling project of Tabriz Metro Line 2. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 15(43), 11–20.

- Ebadati, M., & Barmayehvar, B. (2018). Assessment, prioritization and management of risks in excavation projects. *Journal of Disaster Prevention and Management*, 8(4), 365–372. (Persian)
- Etemadi-Nia, M., & Afshari, A. (2023). Interpretive structural modeling of risks in deep urban excavation projects in Mashhad. *Construction Engineering and Management*, 8(2), 28–38. (Persian)
- Farokhzad, F., Hasanpou, A., & Shabani, M. J. (2020). Investigating stabilized excavations using soil nailing method in urban areas. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2), 126–138.
- Ghaffarpour Jahromi, S., Shabakhty, N., & Tajik, P. (2022). Reliability analysis of nailing method in the stabilization of urban excavation: A case study of an excavation in Tehran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2), 105–109.
- Ghasemi-Tabar, F. (2016). *Investigation of groundwater level changes due to drainage on the stabilization of urban excavations*. Shahid Rajaee Teacher Training University. (Persian)
- Ghareh, S., & Zarif-Rad, N. (2014). Sensitivity analysis of stabilized excavations using soil nailing and anchorage systems. *Proceedings of the 8th National Congress on Civil Engineering*. Babol Noshirvani University of Technology. (Persian)
- Golahmar, Y., & Haravi, G. (2016). Identification and classification of risks in urban deep excavation projects. *Proceedings of the 9th National Congress on Civil Engineering*. Ferdowsi University of Mashhad. (Persian)
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*.
- He, Z., Pan, Y., & Chen, J. J. (2025). Towards automated and uncertainty-aware risk assessment for deep excavation via data-driven pythagorean fuzzy Bayesian network. *Expert Systems with Applications*, 130391.
- Huang, J., Fang, J., Guo, P., & Wang, J. (2025). Coupling analysis of multiple risk factors in deep foundation pit construction of metro station based on the NK/SNA model. *Scientific Reports*, 15(1), 15919.
- Khoshzahr, E., Miri Darmarani, S., Chakeri, H., Darbor, M., & Haghighi, H. (2025). The influence of fiber-reinforced shotcrete on ground settlement in tunnel excavation: A case study of Tabriz Metro Line 2. *Engineering Geology and Mining*, 59(1), 21–29.
- Kline, R. B. (2023). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.
- Krupa, H. R., & Prasad, S. K. (2022). Influence of excavation phase on the performance of soil nail system. In *Indian Geotechnical Conference*. Kochi, India. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1831-4_50
- Mikhailov, A. V., & Bouguebrine, C. (2026). Analysis excavator equipping with lidar sensors for functionality improving. *International Engineering*, 39(6), 1414–1421.
- Naghshbandi, A., & Ahmadi, A. (2025). Identification and modeling of causes of trench wall collapse accidents in excavation and gas pipeline installation operations using Bayesian Network and Fuzzy DEMATEL. *Journal of Occupational Health and Safety*, 15(1), 174–200. (Persian)
- Sabermahani, M., & Gholaminia, M. (2017). Investigation of soil nail arrangement effects on stability and performance of nailed walls. *Journal of Engineering Geology*, 11(2). (Persian)
- Salami, M. (2021). Hazard identification and risk assessment in urban building excavations using the HAZID method. In *Proceedings of the 5th International Conference on Civil Engineering, Structures and Earthquake*. Tehran. (Persian)
- Sharifi, S., Jenabali-Jahromi, S., Shahid-Salami, A., & Feili, A. (2025). Improving risk management in excavation projects using gap analysis approach: A case study of Shiraz. *Civil Engineering and Project Journal*, 7(3), 26–46. (Persian)

Wang, Y., Guo, P., Lin, H., & Zhao, Y. (2024). Risk management technologies for deep excavations in water-rich areas. *Water*, 16(2), 323.