System Engineering and Productivity/ 2026/ Vol.6/ No.3/ 51-77

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2075517.1415

A Hybrid SEM–Machine Learning Framework for Improving Communication Management in Construction Projects (Case Study: Zanjan City)

Hadi Shakibazahed[1,*], **Naser Ahmadi**[2]

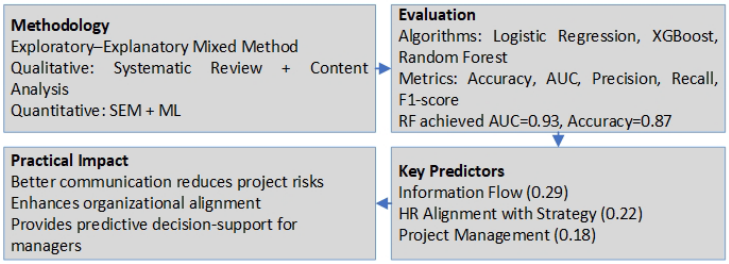
[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

[2] M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

HIGHLIGHTS

- Identification of key communication weaknesses
- Innovative hybrid model of structural equation modeling and machine learning
- Prediction of key communication factors using machine learning
- Practical tool for national projects

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 12 October 2025
Revised: 20 November 2025
Accepted: 3 December 2025
Available online: 3 December 2025
*Correspondence:
h.shakiba@hsu.ac.ir
How to cite this article:
Shakibazahed, H., & Ahmadi, N. (2026). A hybrid SEM–machine learning framework for improving communication management in construction projects (case study: Zanjan city). *System Engineering and Productivity*, 6 (3), 51-77.

Keywords:
Poor communication
Structural Equation Modeling (SEM)
Machine Learning (ML)
Information flow
Project performance

ABSTRACT

The construction industry in Iran faces challenges such as delays, cost increases, and quality decline, a significant portion of which stems from weaknesses in communication management among project stakeholders. The aim of this research is to identify key factors affecting communication weaknesses and to present a hybrid model for analyzing and predicting their impact on the performance of construction projects. The present study employs a mixed exploratory-explanatory approach. In the qualitative phase, indicators related to communication weaknesses were extracted through a systematic review of sources and content analysis of documents. In the quantitative phase, data from 114 valid questionnaires from employees of construction projects in Zanjan city were analyzed using Structural Equation Modeling (SEM) and Random Forest (RF) algorithm. The SEM model results showed that information flow, project management, and alignment of human resources with organizational strategy have the greatest direct impact on project performance. The machine learning model also identified these three factors as the strongest predictive variables for communication weaknesses and achieved a prediction accuracy of 0.87 and an AUC value of 0.93. The combination of the two methods provided the possibility of simultaneous analysis of theoretical relationships and empirical prediction. The findings indicate that strengthening the project information management system, clarifying the managerial structure, and aligning human resources with organizational goals can significantly reduce the risk of poor communications. The main innovation of the research is the application of the hybrid SEM-ML approach in the context of national projects in Iran and presenting a model that, in addition to analyzing causal relationships, has the ability to rank and data-driven predict key factors.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

The construction industry in Iran has persistently encountered fundamental challenges such as project delays, cost overruns, and compromised quality, many of which are closely associated with deficiencies in communication among project stakeholders. Ineffective communication not only leads to frequent rework and misalignment of project objectives but also amplifies project uncertainty and operational risks across different project phases. Despite the recognized importance of communication in project success, most previous studies have predominantly relied on Structural Equation Modeling (SEM) to investigate causal relationships among communication-related factors, while comparatively limited attention has been devoted to the predictive evaluation of communication performance (Alsulamy, 2025; Baduge et al., 2022; Bahrain et al., 2023; Gamil et al., 2023; Johansen et al., 2021, Kline, 2023). To address this research gap, the present study integrates SEM with a Machine Learning (ML) approach—specifically the Random Forest (RF) algorithm—to simultaneously explain and predict the key factors associated with weak communication in construction projects. The novelty of this research lies in its hybrid methodological framework that combines explanatory and predictive modeling, as well as its empirical application to large-scale national construction projects within the context of a developing country.

2. Methodology

This study adopted a sequential exploratory–explanatory mixed-methods design to systematically identify and analyze the determinants of weak communication in construction projects. In the qualitative phase, potential indicators were first extracted through a comprehensive systematic literature review and subsequently refined and validated through expert judgment to ensure content validity. In the quantitative phase, structured questionnaire data were collected from 114 engineers and project managers directly involved in construction projects in Zanjan, Iran, selected using an appropriate sampling strategy.

Structural Equation Modeling (SEM) was performed using AMOS software to assess both the measurement and structural models, including tests of construct reliability, convergent and discriminant validity, and the evaluation of hypothesized causal relationships among latent variables. To strengthen the predictive dimension of the analysis, the Random Forest (RF) machine learning algorithm was implemented using all 27 validated indicators as input features. Prior to model training, data preprocessing procedures—including normalization, outlier detection and elimination, and categorical variable encoding—were applied to improve data quality. A 5-fold cross-validation scheme was employed to enhance model robustness and generalizability. The predictive performance of the model was evaluated using Accuracy, Recall, Precision, F1-score, and the Area Under the ROC Curve (AUC).

3. Results and Discussion

The SEM analysis confirmed the adequacy of both the measurement and structural models, demonstrating acceptable fit indices and factor loadings. The results indicated that information flow, project management effectiveness, and alignment of human resources with organizational strategy are the most influential determinants of communication performance. Among these, information flow exhibited the strongest direct impact on project outcomes, highlighting its critical role in coordinating activities and reducing uncertainty.

The Random Forest model supported the SEM findings from a predictive perspective. Feature importance analysis ranked the same three factors as the most significant predictors. The model achieved an Accuracy of 0.87, Recall of 0.84, Precision of 0.86, F1-score of 0.85, and an AUC of 0.93, indicating strong predictive capability despite the limited sample size.

A comparative assessment shows that SEM effectively explains the causal relationships among variables, while RF provides robust predictive power and reliable feature ranking. Their integration enables both theoretical validation and practical risk prediction within a unified framework. As illustrated in Figure. 1, information flow is identified as the most dominant communication dimension.

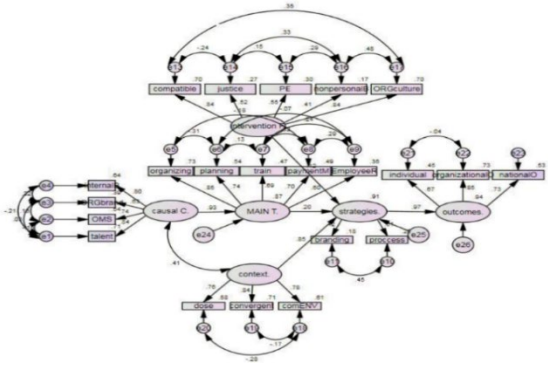


Figure 1. Final structural model with standardized path coefficients.

4. Conclusions

This study proposed a hybrid SEM–Machine Learning framework to both explain and predict weak communication in construction projects. Methodologically, the integration of SEM with the Random Forest algorithm extends traditional causal analysis by incorporating predictive capability. The results confirmed that weak communication is a multidimensional phenomenon primarily influenced

by information flow, project management, and human resource–strategy alignment.

From a practical perspective, the findings emphasize the necessity of strengthening project information systems, clarifying managerial structures, and strategically aligning human resources to improve communication performance. The proposed framework enables early identification and prioritization of communication risks, thereby supporting proactive project management.

Despite its contributions, this study is limited by its regional scope and sample size. Future research should employ larger datasets, apply additional machine learning algorithms, and validate the model across different project types and geographical contexts.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions in writing this article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Alsulamy, S. (2025). Predicting construction delay risks in Saudi Arabian projects: A comparative analysis of CatBoost, XGBoost, and LGBM. *Expert Systems with Applications*, *268*, 126268. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126268

Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., ... & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, *141*, 104440. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440

Bahrain, N. K., Sakrani, S. R., & Maidin, A. (2023). Communication barriers in work environment: understanding impact and challenges. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, *13*(11), 1489-1503. https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v13-i11/19498

Gamil, Y., & Abd Rahman, I. (2023). Impact of poor communication on dispute occurrence in the construction industry: A preliminary exploratory study of Yemen construction industry. *International Journal of Construction Management*, *23*(16), 2729-2735. https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2092388

Johansen, K. W., Nielsen, R., Schultz, C., & Teizer, J. (2021). Automated activity and progress analysis based on non-monotonic reasoning of construction operations. *Smart and Sustainable Built Environment*, *10*(3), 457-486. https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2021-0044

Kline, R. B. (2023). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (5th ed.). Guilford Press.

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۵۱-۷۷

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2075517.1415

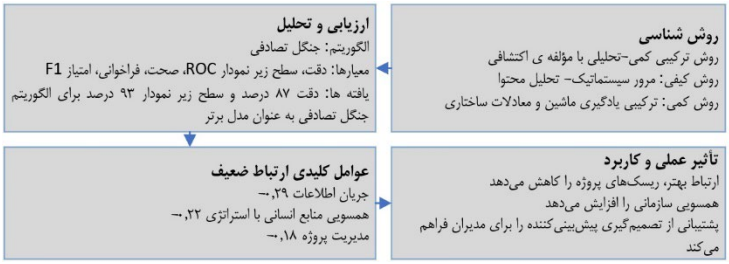
چارچوب ترکیبی مدل‌سازی معادلات ساختاری و یادگیری ماشین برای بهبود مدیریت ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی (مطالعه موردی: شهر زنجان)

هادی شکیبازاهد[۱]*، ناصر احمدی[۲]

[۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

[۲] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده گرافیکی



چکیده

صنعت ساخت‌وساز ایران با چالش‌هایی نظیر تأخیر، افزایش هزینه و افت کیفیت مواجه است که بخش قابل‌توجهی از آن ناشی از ضعف در مدیریت ارتباطات میان ذی‌نفعان پروژه‌هاست. هدف این پژوهش، شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر ضعف ارتباطات و ارائه مدلی ترکیبی برای تحلیل و پیش‌بینی اثر آن‌ها بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی است. پژوهش حاضر از رویکرد ترکیبی اکتشافی–توضیحی بهره می‌برد. در فاز کیفی، شاخص‌های مرتبط با ضعف ارتباطات از طریق مرور نظام‌مند منابع و تحلیل محتوای اسناد استخراج شد. در فاز کمی، داده‌های حاصل از ۱۱۴ پرسشنامه معتبر کارکنان پروژه‌های ساختمانی شهر زنجان با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) و الگوریتم جنگل تصادفی (RF) تحلیل گردید. نتایج مدل SEM نشان داد که جریان اطلاعات، مدیریت پروژه و همسویی منابع انسانی با استراتژی سازمان بیشترین اثر مستقیم را بر عملکرد پروژه دارند. مدل یادگیری ماشین نیز همین سه عامل را به‌عنوان قوی‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ضعف ارتباطات شناسایی کرد و به دقت پیش‌بینی ۰/۸۷ و مقدار AUC برابر ۰/۹۳ دست یافت. ترکیب دو روش، امکان تحلیل هم‌زمان روابط نظری و پیش‌بینی تجربی را فراهم ساخت. یافته‌ها بیانگر آن است که تقویت سیستم مدیریت اطلاعات پروژه، شفاف‌سازی ساختار مدیریتی و هم‌راستاسازی منابع انسانی با اهداف سازمانی می‌تواند ریسک ارتباطات ضعیف را به‌طور معناداری کاهش دهد. نوآوری اصلی پژوهش در به‌کارگیری رویکرد ترکیبی SEM–ML در بستر پروژه‌های ملی ایران و ارائه مدلی است که علاوه بر تحلیل روابط علی، توان رتبه‌بندی و پیش‌بینی داده‌محور عوامل کلیدی را داراست.

برجسته‌ها

- شناسایی ضعف‌های کلیدی ارتباطات
- مدل ترکیبی معادلات ساختاری و یادگیری ماشین نوآورانه
- پیش‌بینی عوامل کلیدی ارتباطات با یادگیری ماشین
- ابزار کاربردی برای پروژه‌های ملی

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

*نویسنده مسئول:

h.shakiba@hsu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ضعف ارتباطات

مدل‌سازی معادلات ساختاری

یادگیری ماشین

جریان اطلاعات

عملکرد پروژه

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

ضعف ارتباطات همچنان یکی از مهم‌ترین ریشه‌های تأخیر، اضافه‌هزینه و افت کیفیت در پروژه‌های ساختمانی محسوب می‌شود؛ موضوعی که در مطالعات متعدد نیز تأیید شده است (Gamil et al., 2019؛ Hoezen et al., 2006). پیچیدگی رو به افزایش پروژه‌های ملی و تعدد ذی‌نفعان موجب شده مدیریت جریان اطلاعات، هماهنگی بین سطوح مختلف و هم‌راستایی نقش‌ها به چالش جدی بدل شود. با وجود اهمیت این موضوع، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های موجود یا بر جنبه‌های رفتاری و سازمانی تمرکز کرده‌اند (Redding, 1972) یا به تحلیل پیامدهای ضعف ارتباطات پرداخته‌اند (Gamil et al., 2023) و هنوز چارچوبی که بتواند روابط علّی و الگوهای پیش‌بینی را هم‌زمان پوشش دهد، کمتر توسعه یافته است.

از سوی دیگر، مطالعات اخیر در حوزه مهندسی ساخت نشان می‌دهند که بهره‌گیری از روش‌های داده‌محور، به‌ویژه یادگیری ماشین، در شناسایی الگوهای پنهان و تعامل‌های غیرخطی میان مؤلفه‌های پروژه اثربخش است (Baduge et al., 2022؛ Johansen et al., 2021). بااین‌حال، اغلب این روش‌ها فاقد تبیین نظری کافی بوده و قادر به ارائه ساختار علّی میان سازه‌های کلیدی نیستند. در مقابل، مدل‌سازی معادلات ساختاری[1] (SEM) امکان آزمون فرضیات نظری و بررسی روابط بین سازه‌های مکنون را فراهم می‌کند (Ghasemi, 2010؛ Hair et al., 2019) اما در کشف الگوهای پیچیده غیرخطی محدودیت دارد.

در این زمینه، پژوهش حاضر با اتخاذ رویکردی ترکیبی و بهره‌گیری از دو ابزار مکمل SEM و یادگیری ماشین[2] (ML)، چارچوبی برای تحلیل هم‌زمان ساختار ارتباطات و پیش‌بینی ضعف‌های ارتباطی در پروژه‌های نهضت ملی مسکن ارائه می‌کند. این رویکرد امکان می‌دهد تا ضمن آزمون روابط نظری، مهم‌ترین عوامل اثرگذار نیز بر اساس داده‌های واقعی رتبه‌بندی شوند و توان مدل در محیط واقعی ارزیابی گردد. این پژوهش با تکیه بر داده‌های تجربی کارشناسان پروژه‌های عمرانی، گامی در جهت تلفیق تبیین نظری و تحلیل پیش‌بینی‌محور در مدیریت ارتباطات پروژه‌های ملی ایران برداشته است.

1 Structural Equation Modeling
2 Machine Learning

۲- ادبیات تحقیق

ضعف ارتباطات در پروژه‌های ساخت، به‌ویژه در پروژه‌های چندسازمانی، به‌عنوان یکی از عوامل محوری بروز تأخیر و ناهماهنگی گزارش شده است (Bahrain et al., 2023؛ Gamil et al., 2023). پژوهش‌های متعددی علل این ضعف را در ابعاد رفتاری، ساختاری و فناورانه بررسی کرده‌اند. برای نمونه، مطالعاتی همچون هوزن و همکاران (Hoezen et al. 2006) ساختارهای ارتباطی و کانال‌های ناکارآمد اطلاعات را عامل تنش‌های پروژه‌ای دانسته‌اند، درحالی‌که جانسون و همکاران (Johansen et al. 2021) نقش فناوری و تحلیل خودکار داده‌ها را برجسته کرده‌اند.

در سال‌های اخیر، تحقیقات حوزه ساخت به سمت بهره‌گیری از روش‌های داده‌محور برای پیش‌بینی ریسک‌ها و تحلیل الگوهای پیچیده حرکت کرده‌اند. کاربرد الگوریتم‌های ML همچون جنگل تصادفی[3]، XGBoost و ماشین بردار پشتیبانی[4] در پیش‌بینی هزینه، تأخیر و ریسک‌های پروژه افزایش یافته است (Chen, 2025؛ Alsulamy et al., 2025؛ Zhang, 2024). این روش‌ها امکان شناسایی الگوهای غیرخطی و تعاملات چندگانه را فراهم می‌کنند، اما به دلیل فقدان چارچوب نظری و روابط علّی، برای تحلیل سازه‌های مفهومی محدودیت دارند.

از سوی دیگر، روش SEM به‌طور گسترده برای مدل‌سازی عوامل سازمانی، رفتاری و مدیریتی در پروژه‌ها استفاده شده است (Ghasemi, 2010؛ Hair et al., 2019)، اما همان‌گونه که مطالعات جدیدتر بیان می‌کنند، این روش برای اعتبارسنجی الگوهای پیچیده نیازمند ابزارهای تکمیلی است. پژوهش‌هایی همچون شایسته (Shayesteh et al. 2024) نیز بر ضرورت ادغام روش‌های SEM و ML برای تقویت روایی مدل و افزایش قدرت پیش‌بینی تأکید کرده‌اند.

جمع‌بندی مطالعات گذشته (جدول ۱) نشان می‌دهد که بخش مهمی از پژوهش‌ها به بررسی پیامدهای ضعف ارتباطات پرداخته‌اند، اما مدل‌های جامع چندبعدی محدودند. همچنین کاربرد رویکردهای داده‌محور در حوزه ارتباطات پروژه بسیار محدود بوده و عمدتاً در حوزه‌های

3 Random Forest
4 Support Vector Machines (SVMs)

تأخیر، هزینه و ریسک استفاده شده است؛ و درنهایت ترکیب SEM و ML برای تحلیل ضعف ارتباطات در پروژه‌های ملی ایران تاکنون گزارش نشده است.

درنتیجه، این پژوهش شکاف موجود را با ارائه مدل ترکیبی SEM–ML و به‌کارگیری داده‌های واقعی پروژه‌های نهضت ملی مسکن پوشش می‌دهد و چارچوبی یکپارچه برای تحلیل تبیینی و پیش‌بینی‌محور ضعف ارتباطات ارائه می‌کند.

۳- روش تحقیق

۳-۱- رویکرد کلی تحقیق

این پژوهش بر اساس الگوی رویکرد کمی-تحلیلی با مؤلفه اکتشافی مبتنی بر تحلیل محتوای اسناد طراحی شده است (Creswell & Plano Clark, 2018) تا ابتدا شاخص‌ها و مؤلفه‌های مفهومی زیربنایی از طریق تحلیل کیفی استخراج شود و سپس روابط نظریِ حاکم بین این مؤلفه‌ها در فاز کمّی به‌صورت تبیینی و آزمون‌پذیر بررسی گردد. این ترتیب روش‌شناختی به‌ویژه برای مسائلی مناسب است که در بستر بومی نیاز به توسعه ابزار سنجش و سپس ارزیابی ساختاری دارند؛ به‌این‌ترتیب روایی سازه افزایش یافته و امکان بهره‌گیری از روش‌های پیش‌بینی‌محور نیز فراهم می‌آید. طراحی پژوهش در دو فاز مجزا اما مرتبط مطابق نقشه شکل **۱** اجرا شد:

۱) **فاز کیفی**: در این فاز، مرور نظام‌مند ادبیات و تحلیل محتوای اسناد به‌منظور شناسایی شاخص‌ها و عوامل مؤثر بر مدیریت ارتباطات پروژه به کار گرفته شد. منابع کیفی شامل مقالات علمی مرتبط، اسناد پروژه و ۶۰۰ پرونده تغییر کاربری کمیسیون ماده پنج شهر زنجان (دوره ۱۳۸۱–۱۴۰۳) بود. با توجه به اینکه نگارنده از مدیران نهضت ملی مسکن زنجان بوده است، با حفظ محرمانگی به اسناد دست یافت. تحلیل محتوای اسناد به‌صورت سلسله‌مراتبی (کدگذاری باز ← محوری ← انتخابی) انجام شد. کدگذاری توسط حداقل دو کدگذار مستقل صورت گرفت و سازگاری بین کدگذاران با استفاده از شاخص‌هایی مانند Cohen’s κ بررسی و در موارد اختلاف، جلسات تطبیقی برگزار شد تا کدبوک نهایی شکل گیرد. حاصل این مرحله مجموعه‌ای متشکل از ۳۷ متغیر کلیدی بود که به‌عنوان مبنای تدوین آیتم‌های پرسشنامه استفاده گردید.

۲) **فاز کمی**: یافته‌های فاز کیفی به‌عنوان چارچوب مفهومی و منبع آیتم‌سازی پرسشنامه به کار رفت. پرسشنامه نهایی پس از پیش‌آزمون و اصلاح محتوا و فرم، در میان اعضای جامعه آماری توزیع شد. داده‌های گردآوری‌شده برای آزمون ساختار اندازه‌گیری و مدل ساختاری با استفاده از روش‌های مدل‌سازی معادلات ساختاری تحلیل گردید؛ علاوه بر آن، به‌منظور سنجش قابلیت پیش‌بینی و رتبه‌بندی عواملِ مؤثر، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز استفاده شد. ترکیب این دو رویکرد امکان آزمون صریح روابط نظری و درعین‌حال بهره‌مندی از توان پیش‌بینی و کشف الگوهای غیرخطی را فراهم می‌آورد.

۳-۲- دلایل انتخاب رویکرد ترکیبی

۱) نیاز به توسعه و اعتبارسنجی ابزار سنجش بومی (بدون انتقال صرف از مقیاس‌های خارجی)
۲) ضرورت آزمون روابط علّی (برای تقویت مبانی نظری) و درعین‌حال ارائه خروجی‌های کاربردی (رتبه‌بندی عوامل و پیش‌بینی ریسک‌ها)
۳) امکان تجمیع دیدگاه‌های کیفی مبتنی بر اسناد با پاسخ‌های ادراکی ذی‌نفعان به‌منظور افزایش روایی و اقتباس محلی سازه‌ها

۳-۳- ابزار گردآوری داده‌ها

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها در این پژوهش پرسشنامه محقق ساخته است که بر پایه یافته‌های مرحله کیفی و مرور نظام‌مند ادبیات طراحی گردید. طراحی پرسشنامه با هدف سنجش ابعاد اصلی مدیریت ارتباطات پروژه‌های ساختمانی انجام شد و در ساخت آن از مقیاس‌ها و شاخص‌های معتبر بین‌المللی بهره گرفته شد تا روایی نظری ابزار تضمین شود.

الف) ساختار پرسشنامه

پرسشنامه از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

۱) **مشخصات جمعیت‌شناختی** شامل اطلاعات پایه‌ای پاسخ‌دهندگان نظیر جنسیت، سن، میزان تحصیلات، سابقه کاری، نقش سازمانی و نوع پروژه محل فعالیت.

۲) **گویه‌های تخصصی** شامل ۲۷ سؤال بسته بر اساس طیف هفت‌درجه‌ای لیکرت (از ۰ = بسیار کم تا ۶ = بسیار زیاد) که در قالب پنج بُعد اصلی زیر طراحی شدند:

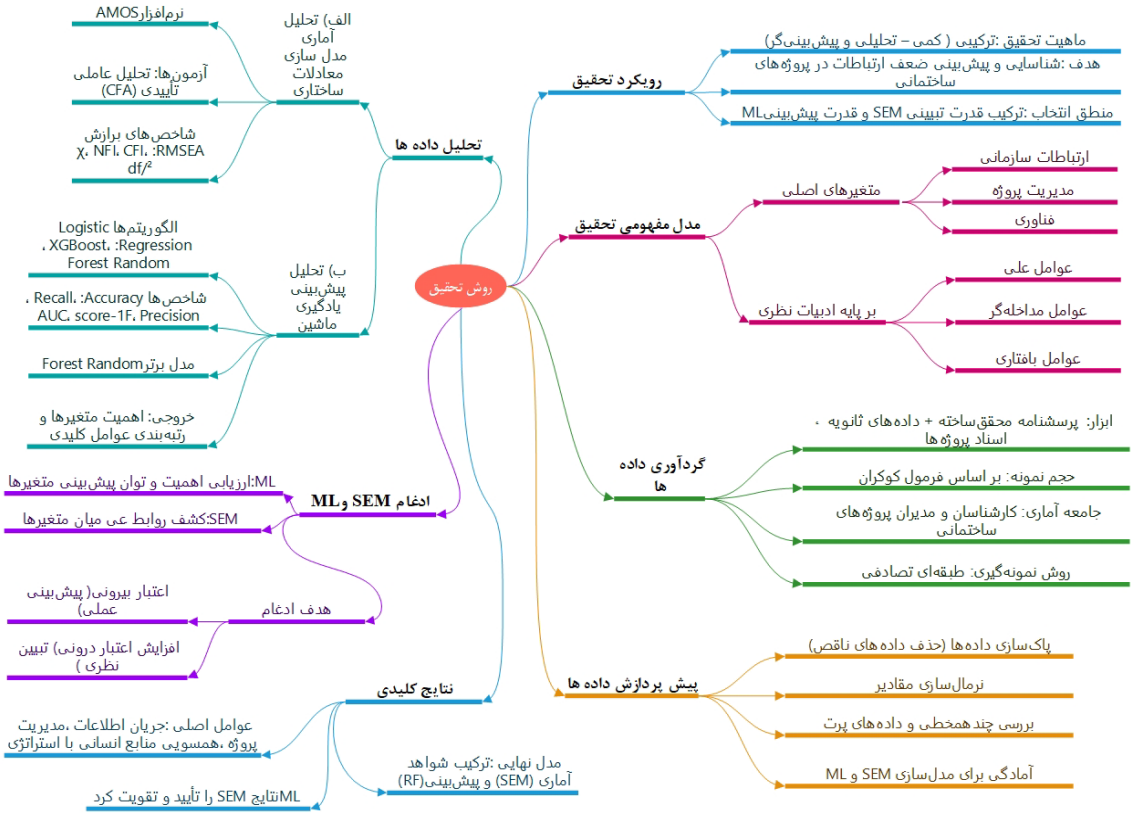
- سازمان‌دهی ارتباطات (۶ گویه)
- مدیریت ارتباطات و هماهنگی بین‌نقشی (۵ گویه)
- جریان اطلاعات و تبادل دانش (۷ گویه)
- رفتار و فرهنگ ارتباطی در تیم پروژه (۴ گویه)
- فناوری‌های ارتباطی و زیرساخت‌های دیجیتال (۵ گویه)

گویه‌ها با هدف سنجش ادراک پاسخ‌دهندگان از وضعیت موجود ارتباطات در پروژه‌ها تدوین شدند و با استفاده از زبان ساده و کاربردی تنظیم گردیدند تا فهم آن برای همه سطوح شغلی میسر باشد.

جدول ۱. مقایسه پیشینه پژوهش

Table 1. Comparison of Previous research

منبع	موضوع	هدف پژوهش	روش‌شناسی	نتایج کلیدی	محدودیت‌ها
Waqar et al., 2023	BIM و موفقیت پروژه	تحلیل رابطه BIM و موفقیت پروژه	SEM	اثر مستقیم BIM بر کیفیت و رضایت ذی‌نفعان	مطالعه محدود به پروژه‌های خاص در مالزی
Namdarzadegan & Bozorgi Amiri, 2025	مدل ترکیبی پایداری هوشمندسازی	توسعه یک مدل تصمیم‌یار برای هوشمندسازی	DRL و SEM	فناوری‌های مقیاس‌پذیر دقت مدل ۸۹/۲٪	نمونه محدود؛ تعمیم‌پذیری پایین
Chen, 2025	پیش‌بینی هزینه	توسعه مدل ML پیش‌بینی هزینه	ML (RF, SVM)	ML دقت پیش‌بینی بیشتر از ۸۵٪ داشت	جمع‌آوری داده‌ها از یک کشور خاص (چین)
Alsulamy et al., 2025	ریسک تأخیر	شناسایی عوامل تأخیر پروژه	ML XGBoost, RF	عوامل کلیدی: نیروی انسانی، تأمین مالی	نیاز به داده‌های گسترده‌تر
Zhang, 2024	پیش‌بینی تأخیر	مقایسه رگرسیون‌ها در تأخیر پروژه	ML (Regression, SVR)	SVR بهترین عملکرد را داشت	داده محدود به یک منطقه شهری
Khalili et al., 2025	موفقیت پروژه‌های ساخت	تحلیل تأثیر نگرش‌های مدیریتی	رویکرد کیفی؛ مصاحبه	بهبود تعاملات باتیمی نگرش فعالانه باعث	حجم نمونه؛ تعمیم‌پذیری محدود
Hemmasian Etefagh, 2022	رویکرد ترکیبی SEM+ML	تلفیق روش‌ها برای تحلیل و پیش‌بینی	SEM + ML	تقویت تحلیل علّی و هم پیش‌بینی	داده محدود به ایران
Ershadi et al., 2024	موانع ارتباطی	تحلیل ضعف ارتباطات در ایران	پرسشنامه + SEM	عوامل علّی: مدیریت ضعیف، ساختار ناکارآمد	تمرکز بر یک استان
Bahrain et al., 2023	فرهنگ‌سازمانی و ارتباطات	نقش فرهنگ در کیفیت ارتباطات	SEM	فرهنگ حمایتی اثر مثبت بر عملکرد داشت	نمونه محدود به شرکت‌های کوچک
Shayesteh et al., 2024	بهره‌وری نیروی انسانی متخصص	مؤلفه‌های بهره‌وری	SEM	اثر منفی سن بر ورودی، پردازش و خروجی معنادار	عدم بررسی عوامل تعدیل‌گر



شکل ۱. فلوچارت رویکرد ترکیبی مدل‌سازی معادلات ساختاری و یادگیری ماشین.

Figure 1. Flowchart of the hybrid approach of structural equation modeling and machine learning.

ب) فرایند طراحی و اعتبارسنجی ابزار

در مرحله نخست، فهرست اولیه ۳۷ شاخص استخراج‌شده از فاز کیفی، مبنای طراحی گویه‌ها قرار گرفت. سپس از طریق سه مرحله بازنگری متوالی، تعداد نهایی گویه‌ها به ۲۷ مورد تقلیل یافت تا پرسشنامه از نظر حجم و وضوح بهینه گردد. برای تضمین روایی محتوا، از نظرات ۷ نفر از خبرگان حوزه مدیریت ساخت، ارتباطات پروژه و روش تحقیق استفاده شد. شاخص‌های نسبت روایی محتوا[1] و شاخص روایی محتوا[2] مطابق فرمول‌های لاوشه (Lawshe, 1975) و والتز و باسل (Waltz & Bausell, 1981) محاسبه شدند؛ نتایج نشان داد CVR تمامی گویه‌ها بالاتر از ۰/۶۲ و CVI آن‌ها بیش از ۰/۷۹ است که نشان‌دهنده کفایت و تناسب محتوای گویه‌ها است.

ج) روایی سازه و پایایی

برای ارزیابی روایی سازه، از تحلیل عاملی تأییدی[3] استفاده شد تا ساختار مفهومی پرسشنامه بررسی گردد. تمامی بارهای عاملی بالاتر از ۰/۶ گزارش شدند که دلالت بر همبستگی مطلوب بین گویه‌ها و سازه‌های مربوط دارد (Hair et al., 2019).

پایایی ابزار با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد. مقادیر آلفای به‌دست‌آمده برای ابعاد مختلف پرسشنامه بین ۰/۷۹ تا ۰/۹۰ بود و آلفای کل ابزار برابر با ۰/۹۱ محاسبه گردید که مطابق با معیار نونالی و برنشتاین (Nunnally & Bernstein, 1994) نشان‌دهنده پایایی بسیار عالی است.

د) ملاحظات اجرایی

پرسشنامه‌ها به‌صورت حضوری و الکترونیکی (فرم آنلاین) در میان اعضای جامعه آماری توزیع شد. به‌منظور افزایش نرخ بازگشت و کاهش سوگیری پاسخ، پیش از توزیع، هدف پژوهش برای شرکت‌کنندگان تشریح و محرمانگی اطلاعات تضمین گردید. همچنین پرسشنامه در یک مطالعه مقدماتی[4] با ۳۰ نفر از جامعه مشابه اجرا و

[1] Content Validity Ratio (CVR)
[2] Content Validity Index (CVI)
[3] Confirmatory Factor Analysis (CFA)
[4] Pilot Test

اصلاحات لازم در واژگان، ترتیب سؤالات و مقیاس پاسخ‌دهی اعمال شد.

۳-۴- روایی و پایایی ابزار

ارزیابی روایی و پایایی ابزار پژوهش برای اطمینان از کیفیت سنجش سازه‌ها و دقت داده‌های گردآوری‌شده انجام شد. این مرحله شامل سه بخش اصلی بود: پایایی درونی[۱]، روایی محتوا[۲] و روایی سازه[۳].

الف) پایایی درونی

برای سنجش پایایی درونی، از ضریب آلفای کرونباخ[۴] استفاده شد که میزان همبستگی درونی گویه‌های مربوط به هر سازه را نشان می‌دهد. مطابق با معیار نونالی و برنشتاین (Nunnally & Bernstein, 1994)، مقادیر بالاتر از ۰/۷۰ قابل‌قبول، بالاتر از ۰/۸۰ خوب و بالاتر از ۰/۹۰ عالی تلقی می‌شود. نتایج محاسبه‌شده در جدول **۲** نشان می‌دهد که تمامی ابعاد پرسشنامه دارای آلفایی بالاتر از ۰/۷۹ هستند و آلفای کل ابزار برابر با ۰/۹۱ به‌دست‌آمده است. این مقدار بیانگر پایایی بسیار بالا و ثبات نتایج در اندازه‌گیری تکراری است. این نتایج نشان می‌دهد ابزار پژوهش از انسجام درونی مطلوبی برخوردار است و پاسخ‌دهندگان در پاسخ به گویه‌های هر بعد از سازگاری شناختی و رفتاری بالایی برخوردار بوده‌اند.

ب) روایی محتوا

برای سنجش روایی محتوا، از روش قضاوت خبرگان[۵] و شاخص‌های نسبت روایی محتوا و شاخص روایی محتوا استفاده شد. بدین منظور، پرسشنامه در اختیار ۷ نفر از اساتید و متخصصان حوزه مدیریت ساخت و ارتباطات پروژه قرار گرفت تا میزان ضرورت و تناسب گویه‌ها را ارزیابی کنند.

- مقدار بحرانی CVR بر اساس جدول لاوشه (Lawshe, 1975) برای ۷ ارزیاب، ۰/۶۲ است.
- نتایج نشان داد که تمامی گویه‌ها دارای نسبت روایی محتوا بیش از ۰/۶۲ و شاخص روایی محتوا بیش از ۰/۷۹ بوده‌اند، بنابراین همگی در دامنه قابل‌قبول قرار گرفته‌اند.

بر این اساس، محتوای ابزار از نظر انطباق با اهداف پژوهش، پوشش مفهومی ابعاد و وضوح زبانی مورد تأیید خبرگان قرار گرفت.

جدول ۲. ضریب آلفای کرونباخ برای ابعاد پرسشنامه

Table 2. Cronbach's alpha coefficients for questionnaire dimensions

بعد	تعداد گویه‌ها	آلفای کرونباخ	تفسیر پایایی
سازمان‌دهی	۶	۰/۸۴	خوب
مدیریت	۵	۰/۸۸	عالی
جریان اطلاعات	۷	۰/۹۰	عالی
رفتار	۴	۰/۷۹	قابل‌قبول
فناوری	۵	۰/۸۲	خوب
کل پرسشنامه	۲۷	۰/۹۱	عالی

ج) روایی سازه

جهت اطمینان از اینکه ساختار نظری ابزار با داده‌های گردآوری‌شده انطباق دارد، تحلیل عاملی تأییدی انجام شد. در این تحلیل، بارهای عاملی[۶] تمامی گویه‌ها در بازه ۰/۶ تا ۰/۹ قرار داشتند که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین متغیرهای مشاهده‌شده و متغیرهای پنهان است (Hair et al., 2019). شاخص‌های برازش مدل نیز مقادیر قابل‌قبولی داشتند که همگی مطابق با حدود پیشنهادی هو و بنتلر (Hu & Bentler, 1999) هستند. نتایج تحلیل عاملی تأییدی نشان داد که ساختار پنج‌بعدی ابزار شامل سازمان‌دهی، مدیریت، جریان اطلاعات، رفتار و فناوری از برازش نظری مطلوبی برخوردار است.

۳-۵- پیش‌پردازش داده‌ها

به‌منظور اطمینان از کیفیت و قابلیت اتکای داده‌ها پیش از تحلیل، مجموعه‌ای از مراحل پیش‌پردازش به‌صورت نظام‌مند اجرا شد. این مرحله نقش بنیادینی در تضمین دقت مدل‌سازی معادلات ساختاری و عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین دارد، زیرا داده‌های خام معمولاً شامل نویز، مقادیر مفقود و ناهمگنی مقیاس هستند که می‌تواند موجب انحراف در نتایج شود.

[1] Internal Consistency
[2] Content Validity
[3] Construct Validity
[4] Cronbach's Alpha
[5] Expert Judgment
[6] Factor Loadings

۱) **بررسی داده‌های مفقود**[1]: داده‌های ناقص ابتدا از طریق آزمون Little's MCAR بررسی شدند تا مشخص شود آیا حذف تصادفی رخ داده است یا خیر. نتایج نشان داد مقادیر مفقود در سطح قابل‌قبول (کمتر از ۵٪) و به‌صورت تصادفی هستند؛ بنابراین، به‌جای حذف موردها، از روش میانگین‌گیری گروهی[2] برای جایگزینی مقادیر استفاده شد تا از کاهش حجم نمونه جلوگیری گردد (Hair et al., 2019).

۲) **تشخیص داده‌های پرت**[3]: برای شناسایی داده‌های پرت، از آزمون Z-Score استفاده شد. مواردی که دارای مقدار مطلق بزرگ‌تر از ۳ بودند، بررسی و در صورت عدم توجیه منطقی، از مجموعه داده حذف شدند. حذف این موارد باعث بهبود نرمال بودن توزیع و افزایش برازش مدل شد.

۳) **آزمون نرمالیتی و یکنواخت‌سازی مقیاس‌ها:** پیش از اجرای تحلیل SEM، نرمال بودن داده‌ها از طریق آزمون کولموگروف–اسمیرنوف و چولگی–کشیدگی بررسی شد. مقادیر چولگی و کشیدگی در بازه ۲± قرار داشتند که نرمالیتی نسبی داده‌ها را تأیید می‌کند. برای تحلیل‌های ML، داده‌ها به‌صورت عددی استاندارد شدند تا تفاوت مقیاس میان شاخص‌ها اثر منفی بر مدل نگذارد. از روش میانگین صفر و انحراف معیار یک[4] استفاده شد که عملکرد مدل‌های مبتنی بر فاصله مانند جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبانی را بهبود می‌دهد (Han et al., 2022).

۴) **کدگذاری متغیرهای کیفی:** متغیرهای کیفی مانند جنسیت، سطح تحصیلات و سابقه کار به‌صورت کدگذاری دودویی[5] و کدگذاری ترتیبی[6] برای تحلیل‌های آماری و یادگیری ماشین آماده شدند. این کار امکان ورود داده‌ها به مدل‌های کمی را فراهم کرد.

۵) **بررسی هم‌خطی**[7]: پیش از مدل‌سازی، شاخص تورم واریانس[8] محاسبه شد. مقادیر کمتر از ۵ نشان داد که بین متغیرها هم‌خطی شدید وجود ندارد و مدل از نظر استقلال سازه‌ها معتبر است (Kline, 2023).

۶) **آماده‌سازی داده‌ها برای فازهای تحلیلی:** در پایان، مجموعه داده‌های نهایی شامل ۲۷ شاخص معتبر از ۱۱۴ نمونه پاسخ معتبر بود که پس از نرمال‌سازی، به دو بخش برای تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین تقسیم شد. داده‌ها با برچسب‌گذاری و مستندسازی کامل ذخیره گردیدند تا قابلیت بازتولید تحلیل‌ها حفظ شود.

۳-۶- روش تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در این پژوهش در دو فاز مکمل انجام شد:

۱) مدل‌سازی معادلات ساختاری برای آزمون روابط علّی و نظری میان متغیرها

۲) تحلیل پیش‌بینی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای اعتبارسنجی بیرونی و شناسایی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر مدیریت ارتباطات پروژه

این ترکیب دومرحله‌ای امکان بهره‌گیری هم‌زمان از توان تحلیل علّی–توضیحی و پیش‌بینی داده‌محور را فراهم کرد (Baduge et al., 2022 ؛Hair et al., 2019).

۳-۶-۱- مدل‌سازی معادلات ساختاری

در فاز نخست، از رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری با نرم‌افزار AMOS 26 استفاده شد. این روش به پژوهشگر اجازه می‌دهد روابط بین متغیرهای پنهان[9] و مشاهده‌شده[10] را به‌طور هم‌زمان تحلیل کند. مراحل اجرا به شرح زیر است:

[1] Missing Data Treatment
[2] Group Mean Imputation
[3] Outlier Detection
[4] Z-Standardization
[5] Dummy Encoding
[6] Ordinal Encoding
[7] Multicollinearity
[8] Variance Inflation Factor
[9] Latent Variables
[10] Observed Variables

۱) **تحلیل عاملی تأییدی:** ابتدا برای سنجش روایی سازه‌ها، تحلیل عاملی تأییدی اجرا شد. بارهای عاملی کمتر از ۰/۵ حذف و شاخص‌های برازش شامل χ^2/df، RMSEA، CFI، TLI و NFI بررسی شدند. نتایج نشان داد نسبت χ^2/df برابر ۱/۹، RMSEA برابر ۰/۰۶ و CFI برابر ۰/۹۲ بوده است که نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل می‌باشد (Kline, 2023).

۲) **آزمون فرضیات علّی:** بر اساس مدل مفهومی، روابط میان ابعاد پنج‌گانه مدیریت ارتباطات (سازمان‌دهی، مدیریت، جریان اطلاعات، رفتار و فرهنگ و فناوری) و پیامدهای پروژه (هزینه، زمان، کیفیت، رضایت ذی‌نفعان به‌صورت فردی و سازمانی، ملی و بین‌المللی) بررسی شد. مسیرهایی که مقدار بحرانی (CR) بزرگ‌تر از ±۱/۹۶ داشتند در سطح ۰/۰۵ معنادار تلقی شدند.

۳) **اعتبارسنجی و تأیید نهایی مدل:** مدل نهایی پس از اصلاح کواریانس‌های خطا و حذف مسیرهای غیرمعنادار، با شاخص‌های برازش مناسب تأیید شد. این مدل پایه تحلیلی برای فاز یادگیری ماشین محسوب گردید و متغیرهای تأییدشده از آن به‌عنوان ورودی مدل ML استفاده شدند.

۳-۶-۲- تحلیل پیش‌بینی با یادگیری ماشین

در فاز دوم، برای تکمیل تحلیل علّی و افزایش دقت پیش‌بینی، پس از بررسی مدل‌های مختلف، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. این روش با تلفیق نتایج SEM، به شناسایی و رتبه‌بندی اهمیت عوامل کلیدی کمک می‌کند (Johansen et al., 2021).

۱) انتخاب الگوریتم: جنگل تصادفی به دلیل توانایی بالا در مدیریت داده‌های با ابعاد زیاد، مقاومت در برابر بیش‌برازش[1] و قابلیت محاسبه اهمیت ویژگی‌ها[2] انتخاب شد. به‌منظور انتخاب مدل نهایی، ابتدا سه الگوریتم رقابتی شامل رگرسیون لجستیک، XGBoost و جنگل تصادفی آموزش داده‌شده و عملکرد آن‌ها بر اساس شاخص‌های دقت[3]، مساحت زیر منحنی[4]، دقت طبقه‌بندی[5]، بازخوانی یا حساسیت[6]، امتیاز F1[7] ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اگرچه مدل‌های رگرسیون لجستیک[8] و XGBoost عملکرد قابل‌قبولی داشتند، اما الگوریتم جنگل تصادفی با دستیابی به دقت ۰/۸۷ و مقدار سطح زیر نمودار برابر ۰/۹۳ بهترین کارایی را ارائه داد. ازاین‌رو این مدل به‌عنوان الگوریتم منتخب برای تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و تفسیر مدیریتی به کار گرفته شد.

۲) تنظیم پارامترها: پیکربندی مدل‌ها مطابق بهترین رویه‌های تجربی در تحلیل داده‌های پیچیده انجام شده است. پارامترهای کلیدی مدل جنگل تصادفی شامل تعداد درخت‌ها[9]، عمق درخت‌ها[10]، معیار تقسیم[11] و روش اعتبارسنجی پنج‌تایی[12] به‌صورت نظام‌مند تنظیم گردید. علاوه‌براین، دو مدل رقیب شامل رگرسیون لجستیک و XGBoost نیز برای مقایسه عملکرد به کار گرفته شدند تا ارزیابی جامعی از قابلیت پیش‌بینی حاصل شود.

به‌منظور مستندسازی دقیق فرایند مدل‌سازی و تقویت قابلیت ارزیابی نتایج، جدول **۳** تمامی تنظیمات فنی مدل‌های مدل‌سازی معادلات ساختاری، جنگل تصادفی، رگرسیون لجستیک و XGBoost را ارائه می‌کند. این رویکرد امکان بازتولید تحلیل‌ها و مقایسه مستقل پژوهشگران دیگر را فراهم می‌سازد.

۳) تقسیم داده‌ها: داده‌ها به دو بخش آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند. شاخص‌های ارزیابی شامل دقت[13]، حساسیت[14]، دقت پیش‌بینی و شاخص F1 بودند. همچنین

[1] Overfitting
[2] Feature Importance

[3] Accuracy
[4] AUC
[5] Precision
[6] Recall
[7] F1-score
[8] Logistic regression
[9] (n_estimators = 500)
[10] (max_depth = None)
[11] (Gini)
[12] (5-fold cross validation)
[13] Accuracy
[14] Recall

ناحیه زیر منحنی[1] ROC (AUC) برای ارزیابی کلی عملکرد مدل محاسبه گردید.

۴) تحلیل اهمیت متغیرها: مدل RF میزان اهمیت نسبی هر متغیر را در پیش‌بینی عملکرد ارتباطات پروژه محاسبه کرد. نتایج نشان داد سه عامل «جریان اطلاعات»، «رفتار ارتباطی» و «سطح یکپارچگی فناوری و مدیریت پروژه» بیشترین سهم را در پیش‌بینی موفقیت پروژه دارند. این یافته‌ها همسو با نتایج SEM بوده و اعتبار متقابل دو روش را تأیید کرد.

جدول ۳. کامل تنظیمات مدل‌ها

Table 3. Complete settings of the models

مدل	پارامتر	مقدار/روش
مدل‌سازی معادلات ساختاری	روش برآورد	Maximum Likelihood (ML)
	تعداد تکرار	200
	شاخص‌های اصلاح مدل	MI, SRMR, CFI, RMSEA
جنگل تصادفی	n_estimators	500
	max_depth	None
	Criterion	Gini
	Cross Validation	5-fold
رگرسیون لجستیک	Solver	binary:logistic
	Penalty	lbfgs
	Regularization (C)	L2
	max_iter	1.0
	Class Weight	1000
	Cross Validation	balanced
XGBoost	Learning Rate	0.10
	Max Depth	6
	n_estimators	200
	Objective	binary:logistic

۳-۶-۳- نقش و مزیت یادگیری ماشین در تحلیل داده‌ها

استفاده از یادگیری ماشین در این پژوهش صرفاً جنبه تکمیلی نداشته، بلکه سه کارکرد کلیدی داشته است:

۱) اعتبارسنجی بیرونی مدل مفهومی: الگوریتم‌های یادگیری ماشین نتایج مدل SEM را در قالب پیش‌بینی داده‌محور تکرار کرد. بدین ترتیب، فرضیات نظری به‌صورت تجربی و مستقل تأیید شدند (Baduge et al., 2022).

۲) شناسایی الگوهای غیرخطی و تعاملات پنهان: برخلاف SEM که روابط را خطی فرض می‌کند، ML قادر است تعاملات پیچیده و اثرات غیرخطی میان شاخص‌ها را آشکار سازد. این ویژگی به افزایش دقت مدل و کشف روابط جدید میان ابعاد ارتباطی کمک کرد (Kyriazos & Poga, 2024).

۳) افزایش قدرت پیش‌بینی و تصمیم‌گیری مدیریتی: خروجی مدل ML، علاوه بر اعتبار علمی، ارزش کاربردی برای مدیران پروژه دارد؛ زیرا می‌توانند پیش از وقوع شکست ارتباطی، متغیرهای پر ریسک را شناسایی و اقدامات اصلاحی انجام دهند (Johansen et al., 2021).

۳-۶-۴- منطق ترکیب SEM و ML

منطق نظری این ترکیب بر پایه سه اصل زیر است:

۱) SEM برای تحلیل روابط علّی-تبیینی: مدل SEM در این پژوهش برای آزمون نظریه زیربنایی و بررسی ساختارهای پنهان ارتباطات به کار رفت. این بخش به پژوهش اعتبار نظری و تبیینی می‌دهد.

۲) ML برای تحلیل پیش‌بینی-داده‌محور: یادگیری توانایی دارد داده‌های حاصل از پرسش‌نامه را به‌صورت چندبعدی تحلیل کند و الگوهای غیرخطی و تعاملات پنهان را بیابد. این امر منجر به کشف روابطی شد که در مدل‌های خطی کلاسیک قابل‌مشاهده نیستند (Kyriazos & Poga, 2024).

۳) هم‌افزایی دو رویکرد[2]: در این مدل ترکیبی، SEM پایه نظری و تئوریک را تثبیت می‌کند و سپس ML همان مدل را در محیط داده‌ای پیچیده اعتبارسنجی و تقویت می‌کند. این باعث می‌شود پژوهش از هر دو بعد «توضیحی» و «پیش‌بینی‌کننده» غنی شود (Hair et al., 2019).

۳-۶-۵- ارتباط بین اهداف، روش‌ها و نتایج

این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ضعف ارتباطات در پروژه‌ها و تعیین مهم‌ترین

[1] Area Under the Curve

[2] Analytical Synergy

پیش‌بینی‌کننده‌های آن انجام شده است. برای تحقق این اهداف، روش‌شناسی پژوهش در دو مرحله تکمیلی طراحی شده است. در مرحله نخست، مدل‌سازی معادلات ساختاری برای آزمون روابط علی بین عوامل علّی، بافتی، مداخله‌گر، راهبردها و پیامدها به کار گرفته شد. خروجی این مرحله، شناسایی مسیرهای تأثیرگذار و برازش مدل نظری بود. در مرحله دوم، خروجی‌های SEM (متغیرهای معنادار) به‌عنوان ورودی الگوریتم جنگل تصادفی در بخش یادگیری ماشین استفاده شد تا اهمیت نسبی عوامل و توان پیش‌بینی آن‌ها مشخص گردد؛ بنابراین نتایج حاصل از SEM ساختار علی مسئله را روشن می‌سازد و تحلیل ML، وزن و اولویت عوامل را تعیین می‌کند. بدین ترتیب، ارتباط میان اهداف، روش و نتایج با یک منطق تحلیلی از نوع «علّی ← پیش‌بینی» برقرار شده و یافته‌ها از هر دو بخش در راستای هدف اصلی پژوهش یکدیگر را تکمیل می‌کنند.

۳-۶-۶- تحلیل استحکام مدل[1]

به‌منظور افزایش اعتبار و پایداری نتایج مدل، آزمون Bootstrap با ۵۰۰ تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد تمامی ضرایب مسیر در سطح ۰/۰۰۱ معنادار باقی ماندند. همچنین، آزمون Robustness Check شامل سه بخش Bootstrap، Split-sample و Sensitivity Analysis انجام شد. مجموعه نتایج حاکی از ثبات ضرایب و پایداری الگوی پیشنهادی است.

۱) Bootstrap (۵۰۰ تکرار): تمامی ضرایب مسیر در سطح ۰/۰۰۱ پایدار و معنادار باقی ماندند.

۲) تقسیم داده‌ها[2]: داده‌ها به دو بخش (۳۰/۷۰) تقسیم شدند. در هر دو زیر نمونه، رتبه‌بندی عوامل کلیدی (جریان اطلاعات، مدیریت، همسویی منابع انسانی) ثابت ماند.

۳) تحلیل حساسیت[3]: حذف ۱۰٪ از داده‌ها به‌صورت تصادفی تغییری در جهت اثر مسیرهای اصلی ایجاد نکرد.

این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از استحکام و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است.

1 Robustness Check
2 Split-Sample Analysis
3 Sensitivity Analysis

۳-۷- نوآوری روش‌شناسی و منطق ترکیب SEM–ML

یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های این پژوهش، طراحی یک رویکرد ترکیبی و داده‌محور برای تحلیل سازه‌های مدیریت ارتباطات در پروژه‌های ساخت است. درحالی‌که بسیاری از پژوهش‌های پیشین عمدتاً از مدل‌سازی معادلات ساختاری برای بررسی روابط علّی میان متغیرها استفاده کرده‌اند (Baduge et al., 2022؛ Johansen et al., 2021)، این مطالعه با افزودن لایه یادگیری ماشین گامی فراتر نهاده است تا علاوه بر آزمون مدل نظری، امکان پیش‌بینی، رتبه‌بندی و سنجش اهمیت نسبی عوامل مؤثر نیز فراهم شود. بدین ترتیب، پژوهش حاضر خلأ موجود در ادبیات را از حیث فقدان رویکردهای پیش‌بینی‌محور در کنار تحلیل‌های علّی پوشش می‌دهد.

نوآوری‌های پژوهش در سه سطح تحلیلی، ابزاری و کاربردی قابل تبیین است. همان‌گونه که در جدول **۴** نشان داده شده است، در سطح نوآوری تحلیلی، ترکیب SEM با جنگل تصادفی برای نخستین بار در تحلیل ارتباطات پروژه‌های ساخت به‌کاررفته است؛ ترکیبی که امکان مدل‌سازی روابط خطی و آزمون فرضیه‌ها را در کنار کشف الگوهای غیرخطی، تعاملات پنهان و افزایش دقت پیش‌بینی فراهم می‌کند.

در سطح نوآوری ابزاری، استفاده از جنگل تصادفی به‌جای روش‌های رگرسیونی یا مدل‌های خطی متداول، امکان رتبه‌بندی دقیق سازه‌ها و ابعاد ارتباطی را فراهم ساخته است. این الگوریتم با توانایی شناسایی اثرات میان‌بعدی و حساسیت بالا در استخراج اهمیت نسبی عوامل، «نقشه‌ای داده‌محور» از سازه‌های کلیدی ارائه می‌دهد که در مطالعات پیشین گزارش نشده بود.

در سطح نوآوری کاربردی، نتایج پژوهش فراتر از ارائه تحلیل نظری بوده و به ابزارهای تصمیم‌سازی مدیریتی تبدیل شده‌اند. رتبه‌بندی کمی عوامل نشان می‌دهد که «جریان اطلاعات»، «همسویی منابع انسانی با استراتژی» و «مدیریت پروژه» بیشترین نقش را در شکل‌دهی به ضعف ارتباطات دارند. این نتایج می‌تواند مبنایی برای طراحی مداخلات مدیریتی، برنامه‌ریزی سازمانی، بهبود ساختار ارتباطات و سیاست‌گذاری در پروژه‌های ساخت قرار گیرد.

جدول ۴. نوآوری تحلیلی، ابزاری و کاربری

Table 4. Analytical, instrumental, and applied innovations

سطح نوآوری	توضیح	پیامد پژوهشی
نوآوری تحلیلی	ترکیب مدل‌سازی معادلات ساختاری با یادگیری ماشین برای نخستین بار در تحلیل ارتباطات پروژه‌های ساخت.	افزایش دقت، کشف تعاملات غیرخطی و بهبود اعتبار نتایج.
نوآوری ابزاری	استفاده از جنگل تصادفی به‌جای روش‌های رگرسیونی کلاسیک برای شناسایی اهمیت نسبی عوامل.	به‌دست‌آمده آمدن نقشه دقیق از اثرگذاری نسبی هر بعد ارتباطی.
نوآوری کاربردی	تبدیل نتایج تحلیل به ابزار تصمیم‌گیری مدیریتی برای بهبود عملکرد ارتباطات در پروژه‌های ساخت.	ارتقای ارزش عملی و سیاست‌گذاری برای مدیران پروژه.

ترکیب این سه سطح نوآوری، پژوهش حاضر را به یک چارچوب تحلیلی دوگانه (علّی-پیش‌بینی) مجهز می‌کند که تصویری جامع‌تر، دقیق‌تر و قابل‌اتکاتر نسبت به مطالعات پیشین ارائه می‌دهد و جایگاه پژوهش را در ادبیات مدیریت ارتباطات پروژه‌ها ارتقا می‌بخشد.

۴- یافته‌های تحقیق و تحلیل نتایج

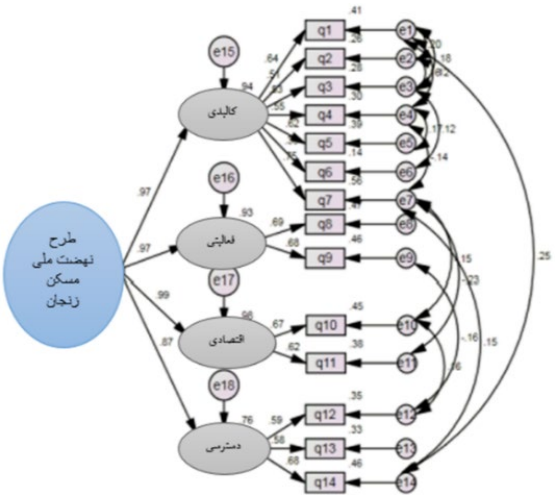
۴-۱- تحلیل عاملی تأییدی و مدل‌سازی معادلات ساختاری

به‌منظور ارزیابی روایی سازه و کفایت مدل اندازه‌گیری، تحلیل عاملی تأییدی برای تمامی ابعاد اصلی پژوهش انجام شد. این تحلیل به پژوهشگر امکان می‌دهد روابط میان متغیرهای مشاهده‌شده و سازه‌های پنهان را ارزیابی و تأیید کند. نتایج نشان داد تمامی گویه‌ها دارای بار عاملی بالاتر از ۰/۶۰ بوده و در سطح معناداری ۰/۰۵ مورد تأیید قرار گرفتند که بیانگر اعتبار مفهومی مناسب ابزار است. همچنین شاخص‌های برازش از مقادیر استاندارد فراتر رفتند که نشان‌دهنده تطابق مطلوب داده‌های تجربی با مدل نظری می‌باشد (Ghasemi, 2010). جداول شاخص برازش در پیوست پژوهش آورده شده است.

۴-۱-۱- تحلیل عاملی تأییدی متغیر عوامل علی

بارهای عاملی نشان دادند که در میان عوامل علّی، عامل اقتصادی با ضریب (۰/۹۷۵) بیشترین نقش را در شکل‌گیری ضعف ارتباطات ایفا می‌کند و پس‌ازآن، عامل کالبدی (۰/۹۳۸)، عامل فعالیتی (۰/۹۳۴) و عامل دسترسی (۰/۷۵۸) قرار دارند. این یافته‌ها حاکی از آن است که ملاحظات اقتصادی و کالبدی بیش از سایر عوامل در ایجاد نارسایی‌های ارتباطی پروژه‌ها نقش دارند.

مدل نهایی عوامل علّی در شکل **۲** نمایش داده شده است. مطابق با نتایج، تمامی شاخص‌ها در محدوده مطلوب قرار دارند که نشان‌دهنده برازش قابل‌قبول مدل اصلاح‌شده است.

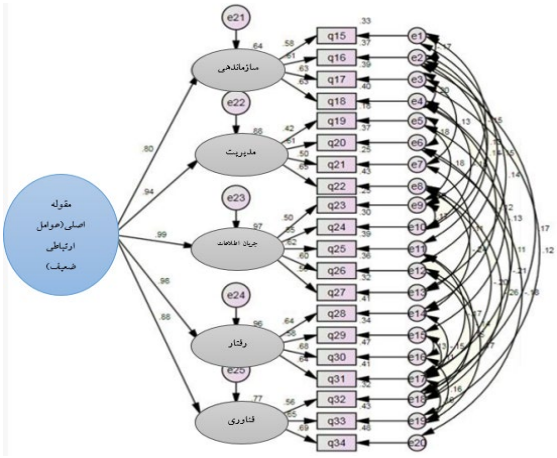


شکل ۲. مدل نهایی عوامل علی با ضریب استاندارد.

Figure 2. Final model of causal factors with standardized coefficients.

۴-۱-۲- تحلیل متغیر پدیده اصلی (عوامل ارتباطی ضعیف)

مدل اصلاحی پدیده اصلی در شکل **۳** نمایش داده شده است. بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پارادایمی، «ضعف در ارتباطات سازمانی» به‌عنوان پدیده مرکزی پژوهش شناسایی گردید. این پدیده از پنج مؤلفه اصلی شامل جریان اطلاعات (۰/۹۷۴)، سازمان‌دهی (۰/۹۶۱)، مدیریت (۰/۸۸۱)، فناوری (۰/۷۷۱) و رفتار (۰/۶۳۵) شکل گرفته است. ضرایب بار عاملی به‌روشنی نشان می‌دهند که اختلال در جریان اطلاعات و ناکارآمدی در سازمان‌دهی، بیشترین سهم را در تضعیف ارتباطات درون‌سازمانی دارند.



شکل ۳. مدل نهایی پدیده اصلی با ضریب استاندارد.

Figure 3. Final model of the main phenomenon with standardized coefficients.

۴-۱-۳- تحلیل متغیر راهبردها و اقدامات

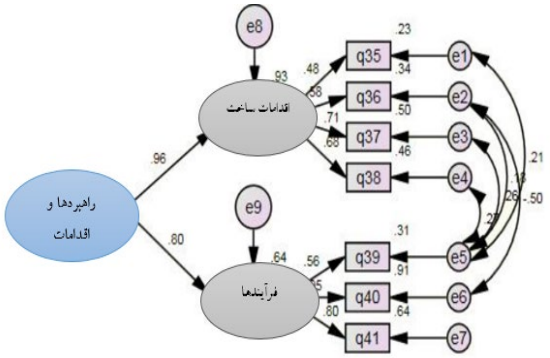
مدل اصلاحی راهبردها و اقدامات در شکل **۴** نمایش داده شده است. با توجه به ضرایب همبستگی چندگانه می‌توان گفت اقدامات ساخت اجرای پروژه‌های ساختمانی (۰/۹۳۰) بیشتر از فرایندها (۰/۶۴۲) در تبیین راهبردها نقش داشته است.

۴-۱-۴- تحلیل متغیر عوامل مداخله‌گر

مدل اصلاحی عوامل مداخله‌گر در شکل **۵** نمایش داده شده است. توجه به ضرایب همبستگی چندگانه می‌توان گفت مدیریت (۰/۹۱۵) بیشتر از سایر ابعاد و بعدازآن فرهنگ‌سازمانی (۰/۸۲۷)، فناوری (۰/۷۹۱)، ارزیابی عملکرد (۰/۶۵۹)، مطابقت سیستم فعلی (سنتی) با پیشرفته آن (یادگیری ماشین) (۰/۴۰۱) و رفتار (۰/۱۰۵) به ترتیب در عوامل مداخله‌گر نقش داشتند. این یافته‌ها حاکی از آن است که به‌کارگیری فناوری‌های نوین ارتباطی و سبک‌های مدیریتی مشارکتی می‌تواند اثرات منفی عوامل علّی را تعدیل نماید.

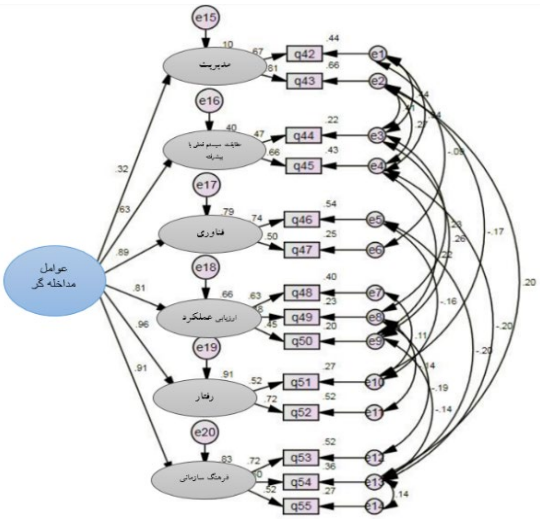
۴-۱-۵- تحلیل متغیر عوامل بافتاری

مدل اصلاحی عوامل بافتاری در شکل **۶** نمایش داده شده است. با توجه به ضرایب همبستگی چندگانه می‌توان گفت همسویی برنامه‌های سامانه منابع انسانی با استراتژی سازمان (۰/۹۷۹)، بیشتر از انگارش کارکنان به سازمان و سازمان به کارکنان (۰/۹۷۱) و محیط رقابتی پویا (۰/۹۷۰) در تبیین عوامل بافتاری نقش داشته است.



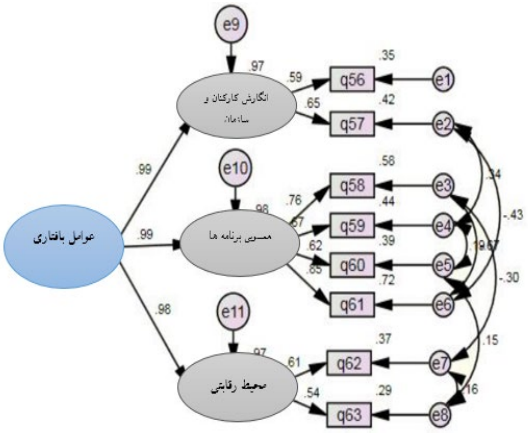
شکل ۴. مدل نهایی راهبردها و اقدامات با ضریب استاندارد.

Figure 4. Final model of strategies and actions with standardized coefficients.



شکل ۵. مدل نهایی عوامل مداخله‌گر با ضریب استاندارد.

Figure 5. Final model of intervening factors with standardized coefficients.



شکل ۶. مدل نهایی عوامل بافتاری با ضریب استاندارد.

Figure 6. Final model of contextual factors with standardized coefficients.

۴-۱-۶- تحلیل متغیر عوامل پیامدها

مدل اصلاحی عوامل پیامدها در شکل **۷** نمایش داده شده است. با توجه به ضرایب همبستگی چندگانه می‌توان گفت پیامدهای سازمانی (۰/۸۸۵)، پیامدهای ملی و بین‌المللی (۰/۸۲۳) و پیامدهای فردی (۰/۵۵۸) در تبیین پیامدها نقش داشته‌اند.

۴-۲- مدل ساختاری و آزمون فرضیات تحقیق

پس از تأیید مدل‌های اندازه‌گیری و اطمینان از روایی سازه‌ها در مرحلهCFA ، مدل ساختاری برای آزمون روابط علی میان متغیرهای پنهان موردبررسی قرار گرفت. تحلیل معادلات ساختاری با استفاده از نرم‌افزار AMOS نسخه ۱۸ انجام شد تا اثر مستقیم و غیرمستقیم متغیرها بر یکدیگر به‌طور هم‌زمان مورد آزمون قرار گیرد. مدل اصلاح‌شده ساختاری خروجی نرم‌افزار در شکل **۸**ارائه شده است.

۴-۲-۱- شاخص‌های برازش مدل ساختاری

مدل نهایی ساختاری پس از اصلاح مسیرها، شاخص‌های برازش قابل‌قبول به دست آورد:

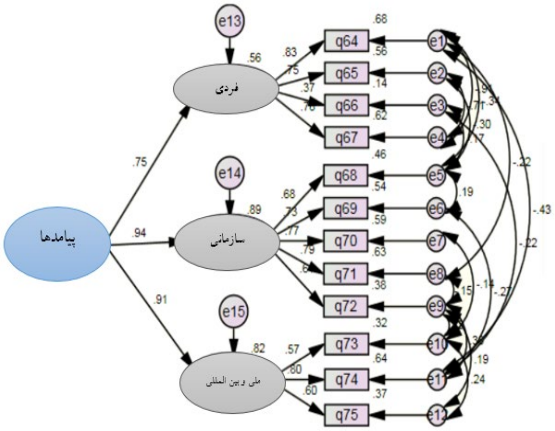
۱) $\chi^2/df = 1.9 < 3$
۲) $RMSEA = 0.06 < 0.08$
۳) $NFI = 0.851$ و $CFI = 0.867$ (کمی کمتر از حد ایده‌آل ۰/۹۰، اما قابل‌قبول با توجه به سایر شاخص‌ها)

این مقادیر در کنار سایر شاخص‌های برازش مانند GFI، TLIو IFI که بالاتر از ۰/۸۵ گزارش شده‌اند، نشان می‌دهند که ساختار پیشنهادی پژوهش از هم‌خوانی منطقی با داده‌های تجربی برخوردار است.

۴-۲-۲- آزمون فرضیات پژوهش

برای آزمون روابط میان متغیرهای پنهان، مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم مدل بررسی شدند. تمامی مسیرهای اصلی از نظر آماری معنادار بودند، هرچند شدت اثر در برخی مسیرها متفاوت است. به‌طور خلاصه، نتایج جدول **۵** و جدول **۶** نشان می‌دهد:

۱) اثر عوامل علّی بر راهبردها: اثر قوی و معنادار
۲) اثر عوامل مداخله‌گر بر راهبردها: اثر ضعیف اما معنادار
۳) اثر عوامل بافتاری بر راهبردها: اثر قوی و معنادار
۴) اثر راهبردها بر پیامدها: اثر بسیار قوی و مستقیم



شکل ۷. مدل نهایی پیامدها با ضریب استاندارد.

Figure 7. Final model of outcomes with standardized coefficients.

جدول ۵. آزمون فرضیات تحقیق

Table 5. Testing of research hypotheses

رد یا پذیرش	همبستگی چندگانه مربع	ضریب استاندارد	سطح معناداری	عدد معناداری	خطای استاندارد	تخمین غیراستاندارد	
پذیرش	۰/۸۷۴	۰/۹۳۵	*	۱۳/۵۶۵	۰/۰۶۷	۰/۹۰۲	عوامل علی
پذیرش	۰/۹۱۲	۰/۱۹۹	*	۴/۲۴۳	۰/۳۱	۰/۱۳۱	عوامل اصلی
پذیرش		۰/۸۵۳	*	۷/۶۸۸	۰/۰۶۸	۰/۵۲۴	عوامل بافتاری
پذیرش		۰/۱۱۶	۰/۰۴۳	۲/۰۱۹	۰/۰۳۸	۰/۰۷۸	عوامل مداخله‌گر
پذیرش	۰/۹۳۷	۰/۹۶۸	*	۸/۴۳۵	۰/۱۳۶	۱/۱۴۶	راهبردها

توضیحات: *به معنای سطح معناداری کمتر از ۰/۰۰۱ است.

جدول ۶. نتایج تحلیل مسیر روابط تحقیق

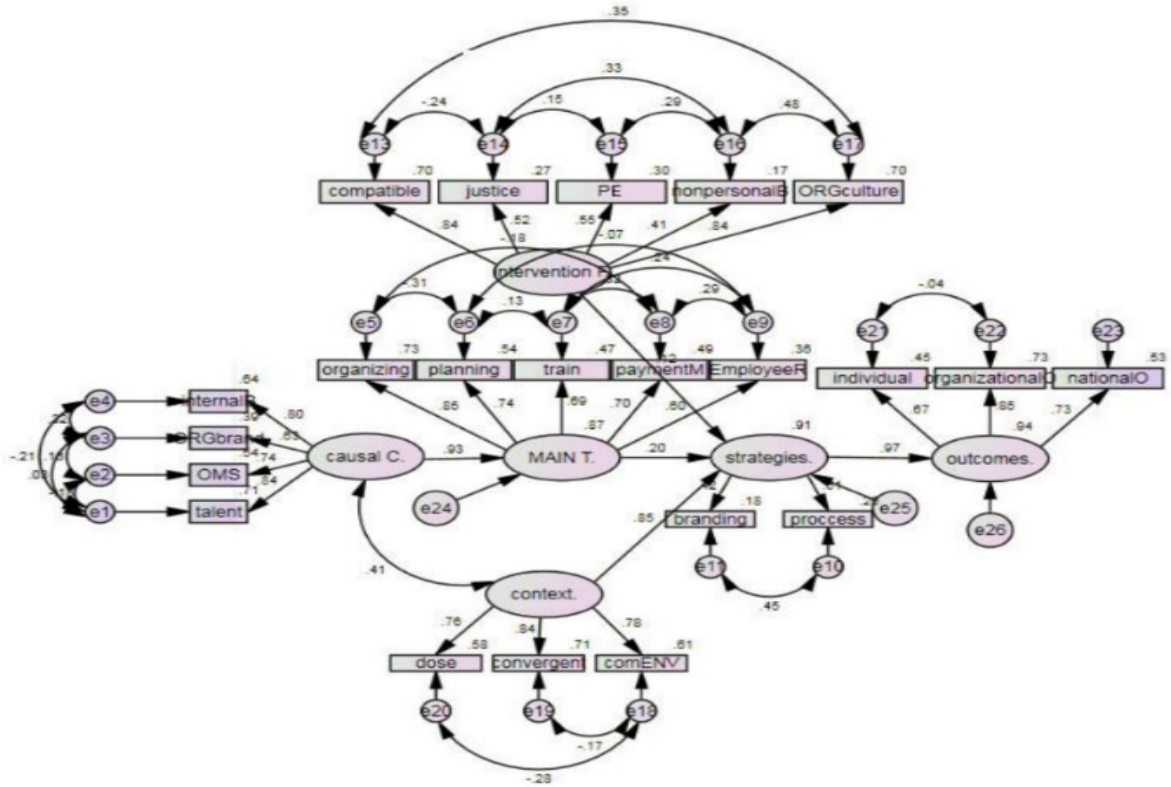
Table 6. Results of path analysis for research relationships

مسیر	اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم	اثر کل	رد یا پذیرش
عوامل علّی	۰/۹۳۵	-	۰/۹۳۵	پذیرش
عوامل علّی - راهبردها	-	۰/۱۸۶	۰/۱۸۶	پذیرش
عوامل علّی - نتایج	-	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	پذیرش
عوامل مداخله‌گر - راهبردها	۰/۱۱۶	-	۰/۱۱۶	پذیرش
عوامل مداخله‌گر - نتایج	-	۰/۱۱۳	۰/۱۱۳	پذیرش
عوامل بافتاری - راهبردها	۰/۸۵۳	-	۰/۸۵۳	پذیرش
عوامل بافتاری – نتایج	-	۰/۸۲۶	۰/۸۲۶	پذیرش
سامانه مدیریت - راهبردها	۰/۱۱۹	-	۰/۱۹۹	پذیرش
سامانه مدیریت - نتایج	-	۰/۱۹۳	۰/۱۹۳	پذیرش
راهبردها و اقدامات - نتایج	۰/۹۶۸	-	۰/۸۶۳	پذیرش

جدول ۷. نتایج آزمون فرضیات پژوهش بر اساس مدل معادلات ساختاری

Table 7. Results of Testing research hypotheses based on structural equation modeling

فرضیه	مسیر آزمون‌شده	ضریب استاندارد(β)	مقدارt	نتیجه
H1	عوامل علّی ⟶ راهبردها	۰/۹۳۵	۱۲/۴۷	تأیید
H2	عوامل مداخله‌گر ⟶ راهبردها	۰/۱۱۶	۲/۳۱	تأیید (ضعیف)
H3	عوامل بافتاری ⟶ راهبردها	۰/۸۵۳	۱۰/۸۲	تأیید
H4	راهبردها ⟶ پیامدها	۰/۹۶۸	۱۴/۶۳	تأیید قوی



شکل ۸. مدل نهایی ساختاری با ضریب استاندارد.

Figure 8. Final structural model with standardized coefficients.

بر این اساس، فرضیات ۱ تا ۴ پژوهش همگی تأیید شدند. در جدول **۷** ضرایب استاندارد، آماره t و معناداری مسیرها گزارش شده است. تمامی ضرایب از نظر آماری در سطح ۰/۰۰۱ معنی‌دار بوده‌اند.

۴-۲-۳- جمع‌بندی مدل ساختاری

نتایج SEM به‌روشنی نشان داد که:

۱) مدل پیشنهادی از برازش مناسبی برخوردار است.
۲) مسیرهای علّی تأییدشده، نشان‌دهنده هم‌راستایی قوی بین مدل نظری و داده‌های تجربی‌اند.
۳) روابط علی میان متغیرها با یافته‌های تحلیل عاملی تأییدی سازگار است.
۴) راهبردهای مدیریتی و سازمانی نقش میانجی قوی بین عوامل ورودی (علی، مداخله‌گر و بافتاری) و پیامدها دارند.

اگرچه SEM امکان آزمون روابط نظری و شناسایی اثرات مستقیم و غیرمستقیم را فراهم می‌کند، اما از منظر پیش‌بینی عملکرد و رتبه‌بندی اهمیت متغیرها محدود است.

در همین راستا، در بخش بعدی، از یادگیری ماشین به‌عنوان رویکردی مکمل استفاده شده است تا بتوان توان پیش‌بینی و تبیین روابط پیچیده‌تر میان متغیرها را ارتقا داد.

۴-۳- جمع‌بندی و تبیین مدل پژوهش

برای ارزیابی روایی سازه و صحت مدل اندازه‌گیری، تحلیل عاملی تأییدی (CFA) برای هر یک از متغیرهای مکنون انجام شد. نتایج نشان داد که بارهای عاملی برای تمامی شاخص‌ها بالاتر از ۰/۶۰ بوده و در سطح معناداری ۰/۰۵ تأیید شدند.

بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پارادایمی، پدیده مرکزی پژوهش یعنی «ضعف در ارتباطات سازمانی» و ابعاد مرتبط با آن در قالب مجموعه‌ای از شرایط علّی، مداخله‌گر، بافتاری، راهبردی و پیامدی موردبررسی قرار گرفت. تفسیر و تبیین هر یک از این ابعاد به همراه ضرایب بار عاملی مربوطه در جدول **۸** ارائه شده است. به‌طورکلی، مدل پارادایمی نشان می‌دهد که ضعف در ارتباطات سازمانی پدیده‌ای چندبعدی است که از ترکیب عوامل اقتصادی، کالبدی و مدیریتی شکل می‌گیرد و از طریق به‌کارگیری فناوری، همسویی منابع انسانی با استراتژی و اقدامات ساختاری قابل تعدیل است. این مدل تأکید می‌کند که برای دستیابی به سازمان‌های کارآمد و رقابت‌پذیر، بازنگری در سازوکارهای ارتباطی نه‌تنها در سطح فردی بلکه در سطوح کلان ساختاری و محیطی ضروری است.

۴-۴- اعتبار سنجی بیرونی مدل با یادگیری ماشین

در راستای مسیر ترکیبی پژوهش (شکل **۱**)، مرحله چهارم به اعتبارسنجی بیرونی مدل از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین اختصاص یافت. با توجه به پیچیدگی روابط میان متغیرهای سازمانی و احتمال وجود تعاملات غیرخطی میان آن‌ها، در این پژوهش از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌عنوان مکمل روش مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده شد. هدف از این رویکرد، نه جایگزینی SEMبلکه اعتبارسنجی بیرونی نتایج نظری و بهبود توان پیش‌بینی مدل بود. درواقع، یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری داده‌محور به پژوهش کمک کرد تا اطمینان حاصل شود که روابط شناسایی‌شده در SEM، تنها محدود به ساختار نظری نیستند، بلکه در داده‌های واقعی نیز از قدرت پیش‌بینی بالا برخوردارند. به‌بیان‌دیگر، ML در این تحقیق نقش تأییدکننده و تقویت‌کننده یافته‌های آماری SEMرا ایفا کرده است.

۴-۴-۱- اجرای الگوریتم‌ها و انتخاب مدل برتر

برای تحلیل داده‌ها، سه الگوریتم متداول و معتبر یادگیری ماشین، شامل رگرسیون لجستیک، XGBoost و جنگل تصادفی مورداستفاده قرار گرفتند. انتخاب این سه الگوریتم به دلیل توازن میان قابلیت تفسیرپذیری و توان پیش‌بینی غیرخطی انجام شد. داده‌های پرسشنامه و اسناد پروژه‌ها پس از پاک‌سازی و نرمال‌سازی، به مدل‌ها وارد شدند و عملکرد هر الگوریتم با شاخص‌های استاندارد Accuracy، AUC، Precision، Recall و F1-score ارزیابی گردید.

جدول ۸. جمع‌بندی و تبیین مدل پژوهش

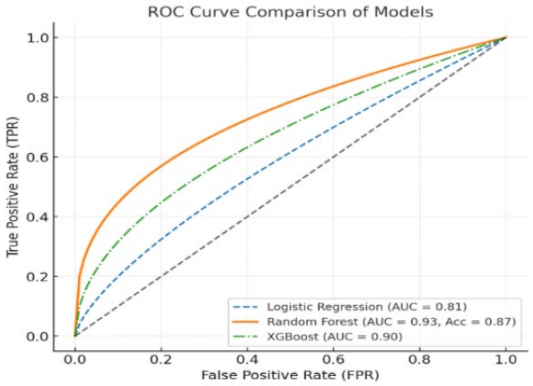
Table 8. Summary and explanation of the research model

عامل	مؤلفه اصلی	ضریب	تفسیر
عوامل ضعیف ارتباطی	جریان اطلاعات	۰/۹۷۴	بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پارادایمی، «ضعف در ارتباطات سازمانی» به‌عنوان پدیده مرکزی پژوهش شناسایی گردید. ضرایب بار عاملی به‌روشنی نشان می‌دهند که اختلال در جریان اطلاعات و ناکارآمدی در سازمان‌دهی، بیشترین سهم را در تضعیف ارتباطات درون‌سازمانی دارند.
	سازمان‌دهی	۰/۹۶۱	
	مدیریت	۰/۸۸۱	
	فناوری	۰/۷۷۱	
	رفتار و فرهنگ	۰/۶۳۵	
عوامل علّی	عامل اقتصادی	۰/۹۷۵	در بررسی شرایط علّی، چهار عامل کلیدی مؤثر بر شکل‌گیری این پدیده شناسایی شد، نتایج نشان می‌دهد که محدودیت‌های اقتصادی و کالبدی بیشترین نقش را در ایجاد زمینه‌های ضعف ارتباطی ایفا می‌کنند. به‌بیان‌دیگر، کمبود منابع مالی و زیرساختی موجب کاهش کیفیت و فراوانی تعاملات سازمانی شده است.
	عامل کالبدی	۰/۹۳۸	
	عامل فعالیتی	۰/۹۳۴	
	عامل دسترسی	۰/۷۵۸	
عوامل مداخله‌گر	مدیریت	۰/۹۱۵	شرایط مداخله‌گر شامل متغیرهایی است که شدت یا جهت اثرگذاری عوامل علّی را تغییر می‌دهند. مدیریت، رفتار و فناوری نقش تقویت‌کننده دارند، درحالی‌که مطابقت با سیستم سنتی به‌عنوان عاملی بازدارنده عمل می‌کند. این یافته‌ها حاکی از آن است که به‌کارگیری فناوری‌های نوین ارتباطی و سبک‌های مدیریتی مشارکتی می‌تواند اثرات منفی عوامل علّی را تعدیل نماید.
	رفتار و فرهنگ‌سازمانی	۰/۸۲۷	
	فناوری	۰/۷۹۱	
	ارزیابی عملکرد	۰/۸۲۷	
	مطابقت سیستم فعلی (سنتی) با پیشرفته آن (یادگیری ماشین)	۰/۴۰۱	
عوامل بافتاری راهبردها	همسویی منابع انسانی با استراتژی سازمان	۰/۹۷۹	در بعد شرایط بافتاری، سه مؤلفه اصلی شناسایی شد، این مؤلفه‌ها بیانگر آن هستند که وجود انسجام درونی، نگرش مثبت کارکنان نسبت به سازمان و پویایی محیط بیرونی می‌تواند بستر مناسبی برای بهبود و بازسازی ساختارهای ارتباطی فراهم سازد. به‌منظور مقابله با ضعف ارتباطی، راهبردها و اقدامات سازمانی در دو بعد «اقدامات ساخت» و «فرایندها» تعریف شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که اقدامات ساختاری – نظیر بازطراحی شبکه‌های رسمی و غیررسمی ارتباطات و اصلاح ساختار سازمانی اثربخش‌تر از تغییر صرف در فرایندهای ارتباطی است.
	انگارش کارکنان و سازمان	۰/۹۷۱	
	محیط رقابتی پویا	۰/۹۷۰	
	اقدامات ساختاری	۰/۹۳۰	
	فرایندها	۰/۶۴۲	
پیامدها	سازمانی	۰/۸۸۵	درنهایت، اجرای راهبردهای مذکور منجر به بروز پیامدهای چندسطحی در سازمان گردید. این پیامدها در سه سطح «سازمانی»، «ملی و بین‌المللی» و «فردی» شناسایی شدند. نتایج بیانگر آن است که بهبود ارتباطات سازمانی بیش از همه در ارتقای عملکرد و کارایی سازمان مؤثر است و در سطح کلان نیز منجر به افزایش اعتبار و تعاملات ملی و بین‌المللی می‌شود؛ درحالی‌که اثرات فردی، هرچند معنادار، در سطح پایین‌تری قرار دارد.
	ملی و بین‌المللی	۰/۸۲۳	
	فردی	۰/۵۵۸	

جدول ۹. مقایسه عملکرد سه الگوریتم منتخب در پیش‌بینی ضعف ارتباطات پروژه‌های ساختمانی

Table 9. Performance comparison of three selected algorithms in predicting communication weaknesses in construction projects

الگوریتم	Accuracy	AUC	Precision	Recall	F1-score
رگرسیون لجستیک	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۴
XGBoost	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۳
جنگل تصادفی	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۵



شکل ۹. مقایسه منحنی ROC سه الگوریتم منتخب (رگرسیون لجستیک، جنگل تصادفی و XGBoost).

Figure 9. Comparison of ROC curves for three selected algorithms (logistic regression, random forest, and XGBoost).

نتایج مقایسه (جدول **۹** و شکل **۹**) نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با مقدار سطح زیر نمودار ۰/۹۳ و دقت ۰/۸۷ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی ضعف ارتباطات پروژه‌های ساختمانی ارائه داده است. به همین دلیل، این الگوریتم برای تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و پیش‌بینی عملکرد پروژه به‌عنوان مدل اصلی پژوهش انتخاب شد.

۴-۴-۲- ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی

به‌منظور سنجش کارایی مدل منتخب پژوهش، شاخص‌های ارزیابی استاندارد برای الگوریتم جنگل تصادفی محاسبه شد. جدول **۱۰** مقادیر Accuracy، AUC، F1و میانگین دقت حاصل از اعتبارسنجی متقابل ۵ بخشی را گزارش می‌کند که بیانگر عملکرد پایدار و قابل‌اتکای مدل است. در تمامی مدل‌های یادگیری ماشین، از اعتبارسنجی متقاطع پنج‌لایه استفاده شد. این روش با توجه به حجم نمونه و توصیه‌های پژوهش‌های مشابه، تعادل مناسبی میان واریانس مدل و پایداری نتایج ایجاد می‌کند. همان‌گونه مشاهده می‌شود، مقادیر بالای AUC و F1 نشان می‌دهد مدل علاوه بر تفکیک‌پذیری مناسب، توازن مطلوبی بین Precision و Recall برقرار کرده و برای تحلیل‌های بعدی قابل‌اتکاست.

۴-۴-۳- نقش تحلیلی یادگیری ماشین در بهبود نتایج

نتایج الگوریتم جنگل تصادفی از چند جهت به غنای تحلیلی پژوهش افزود:

۱) **تأیید تجربی نتایج SEM:** الگوریتم RF نشان داد که متغیرهای «جریان اطلاعات»، «همسویی منابع انسانی با استراتژی سازمان» و «مدیریت پروژه» بیشترین وزن را در پیش‌بینی ضعف ارتباطات دارند (جدول **۱۱**). این سه عامل دقیقاً همان متغیرهایی بودند که در SEM نیز دارای بیشترین بار عاملی یا ضریب مسیر بودند. این هم‌گرایی میان دو روش، اعتبار یافته‌ها را به‌طور قابل‌توجهی تقویت کرد.

۲) **شناسایی روابط غیرخطی و اثرات ترکیبی:** برخلاف SEM که محدود به روابط خطی و مشخص است، RF توانست اثرات هم‌زمان و غیرخطی میان متغیرها را کشف کند. برای مثال، تعامل بین «مدیریت پروژه» و «جریان اطلاعات» به‌عنوان یک اثر ترکیبی برجسته شناسایی شد؛ موضوعی که در SEM قابل مدل‌سازی مستقیم نیست.

۳) **بهبود توان پیش‌بینی عملی مدل:** RF توانست ضعف ارتباطات را با دقت ۰/۸۷، حساسیت ۰/۸۴ و سطح زیر نمودار ۰/۹۳ پیش‌بینی کند (جدول **۱۰**). این نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی نه‌تنها از نظر نظری معتبر است، بلکه از نظر پیش‌بینی داده‌های واقعی نیز عملکرد قابل‌اعتماد و پایداری دارد. این ویژگی، مدل پژوهش را از یک چارچوب توصیفی صرف به یک ابزار پیش‌بینی‌کننده مدیریتی ارتقا داد.

۴-۴-۴- تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و نتایج

تحلیل اهمیت ویژگی‌ها در مدل RF (شکل **۱۰** و جدول **۱۱**) نشان داد سه متغیر زیر نقش کلیدی در پیش‌بینی ضعف ارتباطات دارند: این یافته‌ها با نتایج مدل SEM از نظر رتبه و جهت اثر مطابقت داشتند و بنابراین نشان دادند که ترکیب دو روش می‌تواند هم از منظر تئوریک (از طریق آزمون روابط علی) و هم از منظر تجربی و پیش‌بینی‌کننده، دیدگاهی کامل‌تر فراهم کند. از دیدگاه مدیریتی، این نتایج بیانگر آن است که تمرکز بر سه حوزه یادشده، می‌تواند بیشترین اثر را در بهبود ارتباطات و

کاهش ریسک‌های عملکردی پروژه‌های ملی ساختمانی داشته باشد.

جدول ۱۰. شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی

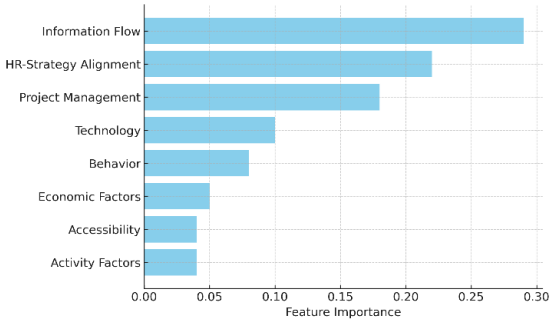
Table 10. Performance evaluation metrics of the random forest algorithm

شاخص ارزیابی	مقدار
دقت پیش‌بینی	۰/۸۷
ضریب F1	۰/۸۵
مساحت زیر منحنی	۰/۹۳
اعتبارسنجی متقابل - میانگین دقت	۰/۸۶

جدول ۱۱. سه متغیر کلیدی بر اساس اهمیت ویژگی‌ها در مدل جنگل تصادفی

Table 11. Three key variables based on feature importance in the random forest model

متغیر	اهمیت (وزن)
جریان اطلاعات	۰/۲۹
همسویی منابع انسانی با استراتژی	۰/۲۲
مدیریت پروژه	۰/۱۸



شکل ۱۰. اهمیت ویژگی در مدل جنگل تصادفی.

Figure 10. Feature importance in the random forest model.

به‌طورکلی، نتایج مدل جنگل تصادفی نشان می‌دهد که ضعف ارتباطات بیش از هر چیز تحت تأثیر جریان اطلاعات ناکافی، همسویی ضعیف منابع انسانی با راهبردها و ضعف در مدیریت پروژه است؛ بنابراین مداخلات مدیریتی در این سه حوزه می‌تواند بیشترین تأثیر را بر بهبود عملکرد پروژه‌های ساختمانی داشته باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی معادلات ساختاری و یادگیری ماشین، به‌ویژه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای شناسایی و پیش‌بینی ریسک‌های ناشی از ضعف ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی باشد.

۴-۵- مقایسه و جمع‌بندی نهایی نتایج SEM و ML

با توجه به اهداف پژوهش و رویکرد ترکیبی مورداستفاده، در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی معادلات ساختاری و یادگیری ماشین با یکدیگر مقایسه و تفسیر می‌شوند تا روشن شود هر یک از این دو روش چه سهمی در اعتبار نظری و تجربی پژوهش داشته‌اند. مدل SEM امکان آزمون روابط علی میان متغیرهای مکنون را فراهم آورد و توانست مسیرهای اثرگذاری را در چارچوبی نظری تبیین کند؛ درحالی‌که روش ML با بهره‌گیری از داده‌های واقعی، به ارزیابی قدرت پیش‌بینی و اهمیت عملی متغیرها پرداخت. ترکیب این دو رویکرد موجب شد مدل نهایی پژوهش از دو جنبه «اعتبار علمی» و «کاربرد مدیریتی» تقویت گردد.

۴-۵-۱- نتایج مشترک و هم‌راستا

بررسی نتایج نشان داد که یافته‌های هر دو روش از هم‌گرایی قابل‌توجهی برخوردارند. در هر دو تحلیل، متغیرهای «جریان اطلاعات»، «مدیریت پروژه» و «همسویی منابع انسانی با استراتژی سازمان» به‌عنوان عوامل کلیدی در تبیین ضعف یا بهبود ارتباطات پروژه‌های ساختمانی شناسایی شدند. در مدل SEM، این متغیرها دارای بالاترین ضرایب استاندارد و بار عاملی بودند (به‌ویژه جریان اطلاعات با ۰/۹۷۴ و مدیریت با ۰/۸۸۱)، درحالی‌که در مدل ML نیز همین عوامل دارای بیشترین وزن پیش‌بینی بودند. این هم‌پوشانی نتایج، اعتبار درونی و بیرونی مدل نظری پژوهش را تقویت کرد.

۴-۵-۲- تمایز کارکردی دو روش

در عین هم‌گرایی مفهومی، تفاوت در کارکرد این دو روش به‌وضوح قابل‌مشاهده است:

- **مدل SEM** : روابط خطی و علی میان متغیرها را مشخص کرد و توانست مسیرهای اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم را با شاخص‌های برازش قوی تأیید نماید. بااین‌حال، این روش محدود به فروض اولیه مدل نظری و روابط از پیش تعریف‌شده بود.

- **مدل ML**: با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها را شناسایی کرد. برخلاف SEM که فرض ساختار علی مشخص دارد، ML بدون پیش‌فرض آماری، به کشف الگوهای پنهان در داده‌ها پرداخت. نتایج نشان داد که مدل ML توانست ضعف ارتباطات پروژه‌ها را با دقت ۰/۸۷ و مساحت زیر منحنی ROC برابر ۰/۹۳ پیش‌بینی کند؛ بدین معنا که مدل، علاوه بر تبیین نظری، از قابلیت پیش‌بینی واقعی نیز برخوردار است.

۴-۵-۳- مزیت ترکیب دو روش

تلفیق SEM و ML در این پژوهش، رویکردی **نوآورانه و چندسطحی** ایجاد کرد. SEMچارچوب نظری و روابط علی را تعیین نمود، درحالی‌که ML اعتبار پیش‌بینی این روابط را در داده‌های واقعی آزمود و متغیرهای کلیدی را رتبه‌بندی کرد. این ترکیب موجب شد تا مدل نهایی از سه مزیت کلیدی برخوردار شود:

۱) **افزایش روایی مدل:** هم‌راستایی نتایج دو روش، نشان‌دهنده روایی سازه‌ای بالا و انسجام مفهومی میان داده‌های نظری و تجربی است.

۲) **کشف روابط غیرخطی پنهان:** ML توانست الگوهای پیچیده‌ای را شناسایی کند که در SEM قابل‌مشاهده نبودند، مانند اثر ترکیبی میان «جریان اطلاعات» و «مدیریت پروژه» بر کیفیت تصمیم‌گیری ارتباطی.

۳) **قابلیت استفاده مدیریتی:** خروجی ML، به‌ویژه در قالب رتبه‌بندی متغیرها به مدیران امکان می‌دهد تا حوزه‌های بحرانی را در اولویت اصلاح قرار دهند و منابع سازمانی را هدفمندتر تخصیص دهند.

۴-۵-۴- مقایسه کمی عملکرد دو مدل

به‌منظور جمع‌بندی نهایی، شاخص‌های کمی دو مدل در جدول **۱۲** آورده شده است.

جدول ۱۲. مقایسه کمی عملکرد مدل‌های SEM و ML در تبیین و پیش‌بینی ضعف ارتباطات

Table 12. Quantitative comparison of SEM and ML models' performance in explaining and predicting communication weaknesses

شاخص	SEM	RF
R^2	۰/۸۲	–
RMSEA	۰/۰۶	–
CFI	۰/۹۲	–
NFI	۰/۹۱	–
Accuracy	–	۰/۸۷
Recall	–	۰/۸۴
Precision	–	۰/۸۶
F1-score	–	۰/۸۵
AUC	–	۰/۹۳

بر اساس این مقایسه، SEM توانست برازش نظری مطلوبی ارائه دهد، درحالی‌که RFبا دقت بالا و شاخص AUC قوی، توان پیش‌بینی بالاتری از خود نشان داد. بنابراین، ترکیب نتایج این دو مدل نه‌تنها یافته‌های پژوهش را معتبرتر کرد، بلکه از منظر کاربردی نیز چارچوبی برای پیش‌بینی ضعف‌های ارتباطی و بهبود تصمیم‌گیری در پروژه‌ها فراهم ساخت. بدین ترتیب، رویکرد ترکیبی SEM–ML در این پژوهش، چارچوبی علمی، پیش‌بینی‌پذیر و مبتنی بر داده ارائه کرد که می‌تواند به‌عنوان مدل مرجع برای مدیریت ارتباطات در پروژه‌های ملی مورداستفاده قرار گیرد.

۴-۵-۵- جمع‌بندی نهایی مدل ترکیبی

نتایج تلفیقی SEM و ML نشان دادند که:

- عوامل علی و بافتاری بیشترین تأثیر را بر راهبردهای مدیریت ارتباطات دارند.
- راهبردها مستقیماً پیامدهای سازمانی را تقویت می‌کنند.
- جریان اطلاعات، مدیریت پروژه و همسویی منابع انسانی سه متغیر کلیدی در هر دو مدل هستند.
- یادگیری ماشین نه‌تنها یافته‌های SEM را تأیید کرد، بلکه توانست روابط غیرخطی و الگوهای پنهان را نیز آشکار سازد.

بدین ترتیب، روش ترکیبی پژوهش ضمن حفظ دقت آماری و انسجام نظری، مدلی ارائه می‌دهد که در عین علمی بودن، کاربردی، پیش‌بینی‌پذیر و قابل‌اتکا برای تصمیم‌گیری مدیریتی در پروژه‌های ساختمانی است.

برای تلفیق یافته‌های بخش SEM و بخش یادگیری ماشین و نمایش روابط علی، مفهومی و پیش‌بینی‌کننده، مدل نهایی پژوهش در قالب یک چارچوب ترکیبی در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، عوامل علّی و بافتی از طریق سازه «ضعف ارتباطات» بر پیامدهای پروژه تأثیر می‌گذارند. همچنین خروجی معادلات ساختاری، به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل یادگیری ماشین به کار گرفته شده و جنگل تصادفی مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها شامل جریان اطلاعات، همسویی منابع انسانی با استراتژی و مدیریت پروژه را شناسایی کرده است. این چارچوب امکان تلفیق تحلیل علی و پیش‌بینی‌محور را فراهم ساخته و دقت مدل را افزایش می‌دهد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

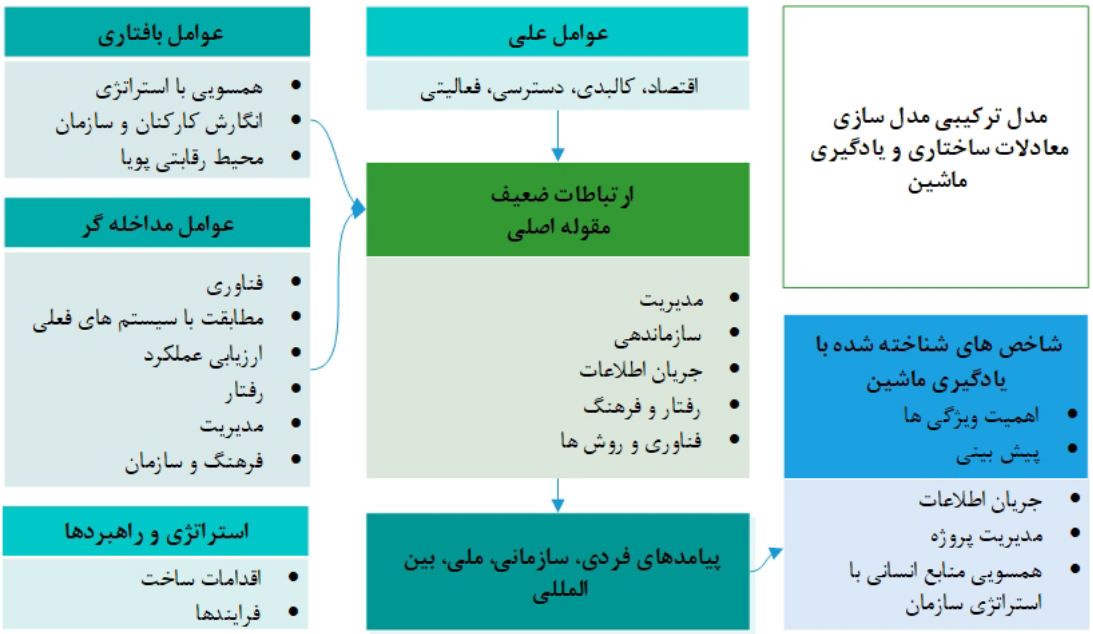
یافته‌های این پژوهش با رویکردی ترکیبی بر پایه مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) نشان دادند که ضعف ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی، پدیده‌ای چندبعدی و وابسته به تعامل میان عوامل سازمانی، بافتاری و فردی است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها به‌ویژه در ترکیب دو روش، امکان درک عمیق‌تر روابط علی و پیش‌بینی دقیق‌تر ریسک‌های ارتباطی را فراهم کرد.

۵-۱- تبیین نظری یافته‌ها

در چارچوب نظری پژوهش، ضعف ارتباطات به‌عنوان متغیری میانجی و اثرگذار بر پیامدهای پروژه، تحت تأثیر سه دسته عامل قرار گرفت.

عوامل علّی، مداخله‌گر و بافتاری. تحلیل SEM نشان داد که عوامل علّی (مانند ساختار اقتصادی و کالبدی پروژه‌ها) و عوامل بافتاری (ازجمله همسویی منابع انسانی با استراتژی سازمان) بیشترین اثر را بر راهبردهای ارتباطی داشتند. در مقابل، عوامل مداخله‌گر نظیر فرهنگ‌سازمانی و فناوری، نقش تعدیل‌کننده‌ای ایفا کردند.

این نتایج با نظریه‌های کلاسیک ارتباطات سازمانی (Dainty et al., 2007؛ Redding, 1972) هم‌خوانی دارد که بر اهمیت ساختار، شفافیت و هماهنگی بین‌سازمانی در موفقیت پروژه‌ها تأکید دارند؛ اما در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، مدل حاضر از طریق تلفیق SEM وML ، توانست روابط میان متغیرها را نه‌تنها در سطح فرضیات نظری بلکه در سطح پیش‌بینی داده‌های واقعی نیز اعتبارسنجی کند؛ امری که در تحقیقات مشابه (Hemmasian Etefagh, 2022 ؛Shayesteh et al., 2024) کمتر موردتوجه قرار گرفته است.



شکل ۱۱. مدل نهایی پژوهش: چارچوب ترکیبی SEM–ML برای تحلیل ضعف ارتباطات در پروژه‌ها.

Figure 11. Final research model: hybrid SEM-ML framework for analyzing communication weaknesses in projects.

۵-۲- تفسیر یافته‌ها بر اساس تحلیل SEM

تحلیل معادلات ساختاری نشان داد که مسیر عوامل علّی ← راهبردها ← پیامدها قوی‌ترین اثر را در مدل دارد. این امر بیانگر آن است که طراحی ساختار سازمانی شفاف و نظام تصمیم‌گیری مؤثر، مستقیماً راهبردهای ارتباطی را بهبود داده و از این طریق، پیامدهای سازمانی مطلوبی نظیر افزایش بهره‌وری و رضایت ذی‌نفعان را به همراه دارد.

از سوی دیگر، اثر عوامل مداخله‌گر هرچند معنادار اما نسبتاً ضعیف بود. این یافته نشان می‌دهد که فرهنگ‌سازمانی، فناوری و ارزیابی عملکرد، در صورتی می‌توانند بر کیفیت ارتباطات تأثیرگذار باشند که ساختار علّی و بافتاری مناسبی در سازمان وجود داشته باشد. در غیر این صورت، اثر آن‌ها محدود خواهد بود.

۵-۳- تحلیل و تفسیر یافته‌ها بر اساس ML

یافته‌های بخش یادگیری ماشین، با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مؤید نتایج SEM بود اما درعین‌حال، ظرفیت تحلیلی متفاوتی ارائه داد. مدل ML توانست با دقت ۰/۸۷ و سطح زیر نمودار ۰/۹۳، الگوهای غیرخطی و تعامل‌های پیچیده میان متغیرها را شناسایی کند که در مدل‌های سنتی قابل‌مشاهده نبود.

سه عامل کلیدی شناسایی‌شده در مدل ML عبارت بودند از:

۱) جریان اطلاعات (۰/۲۹): مهم‌ترین متغیر پیش‌بینی‌کننده ضعف ارتباطات.

۲) همسویی منابع انسانی با استراتژی (۰/۲۲): تعیین‌کننده انسجام سازمانی و هماهنگی بین سطوح مدیریتی.

۳) مدیریت پروژه (۰/۱۸): عامل کلیدی در کنترل فرآیندها و جلوگیری از گسست ارتباطی.

این نتایج نشان دادند که مدل ML نه‌تنها یافته‌های SEM را تأیید کرده بلکه درک عمیق‌تری از روابط غیرخطی میان متغیرها فراهم کرده است. برای مثال، مشخص شد که کاهش همسویی منابع انسانی اثر جریان اطلاعات را به‌طور نمایی تشدید می‌کند الگویی که در مدل‌های خطی قابل‌تشخیص نیست.

۵-۴- هم‌افزایی روش‌شناختی SEM و ML

تلفیق SEM و ML در این پژوهش یک رویکرد تحلیلی دوگانه را شکل داد که مطابق جدول **۱۳** نقاط ضعف هر روش را با قوت‌های دیگری جبران کرد.

این هم‌افزایی موجب شد تا مدل نهایی از اعتبار نظری، دقت آماری و قابلیت تصمیم‌گیری عملی برخوردار باشد و بتواند به‌عنوان چارچوبی برای پایش هوشمند ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی ایران مورداستفاده قرار گیرد.

۵-۵- پیامدهای نظری و کاربردی

از نظر نظری، پژوهش حاضر با ارائه چارچوب ترکیبی SEM + ML، گامی در جهت توسعه مدل‌های داده‌محور در مدیریت ساخت برداشت. نتایج نشان داد که ضعف ارتباطات نه صرفاً مسئله‌ای مدیریتی، بلکه پدیده‌ای قابل پیش‌بینی است که می‌توان با تحلیل داده‌های تاریخی، وقوع آن را پیش از بروز بحران شناسایی کرد. از نظر کاربردی، خروجی مدل ML امکان ایجاد یک سامانه هشدار زودهنگام برای پروژه‌ها را فراهم می‌کند؛ به این معنا که با نظارت بر شاخص‌هایی چون جریان اطلاعات و همسویی منابع انسانی، می‌توان به‌صورت بلادرنگ ریسک ارتباطی را برآورد نمود.

جدول ۱۳. هم‌افزایی روش‌شناختی SEM و ML

Table 13. Methodological synergy of SEM and ML

ویژگی	SEM	ML	نقش مکمل
نوع تحلیل	تبیینی (علّی)	پیش‌بینی‌کننده (غیرخطی)	آزمون نظری + پیش‌بینی عملی
فرض آماری	دارد (خطی و نرمال)	ندارد	افزایش تعمیم‌پذیری
خروجی کلیدی	مسیرهای علی و برازش مدل	رتبه‌بندی متغیرها و پیش‌بینی ریسک	تقویت اعتبار درونی و بیرونی
کارکرد مدیریتی	شناسایی روابط نظری	پیش‌بینی و اولویت‌بندی عوامل	تصمیم‌سازی هدفمند

۵-۶- محدودیت‌ها و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

اگرچه ترکیب SEM و ML توانست بینش جامعی فراهم آورد، اما محدودیت‌هایی نیز وجود دارد:

۱) حجم نمونه محدود به ۱۱۴ نفر ممکن است بر تعمیم‌پذیری نتایج تأثیر بگذارد.
۲) مدل ML تنها بر داده‌های مقطعی متکی بود؛ استفاده از داده‌های زمانی[1] می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد.
۳) در پژوهش‌های آینده، ترکیب الگوریتم‌های یادگیری عمیق[2] با SEM می‌تواند به کشف الگوهای پنهان‌تر در رفتار ارتباطی کمک کند.

۵-۷- پیشنهادهای کاربردی برای مدیران پروژه

در راستای ارتقای کارآمدی ارتباطات و بهبود مدیریت جریان اطلاعات در پروژه‌های نهضت ملی مسکن، مجموعه‌ای از راهکارهای عملیاتی و مبتنی بر شواهد این پژوهش ارائه می‌شود. این اقدامات، با هدف افزایش شفافیت، تقویت هماهنگی بین ذی‌نفعان و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی تدوین شده‌اند:

۱) **استقرار نظام گردش اطلاعات مبتنی بر BIM**: به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[3] امکان یکپارچه‌سازی داده‌ها، تسهیل تبادل اطلاعات بین واحدهای اجرایی و کاهش خطاهای ناشی از تفسیرهای متفاوت را فراهم می‌سازد. پیاده‌سازی BIM در گردش اطلاعات پروژه موجب افزایش شفافیت و ردیابی بهتر تغییرات می‌گردد.
۲) **توسعه داشبوردهای تحلیلی برای پایش بلادرنگ جریان اطلاعات:** طراحی داشبوردهای مدیریتی هوشمند، به مدیران پروژه این امکان را می‌دهد که شاخص‌های کلیدی عملکرد ارتباطات، وضعیت تبادل اطلاعات و نقاط گلوگاهی را در زمان واقعی[4] رصد کرده و تصمیمات اصلاحی را به‌موقع اتخاذ کنند.
۳) **بازطراحی ساختارهای ارتباطی رسمی و غیررسمی:** نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ناکارآمدی برخی کانال‌های ارتباطی منجر به تأخیر یا تحریف اطلاعات می‌شود. بازنگری و استانداردسازی فرآیندهای ارتباطی، شامل بهبود مسیرهای گزارش‌دهی، تعیین نقش‌ها و مسئولیت‌های ارتباطی و تقویت ارتباطات بین‌بخشی، از عوامل کلیدی موفقیت پروژه است.
۴) **ایجاد نظام سنجش و ارزیابی عملکرد ارتباطات پروژه:** پیشنهاد می‌شود شاخص‌های کمی و کیفی مشخصی برای ارزیابی کارایی ارتباطات تعریف و به‌صورت دوره‌ای پایش شوند. این نظام می‌تواند شامل ارزیابی سرعت انتقال اطلاعات، میزان همسویی بین ذی‌نفعان، کیفیت تعاملات و سطح رضایت از ارتباطات باشد.
۵) **به‌کارگیری مدل‌های پیش‌بینی و هشداردهی زودهنگام:** استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در راستای شناسایی الگوهای رفتاری و پیش‌بینی اختلالات احتمالی در جریان اطلاعات، می‌تواند سامانه‌ای برای هشداردهی زودهنگام فراهم کند که به مدیران اجازه می‌دهد اقدامات اصلاحی را پیش از ایجاد بحران اتخاذ نمایند.

۵-۸- جمع‌بندی نهایی

به‌طور خلاصه، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی SEM وML، توانست مدلی جامع برای تبیین و پیش‌بینی ضعف ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی ارائه دهد.

SEM روابط علّی را تبیین کرد، MLاعتبار پیش‌بینی را سنجید و ترکیب آن‌ها باعث شد مدل از مرز تحلیل نظری فراتر رفته و به ابزاری تصمیم‌یار برای مدیریت پروژه تبدیل شود.

بنابراین، یافته‌های این پژوهش نه‌تنها از نظر علمی، بلکه از منظر کاربردی نیز نشان می‌دهند که ادغام روش‌های

[1] Longitudinal
[2] Deep Learning
[3] Building information modeling
[4] Real-time

تحلیلی کلاسیک با هوش مصنوعی، مسیری مؤثر برای ارتقای کیفیت ارتباطات و کاهش ریسک در پروژه‌های ملی ایران است.

۵-۹- ملاحظات اخلاقی و راهبردهای کاهش سوگیری

در این پژوهش تمامی مراحل گردآوری و تحلیل داده‌ها مطابق اصول اخلاق پژوهش انجام شد. با توجه به مشارکت یکی از نویسندگان در پروژه‌های نهضت ملی مسکن زنجان، راهبردهای زیر برای کاهش احتمال سوگیری اعمال گردید:

۱) استقلال جمع‌آوری داده‌ها: پرسشنامه‌ها توسط کارکنان چندین سازمان (اداره راه و شهرسازی، شهرداری، مشاوران و پیمانکاران) تکمیل شد و نویسنده نقشی در انتخاب پاسخ‌دهندگان نداشت.

۲) کدگذاری کیفی مستقل: تحلیل محتوای اسناد توسط دو کدگذار مستقل انجام شد و میزان توافق بین کدگذاران با شاخص Cohen’s κ تأیید گردید.

۳) حفظ محرمانگی اسناد: دسترسی به پرونده‌های پروژه‌ها با حفظ حقوق مالکیت سازمانی و بدون مداخله در انتخاب موارد انجام شد.

۴) تحلیل کمی بدون مداخله انسانی: تحلیل‌های SEM و ML صرفاً توسط نرم‌افزارهای تخصصی و بدون اعمال قضاوت محقق انجام شد.

۵) استفاده از روش‌های Robustness Check: جهت جلوگیری از سوگیری ناشی از نمونه محدود، تحلیل‌های Bootstrap، Split-Sample و آزمون حساسیت اجرا شدند.

این مجموعه اقدامات تضمین می‌کند که یافته‌های پژوهش از اعتبار درونی و بیرونی کافی برخوردارند.

مشارکت‌های نویسندگان

تمامی نویسندگان نقش و سهم یکسان در نگارش این مقاله داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Alsulamy, S. (2025). Predicting construction delay risks in Saudi Arabian projects: A comparative analysis of CatBoost, XGBoost, and LGBM. *Expert Systems with Applications*, *268*, 126268. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126268

Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., ... & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, *141*, 104440. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440

Bahrain, N. K., Sakrani, S. R., & Maidin, A. (2023). Communication barriers in work environment: understanding impact and challenges. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, *13*(11), 1489-1503. https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v13-i11/19498

Chen, W., & Zhang, H. An Explainable Machine Learning Perspective for Substation Cost Prediction by Using the Gsa-Xgboost Optimization Framework. *Available at SSRN 5239300*. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5239300

Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.

Dainty, A., Moore, D., & Murray, M. (2007). *Communication in construction: Theory and practice*. Routledge.

Ershadi, M. J., Kianmehr, N., Nabatchian, M., & Dinmohammadi, L. (2024). Designing a productivity assessment model to identify and prioritize influential factors and examine obstacles facing Iranian research organizations. *System Engineering and Productivity*, *4*(2), 31-46 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2019692.1171

Gamil, Y., & Abd Rahman, I. (2023). Impact of poor communication on dispute occurrence in the construction industry: A preliminary exploratory study of Yemen construction industry. *International*

Journal of Construction Management, *23*(16), 2729-2735. https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2092388

Gamil, Y., Abd Rahman, I., & Nagapan, S. (2019). Investigating the effect of poor communication in terms of cost and time overruns in the construction industry. *International Journal of Construction Supply Chain Management*, *9*(2), 94-106. https://doi.org/10.14424/ijcscm902019-94-106

Ghasemi, V. (2010). *Structural equation modeling in social research using AMOS*. Sociologists Publications (In Persian).

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (Proverbs 8th ed.). Cengage Learning.

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2022). *Data Mining: Concepts and Techniques* (4th ed.). Morgan Kaufmann.

Hemmasian Etefagh, M. (2022). Modeling of machinery productivity management based on system dynamics approach. *System Engineering and Productivity*, *2*(1), 107-124 (In Persian) https://doi.org/10.22034/sep.2022.243407

Hoezen, M., Reymen, I., & Dewulf, G. P. (2006, July). The problem of communication in construction. In *International Conference on Adaptable Building Structures, ADAPTABLES 2006* (pp. 12-14). Eindhoven University of Technology.

Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural equation modeling: a multidisciplinary journal*, *6*(1), 1-55. https://doi.org/10.1080/10705519909540118

Johansen, K. W., Nielsen, R., Schultz, C., & Teizer, J. (2021). Automated activity and progress analysis based on non-monotonic reasoning of construction operations. *Smart and Sustainable Built Environment*, *10*(3), 457-486. https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2021-0044

Khalili, S., Saeedi, F., Yousefi, S., & Zandpour-Asl, M. (2025). Investigating the impact of the "attitude and mindset" component on the success of project managers in the Iranian construction industry. *Systems Engineering and Productivity*, 5(1), 1–19 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046688.1237

Kline, R. B. (2023). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (5th ed.). Guilford Press.

Kyriazos, T., & Poga, M. (2024). Application of machine learning models in social sciences: managing nonlinear relationships. *Encyclopedia*, *4*(4), 1790-1805. https://doi.org/10.3390/encyclopedia4040118

Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel psychology*, *28*(4).

Namdarzadegan, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2025). Development of an Integrated Sustainability and Resilience Model for Appropriate Smart Technology Implementation in Small and Medium Enterprises Under Crisis Conditions. *System Engineering and Productivity* (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2064025.1337

Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Redding, W. C. (1972). *Communication within the organization: An interpretive review of theory and research*. Industrial Communication Council.

Shayesteh, E., Azizi, A., & Ershadi, M. J. (2024). Modeling the relationship between age and salary on the productivity of specialized human resources in project-oriented engineering companies. *Systems Engineering and Productivity*, 4(1), 15–39 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2009347.1155

Waltz, C. F., & Bausell, B. R. (1981). *Nursing research: design statistics and computer analysis*. Davis Fa.

Waqar, A., Othman, I., Radu, D., Ali, Z., Almujibah, H., Hadzima-Nyarko, M., & Khan, M. B. (2023). Modeling the relation between building information modeling and the success of construction projects: a structural-equation-modeling approach. *Applied Sciences*, *13*(15), 9018. https://doi.org/10.3390/app13159018

Zhang, S., & Li, X. (2024). A comparative study of machine learning regression models for predicting construction duration. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *23*(6), 1980-1996. https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2278887