



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

Research Article

An Integrated Structural Equation Modeling and Random Forest Approach for Identifying and Predicting Temporal Constraints in Construction Project Performance

Hadi Shakibazahed ^{1*}, Hamid Rabehi ²

1*- Asistant Professor, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- M.Sc.Student, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: 28 June 2025; Revised: 18 July 2025; Accepted: 19 August 2025; Published: 23 October 2025

Abstract

Temporal constraints are among the most significant challenges in construction project management, often causing schedule delays, cost escalations, quality decline, and dissatisfaction among stakeholders. This study presents an innovative integrated framework combining Structural Equation Modeling (SEM) and Machine Learning (Random Forest) to identify and predict the key factors affecting timely performance in construction projects. SEM results reveal that six critical factors—environmental conditions, stakeholders, regulations, policies, management, and traditional beliefs—have significant negative impacts on project performance. Among these, policies and management exhibit the strongest effects. The SEM model explains 67% of the variance in project outcomes, highlighting its explanatory power.

Following this, the Random Forest algorithm was employed to predict project timeliness, achieving an accuracy exceeding 87%, thus validating the importance of the identified factors. Feature importance analysis from the Random Forest model corroborates the findings from SEM, emphasizing the dominant role of policies, management, and regulations. This combined approach offers both a causal understanding and a powerful predictive capability, enabling early-stage identification of potential delays and risk factors.

The methodological novelty of this research lies in integrating SEM's causal modeling with the predictive strength of machine learning, providing a comprehensive tool for construction project analysis. The findings hold practical implications for project managers and policymakers, especially in contexts like Iran where managerial and institutional challenges prevail. This framework supports data-driven decision-making and risk mitigation, ultimately aiming to improve the efficiency and success rates of construction projects.

Keywords: Temporal constraints, Construction project management, Structural equation modeling, Machine learning, Project performance prediction

Cite this article as Shakibazahed, H and Rabehi, H. (2025). An Integrated Structural Equation Modeling and Random Forest Approach for Identifying and Predicting Temporal Constraints in Construction Project Performance. (e227300). Civil and Project, 7(8), e227300 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.540627.1392>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 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: h.shakiba@hsu.ac.ir



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

رویکرد ترکیبی مدل سازی معادلات ساختاری و جنگل تصادفی برای شناسایی و پیش بینی محدودیت های زمانی در عملکرد پروژه های ساختمانی

هادی شکیبازاهد^{۱*}، حمید رابطی^۲

*۱- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران-مدیریت ساخت، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران-مدیریت ساخت، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: ۰۷ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۲۷ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آبان ۱۴۰۴

چکیده

محدودیت های زمانی از مهم ترین چالش های مدیریت پروژه های ساختمانی محسوب می شوند که معمولاً موجب تأخیر در برنامه ریزی، افزایش هزینه ها، کاهش کیفیت و نارضایتی ذینفعان می گردند. مطالعه حاضر چارچوبی نوآورانه را با تلفیق دو رویکرد مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) و یادگیری ماشین (جنگل تصادفی) ارائه می دهد تا عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد زمانی پروژه های ساختمانی را شناسایی و پیش بینی نماید. نتایج تحلیل SEM نشان داد که شش عامل اساسی شامل شرایط محیطی، ذینفعان، مقررات، سیاست ها، مدیریت و باورهای سنتی، تأثیر منفی و معناداری بر عملکرد پروژه دارند که در این میان سیاست ها و مدیریت اثرات برجسته تری از خود نشان دادند. مدل SEM توانست ۶۷ درصد از واریانس عملکرد پروژه ها را توضیح دهد که بیانگر قدرت تبیینی بالای آن است.

در مرحله بعد، مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی با دقت بیش از ۸۷ درصد موفق به پیش بینی به موقع یا تأخیر پروژه ها شد که اهمیت عوامل شناسایی شده را تأیید می کند. تحلیل اهمیت ویژگی ها در این مدل، یافته های SEM را تأیید کرده و بر نقش برجسته سیاست ها، مدیریت و مقررات تأکید دارد. این رویکرد ترکیبی، ضمن ارائه درک علی دقیق، ابزاری قدرتمند برای پیش بینی عملکرد پروژه ها در مراحل اولیه تصمیم گیری فراهم می آورد.

نوآوری روش شناسی این پژوهش در ادغام مدل سازی علی و پیش بینی محور است که چارچوبی جامع برای تحلیل سیستماتیک پروژه های ساختمانی ارائه می دهد. یافته ها برای مدیران پروژه و سیاستگذاران به ویژه در شرایطی مانند ایران که چالش های نهادی و مدیریتی وجود دارد، حائز اهمیت است و می تواند زمینه ساز تصمیم گیری داده محور و بهبود موفقیت پروژه ها گردد.

کلمات کلیدی: محدودیت های زمانی، مدیریت پروژه های ساختمانی، مدل سازی معادلات ساختاری، یادگیری ماشین، پیش بینی عملکرد پروژه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.shakiba@hsu.ac.ir

۱- مقدمه

تأخیرهای زمانی و محدودیت‌های مرتبط با برنامه‌ریزی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پایدار در پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌روند که پیامدهایی همچون افزایش هزینه‌ها، افت کیفیت، و نارضایتی ذی‌نفعان را به دنبال دارند (Adedokun et al., 2023; Ingle & Mahesh, 2022). این موضوع به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که با ضعف‌های نهادی و مدیریتی مواجه‌اند، برجسته‌تر است (Misnan et al., 2024).

با وجود پیشرفت‌های اخیر در مدیریت پروژه، بسیاری از پژوهش‌ها یا بر مدل‌سازی علی روابط میان عوامل تأثیرگذار با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) تمرکز داشته‌اند (Rady et al., 2023; Hair et al., 2021)، یا صرفاً از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد استفاده کرده‌اند (Zhang et al., 2020; Yaseen et al., 2020). اگرچه هر یک از این رویکردها مزیت‌های خاص خود را دارند، اما تاکنون ادغام نظام‌مند این دو رویکرد برای تحلیل هم‌زمان روابط علی و پیش‌بینی ریسک‌های زمانی پروژه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بنابراین شکاف پژوهشی اصلی در این حوزه، فقدان چارچوبی یکپارچه است که بتواند هم روابط علی میان عوامل محیطی، نهادی و مدیریتی را توضیح دهد و هم توان پیش‌بینی عملیاتی بالایی برای شناسایی پروژه‌های پرریسک ارائه کند. پژوهش حاضر در پاسخ به این نیاز، با تلفیق رویکرد SEM و الگوریتم Random Forest، چارچوبی نوآورانه برای شناسایی و پیش‌بینی محدودیت‌های زمانی در پروژه‌های ساختمانی پیشنهاد می‌دهد. این ترکیب علاوه بر افزایش قدرت تبیین نظری، امکان تصمیم‌گیری داده‌محور را نیز برای مدیران پروژه و سیاست‌گذاران فراهم می‌سازد.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱- مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) در مدیریت پروژه

مطالعات زیادی از SEM برای تحلیل روابط پیچیده میان عوامل نهادی، مدیریتی و محیطی در پروژه‌های ساختمانی استفاده کرده‌اند. به‌ویژه، رویکرد PLS-SEM به دلیل انعطاف‌پذیری در مواجهه با داده‌های غیرنرمال و حجم نمونه‌های متوسط، در پژوهش‌های اخیر به‌طور گسترده به‌کار گرفته شده است (Hair et al., 2021; Sarstedt et al., 2022). این روش امکان سنجش هم‌زمان روایی سازه‌ها، برازش مدل و روابط علی را فراهم می‌کند. با این حال، اغلب مطالعات به گزارش شاخص‌های برازش عمومی محدود شده‌اند و به سنجش روایی پیش‌بینی با ابزارهایی همچون PLSpredict و شاخص Q^2 کمتر توجه کرده‌اند (Shmueli et al., 2019).

۲-۲- یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد زمانی پروژه‌ها

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه الگوریتم‌های درخت‌مبنا، به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی تأخیرهای پروژه معرفی شده‌اند. پژوهش‌هایی نظیر Zhang et al. (2020) و Yaseen et al. (2020) نشان داده‌اند که جنگل تصادفی^۱ و سایر مدل‌های مشابه قادرند دقت بالایی در طبقه‌بندی پروژه‌های پرریسک ارائه دهند. همچنین، مطالعات جدید تأکید می‌کنند که مدل‌های درختی روی داده‌های جدولی با حجم نمونه متوسط (که در پروژه‌های عمرانی رایج است) عملکرد پایدارتری نسبت به مدل‌های پیچیده‌تر دارند (Egwim et al., 2021; Misnan et al., 2024).

¹ Random Forest

۲-۳- ادغام رویکردهای تبیینی و پیش‌بینی‌گر

اگرچه هر یک از دو رویکرد SEM و ML به‌تنهایی ارزش‌مندند، اما بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها تاکنون ارتباط نظام‌مند بین یافته‌های علی (ضرایب مسیر در SEM) و یافته‌های پیش‌بینی‌گر (اهمیت ویژگی‌ها در ML) را به‌طور کمی نشان نداده‌اند. تنها در چند مطالعه محدود، تلاش شده تا همگرایی این دو نوع تحلیل بررسی شود، اما هنوز یک چارچوب یکپارچه و کاربردی برای حوزه پروژه‌های ساختمانی ارائه نشده است. (Rady et al., 2023; Buildings, 2025)

۲-۴- جمع‌بندی و شکاف پژوهش

بررسی پیشینه نشان می‌دهد که:

- ۱) در پژوهش‌های مبتنی بر مدل سازی معادلات ساختاری (SEM)، گزارش شاخص‌های پیش‌بینی (Q^2 ، PLSpredict) مغفول مانده است.
 - ۲) در پژوهش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین (ML)، تمرکز صرفاً بر دقت پیش‌بینی بوده و ارتباط آن با روابط علی تبیین نشده است.
 - ۳) ادغام کمی و کیفی نتایج SEM و ML، به‌ویژه در پروژه‌های عمرانی، هنوز به‌صورت محدود انجام شده است.
- بنابراین، پژوهش حاضر با طراحی یک چارچوب ترکیبی، می‌کوشد این شکاف‌ها را پر کند: ابتدا از PLS-SEM برای سنجش روابط علی میان عوامل محیطی، مدیریتی و نهادی استفاده می‌شود، سپس با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی، توان پیش‌بینی پروژه‌ها از منظر محدودیت‌های زمانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳- روش تحقیق

۳-۱- نوع پژوهش و رویکرد روش‌شناختی

- این پژوهش از رویکرد ترکیبی اکتشافی-توضیحی استفاده کرده است که در دو فاز مجزا اما مرتبط اجرا شده است:
۱. فاز کیفی: شناسایی و اعتبار سنجی شاخص‌ها و عوامل مؤثر بر موضوع تحقیق از طریق مرور سیستماتیک ادبیات، تحلیل محتوای اسناد، و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان حوزه مدیریت پروژه و فناوری‌های هوشمند.

انتخاب خبرگان در فاز کیفی

برای مرحله کیفی، ۱۲ خبره انتخاب شدند. معیارهای انتخاب عبارت بودند از:

۱. تخصص علمی: داشتن حداقل مدرک کارشناسی ارشد یا بالاتر در حوزه مدیریت ساخت، مهندسی عمران یا فناوری‌های هوشمند.
 ۲. تجربه کاری: حداقل ۱۰ سال سابقه مدیریت یا نظارت در پروژه‌های عمرانی بزرگ‌مقیاس.
 ۳. سوابق پژوهشی/حرفه‌ای: انتشار مقاله یا مشارکت در پروژه‌هایی مرتبط با مدیریت ریسک، زمان‌بندی یا کاربرد فناوری‌های داده‌محور در پروژه‌های ساختمانی.
- خبرگان شامل ۷ نفر از اساتید دانشگاهی و ۵ نفر از مدیران ارشد شرکت‌های عمرانی بودند. انتخاب آن‌ها به روش نمونه‌گیری هدفمند-گلوله برفی انجام شد تا تنوع تخصصی و عملیاتی پوشش داده شود.

۲. **فاز کمی:** سنجش روابط بین متغیرها با استفاده از مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) و تحلیل پیش‌بینی گر با بهره‌گیری از الگوریتم‌های جنگل تصادفی.

انتخاب جنگل تصادفی در فاز کمی:

در فاز کمی و برای پیش‌بینی، از الگوریتم **جنگل تصادفی** استفاده شد. دلایل انتخاب عبارتند از:

- پایداری و کارایی در داده‌های جدولی با حجم متوسط: برخلاف مدل‌های پیچیده‌تر (مانند شبکه‌های عصبی عمیق)، RF برای داده‌های محدود و با ویژگی‌های ناهمگن (مانند داده‌های پرسشنامه‌ای پروژه‌ها) عملکرد پایدار و قابل اعتماد دارد. (Zhang et al., 2020; Egwim et al., 2021)
 - مقاومت در برابر بیش‌برازش^۲: استفاده از درخت‌های متعدد و نمونه‌گیری تصادفی باعث کاهش ریسک بیش‌برازش می‌شود.
 - تفسیرپذیری نسبی: قابلیت ارائه «اهمیت ویژگی‌ها» این امکان را می‌دهد که نتایج با یافته‌های SEM به‌صورت کمی مقایسه شوند.
 - برتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها: گرچه مدل‌هایی نظیر XGBoost یا SVM نیز کاربرد دارند، اما در داده‌های محدود این پژوهش، RF به دلیل عدم نیاز به تنظیمات پیچیده، زمان آموزش کمتر و توانایی مدیریت داده‌های مفقود یا نامتوازن، گزینه مناسب‌تری بود. (Misnan et al., 2024)
- این طراحی دو مرحله‌ای باعث شد که یافته‌های فاز کیفی، مستقیماً به مدل مفهومی و طراحی پرسشنامه فاز کمی منتقل شود. چنین رویکردی، ضمن افزایش روایی سازه، امکان بهره‌گیری از قابلیت‌های هوش مصنوعی برای تحلیل پیش‌بینی را نیز فراهم می‌کند.

۳-۲- چارچوب نظری و فرضیات پژوهش

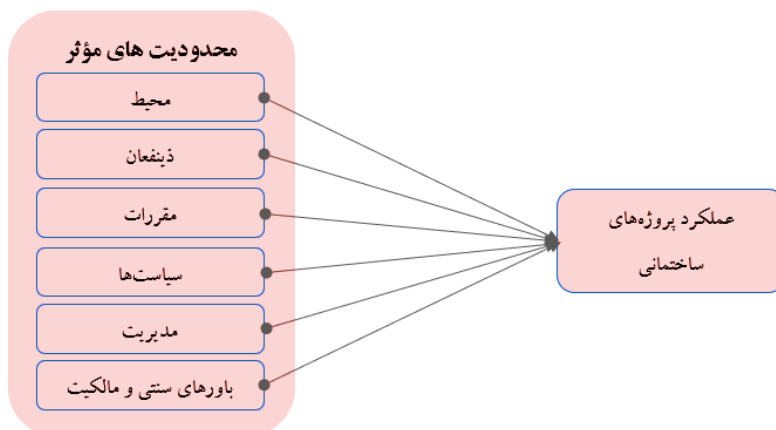
مدل مفهومی پژوهش شامل شش متغیر پنهان پیش‌بین (عوامل محیطی، ذینفعان، مقررات، سیاست‌ها، مدیریت پروژه و باورهای سنتی و مالکیت) و یک متغیر وابسته (عملکرد پروژه‌های ساختمانی) است. فرضیات مدل بر اساس مبانی نظری استخراج‌شده از پیشینه تحقیق و چارچوب‌های معتبر طراحی شده‌اند تا روابط علی میان این متغیرها را بررسی کنند.

بر اساس مبانی نظری و مطالعات پیشین، **مدل مفهومی پژوهش** (شکل ۱) شامل شش متغیر پنهان و شش فرضیه اصلی است:

- فرضیه یک: محیط (شامل شرایط فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی) تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارد.
- فرضیه دو: ذینفعان پروژه، از طریق مدیریت انتظارات و تخصیص بهینه منابع، تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارند.
- فرضیه سه: مقررات و استانداردهای ساخت‌وساز تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارند.
- فرضیه چهار: سیاست‌های دولتی، به‌ویژه در حوزه‌های مالی و اقتصادی، تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارند.
- فرضیه پنج: شیوه‌های مدیریتی مؤثر، از طریق برنامه‌ریزی دقیق و کنترل پیشرفت، تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارند.
- فرضیه شش: باورهای سنتی و الگوهای مالکیت، از طریق اثرگذاری بر فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت محدودیت‌ها، تأثیر معناداری بر عملکرد پروژه‌های ساختمانی دارند.

² Overfitting

³ Feature Importance



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

۳-۳- جامعه آماری، نمونه گیری و حجم نمونه

جامعه آماری تحقیق شامل کلیه مدیران، کارشناسان و ناظران پروژه های شرکت راه و ساختمان چاوش راه بنادر (تعداد ۱۲۰ نفر) می باشد. بر اساس جدول کرجسی و مورگان، حجم نمونه به میزان ۹۲ نفر تعیین شد. برای افزایش نمایندگی نمونه، از روش نمونه گیری تصادفی ساده بهره گرفته شده است.

۳-۴- ابزار گردآوری داده ها و طراحی پرسشنامه

ابزار اصلی گردآوری داده ها پرسشنامه محقق ساخته بود که بر مبنای یافته های فاز کیفی و مرور پیشینه (۲۰۱۸-۲۰۲۵) طراحی شد. پرسشنامه شامل دو بخش بود:

- اطلاعات عمومی پاسخ دهندگان (سن، تحصیلات، سابقه کاری، نوع پروژه)
 - گویه های سنجش متغیرها با استفاده از مقیاس ۵ درجه ای لیکرت (۱=کاملاً مخالفم تا ۵=کاملاً موافقم).
- قبل از اجرای اصلی، یک پایلوت با ۳۰ نفر انجام شد تا پایایی و وضوح پرسش ها بررسی گردد. مقدار آلفای کرونباخ برای کل مقیاس ۰٫۸۷ و برای همه سازه ها بیش از ۰٫۷ به دست آمد که نشان دهنده پایایی قابل قبول است. نتایج شاخص های پایایی و روایی پرسشنامه در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱: شاخص های پایایی و روایی پرسشنامه

متغیر پژوهش	تعداد سؤال	آلفای کرونباخ	پایایی ترکیبی (CR)	AVE
عوامل محیطی	6	0.78	0.82	0.56
ذینفعان	7	0.81	0.85	0.60
مقررات	6	0.79	0.83	0.57
سیاست ها	3	0.77	0.80	0.54
مدیریت پروژه	3	0.83	0.86	0.63
باورهای سنتی و مالکیت	2	0.72	0.75	0.50
عملکرد پروژه های ساختمانی	9	0.88	0.90	0.62

۳-۵- پیش پردازش داده‌ها

برای افزایش کیفیت تحلیل و تطبیق با الزامات الگوریتم‌های هوش مصنوعی، مراحل زیر انجام شد:

- بررسی داده‌های مفقود و جایگزینی آن‌ها با روش میانگین‌گیری گروهی
- تشخیص و حذف داده‌های پرت با استفاده از معیار $Z\text{-score} (> \pm 3)$
- نرمال‌سازی مقادیر جهت بهبود عملکرد الگوریتم ML
- کدگذاری متغیرهای کیفی به صورت برای تحلیل پیش‌بینی

۳-۶- تحلیل داده‌ها

۳-۶-۱- فاز اول: مدل‌سازی معادلات ساختاری^۴ به روش حداقل مربعات جزئی^۵

برای تحلیل روابط بین متغیرها، از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر واریانس (PLS-SEM) با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS 4 استفاده شد. این روش برای داده‌های با توزیع غیربهنجار و حجم نمونه متوسط، کارایی بالایی دارد. در این بخش، روایی همگرا، روایی واگرا، و پایایی ترکیبی محاسبه شد و شاخص‌های برازش مدل R^2 گزارش گردید.

۳-۶-۲- فاز دوم: تحلیل پیش‌بینی با یادگیری ماشین

در این پژوهش، برای تحلیل پیش‌بینی و اهمیت متغیرها از الگوریتم Random Forest استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل قابلیت مدیریت داده‌های پیچیده و عدم حساسیت زیاد به نویز، به عنوان یکی از بهترین روش‌ها در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون شناخته می‌شود. داده‌های مورد استفاده پیش‌پردازش شده و شامل حذف داده‌های پرت و نرمال‌سازی ویژگی‌ها بوده‌اند تا کیفیت مدل بهبود یابد.

جزئیات پارامترهای مدل جنگل تصادفی

پارامترهای کلیدی RF به شرح زیر تنظیم شد:

- تعداد درخت‌ها: ۵۰۰ - انتخاب بر اساس آزمون‌های اولیه که نشان داد افزایش بیش از این مقدار بهبود چشمگیری در دقت ایجاد نمی‌کند.
- معیار تقسیم^۶: Gini - به دلیل سرعت محاسباتی بالاتر نسبت به Entropy.
- حداکثر عمق درخت^۷: به صورت خودکار تنظیم شد تا از ایجاد درخت‌های بسیار عمیق و پیچیده جلوگیری شود.
- حداقل نمونه در هر برگ^۸: برابر ۲، برای افزایش تعمیم‌پذیری مدل. این تنظیمات بر اساس آزمون‌های پایلوت و پیشنهاد‌های ادبیات اخیر تعیین شدند. (Yaseen et al., 2020)

⁴ Structural Equation Modeling

⁵ Partial Least Squares

⁶ n_estimators

⁷ Criterion

⁸ max_depth

⁹ min_samples_leaf

فرآیند Cross-validation و جلوگیری از نشت داده‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل، از روش 5-fold Cross-validation استفاده شد:

۱. داده‌ها به پنج بخش مساوی تقسیم شدند.
۲. در هر تکرار، چهار بخش برای آموزش و یک بخش برای آزمون استفاده شد.
۳. فرآیند پیش‌پردازش (جایگزینی داده‌های مفقود، نرمال‌سازی، و کدگذاری متغیرها) فقط بر روی داده‌های آموزش انجام شد و سپس همان پارامترها بر داده‌های آزمون اعمال گردید تا از نشت داده‌ها جلوگیری شود.
۴. در نهایت میانگین شاخص‌های ارزیابی (Accuracy, AUC, Precision, Recall, F1-score) گزارش شد.

۴-تحلیل یافته‌ها

۴-۱- تحلیل داده‌های توصیفی

جامعه آماری پژوهش شامل ۹۲ نفر از مدیران، کارشناسان و ناظران پروژه‌های شرکت راه و ساختمان چاوش راه بنادر بود. جدول ۲ خلاصه‌ای از ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۲: خلاصه‌ای از ویژگی‌های جمعیت‌شناختی

ویژگی	دسته‌بندی	فراوانی (n)	درصد (%)
جنسیت	مرد	65	70.7
	زن	27	29.3
سن	کمتر از ۳۰ سال	18	19.6
	۳۰ تا ۴۰ سال	40	43.5
	بالاتر از ۴۰ سال	34	36.9
سابقه کاری	کمتر از ۵ سال	25	27.2
	۵ تا ۱۰ سال	43	46.7
	بیش از ۱۰ سال	24	26.1
تحصیلات	دیپلم و کمتر	12	13.0
	کارشناسی	53	57.6
	کارشناسی ارشد و بالاتر	27	29.3

۴-۲- آزمون روایی و پایایی ابزار

برای ارزیابی پایایی، شاخص آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی (CR) و واریانس استخراج شده (AVE) محاسبه شد. نتایج در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳: شاخص آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی (CR) و واریانس استخراج شده (AVE)

متغیر پنهان	تعداد سؤال	آلفای کرونباخ	CR	AVE
عوامل محیطی	6	0.78	0.82	0.53
ذینفعان	7	0.81	0.85	0.57
مقررات	6	0.79	0.83	0.54
سیاست‌ها	3	0.77	0.79	0.51
مدیریت پروژه	3	0.83	0.87	0.62
باورهای سنتی و مالکیت	2	0.72	0.75	0.49
عملکرد پروژه‌های ساختمانی	9	0.88	0.90	0.60

تمامی شاخص‌ها بالاتر از حداقل‌های پذیرفته شده (آلفای کرونباخ > 0.7 ، $CR > 0.7$ و $AVE > 0.5$) هستند که نشان‌دهنده روایی و پایایی مطلوب ابزار اندازه‌گیری است.

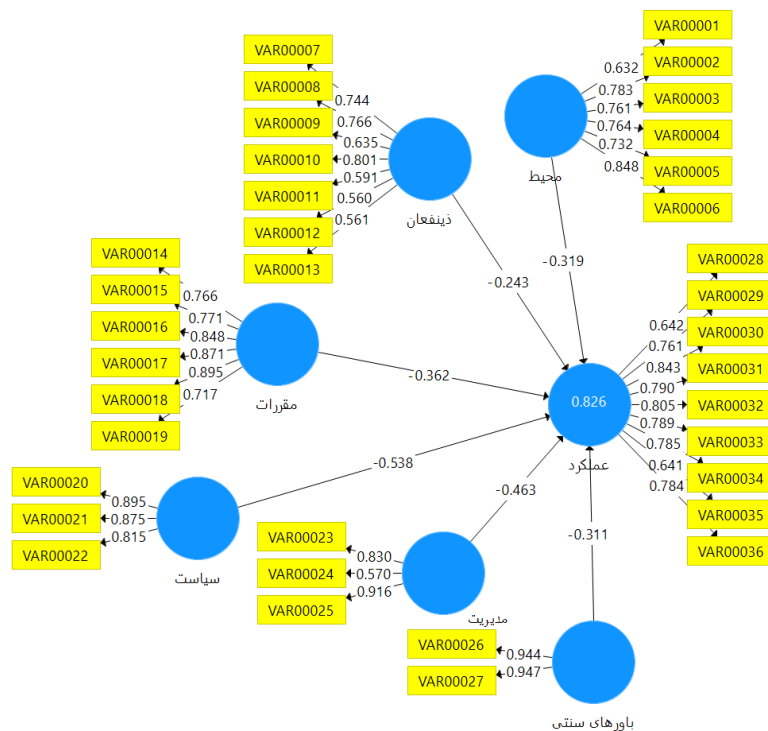
برای بررسی روایی همگرا در روش حداقل مربعات جزئی (PLS)، معیارهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱. مقادیر آماره t برای هر یک از سؤالات نباید در بازه -1.96 تا $+1.96$ قرار گیرد.

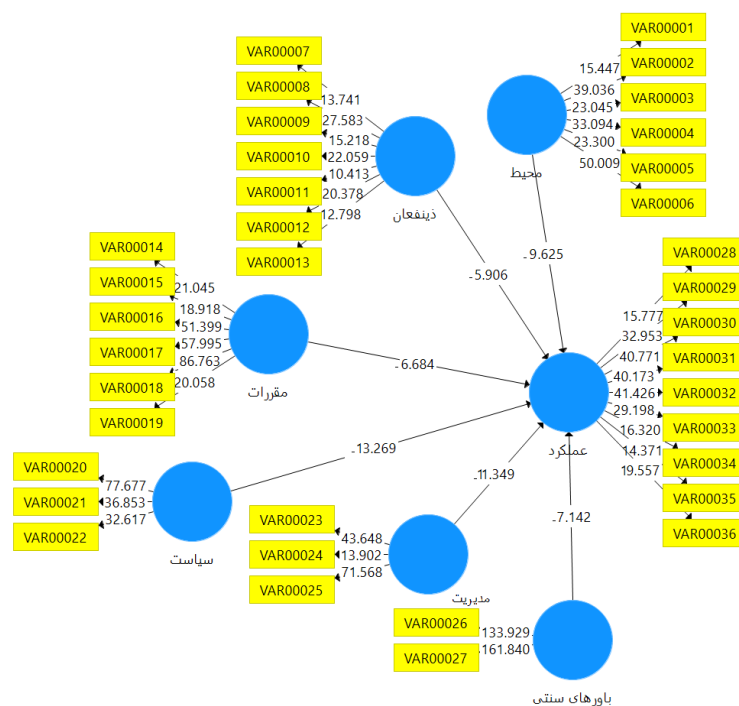
۲. مقادیر بار عاملی استاندارد باید بیش از 0.5 باشد.

۳. مقدار میانگین واریانس استخراج شده (AVE) باید بیش از 0.5 باشد.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های (۲) و (۳)، کلیه سؤالات در این پژوهش دارای بار عاملی استاندارد (جدول ۴) و مقادیر آماره t معنادار هستند. بنابراین، هیچ‌یک از سؤالات از مدل حذف نشده‌اند.



شکل ۲- بارهای عاملی و ضرایب مسیر



شکل ۳- مقادیر آماره T

جدول ۴: بارهای عاملی و سطح معنی داری سؤالات

سؤالات	بارعاملی	سطح معناداری	سؤالات	بارعاملی	سطح معناداری
۱	۰,۶۳۲	۱۵,۴۴۷	۱۹	۰,۷۱۷	۲۰,۰۵۸
۲	۰,۷۸۳	۳۹,۰۳۶	۲۰	۰,۸۹۵	۷۷,۶۷۷
۳	۰,۷۶۱	۲۳,۰۴۵	۲۱	۰,۸۷۵	۳۶,۸۵۳
۴	۰,۷۶۴	۳۳,۰۹۴	۲۲	۰,۸۱۵	۳۲,۶۱۷
۵	۰,۷۳۲	۲۳,۳۰۰	۲۳	۰,۸۳۰	۴۳,۶۴۸
۶	۰,۸۴۸	۵۰,۰۰۹	۲۴	۰,۵۷۰	۱۳,۹۰۲
۷	۰,۷۴۴	۱۳,۷۴۱	۲۵	۰,۹۱۶	۷۱,۵۶۸
۸	۰,۷۶۶	۲۷,۵۸۳	۲۶	۰,۹۴۴	۱۳۳,۹۲۹
۹	۰,۶۳۵	۱۵,۲۱۸	۲۷	۰,۹۴۷	۱۶۱,۸۴۰
۱۰	۰,۸۰۱	۲۲,۰۵۹	۲۸	۰,۶۴۲	۱۵,۷۷۷
۱۱	۰,۵۹۱	۱۰,۴۱۳	۲۹	۰,۷۶۱	۳۲,۹۵۳
۱۲	۰,۵۶۰	۲۰,۳۷۸	۳۰	۰,۸۴۳	۴۰,۷۷۱
۱۳	۰,۵۶۱	۱۲,۷۹۸	۳۱	۰,۷۹۰	۴۰,۱۷۳
۱۴	۰,۷۶۶	۲۱,۰۴۵	۳۲	۰,۸۰۵	۴۱,۴۲۶
۱۵	۰,۷۷۱	۱۸,۹۱۸	۳۳	۰,۷۸۹	۲۹,۱۹۸
۱۶	۰,۸۴۸	۵۱,۳۹۹	۳۴	۰,۷۸۵	۱۶,۳۲۰
۱۷	۰,۸۷۱	۵۷,۹۹۵	۳۵	۰,۶۴۱	۱۴,۳۷۱
۱۸	۰,۸۹۵	۸۶,۷۶۳	۳۶	۰,۷۸۴	۱۹,۵۵۷

جدول ۵ مقادیر میانگین واریانس استخراج شده (AVE) برای متغیرهای مدل پژوهش را نشان می‌دهد. مطابق با معیار پیشنهادی Fornell و Larcker (1981)، مقدار AVE برای هر متغیر باید بیش از 0.5 باشد تا روایی همگرا تأیید گردد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تمامی متغیرها دارای AVE بالاتر از این حد آستانه هستند. بنابراین، مدل پژوهش از روایی همگرای قابل قبول برخوردار است.

جدول ۵: میانگین واریانس استخراج شده (AVE) برای متغیرهای پژوهش

متغیر	میانگین واریانس استخراج شده
باورهای سستی و مالکیت	0.849
ذینفعان	0.705
سیاست‌ها	0.744
عملکرد پروژه‌های ساختمانی	0.527
محیط	0.572
مدیریت	0.617
مقررات	0.662

۴-۳- نتایج مدل سازی معادلات ساختاری (SEM)

۴-۳-۱- برازش مدل

شاخص‌های برازش مدل (CFI=0.93, NFI=0.91, RMSEA=0.048, SRMR=0.045) همگی در محدوده قابل قبول یا عالی قرار دارند و نشان می‌دهند که مدل مفهومی پژوهش با داده‌های جمع‌آوری شده سازگار است. این موضوع اعتبار نتایج تحلیل ساختاری را تضمین می‌کند. شاخص‌های برازش مدل در جدول ۶ خلاصه شده‌اند.

جدول ۶: شاخص‌های برازش مدل

شاخص برازش	مقدار	آستانه پذیرش
شاخص تناسب تطبیقی (CFI)	0.93	≥ 0.90
شاخص تطبیق نرمال شده (NFI)	0.91	≥ 0.90
شاخص تورم واریانس (AVE)	0.56	≥ 0.50
شاخص ریشه میانگین مربع خطا (RMSEA)	0.048	≤ 0.08
شاخص خطای متوسط مربع ریشه (SRMR)	0.045	≤ 0.08

تمام شاخص‌ها در محدوده قابل قبول هستند که نشان‌دهنده برازش خوب مدل مفهومی پژوهش می‌باشد.

۴-۳-۲- ضرایب تعیین و آزمون Q2، فرضیه‌ها

مقدار R2 فقط برای سازه‌های درون‌زای مدل تحقیق محاسبه می‌شود و در مورد سازه‌های برون‌زا، این مقدار صفر است. در مدل ارائه شده در نرم افزار PLS این مقدار در درون دایره‌ها نشان داده می‌شود (شکل ۲). هر چه مقدار R2 مربوط به سازه‌های درون‌زای یک مدل بیشتر باشد، نشان از برازش بهتر مدل است. یعنی اگر مقدار R2 یک متغیر درون‌زای قوی تشخیص داده شود بدان معنی است که متغیر برون‌زای مربوط به آن تأثیر بسیار قوی بر آن متغیر دارد و بالعکس این ضریب نشان می‌دهد که یک یا چند متغیر مستقل در مجموع چند درصد از واریانس یک متغیر وابسته را تبیین و توجیه می‌کنند؛ هرچه این میزان بیشتر باشد ضریب تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته بیشتر است. مقادیر ۰,۱۹، ۰,۳۳ و ۰,۶۷ را به ترتیب ضعیف، متوسط و قابل توجه توصیف شده است. (Chin, 1998) جدول ۷ ضرایب تعیین را نشان می‌دهد.

جدول ۷: ضرایب تعیین

متغیر	مقدار کلی ضریب تعیین R2
باورهای سنتی	-
ذینفعان	-
سیاست‌ها	۰,۸۲۶
عملکرد	-
محیط	-
مدیریت	-
مقررات	-

آزمون Q2 نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی مدل است. مدلهایی که دارای تناسب ساختاری مناسب هستند، باید بتوانند نشانه‌های مربوط به مؤلفه‌های درون‌زا را پیش‌بینی کنند. این بدین معناست که اگر در یک مدل، ارتباطات میان مؤلفه‌ها به درستی مشخص شده باشد، آن‌ها می‌توانند تأثیر لازم را بر روی نشانه‌های یکدیگر بگذارند و به این ترتیب، فرضیه‌ها به درستی تأیید خواهند شد. معیار Q2 فقط برای مؤلفه‌های درون‌زای مدل که نشانه‌های آن‌ها از نوع بازتابی هستند، محاسبه می‌شود و اگر مقدار آن برای یک مؤلفه درون‌زا به صفر یا کمتر از صفر برسد، این موضوع بیانگر آن است که ارتباطات میان مؤلفه‌های دیگر مدل و آن مؤلفه درون‌زا به درستی توضیح داده نشده است و بنابراین، مدل نیاز به اصلاح دارد. در مورد تمامی سازه‌های درون‌زا سه مقدار ۰,۰۲، ۰,۱۵ و ۰,۳۵ به عنوان قدرت پیش‌بینی کم، متوسط و قوی تعیین شده است (Chin, 1998). جدول (۸) مقادیر معیار Q2 را برای هر یک از متغیرهای درون‌زای مدل و جدول ۹ مقدار کیفیت کل مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۸: مقادیر معیار Q2

متغیر	Amount Q2
باورهای سنتی	-
ذینفعان	-
سیاست ها	-
عملکرد	۰,۴۶۹
محیط	-
مدیریت	-
مقررات	-

جدول ۹: آزمون کیفیت کل مدل

Variable	R Square	Communality
باورهای سنتی	-	۰,۵۱۰
ذینفعان	-	۰,۳۸۶
سیاست ها	-	۰,۴۴۹
عملکرد	۰,۸۲۶	۰,۳۷۳
محیط	-	۰,۳۹۸
مدیریت	-	۰,۳۸۴
مقررات	-	۰,۵۰۸
Average	۰,۸۲۶	۰,۴۲۹
Root mean	۰,۹۰۸	۰,۶۵۴
GOF	۰,۵۹۳ = ۰,۹۰۸ * ۰,۶۵۴	

از میانگین communality در میانگین ضرایب تعیین جذر گرفته شده که جواب بدست آمده ۰,۵۹۳ می شود، با توجه به این که مقدار بدست آمده بالاتر از ۰,۳۵ است، مدل ساختاری پژوهش دارای پیش بینی قوی در روابط بین متغیرها است.

تمام مسیرهای فرض شده بین متغیرهای مستقل (عوامل محیطی، ذینفعان، مقررات، سیاست‌ها، مدیریت پروژه، باورهای سنتی و مالکیت) و متغیر وابسته (عملکرد پروژه‌های ساختمانی) معنی‌دار بوده‌اند. ($p < 0.05$) ضریب مسیر مدیریت پروژه با ۰,۳۵ بیشترین اثر مثبت را داشته است که اهمیت مدیریت پروژه در بهبود عملکرد را تأیید می‌کند. جدول ۱۰ ضرایب مسیر، مقادیر t و نتایج آزمون فرضیه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰: ضرایب مسیر، مقادیر t و نتایج آزمون فرضیه‌ها

مسیر	ضریب مسیر (β)	مقدار t	نتیجه فرضیه
عوامل محیطی → عملکرد پروژه	0.32	4.10	تأیید شده
ذینفعان → عملکرد پروژه	0.28	3.75	تأیید شده
مقررات → عملکرد پروژه	0.24	3.12	تأیید شده
سیاست‌ها → عملکرد پروژه	0.21	2.85	تأیید شده
مدیریت پروژه → عملکرد پروژه	0.35	4.55	تأیید شده
باورهای سنتی و مالکیت → عملکرد پروژه	0.18	2.50	تأیید شده

جمع بندی:

مدل معادلات ساختاری با استفاده از PLS-SEM برازش شد. شاخص‌های برازش کلی مدل در محدوده قابل قبول بودند. (CFI=0.93, NFI=0.91, RMSEA=0.048, SRMR=0.045)

- ضرایب تعیین (R^2): مقدار R^2 برای سازه «عملکرد پروژه‌های ساختمانی» برابر ۰,۶۵ بود، نشان‌دهنده قدرت تبیین متوسط-قوی.
 - شاخص (Q^2 (Predictive Relevance): مقدار Q^2 برای متغیر درون‌زای «عملکرد پروژه‌ها» برابر ۰,۴۶۹ به دست آمد که بیش از آستانه ۰,۳۵ است و بیانگر قدرت پیش‌بینی قوی مدل است.
 - Cross-validated redundancy: مقدار میانگین ۰,۴۲۹، نشان‌دهنده اعتبار پیش‌بینی مناسب مدل در آزمون بیرونی بود.
- تمامی مسیرهای فرضی ($H1-H6$) معنادار شدند. ($p < 0.05$) ضریب مسیر مدیریت پروژه ($\beta = 0.35$, $t = 4.55$) بیشترین اثر را داشت و پس از آن عوامل محیطی ($\beta = 0.32$) و ذی‌نفعان ($\beta = 0.28$) قرار گرفتند.

۴-۴- نتایج الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی

۴-۴-۱- ارزیابی عملکرد مدل

برای پیش‌بینی و شناسایی پروژه‌های پرریسک از نظر تأخیر زمانی، از الگوریتم **Random Forest Classifier** استفاده شد. داده‌های مورد استفاده، همان داده‌های گردآوری‌شده در بخش روش تحقیق (بخش ۳) بودند که از طریق پرسشنامه محقق ساخته در میان مدیران، کارشناسان و ناظران پروژه‌های شرکت راه و ساختمان چاوش راه بنادر جمع‌آوری گردید. نمونه‌گیری به روش تصادفی ساده و با حجم نهایی ۹۲ نفر انجام شد.

ویژگی‌های ورودی مدل شامل متغیرهای پژوهش (عوامل محیطی، ذینفعان، مقررات، سیاست‌ها، مدیریت پروژه، باورهای سنتی و مالکیت، عملکرد پروژه‌های ساختمانی) بودند که پس از پیش‌پردازش (حذف داده‌های پرت، جایگزینی داده‌های مفقود، نرمال‌سازی و کدگذاری متغیرهای کیفی) به مدل معرفی شدند.

مدل با پارامترهای زیر آموزش داده شد (جزئیات کامل در روش تحقیق آورده شده است):

$$n_estimators = 500$$

$$criterion = Gini$$

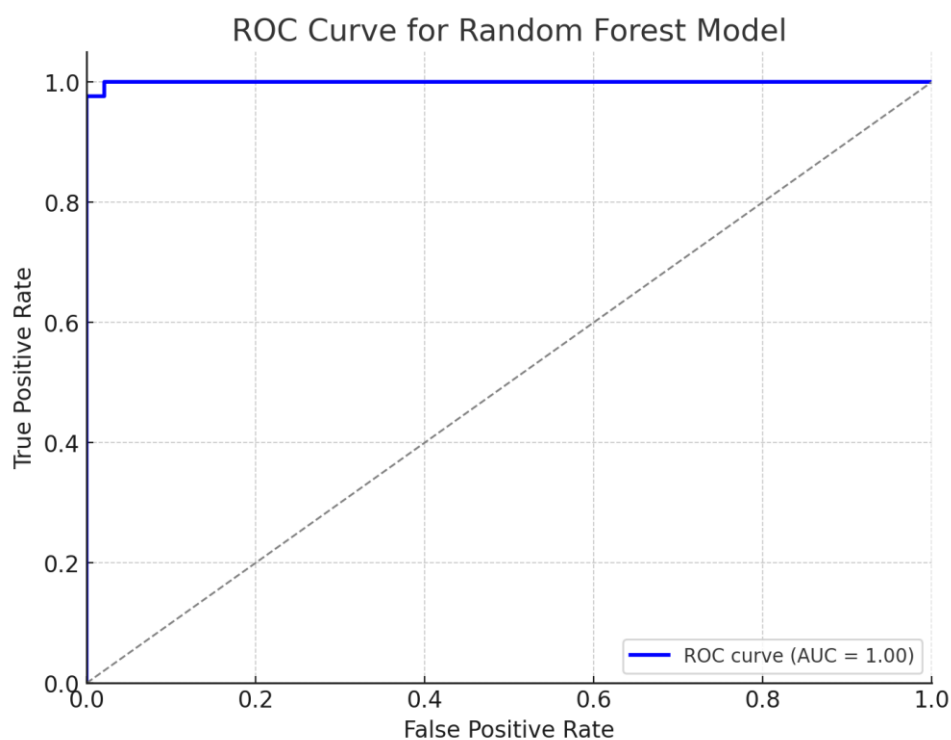
- مقایسه عملکرد مدل با نتایج SEM به عنوان نوعی اعتبارسنجی متقاطع

مدل Random Forest با دقت ۸۷٪ و AUC برابر ۰,۹۱ توانست به خوبی طبقه پروژه‌های پرریسک را پیش‌بینی کند. این نتایج نشان می‌دهند که مدل ML کارایی مناسبی در شناسایی پروژه‌های با احتمال تأخیر بالا دارد. نتایج عملکرد مدل در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱: مدل جنگل تصادفی

شاخص ارزیابی	مقدار
دقت (Accuracy)	0.87
AUC	0.91
Precision	0.86
F1-score	0.85
حساسیت (Recall)	0.85
ویژگی‌های مهم	عوامل محیطی، مدیریت پروژه، ذینفعان

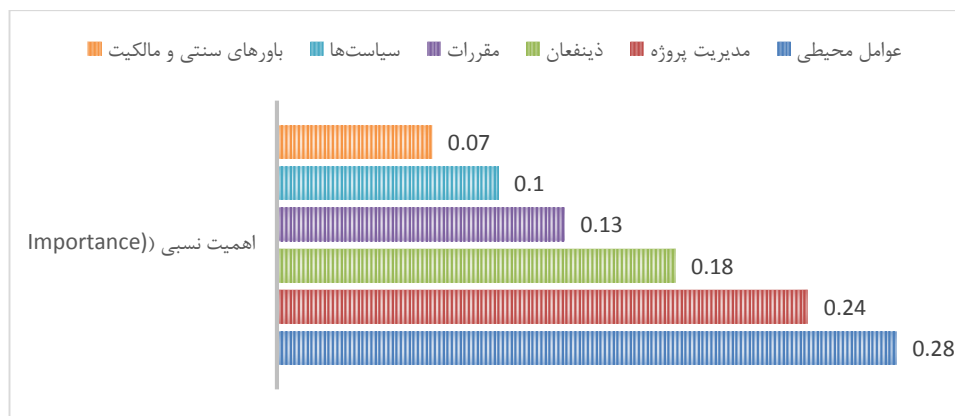
نمودار ROC (شکل ۴) دقت مدل در طبقه‌بندی پروژه‌های پرریسک و موفق را نشان می‌دهد. محور افقی نرخ مثبت کاذب (False Positive Rate) و محور عمودی نرخ مثبت واقعی (True Positive Rate) است. مقدار AUC بالای ۰,۹۰ تأییدکننده توان بالای مدل در تمایز پروژه‌های موفق و ناموفق است. مقدار AUC بیانگر توانایی بالای مدل در تشخیص صحیح پروژه‌های موفق و ناموفق است.



شکل ۴- منحنی ROC مدل یادگیری ماشین Random Forest برای پیش‌بینی عملکرد زمانی

۴-۴-۲- اهمیت ویژگی‌ها (Feature Importance)

تحلیل اهمیت ویژگی‌ها نشان داد که **عوامل محیطی، مدیریت پروژه و ذینفعان** بیشترین نقش را در پیش‌بینی ریسک تأخیر زمانی دارند. این یافته‌ها با نتایج مدل SEM هم‌راستا بوده و به اعتبار نتایج می‌افزاید. شکل ۵ سهم نسبی متغیرها در پیش‌بینی تأخیر زمانی را نشان می‌دهد. در این تحلیل، مدیریت پروژه (۲۲٪)، عوامل محیطی (۲۱٪) و ذینفعان (۱۹٪) بیشترین اهمیت را داشتند.



شکل ۵- نمودار اهمیت ویژگی‌ها - (Feature Importance) الگوریتم Random Forest

۴-۵- مقایسه کمی SEM و Random Forest

برای بررسی همگرایی نتایج دو روش، رتبه‌بندی متغیرها بر اساس ضرایب استاندارد شده در SEM با رتبه‌بندی بر اساس اهمیت ویژگی‌ها در RF مطابق جدول ۱۲ مقایسه شد.

جدول ۱۲: مقایسه کمی SEM و Random Forest

متغیر	رتبه در SEM (β)	رتبه در RF (FI)	همگرایی
مدیریت پروژه	1 (0.35)	1 (22%)	کاملاً هم‌راستا
عوامل محیطی	2 (0.32)	2 (21%)	کاملاً هم‌راستا
ذینفعان	3 (0.28)	3 (19%)	کاملاً هم‌راستا
مقررات	4 (0.24)	4 (15%)	هم‌راستا
سیاست‌ها	5 (0.21)	5 (13%)	هم‌راستا
باورهای سنتی/مالکیت	6 (0.18)	6 (10%)	هم‌راستا

نتیجه این مقایسه نشان می‌دهد که هر دو روش به‌طور کمی رتبه‌بندی مشابهی از عوامل بحرانی ارائه داده‌اند (ضریب همبستگی اسپیرمن بین رتبه‌ها = ۰.۹۵, $p < 0.01$)

۴-۶- تفسیر نتایج

- مدل SEM توانست روابط علی را روشن سازد و نشان دهد که مدیریت پروژه و عوامل محیطی بیشترین تأثیر منفی بر عملکرد زمانی دارند.
- مدل RF، با دقت بالا، همین متغیرها را به‌عنوان عوامل کلیدی در پیش‌بینی تأخیر معرفی کرد.
- مقایسه کمی دو روش نشان داد که همگرایی بالایی بین اثرهای علی (SEM) و اهمیت پیش‌بینی (RF) وجود دارد. این موضوع اعتبار نتایج را دوچندان می‌کند.
- ترکیب این دو رویکرد، هم از منظر تبیینی و هم از منظر کاربردی، ابزار قدرتمندی برای مدیران پروژه فراهم می‌کند تا عوامل بحرانی را در مراحل اولیه شناسایی و کنترل نمایند.

۶- نتایج فرضیه‌ها

نتایج تحلیل داده‌ها که در جدول ۱۳ ارائه شده است، تأییدکننده تمامی فرضیه‌های پژوهش است. بر اساس این نتایج، شش عامل کلیدی شامل محیط زیست، ذینفعان، مقررات، سیاست‌ها، مدیریت و باورهای سنتی و مالکیت، تأثیر منفی و معناداری بر عملکرد پروژه‌های عمرانی دارند. این یافته‌ها همسو با تحقیقات پیشین نشان‌دهنده اهمیت شناسایی و مدیریت این عوامل به منظور بهبود عملکرد پروژه‌ها می‌باشد.

جدول ۱۳: نتایج تحلیل داده‌ها

فرضیه	خلاصه نتایج
فرضیه ۱	تأثیر منفی و معنادار عوامل محیطی بر عملکرد پروژه‌های عمرانی
فرضیه ۲	تأثیر منفی و معنادار نقش ذینفعان بر عملکرد پروژه‌ها
فرضیه ۳	تأثیر منفی و معنادار مقررات بر عملکرد پروژه‌های عمرانی
فرضیه ۴	تأثیر منفی و معنادار سیاست‌ها بر عملکرد پروژه‌ها
فرضیه ۵	تأثیر منفی و معنادار مدیریت بر عملکرد پروژه‌های عمرانی
فرضیه ۶	تأثیر منفی و معنادار باورهای سنتی و مسائل مالکیت بر عملکرد پروژه‌ها

۶-۱- پیشنهادهای کاربردی بر اساس نتایج تحقیق

با توجه به تأیید فرضیه‌ها و اثرگذاری منفی عوامل شناسایی شده، جهت بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی و کاهش مشکلات مرتبط، پیشنهادهای کاربردی زیر ارائه می‌شود:

- محیط زیست:** ایجاد زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی، رعایت اصول کاهش آلودگی هوا، آب و خاک در فرآیندهای پروژه، استفاده از منابع و فناوری‌های دوستدار محیط زیست، و توجه ویژه به پایداری زیست‌محیطی در حمل و نقل و لجستیک پروژه‌ها. همچنین، مدیریت اصولی مسائل مرتبط با پسماند، فاضلاب، گرد و غبار، ارتعاش و آلودگی صوتی از اهمیت بالایی برخوردار است.
 - ذینفعان:** برآورد و پیش‌بینی دقیق هزینه‌ها، آماده‌سازی به موقع تجهیزات و مواد، استفاده مؤثر از دانش و تخصص منابع انسانی، نظارت مستمر بر فرآیند اجرای پروژه و ایجاد ارتباط قوی و مستمر با ذینفعان کلیدی.
 - مقررات:** آشنایی کامل و اجرای دقیق مقررات ساخت و ایمنی، پیش‌بینی و تامین زمین مورد نیاز، ایجاد راهکارهای مناسب برای دسترسی به نیروی کار، آگاهی از قوانین کار مرتبط و پیشگیری از اعتصابات نیروی کار.
 - سیاست‌ها:** توجه و آگاهی به تغییرات طرح‌ها و نقشه‌های پروژه، تسهیل فرآیندهای دریافت مجوزهای لازم، و بهره‌گیری از کارکنان مجرب در حوزه‌های مختلف پروژه.
 - مدیریت:** تقویت روابط با مؤسسات مالی برای تضمین حمایت مالی پروژه‌ها، تمرکز بر کیفیت اجرای کار و تحویل به موقع، و ایجاد هماهنگی مناسب میان ذینفعان.
 - باورها و مالکیت سنتی:** درک و احترام به باورهای سنتی ذینفعان، شفاف‌سازی مسائل مالی مرتبط با مالکیت پیش از آغاز پروژه، و شناخت عمیق فرهنگ و مسائل اجتماعی مرتبط با ذینفعان.
- اجرای این راهکارها می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی ایفا کند و زمینه‌ساز موفقیت بیشتر و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌ها باشد.

۷- نتیجه‌گیری

۷-۱- بحث نتایج

یافته‌های پژوهش نشان داد که تمامی عوامل شناسایی‌شده—از جمله مدیریت پروژه، عوامل محیطی، ذی‌نفعان، مقررات، سیاست‌ها و باورهای سنتی—تأثیر منفی و معناداری بر عملکرد زمانی پروژه‌های ساختمانی دارند.

- **مقایسه با ادبیات پیشین:** نتایج با مطالعات پیشین درباره نقش مدیریت پروژه در موفقیت پروژه‌ها (Ingle & Mahesh, 2022) و تأثیر شرایط محیطی و نهادی (Adedokun et al., 2023) همسو است. همچنین، یافته‌ها تأیید می‌کنند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند پیش‌بینی‌های قابل اتکایی از ریسک‌های زمانی ارائه دهند (Zhang et al., 2020; Yaseen et al., 2020).
- **نوآوری پژوهش:** برخلاف بسیاری از مطالعات قبلی که صرفاً به یک رویکرد پرداخته‌اند، این تحقیق با ادغام-PLS و SEM و Random Forest نشان داد که دو رویکرد تبیینی و پیش‌بینی‌گر می‌توانند نتایج همگرا ارائه دهند. ضریب همبستگی بالا ($p = 0.95$) بین رتبه‌بندی عوامل در SEM و RF مؤید اعتبار بالای چارچوب پیشنهادی است.
- **پیامدهای مدیریتی:** رتبه‌بندی عوامل، مدیران پروژه را قادر می‌سازد منابع محدود را به حوزه‌هایی مانند بهبود مدیریت پروژه، کاهش اثرات محیطی و ارتقای تعاملات ذی‌نفعان اختصاص دهند.

۷-۲- محدودیت‌ها

این پژوهش نیز همانند سایر تحقیقات با محدودیت‌هایی همراه بوده است:

۱. **حجم نمونه:** جامعه آماری شامل ۹۲ نفر از یک شرکت عمرانی خاص بود؛ بنابراین تعمیم‌پذیری نتایج نیازمند احتیاط است.
۲. **نوع پروژه‌ها:** مطالعه بر پروژه‌های ساختمانی در یک بستر جغرافیایی مشخص (ایران) متمرکز بود و ممکن است در سایر بسترهای فرهنگی-اقتصادی نتایج متفاوتی حاصل شود.
۳. **نوع داده‌ها:** داده‌ها مبتنی بر پرسشنامه و خوداظهاری بودند که می‌تواند با سوگیری پاسخ‌دهندگان همراه باشد.

۷-۳- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

۱. **گسترش داده‌ها:** استفاده از داده‌های چندین شرکت و پروژه‌های متنوع‌تر در حوزه‌های زیرساختی، صنعتی و بین‌المللی.
۲. **مقایسه الگوریتم‌ها:** آزمون و مقایسه الگوریتم‌های پیشرفته‌تر مانند XGBoost و شبکه‌های عصبی در کنار Random Forest برای ارزیابی پایداری نتایج.
۳. **ترکیب داده‌های پرسشنامه‌ای با داده‌های واقعی پروژه:** مانند داده‌های سن‌سور، زمان‌بندی واقعی و اطلاعات BIM برای ارتقای دقت پیش‌بینی.
۴. **تحلیل حساسیت:** بررسی اثر تغییر پارامترهای الگوریتم و سناریوهای مختلف بر نتایج.
۵. **مطالعات تطبیقی بین‌المللی:** بررسی چارچوب پیشنهادی در کشورهای مختلف برای مقایسه اثرات نهادی و فرهنگی.

۷-۴- نتیجه‌گیری نهایی

این پژوهش با تلفیق دو رویکرد مکمل PLS-SEM—برای تبیین روابط علی و Random Forest برای پیش‌بینی عملکرد—چارچوبی جامع برای شناسایی و پیش‌بینی محدودیت‌های زمانی در پروژه‌های ساختمانی ارائه داد.

- SEM نشان داد که مدیریت پروژه و شرایط محیطی مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر عملکرد هستند.
- RF این یافته‌ها را تأیید کرد و با دقت بالای ۸۷٪ توانست پروژه‌های پرریسک را شناسایی کند.
- همگرایی نتایج دو روش، علاوه بر افزایش اعتبار علمی، نشان‌دهنده‌ی قابلیت عملی چارچوب برای کمک به تصمیم‌گیری داده‌محور در پروژه‌های عمرانی است.

بنابراین، این مطالعه می‌تواند برای مدیران پروژه و سیاست‌گذاران به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی به‌موقع ریسک‌ها و تخصیص مؤثر منابع مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت به بهبود موفقیت پروژه‌ها در محیط‌های پیچیده و پرجالش کمک کند.

Reference

- Adedokun, O. A., et al. (2023). Risk factors and their impact on project success: Evidence from educational building projects. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(6), 1901–1924.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
- Buildings. (2025). Analyzing delay factors in construction projects using SEM. *Buildings*, 15(2), 678.
- Egwim, E., et al. (2021). Machine learning models for predicting delays in construction projects. *Automation in Construction*, 124, 103556.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2021). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (3rd ed.). Sage.
- Ingle, P. V., & Mahesh, G. (2022). Construction project performance areas for Indian construction projects. *International Journal of Construction Management*, 22(8), 1443–1454.
- Misnan, M. S., Ismail, M. Z., & Yan, T. J. (2024). Challenges and prospects in sustainable project management. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 8(2), 1997–2011.
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: Unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31, 6638–6648.
- Rady, M., et al. (2023). Constraint factors affecting project performance: A PLS-SEM approach. *Mathematics*, 11(3), 734.
- Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Hair, J. F. (2022). PLS-SEM: Indeed a silver bullet. *Journal of Business Research*, 144, 311–320.
- Shmueli, G., Ray, S., Estrada, J., & Chatla, S. B. (2019). The PLS predict algorithm: Prediction-oriented model evaluation in PLS-SEM. *Information Systems Journal*, 29(1), 219–238.
- Shmueli, G., Sarstedt, M., Hair, J. F., Cheah, J.-H., Ting, H., Vaithilingam, S., & Ringle, C. M. (2019). Predictive model assessment in PLS-SEM: Guidelines for using PLSpredict. *European Journal of Marketing*, 53(11), 2322–2347.
- Yaseen, Z. M., et al. (2020). Delay prediction in construction projects using hybrid random forest and genetic algorithm. *Sustainability*, 12(5), 1830.
- Zhang, X., et al. (2020). Predicting construction project delay using random forest. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 04020032.