

Enhanced Bayesian Network Approach to Delay Risk Analysis in Mass Housing Construction

Ali Akbar Shirzadi Javid*, Mohammad Hosein Madihi, Ehsan Nafari

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Housing mass construction projects are vital for urban development but often face delays that lead to increased costs and missed opportunities. This study addresses delay risks using an integrated approach combining Bayesian Belief Networks (BBNs), Interpretive Structural Modeling (ISM), and the DEMATEL method. BBNs identify and model risk relationships, while the Ranked Node Method optimizes parametric analysis by reducing time and effort. ISM establishes risk hierarchies, and DEMATEL analyzes cause-and-effect relationships. Applied to a Parand mass housing project, the methodology revealed a 68% probability of significant delays, with financial and economic risks having a 60% likelihood. Payment delays by the owner showed a 65% probability, while factors like inexperienced consultants, unsuitable contractors, and mismanagement each had over 50% severity probabilities. Contractor- and consultant-related issues also contributed, each with average probabilities exceeding 40%. These findings highlight the importance of addressing financial inefficiencies and enhancing project management practices. The proposed method enhances delay risk modeling precision while minimizing required information, offering a practical and efficient solution for managing delays in mass housing projects.

Review History:

Received: Jun. 08, 2024

Revised: Jan. 03, 2025

Accepted: Apr. 16, 2025

Available Online: Apr. 18, 2025

Keywords:

Risk Assessment

Delay

Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

Interpretive Structural Modeling (ISM)

Bayesian Belief Network (BBN)

Housing Mass

1- Introduction

Construction project delays represent a persistent challenge with far-reaching economic and social consequences. In mass housing projects, where scale and complexity amplify risks, delays can lead to cost overruns exceeding 40% of initial budgets and extended timelines that undermine urban development goals. While prior studies have identified common delay factors—ranging from financial instability to contractor inefficiencies—existing methodologies suffer from three key limitations. First, techniques like the Analytical Network Process (ANP) and Structural Equation Modeling (SEM) struggle to model nonlinear interactions among risks. Second, conventional Bayesian Networks often require impractical volumes of expert input for parameterization. Third, few frameworks simultaneously address the hierarchical organization of risks and their dynamic probabilistic impacts [1].

This study bridges these gaps through an integrated DEMATEL-ISM-BBN approach. The framework begins with DEMATEL to map causal relationships

among 23 delay factors identified through literature review and expert surveys. ISM then organizes these factors into a four-tier hierarchy, distinguishing root causes (e.g., owner payment delays) from surface-level symptoms (e.g., material shortages). Finally, a BBN enhanced with RNM quantifies the probabilistic impacts, using ranked node states to streamline conditional probability table (CPT) development. Validated against data from a 1,200-unit housing project in Parand, the model demonstrates superior precision in risk prioritization compared to existing methods, with a 22% improvement in delay prediction accuracy over traditional ANP approaches [2,3].

2- Methodology

The research methodology comprised three sequential phases, each addressing specific aspects of delay risk analysis.

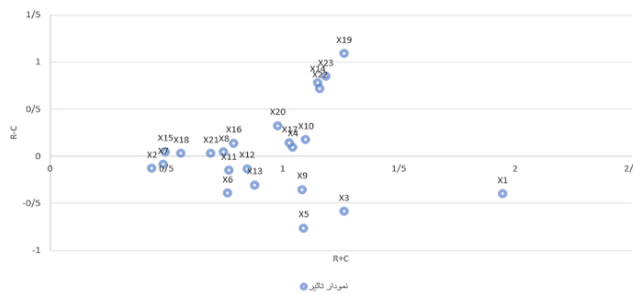
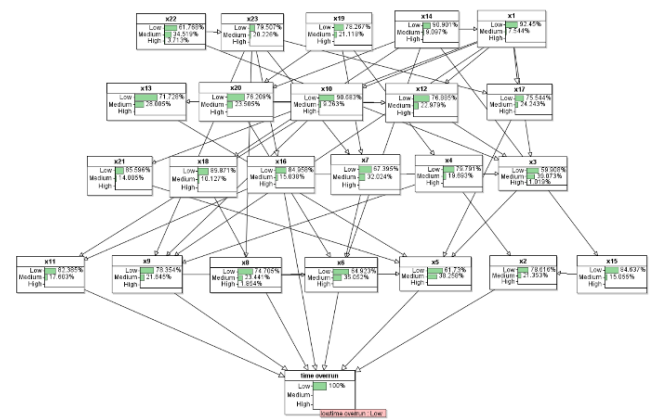
Phase 1: Factor Identification and Causal Analysis

A comprehensive literature review identified 23 delay factors across six categories: owner-related, consultant-related, contractor-related, labor-related, material/equipment-related, and external risks. These factors were refined through structured interviews with 15 industry experts using Likert-

*Corresponding author's email: Shirzad@iust.ac.ir

Table 1. Hierarchical classification of delay factors in the case study obtained from Interpretive Structural Modeling (ISM)

4	3	2	1	Level
X ₂₂ , X ₂₃ , X ₁₉ , X ₁₄ , X ₁	X ₂₁ , X ₁₈ , X ₁₆ , X ₁₇ , X ₄ , X ₃	X ₂₀ , X ₁₇ , X ₁₃ , X ₁₂ , X ₁₀	X ₁₅ , X ₁₁ , X ₉ , X ₈ , X ₇ , X ₅ , X ₂	Node

**Fig. 1. Influence/dependence diagram obtained from Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) analysis****Fig. 2. Bayesian network validation (target factor: lowest severity)**

scale questionnaires. DEMATEL analysis then quantified causal relationships, with experts rating factor interactions on a 0–4 scale. The resulting influence matrix (Figure 1) revealed strong one-way dependencies—for example, owner payment delays (cause factor) directly impacted contractor liquidity (effect factor) but not vice versa.

Phase 2: Hierarchical Structuring with ISM

The DEMATEL output informed ISM to classify factors into four hierarchical levels (Table 1). Level 1 contained fundamental risks like economic instability (X₂₃) and owner payment delays (X₃), which influenced but were not influenced by other factors. Level 4 included surface-level risks such as low labor productivity (X₆), which were effects rather than causes. This hierarchy provided project managers with a prioritized intervention roadmap.

Phase 3: Probabilistic Modeling with BBN-RNM

The ISM hierarchy guided BBN structure development, with parent-child relationships mirroring the causal chains. To address parametric complexity, RNM assigned each node three states (low/medium/high) mapped to normalized 0–1 scales. Weighted influences from DEMATEL matrices populated CPTs, reducing expert judgment requirements by 60% compared to conventional BBNs. The model was implemented in AgenaRisk software, with sensitivity analyses validating its responsiveness to parameter variations (Figure 2).

3- Results and Discussion

The case study application yielded three key findings with theoretical and practical implications.

First, financial risks dominated the delay landscape. Owner payment delays (X₃) showed a 65% probability of occurrence, with a cascading effect that increased contractor-related delay risks by 35%. Economic instability (X₂₃) compounded this, exhibiting strong correlations with material price fluctuations ($r = 0.72$) and budget shortfalls. These results align with Ogunlana et al.'s (2015) findings in infrastructure projects but reveal 18% higher financial risk probabilities in housing developments due to tighter margins.

Second, the RNM-enhanced BBN demonstrated remarkable efficiency. Traditional BBNs required 120+ expert judgments for CPT completion, while RNM achieved comparable accuracy with only 48 inputs—a 60% reduction that makes the model feasible for time-constrained industry applications. Validation tests showed <5% deviation between RNM-generated probabilities and full expert-parameterized CPTs.

Third, the hierarchy clarified intervention priorities. Level 1 factors (e.g., X₃, X₂₃) demanded strategic solutions like escrow payment systems and inflation-indexed contracts. In contrast, Level 4 factors (e.g., X₆, X₁₈) required operational fixes such as productivity incentives. This stratification helps managers allocate resources effectively, addressing root causes rather than symptoms. Figure 3. Shows the Impact severity and occurrence probability of delay risks.

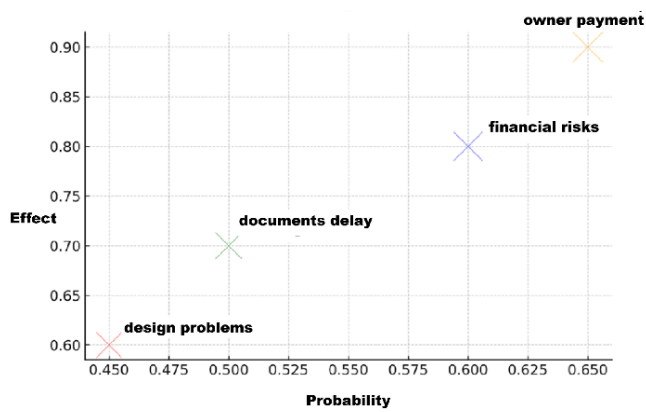


Fig. 3. Impact severity and occurrence probability of delay risks

4- Conclusions

This study advances delay risk management through a rigorously validated hybrid methodology. By unifying DEMATEL's causal mapping, ISM's hierarchical clarity, and BBN's probabilistic rigor—optimized via RNM—the framework offers a comprehensive yet practical solution for mass housing projects. Key takeaways include:

Financial risks require institutional safeguards, particularly escrow mechanisms for owner payments and economic contingency clauses.

Contractor and consultant risks are interdependent; integrated performance metrics should replace siloed evaluations.

RNM makes BBNs accessible for industry use without compromising analytical depth.

Future research could expand the model to modular construction and integrate real-time data feeds for dynamic risk updating.

References

- [1] G. Dehdasht, et al., DEMATEL-ANP risk assessment in oil and gas construction projects, *Sustainability* 9 (8) (2017) 1420. Author, A., 1986. Book Name. Publisher Name, Address.
- [2] M.H. Madihi, A.A. Shirzadi Javid, F. Nasirzadeh, Enhancing risk assessment: an improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks, *Engineering, Construction and Architectural Management* (2023), <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2023-0774>.
- [3] F. Antoniou, Delay risk assessment models for road projects, *Systems* 9 (3) (2021) 70.



تحلیل ریسک تاخیر پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن با استفاده از یک روش بهبود یافته ترکیبی مبتنی بر شبکه بیزین

علی اکبر شیرزادی جاوید^{*}، محمدحسین مدیحی، احسان نفری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹

کلمات کلیدی:

ارزیابی ریسک

تاخیر

آزمایش و ارزیابی تصمیم‌گیری (DE-)

(MATEL)

مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)

شبکه باور بیزین (BBN)

انبوه‌سازی مسکن

خلاصه: پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری و نقش کلیدی در توسعه، از اهمیت بالایی برخوردارند. با این حال، این پروژه‌ها با چالش‌های متعددی از جمله تاخیر در اجرا مواجه هستند. تاخیر در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها، نارضایتی مشتریان و از دست رفتن فرصت‌های اقتصادی شود. در این مقاله، به بررسی ریسک‌های تاخیر در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن با استفاده از روشی نوآورانه پرداخته شده است. این روش، ترکیبی از شبکه بیزین (BBNs)، مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) و آزمایش و ارزیابی تصمیم‌گیری (DEMATEL) است. این روش بر روی یکی از پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن پرنده به عنوان مطالعه موردی اعمال گردید که نتایج به دست آمده نشان داد که در این پروژه در حالت عادی احتمال شدت بالای تاخیر ۶۸ درصد بوده است. از طرفی عوامل مرتبط با مسائل مالی و اقتصادی با احتمال شدت بالای وقوع ۶۰ درصد رخ خواهند داد. همچنین تاخیر در پرداخت‌های انجام شده توسط مالک هم با احتمال وقوع ۶۵ درصد، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. تجربه ناکافی مشاور، انتخاب پیمانکاران نامناسب، در دست داشتن چند پروژه همزمان و سوء مدیریت سه عامل اثرگذار دیگر هستند که با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۵۰ درصد اتفاق می‌افتند. از طرفی مدل ارائه شده، عوامل مرتبط با پیمانکار را که از منابع مهم تاخیر است، با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۴۰ درصد را نشان می‌دهد. همچنین عوامل مربوط به مشاور نیز باتوجه به نقش مهم آن، با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۴۰ درصد نشان داده شده‌اند.

۱- مقدمه

تاخیر در پروژه‌های ساختمانی مشکلی جهانی است که ناشی از عوامل مختلفی مانند ضعف مدیریت، کمبود منابع، مشکلات ارتباطی و ... است. این تاخیرها می‌توانند منجر به افزایش هزینه، از دست رفتن درآمد و نارضایتی ذینفعان شوند. شناسایی و ارزیابی ریسک‌های منجر به تاخیر، گامی مهم در جهت مدیریت این مشکل است. ارزیابی ریسک، فرآیندی است که برای شناسایی و تحلیل ریسک‌های احتمالی یک سازمان یا پروژه انجام می‌شود. این فرآیند به سازمان‌ها کمک می‌کند تا اثرات منفی ریسک‌ها را کاهش دهند و احتمال موفقیت خود را افزایش دهند [۱، ۲].

در این زمینه، تحقیقات متعددی در جهان انجام شده است. این تحقیقات، بسته به محل انجام و نوع پروژه، عوامل مختلفی را شناسایی کرده‌اند. تعداد عوامل شناسایی شده، از ۱۱۳ عامل در مطالعه‌ای در مالزی تا ۹ عامل در مطالعه‌ای در هنگ کنگ متغیر است. فانی آنتونیو [۳]، مدل‌سازی

ارزیابی ریسک تاخیر در پروژه‌های جاده‌ای را انجام داد. این مطالعه، تمام عوامل تاخیر ساخت راه را، با توسعه یک ساختار شکست ریسک مشترک (RBS^۱)، طبقه‌بندی و استاندارد کرده است. این کار، امکان مقایسه بین عوامل تاخیر واقعی پروژه‌ها را فراهم نموده است. این مطالعه عوامل تاخیر را بر اساس چهار معیار احتمال وقوع، شدت، قابل کنترل بودن و قابل پیش‌بینی بودن، ارزیابی نموده است. استفاده از مدل‌های پیشنهادی در دو پروژه فرضی در یونان نشان داد که عوامل تاخیر «شرایط آب و هوا»، «تحصیل دیر هنگام زمین»، «شبکه‌های تاسیساتی» و «کنترل ترافیک» در واقع محتمل‌ترین و شدیدترین عوامل تاخیری هستند که باید با آنها برخورد کرد. علوی و معتمدی [۴] مطالعه‌ای را جهت شناسایی و ارزیابی ریسک‌های تاخیر در پروژه‌های عمرانی انجام دادند. در این مطالعه سعی بر آن بوده است تا تأخیر در پروژه‌های عمرانی در ایران در یک تحقیق میدانی مورد بررسی قرارگیرد و شدت، فراوانی و اهمیت دلایل تأخیر مورد بررسی قرار گرفته است. حدود

1. Risk breakdown structure-

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shirzad@iust.ac.ir



۲۵ درصد از مشاوران، ۴۰ تا ۶۰ درصد زمان خارج از حد را در مقایسه با مدت زمان مشخص شده اولیه نشان دادند. همچنین حدود ۷۶ درصد از پیمانکاران شرکت کننده مشخص نمودند که معدل زمان خارج از حد برای پروژه‌هایی که تجربه کرده‌اند بین ۲۰ تا ۴۰ درصد مدت زمان اصلی پروژه بوده است. حدود ۵۶ درصد از مشاوران شرکت کننده، درصد مشابهی را مشخص کردند، در حالیکه ۱۵٪ پیمانکاران تأخیر زمانی بیش از ۱۰۰٪ مدت قرارداد اصلی را بیان کردند. مین یانگ چنگ و همکاران [۵] مدلی برای ارزیابی ریسک تأخیر برنامه ساخت و یک نقشه مدیریتی مختص پیمانکاران عمومی خارجی (FGCs^۱) ایجاد نمودند. در مدل مذکور، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به منظور تخمین تأخیر زمان بندی پروژه گسترش داده شد. از محدودیت این روش می توان به این اشاره نمود که شبکه عصبی مصنوعی (ANN) قادر به تحلیل اثر متقابل عوامل خطر نیست. دهدشت و همکاران [۶] روش جدیدی برای ارزیابی ریسک در پروژه‌های ساخت نفت و گاز ارائه دادند و در تحقیق خود از ترکیب دو روش آزمایش و ارزیابی تصمیم گیری (DEMATEL) و فرآیند شبکه تحلیلی (ANP^۲) استفاده کردند. برای مقابله با مشکلات فنی و زمانی پروژه‌ها، بواتنگ و همکاران [۷] تحقیقی با روش فرآیند شبکه تحلیلی (ANP) را منتشر کردند. آنها یک شاخص اولویت ریسک جدید به عنوان رویکردی نوآورانه برای مدل سازی ریسک‌ها به صورت تحلیلی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه شبکه تراموا ادینبورگ در مرحله ساخت ارائه کردند. محدودیت اساسی این رویکرد این است که همزمان با اختصاص یک مقدار واضح برای ثبت عدم قطعیت و رفتار تصادفی در داده‌های ریسک پروژه‌های پیچیده، یک مقایسه زوجی انجام می‌دهد. به طور مشابه، این مقایسه زوجی به پیوندهای شبکه پیچیده‌تر و محاسبات اضافی در صورت افزایش عناصر خطر در سیستم نیاز دارد. [۸، ۹] چاندر و همکاران [۱۰] با هدف شناسایی عواملی که باعث ایجاد ریسک می‌شوند، در یک مطالعه، به شناسایی عوامل موفقیت پروژه و ارائه مدل عوامل ریسک موثر بر موفقیت پروژه پرداختند. داده‌های جمع‌آوری شده با کمک مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) برای پیش‌بینی موفقیت پروژه مورد تحلیل قرار گرفت. موفقیت پروژه به طور قابل توجهی با هزینه (ضریب استاندارد شده ۰٫۸۷۸)، کیفیت (ضریب استاندارد ۰٫۸۷۳)، زمان (ضریب استاندارد ۰٫۸۰۴)، رضایت مشتری (ضریب استاندارد شده ۰٫۸۸۴) و سود (ضریب استاندارد شده ۰٫۸۵۰) مرتبط است. یکی از محدودیت‌های مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) این است که عدم قطعیت و رفتار تصادفی رویدادها را فرض

نمی‌کند. این مدل چند متغیره فقط برای یافتن تعاملات پیچیده عناصر سیستم در جایی که عدم قطعیت کم است مناسب می باشد. مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) کاربردهای محدودی برای پروژه‌های پیچیده تحت عدم قطعیت بالا و در جایی که اطلاعات محدود و مبهم در دسترس است را دارا می باشد. [۱۱] روش‌هایی مانند فرآیند شبکه تحلیلی (ANP) و مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) نیز با محدودیت‌هایی با وجود توانایی در نظر گرفتن تأثیر متقابل عوامل خطر روبرو هستند. محدودیت مشترکشان این است که نمی‌توانند احتمالات مشروط بین عوامل و در نتیجه احتمال وقوع ریسک را تعیین کنند. [۷، ۱۲، ۱۳] جیان وانگ و هانگ پینگ [۱۴]، در مقاله خود تعاملات میان متغیرهای اصلی در ارتباط با ریسک‌های برنامه‌ریزی زیرساخت با بهره‌گیری از نمودارهای دوار علی را بررسی کردند. سپس، مدل سیستم پویا (SD^۳) به منظور بررسی اثرات ریسک بر روی یک برنامه پروژه بر مبنای نمودارهای دوار علی و رابطه‌های زیربنایی میان متغیرها ساخته شد. نتایج نشان داد که مدل دینامیک سیستم توانایی دارد تا به عنوان اساسی برای شبیه‌سازی اثرات ریسک متنوع در برنامه زمان بندی پروژه استفاده گردد.

در سال‌های اخیر استفاده از روش شبکه بیزین به عنوان یک روش جدید و کاربردی مطرح و به کار گرفته شده است. خانزادی و همکاران [۱۵] در مقاله خود پیش‌بینی جریان نقدی احتمالی را با استفاده از شبکه‌های بیزین (BBNs) برای جلوگیری از ورشکستگی پیمانکاران با در نظر گرفتن نمودارهای تأثیر و عوامل خطر بررسی کردند. کارایی و قابلیت اطمینان رویکرد پیشنهادی بر روی یک پروژه ساختمانی مهم در ایران به عنوان یک مطالعه موردی واقعی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل به خوبی عمل کرد. نتایج همچنین حاکی از دقت روش و همگرایی مطلوب آن با شرایط واقع بینانه بود. کساوگلو بالتا و همکاران [۱۶] از روش شبکه بیزین برای مقاله خود در بررسی ریسک تأخیر پروژه‌های حفاری تونل استفاده کردند. در این پژوهش، یک روش بررسی ریسک بر مبنای شبکه باور بیزین (BBN) مخصوص پروژه‌های تونل ماشین (حفاری تونل) به منظور پیش‌بینی تأخیر ارائه شد. در این مطالعه، بر مبنای مدل بیزین (BBN)، به منظور ارزیابی تأخیر، یک ابزار با در نظر داشتن اثرات انجام نقشه‌های کاهش ریسک جایگزین گسترش داده شد. نتایج بیان کرد که شبکه بیزین (BBN) و روش بررسی ریسک، توانایی مدل سازی ارتباط متقابل میان عوامل خطر، پیش‌بینی تأخیر، کمک به تصمیم‌گیرندگان و ایجاد

1. Foreign general contractors
2. Analytical Network Process

جدول ۱. جمع بندی مرتبط ترین تحقیقات با مقاله حاضر و بررسی هدف و محدودیت آن ها

Table 1. Summary of the most relevant studies to the current paper and examination of their objectives and limitations

نام مرجع	هدف تحقیق	یافته ها و محدودیت ها
آنتونیو و همکاران [۳]	استفاده از یک ساختار شکست ریسک (RBS)، عوامل مؤثر بر تأخیر در پروژه های راه سازی را بر اساس معیارهایی نظیر احتمال وقوع، شدت، و قابل کنترل بودن ارزیابی کردند.	با وجود دستاوردهای این مطالعه، مدل ارائه شده محدود به تحلیل روابط غیرخطی میان عوامل نبود و نتوانست تعاملات پیچیده میان متغیرها را بررسی کند.
دهدشت و همکاران [۶]	با استفاده از ترکیب روش های DEMATEL و ANP، ارزیابی ریسک پروژه های نفت و گاز را انجام دادند.	هرچند این رویکرد توانست روابط متقابل میان عوامل را تحلیل کند، اما به دلیل پیچیدگی در محاسبات و نیاز به داده های گسترده، برای پروژه های انبوه سازی مسکن که با تنوع بیشتری از عوامل مواجه هستند، مناسب نبود.
خاندادی و همکاران [۱۵]	از شبکه بیزین برای پیش بینی جریان نقدی و شناسایی ریسک های مالی استفاده کردند.	این تحقیق نشان داد که استفاده از شبکه بیزین می تواند پیش بینی های دقیقی ارائه دهد، اما ساختار اولیه شبکه بر اساس نظرات کارشناسان تنظیم شده بود که احتمال خطا در شناسایی وابستگی های متقابل میان عوامل را افزایش می داد.
مدیحی و همکاران [۱۸]	از شبکه بیزین برای پیش بینی جریان نقدی و شناسایی ریسک های افزایش هزینه ساخت استفاده کردند.	روش پیشنهادی در مقایسه با شبکه بیزین سنتی، زمان و تلاش مورد نیاز برای استخراج پارامترها را به طور چشمگیری کاهش داده و ساختاردهی شبکه را آسان تر می کند.

پرسیده می شد، در حالی که این ریسک عموماً در حالت بله است و این سوال، کارشناس را سردرگم می کند. برای تطابق بیشتر با واقعیت، این گره باید حداقل در سه حالت کم، متوسط و زیاد تعریف شود و احتمال این حالت ها را از کارشناس جویا شود. جدول ۱ به جمع بندی مهمترین و مرتبط ترین تحقیقات به مقاله ی حاضر و اهداف و یافته ها و محدودیت آنها پرداخته است.

۲- اهمیت تحقیق حاضر با توجه به خلا تحقیقات پیشین

پروژه های انبوه سازی مسکن به دلیل اهمیت بالا در توسعه شهری و نیاز به سرمایه گذاری های کلان، همواره با چالش های متعددی از جمله تأخیر در اجرا مواجه بوده اند. در سال های اخیر، تحقیقات گسترده ای برای شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر تأخیر پروژه های عمرانی انجام شده

شبکه ریسک در آماده سازی استراتژی های کاهش ریسک مقرون به صرفه را دارد. در میان این روش ها، پویایی سیستم (SD) و شبکه های بیزین (BBN)، علاوه بر فراهم کردن امکان تحلیل تعامل بین عوامل خطر، برای ارزیابی کمی اثرات ریسک ها نیز مورد استفاده قرار گرفته اند. استفاده از شبکه بیزین (BBN) برای ارزیابی کمی ریسک در تحقیقات گذشته نشان داد که این روش، علاوه بر مدل سازی تعامل بین عوامل و تأثیر آنها بر یکدیگر، زنجیره ای از احتمالات مشروط را ارائه می دهد و منجر به ارزیابی بهتر کمی ریسک خواهد شد. [۱۷] در برخی از مطالعات گذشته، به منظور کاهش مقدار داده های مورد نیاز برای تکمیل جداول احتمال شرطی، از یک تعریف دودویی از حالت های عامل خطر برای ساده سازی مدل استفاده شد که در نتیجه منجر به عدم تطابق بین مدل و واقعیت می شود. به عنوان مثال ریسک کار مجدد در دو حالت بله و خیر تعریف می شد و احتمال هر حالت

و تحلیل حساسیت عوامل

این مراحل به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ابتدا یک درک کیفی از روابط میان عوامل ارائه دهند و سپس با استفاده از مدل‌های کمی، پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های دقیق‌تر انجام شوند. رویکرد اتخاذ شده، نه تنها امکان بررسی عوامل به صورت مجزا، بلکه امکان تحلیل اثرات متقابل و ترکیبی آن‌ها را نیز فراهم می‌کند. شکل ۱ نمودار روند پژوهش را نشان می‌دهد.

۳-۱- شناسایی عوامل خطر در مرحله اول

در این پژوهش جهت صحت سنجی عملکرد مدل مذکور، از داده‌های یک پروژه‌ی انبوه‌سازی در حال انجام واقع در شهر پرند استفاده شده است. در مرحله اول، فهرست اولیه‌ای از عوامل خطر موثر بر تأخیر پروژه (شامل تجهیزات، مواد، منابع انسانی و هزینه‌های سربار) با مرور ادبیات شناسایی شد. سپس یک جلسه با کارشناسان پروژه، برای نهایی کردن عوامل خطر تشکیل شد و از ایشان خواسته شد تا با استفاده از مقیاس لیکرت، میزان اهمیت خطرات شناسایی شده از ادبیات را تعیین کنند. ریسک‌هایی که در لیست اولیه مغفول مانده بود نیز طبق نظر کارشناسان مذکور به لیست اضافه شد.

۳-۲- ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL)

تکنیک ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL) می‌تواند به راحتی روابط متقابل بین عوامل شناسایی شده را در یک مدل ساختاری قابل درک از سیستم مورد مطالعه، ترسیم کند. در این تکنیک، از تجربه کارشناسان برای افزایش درک ساختار سیستم، شناسایی عوامل کلیدی و ارائه راه حل برای سیستم‌های تصمیم‌گیری پیچیده استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان از خروجی این روش برای تعیین ساختار BBN و روابط بین عوامل خطر استفاده کرد. این تکنیک شامل چند مرحله است که در ادامه بیان گردیده است. اولین گام، تعریف ماتریس تاثیر مستقیم است، که این ماتریس، بر روابط مستقیم بین عوامل تمرکز دارد و از روابط متقابل پیچیده غفلت می‌کند. از متخصصان خواسته شد که با استفاده از مقیاس پنج درجه‌ای لیکرت بصورت بسیار زیاد (۴)، زیاد (۳)، متوسط (۲)، کم (۱) و بدون تأثیر (۰)، تأثیر مستقیم هر یک از عوامل خطر را بر سایر همتایان بیان کنند: مقادیر به دست آمده ماتریس تأثیر مستقیم را بر اساس معادله (۱) تشکیل می‌دهند.

است. مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که بسیاری از این مطالعات بر عوامل عمومی مانند ضعف مدیریت، کمبود منابع و مشکلات ارتباطی تمرکز داشته‌اند، اما هنوز نیاز به بررسی دقیق‌تر روابط متقابل این عوامل و ارائه راهکارهای عملی باقی مانده است. تحقیق حاضر با ترکیب روش‌های ISM، DEMATEL و شبکه بیزین، نه تنها به تحلیل تعاملات پیچیده میان عوامل ریسک پرداخته، بلکه ساختار سلسله‌مراتبی این عوامل را نیز مشخص کرده است. استفاده از روش گره رتبه‌بندی شده (RNM) برای پر کردن جداول احتمال شرطی در شبکه بیزین، از جمله نوآوری‌های این تحقیق است که باعث کاهش نیاز به داده‌های گسترده و افزایش دقت تحلیل‌ها شده است. همچنین، این تحقیق با تمرکز بر پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن، حوزه‌ای را مورد بررسی قرار داده که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه بوده است. در مقایسه با مطالعات قبلی، این تحقیق به طور خاص به نقاط ضعف روش‌های پیشین پرداخته و سعی در رفع آن‌ها داشته است. برای مثال، با استفاده از روش ISM، ساختار سلسله‌مراتبی عوامل ریسک به صورت دقیق‌تر شناسایی شده و با کمک شبکه بیزین، زنجیره احتمالات مشروط میان عوامل تحلیل شده است. این رویکرد ترکیبی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و تصمیم‌گیری بهینه‌تر را برای مدیران پروژه فراهم می‌کند.

۳-۳ روش تحقیق

در این تحقیق، یک رویکرد ترکیبی و چندمرحله‌ای برای شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر تأخیر در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن استفاده شده است. این رویکرد شامل سه روش اصلی یعنی ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL)، مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)، و شبکه بیزین (BBN) می‌باشد. این ترکیب از روش‌ها برای ارائه یک تحلیل جامع از روابط متقابل میان عوامل و پیش‌بینی تأثیرات آن‌ها طراحی شده است. مراحل این تحقیق به شرح زیر است:

مرحله اول: شناسایی عوامل خطر مرتبط با تأخیر پروژه‌ها از طریق مرور ادبیات و نظرخواهی از کارشناسان

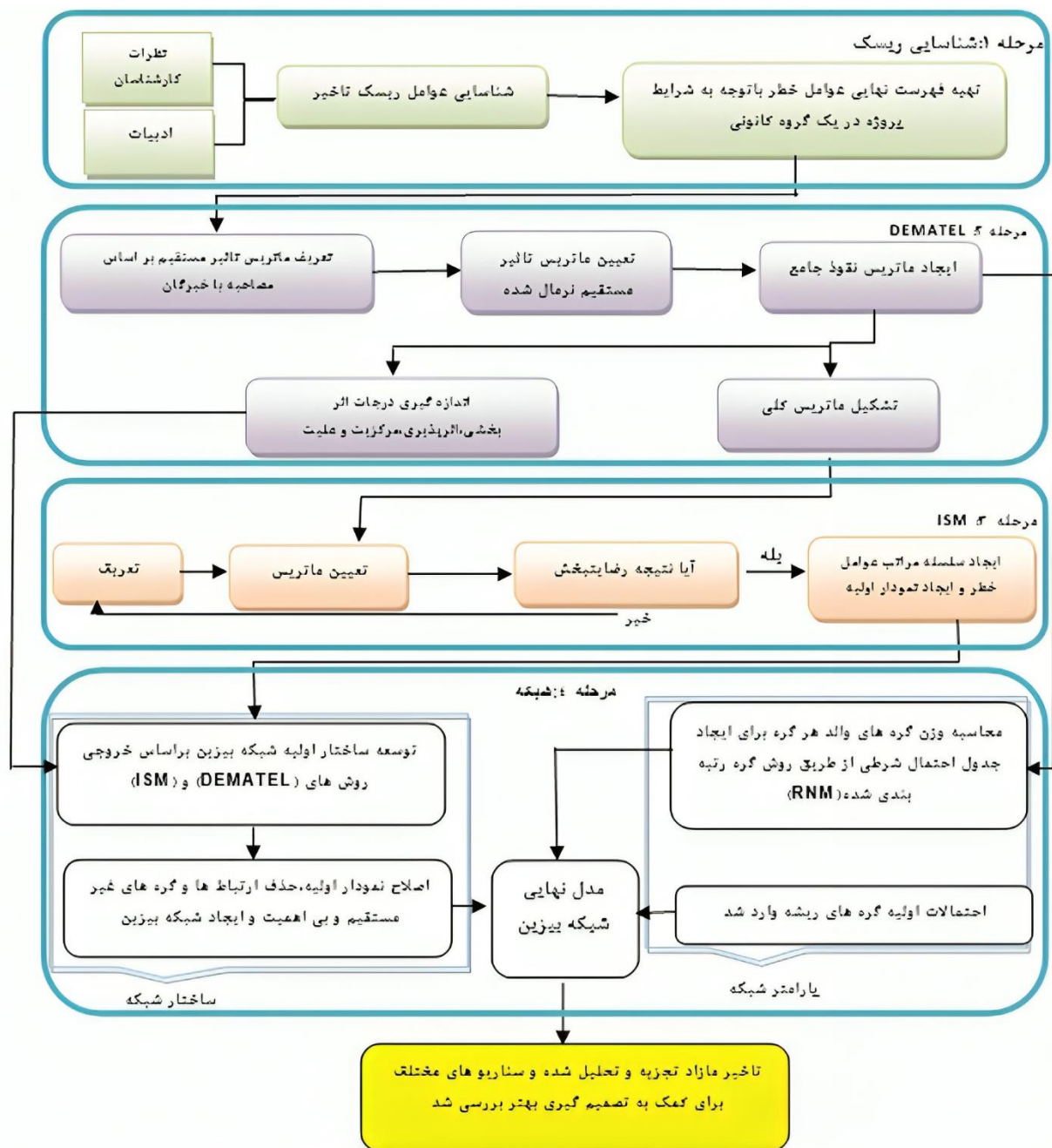
مرحله دوم: تحلیل روابط متقابل عوامل با استفاده از روش DEMATEL

و ایجاد ماتریس تأثیر

مرحله سوم: ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی عوامل با کمک مدل‌سازی

ساختاری تفسیری (ISM)

مرحله چهارم: استفاده از شبکه بیزین برای پیش‌بینی احتمال وقوع تأخیر



شکل ۱. نمودار جریان روش مورد استفاده در مطالعه حاضر

Fig. 1. Flowchart of the methodology used in the current study

است، n برابر با تعداد عوامل خطر به اضافه تعداد اقلام تاخیر است. از معادله زیر برای تشکیل ماتریس نرمال شده (C) استفاده می شود:

$$C = \frac{1}{\max \sum_{j=1}^n Z_{ij}} \quad 1 \leq i \leq n$$

(۲)

$$Z_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m z_{ij}^k, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Z_{ij} نشان دهنده میانگین تأثیر عامل Z_i بر روی عامل Z_j است که میانگین مقدار، بر اساس امتیازهای m متخصص است که بین ۰ تا ۴ متغیر

نشان‌دهنده یک رابطه ضعیف یا بدون رابطه است. این فرایند با تعیین حد آستانه شروع می‌شود. [۲۰، ۲۱]

$$K = [k_{ij}] k_{ij} = \begin{cases} k_{ij} = 1 & \text{if } h_{ij} \geq \lambda, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ k_{ij} = 0 & \text{if } h_{ij} < \lambda, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (۹)$$

hij عناصر ماتریس کلی (H) است.

$$d_{ij} = \sum_{i \neq j} k_{ij} i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (۱۰)$$

برای تعیین سطح هر عامل، تعدادی مجموعه در رابطه با معادلات (۱۱) تا (۱۳) پایه‌گذاری شده است. مجموعه قابل دسترس و پیش مجموعه به ترتیب $R(X_i)$ و $A(X_i)$ نامیده می‌شوند.

$$R(x_i) = \{x_i | k_{ij} = 1\} \quad (۱۱)$$

$$A(x_i) = \{x_j | k_{ji} = 1\} \quad (۱۲)$$

$$C(x_i) = R(x_i) \cap A(x_i) \quad (۱۳)$$

که در آن kij و kji عناصر ماتریس دسترسی هستند.

۳-۴- شبکه بیزین (BBN)

شبکه بیزین (BBN) از دو بخش ساختاری و پارامتری تشکیل شده است که می‌تواند به صورت دستی، خودکار یا ترکیبی، بر اساس داده‌های تاریخی و نظرات کارشناسان ایجاد شود (لیو، ۲۰۱۰). بخش ساختاری، شامل مجموعه‌ای از گره‌ها و لبه‌های جهت‌دار است که به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای سیستم و وابستگی‌های متقابل آنها است. بخش پارامتری و کمی، شامل توزیع احتمال شرایط برای هر گره در رابطه با گره‌های حالت نفوذ (یا «والد») است. جداول احتمال شرطی (CPTs) مربوط به هر گره، اثرات علی را تعریف می‌کنند. در شبکه بیزین (BBN)، براساس قضیه بیز، احتمال رخداد یک گره اثر (گره فرزند) بر روی هر متغیر مدل از احتمال یک علت

سپس، ماتریس تأثیر مستقیم جامع $(T = [t_{ij}]_{n \times n})$ از طریق معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \times P(B)}{P(A)} \quad (۳)$$

همچنین توسط یک ماتریس تأثیر جامع، روابط مستقیم و هم غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود و این ماتریس می‌تواند رابطه جامع بین عوامل مختلف را منعکس کند. براساس ماتریس تأثیر مستقیم جامع (T)، درجات اثربخشی، تأثیرپذیری، مرکزیت و علیت با معادلات (۴) تا (۷) تعیین شد. [۱۹]

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (۴)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (۵)$$

$$M_i = f_i + e_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (۶)$$

$$N_i = f_i - e_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (۷)$$

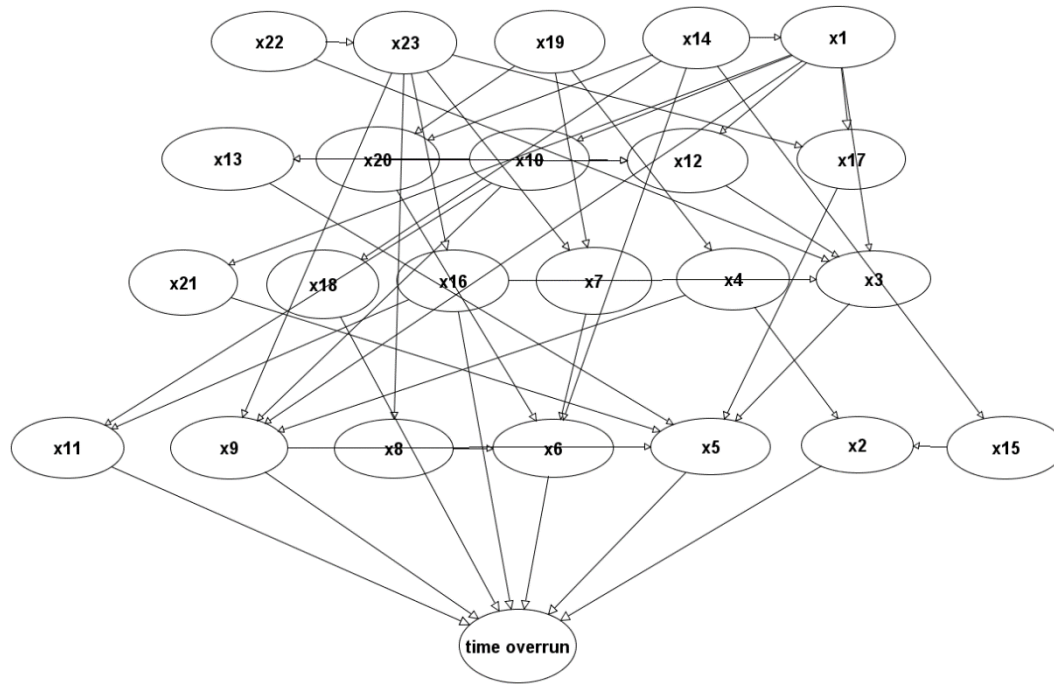
f_i نشان‌دهنده درجات اثربخشی، e_i نشان‌دهنده درجات تأثیرپذیری، M_i نشان‌دهنده مرکزیت و N_i نشان‌دهنده علیت است.

$$H = T + I \quad (۸)$$

که در آن، T ماتریس تأثیر مستقیم جامع است و I نشان‌دهنده ماتریس ترکیب شده است.

۳-۳- روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)

ماتریس دسترسی (K) با معادله (۹) از ماتریس کلی (خروجی آخرین مرحله روش ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL)) تعریف شده و درجه هر ماتریس (d_i) از معادله (۱۰) به دست آمده است. مقدار ۱ در ماتریس دسترسی، به معنای همبستگی قوی بین دو عامل است و مقدار ۰



شکل ۲. مدل ابتدایی شبکه بیزین و ترسیم روابط بین عوامل ریسک

Fig. 2. Initial Bayesian network model illustrating relationships between risk factors

معین (گره والد) محاسبه می شود که به صورت زیر قابل بیان است:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \times P(B)}{P(A)} \quad (14)$$

که $P(BA)$ احتمال رویداد B است با توجه به اینکه رویداد A قبلاً رخ داده است، $P(A)$ احتمال وقوع رویداد A و $P(B)$ احتمال وقوع رویداد B است.

در این تحقیق با استفاده از خروجی‌های بدست آمده در مراحل قبلی، مراحل رسیدن به شبکه بیزین انجام گردید و هر گره در سطح تعیین شده قرار گرفت و ارتباطات بین عوامل در شکل (۲) ترسیم شد. همانطور که قبلاً ذکر شد، یک روش ابتکاری به نام روش گره رتبه‌بندی‌شده (RNM) برای تکمیل جداول احتمال شرطی (CPT) استفاده گردید. از طریق گره رتبه‌بندی‌شده (RNM)، هر گره با برخی از حالت‌ها با مقیاس استاندارد در محدوده (۱-۰) تعریف شد. [۲۲] برای ایجاد جداول احتمال شرطی (CPT) با استفاده از روش گره رتبه‌بندی‌شده (RNM)، شش مرحله به شرح زیر می‌بایست طی شود.

مرحله اول، پیوند دادن حالت‌های هر گره به یک مقیاس نرمال شده از ۰ تا ۱ بوده که هر حالت مربوط به یک محدوده ای از (۰-۱) است. به عنوان مثال، برای یک گره از سه حالت: کم، متوسط و زیاد، این محدوده‌ها به صورت $[۰, ۱]$ ، $[۱/۳, ۲/۳]$ و $[۲/۳, ۱]$ هستند. در مرحله دوم، میزان وزن تعیین شد که به طور کلی، چهار حالت برای بیان وزن وجود دارد: (۱) وزن متوسط، (۲) وزن حداقل، (۳) حداکثر وزن و (۴) ترکیبی از حداقل و حداکثر وزن. در روش ارائه شده در این تحقیق، این وزن‌ها با استفاده از مقایسه زوجی داده‌ها در ماتریس نفوذ جامع که در بخش روش ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL) شرح داده شده است، استخراج شدند. واریانس در مرحله بعدی محاسبه می‌گردد، که واریانس توزیع (TNORMAL) را در عمل تعیین می‌کند. در مرحله پنجم، مقادیر احتمالات شرطی براساس توابع بیان وزن محاسبه می‌شود و آن وزن‌ها برای والدین هر ولد تعیین می‌گردد [۲۳]. مرحله ششم جداول احتمال شرطی (CPT) تولیدشده را تایید می‌کند. اگر انطباق بین خروجی‌ها و نظرات کارشناسان رضایت‌بخش نبوده، تجدید نظر شبکه با تغییر و تنظیم پارامترها یا برخی مداخلات دستی انجام می‌شود. در نهایت، توزیع احتمال تاخیر پروژه با اجرای شبکه بیزین تعیین می‌شود. همچنین باید ذکر شود که در این مطالعه از نرم افزار (AGENARISK) برای اجرای شبکه بیزین استفاده شده است.

جدول ۲. لیست نهایی عوامل ریسک تاخیر در پروژه های انبوه سازی مسکن

Table 2. Final list of delay risk factors in mass housing construction projects

منبع ریسک	فاکتور ریسک
مالک	X۱ انتخاب پیمانکاران نامناسب
	X۳ تأخیر در پرداخت های انجام شده توسط مالک
	X۴ هماهنگی ضعیف توسط مالک بین مشاور و پیمانکار
مشاور	X۲ تأخیر در بررسی و تایید اسناد طراحی
	X۱۹ تجربه ناکافی مشاور
	X۱۵ مشکلات اجرایی ناشی از طراحی
پیمانکار	X۲۰ برنامه ریزی نامناسب پروژه توسط پیمانکار
	X۱۰ بی کفایتی یا بی تجربگی پیمانکار
	X۱۱ تجهیز کند سایت
	X۱۲ تأخیر به دلیل کار غیرقابل اعتماد پیمانکاران جزء
	X۱۳ دوباره کاری به دلیل خطا در حین ساخت
	X۱۴ در دست داشتن چند پروژه همزمان و سوء مدیریت
	X۵ تعارض بین کارگران و پیمانکاران
	X۱۶ کمبود نیروی کار
کارگر	X۱۷ بهره وری پایین نیروی کار
مصلح	X۶ تأخیر در تحویل مصالح
	X۷ کیفیت نامناسب مصالح
	X۸ تغییرات در انواع مصالح و مشخصات در طول ساخت
تجهیزات	X۹ کمبود، بهره وری و کارایی پایین تجهیزات
خارجی	X۱۸ تأخیر در اخذ مجوز
	X۲۳ شرایط بد اقتصادی
	X۲۱ حوادث در حین ساخت و ساز
	X۲۲ نوسانات قیمت

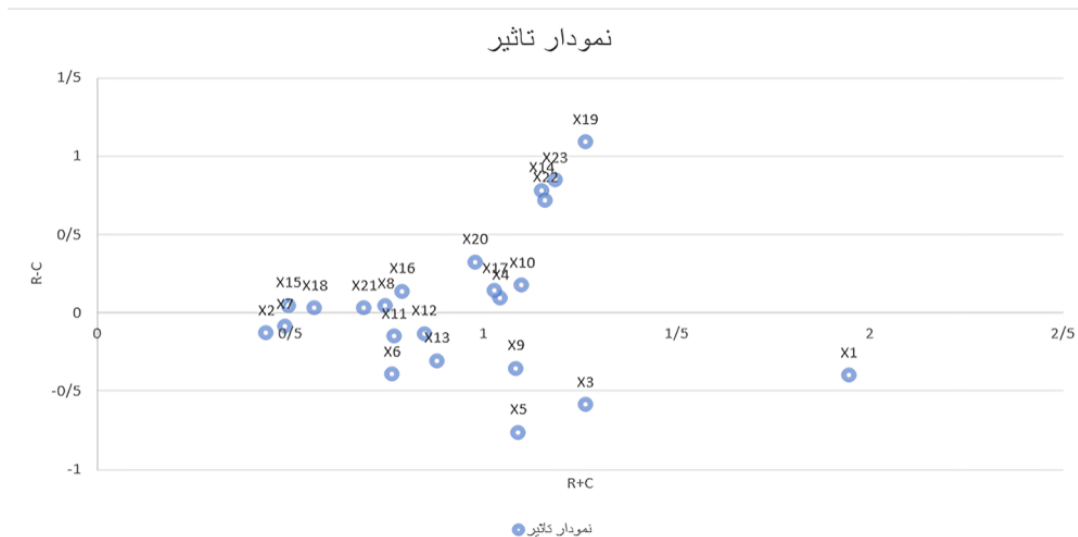
۴- پیاده سازی مدل

۴-۱- غربالگری عوامل خطر تاخیر و اثرگذاری عوامل باقیمانده بر یکدیگر
 برای غربالگری و انتخاب مهم ترین عوامل خطر تاخیر، این عوامل در قالب یک ماتریس ریسک در اختیار متخصصین قرار داده شد و با نظر نهایی آن ها لیست عوامل خطر تاخیر در جدول (۲) شناسایی و جدا سازی شد. پس از شناسایی عوامل خطر تاخیر، از ماتریس دیگری برای ارزیابی روابط بین آنها استفاده شد. در این روش، متخصصین پروژه می بایست این موضوع را که آیا یک عامل خطر تاخیر، بر عامل خطر تاخیر دیگر تأثیر می گذارد یا خیر قضاوت میکردند. سپس با استفاده از راهنمایی که در اختیار متخصصین قرار گرفت، میزان روابط عوامل خطر تعیین شد. اطلاعات حاصل از ماتریس مقایسه زوجی برای انجام مراحل بعدی ارزیابی ریسک تاخیر لازم است.

۴-۲- انجام روش ارزیابی آزمایشی تصمیم گیری (DEMATEL)

برای استفاده از روش دیمتل، ماتریس مقایسه زوجی بدست آمده به کار گرفته شد. سپس با استفاده از کدنویسی، تابع ماتریس روابط مستقیم (R)، بر اساس ماتریس مقایسه زوجی ایجاد گردید. در نهایت، از ماتریس روابط کل (T) برای شناسایی عوامل اصلی و عوامل فرعی استفاده شد. این ماتریس نشان دهنده میزان تأثیر یک عامل بر کل سیستم است.

در این مرحله فرم نرمال شده ماتریس تأثیر مستقیم، درجات اثربخشی، تأثیرپذیری، مرکزیت و علیت بوسیله اکتاو محاسبه شد که خروجی آن در شکل (۳) ارائه شده است که در آن مرکزیت اهمیت و تسلط یک عامل و علیت میزان اثر به بقیه عوامل را نشان می دهد.



شکل ۳. نمودار تاثیر پذیری و تاثیرگذاری بدست آمده از اجرای روش آزمایش و ارزیابی تصمیم گیری

Fig. 3. Influence/dependence diagram obtained from Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) analysis

جدول ۳. سطح بندی عوامل تاخیر پروژه موردی به دست آمده از روش مدل سازی ساختاری تفسیری (ISM)

Table 3. Hierarchical classification of delay factors in the case study obtained from Interpretive Structural Modeling (ISM)

سطح	۱	۲	۳	۴
گره	X۶، X۵، X۲، X۱۵، X۱۱، X۹، X۸	X۱۷، X۱۳، X۱۲، X۱۰، X۲۰،	X۱۶، X۷، X۴، X۳، X۲۱، X۱۸،	X۲۳، X۱۹، X۱۴، X۱، X۲۲،

R+C (بردار برتری) که بردار افقی بوده و میزان تاثیر عامل مورد نظر در سیستم است.

R-C (بردار ارتباط) که بردار عمودی، و مقدار نهایی تاثیرگذاری عامل بر مجموعه عناصر دیگر سیستم را نشان می دهد.

۳-۴ اجرای روش مدل سازی ساختاری تفسیری (ISM) در برنامه اکتاو (Octave) و سطح بندی عوامل تاخیر

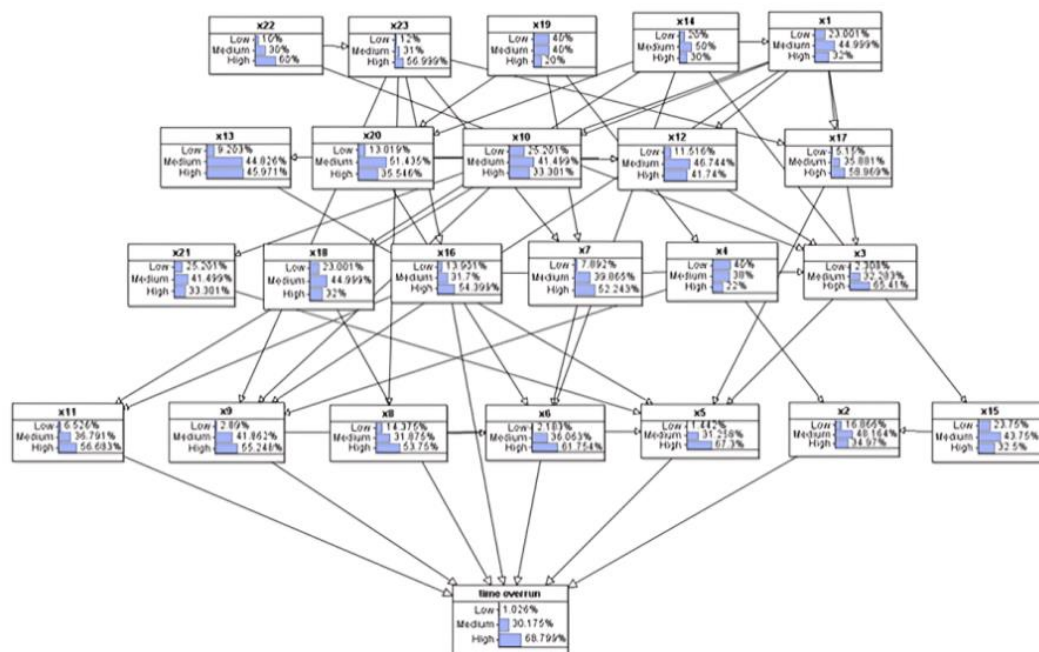
در مرحله بعد با استفاده از ماتریس بدست آمده از مرحله قبل، ماتریس دسترسی با استفاده از روش مدل سازی ساختاری تفسیری (ISM) ایجاد شد. باتوجه به اصل توضیح داده شده، مقدار $\lambda = 0.585$ به عنوان بهترین مقدار انتخاب شد. در نهایت، در جدول (۳) نتایج سطح بندی نهایی عوامل

خطر به عنوان خروجی روش مدل سازی ساختاری تفسیری (ISM) ارائه شده است.

با توجه به اجراهای مجدد، نهایتاً نرم افزار، این عوامل را در چهار سطح دسته بندی نمود که در آن عوامل به ترتیب بالاتر بودن سطحشان از اهمیت بیشتری برخوردارند. همچنین روابط بدست آمده در مرحله قبل نیز تایید شد.

۴-۴ شبکه بیزین و رسم نمودار

در مرحله آخر، ساختار کلی شبکه بیزین (BBN) با در نظر گرفتن خروجی های مراحل قبلی، یعنی سطح بندی عوامل خطر و ماتریس دستیابی ایجاد شد. این ساختار با توجه به جزئیات توضیح داده شده در بخش

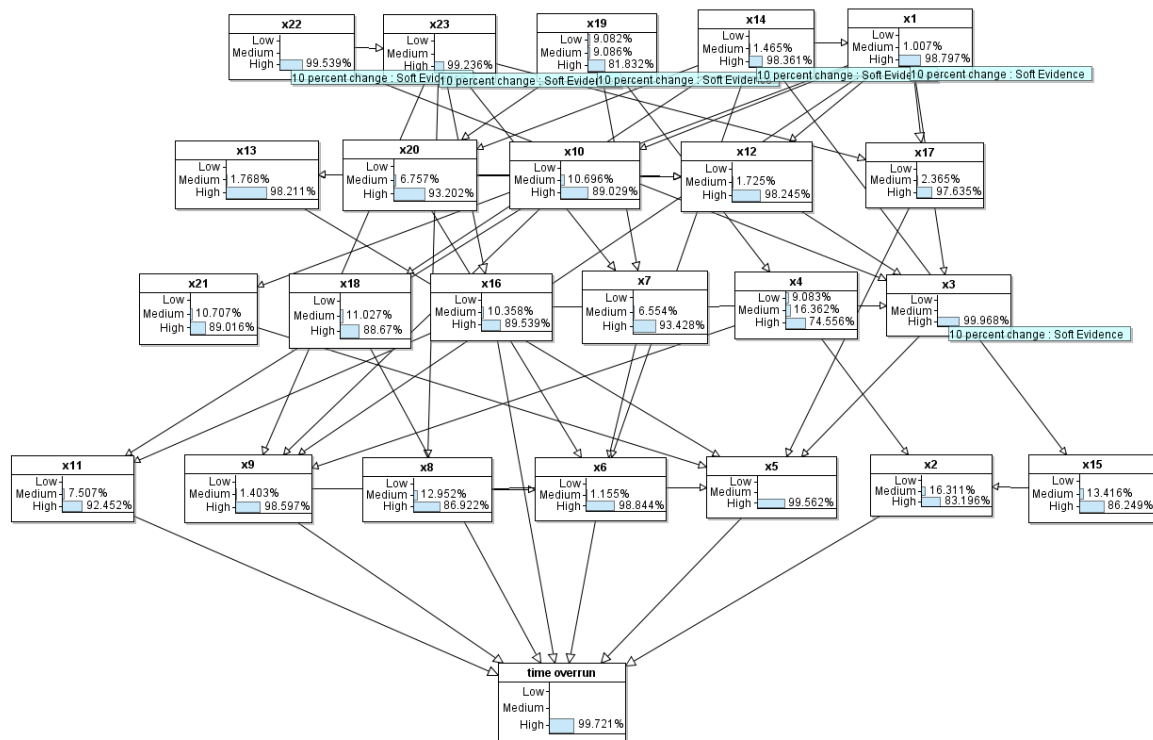


شکل ۴. مدل شبکه بیزین نهایی برای ارزیابی ریسک تاخیر در پروژه های مسکن انبوه سازی

Fig. 4. Final Bayesian network model for delay risk assessment in mass housing projects

شده عوامل مرتبط با پیمانکار را که از منابع مهم تاخیر است، با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۴۰ درصد نشان می‌دهد. عوامل مربوط به مشاور نیز باتوجه به نقش مهم آن، با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۴۰ درصد نشان داده شده‌اند. جهت تفسیر نتایج بدست آمده در این پژوهش، ذکر این نکته لازم است که در مطالعه فانی آنتونیو، محتمل‌ترین و شدیدترین عوامل «شرایط آب و هوایی»، «شبکه‌های تاسیساتی» و «تحويل دیر هنگام زمین» اعلام شده است، در حالی که در مطالعه انجام شده، مسائل اقتصادی، پرداختی‌های مالک، تورم و ... به عنوان عوامل مهم خطر تاخیر معرفی شدند. لازم به ذکر است که عاملی مانند شرایط آب و هوایی به نسبت شرایط جغرافیایی منطقه اهمیت پیدا می‌کند. موضوعی دیگری که نیز مطرح هست، مطالعه مذکور در پروژه‌های راه‌سازی انجام شده است در حالی که تمرکز پژوهش حاضر بر پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن بود. پژوهش دیگری که می‌توان با نتایج پژوهش حاضر، مطالعه اوگونلانا و همکاران است که عواملی مانند کمبود منابع، مشکلات ناشی از مشاوران، مشکلات کمبود منابع پیمانکاران را مطرح کرد که تا حدودی با پژوهش حاضر هم سو و هم نظر بوده است اما در میزان احتمال، به ترتیب ۱۰، ۱۴ و ۲۰ درصد اختلاف داشتند. در پژوهشی دیگر، محمد سودانگی و علا سلمان رابطه بین عوامل تاخیر مرتبط مشاور را بر توسعه مسکن پایدار در عربستان سعودی

روش‌شناسی براساس نظرات کارشناسان مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای اجرای مدل، باید احتمالات اولیه گره‌های بدون والد و همچنین جداول احتمال شرطی گره‌های با والدین را به عنوان ورودی مدل اضافه کرد و حالت‌های هر گره را تعریف نمود. در این مطالعه برای سازگاری بیشتر با واقعیت، هر گره در سه حالت کم، متوسط و زیاد تعریف شد. پس از وارد کردن داده‌های مورد نیاز، مدل اجرا شد و خروجی تاخیرهای تمام شده همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است مشخص شد. این شکل، احتمال وقوع هر یک از عوامل خطر در حالت‌های مختلف و در نهایت احتمال تاخیر در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، احتمال شدت بالای تاخیر در پروژه‌های عمرانی یعنی احتمال اینکه با شدت زیاد اتفاق بیفتد، ۶۸ درصد و با شدت متوسط (medium) نیز این احتمال ۳۰ درصد خواهد بود. در مورد منابع و عوامل ریسک تاخیر، نتایج مدل نشان داد که عوامل مرتبط با مسائل مالی و اقتصادی با احتمال شدت بالای وقوع ۶۰ درصد رخ خواهند داد. همچنین تاخیر در پرداخت‌های انجام شده توسط مالک هم با احتمال وقوع ۶۵ درصد، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. تجربه ناکافی مشاور، انتخاب پیمانکاران نامناسب و در دست داشتن چند پروژه همزمان و سوء مدیریت، سه عامل دیگر والد هستند که با احتمال شدت متوسط وقوع بیش از ۵۰ درصد اتفاق می‌افتند. از طرفی مدل ارائه



شکل ۵. قراردادن احتمال زیاد وقوع گره های والد و پرداختی مالک

Fig. 5. Applying high probability values to parent nodes and owner's payment node

۳X) «تاخیر در پرداخت های انجام شده توسط مالک» این موضوع در شکل ۷ بررسی شد. مدل اجرا شده نشان دهنده تغییرات کمتر نسبت به مرحله ی قبلی می باشد و عامل ۳X) در حالت زیاد (high) خود، احتمال وقوع ۹۱ درصد را خواهد داشت و بقیه آن، سهم حالت متوسط (medium) خواهد بود که این موضوع را به درستی تایید می کند

اصل سوم: برای بررسی این اصل، فرضیه هایی تعریف می شود و تغییرات نسبت به آن فرضیه در عامل هدف و بقیه عوامل بررسی می گردد. به عنوان مثال در شکل ۸، در یکی از فرض های خود، احتمال شدت کمترین تاخیر، ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. سپس تغییرات عوامل موجود، برای رسیدن به احتمال ۱۰۰ درصد با کمترین شدت (Low) در فاکتور هدف، بررسی می شود.

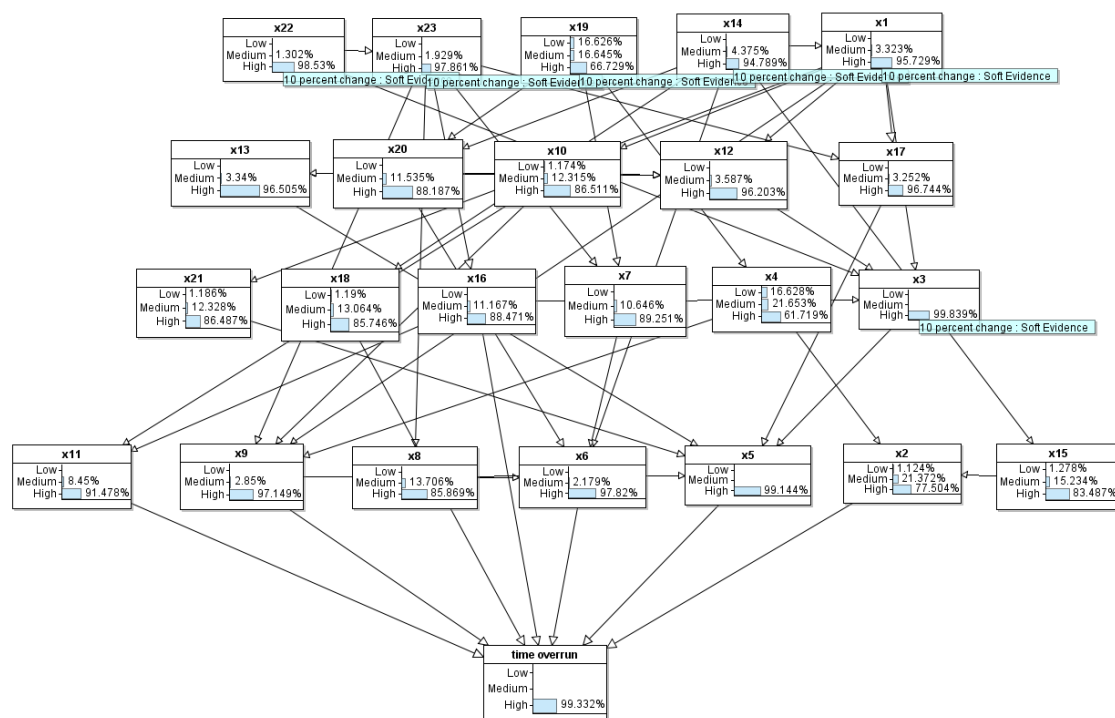
به عنوان مثال : فاکتور مهمی مانند «انتخاب پیمانکاران نامناسب» نقش مهمی در رسیدن به این هدف دارد و برای رسیدن به فاکتور هدف، می بایست در حدود ۹۲ درصد با کمترین شدت رخ دهد که نشان دهنده نقش مهم این فاکتور می باشد و روند تغییرات این عامل را نیز نسبت به عامل هدف تایید می کند.

با استفاده از تکنیک های سلسله مراتبی (AHP) و روش ارزیابی آزمایشی تصمیم گیری (DEMATEL) بررسی کردند. در میان عوامل مطرح شده، ارتباط ضعیف بین پیمانکاران و مشاور با نتایج پژوهش حاضر هم سو بود. همچنین در پژوهش دهدشت و همکاران، نسبت به پژوهش حاضر میزان تاخیر، ۱۳ در صد کمتر بدست آمده است.

۴-۵- اعتبارسنجی مدل

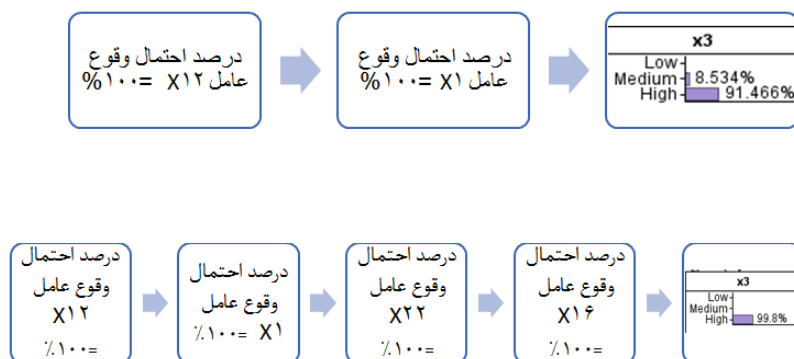
اصل اول: جهت اعتبارسنجی و تایید صحت مدل ایجاد شده، با در نظر گرفتن گره های والد و پرداختی مالک و تغییرات ده درصدی در احتمال وقوعشان، نحوه تغییرات در بقیه عوامل مورد بررسی قرار گرفت تا درستی تغییرات بررسی شود. نتایج در شکل های ۵ و ۶ نشان داد که تغییرات آن ها موجب تغییرات درست در گره های فرزند می شود و این کاهش تدریجی در بقیه ی عوامل تاخیر نیز به درستی ترتیب اثر داده شده است.

اصل دوم: برای بررسی این اصل، اثر کل تغییرات احتمال از گره های والد عامل مورد نظر (X) بر نتیجه نهایی همیشه باید بیشتر از مجموعه تغییرات احتمال در بخشی از گره های والد باشد. در این جا نیز با بررسی عامل



شکل ۶. تغییرات ده درصدی در احتمال وقوع گره های والد و پرداختی مالک

Fig. 6. 10% probability variation in parent nodes and owner's payment node

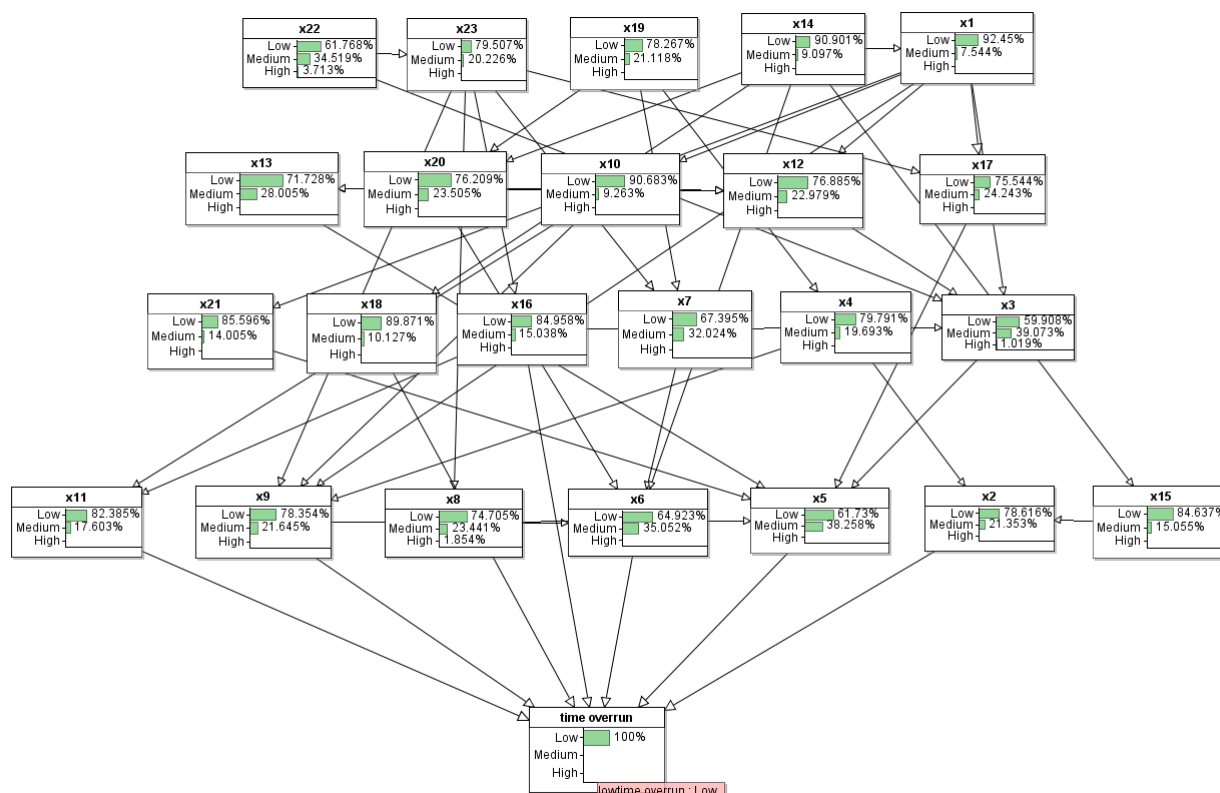


شکل ۷. خلاصه نکات اعتبار سنجی اصل سوم بر روی عامل X3

Fig. 7. Summary of validation results (Principle 3) for factor X3

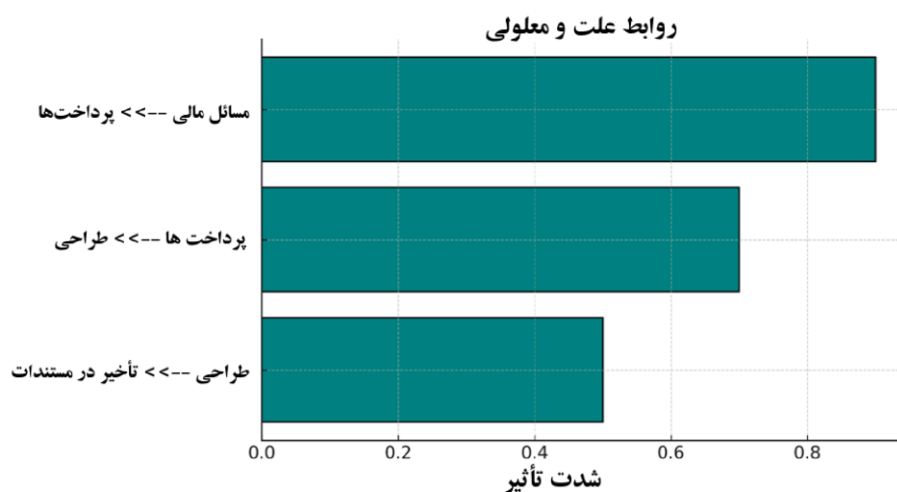
داشته باشند. این تأثیرات شامل افزایش هزینه‌های کلی پروژه و کاهش رضایت ذینفعان است. تورم و نوسانات قیمت مواد اولیه، دو نمونه از این عوامل هستند که باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در بودجه پروژه می‌شوند. تغییرات نرخ ارز نیز می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های پیش‌بینی نشده در تهیه تجهیزات و مصالح شود، که به نوبه خود اجرای پروژه را تحت تأثیر قرار

در شکل های ۹ و ۱۰ و همچنین جدول ۴، تلاش شده است تا شدت تاثیر، احتمالاً و ضرایب اثر ریسک ها نمایش داده شوند. تحلیل و تفسیر عوامل ذکر شده در این شکل ها و جدول به شرح زیر است: عوامل مالی و اقتصادی: این عوامل با احتمال وقوع ۶۰٪ به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل شناسایی شدند که می‌توانند تأثیرات جدی بر تأخیر پروژه‌ها



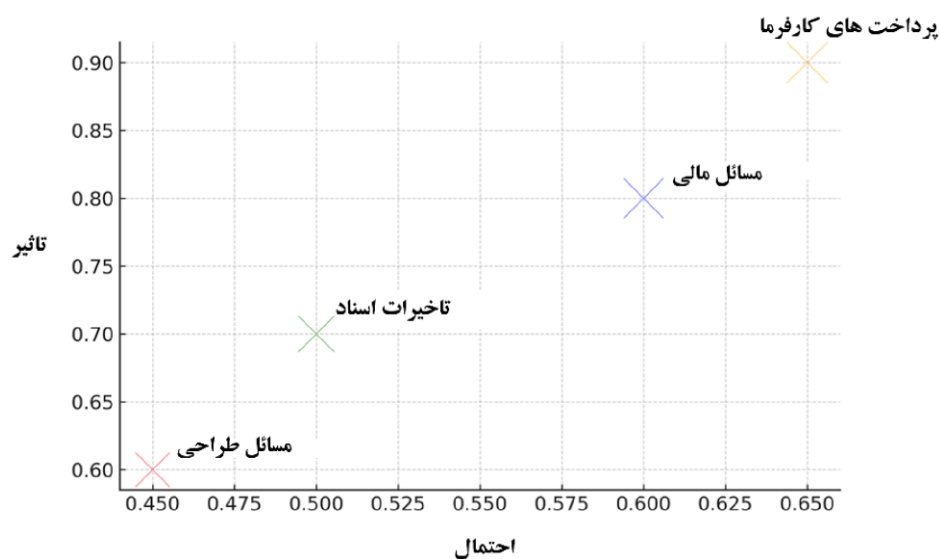
شکل ۸. اعتبارسنجی شبکه بیزین (عامل هدف: کمترین شدت)

Fig. 8. Bayesian network validation (target factor: lowest severity)



شکل ۹. روابط علت و معلولی عوامل موثر در ریسک تأخیر

Fig. 9. Cause-and-effect relationships among delay risk factors



شکل ۱۰. شدت تاثیر و احتمال رخداد ریسک های تاخیر

Fig. 10. Impact severity and occurrence probability of delay risks

جدول ۴. میزان و ضرایب احتمال، تاثیر و اثربخشی فاکتورهای ریسک تاخیر

Table 4. Probability levels and coefficients of impact and effectiveness of delay risk factors

فاکتور ریسک	احتمال	تأثیر	اثربخشی
مسائل مالی	۰/۶	۰/۸	۰/۷
پرداخت های کارفرما	۰/۶۵	۰/۹	۰/۶
تأخیرات اسناد	۰/۵	۰/۷	۰/۵
مسائل طراحی	۰/۴۵	۰/۶	۰/۴

باعث کاهش کیفیت کار گردد. از راهکارهای پیشنهادی می توان به استفاده از قراردادهای مبتنی بر عملکرد اشاره کرد که در آن پرداخت ها به تحقق مراحل کلیدی پروژه وابسته است. همچنین، ایجاد یک سیستم پاداش دهی برای پیمانکارانی که پروژه را به موقع و با کیفیت تکمیل می کنند، می تواند انگیزه آن ها را افزایش دهد. استفاده از مکانیزم های جبران نظیر پیش پرداخت ها یا تأمین مالی مرحله ای نیز می تواند ریسک تأخیرهای مالی را کاهش دهد. به عنوان مثال، در پروژه های موفق ساختمانی، قراردادهای تنظیم شده بر اساس تسویه منظم و شفاف باعث افزایش اعتماد و کاهش تأخیر شده اند.

مشکلات طراحی و بررسی اسناد: عدم هماهنگی میان مشاوران و پیمانکاران باعث تأخیر در بررسی و تأیید اسناد طراحی می شود. این عامل نیز

می دهد. این شرایط ممکن است منجر به بازنگری در اولویت بندی فعالیت ها یا حتی توقف موقت پروژه شود. به عنوان مثال، در مطالعات انجام شده توسط خاندادی و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر شدید نوسانات اقتصادی بر زمان بندی پروژه ها تأیید شده است. علاوه بر این، پیشنهاد می شود که مکانیزم های مالی مناسب مانند قراردادهای پوششی و صندوق های اضطراری برای مدیریت این ریسک ها در پروژه ها در نظر گرفته شود.

تأخیر در پرداخت های مالک: تأخیر در پرداخت ها به عنوان عاملی کلیدی با احتمال وقوع ۶۵٪ شناسایی شد. این موضوع می تواند باعث ایجاد اختلال در زنجیره تأمین و کاهش بهره وری پیمانکاران شود. برای مثال، تأخیر در پرداخت ها ممکن است به کاهش انگیزه پیمانکاران منجر شود و در نهایت

با احتمال ۵۰٪ تأثیرگذاری مستقیم بر زمان‌بندی پروژه دارد. عدم هماهنگی ممکن است منجر به ارائه اسناد ناقص یا اشتباهاتی در طراحی شود که نیاز به بازبینی مکرر دارند و در نتیجه باعث افزایش هزینه‌های پروژه می‌گردد. برای مثال، تغییرات غیرمنتظره در اسناد طراحی می‌تواند به تهیه مجدد مصالح یا تغییر در برنامه‌های اجرایی منجر شود که این امر زمان و هزینه‌های اضافی را تحمیل می‌کند. برای کاهش این تأخیرها، پیشنهاد می‌شود جلسات منظم بازبینی بین مشاوران و پیمانکاران برگزار شود و یک سیستم مدیریت مدارک الکترونیکی برای اطمینان از دسترسی سریع و صحیح به اطلاعات به‌کار گرفته شود. همچنین، تخصیص منابع برای کنترل کیفیت و نظارت بیشتر بر روند طراحی و تأیید اسناد می‌تواند به کاهش این مشکلات کمک کند.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

- این تحقیق با هدف شناسایی و ارزیابی عوامل کلیدی تأثیرگذار بر تأخیر در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن انجام شد. در این راستا، از ترکیب سه روش ارزیابی آزمایشی تصمیم‌گیری (DEMATEL)، مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)، و شبکه بیزین (BBN) برای تحلیل روابط پیچیده میان عوامل استفاده شد. این رویکرد نه تنها امکان شناسایی دقیق‌تر تأثیرات متقابل و ساختار سلسله‌مراتبی عوامل را فراهم کرد، بلکه با بهره‌گیری از شبکه بیزین، پیش‌بینی احتمال وقوع تأخیر و تحلیل حساسیت عوامل مختلف ممکن شد.
- نتایج نشان داد که احتمال شدت بالای تأخیر در پروژه‌های عمرانی ۶۸ درصد است، در حالی که احتمال وقوع تأخیر با شدت متوسط به ۳۰ درصد می‌رسد. از میان عوامل بررسی‌شده، مسائل مالی و اقتصادی با احتمال وقوع ۶۰ درصد، به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین عوامل شناسایی شد. این مسائل شامل مواردی مانند تورم، نوسانات قیمت مصالح، و تغییرات غیرمنتظره در بودجه پروژه هستند که مستقیماً بر روند اجرای پروژه اثرگذارند. پیامدهای این عوامل شامل افزایش هزینه‌های پروژه، کاهش بهره‌وری تیم‌های اجرایی، و تغییر اولویت‌های زمانی در برنامه‌ریزی پروژه است.
- همچنین، تأخیر در پرداخت‌های مالک با احتمال وقوع ۶۵ درصد، یکی از موانع کلیدی شناسایی شد که می‌تواند زنجیره تأمین را مختل کند و باعث کاهش انگیزه پیمانکاران شود. این موضوع اغلب به کاهش کیفیت اجرا، تأخیر در تحویل پروژه، و افزایش هزینه‌های غیرضروری منجر می‌شود. استفاده از سیستم‌های مالی شفاف و مکانیزم‌های جبران مانند

- پیش‌پرداخت‌ها می‌تواند به کاهش اثرات این عامل کمک کند.
- از دیگر یافته‌های مهم می‌توان به تأثیر منفی انتخاب پیمانکاران نامناسب، تجربه ناکافی مشاور، و سوءمدیریت در مدیریت پروژه‌ها اشاره کرد که هر یک با احتمال وقوع بیش از ۴۰ درصد، سهم قابل‌توجهی در تأخیر پروژه‌ها دارند. علاوه بر این، عواملی مانند مشکلات طراحی و بررسی اسناد و عدم هماهنگی میان مشاوران و پیمانکاران، با ایجاد تغییرات مکرر و بازنگری‌های مداوم، هزینه‌ها و زمان پروژه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند.
- نکته مهم دیگر، قابلیت روش ترکیبی ارائه‌شده در این تحقیق است. استفاده از مدل‌های چندبعدی و شبکه بیزین، نه تنها تحلیل کیفی عوامل تأثیرگذار را بهبود بخشیده است، بلکه امکان کمی‌سازی این اثرات و تحلیل احتمالات وقوع را نیز فراهم آورده است. این روش می‌تواند به عنوان الگویی جامع برای مدیریت ریسک و بهینه‌سازی پروژه‌ها در سایر حوزه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گیرد.
- این مطالعه تأکید می‌کند که درک درست از روابط علی و معلولی میان عوامل کلیدی می‌تواند به مدیران پروژه در اولویت‌بندی منابع و اتخاذ تصمیمات استراتژیک برای کاهش تأخیرها کمک شایانی کند. برای مثال، شناسایی زود هنگام عوامل مرتبط با مسائل مالی و طراحی می‌تواند به جلوگیری از مشکلات زنجیره‌ای و مدیریت بهتر بودجه و زمان‌بندی پروژه کمک کند.

۶- محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- محدودیت‌ها: این تحقیق بر یک مطالعه موردی در شهر پرند متمرکز بود که ممکن است نتایج آن به تمام پروژه‌های مشابه قابل‌تعمیم نباشد. همچنین، برای تکمیل جداول احتمال شرطی در شبکه بیزین (CPT)، داده‌های بیشتری مورد نیاز است که به جمع‌آوری دقیق‌تر اطلاعات نیازمند است.
- پیشنهادهای تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی اثرات روش‌های مدیریتی مختلف بر کاهش تأخیر در پروژه‌های انبوه‌سازی بپردازند. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و کاهش تأخیرها پیشنهاد می‌شود. گسترش این مطالعه به پروژه‌های با ابعاد بزرگ‌تر و پیچیدگی بیشتر نیز می‌تواند به نتایج جامع‌تر و عملی‌تری منجر شود.
- این پژوهش با ارائه مدلی ترکیبی و دقیق برای تحلیل عوامل تأثیرگذار،

Surabaya, Procedia Engineering 125 (2015) 53–59.

- [11] A. Adeleke, A.Y. Bahaudin, A.M. Kamaruddeen, Organizational internal factors and construction risk management among Nigerian construction companies, *Global Business Review* 19 (4) (2018) 921–938.
- [12] M. Eybpoosh, I. Dikmen, M. Talat Birgonul, Identification of risk paths in international construction projects using structural equation modeling, *Journal of Construction Engineering and Management* 137 (12) (2011) 1164–1175.
- [13] F. Afzal, et al., Integrated priority decision index for risk assessment in chaos: cost overruns in transport projects, *Engineering, Construction and Architectural Management* 27 (4) (2020) 825–849.
- [14] J. Wang, H. Yuan, System dynamics approach for investigating the risk effects on schedule delay in infrastructure projects, *Journal of Management in Engineering* 33 (1) (2017) 04016029.
- [15] M. Khanzadi, E. Eshtehardian, M. Mokhlespour Esfahani, Cash flow forecasting with risk consideration using Bayesian Belief Networks (BBNS), *Journal of Civil Engineering and Management* 23 (8) (2017) 1045–1059.
- [16] G.K. Balta, I. Dikmen, M. Birgonul, Bayesian network based decision support for predicting and mitigating delay risk in TBM tunnel projects, *Automation in Construction* 129 (2021) 103819.
- [17] V. Khodakarami, A. Abdi, Project cost risk analysis: A Bayesian networks approach for modeling dependencies between cost items, *International Journal of Project Management* 32 (7) (2014) 1233–1245.
- [18] M.H. Madihi, A.A. Shirzadi Javid, F. Nasirzadeh, Enhancing risk assessment: an improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks, *Engineering, Construction and Architectural Management* (2023), <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2023-0774>.
- [19] H. Shakeri, M. Khalilzadeh, Analysis of factors affecting project communications with a hybrid DEMATEL-ISM approach (A case study in Iran), *Heliyon* 6 (8) (2020).

گامی مهم در مدیریت بهتر ریسک و زمان‌بندی پروژه‌ها برداشته است. امید است که یافته‌های این تحقیق در کاهش تأخیرها و افزایش کارایی پروژه‌های عمرانی مفید واقع شود.

منابع

- [1] R.C. de Azevedo, L. Ensslin, A.E. Jungles, A review of risk management in construction: opportunities for improvement, *Modern Economy* 5 (04) (2014) 367.
- [2] Project Management Institute, Construction Extension to the PMBOK' Guide, Project Management Institute, 2016.
- [3] F. Antoniou, Delay risk assessment models for road projects, *Systems* 9 (3) (2021) 70.
- [4] A.H. Alavifar, S. Motamedi, Identification, evaluation and classification of time delay risks of construction project in Iran, in: *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2014.
- [5] G. Young, Y. Chen, M. Yang, Concentrations, distribution, and risk assessment of heavy metals in the iron tailings of Yeshan National Mine Park in Nanjing, China, *Chemosphere* 271 (2021) 129546.
- [6] G. Dehdasht, et al., DEMATEL-ANP risk assessment in oil and gas construction projects, *Sustainability* 9 (8) (2017) 1420.
- [7] P. Boateng, Z. Chen, S.O. Ogunlana, An Analytical Network Process model for risks prioritisation in megaprojects, *International Journal of Project Management* 33 (8) (2015) 1795–1811.
- [8] C.-N. Huang, J.J. Liou, Y.-C. Chuang, A method for exploring the interdependencies and importance of critical infrastructures, *Knowledge-Based Systems* 55 (2014) 66–74.
- [9] A. Valipour, et al., A fuzzy analytic network process method for risk prioritization in freeway PPP projects: an Iranian case study, *Journal of Civil Engineering and Management* 21 (7) (2015) 933–947.
- [10] H.P. Chandra, Structural equation model for investigating risk factors affecting project success in

- [22] M. Yazdi, et al., Improved DEMATEL methodology for effective safety management decision-making, *Safety Science* 127 (2020) 104705.
- [23] N.E. Fenton, M. Neil, J.G. Caballero, Using ranked nodes to model qualitative judgments in Bayesian networks, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 19 (10) (2007) 1420–1432.
- [20] M. Qin, X. Wang, Y. Du, Factors affecting marine ranching risk in China and their hierarchical relationships based on DEMATEL, ISM, and BN, *Aquaculture* 549 (2022) 737802.
- [21] F. Li, et al., Analysis on accident-causing factors of urban buried gas pipeline network by combining DEMATEL, ISM and BN methods, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 61 (2019) 49–57.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. A. Shirzadi Javid, M. H. Madihi, E. Nafari, *Enhanced Bayesian Network Approach to Delay Risk Analysis in Mass Housing Construction*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(3) (2025) 529-548.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23135.8138](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23135.8138)

