Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(8) (2025) 1407-1430
DOI: 10.22060/ceej.2025.23824.8222

Development of an Innovative Automated Method for Identifying the Installation Sequence of Steel Structure Elements Using ETABS Model Information

M. Tavakolan *, Sh. Nikoukar

Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Accurate and detailed scheduling is a critical prerequisite for creating 4D models in construction projects. However, this process, heavily reliant on manual efforts, often results in a generalized and less-detailed schedule that ultimately fails to deliver the required accuracy and efficiency, potentially jeopardizing project success. This challenge becomes more pronounced with the increasing scale and complexity of projects, especially in steel structures, where the installation sequence of elements must be determined in a way that not only adheres to general installation rules but also ensures structural stability at all times. Despite the importance of this issue, the literature has paid limited and often fragmented attention to installation sequencing, leaving the process predominantly manual. To address this gap, this paper introduces an innovative automated method for identifying installation prerequisites and determining the optimal installation sequence for steel structure elements. The proposed method automatically extracts the necessary data from the ETABS model and, using a set of installation rules and real-time stability analysis, identifies the prerequisites for installing each element. The results demonstrate the success of the model in determining installation prerequisites for each element and, consequently, the installation sequence for the structure. Furthermore, the findings indicate that the proposed method, particularly in large-scale projects, not only improves the accuracy and speed of installation sequencing but also serves as a robust foundation for generating automated 4D models—an aspect that has been addressed to a limited extent in the existing literature.

Review History:

Received: Jan. 09. 2025
Revised: Aug. 16, 2025
Accepted: Nov. 06, 2025
Available Online: Nov. 17, 2025

Keywords:

Automation
Installation Sequence
Steel Structures
4D Modeling
Building Information Modeling (BIM)

1- Introduction

Construction projects increasingly demand precise scheduling, particularly for large-scale steel structures where complexity and scale challenge traditional planning approaches. Existing methods heavily depend on manual input, which hampers accuracy and increases inefficiencies. Moreover, ensuring structural stability during the installation process remains a critical challenge. Although Building Information Modeling (BIM) tools have facilitated advancements, limited attention has been given to automating detailed sequencing, leaving a significant research gap. This paper contributes to the field by proposing a novel automated methodology that integrates ETABS data and predefined installation rules to generate optimal sequences while preserving structural stability.

2- Methodology

The proposed methodology introduces an automated framework to determine the optimal installation sequence of steel structure elements. This framework leverages Building Information Modeling (BIM) data extracted from ETABS files and incorporates engineering rules to ensure structural stability during installation. The methodology includes the following steps:

- **Data Extraction from ETABS Models:** Automatically extract detailed structural information, including element geometry, connectivity, and load-bearing properties, from ETABS files. This data serves as the foundation for subsequent analyses.
- **Classification of Structural Elements:** Categorize elements based on their roles and properties, such as beams, columns, and bracings, to facilitate the prioritization of their installation.
- **Identification of Rigid Frames:** Analyze the structural model to identify rigid frames using Eulerian path algorithms. This step ensures efficient sequencing by recognizing interconnected elements that can be installed sequentially.
- **Adjacency Analysis:** Examine spatial relationships between elements to determine adjacency and interdependencies, which are crucial for accurate installation sequencing.
- **Application of Installation Precedence Rules:** Define and apply precedence rules based on structural stability

*Corresponding author's email: mtavakolan@ut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

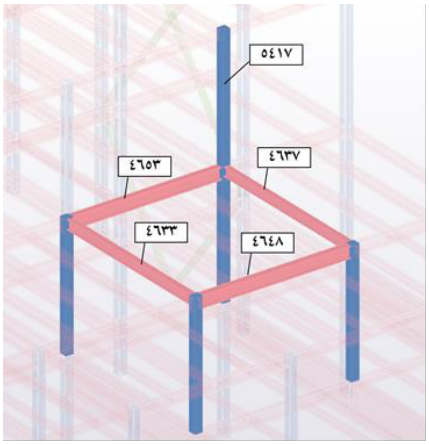


Fig. 1. Element #5417 and its Installation Prerequisites in the 3D Space.

and practical construction constraints. These rules are derived from engineering expertise and ensure that the installation sequence maintains stability at every stage.

- **Verification of Structural Stability:** Conduct moment-by-moment stability checks to guarantee that the structure remains stable during installation. This step ensures compliance with safety standards without overemphasizing the computational complexity of stability analysis.
- **Generation of Installation Sequence:** Combine the analyzed data and precedence rules to automatically generate an optimal installation sequence that aligns with structural stability requirements and practical constraints.

The methodology's automated approach reduces reliance on manual efforts, improves accuracy, and offers scalability for complex and large-scale steel structure projects.

3- Results and Discussion

The proposed methodology was implemented and tested on a 730-ton steel structure located in Tehran to evaluate its practical applicability and reliability. The automated framework effectively identified installation prerequisites and generated optimal sequencing for structural elements. The results demonstrated a significant improvement in scheduling precision and efficiency compared to traditional manual approaches. Specifically, the application of this method reduced the total project duration to 208 working days, emphasizing its potential to streamline construction timelines.

Figure 1 depicts the automated identification of installation prerequisites for various structural elements. The visual representation highlights how the methodology systematically classifies and organizes elements based on their dependencies and spatial relationships. This step ensures a clear understanding of the sequence required for stable and efficient installation.

Figure 2 presents the final installation sequence, integrating both precedence rules and stability checks. The sequencing not only adheres to engineering principles but also ensures structural stability at every stage of installation. The visualized sequence demonstrates how the method avoids potential conflicts and delays by accounting for all practical and structural constraints.

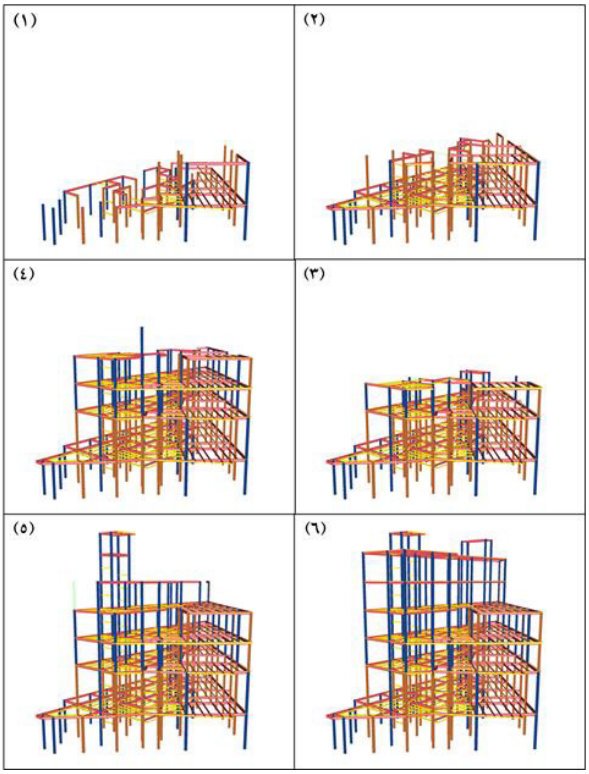


Fig. 2. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with Snapshots of the Installation Sequence in the 4D Model.

The automated approach's ability to maintain structural stability during installation is a critical advantage over traditional methods. By systematically incorporating stability analysis and sequencing rules, the methodology enhances project safety while optimizing resource allocation and scheduling accuracy. This combination of precision, safety, and efficiency underscores the value of the proposed framework, particularly for large-scale and complex steel structures.

4- Conclusion

This study introduces a robust framework for automating installation sequencing in steel structures, addressing challenges of manual processes and ensuring structural stability. The proposed method integrates ETABS data with advanced sequencing algorithms to optimize project planning and execution. Although the research demonstrates promising results, limitations include the unavailability of BIM models for some projects and the exclusion of hybrid or highly complex structures from analysis. Future work could expand the methodology to address these limitations and explore its application to diverse structural systems and larger datasets.

References

[1] S. Gaur, Understanding the importance of project planning and scheduling in Indian construction projects, Journal of Positive School Psychology, 6(3) (2022) 3535–3544-3535–3544.

[2] K. Kim, J. Park, C. Cho, Framework for automated generation of constructible steel erection sequences using structural information of static indeterminacy variation in BIM, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(11) (2020) 3169-3178.

[3] J. Park, K. Kim, Y.K. Cho, Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors, Journal of Construction Engineering and Management, 143(2) (2017) 05016019.

[4] H. Kim, K. Anderson, S. Lee, J. Hildreth, Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology, Automation in Construction, 35 (2013) 285-295.

[5] V. Faghihi, A. Nejat, K.F. Reinschmidt, J.H. Kang, Automation in construction scheduling: a review of the literature, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81 (2015) 1845-1856.

[6] Z. Wang, E. Rezazadeh Azar, BIM-based draft schedule generation in reinforced concrete-framed buildings, Construction Innovation, 19(2) (2019) 280-294.

[7] T. Dang, H.-J. Bargstädt, 4D relationships: The missing link in 4D scheduling, Journal of Construction Engineering and Management, 142(2) (2016) 04015072.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۸، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۴۰۷ تا ۱۴۳۰
DOI: 10.22060/ceej.2025.23824.8222

توسعه یک روش خودکار نوین برای شناسایی توالی نصب عناصر سازه‌های فولادی با استفاده از اطلاعات مدل ETABS

مهدی توکلان*، شایان نیکوکار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

کلمات کلیدی:
خودکار سازی
توالی نصب
سازه‌های فولادی
مدل چهاربعدی
مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

خلاصه: زمان‌بندی دقیق و با جزییات کافی، پیش‌نیاز کلیدی برای ایجاد مدل‌های چهاربعدی در پروژه‌های ساختمانی است. با این حال، این فرآیند به دلیل اتکای بالا به تلاش‌های دستی، معمولاً به یک زمان‌بندی کلی و کم‌جزئیات منجر می‌شود که در نهایت، سطح دقت و کارایی لازم را ارائه نمی‌کند و می‌تواند موفقیت پروژه را به خطر بیندازد. این چالش با افزایش مقیاس و پیچیدگی پروژه‌ها، به‌ویژه در سازه‌های فولادی، پیچیده‌تر می‌شود. در این سازه‌ها، توالی نصب عناصر باید به گونه‌ای تعیین شود که علاوه بر رعایت قواعد عمومی نصب، پایداری سازه نیز در هر لحظه حفظ شود. با این وجود، در ادبیات پژوهش، رویکردهای محدودی به صورت جامع به تعیین توالی نصب پرداخته‌اند و این فرآیند معمولا دستی باقی مانده است. این مقاله با هدف رفع این شکاف، یک روش خودکار نوین برای شناسایی پیش‌نیازهای نصب و تعیین توالی بهینه عناصر سازه‌های فولادی ارائه می‌دهد. این رویکرد که پیش‌تر در هیچ مطالعه‌ای آزموده نشده‌است، به‌طور مستقیم داده‌های مدل ETABS را استخراج کرده و با ترکیب تحلیل لحظه‌ای پایداری سازه و قوانین اجرایی نصب، پیش‌نیازهای نصب و توالی بهینه عناصر سازه‌های فولادی را تعیین می‌کند. نتایج بدست آمده نشان از موفقیت مدل در تعیین پیش‌نیازی‌های نصب هر عنصر و به‌دنبال آن توالی‌های نصب سازه دارد. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی علی‌الخصوص در پروژه‌های مقیاس بزرگ نه تنها دقت و سرعت تعیین توالی نصب را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند به عنوان پایه‌ای قدرتمند برای تولید مدل‌های چهاربعدی خودکار مورد استفاده قرار گیرد؛ امری که در ادبیات پژوهش تا کنون به صورت محدودی به آن پرداخته شده است. محدودیت‌های اصلی پژوهش حاضر شامل وابستگی به مدل ETABS و عدم ارزیابی در سازه‌های ترکیبی یا با پیچیدگی بالا است که می‌تواند در پژوهش‌های آتی برطرف شود.

۱- مقدمه

در میان تحولات سریع فناوری‌های ساخت‌وساز، اهمیت برنامه‌ریزی ماهرانه و زمان‌بندی دقیق همچنان غیرقابل‌انکار باقی مانده است[۱]. برنامه‌های زمان‌بندی دقیق و جامع نقشی کلیدی در پروژه‌های ساخت‌وساز ایفا می‌کنند و به عنوان مبنای اساسی برای پیگیری پیشرفت، گزارش وضعیت، و مدیریت اختلافات احتمالی عمل می‌کنند[۲]. یک زمان‌بندی دقیق و عملی، پایه‌گذار موفقیت پروژه ساخت‌وساز است و تأثیر چشمگیری بر زمان‌بندی کلی پروژه و مراحل مختلف آن دارد. با این حال، تهیه یک زمان‌بندی دقیق و عملیاتی برای ساخت‌وساز اغلب فرآیندی زمان‌بر و مستعد خطاست. دلیل اصلی این مسئله، ماهیت پیچیده و دشوار زمان‌بندی ساخت‌وساز است که شامل تجزیه محدوده پروژه به وظایف قابل مدیریت، طراحی توالی فعالیت‌ها، تخصیص منابع، و بهینه‌سازی برنامه می‌شود[۳]. این مسئله به‌ویژه با افزایش مقیاس پروژه‌ها برجسته‌تر می‌شود. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند فقط حدود ۵۲٪ پروژه‌ها در زمان مقرر کامل شده و مابقی با تاخیر مواجه شده‌اند[۴]. این امر لزوم خودکارسازی زمان‌بندی و کاهش خطاهای دستی را تقویت می‌کند.

استفاده از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[1] راه‌حلی برای کاهش چالش‌های ناشی از تکنیک‌های سنتی زمان‌بندی ارائه می‌دهد؛ تکنیک‌هایی که اغلب با نیازهای پیچیده پروژه‌های مدرن ساخت‌وساز دست‌وپنجه نرم می‌کنند. به عنوان یک راهکار، رویکرد مدل‌سازی چهاربعدی مطرح می‌شود که با اتصال مدل‌های سه‌بعدی به برنامه‌های زمان‌بندی پروژه، امکان شبیه‌سازی مجازی را از طریق نمایش بصری توالی فعالیت‌ها به همراه عناصر مدل مربوطه فراهم می‌کند. با گسترش فناوری‌های BIM، استفاده از مدل‌های چهاربعدی BIM به عنوان یک استراتژی پیشرفته برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mtavakolan@ut.ac.ir

1. Building Information Modeling (BIM)

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

برنامه‌ریزی ساخت‌وساز[۵]، تحلیل پروژه‌های ساخت‌وساز[۶]، و نظارت در محل[۷] به‌طور گسترده‌ای شناخته شده است. با وجود مزایای متعدد و قابلیت نمایش بصری فرآیند ساخت‌وساز، ایجاد یک مدل چهاربعدی BIM به یک کار چالش‌برانگیز و گاهی غیرعملی تبدیل می‌شود، به‌ویژه زمانی که برنامه به سطوح جزئی‌تری مانند سطح روزانه می‌رسد[۸].

با توجه به پیچیدگی‌های فزاینده در توسعه مدل‌های چهاربعدی BIM، مطالعات پیشین [۹-۱۲] بر ضرورت خودکارسازی این مدل‌ها به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها تأکید کرده‌اند. علی‌رغم پیشرفت‌های انجام‌شده در حوزه خودکارسازی، این زمینه هنوز به بلوغ کامل نرسیده و از پشتیبانی ابزارهای نرم‌افزاری رایج بی‌بهره است. به‌ویژه، تلاش‌های پیشرفته اغلب با محدودیت‌های اساسی مواجه هستند که از جمله می‌توان به استفاده از قوانین از پیش‌تعریف‌شده[۱۳]، شناسایی خودکار اجزای مرتبط با فعالیت‌ها[۱۱]، و اتکا به اطلاعات ساختاری تعریف‌شده توسط کاربر [۳] اشاره کرد.

این محدودیت‌ها با چالش‌های بنیادینی که در استفاده از مدل BIM برای فرآیند خودکارسازی وجود دارد، تشدید می‌شوند. در رابطه با اعتماد به فرآیندهای خودکارسازی مبتنی بر BIM، بسیاری از پیمانکاران به دلیل ملاحظات مالی، در استفاده از این فناوری محتاط هستند[۱۴]. موانع رایج که کاربرد BIM برای خودکارسازی را محدود کرده‌اند، شامل مسائل مربوط به مالکیت، مجوزها، نظارت دستی، و مسئولیت ورود داده‌ها به مدل هستند[۱۵]. این موضوع به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ مشکل‌ساز است، جایی که کار دستی به‌طور چشمگیری زمان‌بر و مستعد خطا می‌شود. این فاصله میان قابلیت‌های فناوری و تداوم فرآیندهای دستی، یکی از دغدغه‌های مهم در صنعت ساخت‌وساز محسوب می‌شود.

پژوهش‌های انجام شده عنوان نموده‌اند که به دلیل محدودیت‌های فعلی در خودکارسازی زمان‌بندی با جزییات بالا و همچنین عدم هماهنگی سطح جزییات مدل BIM و زمان‌بندی به دلیل سطح جزییات کمتر زمان‌بندی‌ها، استفاده از مدل چهاربعدی BIM در درجه اول به پروژه‌های کوچک با تعداد فعالیت‌های کم و با سطح جزییات کم محدود می‌شوند[۱۶]. علاوه بر این، مطالعات پیشین عمدتا بر کلیات پیش‌نیازی‌ها تمرکز داشته و به همین دلیل، زمان‌بندی را در سطح جزئیات ماکرو مد نظر قرار داده‌اند؛ رویکردی که منجر به ایجاد یک حواس‌پرتی زمان‌بر شده و از واقعیت‌های روزانه و نیازهای عملیاتی در سطح کارگاه فاصله می‌گیرد[۱۰]. همچنین، این مطالعات تمرکزی بر خودکارسازی توالی نصب در سطح جزئیات روزانه نداشته و از قوانین نصب عمومی نیز استفاده نکرده‌اند. با هدف رفع این شکاف، این پژوهش یک مدل خودکار نوین را معرفی می‌کند که با استفاده از استخراج و تحلیل اطلاعات از مدل ETABS (مدل طراحی سازه) توالی نصب عناصر سازه‌های رایج فولادی را تعیین کند. این مدل، با در اختیار داشتن اطلاعات هندسی، مکانی و طراحی و ترکیب آن با قواعد نصب سازه‌های فلزی و همچنین بررسی لحظه‌ای پایداری سازه‌ای، پیش‌نیازی‌های نصب تمام عناصر را شناسایی نموده و بدین ترتیب امکان ایجاد یک زمان‌بندی جزیی و دقیق را فراهم می‌آورد. مدل نوین معرفی شده در عین اطمینان از نبود خطای زمان‌بندی، می‌تواند به افزایش سرعت تولید زمان‌بندی با جزییات به صورت خودکار و در نتیجه کاهش محدودیت‌های استفاده از مدل‌های چهاربعدی BIM کمک قابل توجهی را انجام دهد. از طرفی ترکیب تحلیل خودکار پایداری لحظه‌ای سازه با قوانین عمومی نصب و استفاده مستقیم از داده‌های خودکار مستخرج شده، پایداری و توالی صحیح نصب قطعات را در هر لحظه از پروژه تضمین می‌کند. علاوه بر این، مدل پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مهندسان و مدیران پروژه مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز بهبود قابل‌توجه در برنامه‌ریزی پروژه‌های سازه‌های فولادی شود. در ادامه پژوهش حاضر، پیشینه پژوهشی در حوزه‌های مرتبط بررسی می‌شود. سپس، روش‌شناسی توسعه مدل توضیح داده شده و نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن تحلیل می‌گردد. در پایان، جمع‌بندی و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

برنامه‌ریزی در صنعت ساخت‌وساز به مدت چند دهه جزء اجزای جدایی‌ناپذیر تمامی پروژه‌های ساختمانی بوده است. در بیشتر پروژه‌ها، برنامه‌ریزی به عنوان سنگ‌بنای قراردادها عمل می‌کند. اگر پیمانکاران نتوانند کار را در چارچوب زمانی تعیین‌شده به پایان برسانند، پروژه‌ها با تأخیر مواجه می‌شوند و پیمانکاران متحمل جرایم مالی می‌گردند که منجر به زیان‌های اقتصادی می‌شود. بنابراین، برنامه‌ریزی پروژه همواره در ادبیات پژوهشی مورد توجه ویژه قرار گرفته است (حتی بیشتر از ملاحظات هزینه‌ای). با این حال، برنامه‌ریزی همچنان فرآیندی زمان‌بر و مستعد خطا است که معمولا به‌صورت دستی انجام می‌شود[۱۰]. با وجود پژوهش‌های گسترده‌ای که در زمینه برنامه‌ریزی انجام شده است، چالش‌های ذاتی فرآیندهای دستی، مانند زمان‌بر بودن و آسیب‌پذیری در برابر خطاها، توجه روزافزونی را به سمت خودکارسازی این فرآیند جلب کرده است[۱۷].

پیش از گسترش فناوری‌های پیشرفته مانند مدل‌سازی اطلاعات

ساختمان در حوزه برنامه‌ریزی خودکار، پژوهش‌های متعددی انجام شده بود. در سال ۲۰۰۶، کونیگ و همکارانش [۱۸] روشی را برای ایجاد برنامه‌های جایگزین پروژه با ترتیب‌های مختلف وظایف ارائه کردند. این برنامه‌ها به صورت خودکار تولید و ارزیابی می‌شوند. روش آن‌ها از یک زبان منطقی ویژگی‌محور استفاده می‌کند که به طور مؤثر محدودیت‌های از پیش تعیین‌شده پروژه را با فرآیند برنامه‌ریزی ارتباط می‌دهد. تاشر و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۰۷ روشی را برای تولید برنامه‌های انعطاف‌پذیر ارائه دادند که گزینه‌های مختلف اجرا را در یک مدل واحد ترکیب می‌کند. این روش با استفاده از منطق ویژگی و استدلال مبتنی بر مورد، امکان تولید خودکار برنامه‌ها و استفاده مجدد از راه‌حل‌های اثبات‌شده را فراهم می‌سازد که انعطاف‌پذیری پروژه و پاسخگویی سریع در محل را ارتقا می‌دهد. این نوع پژوهش‌ها همچنان ادامه دارد. اخیرا هنگ و همکارانش[۲۰] در سال ۲۰۲۳ به چالش استخراج و استفاده از دانش ضمنی برنامه‌ریزی در ساخت‌وساز پرداخته‌اند. روش برنامه‌ریزی خودکار مبتنی بر گراف آن‌ها ویژگی‌هایی را از برنامه‌های موجود استخراج می‌کند، آن‌ها را بر اساس نوع ترتیب طبقه‌بندی می‌کند و این دانش را برای گردآوری و بهینه‌سازی برنامه‌های جدید به کار می‌گیرد. این رویکرد، برخلاف روش‌های وابسته به BIM، به داده‌های حداقلی از BIM نیاز دارد و برای شروع برنامه‌های کارآمد در مراحل اولیه ساخت‌وساز مناسب است.

با وجود معرفی روش‌های نوآورانه، پژوهش‌های ارائه‌شده با محدودیت‌های عمده‌ای مواجه بوده‌اند که دقت نتایج را تحت تأثیر قرار داده یا فرآیند را بسیار زمان‌بر کرده و نیازمند ورودی دستی گسترده‌ای بوده‌اند. علاوه بر این، چنین روش‌هایی توانایی نمایش وابستگی‌های پیچیده و محدودیت‌های فضایی مرتبط با فعالیت‌های ساخت‌وساز را ندارند. همچنین، یکی دیگر از محدودیت‌ها، عدم توانایی در اعمال سریع تغییرات در ورودی‌ها است که می‌تواند انعطاف‌پذیری و پاسخگویی به تغییرات پروژه را مختل کند.

در سال ۲۰۰۳، کوو و فیشر [۲۱] به محدودیت‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر روش مسیر بحرانی در به تصویر کشیدن منطق پشت ترتیب فعالیت‌ها پرداختند. آن‌ها روشی را برای نمایش "نقش" و "وضعیت" فعالیت‌ها ارائه دادند که امکان شناسایی و ارزیابی خودکار گزینه‌های ترتیب‌بندی جایگزین را فراهم می‌کند و کارایی برنامه‌ریزی را بهبود می‌بخشد. در پژوهش در سال ۲۰۰۷، پژوهشگران [۲۲] از یک مدل ساختمانی جامد برای استخراج توالی ساخت بهره بردند. در حالی که یک مطالعه آزمایشی عملکرد این روش را نشان داد، محدودیت‌هایی نیز در اجرای فعلی آشکار شد. آن‌ها توسعه بیشتر این روش را برای گنجاندن تخصص پیمانکاران جهت افزایش دقت پیشنهاد دادند. کیم و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۳ چارچوبی نوین برای خودکارسازی برنامه‌های ساخت‌وساز با استفاده از داده‌های BIM ارائه کردند. سیستم آن‌ها جزئیاتی مانند لایه‌های مواد و روابط فضایی را استخراج می‌کند تا وظایف را ایجاد کرده و یک برنامه‌ریزی تولید کند. این رویکرد با هدف تسهیل برنامه‌ریزی در محیط BIM و احتمالا ادغام با مدل چهاربعدی BIM برای بهبود تجسم پروژه ارائه شده است.

در حالی که پژوهش‌های پیشین پیشرفت‌هایی را در برنامه‌ریزی خودکار نشان داده‌اند، نیاز به توسعه بیشتر در تحلیل روابط توپولوژیکی و سازه‌ای برجسته شده است. این تحلیل پیشرفته پتانسیل کامل مدل‌های چهاربعدی BIM را آزاد کرده و امکان برنامه‌ریزی خودکار بر اساس اطلاعات هندسی و عملکردی غنی آن‌ها را فراهم می‌کند.

در پژوهشی [۲۳] در سال ۲۰۱۲، روش برای خودکارسازی برنامه‌ریزی ساخت معرفی شد که از روابط توپولوژیکی بین اجزای BIM استفاده می‌کند. این رویکرد "استدلال فضایی مبتنی بر قاعده" به صورت خودکار توالی ساخت را بر اساس ساختار زیربنایی مدل BIM تولید می‌کند. در پژوهشی دیگر [۲۴] در سال ۲۰۱۸، یک روش دو مرحله‌ای برای خودکارسازی لینک‌دهی مدل‌های سه‌بعدی به برنامه‌ها در BIM پیشنهاد شد. در حالی که روش معرفی شده فرآیند ایجاد مدل‌های چهاربعدی را ساده‌تر می‌کند، خود فرآیند تولید برنامه همچنان دستی باقی مانده است.

رضازاده و ونگ [۲۵] در سال ۲۰۱۹ چارچوبی مبتنی بر BIM برای تولید خودکار برنامه‌های ساخت‌وساز ساختمان‌های بتنی ارائه کردند. سیستم آن‌ها داده‌ها را از مدل BIM استخراج کرده، قواعد ساخت‌وساز را اعمال می‌کند و برنامه‌های پیش‌نویس ترتیبی و همپوشانی ایجاد می‌کند. این رویکرد با هدف کاهش زمان و تلاش برنامه‌ریزی ارائه شده، اما به برنامه‌ریزی اولیه برای ساختمان‌های کمتر پیچیده محدود است و نیازمند ورودی‌های دستی زمان‌بر و ادغام مدل BIM است. فقیهی و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۴ چالش تولید توالی‌های ساخت پایدار را بررسی کردند. پژوهش آن‌ها روشی نوین ارائه می‌کند که از داده‌های BIM و الگوریتم ژنتیک برای تعیین خودکار توالی‌های نصب سازه‌ای پایدار بهره می‌برد. این رویکرد با هدف کاهش وابستگی به تجربه برنامه‌ریزی‌کننده و بهبود کارایی برنامه‌ریزی ساخت پیشنهاد شده است. پژوهشگران [۲۶] در سال ۲۰۱۹، روشی برای تولید خودکار توالی‌های ریختن بتن در دال‌ها با در نظر گرفتن تقسیم‌بندی و جهت پیشنهاد کردند. همچنین در سال ۲۰۱۷، محققان [۲۷] رویکرد نیمه‌خودکاری

برای تولید مدل‌های چهاربعدی BIM برای گزینه‌های مختلف بازنشستگی سکوهای نفت و گاز فراساحلی ارائه کردند.

در سال‌های اخیر، رویکردهای نوینی برای خودکارسازی فرآیند زمان‌بندی و توسعه مدل‌های چهاربعدی پروژه‌های ساختمانی مطرح شده‌اند. به عنوان مثال، فاضلی و همکارانش [۲۸] روشی برای تولید خودکار مدل‌های چهاربعدی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه کرده است. در پژوهشی دیگر [۲۹] ترکیب مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و یادگیری ماشین به‌عنوان الگویی برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی معرفی شد. همچنین از الگوریتم ژنتیک چندمعیاره در کنار مدل‌سازی چهاربعدی برای زمان‌بندی پروژه‌های پیش‌ساخته در پژوهشی دیگر [۳۰] بهره برده شده است. این مطالعات، قابلیت‌های جدیدی برای کاهش زمان و افزایش دقت زمان‌بندی ایجاد کرده‌اند. با وجود این که پژوهش‌های انجام‌شده نتایج قابل قبولی به‌دست آورده‌اند، اما عمدتا به تعیین توالی در سطح کلیات پرداخته‌اند. کیم و همکارانش [۳] در سال ۲۰۲۰ به محدودیت‌های تولید خودکار مدل چهاربعدی برای سازه‌های فولادی پرداختند. روش آن‌ها از داده‌های BIM استفاده کرده و با تحلیل تغییرات در عدم تعین استاتیکی، توالی‌های ساخت‌وساز سازه‌ای پایدار ایجاد می‌کند. اگرچه پژوهش آن‌ها رویکردی نوین ارائه می‌دهد، پیاده‌سازی آن به شدت به در دسترس بودن مدل BIM شامل اطلاعات سازه‌ای وابسته است. این وابستگی چالش اساسی در کاربرد عملی این پژوهش در پروژه‌های واقعی ایجاد می‌کند. افزون بر این، این روش تنها در یک پروژه کوچک آزمایش شده و فاقد مقیاس‌پذیری برای پروژه‌های بزرگ‌تر است. همچنین، تکیه صرف بر قانون عدم تعین استاتیکی به عنوان عامل تعیین‌کننده در این پژوهش، قوانین گسترده‌تر نصب در سازه‌های فولادی را نادیده می‌گیرد و ممکن است برای تعیین توالی نصب واقعی کافی نباشد.

۳- شکاف پژوهش و هدف تحقیق

با استفاده از فناوری BIM در صنعت معماری، مهندسی، و ساخت‌وساز، فرصت‌های جدیدی برای بهبود فرآیندهای زمان‌بندی فراهم شده است. بهره‌گیری از اطلاعات غنی ارائه‌شده توسط مدل‌های BIM و ادغام آن‌ها با روش‌شناسی‌های پیشنهادی در مطالعات حوزه زمان‌بندی، می‌تواند به پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه خودکارسازی مدل‌های چهاربعدی منجر شود [۳۱]. ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد که علی‌رغم پذیرش محدود این مدل‌ها، مدل‌های چهاربعدی دارای مزایای بالقوه قابل‌توجهی هستند[۳۲]. اجرای موفق مدل‌های چهاربعدی به طور مستقیم نیازمند مشارکت پیمانکاران، تأمین‌کنندگان، و تولیدکنندگان است. با این حال، به دلیل عدم تحقق این مشارکت در بسیاری از پروژه‌ها، پتانسیل کامل استفاده از مدل‌های چهاربعدی به فعلیت نمی‌رسد[۳۳]. یکی دیگر از محدودیت‌های برجسته‌شده در پژوهش‌های پیشین، عدم پشتیبانی کافی (یا پشتیبانی محدود) نرم‌افزارهای موجود برای توسعه برنامه‌های زمان‌بندی چهاربعدی است. در نتیجه، این مشکل نیازمند تلاش‌های کاربر برای ایجاد مدل چهاربعدی از طریق لینک‌دهی زمان‌بندی به مدل‌سازی سه‌بعدی است [۳۴, ۳۵]. بنابراین، این حوزه هنوز راه طولانی برای گذار از فرآیندهای دستی یا نیمه‌خودکار زمان‌بندی و مدل‌سازی سه‌بعدی به فرآیندهای کاملا خودکار در پیش دارد.

چندین مطالعه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه زمان‌بندی ساخت‌وساز با استفاده از فناوری BIM نشان داده‌اند. با این وجود، تاکنون تعداد محدودی از مطالعات توانسته‌اند این فرآیند را به خودکار کنند. یکی از دلایل این مسئله، تعامل چالش‌برانگیز بین نرم‌افزارهای زمان‌بندی و BIM است که منجر به عدم بهره‌برداری از بسیاری از مزایای BIM شده است که در مطالعات گذشته برجسته شده‌اند[۹].

علی‌رغم تمامی پیشرفت‌های حاصل‌شده در پژوهش‌های معرفی‌شده، شکاف‌های متعددی وجود دارد که بهره‌گیری از این تحقیقات را دشوار یا غیرعملی می‌سازد. اگرچه مطالعات بسیاری در حوزه زمان‌بندی خودکار انجام‌شده، اما اکثر آن‌ها فاقد جزئیات کافی هستند. بسیاری از ناظران میدانی اذعان می‌کنند که زمان‌بندی در سطح کلان غالبا از فعالیت‌های عملیاتی روزانه جدا است و به‌عنوان یک فرآیند زمان‌بر، انحرافی از تمرکز محسوب می‌شود. به‌عنوان‌مثال، زمان‌بندی دقیق در سازه‌های فولادی منجر به تولید برنامه‌های ساخت دقیق در کارخانه‌ها می‌شود و اجرای پروژه‌ها در سایت‌هایی با فضای ذخیره‌سازی محدود را امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین، زمان‌بندی دقیق و کاملا خودکار، به‌ویژه در مراحل اولیه پروژه، هنوز به‌طور کامل محقق نشده است. ابزارهای کنونی هنوز به اندازه کافی خودکار نیستند تا بتوانند رابطه‌ای مناسب بین فعالیت‌های ساخت برقرار کنند[۳۶]. علاوه بر این، عدم هماهنگی بین مدل‌های BIM و زمان‌بندی در سطح جزئیات مشابه، تولید مدل‌های چهاربعدی یکپارچه را دشوار می‌سازد[۳۷]. این رویکرد گسسته، جریان روان اطلاعات را مختل می‌کند و مزایای بالقوه مدل‌سازی چهاربعدی را محدود می‌سازد. جدول (۱) به صورت ساختاریافته مرتبط‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته را به همراه اطلاعات فنی، هدف پژوهش، ساختار و رویکردهای آن‌ها نمایش می‌دهد. بررسی این جدول این امکان را ایجاد

جدول ۱. بررسی یکپارچه و ساختاریافته اهم پژوهش‌های انجام شده در ادبیات.

Table 1. Integrated and Structured Review of Key Studies in the Literature.

پژوهش	هدف	استخراج اطلاعات	تعیین توالی	زمان‌بندی	عدم قطعیت	مدل چهاربعدی	مطالعه موردی
کیم و همکاران (۲۰۱۳)	تولید زمان‌بندی خودکار مبتنی بر BIM	دستی	دستی	خودکار	×	×	یک ساختمان دو طبقه و یک ساختمان چهار طبقه
فقیهی و همکاران (۲۰۱۴)	تولید زمان‌بندی با استفاده از الگوریتم ژنتیک	خودکار	دستی	خودکار	×	×	یک پروژه ساختمانی واقعی کوچک
ونگ و رضازاده آذر (۲۰۱۹)	تولید خودکار زمان‌بندی اولیه ساختمان‌های بتنی مبتنی بر BIM	خودکار	دستی	خودکار	×	×	یک مطالعه موردی کوچک و محدود
کیم و همکاران (۲۰۲۰)	تعیین توالی نصب	دستی	خودکار تحلیل پایداری لحظه‌ای	×	×	×	یک مطالعه موردی کوچک
پژوهش حاضر	توسعه یک روش خودکار شناسایی توالی نصب و تولید مدل خودکار چهاربعدی	خودکار	خودکار ترکیب تحلیل خودکار پایداری لحظه‌ای با قوانین نصب	خودکار	شبیه‌سازی فرآیند ساخت	✓	یک پروژه واقعی مقیاس بزرگ

می‌کند تا به طور جامع‌تر و دقیق‌تری به تحلیل و مقایسه پژوهش‌های مختلف پرداخته شود. همچنین، این جدول به شناسایی زمینه‌های نیازمند به تحقیقات بیشتر کمک کرده و راهنمایی برای تحقیقات آینده در این حوزه فراهم می‌آورد.

بنابراین، تولید یک مدل زمان‌بندی چهاربعدی خودکار که با اطلاعات توالی نصب غنی شده باشد، می‌تواند به کاهش زمان و افزایش دقت در زمان‌بندی نسبت به پژوهش‌های پیشین کمک کند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر توسعه یک روش نوین خودکار برای تولید مدل‌های زمان‌بندی چهاربعدی است که با بهره‌گیری از اطلاعات غنی مدل‌های BIM و تحلیل دقیق توالی نصب عناصر، بتواند فرآیند زمان‌بندی را در مراحل مختلف پروژه‌های ساخت‌وساز بهبود بخشد. این روش به دنبال رفع شکاف‌های موجود در پژوهش‌های پیشین است که شامل پیچیدگی‌های ناشی از زمان‌بندی دستی یا نیمه‌خودکار، و عدم هماهنگی بین مدل‌های BIM و زمان‌بندی در سطح جزئیات مشابه است. به‌طور مشخص، این پژوهش با هدف توسعه الگوریتمی خودکار برای شناسایی توالی بهینه نصب عناصر سازه‌ای در پروژه‌های ساخت‌وساز با استفاده از اطلاعات مدل‌های BIM و با تمرکز بر سازه‌های فولادی، به دنبال ارائه روشی است که بتواند زمان‌بندی دقیق نصب المان‌ها را به‌صورت خودکار تولید کرده و از این طریق چالش‌های مطرح‌شده در ادبیات موجود را کاهش دهد.

۴- روش‌شناسی پژوهش

یکی از پرچالش‌ترین بخش‌های تولید یک زمان‌بندی خودکار، تعیین روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌ها است. با وجود اینکه پژوهش‌هایی در این حوزه انجام شده‌است، اما این پژوهش‌ها معمولا دارای فرضیات محدودکننده بسیاری بوده‌اند. از جمله مهم‌ترین فرضیات محدود کننده می‌توان به ورود دستی اطلاعات مورد نیاز برای تولید زمان‌بندی در مدل BIM اشاره نمود. همچنین، تهیه زمان‌بندی در سطح کلان عموما نمی‌تواند معیار مناسبی برای زمان‌بندی‌های در سطح روزانه سایت پروژه باشد؛ از این رو، زمان‌بندی‌های تولید شده کارایی لازم را نداشته و در سطح کارگاه قابل استفاده نیستند. در نتیجه تهیه یک زمان‌بندی با سطح جزییات بالا می‌تواند منجر به ایجاد یک مدل چهاربعدی خودکار و کاربردی شود. بنابراین برای حل مهم‌ترین ضعف پژوهش‌های پیشین در حوزه مدل‌های چهاربعدی (تعیین روابط پیش‌نیازی)، نیاز به یک آنالیز خودکار جدید برای تحلیل پیش‌نیازی در سطح یک عنصر است. این رویکرد جدید نه تنها به بهبود دقت و کارایی زمان‌بندی‌های تولید شده کمک می‌کند، بلکه امکان مدیریت بهتر و موثرتر پروژه‌های ساخت و ساز را فراهم می‌آورد. برای رسیدن به هدف پژوهش حاضر، یک مدل خودکار نوین برای تعیین توالی نصب عناصر سازه‌های فولادی رایج که منجر به ایجاد یک زمان‌بندی با سطح جزییات بالا شود، ارائه می‌گردد. برخلاف مطالعات پیشین، مانند پژوهش کیم و همکاران [۳] که نیازمند ورود دستی

اطلاعات مربوط به نوع اتصالات در مدل بوده‌اند، رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش به‌صورت خودکار داده‌های موردنیاز را از مدل ETABS استخراج کرده و همزمان قوانین عمومی نصب را نیز در فرآیند تعیین توالی نصب لحاظ می‌کند.

در این پژوهش، منظور از «سازه‌های رایج فولادی» آن دسته از سازه‌هایی است که از سیستم‌های متداول قاب‌بندی فولادی در پروژه‌های ساختمانی بهره می‌برند؛ نظیر ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری که فاقد سیستم‌های خرپایی خاص، پل‌ها، عرشه‌ها یا سازه‌هایی با روش‌های اجرایی ویژه هستند. هرچند این سازه‌ها از نظر سیستم سازه‌ای رایج محسوب می‌شوند، اما روش پیشنهادی می‌تواند با ترکیب نوع و همچنین عملکرد سازه‌ای عناصر به طور خودکار و دقیق توالی نصب را شناسایی نموده؛ زمینه‌ساز برنامه‌ریزی بهینه عملیات نصب و تأمین مصالح شود و در نهایت به تولید یک برنامه زمان‌بندی دقیق در سطح جزئیات روزانه کارگاه بینجامد. این امر علاوه بر کاهش وابستگی به برنامه‌ریزی دستی، موجب افزایش سرعت و دقت فرآیند مدیریت ساخت خواهد شد.

به طور کلی، چارچوب مدل پیشنهادی برای ارزیابی تمام عناصر مدل‌سازی شده در ETABS و شناسایی پیش‌نیازهای نصب هر عنصر معرفی می‌شود. این تحلیل بر اساس داده‌های استخراج شده از ETABS و همچنین قواعد پایداری و قوانین نصب در سازه‌های فولادی رایج انجام می‌شود. با استفاده از این مدل پیشنهادی، نه تنها تحلیل دقیقی از توالی نصب عناصر صورت می‌گیرد، بلکه پایداری کلی سازه نیز در طول مرحله نصب مورد توجه قرار می‌گیرد. چارچوب پیشنهادی در پنج مرحله در ادامه توضیح داده می‌شود.

۴- ۱- استخراج اطلاعات از فایل ETABS

به عنوان اولین مرحله در پیاده‌سازی روش‌شناسی، داده‌های اولیه از فایل ETABS جمع‌آوری می‌شود تا در یک پایگاه داده جامع برای انجام محاسبات پیش‌نیاز نصب عناصر ایجاد گردد. فرض بر این است که مدل تولید شده در ETABS، از لحاظ پایداری و مدل‌سازی به صورت صحیح و بر اساس استانداردهای طراحی انجام شده است. این داده‌ها شامل داده‌های هندسی، داده‌های مکانی، داده‌های سازه‌ای و داده‌های فیزیکی بوده که در اختیار داشتن این داده‌ها می‌تواند فرآیندهای خودکار سازی تعیین توالی نصب را بسیار تسهیل کند. بنابراین شناخت دقیق داده‌های معرفی شده ضروری بوده و نیاز به بررسی کامل نرم‌افزار ETABS می‌باشد. نرم‌افزار ETABS

جدول ۲. داده‌ها و ویژگی‌های مورد نیاز برای تولید مدل BIM و تعیین پیش نیازهای نصب.

Table 2. Data and Attributes Required for BIM Model Generation and Determination of Installation Prerequisites.

جدول	ویژگی‌ها
طبقه[1]	نام طبقه ارتفاع طبقه تراز طبقه
گره[2]	نام گره مختصات سه‌بعدی (X,Y,Z)
عنصر	نام یکتا طبقه گره شروع گره پایان لیبل[3] درجات آزادی

[1] Story
[2] Joint
[3] Label

امکان دسترسی به اطلاعات و ویژگی‌های مختلف را با استفاده از جداولی مشخص فراهم نموده است که علاوه بر امکان ذخیره‌سازی آن به فرمت‌های مختلف، امکان دستیابی به این اطلاعات از طریق کتابخانه نرم‌افزار نیز وجود دارد. با مطالعه خروجی‌های مختلف، تمام داده‌ها در ادامه به تفکیک معرفی می‌شوند. همچنین تمام داده‌ها در جداول مختلف ذخیره شده و نهایتا در یک پایگاه داده جامع تجمیع می‌شوند. جدول (۲) نام داده‌های مورد نیاز را به همراه تمامی خصوصیات آن‌ها نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است، داده‌ها شامل جداول استخراج شده از فایل ETABS مانند نام طبقات، گره‌ها و المان‌ها است.

جدول طبقات: شامل اطلاعاتی درباره سطوح ارتفاعی است که شامل نام طبقه، ارتفاع طبقه و تراز طبقه می‌باشد. در نرم افزار ETABS برای هر عنصر یک طبقه تخصیص داده می‌شود. بنابراین هیچ عنصری وجود ندارد که طبقه آن مشخص نباشد.

جدول گره‌ها: شامل اطلاعات مربوط به مختصات نقاطی است که مرتبط با یک عنصر می‌باشد. این اطلاعات شامل نام گره و مختصات

سه‌بعدی دکارتی[1] آن است. در نرم‌افزار ETABS هر گره نمایانگر محل قرارگیری ابتدا یا انتهای یک عنصر می‌باشد.

جدول عناصر: به عنوان اصلی‌ترین جدول پایگاه داده، حاوی جزئیات و ویژگی‌های گسترده‌ای است که هر کدام به تعیین پیش‌نیازهای نصب خدمت می‌کنند. اطلاعات مورد نیاز در این جدول شامل نام یکتا عنصر، طبقه مربوطه، گره شروع، گره پایان، لیبل و درجات آزادی آن عنصر است. در نرم‌افزار ETABS به صورت خودکار به هر عنصری که ترسیم شده است، یک لیبل تخصیص داده می‌شود. این لیبل یکی از سه حرف "B" (مخفف Beam)، "C" (مخفف Column) و "D" (مخفف Diagonal) می‌باشد. این لیبل تا حد مناسبی (و نه کافی) مشخص کننده نوع دقیق عنصر می‌باشد؛ چرا که المان‌ها بسته به نوع درجات آزادی و موقعیت قرارگیری در مدل ممکن است رفتار سازه‌ای متفاوتی را نشان دهد. یک مثال بارز این است که عناصر دارای لیبل "D" بسته به درجه آزادی گره ابتدا و انتهای خود می‌تواند نقش ستون قطری و یا مهاربند جانبی را ایفا کند. بنابراین برای تعیین دقیق نوع عنصر (تیر اصلی، تیر فرعی، ستون، مهاربند جانبی و ...) می‌بایست تحلیل‌های بیشتری صورت گیرد.

بر این اساس، در اختیار داشتن ویژگی درجات آزادی برای هر عنصر ضروری است تا تحلیل سازه‌ای دقیق و تعیین پیش‌نیازهای نصب به درستی انجام شود. داشتن اطلاعات درباره درجات آزادی هر عنصر نه تنها پایداری سازه‌ای را در هر زمان تضمین می‌کند، بلکه شناسایی رفتار عملکردی هر عنصر را نیز تسهیل می‌نماید. این جنبه نقش مهمی در تعیین پیش‌نیازهای نصب عناصر مدل دارد.

درجات آزادی یک سیستم مکانیکی، تعداد مختصات مستقل مورد نیاز برای تعیین موقعیت و پیکربندی کامل آن سیستم است. به عبارت دیگر، درجات آزادی نشان می‌دهد که یک سیستم چند روش مختلف برای حرکت یا تغییر شکل دارد. انواع درجات آزادی در نرم‌افزار ETABS به شرح زیر می‌باشد:

- نیروی محوری (Axial): این درجه آزادی به یک عنصر اجازه می‌دهد تا در امتداد محور طولی خود به جلو و عقب حرکت کند.
- نیروی برشی اصلی (Shear 2): این درجه آزادی فقط حرکت برشی در راستای محور اصلی (محور "۲" در نرم‌افزار) را برای یک عنصر مجاز می‌کند.
- نیروی برشی فرعی (Shear 3): این درجه آزادی فقط حرکت برشی در راستای محور فرعی (محور "۳" در نرم‌افزار) را برای یک عنصر مجاز می‌کند.
- نیروی پیچشی (Torsion): این درجه آزادی به یک عنصر اجازه می‌دهد حول محور طولی خود پیچش داشته باشد.
- نیروی خمشی اصلی (Moment 22): این درجه آزادی فقط حرکت خمشی حول محور اصلی را برای یک عنصر مجاز می‌کند.
- نیروی خمشی فرعی (Moment 33): این درجه آزادی فقط حرکت خمشی حول محور فرعی را برای یک عنصر مجاز می‌کند.

برای هر نوع درجه آزادی در نرم‌افزار ETABS چهار حالت (۱) هیچکدام، (۲) ابتدا، (۳) انتها، و (۴) هردو وجود دارد. این حالت‌ها نقش تعیین کننده در تعیین نوع اتصالات یک عنصر دارند. حالت "هیچکدام" بدین معنی است که هر دو طرف عنصر نیروی نشات گرفته از آن نوع درجه آزادی را تحمل می‌کند. به عنوان مثال در صورتی که تمام انواع درجات آزادی یک سمت عنصر بر روی حال "هیچکدام" باشند، اتصال آن سمت عنصر از نوع دو سر گیردار . حالت "ابتدا" و "انتها" بدین معناست که آن سمت از عنصر نیروی مورد نظر را تحمل نمی‌کند. به عنوان مثال، در صورتی که یک سمت عنصر نیروهای خمش حول هر دو محور و نیروی برشی را تحمل نکنند، اتصال آن سمت عنصر از نوع مفصل خواهد بود. حالت "هردو" نیز برای زمانی می‌باشد که هر دو سمت عنصر، نیروی مورد نظر را تحمل نکنند. به عنوان مثال، زمانی که نیروی‌های خمش حول هر دو محور و نیروی برشی بر روی حالت "هردو" باشد، اتصال آن عنصر از نوع دو سر مفصل می‌باشد.

۴- ۲- شناسایی نوع عنصر

اولین گام در تعیین پیش‌نیاز نصب عناصر دسته‌بندی نوع عملکردی هر عنصر سازه‌ای می‌شود. همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، در نرم‌افزار ETABS عناصر به صورت خودکار لیبل‌هایی دریافت می‌کنند. با این حال، بر اساس نوع اتصالات عناصر، این برچسب ممکن است نوع صحیح عنصر را نشان ندهد. بنابراین، نیاز به تحلیل دقیق‌تری می‌باشد تا بتوان در ادامه مسیر فرآیند تعیین و شناسایی پیش‌نیازی‌های نصب هر عنصر را تسهیل نمود. در این مرحله، ویژگی‌های سازه‌ای تمامی عناصر بررسی می‌شود تا نوع دقیق آن‌ها شناسایی گردد. در این پژوهش عناصر به سه دسته اصلی ستون، تیر، و بادبند تفکیک می‌شوند. با این حال به منظور افزایش دقت در شناسایی پیش‌نیازی‌ها، تیرها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: (۱) تیر اصلی، (۲) تیر فرعی، (۳) تیرچه، و (۴) تیر کنسول

1. Cartesian Coordinates

جدول ۳. تعاریف نوع عنصر سازه‌ای.

Table 3. Definitions of Structural Element Types.

نوع المان	معیار (یکی از معیارها
ستون	• عنصر برچسب "C" داشته باشد و اتصالات آن گیردار باشد. • عنصر برچسب "D" داشته باشد و اتصالات آن گیردار باشد.
بادبند	• هر دو سمت عنصر مفصل باشد و عنصر برچسب "D" داشته باشد.
تیر اصلی	• عنصر برچسب "B" داشته باشد و ابتدا و انتهای آن به انتهای ستون* متصل باشد.
تیر فرعی	• عنصر برچسب "B" داشته باشد، یک سمت آن به انتهای ستون و سمت دیگر به گره میانی** یک ستون متصل باشد. • عنصر برچسب "B" داشته باشد و هر دو سمت عنصر به گره میانی یک ستون متصل باشد.
تیرچه	• عنصر برچسب "B" داشته باشد و هر دو سمت عنصر به گره میانی یک عنصر تیر متصل باشد.
تیر کنسول	• عنصر برچسب "B" داشته باشد، یک سمت عنصر به یک گره (گره ابتدایی، انتهایی و یا میانی) از یک ستون متصل باشد و یک سمت دیگر به ستون متصل نباشد.

* در نرم‌افزار ETABS گره ابتدای عنصر همیشه در تراز ارتفاعی پایین‌تر نسبت به گره انتهای عنصر قرار دارد.

** ممکن است یکی از دو سمت یک عنصر به گره‌ای به جز ابتدا و انتهای یک عنصر دیگر برخورد کند که گره میانی نامیده می‌شود

جدول (۳) تعاریف و معیارهای هر نوع عنصر را نمایش می‌دهد که راهنمای مراحل بعدی فرآیند تحلیل خواهد بود. عناصر تنها لازم است یکی از معیارهای مشخص شده را داشته‌باشند تا نوع آن‌ها مشخص گردد. این دسته‌بندی دقیق و جامع، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های بعدی و برنامه‌ریزی نصب عناصر فراهم می‌کند و به شناسایی صحیح نوع عملکردی هر عنصر کمک می‌کند. معیارهای ارائه‌شده در جدول (۳) بر اساس برچسب‌گذاری خودکار نرم‌افزار ETABS استخراج شده‌اند و به منظور اطمینان از صحت و کارایی، توسط چندین متخصص با تجربه در حوزه طراحی و اجرای سازه‌های فولادی مورد بازبینی و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند؛ از این‌رو، هر گونه خطای انسانی در این بخش از فرآیند، به دلیل خودکارسازی از بین خواهد رفت.

۴- ۳- تشخیص قاب صلب[1]

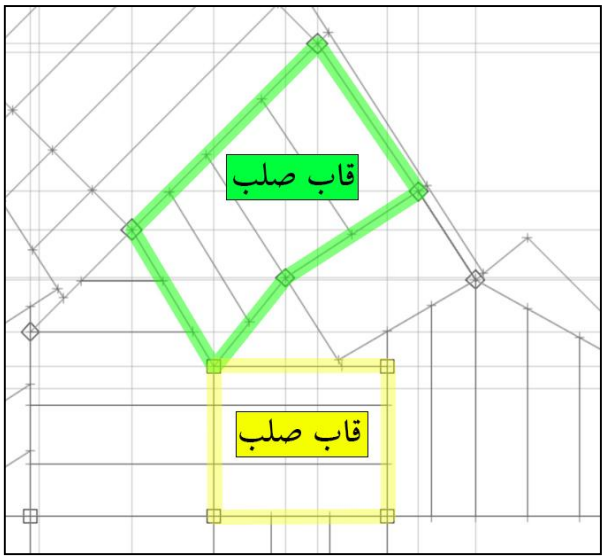
یکی از مهم‌ترین نکات پایداری در سازه‌های فلزی، قاب صلب می‌باشد. قاب صلب نوعی سیستم سازه‌ای است که از اعضای صلب مانند تیرها و ستون‌های به هم پیوسته تشکیل شده است. این اعضای صلب در محل اتصالات خود به یکدیگر لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری منتقل می‌کنند. قاب‌های صلب به دلیل مقاومت و صلبیت بالا، در طیف گسترده‌ای از سازه‌ها مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌ها به کار می‌روند.

1. Solid Frame

یکی از پیش‌فرض‌های اصلی برای اطمینان از پایداری سازه، شناسایی قاب‌های صلب در مدل می‌باشد. بر این اساس در فرآیند شناسایی پیش‌نیازهای نصب یک تابع تعریف شده که وظیفه شناسایی قاب‌های صلب را دارد. این الگوریتم که تاکنون در ادبیات حوزه ساخت و ساز برای این منظور به‌کار گرفته نشده است، به عنوان یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش محسوب می‌شود. این تابع بر اساس مفهوم مسیر اویلری در نظریه گراف پیاده‌سازی شده است. در نظریه گراف، مسیر اویلری به مسیری اطلاق می‌شود که از یک رأس شروع شده و پس از گذر از چندین رأس (هر رأس دقیقا یک بار)، به رأس اولیه بازمی‌گردد. در این پژوهش، استفاده از مسیر اویلری صرفا برای شناسایی هندسی و توپولوژیکی قاب‌های صلب به‌کار رفته و تحلیل سختی، پایداری و رفتار واقعی المان‌ها در بخش‌های بعدی روش‌شناسی انجام می‌شود.

فرآیند شناسایی شامل تولید قاب‌های صلب متعدد با کاوش بازگشتی گره‌های متصل به‌هم درون یک مدل سازه است. قاب صلب در این بخش به عنوان قابی تعریف می‌شود که در آن یک حلقه، از اولین گره (رأس) شروع شده و پس از گذر از حداقل سه عنصر تیر اصلی (یک مسیر) به آن بازمی‌گردد. گره‌هایی که این مسیر را تشکیل می‌دهند قاب‌های صلب نامیده می‌شوند. شکل (۱) چند نمونه از قاب‌های صلب را نشان می‌دهد.

مراحل شناسایی قاب‌های صلب بدین صورت می‌باشد که برای هر گره،



شکل ۱. نمونه‌ای از چند قاب صلب.

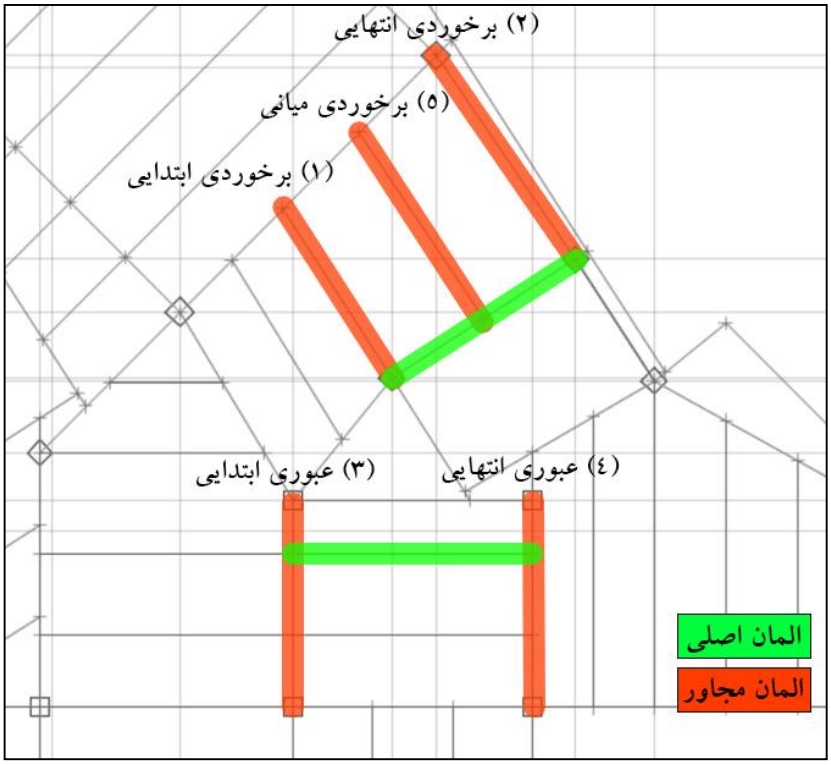
Fig. 1. Examples of Several Rigid Frames

در ابتدا لیستی برای ذخیره قاب‌های صلب مرتبط با آن ایجاد می‌شود. سپس مسیری از هر گره به گره مجاورش ترسیم می‌شود. پس از آن، برای هر گره مجاور، مسیر بعدی با استفاده از یک تابع بازگشتی بررسی می‌شود. این فرآیند ادامه می‌یابد تا زمانی که مسیر به گره اولیه بازگردد. با توجه به اینکه تعداد قاب‌های صلب می‌تواند زیاد باشد، فرآیند حداکثر پنج قاب با کمترین تعداد گره‌ها را در نظر می‌گیرد. این فرآیند بازگشتی به صورت کارآمد شبکه‌ای از قاب‌های صلب درون مدل سازه را می‌سازد. در مجموع، شناسایی قاب صلب در کنار سایر شاخص‌های پایداری سازه (مانند شاخص نامعینی استاتیکی) در گام‌های بعدی روش‌شناسی پژوهش، این امکان را می‌دهد تا به صورت جامع تمامی پیش‌نیازی‌ها تحلیل و به‌درستی انتخاب شوند. این روش نه تنها به تحلیل دقیق‌تر سازه کمک می‌کند، بلکه باعث می‌شود تا شناسایی پیش‌نیازی‌ها و برنامه‌ریزی نصب عناصر به صورت دقیق‌تر و با کیفیت بالاتری انجام شود. شکل (۲) شبه‌کد تابع شناسایی قاب‌های صلب را نشان می‌دهد.

```
// Initialize the Solid frames for the structure
function Get_Solid_Frames():
   // Initialize an empty list to store full frames
   Solid_Frames = New List(Of Solid_Frame)
   // Initialize an empty list to store connected elements
   el_connected = New List(Of Element)
   // 3 is the minimum number of  elements in a solid frame
   i = 3
   // Get connected joints with type "Main_Beam"
   cmb = Me.Connected_Joints_With_Type("Main_Beam", el_connected)
   // Loop to consider frames with different element counts
   while i < 8:
      // Initialize lists for exceptions
      exception = New List(Of Joint)
      Element_Exception = New List(Of Element)
      // Add the current joint to the exception list
      exception.Add(Me)
      // Get the next joints recursively
      Get_Next_Joints(exception, 1, i, Element_Exception, Solid_Frames)
      // Increment i by 1
      i += 1
    End while
   // Remove duplicate frames from the list
   Remove_Duplicate_Frames()
   // Sort the solid frames by the number of elements in each frame
   Solid_Frames = Solid_Frames.OrderBy(Function(frame) frame.Elements_Number).ToList()
```

شکل ۲. شبه‌کد تابع شناسایی قاب‌های صلب.

Fig. 2. Pseudocode of the Rigid Frame Identification Function.



شکل ۳. دسته‌بندی عناصر مجاور بر اساس نوع و نحوه برخورد.

Fig. 3. Classification of Adjacent Elements Based on Type and Interaction Mode.

۴- ۴- آنالیز عناصر مجاور

در ادامه فرآیند تعیین پیش‌نیازی‌های نصب برای یک عنصر، یکی دیگر از مواردی که می‌تواند این فرآیند را آسان‌تر کند، شناسایی عناصر مجاور بر اساس نوع و محل برخورد آن با عنصر اصلی می‌باشد. همان‌طور که قبلا اشاره شد، هر عنصر دارای یک گره ابتدایی و یک گره انتهایی است. علاوه بر این دو گره، ممکن است گره‌های دیگری نیز بر روی خود عنصر (نه در ابتدا و انتهای آن) تعریف شده باشند، که نشان‌دهنده این است که عنصر مورد بررسی ممکن است با یک عنصر مجاور در محلی غیر از گره‌های ابتدایی و انتهایی خود تلاقی داشته باشد (گره میانی). بر اساس این موضوع، عناصر مجاور بر اساس نوع و محل تقاطع با عنصر اصلی به پنج دسته تقسیم می‌شوند که این دسته‌بندی به صورت تصویری در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد:

۱. **عنصر برخوردی ابتدایی:** عناصری که با گره ابتدایی عنصر اصلی تلاقی دارند (یعنی گره ابتدایی یا گره انتهایی عنصر مجاور همان گره ابتدایی عنصر اصلی باشد).

۲. **عنصر برخوردی انتهایی:** عناصری که با گره انتهایی عنصر اصلی تلاقی دارند.

۳. **عنصر عبوری ابتدایی:** عناصری که گره میانی آن‌ها با گره ابتدایی عنصر اصلی تلاقی دارد.

٤. **عنصر عبوری انتهایی:** عناصری که گره میانی آن‌ها با گره انتهایی عنصر اصلی تلاقی دارد.

۵. **عنصر برخوردی میانی:** عناصری که گره ابتدایی یا انتهایی آن‌ها با گره میانی عنصر اصلی تلاقی دارد.

این دسته‌بندی کمک می‌کند تا درک بهتری از نحوه تعامل و تلاقی عناصر در ساختار کلی فرآیند صورت گیرد و بر اساس آن بتوان تحلیل دقیق‌تری از رفتار سازه ارائه نمود. به این ترتیب، تصمیم در مورد پیش‌نیاز بودن یا نبودن یک عنصر به صورت راحت‌تری صورت می‌پذیرد.

۴- ۵- به‌کارگیری قوانین پیش‌نیازی نصب

در مرحله نهایی تحلیل پیش‌نیازهای نصب، قوانین مختلفی برای شناسایی پیش‌نیازهای هر عنصر به کار گرفته می‌شوند. این قوانین بر اساس بحث‌ها و مشورت‌های انجام شده با تیم‌های فنی مجرب و کارشناسان در

زمینه اجرای سازه‌های فولادی تدوین شده‌اند. به همراه این، ملاحظات پایداری سازه نیز در نظر گرفته شده‌اند. از آنجاییکه پایداری سازه شرط لازم برای تعیین توالی نصب عناصر بوده و این مهم با استفاده از محاسبه تعیین درجه نامعینی استاتیکی سازه تحقق می‌یابد، در ابتدا در مورد روش محاسبه درجه نامعینی و اطمینان از پایداری سازه بحث شده و پس از آن قوانین عمومی و اجرایی نصب ارائه می‌گردد.

درجه‌ی نامعینی استاتیکی (ناپایداری استاتیکی[1]) یک شاخص برای سنجش پایداری سازه‌های کامل یا در حال ساخت است. این شاخص بیانگر تعداد قیود اضافی نسبت به حداقل قیود لازم برای تعادل سازه بوده و به‌طور مستقیم بر توانایی سازه در تحمل بارهای موقت طی فرآیند نصب اثرگذار است. با این حال، استفاده‌ی ساده از درجه‌ی نامعینی استاتیکی نمی‌تواند بی‌ثباتی موضعی ناشی از نصب عنصر جدید در طول ساخت‌وساز را شناسایی کند. برای شناسایی مشکل ناپایداری موضعی در حین ساخت، با الهام از پژوهش کیم و همکاران[۳] در سال ۲۰۲۰ رویکرد جدیدی به نام افزایش نامعینی استاتیکی[2] که مبتنی بر تحلیل گام به گام[3] پیشنهاد می‌شود.

پایداری سازه‌ای، عامل حیاتی ایمنی در مراحل برنامه‌ریزی و ساخت‌وساز است که به دو نوع دینامیک و استاتیک تقسیم می‌شود. پایداری دینامیک به حرکت سیستم‌ها و نوع استاتیک به پیکربندی‌های ایستا در سازه‌های مهندسی عمران مانند ساختمان‌ها و پل‌ها مربوط می‌شود. در مرحله طراحی، تحلیل‌های دقیقی برای بررسی پایداری سازه انجام می‌شود، اما این تحلیل‌ها اغلب برای شرایط سازه‌های در حال ساخت کافی نیستند. نصب مداوم المان‌ها طی ساخت‌وساز نیز به پیچیدگی تحلیل پایداری اضافه می‌کند. در نتیجه، تحلیل پایداری استاتیک به تنهایی برای همه مراحل ساخت کافی نیست. نامعینی استاتیکی (SI) سازه‌های قاب سه‌بعدی با رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$SI = 6m + r - 6j - h \qquad (۱)$$

که در این رابطه m تعداد عناصر، r تعداد عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی، j تعداد گره‌ها، و h تعداد مفصل‌های تکیه‌گاهی می‌باشد. از آنجاییکه داده‌های درجات آزادی از قبل به طور خودکار استخراج شده است، محاسبه پایداری استاتیکی در این مرحله به صورت خودکار صورت می‌گیرد؛ امری که در پژوهش‌های پیشین وجود نداشته است. با وجود اینکه رابطه (۱) نشان‌دهنده پایداری سازه می‌باشد، اما مسائل مربوط به پایداری محلی ناشی از نصب عنصر جدید را تشخیص نمی‌دهد. به عنوان مثال، نصب تیر اصلی در حالی که تنها یک سمت تیر به ستون متصل است، نشان‌دهنده عدم پایداری محلی می‌باشد. در نتیجه، تجزیه و تحلیل کامل پایداری در ساختاری که به طور مداوم در حال تغییر است، نیازمند یک رویکرد دقیق‌تری می‌باشد. به منظور پوشش مشکل ناپایداری موضعی، از رابطه (۲) استفاده می‌شود. این رابطه اطمینان حاصل می‌کند که به جز درحالتی که تیر کنسول نصب می‌گردد، در صورتی که با افزودن عنصر درجه آزادی کاهش نیابد، شرط پایداری رعایت می‌گردد.

$$\Delta SI_t = SI_t - SI_{t-1} \geq 0; \quad \text{برای تمام عناصر به جز تیر کنسول} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا t، شماره مرحله نصب عنصر می‌باشد. این رابطه بر مبنای اصول پذیرفته‌شده در استانداردهای طراحی و اجرای سازه‌های فولادی تدوین شده است و فرآیند ارزیابی آن با استفاده از رویکرد تحلیل گام‌به‌گام انجام می‌گیرد[۳]. در این رویکرد، وضعیت پایداری سازه در هر گام نصب به‌صورت تدریجی بررسی شده و بدین ترتیب اطمینان حاصل می‌شود که پیش‌نیازهای نصب در تمام مراحل اجرا رعایت شوند.

قوانین عمومی و اجرایی نصب شامل عواملی هستند که شرایط عمومی پایداری سازه را برای نصب عناصر مختلفی همچون ستون، بادبند و انواع تیرها در نظر می‌گیرند. جدول (۴) مجموعه کاملی از قوانین پیش‌نیاز برای هر نوع عنصر را نشان می‌دهد. این قوانین به طور دقیق کمک می‌کنند تا درک بهتری از مراحل لازم برای نصب ایمن و پایدار عناصر مختلف در سازه وجود داشته باشد. لازم به ذکر است تمام عناصری که یکی از شروط پیش‌نیازی نصب را داشته باشند، به عنوان پیش‌نیاز نصب عنصر مورد بررسی (عنصر مرجع) قرار می‌گیرند.

۵- نتایج پژوهش

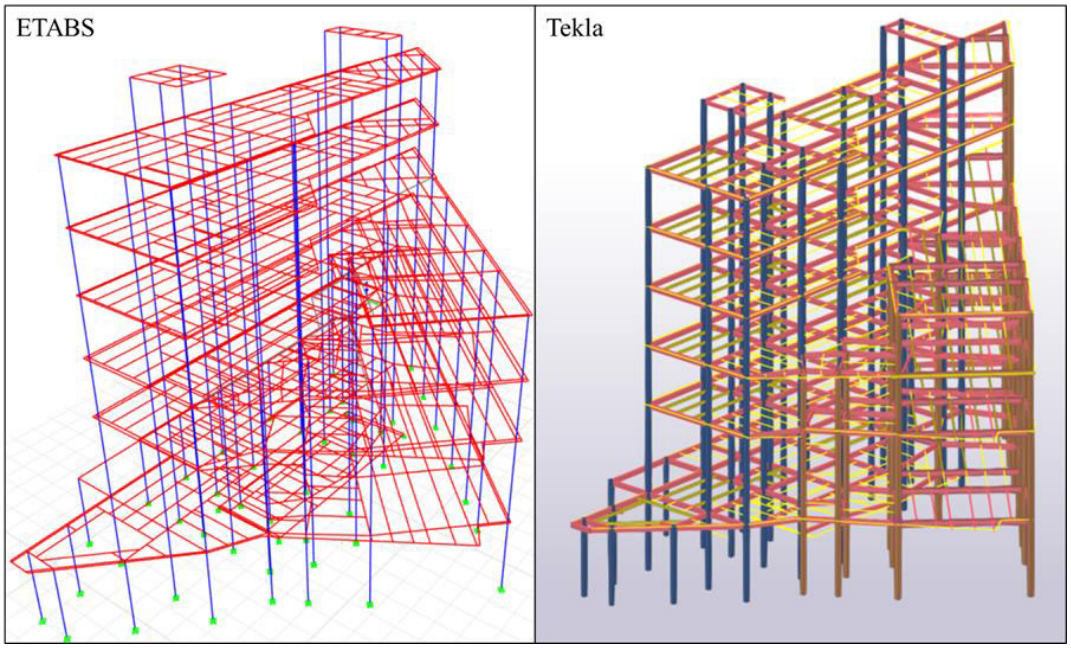
در این بخش روش معرفی شده از طریق یک مطالعه موردی واقعی بررسی شده و نتایج آن ارائه می‌شود. مطالعه موردی، یک پروژه سازه فولادی به وزن ۷۳۰ تن در شهر تهران می‌باشد. همچنین، پروژه شامل عناصر سازه‌ای از انواع مختلفی از جمله ستون‌ها، تیرهای اصلی، تیرهای فرعی، تیرچه‌ها و مهاربندی‌ها تشکیل شده است. . شکل ۴ مدل طراحی

1. Indeterminacy Static
2. Increment of Static Indeterminacy
3. Incremental Analysis

جدول ۴. قوانین پیش‌نیازی برای نصب عناصر سازه‌های رایج فولادی

Table 4. Prerequisite Rules for the Installation of Common Steel Structure Elements.

نوع عنصر مرجع	پیش‌نیازی‌های نصب
ستون	• اگر گره ابتدایی ستون مرجع به گره انتهایی یک ستون وصل شده باشد، یک قاب صلب که شامل گره ابتدایی ستون مرجع باشد، باید نصب شود. • اگر گره ابتدایی ستون مرجع به حداقل یک عنصر متصل باشد و به هیچ ستونی متصل نباشد، باید تمام عناصر متصل به عنصر مرجع به جز بادبندها نصب شوند.
بادبند	• تمام عناصر متصل (به‌جز بادبندها) به گره ابتدایی بادبند مرجع، صرف نظر از اینکه اتصال آن‌ها از طریق گره ابتدایی، انتهایی، یا میانی خود باشد، باید نصب شوند. • تمام عناصر متصل (به‌جز بادبندها و ستون‌هایی با طبقات بالاتر) به گره انتهایی بادبند مرجع، صرف نظر از اینکه اتصال آن‌ها از طریق گره ابتدایی، انتهایی، یا میانی خود باشد، باید نصب شوند.
تیر	• تمام ستون‌هایی که گره انتهایی آن‌ها به یک طرف تیر مرجع متصل است، باید نصب شوند. • تمام تیرهای اصلی یا فرعی که گره میانی آن‌ها به یک طرف تیر مرجع متصل است، باید نصب شوند. • تمام تیرهای کنسولی که یکی از گره‌های آن‌ها به یک طرف تیر مرجع متصل است، باید نصب شوند؛ به شرطی که تیر مرجع به عنوان پیش‌نیاز آن‌ها ثبت نشده باشد. • اگر یک تیر کنسول به گره میانی تیر مرجع متصل است، به شرطی که حداقل یکی از موارد زیر صادق باشد، باید نصب شود: (۱) طول تیر کنسول کمتر از تیر مرجع باشد یا (۲) تیر مرجع به عنوان پیش‌نیاز آن تیر کنسول ثبت نشده‌باشد. • در صورتی که هیچ یک از انتهای تیر مرجع به گره انتهایی ستونی متصل نباشد، تمام موارد زیر باید نصب شوند: (۱) تمام تیرهایی که گره میانی آن‌ها به تیر مرجع متصل است. (۲) تمام تیرهای کنسول که گره ابتدایی یا گره انتهایی آن‌ها به تیر مرجع متصل است.



شکل ۴. مدل سه‌بعدی پروژه در نرم افزار ETABS و Tekla.

Fig. 4. 3D Model of the Project in ETABS and Tekla Software.

BIMComponents

ID	Comp_Uniqu	Comp_Level	Comp_Type	Comp_Weigl	Comp_Prede	Comp_Prede	Comp_Prede	Comp_Prede	Comp_Prede	CGX	CGY	Click to Add
3455	4841	4	Main_Beam	1536	8855	5421	0	0	0	14998	61835	
3456	4842	4	Cantilever_Beam	1601	5420	4846	0	0	0	14882	55000	
3457	4843	3	Main_Beam	1091	5606	5527	0	0	0	12050	52900	
3458	4844	3	Main_Beam	1553	5523	5399	0	0	0	14968	61835	
3459	4845	3	Cantilever_Beam	1565	5606	4839	0	0	0	15110	50800	
3460	4846	4	Cantilever_Beam	2852	8855	0	0	0	0	12050	58302	
3461	4847	3	Main_Beam	1835	5527	5523	0	0	0	12050	58417	
3462	4848	3	Joist_Beam	2543	4839	4595	0	0	0	22500	50800	
3463	4849	3	Cantilever_Beam	1934	5527	0	0	0	0	9640	55000	
3464	4850	3	Main_Beam	633	5625	5606	0	0	0	9640	50800	
3465	5347	1	Column	3517	0	0	0	0	0	18000	36000	
3520	5414	3	Column	3517	4627	4656	4630	4651	0	18000	36000	
3521	5415	3	Column	3517	4630	4656	4627	4651	0	27000	36000	
3522	5416	3	Column	3517	4633	4648	4637	4653	0	36000	36000	
3523	5417	3	Column	3517	4637	4648	4633	4653	0	45000	36000	
3524	5418	3	Column	3517	4641	4649	4637	4654	0	52050	36000	
3525	5420	4	Column	3846	4593	4622	4596	4617	0	18000	55000	
3526	5421	4	Column	3846	4593	4617	4596	4622	0	18000	61835	
3527	5422	4	Column	3517	4595	4612	4839	4617	0	27000	55000	
3528	5423	4	Column	3517	4596	4617	4593	4622	0	27000	61835	
3529	5424	4	Column	3517	4598	4613	4595	4618	0	36011	55000	
3530	5425	4	Column	3517	4599	4618	4596	4623	0	36011	61835	
3531	5426	4	Column	3517	4601	4614	4598	4619	0	45000	55000	

شکل ۵. نمایی از جدول تکمیل شده اطلاعات مدل BIM شامل داده‌های پیش‌نیازی‌های نصب المان‌ها

Fig. 5. View of the Completed BIM Data Table Containing Installation Prerequisite Information of Elements.

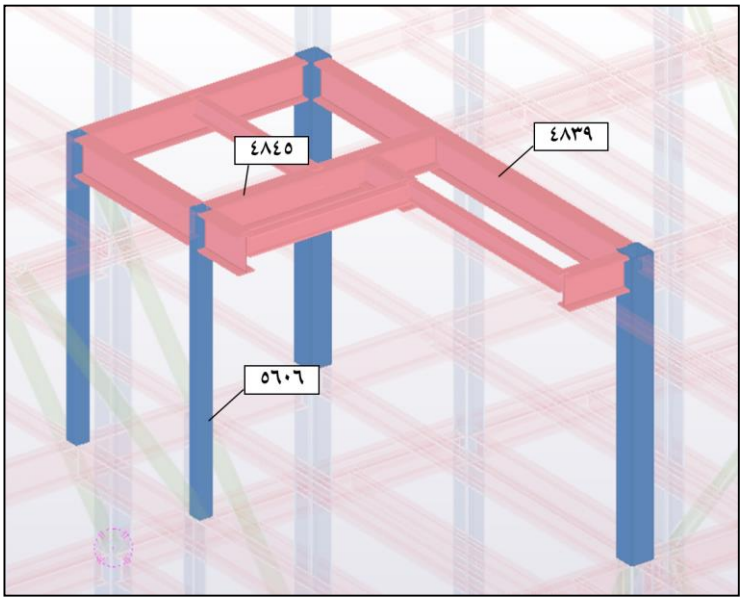
شده پروژه در نرم افزار ETABS و Tekla را نشان می‌دهد. مدل BIM پروژه با سطح جزییات LOD:250 توسط افزونه خودکار از فایل نرم‌افزار ETABS بدست آمده و اتصالات در آن مدل نشده‌اند. با این وجود به‌دلیل اینکه اطلاعات سازه‌ای از نرم‌افزار ETABS به صورت خودکار استخراج می‌شود، از این رو ملاحظات سازه‌ای نظیر اتصالات و عملکرد سازه‌ای عناصر در محاسبات پیش‌نیازی نصب در نظر گرفته می‌شود.

همان گونه که در بخش روش‌شناسی پژوهش مطرح شد، فرآیند محاسبه پیش‌نیازی‌ها بدین صورت است که با خواندن اطلاعات از نرم‌افزار ETABS، در ابتدا نوع تمام المان‌ها تعیین شده و پس از اتمام فرآیند شناسایی قاب‌های صلب، پیش‌نیازی‌های هر عنصر به ترتیب بدست می‌آید. اطلاعات بدست آمده از پیش‌نیازی‌های هر المان،به همراه اطلاعات مدل BIM، در یک جدول در پایگاه داده تجمیع می‌شود. شکل ۵ نمایی از جدول تکمیل شده اطلاعات مدل BIM را که در آن شماره پیش‌نیازی‌های المان‌ها در آن مشخص گردیده است، نمایش می‌دهد.

شکل ۶ پیش‌نیازی‌های عنصر با شناسه یکتا ۴۸۴۵# را نشان می‌دهد. با مشاهده پایگاه‌داده شکل ۵، می‌توان استنباط نمود که عناصر با شناسه یکتا ۵۶۰۶# و ۴۸۳۹# به عنوان پیش‌نیازی‌های نصب عنصر ۴۸۴۵# شناسایی شده‌اند. شکل ۶ این المان‌ها را در فضای سه‌بعدی نشان می‌دهد. بنابر قوانین تعریف شده، یک طرف عنصر ۴۸۴۵# ستون (۵۶۰۶#) بوده و طرف دیگر آن نیز یک تیر اصلی (۴۸۳۹#) می‌باشد. بر همین اساس این دو عنصر به عنوان پیش‌نیاز عنصر ۴۸۴۵# می‌بایست انتخاب شوند که پایگاه‌داده که نتایج آنالیز تعیین پیش‌نیازی نصب را نشان می‌دهد این موضوع را تایید می‌کند.

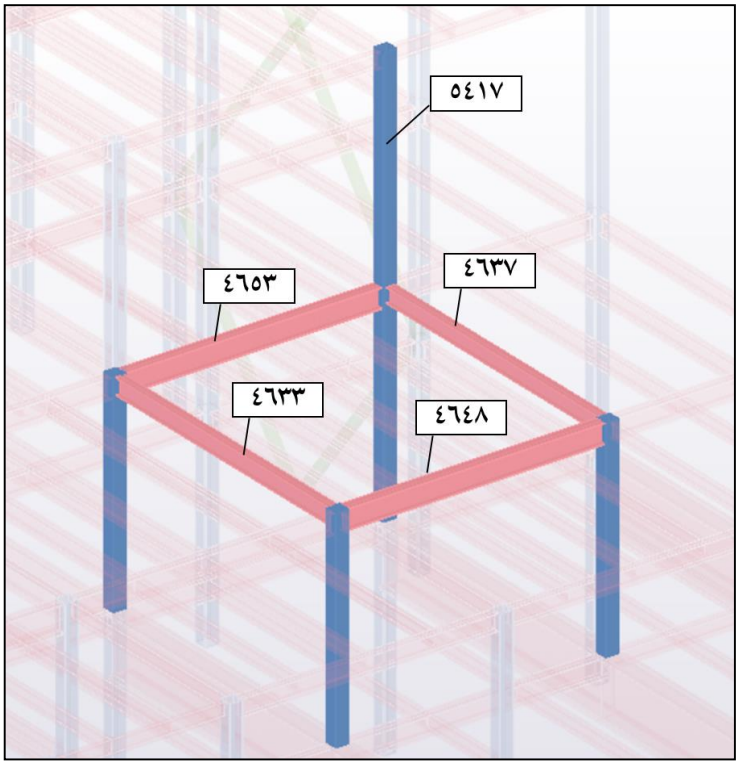
شکل ۷ یک نمونه دیگر از پیش‌نیازی‌های عناصر مدل BIM را نشان می‌دهد. برای عنصر با شناسه یکتا ۵۴۱۷# می‌باشد، عناصر ۴۶۳۷#، ۴۶۴۸#، ۴۶۳۳# و ۴۶۵۳# به عنوان پیش‌نیازی‌های نصب محاسبه شده‌اند. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه عنصر ۵۴۱۷ یک ستون می‌باشد و همچنین یک ستون در زیر آن نیز قرار گرفته‌است، بنابراین بر اساس قانون قاب صلب، یک قاب با حداقل سه عنصر متشکل از تیرهای اصلی می‌بایست به عنوان پیش‌نیازی‌های آن در نظر گرفته شود. همانگونه که در شکل ۷ و پایگاه‌داده شکل ۵ نشان‌داده شده‌است، عناصر ۴۶۳۷#، ۴۶۴۸#، ۴۶۳۳# و ۴۶۵۳# تشکیل یک قاب صلب را داده و بر همین اساس به عنوان پیش‌نیازی‌های نصب عنصر ۵۴۱۷# در نظر گرفته می‌شوند.

شناسایی پیش‌نیازی‌های نصب، مهم‌ترین بخش برای تعیین روابط میان فعالیت‌های برنامه زمان‌بندی می‌باشد که عموما به صورت دستی صورت



شکل ۶. عنصر ۴۸۴۵# و پیش‌نیازی‌های نصب آن در فضای سه‌بعدی.

Fig. 6. Element #4845 and Its Installation Prerequisites in 3D Space.



شکل ۷. عنصر ۵۴۱۷# و پیش‌نیازی‌های نصب آن در فضای سه‌بعدی.

Fig. 7. Element #5417 and Its Installation Prerequisites in 3D Space.

می‌گیرد. با بزرگ شدن مقیاس پروژه‌ها این کار بسیار زمان‌بر و سخت خواهد بود. از این رو اغلب برنامه‌ریزی‌های زمان‌بندی به ناچار در سطح کلان تدوین می‌شوند که این مساله منجر به کاهش دقت در زمان‌بندی‌های کارگاهی و همچنین چیدمان سایت نادرست شده که در نتیجه کاهش بهره‌وری، افزایش زمان و هزینه نهایی پروژه را به همراه خواهد داشت. در نتیجه آنالیز تعیین پیش‌نیازی‌های نصب علاوه بر خودکار کردن پایه‌های تولید زمان‌بندی، زمان تدوین زمان‌بندی را در عین افزایش جزییات زمان‌بندی و دقت آن کاهش می‌دهد که این موضوع بسیار ارزشمند خواهد بود.

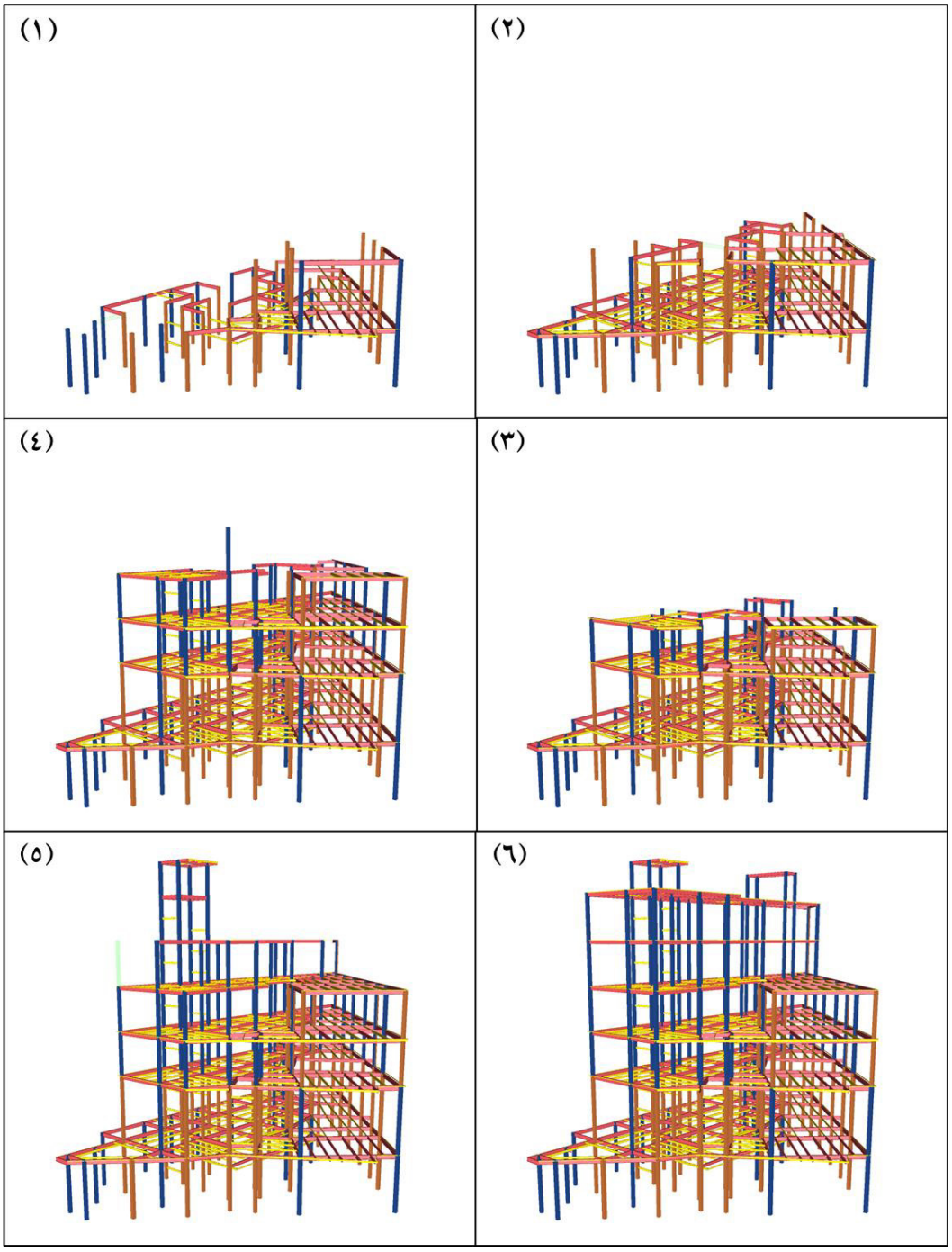
با کامل شدن اطلاعات پیش‌نیازی نصب و ترکیب آن با اطلاعات بدست آمده از مدل BIM تولید شده به صورت خودکار، امکان تهیه یک زمان‌بندی اجرای پروژه به صورت بهینه و خودکار به وجود می‌آید. در فرآیند استخراج مدل BIM از نرم‌افزار ETABS، شناسه یکتای عناصر (که توسط نرم‌افزار ETABS به صورت خودکار تخصیص داده می‌شود) در مدل BIM و در پایگاه داده ذخیره می‌شود. این موضوع موجب می‌شود تا سطح جزییات زمان‌بندی و مدل همیشه یکسان بوده و بدین ترتیب مدل BIM و زمان‌بندی به یکدیگر از طریق شناسه یکتا به راحتی متصل می‌گردند. علاوه بر این، حتی در صورت بروز رسانی مدل یا زمان‌بندی، بروز رسانی مدل ۴بعدی به راحتی انجام می‌شود.

با توجه به اطلاعات پیش‌نیازی نصب بدست آمده برای هر یک از عناصر، با استفاده از شبیه‌سازی یک مدل ۴بعدی را می‌توان بدست آورد. به همین منظور از نرم افزار Symphony برای شبیه‌سازی فرآیند نصب با کمک اطلاعات محاسبه شده استفاده می‌شود. پیش از اجرای شبیه‌سازی نیاز است تا فرضیاتی در نظر گرفته شده تا بر اساس آن بتوان زمان و توالی نصب عناصر را محاسبه نمود. بر این اساس فرض می‌گردد بازه زمانی نصب یک ستون فولادی ۳ تا ۵ ساعت برآورد شده و این بازه برای سایر قطعات فولادی ۲ تا ۳ ساعت در نظر گرفته می‌شود. همچنین از ۲ جرثقیل برجی برای نصب قطعات استفاده می‌شود که هر دو آن‌ها محل نصب تمام عناصر را پوشش می‌دهند.

در نهایت، با ترکیب برنامه زمان‌بندی بهینه بدست آمده با مدل سه بعدی ساخته شده، مدل زمان‌بندی چهاربعدی به صورت خودکار تولید می‌شود. از آنجاییکه سطح جزییات مدل سه‌بعدی و زمان‌بندی بدست آمده یکسان بوده و شناسه یکتا هر عنصر نیز هم در خروجی فرآیند شبیه‌سازی و هم در مدل سه‌بعدی به صورت خودکار وارد شده است، از این رو تهیه زمان‌بندی چهاربعدی به صورت خودکار صورت می‌گیرد. شکل ۸ مدل زمان‌بندی چهاربعدی تولید شده برای ساخت و نصب قطعات را در انتهای هر ماه به تصویر می‌کشد.

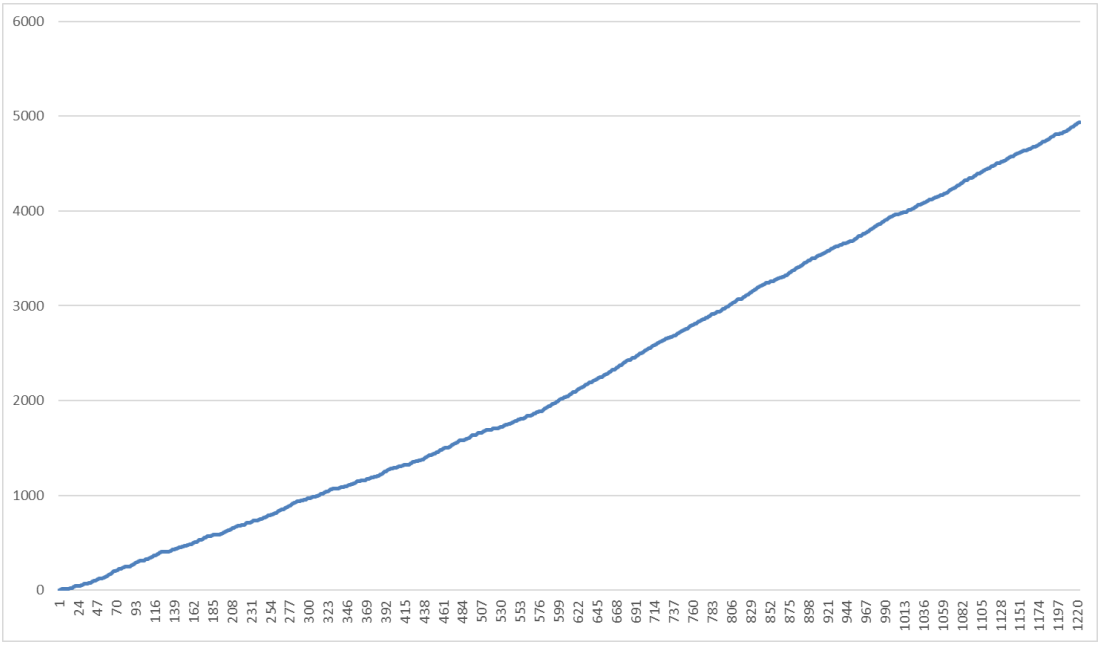
مدل شبیه‌سازی زمان‌بندی نصب عناصر، مدت زمان ۲۰۸ روز (با در نظر گرفتن ۸ ساعت کاری در روز) را برای اجرای پروژه نشان‌می‌دهد. بررسی جزئی‌تر فرآیند نصب نشان از توالی نصب صحیح و در نتیجه عملکرد موفقیت آمیز مدل معرفی شده دارد. همچنین آنالیز پایداری سازه (که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است) در هر لحظه نشان از عدم کاهش پایداری سازه در تمام مقاطع زمانی داشته که این مورد نیز تایید کننده توانایی مدل در تعیین درست پیش‌نیازی‌های نصب هر عنصر و در نهایت توالی نصب تمام عناصر پروژه می‌باشد. همچنین در مقایسه با روش‌های پیشین، از جمله مطالعه کیم و همکاران [۳] که فاقد مدل‌سازی چهاربعدی بوده، قوانین نصب را در نظر نگرفته و نیازمند ورود دستی داده‌های سازه‌ای است، روش حاضر با بهره‌گیری از مدل BIM و استخراج خودکار اطلاعات، امکان تولید توالی نصب دقیق و زمان‌بندی چهاربعدی یکپارچه را فراهم ساخته است.

برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی روش پیشنهادی، نتایج آن با برنامه زمان‌بندی دستی ارائه‌شده توسط پیمانکار پروژه مقایسه گردیده‌است. برنامه دستی بر اساس تجربه مهندسان پروژه و با استفاده از جداول زمان‌بندی کلی در سطح فعالیت‌های هفتگی تهیه شده بود و در آن روابط پیش‌نیازی و زمان نصب عناصر با دقت جزئی تعریف نشده بود. تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که روش پیشنهادی توانسته است مدت زمان کل پروژه را از ۲۳۰ روز کاری (در برنامه پیمانکار) به ۲۰۸ روز کاری کاهش دهد که معادل صرفه‌جویی حدود ۹ درصدی در زمان اجرا است. این موضوع در کنار این است که در روش پیشنهادی، به دلیل استفاده از شبیه‌سازی، عدم قطعیت نیز در پروژه و فرآیند نصب در نظر گرفته شده است؛ در صورتی که در زمان‌بندی پیمانکار عدم قطعیت لحاظ نشده است. علاوه بر این، دقت زمان‌بندی در روش پیشنهادی در سطح عنصر و با جزئیات روزانه ارائه شده است، در حالی که برنامه پیمانکار تنها سطح هفتگی را پوشش می‌دهد. یکی دیگر از مزایای روش پیشنهادی، بهره‌گیری مستقیم از مدل BIM و دسترسی به اطلاعات دقیق وزن و ابعاد هر قطعه است که امکان محاسبه دقیق‌تر زمان نصب را فراهم می‌کند. در مقابل، در برنامه دستی پیمانکار این اطلاعات یا موجود نبوده یا باید به صورت دستی محاسبه می‌شد که احتمال بروز خطا را افزایش می‌دهد.



شکل ۸. تصاویری از توالی نصب عناصر در مدل ۴بعدی.

Fig. 8. Images of Element Installation Sequences in the 4D Model.



شکل ۹. نمودار تغییرات پایداری سازه در طول نصب.

Fig. 9. Graph of Structural Stability Changes During Installation.

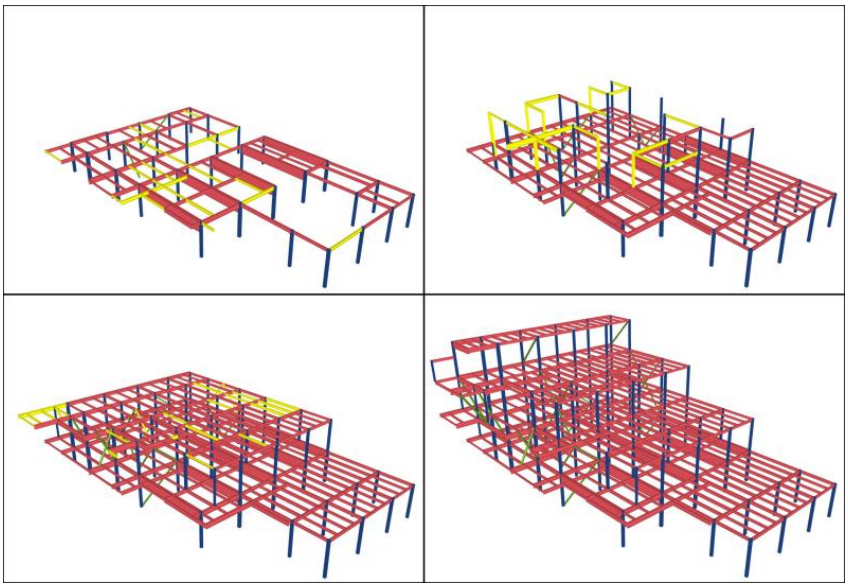
۶- اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی عملکرد مدل تعیین پیش‌نیازی‌های نصب، یک آزمایش بر روی یک پروژه واقعی سازه فولادی به وزن ۱،۱۹۲ تن انجام شده‌است. بررسی تک به تک قطعات و پیش‌نیازی‌های آن‌ها نشان از عملکرد صحیح مدل تعیین پیش‌نیازی نصب المان‌ها دارد. همچنین شکل ۱۰ برخی تصاویر از توالی نصب در این مدل را نشان می‌دهد که این موضوع صحت عملکرد مدل شناسایی خودکار پیش‌نیازی‌های المان‌ها را نیز تایید می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف خودکارسازی فرآیند شناسایی پیش‌نیازی‌ها و تعیین توالی بهینه نصب عناصر سازه‌های فولادی، گامی در جهت بهبود برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دقیق‌تر پروژه‌های ساخت‌وساز برداشته است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب تحلیل خودکار پایداری لحظه‌ای سازه با مجموعه‌ای از قوانین اجرایی نصب است، به‌گونه‌ای که نه‌تنها توالی نصب بر اساس الزامات فنی و اجرایی تعیین می‌شود، بلکه در هر لحظه از فرایند نصب، پایداری کلی سازه نیز تضمین می‌گردد. روش ارائه‌شده با بهره‌گیری از فناوری‌های BIM و تحلیل داده‌های نرم‌افزار ETABS، امکان استخراج اطلاعات دقیق برای برنامه‌ریزی را فراهم کرده و چالش‌های مرتبط با روش‌های سنتی و دستی را کاهش داده است. مطالعه موردی انجام‌شده بر روی پروژه‌ای واقعی در تهران نشان داد که این روش توانسته است زمان لازم برای تدوین برنامه‌ریزی را کاهش دهد و در عین حال دقت و جزئیات آن را افزایش دهد.

از جمله نتایج مهم این پژوهش، کاهش حدود ۱۵ درصدی زمان کل اجرای پروژه نسبت به روش‌های دستی است. در این مطالعه موردی، زمان اجرای پروژه از ۲۳۰ روز کاری در برنامه پیمانکار به ۲۰۸ روز کاری کاهش یافت که نشان‌دهنده توانایی روش پیشنهادی در بهینه‌سازی زمان‌بندی است. فرآیند شناسایی پیش‌نیازی‌های نصب با استفاده از مدل BIM و پایگاه‌داده تولیدشده، توالی نصب دقیقی را ارائه داده که تضمین‌کننده پایداری سازه در طول مراحل نصب بوده است. رابطه پایداری در توالی نصب عناصر به گونه‌ای طراحی شده است که سازه در هر لحظه از اجرای پروژه پایداری لازم را حفظ نماید. این امر به کاهش خطرات اجرایی کمک کرده و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر فرآیند نصب را فراهم ساخته است. با این حال، پیاده‌سازی چنین رویکردی در پروژه‌های واقعی می‌تواند با چالش‌هایی نظیر مقاومت برخی پیمانکاران در تغییر فرآیندهای سنتی، نیاز به آموزش تیم اجرایی برای



شکل ۱۰. تصاویری از توالی نصب المان‌ها در مدل.

Fig. 10. Images of Element Installation Sequences in the Model.

کار با مدل‌های BIM و یکپارچه‌سازی داده‌ها، و لزوم انطباق با رویه‌ها و استانداردهای موجود در کارگاه مواجه شود.

با وجود مزایای روش پیشنهادی، این پژوهش با چند محدودیت همراه بوده است. از جمله، در این مطالعه فرض شده که پیمانکار صرفا مسئول اجرای اسکلت فولادی است و فرآیندهای مرتبط با اجرای کف‌سازی و سقف‌ها در نظر گرفته نشده است. همچنین جزئیات برخی از اتصالات، مانند اتصالات پای ستون، به‌طور کامل مدل‌سازی نشده و صرفا زمان ثابتی برای اجرای آن‌ها در زمان نصب ستون لحاظ گردیده است. روش پیشنهادی برای سازه‌های فولادی رایج تدوین شده و در مورد سازه‌های خاص‌تر مانند سوله‌ها، پل‌ها یا سیستم‌های خرپایی که ممکن است نیازمند روش‌های اجرایی متفاوت یا استفاده از تکیه‌گاه‌های موقت باشند، نیازمند تطبیق و توسعه است. علاوه بر این، بارهای موقتی همچون اثر باد، بار ناشی از جرثقیل، یا ضربه‌های ناشی از جوشکاری در مدل لحاظ نشده‌اند که می‌تواند بر دقت تحلیل در شرایط واقعی تأثیر بگذارد. عدم دسترسی به مدل BIM در برخی مراحل از چرخه حیات پروژه نیز می‌تواند فرآیند خودکارسازی را با چالش مواجه کند. با توجه به نوآوری روش و نبود مطالعات مشابه، این موارد به عنوان محدودیت‌های طبیعی این پژوهش محسوب می‌شوند. بنابراین در این حوزه نیازمند تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

پژوهش‌های آینده می‌توانند با توسعه روش پیشنهادی برای سازه‌های خاص‌تر و حتی سازه‌های غیرفولادی، دامنه کاربرد آن را افزایش دهند. همچنین، افزودن مدل‌سازی دقیق‌تر اتصالات، لحاظ‌کردن اثر بارهای موقت و شرایط محیطی، و استفاده از اطلاعات جزئی‌تر کف‌سازی و سقف‌ها می‌تواند دقت نتایج را در شرایط واقعی ارتقا دهد. ایجاد الگوریتم‌هایی که بتوانند با مدل‌های BIM ناقص یا تغییرپذیر نیز سازگار باشند، یکی دیگر از مسیرهای توسعه این پژوهش است. علاوه بر این، ارزیابی اثرات روش پیشنهادی بر هزینه، ایمنی و کارایی پروژه‌ها، و مقایسه آن با روش‌های دستی در پروژه‌های واقعی، می‌تواند ارزش عملیاتی آن را به‌طور جامع‌تر مشخص سازد.

در مجموع، پژوهش حاضر با استفاده از فناوری BIM و تحلیل داده‌های ساختاری به خودکارسازی فرآیندهای برنامه‌ریزی کمک نموده و دقت و بهره‌وری را در پروژه‌های ساخت‌وساز افزایش می‌دهد. رفع محدودیت‌های شناسایی‌شده و توسعه بیشتر این روش می‌تواند آن را به ابزاری قدرتمند برای مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز تبدیل کند.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان پژوهش تشکر و قدردانی خود را از کارفرمای پروژه برای در اختیار قراردادن اطلاعات و حمایت معنوی اعلام می‌دارند.

منابع

[1] S. Gaur, Understanding the importance of project planning and scheduling in Indian construction projects, Journal of Positive School Psychology, 6(3) (2022) 3535–3544-3535–3544.

[2] S. Farzad Moosavi, O. Moselhi, Review of detailed schedules in building construction, Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 6(3) (2014) 05014001.

[3] K. Kim, J. Park, C. Cho, Framework for automated generation of constructible steel erection sequences using structural information of static indeterminacy variation in BIM, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(11) (2020) 3169-3178.

[4] P.M. Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – 7th Edition, Project Management Institute, 2020.

[5] C.M. Eastman, BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors, John Wiley & Sons, 2011.

[6] K. Kim, Y. Cho, K. Kim, BIM-driven automated decision support system for safety planning of temporary structures, Journal of construction engineering and management, 144(8) (2018) 04018072.

[7] J. Park, K. Kim, Y.K. Cho, Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors, Journal of Construction Engineering and Management, 143(2) (2017) 05016019.

[8] T. Mazars, A. Francis, Chronographical spatiotemporal dynamic 4D planning, Automation in Construction, 112 (2020) 103076.

[9] E. Tauscher, E. Mikulakova, K. Beucke, M. König, Automated generation of construction schedules based on the IFC object model, in: Computing in Civil Engineering (2009), 2009, pp. 666-675.

[10] H. Kim, K. Anderson, S. Lee, J. Hildreth, Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology, Automation in Construction, 35 (2013) 285-295.

[11] H. Son, C. Kim, Y. Kwon Cho, Automated schedule updates using as-built data and a 4D building information model, Journal of Management in Engineering, 33(4) (2017) 04017012.

[12] O. Doukari, B. Seck, D. Greenwood, The creation of construction schedules in 4D BIM: a comparison of conventional and automated approaches, Buildings, 12(8) (2022) 1145.

[13] V. Faghihi, K.F. Reinschmidt, J.H. Kang, Construction scheduling using genetic algorithm based on building information model, Expert Systems with Applications, 41(16) (2014) 7565-7578.

[14] V. Singh, N. Gu, X. Wang, A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform, Automation in construction, 20(2) (2011) 134-144.

[15] J. Lucas, S.S.N. Vijayarao, Barriers of Automated BIM Use: Examining Factors of Project Delivery, in: Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering: Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management, Springer, 2019, pp. 3-9.

[16] C. Boton, S. Kubicki, G. Halin, The challenge of level of development in 4D/BIM simulation across AEC project lifecyle. A case study, Procedia Engineering, 123 (2015) 59-67.

[17] V. Faghihi, A. Nejat, K.F. Reinschmidt, J.H. Kang, Automation in construction scheduling: a review of the literature, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81 (2015) 1845-1856.

[18] M. König, K. Beucke, E. Tauscher, Management and evaluation of alternative construction tasks, in: The 11th international conference on computing in civil and building engineering, Montreal, Canada, 2006.

[19] E. Tauscher, E. Mikulakova, M. König, K. Beucke, Generating construction schedules with case-based reasoning support, in: Computing in Civil Engineering (2007), 2007, pp. 119-126.

[20] Y. Hong, H. Xie, E. Agapaki, I. Brilakis, Graph-Based Automated Construction Scheduling without the

Use of BIM, Journal of Construction Engineering and Management, 149(2) (2023) 05022020.

[21] B. Koo, M. Fischer, Formalizing construction sequencing constraints for rapid generation of schedule alternatives, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Stanford Univ., Stanford, Calif, (2003).

[22] B. de Vries, J.M. Harink, Generation of a construction planning from a 3D CAD model, Automation in Construction, 16(1) (2007) 13-18.

[23] Y.W. Weldu, G.M. Knapp, Automated generation of 4D building information models through spatial reasoning, in: Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World, 2012, pp. 612-621.

[24] M. Altun, A. Akcamete, A method for facilitating 4D modeling by automating task information generation and mapping, in: Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering: Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management, Springer, 2018, pp. 479-486.

[25] Z. Wang, E. Rezazadeh Azar, BIM-based draft schedule generation in reinforced concrete-framed buildings, Construction Innovation, 19(2) (2019) 280-294.

[26] M. Sheikhkhoshkar, F.P. Rahimian, M.H. Kaveh, M.R. Hosseini, D.J. Edwards, Automated planning of concrete joint layouts with 4D-BIM, Automation in construction, 107 (2019) 102943.

[27] J.C. Cheng, Y. Tan, Y. Song, X. Liu, X. Wang, A semi-automated approach to generate 4D/5D BIM models for evaluating different offshore oil and gas platform decommissioning options, Visualization in Engineering, 5 (2017) 1-13.

[28] A. Fazeli, S. Banihashemi, A. Hajirasouli, S.R. Mohandes, Automated 4D BIM development: The resource specification and optimization approach, Engineering, Construction and Architectural Management, 31(5) (2024) 1896-1922.

[29] M.A. Al-Sinan, A.A. Bubshait, Z. Aljaroudi, Generation of construction scheduling through machine learning and BIM: A blueprint, Buildings, 14(4) (2024) 934.

[30] M. Awe, A. Malhi, M. Budka, N. Mavengere, B. Dave, Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM, Buildings, 15(7) (2025) 1072.

[31] A.K. Singh, A. Pal, P. Kumar, J.J. Lin, S.-H. Hsieh, Prospects of Integrating BIM and NLP for Automatic Construction Schedule Management, in: ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC Publications, 2023, pp. 238-245.

[32] J. Crowther, S.O. Ajayi, Impacts of 4D BIM on construction project performance, International Journal of Construction Management, 21(7) (2021) 724-737.

[33] R. Büchmann-Slorup, N. Andersson, BIM-based scheduling of Construction–A comparative analysis of prevailing and BIM-based scheduling processes, in: Proc., 27 th Int. Conf. of the CIB W78, 2010, pp. 113-123.

[34] J. Tulke, J. Hanff, 4D construction sequence planning–new process and data model, in: Proceedings of CIB-W78 24th International Conference on Information Technology in Construction, Maribor, Slovenia, 2007, pp. 79-84.

[35] J. Campagna-Wilson, C. Boton, Challenges related to 4D BIM simulation in the construction industry, in: Cooperative Design, Visualization, and Engineering: 17th International Conference, CDVE 2020, Bangkok, Thailand, October 25–28, 2020, Proceedings 17, Springer, 2020, pp. 270-278.

[36] T. Dang, H.-J. Bargstädt, 4D relationships: The missing link in 4D scheduling, Journal of Construction Engineering and Management, 142(2) (2016) 04015072.

[37] M.V. Tallgren, M. Roupé, M. Johansson, 4D modelling using virtual collaborative planning and scheduling, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 26(42) (2021) 763-782.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Tavakolan, Sh. NIkoukar, Development of an Innovative Automated Method for Identifying the Installation Sequence of Steel Structure Elements Using ETABS Model Information , Amirkabir J. Civil Eng., 57(8) (2025) 1407-1430.

DOI: 10.22060/ceej.2025.23824.8222