Sharif Civil Engineering Journal (2026), **41**(4), 17-29

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

A Framework for Semi-Automatic Scheduling and 4D Modeling of Construction Projects Based on Visual Programming and BIM

Naimeh Sadeghi* and Farbod Farmani Rastgoo

Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology.
* corresponding author:(sadeghi@kntu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 2 November 2024

Revised: 19 February 2025

Accepted: 1 March 2025

Keywords:

BIM,
4D modeling,
visual programming,
simulation

Abstract

Building Information Modeling (BIM) is recognized as a transformative technology in the construction industry, enabling enhanced information management, collaboration, and process optimization across project stages. A key capability of BIM is 4D modeling, which links the project schedule to 3D models, allowing stakeholders to dynamically visualize the construction process. Despite its potential, many projects underutilize 4D modeling due to the time-consuming process of manually linking scheduling information with 3D models, which often results in projects remaining at the 3D level. This research proposes a novel framework for the semi-automatic generation of project schedules and 4D models, requiring minimal input from experts. The framework leverages BIM-based quantity takeoff data to enhance the accuracy and efficiency of time estimates, automating much of the traditionally manual process. Using a visual programming environment, the framework integrates construction planning logic to generate schedules while simultaneously creating 4D visualizations of the construction sequence. This approach simplifies 4D modeling, as the visual programming interface allows for intuitive rule-based logic input. One of the core advantages of this framework is its dynamic nature: any modification to the BIM model automatically updates both the project schedule and the corresponding 4D visualization. This feature ensures that project changes are consistently reflected across both time and space, facilitating improved coordination and decision-making. Additionally, the framework is flexible in incorporating construction equipment and resource constraints into the 4D visualizations, further enhancing the project's visual realism and planning precision. The proposed framework was tested in a case study, demonstrating its effectiveness and ease of use. The case study highlighted how the integration of BIM data with visual programming environments streamlines the creation of 4D models, providing project teams with a more interactive and comprehensive view of the construction process. This method represents a significant step forward in the automation of construction scheduling and modeling, with the potential to enhance project performance and BIM adoption.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: Naimeh Sadeghi led the conceptualization and methodology, model development, validation, manuscript writing and editing, and project supervision. Farbod Farmani Rastgoo contributed to model development and validation, including implementing and testing modeling components and supporting the analysis workflow.

To Cite this article:
Sadeghi, N. and Farmani Rastgoo, F. 2026. A framework for semi-automatic scheduling and 4D modeling of construction projects based on visual programming and BIM, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 17-29 .
https://doi.org/10.24200/j30.2025.65546.3383

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

چارچوبی جهت ایجاد نیمه‌خودکار زمان‌بندی و مدل چهاربُعدی بر مبنای برنامه‌نویسی بصری و BIM

نعیمه صادقی * و فربد فرمانی راست‌گو

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (sadeghi@kntu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

واژگان کلیدی:

مدل‌سازی اطلاعات ساخت،

مدل‌سازی چهاربعدی،

برنامه‌نویسی بصری،

شبیه‌سازی.

چکیده

مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM)، به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین در صنعت ساخت‌وساز شناخته می‌شود. یکی از قابلیت‌های کلیدی BIM، مدل‌سازی چهاربعدی است، که زمان‌بندی پروژه را به مدل‌های سه‌بعدی متصل می‌کند. با وجود این، فرآیند زمانبر پیوند دستی اطلاعات زمان‌بندی به مدل‌ها باعث شده است که بسیاری از پروژه‌ها از قابلیت اخیر BIM نتوانند استفاده کنند. پژوهش حاضر، چارچوبی را برای تولید نیمه‌خودکار زمان‌بندی پروژه و مدل‌های چهاربعدی با نیاز به کمینه‌ی ورودی از متخصصان ارائه داده است. در چارچوب مذکور، داده‌های متره از مدل BIM برای بهبود دقت و کارایی تخمین زمان استفاده شده‌اند. نوآوری پژوهش حاضر در افزودن منطق ساخت به‌صورت بصری به BIM برای نخستین بار نهفته است، که با استفاده از ابزارهای برنامه‌نویسی بصری، امکان ایجاد زمان‌بندی و شبیه‌سازی چهاربعدی فرآیندهای ساخت را به‌صورت خودکار فراهم می‌سازد. یکی از مزایای چارچوب اخیر آن است که هر تغییری در مدل BIM ایجاد شود، زمان‌بندی و تجسم چهاربعدی به‌صورت خودکار به‌روزرسانی می‌شوند. روش پیشنهادی در یک مطالعه‌ی موردی پیاده‌سازی شده است، که کارایی و سهولت استفاده از آن را نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت حیاتی زمان‌بندی در پروژه‌ها، توسعه‌ی آن‌ها باید با دقت فراوان انجام شود.[۱] به‌طورسنتی، برنامه‌ریزان پروژه از روش‌های مبتنی بر نقشه‌های دوبعدی استفاده می‌کنند، که با تطبیق منطقی دستی بین نقشه‌ها، مقدار یا حجم کار برای هر المان ساختمانی محاسبه می‌شود و مبنای محاسبه‌ی زمان لازم برای انجام فعالیت‌ها قرار می‌گیرد. اما در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM)[1]، روش‌های سنتی دسترسی به اطلاعات پروژه را متحول کرده‌اند.[۲]

BIM امکان نمایش سه‌بعدی و دسترسی و مدیریت آسان اطلاعات ساختمان را ایجاد می‌کند و در نتیجه برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ساختمانی را بهبود می‌بخشد. علاوه‌بر این، با استفاده از BIM، امکان نمایش زمان‌بندی ساخت چهاربعدی از طریق اتصال به برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه فراهم می‌شود، که به کارفرمایان و پیمانکاران کمک می‌کند فرآیند پروژه را قبل از ساخت با دقت و سهولت بررسی و توالی پروژه را بهتر درک کنند.[۳] این تجسم می‌تواند به شناسایی زودهنگام تضادها و ناکارآمدی‌ها در مرحله‌ی برنامه‌ریزی کمک کند و ریسک تأخیر در پروژه را کاهش دهد.[۴] به‌طورکلی، پیاده‌سازی مدل‌های چهاربعدی به افزایش بهره‌وری در صنعت ساخت‌وساز کمک می‌کند، تصمیم‌گیری را تسهیل می‌سازد، و کارایی کلی مدیریت پروژه را افزایش می‌دهد.[۵] با وجود مزایای قابل توجه، چالش‌هایی مانند مقاومت در برابر تغییر و نیاز به ادغام ابزارهای مناسب، هنوز موانعی برای پذیرش گسترده‌ی آن در صنعت ساخت‌وساز هستند.[۶]

یکی از چالش‌های اصلی موجود در زمینه‌ی ذکرشده آن است که حتی زمانی که پروژه‌ها براساس BIM انجام می‌شوند، به‌دلیل زمانبربودن واردکردن اطلاعات زمان‌بندی در BIM، در اغلب موارد مدل‌ها در سطح سه‌بعدی باقی می‌مانند و از قابلیت‌های مدل چهاربعدی در پروژه‌ها بهره‌برداری نمی‌شود. برای بهره‌برداری مؤثر از قابلیت‌های BIM، نیاز به روشی ساده برای تولید و ایجاد ارتباط مستقیم بین برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه و BIM با کمینه‌ی ورودی وجود دارد.[۷] در حال حاضر، فرایند پیوند اطلاعات زمان‌بندی به مدل‌های BIM معمولاً نیاز به تلاش دستی زیادی دارد، که می‌تواند منجر به ناکارآمدی و افزایش احتمال خطا شود.

توسعه‌ی یک روش که امکان استخراج و ادغام خودکار داده‌های زمان‌بندی را فراهم کند، می‌تواند کارایی و استفاده از BIM در مدیریت پروژه را افزایش دهد. روش مذکور باید امکان اتصال مدل‌های سه‌بعدی به داده‌های زمانی را فراهم سازد و به مدیران پروژه این امکان را دهد که با بهره‌گیری از اطلاعات BIM به سادگی برنامه‌ی زمان‌بندی را تولید کنند.[۸] به‌عنوان مثال، با ایجاد

[1] Building Information Modeling

استناد به این مقاله:

صادقی، نعیمه و فرمانی راست‌گو، فربد، ۱۴۰۴. چارچوبی جهت ایجاد نیمه‌خودکار زمان‌بندی و مدل چهاربُعدی بر مبنای برنامه‌نویسی بصری و BIM. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۱۷-۲۹. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65546.3383

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

روابط از پیش‌تعریف‌شده بین فعالیت‌های پروژه و المان‌ها مرتبط در مدل BIM، ذینفعان می‌توانند به سرعت زمان‌بندی پروژه را مشاهده و توالی فعالیت‌ها را درک کنند. این امر نه فقط باعث صرفه‌جویی در زمان می‌شود، بلکه ریسک ناهماهنگی بین مدل و برنامه را نیز کاهش می‌دهد. علاوه‌بر این، خودکارسازی چنین فرایندی، امکان به‌روزرسانی‌های آنی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را به محض وقوع تغییرات در مدل BIM فراهم می‌سازد.

هدف اصلی پژوهش حاضر، ایجاد چارچوبی مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM) است، که با دریافت ورودی‌های ساده از متخصصان، برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی پروژه‌ی ساختمانی را به‌صورت خودکار تولید کند. درنهایت، چارچوب پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند که ذینفعان روند چهاربعدی ساخت را مشاهده کنند و تصمیم‌گیری‌های بهتری در راستای مدیریت پروژه انجام دهند. برای دستیابی به هدف ذکرشده، روش پژوهش حاضر، شامل طراحی و توسعه‌ی یک چارچوب مبتنی بر BIM و ارزیابی آن از طریق یک مطالعه‌ی موردی بوده است. در مرحله‌ی طراحی، در چارچوب پیشنهادی از یک محیط برنامه‌نویسی بصری[1] برای ارتباط با BIM استفاده شده است. به این ترتیب که محیط برنامه‌نویسی بصری به‌منظور نمایش آسان منطق برنامه‌ریزی پروژه‌ها و محاسبه‌ی زمان شروع و پایان فعالیت‌ها به کار رفته و BIM برای استخراج اطلاعات متره و نمایش چهاربعدی استفاده شده است. در مرحله‌ی اعتبارسنجی، چارچوب بر روی یک پروژه‌ی ساختمانی واقعی پیاده‌سازی و اثربخشی آن از جنبه‌هایی مانند دقت نتایج زمان‌بندی، سرعت تولید مدل چهاربعدی، و رضایت ذینفعان از شبیه‌سازی بررسی شده است. در ادامه، ابتدا به بررسی ادبیات پیشین پرداخته و سپس در بخش سوم، چارچوب موردنظر ارائه شده است. پیاده‌سازی چارچوب نیز در بخش چهارم بر روی یک مطالعه‌ی موردی تشریح و در بخش آخر، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات پژوهش

در بخش کنونی، ابتدا به تعریف و تاریخچه‌ی BIM پرداخته و کاربردهای آن در مدیریت پروژه‌های ساخت بررسی شده است. سپس، به کاربردهای BIM در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت توجه شده است، که شامل استفاده از BIM در شبیه‌سازی پروژه‌های ساخت، نمایش، و برنامه‌ریزی مراحل مختلف پروژه است. در ادامه، بر روی چالش‌ها و مشکلات موجود در پیاده‌سازی خودکار داده‌های زمان‌بندی و هماهنگ‌سازی آن‌ها با مدل‌های سه‌بعدی بحث صورت گرفته و لزوم توسعه‌ی روش‌های خودکار برای بهبود فرآیندهای مذکور مطرح شده است. در بخش ۲ .۳.، به برنامه‌نویسی بصری و جایگاه آن در ارتباط با BIM پرداخته شده است. سپس، کاربردهای برنامه‌نویسی بصری در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها و نقش آن در ساده‌سازی و تسهیل فرآیندهای پیچیده‌ی زمان‌بندی پروژه‌ها در مطالعات پیشین بررسی شده است. درنهایت، مشکلات و محدودیت‌های موجود در استفاده از BIM و برنامه‌نویسی بصری بررسی و خلأهای پژوهشی در حوزه‌ی اخیر تبیین شده است.

۲. ۱. تاریخچه‌ی BIM

BIM را می‌توان به‌عنوان فرآیندی برای مدیریت اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی ساختمان از طریق نمایش دیجیتالی آن تعریف کرد.[۹] فناوری اخیر، تغییراتی اساسی در نحوه‌ی طراحی، ساخت، و مدیریت ساختمان‌ها ایجاد کرده است. BIM نه فقط به مدل‌سازی فیزیکی ساختمان می‌پردازد، بلکه اطلاعات مرتبط با اجزاء مختلف ساختمان را نیز در یک محیط دیجیتالی یکپارچه گردآوری و مدیریت می‌کند. فرآیند BIM با ایجاد همکاری مشترک میان ذینفعان مختلف، از جمله معماران، مهندسان، پیمانکاران، و مالکان پروژه، باعث بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود.[۱۰]

معرفی مفهوم BIM در دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط پیشگامانی مانند چارلز ایستمن مطرح شده است. در دوران مذکور، استفاده از فناوری‌های دیجیتال به‌طورمحدود و عمدتاً در زمینه‌ی طراحی‌های هندسی بوده است. اما در دهه‌ی ۱۹۹۰، با پیشرفت‌های قابل‌توجه در نرم‌افزارهای BIM و توانایی‌های پیشرفته‌تر در مدل‌سازی ساختمان‌ها، فناوری BIM، تحول بزرگی در عرصه‌ی معماری و ساخت‌وساز ایجاد کرده است. به‌ویژه، در دوران دهه‌ی ۷۰، نرم‌افزارهای BIM به‌شکل گسترده‌تری در صنعت استفاده شده‌اند، که قابلیت‌های مدل‌سازی پیچیده‌تر و جزئیات بیشتری داشته‌اند.[۱۱]

فناوری BIM به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده و چندوجهی، که نیاز به هماهنگی بین تیم‌های مختلف دارند، به‌طور چشمگیری عملکرد را بهبود می‌بخشد. با ارتقاء ارتباط‌ها، کاهش خطاها، و تسهیل گردش کار، پروژه‌ها به‌طورکارآمدتری پیش می‌روند.[۱۲] اطلاعات دقیق و بصری‌سازی، که توسط BIM فراهم می‌شود، امکان پیش‌بینی بهتر مشکلات و ارزیابی دقیق‌تر هزینه‌ها را فراهم می‌سازد. قابلیت‌های ذکرشده، همچنین به بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت و کاهش ضایعات کمک می‌کنند.[۱۳]

برای نمونه، در برخی پروژه‌ها از BIM برای تخمین پویای هزینه‌های ساخت‌وساز استفاده شده است. تخمین‌ها از طریق اتصال خودکار مدل به فهرست‌بهای مرتبط انجام شده و بدین ترتیب دقت تخمین‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.[۱۴] همچنین، BIM در کنترل خودکار ضوابط ساختمانی،[۱۵] ارزیابی خودکار ریسک،[۱۶ و ۱۷] و نیز در مدیریت ساخت‌وساز با توجه به معیارهای پایداری،[۱۸ و ۱۹] و مدیریت تعمیر و نگهداری،[۲۰] کاربرد دارد.

در زمینه‌های تحقیقاتی پیشرفته‌تر، ترکیب BIM با روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی توجه پژوهشگران و متخصصان را جلب کرده است. برای مثال، در برخی پژوهش‌ها، BIM با بهینه‌سازی چندهدفه ترکیب شده است، تا بتواند تعادل میان زمان، هزینه، کیفیت، و ایمنی پروژه را مدیریت کند. ترکیب اخیر به ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده، که نیاز به مدیریت دقیق منابع و زمان‌بندی دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه‌بر این، مقادیر متره‌ی تولیدشده توسط BIM به مدیریت منابع کمک می‌کند و امکان زمان‌بندی دقیق‌تر و اجرای بهینه‌ی فعالیت‌های ساخت‌وساز را فراهم می‌سازد.[۲۱ و ۲۲]

درنهایت، می‌توان گفت که BIM نه فقط یک فناوری مدیریتی، بلکه رویکردی نوین در فرآیندهای طراحی و ساخت است، که در حال تحول و بهبود مداوم است.

۲. ۲. کاربردهای BIM در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت

در زمینه‌ی نظارت بر عملیات اجرایی ساخت، پور رحیمیان و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۳] در یک مطالعه‌ی موردی، یک محیط شبیه‌سازی بازی طراحی کردند تا امکان مقایسه‌ی وضعیت فعلی با وضعیت برنامه‌ریزی‌شده‌ی پروژه و انجام برنامه‌ریزی مجدد را فراهم سازند. ایشان اطلاعات عناصر پروژه، از قبیل

[1] Visual Programming

اطلاعات هندسی و رنگ را از مدل BIM به نرم‌افزار بازی‌سازی Unity انتقال دادند. همچنین، با استفاده از دوربین‌های ثابت نصب‌شده در کارگاه، اطلاعات وضعیت فعلی عناصر پروژه را به‌دست آوردند و با پردازش تصویر، اطلاعات مذکور را به برنامه‌ی خود در نرم‌افزار Unity افزودند و درنهایت، آن را به یک محیط واقعیت مجازی ارتقاء دادند، تا پیمانکار و کارفرما بتوانند در محیط سه‌بعدی از وضعیت فیزیکی پروژه و مقایسه‌ی آن با برنامه‌ی زمان‌بندی در لحظه آگاه شوند.

در زمینه‌ی شبیه‌سازی چهاربعدی، BIM ارتباط‌های میان ذینفعان را تقویت می‌کند و امکان برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تعاملی را فراهم می‌سازد. به‌علاوه، ترکیب فناوری BIM با واقعیت مجازی، به درک بهتر جزئیات پروژه‌ها کمک می‌کند و مشارکت ذینفعان را در تصمیم‌گیری‌های مختلف افزایش می‌دهد.[۲۴]

در طول دو دهه‌ی گذشته، پژوهش‌هایی در زمینه‌ی تسریع و ساده‌سازی فرآیند ایجاد مدل‌های چهاربعدی انجام شده است، که اصولاً بر سه راهبرد تمرکز داشته‌اند:[۷] (۱) تعریف ویژگی‌های مشترک بین زمان‌بندی‌ها و مدل‌های سه‌بعدی به‌گونه‌ای که بتوان آن‌ها را بین عناصر مدل BIM و فعالیت‌های زمان‌بندی مرتبط ساخت؛ (۲) ایجاد یک سیستم کدگذاری منسجم بین فعالیت‌ها و عناصرBIM ؛ و (۳) خودکارکردن فرآیند تولید ساختار شکست کارها. برای مثال، در یک مطالعه، چارچوبی ارائه شده است که تمام فعالیت‌ها را از یک برنامه‌ی زمان‌بندی استخراج و به‌صورت خودکار ساختار تفکیک مناطق مکانی کاری را ایجاد کرده و سپس هر فعالیت را به یک مکان کاری اختصاص داده است.[۷]

کاریبینی[۲] و همکاران (۲۰۱۶)،[۲۵] تطبیق نیمه‌خودکار عناصر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را با فعالیت‌های ساخت‌وساز با استفاده از یک متغیر از پیش تعریف‌شده به نام شناسه‌ی فعالیت پیشنهاد کرده‌اند. با وجود اینکه در روش پیشنهادی ایشان، فرآیند ایجاد یک مدل BIM چهاربعدی تا حدی ساده شده است، پارامتر اضافی هنوز باید به‌صورت دستی برای هر المان جدید تعریف شود. در روشی مشابه، آلتون و آکمت[۳] (۲۰۱۹)،[۲۶] یک متغیر به نام شناسه‌ی فعالیت را تعریف کرده‌اند، که برای المان‌های مدل BIM براساس ویژگی‌های آن‌ها تولید شده است. سپس از شناسه‌های فعالیت برای اتصال المان‌ها به برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه استفاده کرده‌اند، تا مدل چهاربعدی ایجاد شود.

علیرغم قابلیت‌های بالقوه‌ی BIM در مدیریت پروژه‌های ساختمانی، استفاده از مدل‌های چهاربعدی عملاً محدود باقی مانده است.[۶] دلیل اصلی این محدودیت، پیچیدگی و زمانبربودن فرآیند پیوند اطلاعات زمان‌بندی با مدل‌های سه‌بعدی BIM است. اغلب پروژه‌ها به‌دلیل نبود ابزارهای کارآمد و ساده برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی مبتنی بر BIM، فقط در سطح سه‌بعدی باقی می‌مانند و از امکانات مدل‌های چهاربعدی بهره‌برداری نمی‌کنند.

در حال حاضر، فرآیند ایجاد مدل‌های چهاربعدی نیازمند ورود دستی اطلاعات زمان‌بندی است، که منجر به ناکارآمدی، افزایش احتمال بروز خطا، و دشواری در هماهنگی میان مدل و برنامه‌ی زمان‌بندی می‌شود. لذا، توسعه‌ی یک روش خودکار و ساده، که قادر به استخراج و ادغام داده‌های زمان‌بندی با مدل‌های BIM باشد، ضرورت دارد. چنین روشی باید به مدیران پروژه امکان دهد تا با کمینه‌ی ورودی و تلاش، برنامه‌های زمان‌بندی دقیق و به‌روز تولید کنند و ارتباط بین مدل سه‌بعدی و اطلاعات زمانی را به‌صورت خودکار برقرار سازند. در این راستا، برنامه‌نویسی بصری می‌تواند به خودکارسازی فرآیندهای اخیر کمک کند و با ارائه‌ی ابزارهای ساده و گرافیکی، ساخت مدل‌های چهاربعدی و ادغام آن‌ها با اطلاعات زمان‌بندی را تسهیل سازد.

۲. ۳. برنامه‌نویسی بصری و BIM

برنامه‌نویسی بصری، یک رویکرد نوین در توسعه‌ی نرم‌افزار است، که به‌جای نوشتن کدهای پیچیده و متنی، از رابط‌های گرافیکی برای ایجاد برنامه‌ها استفاده می‌کند؛ و در آن، به‌جای کدنویسی خطی از عناصر گرافیکی، مانند: بلوک‌ها، نمودارها، و جریان‌های بصری برای ترسیم و طراحی برنامه‌ها بهره‌برداری می‌شود. رویکرد مذکور، به‌ویژه برای افراد فاقد تخصص عمیق در برنامه‌نویسی، به‌ویژه مهندسان و مدیران پروژه در صنعت ساخت‌وساز، این امکان را فراهم می‌آورد که بدون نیاز به نوشتن کدهای پیچیده، بتوانند برنامه‌های پیچیده را طراحی و اجرا کنند. از آنجا که برنامه‌نویسی بصری با استفاده از تصاویر و نمایش‌های گرافیکی انجام می‌شود، فرآیندهای پیچیده‌تری مانند طراحی مدل‌های سه‌بعدی یا ایجاد مدل‌های چهاربعدی در BIM را ساده‌تر و قابل‌فهم‌تر می‌کند.[۲۷]

در مقایسه با روش‌های سنتی برنامه‌نویسی، که نیاز به تسلط به زبان‌های برنامه‌نویسی دارند، برنامه‌نویسی بصری به‌ویژه برای افراد غیرتخصصی در حوزه‌های فنی، ابزاری کارآمد و جذاب است و می‌تواند به‌طور مؤثری در کنار BIMبه‌ویژه در زمینه‌های برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت، تسهیل‌کننده‌ی فرآیندهای کاری باشد. در این فرآیندها، ایجاد مدل‌های چهاربعدی، که در آن زمان‌بندی با مدل‌های سه‌بعدی BIM همگام می‌شود، می‌تواند با استفاده از برنامه‌نویسی بصری به‌شکل خودکار و ساده‌تری انجام گیرد.[۲۸] به‌ویژه برای مدیران پروژه و مهندسان، استفاده از روش مذکور در کنار ابزارهای BIM ، نیاز به نوشتن کدهای پیچیده را کاهش می‌دهد و به افزایش سرعت و دقت در فرآیند طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها کمک می‌کند.

با این حال، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از برنامه‌نویسی بصری وجود دارد. به‌عنوان مثال، قابلیت‌های پیشرفته‌ای که در زبان‌های برنامه‌نویسی سنتی مانند Python یا C++ وجود دارند، در محیط‌های برنامه‌نویسی بصری کاملاً پشتیبانی نمی‌شوند. علاوه‌بر این، چالش‌هایی در زمینه‌ی تعامل داده‌ها بین نرم‌افزارهای مختلف، همچنان یکی از موانع اصلی پذیرش و گسترش برنامه‌نویسی بصری در صنعت ساخت‌وساز محسوب می‌شود.[۲۹]

در میان ابزارهای برنامه‌نویسی بصری، Dynamo یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارهایی است که در کنار نرم‌افزار Autodesk Revit، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای BIM است، که به‌خوبی عمل می‌کند. Dynamo مستقیماً به Revit متصل می‌شود و با استفاده از محیط گرافیکی خود، به کاربر این امکان را می‌دهد که فرآیندهای پیچیده را به‌صورت بصری و بدون نیاز به کدنویسی پیچیده مدیریت کند. استفاده از Dynamo در ترکیب با BIM در زمینه‌های مختلف طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت‌وساز، کاربردهای فراوانی دارد و می‌تواند به بهبود فرآیندهای کاری کمک کند.[۳۰]

درنهایت، هدف از روش‌های برنامه‌نویسی بصری، خودکارسازی و تسهیل فرآیندهای مختلف در صنعت ساخت‌وساز، به ویژه در برنامه‌ریزی پروژه‌هاست؛

[2] Ciribini

[3] Altun & Akcamete

که می‌تواند در مراحل مختلف برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت، از جمله ایجاد مدل‌های چهاربعدی، مدیریت زمان‌بندی، و تخصیص منابع استفاده شود.

۲. ۴. کاربرد برنامه‌نویسی بصری در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت

چن[4] و همکاران (۲۰۲۰)،[۳۱] راهکاری برای استفاده از برنامه‌نویسی بصری و BIMجهت نظارت بر پروژه و تصحیح برنامه‌ی زمان‌بندی ارائه داده‌اند. ایشان با استفاده از فناوریRFID، به نظارت بر پروژه و تصحیح برنامه‌ی زمان‌بندی پرداخته و اطلاعات موردنیاز از مدل BIM را با کمک Dynamo استخراج کرده و در کنار اطلاعات مربوط به برچسب‌های RFID موجود در المان‌های پروژه، در پایگاه داده‌ی SQLite قرار داده‌اند، تا زمان‌بندی و میزان پیشرفت پروژه تطبیق داده شوند.

شیخ‌خشکار و همکاران (۲۰۱۹)،[۸] با بهره‌گیری از BIM و برنامه‌نویسی بصری توانسته‌اند برنامه‌ی زمان‌بندی بتن‌ریزی دال‌های ساختمانی را محاسبه کنند. ایشان با استفاده از ابزار Dynamo، اطلاعات هندسی و مشخصات مصالح عناصر ساختمانی را از BIM خوانده و به نرم‌افزار Microsoft Excel منتقل کرده‌اند. اتصال اخیر به‌صورت خودکار و بدون نیاز به مراحل واسطه‌ای اضافی انجام شده است، زیرا Dynamo گره‌یی دارد که می‌تواند با نرم‌افزار Excel مستقیماً ارتباط برقرار کند. پژوهشگران پس از انتقال داده‌ها به Excel، اطلاعات مرتبط را از نرم‌افزار MATLAB خوانده و با اعمال محدودیت‌ها و الزام‌های مختلف، برنامه‌ی زمان‌بندی بتن‌ریزی هر ناحیه از دال‌ها را محاسبه کرده‌اند.

مازارس و فرانسیس[5] (۲۰۲۰)،[۳۲] در نوشتار خود به اهمیت مدیریت فضای کار و فعالیت‌ها از منظر خالی یا اِشغال بودن و گروه‌های کارگری برای بهبود کارایی و ایجاد برنامه‌ی زمانی مناسب در پروژه‌های ساختمانی اشاره کرده‌اند. ایشان با استفاده از BIM و رابط برنامه‌نویسیDynamo ، اطلاعات سه‌بعدی عناصر را استخراج کرده و سپس در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel با استفاده از رابط برنامه‌نویسی Visual Basic، برنامه‌ی زمان‌بندی را برای هر گروه کاری در مکان‌ها و طبقات مشخص ارائه داده‌اند. درنهایت، برنامه‌ی زمان‌بندی چهاربعدی را در نرم‌افزار Autodesk Navisworks به تصویر کشیده‌اند.

ونگ و رضازاده آذر[6] (۲۰۱۹)،[۳۳] با استفاده از BIM در نرم‌افزار Autodesk Revit، اطلاعات هندسی عناصر را از طریق رابط برنامه‌نویسیDynamo استخراج کرده‌اند. سپس با اعمال قواعد ساخت، دانش پیشین، و داده‌های نرخ بهره‌وری، بسته‌های کاری پروژه را ایجاد، مدت زمان اجرای آن‌ها را محاسبه، و روابط میان آن‌ها را تعیین کرده‌اند. درنهایت، نتایج به‌دست‌آمده را با استفاده از نرم‌افزار مدیریت پروژه MS Project در قالب یک برنامه‌ی زمان‌بندی ارائه کرده‌اند. ونگ و همکاران (۲۰۲۰)،[۳۴] نیز با استخراج اطلاعات از BIM به کمک برنامه‌نویسی بصری، دسته‌بندی کاری را به‌صورت نیمه‌خودکار ایجاد و سپس برای پروژه‌ی موردمطالعه‌ی خود، زمان‌بندی را با استفاده از روش ریاضی محدودیت منابع ارائه کرده‌اند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که کاربردهای BIM و برنامه‌نویسی بصری در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌های ساخت‌وساز رشد قابل‌توجهی داشته است. با این حال، چالش‌ها و محدودیت‌های مهمی وجود دارد، که نیازمند پژوهش‌های بیشتر و توسعه‌ی ابزارهای نوآورانه هستند. خلأهای اصلی پژوهش حاضر به این شرح هستند:

۱) ابزارها و رویکردهای فعلی هنوز قابلیت تعریف و به‌روزرسانی شبکه‌ی فعالیت‌های پروژه را به‌صورت یکپارچه در محیط BIM ندارند. این ویژگی یکی از نیازهای اصلی برای مدیریت مؤثر پروژه‌های ساخت‌وساز است.

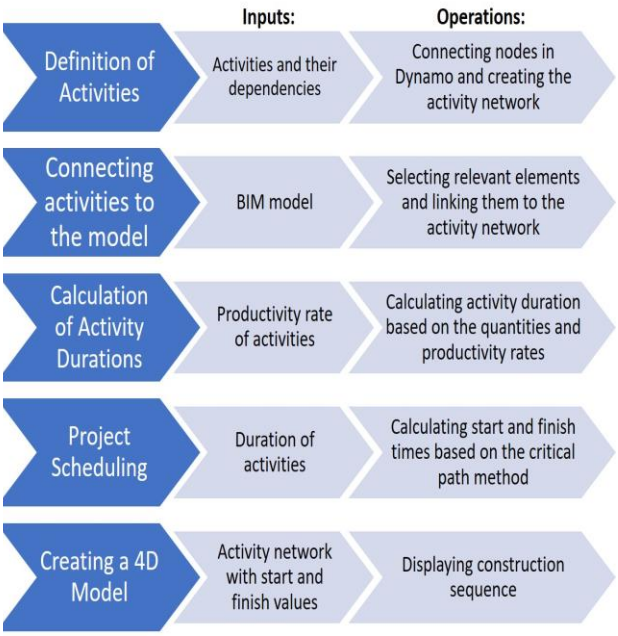
۲) فرآیندهای مربوط به منطق اجرای فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی ساخت‌وساز در محیط‌های BIM به‌خوبی پشتیبانی نمی‌شوند. این موضوع باعث محدودیت در استفاده از ابزارها برای برنامه‌ریزی دقیق و یکپارچه‌ی پروژه‌ها شده است.

۳) ابزار جامع و کاربرپسندی که بتواند تمامی قابلیت‌های مدل‌سازی چهاربعدی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی را در یک محیط گرافیکی واحد ارائه دهد، هنوز توسعه نیافته است. وجود چنین ابزاری می‌تواند نقش مهمی در تسهیل و افزایش بهره‌وری برنامه‌ریزی ساخت ایفا کند.

۴) رویکردهای موجود اغلب نیازمند انتقال یا تبدیل داده‌ها بین سیستم‌های مختلف هستند. این امر موجب پیچیدگی در مدیریت داده‌ها و کاهش دقت و هماهنگی در برنامه‌ریزی پروژه‌ها می‌شود و بهره‌وری کلی را کاهش می‌دهد.

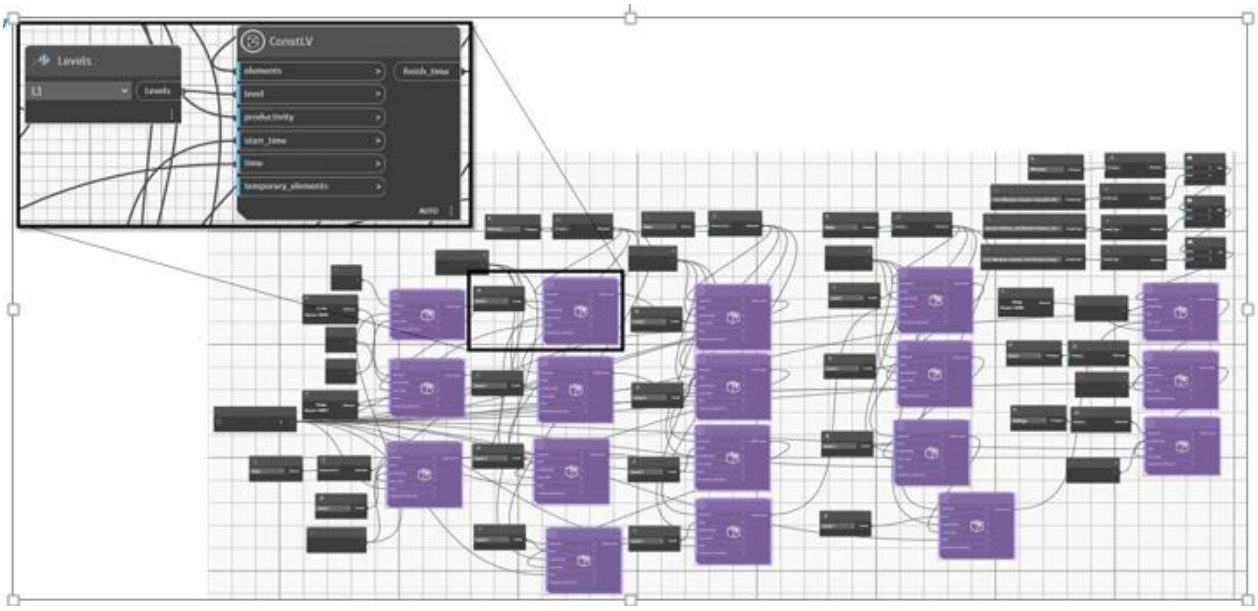
۳. چارچوب پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی در نوشتار حاضر به‌منظور تسهیل برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی و ایجاد مدل چهاربعدی فرآیند ساخت‌وساز بر مبنای BIM از طریق برنامه‌نویسی بصری طراحی شده است؛ که شامل پنج مرحله‌ی اصلی است: (۱) تعریف فعالیت‌ها و وابستگی‌ها، (۲) اتصال فعالیت‌ها به مدل BIM، (۳) محاسبه‌ی زمان فعالیت‌ها، (۴) برنامه‌ریزی زمان‌بندی پروژه، و (۵) ایجاد خودکار مدل چهاربعدی فرآیند ساخت پروژه. در شکل ۱، فرآیند چارچوب پیشنهادی، ورودی‌ها، و نحوه‌ی عملیات هر یک از مراحل مشاهده می‌شود. در



شکل ۱. مراحل اصلی چارچوب پیشنهادی.

[4] Chen
[5] Mazars & Francis
[6] Wang & Rezazadeh Azar



شکل ۲. شمای کلی شبکه‌ی فعالیت‌های پروژه به کمک گره‌های اختصاصی در Dynamo.

پیاده‌سازی فعلی چارچوب ارائه‌شده برای محیط BIM از نرم‌افزار Autodesk Revit و برای برنامه‌نویسی بصری از نرم‌افزار Dynamo استفاده شده است. در ادامه، هر یک از مراحل مذکور به تفصیل توضیح داده شده‌اند.

۳ . ۱. تعریف فعالیت‌ها و وابستگی‌ها

برای ایجاد توالی منطقی فعالیت‌ها از گره‌های به هم متصل در Dynamo استفاده شده است، که هر گره نشانگر یک فعالیت خاص پروژه است. هر گره به فعالیت‌های پیش‌نیاز خود متصل می‌شود و توالی لازم عملیات‌ها را ثبت می‌کند. بدین منظور در نرم‌افزار Dynamo گره‌های اختصاصی توسعه داده شده‌اند. برای نمونه در شکل ۲، گره‌های مربوط به فعالیت‌های مختلف با رنگ بنفش نشان داده شده‌اند. سایر گره‌ها و اتصال‌های آن‌ها در شکل ۲، مربوط به اتصال فعالیت‌ها به مدل BIM و ایجاد مدل چهاربعدی است. برای نمونه، قسمتی از شکل با بزرگ‌نمایی بیشتر انتخاب شده است، که بیانگر فعالیت و انتخاب المان‌های مربوط به طبقه‌ی یک برای آن فعالیت است.

۳ . ۲. اتصال فعالیت‌ها به مدل BIM

گره‌های مربوط به فعالیت‌ها، انواع مختلف فعالیت‌های یک پروژه را نمایندگی می‌کنند و در ترکیب با سایر گره‌ها و المان‌های BIM می‌توانند برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را به‌صورت خودکار ایجاد کنند. هر فعالیت می‌تواند به المان‌های خاصی از مدل BIM مربوط بوده و مدت زمان انجام فعالیت به مقادیر متره‌ی المان‌های BIM بستگی داشته باشد، یا ممکن است فعالیتی تعریف شود که المان‌های BIM آن اصلاً تعریف نشده یا اگر تعریف شده‌اند، نمی‌توان از مقادیر متره‌ی آن‌ها، مدت زمان موردنیاز برای انجام فعالیت موردنظر را به‌دست آورد.

نکته‌ای که در ایجاد شبکه‌ی فعالیت‌ها لازم است به آن توجه شود، ارتباط بین میزان جزئی‌بودن فعالیت‌های در نظر گرفته‌شده در شبکه‌ی فعالیت و مدل BIM است. فعالیت‌هایی که در شبکه‌ی فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شوند، بهتر است به سطح توسعه‌ی مدل (LOD) در BIM بستگی داشته باشند. به این معنا که هر چه مدل، جزئیات بیشتری داشته باشد، بهتر است فعالیت‌ها به‌صورت دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری تعریف شوند، تا بتوان برنامه‌ی زمان‌بندی دقیق‌تر و مدل چهاربعدی بهتری ایجاد کرد. برای مثال، اگر بخش سازه‌ی مدل، شامل المان‌هایی مانند قالب‌بندی و آرماتوربندی باشد، می‌توان برای هر کدام از آن قسمت‌ها، فعالیت‌های مجزایی تعریف کرد. اما اگر فقط پی ساختمان مدل شده باشد و قالب‌بندی جداگانه مشخص نشده باشد، می‌توان برنامه‌ریزی را با جزئیات کمتری انجام داد، که در آن تمامی وظایف مربوط به پی‌سازی به‌عنوان یک فعالیت واحد در نظر گرفته شوند. به زبان دیگر، سطح جزئیات فعالیت‌ها کاملاً بستگی به نظر کاربر (برنامه ریز پروژه) دارد، اما اگر برنامه‌ریزی مطابق با سطح جزئیات موجود در مدل باشد، از پیچیدگی غیرضروری جلوگیری می‌شود.

انتخاب المان‌ها برای فعالیت‌ها می‌تواند براساس ساختار پروژه، سفارشی‌سازی شود و دو رویکرد اصلی دارد: انتخاب مبتنی بر طبقه و انتخاب دستی. هر روش بسته به فعالیت مد نظر، مزایای متمایزی دارد. انتخاب مبتنی بر طبقه برای فعالیت‌هایی مناسب است که یک فرآیند ساخت ترتیبی طبقه به طبقه را دنبال می‌کنند، مانند دیوارچینی در ساختمان‌های چندطبقه. در این حالت، المان‌هایی که وارد گره‌ی فعالیت می‌شوند، از یک فیلتر اضافی رد می‌شوند و با گرفتن اشتراک بین المان‌های ورودی و المان‌های یک طبقه‌ی خاص، فقط المان‌هایی را پیدا می‌کنند که در طبقه‌ی خاصی تعریف شده‌اند. به این ترتیب، توسعه‌دهندگان می‌توانند به راحتی پیشرفت منطقی را از یک طبقه به طبقه‌ی دیگر برای فعالیت‌ها تعریف کنند.

روش انتخاب دستی، برای فعالیت‌های پروژه‌هایی مناسب است که به‌صورت قسمت‌بندی یا نواحی عملکردی بزرگ‌تر سازماندهی شده‌اند؛ مانند: دانشگاه‌ها، فضاهای تجاری باز، یا تأسیسات صنعتی پیچیده. در این موارد، المان‌ها به‌صورت دستی از مدل BIM انتخاب می‌شوند و به کاربر این امکان را می‌دهند که آزادی بیشتری در تعریف و سازماندهی نواحی ساخت‌وساز، که با نیازهای فضایی پروژه هم‌راستا هستند، داشته باشد. در حالی که انتخاب دستی، کنترل بیشتری بر گروه‌بندی‌های خاص المان‌ها ارائه می‌دهد، نیاز به ورودی اضافی از کاربر دارد، که باید هر ناحیه‌ی فعالیت را به دقت تعریف کند. به‌علاوه، برخی از فعالیت‌ها مانند نصب پنجره، لزوماً طبقه به طبقه انجام نمی‌شوند و نیازی به واردکردن فیلتر اضافی مربوط به طبقه وجود ندارد.

برخی از فعالیت‌ها ممکن است به المان‌هایی مربوط باشند که در مدل BIM طراحی نشده‌اند. در این مواقع، می‌توان ورودی المان‌های مربوط به فعالیت را

خالی گذاشت و فعالیت مذکور فقط مدت زمان را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند. برای مثال، ممکن است تجهیزات کارگاه در BIM مدل نشده باشند، اما لازم باشد فعالیت اخیر در ساختار شبکه‌ی فعالیت‌های پروژه و در کنار سایر فعالیت‌ها تعریف شود. با وجودی که فعالیت تجهیزات کارگاه مستقیماً با المان‌های مدل BIM ارتباطی ندارد، ولی روی سایر فعالیت‌ها در ساختار شبکه تأثیرگذار است و در نتیجه، برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مورد دیگری که در چارچوب پیشنهادی به آن توجه شده است، اتصال المان‌های موقت به فعالیت‌های مرتبط است. برای مثال، کارگران، ماشین‌آلات، و به‌صورت کلی تمام المان‌هایی که در زمان اجرای یک فعالیت استفاده می‌شوند، می‌توانند به گره‌ی فعالیت متصل شوند.

۳.۳. محاسبه‌ی زمان فعالیت‌ها

در حالتی که مقادیر متره‌ی المان‌های مربوط به هر فعالیت برای محاسبه‌ی مدت زمان فعالیت مؤثر هستند، برای بهره‌برداری کامل از مزایای رویکرد مبتنی بر BIM، با استفاده از مقادیر متره (q) که به‌صورت خودکار برای المان‌های مربوط به هر فعالیت محاسبه می‌شوند؛ نرخ بهره‌وری هر فعالیت (p) و مدت زمان انجام آن محاسبه می‌شود.

نرخ بهره‌وری معمولاً براساس داده‌های تاریخی، یا نظر کارشناسی تعیین می‌شود.[۳۵] نرخ بهره‌وری همچنین باید با توجه به منابع موجود در پروژه و جزئیات تعریف‌شده در مدل و شبکه‌ی فعالیت‌ها باشد. به‌عنوان مثال، اگر اجرای پی ساختمان به‌صورت یک فعالیت واحد مدل‌سازی شده باشد، نرخ بهره‌وری باید تمام ریزفعالیت‌های مربوط به ساخت پی، مانند قالب‌بندی و نصب آرماتور را در نظر بگیرد. به این ترتیب می‌توان اطمینان حاصل کرد که یک زمان‌بندی واقع‌گرایانه برای فعالیت ارائه شده است. در مقابل، اگر قالب‌بندی به‌صورت فعالیت جداگانه در شبکه‌ی فعالیت‌ها وجود داشته باشد، در این صورت باید برای هر کدام از ریزفعالیت‌ها، نرخ بهره‌وری را جداگانه تعریف کرد. به این ترتیب، چارچوب مذکور، زمان‌بندی را برای سطوح مختلف جزئیات پروژه قابل‌تنظیم می‌سازد.

مقادیر برآورد متره‌ی (q) استخراج‌شده از مدل BIM، براساس المان‌های ساختمانی مرتبط با هر فعالیت و معیار اندازه‌گیری مناسب تعیین می‌شود. در چارچوب پیشنهادی، فعالیت‌ها به سه روش اندازه‌گیری برآورد می‌شوند: ۱) فعالیت‌ها ممکن است حجم‌محور باشند (مانند بتن‌ریزی و خاک‌برداری)؛ ۲) برخی فعالیت‌ها براساس مساحت اندازه‌گیری می‌شوند (مانند نصب کف و رنگ‌آمیزی)؛ ۳) برای برخی فعالیت‌ها می‌توان از شمارش تعداد المان‌ها استفاده کرد (مانند نصب درها و پنجره‌ها). پس از محاسبه‌ی متره با واحد مشخص‌شده، با استفاده از رابطه‌ی ۱، مدت زمان انجام فعالیت محاسبه می‌شود:

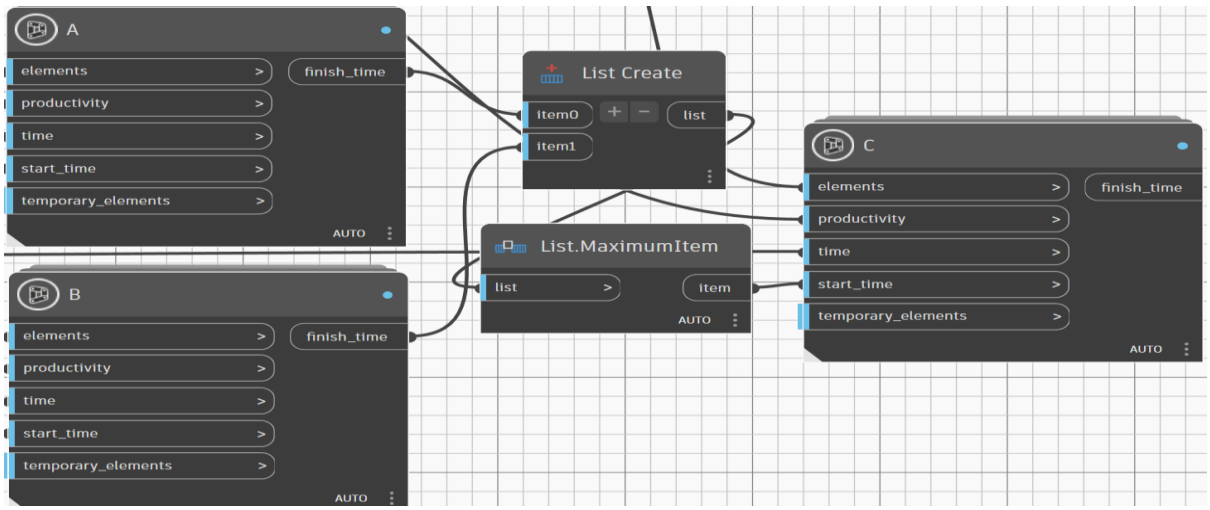
$$d = \frac{q}{p} \qquad (1)$$

به‌علاوه همان‌طور که قبلاً گفته شد، ممکن است فعالیت‌هایی وجود داشته باشند که با وجود المان‌های تعریف‌شده برای آن‌ها، زمان انجام‌شان براساس مقدار المان‌ها در مدل محاسبه نشود و کاربر ترجیح دهد که مدت زمان را مستقیماً به مدل وارد کند. بنابراین، چهار نوع فعالیت از منظر محاسبه‌ی مدت زمان در نظر گرفته شده است: (۱) مبتنی بر حجم؛ (۲) مبتنی بر مساحت؛ (۳) مبتنی بر تعداد؛ و (۴) مبتنی بر ارائه‌ی مستقیم زمان.

۳.۴. محاسبه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه

با تعریف گره‌های مربوط به فعالیت‌ها و اتصال آن‌ها به یکدیگر، مدت‌زمان هر فعالیت براساس داده‌های BIM به‌صورت بلادرنگ محاسبه می‌شود؛ که برای انجام آن، چارچوب پیشنهادی براساس منطق مسیر رفت در روش مسیر بحرانی، زودترین زمان‌های شروع و پایان فعالیت‌ها را محاسبه می‌کند. به این منظور، از منطق برنامه‌نویسی بصری استفاده شده است، که در آن خروجی یک گره، ورودی گره‌ی بعدی است. یکی از ورودی‌های گره‌های اختصاصی ایجادشده برای انواع فعالیت‌ها، زمان شروع (start_time) است و فقط خروجی گره‌های اختصاصی فعالیت‌ها، زودترین زمان پایان فعالیت (finish_time) است. زمان پایان به‌صورت ساده با جمع زمان شروع و مدت زمان انجام فعالیت (d) محاسبه می‌شود. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، محاسبه‌ی مدت زمان در بسیاری از فعالیت‌ها با درنظرگرفتن مقادیر متره در درون گره‌ی اختصاصی فعالیت محاسبه شده است.

در شبکه‌ی فعالیت‌ها، خروجی هر گره به ورودی start_time گره‌ی بعد متصل شده است. به این ترتیب با استفاده از منطق Dynamo، زمان شروع به‌صورت خودکار محاسبه می‌شود. اما زمانی که چند فعالیت پیش‌نیاز فعالیت بعدی هستند، از یک فهرست و دستور محاسبه‌ی بیشینه (maximum) برای اتصال فعالیت‌ها به هم استفاده شده است. برای نمونه، در شکل ۳، بخشی از یک شبکه‌ی فعالیت مشاهده می‌شود، که در آن، فعالیت‌های A و B پیش‌نیاز



شکل ۳. مدل‌کردن پیش‌نیاز فعالیت‌ها به کمک گره‌های اختصاصی در Dynamo.

فعالیت C هستند. با شیوه‌ی اتصال پیشنهادی و منطق پیاده‌شده در گره‌ی اختصاصی فعالیت، زودترین زمان شروع و پایان فعالیت C براساس فعالیت‌های A و B به صورت خودکار محاسبه می‌شود.

۳ . ۵. ایجاد خودکار مدل چهاربعدی فرآیند ساخت پروژه

برای بهره‌برداری کامل از مزایای BIM، یک رویکرد مدل‌سازی خودکار چهاربعدی نیز در چارچوب پیشنهادی ادغام شده است، که از سطوح شفافیت برای پنهان و نمایان‌کردن دینامیک المان‌ها براساس پیشرفت فعالیت استفاده می‌کند. به این ترتیب، امکان مشاهده‌ی توالی‌های ساخت در طول زمان فراهم می‌شود.

برای ایجاد مدل خودکار چهاربعدی، ورودی زمان، که زمان فعلی شبیه‌سازی را مشخص می‌کند، به‌عنوان یک ورودی کلیدی برای کلیه‌ی گره‌های اختصاصی فعالیت‌ها تعریف شده است. سپس سطح شفافیتی که برای فعالیت لازم است، براساس زمان فعلی در شبیه‌سازی و نوع فعالیت محاسبه شده است. فعالیت‌ها براساس نوع، می‌توانند مربوط به ساخت یا تخریب باشند:

- فعالیت‌های تخریب شامل حذف ساختارها یا اجزاء موجود هستند.
- فعالیت‌های ساخت، مربوط به کار ساخت یا مونتاژ هستند.

نمایش هر عنصر از طریق سطح شفافیت (tr) مدیریت می‌شود، که براساس زمان فعلی در شبیه‌سازی ($tnow$)، زمان شروع فعالیت (s)، و مدت‌زمان آن (d) متفاوت است. برای فعالیت‌های ساخت، شفافیت قبل از شروع فعالیت ، ٪۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در زمان شروع فعالیت، شفافیت از ٪۸۰ (بسیارشفاف)در نظر گرفته شده و به‌تدریج به ٪۰ (کاملاً نمایان) کاهش یافته است. به این ترتیب المان‌های مدل با پیشرفت روند ساخت آن‌ها بصری‌تر می‌شوند. روش محاسبه‌ی سطح شفافیت مطابق رابطه‌ی ۲ است:

$$tr=\begin{cases}100 & ,\ tnow\le s\\ 80\times(1-\dfrac{tnow-s}{d}), & s<tnow\le s+d\\ 0 & ,\ s+d<tnow\end{cases} \qquad (2)$$

به‌صورت مشابه، فعالیت‌های تخریب قبل از شروع فعالیت، شفافیت ٪۰ دارند، یعنی کاملاً نمایان هستند. در زمان شروع فعالیت از ٪۰، شفافیت به‌تدریج و براساس زمان شبیه‌سازی درجه‌ی شفافیت تا ٪۸۰ افزایش می‌یابد، که باعث می‌شود المان‌های مرتبط در زمان‌های نزدیک به انتهای فعالیت کم‌رنگ‌تر دیده شوند. نهایتاً، بعد از اتمام فعالیت، شفافیت به ٪۱۰۰ تغییر می‌یابد، که باعث می‌شود در ادامه‌ی فرآیند شبیه‌سازی، المان‌های مذکور دیگر نمایش داده نشوند. در رابطه‌ی ۳، محاسبه‌ی میزان شفافیت در حالت مذکور ارائه شده است:

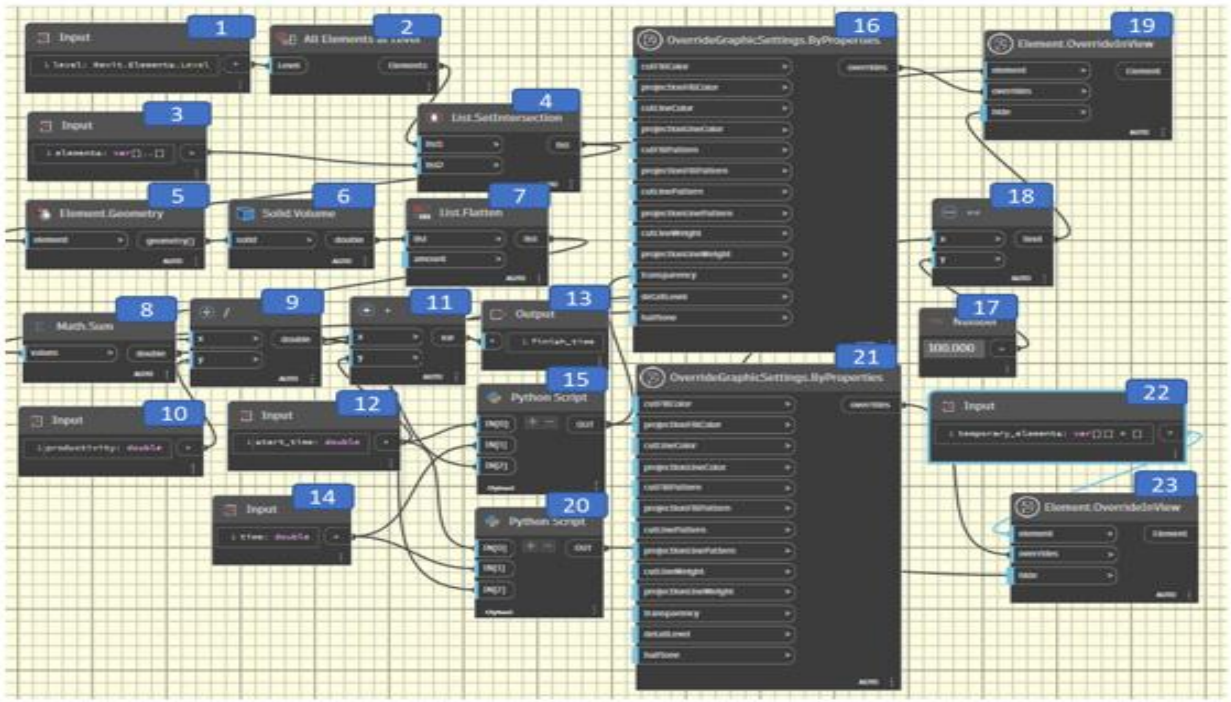
$$tr=\begin{cases}0 & ,\ tnow\le s\\ 80\times(1-\dfrac{tnow-s}{d}), & s<tnow\le s+d\\ 100 & ,\ s+d<tnow\end{cases} \qquad (3)$$

علت تغییر شفافیت ناگهانی از ۸۰ به ۱۰۰ درصد این است که امکان تفکیک بصری دقیق‌تر بین المان‌های در حال ساخت و المان‌های تکمیل‌شده فراهم شود. این تفکیک بصری کمک می‌کند تا کاربران بتوانند به‌راحتی وضعیت پیشرفت هر المان را در فرآیند ساخت تشخیص دهند. برای تعیین میزان شفافیت، از گره‌های موجود در Dynamo استفاده شده است؛ که آن‌ها با دریافت مقادیر شفافیت به‌عنوان ورودی، کنترل دینامیک شفافیت المان‌ها را بر عهده دارند. مورد دیگری که در چارچوب پیشنهادی به آن توجه شده است، نمایش المان‌هایی است که در زمان اجرای یک فعالیت استفاده می‌شوند و فقط لازم است به‌صورت موقت در مدل نمایش داده شوند. بدین منظور، یک فهرست ورودی از المان‌های موقت برای هر فعالیت در نظر گرفته شده است. تمام المان‌های موجود در فهرست اخیر در زمان اجرای فعالیت در مدل به‌صورت بصری نمایش داده می‌شوند و پس از اتمام فعالیت مشاهده نمی‌شوند. نمایش موقت المان‌های استفاده‌شده، نمایش پروژه را بهبود می‌بخشد و درک بهتری از استفاده از منابع در طول فرآیند ساخت فراهم می‌سازد. روش اخیر به ذینفعان این امکان را می‌دهد که نه فقط پیشرفت فیزیکی پروژه را مشاهده کنند، بلکه استقرار منابع را نیز به‌صورت لحظه‌ای تجسم کنند.

۳ . ۶. پیاده‌سازی گره‌های اختصاصی

با ترکیب دسته‌بندی‌های مربوط به فعالیت‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر، در مجموع ۱۶ (۲×۴×۲) گره‌ی اختصاصی Dynamo مربوط به تعریف انواع فعالیت‌ها ایجاد شده است (۲ روش برای انتخاب المان‌ها، ۴ روش برای محاسبه‌ی متره و مدت زمان، و ۲ روش برای نمایش ساخت یا تخریب). طراحی مذکور به توسعه‌دهندگان امکان می‌دهد چارچوب زمان‌بندی را با نیازهای خاص هر پروژه تطبیق دهند. در حالی که ممکن است یک گره‌ی فعالیت چندپارامتری واحد ایجاد کرد تا همه‌ی دسته‌بندی‌ها را در بر گیرد؛ اما چنین طراحی به یک فضای کاری پیچیده‌ی Dynamo با ورودی‌های متعدد برای هر گره منجر می‌شود. لذا، تصمیم گرفته شد تعداد بیشتری از گره‌های تخصصی ایجاد شوند؛ که هر کدام، ورودی‌های کمتری داشته باشند. برای نمونه، ساختار داخلی یکی از گره‌های اختصاصی طراحی‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که در آن گره‌های داخلی برای ارائه‌ی بهتر توضیحات شماره‌گذاری شده‌اند. گره‌های ۱ الی ۴، برای انتخاب المان‌ها براساس طبقه استفاده می‌شوند.

ابتدا، تمام المان‌های یک طبقه با استفاده از گره‌های ۱ و ۲ انتخاب شده‌اند. سپس، اشتراک این مجموعه با المان‌های ورودی در گره‌ی ۴ گرفته شده است، تا فقط المان‌های متعلق به طبقه‌ی مشخص‌شده انتخاب شوند. گره‌های ۵ الی ۸ برای محاسبه‌ی مقدار متره (در این گره حجم) استفاده شده‌اند. ابتدا، حجم هر المان ورودی به‌صورت یک فهرست توسط گره‌های ۵ و ۶ محاسبه شده است. سپس، در گره‌ی ۸ مجموع کل حجم المان‌های ورودی به‌دست آمده است. گره‌های ۹ الی ۱۳ برای محاسبه‌ی مدت زمان فعالیت و زمان پایان فعالیت استفاده شده‌اند. ابتدا، مقدار حجم محاسبه‌شده از گره‌ی ۸ بر بهره‌وری (گره‌ی ۱۰) تقسیم شده است (گره‌ی ۹)، تا مدت زمان انجام فعالیت مشخص شود. سپس، این مقدار به زمان شروع فعالیت (گره‌ی ۱۲) اضافه شده است، تا زمان اتمام فعالیت محاسبه شود. برای نمایش چهاربعدی نیز از گره‌های ۱۴ الی ۲۳ استفاده شده است. به این ترتیب که گره‌های ۱۵ الی ۱۷ برای نمایش شفافیت مناسب المان‌هایی که قرار است ساخته شوند، براساس میزان پیشرفت پروژه طراحی شده‌اند. به‌صورت خاص، گره‌ی ۱۵، رابطه‌ی ۲ را با کد پایتون پیاده‌سازی می‌کند. سپس، گره‌های ۱۶ و ۱۹ برای به‌روزرسانی میزان شفافیت المان در حال ساخت بر اساس خروجی گره‌ی ۱۵ استفاده شده‌اند. اگر مقدار محاسبه‌شده در گره‌ی ۱۵ برابر ۱۰۰ باشد، یعنی المان کاملاً پنهان شده است. در این حالت، گره‌ی ۱۸ این وضعیت را بررسی و در صورت نیاز، فرآیند پنهان‌سازی در گره‌ی ۱۹ را فعال می‌کند. گره‌های ۲۰ الی ۲۳، مربوط به



شکل ۴. پیاده‌سازی داخلی یک گره‌ی اختصاصی فعالیت، که در آن فیلتر طبقه وجود دارد و محاسبه‌ی متره براساس حجم المان‌های متصل انجام شده است.

نمایش اجزاء موقت در مدل هستند. به‌صورت خاص، گره‌ی ۲۰ یک مقدار *True* یا *False* را براساس زمان شروع، زمان فعلی شبیه‌سازی، و مدت زمان فعالیت محاسبه می‌کند، که نشانگر نمایش یا عدم نمایش المان‌های موقت است. گره‌ی ۲۱، ورودی خاصی ندارد، اما گره‌ی ۲۳ برای به‌روزرسانی مدل به آن نیاز دارد.

سایر انواع فعالیت‌ها هم با روش مشابهی به صورت گره‌های اختصاصی در Dynamo ایجاد شده‌اند، که می‌توانند بنا به نیاز پروژه از ترکیب فعالیت‌های مذکور برای مشخص‌کردن روند ساخت پروژه در شبکه‌ی فعالیت استفاده شوند.

۴. مطالعه‌ی موردی

چارچوب پیشنهادی روی یک مطالعه‌ی موردی مربوط به یک ساختمان مسکونی چهارطبقه واقع در شهرستان دماوند در استان تهران با مساحت حدود ۷۰۰ مترمربع و اسکلت بتنی طراحی و پیاده‌سازی شده است. مدل BIM معماری پروژه‌ی اخیر در نرم‌افزار Autodesk Revit ایجاد شده است، که شامل برخی از ماشین‌آلات اصلی موردنیاز برای فعالیت‌های پروژه است. مراحل پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی به ترتیب شامل ایجاد شبکه‌ی فعالیت‌ها و اتصال آن‌ها به مدل BIM، محاسبه‌ی زمان، و برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه، و نمایش چهاربعدی آن است، که در ادامه توضیح داده شده است.

۴ . ۱. ایجاد شبکه‌ی فعالیت‌ها و اتصال به BIM

از آنجا که سازه‌ی ساختمان موردمطالعه، بتنی بوده است، اغلب فعالیت‌ها به‌صورت طبقه به طبقه در نظر گرفته شده‌اند و برای مدل‌سازی آن‌ها از گره‌های اختصاصی جهت فیلترکردن استفاده شده است. برای انتخاب المان‌ها، در اغلب موارد از گره‌های از پیش‌تعریف‌شده در Dynamo استفاده شده است، که برای انتخاب همه‌ی المان‌های یک نوع خاص طراحی شده‌اند. مثلاً تمام المان‌های مربوط به یک family یا یک category یا class مشخص، به کمک گره‌های مذکور انتخاب می‌شوند. سپس با تعیین طبقه‌ی مرتبط، المان‌های موردنظر برای فعالیت خاص فیلتر می‌شوند. المان‌های موقت تعریف‌شده نیز به ورودی المان‌های موقت (temporary-elements) گره‌ی فعالیت مرتبط متصل شده‌اند، که شامل یک ماشین خاکبردار و یک جرثقیل برای نصب پنجره‌ها بوده است.

۴ .۲. محاسبه‌ی زمان انجام فعالیت‌ها و ایجاد برنامه‌ی زمان‌بندی

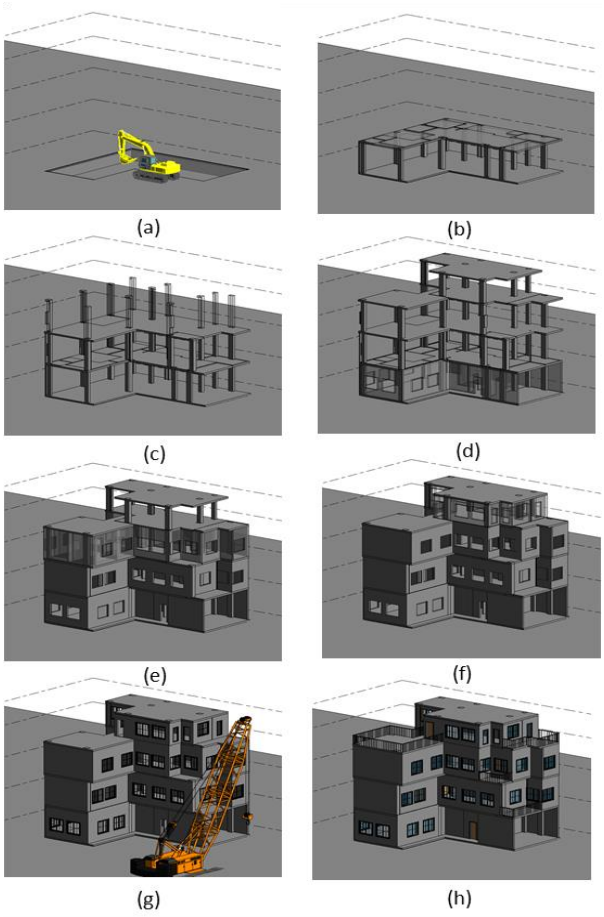
به‌منظور افزایش دقت زمان‌بندی پروژه، برخی فعالیت‌ها (مانند تجهیز کارگاه) در شبکه‌ی فعالیت‌ها گنجانده شده‌اند. اما از آنجایی که المان‌های مرتبط با فعالیت‌های مذکور مدل‌سازی نشده‌اند، آن ها به المان خاصی پیوند داده نشده و زمان اجرای آن‌ها مستقیماً به مدل داده شده است. در سایر موارد، فعالیت‌ها به المان‌های مرتبط در مدل BIM پیوند داده شده‌اند و مدت زمان آن‌ها بسته به متره‌ی المان‌های مذکور و واحد اندازه‌گیری مشخص و همچنین برآورد بهره‌وری با توجه به اکیپ‌های کاری و تجهیزات پروژه، همان‌طور که در بخش پیش توضیح داده شد، به گره‌های اختصاصی Dynamo وارد شده است.

با استفاده از منطق تعبیه‌شده در گره‌های اختصاصی، پس از اتمام ساخت شبکه‌ی فعالیت‌ها و واردکردن اطلاعات بهره‌وری و زمانی، زودترین زمان شروع و پایان هر فعالیت به‌صورت خودکار و بلادرنگ محاسبه و به این ترتیب برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه به‌صورت خودکار آماده شده است.

۴ .۳. نمایش چهاربعدی فرآیند ساخت

تمامی فعالیت‌ها به جز خاکبرداری از نوع ساخت تعریف شده‌اند؛ در حالی که فعالیت خاکبرداری از نوع تخریب در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در مدل چهاربعدی، ابتدا المان تعریف‌شده برای خاک مشاهده و سپس با گذشت زمان شبیه‌سازی ناپدید می‌شود و به‌جای آن فونداسیون قرار می‌گیرد.

همچنین، یک گره برای نمایش زمان فعلی شبیه‌سازی به ورودی زمان (*time*) تمامی فعالیت‌ها متصل شده است، که با تغییر مقدار زمان، وضعیت نمایش مدل تغییر می‌کند. در ابتدای شبیه‌سازی، با قراردادن زمان در صفر، تمامی المان‌های ساختمان به حالت مخفی در می‌آیند. زمان پروژه با استفاده از یک



شکل ۵. برخی مراحل نمایش داده‌شده در مدل چهاربعدی: (الف) خاکبرداری، (ب و پ) اجرای سازه، (ت، ث، و ج) ساخت دیوارها، (چ) نصب پنجره‌ها، و (ح) مدل تکمیل‌شده.

نوار لغزنده که زمان فعلی شبیه‌سازی (tnow) را تعیین می‌کند، به جلو پیش می‌رود. با پیشرفت زمان، ساختمان به‌تدریج و براساس پیشرفت پروژه، المان‌های مرتبط را نمایش می‌دهد و مراحل ساخت به‌صورت یک مدل چهاربعدی بازنمایی می‌شود. این شبیه‌سازی تا زمان اتمام پروژه ادامه دارد. در شکل ۵، برخی از مراحل نمایش چهاربعدی در مطالعه‌ی موردی به تصویر کشیده شده است.

در شکل ۵- الف، عملیات خاکبرداری در کنار ماشین خاکبردار مشاهده می‌شود. ماشین خاکبردار در تمام مدت عملیات حضور دارد و هم‌زمان، بخش مربوط به خاکبرداری به‌تدریج شفاف‌تر و درنهایت ناپدید می‌شود. شکل‌های ۵ (ب و پ) دو مرحله از ساخت اسکلت ساختمان را نشان می‌دهند. در شکل ۵- ب، سقف طبقه‌ی اول در حال ساخت است و تا حدی شفاف دیده می‌شود، در حالی که در شکل ۵- پ، ستون‌های طبقه‌ی سوم در حال ساخت هستند. شکل‌های ۵ (ت، ث، و ج) سه مرحله از ساخت دیوارها را نمایش می‌دهند، که به‌ترتیب مربوط به طبقه‌های اول، سوم، و چهارم هستند. شکل ۵- چ، زمان نصب پنجره‌ها را نشان می‌دهد و به همین دلیل، جرثقیل در تصویر مشاهده می‌شود. درنهایت، شکل ۵- ح، مرحله‌ی اتمام ساخت را نمایش می‌دهد. در پروژه‌ی ذکرشده، فقط با تعیین روند انجام فعالیت‌ها، انتخاب المان‌های مرتبط و واردکردن بهره‌وری‌های تخمینی، برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه و مدل چهاربعدی به‌صورت خودکار ایجاد شده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به شبکه‌ی فعالیت‌ها برای مثال ساده.[۳۶]

Activity	A	B	C	D	E	F	G	H
Duration	7	3	6	3	3	2	3	2
Prerequisite	–	–	A	B	D, F	B	C	E, G

۵. راستی‌آزمایی

چارچوب ارائه‌شده از دو دیدگاه بررسی شده است: ۱) بررسی درستی محاسبات زمان شروع و پایان هر فعالیت و زمان کل پروژه در شبکه‌ی فعالیت‌ها؛ ۲) بررسی نتایج مطالعه‌ی موردی.

۵ .۱. راستی‌آزمایی محاسبه‌های شبکه‌ی فعالیت‌ها

درستی محاسبات چارچوب پیشنهادی از طریق مثال‌های عددی ارزیابی شده‌اند. چند شبکه‌ی فعالیت از منابع معتبر انتخاب و در Dynamo پیاده‌سازی و نتایج آن‌ها با داده‌های منابع اصلی مقایسه شده است. به عنوان نمونه، یک مثال برگرفته از سنتیاگو و ماگالون[۷] (۲۰۰۹)،[۳۶] بررسی شده است، که اطلاعات فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی آن‌ها در جدول ۱ ارائه و پیاده‌سازی آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که زمان‌های محاسبه‌شده برای شروع و پایان فعالیت‌ها و مدت زمان کل پروژه در چارچوب پیشنهادی دقیقاً با مقادیر ذکرشده در منبع مطابقت دارد و در هر دو مورد، ۱۸ روز به‌دست آمده است.

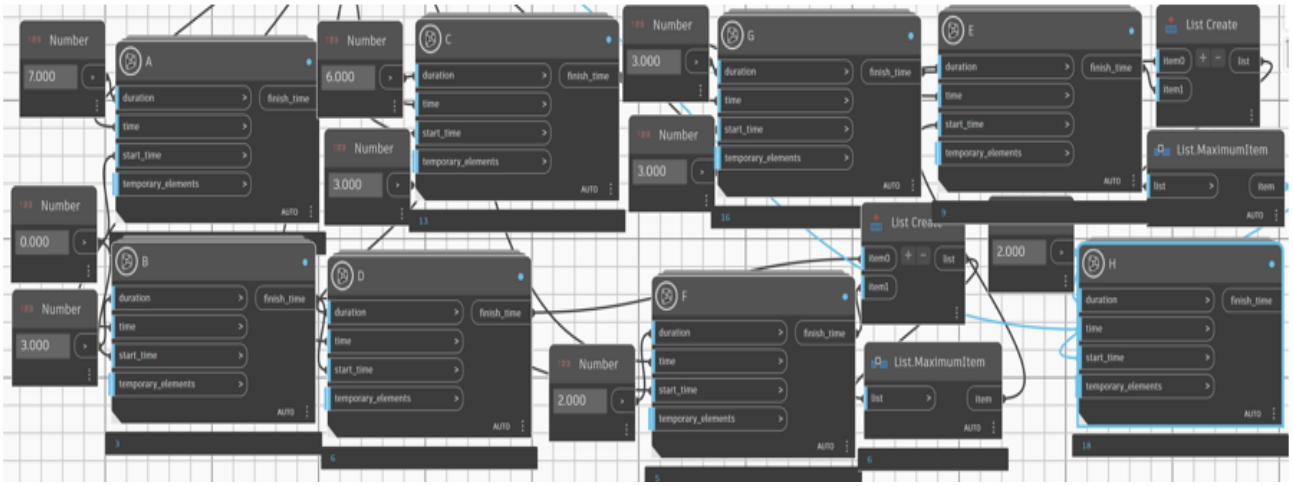
۵ .۲. راستی‌آزمایی چارچوب براساس نتایج مطالعه‌ی موردی

در بخش حاضر، نتایج حاصل از چارچوب پیشنهادی با برنامه‌ی زمان‌بندی اولیه مقایسه شده است. در روش قبلی، متره‌ی پروژه از مدل BIM استخراج و با لحاظ نرخ بهره‌وری، مدت فعالیت‌ها در اکسل محاسبه شده است. سپس زمان‌بندی پروژه براساس پیش‌نیازی‌ها در MS Project تعیین شده و بررسی‌ها نشان داده است که زمان کل پروژه در هر دو روش، ۲۲۱/۱۵ روز بوده و چارچوب پیشنهادی نتایج مشابهی را به‌صورت خودکار ارائه داده است. این تطابق منطقی است، زیرا در هر دو روش، زمان‌بندی براساس متره‌ی مدل BIM انجام شده است، با این تفاوت که چارچوب پیشنهادی فرآیند ذکرشده را به‌طورخودکار و درون گره‌های طراحی‌شده اجرا می‌کند.

در ادامه، تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات ورودی بررسی شده و نتایج نشان داده است که چارچوب پیشنهادی قادر است برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را بلافاصله پس از اعمال تغییرات درBIM بروزرسانی کند. به‌عنوان نمونه، افزایش عمق فونداسیون را از ۱/۵ متر به ۲ متر، مدت کل پروژه را از ۲۲۱/۱۵ روز به ۲۲۸/۵۱ روز، زمان اتمام خاکبرداری را از ۲۳/۲۵ روز به ۲۷/۶۷ روز، و زمان اجرای فونداسیون را از ۳۲/۰۸ روز ۳۹/۴۵ روز تغییر داده است. افزایش نرخ بهره‌وری خاکبرداری از ۲۰ مترمکعب در روز به ۳۰ مترمکعب در روز، مدت زمان اجرای پروژه را به ۲۱۶/۷۳ روز کاهش داده است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر انعطاف‌پذیری چارچوب پیشنهادی در واکنش خودکار به تغییرات مدل و قابلیت آن در بروزرسانی سریع برنامه‌ی زمان‌بندی است.

علاوه‌بر تحلیل‌های عددی، مدل‌های چهاربعدی به‌صورت کیفی نیز ارزیابی شده‌اند. در بررسی انجام‌شده، مدل ایجادشده به مدیران پروژه نمایش داده شد

[7] Santiago & Magallon



شکل۶. پیاده‌سازی شبکه‌ی فعالیت‌ها برای یک مثال ساده.

و نظرهای آن‌ها دریافت شد. طبق بازخورد مدیران، فرآیند ساخت در مدل چهاربعدی با واقعیت پروژه هم‌خوانی داشته و مدل‌سازی خودکار، هماهنگی بین فعالیت‌ها را به‌خوبی نشان داده است. نتایج راستی‌آزمایی انجام‌شده نشان می‌دهد که چارچوب ارائه شده می‌تواند به عنوان یک ابزار معتبر در مدیریت زمان‌بندی و فرآیند ساخت پروژه‌های ساختمانی استفاده شود.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، چارچوبی برای تولید نیمه‌خودکار برنامه‌ی زمان‌بندی و ایجاد مدل‌های چهاربعدی با استفاده از BIM و برنامه‌نویسی بصری ارائه شده است؛ که با کاهش نیاز به ورودی‌های پیچیده از سوی متخصصان، فرآیند زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی را تسهیل ساخته و امکان نمایش چهاربعدی پروژه‌ها را فراهم آورده است. چارچوب مذکور در محیط برنامه‌نوسی بصری Dynamo و نرم‌افزار Autodesk Revit پیاده سازی شده است. چارچوب پیشنهادی از طریق کنترل شفافیت براساس زمان شبیه‌سازی، امکان مشاهده‌ی چهاربعدی را به‌صورت خودکار فراهم می‌آورد. ماشین آلات و سایر المان‌های موقت در مدل نیز با اتصال به فعالیت‌های مرتبط در زمان انجام فعالیت نمایش داده می‌شوند. به این ترتیب، راه‌حلی ساده و عملی برای ایجاد نمایش چهاربعدی در بستر BIM را فراهم می‌آورد.

به‌منظور راستی‌آزمایی، چارچوب پیشنهادی بر روی یک نمونه از شبکه‌ی فعالیت‌های پروژه پیاده‌سازی و تطابق دقیق عددی نتایج با محاسبات روش مسیر بحرانی تأیید شده است. علاوه‌بر این، یک مطالعه‌ی موردی بر روی یک ساختمان مسکونی بتنی انجام شده است؛ که در آن، نتایج راستی‌آزمایی نشان داد که برنامه‌ی زمان‌بندی تولیدشده توسط چارچوب پیشنهادی با مدل ایجادشده در MS Project کاملاً مطابقت دارد. در هر دو روش، مدت‌زمان ۲۲۱/۱۵ روز محاسبه شده است. همچنین، انجام تحلیل حساسیت و اعمال تغییرات در BIM، انعطاف‌پذیری چارچوب را در واکنش صحیح و خودکار به تغییرات مدل تأیید کرده است. مزایای اصلی چارچوب پیشنهادی را می‌توان در این موارد خلاصه کرد:

۱. استفاده از برنامه‌نویسی بصری برای ساده‌سازی زمان‌بندی پروژه و کاهش نیاز به ورودی‌های پیچیده توسط متخصصان؛

۲. ارتباط بلادرنگ بین مدل BIM و برنامه‌ی زمان‌بندی، به نحوی که تغییرات مدل به صورت خودکار در زمان‌بندی و مدل چهاربعدی اعمال شود؛

۳. امکان ایجاد خودکار مدل‌های چهاربعدی؛

٤. حذف نیاز به انتقال اطلاعات بین نرم‌افزارهای مختلف و انجام تمامی فرآیندها در یک محیط واحد؛

۵. نمایش ماشین‌آلات و المان‌های موقت در مدل چهاربعدی که به مدیریت بهتر فعالیت‌ها کمک می‌کند.

با وجود راحتی استفاده از چارچوب پیشنهادی، در مطالعات آتی، ترکیب چارچوب پیشنهادی با هوش مصنوعی می‌تواند ایجاد برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را تا حد قابل توجهی ارتقاء دهد. برای مثال، استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند فرآیند اتصال المان‌های مدل BIM به گره‌های فعالیت در Dynamo و همچنین تخمین مدت زمان یا بهره‌وری انجام فعالیت‌ها را به صورت کاملاً خودکار میسر سازد.

References- منابع

1. Dasović, B., Galić, M. and Klanšek, U. 2020. A survey on integration of optimization and project management tools for sustainable construction scheduling. *Sustainability*, *12*(8), pp. 3405. https://doi.org/10.3390/su12083405

2. Aredah, A.S., Baraka, M.A. and Elkhafif, M. 2019. Project scheduling techniques within a building information modeling (BIM) environment: a survey study. *IEEE Engineering Management Review*, *47*(2), pp. 133–143. https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2916365

3. Crowther, J. and Ajayi, S.O. 2021. Impacts of 4D BIM on construction project performance. *International Journal of Construction Management*, *21*(7), pp. 724–737. https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1580832

4. Boton, C., Kubicki, S. and Halin, G. 2015. 4D/BIM simulation for pre-construction and construction scheduling: multiple levels of development within a single case study. In: *Proceedings of the Creative Construction Conference 2015*, Kraków, Poland, pp. 500–505. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1941.3603

5. Bolshakova, V., Guerriero, A. and Halin, G. 2018. Identification of relevant project documents to 4D BIM uses for a synchronous collaborative decision support. In: *Proceedings of the Creative Construction Conference 2018*, Ljubljana, Slovenia, pp. 1036–1043. https://doi.org/10.3311/CCC2018-134

6. Vass, S. and Gustavsson, T.K. 2017. Challenges when implementing BIM for industry change. *Construction Management and Economics*, *35*(10), pp. 597–610. https://doi.org/10.1080/01446193.2017.1314519

7. Torres-Calderon, W., Chi, Y., Amer, F. and Golparvar-Fard, M. 2019. Automated mining of construction schedules for easy and quick assembly of 4D BIM simulations. In: *Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation*, pp. 432–438. https://doi.org/10.1061/9780784482421.055

8. Sheikhkhoshkar, M., Pour Rahimian, F., Kaveh, M.H., Hosseini, M.R. and Edwards, D.J. 2019. Automated planning of concrete joint layouts with 4D-BIM. *Automation in Construction*, *107*, pp. 102943. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102943

9. Kravchenko, O., Khoruzhy, V., Lyubenko, V. and Nedashkovskyi, I. 2023. BIM technologies in engineering network design. *Problems of Water Supply, Sewage, and Hydraulics*, *42*, pp. 29–34. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.29-34

10. Biswas, H.K., Sim, T.Y. and Lau, S.L. 2024. Impact of building information modelling and advanced technologies in the AEC industry: a contemporary review and future directions. *Journal of Building Engineering*, *82*, pp. 108165. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108165

11. Bredella, N. 2019. Simulation and architecture: mapping building information modeling. *N.T.M.*, *27*(4), pp. 419–441. https://doi.org/10.1007/s00048-019-00224-9

12. Borkowski, A.S. 2023. Evolution of BIM: epistemology, genesis and division into periods. *Journal of Information Technology in Construction*, *28*, pp. 646–661. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.034

13. Rahmani Asl, M., Zarrinmehr, S., Bergin, M. and Yan, W. 2015. BPOpt: a framework for BIM-based performance optimization. *Energy and Buildings*, *108*, pp. 401–412. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.011

14. Shakeri, E. and Taheri Jebelli, S. 2020. Comparison of project cost estimation with conventional method and dynamic and smart model based on BIM based on list price. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *36.2*(2.1), pp. 141–150. https://doi.org/10.24200/j30.2019.51237.2382

15. Solihin, W., Dimyadi, J., Lee, Y.C., Eastman, C. and Amor, R. 2020. Simplified schema queries for supporting BIM-based rule-checking applications. *Automation in Construction*, *117*, pp. 103248. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103248

16. Rasoulimanesh, M., Taghaddos, H., Chokan, F., Dadashi Haji, M. and Tamanaeifar, M.H. 2021. Automated evaluation of fall hazard risk using building information modeling and image processing. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *36.2*(4.1), pp. 39–47. https://doi.org/10.24200/j30.2020.53198.2539

17. Zou, Y., Kiviniemi, A. and Jones, S.W. 2017. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. *Safety Science*, *97*, pp. 88–98. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.027

18. Lozano, F., Jurado, J.C., Lozano-Galant, J.A., de la Fuente, A. and Turmo, J. 2023. Integration of BIM and value model for sustainability assessment for application in bridge projects. *Automation in Construction*, *152*, pp. 104935. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104935

19. Cheng, Q., Tayeh, B.A., Abu Aisheh, Y.I., Alaloul, W.S. and Aldahdooh, Z.A. 2024. Leveraging BIM for sustainable construction: benefits, barriers, and best practices. *Sustainability*, *16*(17), pp. 7654. https://doi.org/10.3390/su16177654

20. Oreto, C., Massotti, L., Biancardo, S.A., Veropalumbo, R., Viscione, N. and Russo, F. 2021. BIM-based pavement management tool for scheduling urban road maintenance. *Infrastructures*, *6*(11), pp. 148. https://doi.org/10.3390/infrastructures6110148

21. Nguyen, D.T., Chou, J.S. and Tran, D.H. 2022. Integrating a novel multiple-objective FBI with BIM to determine tradeoff among resources in project scheduling. *Knowledge-Based Systems*, *235*, pp. 107640. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107640

22. Zhang, Q. 2021. Research on the construction schedule and cost optimization of grid structure based on BIM and genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, *1744*(2), pp. 022065. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1744/2/022065

23. Pour Rahimian, F., Seyedzadeh, S., Oliver, S., Rodriguez, S. and Dawood, N. 2020. On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application of BIM and machine learning. *Automation in Construction*, *110*, pp. 103012. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103012

24. Viklund Tallgren, M., Roupé, M. and Johansson, M. 2021. 4D modelling using virtual collaborative planning and scheduling. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*, pp. 763–782. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.042

25. Ciribini, A.L.C., Mastrolembo Ventura, S. and Paneroni, M. 2016. Implementation of an interoperable process to optimize design and construction phases of a residential building: a BIM pilot project. *Automation in Construction*, *71*, pp. 62–73. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.005

26. Altun, M. and Akcamete, A. 2019. A method for facilitating 4D modeling by automating task information generation and mapping. In: *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, pp. 479–486. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_57

27. Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. 2018. *Building information modeling: technology foundations and industry practice*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3

28. Kensek, K. 2015. Visual programming for building information modeling: energy and shading analysis case studies. *Journal of Green Building*, *10*(4), pp. 28–43. https://doi.org/10.3992/jgb.10.4.28

29. Ghannad, P., Lee, Y.-C., Dimyadi, J. and Solihin, W. 2019. Automated BIM data validation integrating open-standard schema with visual programming language. *Advanced Engineering Informatics*, *40*, pp. 14–28. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.01.006

30. Collao, J., Lozano-Galant, F., Lozano-Galant, J.A. and Turmo, J. 2021. BIM visual programming tools applications in infrastructure projects: a state-of-the-art review. *Applied Sciences*, *11*(18), pp. 8343. https://doi.org/10.3390/app11188343

31. Chen, Q., Adey, B.T., Haas, C. and Hall, D.M. 2020. Using look-ahead plans to improve material flow processes on construction projects when using BIM and RFID technologies. *Construction Innovation*, *20*(3), pp. 471–508. https://doi.org/10.1108/CI-11-2019-0133

32. Mazars, T. and Francis, A. 2020. Chronographical spatiotemporal dynamic 4D planning. *Automation in Construction*, *112*, pp. 103076. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103076

33. Wang, Z. and Rezazadeh Azar, E. 2019. BIM-based draft schedule generation in reinforced concrete-framed buildings. *Construction Innovation*, *19*(2), pp. 280–294. https://doi.org/10.1108/CI-11-2018-0094

34. Wang, H.W., Lin, J.R. and Zhang, J.P. 2020. Work package-based information modeling for resource-constrained scheduling of construction projects. *Automation in Construction*, *109*, pp. 102958. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102958

35. Sadeghi, N., Dehghani, M.S. and Ingolfsson, A. 2024. Choice of probability distributions for activity durations in project networks with limited sample size. *Journal of Construction Engineering and Management*, *150*(3), pp. 04024002. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-13753

36. Santiago, J. and Magallon, D. 2009. Critical path method. *CEE 320 – VDC Seminar*, Stanford University. Available at: https://acqnotes.com/ (Accessed: 4 January 2026).

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.