

چارچوبی جهت ایجاد نیمه خودکار زمان‌بندی و مدل چهاربعدی بر مبنای برنامه‌نویسی بصری و BIM

نعیمه صادقی^{۱*}، فرید فرمانی راست‌گو^۲

چکیده: مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM) به عنوان 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 این حال، فرآیند زمان‌بر پیوند دستی اطلاعات زمان‌بندی به مدل‌ها باعث شده بسیاری از پروژه‌ها از این قابلیت استفاده نکنند. این پژوهش چارچوبی را برای تولید نیمه خودکار زمان‌بندی پروژه و مدل‌های چهاربعدی با نیاز به حداقل ورودی از متخصصان ارائه می‌دهد. در این چارچوب، داده‌های متره از مدل BIM برای بهبود دقت و کارایی تخمین زمان استفاده شده. نوآوری این پژوهش در افزودن منطق ساخت به صورت بصری به BIM برای نخستین بار نهفته است که با استفاده از ابزارهای برنامه‌نویسی بصری، امکان ایجاد زمان‌بندی و شبیه‌سازی چهاربعدی فرآیندهای ساخت را به صورت خودکار فراهم می‌آورد. یکی از مزایای این چارچوب این است که هر تغییری در مدل BIM ایجاد شود، زمان‌بندی و تجسم چهاربعدی به صورت خودکار به‌روزرسانی می‌شوند. روش پیشنهادی در یک مطالعه موردی پیاده‌سازی شده که کارایی و سهولت استفاده از آن را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات ساخت، مدل‌سازی چهاربعدی، برنامه‌نویسی بصری، شبیه‌سازی

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 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, 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.

Keywords: BIM , 4D Modeling, Visual Programming, Simulation

* نویسنده مسئول، ایمیل: sadeghi@kntu.ac.ir

۱ - دکتری (استادیار)، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایمیل: sadeghi@kntu.ac.ir

۲ - کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایمیل: farbod.farmanirastgoo@email.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

باتوجه به اهمیت حیاتی زمان‌بندی در پروژه‌ها، توسعه آن‌ها باید با دقت فراوان انجام شود [۱]. به طور سنتی، برنامه‌ریزان پروژه از روش‌های مبتنی بر نقشه‌های دو بعدی استفاده می‌کنند که با تطبیق منطقی دستی بین نقشه‌ها، مقدار یا حجم کار برای هر المان ساختمانی محاسبه می‌شود و مبنای محاسبه زمان لازم برای انجام فعالیت‌ها قرار می‌گیرد. اما در سالهای اخیر پیشرفت‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی اطلاعات ساخت^۳ (BIM) روشهای سنتی دسترسی به اطلاعات پروژه را متحول کرده است [۲].

BIM امکان نمایش سه بعدی و دسترسی و مدیریت آسان اطلاعات ساختمان را ایجاد میکند و در نتیجه برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ساختمانی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، با استفاده از BIM، امکان نمایش زمان‌بندی ساخت چهاربعدی از طریق اتصال به برنامه زمان‌بندی پروژه فراهم می‌شود که به کارفرمایان و پیمانکاران کمک می‌کند فرآیند پروژه را قبل از ساخت بادقت و سهولت بررسی کنند و توالی پروژه را بهتر درک کنند [۳]. این تجسم می‌تواند به شناسایی زود هنگام تضادها و ناکارآمدی‌ها در مرحله برنامه‌ریزی کمک کند و ریسک تأخیر در پروژه را کاهش دهد [۴]. به طور کلی، پیاده‌سازی مدل‌های چهاربعدی به افزایش بهره‌وری در صنعت ساخت و ساز کمک می‌کند، تصمیم‌گیری را تسهیل کرده 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 گسترده آن در صنعت ساخت و ساز هستند [۶].

یکی از چالش‌های اصلی موجود در این زمینه این است که حتی زمانی که پروژه‌ها بر اساس BIM انجام می‌شوند، به دلیل زمان‌بر بودن وارد کردن اطلاعات زمان‌بندی در BIM، در اغلب موارد این مدل‌ها در سطح سه بعدی باقی می‌مانند و از قابلیت‌های مدل چهاربعدی در پروژه‌ها بهره‌برداری نمی‌شود. برای بهره‌برداری مؤثر از قابلیت‌های BIM، نیاز به یک روش ساده برای تولید و ایجاد ارتباط

مستقیم بین برنامه زمان‌بندی پروژه و BIM با حداقل 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.

توسعه 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. این روش باید امکان اتصال مدل‌های سه بعدی به داده‌های زمانی را فراهم کند و به مدیران پروژه این امکان را بدهد که با بهره‌گیری از اطلاعات BIM به سادگی برنامه زمان‌بندی را تولید کنند [۸]. به عنوان مثال، با ایجاد روابط از پیش تعریف‌شده بین فعالیت‌های پروژه و المان‌ها مربوطه در مدل BIM، ذینفعان بتوانند به سرعت زمان‌بندی پروژه را مشاهده کرده و توالی فعالیت‌ها را درک کنند. این امر نه تنها در زمان صرفه‌جویی می‌کند بلکه ریسک ناهماهنگی بین مدل و برنامه را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خودکارسازی چنین فرایندی، امکان به‌روزرسانی‌های آنی زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را به محض وقوع تغییرات در مدل BIM فراهم می‌کند.

هدف اصلی این پژوهش ایجاد چارچوبی مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM) است که با دریافت ورودی‌های ساده از متخصصان، برنامه زمان‌بندی و مدل چهاربعدی پروژه ساختمانی را به صورت خودکار تولید کند. در نهایت، چارچوب پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند که ذینفعان روند چهاربعدی ساخت را مشاهده کرده و تصمیم‌گیری‌های بهتری در راستای مدیریت پروژه انجام دهند. برای دستیابی به این هدف، روش تحقیق این پژوهش شامل طراحی و توسعه یک چارچوب مبتنی بر BIM و ارزیابی آن از طریق یک مطالعه موردی است. در مرحله طراحی، در چارچوب پیشنهادی از یک محیط برنامه‌نویسی بصری^۴ برای ارتباط با BIM استفاده شده است. به این ترتیب که محیط برنامه‌نویسی بصری به منظور نمایش آسان منطق برنامه‌ریزی پروژه‌ها و محاسبه زمان شروع و پایان

فعالیت‌ها به کار رفته و BIM برای استخراج اطلاعات متره و نمایش چهار بعدی استفاده شده است. در مرحله اعتبارسنجی، چارچوب بر روی یک پروژه ساختمانی واقعی پیاده‌سازی شد و اثربخشی آن از جنبه‌هایی مانند دقت نتایج زمان‌بندی، سرعت تولید مدل چهاربعدی و رضایت ذینفعان از شبیه‌سازی بررسی شده است. در ادامه این مقاله ابتدا به بررسی ادبیات پیشین می‌پردازیم. سپس در بخش سوم چارچوب موردنظر ارائه می‌گردد. پیاده‌سازی این چارچوب در بخش چهارم بر روی یک مطالعه موردی تشریح شده و در بخش آخر نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. مرور در ادبیات پژوهش

در این بخش ابتدا به تعریف و تاریخچه BIM پرداخته شده کاربردهای آن در مدیریت پروژه‌های ساخت بررسی می‌شود. سپس، کاربردهای BIM در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت مورد توجه قرار می‌گیرد، که شامل استفاده از BIM در شبیه‌سازی پروژه‌های ساخت، نمایش و برنامه‌ریزی مراحل مختلف پروژه است. در ادامه، چالش‌ها و مشکلات موجود در پیاده‌سازی خودکار داده‌های زمان‌بندی و هماهنگ‌سازی آنها با مدل‌های سه‌بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد و لزوم توسعه روش‌های خودکار برای بهبود این فرآیندها مطرح می‌شود. در بخش ۲-۳، به برنامه‌نویسی بصری و جایگاه آن در ارتباط با BIM پرداخته می‌شود. سپس، کاربردهای برنامه‌نویسی بصری در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها و نقش آن در ساده‌سازی و تسهیل فرآیندهای پیچیده‌ی زمان‌بندی پروژه‌ها در تحقیقات پیشین بررسی می‌گردد. در نهایت، مشکلات و محدودیت‌های موجود در استفاده از BIM و برنامه‌نویسی بصری مورد بررسی قرار خواهد گرفت و خلاهای پژوهشی در این حوزه تبیین می‌شود.

۲-۱. تاریخچه BIM

BIM را می‌توان به عنوان فرآیندی برای مدیریت اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی ساختمان از طریق نمایش دیجیتالی آن تعریف کرد [۹]. این فناوری تغییراتی اساسی در نحوه طراحی، ساخت و مدیریت ساختمان‌ها ایجاد کرده است. نه تنها به مدل‌سازی فیزیکی ساختمان می‌پردازد، بلکه اطلاعات مرتبط با اجزای مختلف ساختمان را نیز در یک محیط دیجیتالی یکپارچه

گردآوری و مدیریت می‌کند. این فرآیند با ایجاد همکاری مشترک میان ذینفعان مختلف، از جمله معماران، مهندسان، پیمانکاران و مالکان پروژه، امکان باعث بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود [۱۰].

معرفی مفهوم BIM در دهه ۱۹۷۰ توسط پیشگامانی مانند چارلز ایستمن مطرح شد. در این دوران، استفاده از فناوری‌های دیجیتال به طور محدود و عمدتاً در زمینه طراحی‌های هندسی بود. اما در دهه ۱۹۹۰ با پیشرفت‌های قابل توجه در نرم‌افزارهای BIM و توانایی‌های پیشرفته‌تر در مدل‌سازی ساختمان‌ها، این فناوری تحول بزرگی در عرصه معماری و ساخت‌وساز ایجاد کرد. به ویژه، در این دوران، نرم‌افزارهایی BIM به شکل گسترده‌تری در صنعت استفاده شدند که از قابلیت‌های مدل‌سازی پیچیده‌تر و جزئیات بیشتر برخوردار بودند [۱۱].

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

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

در زمینه‌های تحقیقاتی پیشرفته‌تر، ترکیب BIM با روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی توجه محققان و متخصصان را جلب کرده است. برای مثال، در برخی تحقیقات BIM با بهینه‌سازی چندهدفه ترکیب شده است تا بتواند تعادل میان زمان، هزینه، کیفیت و ایمنی

پروژه را مدیریت کند. این ترکیب به ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده که نیاز به مدیریت دقیق منابع و زمان‌بندی دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، مقادیر متره تولید شده توسط BIM به مدیریت منابع کمک کرده و امکان زمان‌بندی دقیق‌تر و اجرای بهینه فعالیت‌های ساخت‌وساز را فراهم می‌سازد [۲۱،۲۲].

در نهایت، می‌توان گفت که BIM نه تنها یک فناوری مدیریتی، بلکه رویکردی نوین در فرآیندهای طراحی و ساخت است که در حال تحول و بهبود مداوم است. در بخش بعدی، به بررسی کاربردهای BIM در برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های ساخت خواهیم پرداخت.

۲-۲. کاربردهای BIM در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت

در زمینه نظارت بر عملیات اجرایی ساخت، پوررحیمیان و همکاران [۲۳] در یک مطالعه موردی، یک محیط شبیه‌سازی بازی طراحی کردند تا امکان مقایسه وضعیت فعلی با وضعیت برنامه‌ریزی شده پروژه و انجام برنامه‌ریزی مجدد را فراهم کنند. آن‌ها اطلاعات عناصر پروژه از قبیل اطلاعات هندسی و رنگ را از مدل BIM به نرم‌افزار بازی‌سازی Unity انتقال دادند. همچنین، با استفاده از دوربین‌های ثابت نصب شده در کارگاه، اطلاعات وضعیت فعلی عناصر پروژه را به دست آوردند و با استفاده از پردازش تصویر، این اطلاعات را به برنامه خود در نرم‌افزار Unity افزودند. در نهایت، برنامه خود را به یک محیط واقعیت مجازی ارتقا دادند تا پیمانکار و کارفرما بتوانند در محیط سه‌بعدی از وضعیت فیزیکی پروژه و مقایسه آن با برنامه زمان‌بندی در لحظه آگاه شوند.

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

در طول دو دهه گذشته، تحقیقاتی در زمینه تسریع و ساده‌سازی فرآیند ایجاد مدل‌های چهاربعدی انجام شده است که اصولاً بر سه استراتژی تمرکز دارند [۷]: (۱) تعریف ویژگی‌های مشترک بین زمان‌بندی‌ها و مدل‌های سه‌بعدی به گونه‌ای که بتوان این ویژگی‌ها را

بین عناصر مدل BIM و فعالیت‌های زمان‌بندی مرتبط کرد، (۲) ایجاد یک سیستم کدگذاری منسجم بین فعالیت‌ها و عناصر BIM و (۳) خودکار کردن فرآیند تولید ساختار شکست کارها. برای مثال، در یک مطالعه، چارچوبی ارائه شده است که تمام فعالیت‌ها را از یک برنامه زمان‌بندی استخراج می‌کند و به صورت خودکار ساختار تفکیک مناطق مکانی کاری را ایجاد می‌نماید، سپس هر فعالیت را به یک مکان کاری اختصاص می‌دهد [۷].

در مطالعه‌ای دیگر، کاریبینی و همکاران [۲۵] تطبیق نیمه‌خودکار عناصر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با فعالیت‌های ساخت‌وساز را با استفاده از یک متغیر از پیش تعریف شده به نام شناسه فعالیت پیشنهاد کرده‌اند. با وجود اینکه در روش پیشنهادی آن‌ها فرآیند ایجاد یک مدل BIM چهاربعدی تا حدی ساده شده است، پارامتر اضافی هنوز باید به صورت دستی برای هر المان جدید تعریف شود. در روشی مشابه، آلتون و آکمت [۲۶] یک متغیر به نام شناسه فعالیت را تعریف کردند که برای المان‌های مدل BIM بر اساس ویژگی‌های آن‌ها تولید می‌شود. سپس از شناسه‌های فعالیت برای اتصال المان‌ها به برنامه زمان‌بندی پروژه استفاده می‌شود تا مدل چهاربعدی ایجاد گردد.

علیرغم قابلیت‌های بالقوه BIM در مدیریت پروژه‌های ساختمانی، استفاده از مدل‌های چهاربعدی در عمل محدود باقی مانده است [۶]. دلیل اصلی این محدودیت، پیچیدگی و زمان‌بر بودن فرآیند پیوند اطلاعات زمان‌بندی با مدل‌های سه‌بعدی BIM است. اغلب پروژه‌ها به دلیل نبود ابزارهای کارآمد و ساده برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی مبتنی بر BIM، تنها در سطح سه‌بعدی باقی می‌مانند و از امکانات مدل‌های چهاربعدی بهره‌برداری نمی‌شود.

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 برنامه زمان‌بندی می‌شود. از این رو، توسعه 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 حداقل ورودی و تلاش، برنامه‌های زمان‌بندی دقیق و به‌روز تولید کنند و ارتباط بین مدل سه‌بعدی و اطلاعات زمانی را به صورت خودکار برقرار کنند. در

این راستا، برنامه‌نویسی بصری می‌تواند به خودکارسازی این فرآیندها کمک کند و با ارائه ابزارهای ساده و گرافیکی، ساخت مدل‌های چهاربعدی و ادغام آن‌ها با اطلاعات زمان‌بندی را تسهیل نماید.

۳-۲. برنامه‌نویسی بصری و BIM

برنامه‌نویسی بصری یک رویکرد نوین در توسعه نرم‌افزار است که به جای نوشتن کدهای پیچیده و متنی، از رابط‌های گرافیکی برای ایجاد برنامه‌ها استفاده می‌کند. در این روش، به جای کد نویسی خطی، از عناصر گرافیکی مانند بلوک‌ها، نمودارها و جریان‌های بصری برای ترسیم و طراحی برنامه‌ها بهره‌برداری می‌شود. این رویکرد، 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 کد 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. این رویکرد می‌تواند به‌طور مؤثری در کنار BIM به‌ویژه در زمینه‌های برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت، تسهیل‌کننده 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 این روش در کنار ابزارهای BIM به کاهش نیاز به نوشتن کدهای پیچیده و افزایش سرعت و دقت در فرآیند طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها کمک می‌کند.

با این حال، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از برنامه‌نویسی بصری وجود دارد. به عنوان مثال، قابلیت‌های پیشرفته‌ای که در زبان‌های برنامه‌نویسی سنتی مانند Python یا C++ موجود است، در محیط‌های برنامه‌نویسی بصری کاملاً پشتیبانی نمی‌شود. علاوه بر این، چالش‌هایی در زمینه تعامل داده‌ها بین نرم‌افزارهای مختلف،

همچنان یکی از موانع اصلی پذیرش و گسترش این روش 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، به خوبی عمل می‌کند. این ابزار به طور مستقیم به Revit متصل می‌شود و با استفاده از محیط گرافیکی خود، به کاربر این امکان را می‌دهد که فرآیندهای پیچیده را به صورت بصری و بدون نیاز به کدنویسی پیچیده مدیریت کند. استفاده از Dynamo در ترکیب با BIM در زمینه‌های مختلف طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت و ساز، کاربردهای فراوانی دارد و می‌تواند به بهبود فرآیندهای کاری کمک کند [۳۰].

در نهایت، هدف از این روش‌های برنامه‌نویسی، خودکارسازی و تسهیل فرآیندهای مختلف در صنعت ساخت‌وساز، به ویژه در برنامه‌ریزی پروژه‌ها است. این خودکارسازی می‌تواند در مراحل مختلف برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت، از جمله ایجاد مدل‌های چهاربعدی، مدیریت زمان‌بندی و تخصیص منابع، به کار گرفته شود. در ادامه، به بررسی کاربرد برنامه‌نویسی بصری و BIM در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت پرداخته خواهد شد. در ادامه، چارچوب پیشنهادی این پژوهش معرفی می‌شود که با هدف پاسخگویی به این چالش‌ها طراحی شده است.

۴-۲ کاربرد برنامه‌نویسی بصری در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت

چن و ادی [۳۱] یک راهکار برای استفاده از برنامه‌نویسی بصری و BIM جهت نظارت بر پروژه و تصحیح برنامه زمان‌بندی ارائه داده‌اند. آن‌ها با استفاده از فناوری RFID، به نظارت بر پروژه و تصحیح برنامه زمان‌بندی پرداختند. ابتدا اطلاعات موردنیاز از مدل BIM با کمک Dynamo استخراج شده و در کنار اطلاعات مربوط به برچسب‌های RFID موجود در المان‌های پروژه، در پایگاه داده SQLite قرار گرفتند تا زمان‌بندی و میزان پیشرفت پروژه تطبیق داده شود.

شیخ خشکار و همکاران [۸] با بهره‌گیری از BIM و برنامه‌نویسی بصری توانستند برنامه زمان‌بندی بتن‌ریزی دال‌های ساختمانی را

محاسبه کنند. در این پژوهش، آن‌ها از ابزار Dynamo بهره بردند که شامل که اطلاعات هندسی و مشخصات مصالح عناصر ساختمانی را از BIM خوانده و به نرم‌افزار Microsoft Excel منتقل می‌کند. این اتصال به صورت خودکار و بدون نیاز به مراحل واسطه‌ای اضافی انجام می‌شود زیرا Dynamo دارای گرهی است که می‌تواند با نرم‌افزار Excel به صورت مستقیم ارتباط برقرار کند. پس از انتقال داده‌ها به Excel، محققان اطلاعات مربوطه را از با نرم‌افزار MATLAB خوانده و با اعمال محدودیت‌ها و الزامات مختلف، برنامه زمان‌بندی بتن‌ریزی هر ناحیه از دال‌ها را محاسبه کردند.

مازارس و همکاران [۳۲] در مقاله‌ای به اهمیت مدیریت فضای کار و فعالیت‌ها از منظر خالی یا اشغال بودن و گروه‌های کارگری برای بهبود کارایی و ایجاد برنامه‌زمانی مناسب در پروژه‌های ساختمانی اشاره کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از BIM و رابط برنامه‌نویسی Dynamo، اطلاعات سه‌بعدی عناصر را استخراج کرده و سپس در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel با استفاده از رابط برنامه‌نویسی Visual Basic، برنامه زمان‌بندی را برای هر گروه کاری در مکان‌ها و طبقات مشخص ارائه دادند. در نهایت، برنامه زمان‌بندی چهاربعدی را در نرم‌افزار Autodesk Navisworks به تصویر کشیدند.

ونگ و همکاران [۳۳] با استفاده از BIM در نرم‌افزار Autodesk Revit، اطلاعات هندسی عناصر را از طریق رابط برنامه‌نویسی Dynamo استخراج کرده‌اند. سپس با اعمال قواعد ساخت، دانش پیشین و داده‌های نرخ بهره‌وری، بسته‌های کاری پروژه را ایجاد کرده، مدت زمان اجرای آن‌ها را محاسبه کرده و روابط میان آن‌ها را تعیین کردند. در نهایت، این نتایج را با استفاده از نرم‌افزار مدیریت پروژه MS Project در قالب یک برنامه زمان‌بندی ارائه نمودند. وی‌ونگ و همکاران [۳۴] نیز با استخراج اطلاعات از BIM به کمک برنامه‌نویسی بصری، دسته‌بندی کاری را به صورت نیمه‌خودکار ایجاد کردند و سپس برای پروژه مورد مطالعه خود، زمان‌بندی را با استفاده از روش ریاضی محدودیت منابع ارائه کردند.

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 توسعه ابزارهای نوآورانه هستند. خلاهای اصلی پژوهش به شرح زیر هستند:

۱. ابزارها و رویکردهای فعلی هنوز قابلیت تعریف و به‌روزرسانی شبکه فعالیت‌های پروژه را به صورت 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 به خوبی پشتیبانی نمی‌شوند. این موضوع باعث محدودیت در استفاده از این ابزارها برای برنامه‌ریزی دقیق و یکپارچه 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

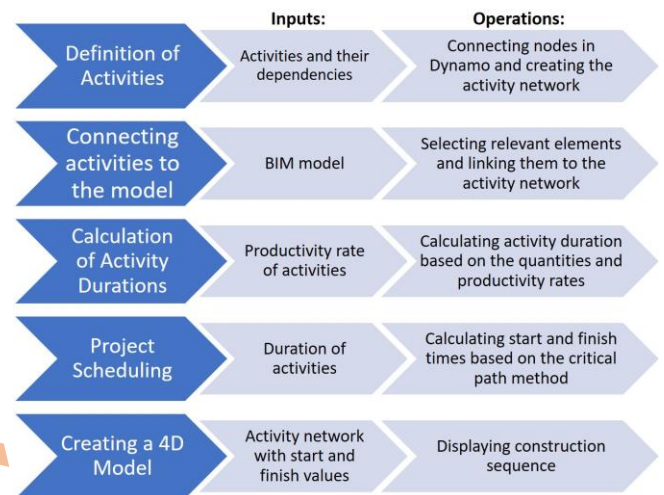
چارچوب پیشنهادی در این مقاله به منظور تسهیل برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی و ایجاد مدل چهاربعدی فرآیند ساخت‌وساز بر مبنای BIM از طریق برنامه‌نویسی بصری طراحی شده است. این چارچوب شامل پنج مرحله اصلی است: (۱) تعریف فعالیت‌ها و وابستگی‌ها، (۲) اتصال فعالیت‌ها به مدل BIM، (۳) محاسبه زمان فعالیت‌ها، (۴) برنامه‌ریزی زمان‌بندی پروژه و (۵) ایجاد خودکار مدل چهاربعدی فرآیند ساخت پروژه. شکل ۱ فرآیند چارچوب پیشنهادی، ورودی‌ها و نحوه عملیات هر یک از مراحل را نشان می‌دهد. در پیاده‌سازی فعلی این چارچوب برای محیط BIM از نرم‌افزار Autodesk Revit و برای برنامه‌نویسی بصری از Dynamo

استفاده شده است. در ادامه هر یک از این مراحل به تفصیل توضیح داده شده است و در نهایت بخش ۳-۶ به توضیح پیاده سازی گره های اختصاصی در داینامو می پردازد.

۲-۲. اتصال فعالیت ها به مدل BIM

گره های مربوط به فعالیت ها انواع مختلف فعالیت های یک پروژه را نمایندگی می کنند و در ترکیب با سایر گره ها و المان های BIM می توانند برنامه زمان بندی و مدل چهاربعدی را به صورت خودکار ایجاد کنند. هر فعالیت می تواند به المان های خاصی از مدل BIM مربوط باشد و مدت زمان انجام فعالیت به مقادیر متره این المان ها بستگی داشته باشد، یا ممکن است فعالیتی تعریف شود که المان های BIM آن اصلاً تعریف نشده اند یا اگر تعریف شده اند نمی توان از مقادیر متره آنها مدت زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت را بدست آورد.

نکته ای که در ایجاد شبکه فعالیت ها لازم است به آن توجه شود ارتباط بین میزان جزئی بودن فعالیت های در نظر گرفته شده در شبکه فعالیت و مدل BIM است. فعالیت هایی که در شبکه فعالیت ها در نظر گرفته می شوند بهتر است به سطح توسعه مدل (LOD) در BIM بستگی داشته باشد. به این معنی که هرچه مدل جزئیات بیشتری داشته باشد، بهتر است فعالیت ها به صورت دقیق تر و با جزئیات بیشتری تعریف شوند تا بتوان برنامه زمان بندی دقیق تر و مدل چهاربعدی بهتری ایجاد نمود. برای مثال، اگر بخش سازه مدل شامل المان های مانند قالب بندی و آرماتور بندی باشد، می توانیم برای هر کدام از این قسمت ها فعالیت های مجزایی تعریف کنیم. اما اگر تنها پی ساختمان مدل شده باشد و قالب بندی جداگانه مشخص نشده باشد، می توان برنامه ریزی را با جزئیات کمتری انجام داد که در آن تمامی وظایف مربوط به پی سازی به عنوان یک فعالیت واحد در نظر گرفته شوند. به زبان دیگر، سطح جزئیات فعالیت ها کاملاً بستگی به نظر کاربر (برنامه ریز پروژه) دارد، اما اگر برنامه ریزی مطابق با سطح

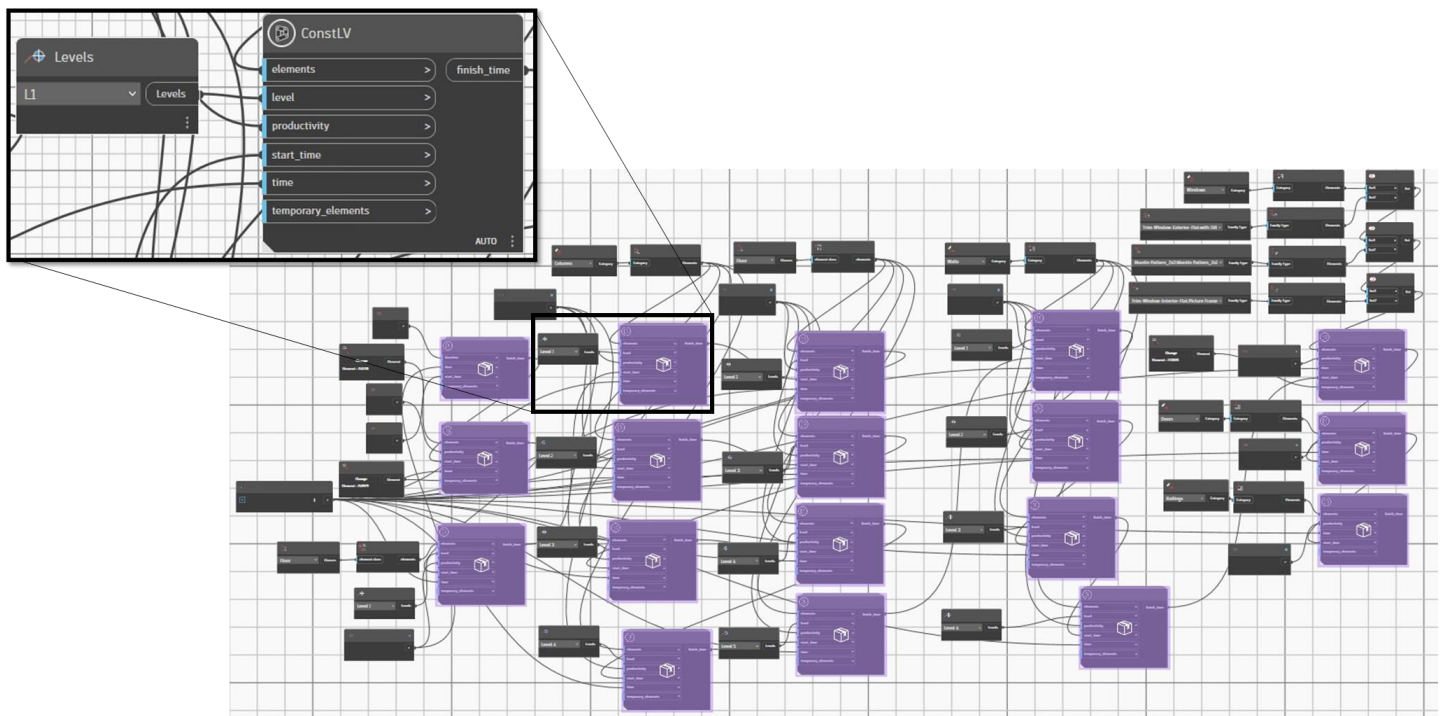


شکل ۱: مراحل اصلی چارچوب پیشنهادی.

Figure ۱: Main stages of the proposed framework.

۳-۱. تعریف فعالیت ها و وابستگی ها

برای ایجاد توالی منطقی فعالیت ها از گره های به هم متصل در Dynamo استفاده شده است، که هر گره نشان دهنده یک فعالیت خاص پروژه است. این گره ها به فعالیت های پیش نیاز خود متصل می شوند و توالی لازم عملیات را ثبت می کنند. بدین منظور ما در Dynamo گره های اختصاصی توسعه داده ایم. برای نمونه در شکل ۲ گره های مربوط به فعالیت های مختلف با رنگ بنفش نشان داده شده است. سایر گره ها و اتصالات آنها در این شکل مربوط به اتصال فعالیت ها به مدل BIM و ایجاد مدل چهاربعدی است. برای نمونه قسمتی از شکل با بزرگنمایی بیشتر انتخاب شده که نشان دهنده فعالیت و انتخاب المان های مربوط به طبقه یک برای آن فعالیت است.



شکل ۲: شمای کلی شبکه فعالیت‌های پروژه به کمک گره‌های اختصاصی در Dynamo

Figure ۲: Overview of the project activity network using costum nodes in Dynamo.

ترتیب، توسعه‌دهندگان می‌توانند به راحتی پیشرفت منطقی را از یک طبقه به طبقه دیگر برای فعالیت‌ها تعریف کنند.

روش انتخاب دستی برای فعالیت‌های پروژه‌هایی مناسب است که به صورت قسمت بندی یا نواحی عملکردی بزرگ‌تر سازماندهی شده‌اند، مانند دانشگاه‌ها، فضاهای تجاری باز یا تأسیسات صنعتی پیچیده. در این موارد، المان‌ها به صورت 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 است، داشته باشد. درحالی‌که انتخاب دستی کنترل بیشتری بر گروه‌بندی‌های خاص المان‌ها ارائه می‌دهد، نیاز به ورودی اضافی از کاربر دارد که باید هر ناحیه فعالیت را به دقت تعریف کند. به علاوه برخی از فعالیت‌ها مانند نصب پنجره لزوماً طبقه به طبقه انجام

جزئیات موجود در مدل باشد، از پیچیدگی غیرضروری جلوگیری می‌شود.

انتخاب المان‌ها برای فعالیت‌ها می‌تواند بر اساس 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 چند طبقه. در این حالت، المان‌هایی که وارد گره فعالیت می‌شوند از یک فیلتر اضافی رد می‌شوند که با گرفتن اشتراک بین المان‌های ورودی و المان‌های یک طبقه خاص، تنها المان‌هایی را پیدا می‌کند که در طبقه خاصی تعریف شده‌اند. به این

نمی‌شوند و نیازی به وارد کردن 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. در این حالت فعالیت تنها مدت زمان را به عنوان ورودی دریافت می‌کند. به عنوان مثال، ممکن است تجهیزات کارگاه در BIM مدل نشده باشند، اما لازم باشد این فعالیت را در ساختار شبکه فعالیت‌های پروژه و در کنار سایر فعالیت‌ها تعریف کنیم. با وجودیکه این فعالیت مستقیماً با المانهای مدل BIM ارتباطی ندارد، ولی روی سایر فعالیت‌ها در ساختار شبکه تاثیرگذار است و در نتیجه برنامه زمان‌بندی و مدل چهاربعدی را تحت تاثیر قرار میدهد.

مورد دیگری که در چارچوب پیشنهادی به آن توجه شده، اتصال المان‌های موقت به فعالیت‌های مربوطه است. برای مثال کارگران، ماشین‌آلات و به صورت کلی تمام المان‌هایی است که در زمان اجرای یک فعالیت مورد استفاده قرار می‌گیرند میتوانند به گره فعالیت متصل شوند.

۳-۳. محاسبه زمان فعالیت‌ها

در حالتی که مقادیر متره المان‌های مربوط به فعالیت برای محاسبه مدت زمان فعالیت موثر هستند، برای بهره‌برداری کامل از مزایای رویکرد مبتنی بر BIM، با استفاده از مقادیر متره (q) که به صورت خودکار برای المان‌های مربوط به هر فعالیت محاسبه می‌شود و نرخ بهره‌وری هر فعالیت (p)، مدت زمان انجام فعالیت را محاسبه می‌کنیم.

نرخ بهره‌وری معمولاً بر اساس داده‌های تاریخی، یا نظر کارشناسی تعیین می‌شود [۳۵]. نرخ بهره‌وری همچنین باید با توجه به منابع موجود در پروژه و جزئیات تعریف شده در مدل و شبکه فعالیت‌ها باشد. به عنوان مثال، اگر اجرای پی ساختمان به صورت یک فعالیت واحد مدل‌سازی شده باشد، نرخ بهره‌وری باید تمام ریز فعالیت‌های مربوط به ساخت پی مانند قالب‌بندی و نصب آرماتور را در دل خود

در نظر بگیرد. به این ترتیب میتوان اطمینان حاصل کرد که یک زمان‌بندی واقع‌گرایانه برای فعالیت ارائه شده‌است. در مقابل اگر قالب بندی به صورت فعالیت جداگانه در شبکه فعالیت‌ها وجود داشته باشد، در این صورت باید برای هر کدام از ریز فعالیت‌ها نرخ بهره‌وری را جداگانه تعریف نمود. به این ترتیب، این چارچوب زمان‌بندی را قابل تنظیم برای سطوح مختلف جزئیات پروژه می‌سازد.

مقادیر برآورد متره (q) استخراج شده از مدل BIM، بر اساس المان‌ها ساختمانی مرتبط با هر فعالیت و معیار اندازه‌گیری مناسب تعیین می‌شود. در چارچوب پیشنهادی فعالیت‌ها به سه روش اندازه‌گیری برآورد می‌شوند: فعالیت‌ها ممکن است حجم‌محور باشند (مانند بتن‌ریزی و خاک‌برداری)؛ برخی فعالیت‌ها مانند نصب کف و رنگ‌آمیزی بر اساس مساحت اندازه‌گیری می‌شوند؛ و برای فعالیت‌هایی مانند نصب درها و پنجره‌ها می‌توان از شمارش تعداد المان‌ها استفاده کرد. پس از محاسبه متره با واحد مشخص شده، با استفاده از رابطه زیر مدت زمان انجام فعالیت محاسبه می‌گردد:

$$d = \frac{q}{p}$$

به علاوه همانطور که قبلاً گفته شد، ممکن است فعالیت‌هایی وجود داشته باشد که با وجودیکه المانهای آنها تعریف شده است، اما زمان آنها بر اساس مقدار المانها در مدل محاسبه نشود و کاربر ترجیح دهد که مدت زمان را به صورت مستقیم به مدل وارد کند. بنابراین ما چهار نوع فعالیت از منظر محاسبه مدت زمان خواهیم داشت، (۱) مبتنی بر حجم؛ (۲) مبتنی بر مساحت؛ (۳) مبتنی بر تعداد و (۴) مبتنی بر ارائه زمان به صورت مستقیم.

۴-۳. محاسبه برنامه زمان‌بندی پروژه

با تعریف گره‌های مربوط به فعالیت‌ها و اتصال آنها به یکدیگر، مدت‌زمان هر فعالیت بر اساس داده‌های BIM به صورت بلادرنگ محاسبه می‌شود. برای انجام این محاسبات، چارچوب پیشنهادی بر اساس منطق مسیر رفت در روش مسیر بحرانی، زودترین زمان‌های شروع و پایان فعالیت‌ها را محاسبه می‌کند. به این منظور، ما از منطق برنامه‌نویسی بصری استفاده کرده‌ایم که در آن خروجی یک گره

۴-۵. ایجاد خودکار مدل چهاربعدی فرآیند ساخت پروژه

برای بهره‌برداری کامل از مزایای BIM، ما یک رویکرد مدل‌سازی خودکار چهاربعدی را نیز در این چارچوب ادغام کرده‌ایم که از سطوح شفافیت برای پنهان و نمایان کردن دینامیک المان‌ها بر اساس پیشرفت فعالیت استفاده می‌کند. به این ترتیب امکان مشاهده توالی‌های ساخت در طول زمان فراهم می‌شود.

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

- فعالیت‌های تخریب شامل حذف ساختارها یا اجزای موجود است.
- فعالیت‌های ساخت مربوط به کار ساخت یا مونتاژ است.

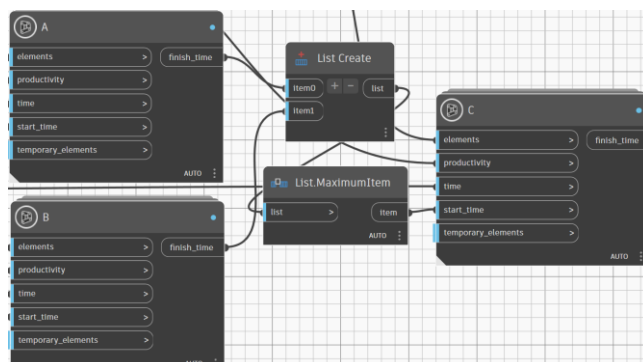
نمایش هر عنصر از طریق سطح شفافیت (tr) مدیریت می‌شود که بر اساس زمان فعلی در شبیه‌سازی ($tnow$)، زمان شروع فعالیت (s) و مدت‌زمان آن (d) متفاوت است. برای فعالیت‌های ساخت، شفافیت قبل از شروع فعالیت را ۱۰۰٪ در نظر گرفته‌ایم. در زمان شروع فعالیت شفافیت از ۸۰٪ (بسیار شفاف) در نظر گرفته شده است و به تدریج به ۰٪ (کاملاً نمایان) کاهش می‌یابد. به این ترتیب المان‌های مدل با پیشرفت روند ساخت آنها بصری‌تر می‌شوند. رابطه زیر روش محاسبه سطح شفافیت را نشان می‌دهد:

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

به صورت مشابه، فعالیت‌های تخریب قبل از شروع فعالیت دارای شفافیت ۰٪ یعنی کاملاً نمایان هستند. در زمان شروع فعالیت از ۸۰٪ شفافیت به تدریج و براساس زمان شبیه‌سازی درجه شفافیت تا ۰٪

ورودی گره بعدی خواهد بود. یکی از ورودی‌های گره‌های اختصاصی ایجاد شده برای انواع فعالیت‌ها، زمان شروع ($start_time$) است و تنها خروجی گره‌های اختصاصی فعالیت‌ها زودترین زمان پایان فعالیت ($finish_time$) است. زمان پایان به صورت ساده با جمع زمان شروع و مدت زمان انجام فعالیت (d) محاسبه می‌گردد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد محاسبه مدت زمان در بسیاری از فعالیت‌ها با در نظر گرفتن مقادیر متره در درون گره اختصاصی فعالیت محاسبه می‌گردد.

در شبکه فعالیت‌ها، خروجی هر گره به ورودی $start_time$ گره بعد متصل می‌گردد. به این ترتیب با استفاده از منطق Dynamo این زمان شروع به صورت خودکار محاسبه می‌گردد. اما زمانی که چند فعالیت پیش نیاز فعالیت بعدی هستند ما از یک لیست و دستور محاسبه بیشینه ($maximum$) برای اتصال فعالیت‌ها به هم استفاده می‌کنیم. برای نمونه شکل ۳ بخشی از یک شبکه فعالیت را نشان می‌دهد که در آن فعالیت‌های A و B پیش‌نیاز فعالیت C هستند. با شیوه اتصال پیشنهادی و منطق پیاده شده در گره اختصاصی فعالیت، زودترین زمان شروع و پایان فعالیت C بر اساس فعالیت‌های A و B به صورت خودکار محاسبه می‌گردد.



شکل ۳: مدل کردن پیش‌نیازی فعالیت‌ها به کمک گره‌های اختصاصی در Dynamo

Figure ۳: Modeling activity dependencies using custom nodes in Dynamo.

افزایش می‌یابد که باعث می‌شود المان‌های مربوطه در زمان‌های نزدیک به انتهای فعالیت کم‌رنج‌تر دیده شوند. نهایتاً بعد از اتمام فعالیت شفافیت به ۱۰۰٪ تغییر می‌یابد که باعث می‌شود در ادامه فرآیند شبیه سازی دیگر این المان‌ها نمایش داده نشوند. رابطه زیر محاسبه میزان شفافیت در این حالت را نشان می‌دهد:

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

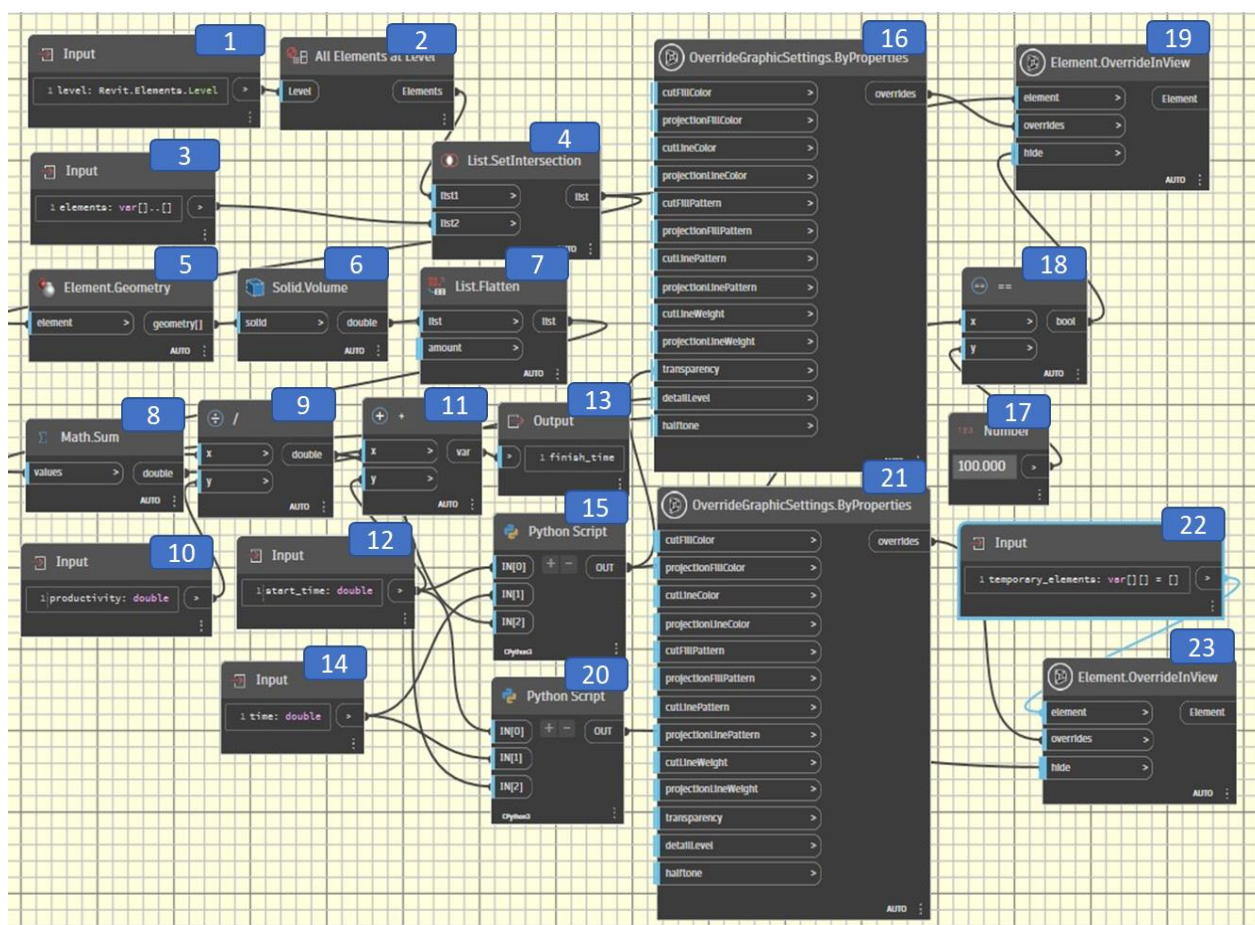
علت تغییر شفافیت از ۸۰٪ به ۱۰۰٪ به صورت ناگهانی این است که امکان تفکیک بصری دقیق‌تر بین المان‌های در حال ساخت و المان‌های تکمیل‌شده فراهم شود. این تفکیک بصری کمک می‌کند تا کاربران بتوانند به راحتی وضعیت پیشرفت هر المان را در فرآیند ساخت تشخیص دهند. برای تعیین میزان شفافیت، از گره‌های موجود در Dynamo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

۳-۶. پیاده سازی گره‌های اختصاصی

با ترکیب دسته بندی‌های مربوط به فعالیت‌های ارایه شده در بالا در مجموع ۱۶ گره اختصاصی Dynamo مربوط به تعریف انواع فعالیت‌ها ایجاد شده است (۲ × ۴ × ۲): دو نوع روش برای انتخاب

المان‌ها، چهار روش برای محاسبه متره و مدت زمان، و دو روش برای نمایش ساخت یا تخریب). این طراحی به توسعه‌دهندگان امکان می‌دهد چارچوب زمان‌بندی را با نیازهای خاص هر پروژه تطبیق دهند. در حالی که ممکن بود یک گره فعالیت چند پارامتره واحد ایجاد کنیم تا همه دسته‌بندی‌ها را در بر گیرد، چنین طراحی به یک فضای کاری پیچیده Dynamo با ورودی‌های متعدد برای هر گره منجر می‌شود. در عوض، ما تصمیم گرفتیم تعداد بیشتری از گره‌های تخصصی ایجاد کنیم که هر کدام ورودی‌های کمتری داشته باشند.

برای نمونه ساختار داخلی یکی از این گره‌های اختصاصی طراحی شده در شکل ۴ نمایش داده شده است که در آن گره‌های داخلی را برای ارائه بهتر توضیحات شماره گذاری کرده‌ایم. گره‌های ۱ تا ۴ برای انتخاب المانها بر اساس طبقه استفاده می‌شود. ابتدا، تمام المان‌های یک طبقه با استفاده از گره‌های ۱ و ۲ انتخاب می‌شوند. سپس، اشتراک این مجموعه با المان‌های ورودی در گره ۴ گرفته می‌شود تا تنها المان‌های متعلق به طبقه مشخص شده انتخاب شوند. گره‌های ۵ تا ۸ برای محاسبه مقدار متره (در این گره حجم) استفاده شده است. ابتدا، حجم هر المان ورودی به صورت یک لیست توسط گره‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شود. سپس، گره ۸ مجموع کل حجم المان‌های ورودی را به دست می‌آورد. گره‌های ۹ تا ۱۳ برای محاسبه مدت زمان فعالیت و زمان پایان فعالیت استفاده می‌شوند. ابتدا، مقدار حجم محاسبه شده از گره ۸ بر بهره‌وری (گره ۱۰) تقسیم می‌شود (گره ۹) تا مدت زمان انجام فعالیت مشخص گردد. سپس، این مقدار به زمان شروع فعالیت (گره ۱۲) اضافه می‌شود تا زمان اتمام فعالیت محاسبه گردد. برای نمایش چهاربعدی نیز از گره‌های ۱۴ تا ۲۳ استفاده شده است. به این ترتیب که گره‌های ۱۵ تا ۱۷ برای نمایش شفافیت مناسب المان‌هایی که قرار است ساخته شوند بر اساس میزان پیشرفت پروژه طراحی شده‌اند. به صورت خاص، گره ۱۵ رابطه (۲) را با کد پایتون پیاده سازی می‌کند. سپس، گره‌های ۱۶ و ۱۹ برای به روزرسانی میزان شفافیت المان در حال ساخت بر اساس خروجی گره ۱۵ استفاده می‌شوند. اگر مقدار محاسبه شده در گره ۱۵ برابر ۱۰۰ باشد، یعنی المان کاملاً پنهان شده است. در این حالت، گره ۱۸



شکل ۴: پیاده سازی داخلی یک گره اختصاصی فعالیت که در آن فیلتر طبقه وجود دارد و محاسبه متره بر اساس حجم المان های متصل انجام می شود.

Figure ۴: Internal implementation of a custom activity node, where a floor filter is present, and quantity takeoff is calculated based on the volume of connected elements.

فعالیت ها برای مشخص کردن روند ساخت پروژه در شبکه فعالیت می توان استفاده نمود.

۴. مطالعه موردی

چارچوب پیشنهادی روی یک مطالعه موردی مربوط به یک ساختمان مسکونی چهارطبقه واقع در شهرستان دماوند در استان تهران پیاده سازی شده است. این ویلا با مساحت حدود ۷۰۰ متر مربع و با اسکلت بتنی طراحی گردیده است. مدل BIM معماری این پروژه در نرم افزار Autodesk Revit ایجاد گردیده و شامل برخی از ماشین آلات اصلی مورد نیاز برای فعالیت های پروژه است. مراحل

این وضعیت را بررسی کرده و در صورت نیاز، فرآیند پنهان سازی گره ۱۹ را فعال می کند. گره های ۲۰ تا ۲۳ مربوط به نمایش اجزای موقت در مدل است. به صورت خاص گره ۲۰ یک مقدار *True* یا *False* را بر اساس زمان شروع، زمان فعلی شبیه سازی و مدت زمان فعالیت محاسبه می کند که نشان دهنده نمایش یا عدم نمایش المان های موقت است. گره ۲۱ ورودی خاصی ندارد، اما گره ۲۳ برای به روز رسانی مدل به آن نیاز دارد.

سایر انواع فعالیت ها هم با روش مشابهی به صورت گره های اختصاصی در Dynamo ایجاد شده اند که بنا به نیاز پروژه از ترکیب این

محاسبه می‌شود و به این ترتیب برنامه زمان‌بندی پروژه به صورت خودکار آماده می‌گردد.

۴-۳. نمایش چهاربعدی فرآیند ساخت

تمامی فعالیت‌ها به جز خاک‌برداری از نوع ساخت تعریف شده‌اند؛ در حالیکه فعالیت خاک‌برداری از نوع تخریب در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در مدل چهاربعدی ابتدا المان تعریف شده برای خاک دیده می‌شود و سپس با گذشت زمان شبیه‌سازی ناپدید می‌گردد و بجای آن فونداسون قرار می‌گیرد.

همچنین، یک گره برای نمایش زمان فعلی شبیه‌سازی به ورودی زمان (*time*) تمامی فعالیت‌ها متصل شده که با تغییر مقدار زمان، وضعیت نمایش مدل تغییر می‌کند. در ابتدای شبیه‌سازی، با قرار دادن زمان در صفر، تمامی المان‌های ساختمان به حالت مخفی درمی‌آیند. زمان پروژه با استفاده از یک نوار لغزنده که زمان فعلی شبیه‌سازی (*tnow*) را تعیین می‌کند، به جلو پیش می‌رود. با پیشرفت زمان، ساختمان به تدریج و بر اساس پیشرفت پروژه، المان‌های مربوطه را نمایش می‌دهد و مراحل ساخت به صورت یک مدل چهاربعدی بازنمایی می‌شود. این شبیه‌سازی تا زمان اتمام پروژه ادامه دارد. در شکل ۵، برخی از مراحل نمایش چهاربعدی در مطالعه موردی به تصویر کشیده شده است.

شکل ۵-الف عملیات خاک‌برداری را در کنار ماشین خاک‌برداری نمایش می‌دهد. این ماشین در تمام مدت عملیات حضور دارد و هم‌زمان، بخش مربوط به خاک‌برداری به تدریج شفاف‌تر شده و در نهایت ناپدید می‌شود. شکل‌های ۵-ب و ۵-پ دو مرحله از ساخت اسکلت ساختمان را نشان می‌دهند. در شکل ۵-ب، سقف طبقه اول در حال ساخت است و تا حدی شفاف دیده می‌شود، درحالی‌که در شکل ۵-پ، ستون‌های طبقه سوم در حال ساخت هستند. شکل‌های ۵-ت، ۵-ث و ۵-ج سه مرحله از ساخت دیوارها را نمایش می‌دهند که به ترتیب مربوط به طبقات اول، سوم و چهارم هستند. شکل ۵-چ زمان نصب پنجره‌ها را نشان می‌دهد و به همین دلیل، جرثقیل در تصویر قابل مشاهده است. در نهایت، شکل ۵-ح مرحله اتمام ساخت

پیاده‌سازی این چارچوب به ترتیب شامل ایجاد شبکه فعالیت‌ها و اتصال آنها به مدل BIM، محاسبه زمان و برنامه زمان‌بندی پروژه، و نمایش چهاربعدی آن است، که در ادامه توضیح داده شده است.

۴-۱. ایجاد شبکه فعالیت‌ها و اتصال به BIM

از آنجا که سازه ساختمان مورد مطالعه بتنی است، اغلب فعالیت‌ها به صورت طبقه به طبقه در نظر گرفته شده‌اند و برای مدل‌سازی این فعالیت‌ها از گره‌های اختصاصی جهت فیلتر کردن استفاده شده است. برای انتخاب المان‌ها، در اغلب موارد از گره‌های از پیش تعریف‌شده در Dynamo استفاده شد که برای انتخاب همه المان‌های یک نوع خاص طراحی شده‌اند. مثلاً تمام المان‌های مربوط به یک *family* یا یک *category* یا *class* مشخص به کمک این گره‌ها انتخاب می‌شوند. سپس با تعیین طبقه مربوطه، المان‌های موردنظر برای فعالیت خاص فیلتر می‌شوند. المان‌های موقت تعریف شده نیز به ورودی المان‌های موقت (*temporary_elements*) گره فعالیت مربوطه متصل شده‌اند که شامل یک ماشین خاک‌برداری و یک جرثقیل برای نصب پنجره‌هاست.

۴-۲. محاسبه زمان انجام فعالیت‌ها و ایجاد برنامه زمان‌بندی

به منظور افزایش دقت زمان‌بندی پروژه، برخی فعالیت‌ها (مانند تجهیز کارگاه) در شبکه فعالیت‌ها گنجانده شده‌اند. اما از آنجایی که المان‌های مرتبط با این فعالیت‌ها مدل‌سازی نشده‌اند، این فعالیت‌ها به المان خاصی پیوند داده نشده و زمان اجرای آن‌ها مستقیماً به مدل داده شده است. در سایر موارد، فعالیت‌ها به المان‌های مربوطه در مدل BIM پیوند داده شده‌اند و مدت زمان آنها بسته به متره آن المان‌ها و واحد اندازه‌گیری مشخص شده 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 شبکه فعالیت‌ها و وارد کردن اطلاعات بهره‌وری و زمانی، زودترین زمان شروع و پایان هر فعالیت به صورت خودکار و بلادرنگ

را نمایش می‌دهد. در این پروژه، تنها با تعیین روند انجام فعالیت‌ها، انتخاب المان‌های مربوطه و وارد کردن بهره‌وری‌های تخمینی، برنامه زمان‌بندی پروژه و مدل چهاربعدی به صورت خودکار ایجاد شده است.

۵. صحت سنجی

چارچوب ارائه‌شده از دو دیدگاه بررسی شد: (۱) بررسی درستی محاسبات زمان شروع و پایان هر فعالیت و زمان کل پروژه در شبکه فعالیت‌ها. (۲) بررسی نتایج مطالعه موردی

۵-۱ صحت سنجی محاسبات شبکه فعالیت‌ها

صحت محاسبات چارچوب پیشنهادی از طریق مثال‌های عددی ارزیابی شدند. چندین شبکه فعالیت از منابع معتبر انتخاب و در داینامو پیاده‌سازی شدند و نتایج آن‌ها با داده‌های منابع اصلی مقایسه شده است. به عنوان نمونه، یک مثال برگرفته از سنتیاگو و ماگالون [۳۶] بررسی شده که اطلاعات فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده و پیاده‌سازی آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان‌های محاسبه‌شده برای شروع و پایان فعالیت‌ها و مدت‌زمان کل پروژه در چارچوب پیشنهادی دقیقاً با مقادیر ذکرشده در منبع مطابقت دارد و در هر دو مورد ۱۸ روز به دست آمده است.

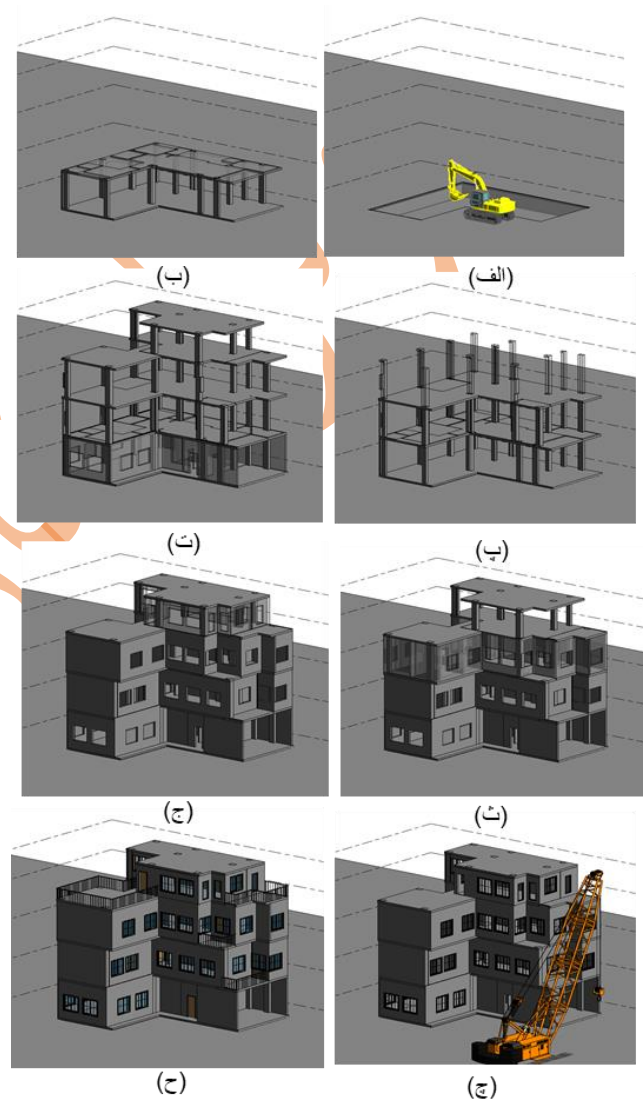
جدول ۱. اطلاعات مربوط به شبکه فعالیت‌ها برای مثال ساده [۳۶]

Table ۱. Information on the activity network for a simple example [۳۶]

Activity	A	B	C	D	E	F	G	H
Duration	۷	۳	۶	۳	۳	۲	۳	۲
Prerequisite	—	—	A	B	D, F	B	C	E, G

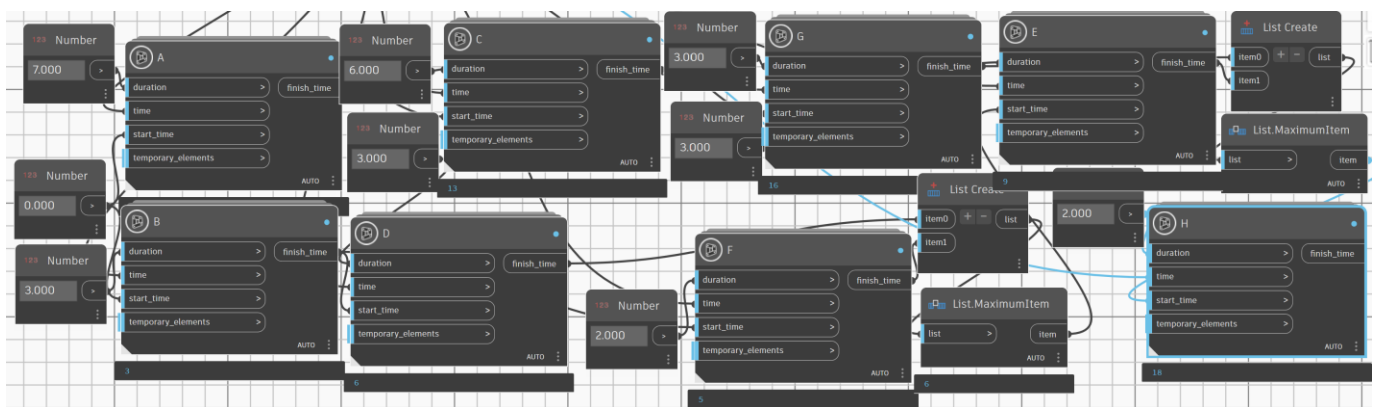
۵-۲ صحت سنجی چارچوب بر اساس نتایج مطالعه موردی

در این بخش، نتایج حاصل از چارچوب پیشنهادی با برنامه زمان‌بندی اولیه مقایسه شده است. در روش قبلی، متره پروژه از مدل BIM استخراج و با لحاظ نرخ بهره‌وری، مدت فعالیت‌ها در اکسل محاسبه شده بود. سپس زمان‌بندی پروژه بر اساس پیش‌نیازی‌ها در MS Project تعیین گردید. بررسی‌ها نشان داد که زمان کل پروژه در هر دو روش ۲۲۱.۱۵ روز بوده و چارچوب پیشنهادی نتایج مشابهی را به صورت خودکار ارائه داده است. این تطابق منطقی است، زیرا به



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

Figure ۵: Selected stages in the 4D model: (a) Excavation, (b) and (c) Structural construction, (d), (e), and (f) Wall construction, (g) Window installation, and (h) Completed model.



شکل ۶: پیاده سازی شبکه فعالیت‌ها برای یک مثال ساده.

Figure ۶: Implementation of the activity network for a simple example.

شده می‌تواند به عنوان یک ابزار معتبر در مدیریت زمان‌بندی و فرآیند ساخت پروژه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد.

هر دو روش، زمان‌بندی بر اساس متره مدل BIM انجام شده است، با این تفاوت که چارچوب پیشنهادی این فرآیند را به طور خودکار و درون گره‌های طراحی شده اجرا می‌کند.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چارچوبی برای تولید نیمه‌خودکار برنامه زمان‌بندی و ایجاد مدل‌های چهاربعدی با استفاده از BIM و برنامه‌نویسی بصری ارائه شد. این چارچوب با کاهش نیاز به ورودی‌های پیچیده از سوی متخصصان، فرآیند زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی را تسهیل کرده و امکان نمایش چهاربعدی پروژه‌ها را فراهم می‌آورد. این چارچوب در محیط برنامه‌نویسی بصری Dynamo و نرم‌افزار Autodesk Revit پیاده‌سازی شده است. چارچوب پیشنهادی از طریق کنترل شفافیت بر اساس زمان شبیه‌سازی، امکان مشاهده چهار بعدی را به صورت خودکار فراهم می‌آورد. ماشین‌آلات و سایر المان‌های موقت در مدل نیز با اتصال به فعالیت‌های مربوطه در زمان انجام فعالیت نمایش داده می‌شوند. به این ترتیب، راه حلی ساده و عملی برای ایجاد نمایش چهاربعدی در بستر BIM را فراهم می‌آورد.

به‌منظور صحت‌سنجی، چارچوب پیشنهادی بر روی یک نمونه از شبکه فعالیت‌های پروژه پیاده‌سازی شد و تطابق دقیق عددی نتایج با محاسبات روش مسیر بحرانی تأیید گردید. علاوه بر این، یک مطالعه موردی بر روی یک ساختمان مسکونی بتنی انجام شد که در آن، نتایج صحت‌سنجی نشان داد برنامه زمان‌بندی تولیدشده توسط

در ادامه، تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات ورودی بررسی گردید. نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی قادر است برنامه زمان‌بندی و مدل چهار بعدی را بلافاصله پس از اعمال تغییرات در BIM به‌روز کند. به عنوان نمونه، افزایش عمق فونداسیون از ۱.۵ متر به ۲ متر، مدت کل پروژه را از ۲۲۱.۱۵ روز به ۲۲۸.۵۱ روز، زمان اتمام خاک‌برداری از ۲۳.۲۵ روز به ۲۷.۶۷ روز و زمان اجرای فونداسیون از ۳۲.۰۸ روز به ۳۹.۴۵ روز تغییر داد. افزایش نرخ بهره‌وری خاک‌برداری از ۲۰ مترمکعب در روز به ۳۰ مترمکعب در روز، مدت پروژه را به ۲۱۶.۷۳ روز کاهش داد. این نتایج نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری چارچوب پیشنهادی در واکنش خودکار به تغییرات مدل و قابلیت آن در به‌روزرسانی سریع برنامه زمان‌بندی است.

علاوه بر تحلیل‌های عددی، مدل‌های چهاربعدی به‌صورت کیفی نیز ارزیابی شدند. در این بررسی، مدل ایجاد شده به مدیران پروژه نمایش داده شد و نظرات آن‌ها دریافت گردید. طبق بازخورد مدیران، فرآیند ساخت در مدل چهاربعدی با واقعیت پروژه هم‌خوانی دارد و مدل‌سازی خودکار، هماهنگی بین فعالیت‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد. نتایج صحت‌سنجی‌های انجام شده نشان می‌دهد که چارچوب ارائه

۳. Crowther, J. and Ajayi, S.O., ۲۰۲۱. Impacts of 4D BIM on construction project performance. *International J. of Construction Management*, ۲۱(۷), pp. ۷۲۴-۷۳۷.
DOI: ۱۰.۱۰۸۰/۱۵۶۲۳۵۹۹, ۲۰۱۹, ۱۵۸۰۸۳۲
۴. Botton, C., Kubicki, S. and Halin, G., ۲۰۱۵. 4D/BIM simulation for pre-construction and construction scheduling: Multiple levels of development within a single case study. *Creative Construction Conference (Kraków- Poland)* pp. ۵۰۰-۵۰۵.
DOI: ۱۰.۱۳۱۴۰/RG.۲, ۱, ۱۹۴۱, ۳۶۰۳.
۵. Bolshakova, V., Guerriero, A. and Halin, G., ۲۰۱۸. Identification of relevant project documents to 4D BIM uses for a synchronous collaborative decision support. *Creative Construction Conference (Ljubljana-Slovenia)*, pp. ۰۰۰-۰۰۰. DOI: ۱۰.۳۳۱۱/CCC۲۰۱۸-۱۳۴.
۶. Vass, S. and Gustavsson, T. K., ۲۰۱۷. Challenges when implementing BIM for industry change, *Construction Management and Economics*, ۳۵(۱۰), pp. ۵۹۷-۶۱۰.
DOI: ۱۰.۱۰۸۰/۰۱۴۴۶۱۹۳, ۲۰۱۷, ۱۳۱۴۵۱۹.
۷. Torres-Calderon, W., Chi, Y., Amer, F. and Golparvar-Fard, M., ۲۰۱۹. Automated mining of construction schedules for easy and quick assembly of 4D BIM simulations. *Computing in Civil Engineering Conference Proceedings*, pp. ۴۳۲-۴۳۸.
DOI: ۱۰.۱۰۶۱/۹۷۸۰۷۸۴۴۸۲۴۲۱, ۰۵۵.
۸. Sheikhhoshkar, M., Pour Rahimian, F., Kaveh, M.H., Hosseini, M.R. and Edwards, D.J., ۲۰۱۹. Automated planning of concrete joint layouts with 4D-BIM. *Automation in Construction*, ۱۰۷, pp. ۱۰۲۹۴۳.
DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۹.۱۰۲۹۴۳.
۹. Kravchenko, O. and Lyubenko, V., ۲۰۲۳. BIM technologies in engineering network design. *Problems of Water Supply, Sewage, and Hydraulics*, pp. ۲۹-۳۴.
DOI: ۱۰.۳۲۳۴۷/۲۵۲۴-۰۰۲۱, ۲۰۲۳, ۴۲, ۲۹-۳۴.
۱۰. Biswas, H.K., Sim, T.Y. and Lau, S.L., ۲۰۲۳. Impact of building information modelling and advanced technologies in the AEC industry: A contemporary review and future directions. *J. of Building Engineering*, pp. ۱۰۸۱۶۵. DOI: ۱۰.۲۴۲۷۵/uama.۱۲۸, ۱۰۴۶۴.
۱۱. Bredella, N., ۲۰۱۹. Simulation and architecture: Mapping building information modeling. *N.T.M.*, pp. ۴۱۹-۴۴۱. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۰۴۸-۰۱۹-۰۰۲۲۴-۹.
۱۲. Borkowski, A.S., ۲۰۲۳. Evolution of BIM: Epistemology, genesis and division into periods. *J. of Information Technology in Construction*, ۲۸, pp. ۶۴۶-۶۶۱. DOI: ۱۰.۳۶۶۸۰/j.itcon.۲۰۲۳.۰۳۴.

چارچوب پیشنهادی با مدل ایجادشده در MS Project کاملاً مطابقت دارد. در هر دو روش، مدت زمان ۲۲۱.۱۵ روز محاسبه شد. همچنین، انجام تحلیل حساسیت و اعمال تغییرات در BIM، انعطاف پذیری چارچوب را در واکنش صحیح و خودکار به تغییرات مدل تأیید کرد. مزایای اصلی چارچوب پیشنهادی را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. استفاده از برنامه نویسی بصری برای ساده سازی زمان بندی پروژه و کاهش نیاز به ورودی های پیچیده توسط متخصصان
 ۲. ارتباط بلادرنگ بین مدل BIM و برنامه زمان بندی، به نحوی که تغییرات مدل به صورت خودکار در زمان بندی و مدل چهاربعدی اعمال می شود
 ۳. امکان ایجاد خودکار مدل های چهاربعدی
 ۴. حذف نیاز به انتقال اطلاعات بین نرم افزارهای مختلف و انجام تمامی فرایندها در یک محیط واحد
 ۵. نمایش ماشین آلات و المان های موقت در مدل چهاربعدی که به مدیریت بهتر فعالیت ها کمک می کند
- با وجود راحتی استفاده از چارچوب پیشنهاد شده، در تحقیقات آینده، ترکیب چارچوب پیشنهاد شده با هوش مصنوعی می تواند ایجاد برنامه زمان بندی و مدل چهاربعدی را تا حد قابل توجهی ارتقا دهد. برای مثال، استفاده از هوش مصنوعی می تواند فرایند اتصال المان های مدل BIM به گره های فعالیت در Dynamo و همچنین تخمین مدت زمان یا بهره وری انجام فعالیت ها را به صورت کاملاً خودکار میسر کند.

منابع

۱. Dasović, B., Galić, M. and Klanšek, U., ۲۰۲۰. A survey on integration of optimization and project management tools for sustainable construction scheduling. *Sustainability*, ۱۲(۸), pp. ۳۴۰۵. DOI: ۱۰.۳۳۹۰/su۱۲۰۸۳۴۰۵.
۲. Aredah, A.S., Baraka, M.A. and Elkhafif, M., ۲۰۱۹. Project scheduling techniques within a building information modeling (BIM) environment: A survey study. *IEEE Engineering Management Review*, ۴۷(۲), pp. ۱۳۳-۱۴۳. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/EMR.۲۰۱۹.۲۹۱۶۳۶۵.

- genetic algorithm. *J. of Physics: Conference Series*, ۱۷۴۴(۲), pp. ۰۲۲.۶۵.
DOI:۱۰.۱۰۸۸/۱۷۴۴-۶۵۹۶/۱۷۴۴/۲/۰۲۲.۶۵.
۲۳. Pour Rahimian, F., Seyedzadeh, S., Oliver, S., Rodriguez, S. and Dawood, N., ۲۰۲۰. On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application of BIM and machine learning. *Automation in Construction*, ۱۱۰, pp. ۱۰۳۰۱۲.
DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۹.۱۰۳۰۱۲.
۲۴. Viklund Tallgren, M., Roupé, M. and Johansson, M., ۲۰۲۱. ۴D modelling using virtual collaborative planning and scheduling. *J. of Information Technology in Construction*, ۲۶, pp. ۷۶۳-۷۸۲.
DOI:۱۰.۳۶۶۸۰/J.ITCON.۲۰۲۱.۰۴۲.
۲۵. Ciribini, A.L.C., Mastrolembu Ventura, S. and Paneroni, M., ۲۰۱۶. Implementation of an interoperable process to optimize design and construction phases of a residential building: A BIM pilot project. *Automation in Construction*, ۷۱, pp. ۶۲-۷۳.
DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۶.۰۳.۰۰۵.
۲۶. Altun, M. and Akcamete, A., ۲۰۱۹. A method for facilitating ۴D modeling by automating task information generation and mapping. In: *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, pp. ۴۷۹-۴۸۶. DOI:۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۰۳۰-۰۰۲۲۰-۶-۰۷.
۲۷. Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J., ۲۰۱۸. *Building information modeling: technology foundations and industry practice*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland. DOI:۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۹۲۸۶۲-۳.
۲۸. Kensek, K., ۲۰۱۵. Visual programming for building information modeling: Energy and shading analysis case studies. *J. of Green Building*, ۱۰(۴), pp. ۲۸-۴۳. DOI:۱۰.۳۹۹۲/jgb.۱۰,۴,۲۸.
۲۹. Ghannad, pp., Lee, Y.C., Dimyadi, J. and Solihin, W., ۲۰۱۹. Automated BIM data validation integrating open-standard schema with visual programming language. *Advanced Engineering Informatics*, ۴۰, pp. ۱۴-۲۸. DOI:۱۰.۱۰۱۶/J.AEI.۲۰۱۹.۰۱.۰۰۶.
۳۰. Collao, J., Lozano-Galant, F., Lozano-Galant, J.A. and Turmo, J., ۲۰۲۱. BIM visual programming tools applications in infrastructure projects: A state-of-the-art review. *Applied Sciences*, ۱۱(۱۸), pp. ۸۲۴۳. DOI:۱۰.۳۳۹۰/APP۱۱۱۸۸۳۴۳.
۳۱. Chen, Q., Adey, B.T., Haas, C. and Hall, D.M., ۲۰۲۰. Using look-ahead plans to improve material flow processes on construction projects when using BIM and
۱۳. Rahmani Asl, M., Zarrinmehr, S., Bergin, M. and Yan, W., ۲۰۱۵. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy and Buildings*, ۱۰۸, pp. ۴۰۱-۴۱۲. DOI:۱۰.۱۰۱۶/J.ENBUILD.۲۰۱۵.۰۹.۰۱۱.
۱۴. Shakri, A. and Taheri Jebli, S., ۲۰۱۹. Comparison of project cost estimation with conventional method and dynamic intelligent model based on BIM according to building cost index. *J. of Safety Science and Engineering*, ۳۶(۲,۱), pp. ۱۴۱-۱۵۰. [In Persian].
DOI:۱۰.۲۴۲۰۰/j۳۰,۲۰۱۹,۵۱۲۳۷,۲۳۸۲.
۱۵. Solihin, W., Dimyadi, J., Lee, Y.C., Eastman, C. and Amor, R., ۲۰۲۰. Simplified schema queries for supporting BIM-based rule-checking applications. *Automation in Construction*, ۱۱۷, pp. ۱۰۳۲۴۸. DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۰.۱۰۳۲۴۸.
۱۶. Rasooli Manesh, M., Taghdis, H., Choukan, F., Dadashi Haji, M. and Tamani Far, M., ۲۰۱۹. Automated evaluation of fall risk using building information modeling and image processing. *Sharif Civil Engineering Journal*, ۳۶(۲,۴), pp. ۳۹-۴۷. [In Persian].
DOI:۱۰.۲۴۲۰۰/j۳۰,۲۰۲۰,۵۳۱۹۸,۲۵۳۹.
۱۷. Zou, Y., Kiviniemi, A. and Jones, S.W., ۲۰۱۷. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. *Safety Science*, ۹۷, pp. ۸۸-۹۸. DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.ssci.۲۰۱۵.۱۲.۰۲۷.
۱۸. Lozano, F., Jurado, J.C., Lozano-Galant, J.A., de la Fuente, A. and Turmo, J., ۲۰۲۳. Integration of BIM and value model for sustainability assessment for application in bridge projects. *Automation in Construction*, ۱۵۲, pp. ۱۰۴۹۳۵. DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۳.۱۰۴۹۳۵.
۱۹. Cheng, Q., Tayeh, B.A., Abu Aisheh, Y.I., Alaloul, W.S. and Aldahdooh, Z.A., ۲۰۲۴. Leveraging BIM for sustainable construction: Benefits, barriers, and best practices. *Sustainability*, ۱۶(۱۷), pp. ۷۶۵۴. DOI:۱۰.۳۳۹۰/su۱۶۱۷۷۶۵۴.
۲۰. Oreto, C., Massotti, L., Biancardo, S.A., Veropalumbo, R., Viscione, N. and Russo, F., ۲۰۲۱. BIM-based pavement management tool for scheduling urban road maintenance. *Infrastructures*, ۶(۱۱), pp. ۱۴۸.
DOI:۱۰.۳۳۹۰/INFRASTRUCTURES۱۱۰۱۴۸.
۲۱. Nguyen, D.T., Chou, J.S. and Tran, D.H., ۲۰۲۲. Integrating a novel multiple-objective FBI with BIM to determine tradeoff among resources in project scheduling. *Knowledge-Based Systems*, ۲۳۵, pp. ۱۰۷۶۴۰. DOI:۱۰.۱۰۱۶/j.knosys.۲۰۲۱.۱۰۷۶۴۰.
۲۲. Zhang, Q., ۲۰۲۱. Research on the construction schedule and cost optimization of grid structure based on BIM and

- RFID technologies. *Construction Innovation*, ۲۰(۳), pp. ۴۷۱-۵۰۸. DOI: ۱۰.۱۱۰۸/CI-۱۱-۲۰۱۹-۰۱۳۳.
۳۲. Mazars, T. and Francis, A., ۲۰۲۰. Chronographical spatiotemporal dynamic ۴D planning. *Automation in Construction*, ۱۱۲, pp. ۱۰۳۰۷۶.
DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۰.۱۰۳۰۷۶.
۳۳. Wang, Z. and Rezazadeh Azar, E., ۲۰۱۹. BIM-based draft schedule generation in reinforced concrete-framed buildings. *Construction Innovation*, ۱۹(۲), pp. ۲۸۰-۲۹۴. DOI: ۱۰.۱۱۰۸/CI-۱۱-۲۰۱۸-۰۰۹۴.
۳۴. Wang, H.W., Lin, J.R. and Zhang, J.P., ۲۰۲۰. Work package-based information modeling for resource-constrained scheduling of construction projects. *Automation in Construction*, ۱۰۹, pp. ۱۰۲۹۵۸. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۹.۱۰۲۹۵۸.
۳۵. Sadeghi, N., Dehghani, M.S. and Ingolfsson, A., ۲۰۲۴. Choice of probability distributions for activity durations in project networks with limited sample size. *J. of Construction Engineering and Management*, 150(۳), pp. ۰۴۰۲۴۰۰۲. DOI: ۱۰.۱۰۶۱/JCEMD۴.COENG-۱۳۷۵۳.
۳۶. Santiago, J. and Magallon, D., ۲۰۰۹. Critical path method. *CEE 320 – VDC Seminar*, Stanford University. Retrieved from <https://acqnotes.com>.