توسعه مدل نوین برنامه‌ریزی ساخت پروژه‌های بالاستی راه‌آهن با استفاده از ابزار شبیه‌سازی پیشامد گسسته (مطالعه موردی: راه‌آهن میانه – اردبیل)

مقاله علمی – پژوهشی

علیرضا مهدوی میرعلیلو، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مسعود فتحعلی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
حسین تقدس، دانشیار، گروه مدیریت ساخت، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fathali@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱٤۰٤/۰۱/۲۲– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۵/۰۱
صفحه ٤۳۸–٤۱۷

چکیده

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در ساخت خطوط بالاستی راه‌آهن با مزایای متعددی همراه بوده است. این فناوری‌ها طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها نظیر به‌کارگیری ماشین‌آلات پیشرفته، مدیریت هوشمند ورود مصالح و بهره‌برداری از فناوری‌های رایانه‌ای برای اجرای پروژه‌های ریلی را دربر می‌گیرند. استفاده از شبیه‌سازی امکان برنامه‌ریزی احداث خطوط ریلی به‌صورت دقیق و منطبق با واقعیت پروژه را فراهم کرده و با تحلیل نقاط گلوگاهی، موجب افزایش بهره‌وری می‌شود. در این پژوهش به نحوه برنامه‌ریزی فرایند ساخت خطوط ریلی بالاستی با تأکید بر مدل‌سازی ساخت با استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته پرداخته شده است. برای توسعه مدل شبیه‌سازی از نرم‌افزار Arena simulation بهره گرفته شده که علاوه بر پیاده‌سازی جزئیات اجرای پروژه، امکان تصویرسازی فرایند اجرا را نیز فراهم می‌آورد. بر پایه مدل توسعه‌یافته، برخی از نقاط گلوگاهی و نحوه تعامل عوامل مؤثر در بهره‌وری ساخت پروژه به‌دقت بررسی شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، مطالعه‌ای موردی در پروژه ساخت راه‌آهن میانه - اردبیل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات جزئی در برخی عوامل تأثیرگذار می‌تواند اثر چشمگیری بر زمان اتمام پروژه داشته باشد. عوامل مختلفی ممکن است بهره‌وری و مدت اجرای پروژه را تحت‌تأثیر قرار دهند. تأخیر در عملیات زیرسازی و نحوه نامطلوب تأمین مصالح از جمله دلایل اصلی کاهش بهره‌وری هستند؛ به‌گونه‌ای که در برخی شرایط، پیشرفت پروژه تا بیش از ۱۶ درصد کاهش‌یافته است.

واژه‌های کلیدی: اجرای روسازی ریلی، ارزیابی بهره‌وری، روسازی بالاستی، شبیه‌سازی پیشامد گسسته

۱– مقدمه

روسازی خطوط راه‌آهن به‌عنوان نخستین لایه‌ای که مستقیماً با قطار در تماس است، نقشی کلیدی در انتقال ایمن و کارآمد نیروهای دینامیکی حاصل از حرکت قطار به سازه‌های زیرین ایفا می‌کند و همچنین از لایه‌های زیرسازی در برابر عوامل محیطی محافظت به عمل می‌آورد (Xiao et al., 2021). روسازی‌های ریلی دارای انواع مختلفی هستند که بر اساس خصوصیات فنی و زمینه‌های کاربرد، طبقه‌بندی می‌شوند. به‌طورکلی، این سامانه‌ها به دو گروه عمدهٔ روسازی بالاستی و بدون بالاست تقسیم می‌گردند. از میان آن‌ها، روسازی بالاستی به دلیل سادگی نسبی در اجرا، سهولت دسترسی به مصالح و هزینه‌های کمتر ساخت، از آغاز توسعه شبکه‌های ریلی تاکنون به‌عنوان یکی از متداول‌ترین گزینه‌ها برای روسازی خطوط

ریلی شناخته می‌شود. علی‌رغم پیشرفت‌های صورت‌گرفته در توسعه سامانه‌های روسازی بدون بالاست، روسازی بالاستی همچنان یکی از گزینه‌های پرکاربرد در بسیاری از خطوط ریلی جهان به شمار می‌رود (Charoenwong et al., 2023). در کشور ایران نیز شرایط مشابهی حاکم است، به‌گونه‌ای که تقریباً تمامی خطوط بین‌شهری موجود با بهره‌گیری از سیستم روسازی بالاستی احداث شده‌اند. در ساختار روسازی بالاستی، اجزای اصلی به‌ترتیب از بالا به پایین شامل ریل، ادوات اتصال (نظیر پابندها)، تراورس، لایه بالاست و زیربالاست هستند. این اجزا به‌صورت لایه‌ای بر روی یکدیگر قرار گرفته و در تعامل با هم، عملکرد منسجم و یکپارچه سامانه روسازی را تضمین می‌کنند. اگرچه ساختار کلی خطوط ریلی با روسازی بالاستی در اغلب موارد مشابه است، تفاوت‌ها عمدتاً در شیوه اجرای سیستم یا نوع مصالح مصرفی، مانند نوع تراورس یا ادوات اتصال، مشاهده می‌شود. صنعت حمل‌ونقل ریلی به‌واسطه برخورداری از مزایای متعدد نسبت به سایر شیوه‌های حمل‌ونقل، از جایگاه برجسته‌ای در نظام‌های حمل‌ونقلی برخوردار است. از مهم‌ترین این مزایا می‌توان به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، بهبود مدیریت ترافیک شهری و بین‌شهری، کاهش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، محدودسازی اثرات منفی بر محیط‌زیست، و افزایش ظرفیت جابه‌جایی بار و مسافر اشاره کرد؛ مزایایی که موجب شده‌اند حمل‌ونقل ریلی به گزینه‌ای کارآمد و پایدار در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بدل شود (Daramola, 2022). باتوجه‌به مزایای یادشده، لازم است صنعت راه‌آهن با بهره‌گیری از فناوری‌ها و رویکردهای نوین در تمامی مراحل، از طراحی و اجرا تا بهره‌برداری، در جهت افزایش بهره‌وری و استفاده حداکثری از ظرفیت‌ها و قابلیت‌های بالقوه خود گام بردارد. در سال‌های اخیر، فناوری‌های پیشرفته متعددی به‌منظور بهبود کارایی و ارتقای حوزه حمل‌ونقل ریلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این فناوری‌ها شامل استفاده از هوش مصنوعی و بینایی پردازشی[1] برای تسهیل فرایندهای بهره‌برداری و نگهداری خطوط، توسعه ناوگان ریلی و همچنین تمرکز بر اجرای پروژه‌های راه‌آهن پرسرعت در نقاط مختلف جهان می‌شود (Tang et al., 2022). بااین‌حال، در کنار پیشرفت‌ها و نوآوری‌های چشمگیر در حوزه روسازی خطوط ریلی، ادغام اصول مدیریت ساخت با فرایندهای برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل پروژه‌های ساخت راه‌آهن همچنان با محدودیت‌هایی مواجه بوده و کمتر مورد توجه پژوهشگران و فعالان صنعت قرار گرفته است.

هر پروژه عمرانی مستلزم بهره‌گیری از روشی برنامه‌ریزی‌شده، متناسب با ماهیت و الزامات خاص آن است. به‌کارگیری رویکردهای ناصحیح در برنامه‌ریزی، نه‌تنها منجر به افزایش هزینه‌ها و اتلاف زمان می‌شود، بلکه می‌تواند پذیرش و توجیه اقتصادی استفاده از حمل‌ونقل ریلی را نیز برای صنایع مختلف با چالش‌هایی همراه سازد. پروژه‌های احداث خطوط ریلی به‌عنوان پروژه‌هایی خطی و دارای ماهیت تکرارپذیر شناخته می‌شوند که برای برنامه‌ریزی اصولی آن‌ها، روش‌های متنوعی پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، روش برنامه‌ریزی خط تعادل[2] است که در این پژوهش نیز به‌عنوان مبنای مدل‌سازی فعالیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در صنعت ساخت، فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ریلی معمولاً با بهره‌گیری از روش‌های متداول همچون روش مسیر بحرانی[3] انجام می‌شود. این رویکرد در پروژه‌هایی با ساختار غیرتکراری یا دارای الگوهای تکرار محدود، کارایی نسبتاً مطلوبی دارد. بااین‌حال، پروژه‌های راه‌آهن که از جمله بارزترین نمونه‌های پروژه‌های خطی محسوب می‌شوند، به‌واسطه ویژگی‌های خاص خود، نیازمند استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی پیشرفته‌تر و سازگارتر با ماهیت خطی هستند. براین‌اساس، به‌کارگیری اصول برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی، به‌عنوان راهکاری مناسب برای رفع محدودیت‌های روش‌های رایج نظیر CPM پیشنهاد می‌شود (Zou and Zhang, 2020). باتوجه‌به مطالب مطرح‌شده و با درنظرگرفتن پیچیدگی‌های خاص پروژه‌های ریلی، نظیر تعدد روابط تقدم و تأخر میان فعالیت‌ها، تنوع جبهه‌های کاری، اهمیت مکان‌یابی مناسب برای دپوی مصالح، وسعت و طول قابل‌توجه محدوده پروژه و همچنین ماهیت تکرارپذیر بسیاری از عملیات اجرایی، می‌توان دریافت که این دسته از پروژه‌ها به‌راحتی با استفاده از روش‌های متداول برنامه‌ریزی، نظیر روش مسیر بحرانی (CPM)، قابل‌مدیریت نیستند. افزون بر این، چنین روش‌هایی به دلیل ماهیت صلب خود، فاقد توانایی لازم برای نمایش پویایی و تغییرات احتمالی در روند اجرای پروژه بوده و نمی‌توانند بازتاب دقیقی از واقعیت‌های اجرایی ارائه دهند. در این پژوهش، با شناسایی خلأهای موجود در تحقیقات پیشین و با تمرکز بر محدودیت‌های روش مسیر بحرانی در مقایسه

با رویکرد شبیه‌سازی پیشامد گسسته، مدل جدیدی ارائه شده است که قابلیت تطابق مناسبی با ویژگی‌های ساخت و اجرای پروژه‌های روسازی راه‌آهن دارد. مدل پیشنهادی با بهره‌گیری مؤثر از ابزارهایی نظیر شبیه‌سازی پیشامد گسسته و سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری[4] (DSS) مبتنی بر داده، امکان برنامه‌ریزی واقع‌گرایانه و منطبق با شرایط پروژه را فراهم می‌سازد. در چارچوب این مدل، بررسی سناریوهای مختلف اجرایی در مرحله برنامه‌ریزی برای ذی‌نفعان پروژه میسر شده و پیامدهای تصمیم‌گیری‌ها پیش از آغاز عملیات اجرایی قابل‌ارزیابی خواهد بود. بر همین اساس، در ادامه ابتدا پیشینه پژوهش‌های مرتبط مرور می‌شود، سپس نحوه پیاده‌سازی مدل شبیه‌سازی همراه با مطالعه موردی توضیح داده شده و در نهایت، نتایج و جمع‌بندی تحقیق ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

در فرایند پیچیده و پرچالش توسعه زیرساخت‌های ریلی، انتخاب روش برنامه‌ریزی مناسب برای عملیات ساخت روسازی همواره یکی از دغدغه‌های اساسی مدیران پروژه به شمار می‌رفته است. در سال‌های گذشته، تصمیم‌گیری‌ها غالباً مبتنی بر تجارب فردی یا دستورالعمل‌های عمومی صورت می‌گرفت، اما در شرایط کنونی که پروژه‌ها با پیچیدگی‌های فزاینده‌ای مواجه‌اند و محدودیت‌هایی مانند کمبود منابع، فشارهای زمانی و محدودیت فضاهای کاری نقش پررنگ‌تری یافته‌اند، این رویکردهای سنتی دیگر پاسخ‌گوی نیازهای پروژه‌ها نیستند (Roofigari and Razavi, 2017). در این بخش، ابزارها، رویکردها و فناوری‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرند که در راستای بهینه‌سازی فرایند برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های عمرانی و ریلی توسعه یافته‌اند.

۲-۱- ابزارها و روش‌های برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی

برنامه‌ریزی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی در مدیریت پروژه‌های بزرگ و پیچیده، به‌ویژه در پروژه‌های ریلی که ذی‌نفعان متعددی در آن‌ها نقش دارند، جایگاهی اساسی دارد. یک برنامه‌ریزی جامع، همانند نقشه‌ای دقیق، تمامی ابعاد پروژه از جمله هزینه، زمان‌بندی، کیفیت و ایمنی را دربر می‌گیرد و نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق اهداف تعیین‌شده ایفا می‌کند (Zou and Zhang, 2020).

این فرآیند با تکیه بر مجموعه‌ای از فرضیات مرتبط با منابع، مصالح، فعالیت‌ها و روابط میان آن‌ها، درصدد تدوین برنامه‌ای عملیاتی است که تخصیص منابع را به‌گونه‌ای بهینه و کارآمد سامان دهد (Laslo, 2020).

روش مسیر بحرانی (CPM) طی سال‌ها به‌عنوان یکی از روش‌های بنیادی در برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته و به دلیل سادگی و کارایی نسبی، همواره گزینه‌ای پرطرفدار در میان مدیران پروژه بوده است. بااین‌حال، هم‌زمان با گسترش پروژه‌های خطی مانند خطوط ریلی، محدودیت‌های این روش بیش‌ازپیش نمایان شده است. ویژگی‌های خاص پروژه‌های خطی، از جمله لزوم تعریف دقیق محدودیت‌های مکانی - زمانی و تخصیص بهینه منابع، چالش‌هایی ایجاد می‌کنند که روشCPM به‌تنهایی قادر به پاسخ‌گویی کامل به آن‌ها نیست (Roofigari and Razavi, 2017). در واکنش به این چالش‌ها، پژوهشگران به توسعه روش‌های جایگزین روی آورده‌اند؛ روش‌هایی که به‌طورکلی در دو دسته جبری و اکتشافی طبقه‌بندی می‌شوند. درحالی‌که رویکردهای جبری از دقت بالایی برخوردارند، به منابع محاسباتی پیشرفته و فرمول‌بندی پیچیده نیاز دارند. در مقابل، روش‌های اکتشافی با تکیه بر روش CPM و اعمال محدودیت‌های تکمیلی، راهکارهایی ساده‌تر و عملی‌تر ارائه می‌دهند (García-Nieves et al., 2019; Franco-Duran and de la Garza, 2020). برای ایجاد درکی واضح‌تر از این موضوع، در یک مطالعه، تأثیر تخصیص منابع بر هزینه‌ها و تحقق اهداف پروژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفت (El-Abbasy et al., 2017).

این مطالعه مبتنی بر مدل‌سازی جبری بوده که به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی، درک و به‌کارگیری آن برای کارفرما و مدیران اجرایی پروژه چندان ساده نیست.

با توجه به محدودیت‌های مطرح‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های متداول برنامه‌ریزی به‌جای ارائه راهکارهایی پویا و تطبیق‌پذیر، غالباً چارچوب‌هایی ایستا و کم‌اثر پیشنهاد می‌کنند. در این میان، نیاز به رویکردی نوین که نه‌تنها به تخصیص بهینه منابع بپردازد، بلکه با بهره‌گیری از تحلیل‌های احتمالاتی، توانایی پیش‌بینی دقیق‌تر زمان‌بندی و هزینه‌های پروژه را نیز داشته باشد، بیش از گذشته احساس می‌شود (Chen et al., 2012).

شبیه‌سازی به‌عنوان یک راهکار نوآورانه، توانسته است خلأ موجود در فرایندهای متداول برنامه‌ریزی را پوشش دهد. این ابزار با امکان مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از پارامترهای پروژه، بستری فراهم می‌کند که در آن بهینه‌سازی فعالیت‌ها در فضایی نزدیک به شرایط واقعی پروژه قابل‌انجام است. تلفیق شبیه‌سازی با فناوری‌هایی نظیر ساخت ناب[۵] و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[۶] (BIM) موجب شده است تا این رویکرد نه‌تنها به کاهش هزینه‌ها و زمان اجرای پروژه کمک کند، بلکه فرایند برنامه‌ریزی را به‌صورت دقیق‌تری با واقعیت‌های اجرایی منطبق سازد (Zamani et al., 2024). این قابلیت‌ها شبیه‌سازی را به گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های خطی تبدیل کرده‌اند، پروژه‌هایی که پیچیدگی‌های مکانی و زمانی آن‌ها مستلزم تحلیل‌های عمیق و داده‌محور است.

۲-۲- شبیه‌سازی در صنعت ساخت

هدف اصلی به‌کارگیری شبیه‌سازی در پروژه‌های ساخت، ایجاد شفافیت و فراهم‌سازی دیدی روشن در فرایند برنامه‌ریزی، به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده است. این ابزار طی چند دهه گذشته در صنعت ساخت مورد استفاده قرار گرفته و آغاز آن به توسعه مدل‌هایی نظیر CYCLONE توسط هالپین بازمی‌گردد. مدل CYCLONE، به دلیل سادگی ساختار و قابلیت مدل‌سازی فعالیت‌های چرخه‌ای، نقطه عطفی در ارتقای رویکردهای برنامه‌ریزی پروژه‌ها به شمار می‌رود. بااین‌حال، محدودیت‌هایی نظیر عدم توانایی در مدل‌سازی دقیق منابع و ناکارآمدی در شبیه‌سازی پروژه‌های پیچیده، منجر به شکل‌گیری تلاش‌های پژوهشی برای توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر شده است (AbouRizk, 2010).

در طی دو دهه اخیر، شبیه‌سازی به ابزاری کارآمد و جامع در مدیریت پروژه‌های ساخت تبدیل شده که قابلیت تحلیل و بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف پروژه را فراهم می‌سازد. این ابزار با تلفیق رویکردهای اکتشافی، امکان تخصیص پویا و هدفمند منابع را ایجاد کرده و به مدیران پروژه اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف اجرایی را پیش از مرحله اجرا مورد بررسی و ارزیابی قرار دهند (Zhang and Li, 2004). افزون بر این، شبیه‌سازی با ترکیب با فناوری‌هایی همچون هوش مصنوعی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، زمینه را برای انجام بهینه‌سازی‌های پیچیده در مرحله برنامه‌ریزی پروژه فراهم کرده است (Abbasi et al. 2020).

یکی از مهم‌ترین مزایای شبیه‌سازی، توانایی آن در مدیریت عدم‌قطعیت‌ها در پروژه‌هایی است که تجربه اجرایی در آن‌ها محدود یا در حال توسعه است. برای نمونه، در یک مطالعه در هنگ‌کنگ، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت، ریسک‌های مرتبط با فرآیند مونتاژ خانه‌های پیش‌ساخته شناسایی شدند و عواملی همچون برچسب‌گذاری نادرست و فاصله نامناسب میان انبارها به‌عنوان موانع اصلی کاهش بهره‌وری معرفی گردیدند (Li et al., 2018). چنین تحلیل‌هایی جایگاه شبیه‌سازی را به‌عنوان ابزاری کلیدی در شناسایی و کاهش ریسک‌های اجرایی در پروژه‌های ساخت تقویت کرده‌است. اگر این پرسش ایجاد شود که از میان روش‌های مختلف شبیه‌سازی کدام یک مناسب فضای ساخت پروژه‌های عمرانی هستند باید گفت که انواع مختلفی از شبیه‌سازی، از جمله شبیه‌سازی پیشامد گسسته، عامل‌محور و آماری، بسته به نوع پروژه و اهداف تحلیلی، کاربردهای خاص خود را دارند. بااین‌حال، شبیه‌سازی پیشامد گسسته (DES) به دلیل انطباق بالا با ماهیت گسسته فعالیت‌های عمرانی، به‌ویژه در پروژه‌های ساخت، کاربرد گسترده‌تری یافته است. این نوع شبیه‌سازی، با فراهم‌کردن امکان تخصیص منعطف منابع و برنامه‌ریزی مؤثر جبهه‌های کاری، مدیران پروژه را قادر می‌سازد تا سناریوهای پویا و چندمتغیره را به‌صورت دقیق مدل‌سازی کنند (Taghaddos et al., 2021).

با تمام تفاسیر ذکر شده، شبیه‌سازی نیز مانند هر فناوری دیگری با چالش‌ها و نقطه‌ضعف‌هایی همراه است. موانعی نظیر پیچیدگی فرایند مدل‌سازی، زمان‌بر بودن توسعه مدل‌ها، و همچنین فقدان دانش تخصصی در زمینه شبیه‌سازی در میان مدیران پروژه، به‌عنوان عوامل محدودکننده در استفاده از فناوری شبیه‌سازی ازنکاتی هستند که نباید از آن‌ها غافل بود (Abdelmegid et al., 2020).

۲-۳- شبیه‌سازی در صنعت ریلی

در سال‌های اخیر، کاربرد شبیه‌سازی به حوزه‌های مختلف صنعت راه‌آهن نیز گسترش‌یافته است. بخش قابل‌توجهی از این مطالعات در زمینه حمل‌ونقل ریلی و مدیریت جریان جابه‌جایی متمرکز بوده‌اند. در یکی از این پژوهش‌ها، با بهره‌گیری از

محیط شبیه‌سازی AnyLogic و زبان برنامه‌نویسی شی گرا Java، مدل پیشامد گسسته‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد ایستگاه راه‌آهن توسعه داده شد (Kuzmin et al., 2022). مدل طراحی‌شده متشکل از دو زیرسیستم اصلی برای شبیه‌سازی جریان حرکت قطارها و مسافران بود که با استفاده از کتابخانه‌های Railway و Pedestrian در محیط AnyLogicپیاده‌سازی شده‌اند. تمرکز اصلی این مطالعه بر افزایش دقت رفتار عامل‌ها، به‌ویژه در بخش مسافران، و طراحی الگوریتم‌هایی برای انتخاب سکو و مدیریت تلاقی جریان‌های ورودی و خروجی معطوف بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده در سطوح مختلف بارگذاری نشان داد که مدل توانایی تحلیل پویا گلوگاه‌ها[۷]، صف‌ها و مدت‌زمان اقامت مسافران در ایستگاه را داراست. از مهم‌ترین مزایای این رویکرد، جامع بودن ساختار مدل و قابلیت انطباق آن با ایستگاه‌هایی با آرایش پیچیده خطوط ریلی عنوان شده است.

در امتداد مطالعات مرتبط با به‌کارگیری شبیه‌سازی در زیرساخت‌های ریلی، مدل RailNet به‌منظور برنامه‌ریزی عملیاتی حمل‌ونقل بار در شبکه‌های پرتردد توسعه یافته است. این مدل اگرچه به طور مستقیم به نوع خاصی از شبیه‌سازی اشاره نمی‌کند، اما ساختار آن به‌وضوح مبتنی بر مفاهیمی نزدیک به شبیه‌سازی پیشامد گسسته طراحی شده است (Michal et al., 2017). مدل مذکور با بهره‌گیری از گراف دوبعدی مکان – زمان و الگوریتم‌های زمان‌بندی، امکان اضافه‌کردن قطارهای باری به برنامه‌ی زمانی موجود را بدون ایجاد تداخل در حرکت قطارهای مسافری فراهم می‌سازد. در این فرایند، محدودیت‌هایی نظیر زمان‌های نگهداری زیرساخت، سرعت سیر مجاز، ایستگاه‌های توقف و زمان‌های انتظار بین قطارها در نظر گرفته می‌شود و با تحلیل گرافی فضاهای زمانی آزاد، مسیرهای جدید برای قطارهای باری پیشنهاد می‌شود.

در راستای بهره‌گیری از شبیه‌سازی پیشامد گسسته در حوزه نگهداری زیرساخت‌های ریلی، یکی از مطالعات انجام‌شده به ارائه مدلی ترکیبی مبتنی بر این نوع شبیه‌سازی اختصاص داشته است. هدف این مدل، ارزیابی کمی عملکرد سامانه‌های اطلاعاتی[۸] (IS) در فرایندهای مدیریت نگهداری بوده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری سامانه‌های اطلاعاتی می‌تواند منجر به کاهش زمان چرخه‌ای فرایندها و بهبود سطح هماهنگی اطلاعاتی میان کاربران شود (Jiang et al., 2016).

۲-٤- محاسبات بهره‌وری

موفقیت و دقت در فرایند شبیه‌سازی به‌شدت وابسته به کیفیت و قابلیت اطمینان داده‌های ورودی است. در این زمینه، فناوری‌هایی نظیر سنسورهای حرکتی و هوش مصنوعی با فراهم‌سازی داده‌های دقیق و به‌روز، نقش مؤثری در ارتقای اثربخشی شبیه‌سازی ایفا می‌کنند (Vahdatikhaki and Hammad, 2014). شبیه‌سازی همچنین جایگاه مهمی در تحلیل نرخ بهره‌وری منابع دارد؛ به‌گونه‌ای که فرایندهای محاسبه بهره‌وری و مدل‌سازی شبیه‌سازی به‌صورت دوسویه یکدیگر را تغذیه کرده و تقویت می‌کنند. در یکی از مطالعات، تأثیر ۲۵ عامل مختلف بر بهره‌وری عملیات بتن‌ریزی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که شبیه‌سازی قادر است روابط پیچیده و متقابل میان این عوامل را با دقت مناسبی بازنمایی و تحلیل کند (Khanh and Kim, 2020). بهره‌وری فعالیت‌های یک پروژه ماهیتی پویا دارد و تحت‌تأثیر شرایط محیطی، اجرایی و مدیریتی متغیر است. دستیابی به برآورد دقیق بهره‌وری مستلزم مدل‌سازی عوامل متعددی است که به‌صورت هم‌زمان و وابسته به یکدیگر عمل می‌کنند. در یکی از مطالعات، بهره‌وری فعالیت قالب‌بندی با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان محاسبه و در یک پایگاه‌داده[۹] ذخیره شد؛ رویکردی که موجب افزایش دقت محاسبات و فراهم‌سازی تصویرسازی مؤثر برای مدیران پروژه گردید (Lee et al., 2017). در مطالعه‌ای دیگر، با بهره‌گیری از روش‌های فازی[۱۰]، عواملی نظیر بارگیری بیش از حد و شرایط نامناسب جاده‌ای به‌عنوان موانع مؤثر بر بهره‌وری ماشین‌آلات خاک‌برداری شناسایی شدند (Salem, 2017). همچنین در یکی از پژوهش‌ها، با استفاده از مدل رگرسیون طبقه‌بندی‌شده[۱۱]، اثر عواملی نظیر تراکم آرماتور و ارتفاع بتن‌ریزی بر بهره‌وری عملیات بتن‌ریزی تحلیل شد و نتایج حاصل، مبنایی برای توسعه یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای طراحان فراهم ساخت (Jarkas, 2012). با این تفاسیر کاملاً واضح است که باید داده‌هایی مانند بهره‌وری به‌درستی برای مدل‌های شبیه‌سازی آماده شود.

در غیر این صورت حتی با توسعه واضح‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی نیز نتایج غیرقابل‌اعتماد خواهد بود.

۲-۵- سیستم‌های پشتیبان تصمیم و ارتباط با شبیه‌سازی

مدیران پروژه ممکن است در مورد برخی تغییرات پروژه و تاثیر این تغییرات در زمان و هزینه پروژه سوالاتی داشته باشند. سیستم‌های پشتیبان تصمیم ابزاری کارآمد برای ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در پروژه‌ها محسوب می‌شوند و به مدیران این امکان را می‌دهند تا با درک روشن‌تری نسبت به شرایط موجود، انتخاب‌های آگاهانه‌تری انجام دهند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از معیارهای کیفی و کمی و اعمال وزن‌دهی مناسب به آن‌ها، فرآیند انتخاب گزینه‌های بهینه را تسهیل می‌کنند (Ezell et al., 2021). ترکیب سیستم‌های پشتیبان تصمیم با مدل‌های پویا که از طریق شبیه‌سازی تولید می‌شوند، موجب افزایش کارایی آن‌ها شده و زمینه را برای هدایت بهتر هزینه‌ها به سمت ایجاد ارزش افزوده در پروژه‌ها فراهم می‌سازد (Helleno et al., 2015).

سیستم‌های پشتیبان تصمیم (DSS) در صنعت ریلی نیز کاربردهای متعددی یافته‌اند. در یکی از پژوهش‌ها، سیستمی به‌منظور بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و نوسازی خطوط ریلی طراحی شد که منجر به کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت زیرساخت ریلی گردید (Guler, 2013). به‌طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر مدلی برای تعیین زمان بهینه اجرای عملیات نگهداری توسعه داده شد که هدف آن کاهش میزان خرابی و افزایش اعتماد بهره‌برداران به عملکرد سیستم بود (Daddow et al., 2020).

سیستم‌های پشتیبان تصمیم نه تنها در فضای ریلی بلکه در بسیاری از حوزه‌های عمرانی و غیر عمرانی گسترده شده‌اند. یکی از مطالعات، با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی، چیدمان بهینه سایت پروژه مورد مدل‌سازی قرار گرفت تا تخصیص منابع و برنامه‌ریزی فضایی پروژه به شکل مؤثرتری انجام گیرد (RazaviAlavi and AbouRizk, 2017). در نهایت با تخصیص بهتر منابع تعداد بهینه کارکنان و جانمایی صحیح اجزای کارگاهی به طور مستقیم هزینه و زمان پروژه بهبود داشته و به طور غیر مستقیم ایمنی کارگاهی اصلاح گردید. فراتر از حوزه عمرانی نیز ترکیب شبیه‌سازی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم به‌کار گرفته شده است. در یکی از مطالعات، با بهره‌گیری از این ابزارها، مدلی برای مدیریت کارآمد بیمارستان طراحی شد که به بهینه‌سازی جریان حرکت بیماران، زمان‌بندی فعالیت‌ها و تخصیص منابع انجامید (Ruiz et al., 2024). یافته‌های این پژوهش نشان داد که بسیاری از چالش‌های مدیریتی در پروژه‌های عمرانی و غیرعمرانی دارای ویژگی‌های مشترک هستند و می‌توان از روش‌های مشابه برای بهبود تصمیم‌گیری در آن‌ها استفاده کرد.

۲-٦- جمع‌بندی ادبیات موجود و خلا تحقیقاتی

آنچه در این مرور ادبیات نمایان شد، تأکید بر نقش کلیدی شبیه‌سازی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم در ارتقای مدیریت پروژه‌های ریلی است که در حوزه‌های مختلف با پیشرفت‌های قابل‌توجهی همراه بوده است. شبیه‌سازی با قابلیت مدل‌سازی سناریوهای پیچیده و ارزیابی پیامدهای تصمیمات پیش از اجرا، توانسته است بسیاری از محدودیت‌های موجود در روش‌های متداول برنامه‌ریزی نظیر روش مسیر بحرانی را برطرف سازد. در این میان، شبیه‌سازی پیشامد گسسته به‌واسطه سازگاری با ماهیت گسسته فعالیت‌های عمرانی، به‌ویژه در پروژه‌های خطی، جایگاه ویژه‌ای داشته و زمینه تخصیص پویای منابع و تحلیل دقیق‌تر روابط زمانی و مکانی فعالیت‌ها را فراهم کرده است. بیشتر مطالعات در حوزه راه‌آهن بر جنبه‌هایی چون حمل‌ونقل، بهره‌برداری یا نگهداری متمرکز بوده و کمتر به حوزه برنامه‌ریزی ساخت روسازی راه‌آهن در مرحله اجرا با رویکرد تصمیم‌های مدیریتی پرداخته‌اند. علاوه بر این، فقدان مدل‌هایی که ترکیب یکپارچه‌ای از شبیه‌سازی پیشامد گسسته، تخصیص منابع و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را در بستر پروژه‌های خطی ارائه دهند، به‌عنوان یکی از خلأهای موجود در ادبیات قابل‌شناسایی است. در پاسخ به خلأهای شناسایی‌شده در ادبیات موجود، پژوهش حاضر با هدف ارتقای دقت در برنامه‌ریزی پروژه‌های روسازی بالاستی در خطوط ریلی، مدلی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشامد گسسته ارائه می‌دهد. این مدل با تمرکز بر تحلیل سناریوهای اجرایی مختلف در فرایند ساخت روسازی، به‌گونه‌ای طراحی شده است که به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، مدیران پروژه را در انتخاب بهینه‌ترین راهکارهای اجرایی یاری دهد.

۳- توسعه مدل شبیه‌سازی پیشامد گسسته

در سطح جهانی، سرمایه‌گذاری معمولاً به‌سوی پروژه‌هایی هدایت می‌شود که دارای توجیه فنی و اقتصادی قابل‌قبولی برای سرمایه‌گذاران باشند. ازاین‌رو، تبیین روشن و مستند از نحوه

بهره‌برداری بهینه از منابع و امکانات موجود، از اهمیت بالایی برخوردار است. در حوزه ساخت پروژه‌های ریلی، کارفرما همواره با مجموعه‌ای از گزینه‌ها و سناریوهای اجرایی مواجه است که انتخاب میان آن‌ها نیازمند ارزیابی دقیق است. برای نمونه، تعیین زمان بهینه آغاز عملیات روسازی و فاصله زمانی مناسب آن نسبت به اجرای زیرسازی، از جمله دغدغه‌های کلیدی مدیران پروژه به شمار می‌رود. در بسیاری از کشورها و به‌ویژه در ایران، فناوری‌های نوینی به‌منظور ارتقای فرایند اجرای روسازی‌های ریلی به کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها، علاوه بر کاهش چشمگیر مدت‌زمان اجرای پروژه‌ها، با بهره‌گیری از سامانه‌های کنترلی دقیق، به بهبود کیفیت عملیات اجرایی نیز کمک می‌کنند. در حوزه اجرای میدانی، ماشین‌آلات پیشرفته‌ای وارد فرایند ساخت شده‌اند که قادرند بازده فعالیت‌های تحت پوشش خود را، در برخی موارد، تا چندین برابر افزایش دهند. با وجود فرصت‌های قابل‌توجه ناشی از ورود فناوری‌های نوین به حوزه اجرای روسازی‌های ریلی، این تحولات با چالش‌هایی نیز همراه بوده‌اند. در برخی موارد، کندی در پیشرفت فعالیت‌های پیش‌نیاز یا عدم فراهم بودن پایدار جبهه‌های کاری موجب می‌شود کارایی بالقوه فناوری‌ها به طور کامل محقق نشود. به‌عنوان نمونه، درصورتی‌که عملیات زیرسازی با تأخیر مواجه شود یا امکان استفاده مستمر از ماشین‌آلات مکانیزه وجود نداشته باشد، پروژه با توقف‌های مکرر مواجه شده و بهره‌وری مورد انتظار از فناوری‌های پیشرفته کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، تأمین به‌موقع و مناسب مصالح و تجهیزات نیز نقشی تعیین‌کننده در اثربخشی این فناوری‌ها ایفا می‌کند؛ به‌نحوی‌که تصمیم‌گیری دقیق در خصوص نحوه تأمین و توزیع مصالح برای پشتیبانی از فرایندهای اجرایی، از ملزومات بهره‌برداری مؤثر از این فناوری‌ها به شمار می‌رود.

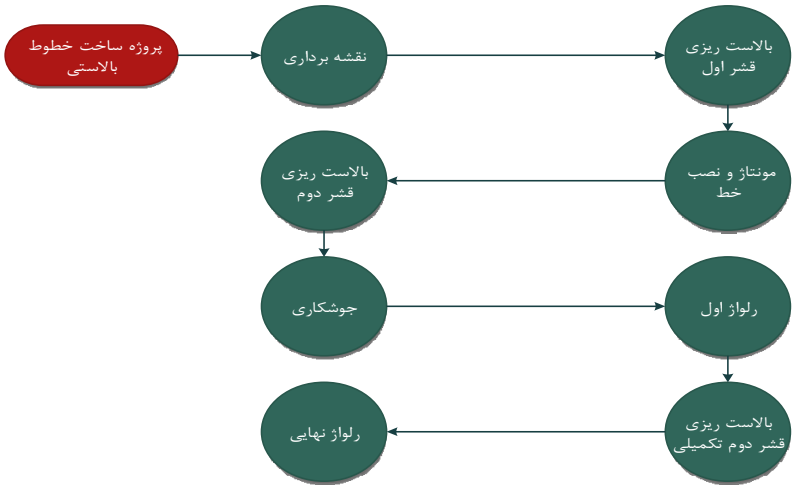
ورود فناوری‌های نوین به حوزه اجرای پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در بخش روسازی ریلی، همواره با هزینه‌هایی همراه است. در خوش‌بینانه‌ترین سناریو، تهیه یا اجاره این تجهیزات مستلزم صرف منابع مالی قابل‌توجهی خواهد بود. ازاین‌رو، مجریان پروژه ناگزیرند برای به‌کارگیری این فناوری‌ها، توجیه فنی و اقتصادی روشنی ارائه دهند که نشان دهد سرمایه‌گذاری انجام‌شده، چه میزان به بهبود عملکرد اجرایی پروژه منجر خواهد شد. در واقع، پیمانکاران باید بتوانند با اتکا به شاخص‌هایی نظیر افزایش بهره‌وری، کاهش زمان اجرا یا ارتقای کیفیت، اثبات کنند که مزایای حاصل از استفاده از فناوری‌های نوین، نسبت به روش‌های سنتی، بر هزینه‌های اضافی آن غلبه دارد. نمایش دقیق تفاوت‌ها، تحلیل جزئیات اجرایی و بررسی احتمالات مختلف در چارچوب روش‌های برنامه‌ریزی سنتی، نظیر روش مسیر بحرانی، با دشواری‌های قابل‌توجهی همراه است. این دشواری ناشی از اتکای زیاد این روش‌ها به محاسبات دستی بوده و می‌تواند منجر به بروز خطاهای محاسباتی ناشی از فرضیات متعدد یا حتی برداشت‌های جهت‌دار و مغرضانه توسط یکی از طرفین پروژه شود. در چنین شرایطی، شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری توانمند در قالب سیستم پشتیبان تصمیم، نقش مؤثری در تحلیل و پیش‌بینی تغییرات و سناریوهای مختلف پروژه ایفا می‌کند. قابلیت‌های تحلیلی شبیه‌سازی این امکان را فراهم می‌آورد که ترکیب‌ها و سناریوهای متنوع برنامه‌ریزی به‌صورت دقیق‌تر، شفاف‌تر و مبتنی بر داده، در فرایند تصمیم‌گیری لحاظ شوند.

باتوجه‌به ورود فناوری‌های نیمه‌مکانیزه در فضای ساخت پروژه‌های ریلی در ایران، مدل توسعه داده شده بر روی روش نیمه‌مکانیزه امتحان خواهد شد تا نقاط قوت و گلوگاه‌های استفاده از این فناوری مشخص شود. لازم به ذکر است مدل توسعه داده شده امکان مدل‌سازی تمامی روش‌های اجرای روسازی‌های ریلی بالاستی را خواهد داشت. در ادامه به تشریح فعالیت‌های اجرای روسازی، ساختار پایگاه‌داده، نحوه استخراج اطلاعات و در نهایت مدل شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

۳-۱- معرفی فعالیت‌های احداث خطوط بالاستی راه آهن

پروژه‌های ساخت خطوط ریلی بالاستی با روندی که مدام در حال تکرار است مطابق با شکل ۱ اجرا می‌شوند. ارتباط این فعالیت‌ها اغلب به‌صورت مکانی انجام می‌پذیرد. به عنوان مثال زمانی که فعالیت مونتاژ و نصب خط در فاصله میان دو ایستگاه مشخص که به آن بلاک[۱۲] گفته می‌شود در حال انجام است واگن‌های حمل مصالح دائما در یک چرخه در حال رفت و برگشت میان محل اجرا و محل دپو مصالح هستند. در چنین مواقعی به جهت حفظ ایمنی و رعایت یکپارچگی اجرا، فعالیت بالاستریزی قشر دوم در آن محدوده انجام نمی‌شود و به محض پایان عملیات مونتاژ و نصب خط در محدوده قرار خواهد گرفت. نکته حائز اهمیت در خصوص شکل ۱ آن است که با توجه به تفاوت در شیوه‌های اجرایی، ممکن است پیمانکار در عمل تغییراتی جزئی در توالی فعالیت‌ها اعمال کرده و یک یا دو فعالیت را جابه‌جا کند. با این حال، آنچه در تعامل میان پیمانکار و کارفرما مورد توافق قرار گرفته و به‌عنوان مبنای کلی اجرای پروژه پذیرفته شده، همان روندی است که در شکل مذکور نمایش داده شده است.

همچنین برای ایجاد درک مناسب‌تر از روند ساخت پروژه بالاستی شکل ۲ مجموعه‌ای از تصاویر اجرای روسازی بالاستی را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱. نمودار مراحل اجرایی پروژه‌های روسازی بالاستی

۳-۲- پایگاه داده

برای انجام فرآیند مدل‌سازی، وجود یک پایگاه داده قابل‌اعتماد از الزامات اساسی به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، پایگاه داده مربوط به پروژه‌های روسازی بالاستی در قالب فایل Excelطراحی و تدوین شده است. در این پایگاه داده، برگه[۱۳]های مجزایی تعریف شده‌اند که شامل اطلاعاتی نظیر فهرست فعالیت‌ها، مقادیر بهره‌وری هر فعالیت به‌صورت خوش‌بینانه، بدبینانه و منطقی، احجام کاری، مشخصات کلی پروژه، پارامترهای مربوط به منابع مورد استفاده، موقعیت مکانی دپوهای مصالح و طول پوشش هر دپو می‌باشند. این ساختار داده‌ای، مبنای اصلی برای ورود اطلاعات به مدل شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای اجرایی خواهد بود. پس از طراحی و ساماندهی ساختار پایگاه داده، این مجموعه اطلاعات به‌عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی متصل می‌شود. این شیوه اتصال داده‌محور، این امکان را فراهم می‌سازد که در صورت تغییر شرایط پروژه یا آغاز پروژه‌ای جدید با ویژگی‌های متفاوت، فرآیند برنامه‌ریزی تنها با اصلاح چند متغیر کلیدی، به‌سادگی و ظرف مدت کوتاهی با شرایط جدید تطبیق یابد.

به این ترتیب، مدل از انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات اجرایی برخوردار خواهد بود.

۳-۳- داده‌یابی از اطلاعات موردنیاز پروژه

بدیهی است که عملکرد دقیق و قابل اعتماد مدل شبیه‌سازی، وابسته به کیفیت و جامعیت داده‌های ورودی آن است. به همین دلیل، داده‌های مورد نیاز باید از طریق روش‌های معتبر و با دقت کافی گردآوری شوند. در این پژوهش، داده‌های مرتبط با پروژه از سه روش مجزا جمع‌آوری شده‌اند که دسته‌بندی آن‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق با این تقسیم‌بندی، برای افزایش دقت اطلاعات ورودی، از رویکرد تلفیقی سه‌گانه استفاده شده تا سهم داده‌های کم‌اعتبار یا دارای انحراف به حداقل برسد. به‌طور طبیعی، هر یک از این روش‌های جمع‌آوری داده ممکن است دارای درصدی از خطا باشند؛ با این حال، ترکیب آن‌ها موجب می‌شود بخشی از این خطاها به‌صورت متقابل جبران گردد. همچنین در روش مبتنی بر مصاحبه با خبرگان، نظرات چندین متخصص به‌طور هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفته تا داده‌های غیرواقعی یا مغرضانه شناسایی شده و از پایگاه داده حذف شوند.

در اسناد برنامه‌ریزی پروژه که مبتنی بر روش مسیر بحرانی تهیه می‌شـــوند، اغلب مقادیر فعالیت‌ها به‌صـــورت غیرواقعی و بیش از حد خوش‌بینانه برآورد می‌گردد. هرچند نظرات خبرگان در این زمینه می‌تواند بسـیار ارزشـمند باشـد، اما تجربه نشـان می‌دهد که دیدگاه آن‌ها عمدتاً بر میانگین حاصل از گزارش‌های ماهانه کنترل پروژه متمرکز اسـت. این امر ممکن است منجر به ارائـه مقادیری شـــود که لزوماً بازتاب دقیقی از عملکرد واقعی فعالیت‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت یا شـــرایط خاص پروژه نیســـتنـد. با توجه به اینکه در گزارش‌های ماهانه کنترل پروژه اطلاعـات مربوط بـه روزهـای کـاری فعـال و شـــرایط جوی به‌صـــورت دقیق و در ســـطح روزانه ثبت نمی‌شـــوند، به‌منظور افزایش دقـت در تحلیل داده‌ها و امکان شـــناســـایی الگوهای روزانـه، فرآینـد داده‌یـابی مبتنی بر گزارش‌هـای روزانـه کنترل پروژه انجام شـده اسـت. این رویکرد امکان اسـتخراج جزئیات دقیق‌تری از عملکرد واقعی پروژه در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت را فراهم می‌سازد.

عملیات نصب خط

بالاست‌ریزی قشر اول

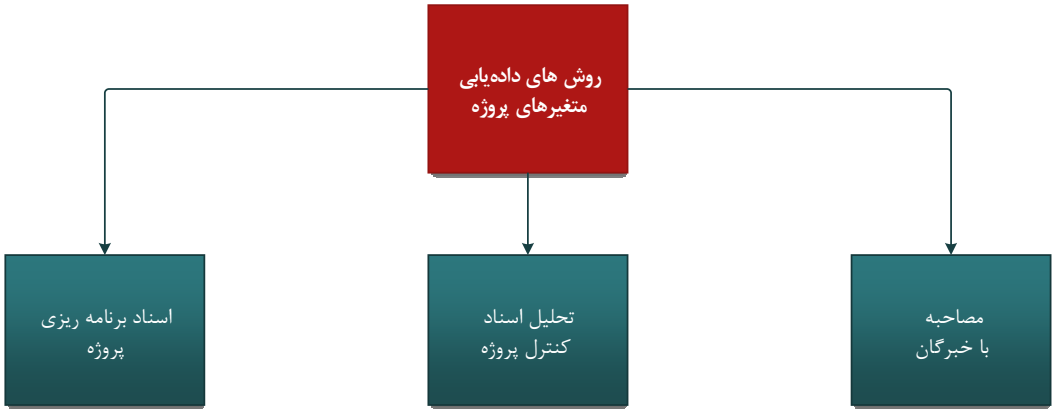
بالاست ریزی قشر دوم

جوشکاری

عملیات مونتاژ خط

رلواژ خط

شکل ۲. مراحل اجرایی ساخت پروژه‌های ریلی بالاستی

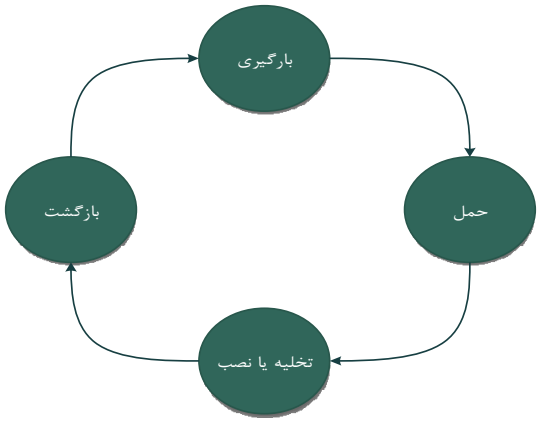


شکل ۳. شیوه‌های جمع‌آوری داده برای مدل شبیه‌سازی

تحلیل گزارش‌های روزانه کنترل پروژه این امکان را فراهم می‌سازد که بخش‌های متغیر فعالیت‌ها در روزهای مختلف پروژه به‌صورت دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد. از طریق این تحلیل می‌توان شرایط متغیر پروژه، نظیر وضعیت تأمین مصالح یا شرایط جوی، را با داده‌های بهره‌وری تطبیق داده و مقادیر واقعی‌تری از عملکرد فعالیت‌ها را به مدل شبیه‌سازی وارد نمود. در ادامه، با ثبت این شرایط به‌صورت رویدادهای مجزا، امکان اعمال تأثیر آن‌ها بر بهره‌وری در قالب سناریوهای مختلف فراهم می‌شود.با توجه به حجم بالای داده‌های ثبت‌شده در گزارش‌های روزانه کنترل پروژه، استخراج نرخ‌های بهره‌وری به‌صورت دستی امکان‌پذیر نبوده و نیازمند استفاده از ابزارهای برنامه‌نویسی است. در این پژوهش، برای پردازش خودکار داده‌ها، کدی بر پایه زبان برنامه‌نویسی Pythonتوسعه داده شده است. این کد با جست‌وجوی نام فعالیت‌های مختلف در فایل‌های روزانه کنترل پروژه، بهره‌وری متناظر هر فعالیت را استخراج کرده و در فایل Excel ثبت می‌کند. همچنین به‌صورت هم‌زمان، داده‌های مربوط به وضعیت منابع پروژه و مصالح موجود نیز برداشت می‌شوند تا امکان تحلیل دقیق‌تر نوسانات بهره‌وری و ارتباط آن با شرایط پروژه فراهم گردد.

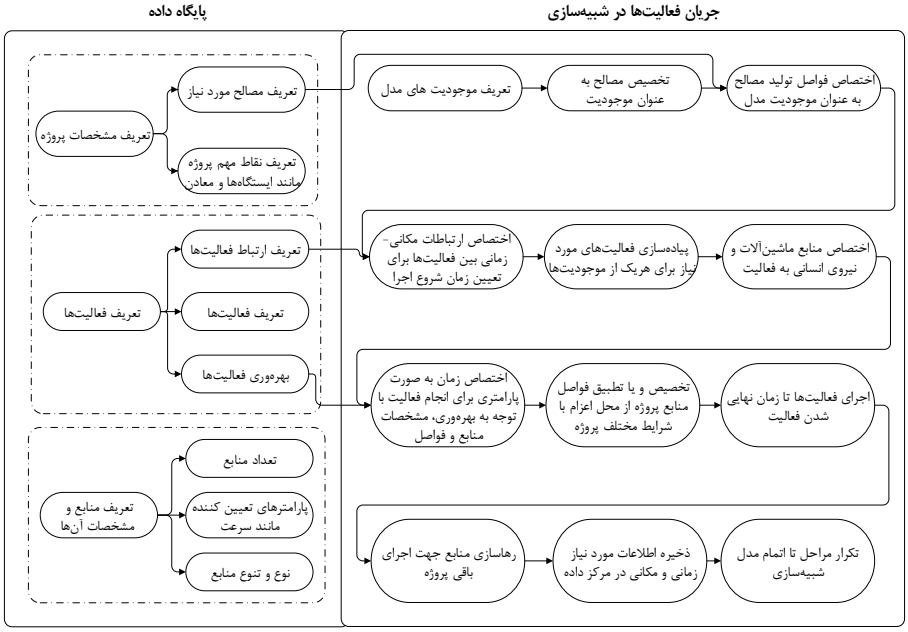
۳-٤- توسعه مدل شبیه‌سازی

در این بخش نرم افزار Rockwell Arena Simulation به‌عنوان بستر اصلی مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار مبتنی بر منطق شبیه‌سازی پیشامد گسسته عمل می‌کند و به‌خوبی با ساختار پروژه‌های ریلی که دارای فعالیت‌های چرخه‌ای و تکرارشونده هستند، سازگار است. الگوی کلی این چرخه‌ها در شکل ٤ نمایش داده شده است. پیاده‌سازی دقیق چنین چرخه‌هایی با استفاده از روش‌های سنتی برنامه‌ریزی، نظیر روش مسیر بحرانی، آن هم به‌صورت دستی و توسط اپراتور، فرآیندی دشوار و مستلزم ساده‌سازی‌های متعدد بر اساس فرضیات تقریبی خواهد بود. در مقابل، شبیه‌سازی به‌واسطه ماهیت داده‌محور، قابلیت‌های بصری و انعطاف‌پذیری در برنامه‌نویسی، امکان مدل‌سازی دقیق، روان و واقع‌گرایانه این چرخه‌ها را به‌سادگی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. همانطور که از شکل ٤ می‌توان استنباط نمود، اکثر فعالیت‌های پروژه‌های ریلی به خصوص پروژه‌های بالاستی ماهیتی رفت و برگشتی را رعایت می‌کنند که به آن رفتار چرخه‌ای نیز گفته می‌شود. برای ایجاد درک روشن از این موضوع در ادامه یک مثال ارائه می‌شود. در فعالیت بالاست‌ریزی قشر اول، کامیون‌ها از محل دپو بارگیری شده و در مسیری مشخص بر روی جاده مسیری را طی می‌کنند. سپس به محل دسترسی به خط پروژه وارد شده و مسیری خاکی را پشت سر می‌گذارند. کامیون‌ها بالاست حمل شده را در محل سایت خالی کرده و بازمی‌گردند و این چرخه در پروژه مدام تکرار می‌شود. در طول این مسیر سرعت حمل مصالح، میزان بالاست جابه‌جا شده، مسافت دپو تا محل اجرا و بسیاری دیگر از عوامل در تعیین زمان هر چرخه از عملیات تاثیرگذار هستند که در مدل شبیه‌سازی ارائه شده به طور کامل گنجانده شده است.



شکل ٤. چرخه اجرایی متداول در فعالیت‌های روسازی ریلی

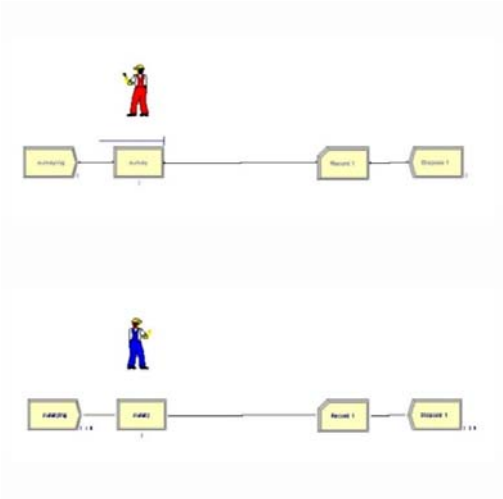
پیش از آنکه به جزئیات مدل پرداخته شـود بهتر اسـت تا ساختار مدل ارائه و توضیح شود. شکل ۵ روند پیاده‌سازی مدل و نحوه ارتباط آن با پایگاه داده را آشـکار می‌سازد. مدل توسعه داده شـده قبل از پردازش، در بخش‌هایی اطلاعات را از پایگاه داده تحویل می‌گیرد و بعد مشغول پردازش اطلاعات تا رسیدن به خروجی‌های مدل خواهد شد.



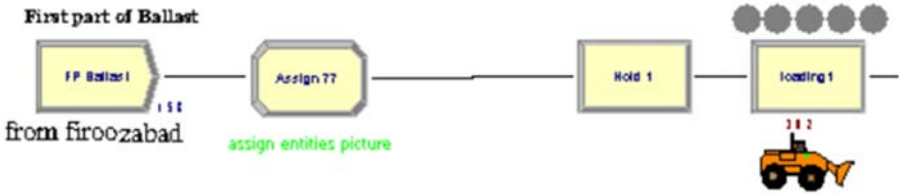
شکل ۵. نمودار فرآیند پیاده‌سازی شبیه‌سازی در اجرای پروژه‌های ریلی

نرم‌افزار مورد اسـتفاده، محیطی با دید بصـری مناسـب در اختیار کاربر قرار می‌دهد که از یک‌سـو موجب درک بهتر روند شبیه‌سازی و از سوی دیگر موجب سهولت در شناسایی خطاها و اشکالات احتمالی در مدل می‌شود. در این محیط، منابع پروژه در وضـعیت‌های مختلف به‌صورت پویا تغییر حالت می‌دهند و همین موضـوع امکان ارزیابی دقیق‌تری از میزان بهره‌برداری یا بیکاری هر منبع را فراهم می‌سـازد. به‌عنوان نمونه، شـکل ٦ وضـعیت فعال یا غیرفعال نقشـه‌بردار را در طول فرآیند اجرای پروژه در محیط شـبیه‌سازی نمایش می‌دهد. در مدل شبیه‌سازی ارائه‌شـده، برای فعالیت‌هایی که به‌صـورت مسـتقیم به مصـرف مصـالح وابسـته هسـتند، مصالح به‌عنوان موجودیت[14] در محیط شـبیه‌سـازی تعریف شـده‌اند. در سایر فعالیت‌ها نیز خط پروژه نقش موجودیـت را ایفا می‌کند تا بتوان فرآیند جریان فعالیت‌ها را به‌صـورت دقیق مدل‌سـازی کرد. به‌عنوان نمونه، در شکل ۷، بـالاسـت بـه‌عنوان موجودیـت اختصـاص‌یـافتـه به فعالیت بالاسـت‌ریزی به تصـویر کشـیده شـده است. همان‌گونه که در

شکل ۷ مشاهده می‌شود، در جریان عملیات بارگیری، صف مشخصی از مصالح بالاست در مدل ایجاد شده است. این وضعیت نشان‌دهنده آن است که نرخ تولید بالاست از نرخ مصرف آن پیشی گرفته است. همچنین، نکته‌ای که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، در خصوص فعالیت یا عدم فعالیت منابع در خصوص لودر نیز صادق است. بررسی بصری وضعیت لودر در محیط شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این منبع در اغلب زمان‌ها در حالت غیرفعال قرار دارد؛ موضوعی که با شرایط واقعی پروژه نیز تطابق داشته و در محل اجرای پروژه به‌وضوح مشاهده شده است. به‌منظور اطمینان از صحت و اعتبار خروجی‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی، فرآیند صحت‌سنجی با بهره‌گیری از روش‌های متنوع انجام گرفته است. خروجی‌های مدل با اسناد موجود مبتنی بر روش مسیر بحرانی و گزارش‌های کنترل پروژه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین انجام بازدیدهای میدانی از محل پروژه، نقش مؤثری در بهبود دقت مدل و افزایش واقع‌گرایی در شبیه‌سازی ایفا کرده است.



شکل ٦. نمای وضعیت فعال (آبی) و غیرفعال (قرمز) نقشه‌بردار در محیط شبیه‌سازی



شکل ۷. نمایش بالاست به‌عنوان موجودیت مدل با دایره‌های خاکستری

ارزیابی عوامل تاثیرگذار در زمان اجرای پروژه

پس از ایجاد مدل پایه شبیه‌سازی و با توجه به قابلیت بسیار مناسب این بستر برای بررسی سناریوهای مختلف عواملی مانند نحوه تامین مصالح، زمان تحویل زیرسازی، تغییرات منابع پروژه بررسی می‌شود. این بررسی، مدیران را نسبت به اهمیت تامین به موقع جبهه کار، تامین به موقع مصالح و میزان مناسب منابع پروژه یاری می‌کند. در نهایت مدیران می‌توانند با بررسی بودجه در اختیار توزیع بهتری از هزینه را برنامه‌ریزی نمایند. سیستم ارزیابی عوامل پروژه نه تنها دید روشنی جهت برنامه‌ریزی پایه پروژه ایجاد می‌کند بلکه برنامه‌ریزی جانبی همچون برنامه تامین مصالح را نیز تعیین می‌کند. پیمانکار با

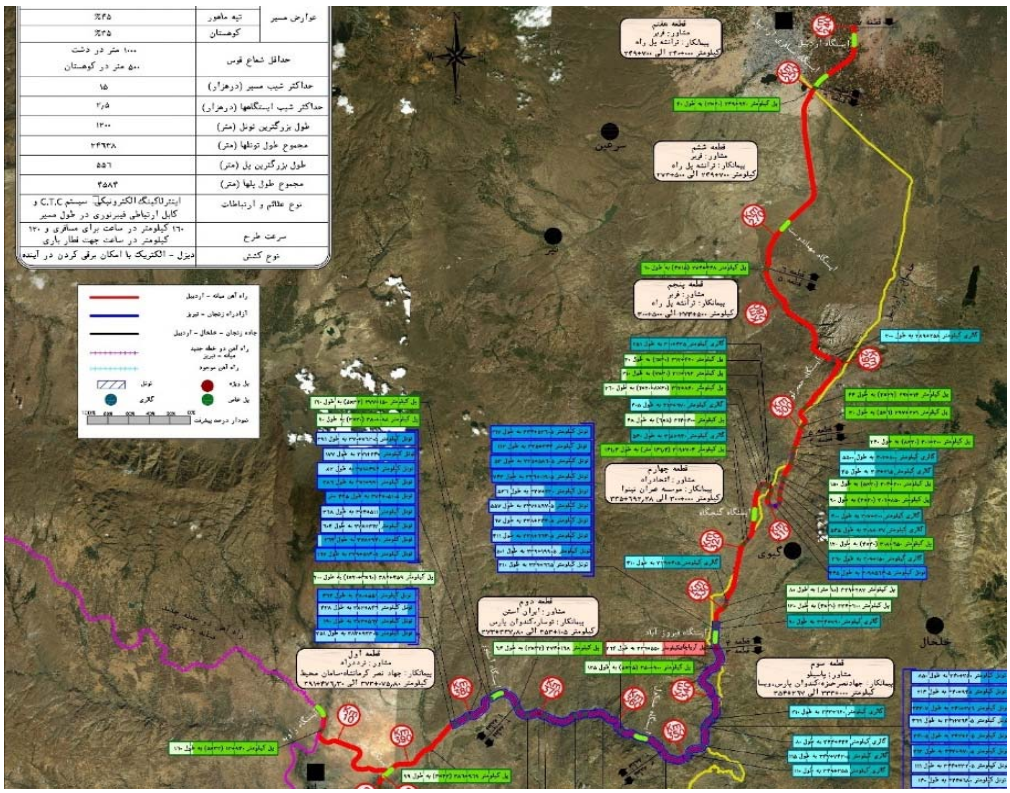
توجه به برنامه اجرایی خود می‌تواند برنامه تامین مصالح پروژه را به تامین‌کنندگان اعلام کند یا بالعکس، ظرفیت تامین مصالح را از تامین‌کنندگان استعلام نماید و طبق این ظرفیت برنامه‌ریزی پروژه را انجام دهد. این موضوع دقیقا در خصوص تحویل زیرسازی و منابع پروژه مانند ماشین‌آلات نیز صادق است.

٤- مطالعه موردی

در بخش قبل، چارچوب کلی پژوهش به‌منظور روند پیاده‌سازی شبیه‌سازی پیشامد گسسته در پروژه‌های ریلی تشریح شد. در این بخش، به‌منظور ارزیابی عملی چارچوب ارائه‌شده، پروژه اجرای روسازی خط راه‌آهن میانه – اردبیل به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. شکل ۸ نمایی کلی از موقعیت و پلان اجرایی این پروژه را نمایش می‌دهد. این قطعه، با طول تقریبی ۹٤ کیلومتر، به‌دلیل اتمام عملیات اجرایی و برخورداری از تنوع قابل‌توجه در پارامترهای تأثیرگذار بر شبیه‌سازی، به‌عنوان یک مطالعه موردی جامع برای ارزیابی مدل شبیه‌سازی انتخاب شده است. تکمیل عملیات ساخت در این بخش، امکان گردآوری داده‌های میدانی دقیق و انجام مقایسه‌ای مستقیم میان اطلاعات واقعی پروژه و خروجی‌های مدل شبیه‌سازی را فراهم کرده است.

با تفاسیر ارائه شده در بخش گذشته، تمامی داده‌های مورد نیاز با ۳ روش استخراج داده از کنترل پروژه، مصاحبه با خبرگان و بررسی اسناد برنامه‌ریزی پروژه استخراج شده و در پایگاه داده قرار داده شد. مشخصات پروژه مانند محل دپوها، تعداد منابع حاضر، مشخصات ایستگاه‌ها، طول هر بلاک، مقدار مصالح موردنیاز و سایر عوامل به دقت و با جزئیات مناسب دسته‌بندی شده و در پایگاه داده گنجانده شد. در نهایت مدل در حالت پردازش قرار گرفته و نتایج اولیه پروژه استخراج شد. برای نمونه بخش کوچکی از پایگاه داده در خصوص نوع فعالیت‌ها و بهره‌وری در جدول ۱ نمایش داده‌شده است.

پیمانکار روسازی می‌تواند اجرای روسازی را با توجه به میزان پیشرفت زیرسازی پروژه به گونه‌ای تنظیم کند که کمترین میزان خواب منابع پروژه تحمیل شود و طبق جبهه‌کار آماده تعداد منابع خود را انتخاب نماید.



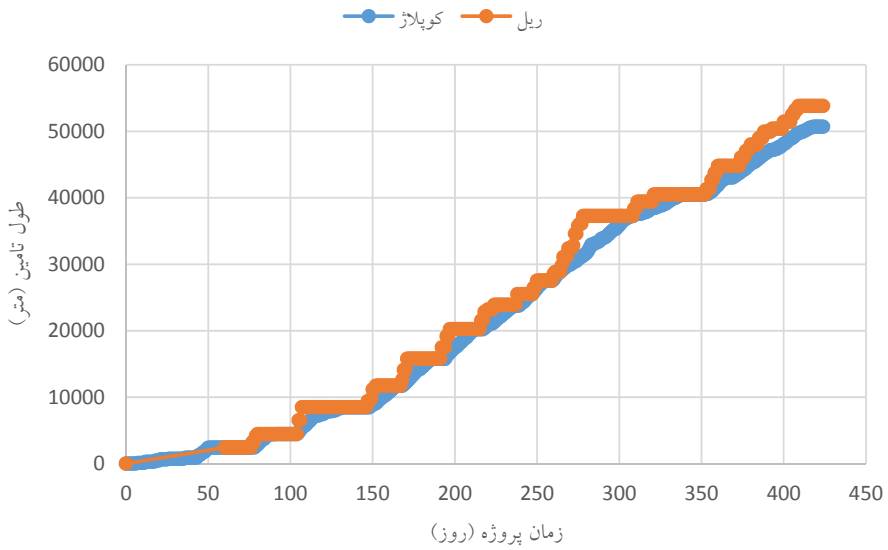
شکل ۸ نمای پلان خط راه‌آهن میانه–اردبیل

پس از پردازش مدل شبیه‌سازی زمان انجام این پروژه تقریبا ۷۲۵ روز محاسبه شد. زمان برداشت شده در اسناد کنترل پروژه ۹۳۰ روز را نمایش می دهد که اختلافی تقریبا ۲۳ درصدی را نسبت به اسناد نمایش می‌دهد. این اختلاف بسیار توجیه‌پذیر است چرا که مدل پایه هنوز عواملی مانند تاخیر مصالح و تاخیر تحویل زیرسازی به عنوان جبهه کار را در نظر نگرفته است. لازم به ذکر است اسناد برنامه‌ریزی پروژه بر بستر مسیر بحرانی ٦۸۸ روز را نمایش می‌دهد که نسبت به روش شبیه‌سازی ۵ درصد انحراف بیشتری دارد. برای بررسی تاثیر عوامل تامین مصالح و جبهه‌کار، از داده‌های کنترل پروژه برداشت انجام گرفت. به عنوان مثال نرخ ورود مصالح به کارگاه مونتاژ خط ۱۸ متری که به کوپلاژ معروف است در کنار نرخ تولید کوپلاژ قرار گرفت که نمونه‌ای از این برداشت و ترسیم نمودار در شکل ۹ ارائه شده است. در این شکل برای یکسان شدن مفهوم تامین مصالح مختلف، داده‌ها با طول تامین برداشت شده است. به عنوان مثال هر دو شاخه ریل ۱۸ متر خط را تامین می‌نمایند یا هر ۳۰ عدد تراورس طول ۱۸ متری را تامین می‌کنند. طبیعتا نقاط برخورد نمودار تولید کوپلاژ و تامین ریل نشان می‌دهد در برخی از مواقع پروژه توانایی تولید کوپلاژ را داشته اما ریل به تعداد کافی وجود نداشته و عملیات مونتاژ متوقف شده است. با توجه به برداشت‌های انجام شده از مدل شبیه‌سازی ریل بیشترین میزان تاخیر در عملیات مونتاژ خط را به خود اختصاص داده است. با وارد کردن روند تامین مصالح در پایگاه داده و به طبع ورود آن به مدل شبیه‌سازی عدد ۸٤۳ روز مشاهده شد که حدود ۱۰ درصد اختلاف با اسناد کنترل پروژه داشته و دقت مدل را به نمایش می‌گذارد.

به طریق مشابه محدودیت جبهه کار با وارد کردن زمان‌های تحویل زیرسازی به پیمانکار روسازی در پایگاه داده بررسی شد که اگر محدودیت مصالح لحاظ نشود ۸۳۱ روز زمان انجام پروژه در این حالت خواهد بود. اگر بحث تامین مصالح و تحویل جبهه‌کار توامان بررسی شود مشخص می‌شود که تاخیر ناشی از تامین مصالح اساسی‌تر است. به گونه‌ای که در تاخیر توامان تفاوت زمانی خاصی با حالتی که صرفاً روند تامین مصالح بررسی شد مشاهده نشد. این خروجی یک نتیجه دیگر را نیز نمایش می‌دهد و این نتیجه آن است که پیمانکار روسازی با توجه به جبهه‌کار آماده اقدام به سفارش کرده و تامین مصالح پروژه را وابسته به جبهه‌کار آماده می‌داند.

جدول ۱. داده‌های فعالیت‌ها و بهره‌وری پروژه میانه – اردبیل

فعالیت ها								
ردیف	فعالیت اصلی	ریز فعالیت	بهره‌وری خوش بینانه	بهره‌وری منطقی	بهره‌وری بد بینانه	میانگین	واحد اندازه گیری	واحد زمانی
۱	نقشه برداری	نقشه برداری(هر ۱۰۰متر یکبار)	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	متر	ساعت
۲	بالاست قشر اول	بالاست قشر اول	٦۳	۳٤	۲۳	٤۰	متر	ساعت
۳	مونتاژ و نصب خط	مونتاژ خط	٤۲	۳٤	۲۳	۳۳	متر	ساعت
٤		نصب خط	٤۵	۲۸	۲۰	۳۱	متر	ساعت
۵	بالاست قشر دوم	بالاست قشر دوم	٦۷	۵٦	۳٤	۵۲	متر	ساعت
٦		رگلاژ و خط آرایی	۳۳٤	۲۸۹	۲۲۳	۲۸۲	متر	ساعت
۷	رلواژ اول	رلـواژ اول	۱۰۰	۹٤	۸۰	۹۲	متر	ساعت
۸	جوشکاری ریل	جوشکاری	٤	۲	۱	۳	بند	ساعت
۹	بالاست ریزی قشر دوم تکمیلی	بالاست ریزی قشر دوم تکمیلی	۸۹	٦۷	۵۰	٦۹	متر	ساعت
۱۰	رلواژ نهایی	رلواژ نهایی	۱٤۰	۱۲۰	۱۰۵	۱۲۲	متر	ساعت



شکل ۹. مقایسه میزان تأمین ریل و فرآیند ساخت کوپلاژ

از سوی دیگر با مدل توسعه یافته می‌توان تعداد منابع را نیز تغییر داد و تاثیر آن را بر پروژه مشاهده نمود. این موضوع محدودیتی نیز نخواهد داشت و هریک از منابع که موردنظر ذی‌نفعان باشد قابل بررسی خواهد بود. به عنوان مثال در برنامه پایه پروژه ٦ کامیون برای عملیات بالاست‌ریزی قشر اول و دوم لحاظ شده است. اگر تعداد کامیون به ۷ کامیون ارتقا داده شود کاهش ۲,٦ درصدی زمان پروژه مشاهده می‌شود. اگر این عدد به ۸ ارتقا داده شود عدد کاهش پروژه ٤,۲ درصد خواهد رسید. باید دقت کرد که این تغییرات بدون لحاظ نرخ تامین مصالح و یا جبهه‌کار آماده است و ممکن است با اعمال محدودیت‌های ذکر شده توجیه استفاده از کامیون بیشتر از دست برود و یا هزینه بالاسری استفاده از کامیون‌های بیشتر به صرفه نباشد. به هر صورت این بستر قابلیت هرگونه بررسی بیشتر را برای مدیران امکان‌پذیر کرده است.

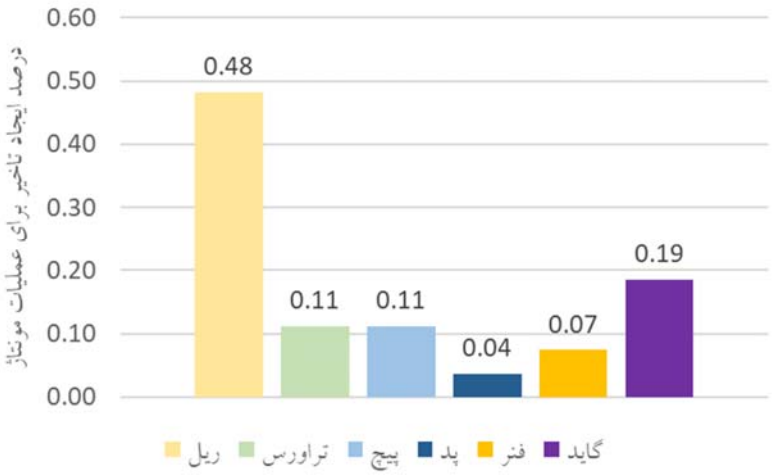
۵- بحث و تفسیر یافته‌ها

صنعت حمل‌ونقل ریلی، به‌دلیل ظرفیت بالای جابه‌جایی، ایمنی بالا و سازگاری با محیط‌زیست، از پتانسیل قابل توجهی برای کسب سهم بیشتری از بازار حمل‌ونقل برخوردار است و همواره به‌عنوان گزینه‌ای راهبردی از سوی سیاست‌گذاران و فعالان این حوزه مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، استفاده از خطوط ریلی برای جابه‌جایی بار و مسافر در سطح جهانی با استقبال گسترده‌ای مواجه شده است. از این‌رو، می‌توان بخش ریلی را یکی از صنایع سودآور در عرصه حمل‌ونقل بین‌المللی قلمداد کرد. همین مزایا موجب شده است که در سال‌های اخیر، سیاست‌گذاران کشورهای مختلف، به‌ویژه در ایران، سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در توسعه خطوط ریلی متصل به مرزهای بین‌المللی انجام دهند. با وجود درک گسترده از اهمیت راهبردی صنعت ریلی در کشور، فرآیند اجرای پروژه‌های ساخت خطوط جدید ریلی، در بسیاری از موارد، با عملکردی کمتر از سطح انتظار همراه بوده است. به‌نظر می‌رسد که فقدان ساختاری منسجم و شفاف در تصمیم‌گیری و مدیریت یکپارچه پروژه‌ها، از عوامل اصلی بروز چالش در مسیر پیشرفت خطوط نوساخت باشد. در نتیجه این ناهماهنگی‌ها، پروژه‌های ساخت با بحران‌های متعدد مواجه شده‌اند و بهره‌برداری به‌موقع از ظرفیت‌های ریلی محقق نگردیده است. این تأخیرها نه‌تنها منجر به از دست رفتن فرصت‌های اقتصادی شده، بلکه هزینه‌های سنگینی را نیز بر نظام اجرایی کشور تحمیل کرده است. در شرایط کنونی، مدیران پروژه‌های ریلی در سطوح مختلف به‌خوبی ضرورت بهره‌گیری از یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی ساخت خطوط ریلی را درک کرده‌اند. سیستمی که نه‌تنها توانایی محاسبه دقیق‌تر زمان اجرای پروژه را داشته باشد، بلکه

قادر باشد پارامترهای اثرگذار در پروژه را نیز به‌درستی شناسایی و تحلیل نماید. در این پژوهش، چنین سیستمی با تکیه بر متغیرهای کلیدی پروژه و بر بستر شبیه‌سازی پیشامد گسسته طراحی و ارائه شده است. ارزیابی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته، تطابق مطلوبی با شرایط واقعی پروژه داشته و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه، نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل تشریح خواهد شد.

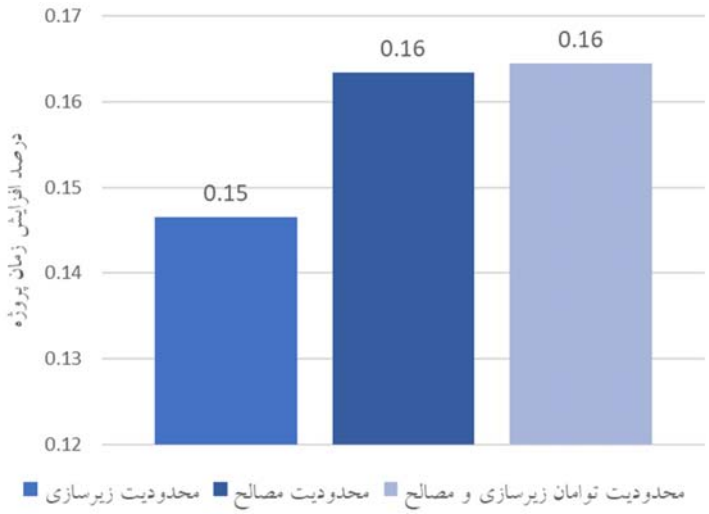
۵-۱- ارزیابی تاثیر روند تأمین مصالح و جبهه‌کار در زمان پروژه

در این پژوهش تلاش شده است تا با توسعه مدلی جامع در بستر شبیه‌سازی، امکان مدل‌سازی طیف وسیعی از عوامل تأثیرگذار بر پروژه فراهم گردد. در همین راستا، به‌منظور شبیه‌سازی واقع‌گرایانه روند تأمین مصالح، داده‌های واقعی پروژه از طریق پردازش گزارش‌های کنترل پروژه با استفاده از کد پایتون استخراج شده‌اند. یافته‌های حاصل از مطالعه موردی نشان داد که در فرآیند اجرای پروژه، ریل به‌عنوان مهم‌ترین عامل ایجاد تأخیر در فعالیت مونتاژ شناخته می‌شود. توزیع علت ایجاد تاخیر در فرآیند مونتاژ خط برای هر یک از انواع مصالح در نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. توزیع درصدی علت توقف فعالیت مونتاژ خط به دلیل عدم تأمین به‌موقع مصالح مشخص

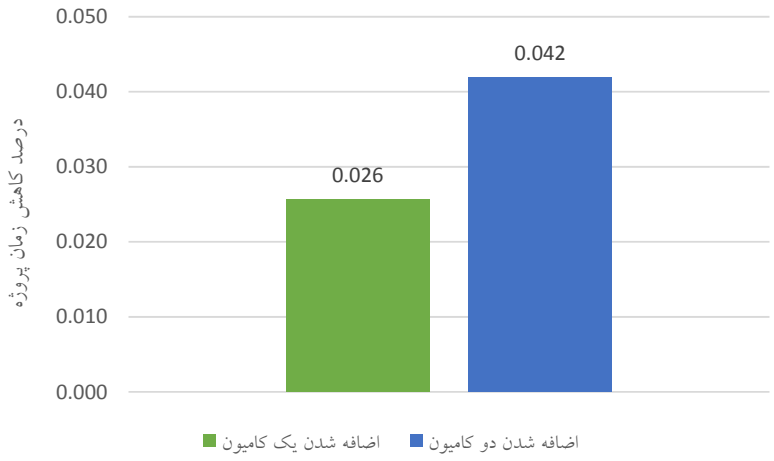
یافته‌های تکمیلی این پژوهش نشان داد که دو عامل کلیدی، یعنی تأخیر در تأمین مصالح و همچنین تأخیر در تحویل بخش زیرسازی، سهم زیادی را در افزایش زمان کل اجرای پروژه ایفا کرده‌اند. این عوامل نه‌تنها موجب ایجاد وقفه‌های مستقیم در فرآیندهای اجرایی نظیر عملیات روسازی، بلکه باعث اختلال در توالی منطقی فعالیت‌ها، افزایش زمان‌های انتظار منابع و کاهش بهره‌وری کلی سیستم نیز شده‌اند. نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۱، درصد تأثیر نسبی هر یک از این پارامترها بر افزایش زمان کل ساخت پروژه را به‌صورت شفاف نمایش می‌دهد و بر نقش حیاتی مدیریت تأمین مصالح و تحویل به‌موقع زیرسازی در بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه تأکید دارد.



شکل ۱۱. درصد تأخیر در زمان اجرای پروژه بالاستی بر اساس پارامترهای معرفی‌شده

۵-۲- ارزیابی تاثیر تغییر در منابع پروژه بر زمان اجرای پروژه

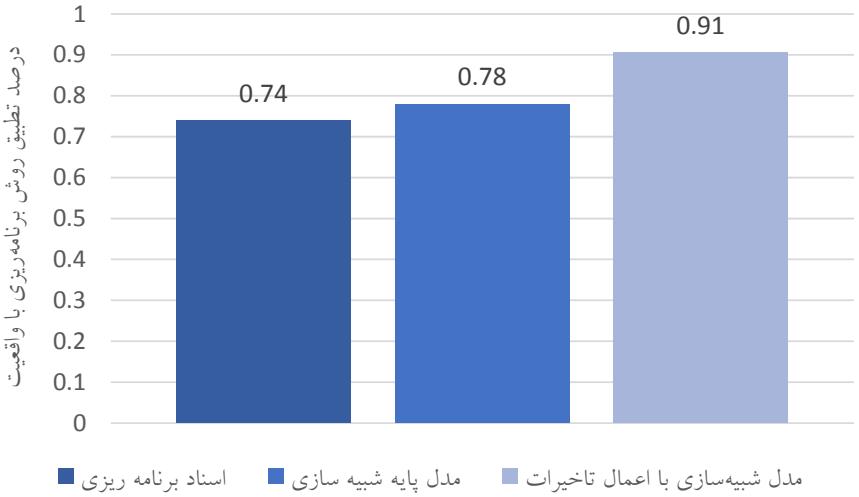
بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که تغییر در منابع موجود پروژه، تأثیر مستقیمی بر مدت زمان اجرای پروژه داشته است. یافته‌های مطالعه موردی نشان می‌دهند که کامیون یکی از منابع حیاتی در پروژه‌های روسازی بالاستی به‌شمار می‌رود. تحلیل شبیه‌سازی نشان داده است که با اضافه شدن یک دستگاه کامیون، مدت زمان اجرای پروژه حدود ۲,٦ درصد کاهش یافته و در صورت افزایش تعداد کامیون‌ها به دو دستگاه، این کاهش به حدود ٤,۲ درصد می‌رسد. این نتایج گویای آن است که منابع حمل‌ونقل مصالح می‌توانند گلوگاه‌های اجرایی را کاهش داده و بهره‌وری فعالیت‌های زیر مجموعه خود را بهبود بخشند. با اتکا به این اطلاعات، پیمانکار قادر خواهد بود تصمیمی آگاهانه در خصوص افزایش موقت یا دائمی ناوگان حمل اتخاذ کند و بر اساس ارزیابی نسبت هزینه به فایده، تشخیص دهد که سرمایه‌گذاری بیشتر برای خرید یا اجاره کامیون تا چه اندازه از منظر زمانی و اقتصادی توجیه‌پذیر است.



شکل ۱۲. درصد کاهش زمان ساخت پروژه بالاستی با افزودن منبع کامیون

۵-۳- مقایسه دقت برنامه‌ریزی با روش‌های متداول و شبیه‌سازی پیشامد گسسته

پس از پیاده‌سازی مدل و استخراج خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های واقعی پروژه و همچنین اسناد برنامه‌ریزی اولیه پروژه مورد مقایسه قرار گرفت. نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۳، درصد میزان انطباق مدل شبیه‌سازی با واقعیت میدانی پروژه و نیز میزان انطباق برنامه‌ریزی متداول پروژه (مبتنی بر روش مسیر بحرانی) با واقعیت را نشان می‌دهد. این مقایسه امکان ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی و میزان به‌کارگیری آن به‌عنوان ابزار پیش‌بینی و تصمیم‌سازی را فراهم می‌کند. بر اساس این تحلیل، مدل شبیه‌سازی ارائه‌شده توانسته است به‌صورت قابل‌قبولی رفتار واقعی پروژه را بازنمایی کند و نسبت به برنامه‌ریزی سنتی، انطباق بیشتری با داده‌های واقعی از خود نشان دهد.



شکل ۱۳. میزان تطابق روش‌های برنامه‌ریزی پروژه با واقعیت‌های اجرایی

٦- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارتقای دقت و کارایی برنامه‌ریزی ساخت پروژه‌های روسازی ریلی، مدلی ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشامد گسسته با رویکرد سامانه پشتیبان تصمیم توسعه داده شد. طراحی این چارچوب با توجه به ویژگی‌های خاص پروژه‌های خطی همچون پیچیدگی روابط تقدم و تأخر، پویایی منابع پروژه و همچنین محدودیت‌های جبهه‌کار انجام گرفت. ارزیابی مدل در مطالعه موردی برای پروژه اجرای روسازی راه‌آهن میانه – اردبیل نشان داد که استفاده از رویکرد شبیه‌سازی، توانسته است نسبت به روش‌های متداول نظیر مسیر بحرانی، تصویر واقعی‌تر و پویاتری از روند اجرا ترسیم کند. یافته‌های به‌دست‌آمده حاکی از آن است که تغییر در تخصیص منابع کلیدی و یا نرخ تحویل جبهه کار توسط سایر پیمانکاران پروژه، تأثیر معناداری بر مدت زمان کل پروژه و بهینه‌سازی توزیع فعالیت‌ها دارد؛ موضوعی که در روش‌های برنامه‌ریزی متداول به دلیل عدم لحاظ تغییرپذیری منابع و فضا، به‌درستی پیش‌بینی نمی‌شود. افزون بر این، قابلیت مدل در تعریف سناریوهای متنوع اجرایی و امکان ارزیابی اثرات آن‌ها پیش از شروع عملیات واقعی، ابزاری راهبردی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت پروژه فراهم آورده است. بر این اساس، به‌کارگیری روش شبیه‌سازی پیشامد گسسته در همراهی با سیستم‌های تصمیم داده‌محور، به عنوان ابزاری اثربخش برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های خطی ریلی پیشنهاد می‌شود. در توسعه‌های آتی، مدل ارائه‌شده امکان یکپارچه‌سازی با سیستم‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را دارد. همچنین تحلیل‌های بهینه‌سازی چندهدفه با درنظر گرفتن معیارهای همزمان زمان، هزینه و کیفیت بسیار ارزشمند خواهد بود

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Image processing
2. Line of Balance
3. Critical Path Method
4. Decision Support System
5. Lean Construction
6. Building Information Modeling
7. Bottleneck
8. Information System
9. Database

10. Fuzzy
11. Categorical Regression
12. Block
13. Sheet
14. Entity

۸- مراجع

-Abbasi, S., Taghizade, K., & Noorzai, E. (2020). BIM-Based Combination of Takt Time and Discrete Event Simulation for Implementing Just in Time in Construction Scheduling under Constraints. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(12), 04020143.
doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001940

-Abdelmegid, M. A., González, V. A., Poshdar, M., O'Sullivan, M., Walker, C. G., & Ying, F. (2020). Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. *Automation in Construction*, *111*, 103046.
doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103046

-AbouRizk, S. (2010). Role of Simulation in Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, *136*(10), 1140–1153.
doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000220

-C. Charoenwong, Connolly, D. P., Aires Colaço, P. Alves Costa, Woodward, P. K., Romero, A., & Galvín, P. (2023). Railway slab vs ballasted track: A comparison of track geometry degradation. *Construction and Building Materials*, *378*, 131121–131121.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131121

-Chen, S.-M., Griffis, F. H. (Bud)., Chen, P.-H., & Chang, L.-M. (2012). Simulation and analytical techniques for construction resource planning and scheduling. *Automation in Construction*, *21*, 99–113.
doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.018

-Daddow, M., Zhang, X., Qiu, H., Zhang, Z., & Liu, Y. (2020). A Mathematical Model for Ballast Tamping Decision Making in Railway Tracks. *Civil Engineering Journal*, *6*(10), 2045–2057.
doi.org/10.28991/cej-2020-03091601

-Daramola, A. (2022). A comparative analysis of road and rail performance in freight transport: an example from Nigeria. *Urban, Planning and Transport Research*, *10*(1), 58–81.
doi.org/10.1080/21650020.2022.2033134

-El-Abbasy, M. S., Elazouni, A., & Zayed, T. (2017). Generic Scheduling Optimization Model for Multiple Construction Projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *31*(4), 04017003.
doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000659

-Ezell, B., Lynch, C. J., & Hester, P. T. (2021). Methods for Weighting Decisions to Assist Modelers and Decision Analysts: A Review of Ratio Assignment and Approximate Techniques. *Applied Sciences*, *11*(21), 10397.
doi.org/10.3390/app112110397

-Franco-Duran, D. M., & de la Garza, J. M. (2020). Performance of Resource-Constrained Scheduling Heuristics. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(4).
doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001804

-García-Nieves, J. D., Ponz-Tienda, J. L., Ospina-Alvarado, A., & Bonilla-Palacios, M. (2019). Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects. *Automation in Construction*, *105*, 102799.
doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.020

-Guler, H. (2013). Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *27*(3), 292–306.
doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000221

-Helleno, A. L., Pimentel, C. A., Ferro, R., Santos, P. F., Oliveira, M. C., & Simon, A. T. (2015). Integrating value stream mapping and discrete events simulation as decision making tools in operation management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *80*(5-8), 1059–1066.
doi.org/10.1007/s00170-015-7087-1

-Jarkas, A. M. (2012). Buildability Factors Influencing Concreting Labor Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, *138*(1), 89–97.
doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000404

-Jiang, T., An, X., Minchin, R. E., & Li, S. (2016). Application of Discrete-Event Simulation in the Quantitative Evaluation of Information Systems in Infrastructure Maintenance Management Processes. *Journal of Management in Engineering*, *32*(2).
doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000403

-Khanh, H. D., & Kim, S.-Y. (2020). Exploring Productivity of Concrete Truck for Multistory Building Projects Using Discrete Event Simulation. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
doi.org/10.1007/s12205-020-1389-z

-Kuzmin, D., Baginova, V., & Ageikin, A. (2022). Discrete event simulation model of the railway station. *Transportation Research Procedia*, *63*, 929–937.
doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.091

-Laslo, Z. (2020). Project portfolio management: An integrated method for resource planning and scheduling to minimize planning/scheduling-dependent expenses. *International Journal of Project Management*, *28*(6), 609–618.
doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.10.001

-Lee, J., Park, Y.-J., Choi, C.-H., & Han, C.-H. (2017). BIM-assisted labor productivity measurement method for structural formwork. *Automation in Construction*, *84*, 121–132.
doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.009

-Taghaddos, M., Taghaddos, H., Hermann, U., Mohamed, Y., & AbouRizk, S. (2021). Hybrid multi-mode simulation and optimization for subarea scheduling in heavy industrial construction. *Automation in Construction*, *125*, 103616. **doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103616**

-Tang, R., De Donato, L., BešinovićN., Flammini, F., Goverde, R. M. P., Lin, Z., Liu, R., Tang, T., Vittorini, V., & Wang, Z. (2022). A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *140*(103679), 103679. **doi.org/10.1016/j.trc.2022.103679**

-Vahdatikhaki, F., & Hammad, A. (2014). Framework for near real-time simulation of earthmoving projects using location tracking technologies. *Automation in Construction*, *42*, 50–67.
Doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.018

-Xiao, X., Cai, D., Liangwei, L., Shi, Y.-F., & Amirkhanian, S. N. (2021). Application of asphalt based materials in railway systems: A review. *Construction and Building Materials*, *304*, 124630–124630.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124630

-Zamani, V., Yavari, E., & Hosein Taghaddos. (2024). A science mapping lens on discrete event simulation applications in construction engineering and management. *Automation in Construction*, *166*, 105625–105625.
doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105625

-Zhang, H., & Li, H. (2004). Simulation-based optimization for dynamic resource allocation. *Automation in Construction*, *13*(3), 409–420. **doi.org/10.1016/j.autcon.2003.12.005**

-Zou, X., & Zhang, L. (2020). A constraint programming approach for scheduling repetitive projects with atypical activities considering soft logic. *Automation in Construction*, *109*, 102990. **doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102990**

-Li, C. Z., Xu, X., Shen, G. Q., Fan, C., Li, X., & Hong, J. (2018). A model for simulating schedule risks in prefabrication housing production: A case study of six-day cycle assembly activities in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, *185*, 366–381.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.308

-Michal, G., Huynh, N., Shukla, N., Munoz, A., & Barthelemy, J. (2017). RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight. *Transportation Research Procedia*, *25*, 461–473. **doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.426**

-RazaviAlavi, S., & AbouRizk, S. (2017). Genetic Algorithm–Simulation Framework for Decision Making in Construction Site Layout Planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, *143*(1), 04016084. **doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001213**

-Roofigari-Esfahan, N., & Razavi, S. (2017). Uncertainty-Aware Linear Schedule Optimization: A Space-Time Constraint-Satisfaction Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, *143*(5), 04016132.
doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001276

-Ruiz, M., Orta, E., & Sánchez, J. (2024). A Simulation-based Approach for Decision-Support in Healthcare Processes. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *136*, 102983–102983. **doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102983**

-Salem, A. (2017). Study of Factors Influencing Productivity of Hauling Equipment in Earthmoving Projects using Fuzzy Set Theory. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 151–154.
doi.org/10.18178/ijimt.2017.8.2.719

Development of a Novel Construction Planning Model for Ballasted Railway Projects Using Discrete Event Simulation (Case Study: Mianeh-Ardabil Railway)

Alireza Mahdavi Miralilou, M.Sc. Grad., Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Masoud Fathali, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Hossein Taghaddos, Associate Professor, Department of Construction Management, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: m.fathali@bhrc.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

In recent years, the use of advanced technologies in the construction of railway ballast tracks has led to numerous advantages. These technologies encompass a wide range of domains, including the deployment of modern machinery, intelligent management of material inflow, and application of computer-based tools for project execution. Among these tools, discrete event simulation offers a precise and reality-based framework for railway construction planning by identifying bottlenecks and enhancing overall productivity. This study proposes a comprehensive modeling framework for the construction planning of ballasted railway infrastructure, utilizing discrete event simulation. The model was developed and implemented in Rockwell Arena Simulation Software, which enables detailed process visualization and execution modeling. The proposed framework facilitates the analysis of critical factors influencing construction performance and highlights interactions that affect productivity. A Mianeh-Ardabil railway project case study was conducted to evaluate the model's effectiveness. Results demonstrate that even slight variations in influential parameters can significantly alter the project completion time. Key challenges such as subgrade delays and inefficient material supply were identified as major contributors to reduced productivity, with some scenarios showing over 16% decline in progress rates.

Keywords: Ballasted Track Systems, Discrete Event Simulation, Productivity Analysis, Railway Infrastructure Construction