مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۳۹-۴۹، (پژوهشی)

Original Article

بهبود فرایند ساخت بر مبنای مفاهیم تولید ناب و استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته

خشایار آسید اسمعیلی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
حسین تقدس * (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران
محمدسعید کریمی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

در روش‌های برنامه‌ریزی متداول و سنتی در پروژه‌ها، فرض بر اجرای فعالیت‌ها بر مبنای سیستم مبتنی بر فشار (شروع فعالیت‌ها در زودترین زمان ممکن) است. سیستم‌های سنتی برنامه‌ریزی مبتنی بر فشار اغلب منجر به انواع ضایعات در پروسه‌ی ساخت می‌شوند، که به‌دلیل توزیع نادرست منابع است. ضایعات ایجاد شده در پروسه‌ی ساخت می‌توانند موجب آثار منفی، نظیر: افزایش زمان، هزینه و انتشار آلاینده‌ها شوند.
در نوشتار حاضر، مفاهیم تولید ناب، نظیر: برنامه‌ریزی کششی، استاندارد کردن پروسه‌ی ساخت و پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت، جهت شناسایی و رفع انواع ضایعات و همچنین گلوگاه‌های پروسه‌ی ساخت در فرایند برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی بررسی شده است. همچنین جهت ارزیابی روش‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر تولید ناب، شبیه‌سازی پیشامد گسسته‌ی سناریوهای مختلف مبتنی بر مفاهیم تولید ناب در قالب مطالعه‌ی موردی پروژه‌ی بتن‌ریزی فونداسیون پروژه‌ی مجتمع تجاری صورت پذیرفته است.

واژگان کلیدی: تولید ناب، برنامه‌ریزی کششی، استانداردسازی پروسه‌ی ساخت، پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت، شبیه‌سازی پیشامد گسسته.

esmaeili@semnan.ac.ir
htaghaddos@ut.ac.ir
mskarimi@semnan.ac.ir

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی تحقیقات

صنعت ساخت در مقایسه با سایر صنایع تولیدی در وجوه مختلف، از جمله: نحوه‌ی برنامه‌ریزی، تفاوت‌های اساسی دارد. بر همین اساس استفاده از مفاهیم موجود در تولید صنعتی (نظیر تولید ناب) در صنعت ساخت به دلیل تفاوت‌هایی مانند پیچیدگی و اجرای در محل، در پروژه‌های ساختمانی دارای صعوبت است. به همین دلیل، علی‌رغم استفاده‌ی موفقیت‌آمیز مفاهیم تولید ناب در بسیاری از صنایع بزرگ تولیدی مانند تویوتا، اجرای آن در پروژه‌های ساختمانی تا حد زیادی مغفول مانده است. پروژه‌های صنعت ساخت اساساً ویژگی‌های منحصر به فرد دارند، در حالی که تولیدات صنعتی، فرایند تکرارشونده با ویژگی‌های مشابه محصولات دارند. از این رو، به‌دلیل عدم تکرار زیاد در هر یک از فرایندهای اجرایی در پروژه‌های صنعت ساخت، برخلاف تولیدات صنعتی، امکان وجود سعی و خطا در بهبود فرایند ساخت وجود ندارد. از طرفی دیگر، با توجه به دشواری پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی فرایند اجرایی در پروژه‌های ساختمانی، روش‌های تولید ناب به‌ندرت در پروژه‌های عمرانی به‌کار می‌روند.

برخی از مطالعات، پتانسیل بالایی از مفاهیم موجود در تولیدات صنعتی مانند تولید ناب را برای بهبود بهره‌وری در ساخت و ساز برای از بین بردن ضایعات در پروسه‌ی اجرایی مختلف نشان داده‌اند.[۱-۳] اگرچه بسیاری از پژوهش‌گران و دست‌اندرکاران در دو دهه‌ی گذشته، تلاش‌های چشم‌گیری را برای انطباق مفاهیم ناب در تولید صنعتی با صنایع ساخت انجام داده‌اند.[۴و۵] با این حال هنوز فضای کار زیادی جهت پیشرفت در این زمینه وجود دارد. تولید ناب، در دهه‌ی ۸۰ میلادی به‌عنوان ابزار مدیریت نوآورانه جهت ارتقاء تولید صنعتی با از بین بردن هرگونه ضایعات معرفی شده است. از آن زمان، مطالعات پژوهشی بسیاری در مفاهیم اساسی تولید ناب، نظیر برنامه‌ریزی کششی،[۱] استانداردسازی[۲] فرایند ساخت و پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت[۳] انجام شده است.[۱،۵و۶] هدف اصلی در تولید ناب، شناسایی و کاهش ضایعات است. یکی از مهم‌ترین مفاهیم تولید ناب در زمینه‌ی کاهش ضایعات، اعمال جریان کششی در پروسه‌ی ساخت بر اساس نیاز مشتری (فعالیت‌های پس‌نیاز) است.[۷] از اولین پژوهش‌گران در زمینه‌ی انطباق مفاهیم تولید ناب و صنعت ساخت، کوسکلا[۴]،[۸] بود که با وام گرفتن مفاهیمی از تولید ناب، که توسط وومک[۵] و همکارانش (۱۹۹۴)،[۹] ایجاد شده بود، اقدام به ارائه‌ی ایده‌هایی جهت بهبود در عملکرد T مربوط به بهره‌وری منابع و کنترل گازهای آلاینده در فرایند

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۷/۸، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۲۰.
DOI:10.24200/J30.2020.55765.2773

اجرایی کرد. همچنین بارلو و همکاران (۲۰۰۳)،[۱۰] شباهت‌هایی مابین فرایندهای اجرایی تولیدات صنعتی و صنعت ساخت معرفی کردند. برخی از مطالعات انجام شده به معرفی برخی مفاهیم تولید ناب، نظیر: روش LPS،[۶][۱۱] جهت بهبود فرایند ساخت و استفاده از مفهوم انتقال مصالح در زمان مقتضی در پروسه‌های اجرایی پرداخته‌اند.[۱۲] در پژوهشی دیگر اینلا[۷] و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۳] با استفاده از مفاهیم تولید ناب اقدام به بهبود فرایند ساخت در ساختمان‌ها با روش ساخت مدولار کردند، که این مطلب از طریق نزدیک کردن شرایط ساخت پروژه‌های عمرانی به تولیدات صنعتی از طریق مدولارسازی و افزایش تکرار و تشابه گام‌های اجرایی در فرایند ساخت صورت پذیرفته است. از دیگر مفاهیم کاربردی و قابل پیاده‌سازی در پروژه‌های عمرانی، که فرایندهای ساخت تکرارپذیر دارند، مفهوم انجام کار در زمان مقرر (JIT) [۸] است.[۱۴] به صورت محدود در برخی از مطالعات صورت‌گرفته، مفهوم ارزش‌زایی فعالیت‌ها با استفاده از مفاهیم تولید ناب ارائه شده است.[۱۵] از دیگر ابزارهای استفاده شده در تولید ناب که ایجادکننده‌ی کشش مابین فعالیت‌های پایین‌دست و بالادست می‌شود، ابزار «سوپرمارکت» [۹] است. سوپرمارکت یکی از ابزارهای کارآمد در مفاهیم ناب است که موجب پیشگیری از تغییرات پیش‌بینی نشده در طی فرایند اجرا، با نگهداری مقدار مشخصی از منابع یا مصالح به‌صورت شناور در طی فرایند ساخت، می‌شود.[۳۳] به‌عبارت دیگر، با استفاده از مفهوم سوپرمارکت، متناسب با نیاز فعالیت‌های بالادستی (پس‌نیاز)، منابع و فعالیت‌های پایین‌دستی (پیش‌نیاز) فعال یا تولید می‌شوند. یکی از اهداف و نوآوری‌های نوشتار حاضر، برجسته‌سازی فعالیت‌های ارزش‌زا در طی پروسه‌ی ساخت با استفاده از روش‌های نشأت‌گرفته از مفاهیم تولید ناب به‌صورت گسترده‌تر نسبت به مطالعات پیشین و همچنین استفاده از روش‌های موجود در تولید ناب در فرایند برنامه‌ریزی اجرایی پیش از شروع پروژه است، که منجر به دست‌یابی به هدف اصلی از به کارگیری تولید ناب و موجب حذف ضایعات می‌شود. علاوه‌بر استفاده از روش‌های نوین در شناسایی ضایعات در طی پروسه‌ی ساخت، تأثیر اعمال روش‌های مذکور در فرایند اجرایی نیز باید ارزیابی شود. یکی از بهترین ابزارها جهت ارزیابی تأثیر واقعی سناریوهای مختلف در تهیه‌ی برنامه‌ی اجرایی، مدل‌سازی فرایند براساس شبیه‌سازی پیشامد گسسته است. شبیه‌سازی پیشامد گسسته قادر به اندازه‌گیری اندیس‌های کلیدی عملکرد (KPI)،[۱۰] نظیر زمان انتظار مابین فعالیت‌ها[۱۱] و زمان اجرای کل چرخه‌ی فعالیت‌ها[۱۲]ست. مطالعات زیادی در خصوص شبیه‌سازی، از زمان ارائه‌ی سایکلون[۱۳] توسط هالپین[۱۴] (۱۹۷۷)،[۱۶] که عموماً به‌عنوان یک زبان مدرن شبیه‌سازی معرفی شده است، صورت گرفته است. برخی از جنبه‌های سایکلون توسط برخی پژوهش‌گران توسعه یافته است.[۱۷-۱۹] شوچوک و چانگ[۱۵] (۱۹۹۱)،[۲۰] یک مدل شبیه‌سازی شی‌گرا جهت تحلیل ساختاری پروسه‌ی ساخت ارائه کرده‌اند. زبان شبیه‌سازی سیمفونی[۱۶] توسط ابوریزک و حاجر[۱۷ ۱۸] معرفی شده است.[۲۱و۲۲] نرم‌افزار Simphony.NET نسل دوم از نرم‌افزار سیمفونی است، که قابلیت مدل‌سازی مبتنی بر پایگاه داده دارد. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار سیمفونی، امکان ورود داده‌ها بر مبنای کدنویسی علاوه‌بر وجود جعبه ابزار پیش‌فرض موجود در نرم‌افزار جهت انجام هرگونه برنامه‌ریزی مبتنی بر شبیه‌سازی است. نرم‌افزار سیمفونی، قابلیت برنامه‌ریزی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشامد گسسته و استفاده از داده‌های آماری را دارد. ارائه‌ی خروجی‌های متنوع آماری و نموداری از مدل‌های شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار سیمفونی، امکان برنامه‌ریزی عملی در صنایع و پروژه‌های عمرانی توسط نرم‌افزار مذکور را فراهم کرده است. در طول ۲۰ سال گذشته، از قابلیت‌های مختلف شبیه‌سازی در ساخت و ساز استفاده شده است. مدل‌سازی پیشامد گسسته در مطالعات زیادی به‌عنوان ابزاری مفید جهت تحلیل هزینه و زمان پروژه‌های ساختمانی استفاده شده است.[۲۳و۲۴] برای نمونه، محمد و همکاران (۲۰۰۷)، در پژوهش خود از شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت برنامه‌ریزی پلان تجهیز کارگاه استفاده کرده‌اند.[۲۵] همچنین ستو[۱۹] و همکاران (۲۰۱۶)، از شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت مدل کردن سطح خستگی کارگران در پروژه‌ی ساختمانی و میزان بهره‌وری آن‌ها استفاده کرده‌اند.[۲۶] ژانگ[۲۰] (۲۰۱۵)،[۲۷] نیز با استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته در یک پروژه‌ی ساختمانی، اقدام به تعریف چارچوبی جهت اندازه‌گیری گازهای آلاینده‌ی ماشین استفاده شده در پروژه کرده است. یکی دیگر از قابلیت‌های مدل‌سازی در محیط شبیه‌سازی پیشامد گسسته، استفاده از آن در برآورد کفایت منابع (برای مثال تاور کرین) و بهینه‌سازی آن‌هاست.[۲۸] همچنین جهت تعیین بهره‌وری منابعی نظیر نیروی انسانی و تجهیزات جهت برنامه‌ریزی در پروژه‌های عمرانی، استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته می‌تواند برای مدیران و برنامه‌ریزان پروژه، کاربردی باشد.[۲۹] برخی از مطالعات صورت‌گرفته در حوزه‌ی شبیه‌سازی، مرتبط با استفاده از ابزار ذکر شده جهت برآورد منابع و زمان انجام فعالیت‌های اصلی، نظیر بتن‌ریزی بخشی از یک پروژه‌ی عمرانی است.[۳۰] همچنین استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت برنامه‌ریزی بالادستی مجموعه‌هایی نظیر ترمینال‌ها، جهت کنترل و بهبود زمان و هزینه در حرکت ماشین‌ها در مطالعات پیشین صورت گرفته است.[۳۱] یکی ازمهم‌ترین قابلیت‌های شبیه‌سازی، استفاده از آن به‌عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی تغییرات ناشی از اعمال سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی در پروسه‌ی اجرایی، به ویژه در پروژه‌های با انجام فعالیت‌های تکراری و خطی (نظیر بتن‌ریزی) است.[۲] استفاده از مدل‌سازی فرایند ساخت با استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت برآورد زمان و هزینه‌ی پروژه‌ها بسیار مفید و کاربردی خواهد بود؛ مخصوصاً در صورتی که فرایند اخیر به‌صورت اتوماتیک در برنامه‌ریزی لحظه‌یی پروژه قابل استفاده باشد.[۳۲] اگرچه پیشرفت‌های چشمگیری در هر دسته از مدل‌های توسعه یافته براساس شبیه‌سازی پیشامد گسسته و همچنین بعضاً به‌کارگیری مفهوم تولید ناب در پروژه‌های ساختمانی وجود دارد؛ اما به‌ندرت مطالعاتی وجود داشته است که مدل‌سازی پیشامد گسسته را با مفاهیم تولید ناب پیوند داده باشد، تا موجب بهبود فرایند اجرایی آن به‌ویژه در پروژه‌های تکراری و خطی شود.

با توجه به توضیحات اخیر در خصوص اهداف به‌کارگیری مفاهیم تولید ناب و شبیه‌سازی پیشامد گسسته در پژوهش حاضر، هدف و نوآوری صورت گرفته در نوشتار حاضر، در وهله‌ی اول استفاده از روش‌هایی در تولید ناب بوده است، که به‌ندرت در پروژه‌ی عمرانی جهت برنامه‌ریزی عملیات اجرایی استفاده شده است (نظیر سوپرمارکت و برنامه‌ریزی کششی). در وهله‌ی بعد، نیز استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته در این خصوص، به‌عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی شرایط ضایعات پیش از آغاز عملیات اجرایی بوده است، که در گام اول، تعیین‌کننده‌ی گلوگاه‌ها و ضایعات فرایند و در گام بعد، به‌عنوان ابزاری جهت تعیین کارآمدی سناریوهای مبتنی بر مفاهیم ناب در بهبود شرایط ضایعات در فرایند اجرا بوده است.

۲. روش پژوهش

موضوع نوشتار حاضر، توسعه‌ی مدلی جهت پیاده‌سازی مفاهیم تولید ناب در بخشی از یک پروژه‌ی عمرانی و ارزیابی توسط مدل‌سازی در محیط شبیه‌سازی پیشامد گسسته در نرم‌افزار سیمفونی است. مدل ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی توانایی شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت مدل‌سازی شرایط اولیه‌ی یک پروژه براساس داده‌های جمع‌آوری شده‌ی پروژه‌ی مشابه، پیش از شروع فرایند اجرایی و متعاقباً استخراج اندیس‌های

جدول ۱. اندیس‌های کلیدی عملکردی استفاده شده در پژوهش حاضر.

اندیس کلیدی عملکرد	واحد	تعریف
زمان چرخه‌ی کلی (CD)	دقیقه	مدت زمان لازم جهت تکمیل کلیه‌ی فعالیت‌های یک چرخه از زمان تولید تا بتن‌ریزی (به صورت میانگین)
زمان انجام مفید فعالیت‌ها (CT)	دقیقه	مجموع مدت زمان انجام هرگام از فرایند (بدون زمان انتظار)
زمان انتظار (WT)	دقیقه	مجموع زمان انتظار تراک‌ها در گام‌های مختلف
ضایعات بتن (CW)	M^3/Min	درصد ضایعات بتن نسبت به کل بتن‌ریزی
صحت انجام عملیات (CO)	(٪)	درصدی از تراک‌ها که عملیات بتن‌ریزی را بدون ضایعات بتن انجام داده‌اند
هزینه‌ی عملیات (OC)	ریال	هزینه‌ی کل عملیات شامل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم (شامل بالاسری)
نرخ بهره‌وری	M^3/Min	میزان بتن قابل اجرای پروژه، تقسیم بر زمان انجام کل صرف شده. این اندیس نشان‌دهنده‌ی بهره‌وری پروسه‌ی بتن‌ریزی پروژه است.
درصد تراک‌های بدون تأخیر (NTP)	(٪)	درصد تراک‌ها در هرگام که گام مرتبط را بدون توقف در صف انتظار طی کرده‌اند (در نظرگیری کمترین مقدار در کل گام‌های فرایند اجرایی)

فرایند ساخت در شرایط کنونی و آتی (قبل و بعد از اعمال مفاهیم تولید ناب در فرایند) است. نوشتار حاضر در دو فاز اصلی صورت پذیرفته است: ۱) شناسایی ضایعات پروسه‌ی ساخت بر اساس خروجی‌های مدل شبیه‌سازی و ۲) بهبود فرایند آتی ساخت بر اساس اعمال مفاهیم تولید ناب.

این مطلب با هدف بهبود ضایعات پروسه‌ی ساخت، کاهش هزینه، کاهش زمان و کاهش انتشارگازهای آلاینده در طی فرایند ساخت صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه‌یی مشابه با پروژه‌ی استفاده شده در مطالعه‌ی موردی در پژوهش حاضر، اقدام به شبیه‌سازی شرایط پروژه مطابق با روش‌های اجرایی سنتی شده است. از مدل شبیه‌سازی شده‌ی شرایط فعلی، اندیس‌های کلیدی عملکردی فرایند (KPI) اجرایی استخراج و تحلیل شده است. بخشی از اندیس‌های استفاده شده در پژوهش حاضر با استفاده از مطالعات پیشین و بر اساس مطالعات روزنباوم[21] و همکاران (۲۰۱۴)،[33] و یو[22] و همکاران (۲۰۰۹)،[3] بوده است و مابقی بر مبنای ماهیت پروژه و بر اساس مطالعات میدانی و شرایط پروژه‌ی ارائه شده توسط نویسندگان نوشتار حاضر است. در جدول ۱، کلیه‌ی اندیس‌های کلیدی عملکردی استفاده‌شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

با استفاده از تحلیل اندیس‌های کلیدی، عملکرد شرایط فعلی ضایعات فرایند اجرایی شناسایی می‌شود. جهت بهبود ضایعات شناسایی شده در فرایند اجرایی، اقدام به تعریف و اعمال ایده‌های مبتنی بر تولید ناب بر فرایند اجرایی و سپس جهت تحلیل کارآیی ایده‌های ناب ـ محور، اقدام به شبیه‌سازی آن‌ها در فرایند اجرایی شده است. سپس با استفاده از تحلیل اندیس‌های کلیدی عملکرد و همچنین ضایعاتی نظیر طول صف انتظار منابع در شرایط قبل و بعد از اعمال ایده‌های ناب ـ محور، در خصوص شرایط ضایعات فرایند اجرایی بحث شده است.

۳. جمع‌آوری داده‌ها و مطالعه‌ی موردی

در پژوهش حاضر، فرایند اجرایی مجتمع تجاری در حال ساخت، واقع در غرب تهران بررسی شده است. تمرکز انجام پژوهش بر روی اجرای فونداسیون پروژه‌ی مذکور بوده است، که بخشی از آن اجرا و بخشی دیگر با مشخصات مشابه با قسمت اجرا شده، در حال ساخت است. گام‌های اصلی بتن‌ریزی در پروژه‌ی حاضر عبارت است از: ۱) تولید بتن در بچینگ‌پلانت با تعداد ۴ عدد بچینگ ثابت در خارج از پروژه، ۲) انتقال بتن از بچینگ‌پلانت به محل پروژه با ۴۰ عدد تعداد ثابت تراک میکسر، ۳) بتن‌ریزی در محل فونداسیون و ۴) بازگشت تراک میکسرها به بچینگ‌پلانت. پس از بازدیدهای میدانی مشخص شد که رمپ دسترسی از داخل پروژه به سمت محل فونداسیون، عرضی محدود معادل تردد یک عدد تراک میکسر در یک جهت در هر لحظه (یک تراک میکسر در حال حرکت به سمت بالا یا پایین رمپ) دارد. محدودیت عرض رمپ موجب بروز صف برای تردد تراک‌ها در ورودی و خروجی رمپ شده است. با توجه به این‌که رویکرد پژوهش حاضر، پیش‌بینی وضعیت کنونی با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر واقعیت است، جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های معتبر به‌عنوان ورودی‌های مدل، اهمیت بسیاری دارد. جمع‌آوری داده‌های موردنیاز جهت

مدل‌سازی، از پروژه‌یی با روند اجرایی و تجهیزات مشابه انجام شده است (فونداسیون اجرا شده واقع در کنار پروژه‌ی فعلی با همان مشخصات فنی و موقعیتی). جهت اطمینان از صحت اطلاعات، جمع‌آوری داده‌ها در مطالعه‌ی حاضر در ۳ مرحله صورت پذیرفته است:

۱. بازدید میدانی و جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز از سایت در بازه‌ی دو هفته‌یی؛

۲. استفاده از اسناد جمع‌آوری شده در بخش کنترل پروژه‌ی پیمانکار؛

۳. استفاده از نظر خبرگی مدیر پروژه و مدیر اجرایی؛

اطلاعات موردنیاز در مرحله‌ی ۱ بر اساس مشاهدات دقیق و منظم در زمان انجام عملیات اجرایی در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌یی گردآوری و در پایگاه داده‌ی نرم‌افزار سیمفونی ثبت شده است. به جهت اطمینان از مناسب بودن توزیع داده‌ها و صحت‌سنجی نرمال بودن داده‌های استفاده شده در فرایند شبیه‌سازی، با استفاده از امکان صحت‌سنجی توزیع نرمال موجود در نرم‌افزار، داده‌های جمع‌آوری شده ارزیابی شده‌اند. همچنین داده‌های جمع‌آوری شده در مرحله‌ی ۲ مشابه مرحله‌ی ۱، برای تشخیص مناسب بودن توزیع داده ارزیابی شدند. نهایتاً داده‌ها جمع‌آوری شده از مراحل ۱ و ۲، با استفاده از اخذ تأیید و نظر خبرگی مدیر پروژه و مدیر اجرایی پروژه جهت استفاده در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده‌اند. در پژوهش حاضر، دو نوع داده‌ی مختلف جمع‌آوری شده است: ۱) داده‌های مربوط به فرایند اجرایی مانند طول صف و زمان انتظار تراک میکسرها در هریک ازگام های فرایند اجرایی، زمان صرف شده توسط منابع برای انجام کار مرتبط با آن‌ها، بهره‌وری منابع، زمان چرخه‌ی انجام بتن‌ریزی، زمان انتظار تراک میکسرها مابین هر یک ازگام‌های فرایند اجرا و ضایعات ناشی از اتلاف بتن در فرایند اجرایی و ۲) داده‌های مربوط به مشخصات منابع نظیر هزینه و میزان انتشار آلاینده‌ها.[۲۳] داده‌های نوع اول به‌عنوان داده‌های فرایند اجرایی مستقیماً در مدل شبیه‌سازی وارد شده‌اند، در حالی که داده‌های دسته‌ی دوم به‌عنوان داده‌های منابع استفاده شده در مدل شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند. همچنین داده‌های مرتبط با انتشار آلاینده‌ی ماشین‌آلات مختلف، اعم از بچینگ‌پلانت، تراک میکسر و پمپ‌های بتن‌ریزی، از میزان مندرج درکاتالوگ‌های ماشین‌آلات و پژوهش بر مبنای نوع مدل هر یک از ماشین‌آلات استفاده شده در مطالعه‌ی موردی، به‌صورت متوسط بر اساس ساعت کارکرد آن‌ها به هر یک از ماشین‌آلات در مدل شبیه‌سازی تخصیص یافته‌اند.

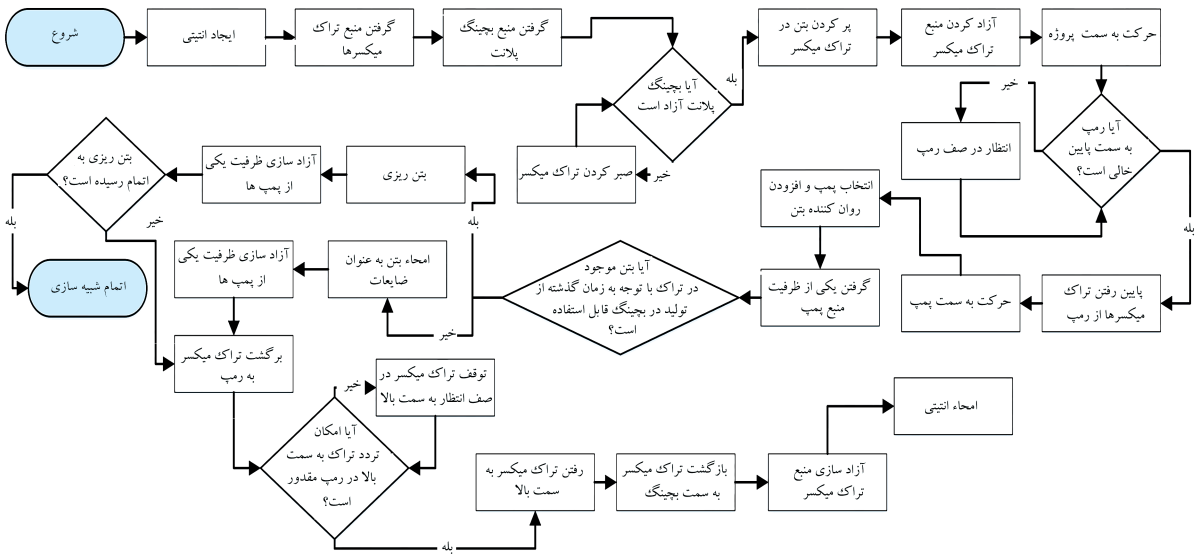
۴. شبیه‌سازی و آنالیز شرایط فعلی فرایند اجرایی

شبیه‌سازی شرایط فعلی بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از بخش «جمع‌آوری داده‌ها» و همچنین با شناسایی فعالیت‌ها و توالی‌های ریختن بتن پروژه با مشاهده‌ی سایت و استفاده از نظر خبرگی مدیر پروژه و مدیر اجرایی با نزدیک به ۱۵ سال سابقه‌ی اجرایی در پروژه‌های ساختمانی آغاز شده است. در شکل ۱، چارچوب و منطق اعمال شده در مدل‌سازی شرایط فعلی در محیط شبیه‌سازی شرایط مشاهده می‌شود.

جهت مدل‌سازی شرایط فعلی، تراک میکسر به‌عنوان انتیتی[۲۴] مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل شبیه‌سازی، زمان انجام فعالیت‌ها بر اساس توزیع نرمال درج شده است. با توجه به این‌که ظرفیت هر تراک میکسر برابر با ۷ مترمکعب لحاظ شده است، جهت اندازه‌گیری میزان بتن، تعداد انتیتی‌ها ۷ برابر شده است.

جهت محاسبه‌ی اندیس‌های عملکردی هزینه‌یی، هزینه‌ی هر یک از منابع، بتن مصرفی و بالاسری با در نظرگرفتن زمان مصرف و ضایعات، بخش مجزا در مدل شبیه‌سازی لحاظ شده است. همچنین نرخ آلایندگی منابع به‌طور متوسط بر اساس مشخصات منابع و نرخ معمول آلایندگی هر منبع، در مدل شبیه‌سازی اعمال شده است.

نتیجه‌ی شبیه‌سازی شرایط فعلی نشان دادکه بیشترین میزان ضایعات درناحیه‌ی رمپ اتفاق افتاده است. میانگین زمان انتظار هر تراک میکسر (WT) [۲۵] برای ورود و پایین رفتن از رمپ، که در واقع نشان‌دهنده‌ی ضایعات اساسی حادث شده در فرایند اجرایی موجود است، برابر با ۳۸ دقیقه و این زمان برای خروج و بالا رفتن از رمپ برابر ۳۶ دقیقه است. از طرفی دیگر، میانگین زمان بی‌کاربودن بچینگ پلانت و هر پمپ، که از دیگر ضایعات رخداده در هر چرخه از فرایند اجرایی فعلی بوده است، به‌ترتیب برابر با ۴۰ و ۳۰ دقیقه بوده است. به‌عبارت دیگر، برخی از



شکل ۱. چارچوب انجام فرایند اجرایی در شرایط فعلی.

پمپ‌ها و بچینگ‌ها در زمان‌های مذکور بی‌کار بوده‌اند، در حالی که تراک میکسرها برای حرکت به سمت آن‌ها در صف انتظار قرارگرفته بودند؛ که این مطلب مؤکد این مطلب است که رمپ، به جهت ایجاد ضایعات ناشی از صف انتظار تراک میکسر در این محدوده، گلوگاه پروژه‌ی حاضر بوده است. در بیشترگام‌های دیگر فرایند اجرایی پروژه‌ی حاضر، طول صف تراک میکسرها برابر صفر بوده است، که نشان‌دهنده‌ی توزیع نادرست منابع در فرایند اجرایی است. از طرفی دیگر، توقف بیش از حد تراک میکسرها در صف گام‌های اجرایی موجب از دست رفتن کیفیت بتن داخل تراک‌ها شده است. در نتیجه، مطابق طرح اختلاط بتن و الزامات بتن‌ریزی پروژه، بتن‌هایی که از زمان تولید تا زمان بتن‌ریزی بیش از ۵۰ دقیقه در داخل تراک مانده باشند، در آزمایش‌های کنترل کیفیت، مردود و به‌عنوان ضایعات بتن در نظرگرفته می‌شوند. خروجی‌های مستخرج از مدل شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده‌ی ۳٫۳۰۰ مترمکعب بتن معادل (۱۶٫۵٪ از کل مقدار بتن‌ریزی) ضایعات بتن‌ریزی است.

از دیگر نتایج ضایعات ناشی از توقف تراک‌ها در صف انتظار، افزایش هزینه‌ی عملیاتی پروژه است. با توجه به اینکه در پروژه‌های عمرانی و به‌صورت خاص پروژه‌ی حاضر، غالباً هزینه‌ی منابع (پمپ‌ها، بچینگ پلانت، تراک میکسر و غیره) به‌صورت اجاره‌یی و وابسته به زمان هستند، در نتیجه افزایش زمان موجب افزایش هزینه‌ی عملیاتی می‌شود. همچنین هزینه‌های بالاسری وابسته به زمان است و افزایش زمان فرایند اجرایی موجب افزایش هزینه‌ی فرایند اجرایی خواهد شد. همچنین هزینه‌ی ضایعات بتن‌ریزی به مجموع هزینه‌های مذکور اضافه می‌شود.

جهت صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شرایط فعلی، خروجی‌های به دست آمده از مدل با شرایط واقعی فرایند اجرایی مقایسه شده است. تمامی اندیس‌های قابل اندازه‌گیری از شرایط واقعی، نظیر: زمان چرخه‌ی کلی و ضایعات بتن‌ریزی، نسبت به خروجی‌های مستخرج از مدل شبیه‌سازی، اختلافی کمتر از ۴٪ داشتند، که این میزان امکان اطمینان به خروجی‌ها جهت پیش‌بینی شرایط واقعی را ممکن ساخته است.

۵. اعمال ایده‌های مبتنی بر تولید ناب

مطابق تحلیل‌های صورت گرفته از شرایط فعلی فرایند اجرایی، جهت کاهش ضایعاتی نظیر طول صف تراک میکسرها و زمان انتظار منابع، اقدام به تعریف و اعمال روش‌های موجود در تولید ناب شده است. انتخاب روش‌های تولید ناب استفاده شده در پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل ضایعات ایجاد شده در فرایند شرایط موجود، که اساساً ناشی از عدم توزیع صحیح منابع بوده است، صورت پذیرفته است. مفاهیم تولید ناب استفاده شده جهت بهبود فرایند اجرایی در پژوهش حاضر، عبارت است از: ۱) اعمال برنامه‌ریزی کششی، ۲) استانداردسازی فرایند ساخت، ۳) پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت در فرایند ساخت.

۱.۵. برنامه‌ریزی کششی

اعمال جریان کششی در فرایند اجرایی، یکی از اساسی‌ترین مفاهیم موجود در تولید ناب است. بهبود محصول نهایی پروژه، از نظر: زمان، هزینه و کیفیت، با استفاده از کاهش ضایعات ناشی از طول صف منابع، از اهداف اصلی اعمال جریان کششی در فرایند ساخت است.[۷] در پیاده‌سازی فرایند براساس جریان کششی، مقدار تولید محصولات بالادستی باید بر اساس نیاز جریان پایین‌دستی صورت پذیرد. به این مفهوم که جهت پیاده‌سازی جریان کششی در دو فعالیتی که رابطه‌ی مستقیم در برنامه‌ی اجرایی دارند، میزان تولید در فعالیت اول باید به اندازه‌یی صورت پذیرد که محصولات تولید شده درگام اول مازاد بر نیاز فعالیت دوم نیست و از ضایعات ناشی از انبار شدن محصولات و تشکیل طول صف پرهیز شود. به این ترتیب می‌توان از تولید به‌موقع محصولات (JIT) [۲۶] اطمینان حاصل کرد.[۱۱] برخلاف تولیدات صنعتی که خط تولید محصولات، چارچوب مشخص و از پیش تعیین شده‌یی دارد، فرایندهای اجرایی موجود در صنعت ساخت مملو از مؤلفه‌ها و وجود عدم قطعیت‌هایی است که عملاً در بسیاری از مواقع مانع از پیاده‌سازی جریان کششی می‌شود. یکی از راه‌حل‌های پیاده‌سازی جریان کششی در پروژه‌های ساخت، تبدیل فرایند اجرایی به شکل یک فرایند تولید خطی[۲۷] است. در پژوهش حاضر، در صورت در نظرگرفتن بتن موجود در تراک میکسر به‌عنوان یک محصول و انجام بتن‌ریزی فونداسیون به‌عنوان یک فرایند تولید خطی، حرکت تراک میکسر در انجام پروژه‌ی بتن‌ریزی می‌تواند به‌عنوان خط تولید محصول لحاظ شود.

هدف اصلی از مفهوم جریان کششی، تولید براساس نیاز مشتری است. در این صورت جهت پیاده‌سازی جریان کششی در پژوهش حاضر، هر یک ازگام‌های اجرایی (جریان پایین‌دستی) باید به‌عنوان یک مشتری برای گام قبل (جریان بالادستی) لحاظ شود. به این ترتیب، نیاز جریان پایین‌دستی در هر یک ازگام‌های فرایند، تعیین‌کننده‌ی حرکت تراک میکسرها به گام بعدی هستند. پروسه‌ی اخیر، مفهوم پیاده‌سازی جریان کششی در فرایند اجرایی است. مطابق توضیحات مذکور، بتن به‌عنوان محصول نهایی باید درگام‌های فرایند اجرایی طی سیستم کششی حرکت کند. مدل‌سازی سیستم کششی در محیط شبیه‌سازی پیشامد گسسته، توسط اتصال کلیه‌ی گام‌ها به‌یکدیگر صورت پذیرفته است.

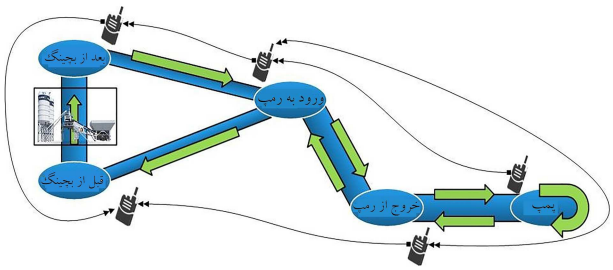
۲.۵. استانداردسازی پروسه‌ی اجرایی

استانداردسازی، به‌عنوان یکی از مفاهیم تولید ناب جهت حذف ضایعات در فرایند اجرایی استفاده می‌شود. استانداردسازی از مفاهیم اساسی تولید ناب است، که موجب بهبود مستمر در گردش کارهای تعریف شده در فرایند اجرایی می‌شود.[۱] پروژه‌های فعلی صنعت ساخت، که معمولاً از روش‌های برنامه‌ریزی و مدیریت سنتی بهره می‌برند، اغلب از نبود استانداردسازی در اجرای فرایندهای اجرایی و متعاقباً کمبود ارتباطات مؤثر در بین عوامل درگیر در پروژه رنج می‌برند. در سیستم‌های مدیریتی سنتی، مدیر پروژه اغلب قوانین کلی و روش‌های اجرای قوانین را بدون درگیری زیاد کارمندان تعریف می‌کند و به‌دلیل نبود دستورالعمل ویژه‌ی دقیق در فرایند اجرایی، مدیر پروژه تصمیم نهایی را در مورد فرایند اجرایی به‌صورت مستمر و لحظه‌یی (به‌عنوان مثال ساعتی) اتخاذ می‌کند. به‌صورت اجمالی مضرات سیستم مدیریتی سنتی در پایش فرایندهای اجرایی عبارت است از: ۱. عدم وجود تسلط بر تمامی ابعاد و زوایای فرایند اجرایی به جهت عدم اطلاع از جزئیاتی که بعضاً عوامل مستقیم درگیر آن هستند و ۲. عدم وجود نگاه جامع بر چگونگی تأثیر تصمیمات در تقسیم منابع و ایجاد ضایعات احتمالی در طی فرایند ساخت.

استانداردسازی فرایند اجرایی در پژوهش حاضر در دو بخش انجام شده است:

الف) استانداردسازی از طریق ایجاد یک سیستم هماهنگی مابین نفرات دفتر مدیریت پروژه (شامل مدیر پروژه، مدیر اجرایی، هماهنگ‌کننده‌ی پروژه و مهندسان فنی ـ اجرایی). در سیستم مذکور، مدیر پروژه به عنوان راهبر کل فرایند، به جای کنترل و پایش تک‌تک فعالیت‌ها، اقدام به کنترل سیستم هماهنگی داخلی[۲۸] می‌کند.

سیستم هماهنگی داخلی هر یک از اجزاء اصلی جهت پیاده‌سازی فرایند اجرایی،



شکل ۲. پیش‌بینی ریگر جهت استانداردسازی ارتباطات مابین عوامل در فرایند اجرایی.

مانند: تصمیم‌گیری در مورد تعداد تراک میکسر در هر مرحله، روش ارتباطی بین ریگرها[۲۹]، مهندسان و عوامل سایت، هماهنگی عملیاتی کل فرایند اجرایی است. ارتباطات مابین عوامل پروژه در سیستم هماهنگی داخلی در شکل ۲ مشاهده می‌شود؛

ب) استانداردسازی از طریق تهیه‌ی دستورالعمل در هر یک از بخش‌های اجرایی (مثلاً دستورالعمل‌هایی برای ریگرها، عوامل سایت و رانندگان و مسئولان ماشین‌آلات)، که در بخش کنونی به آن‌ها اشاره شده است:

- **ناحیه‌ی بچینگ پلانت:** تعداد مشخصی از تراک میکسرها با مقدار تعریف شده در سیستم هماهنگی داخلی باید در صف پُر شدن بتن قبل از بچینگ پلانت بمانند. یک ریگر برای هماهنگی عزیمت تراک میکسرها از صف قبل از پُر شدن به محل بچینگ و یک ریگر جهت ارتباط مستمر با ریگر مستقر در ناحیه‌ی رمپ حضور داشته باشد. تراک میکسرها پس از پُر شدن در بچینگ پلانت، باید در یک صف با تعداد مشخص شده در سیستم هماهنگی داخلی، جهت کسب مجوز حرکت به سمت پروژه توقف کنند. مجوز هر یک از تراک میکسرهای حاضر در صف بعد از بچینگ، توسط ریگر حاضر در ناحیه‌ی ورودی رمپ صادر می‌شود؛
- **ناحیه‌ی رمپ:** تراک میکسرهای پُر شده، که از بچینگ پلانت به سمت رمپ حرکت کرده‌اند، باید در محل ورودی رمپ در یک صف با مقدار مشخص شده مطابق سیستم هماهنگی داخلی توقف کنند. دو ریگر در ورودی و خروجی رمپ باید حضور داشته باشند. وظایف اصلی ریگر مستقر در ورودی رمپ عبارت است از: ۱. مجوز حرکت به تراک میکسرهای پُر شده برای ورود به رمپ بر اساس ظرفیت خالی پمپ‌ها و طول صف میکسرهای خالی در خروجی رمپ مطابق با سیستم هماهنگی داخلی و ۲. هماهنگی با ریگر مستقر در ناحیه‌ی بچینگ پلانت جهت ارائه‌ی مجوز حرکت تراک میکسرهای پُر شده‌ی متوقف در صف انتظار حرکت به سمت پروژه.

وظایف ریگر مستقر در خروجی رمپ عبارت است از: ۱. ارسال اطلاعات در مورد طول صف تراک میکسرهای خالی شده در خروجی رمپ به ریگر مستقر در ورودی رمپ و ۲. صدور مجوز حرکت تراک میکسرهای خالی شده جهت ورود به رمپ و حرکت به سمت بچینگ پلانت؛

- **محل بتن‌ریزی:** تراک میکسرهای پُر شده پس از کسب مجوز ورود به رمپ از سطح رمپ پایین می‌روند و به سمت منطقه‌ی بتن‌ریزی حرکت می‌کنند و در صف انتظار بتن‌ریزی با تعداد مشخص شده در سیستم هماهنگی داخلی متوقف می‌شوند. یک ریگر باید در منطقه‌ی ریختن بتن‌ریزی جهت نیل به سه هدف مستقر شود: ۱. جهت هدایت و توزیع صحیح تراک میکسرها به پمپ‌های خالی و ۲. جهت ارسال اطلاعات در مورد طول صف تراک میکسرهای قبل از پمپ‌ها به ریگر مستقر در ورودی رمپ.

کلیه‌ی گام‌های مذکور در جریان استانداردسازی پروسه‌ی اجرایی حرکت تراک میکسرها، جهت ایجاد ساختار از پیش تعیین شده در طی فرایند بتن‌ریزی و نیز مهم‌تر از آن، اطمینان از عدم ایجاد ضایعات ناخواسته ناشی از عدم توزیع نامناسب منابع در طی فرایند اجرایی بوده است. ساختار کلی سیستم هماهنگی داخلی به‌عنوان یک سیستم هماهنگی بالادستی در محیط شبیه‌سازی، مدل‌سازی شده است.

۳.۵. پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت در فرایند ساخت

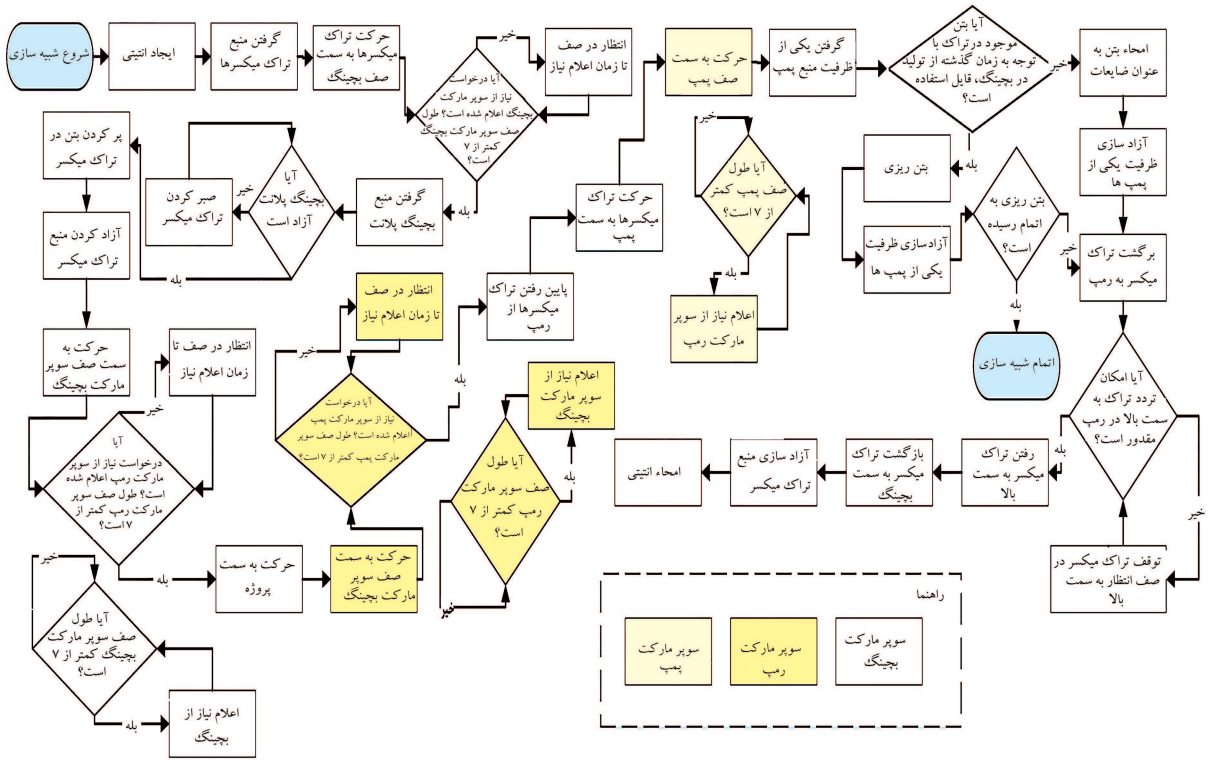
سوپرمارکت به‌عنوان یکی دیگر از ابزارهای کاربردی در مفاهیم تولید ناب جهت بهبود شرایط ضایعات، استفاده می‌شود. سوپرمارکت ابزاری مفید جهت پیاده‌سازی مفهوم «کشش» در فرایند اجرایی، با بی‌استفاده نگه‌داشتن تعدادی منبع یا توقف عمدی تعدادی از آیتم‌های اجرایی، جهت دست‌یابی به یک جریان مستمر و ثابت در طول کل فرایند اجرایی است.[۳]

استانداردسازی فرایند ساخت، که در بخش پیش بحث شده است، موجب نزدیک کردن فرایند ساخت به یک فرایند نزدیک به فرایندهای خطی ـ صنعتی و متعاقباً ایجاد شرایط پیاده‌سازی مفهوم سوپرمارکت در فرایند اجرایی می‌شود. جهت پیاده‌سازی موفق سوپرمارکت در فرایند اجرایی، انتخاب صحیح شناوری در هر گام، که در مطالعه‌ی موردی حاضر براساس تعداد منابع در حال استفاده و محدودیت‌های فضای تراک میکسرها انتخاب شده است، اهمیت دارد. همچنین هر سوپرمارکت در هر گام اجرایی از دو جهت باید به سوپرمارکت دیگر متصل شود: ۱. از ورودی سوپرمارکت فعالیت، متناسب با شرایط خود فعالیت در هر لحظه، در خواست کار به پیش‌نیازهای فعالیت در هر زمان ارسال می‌شود. ۲. خروجی سوپرمارکت بر اساس نیاز پس‌نیاز فعالیت، اقدام به انجام کار یا آزادسازی منبع متناظر با فعالیت می‌کند، در پژوهش حاضر ۳ دسته سوپرمارکت استفاده شده است:

۱. **سوپرمارکت بچینگ:** که کنترل‌کننده‌ی تعداد موردنیاز تراک میکسرها جهت پُر شدن بتن در بچینگ پلانت است. سوپرمارکت بچینگ تضمین‌کننده‌ی حرکت تعداد مناسبی از تراک میکسرها، بر اساس میزان تعداد موردنیاز در سوپرمارکت بعدی (سوپرمارکت ورودی رمپ) است؛

۲. **سوپرمارکت استفاده شده در ورودی رمپ داخل پروژه:** که تراک میکسرها به تعداد مشخص در صف انتظار جهت پایین رفتن از رمپ و حرکت به سمت پمپ‌های بتن‌ریزی توقف می‌کنند و سپس بر اساس نیاز ظرفیت پمپ‌های بتن‌ریزی از صف رمپ جدا می‌شوند و به سمت پمپ‌ها حرکت می‌کنند. سوپرمارکت، بحرانی‌ترین بخش در فرایند اجرایی به‌دلیل گلوگاه بودن آن است. سوپرمارکت استفاده شده در ورودی رمپ داخل پروژه، تعیین‌کننده‌ی حرکت تراک میکسرها از بچینگ پلانت به سمت پروژه، بر اساس ظرفیت‌های خالی پمپ‌ها در هر زمان است؛

۳. **سوپرمارکت قبل از پمپ‌های بتن‌ریزی:** که در آن تراک میکسرها بر اساس میزان تعریف شده برای سوپرمارکت مذکور، در صف انتظار جهت بتن‌ریزی قرار می‌گیرند. سوپرمارکت قبل از پمپ بتن‌ریزی، جهت اطمینان از بی‌کار نبودن پمپ‌های بتن‌ریزی از مقدار مشخص و همچنین عدم افزایش طول صف تراک میکسرهای قبل از پمپ‌های بتن‌ریزی از میزان تعیین شده است. ورودی سوپرمارکت اخیر به سوپرمارکت ورودی رمپ متصل است و حرکت تراک



شکل ۳. چارچوب اعمال مفاهیم تولید ناب و شبیه‌سازی در شرایط آتی فرایند ساخت.

میکسرها را از ورودی رمپ به سمت پمپ‌های بتن‌ریزی تعیین می‌کند. همچنین خروجی سوپرمارکت قبل از پمپ‌های بتن‌ریزی به ورودی سوپرمارکت بچینگ پلانت، جهت اطمینان از مکفی‌بودن تعداد تراک میکسرهایی که در بچینگ حاوی بتن و بنا به نیاز فرایند، آماده‌ی حرکت به سمت رمپ (پروژه) هستند، متصل شده است. مدل‌سازی سوپرمارکت‌ها در نرم‌افزار سیمفونی (Simphony.NET) با استفاده از المان وَلو[۳۰] انجام و همچنین با استفاده از کدنویسی در محیط VB.net، اتصال سوپرمارکت‌ها و تعریف قوانین و جزئیات صورت پذیرفته است؛

جانمایی ریگرها در نقاط تبیین‌شده در شکل ۳، که به منزله‌ی وَلوهای پیش‌بینی شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی هستند، به نوعی ضمانت‌کننده‌ی پیاده‌سازی سوپرمارکت در واقعیت، در سناریوهای بهبود فرایند اجرایی مبتنی بر مفاهیم ناب است.

۶. شبیه‌سازی شرایط آتی فرایند اجرایی

سناریوهای مبتنی بر مفاهیم تولید ناب در محیط شبیه‌سازی پیشامد گسسته مطابق چارچوب ارائه شده در شکل ۳ مدل‌سازی شده‌اند. جهت صحت‌سنجی روابط و منطق کلی مدل‌سازی، از نظر خبرگی مدیر پروژه و مدیر اجرایی استفاده شده است. همانند مدل‌سازی شرایط فعلی، تراک میکسرها به‌عنوان انتیتی‌های مدل انتخاب شده‌اند. فرضیات اصلی در خصوص ورودی منابع و اندیس‌های عملکرد اصلی نیز در مدل شرایط آتی مطابق با مدل اولیه (شرایط فعلی) در نظر گرفته شده‌اند.

جهت استانداردسازی فرایند اجرایی مطابق توضیحات بخش مرتبط، اقدام به تعریف سیستم هماهنگ‌کننده‌ی داخلی در مدل شبیه‌سازی شده است. این سیستم به‌عنوان هماهنگ‌کننده‌ی حرکت کلیه‌ی انتیتی‌ها در مدل (معادل تراک میکسر در فرایند واقعی) عمل کرده است، که با توجه به قوانین وضع شده، کنترل‌کننده‌ی توقف و حرکت انتیتی‌ها بوده است. جهت اعمال برنامه‌ریزی کششی در مدل شبیه‌سازی، گام‌های مختلف اجرایی به یکدیگر متصل شده‌اند. به این معنا که با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط شبیه‌سازی، عبور هر یک از انتیتی‌ها به مرحله‌ی بعدی در فرایند، منوط به کسب مجوز از مرحله‌ی بعد بوده است. در گام اجرایی رمپ، شرایط ظرفیتی پمپ‌ها از نظر پُر و خالی بودن و همچنین تعداد تراک‌های متوقف در ورودی و خروجی رمپ، تعیین‌کننده‌ی حرکت تراک‌ها بوده است. در نظرگرفتن هم‌زمان شروط آیتم‌های ذکر شده در مدل، توسط سیستم هماهنگ‌کننده در مدل انجام شده است.

۷. بررسی اثر تعداد تراک میکسرها در زمان کل (آنالیز حساسیت)

با توجه به اهمیت تأثیر تعداد تراک میکسرها در میزان زمان کل فرایند اجرایی و متعاقباً سایر اندیس‌ها، نظیر هزینه و میزان آلاینده‌ها، یک تحلیل حساسیت برای بررسی تغییرات تعداد تراک بر زمان انجام کل فرایند اجرایی انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تراک میکسرها از ۲۵ عدد تا ۴۰ عدد، زمان کل چرخه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در حالی که مقدار زمان چرخه‌ی کل، ناشی از افزایش تعداد تراک میکسرها از ۴۰ عدد تا ۵۵ عدد، تغییر چندانی نداشته است.

۸. آنالیز داده‌ها و بحث

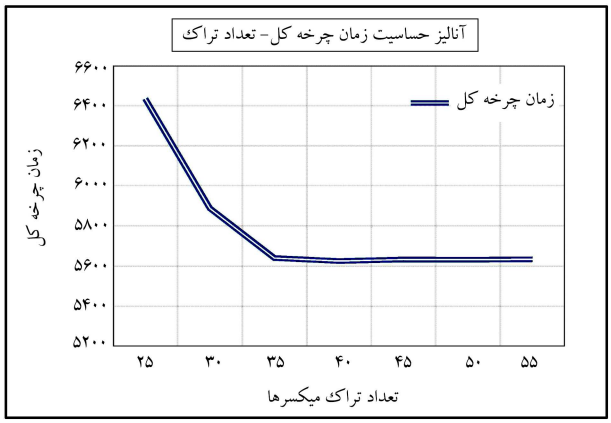
در بخش کنونی، داده‌های مستخرج از مدل شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت ارزیابی

جدول ۲. نتایج اندیس‌های کلیدی عملکرد مستخرج از مدل‌های شبیه‌سازی شرایط فعلی و پس از اعمال مفاهیم ناب.

اندیس کلیدی عملکرد	واحد	شرایط فعلی (اولیه)	شرایط آتی (پس از اعمال مفاهیم ناب)
زمان چرخه‌ی کلی (CD)	دقیقه	۹٫۵۰۴	۵٫۶۳۲
زمان انجام مفید فعالیت‌ها (CT)	دقیقه	۴۷٫۲	۵۱٫۴
زمان انتظار (WT)	دقیقه	۶۶٫۱	۳۰٫۳
ضایعات بتن (CW)	$M^۳$	۳٫۳۰۰	۰
صحت انجام عملیات (CO)	(٪)	٪۸۳٫۵	٪۱۰۰
هزینه‌ی عملیات (OC)	میلیون ریال	۵٫۲۲۰	۴٫۴۲۰
نرخ بهره‌وری	$M^۳/Min$	۲٫۱	۳٫۵
درصد تراک‌های بدون تأخیر (NTP)	(٪)	٪۷۳	٪۹۲

جدول ۳. میانگین آلایندگی منابع در شرایط اولیه و پس از اعمال مفاهیم ناب ($Kg - CO_۲$).

حالت	بچینگ پلانت	تراک میکسر	پمپ
شرایط اولیه (اجرای فرایند به روش سنتی)	۲۷٫۸۸۵	۲۳٫۷۹۰	۲۶٫۵۶۰
پس از اعمال مفاهیم ناب	۲۳٫۱۲۰	۱۹٫۲۰۰	۱۵٫۷۷۵



شکل ۴. آنالیز حساسیت زمان چرخه‌ی کل ناشی از تغییر تعداد تراک میکسر.

اعمال مفاهیم تولید ناب در فرایند اجرایی ارائه و تحلیل شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از شرایط فعلی و شرایط پس از اعمال مفاهیم ناب، که شامل اندیس‌های کلیدی عملکرد ارائه‌شده در جدول ۲ و همچنین تحلیل شرایط فرایند پس از اعمال مفاهیم ناب است، می‌توان این موارد را استخراج کرد:

ضایعات اصلی ایجاد شده در فرایند اجرایی، که ناشی از توزیع نامناسب و تمرکز ضایعات (نظیر طول صف تراک‌ها و زمان انتظار منابع دیگر) بوده است، پس از اعمال مفاهیم ناب، در مقایسه با شرایط اولیه اصلاح شده‌اند. در شرایط اولیه‌ی فرایند، ۸۶٪ از کل طول صف‌های ایجاد شده مرتبط با ورودی و خروجی رمپ اتفاق افتاده است، در حالی که در شرایط پس از اعمال مفاهیم ناب در فرایند، این مقدار به ۲۲٪ کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر در شرایط اولیه، تراک‌ها در بیشترگام‌های اجرایی به جز ورودی و خروجی رمپ، طول صف صفر داشتند. در حالی که پس از اعمال مفاهیم ناب، طول صف تراک‌ها به اعداد بیشتر از صفر افزایش یافته است. این مطلب بدین معناست تراک‌هایی که در شرایط اولیه‌ی فرایند، در ابتدا و انتهای رمپ، تراکم طول صف داشته‌اند، پس از اعمال مفاهیم ناب در کل فرایند اجرایی به‌صورت مناسب توزیع شده‌اند. نتیجتاً توزیع مناسب طول صف تراک‌ها در پروسه، موجب کاهش ۲۱٪ از مجموع کل طول صف تراک‌ها در فرایند اجرایی شده است.

همان‌طور که قبلاً در جدول ۱ در خصوص معنای اندیس عملکردی توضیح داده شده است، اندیس NTP نشان‌دهنده‌ی تعداد تراک میکسرهایی است که هر گام از فرایند اجرایی را بدون توقف در صف انتظارگام قبل طی کنند. حد پایین اندیس NTP، که نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان در تمامی گام‌هاست، از مقدار ۷۳٪ در شرایط اولیه، به عدد ۹۲٪ در شرایط پس از اعمال مفاهیم ناب افزایش یافته است. این مطلب نشان می‌دهد که کاهش ضایعات، ناشی ازکاهش تعداد کل تراک‌هایی است که در صف انتظار جهت حرکت به سمت گام بعدی در فرایند اجرایی هستند. زمان کل فرایند اجرایی بر اساس مدل شبیه‌سازی پس از اعمال ناب برابر ۵٫۶۳۲ دقیقه حاصل شده است؛ که این مقدار نشان‌دهنده‌ی کاهش ۴۰ درصدی زمان اجرای کل فرایند نسبت به شرایط اولیه‌ی پروژه است. کاهش زمان کل فرایند در درجه‌ی اول به دلیل کاهش ضایعات ناشی از قرارگیری تراک‌ها در صف انتظار جهت حرکت به گام بعد فرایند، علی‌الخصوص رمپ به‌عنوان گلوگاه و در درجه‌ی بعدی کاهش زمان بی‌کاری سایر منابع به دلیل توزیع نامناسب منابع در فرایند بوده است.

هزینه‌ی کل فرایند اجرایی برابر ۴٫۴۲ میلیارد ریال حاصل شده است، که نسبت به هزینه‌ی شرایط اولیه، کاهش ۱۵٪ داشته است. همچنین نرخ تولید[۳۱] کل فرایند، که مستقیماً از مدل شبیه‌سازی استخراج شده است، معادل ۳٫۵ مترمکعب بر ثانیه پس از اعمال مفاهیم ناب (۶۷٪ افزایش نسبت به شرایط اولیه) به دست آمده است. کاهش هزینه‌ی کل فرایند به‌دلیل کاهش زمان استفاده از منابع اجاره‌یی و کاهش ضایعات بتن بوده است. با توجه به این‌که هزینه‌ی مصالح که به‌عنوان هزینه‌ی ثابت در فرایند در نظر گرفته شده است، برابر با حدود ۷۰٪ از کل هزینه‌ی فرایند بوده است، کاهش هزینه نسبت به کاهش زمان فرایند کمتر بوده است.

در جدول ۳، آلایندگی منابع در شرایط اولیه و شرایط پس از اعمال مفاهیم ناب در فرایند اجرایی مقایسه شده است.

مجموع میزان آلایندگی منابع در شرایط پس از اعمال مفاهیم ناب برابر با ۶۸٫۴ ($Ton - CO_۲$) به دست آمده است، که به میزان ۲۴٪ کاهش میزان آلایندگی منابع

در مقایسه با شرایط فعلی مشاهده می‌شود. بیشترین میزان کاهش آلایندگی منابع مرتبط به پمپ (به میزان حدود ۴۰٪ نسبت به شرایط فعلی) بوده است. همچنین کاهش میزان آلایندگی در تراک میکسرها و بچینگ به ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۴ درصد بوده است.

۹. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، چارچوبی جهت اعمال مفاهیم تولید ناب، بر اساس مدل‌سازی در محیط شبیه‌سازی پیشامد گسسته در پروژه‌های عمرانی ارائه شده است. مدل توسعه‌یافته‌یی که در پژوهش حاضر در پروژه‌ی بتن‌ریزی استفاده شده است، به‌عنوان ابزاری مفید جهت شناسایی ضایعات، گلوگاه‌های فرایند، و ارائه‌ی راهکارهایی جهت بهبود فرایند ساخت معرفی شده است. همچنین فرایند بتن‌ریزی به‌عنوان یک فرایند تولید خطی و قابل اجرا با گام‌های مجزا در نظر گرفته شده است. مدل شبیه‌سازی پیشامد گسسته‌ی استفاده شده، قابلیت اندازه‌گیری اندیس‌های کلیدی عملکردی (نظیر اندیس‌های مرتبط با زمان، هزینه و آلایندگی منابع) را جهت ارزیابی سناریوهای مبتنی بر مفهوم ناب دارد. درگام اول، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی شبیه‌سازی شده‌ی شرایط فعلی پروژه با استفاده از داده‌های پروژه‌ی مشابه، جهت ارزیابی و متعاقباً شناسایی ضایعات در فرایند ساخت بررسی شده است. سه مفهوم تولید ناب، شامل: اعمال برنامه‌ریزی کششی، استانداردسازی فرایند ساخت و اعمال مفهوم سوپرمارکت در فرایند اجرایی شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج مستخرج از مدل شبیه‌سازی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند: دسته‌ی اول، نتایج حاصل از بررسی اندیس کلیدی عملکرد (KPI)هایی که مستقیماً در مدل شبیه‌سازی شرایط فعلی و پس از اعمال مفاهیم ناب اعمال شده‌اند و دسته‌ی دوم، نتایجی که مربوط به توزیع منابع در فرایند ساخت بوده و پس از بسط مدل‌های شبیه‌سازی مشخص شده است.

در پژوهش حاضر، توزیع نادرست تراک میکسرها بین گام‌های فرایند اجرایی، که ناشی از سیستم مدیریت سنتی مبتنی بر برنامه‌ریزی فشاری بوده است، موجب پیدایش انواع ضایعات در فرایند ساخت شده است.

نتایج نشان می‌دهد که چارچوب ارائه‌شده می‌تواند با موفقیت جهت شناسایی و تحلیل ضایعات مختلف نظیر: زمان انتظار، طول صف ایجادشده در منابع، ضایعات مصالح و هزینه‌یی در فرایند اجرایی استفاده شود. این چارچوب امکان پیش‌بینی ضایعات پیش از شروع فرایند اجرایی و بهبود فرایند بر اساس سناریوهای مبتنی بر مفاهیم تولید ناب را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که پیاده‌سازی مفاهیم تولید ناب در فرایند ساخت پروژه‌های با ماهیت خطی امکان‌پذیر است. به‌طور خلاصه، مفاهیم تولید ناب، که پروژه‌های صنعت ساخت به‌ندرت از آن بهره می‌گیرند، به‌عنوان ابزاری مطمئن جهت بهبود ضایعات پروسه‌ی ساخت می‌تواند استفاده شود. به این ترتیب با بهره‌گیری از مفاهیم تولید ناب استفاده شده در پژوهش حاضر و مفاهیم دیگر تولید ناب، مدیران پروژه می‌توانند از سناریوهای با هزینه، زمان و ضایعات کمتر بهره‌مند شوند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت‌های مرکز تحقیق و توسعه‌ی تکنولوژی‌های نوین ساخت (تکنوسا) دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه تهران که با ارائه‌ی اطلاعات، ما را در انجام پژوهش حاضر یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

پانوشت‌ها

1. pull scheduling
2. standardization
3. implementation supermarket concept
4. Koskela
5. valtolina
6. Last Planner System
7. Innella
8. Just In Time
9. supermarket
10. key performance index
11. lead time
12. cycle time
13. Cyclone
14. Halpin
15. Shewchuk and Chang
16. simphony
17. AbouRizk & Hajjar
18. Abourizk and Hajjar
19. Seo
20. Zhang
21. rosenbaum
22. Yu
23. emission
24. entity
25. waiting time
26. just in time
27. linear production
28. internal coordination system
29. riggers
30. valve
31. production rate

منابع (References)

1. Yu, H., Al-Hussein, M., Al-Jibouri, S. and et al. “Lean transformation in a modular building company: a case for implementation”, *Journal of Management in Engineering*, **29**(1), pp. 103-111 (2013).
2. Castillo, G., Alarcón, L.F. and González, V.A. “Implementing lean production in copper mining development projects: case study”, *Journal of Construction Engineering and Management*, **141**(1), 05014013 (2015).
3. Yu, H., Tweed, T., Al-Hussein, M. and et al. “Development of lean model for house construction using value

stream mapping", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(8), pp. 782-790 (2009).

4. Al-Bataineh, M., AbouRizk, S. and Parkis, H. "Using simulation to plan tunnel construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **139**(5), pp. 564-571 (2013).
5. Tommelein, I.D. "Pull-driven scheduling for pipe-spool installation: simulation of lean construction technique", *Journal of Construction Engineering and Management*, **124**(4), pp. 279-288 (1998).
6. Vieira, A. and Cachadinha, N. "Lean construction and sustainability-complementary paradigms-a case study", IGLC-19, pp. 611-621 (2011).
7. Tezel, A., Koskela, L. and Aziz, Z. "Current condition and future directions for lean construction in highways projects: a small and medium-sized enterprises (SMEs) perspective", *International Journal of Project Management*, **36**(2), pp. 267-286 (2018).
8. Koskela, L., *Application of the New Production Philosophy To Construction*, Technical Report, Stanford, Stanford University, TR072 (1992).
9. Valtolina, G. "The machine that changed the world", The Triumph of Lean Production, La macchina che ha cambiato il mondo, pp. 337-339 (1994).
10. Barlow, J., Childerhouse, P., Gann, D. and et al. "Choice and delivery in housebuilding: lessons from japan for UK housebuilders, *Building Research & Information*, **31**(2), pp. 134-145 (2003).
11. Sadeghi, R., Taghaddos, H. and Eskandar, H. "Lesson learned from semi-automated last planner system (LPS) implementation", *International Congress of Civil Engineering* (2018).
12. Faghfouri, A. "Evaluating lean thinking in construction project", Civil Engineering, Architecture and Urban Development, (In Persian) (2017).
13. Innella, F., Arashpour, M. and Bai, Y. "Lean methodologies and techniques for modular construction: chronological and critical Review", *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**(12), 04019076 (2019).
14. Bamana, F., Lehoux, N. and Cloutier, C. "Simulation of a construction project: assessing impact of just-in-time and lean principles", *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**(5), 05019005 (2019).
15. BuHamdan, S., Alwisy, A., Bouferguene, A. and et al. "Novel approach to overcoming discontinuity in knowledge: application in value-adding frameworks in construction industry", *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**(8), 04019045 (2019).
16. Halpin, D.W. "Cyclone-method for modeling job site processes", *Journal of the Construction Division*, **103**(3), pp. 489-499 (1977).
17. Chang, D.Y. and Carr, R.I. "RESQUE: a resource oriented simulation system for multiple resource constrained processes", *In Proceedings of the PMI Seminar/Symposium*, pp. 4-19 (1987).
18. Lu, M. "Simplified discrete-event simulation approach for construction simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, **129**(5), pp. 537-546 (2003).
19. Shi, J.J. "Activity-based construction (ABC) modeling and simulation method", *Journal of Construction Engineering and Management*, **125**(5), pp. 354-360 (1999).
20. Shewchuk, J.P. and Chang, T.-Ch. "An approach to object-oriented discrete-event simulation of manufacturing systems", Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 302-311 (1991).
21. AbouRizk, S.M. and Hajjar, D. "A framework for applying simulation in the construction industry", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **25**(3), pp. 604-617 (1998).
22. AbouRizk, S.M. and Mohamed, Y. "Simphony-an integrated environment for construction simulation", *Winter Simulation Conference Proceedings* (2000).
23. AbouRizk, S., Halpin, D., Mohamed, Y. and et al. "Research in modeling and simulation for improving construction engineering operations", *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**(10), pp. 843-852 (2011).
24. Hwang, S., Park, M., Lee, H.-S. and et al. "Hybrid simulation framework for immediate facility restoration planning after a catastrophic disaster", *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**(8), 04016026 (2016).
25. Mohamed, Y., Borrego, D., Francisco, L. and et al. "Simulation of module assembly yards: case study", *Engineering, Construction and Architectural Management*, **14**(3), pp. 293-311 (2007).
26. Seo, J., Lee, S.-H. and Seo, J. "Simulation-based assessment of workers' muscle fatigue and its impact on construction operations", *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**(11), 04016063 (2016).
27. Zhang, H. "Discrete-event simulation for estimating emissions from construction processes", *Journal of Management in Engineering*, **31**(2), 04014034 (2015).
28. Taghaddos, H., AbouRizk, S., Mohamed, Y. and et al. "Integrated simulation-based scheduling for module assembly yard", In Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future, pp.1270-1279 (2009).
29. Sherafat, B., Ahn, Ch.R., Akhavian, R. and et al. "Automated methods for activity recognition of construction workers and equipment: state-of-the-art review", *Journal of Construction Engineering and Management*, **146**(6), 03120002 (2020)

30. Schmidtke, D., Heiser, U. and Hinrichsen, O. "A simulation-enhanced value stream mapping approach for optimisation of complex production environments", *International Journal of Production Research*, **52**(20), pp. 6146-6160 (2014).

31. BuHamdan, S., Alwisy, A., Bouferguene, A. and et al. "Novel approach to overcoming discontinuity in knowledge: application in value-adding frameworks in construction industry", *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**(8), 04019045 (2019).

32. Louis, J., Dunston, Ph. and Martinez, J. "Automating construction operations using discrete event simulation models", In Construction Research Congress 2014, Construction in a Global Network, pp. 1043-1052 (2014).

33. Rosenbaum, S., Toledo, M. and González, V. "Improving environmental and production performance in construction projects using value-stream mapping: case study", *Journal of Construction Engineering and Management*, **140**(2), 04013045 (2014).