مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲-۳۷، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۳-۹ (پژوهشی)

Original Article

ارتقای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت خط لوله گاز

مریم معظمی (کارشناس ارشد)
موسسه آموزش عالی پارس
حسین تقدس* (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران
مهران محمودی (کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاداسلامی واحد تهران جنوب
آریوبرزن عباسی (کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

پروژه‌های ساخت در حوزه‌ی نفت و گاز نیاز به بودجه‌ی سنگین و مدت زمان طولانی برای اجرا دارند. یکی از چالش‌هایی که پروژه‌های نفت و گاز با آن روبروست بحث تأخیرها و عدم بهره‌وری مناسب منابع است. اتمام پروژه‌ها با هزینه‌ی مشخص و در زمان معلوم نیازمند برنامه‌ریزی مناسب است تا بتوان پروژه را به‌موقع به بهره‌برداری رساند. تحقیق پیش رو سعی دارد با استفاده از ابزارهای نوین رایانه‌یی از جمله شبیه‌سازی ساخت چارچوبی را برای بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت خط لوله گاز معرفی کند. بررسی اثر تعداد منابع بر روند پروژه، تخمین مدت زمان واقع‌بینانه‌ی پروژه، افزایش بهره‌وری منابع، بررسی دقیق عملیات ساخت و در نهایت کاهش زمان و هزینه‌ی پروژه از اهداف این چارچوب است. چارچوب مدنظر با همکاری شرکت مهندسی و توسعه‌ی گاز ایران در قالب مطالعه‌ی موردی خط لوله‌ی انتقال گاز دهگلان به میاندوآب ارائه می‌شود.

moazamy.m@gmail.com
htaghaddos@ut.ac.ir
mehran.mahmoodi@gmail.com
abbasi.ario@gmail.com

واژگان کلیدی: خط لوله‌ی گاز، برنامه‌ریزی، شبیه‌سازی، زمان و هزینه.

۱. مقدمه

همراه با پیشرفت صنایع مختلف، صنعت گاز نیز پیشرفت کرده است و شبکه‌ی خطوط انتقال گاز طبیعی بزرگ و پیچیده شده‌اند. پروژه‌های ساخت خط لوله با توجه به اهمیت اقتصادی و سیاسی اغلب از نظر زمانی تحت فشار برنامه‌ریزی می‌شوند. به همین دلیل اهمیت بهینه‌کردن عملیات و برنامه‌ریزی این پروژه‌ها افزایش یافته است.[۱] پروژه‌های اجرایی خطوط لوله نفت و گاز، شامل فعالیت‌های پیوسته و خطی‌اند. خاک‌برداری، حفر کانال و جوشکاری مثال‌هایی از این فعالیت‌ها هستند. اگرچه نمودارهای ستونی و روش مسیر بحرانی در حال حاضر روش متداول در این نوع پروژه‌ها هستند، اما این‌ها فاقد جزئیات لازم برای برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی‌اند. در پروژه‌های خطی، عموماً هریک از فعالیت‌ها از ابتدا تا انتهای پروژه تکرار می‌شوند.[۲]

به‌رغم تعداد زیادی از روش‌های برنامه‌ریزی توسعه‌یافته برای برنامه‌ریزی پروژه‌های معمول (غیرتکرارشونده) که ویژگی‌ها و قابلیت‌های مختلفی را در نظر می‌گیرند، هیچ‌کدام از آنها برای برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی و تکرارپذیر به دلیل عدم توجه به تداوم استفاده از منابع مناسب نیستند. ماهیت پروژه‌های تکرارشونده بستگی به روش‌های برنامه‌ریزی جابه‌جایی منابع دارد که اجازه می‌دهد تداوم استفاده از منابع حفظ شود و از این‌رو از ماهیت تکراری این پروژه‌ها بهره می‌برد.[۳]

پژوهش پیش رو سعی دارد چارچوب جدیدی را برای ارتقای برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی تکرارشونده معرفی کند که ضمن به‌کارگیری روش مناسب برنامه‌ریزی، فرایند برنامه‌ریزی را یکپارچه کند. این یکپارچه‌سازی شامل برآورد پروژه، تخمین واقع‌بینانه‌ی مدت زمان و هزینه‌ی پروژه و هم‌چنین ارائه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی و تعداد منابع لازم، در یک سامانه‌ی واحد خواهد بود. چنین سامانه‌یی کارفرمایان و پیمانکاران پروژه را قادر خواهد ساخت، انعطاف‌پذیری بیشتری در بحث برنامه‌ریزی داشته باشد و توان نظارتی خود را افزایش دهد.

با توجه به کاربرد رایانه در بحث یکپارچه‌سازی و محاسبات خودکار، از ابزارهای شبیه‌سازی گسسته پیشامد، کدنویسی رایانه‌یی، هم‌چنین پایگاه داده برای پیاده‌سازی چارچوب این پژوهش استفاده شده است. چارچوب این پژوهش در پروژه‌ی خط لوله‌ی نهم سراسری گاز حدفاصل دهگلان ـ میاندوآب به قطر ۵۶ اینچ درحال پیاده‌سازی است.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۷.
DOI:10.24200/J30.2021.54796.2680

۲. پیشینه‌ی پژوهش

۱.۲. پروژه‌های خطی

مدیریت پروژه‌های خط لوله نقش مهمی در صنعت پتروشیمی ایفا می‌کند. خطوط لوله قابل اعتمادترین و مناسب‌ترین روش از نظر هزینه برای انتقال مقادیر زیادی از سوخت فسیلی در مسافت‌های طولانی است. بر خلاف دیگر روش‌های انتقال، خطوط لوله می‌تواند به‌طور مداوم و بدون وقفه با وجود شرایط آب و هوایی نامناسب هم به‌کار گرفته شود. علاوه بر این، خطوط لوله نقش مهمی در موضوعات زیست محیطی و ایمنی دارد.[۴] صنعت ساخت‌وساز به دلیل وجود عدم قطعیت در ماهیت آن، یکی از بخش‌های با ریسک بالا شناخته می‌شود. هر سال تعداد زیادی از پیمانکاران با ورشکستگی و شکست در کسب‌وکار مواجه هستند.[۵]

طبق مطالعات انجام شده در خصوص دلایل مهم تأخیرها در اجرای پروژه‌های خط لوله گاز، بارها به برنامه‌ریزی ضعیف، تخمین غیرواقعی از مدت زمان پروژه، مشکلات برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اجرای کار و عدم تصمیم‌گیری به موقع توسط ذی‌نفعان اشاره شده است.[۶] تخصیص منابع مناسب به فعالیت‌های مناسب کلید برنامه‌ریزی موفق پروژه است..[۷] پروژه‌های تکرارپذیر مانند ساختمان‌های چندطبقه، بزرگراه‌ها، تونل‌ها و خطوط لوله، بخش بزرگی از صنعت ساخت‌وساز را تشکیل می‌دهند. در نتیجه، برنامه‌ریزی کارآمد این پروژه‌ها بسیار مهم است.[۳] کاهش تأخیرها در ساخت پروژه‌های خطوط لوله مزایای زیادی برای کارفرمایان، پیمانکاران و عموم مردم دارد. تأخیرها در تکمیل پروژه‌های ساخت خط لوله فقط منجر به هزینه‌های بالاتر برای کارفرمایان و پیمانکاران نمی‌شود بلکه هزینه‌یی را نیز به کاربران نهایی تحمیل می‌کند. اگرچه برخی از متغیرهای تأثیرگذار بر تأخیرهای پروژه به سختی قابل کنترل هستند، برنامه‌ریزی خوب پروژه‌های ساخت خط لوله می‌تواند زمان و هزینه‌ی ساخت را کاهش دهد.[۲]

در حال حاضر، پروژه‌های خطی معمول، شامل راه‌آهن، راهسازی، تونل و خط لوله، به‌طور اساسی از روش مسیر بحرانی به منظور برنامه‌ریزی فرایندها استفاده می‌کنند. مطالعات انجام شده محدودیت‌هایی از جمله درنظر نگرفتن بهره‌وری منابع، حفظ تداوم استفاده از منابع و ... را در برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی با استفاده از روش مسیر بحرانی نشان داده‌اند. با وجود محدودیت‌های این روش، روش برنامه‌ریزی جدیدی به نام روش برنامه‌ریزی خطی به تدریج مورد توجه قرار گرفته است که منجر به تخصیص بهتر منابع در پروژه‌های خطی می‌شود. به‌علاوه، این روش ساده، واضح و قابل درک است. برنامه‌ریزی خطی روشی است که فعالیت‌های خطی را بهتر نشان می‌دهد و دارای پتانسیل لازم برای بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی است.[۸]

به رغم تعداد زیادی از روش‌های برنامه‌ریزی توسعه‌یافته برای برنامه‌ریزی پروژه‌های معمول (غیرتکرارشونده) که ویژگی‌ها و قابلیت‌های مختلفی را در نظر می‌گیرند، هیچ‌کدام از آنها برای برنامه‌ریزی پروژه‌های تکرارپذیر به دلیل عدم توجه به تداوم استفاده از منابع مناسب نیستند. ماهیت پروژه‌های تکرارشونده بستگی به روش‌های برنامه‌ریزی جابه‌جایی منابع دارد که اجازه می‌دهد تداوم استفاده از منابع حفظ شود و از این‌رو از ماهیت تکراری این پروژه‌ها بهره می‌برد.[۹]

با توجه به بزرگ‌تر شدن و پیچیده‌تر شدن پروژه‌های ساخت و استفاده از روش‌های سنتی برای مدیریت آنها، شبیه‌سازی رایانه‌یی می‌تواند به طور مؤثری برای طراحی و تحلیل فرایندهای ساخت بدون توجه به اندازه و پیچیدگی پروژه‌ها استفاده شود.[۱۰]

روش‌های برنامه‌ریزی سنتی مانند برنامه‌ریزی مسیر بحرانی یا PERT [۱] ، برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت خطی مناسب نیستند. با توجه به محدودیت‌های روش‌های برنامه‌ریزی سنتی، روش برنامه‌ریزی خطی به‌طور خاص برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت خطی پیشنهاد شده است که بهره‌وری از پارامترهای مهم در برنامه‌ریزی خطی است.[۸]

در دهه‌های اخیر، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت‌وساز مورد توجه جامعه‌ی تحقیقاتی قرارگرفته است. با این حال رایج‌ترین رویکرد برنامه‌ریزی استفاده شده روش مسیر بحرانی بوده که برای پروژه‌های خطی حمل‌ونقل قابل استفاده نیست. روش برنامه‌ریزی خطی مزایای زیادی برای این پروژه‌ها دارد و یک روش برنامه‌ریزی نسبتاً جدید است که نیازمند بهبود بیشتری است؛ زیرا محدودیت‌هایی در ارتباط با بهینه‌سازی پروژه‌های خطی دارد. یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر LSM [۲] و برنامه‌نویسی محدود می‌تواند در بهینه‌سازی به عنوان راه‌حل مورد استفاده قرار گیرد.[۱۱]

به دلیل محدودیت روش مسیر بحرانی یا عدم توانایی در مدل کردن عملیات تکراری و تعامل بین منابع و سناریوی (اگر ـ آنگاه)[۳] ، شبیه‌سازی رخداد گسسته پیشامد[۴] به طور گسترده‌یی برای مدل‌سازی و مطالعه‌ی سیستم‌های دنیای واقعی مخصوصاً برای فرایندهایی که به‌طور ذاتی تکرارپذیر هستند، استفاده می‌شود. در طول مدت پروژه با استفاده از شبیه‌سازی بهبودیافته و با توجه به قابلیت مدل‌سازی می‌توان گزینه‌های متعدد را مقایسه و بهترین گزینه را با توجه به شرایط حال حاضر پروژه انتخاب کرد.[۱۲] در پروژه‌های ساخت‌وساز بزرگراه‌ها، خط لوله و تونل‌ها، نیروی انسانی و ماشین‌آلات به‌طور مداوم در یک ترتیب خطی حرکت می‌کنند. این نوع از پروژه‌های تکراری پیوسته با مشکل محدودیت منابع (نیروی انسانی و ماشین‌آلات) مواجه می‌شوند. مدل‌های معمول برنامه‌ریزی، پروژه‌های تکراری پیوسته را به چندین محدوده‌ی فضایی ـ با فرض اینکه نرخ بهره‌وری در هر یک از این قسمت‌ها ثابت است ـ تقسیم می‌کنند. با این حال، وقتی متغیر باشد، این فرض منجر به یک برنامه‌ریزی نامناسب می‌شود. این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی را به منظور یافتن مجموعه‌ی بهینه‌ی نرخ‌های بهره‌وری در دوره‌های زمانی مختلف برای هر یک از منابع انسانی، با درنظرگرفتن محدودیت دسترسی به منابع، ارائه می‌دهد. برای عملی بودن، مدل پیشنهادی تداوم کار را ضمن حفظ زمان شروع و پایان و فاصله‌ی ابتدایی و انتهایی بین عملیات‌ها مورد بررسی قرار می‌دهد. مسئله‌ی بهینه‌سازی توسط یک الگوریتم استراتژی تکاملی که آسان است و زمان اجرایی کمتری نیاز دارد، پاسخ داده می‌شود. از یک پروژه‌ی واقعی به منظور اعتبارسنجی عملکرد مدل پیشنهادی از منظر کارایی، بهره‌وری و ثبات استفاده شده است.[۱۳]

۲.۲. شبیه‌سازی در برنامه‌ریزی پروژه‌ها

شبیه‌سازی یکی از روش‌های قوی برای پشتیبانی از فرایند تصمیم‌گیری در مدیریت ساخت است. مدل دقیقی از فرایندهای ساخت می‌تواند به توسعه و بهبود گزینه‌های بهتر و بهینه‌سازی منابع پروژه کمک کند. گرچه، از روش‌های شبیه‌سازی در صنعت و مدیریت ساخت، کمتر استفاده می‌شود و از دلایل آن می‌توان پیچیدگی روش‌های شبیه‌سازی و فقدان دانش مناسب شبیه‌سازی در میان کارکنان صنایع را نام برد. با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی رایانه‌یی، می‌توان مدل‌هایی ساخت که منطق کلی بین فعالیت‌های مختلف لازم برای ساخت پروژه، منابع موجود در پروژه (کارکنان، تجهیزات و ...) و محیطی که پروژه قرار است در آن ساخته شود (مانند شرایط آب و

هوا، موقعیت زمین و ...) را نشان دهد. این مدل‌ها فرایند ساخت را نشان می‌دهند و می‌توانند به توسعه و بهبود نقشه‌های پروژه، بهینه‌سازی استفاده از منابع به منظور کاهش مدت زمان و هزینه‌ی پروژه و بهبود کلی مدیریت پروژه‌ی ساخت کمک کنند.[۱۰]

شبیه‌سازی ساخت، علم توسعه و تجربه کردن رایانه‌یی سیستم‌های ساخت برای درک رفتار آنهاست. این شاخه از تحقیقات عملیاتی در مدیریت ساخت طی دو دهه گذشته شاهد پیشرفت‌های قابل توجهی بوده است. در این مقاله، نویسندگان خلاصه‌یی از پیشرفت‌هایی را که در زمینه‌ی نظری شبیه‌سازی ساخت در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است، بیان می‌کنند. سپس عوامل اساسی که به توسعه‌ی موفق شبیه‌سازی در صنعت ساخت کمک می‌کنند و ویژگی‌های کلیدی مشکلات را که موجب پاسخ‌گویی بهتر مدل شبیه‌سازی نسبت به ابزارهای دیگر می‌شود، مطرح می‌کنند. این مقاله در ادامه یک مرور کلی از طرح‌های شبیه‌سازی بلندمدت که منجر به نسل بعدی سیستم‌های مدل‌سازی رایانه‌یی برای ساخت‌وساز می‌شود، ارائه می‌دهد که در آن شبیه‌سازی نقش یکپارچه‌یی در چشم‌انداز آینده‌ی برنامه‌ریزی و کنترل خودکار پروژه ایفا می‌کند.[۱۰]

گرامیان‌فر، پاکزاد و توکلی‌مقدم در مطالعات خود از ابزار شبیه‌سازی به‌منظور بهینه کردن برنامه‌ریزی پروژه‌ی خط لوله استفاده کرده‌اند. مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی برنامه‌ریزی و سپس بهینه کردن مجموعه‌یی از متغیرهای تصمیم بهینه یا نزدیک به بهینه در نظر گرفته شده است که این مدل هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و به مشکلات حاضر در پروژه بهترین پاسخ را می‌دهد.[۱۴] در مطالعات دیگری به ارائه‌ی روشی برای تخمین دقیق‌تر نرخ بهره‌وری برای فعالیت‌های ساخت صنعتی مانند جوشکاری و اجرای لوله می‌پردازد. در این مقاله ابتدا عوامل مؤثر بر نرخ بهره‌وری در حیطه‌ی ساخت صنعتی و محدودیت‌های آن مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه مدلی برای بهبود بازده پروژه ارائه شده است.[۱۵] این مقاله، سیمفونی[5] را به عنوان محیط یکپارچه و ابزاری برای شبیه‌سازی هدفمند به‌منظور مدل‌سازی سیستم‌های ساخت معرفی می‌کند.[۱۶] هاجر و ابوریزک در تحقیقات خود رویکردی را برای بهبود استفاده از شبیه‌سازی در صنعت ساخت بررسی کرده‌اند. این تحقیق به رویکرد جامعی برای مدل‌سازی یکپارچه اشاره می‌کند. مدل یکپارچه مشخص می‌کند که به چه شکل می‌توان از سیستم‌های دیگر با استفاده از مدیریت پایگاه داده اطلاعات لازم را به‌دست آورد. در این تحقیق از محیط سیمفونی برای شبیه‌سازی استفاده شده است.[۱۷]

در مقاله‌ی دیگری به شبیه‌سازی پروژه‌ی ساخت جاده‌ی آسفالت و انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود با استفاده از شبیه‌سازی پرداخته شده است. این مقاله به توسعه‌ی چارچوب جدیدی برای دسترسی بهتر ذی‌نفعان به مدل‌های شبیه‌سازی فرایندهای ساخت می‌پردازد. این چارچوب از اطلاعات ساختاریافته مانند فعالیت‌ها، اطلاعات زیست‌محیطی و ... به عنوان ورودی‌های مناسب برای شبیه‌سازی و استفاده از پیشامد رخداد گسسته برای دستیابی به نتایج مورد نظر استفاده می‌کند. مزیت اصلی این چارچوب، قابلیت استفاده‌ی سریع با کمترین مهارت شبیه‌سازی برای کاربران است.[۱۸] شبیه‌سازی می‌تواند طراحی عملیات ساخت را از طریق آگاهی مدیران به‌وسیله‌ی ارائه کمّی و منطقی روند ساخت، منابع آن، محیط پروژه، و هرگونه عوامل خارجی که ممکن است تأثیرگذار باشد، بهبود ببخشد. در نهایت مدیر می‌تواند با استفاده از چندین سناریو، مشکلات پروژه و راه‌حل‌های احتمالی را بررسی و شناسایی کند.[۱۰]

در مقاله‌ی دیگری از یک نمونه‌ی موردی واقعی برای استفاده عملی از تجزیه‌ی تحلیل‌های شبیه‌سازی مبتنی‌بر سناریو برای برنامه‌ریزی پروژه و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در یک پروژه‌ی تونل‌زنی در آلبرتای کانادا کمک می‌گیرد. مدل شبیه‌سازی در سیمفونی ساخته شده است که به‌منظور بررسی گزینه‌های برنامه‌ریزی و پشتیبانی تصمیم در طول اجرای پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد.[۱۹] این مقاله چارچوبی برای شبیه‌سازی پروژه‌های ساخت حساس به آب‌وهوا که در شرایط خاص آب‌وهوایی اجرا می‌شوند، پیشنهاد می‌کند. مراحل این چارچوب برای شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی فعالیت‌های ساخت خط لوله در شرایط آب‌وهوایی سرد اجرا شده است. عدم اطمینان ناشی از شرایط آب‌وهوایی مانند سرمای شدید، گرما، باد، یا بارش می‌تواند به‌طور مؤثری بر روی برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه و میزان انحراف از برنامه‌ی اولیه تأثیر بگذارد.[۲۰]

پروژه‌های اجرای تونل به روش TBM[6] اغلب با تأخیرهایی مواجه می‌شوند که می‌تواند تأثیرات بدی از جمله افزایش مدت زمان و تحمیل هزینه‌های اضافی بر پروژه بگذارد. این مقاله به معرفی و بررسی یک پروژه‌ی نمونه‌ی موردی برای نمایش کاربرد مؤثر شبیه‌سازی به‌منظور تجزیه و تحلیل عملکرد بهره‌وری پروژه با تأکید بر تأخیرهای ناشی از تجهیزات و شرایط غیر قابل‌پیش‌بینی می‌پردازد. داده‌های پروژه تحت مطالعه‌ی روش مدل تأخیری بهره‌وری (که بر پارامترهای بهره‌وری که قابل اندازه‌گیری و کنترل هستند، تمرکز دارد) که توسط شرکت مشاور تکمیل و جمع‌آوری شده و برای مدل کردن تأخیرها در یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی گسسته و پیوسته‌ی اجرای تونل ایجاد شده است. اعتبارسنجی مدل به‌منظور اطمینان از میزان واقعی بودن نتایج و اندازه‌گیری میزان کارایی مدل‌سازی تأخیرها انجام شده است. تحلیل حساسیت برای تعیین دلایل نامطلوب تأخیرهای پروژه انجام شده است که امکان تجزیه و تحلیل بیشتر را در مورد نتایج کاهش تأخیرها در مدت زمان و هزینه‌های فرضی پروژه ارائه می‌دهد.[۲۱]

در مقاله‌ی دیگری به بررسی رویکرد جدیدی که استفاده از شبیه‌سازی را در صنعت ساخت تسهیل می‌کند، می‌پردازد. در ادامه بیان می‌کند تلاش‌های پیشین در این زمینه به‌واسطه‌ی شکاف میان کاربر و نرم‌افزار شبیه‌سازی، قدرت و انعطاف‌پذیری ابزارهای موجود و آمادگی صنعت متوقف شده بود. یک رویکرد جامع جدید (به عنوان روش مدل‌سازی یکپارچه) که نیازهای کامل شبیه‌سازی ساخت را مورد بررسی قرار می‌دهد به تفصیل بیان شده است که بر مبنای چندین مفهوم مدرن و پیشرفته است. این روش هم‌چنین چگونگی ترکیب این مفاهیم با استفاده از اصول شی‌گرا را توضیح می‌دهد. توسعه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی فرایندی نیست که مراحل دقیق و مشخصی را دنبال کند. بلکه در یک مدل مارپیچ به‌عنوان درک اهداف مدل و منطق عملیات ساخت تکامل می‌یابد. به علاوه، مدل‌های شبیه‌سازی نیازمند داده‌های عددی از منابع مختلف‌اند که اغلب به راحتی موجود نیستند و تلاش زیاد برای جمع‌آوری این داده‌ها نیاز است. این مسائل باعث کم شدن تلاش مورد نیاز برای تکمیل مدل‌سازی و شبیه‌سازی است.[۲۲]

این مقاله یک سیستم شبیه‌سازی یکپارچه به نام COPS[7] را معرفی می‌کند که بازده عملیات ساخت و هم‌چنین عملکرد برنامه‌ی پروژه را به‌صورت جداگانه و مشترک تجزیه و تحلیل می‌کند. مدل‌های عملیاتی را ایجاد می‌کند، این مدل‌ها را در کتابخانه‌ی مدل عملکرد خود نگهداری می‌کند، تحلیل حساسیت را با ترکیب منابع مختلف انجام می‌دهد، ترکیبی از منابع بهینه که نیازهای کاربر را نسبت به بهره‌وری ساعتی و هزینه‌ی ساعتی عملیات برآورده و پیدا می‌کند و این اطلاعات را در زمان‌بندی پروژه منعکس می‌کند و برنامه‌ریزی مبتنی بر شبیه‌سازی را اجرا می‌کند.[۲۳]

این مقاله رویکرد جدیدی را برای محاسبه‌ی زمان رویداد به منظور افزایش دقت برآورد زمان شبیه‌سازی در FDES[8] ارائه می‌دهد. سهم عمده‌ی این مقاله یکپارچگی برنامه‌ریزی پیشامد گسسته با منطق فازی برای افزایش کاربرد آن در

حوزه‌ی ساخت‌وساز و بهبود دقت نتایج FDES است.[۲۴] در این مقاله مدلی برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی پیش ساخته با استفاده از الگوریتم ژنتیک معرفی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پیاده‌سازی فرایندهای کلی پروژه و نیازمندی‌های آن، روش مؤثری برای بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی پیش‌ساخته است. ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی به مدیران پروژه کمک می‌کند تا منابع را به‌صورت مؤثر تخصیص دهند و زمان پروژه را کاهش دهند.[۲۵] برنامه‌ریزی مناسب پروژه‌های با ماهیت تکرارشونده تأثیر چشم‌گیری در عملکرد نهایی پروژه دارد و استفاده از ابزارهای نوین همچون شبیه‌سازی رایانه‌یی می‌تواند نقش مهمی را در بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌ها ایفا کند.[۲۶]

۳.۲. خلأ تحقیقاتی

در پژوهش‌های پیشین از شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری برای تعیین بازده و بهبود برنامه‌ریزی و کاهش زمان و هزینه‌ی پروژه‌ها استفاده شده است. استفاده از سیستم یکپارچه، برداشت اطلاعات کلیدی پروژه توسط برنامه‌نویسی افزونه برای اتوکد و لحاظ کردن شرایط محیطی، تعریف شیفت‌ها، فضاهای کاری و پردازش خودکار داده‌ها جنبه‌ی نو بودن تحقیق حاضر را در بر می‌گیرد. در این پژوهش چارچوبی ارائه شده است تا بتوان داده‌هایی را که از طریق رابط برنامه‌نویسی و کاربر در پایگاه داده ذخیره می‌شوند، در بستر مدل‌سازی پروژه به‌صورت خودکار پردازش کرد و با استفاده از موتور شبیه‌سازی پیشامد گسسته برای مدل‌سازی پروژه به بهترین نتایج دست یافت.

۳. چارچوب پیشنهادی

پروژه‌های ساخت خط لوله از جمله پروژه‌های اجرایی پیچیده‌اند که نیاز به تعداد زیادی نیروی متخصص و ماشین‌آلات سنگین دارند. مراحل ساخت پروژه‌ی خط لوله شامل نقشه‌برداری، مسیریابی و احداث ROW [۹] حفاری کانال، ریسه‌ی لوله، خم‌کاری، جوش‌کاری، رادیوگرافی، عایق‌کاری، لوله‌گذاری، جوش اتصال نهایی، خاک سرندی، هیدروتست و خاک‌ریزی است. همان‌طورکه در شکل (۱) نشان داده شده است، طرح کلی چارچوب پیشنهادی از سه عنصر اصلی نقشه‌های اتوکد خط لوله، شبیه‌سازی پروژه و پایگاه داده تشکیل شده است.

۱.۳. نقشه‌های خط لوله

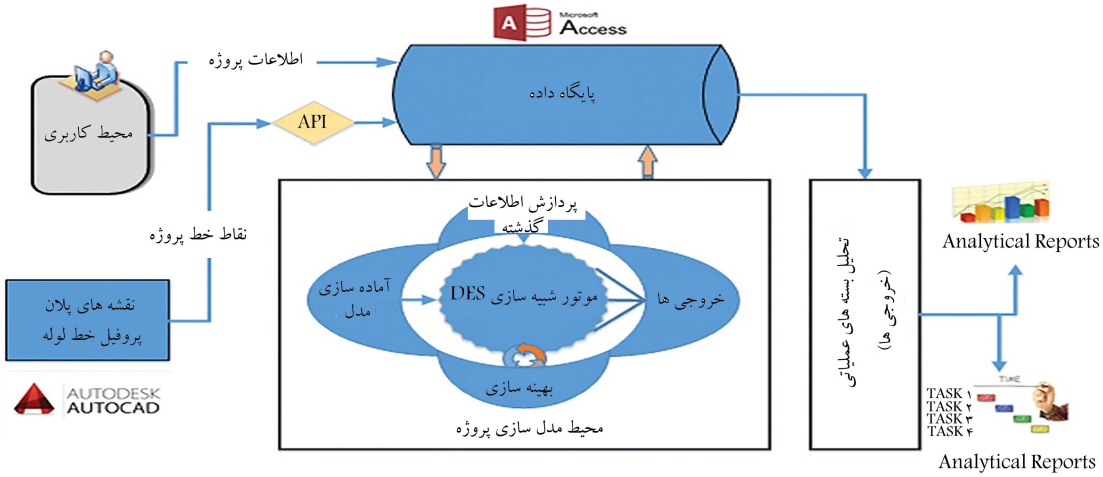
یکی از داده‌های مهم در پروژه‌های ساخت خط لوله، نقشه‌های خط لوله‌ی پروژه است. با استفاده از این نقشه‌ها اطلاعات مربوط به شیب خط پروژه و خط زمین در طول مسیر مشخص می‌شود. طول افقی و شیب‌دار پروژه، محل دقیق تقاطع‌ها، نوع تقاطع (شامل جاده‌ی آسفالت، رودخانه، مسیل، کانال و ...) و هم‌چنین ارتفاع مورد نیاز خاک‌برداری از دیگر مواردی است که از این نقشه‌ها استخراج می‌شود. در این مرحله تمام اطلاعات مورد نیاز که از نقشه‌های خط لوله قابل برداشت است، توسط برنامه‌نویسی افزونه برای نرم‌افزار (API) [۱۰] از نقشه‌های اتوکد استخراج و در پایگاه داده در نرم‌افزار Access ذخیره می‌شود.

۲.۳. پایگاه داده

در این مرحله سایر اطلاعات به‌دست آمده از پروژه توسط کاربر و از طریق فرم‌های ایجاد شده در نرم‌افزار اکسس در پایگاه داده ذخیره می‌شوند. از جمله مهم‌ترین عملیات انجام شده بر روی اطلاعات ذخیره شده در پایگاه داده که به منظور مدیریت هر چه بهتر اطلاعات و دسترسی راحت و سریع آنها انجام می‌شود، ایجاد پرس‌وجوهای مختلف و دستیابی به اطلاعات مورد نیاز از هر جدول است.

داده‌های ورودی در این مرحله شامل اطلاعات مربوط به گزارش زمین‌شناسی پروژه، محل تقاطع‌ها، فازهای پروژه، عملیات اجرایی، منابع و مشخصات آنها، شرایط محیطی، فضای کار، شیفت‌های کاری تعریف شده برای پروژه و هم‌چنین رکوردهای پروژه است. سایر اطلاعات پروژه شامل فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی، گروه‌های کاری شامل منابع انسانی و ماشین‌آلات پروژه و هم‌چنین فضای کاری مورد نیاز برای هرگروه اجرایی برای درنظرگرفتن تداخلات اجرایی و هم‌چنین تقویم و شیفت‌های کاری پروژه نیز در پایگاه داده ذخیره می‌شود. در این پژوهش محاسبه‌ی مدت‌زمان فعالیت‌ها، نرخ بهره‌وری و تولید گروه‌های کاری با توجه به تجارب و ظرفیت ماشین‌آلات و شیب و جنس زمین محاسبه می‌شود. این نرخ یا به صورت دستی برای هر گروه وارد شده یا با تحلیل رکوردهای پروژه و گزارش‌های روزانه تخمین زده می‌شود (شکل ۲).

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روند پیشرفت پروژه‌های ساخت، شرایط آب‌وهوایی به ویژه میزان دما و سرعت باد است. تغییرات جوّی در برخی از موارد



شکل ۱. چارچوب سامانه‌ی پیشنهادی در پژوهش.

Resource Name	Geo_Region	Geo_Ground	Productivity	Unit	PipeDiam
اکیپ پر کردن کانال_۱	تپه و ماهور	همه	270	m/h	56
اکیپ پر کردن کانال_۱	دشت	همه	300	m/h	56
اکیپ پر کردن کانال_۱	کوهستان	همه	225	m/h	56
اکیپ جوشکاری_۱	تپه و ماهور	همه	2	p/h	56
اکیپ جوشکاری_۱	دشت	همه	2.2	p/h	56
اکیپ جوشکاری_۱	کوهستان	همه	1.9	p/h	56
اکیپ حفر کانال_۱	تپه و ماهور	خاکی	110	m3/h	56
اکیپ حفر کانال_۱	تپه و ماهور	سنگی	16	m3/h	56
اکیپ حفر کانال_۱	دشت	خاکی	80	m3/h	56

شکل ۲. نرخ بهره‌وری گروه‌های پروژه در پایگاه داده.

باعث توقف اجرای پروژه و افزایش زمان و هزینه می‌شود. پس یکی از پارامترهای مهمی که در این پروژه به عنوان متغیر در نظرگرفته شده است، شرایط محیطی است. به همین دلیل شرایط آب‌وهوایی محل اجرای پروژه بررسی شده و عملیاتی که در شرایط خاص آب‌وهوایی نمی‌توانند اجرا شوند، شناسایی شده است. برای نمونه در پروژه‌ی خط لوله عملیاتی که نیاز به استفاده از سایدبوم را دارند مانند ریسه‌ی لوله، لوله گذاری در بادهای شدید و جوش‌کاری در دماهای پایین، محدودیت اجرا دارند.

از دیگر عوامل مهم در بازده و بهره‌وری ماشین‌آلات، ماهیت و جنس زمین است. بررسی ماهیت زمین در محل ساخت پروژه نقشی حیاتی دارد و عدم توجه به آن می‌تواند هزینه‌های اضافی و سنگینی را به پروژه تحمیل کند. در واقع جنس و شیب زمین به‌طور مستقیم در نرخ بهره‌وری منابع اثر می‌گذارد. مثلاً در محدوده‌های کوهستانی به‌دلیل درصد سنگ بالا، عملیات مسیرسازی با سرعت کمتری پیش می‌رود. به همین دلیل داده‌های مربوط به گزارش‌های زمین‌شناسی و خاک‌شناسی، شامل ماهیت‌های دشت، تپه ماهور و کوهستانی و هم‌چنین درصد سنگ و خاک در بخش‌های مختلف پروژه استخراج و در پایگاه داده ذخیره شده است.

۳.۳. شبیه‌سازی پروژه

برای تحلیل اطلاعات پروژه برنامه‌نویسی در محیط ویژوال استودیو[11] ۲۰۱۵ و به زبان ویژوال بیسیک[12] انجام شده است. پس از بازخوانی اطلاعات پروژه از پایگاه داده، مدل پروژه ساخته می‌شود. این مدل شامل مدل‌سازی تقسیمات فیزیکی پروژه، شیفت‌بندی‌ها و از همه مهم‌تر بسته‌های کاری است. هر بسته‌ی کاری از یک فعالیت، منابع مورد نیاز، موقعیت اجرا و فضای اجرایی تشکیل شده است. با توجه به موقعیت و ترتیب توالی فعالیت‌ها، هر بسته‌ی کاری به یک یا چند بسته‌ی کاری دیگر متصل می‌شود.

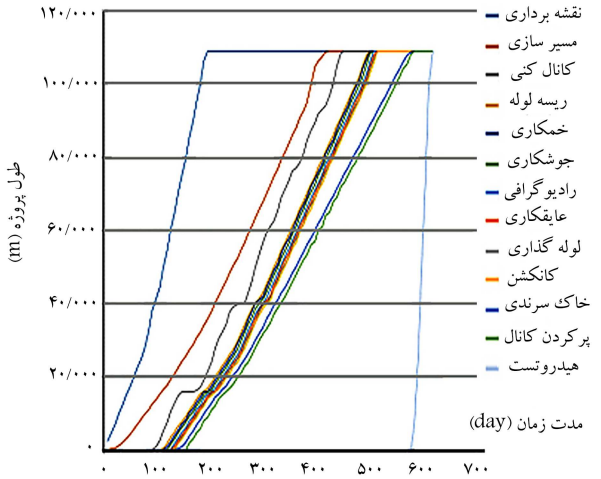
پس از مدل‌سازی فیزیکی، تحلیل‌های زمانی، تخصیص منابع و پیش‌بینی روند پروژه، در موتور شبیه‌سازی گسسته پیشامد صورت می‌پذیرد. تک‌تک بسته‌های کاری با توجه به پیش‌نیازهای اجرایی در شیفت، تقویم، و شرایط آب‌وهوایی قابل اجرا به عنوان یک موجود مستقل (Entity) در صف درخواست منابع (گروه و ماشین‌آلات) قرار می‌گیرند و با توجه به اولویت آماده‌ی شبیه‌سازی رویداد می‌شوند. مدت زمان هر بسته‌ی کاری با توجه به نوع فعالیت، تعداد منابع اختصاص‌یافته و هم‌چنین تحلیل‌های آماری گزارش‌های پیشین تعیین می‌شود. پس از اتمام کلیه‌ی بسته‌های کاری نتایج شبیه‌سازی گزارش می‌شود. خروجی‌های اولیه شامل تخمین مدت‌زمان پروژه، نمودارهای موقعیت زمان LOB[13] حجم کاری، میزان استفاده از منابع، هزینه‌ی پروژه شامل نیروی انسانی و ماشین‌آلات و روند پیشرفت پروژه بر

Project	Project-Name	Project_Length	MaxPipeDiameter	ShiftOrderID	CalendarID	StartDate
1	خط لوله نهم سراسری - حفاصل دهگلان به میاندوآب - قطعه دوم	107717	56	ساعته + استراحت 10	روز در هفته 7	2/17/2018

POINTID	X	Z
1	120000	1718.37900000002
2	120000	1718.37900000002
3	120010	1717.78695899999
4	120020	1717.19394100003
5	120030	1716.60092349997

PROJECTID	Geo_Type	Start	End
1	کوهستان	0	27000
1	تپه ماهور	27000	39000
1	کوهستان	39000	42000
1	تپه ماهور	42000	101000
1	دشت	101000	107117

شکل ۳. اطلاعات ثبت شده در پایگاه داده.



شکل ۴. نمودار روند پیشرفت پروژه به صورت LOB.

اساس تقسیمات پروژه خواهد بود. در ادامه با تحلیل اطلاعات خروجی و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های ژنتیک یا فرابتکاری تعداد بهینه‌ی منابع قابل پیش‌بینی است تا ضمن بیشینه‌سازی استفاده از منابع، تعداد منابع لازم برای نیل به مدت‌زمان مشخص برای پروژه تخمین زده شود.

۴. مطالعه‌ی موردی

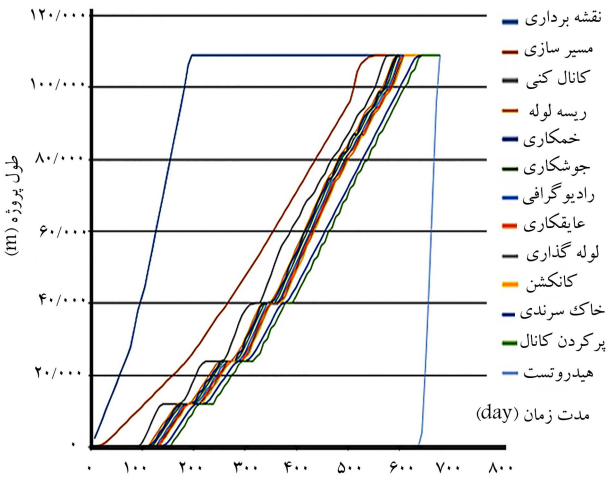
پروژه‌ی مورد مطالعه این پژوهش، اجرای قطعه‌ی دوم خط لوله‌ی انتقال گاز ۵۶ اینچ از دهگلان تا میاندوآب است. طول افقی پروژه حدود ۱۰۶ کیلومتر با انشعاب از خط لوله‌ی انتقال گاز نهم سراسری است. بخش عظیمی از پروژه در مناطق کوهستانی است که باعث افزایش حجم و پیچیدگی عملیات مسیرسازی شده است. مدت‌زمان اتمام پروژه طبق برنامه‌ریزی اولیه ۶۴۵ روز پیش‌بینی شده بود. برای تخمین روند پروژه با ماشین‌آلات موجود، نقاط پروژه از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰ توسط افزونه‌ی اتوکد به پایگاه داده انتقال داده شد و سایر اطلاعات پروژه نیز در پایگاه داده ثبت شد. شکل (۳) نمونه‌یی از اطلاعات ثبت شده را نشان می‌دهد.

پس از اجرای سیستم و تحلیل‌های شبیه‌سازی با تعداد منابع مشخص شده در جدول(۱)، مدت زمان پروژه ۶۷۵ روز بدون درنظر گرفتن مدت زمان تجهیز کارگاه محاسبه شده است. نمودار پیشرفت پروژه LOB، در شکل (۴) آمده است.

از مواردی که از نمودار شکل (۴) قابل شناسایی است، گلوگاه‌های پروژه است.

جدول ۱. تعداد گروه‌های کاری درنظرگرفته شده.

گروه کانکشن ـ ۱	گروه هیدروتست ـ ۱	گروه نقشه‌برداری ـ ۱	گروه مسیرسازی ـ ۱	گروه لوله‌گذاری ـ ۱	گروه عایق‌کاری ـ ۱	
گروه سرند خاک ـ ۱	گروه ریسه لوله ـ ۱	گروه رادیوگرافی ـ ۱	گروه خم‌کاری ـ ۱	گروه حفر کانال ـ ۱	گروه جوشکاری ـ ۱	گروه پر کردن کانال ـ ۱



شکل ۵. نمودار LOB پس از افزایش گروه‌های کاری مسیرسازی و حفرکانال.

مثلاً، عملیات مسیرسازی نسبت به نقشه‌برداری با نرخ کمتری اجرا می‌شود. همین امر باعث می‌شود عملیات بعدی نیز به‌تبع مسیرسازی با نرخ کندتری پیش بروند. در قدم بعدی با افزایش تعداد گروه مسیرسازی از ۱۲ به ۱۶ و گروه حفرکانال از ۶ به ۸، مدت زمان پروژه به ۶۱۸ روز کاهش می یابد. شکل (۵)، روند پیشرفت پروژه در نمودار LOB را در این سناریو نشان می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی به‌طور مؤثری در ارزیابی تأثیرات عوامل مختلف در روند اجرای پروژه‌های خطی و تکرارپذیر مفید است. با توجه به اینکه در حال حاضر پروژه‌های خط لوله با استفاده از روش مسیر بحرانی برنامه‌ریزی می‌شوند، عوامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد پروژه از جمله بازده منابع، ماهیت زمین و فضاهای کاری در نظر گرفته نمی‌شوند که عموماً منجر به عدم استفاده‌ی بیشینه از منابع پروژه و در نهایت اتلاف و افزایش زمان و هزینه می‌شود. از این‌رو این تحقیق چارچوب جدیدی را برای بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌های خطی با استفاده از مدل شبیه سازی ارائه می‌دهد که می‌تواند به برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر پروژه‌ها کمک کند. از دیگر مزایای این سیستم، یکپارچگی و انعطاف‌پذیری آن است و می‌توان با توجه به قطر لوله و سایر ویژگی‌های پروژه، اطلاعات را در پایگاه داده اصلاح و به‌روزرسانی کرد و تغییرات لازم را در مدل شبیه‌سازی اعمال کرد.

در این راستا با استفاده از نقشه‌های اتوکد، پایگاه داده و ابزارهای شبیه‌سازی به‌منظور بهینه کردن مدت زمان اجرای پروژه و تخمین واقع‌بینانه از روند پیشرفت پروژه چارچوب جدیدی ارائه شد. مجموعه‌یی از داده‌های طبقه‌بندی شده شامل عملیات اجرایی پروژه، فازهای پروژه، شیفت‌های کاری، محدودیت منابع، بازده منابع، فضاهای کاری، ماهیت زمین و ... در مدل شبیه‌سازی به منظور نزدیک کردن مدل به واقعیت در نظر گرفته شد. سپس، تحلیل‌های زمانی، تخصیص منابع و پیش‌بینی روند پیشرفت پروژه، در موتور شبیه‌سازی پیشامد گسسته صورت گرفت و گلوگاه‌های پروژه برای مدیریت بهتر زمان و هزینه شناسایی شد. با وجود درنظرگرفتن پارامترهای مختلف در مدل شبیه‌سازی، عوامل دیگری مانند انجام تحلیل‌های آماری، خرابی و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات در نظر گرفته نشده است و در مطالعات آتی بررسی خواهند شد.

تقدیر و تشکر

از عوامل محترم شرکت مهندسی و توسعه‌ی گاز ایران برای ایجاد بستر همکاری، مرکز تحقیق و توسعه‌ی تکنولوژی های نوین ساخت (تکنوسا) در دانشگاه تهران به‌منظورحمایت‌های علمی، شرکت مهندسین مشاور توسعه‌ی انرژی خاورمیانه و شرکت ایران آروین برای در اختیارگذاشتن اطلاعات پروژه، تقدیر و تشکر می‌شود.

پانوشت‌ها

1. program evaluation review technique (PERT)
2. what if scenario
3. linear scheduling model
4. discrete event simulation
5. simphony
6. tunnel boring machine (TMB)
7. construction operation and project scheduling (COPS)
8. fuzzy discrete event simulation (FDES)
9. right of way (ROW)
10. application programming interface (API)
11. visual studio 2015
12. visual basic
13. line of balance (LOB)

منابع (References)

1. Zahran, H.H. “Scheduling of pipeline construction projects using simulation”, American University in Cairo, Master’s Thesis. AUC Knowledge Fountain (2016). Zahran, H.M. “Scheduling of pipeline construc-

tion projects using simulation", (2016).

2. Duffy, G.A. "Linear scheduling of pipeline construction projects with varying production rates (Doctoral dissertation", Oklahoma State University (2009).
3. Ammar, M.A. "LOB and CPM integrated method for scheduling repetitive projects. Journal of construction engineering and management", **139**(1), pp. 44-50 (2013).
4. Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Mendez, C.A. and et al. "Oil-derivatives pipeline logistics using discrete-event simulation", *In Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, pp. 2101-2113 (December 2010).
5. Surety Information Office, "Why do contractors fail", http:// c ymcdn.com/sites/ www.surety.org/resource/resmgr/ LearnAboutSurety /Why_Do_Contractors_Fail.pdf (Jul. 5, 2015).
6. Fallahnejad, M.H. Delay causes in Iran gas pipeline projects", *International Journal of Project Management*, **31**(1), pp. 136-146 (2013).
7. Wu, C., Wang, X. and Lin, J. "Optimizations in project scheduling: A state-of-art survey. In Optimization and control methods in industrial", *Engineering and Construction* pp. 161-177 (2017).
8. Liu, L., Liu, Y., Tang, Y. and et al. "Production rate determination for linear construction projects based on linear scheduling method", *International Journal of Smart Home*, **10**(4), 143-152 (2016).
9. Ammar, M.A. "LOB and CPM integrated method for scheduling repetitive projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, **139**(1), pp.44-50 (2013).
10. AbouRizk, S. "Role of simulation in construction engineering and management", *Journal of Construction Engineering and Management*, **136**(10), pp. 1140-1153 (2010).
11. Tang, Y., Liu, R., Wang, F. and et al. "Scheduling optimization of linear schedule with constraint programming", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **33**(2), pp. 124-151 (2018).
12. Hu, D. and Mohamed, Y. "Simulation-model-structuring methodology for industrial construction fabrication shops", *Journal of Construction Engineering and Management*, **140**(5), pp.04014002-1 - 10 (2014).
13. Hsie, M., Chang, C.J., Yang, I.T. and et al. "Resource-constrained scheduling for continuous repetitive projects with time-based production units", *Automation in Construction*, **18**(7), pp. 942-949 (2009).
14. Geramianfar, R., Pakzad, M.R. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "Multi-product pipeline scheduling using simulation optimization", *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, **4**(3), pp. 1-11 (2015).
15. AbouRizk, S., Knowles, P. and Hermann, U.R. "Estimating labor production rates for industrial construction activities", *Journal of Construction Engineering and Management*, **127**(6), pp. 502-511 (2001).
16. AbouRizk, S. and Mohamed, Y. "Simphony-an integrated environment for construction simulation", *In 2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37165)*, (Vol. 2, pp. 1907-1914) (2000).
17. Hajjar, D. and AbouRizk, S.M. "Unified modeling methodology for construction simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(2), pp. 174-185 (2002).
18. Labban, R., AbouRizk, S., Haddad, Z. and et al. "A discrete event simulation model of asphalt paving operations", In 2013 Winter Simulations Conference (WSC) (pp. 3215-3224) December 2013).
19. 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).
20. Shahin, A., AbouRizk, S.M. and Mohamed, Y. "Modeling weather-sensitive construction activity using simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**(3), pp.238-246 (2011).
21. Werner, M. and AbouRizk, S. "Simulation case study: Modelling distinct breakdown events for a tunnel boring machine excavation", *In 2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 3234-3245 (December 2015).
22. Hajjar, D. and AbouRizk, S.M. "Unified modeling methodology for construction simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(2), pp. 174-185 (2002).
23. Lee, D.E., Yi, C.Y., Lim, T.K. and et al. "Integrated simulation system for construction operation and project", *Journal of Scheduling Computing in Civil Engineering*, **24**(6), pp.557-569 (2010).
24. Sadeghi, N., Fayek, A. and Gerami Seresht, N. "A fuzzy discrete event simulation framework for construction applications: Improving the simulation time advancement" *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**(12), pp.04016071-1 - 12 (2016).
25. Roofigari-Esfahan, N. and Razavi, S. "Uncertainty-aware linear schedule optimization: a space-time constraint-satisfaction approach", *Journal of Construction Engineering and Management*, **143**(5), pp.04016132-1 - 14 (2017).
26. AbouRizk, S., Hague, S., Ekyalimpa, R. and et al. "Simphony: A next generation simulation modelling environment for the construction domain", *Journal of Simulation*, **10**(3), pp. 207-215 (2016).