Archive of SID.ir

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۳-۱۴، (پژوهشی)

Original Article

توسعه روشی ترکیبی از مدل‌سازی نیروی اجتماعی و شبیه‌سازی رویداد گسسته برای بهینه‌سازی راندمان تولید در ساخت‌وساز

مهدی نعیمی‌راد (کارشناسی ارشد)
مجتبی مغربی * (دانشیار)
گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

بهبود راندمان تولید با افزایش تعداد کارگران، رابطه‌ی مستقیم دارد؛ البته تا جایی که تعداد بیش از حد کارگران در محیط سبب ایجاد ازدحام و در نتیجه افت تولید نشود. در یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته[۱] بررسی اثر ازدحام در راندمان تولید و اندرکنش افراد بر یکدیگر ممکن نیست. در پژوهش حاضر سعی شده است تا تأثیر مستقیم نیروی انسانی در راندمان تولید با مدل‌سازی توأم فرایند پردازش کار در سیستم و اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در یکدیگر بررسی شود. بدین منظور، چارچوبی توسعه داده شده است که شامل ترکیب دو مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی[۲] است. نتایج به‌دست آمده به‌وضوح کاهش میزان اثر ازدحام نیروی انسانی را نشان می‌دهند. از خروجی‌های پژوهش حاضر می‌توان برای به‌دست آوردن میزان بهینه‌ی تعداد و ترکیب نیروی انسانی در هر فعالیت استفاده کرد.

واژگان کلیدی: راندمان تولید، محدودیت‌های فضایی، شبیه‌سازی رویداد گسسته، مدل‌سازی نیروی اجتماعی.

mahdi.naeimirad@mail.um.ac.ir
mojtabamaghrebi@um.ac.ir

۱. مقدمه

برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌ها براساس روابط میان فعالیت‌ها شکل می‌گیرد. به‌طوری که یک پروژه شامل عملیات بهم پیوسته و مرتبط است.[۱] برای تهیه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه نیاز به پیش‌بینی مدت انجام فعالیت‌هاست. روش‌های شبیه‌سازی به دلیل توانایی در پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها، همواره یکی از روش‌های مورد استفاده‌ی پژوهشگران بوده است.[۲و۳] هیچ‌کدام از روش‌های شبیه‌سازی فعالیت‌محور، تأثیر مستقیم اندرکنش انسان بر انسان و محیط بر انسان را بررسی نمی‌کنند. هدف نوشتار حاضر، بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد و محیط در راندمان تولید در شرایط ازدحام است. سیر پژوهشی مطالعات پیشین را می‌توان در سه بخش راندمان تولید و برنامه‌ریزی فضا، شبیه‌سازی تولید و مدل‌سازی نیروی اجتماعی (SFM)[۳] بررسی کرد.

۱.۱. راندمان تولید و برنامه‌ریزی فضا

در تخمین راندمان تولید، درک ماهیت و میزان تأثیر پارامترهای فردی در بهره‌وری بسیار مهم است. مطابق یافته‌های موسلهی[۴] و خان (۲۰۱۲)،[۴] یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید نیروی انسانی در ساخت‌وساز، تعداد افراد در تیم‌های کاری است. توماس و هورمان (۲۰۰۶)،[۵] نشان دادند که تعیین ساختار اکیپ‌های کاری می‌تواند یکی از اصول مورد مطالعه برای افزایش راندمان کاری باشد. بر این اساس، ایده‌ی افت تولید به دلیل محدودیت‌های فضایی توسط تابت و بلیوو[۵] (۱۹۹۴)،[۶] ارائه شده است. از این‌رو، اهمیت برنامه‌ریزی فضای کارگاه برای جلوگیری از بروز ازدحام مشخص می‌شود که در ادامه، به بررسی مطالعات صورت گرفته در این زمینه پرداخته شده است.

هر پروژه‌ی ساختمانی به فضای کافی برای تأسیسات موقت، مسیرهای جابه‌جایی، تدارکات و کارگاه‌های مختلف نیاز دارد، تا فعالیت‌های ساختمانی را به شیوه‌یی ایمن و کارآمد انجام دهد. همچنین چیدمان تأسیسات در سطح کارگاه ساخت‌وساز، یک اصل مهم در برنامه‌ریزی کارگاه است.[۷] اثر برنامه‌ریزی فضا در راندمان فعالیت‌های ساختمانی توسط مالاسی[۶] و داوود (۲۰۰۴)،[۸] بررسی شده است. ایشان با رویکرد تحلیل فضایی اجرا و توسعه‌ی یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای حل تداخل و تعارض بین فعالیت‌های ساخت‌وساز مشخص کردند که تداخل فضای کاری می‌تواند تا ۴۰٪ راندمان تولید را در ساخت‌وساز کاهش دهد. به منظور کاهش تداخل و تعارض میان فعالیت‌ها و حل مشکل چیدمان محوطه‌ی یک کارگاه ساخت‌وساز مدولار، چئونگ[۷] و همکاران (۲۰۰۲)[۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، راه‌حلی ارائه کرده‌اند. برای کمینه‌سازی تعداد کل جابه‌جایی‌های مصالح و کاهش ازدحام در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۷، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۷.
DOI:10.24200/J30.2022.60581.3111

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کارگاه، نیز جانگ[8] و همکاران (۲۰۰۷)،[۱۰] از الگوریتم ژنتیک برای تعیین چیدمان مصالح ساختمانی در طبقات ساختمان‌های چندطبقه استفاده کرده‌اند.

به منظور کاهش تداخل میان فعالیت‌ها، سلطانی و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۱] چارچوبی را برای پشتیبانی و تحلیل برنامه‌ریزی مسیر جابه‌جایی وسائط نقلیه و افراد در یک کارگاه ساخت‌وساز توسعه داده‌اند. پیش از این، برنامه‌ریزان طرح محیط کارگاه، هنگام درنظرگرفتن تخصیص مسیرها برای تدارکات، وسائط نقلیه و عوامل کارگاه، عمدتاً به تجربه‌ی خود متکی بودند. پیشرفت‌های فنّاوری اطلاعات می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری به برنامه‌ریزان پروژه از طریق فراهم کردن امکان درنظرگرفتن سناریوهای مختلف برای مسیریابی کمک کند.

همان‌طورکه اشاره شد، افزایش تعداد کارگران درکارگاه و محدودیت‌های فضایی، دو پارامتر مهم تأثیرگذار در تولید هستند؛ که به‌موجب آن، مطالعاتی در راستای برنامه‌ریزی فضا و مسیرهای جابه‌جایی افراد درکارگاه ارائه شده است. اما در پژوهش‌های موجود، تأثیر هم‌زمان دو عامل اخیر در جریان انتقال مصالح و راندمان تولید کاملاً بررسی نشده است. لذا، در نوشتار حاضر، ضمن درنظرگرفتن محدودیت‌های فضایی و افزایش تعداد نیروی انسانی، تأثیر توأم دو عامل اخیر در اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد و راندمان تولید یک فعالیت خاص ساختمانی بررسی شده است.

۲.۱. شبیه‌سازی تولید

شبیه‌سازی، روش‌های مختلفی دارد و اغلب روش‌های استفاده شده در بررسی تولید در پروژه‌های ساخت‌وساز شامل این موارد است:

- روش سیستم‌های پویا (SD)[9]؛
- مدل‌سازی عامل‌محور (ABM)[10]؛
- شبیه‌سازی رویداد گسسته (DES)[11].

روش سیستم‌های پویا،[۱۲] رویکردی از بالا به پایین دارد؛ به‌طوری که بر عوامل مؤثر در سیستم و روابط میان آن‌ها برای بررسی عملکرد کلی سیستم متمرکز می‌شود. از روش سیستم‌های پویا می‌توان برای مدل‌سازی کیفی و کمّی یک رخداد استفاده کرد؛ به گونه‌یی که مدل در حالت کیفی بر روابط میان عوامل در حلقه‌های نمودار تمرکز دارد و در حالت کمّی، روابط میان جریان و خروجی سیستم با معادلات ریاضی بیان می‌شوند. برخلاف روش سیستم‌های پویا، روش مدل‌سازی عامل‌محور، رویکردی پایین به بالا دارد و رفتار کلی سیستم، به‌دلیل اندرکنش میان عامل‌ها و محیط، براساس قوانین است. مزیت روش مدل‌سازی عامل‌محور نسبت به روش شبیه‌سازی رویداد گسسته، در مواردی است که تمرکز بر فرایندها نیست و بر یادگیری، انطباق و تأثیرگذاری عامل‌ها در سیستم تأکید شده است.[۱۳] ایده‌ی استفاده از روش مدل‌سازی مذکور در ساخت‌وساز، اولین بار توسط سانی و همکاران (۲۰۰۳)،[۱۴] ارائه شده است.

همان‌طورکه بیان شد، روش مدل‌سازی عامل‌محور و سیستم‌های پویا در مواردی که تمرکز بر فرایندها نیست و بر تعاملات عوامل درگیر در سیستم و تأثیر عوامل مختلف بر سیستم اشاره دارد، کارآمد هستند. پژوهش‌هایی که در ادامه بیان شده‌اند، چگونگی استفاده از روش اخیر را در ارزیابی راندمان تولید در فعالیت‌های ساخت‌وساز نشان می‌دهند. خانزادی و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۵] مدلی ترکیبی از روش مدل‌سازی عامل‌محور و سیستم‌های پویا برای پیش‌بینی و بهبود تولید نیروی انسانی به‌منظور پیش‌بینی ارزش بهره‌وری نیروی کار ارائه کرده‌اند. جبری و زائد[12] (۲۰۱۷)،[۱۶] از شبیه‌سازی عامل‌محور برای مدل‌سازی عملیات خاک‌برداری استفاده کردند و یک مدل خاک‌برداری چند عامل‌محور متشکل از عوامل هوشمند و سازگار را توسعه دادند.

واتکینز[13] و همکارانش (۲۰۰۹)،[۱۷] مسئله‌ی بررسی اثر ازدحام در راندمان تولید نیروی انسانی درکارگاه ساختمانی را با استفاده از روش مدل‌سازی عامل‌محور مطالعه و فضا را به‌صورت دوبُعدی شبکه‌بندی کردند و به هر عامل، سلول یا سلول‌هایی را اختصاص دادند. اگرچه در مدل ارائه شده‌ی ایشان، عامل‌ها امکان تصمیم‌گیری دارند، اما انتخاب‌های آن‌ها فقط میان چند گزینه محدود بوده است. همچنین با مدل‌سازی اندرکنش میان افراد در جابه‌جایی و اشغال فضا به روش شبکه‌بندی فضا، امکان انعطاف‌پذیری افراد در شرایط ازدحام و تأثیر اندرکنش‌های مذکور را در فرایند تولید در نظرگرفتند. بن‌آلون و ساکس[14] (۲۰۱۷)،[۱۸] با یک‌پارچه‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[15] و مدل‌سازی عامل‌محور، فضای یک کارگاه را به‌صورت مجازی مدل‌سازی کردند و در آن، درک، رفتار و تصمیم‌گیری عامل‌ها توسعه یافت. اما همچنان منطق مدل‌سازی فضای کارگاه، شبکه‌بندی و سلول‌ها اشغال شده بود که توانایی مدل‌سازی رفتار عامل‌ها در شرایط ازدحام و تداخل فعالیت‌ها را نداشت.

در سال ۲۰۱۰، روش مدل‌سازی چند عامل‌محور با عامل‌های خودمختار برای شبیه‌سازی ازدحام ترافیکی ماشین‌آلات ساختمانی و بررسی تأثیر آن در راندمان تولید، توسط کیم و کیم،[۱۹] توسعه داده شد. همچنین اندرکنش‌های میان ماشین‌آلات در شرایط ترافیکی به خوبی مدل‌سازی شد، اما فرایند تولید در سیستم مدل‌سازی جای داده نشد. روش اخیر، برای مدل‌سازی اندرکنش‌های میان ماشین‌آلات مناسب بود، ولی برای مدل‌سازی اندرکنش فیزیکی میان افراد به‌دلیل رفتار پیچیده‌ی آن‌ها مناسب نبود. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در روش مدل‌سازی عامل‌محور، ابزار ذکر شده برای مدل‌سازی فیزیکی و حرکتی افراد در محیط فیزیکی کارگاه، بهترین گزینه نبوده است.

روش شبیه‌سازی رویداد گسسته به مدل‌سازی فرایند انجام فعالیت‌ها براساس جریان منابع و بازیگران درون سیستم می‌پردازد. در مدل اشاره شده، بازیگران عناصری منفعل هستند که در طی جریان کار پردازش می‌شوند.[۲۰] اولین پژوهش قابل ذکر با استفاده از روش شبیه‌سازی رویداد گسسته در ساخت، شبکه‌ی عملیات چرخه‌یی (CYCLONE)[16] است.[۲۱] در سال ۱۹۹۶، شبیه‌سازی فرایندهای ساخت‌وساز بر مبنای وضعیت و منابع (STROBOSCOPE) که نسل جدیدی از سیستم‌های شبیه‌سازی ساخت‌وساز بر مبنای نمودار چرخه‌ی فعالیت‌هاست، توسط مارتینز[17]،[۲۲] توسعه یافت. در ادامه، نیز مدل SIMPHONY با تمرکز بر کنترل رفتارهای سیستم، توسط حجار و ابوریزک[18] (۱۹۹۹)،[۲۳] ارائه شد.

سیستم‌های مدل‌سازی جدیدتر، مانند SIMPHONY یا STROBO-SCOPE، ویژگی‌های بسیاری را برای انعطاف‌پذیری بیشتر در مدل‌سازی ارائه کرده‌اند. به‌عنوان مثال، سیستم‌های اخیر، امکان برنامه‌نویسی توسط کاربر را برای ایجاد تغییراتی در مدل و اجزاء آن به منظور مدیریت مدل و دستیابی به نتایجی دقیق‌تر فراهم می‌کنند. روش مذکور، توانایی مدل‌سازی همه‌منظوره و ایجاد ابزارهای شبیه‌سازی برای هدفی خاص در صنعت را دارد و توسعه‌ی ابزارهای اخیر بر مدل‌سازی و قابلیت شبیه‌سازی بیشتر در مقایسه با ابزارهای قبلی تأکید دارد.[۲۴] در مواردی که برای ورودی‌های یک مدل شبیه‌سازی، به دانش غیردقیق، ذهنی، و زبانی نیاز باشد، در مدل‌سازی از منطق فازی استفاده می‌شود. لذا، صادقی و همکاران (۲۰۱۶)،[۲۵] با ادغام شبیه‌سازی رویداد گسسته و منطق فازی و ارائه‌ی رویکردی جدید در محاسبه‌ی زمان رویداد، قابلیت‌های روش شبیه‌سازی ذکر شده را بهبود بخشیدند.

بنی‌اسدی و همکاران (۲۰۱۸)،[۲۶] با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته، چارچوبی به منظور بهبود همزمان راندمان تولید و ایمنی کارگران درکارگاه ارائه کردند،

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

که می‌توانست ایمنی و بهره‌وری عملیات را به ترتیب ۳۸ و ۴ درصد بهبود بخشد. هو[19] و همکاران (۲۰۱۷)،[27] چارچوبی برای برنامه‌ریزی و کنترل فضای کار و با هدف تعریف منطق مناسب و کنترل ازدحام هنگام عبور بسته‌های کاری از میان فضاهای کارگاه و همچنین تخصیص مؤثر منابع با استفاده از روش مدل‌سازی رویداد گسسته ارائه کردند. تقدس و همکاران (۲۰۲۱)،[28] یک رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی برای طراحی محیط کارگاه و برنامه‌ریزی چیدمان مصالح در کارگاه با درنظرگرفتن حالت پیوسته و گسسته‌ی پروژه ارائه کردند. در نوشتار حاضر، ویژگی‌های دینامیکی وضعیت پروژه و عملیات پروژه با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی، با ترکیب شبیه‌سازی پیوسته[20] و شبیه‌سازی رویداد گسسته، تحلیل و درنهایت مشخص شد که یک طرح چیدمان کارآمد برای محیط کارگاه با توجه به شرایط پروژه منجر به افزایش راندمان هزینه‌ها می‌شود.

۳.۱. مدل‌سازی نیروی اجتماعی

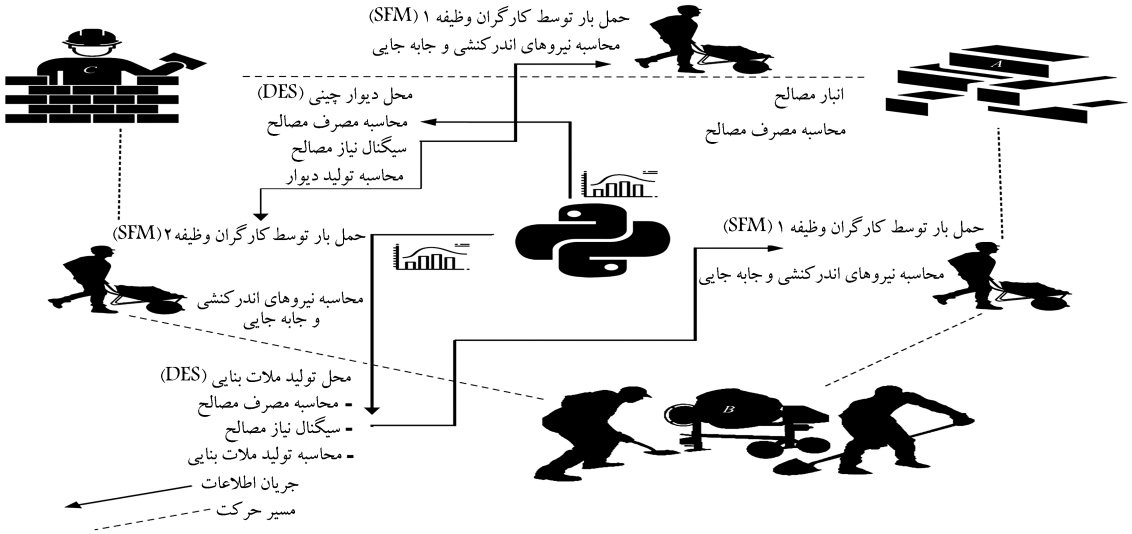
اندرکنش‌های فیزیکی بین افراد درکارگاه با توجه به محدودیت‌های فضایی موجود می‌تواند در راندمان تولید مؤثر باشد. برای مدل‌سازی حرکتی افراد، تاکنون از روش‌های اتوماتای سلولی[21]، مدل‌سازی نیروی اجتماعی، مدل‌های مبتنی بر سرعت[22]، مدل‌های پیوسته[23]، مدل‌های ترکیبی[24]، مدل‌های رفتاری[25] و مدل‌های شبکه[26] استفاده شده است. از میان روش‌های اشاره شده، روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل توانایی‌اش در توصیف تحرک افراد برای مورد مطالعاتی نوشتار حاضر که ارزیابی مؤثرتر راندمان تولید تحت اثر اندرکنش‌های میان افراد و محیط کارگاه است، مناسب‌تر است.

روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، اولین‌بار توسط هلبینگ و ملنار[27] (۱۹۹۵)،[29] برای مدل‌سازی حرکت افراد در یک دالان براساس نیروهای جاذبه و دافعه‌یی که افراد به یکدیگر و محیط اطراف خود وارد می‌کنند، توسعه داده شد. امروزه روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل سادگی فرمول‌های ریاضی، مفهوم فیزیکی روشن و توانایی بالا در توصیف جابه‌جایی افراد تبدیل به یکی از پُر استفاده‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی حرکت در سیستم‌های شبیه‌سازی بر مبنای نیروهای اجتماعی شده است. برای مثال، از روش اخیر برای شبیه‌سازی رفتار عابران در خطوط عابر پیاده،[30و31] بهینه‌سازی تجهیزات ساختمان،[32] شناسایی رفتارهای غیرطبیعی توده‌های جمعیت،[33] شبیه‌سازی فرار اضطراری از کلاس در هنگام زلزله،[34] آنالیز تخلیه‌ی دینامیکی خوابگاه‌ها،[35و36] و ایستگاه‌های مترو،[37] و همچنین ارزیابی نتایج حمله‌ی تروریستی سارین،[38] استفاده شده است. تاکنون در صنعت ساخت‌وساز نیز از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی برای شبیه‌سازی خروج اضطراری از کارگاه ساختمانی در شرایط آتش‌سوزی استفاده شده است.[39] اما همان‌طور که گفته شد، تاکنون از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی برای شبیه‌سازی اندرکنش میان کارگران و محیط کارگاه به‌منظور بهینه‌سازی راندمان تولید در پروژه‌های ساختمانی استفاده نشده است.

روش‌هایی که در دو بخش پیشین معرفی شده‌اند، را می‌توان براساس ماهیت مسئله به تنهایی یا به‌صورت ترکیبی استفاده کرد. این روش‌ها را می‌توان با یکدیگر ترکیب کرد تا بدین ترتیب بتوان از مزایای چند روش استفاده کرد، به‌طوری که ضعف‌های آن‌ها کمتر شود.[40] برای ترکیب مدل‌سازی‌ها، باید بهترین رویکرد برای هر یک از اجزاء مدل براساس مسئله‌یی‌که باید حل شود، انتخاب شود تا روش ترکیبی حاصل، نماینده‌ی دقیق‌تری از واقعیت باشد.[41] روش‌های مدل‌سازی فرایند تولید که در مطالعات پیشین استفاده شده است، توانایی مشاهده‌ی تأثیر رفتار و اندرکنش‌های میان افراد را ندارند. بدین ترتیب همان‌طور که بیان شد، روش‌های شبیه‌سازی رویداد گسسته با تمرکز بر فرایندها و مدل‌سازی نیروی اجتماعی با تمرکز بر اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد می‌توانند تأثیر ازدحام در فضای کارگاه در راندمان تولید را در نظر بگیرند. در پژوهش حاضر، با ارائه‌ی مدل ترکیبی شبیه‌سازی رویداد گسسته ـ مدل‌سازی نیروی اجتماعی، سعی شده است تا بهینه‌ترین تعداد و چیدمان برای اکیپ‌های کاری به‌دست آید.

۲. روش پژوهش

بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی در جریان انتقال بار در طی یک فرایند اجرایی در ساخت‌وساز، نیازمند توسعه‌ی بستری است که بتواند مدلی ترکیبی از دو ابزار شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی ارائه کند. در شکل ۱،



شکل ۱. فرایند یکپارچه‌سازی مدل‌سازی DES-SFM.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

فرایند کار که شامل دو بخش اصلی است، مشاهده می‌شود. بخش اول، مربوط به شبیه‌سازی رویداد گسسته و بخش دوم، شامل مدل‌سازی نیروی اجتماعی است. تقسیم‌بندی مدل‌سازی به دو روش ذکر شده، براساس ماهیت هر فعالیت است. فعالیت‌هایی که به‌صورت ایستا انجام می‌شوند و نیازمند تردد در کارگاه نیستند، به روش شبیه‌سازی رویداد گسسته و فعالیت‌هایی که با جابه‌جایی بار و تردد در کارگاه انجام می‌شوند، به روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی شبیه‌سازی می‌شوند. بنابراین، با درنظر گرفتن روند دیوارچینی به عنوان یک مطالعه‌ی موردی، نوع هر یک از فعالیت‌های مربوط به فرایند اشاره شده مشخص شده است. بدین ترتیب مدلی با پایتون توسعه داده شده است که شامل روشی ترکیبی از شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی است.

۱.۲. مطالعه‌ی موردی

در بخش کنونی، با استفاده از یک نمونه‌ی واقعی، روش پیشنهادی آزمایش شده است. بدین منظور از داده‌های واقعی مربوط به عملیات دیوارچینی در پروژه‌ی احداث یک ساختمان مسکونی استفاده شده است. مدل‌سازی شبیه‌سازی رویداد گسسته را می‌توان در مدل ارزیابی کرد. روش مذکور قابل تعمیم به کل فرایندهای ساختمانی است؛ ولی همان‌طور که در کارهای مشابه برای نشان دادن عملکرد روش‌های پیشنهادی بر روی یک فعالیت متمرکز شده‌اند،[۴۲] در پژوهش حاضر نیز بر فعالیت دیوارچینی در یک پروژه تمرکز شده است.

پروژه‌ی منتخب، یک ساختمان با عملکرد مسکونی در ۸ طبقه و با مساحت ۱۵۶۵ مترمربع بوده است. مطابق شکل ۱، نقشه‌ی توسعه‌ی روش پژوهش نوشتار حاضر نشان داده شده است. بر این اساس، ابتدا فرایند کلی اجرای دیوارچینی از مرحله‌ی تأمین مصالح از محل ذخیره‌ی مصالح تا تکمیل دیوارهای داخلی طبقه‌ی موردنظر تعیین شده است، که شامل ۵ فعالیت بوده است:

۱. انتقال مصالح آب، ماسه و سیمان از محل انبار (A) به محل تولید ملات بنایی(B)؛

۲. انتقال بلوکه از محل انبار (A) به محل دیوار در حال اجرا (C)؛

۳. انتقال ملات تولید شده از محل تولید آن (B) به محل دیوار در حال اجرا (C)؛

۴. تولید ملات بنایی از اختلاط مصالح موردنیاز (در محل B)؛

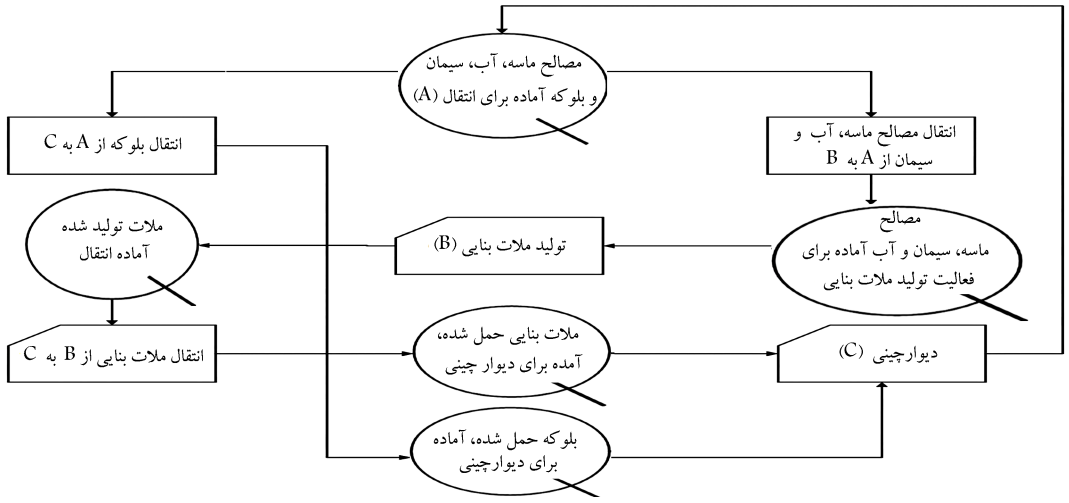
۵. دیوارچینی دیوارهای داخلی (در محل C).

فعالیت‌های ۱ و ۲ توسط یک گروه از کارگران حمل‌کننده‌ی بار صورت گرفته و فعالیت ۳، توسط گروه دیگری از کارگران حمل‌کننده‌ی بار انجام شده است. در گام اول، فضای کارگاه ساختمانی، مدل‌سازی شده است. در ادامه، مدل‌سازی محل فعالیت‌ها و موانع فیزیکی در کارگاه برای ثبت تأثیر اندرکنش‌های فیزیکی کارگران در یکدیگر و محیط صورت گرفته است. اندرکنش‌های اخیر، سرعت و جهت حرکت کارگران را تغییر می‌دادند. مکان افرادی که فعالیت آن‌ها، انتقال بار نبوده است، ثابت فرض شده است. در مدل‌سازی فضا، فرض بر این بوده است که محل فعالیت فردی که ملات بنایی را از مخلوط کردن مصالح تولید می‌کند، همواره ثابت باشد. یکی از دیگر نوآوری‌های نوشتار حاضر، امکان بررسی اثر پویایی محیط کارگاه در تولید است. به این صورت که محل دیوارچینی بسته به محل دیوار در حال ساخت، متغیر بوده است. واضح است که با پیشرفت پروژه در طول زمان، دیوارهای بیشتری در طبقه ساخته شده‌اند، بنابراین محل اجرای فعالیت دیوارچینی در کنار دیوار در حال‌توسعه در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که با پیشرفت پروژه ضمن افزایش موانع در محیط کارگاه، محل فعالیت دیوارچینی نیز به‌صورت پویا تغییر کرده است. موانع تحرک کارگران در کارگاه، شامل: شفت‌ها، پرتگاه‌ها، دیوارهای تمام شده، و دیوار در حال‌توسعه بوده است. به‌روزرسانی دیوارهای طبقه در طول چرخه‌ی عمر پروژه به‌صورت در لحظه بوده است؛ بنابراین، در مدل‌سازی انجام شده، دو ویژگی کارگاه در طول پیشرفت پروژه تغییر می‌کرده است: ۱) محل فعالیت دیوارچینی و ۲) نقشه‌ی دیوارهای موجود.

۲.۲. شبیه‌سازی رویداد گسسته

همان‌طور که بیان شد، فعالیت‌های ۴ و ۵ به صورت ایستا در محل‌های (B) و (C) انجام و براساس روش شبیه‌سازی رویداد گسسته مدل‌سازی شده‌اند. مطابق شکل ۲، فرایند تولید از محل انبار مصالح (A) در طبقه آغاز و با انتقال مصالح به محل‌های مصرف پیگیری شده است.

بدین منظور، مصالح موردنیاز فعالیت‌های تولید ملات بنایی و دیوارچینی، توسط کارگران از محل (A) به محل‌های (B) و (C) انتقال یافته‌اند. با انتقال مصالح به محل موردنظر، آن‌ها در صف مصرف قرار گرفتند. فعالیت تولید ملات بنایی و دیوارچینی



شکل ۲. شبیه‌سازی رویداد گسسته.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

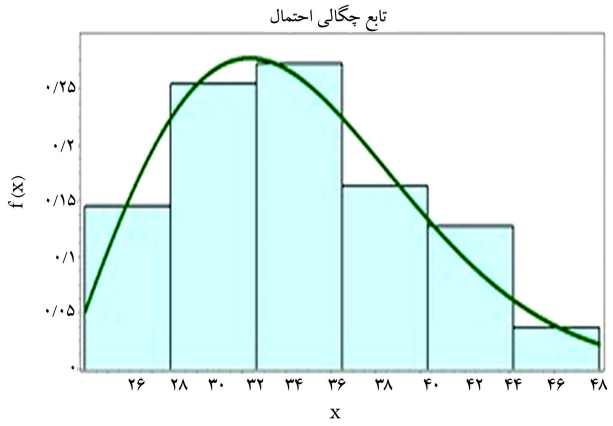
جدول ۱. نتایج آزمون مربع کای برای داده‌های آماری.

آزمون مربع کای					
آمار	تابع چگالی	پارامترها	p-value	آماره آزمون	مقدار بحرانی $a = ۰/۰۵$
تولید ملات ساختمانی	Gamma	$a = ۵۵۷/۰۶$ $\beta = ۰/۰۳۰$	۰/۶۶۵	$> ۳/۲۲$	۱۱/۰۷
دیوار چینی	Normal	$\sigma = ۴/۹۵۳$ $\mu = ۰/۳۷۴$	۰/۹۵۹	$> ۱/۰۳$	۱۱/۰۷
مصرف آب	Triangular	$m = ۷/۴$ $a = ۴/۱۲۸$ $b = ۹/۰۲۷$	۰/۹۹۴	$> ۰/۴۱$	۱۱/۰۷
مصرف ماسه	Weibull	$a = ۵/۷۸۰$ $\beta = ۳۲/۱۵$	۰/۹۹۲	$> ۰/۴۸$	۱۱/۰۷
مصرف سیمان	Weibull	$a = ۶/۴۱۲$ $\beta = ۶/۷۱۷۳$	۰/۷۷۱	$> ۲/۵۳$	۱۱/۰۷
مصرف بلوکه	Gamma	$a = ۳۳/۷۱۴$ $\beta = ۲/۱۰۲۷$	۰/۸۵۲	$> ۱/۹۷$	۱۱/۰۷
مصرف ملات	Lognormal	$\sigma = ۰/۱۵۷۹$ $\mu = ۳/۵۲۹۸$	۰/۸۵۵	$> ۱/۵۹$	۱۱/۰۷

هنگامی انجام شده است که تمامی مصالح موردنیاز به حد کافی در صف انتظار باشند. با اجرای فعالیت تولید ملات بنایی، به صف انتقال محصول از محل (B) به محل (C) افزوده شده است، تا جایی که ملات کافی جهت انتقال در دسترس باشد. در ادامه، ملات از محل (B) به محل (C) منتقل شده است. با انتقال مصالح موردنیاز فعالیت دیوارچینی، به صف‌های بلوکه و ملات آماده برای اجرای دیوارچینی افزوده شده است. در صورتی که صف‌های ملات و بلوکه به میزان کافی پر بودند، فعالیت دیوارچینی اجرا می‌شد.

مدل توسعه‌یافته با استفاده از داده‌های آماری و براساس توابع چگالی احتمال[۲۸]، فرایند تولید را شبیه‌سازی کرده است. برای این منظور، از داده‌های ثبت شده، نمودار ستونی فراوانی[۲۹] مدت هر فعالیت و مصرف هر مصالح به‌دست آمده است. ثبت زمانی هر فعالیت بدون درنظرگرفتن نرخ مصرف مصالح برای مدل کافی نیست. تا زمانی که تمام مصالح موردنیاز به حد کافی در محل کار وجود نداشته باشند، فعالیت انجام نمی‌شود؛ بنابراین، نه فقط داده‌های ثبت شده‌ی نرخ تولید در هر فعالیت موردنیاز است، بلکه مجموعه‌یی از داده‌ها در مورد نرخ مصرف مصالح در هر فعالیت نیز باید ثبت شود. به‌منظور توسعه‌ی توابع چگالی احتمال، از داده‌های ثبت شده در طول ۴ روز عملیات دیوارچینی در ساختمان موردنظر و در ماه شهریور و شرایط آب‌وهوایی مطلوب استفاده شده است. داده‌های ثبت شده، حاصل از ۳۷۰ چرخه‌ی اجرای کار براساس میزان خروجی هر فعالیت در ساعت و برای مصرف مصالح براساس میزان مصرف هر ماده در ساعت است. به طور مثال در شکل ۳، نمودار فراوانی ستونی مصرف ماسه مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر فرض شده است که میزان خروج مصالح از محل انبار با حضور کارگر حمل‌کننده در محل و در لحظه صورت می‌پذیرد؛ از این رو، نرخ زمانی برای آن منظور نشده است. در ادامه، داده‌های ثبت شده با درجه آزادی ۵ به روش مربع کای[۳۰] ارزیابی شده‌اند. براساس آزمون مربع کای، می‌توان به یک رتبه‌بندی از متناسب‌ترین توابع چگالی احتمال دست‌یافت و بهترین آن را برای هر سری از داده‌ها برگزید. به‌طور مثال، تابع Weibull، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، متناسب‌ترین



شکل ۳. نمودار فراوانی ستونی مصرف ماسه در فعالیت تولید ملات.

تابع برای نرخ مصرف ماسه است. در جدول ۱، نتایج آزمون مربع کای برای اطلاعات ثبت شده ارائه شده است.

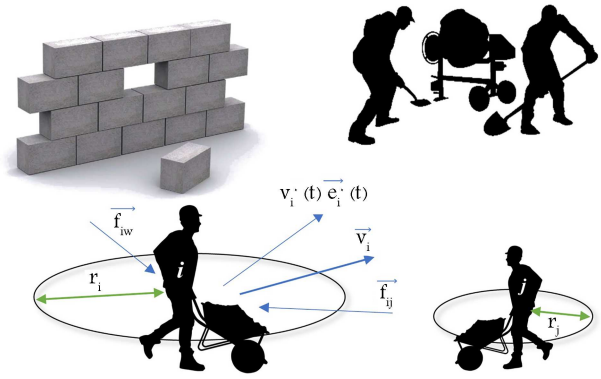
مطابق جدول ۱، با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ ($\alpha = ۰/۵$) با توجه به اینکه آماره‌ی آزمون کمتر از مقدار بحرانی است، می‌توان نتیجه گرفت که فرض صفر رد می‌شود. همچنین براساس نمودار ستونی فراوانی از رکوردهای ثبت شده، مناسب‌ترین تابع چگالی احتمال براساس آزمون مربع کای برای همه‌ی داده‌های مربوط به فعالیت‌ها تعیین شده است. در مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته از توابع به‌دست‌آمده در جدول ۱ استفاده شده است.

۳.۲. مدل‌سازی نیروی اجتماعی

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در مطالعه‌ی حاضر، فرض بر این بوده است که محل دو فعالیت «تولید ملات بنایی» و «دیوارچینی» به صورت ثابت باشد و کارگران، وظیفه‌ی انتقال محصول هر فعالیت به فعالیت بعد از آن‌ها را بر عهده دارند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۴. نمودار نیروهای وارد بر عامل.

همان‌طور که گفته شد، فرایند تولید مربوط به فعالیت‌های ایستا با روش شبیه‌سازی رویداد گسسته مدل‌سازی می‌شود. اما تفاوت رویکرد پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در مدل‌سازی انتقال بار بین فعالیت‌هاست. به طوری که در مطالعه‌ی حاضر، انتقال بار در فضا با مدل‌سازی فضا و حرکت کارگران در محیط مذکور به صورت هم‌زمان شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی حرکت کارگران در کارگاه و درنظر گرفتن تأثیر اندرکنش‌های فیزیکی در بهره‌وری، از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی استفاده شده است. بدین ترتیب، هر کارگر متحرک که مصالح را در کارگاه منتقل می‌کند، در مدل‌سازی نیروی اجتماعی به عنوان یک عامل[۳۱] معرفی می‌شود. در پژوهش حاضر، از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل توانایی آن در دقت شبیه‌سازی حرکتی نیروهای فعال در محیط و بررسی واقعی‌تر اندرکنش بین نیروها در محیط محدود کارگاه استفاده شده است. مطابق شکل ۴، هر یک از کارگرهای حمل‌کننده‌ی بار، تحت‌تأثیر نیروهای جاذبه و دافعه‌یی از محیط اطراف خود هستند، که شامل نیروی جاذبه‌ی مقصد و نیروهای دافعه از سوی دیوارها و دیگر افراد است. در رابطه‌ی ۱، چگونگی محاسبه‌ی برآیند نیروهای وارد بر هر عامل ارائه شده است.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i(t)\,\vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_{w} f_{iw} \qquad (۱)$$

که در آن:

$\vec{f}_{iw}$: نیروی دافعه‌ی وارد بر عامل i از سوی دیوار یا هر یک از موانع محیط؛

$\vec{f}_{ij}$: نیروی دافعه‌ی وارد بر عامل i از عاملی دیگر مانند j؛

$\vec{f}_i$: نیروی جاذبه‌ی مقصد عامل i؛

$\vec{v}_i$: سرعت لحظه‌یی عامل i؛

$\vec{e}_i$: بردار جهت حرکت عامل i به سوی مقصد؛

v_i : سرعت مطلوب عامل i؛

τ_i : زمان شتاب‌گیری عامل i؛

m_i : جرم عامل i؛

r_i : شعاع خصوصی عامل i؛

r_j : شعاع خصوصی عامل j؛

d_{ij} : فاصله‌ی عامل i از عامل دیگری مانند j.

مطابق شکل ۴، برآیند نیروهای وارد بر هر عامل در هر اجرای حلقه سراسری برنامه براساس برآیند نیروهای وارد بر آن مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. هلبینگ[۳۲] و همکاران (۲۰۰۰)،[۴۳] برای درنظرگرفتن جابه‌جایی و تحرک افراد، مدلی را پیشنهاد کردند (رابطه‌ی ۱) که از سه مؤلفه تشکیل شده است: مؤلفه‌ی اول، نیروی جاذبه‌ی هر عامل به مقصد را محاسبه می‌کند. جایی که عامل i با جرم (m_i) با سرعت دلخواه معین (ν_i) و در یک جهت معین $\vec{e}_i$ حرکت می‌کند و سرعت واقعی او تمایل دارد در هر زمان واکنش (τ_i) به سرعت دلخواه (ν_i) برسد. مؤلفه‌ی دوم، نیروی اندرکنش فیزیکی میان دو عامل i و (j) را محاسبه می‌کند این نیرو f_{ij} مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$f_{ij} = \left(A_i.e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} + k.g\,(r_{ij}-d_{ij})\right)\vec{n}_{ij} + \kappa.g\,(r_{ij}-d_{ij})\,\Delta\vec{\nu}^t_{ij}.\vec{t}_{ij} \qquad (۲)$$

که در آن، $A_i.e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i}$ نماینده‌ی نیروی دافعه میان عامل i و j است. A_i و B_i دو پارامتر ثابت جهت اطمینان از کالیبره بودن مدل شبیه‌سازی هستند. $\vec{n}_{ij}$ بردار نرمال عامل i به سمت عامل j است. همچنین هنگامی که فاصله‌ی بین دو عامل(d_{ij}) کمتر از مجموع شعاع فضای خصوصی حول بدن هریک از آن‌ها (r_{ij}) باشد، مؤلفه‌های $k.g\,(r_{ij}-d_{ij})$ و $\kappa.g\,(r_{ij}-d_{ij})\,\Delta\vec{\nu}^t_{ij}.\vec{t}_{ij}$ به ترتیب نیروی فشردگی و نیروی اصطکاک لغزشی را بین افراد i وj محاسبه می‌کنند. تابع $g(x)$ درصورتی که کارگران به یکدیگر برخورد نکنند، صفر است؛ در غیر این صورت برابر با آرگومان x خواهد بود. $\Delta\vec{\nu}^t_{ij}$ و $\vec{t}_{ij}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی اختلاف سرعت مماسی و جهت مماسی هستند. مؤلفه‌ی سوم، نیروی اندرکنش میان عامل i و موانع محیط مانند دیوارها را از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌کند:

$$f_{iw} = \left(A_i.e^{(r_i-d_{iw})/B_i} + \kappa.g\,(r_i-d_{iw})\right)\vec{n}_{iw} + \kappa.g\,(r_i-d_{iw})\,(\vec{\nu}_i.\vec{t}_{iw})\,\vec{t}_{iw} \qquad (۳)$$

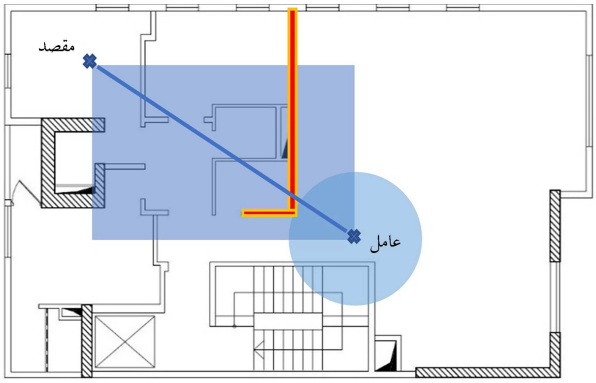
که در آن، $A_i.e^{(r_i-d_{iw})/B_i}$ نماینده‌ی نیروی دافعه میان عاملi و دیوار w است. $\vec{n}_{iw}$ بردار نرمال عامل i به سمت دیوار w است. همچنین هنگامی که فاصله‌ی بین عامل و دیوار (d_{iw}) کمتر از شعاع خصوصی اطراف بدن عامل (r_i) باشد، مؤلفه‌های $k.g(r_i-d_{iw})$ و $\kappa.g(r_i-d_{iw})(\vec{\nu}_i.\vec{t}_{iw})\vec{t}_{iw}$ به ترتیب نیروی فشردگی و نیروی اصطکاک لغزشی را بین عامل و دیوار محاسبه می‌کنند. $\vec{t}_{iw}$ جهت مماسی است که از عامل i به دیوار w اشاره می‌کند.

مطابق شکل ۴، پیرامون هر فرد فضایی تحت عنوان فضای خصوصی قرار دارد. فضای خصوصی دایره‌یی است به شعاع r_i به‌دلیل جابه‌جایی‌های عامل در کارگاه، هر چه مانع محیطی یا فرد دیگری به مرز این محیط بیشتر نزدیک می‌شود، نیروی دافعه بیشتر می‌شود، تا بدین منظور از برخورد فیزیکی بین فرد با دیگران و یا موانع جلوگیری شود. با افزایش تعداد افراد، فضای بیشتری نسبت به فضای کارگاه اشغال می‌شود و اگر تعداد افراد محیط زیاد باشد، این موضوع باعث ازدحام می‌شود. همچنین با پیشرفت پروژه، موانع فیزیکی محیط به دلیل افزایش دیوارها افزایش می‌یابد که باعث افزایش اندرکنش‌های فیزیکی بین افراد و محیط می‌شود؛ بنابراین، در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، می‌توان تأثیر پیشرفت فیزیکی کار را در راندمان تولید در نظر گرفت.

در پژوهش حاضر، استفاده از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل تفاوت با کاربردهای متداول آن در مطالعات پیشین متفاوت است. در کاربردهای متداول روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، مبدأ و مقصد حرکت عامل ثابت است و مسیر و سرعت حرکت عوامل از مبدأ به مقصد تحت تأثیر نیروهای جاذب و دافعه‌ی ایجاد شده توسط افراد دیگر و محیط تغییر می‌کند. اما در پژوهش حاضر، مدل با اعمال تغییراتی به ساخت‌وساز تطبیق داده شده است. تفاوت در مدل‌سازی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



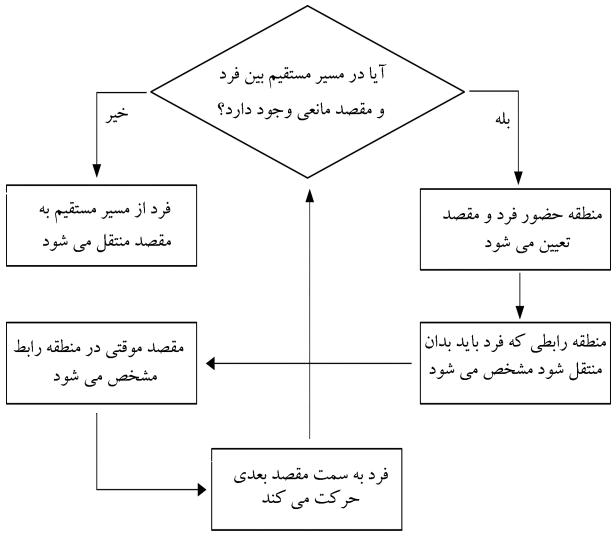
شکل ۵. مدل‌سازی کارگاه و نحوه‌ی مسیریابی عامل.

حرکت کارگران در یک محل ساخت‌وساز برای حمل بار از یک مکان به مکان دیگر با کاربردهای متداول روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی شامل این موارد است:

- پیچیدگی بیشتر فضای مدل شده و مشخص نبودن جهت کلی حرکت عامل،
- بی‌ثباتی مبدأ و مقصد حرکت عامل‌ها در فضا به دلیل ثابت نبودن محل کار،
- بی‌ثباتی هندسه‌ی فضا و تغییر هندسه و موانع موجود در طول پیشرفت پروژه.

با توجه به تفاوت‌های ذکر شده، تغییراتی در الگوی اولیه‌ی مدل‌سازی نیروی اجتماعی اعمال شده است. همان‌طور که گفته شد، عوامل حمل بار در کارگاه به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول، کارگرانی هستند که مسیر بین «انبار مصالح» و دو فعالیت «تولید ملات بنایی» و «دیوارچینی» را طی می‌کنند و گروه دوم، کارگرانی هستند که بین محل «انبار مصالح» و «دیوارچینی» خدمت می‌کنند. فرض بر این است که محل «تولید ملات ساختمانی» و «انبار مصالح» ثابت است. اما محل «دیوارچینی» متغیر است. محل دیوارچینی در کنار دیوار در حال ساخت است. با پیشرفت پروژه، دیوارهای متفاوتی ساخته می‌شوند و مکان هر دیوار با دیوارهای دیگر متفاوت است. این بدان معناست که مقصد کارگرانی که مصالح را به محل دیوارچینی منتقل می‌کنند، ثابت نیست. بنابراین، افراد باید از مسیرهای مختلف جدید برای رسیدن به یک مقصد قدیمی استفاده کنند. با ساخت دیوارهای داخلی، دیوارهای بیشتری بین مبدأ و مقصد عامل وجود خواهد داشت. بنابراین، انتخاب مسیر مستقیم از مبدأ تا مقصد برای کارگر ممکن نیست. از این رو، یافتن مسیر به صورت در لحظه برای هر فرد ضروری است و مسیر انتخاب شده باید بهینه و شبیه انتخاب‌های انسانی باشد. هنگامی که یک کارگر می‌خواهد به مقصدی برسد، باید بداند که آیا مانعی بر سر راه مقصد وجود دارد یا خیر. برای این منظور، عامل در هر لحظه محیط خود را بررسی می‌کند تا تمام موانع و دیوارهای اطراف خود را در نظر بگیرد. بررسی تمام محیط کارگاه شبیه‌سازی شده، نیازمند محاسبات زیاد عددی است. در نوشتار حاضر، برای حل این موضوع در هر تیک فقط فضای اطراف هر عامل با شعاعی مشخص بررسی شده است. دایره‌ی مذکور، در واقع همان پارامتر فاصله‌ی اندرکنش است و مقدار آن با افزایش سرعت به صورت خطی افزایش می‌یابد. در بعضی مواقع فقط ربعی از شعاع حرکتی، که در جهت مقصد است، بررسی شده است (شکل ۵).

مطالعات شبیه‌سازی بدون محدودیت‌های ذکر شده نشان داد که تأثیر چندانی در دقت جواب ندارند و فقط منجر به پیچیدگی محاسبات خواهند شد. در مدل توسعه داده شده، همواره یک خط مستقیم بین عامل و مقصد وی ترسیم می‌شود. پس از آن، دو سناریو رخ می‌دهد: ۱) خط مذکور، هیچ تلاقی با موانع یا دیوارهای



شکل ۶. نمودار تصمیم‌گیری و مسیریابی عامل.

موجود در فضای بررسی‌شده ندارد. ۲) خط ذکر شده دست‌کم با یک مانع محیطی (دیوار)، تقاطع دارد. اگر اولین سناریو اتفاق بیفتد، راه مستقیم به مقصد به‌عنوان مسیر انتخاب می‌شود. اما، اگر سناریوی دوم اتفاق بیفتد، برای پیدا کردن بهترین مسیر، مطابق الگوریتم شکل ۶ عمل می‌شود. بدین منظور محیط کارگاه شبیه‌سازی شده براساس ماهیت محیط به تعدادی منطقه تقسیم می‌شود. در پژوهش حاضر، مبنای تقسیم فضاهای مستقل شامل اتاق‌ها و راهروها بوده است. در مطالعه‌ی موردی انتخاب شده، محیط کارگاه به ۱۷ منطقه، که شامل راهرو و اتاق بودند، تقسیم و برای دسترسی به اتاق‌ها از راهروها استفاده شده است. همه‌ی افراد همیشه از منطقه‌ی حضور و منطقه‌ی مقصد خود آگاه هستند. اگر منطقه‌ی حضور و منطقه‌ی مقصد یک کارگر برابر نباشد، کارگر باید با انتخاب مناطق واسطه به مقصد خود برسد.

مطابق الگوریتم شکل ۶، بسته به موقعیت هر کارگر و منطقه‌ی مقصد نهایی، منطقه‌ی بعدی که کارگر باید به آنجا منتقل شود، مشخص می‌شود. همچنین، با حرکت فرد بین مناطق، مقاصد موقت برای انتقال عامل از یک منطقه به منطقه‌ی دیگر در آستانه‌ی ورودی منطقه‌ی بعدی شکل می‌گیرد. هر کارگر به محض اینکه در بررسی محیط متوجه شود که دیگر هیچ مانعی بین او و مقصد نهایی وجود ندارد، بدون توجه به پروتکل حرکت بین مناطق، به سمت مقصد با مسیر مستقیم حرکت می‌کند.

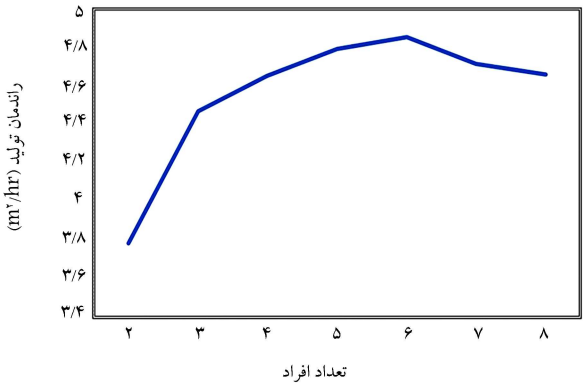
۳. نتایج

در بخش قبل، چگونگی مدل‌سازی یک کارگاه ساختمانی و همچنین اندرکنش‌های وارد بر افراد از محیط و دیگر افراد شرح داده شده است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی از مطالعه‌ی موردی برای پروژه‌ی ساختمانی در شهر مشهد و شرایط آب‌وهوایی مساعد استفاده شده است. به‌دلیل منحصربه‌فرد بودن عوامل مؤثر در راندمان تولید نیروی انسانی (مانند: هندسه‌ی فضای کارگاه، نوع کار، خصوصیات فردی کارگران و شرایط دمایی، آب‌وهوایی و ارتفاعی) در هر پروژه، در بهره‌مندی جامع از مدل، محدودیت وجود دارد. بدین ترتیب، جهت استفاده از مدل ارائه شده برای پیش‌بینی راندمان تولید در هر پروژه‌ی دیگری، باید مدل با شرایط خاص مطالعه‌ی موردی تطبیق داده شود.

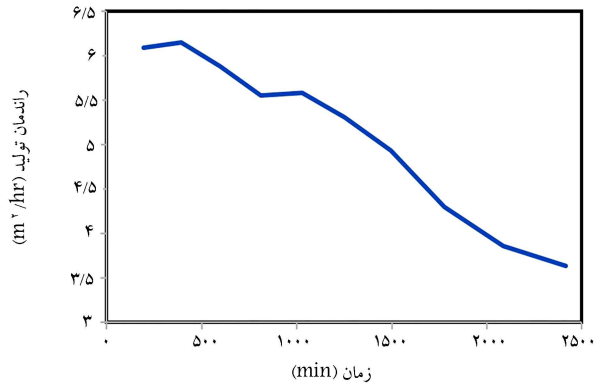
بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در راندمان تولید با آزمایش

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۷. روند تغییرات راندمان تولید با افزایش تعداد کارگران.



شکل ۸. روند تغییرات راندمان تولید طی پیشرفت کار.

سناریوهای مختلف بر روی مدل توسعه‌یافته امکان‌پذیر است. سناریوهای ارائه شده می‌توانند شامل استفاده از تعداد نیروهای مختلف در هر پست، استفاده از محل‌های مختلف برای انجام فعالیت‌های ایستا، و ترتیب و توالی مختلف دیوارها برای ساخت باشند. برای بررسی اثر تعداد و ترکیب افراد در اجرای یک فرایند ساختمانی با درنظرگرفتن محدودیت‌های محیط کارگاه، در مدل ایجاد شده، سناریوهای مرتبط شبیه‌سازی شده‌اند.

در ادامه، ۲۰ سناریو با استفاده از تعداد و چیدمان‌های مختلف کارگران برای اجرای کار، شبیه‌سازی شده‌اند. راندمان تولید متناظر با استفاده از تعداد و ترکیب‌های مختلف افراد برای انتقال بار بین محل انبار مصالح (A) و محل دیوارچینی (C) و محل تولید ملات بنایی(B)، همچنین بین محل تولید ملات بنایی (B) و محل دیوارچینی (C) در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر به‌دست آمده برای راندمان تولید هر سناریو بر حسب مترمربع اجرای دیوار بر ساعت است. به‌طور مثال، در سناریوی S۱، به‌ازاء استفاده از دو کارگر به‌طوری که در هر محل خدمت، یک کارگر فعالیت کند، راندمان تولید معادل ۳/۷۸ مترمربع بر ساعت به‌دست آمده است.

مطابق جدول ۲، مشاهده می‌شود هر چه تعداد کارگران افزایش یافته است، راندمان تولید بیشتر شده است؛ اما این روند تا جایی ادامه یافته است که تعداد بیشتر کارگران سبب افزایش اندرکنش‌های فیزیکی شده و این امر سبب کاهش راندمان تولید شده است. بدین ترتیب، راندمان تولید متناظر با سناریو S۱۱ و استفاده از ۶ نفر و با ترکیب ۴ نفر برای خدمت در مسیر بین منبع مصالح و محل تولید ملات بنایی و دیوارچینی و همچنین ۲ نفر برای خدمت در مسیر بین محل تولید ملات بنایی و محل دیوارچینی، بیشینه بوده و این ترکیب به‌عنوان ترکیب بهینه برگزیده شده است. برای درک راحت‌تر یافته‌ی اخیر، راندمان بهینه‌ی متناظر با تعداد مختلف کارگران در شکل ۷ مشاهده شود.

در حین اجرای پروژه، دیوارهای بیشتری در ساختمان ساخته می‌شوند که باعث افزایش تعداد موانع بر سر راه کارگران می‌شود. با افزایش موانع در محیط، اندرکنش‌های فیزیکی افزایش می‌یابد و کاهش راندمان تولید را به همراه دارد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، یکی از سناریوهای ذکر شده در جدول ۲ انتخاب شده است. براساس نتایج به دست آمده از میان سناریوهای بررسی شده، سناریوی S۴ گزینه‌ی مناسبی بوده است؛ چون طی اجرای مکرر سناریوی اخیر، کمترین نوسان‌ها مشاهده شده است. لازم به ذکر است هرکدام از سناریوهای دیگر نیز قابلیت بررسی دقیق‌تر را دارند. در سناریوی S۴ از ۴ کارگر برای جابه‌جایی مصالح در کارگاه با ترکیب ۲ نفر برای انتقال بار بین منبع مصالح و محل تولید ملات بنایی و محل دیوارچینی و همچنین ۲ نفر برای انتقال ملات از محل تولید به محل دیوارچینی استفاده شده است. در جدول ۳، حجم کار اجرایی پروژه به بسته‌های ۱۰ مترمربعی از دیوارچینی تقسیم شده است که در طول چرخه‌ی عمر پروژه و در بازه‌های زمانی اجرا شده‌اند.

مشاهده می‌شود که در حین اجرای پروژه، مدت زمان اجرای مقدار ثابتی از کار (۱۰ مترمربع)، با پیشرفت پروژه تغییر کرده و تغییر مذکور، روندی افزایشی داشته است. با پیشرفت کار و افزایش تعداد دیوارها و موانع ثابت، اندرکنش فیزیکی میان افراد و محیط بیشتر شده و میزان راندمان تولید اکیپ کاهش یافته است. این موضوع در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود. مدل‌های رایج شبیه‌سازی رویداد گسسته، قابلیت بررسی موانع و مدل‌سازی دقیق رفتار حرکتی نیروهای انسانی در محیط کاری را ندارند؛ ولی همان‌طورکه نشان داده شد، مدل پیشنهادی در نوشتار حاضر، این شانس را به مدیران پروژه می‌دهد تا شبیه‌سازی واقعی‌تری از فرایندهای کاری را داشته باشند.

۴. نتیجه‌گیری

تعداد افراد مشغول در کارگاه، تأثیر زیادی در راندمان تولید فعالیت‌های ساختمانی دارد. از طرفی، پیش‌بینی تأثیر تعداد و ترکیب افراد مشغول در اکیپ‌های کاری در راندمان تولید، پیچیدگی‌های زیادی دارد. پیش‌بینی و بهبود راندمان تولید با استفاده از روش‌های پیشین، به دلیل محدودیت‌های آن‌ها در بررسی اثر اندرکنش افراد حین جابه‌جایی بار در محیط کارگاه امکان‌پذیر نیست. موضوع دیگری که تاکنون دقیقاً بررسی نشده است، تأثیر تغییرات محیط کارگاه ناشی از تغییر موانع ثابت (دیوار) به دلیل پیشرفت پروژه در عملکرد نیروهای انسانی است.

در پژوهش حاضر سعی شده است که تأثیر مستقیم نیروی انسانی در راندمان تولید با مدل‌سازی توأم فرایند پردازش کار در سیستم و اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در یکدیگر هنگام حمل بار در شرایط ازدحام ناشی از افزایش تعداد کارگران و محدودیت‌های محیط کارگاه بررسی شود. بدین منظور چارچوبی توسعه داده شده است که شامل ترکیب دو روش شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی است. چارچوب توسعه داده شده این امکان را فراهم آورد تا بتوان یک یا چند فعالیت را دقیق‌تر شبیه‌سازی کرد. برای نشان‌دادن قابلیت‌های روش ارائه شده، مطالعه‌ی موردی واقعی انتخاب شد که مربوط به دیوارچینی در یک پروژه‌ی ساختمانی بوده است. ضمن پیاده‌سازی روش پیشنهادی در پروژه‌ی موردی، سعی شده است تا بهینه‌ترین تعداد افراد و ترکیب برای اکیپ کاری با درنظرگرفتن اثر اندرکنش‌های فیزیکی افراد حین حرکت در کارگاه به‌دست آید. درنهایت، ایده‌ی توسعه داده شده در نوشتار حاضر با داده‌های یک پروژه‌ی واقعی ارزیابی و به‌وضوح کاهش میزان تولید در اثر ازدحام نیروی انسانی مشاهده شده است. نتایج به‌دست

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۲. نتایج سناریوهای مختلف برای تعداد و ترکیب‌های مختلف افراد در اکیپ کاری.

سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)	سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)
S۱	۲	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۱	۳/۷۸۲۷	S۱۰	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۴	۳/۷۲۳۰
S۲	۳	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۱	۴/۴۷۰۱۹	S۱۱	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۲	۴/۸۵۴۵
S۳	۳	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۲	۳/۶۰۹۳	S۱۲	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۴	۴/۱۴۵۴
S۴	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۲	۴/۶۵۴۲	S۱۳	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۳	۳/۸۳۵۴
S۵	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۱	۴/۰۴۱۴	S۱۴	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۳	۴/۷۱۴۲
S۶	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۳	۳/۶۴۲۴	S۱۵	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۳	۴/۴۷۱۴
S۷	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۲	۴/۷۹۲۳	S۱۶	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۲	۳/۸۷۱۴
S۸	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۳	۴/۲۴۲۳	S۱۷	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۵	۳/۶۷۱۴
S۹	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۱	۳/۶۳۰۵	S۱۸	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۴	۴/۶۵۹۰

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ادامه‌ی جدول ۲.

سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)	سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)
S۱۹	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی	۵	۴/۱۹۰۳	S۲۰	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی	۳	۴/۰۵۹۰
		بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳				بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۵	

جدول ۳. راندمان تولید طی پیشرفت پروژه به‌ازاء مقادیر یکسانی از پیشرفت کار.

ردیف	دیوارچینی (m^2)	زمان (min)	مدت (min)	راندمان تولید (m^2/hr)
۱	۱۰	۱۹۵	۱۹۷	۶/۰۹۱۳۷۰۶
۲	۲۰	۳۹۲	۱۹۵	۶/۱۵۳۸۴۶۲
۳	۳۰	۵۹۶	۲۰۴	۵/۸۸۲۳۵۲۹
۴	۴۰	۸۱۲	۲۱۶	۵/۵۵۵۵۵۶
۵	۵۰	۱۰۲۷	۲۱۵	۵/۵۸۱۳۹۵۳
۶	۶۰	۱۲۵۳	۲۲۶	۵/۳۰۹۷۳۴۵
۷	۷۰	۱۴۹۶	۲۴۳	۴/۹۳۸۲۷۱۶
۸	۸۰	۱۷۷۵	۲۷۹	۴/۳۰۱۰۷۵۳
۹	۹۰	۲۰۸۶	۳۱۱	۳/۸۵۸۵۲۰۹
۱۰	۱۰۰	۲۴۱۶	۳۳۰	۳/۶۳۶۳۶۳۶

آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش تعداد کارگران، راندمان تولید نیز افزایش می‌یابد؛ ولی این روند تا جایی ادامه می‌یابد که تعداد بیشتر کارگران سبب افزایش اندرکنش‌های فیزیکی شود، که درنهایت به کاهش راندمان تولید منتج می‌شود. همچنین راندمان تولید در طول مدت زمان اجرای پروژه تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند بنا به دلایل متعددی باشد؛ اما نتایج نشان می‌دهند که پیشرفت پروژه و به‌دنبال آن ایجاد موانع بیشتر در محیط، به‌خودی خود می‌توانند سبب کاهش راندمان تولید شوند. در مطالعات پیشین تولید در فعالیت‌های ساختمانی با تمرکز بر فرایند و آثار متقابل عامل‌ها ارزیابی شده است، اما به‌دلیل محدودیت‌های روش‌های پیشین، شناسایی رفتارهای حرکتی کارگران و حمل بار در یک کارگاه، تاکنون بررسی نشده بود.

لذا در پژوهش حاضر، ضمن ارائه‌ی رویکردی جدید، امکان مطالعه‌ی دقیق‌تر متغیرهای مؤثر در فرایندهای تولیدی در صنعت و به‌ویژه صنعت ساختمان فراهم شده است. ضمناً برای مطالعات آتی این موضوعات نیز پیشنهاد می‌شود:

- استفاده از روش ترکیبی ارائه شده برای مدل‌سازی تولید در فرایندهای صنعتی مشابه دیگر،
- استفاده از روش ترکیبی ارائه شده برای بررسی سناریوهای موازی‌کاری فعالیت‌ها،
- استفاده از روش ارائه شده برای تحلیل مبادله‌ی زمان ـ هزینه،
- استفاده از روش ارائه شده برای برنامه‌ریزی و طرح‌بندی محیط کارگاه.

پانوشت‌ها

1. discrete event simulation
2. social force modeling
3. social force modelling (SFM)
4. Moselhi
5. Thabet & Beliveau
6. Mallasi
7. Cheung
8. Jang
9. system dynamic
10. Agent-based modelling
11. discrete event simulation
12. Jabri & Zayed
13. Watkins
14. Ben-Alon & Sacks
15. building information modelling
16. cyclic operations network
17. Martinez
18. Hajjar & AbouRizk
19. Hu
20. continues simulation
21. cellular automata
22. velocity-based models
23. continuum models
24. hybrid models
25. behavioral models
26. network models
27. Helbing & Molnar
28. probability density function
29. histogram
30. Chi-squared test
31. agent
32. Helbing

منابع (References)

1. Halpin, D.W. and Riggs, L.S. “Planning and analysis of construction operations”, John Wiley & Sons (1992).
2. Sadeghi, N., Robinson Fayek, A. and Gerami Seresht, N. “Queue performance measures in construction simulation models containing subjective uncertainty”, *Automation in Construction*, **60**, pp. 1-11 (2015).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

3. Abdelmegid, M.A., Gonzalez, V.A., Poshdar, M. "Barriers to adopting simulation modelling in construction industry", *Automation in Construction*, **111**, pp. 103046 (2020).
4. Moselhi, O. and. Khan, Z. "Significance ranking of parameters impacting construction labour productivity", *Construction Innovation*, **12**(3), pp. 272-296 (2012).
5. Randolph Thomas, H. and Horman, M.J. "Fundamental principles of workforce management", *Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(1), pp. 97-104 (2006).
6. Thabet, W.Y. and Beliveau, Y.J. "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, **120**(1), pp. 96-116 (1994).
7. Liao, T.W., Egbelu, P.J., Sarker, B.R. and et al. "Metaheuristics for project and construction management - A state-of-the-art review", *Automation in Construction*, **20**(5), pp. 491-505 (2011).
8. Mallasi, Z. and Dawood, N. "Workspace competition: assignment, and quantification utilizing 4D visualization tools", *in Proceeding of Conference on Construction Application of Virtual Reality, ADETTI/ISCTE Lisbon*, pp. 13-22 (2004).
9. Cheung, S.-O., Tong, T. K.-L. and Tam, C.-M. "Site pre-cast yard layout arrangement through genetic algorithms", *Automation in Construction*, **11**(1), pp. 35-46 (2002).
10. Jang, H.-S., Lee, S. and Choi, S. "Optimization of floor-level construction material layout using genetic algorithms", *Automation in Construction*, **16**(4), pp. 531-545 (2007).
11. Soltani, A.R., Tawfik, H., Goulermas, J.Y. and et al. "Path planning in construction sites: Performance evaluation of the Dijkstra, A, and GA search algorithms", *Advanced Engineering Informatics*, **16**(4), pp. 291-303 (2002).
12. Kunc, M. "System dynamics: A soft and hard approach to modelling", *in 2017 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE*, pp. 597-606 (2017).
13. Siebers, P.-O., Macal, C., Garnett, J. and et al. "Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation", *J. of Simulation*, **4**, pp. 204-210 (2010).
14. Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K. and et al. "Agent-based modeling and simulation in construction", *Proceedings - Winter Simulation Conference*, **2**, pp. 1541-1547 (2003).
15. Khanzadi, M., Nasirzadeh, F., Mir, M. and et al. "Prediction and improvement of labor productivity using hybrid system dynamics and agent-based modeling approach", *Construction Innovation*, **18**(1), pp. 2-19 (2018).
16. Jabri, A. and Zayed, T. "Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations", *Automation in Construction*, **81**, pp. 210-223 (2017).
17. Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N. and et al. "Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(7), pp. 657-667 (2009).
18. Ben-Alon, L. and Sacks, R. "Simulating the behavior of trade crews in construction using agents and building information modeling", *Automation in Construction*, **74**, pp. 12-27 (2017).
19. Kim, K. and Kim, K.J. "Multi-agent-based simulation system for construction operations with congested flows", *Automation in Construction*, **19**(7), pp. 867-874 (2010).
20. Bokor, O., Florez, L., Osborne, A. and et al. "Overview of construction simulation approaches to model construction processes", *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, **11**(1), pp. 1853-1861 (2019).
21. Halpin, D.W. "An investigation of the use of simulation network for modeling construction operations", PhD Dissertation, Univ. of Illinois (1973).
22. Martinez, J "STROBOSCOPE-state and resource based simulation of construction processes", Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1996).
23. Hajjar, D. and AbouRizk, S. "Simphony: an environment for building special purpose construction simulation tools", *Presented at the Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation-a Bridge to the Future -, 2, Phoenix*, Arizona, USA, (1999).
24. AbouRizk, S. "Role of simulation in construction engineering and management", *Journal of Construction Engineering and Management*, **136**(10), pp. 1140-1153 (2010).
25. Sadeghi, N., Fayek Aminah, R. 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 (2016).
26. Baniassadi, F., Alvanchi, A. and Mostafavi, A. "A simulation-based framework for concurrent safety and productivity improvement in construction projects", *Engineering, Construction and Architectural Management*, **25**(11), pp. 1501-1515 (2018).
27. Hu, D., Mohamed, Y., Taghaddos, H. and et al. "A simulation-based method for effective workface planning of industrial construction projects", *Construction Management and Economics*, pp. 1-20 (2017).
28. Taghaddos, H., Heydari, M.H. and Asgari, A. "A hybrid simulation approach for site layout planning in construction projects", *Construction Innovation*, **21**(3), pp. 417-440 (2021).
29. Helbing, D. and Molnar, P. "Social force model for pedestrian dynamics", *Physical Review E*, **51**(5), pp. 4282-4286 (1995).
30. Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H. and et al. "Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk", *Transportation Research part C: Emerging Technologies*, **40**, pp. 143-159 (2014).
31. Zeng, W., Chen, P., Yu, G. and et al. "Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: A hybrid approach", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **80**, pp. 37-70 (2017).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

32. Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A. and et al. "Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions", *Transportation Science*, **39**(1), pp. 1-24 (2005).
33. Mehran, R., Oyama, A. and Shah, M. "Abnormal crowd behavior detection using social force model", *in 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, pp. 935-942 (2009).
34. Li, M., Zhao, Y., He, L. and et al. "The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China", *Safety Science*, **79**, pp. 243-253 (2015).
35. Lei, M., Li, A., Gao, R. and et al. "Experimental study and numerical simulation of evacuation from a dormitory", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **391**(21), pp. 5189-5196 (2012).
36. Lei, W., Li, A. and Gao, R. "Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for a dormitory in China", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **392**(1), pp. 79-88 (2013).
37. Lei, W., Li, A., Gao, R. and et al. "Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **391**(22), pp. 5355-5365 (2012).
38. Ma, L., Chen, B., Qiu, S. and et al. "Agent-based modeling of emergency evacuation in a railway station square under sarin terrorist attack", *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, **8**(02), pp. 1750022 (2017).
39. Hosseini, O. and Maghrebi, M. "Risk of fire emergency evacuation in complex construction sites: Integration of 4D-BIM, social force modeling, and fire quantitative risk assessment", *Advanced Engineering Informatics*, **50**, pp. 101378 (2021).
40. Borshchev, A. and Filippov, A. "From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools", *in Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, 22: Citeseer* (2004).
41. Borshchev, A. "Multi-method modeling", *in Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World, IEEE Press*, pp. 4089-4100 (2013).
42. Dabirian, S., Moussazadeh, M., Khanzadi, M. and et al. "Predicting the effects of congestion on labour productivity in construction projects using agent-based modelling", *International Journal of Construction Management*, pp. 1-24 (2021).
43. Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. "Simulating dynamic features of escape panic", *Nature*, **407**, pp. 487-490 (2000).

Archive of SID.ir