مدل سازی عامل محور و یکپارچه سازی رویکردهای شبیه سازی پویایی سیستم

کیانا احقری *

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی عمران و توسعه، همدان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۹

چکیده

مقدار بهره‌وری در پروژه های ساخت تحت تأثیر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان بوده و از سوی دیگر تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین نیروی انسانی حاضر در پروژه می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدلسازی عامل‌محور، ابزاری نوین برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه می‌گردد. استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و مدلسازی عامل‌محور ما را قادر می‌سازد انواع عوامل مؤثر بر بهره‌وری را به صورت همزمان در نظر بگیریم. در این تحقیق کلیه عوامل و فاکتورهای اثرگذار که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می باشند با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم مدلسازی خواهند شد. در ادامه برای درنظرگیری تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه بر روی بهره‌وری، از رویکرد مدلسازی عامل‌محور استفاده شده است. در نهایت با ترکیب و یکپارچه سازی دو مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه عوامل اثرگذار ارایه می‌گردد.

کلمات کلیدی

بهره‌وری، شبیه‌سازی ترکیبی، شبیه‌سازی پویایی سیستم، مدلسازی عامل محور

Agent-based modeling and integration of system dynamics simulation approaches

Kiana Ahghari *

Department of Civil Engineering, Faculty of Technology & Engineering, University College of Omran & Tosseeh, Hamedan, Iran.

*Corresponding author's email address:
k.ahghari@gmail.com

Abstract

On the one hand, the amount of productivity in construction projects is influenced by different factors with continuous behavior over time, and on the other hand, by the interaction and interaction between the human resources present in the project. In this research a new tool for modeling and predicting productivity in construction projects is presented by integrating the system dynamics simulation method and agent-based modeling method. Using a combination of system dynamics simulation and agent-based modeling enables us to consider a variety of factors affecting productivity simultaneously. In this research, all the effective factors and factors that have continuous behavior over time will be modeled using system dynamics simulation. In the following, factor-based modeling approach is used to consider the effect of the interactions between the manpower present in the project on productivity. Finally, by combining and integrating the two systems of system dynamics simulation and agent-based modeling, a hybrid model for predicting the productivity with all the effective factors is presented.

Keywords

Productivity, Combined Simulation, System Dynamic Simulation, Agent-Based Modeling

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی
مهندسی و مدیریت ساخت

۱-مقدمه

بهره‌وری یکی از مهمترین عوامل اثرگذار بر روی عملکرد پروژه های ساخت می باشد که تأثیر بسیار زیادی بر روی زمان و هزینه این پروژه‌ها دارد. با بهبود بهره‌وری در یک پروژه ساخت می‌توان عملکرد آن پروژه را از جهت اهداف مختلف زمانی، هزینه‌ای و کیفی بهبود بخشید. مقدار بهره‌وری تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثر گذار متعددی می‌باشد و شناسایی و طبقه‌بندی این عوامل بر اساس تاثیری که بر روی بهره‌وری دارند بسیار حائز اهمیت است. چراکه با شناسایی عوامل مؤثر بر بهره‌وری و بکارگیری اقدامات لازم در جهت بهبود این عوامل می‌توان صرفه‌جویی‌های زیادی از حیث منابع استفاده شده در پروژه انجام داد. مقدار بهره‌وری از یکسو تحت تأثیر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان می‌باشد که این فاکتورها شامل عواملی همچون دمای هوا، مهارت کارگران، میزان خستگی و ... می-باشد. از سوی دیگر مقدار بهره‌وری تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین گروه های کاری مختلف حاضر در پروژه می‌باشد. با مروری بر ادبیات موضوع می تواند دید که تا کنون تحقیقات چندی در زمینه بررسی میزان تاثیر عوامل مختلف اثرگذار بر روی بهره وری انجام شده است. سونگ و ابوریزک[۱] با استفاده از تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی پیشامد گسسته[1] ، بهره‌وری نیروی انسانی را مدل‌سازی نموده اند. ازلدین و شرارا[۲] از طریق بررسی کارهای انجام‌شده قبلی، فاکتورهای موثر بر بهره‌وری در فعالیت‌های بتن‌ریزی را شناسایی نمودند. سپس با استفاده از سه شبکه عصبی مصنوعی برای سه عملیات قالب‌بندی، آرماتور گذاری و بتن‌ریزی، نرخ واحد انجام کار توسط منابع را پیش‌بینی نمودند. زاید و هالپین [۳] نیز با ارائه مدلی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی، به شناسایی برخی راهکارهای بهبود بهره‌وری در صنعت ساخت

پرداخته‌اند. گریک و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۵ عملکرد دو روش شبکه عصبی مصنوعی متفاوت را برای مدلسازی بهره‌وری نیروی انسانی مقایسه کردند. پوریر و همکارانش [۵] اثر استفاده از مدلسازی اطلاعات ساختمان [۲] را بر بهره‌وری نیروی انسانی طی یک تحقیق عملی که با همکاری یک پیمانکار انجام شد، بررسی کرده‌اند. کیسی و همکاران [۶] از یک روش دوسویه برای تخمین بهره‌وری بهینه در عملیات‌های ساختمانی استفاده کرده‌اند. مانی و همکاران [۷] با استفاده از یک روش دوگانه تلاش نمودند تا بهره‌وی ایده‌آل (حداکثر کار تئوری انجام شده در واحد زمان که در شرایط ایده‌آل بدست می‌آید) را تخمین بزنند.

جرکاس [۸] در سال ۲۰۱۲ اثر ویژگی‌های عملیاتی فعالیت مانند هندسه عضو و ابعاد آرماتور را بر بهره‌وری کارگران آرماتوربند بررسی و کمی نموده است. آرش‌پور و آرش‌پور[۹] در سال ۲۰۱۵ اثرات تغییر در جریان کار ایجاد شده توسط دوباره‌کاری و تغییر مقادیر کار را بر بهره‌وری تحلیل کرده‌اند. ایبز و همکاران [۱۰] تغییرات کار که از طرف کارفرما و یا پیمانکار به پروژه تحمیل می‌شود و تأثیرات منفی آن از قبیل کاهش بهره‌وری و ایجاد وقفه‌های کاری را به وسیله نمودارهای علت و معلولی و با استفاده از رویکرد پویایی سیستمی مدل‌سازی نمودند. گودرام و همکاران [۱۱] تحقیقی در خصوص ارتباط بین تغییر در تکنولوژی مصالح و بهره‌وری نیروی انسانی انجام دادند. در مطالعاتی که توسط واتکینز و همکاران [۱۲] در خصوص بهره‌وری نیروهای کارگاهی و ارتباط آن با فضای کار (فشردگی فضای انجام فعالیت‌ها در کارگاه) انجام شد، رابطه بین این دو عامل توسط رویکرد عامل‌محور بررسی شد. مدزلی والجبوری[۱۳] در خصوص مدل‌سازی بهره‌وری و فاکتورهای موثر بر آن با استفاده از روش پویایی سیستمی مطالعه‌ای را انجام دادند. نصیرزاده و نوجه دهی[۱۴] پس از شناسایی فاکتورهای موثر بر بهره‌وری با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و براساس نظر خبره‌ها، نحوه تأثیر این عوامل بر روی بهره‌وری را با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم مدل‌سازی نمودند.

با مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه بهره‌وری می‌توان دید که در اکثر تحقیقات انجام شده قبلی، تنها اثر یک فاکتور خاص بر روی بهره‌وری ارزیابی شده است. در دو تحقیق آخر، که اثر بیش از یک فاکتور بر روی بهره وری بررسی شده است نیز ، تنها فاکتورهای اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان در نظر گفته شده اند و از تاثیرات مهم ناشی از تعاملات و اندرکنشهای بین گروه های کاری مختلف درگیر در پروژه صرفنظر شده است. لذا نیاز به ارائه مدلی جامع که قادر به درنظر گیری تأثیرات همزمان هر دو دسته عوامل فوق‌الذکر باشد کاملاً مشهود است.

در این تحقیق برای رفع مشکلات فوق‌الذکر با استفاده از یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدلسازی عامل‌محور، ابزاری نوین و جدید برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه می‌گردد. در مطالعه حاضر ابتدا فاکتورهای موثر بر میزان بهره‌وری در پروژه‌های ساخت شناسایی می‌گردند. سپس کلیه عوامل و فاکتورهای اثرگذار که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می باشند با استفاده از روش شبیه‌سازی پیوسته پویایی سیستم مدلسازی خواهند شد. در ادامه برای درنظرگیری تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه بر روی بهره‌وری، از رویکرد مدلسازی عامل‌محور استفاده شده است. در نهایت با ترکیب و یکپارچه سازی دو مدل شبیه‌سازی پیوسته پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه عوامل اثرگذار ارایه می‌گردد.

۲-روش تحقیق

همانطور که پیشتر گفته شد در این تحقیق با استفاده از یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدلسازی عامل‌محور، ابزاری نوین و جدید برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه می‌گردد. در قسمت ذیل ابزارهای شبیه سازی استفاده شده در این تحقیق به تفصیل معرفی می گردند. برای این منظور ابتدا دو روش شبیه سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور معرفی گردیده و سپس این دو روش شبیه سازی ترکیب گردیده و روش شبیه سازی ترکیبی جدید استفاده شده در این تحقیق معرفی می‌گردد.

۲-۱- رویکرد شبیه سازی پویایی سیستم

پویایی سیستم در اواخر دهه ۱۹۵۰ در دانشگاه MIT توسط فارستر که یک مهندس برق بود و در زمینه مکانیزم خودکار برای راه‌اندازی ماشین‌ها کار می‌کرد، معرفی شد[۱۵]. پویایی سیستم از حلقه‌های بازخوردی و انباره و جریان‌ها برای مدل‌سازی رفتار سیستم‌های پیچیده در طول زمان استفاده می‌کند و با چرخه‌های بازخوردی داخلی و تأخیرهای زمانی که بر رفتار کل سیستم اثر می‌گذارند مقابله می‌کند[۱۶]. پویایی سیستم یک رویکرد برای مدل‌سازی و شبیه-سازی سیستمها با کمک معادلات دیفرانسیل معمولی است[۱۷]. شیریتز و همکاران[۱۷] پویایی سیستم را به عنوان یک رویکرد برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پویای غیرخطی که هدف از آن درک ساختار یک سیستم و استنتاج رفتار از آن است معرفی نمودند. آن‌ها روی فهمیدن به عنوان یک مزیت رویکرد پویایی سیستم تاکید می‌کنند زیرا این رویکرد برای توسعه سیاست‌هایی که عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد نیاز است. در مورد مفهوم بازخورد می‌توان گفت، وقتی خروجی، دوباره به عنوان ورودی استفاده می‌شود یک بازخورد اتفاق می‌افتد که سیستم را قادر به ایجاد رفتار درونی می‌کند [۱۵]. در روش پویایی سیستم، دو نوع بازخورد بنام حلقه های مثبت و منفی وجود دارند. مدل‌های پویایی سیستم با در نظر گرفتن فرایندهای بازخورد موجود، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازد[۱۸]. حلقه‌های منفی در اصل رفتار هدف محور را نشان می‌دهند و حلقه‌های مثبت تمایل دارند ورودی را به سمت رشد نمایی یا از بین رفتن هدایت کنند[۱۵]. پویایی سیستم برای پروژه‌های ساخت با پویایی زیاد مناسب است و می‌تواند به آسانی برای مرتبط کردن موضوعات مختلف یک پروژه به کار برده شود[۱۹].

۲-۲- رویکرد مدلسازی عامل محور

مدل‌سازی عامل محور یا سیستم‌های چند عامله، در بر دارنده یک مجموعه از اعضا (عامل‌ها) می باشد که توسط ویژگی‌هایی منحصر

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی

بفرد مشخص‌شده‌اند و برطبق قوانین مناسب تعریف شده در یک محیط، با هم تعامل و اندرکنش دارند[۲۰]. عامل‌ها بر اساس اندرکنشی که با همدیگر و محیط اطرافشان دارند و همچنین قوانینی که دنبال می‌کنند رفتار مناسب را از خود نشان می‌دهند و یا خروجی مناسب را تولید می‌کنند رویکرد عامل محور، روشی مناسب برای توصیف سیستم‌های پیچیده است زیرا به جای اینکه هر واحد را همسان در نظر بگیرد، آنرا به صورت غیرهمسان در نظر گرفته و همچنین به عامل‌ها اجازه می‌دهد به صورت پویا رفتار نمایند[۱۲]. شبیه‌سازی عامل محور به مدلسازی اطلاق می‌شود که در آن یک روند پویا از اندرکنش‌های بین عامل‌ها به صورت مکرر طی زمان شبیه‌سازی می گردد، مشابه آنچه در روشهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدلسازی پیشامد گسسته و انواع دیگر روش‌های شبیه‌سازی سنتی اتفاق می‌افتد[۲۱, ۲۲]. رفتارهای بسیار پیچیده می‌تواند از اندرکنش‌های رقابتی بین عامل‌ها که توسط قدرت پردازش کامپیوترها قابل مدلسازی شده‌اند ناشی شود[۲۳]. هدف از شبیه‌سازی عامل‌محور، دنبال نمودن اندرکنش‌های بین عوامل در محیط مجازی‌شان و درک روندهایی است که طی آن الگوهای کلی رفتاری پدیدار می‌شوند [۲۳, ۲۴].

۳-۲- مقایسه رویکردهای شبیه سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور

به نظر می‌رسد رویکرد پویایی سیستم در بسیاری از مواقع دچار مشکلاتی می‌شود و رویکرد عامل محور باید به حل این مشکلات کمک کند[۲۵]. البته این گفته به این معنی نیست که رویکرد پویایی سیستم ضعیف‌تر از رویکرد عامل محور است بلکه چه بسا روش پویایی سیستم، بسیار پخته‌تر از روش مدلسازی عامل محور که هنوز در اوایل راهش است می باشد[۲۵, ۲۶]. در حقیقت هر دو رویکرد شبیه سازی پویایی سیستم و عامل محور دارای نقاط ضعف و قوتی می‌باشند و می‌توان از آن‌ها برای تکمیل یکدیگر استفاده نمود[۲۵]. با استفاده از رویکرد شبیه سازی ترکیبی، اجتناب از مشکلات و نقصهای دو روش امکان پذیر شده و می‌توان مدل‌های واقعی‌تری تولید نمود[۲۵]. تفاوت‌های میان مدل‌سازی پویایی سیستم و مدل-سازی عامل محور در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مقایسه رویکردهای شبیه سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور [۱۵]

رویکرد پویایی سیستم	رویکرد عامل محور	ویژگی های مورد مقایسه
بالا به پایین	پایین به بالا	زاویه دید
حلقه بازخوردی	عامل فردی	واحد ساختار اصلی
ساختارسیستم	قوانین عامل	واحد تحلیل
تجمعی	فردی	سطح مدل‌سازی
ثابت	غیرثابت	ساختار سیستم
پیوسته	گسسته یا پیوسته	زمان

۳-مدلسازی ترکیبی

ایده ایجاد مدل‌های شبیه سازی ترکیبی در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی ایجاد شد. ترکیب دو روش مختلف شبیه سازی زمانی می‌تواند مفید باشد که اجازه ترکیب ویژگی‌هایی که مربوط به یک روش مجزا است داده شود[۱۵]. ترکیب دو روش شبیه سازی می‌تواند ما را بیشتر به واقعیت نزدیک نماید، همان طور که می‌تواند روش‌های متناسب از رویکردهای مختلف را ترکیب کند گرچه قدرت توضیحی مدل را کاهش می‌دهد[۲۷]. ترکیب رویکرد پویایی سیستم با مدلسازی عامل محور به ما این توانایی را می‌دهد که توانایی‌های دو رویکرد را ترکیب کنیم[۱۷]. در حقیقت ترکیب پویایی سیستم با رویکرد عامل محور، ترکیبی از روش‌ها برای کاهش پیچیدگی اولیه مدل است[۱۷].

به نظر می‌رسد سوینرد و مک‌نات[۲۸] کامل‌ترین طبقه‌بندی را برای شبیه‌سازی ترکیبی با استفاده از روشهای پویایی سیستم و عامل محور ارائه داده‌اند. آن‌ها روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرده‌اند که شامل: یکپارچه شده[۳]، واسط[۴] و ترتیبی[۵] می‌باشد.

- در روش یکپارچه شده، گروه یکپارچه شده و بازخورد بین مدل‌های عامل‌محور و پویایی سیستم را برای ارائه یک روند پیوسته و جاری ترکیب می‌نماید.
- در روش واسط، مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور در گروه واسط ممکن است به صورت موازی اجرا شوند و خروجی آن‌ها برای نشان دادن خروجی مطلوب به عنوان تابعی از زمان ترکیب شود.
- در روش ترتیبی، مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور باید ابتدا اجرا شوند و خروجی یکی به عنوان ورودی استفاده شود.

سوینرد و مک‌نات گروه یکپارچه شده را برای اعمال مفهوم شبیه‌سازی ترکیبی به ۳ دسته به شرح زیر تقسیم کردند:

- یک مدل پویایی سیستم درون عامل‌های یک مدل عامل محور ساخته شود. (عامل‌ها با ساختار درونی کامل)
- یک سطح در مدل پویایی سیستم استفاده شود تا یک مقدار تجمعی از یک مدل عامل محور را درون خود جای دهد. (عامل‌های انبارشده)
- یک مقدار تجمعی از یک مدل عامل محور برای اثر گذاشتن بر یک فاکتور، درون یک مدل پویایی سیستم استفاده شده است. (پارامترها با رفتار ظاهر شونده)

محققان مزایای مختلفی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور بیان کرده‌اند. شیریتز و گلوبر[۱۷] بیان می-کنند که یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستم و رویکرد مدلسازی عامل‌محور باعث ترکیب نقاط قوت دو رویکرد می‌شود. لورنز و جوست[۲۷] بیان کردند که یکی از مزایای عمده‌ای که می‌توان طی یکپارچه‌سازی رویکرد عامل‌محور درون پویایی سیستم بدست آورد خاصیت مکانی است که به سادگی می‌توان با دادن متغیرهای x و y به هر عامل اعمال نمود. انواع مختلفی از مفاهیم در رویکرد عامل‌محور برای افزودن اطلاعاتی از مکان عامل‌ها وجود دارد[۲۷]. لاتیلا و همکاران[۲۵] مزایایی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور برای ایجاد یک سیستم خبره[۶] بیان نمودند. مصطفوی و همکاران[۲۹] اعتقاد دارند استفاده همزمان از

رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور مزایایی از ترکیب توانمندی-های هر دو مدل تا شبیه‌سازی فعالیت‌های عوامل در ترکیب با حرکت‌های مهم و فاکتورهای دیگر را به همراه دارد. دوگان[۳۰] اعتقاد دارد رویکرد عامل‌محور، رویکرد پویایی سیستم را به عنوان یک روش مستحکم و خوب تعریف‌شده برای مدل کردن رفتار واحدهای تصمیم‌گیر به‌کاربرده است.

۴-مدلسازی بهره وری با استفاده از روش شبیه سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور

در این بخش از مقاله، برای نشان دادن قابلیت‌ها و توانایی‌های روش شبیه سازی ترکیبی پیشنهاد شده در این تحقیق، به مدلسازی بهره وری با استفاده از روش پیشنهادی پرداخته می شود. برای این منظور ابتدا ضرورت ایجاد مدل ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور تبیین گردد. در ادامه جزئیاتی از هر کدام از مدل‌های پویایی سیستم و مدل عامل‌محور ارائه می‌شود. سپس نحوه ترکیب این دو مدل برای رسیدن به هدف تحقیق شرح داده می‌شود.

۴-۱-ضرورت استفاده از دو رویکرد مدلسازی پویایی سیستم و عامل محور

محققان مختلف، مطالعاتی را برای شناسایی متغیرهایی که روی بهره‌وری در صنعت ساخت اثر می‌گذارند انجام داده‌اند. برای مدلسازی و پیش‌بینی بهره‌وری لازم است که اثرات تمامی این متغیرهای اثرگذار در نظر گرفته شوند. مقدار بهره‌وری تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثر گذار متعددی می‌باشد. مقدار بهره‌وری از یکسو تحت تأثیر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان بوده و از سوی دیگر مقدار بهره‌وری تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عامل‌های[۷] حاضر در پروژه می‌باشد. در نظر گرفتن اثرات چندین متغیر با رفتار پیوسته در طول زمان یکی از مهم‌ترین ویژگی-های رویکرد پویایی سیستم است. بنابراین استفاده از رویکرد پویایی سیستم اجتناب‌ناپذیر است. برای در نظر گرفتن اثرات ناشی از تعاملات بین عوامل موجود در کارگاه مانند فشردگی فضای کاری، رویکرد پویایی سیستم جوابگو نبوده و باید از یک رویکرد شبیه سازی دیگر استفاده شود. رویکرد عامل‌محور مناسب‌ترین روش‌ها برای در نظرگیری اثرات ناشی از تعاملات بین عوامل موجود در کارگاه می باشد. بنابراین استفاده همزمان از هر دو رویکرد شبیه سازی پویایی سیستم و عامل محور اجتناب‌ناپذیر است. لذا برای مدلسازی بهره وری با در نظر داشتن تمامی فاکتورهای اثرگذار، نیاز به استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور می‌باشد.

۴-۲-توسعه مدل پویایی سیستم عوامل موثر بر بهره وری نیروی انسانی

همانطور که پیشتر گفته شد مقدار بهره‌وری نیروی انسانی، تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثر گذار متعددی می‌باشد. مقدار بهره‌وری از یکسو تحت تأثیر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان می‌باشد که این فاکتورها شامل عواملی همچون دمای هوا، مهارت کارگران، میزان خستگی و ... می‌باشد. از سوی دیگر مقدار بهره‌وری تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه می‌باشد.

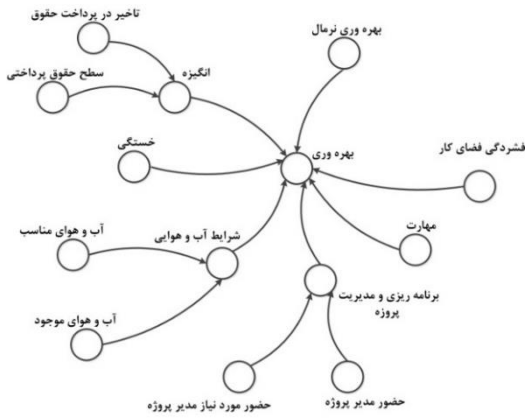
برای ساختن مدل شبیه سازی پیوسته بهره‌وری نیروی انسانی، ابتدا کلیه فاکتورها و عوامل اثرگذار بر میزان بهره‌وری نیروی انسانی که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می‌باشند با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای شناسایی شدند و برای بررسی نهایی فاکتورهای موثر و تطبیق و بومی سازی آن‌ها، مصاحبه‌هایی با مدیران و کارشناسان ارشد تعدادی از شرکت‌های پیمانکاری انجام گردید. جدول شماره ۲ لیست نهایی مهمترین فاکتورهای اثرگذار بر بهره وری نیروی انسانی که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می باشند را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ عوامل پیوسته موثر بر بهره وری

ردیف	نام عامل شناسایی شده
۱	فشردگی فضای کار
۲	مهارت
۳	مدیریت و برنامه ریزی پروژه
۴	شرایط آب و هوایی
۵	خستگی
۶	انگیزش کارگران
۷	تاخیر در پرداخت حقوق
۸	سطح حقوق پرداختی

پس از تعیین مهمترین فاکتورهای اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان، تعاملات پیچیده موجود بین این عوامل شناسایی گردیده و نحوه تاثیر این عوامل بر میزان بهره وری نیروی انسانی با در نظر گرفتن تعاملات پیچیده موجود بین آن‌ها به صورت کیفی و با استفاده از حلقه‌های علت و معلولی شبیه سازی گردید (شکل ۱). در ادامه روابط و تعاملات بین متغیرها با استفاده از روابط ریاضی تعیین گردیده و مدل کمی پیش بینی بهره وری تهیه شد. حال با استفاده از مدل شبیه ساز پویایی سیستمی توسعه داده شده، می‌توان میزان تاثیر کلی هر عامل با رفتار پیوسته در طول زمان را بر روی میزان بهره وری با در نظر داشتن اثرات مستقیم و غیر مستقیم ناشی از آن عامل، در محیطی مجازی شبیه سازی نمود[۱۴].

همانطور که در شکل شماره ۱ مشخص شده است، میزان بهره وری در طول پروژه برمبنای بهره وری شرایط نرمال و نیز تاثیرات ناشی از فاکتورهای متعدد اثرگذار بر میزان بهره وری که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می‌باشند (همچون فشردگی فضای کاری، مهارت نیروی انسانی، خستگی نیروی انسانی، تاثیرات آب و هوایی، انگیزه نیروی کار و شرایط برنامه ریزی و مدیریت پروژه) و با درنظرگرفتن تعاملات پیچیده بین آن‌ها مدلسازی می‌گردد.



شکل ۱ مدل پویایی سیستم عوامل تاثیر گذار بر بهره وری نیروی انسانی [۱۴]

۳-۴-مدل عامل محور عوامل موثر بر بهره وری نیروی انسانی

همانطور که پیشتر گفته شد مقدار بهره‌وری نیروی انسانی علاوه بر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان، تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه می‌باشد. در این تحقیق برای درنظرگیری تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه بر روی بهره‌وری، از رویکرد مدلسازی عامل-محور استفاده شده است و تاثیر تداخلات کاری بین نیروی انسانی که ناشی از تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه می‌باشد بر روی بهره وری تعیین می‌گردد.

مدل شبیه‌سازی عامل‌محور پیشنهادی، برای پیش‌بینی بهره‌وری گروه‌های کاری و زمان تکمیل پروژه بر روی یک پروژه واقعی به کارگرفته می‌شود پروژه مورد مطالعه مربوط به بتن‌ریزی یک پی گسترده با حجم بتن ریزی۴۰۰ مترمکعب است. مساحت پی ۴۰۰ مترمربع و ضخامت بتن‌ریزی ۱ متر می‌باشد و بتن‌ریزی فونداسیون در قطعات با ابعاد ۲متر در ۲ متر انجام می‌شود. عامل‌ها[8] نیز گروه-های کاری بتن‌ریز درنظر گرفته شده‌اند.

۴-۴-چگونگی ارتباط بین دو مدل شبیه سازی پویایی سیستم و عامل محور

فاکتورهای اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان که در شکل شماره۱ نشان داده شده است بر روی مقدار بهره وری تاثیر دارند. مقدار بهره وری که به عنوان خروجی مدل پویایی سیستم توسعه داده شده، شبیه سازی و تعیین می‌گردد خود به عنوان ورودی مدل عامل محور عمل نموده و به مدل عامل محور فرستاده می‌شود. چرا که مقدار بهره وری، بر رفتار هر گروه‌کاری اثرگذاشته و بنابراین مدل پویایی سیستم مقدار محاسبه شده این متغیر را به هر گروه‌کاری (عامل) می‌فرستد و رفتار و حرکت هر گروه‌کاری بر اساس مقدار بهره وری محاسبه شده تعیین شده و اندرکنش گروه‌های‌کاری با یکدیگر در محیط بر این اساس تعیین می گردد. با توجه به توضیحات فوق الذکر می‌توان نتیجه گرفت که مدل پویایی سیستم، یک دید پایین به بالا در مقایسه با عامل‌ها دارد و هر عامل یک دید بالا به پایین در مقایسه با مدل پویایی سیستم خودش دارد. بنابراین مدل عامل‌محور در سطح بالاتری از مدل پویایی سیستم قرار دارد.

از سوی دیگر، گروه‌های کاری(عامل‌ها) در سایت (محیط) با یکدیگر اندرکنش داشته که این اندرکنش‌ها باعث تداخلات کاری بین نیروی انسانی می شود که خود بر روی بهره وری تاثیر منفی خواهد داشت. لذا متغیر تداخلات کاری بین نیروی انسانی، مقدار بهره وری نیروی انسانی را در مدل پویایی سیستم مربوط به هر یک از گروه‌های کاری تحت تاثیر قرار خواهد داد. از طرف دیگر تغییر در هر متغیر مدل پویایی سیستم متغیرهای دیگر به خصوص بهره‌وری را تغییر می‌دهد. بهره‌وری تغییر داده‌شده، مجددا نرخ انجام کار هر گروه کاری راتغییر می‌دهد و این مطلب، رفتار گروه‌های کاری در محیط را تغییر می‌دهد و چرخه مذکور مجددا تکرار می شود. بنابراین مشاهده می گردد که یک جریان اطلاعات دوطرفه بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل-محور وجود دارد.

به علت اینکه در گروه شبیه‌سازی واسط از طبقه‌بندی سوینرد و مک‌نات[۲۸] در حین انجام شبیه‌سازی بین مدل‌ها اطلاعات منتقل نمی‌شود، با توجه به انتقال اطلاعات بین مدل‌ها که در مرحله قبل اشاره شد، بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور ارتباط وجود دارد و این مدل‌ها به هم متصل هستند، بنابراین گروه شبیه‌سازی آن‌ها نمی‌تواند گروه واسط باشد. با توجه به تفسیر ارائه‌شده در مسیر جریان اطلاعات واضح است که یک رابطه دو طرفه بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور وجود دارد. این نکته نشان می‌دهد که گروه یکپارچه‌شده از طبقه‌بندی سوینرد و مک‌نات[۲۸] بهترین گروه برای جستجوی هدف است. سطح مدل عامل‌محور، بالاتر از مدل پویایی سیستم است. در میان انواع ترکیبی از گروه یکپارچه‌شده، تنها نوعی که مدل عامل‌محور در سطح بالاتری از مدل پویایی سیستم است، «عامل با ساختار درونی کامل» می‌باشد که در این تحقیق استفاده شده است.

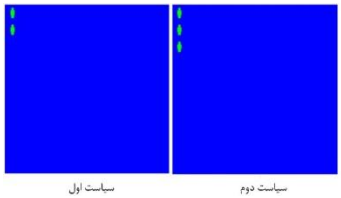
برای رسیدن به هدف تحقیق، متغیرهای میانجی برای انتقال دوطرفه اطلاعات از مدل عامل‌محور به مدل پویایی سیستم باید انتخاب شود. در این تحقیق متغیرهای میانجی شامل دو متغیر فشردگی فضای کار و بهره‌وری می‌باشد. در مدلسازی انجام شده برای پیش‌بینی بهره‌وری، ابتدا مدل عامل‌محور مقدار فشردگی فضای کار را با توجه به فاصله بین گروه‌های کاری در هر زمان محاسبه نموده و مقدار فشردگی فضای کار محاسبه شده به مدل پویایی سیستم فرستاده می‌شود. مدل پویایی سیستم نیز در ادامه مقدار جدید بهره‌وری را با توجه به ورودی گرفته شده از مدل عامل‌محور (مقدار فشردگی فضای کار) محاسبه می‌نماید. سپس مقدار بهره‌وری جدید محاسبه شده از مدل پویایی سیستم به هر گروه‌کاری (عامل) برای اصلاح نرخ کار فرستاده می‌شود و این چرخه مجددا تکرار می‌شود.

۵-شبیه سازی عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن ریزی با استفاده از روش مدلسازی ترکیبی پیشنهادی

با استفاده از روش مدلسازی ترکیبی پیشنهادی در این تحقیق می-توان عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن‌ریزی را پیش از بکارگیری در یک محیط مجازی ارزیابی نمود. در پروژه نمونه مورد مطالعه در این تحقیق، پس از بررسی های انجام شده با متخصصین

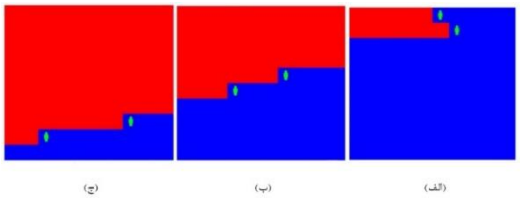
JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی

اجرایی پروژه، دو سیاست جایگزین مختلف برای انجام بتن‌ریزی فونداسیون بر اساس تعداد گروه‌های کاری و مکان اولیه این گروه ها تعریف شده است. سیاست اول شامل استفاده از دو گروه‌کاری مختلف می‌باشد که مکان اولیه استقرار آن‌ها در بالای پی می‌باشد و دو گروه کاری از دو نقطه نزدیک یکدیگر کار خود را شروع می‌کنند (شکل۲). سیاست دوم شامل استفاده از سه گروه‌کاری می‌باشد که مکان اولیه استقرار آن‌ها درنیز در بالای پی در نظر گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲مکان اولیه گروه های کاری در دو سیاست بتن ریزی

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط هرنر و تالحونی[۳۱] و توماس و اسمیت[۳۲] برای حداکثر بهره‌وری نیروی انسانی در کارگاه های ساخت، نیروهای کار به ۷۷ تا ۹۲ مترمربع مساحت برای هر فرد نیاز دارند[۳۳]. بر اساس مساحت مشخص‌شده برای حداکثر بهره‌وری، شعاع حداقل فضای کاری لازم برای حداکثر بهره‌وری ۴,۹۵ متر تا ۵,۴ متر می‌باشد. در این مطالعه شعاع حداقل فضای کاری لازم برای حداکثر بهره‌وری ۵ متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب اگر فاصله کارگران صفر باشد حداکثر فشردگی فضای کار وجود دارد و گروه‌های کاری نمی‌توانند کارشان را انجام دهند. اگر فاصله گروه‌های کاری مساوی و یا بیشتر از ۵ متر باشد حداکثر اثربخشی را دارند و بهره‌وری بر اثر فشردگی فضای کار کاهش نمی‌یابد. بنابراین در این تحقیق یک ضریب برای در نظر گیری اثر فشردگی فضای کار بر روی بهره‌وری تعریف شد که اثر فشردگی فضای کار را روی بهره‌وری اعمال می‌کند. ضریب فشردگی فضای کار، یک متغیر با مقادیر بین صفر و ۱ فرض می‌گردد. اگر فاصله گروه‌های کاری صفر باشد، هیچ‌کدام از آن‌ها نمی‌توانند کار خود را انجام دهد و ضریب فشردگی مقدار صفر گرفته و بهره‌وری را به صفر تقلیل می‌دهد. و اگر فاصله گروه‌های کاری مساوی یا بیشتر از ۵ متر باشد، ضریب فشردگی ۱ در نظر گرفته می‌شود و اثر کاهشی بر روی بهره‌وری نخواهد داشت. بهره‌وری اولیه گروه‌های کاری در سیاست‌های مختلف در جدول شماره ۳ ارائه شده است.



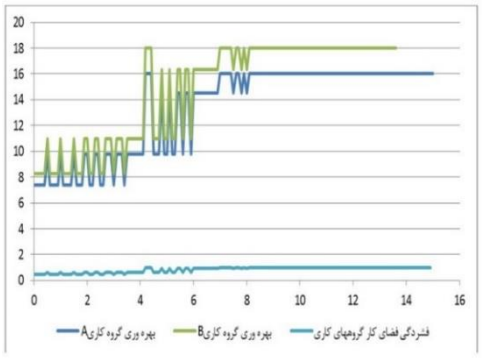
شکل ۳روند انجام بتن ریزی در سیاست اول بتن ریزی

جدول ۳ بهره وری اولیه در گروه های کاری برای سیاست های مختلف بتن ریزی

سیاست های بتن‌ریزی	گروه های کاری	بهره‌وری اولیه (مترمکعب بتن ریخته شده در ساعت)
سیاست اول	گروه‌کاری	۱۴
	گروه‌کاری	۱۸
سیاست دوم	گروه‌کاری	۱۶
	گروه‌کاری	۱۸
	گروه‌کاری	۱۴

۵-۱- نتایج شبیه سازی عملکرد سیاست اول بتن ریزی

همانطور که ذکر شد، در این سیاست، دو گروه کاری عملیات بتن ریزی را از بالای پی شروع می‌نمایند. نقاط شروع ابتدایی این گروه‌ها در کنار یکدیگر قرار دارد و هر گروه‌کاری شروع به بتن ریزی یک نوار عرضی (ردیف) می نماید و در صورتی که یک گروه‌کاری در یک نوار مشغول به کار باشد، گروه دیگر به نوار بعدی جهت انجام بتن‌ریزی منتقل می‌شود. با توجه به فاصله گروه‌ها از یکدیگر، در شروع بتن-ریزی، فشردگی فضای کار بر عملکرد آن‌ها اثری می‌گذارد و بهره‌وری آن‌ها کمتر از حداکثر مقداری است که می‌توانند داشته باشند. در شکل شماره ۳ روند انجام بتن‌ریزی در سیاست اول ارائه شده است. در طول فرآیند بتن ریزی، فاصله بین گروه‌های کاری تغییر می‌کند که این امر باعث تغییر در سطح فشردگی فضای کاری که هرکدام از گروه‌ها تجربه می‌کنند می‌شود و درنتیجه بهره‌وری تغییر می‌کند. روند تغییر بهره‌وری و فشردگی فضای کار گروه‌های کاری در سیاست اول بتن‌ریزی در شکل شماره ۴ دیده می‌شود.



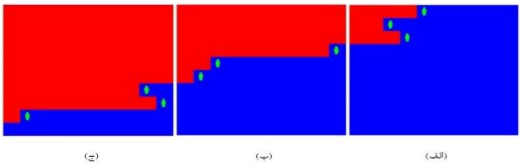
شکل ۴ روند تغییر بهره وری و فشردگی فضای کار در گروه های کاری در سیاست اول بتن ریزی

۵-۲-نتایج شبیه سازی عملکرد سیاست دوم بتن ریزی

در این سیاست یتن‌ریزی، سه گروه کاری با همان روش و نحوه حرکتی که در سیاست اول داشتیم شروع به انجام کار کرده‌اند، نشان داده شده است. فشردگی فضای کاری که هرکدام از گروه‌ها تجربه می‌کند ناشی از فاصله‌ای است که با دو گروه دیگر دارد. روند انجام بتن‌ریزی در سیاست دوم بتن‌ریزی در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. مقدار ضریب فشردگی فضای کار برای هرکدام از گروه‌ها برابر

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی

است با حاصلضرب ضریب فشردگی ناشی از فاصله با هرکدام از گروه-های دیگر. همانطور که در شکل‌های شماره ۶ تا ۸ مشاهده می گردد بر خلاف سیاست اول بتن ریزی، نقاط اوج و افت بهره‌وری و فشردگی فضای کار هیچکدام از گروه‌ها در سیاست دوم کاملا با یکدیگر یکسان نیست زیرا در سیاست اول بتن ریزی، هر کدام از گروه‌ها تنها بر فشردگی فضای کار یک گروه اثر می‌گذاشت درحالی که در سیاست دوم بر هرکدام از گروه‌های کاری، دو گروه دیگر اثر می‌گذارند.

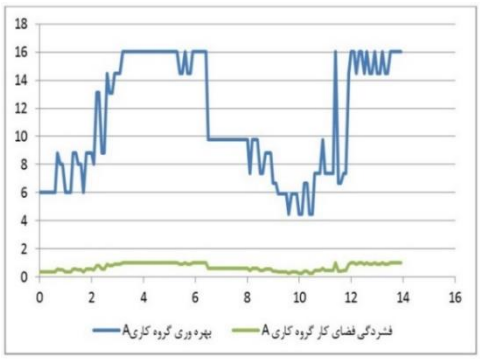


شکل ۵روند انجام بتن ریزی در سیاست دوم بتن ریزی

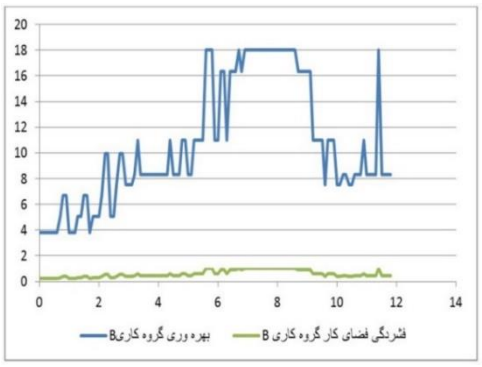
همانطور که در شکل ۵(ج) مشاهده می‌شود در مراحل انتهایی بتن-ریزی، تنها یک ردیف برای بتن‌ریزی باقی مانده است که هنوز هیچ گروه‌کاری مشغول به کار در آن نشده است. در این حالت از گروه‌های مشغول به کار در ردیف‌های بالاتر، گروهی که کار خود در آن نوار را زودتر به اتمام رساند به نوار بعدی بتن‌ریزی نشده، منتقل می شود و یکی از گروه‌ها با توجه به اینکه نوار بتن‌ریزی نشده ای باقی نمانده، محیط کار را ترک می‌کند. با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ و همچنین جدول شماره ۴، گروه کاری B زودتر از گروههای دیگر محیط کار را ترک می‌کند. از لحظه خروج گروه‌کاری B از محیط کار، تنها دو گروه باعث فشردگی فضای کار می‌شوند که به همین دلیل تغییرات فشردگی فضای کار در این دو گروه از لحظه خروج گروه B تا انتهای کار با یکدیگر یکسان می‌باشد و نقاط صعود و نزول مقدار بهره‌وری نیز مشابه می‌باشد(اشکال شماره ۶و۸).

۳-۵-مقایسه نتایج شبیه سازی شده عملکرد سیاست‌های اول و دوم بتن ریزی

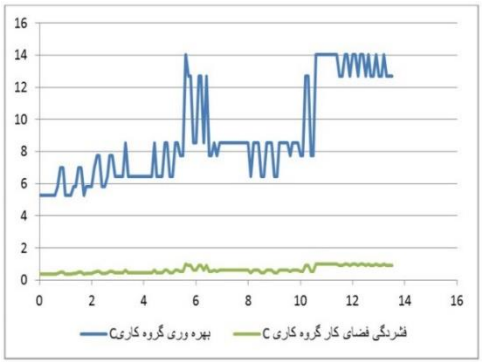
همانطور که در جدول شماره ۴ مشاهده می‌شود، زمان تکمیل پروژه در سناریوی اول بتن ریزی، حدود ۱۵ساعت می‌باشد در حالی که این زمان برای سناریوی دوم بتن ریزی، حدود ۱۳ ساعت و ۵۰ دقیقه است. با توجه به اینکه در سناریوی دوم تعداد گروه‌های بتن‌ریز افزایش می‌یابد انتظار این است که زمان انجام پروژه کاهش بیشتری داشته باشد. اما ملاحظه می‌شود با وجود افزایش گروه‌های کاری باتوجه به افزایش فشردگی فضای کار ناشی از اضافه شدن یک گروه، زمان انجام پروژه تنها حدود ۲ ساعت و ۲۰ دقیقه کاهش دارد. و این نشان می‌دهد افزایش گروه‌های کاری الزاما باعث کاهش چشمگیر در زمان انجام کار نمی‌شود.



شکل ۶ روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره وری گروه کاری ؟ در سیاست دوم بتن ریزی



شکل ۷ روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره وری گروه کاری ؟ در سیاست دوم بتن ریزی



شکل ۸ روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره وری گروه کاری ؟ در سیاست دوم بتن ریزی

جدول ۴ زمان اتمام کار گروه های کاری مختلف در دو سیاست بتن ریزی

زمان اتمام کار (ساعت)	گروه های کاری	سیاست های بتن‌ریزی
۱۵´	گروه‌کاری	سیاست اول
۱۳:۴۰´	گروه‌کاری	
۱۳:۵۰´	گروه‌کاری	سیاست دوم
۱۱:۵۰´	گروه‌کاری	
۱۳:۳۰´	گروه‌کاری	

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی

۶- نتیجه گیری

با مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه بهره‌وری می‌توان دید که در اکثر تحقیقات انجام شده قبلی، تنها اثر یک فاکتور خاص بر روی بهره‌وری ارزیابی شده است. لذا نیاز به ارائه مدلی جامع که قادر به درنظر گیری تأثیرات همزمان تمامی عوامل اثرگذار بر بهره وری باشد کاملاً مشهود است. در این تحقیق برای رفع مشکلات فوق‌الذکر با استفاده از یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدلسازی عامل‌محور، ابزاری نوین و جدید برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه گردید. برای این منظور ابتدا فاکتورهای موثر بر میزان بهره‌وری در پروژه‌های ساخت شناسایی گردید. سپس کلیه عوامل و فاکتورهای اثرگذار که دارای رفتاری پیوسته در طول زمان می‌باشند با استفاده از روش شبیه‌سازی پیوسته پویایی سیستم مدلسازی شد. در ادامه برای درنظرگیری تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه بر روی بهره‌وری، از رویکرد مدلسازی عامل‌محور استفاده شد. در نهایت با ترکیب و یکپارچه سازی دو مدل شبیه‌سازی پیوسته پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه عوامل اثرگذار ارایه گردید. برای نشان دادن قابلیت‌ها و توانایی‌های روش شبیه سازی ترکیبی پیشنهاد شده در این تحقیق، روش شبیه سازی ترکیبی پیشنهادی بر روی یک پروژه نمونه بتن ریزی پیاده شد. پروژه مورد مطالعه مربوط به بتن‌ریزی یک پی گسترده با حجم بتن ریزی ۴۰۰ مترمکعب می‌باشد. با استفاده از مدل شبیه سازی ترکیبی پیشنهادی، عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن‌ریزی پیش از بکارگیری در یک محیط مجازی ارزیابی گردید. برای این منظور، تاثیر عوامل مختلف اثر گذار بر بهره‌وری که دارای رفتار پیوسته در طول زمان هستند توسط مدل پویایی سیستم ارزیابی شد و همچنین اثر فشردگی فضای کار به عنوان عاملی که ناشی از اندرکنش بین نیروهای کاری مشغول به کار در کارگاه می‌باشند توسط روش شبیه‌سازی عامل‌محور بدست آمد. با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده، در نهایت بهترین سیاست بتن ریزی تعیین گردید. روش شبیه سازی ترکیبی پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند ابزاری نوین و قدرتمند را برای پیش بینی عملکرد پروژه-های ساخت در یک محیط مجازی فراهم نماید چراکه اثر فاکتورهای مختلف اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان و نیز تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه بطور همزمان در نظر گرفته می‌شود.

۷-مراجع

[1] Song, L. and AbouRizk, S.M. "Measuring and modeling labor productivity using historical data", *J. Constr. Eng. M.*, 134(10), pp. 786-794 (2008).

[2] Ezeldin, A.S. and Sharara, L.M. "Neural networks for estimating the productivity of concreting activities", *J. Constr. Eng. M.*, 132(6), pp. 650-656 (2006).

[3] Zayed, T.M. and Halpin, D.W. "Pile construction productivity assessment", *J. Constr. Eng. M.*, 131(6), pp. 705-714 (2005).

[4] Gerek, I.H., Erdis, E., Mistikoglu, G. and Usmen, M. "Modelling masonry crew productivity using two artificial neural network techniques" *J. Civ. Eng. Manag.*, 21(2), pp. 231-238 (2015).

[5] Poirier, E.A., Staub-French, S. and Forgues, D. "Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research", *Automat. Constr.*, 58, pp. 74-84 (2015).

[6] Kisi, K.P., Mani, N. and Rojas, E.M. " Estimating Optimal Labor Productivity: A Two-Pronged Strategy", *Constr. Res. Cong.*, ASCE, pp. 757-766 (2014).

[7] Mani, N., Kisi, K.P. and Rojas, E.M. " Estimating labor productivity frontier: a pilot study", *Constr. Res. Cong.*, ASCE, pp. 807-816 (2014).

[8] Jarkas, A.M. " Influence of buildability factors on rebar installation labor productivity of columns", *J. Constr. Eng. M.*, 138(2), pp. 258-267 (2012).

[9] Arashpour, M. and Arashpour, M. " Analysis of Workflow Variability and Its Impacts on Productivity and Performance in Construction of Multistory Buildings", *J. Manage. Eng.*, 31(6), (2015).

[10] Ibbs, W., Nguyen, L.D. and Lee, S. "Quantified impacts of project change" J. Prof. Iss. Eng. Ed. Pr., 133(1), pp. 45-52 (2007).

[11] Goodrum, P.M., Zhai, D. and Yasin, M.F. "Relationship between changes in material technology and construction productivity" *J. Constr. Eng. M.*, 135(4), pp. 278-287, (2009).

[12] Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N. and Mattila, K. "Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions", *J. Constr. Eng. M.*, 135(7), pp. 657-667 (2009).

[13] Mawdesley, M.J. and Al-Jibouri, S. "Modelling construction project productivity using systems dynamics approach", *Int. J. Prod. Perf. Manag.*, 59(1), pp. 18-36 (2009).

[14] Nasirzadeh, F. and Nojedehi, P. "Dynamic modeling of labor productivity in construction projects", *Int. J. Proj. Manag.*, 31(6), pp. 903-911 (2013) .

[15] Schieritz, N. and Milling, P.M. "Modeling the forest or modeling the trees", 21st Int. Conf. Syst. Dyn. Soc., (2003).

[16] Wu, D.D., Kefan, X., Hua, L., Shi, Zh. and Olson, D.L. "Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: an agent-based perspective" *Technol. Forcast. Soc.*, 77(6), pp. 857-869 (2010).

[17] Schieritz, N. and Grobler, A. "Emergent structures in supply chains-a study integrating agent-based and system dynamics modeling" *36th Int. Conf. Syst. Sci., IEEE, Hawaii* (2003).

[18] Nasirzadeh, F., Khanzadi, M. and Afshar, A. "Simulating consequences of concurrent risks on project time and cost by considering uncertanities" *Sharif Journal, Civil Engineering*, 30(2), pp. 69-75, (2014).

[19] 9. Nasirzadeh, F. *"An integrated fuzzy system dynamics approach to construction project risk management"* Doctoral thesis, Iran University of Science and Technology (2008).

[20] Nasirzadeh, F., Afshar, A. and Khanzadi, M. "Dynamic risk analysis in construction projects" *Can. J. Civ. Eng.*, 35(8), pp. 820-831 (2008).

[21] Barbati, M., Bruno, G. and Genovese, A. "Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review", *Expert. Syst. Appl.*, 39(5), pp. 6020-6028 (2012).

[22] Osman, H., "Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities", *Automat. Constr.*, 28, pp. 45-57 (2012).

[23] Macal, C.M. and North, M.J. "Agent-based modeling and simulation: ABMS examples", *40th Winter Simulation Conference* (2008).

[24] Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K. and Mulky, A.R. "Agent-based modeling and simulation in construction", *Proc. Sim. Conf., Winter, IEEE* (2003).

[25] Epstein, M. and Axtell, R. "Growing artificial societies: Social science from the ground up", *Boston, MA, MIT Press* (1996).

[26] Lättilä, L., Hilletofth, P. and Lin, B. "Hybrid simulation models–when, why, how? ", *Expert. Syst. Appl.*, 37(12), pp. 7969-7975 (2010).

[27] Hilletofth, P., Aslam, T., and Hilmola, O. P. "Multi-agent-based supply chain management: a case study of requisites", *IJNVO,* 7(2), pp. 184-206 (2010).

[28] Lorenz, T. and Jost, A. "Toward an orientation framework in multi-paradigm modeling" *24th Int. Conf. Syst. Dyn. Soc.* (2006).

[29] Swinerd, C. and McNaught, K.R. "Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models", *Simul. Model. Pract. Th.*, 25, pp. 118-133 (2012).

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی

[30] Mostafavi, A., Abraham, D., Delaurentis, D., Sinfield, J. and Queiroz, C. "Innovation Policy Assessment for Civil Infrastructure System-of-Systems" *Const. Res. Cong., Construction Challenges in a Flat World*, ASCE (2012).

[31] Duggan, J. "A Simulator for Continous Agent-Based Modelling", *26th Int. Conf. Syst. Dyn. Soc.* (2008).

[32] Horner, R. and Talhouni, B. "Effects of accelerated working, delays and disruption on labour productivity", *Chartered Institute of Building* (1993).

[33] Thomas, H. and Smith, G." Loss of labor productivity: The weight of expert opinion", *PTI Rep*, 9019 (1992).

[34] Thomas, H.R., Riley, D.R. and Sinha, S.K. "Fundamental principles for avoiding congested work areas—A case study", *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 11(4), pp. 197-205 (2006)

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
5 (2) , 2020
دوره ۵، شماره ۲
تابستان ۱۳۹۹
فصلنامه پژوهشی
مهندسی و مدیریت ساخت

[1] Discrete Event Simulation
[2] Building Information Modeling
[3] Integrated
[4] Interfaced
[5] Sequential
[6] Expert System
[7] Agents
[8] Agents