مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۸۷-۹۵، (یادداشت فنی)

Research Note

شبیه‌سازی بهره‌وری با استفاده از یک‌پارچه‌سازی رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور

مصطفی خانزادی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، ایران
فرناد نصیرزاده* (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
مصطفی میر (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، ایران

مقدار بهره‌وری در پروژه‌های ساخت از یک‌سو، تحت تأثیر عوامل مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان و از سوی دیگر، تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین نیروی انسانی حاضر در پروژه بوده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از یک‌پارچه‌سازی، روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدل‌سازی عامل‌محور، ابزاری نوین برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه شده است. استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور، امکان در نظر گرفتن انواع عوامل مؤثر در بهره‌وری را به صورت هم‌زمان میسر می‌سازد. در پژوهش حاضر، کلیه‌ی عوامل و فاکتورهای اثرگذار، که رفتاری پیوسته در طول زمان دارند، با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه، برای در نظر گرفتن تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه در بهره‌وری، از رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور استفاده شده است. درنهایت، با ترکیب و یک‌پارچه‌سازی دو مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه‌ی عوامل اثرگذار ارائه شده است.

واژگان کلیدی: بهره‌وری، شبیه‌سازی ترکیبی، شبیه‌سازی پویایی سیستم، مدل‌سازی عامل‌محور.

khanzadi@iust.ac.ir
f.nasirzadeh@gmail.com
m.mir1988@yahoo.com

۱. مقدمه

بهره‌وری، یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در عملکرد پروژه‌های ساخت است، که تأثیر بسیار زیادی در زمان و هزینه‌ی آنها دارد. با بهبود بهره‌وری در یک پروژه‌ی ساخت می‌توان عملکرد آن پروژه را از جهت اهداف مختلف زمانی، هزینه‌یی و کیفی بهبود بخشید. مقدار بهره‌وری تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثرگذار متعددی است و شناسایی و طبقه بندی آنها بر اساس تأثیری که در بهره‌وری دارند، بسیار مهم است. چرا که با شناسایی عوامل مؤثر در بهره‌وری و به کارگیری اقدامات لازم در جهت بهبود عوامل ذکر شده، می‌توان صرفه‌جویی‌های زیادی از حیث منابع استفاده شده در پروژه انجام داد. مقدار بهره‌وری از یک‌سو، تحت تأثیر عوامل مختلف مانند: دمای هوا، مهارت کارگران، میزان خستگی و ...، با رفتار پیوسته در طول زمان و از سوی دیگر، تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین گروه‌های کاری مختلف حاضر در پروژه است.

با مروری بر ادبیات موضوع پژوهش مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعات چندی در زمینه‌ی بررسی میزان تأثیر عوامل مختلف اثرگذار در بهره‌وری انجام شده است. برای مثال، در سال ۲۰۰۸، با استفاده از روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی پیشامدگسسته[1]، بهره‌وری نیروی انسانی مدل‌سازی شده است.[1] در سال ۲۰۰۶ نیز از طریق بررسی مطالعات پیشین، عوامل مؤثر در بهره‌وری در فعالیت‌های بتن‌ریزی شناسایی و سپس با استفاده از ۳ شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای ۳ عملیات قالب بندی، آرماتورگذاری و بتن‌ریزی، نرخ واحد انجام کار توسط منابع پیش‌بینی شده است.[2] همچنین در سال ۲۰۰۵، با ارائه‌ی مدلی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی، به شناسایی برخی راهکارهای بهبود بهره‌وری در صنعت ساخت پرداخته شده است.[3] در سال ۲۰۱۵، نیز عملکرد دو روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی متفاوت برای مدل‌سازی بهره‌وری نیروی انسانی مقایسه،[4] و همچنین اثر استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[2] در بهره‌وری نیروی انسانی طی یک پژوهش عملی، که با همکاری یک پیمانکار انجام شد، بررسی شده است.[5]

در سال ۲۰۱۴، نیز از یک روش دو سویه برای تخمین بهره‌وری بهینه در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۸/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۴/۲۲، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۳.
DOI:10.24200/J30.2018.1325

عملیات‌های ساختمانی استفاده شده است.[۶] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، با استفاده از یک روش دوگانه تلاش شد تا بهره‌وی ایده‌آل (بیشینه‌ی کار تئوری انجام شده در واحد زمان که در شرایط ایده‌آل به دست می‌آید) تخمین زده شود.[۷] در سال ۲۰۱۲، نیز اثر ویژگی‌های عملیاتی فعالیت، مانند: هندسه‌ی عضو و ابعاد آرماتور در بهره‌وری کارگران آرماتوربند بررسی و کمّی شده است.[۸] همچنین در سال ۲۰۱۵، اثرات تغییر در جریان کار ایجاد شده توسط دوباره کاری و تغییر مقادیر کار در بهره‌وری تحلیل شده است.[۹]

در سال ۲۰۰۷، نیز 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، به وسیله‌ی نمودارهای علت و معلولی و با استفاده از رویکرد پویایی سیستمی مدل‌سازی شده است.[۱۰] همچنین پژوهشی در سال ۲۰۰۹، درخصوص ارتباط بین تغییر در تکنولوژی مصالح و بهره‌وری نیروی انسانی انجام شده است.[۱۱] در مطالعات دیگری در همان سال.[۱۲] نیز درخصوص بهره‌وری نیروهای کارگاهی و ارتباط آن با فضای کار (فشردگی فضای انجام فعالیت‌ها در کارگاه) انجام و رابطه‌ی بین دو عامل مذکور توسط رویکرد عامل‌محور بررسی و همچنین در خصوص مدل‌سازی بهره‌وری و عوامل مؤثر در آن با استفاده از روش پویایی سیستمی، مطالعاتی انجام شده است.[۱۳] در پژوهش دیگری (۲۰۱۴) نیز پس از شناسایی عوامل مؤثر در بهره‌وری با استفاده از مطالعات کتابخانه‌یی و بر اساس نظر خبره‌ها، نحوه‌ی تأثیر عوامل مذکور در بهره‌وری با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم مدل‌سازی شده است.[۱۴]

با مروری بر مطالعات انجام شده‌ی پیشین در زمینه‌ی بهره‌وری می‌توان دید که در بیشتر پژوهش‌های انجام شده‌ی قبلی، فقط اثر یک عامل خاص در بهره‌وری ارزیابی شده است. در دو مطالعه‌ی ذکر شده‌ی اخیر،[۱۳و۱۴] که اثر بیش از یک عامل در بهره‌وری بررسی شده است، نیز فقط عوامل اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان در نظر گرفته شده‌اند و از تأثیرات مهم ناشی از تعاملات و اندرکنش‌های بین گروه‌های کاری مختلف درگیر در پروژه صرف نظر شده است. لذا نیاز به ارائه‌ی مدلی جامع که قادر به در نظرگرفتن تأثیرات هم‌زمان هر دو دسته‌ی عوامل ذکر شده باشد، کاملاً مشهود است. در پژوهش حاضر، برای رفع مشکلات ذکر شده 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 شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا عوامل مؤثر در میزان بهره‌وری در پروژه‌های ساخت شناسایی شده‌اند. سپس کلیه‌ی عوامل و فاکتورهای اثرگذار که رفتاری پیوسته در طول زمان دارند، با استفاده از روش شبیه‌سازی پیوسته‌ی پویایی سیستم مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه، برای در نظرگرفتن تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه در میزان بهره‌وری، از رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور استفاده شده است. در نهایت، با ترکیب و یک‌پارچه‌سازی دو مدل شبیه‌سازی پیوسته‌ی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه‌ی عوامل اثرگذار ارائه شده است.

۲. روش پژوهش

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در پژوهش حاضر 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 شده است. در بخش حاضر، ابزارهای شبیه‌سازی استفاده شده در پژوهش حاضر به تفصیل معرفی شده‌اند. برای این منظور، ابتدا دو روش شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور معرفی و سپس دو روش مذکور شبیه‌سازی ترکیب شده و روش شبیه‌سازی ترکیبی جدید در پژوهش حاضر معرفی شده است.

۱.۲. رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم [۳]

پویایی سیستم در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ در دانشگاه MIT، توسط فارستر که یک مهندس برق بود و در زمینه‌ی 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 در رفتار کل سیستم اثر می‌گذارند، مقابله می‌کند.[۱۶] پویایی سیستم، یک رویکرد برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌ها با کمک معادلات دیفرانسیل معمولی است و به عنوان رویکردی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پویای غیرخطی، که هدفش درک ساختار یک سیستم و استنتاج رفتار از آن است، معرفی شده است. همچنین در فهمیدن به عنوان یک مزیت رویکرد پویایی سیستم تأکید شده است، زیرا رویکرد مذکور برای توسعه‌ی سیاست‌هایی است که عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشند.[۱۷]

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 به نام حلقه‌های مثبت و منفی وجود دارند. مدل‌های پویایی سیستم با در نظرگرفتن فرایندهای بازخورد موجود، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازند.[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 عامل‌محور [۴]

مدل‌سازی عامل‌محور یا سیستم‌های چند عامل، در بر دارنده‌ی یک مجموعه از اعضایی (عامل‌ها) هستند که توسط ویژگی‌هایی منحصر به فرد مشخص شده‌اند و بر طبق 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 عامل‌محور، روشی مناسب برای توصیف سیستم‌های پیچیده است، زیرا به جای اینکه هر واحد را همسان در نظر بگیرد، آن را به صورت غیرهمسان در نظر می‌گیرد و همچنین به عامل‌ها اجازه می‌دهد به صورت پویا رفتار کنند.[۱۲]

شبیه‌سازی عامل‌محور به مدل‌سازی اطلاق می‌شود که در آن یک روند پویا از اندرکنش‌های بین عامل‌ها به صورت مکرر طی زمان شبیه‌سازی می‌شود، مشابه آنچه در روش‌های شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی پیشامد گسسته و انواع دیگر روش‌های شبیه‌سازی سنتی اتفاق می‌افتد.[۲۱و۲۲] رفتارهای بسیار پیچیده می‌توانند از اندرکنش‌های رقابتی بین عامل‌ها، که توسط قدرت پردازش کامپیوترها قابل مدل‌سازی شده‌اند، ناشی شود.[۲۳] هدف از شبیه‌سازی عامل‌محور، دنبال کردن اندرکنش‌های

جدول ۱. مقایسه‌ی رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور.[۱۵]

رویکرد پویایی سیستم	رویکرد عامل‌محور	ویژگی‌های مورد مقایسه
بالا به پایین	پایین به بالا	زاویه دید
حلقه‌ی بازخوردی	عامل فردی	واحد ساختار اصلی
ساختار سیستم	قوانین عامل	واحد تحلیل
تجمعی	فردی	سطح مدل‌سازی
ثابت	غیرثابت	ساختار سیستم
پیوسته	گسسته یا پیوسته	زمان

بین عوامل در محیط مجازی‌شان و درک روندهایی است که طی آن الگوهای کلی رفتاری پدیدار می‌شوند.[۲۳و۲۴]

۳.۲. مقایسه‌ی رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور

به نظر می‌رسد رویکرد پویایی سیستم در بسیاری از مواقع دچار مشکلاتی می‌شود و رویکرد عامل‌محور باید به حل این مشکلات کمک کند.[۲۵] البته این گفته به این معنی نیست که رویکرد پویایی سیستم ضعیف‌تر از رویکرد عامل‌محور است، بلکه چه بسا روش پویایی سیستم، بسیار پخته‌تر از روش مدل‌سازی عامل‌محور است، که هنوز در اوایل راهش است.[۲۵و۲۶] در حقیقت هر دو رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور، نقاط ضعف و قوتی دارند و می‌توان از آن‌ها برای تکمیل یکدیگر استفاده کرد.[۲۵] با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی، اجتناب از مشکلات و نقص‌های دو روش امکان پذیر است و می‌توان مدل‌های واقعی‌تری تولید کرد.[۲۵] تفاوت‌های میان مدل‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور در جدول ۱ ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی ترکیبی

ایده‌ی ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی ترکیبی در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی ایجاد شد. ترکیب دو روش مختلف شبیه‌سازی زمانی می‌تواند مفید باشد، که اجازه‌ی ترکیب ویژگی‌هایی که مربوط به یک روش مجزاست، داده شود.[۱۵] ترکیب دو روش شبیه‌سازی می‌تواند ما را بیشتر به واقعیت نزدیک کند، همان‌طورکه می‌تواند روش‌های متناسب از رویکردهای مختلف را ترکیب کند، گرچه قدرت توضیحی مدل را کاهش می‌دهد.[۲۷] ترکیب رویکرد پویایی سیستم با مدل‌سازی عامل‌محور به ما این توانایی را می‌دهد که توانایی‌های دو رویکرد را ترکیب کنیم.[۱۷]

در حقیقت ترکیب پویایی سیستم با رویکرد عامل‌محور، ترکیبی از روش‌ها برای کاهش پیچیدگی اولیه‌ی مدل است.[۱۷] به نظر می‌رسد سوینرد و مک‌نات،[۲۸] کامل‌ترین طبقه‌بندی را برای شبیه‌سازی ترکیبی با استفاده از روش‌های پویایی سیستم و عامل‌محور ارائه داده و روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرده‌اند، که شامل: یک‌پارچه شده[۵]، واسط[۶] و ترتیبی[۷] است.

- در روش یک‌پارچه شده، گروه یک‌پارچه شده است و بازخورد بین مدل‌های دیگری عامل‌محور و پویایی سیستم را برای ارائه‌ی یک روند پیوسته و جاری ترکیب می‌کند.
- در روش واسط، مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور درگروه 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 دیگری استفاده شود.

سوینرد و مک‌نات،[۲۸] گروه یک‌پارچه شده را برای اعمال مفهوم شبیه‌سازی ترکیبی به دسته به این شرح تقسیم کردند:

- یک مدل پویایی سیستم، درون عامل‌های یک مدل عامل‌محور ساخته شود (عامل‌ها با ساختار درونی کامل)؛
- یک سطح درمدل پویایی سیستم استفاده شود تا یک مقدار تجمعی از یک مدل عامل‌محور را درون خود جای دهد (عامل‌های انبار شده)؛
- یک مقدار تجمعی از یک مدل عامل‌محور برای اثرگذاشتن در یک عامل، درون یک مدل پویایی سیستم استفاده شود (پارامترها با رفتار ظاهرشونده).

در برخی مطالعات مزایای مختلفی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور بیان شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۳،[۱۷] بیان شده است که یک‌پارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستم و رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور باعث ترکیب نقاط قوت دو رویکرد می‌شود. در پژوهش دیگری (۲۰۱۰)،[۲۷] نیز بیان شده است که یکی از مزایای عمده‌یی که می‌توان طی یک‌پارچه‌سازی رویکرد عامل‌محور درون پویایی سیستم به دست آورد، خاصیت مکانی است که به سادگی می‌توان با دادن متغیرهای x و y به هر عامل اعمال کرد.

انواع مختلفی از مفاهیم در رویکرد عامل‌محور برای افزودن اطلاعاتی از مکان عامل‌ها وجود دارد. همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۹۶)،[۲۵] مزایایی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور برای ایجاد یک سیستم خبره[۸] بیان کرده‌اند. برخی دیگر،[۲۹] نیز اعتقاد دارند استفاده‌ی هم‌زمان از رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور، مزایایی از ترکیب توانمندی‌های هر دو مدل تا شبیه‌سازی فعالیت‌های عوامل در ترکیب با حرکت‌های مهم و عوامل دیگر را به همراه دارد. همچنین پژوهشگر دیگری (۲۰۱۲)،[۳۰] اعتقاد دارد رویکرد عامل‌محور، رویکرد پویایی سیستم را به عنوان یک روش مستحکم و خوب تعریف شده برای مدل کردن رفتار واحدهای تصمیم‌گیر به کار برده است.

۴. مدل‌سازی بهره‌وری با استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

در بخش حاضر، برای نشان دادن قابلیت‌ها و توانایی‌های روش شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهاد شده در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی بهره‌وری با استفاده از روش پیشنهادی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا ضرورت ایجاد مدل ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور تبیین و در ادامه، جزئیاتی از هرکدام از مدل‌های پویایی سیستم و مدل عامل‌محور ارائه شده است. سپس نحوه‌ی ترکیب دو مدل مذکور برای رسیدن به هدف پژوهش شرح داده شده است.

۱.۴. ضرورت استفاده از دو رویکرد مدل‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور

پژوهشگران مختلف، مطالعاتی را برای شناسایی متغیرهایی که در بهره‌وری در صنعت ساخت اثر می‌گذارند، انجام داده‌اند. برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری لازم است که اثرات تمامی متغیرهای اثرگذار در نظرگرفته شود. مقدار بهره‌وری تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثرگذار متعددی است. مقدار بهره‌وری از یک‌سو تحت تأثیر عوامل مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان است و از سوی دیگر، مقدار بهره‌وری تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عامل‌های[9] حاضر در پروژه است. در نظرگرفتن اثرات چندین متغیر با رفتار پیوسته در طول زمان، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های رویکرد پویایی سیستم است.

بنابراین استفاده از رویکرد پویایی سیستم اجتناب ناپذیر است. برای در نظرگرفتن اثرات ناشی از تعاملات بین عوامل موجود در کارگاه، مانند فشردگی فضای کاری، رویکرد پویایی سیستم جواب‌گو نیست و باید از یک رویکرد شبیه‌سازی دیگر استفاده شود. رویکرد عامل‌محور، مناسب‌ترین روش‌ها برای در نظر گرفتن اثرات ناشی از تعاملات بین عوامل موجود درکارگاه است. بنابراین استفاده‌ی هم‌زمان از هر دو رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور اجتناب ناپذیر است. لذا برای مدل‌سازی بهره‌وری با در نظر داشتن تمامی عوامل اثرگذار، نیاز به استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور است.

۲.۴. توسعه‌ی مدل پویایی سیستم عوامل مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی

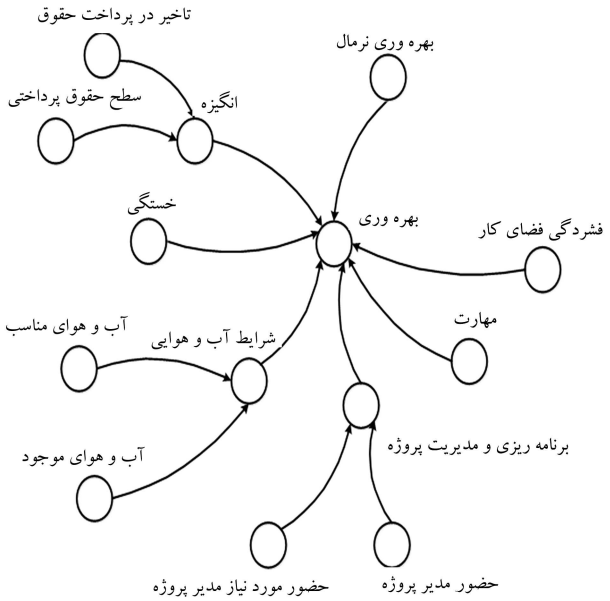
همان‌طور که پیشتر گفته شد، مقدار بهره‌وری نیروی انسانی، تحت تأثیر عوامل و فاکتورهای اثرگذار متعددی است. مقدار بهره‌وری از یک‌سو تحت تأثیر فاکتورهای مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان، مانند: دمای هوا، مهارت کارگران، میزان خستگی و ... است؛ از سوی دیگر، تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه است.

برای ساختن مدل شبیه‌سازی پیوسته‌ی بهره‌وری نیروی انسانی، ابتدا کلیه‌ی فاکتورها و عوامل اثرگذار در میزان بهره‌وری نیروی انسانی، که رفتاری پیوسته در طول زمان دارند، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌یی شناسایی شدند و برای بررسی نهایی عوامل مؤثر و تطبیق و بومی سازی آنها، مصاحبه‌هایی با مدیران و کارشناسان ارشد تعدادی از شرکت‌های پیمانکاری انجام شده است. جدول ۲، فهرست نهایی مهم‌ترین عوامل اثرگذار در بهره‌وری نیروی انسانی، که رفتاری پیوسته در طول زمان دارند، را نمایش می‌دهد.

پس از تعیین مهم‌ترین عوامل اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان، تعاملات پیچیده‌ی موجود بین آنها شناسایی و نحوه‌ی تأثیرشان در میزان بهره‌وری نیروی انسانی با در نظر گرفتن تعاملات پیچیده‌ی موجود بین آنها به صورت کیفی و با استفاده از حلقه‌های علت و معلولی شبیه‌سازی شده است (شکل ۱). در ادامه، روابط و تعاملات بین متغیرها با استفاده از روابط ریاضی تعیین و مدل کمّی پیش‌بینی بهره‌وری تهیه شده است. حال با استفاده از مدل شبیه‌ساز پویایی سیستمی توسعه داده شده، می‌توان میزان تأثیرکلی هر عامل با رفتار پیوسته در طول زمان را در میزان بهره‌وری با در نظر داشتن اثرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از عامل مذکور، در محیطی مجازی شبیه‌سازی کرد.[۱۴] همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، میزان بهره‌وری در طول پروژه بر مبنای بهره‌وری شرایط نرمال و نیز تأثیرات ناشی از عوامل

جدول ۲. عوامل پیوسته‌ی مؤثر در بهره‌وری.

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



شکل ۱. مدل پویایی سیستم عوامل تأثیرگذار در بهره‌وری نیروی انسانی.[۱۴]

متعدد اثرگذار در میزان بهره‌وری، که رفتاری پیوسته در طول زمان دارند (همچون فشردگی فضای کاری، مهارت نیروی انسانی، خستگی نیروی انسانی، تأثیرات آب و هوایی، انگیزه‌ی نیروی کار و شرایط برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه) و با در نظرگرفتن تعاملات پیچیده بین آنها مدل‌سازی می‌شود.

۳.۴. مدل عامل‌محور عوامل مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی

همان‌طورکه پیشترگفته شد، مقدار بهره‌وری نیروی انسانی علاوه بر عوامل مختلف با رفتار پیوسته در طول زمان، تحت تأثیر تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه است. در پژوهش حاضر، برای در نظر گرفتن تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه در بهره‌وری، از رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور استفاده شده و تأثیر تداخلات کاری بین نیروی انسانی، که ناشی از تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه است، در بهره‌وری تعیین شده است.

مدل شبیه‌سازی عامل‌محور پیشنهادی، برای پیش‌بینی بهره‌وری گروه‌های کاری و زمان تکمیل پروژه بر روی یک پروژه‌ی واقعی استفاده شده است. پروژه‌ی مورد

مطالعه مربوط به بتن‌ریزی یک پی گسترده با حجم بتن‌ریزی ۴۰۰ مترمکعب بوده است. مساحت پی ۴۰۰ متر مربع و ضخامت بتن‌ریزی ۱ متر بوده و بتن‌ریزی فونداسیون در قطعات با ابعاد ۲ متر در ۲ متر انجام شده است. عامل‌ها نیز گروه‌های کاری بتن‌ریز در نظر گرفته شده‌اند.

۴.۴. چگونگی ارتباط بین دو مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور

عوامل اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان، که در شکل ۱ نشان داده شده است، در مقدار بهره‌وری تأثیر دارند. مقدار بهره‌وری، که به عنوان خروجی مدل پویایی سیستم توسعه داده شده است، شبیه‌سازی و تعیین می‌شود و خود به عنوان ورودی مدل عامل‌محور عمل می‌کند و به مدل عامل‌محور فرستاده می‌شود. چرا که مقدار بهره‌وری در رفتار هر گروه کاری، اثر می‌گذارد و بنابراین مدل پویایی سیستم، مقدار محاسبه شده‌ی متغیر مذکور را به هر گروه کاری (عامل) می‌فرستد و رفتار و حرکت هر گروه کاری بر اساس مقدار بهره‌وری محاسبه شده و نیز اندرکنش گروه‌های کاری با یکدیگر در محیط بر اساس آن تعیین می‌شود.

با توجه به توضیحات ذکر شده، 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 دارند، که باعث تداخلات کاری بین نیروی انسانی می‌شود و در بهره‌وری نیز تأثیر منفی خواهد داشت. لذا متغیر تداخلات کاری بین نیروی انسانی، مقدار بهره‌وری نیروی انسانی را در مدل پویایی سیستم مربوط به هر یک از گروه‌های کاری تحت تأثیر قرار خواهد داد.

از طرف دیگر، تغییر در هر متغیر مدل پویایی سیستم، متغیرهای دیگر به خصوص بهره‌وری را تغییر می‌دهد. بهره‌وری تغییر داده شده، مجدداً نرخ انجام کار هر گروه کاری را تغییر می‌دهد و این مطلب، رفتار گروه‌های کاری در محیط را تغییر می‌دهد و چرخه‌ی مذکور مجدداً تکرار می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که یک جریان اطلاعات دوطرفه بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور وجود دارد. به علت اینکه در گروه شبیه‌سازی واسط از طبقه‌بندی سوینرد و مک‌نات، [۲۸] اطلاعات در حین انجام شبیه‌سازی بین مدل‌ها منتقل نمی‌شود و با توجه به انتقال اطلاعات بین مدل‌ها، که در مرحله‌ی قبل اشاره شد، بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور ارتباط وجود دارد و مدل‌های مذکور به هم متصل هستند، بنابراین گروه شبیه‌سازی آنها نمی‌تواند گروه واسط باشد.

با توجه به تفسیر ارائه شده در مسیر جریان اطلاعات واضح است که یک رابطه‌ی دوطرفه بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور وجود دارد. این نکته نشان می‌دهد که گروه یک‌پارچه شده 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 یک‌پارچه شده، فقط عامل «با ساختار درونی کامل»، که در آن مدل عامل‌محور در سطح بالاتری از مدل پویایی سیستم است، در پژوهش حاضر استفاده شده است.

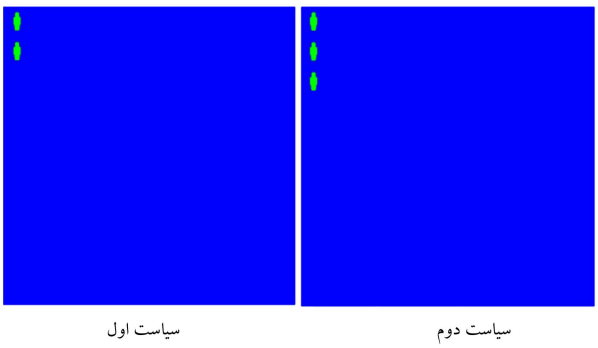
برای رسیدن به هدف پژوهش، متغیرهای میانجی برای انتقال دوطرفه‌ی اطلاعات از مدل عامل‌محور به مدل پویایی سیستم، باید انتخاب شوند. در پژوهش حاضر، متغیرهای میانجی شامل دو متغیر فشردگی فضای کار و بهره‌وری هستند. در مدل‌سازی انجام شده برای پیش‌بینی بهره‌وری، ابتدا مدل عامل‌محور مقدار فشردگی فضای کار با توجه به فاصله بین گروه‌های کاری در هر زمان محاسبه و سپس مقدار آن به مدل پویایی سیستم فرستاده شده است. مدل پویایی سیستم نیز در ادامه، مقدار جدید بهره‌وری را با توجه به ورودی گرفته شده از مدل عامل‌محور (مقدار فشردگی فضای کار) محاسبه کرده و سپس مقدار آن را به هر گروه کاری (عامل) برای اصلاح نرخ کار می‌فرستد و چرخه‌ی مذکور مجدداً تکرار می‌شود.

۵. شبیه‌سازی عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن‌ریزی با استفاده از روش مدل‌سازی ترکیبی پیشنهادی

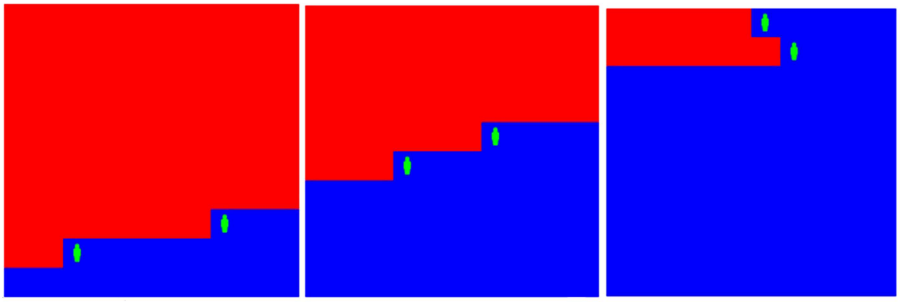
با استفاده از روش مدل‌سازی ترکیبی پیشنهادی در پژوهش حاضر می‌توان عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن‌ریزی را پیش از به کارگیری در یک محیط مجازی ارزیابی کرد. در پروژه‌ی نمونه‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، پس از بررسی‌های انجام شده با متخصصان اجرایی پروژه، دو سیاست جایگزین مختلف برای انجام بتن‌ریزی فونداسیون بر اساس تعداد گروه‌های کاری و مکان اولیه‌ی آنها تعریف شده است. سیاست اول، شامل استفاده از دو گروه کاری مختلف است، که مکان اولیه‌ی استقرار آن‌ها در بالای پی است و دو گروه کاری از دو نقطه‌ی نزدیک یکدیگر کار خود را شروع می‌کنند (شکل ۲). سیاست دوم، شامل استفاده از ۳ گروه کاری است، که مکان اولیه‌ی استقرار آن‌ها نیز در بالای پی در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

با توجه به مطالعات انجام شده،[۳۱و۳۲] برای بیشینه‌ی بهره‌وری نیروی انسانی در کارگاه‌های ساخت، نیروهای کار به ۷۷ تا ۹۲ متر مربع مساحت برای هر فرد نیاز دارند.[۳۳] بر اساس مساحت مشخص شده برای بیشینه‌ی بهره‌وری، شعاع کمینه‌ی فضای کاری لازم برای بیشینه‌ی بهره‌وری، ۴٫۹۵ متر تا ۵٫۴ متر است. در مطالعه‌ی حاضر، شعاع کمینه‌ی فضای کاری لازم برای بیشینه‌ی بهره‌وری، ۵ متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب اگر فاصله‌ی کارگران صفر باشد، بیشینه‌ی فشردگی فضای کار وجود دارد و گروه‌های کاری نمی‌توانند کارشان را انجام دهند.

اگر فاصله‌ی گروه‌های کاری مساوی و یا بیشتر از ۵ متر باشد، بیشینه‌ی اثربخشی دارند و بهره‌وری در اثر فشردگی فضای کار، کاهش نمی‌یابد. بنابراین در پژوهش حاضر، یک ضریب برای در نظر گرفتن اثر فشردگی فضای کار بر روی بهره‌وری تعریف شده است، که اثر آن را در بهره‌وری اعمال می‌کند. ضریب فشردگی فضای کار، یک متغیر با مقادیر بین ۰ و ۱ فرض می‌شود. اگر فاصله‌ی گروه‌های کاری صفر باشد، هیچ کدام از آن‌ها نمی‌توانند کار خود را انجام دهند و ضریب فشردگی مقدار صفر می‌گیرد و بهره‌وری را به صفر تقلیل می‌دهد. و اگر فاصله‌ی گروه‌های کاری مساوی یا بیشتر از ۵ متر باشد، ضریب فشردگی ۱ در نظر گرفته می‌شود و اثر



شکل ۲. مکان اولیه‌ی گروه‌های کاری در دو سیاست بتن‌ریزی.



شکل ۳. روند انجام بتن‌ریزی در سیاست اول بتن‌ریزی.

جدول ۳. بهره‌وری اولیه در گروه‌های کاری برای سیاست‌های مختلف بتن‌ریزی.

سیاست‌های بتن‌ریزی	گروه‌های کاری	بهره‌وری اولیه(متر مکعب بتن ریخته شده در ساعت)
سیاست اول	گروه کاری A	۱۴
	گروه کاری B	۱۸
سیاست دوم	گروه کاری A	۱۶
	گروه کاری B	۱۸
	گروه کاری C	۱۴

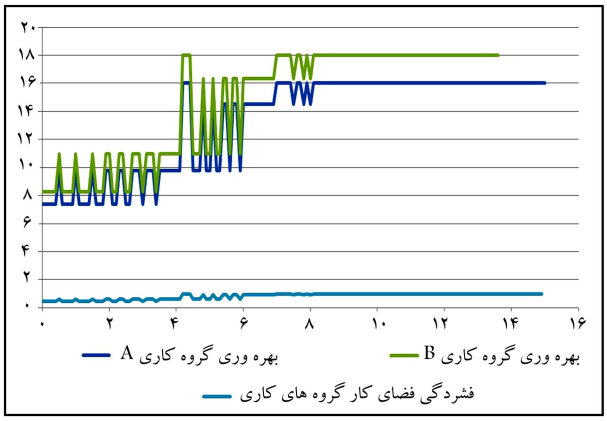
کاهشی در بهره‌وری نخواهد داشت. بهره‌وری اولیه‌ی گروه‌های کاری در سیاست‌های مختلف، در جدول ۳ ارائه شده است.

۱.۵. نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیاست اول بتن‌ریزی

همان‌طورکه ذکر شد، در سیاست اول، دوگروه کاری عملیات بتن‌ریزی را از بالای پی شروع می‌کنند. نقاط شروع ابتدایی گروه‌های مذکور درکنار یکدیگر قرار دارد و هرگروه کاری شروع به بتن‌ریزی یک نوار عرضی (ردیف) می‌کند و در صورتی که یک گروه کاری در یک نوار مشغول به کار باشد، گروه دیگر به نوار بعدی جهت انجام بتن‌ریزی منتقل می‌شود. با توجه به فاصله‌ی گروه‌ها از یکدیگر، در شروع بتن‌ریزی، فشردگی فضای کار در عملکرد آنها اثر می‌گذارد و بهره‌وری آنها کمتر از بیشینه‌ی مقداری است که می‌توانند داشته باشند. در شکل ۳، روند انجام بتن‌ریزی در سیاست اول مشاهده می‌شود.در طول فرایند بتن‌ریزی، فاصله‌ی بین گروه‌های کاری تغییر می‌کند، که این امر باعث تغییر در سطح فشردگی فضای کاری، که هرکدام از گروه‌ها تجربه می‌کنند، می‌شود و در نتیجه بهره‌وری تغییر می‌کند. روند تغییر بهره‌وری و فشردگی فضای کار گروه‌های کاری در سیاست اول بتن‌ریزی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۲.۵. نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیاست دوم بتن‌ریزی

در سیاست دوم بتن‌ریزی، ۳ گروه کاری با همان روش و نحوه‌ی حرکتی، که در سیاست اول بود، شروع به انجام کار می‌کنند. فشردگی فضای کاری که هرکدام از گروه‌ها تجربه می‌کنند، ناشی از فاصله‌یی است که با دوگروه دیگر دارد. روند انجام بتن‌ریزی در سیاست دوم بتن‌ریزی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار ضریب



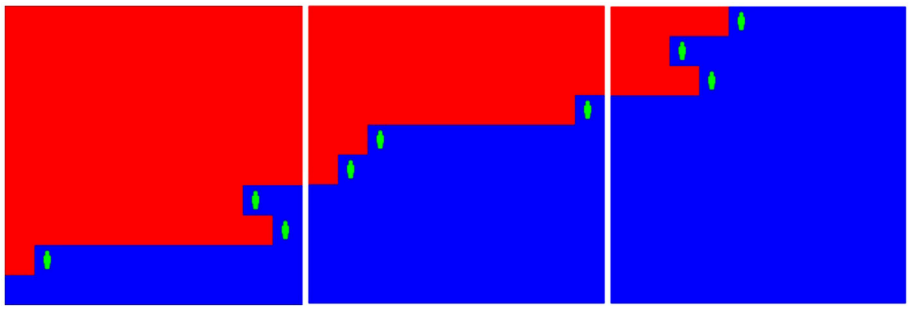
شکل ۴. روند تغییر بهره‌وری و فشردگی فضای کار در گروه‌های کاری در سیاست اول بتن‌ریزی.

فشردگی فضای کار برای هرکدام ازگروه‌ها برابر با حاصل ضرب ضریب فشردگی ناشی از فاصله با هرکدام ازگروه‌های دیگر است.

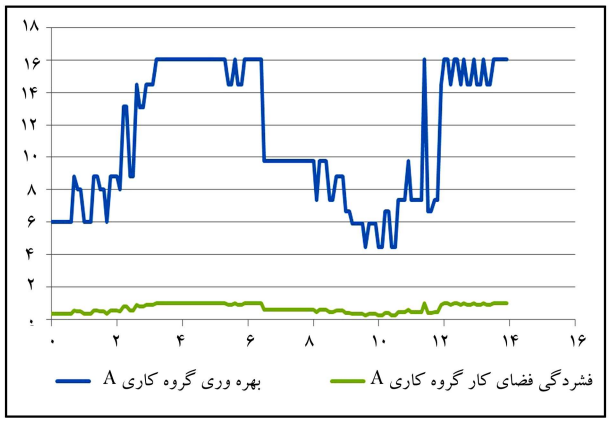
مطابق شکل‌های ۶ الی ۸، برخلاف سیاست اول بتن‌ریزی، نقاط اوج و افت بهره‌وری و فشردگی فضای کار هیچ کدام ازگروه‌ها در سیاست دوم کاملاً با یکدیگر یکسان نیست؛ زیرا در سیاست اول بتن‌ریزی، هرکدام ازگروه‌ها فقط در فشردگی فضای کار یک گروه اثر می‌گذارد، در حالی که در سیاست دوم، دو گروه دیگر در هر کدام از گروه‌های کاری اثر می‌گذارند. همان‌طور که در شکل ۵ ـ ج مشاهده می‌شود، در مراحل انتهایی بتن‌ریزی، فقط یک ردیف برای بتن‌ریزی باقی مانده است، که هنوز هیچ گروه کاری در آن مشغول به کار 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 می‌شود و یکی ازگروه‌ها با توجه به اینکه نوار بتن‌ریزی نشده‌یی باقی نمانده است، محیط کار را ترک می‌کند. با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ و همچنین جدول ۴، گروه کاری B زودتر ازگروه‌های دیگر محیط کار را ترک می‌کند. از لحظه‌ی خروج این گروه از محیط کار، فقط دو گروه باعث فشردگی فضای کار می‌شوند، که به همین دلیل تغییرات فشردگی فضای کار در این دوگروه از لحظه‌ی خروج گروه B تا انتهای کار با یکدیگر یکسان است و نقاط صعود و نزول مقدار بهره‌وری نیز مشابه است (شکل‌های ۶ و ۸).

۳.۵. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی شده‌ی عملکرد سیاست‌های اول و دوم بتن‌ریزی

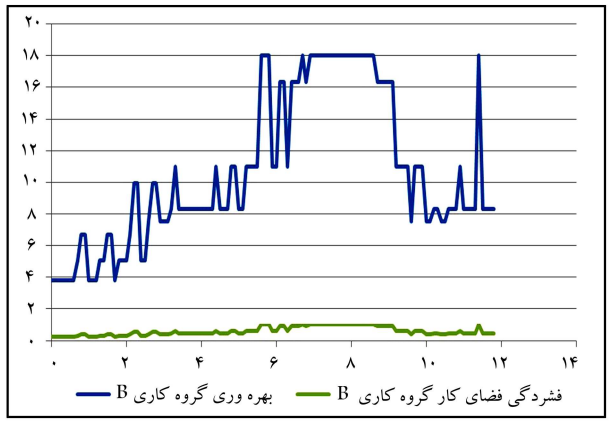
مطابق جدول ۴، زمان تکمیل پروژه در سناریوی اول بتن‌ریزی، حدود ۱۵ ساعت



شکل ۵. روند انجام بتن‌ریزی در سیاست دوم بتن‌ریزی.

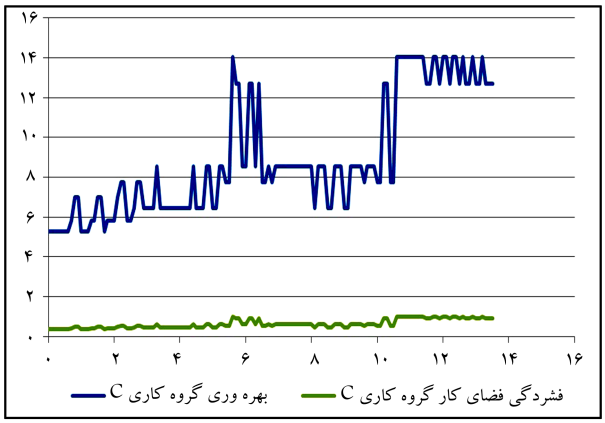


شکل ۶. روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره‌وری گروه کاری A در سیاست دوم بتن‌ریزی.



شکل ۷. روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره‌وری گروه کاری B در سیاست دوم بتن‌ریزی.

است؛ در حالی که این زمان برای سناریوی دوم بتن‌ریزی، 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 با توجه به افزایش فشردگی فضای کار ناشی از اضافه شدن یک گروه، زمان انجام پروژه فقط حدود ۲ ساعت و ۲۰ دقیقه کاهش دارد و این نشان می‌دهد افزایش گروه‌های کاری الزاماً باعث کاهش چشم‌گیر در زمان انجام کار نمی‌شود.



شکل ۸. روند تغییر فشردگی فضای کار و بهره‌وری گروه کاری X در سیاست دوم بتن‌ریزی.

جدول ۴. زمان اتمام کار گروه‌های کاری مختلف در دو سیاست بتن‌ریزی.

سیاست‌های بتن‌ریزی	گروه‌های کاری	زمان اتمام کار (ساعت)
سیاست اول	گروه کاری A	۱۵ دقیقه
	گروه کاری B	۱۳:۴۰
سیاست دوم	گروه کاری A	۱۳:۵۰
	گروه کاری B	۱۱:۵۰
	گروه کاری C	۱۳:۳۰

۶. نتیجه گیری

با مروری بر مطالعات انجام شده‌ی پیشین در زمینه‌ی بهره‌وری می‌توان دید که در بیشتر مطالعات انجام شده‌ی قبلی، فقط اثر یک عامل خاص در بهره‌وری ارزیابی شده است. لذا نیاز به ارائه‌ی مدلی جامع که قادر به در نظر گرفتن تأثیرات هم‌زمان تمامی عوامل اثرگذار در بهره‌وری باشد، کاملاً مشهود است. در مطالعه‌ی حاضر، برای رفع مشکلات ذکر شده با استفاده از یک‌پارچه سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستمی و روش مدل‌سازی عامل‌محور، ابزاری نوین و جدید برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بهره‌وری در پروژه‌های ساخت ارائه شده است. برای این منظور ابتدا عوامل مؤثر در میزان بهره‌وری در پروژه‌های ساخت شناسایی و سپس کلیه‌ی عوامل و فاکتورهای اثرگذار، که رفتاری پیوسته در طول

زمان دارند، با استفاده از روش شبیه‌سازی پیوسته‌ی پویایی سیستم مدل‌سازی شدند.

در ادامه، برای در نظرگرفتن تأثیر تعاملات بین نیروی انسانی حاضر در پروژه در بهره‌وری، از رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور استفاده شده است. در نهایت با ترکیب و یک‌پارچه‌سازی دو مدل شبیه‌سازی پیوسته‌ی پویایی سیستم و مدل‌سازی عامل‌محور، مدلی ترکیبی برای پیش‌بینی میزان بهره‌وری با در نظر داشتن کلیه‌ی عوامل اثرگذار ارائه شده است. برای نشان‌دادن قابلیت‌ها و توانایی‌های روش شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهاد شده در پژوهش حاضر، روش شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهادی بر روی یک پروژه‌ی نمونه‌ی بتن‌ریزی پیاده شد. پروژه‌ی مورد مطالعه‌ی مربوط به بتن‌ریزی یک پی گسترده با حجم بتن‌ریزی ۴۰۰ متر مکعب است.

با استفاده از مدل شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهادی، عملکرد سیاست‌های مختلف اجرایی بتن‌ریزی پیش از به کارگیری در یک محیط مجازی ارزیابی شد. برای این منظور، تأثیر عوامل مختلف اثرگذار در بهره‌وری، که رفتار پیوسته در طول زمان دارند، 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 هستند، توسط روش شبیه‌سازی عامل‌محور به دست آمد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی به دست آمده، درنهایت بهترین سیاست بتن‌ریزی تعیین شده است.

روش شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهادی در پژوهش حاضر، می‌تواند ابزاری نوین و قدرتمند را برای پیش‌بینی عملکرد پروژه‌های ساخت در یک محیط مجازی فراهم کند، چرا که اثر عوامل مختلف اثرگذار با رفتار پیوسته در طول زمان و نیز تعامل و اندرکنش موجود بین عوامل (نیروی انسانی) حاضر در پروژه، به طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود.

پانوشت‌ها

1. discrete event simulation
2. building information modeling
3. system dynamics (SD)
4. agent based
5. integrated
6. interfaced
7. sequential
8. expert system
9. agents

منابع (References)

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 J. Civil Engineering*, **30**(2), pp. 69-75 (2014).

19. 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 (sep., 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 fFrom the Ground up*, Boston, MA, MIT Press (1996).

26. Lattila, 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 (June, 2012).

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

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

33. 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).