نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ۱، سال ۱۳۹۷، صفحه ۱۵۷ تا ۱۷۳

نشریه مهندسی سازه و ساخت

www.jsce.ir

مدلسازی ترکیبی در پروژه های ساخت با استفاده از ترکیب رویکردهای شبیه سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل محور

مصطفی خانزادی[۱]، فرناد نصیرزاده[۲*]، مصطفی میر[۳]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

شبیه‌سازی ترکیبی ما را قادر می‌سازد نقاط قوت روش‌های شبیه‌سازی مختلف را با یکدیگر ترکیب نماییم. ترکیب رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل‌محور باعث هم‌افزایی در قدرت روش‌های شبیه‌سازی می‌شود و مدلسازان را قادر می‌سازد موضوعات با پیچیدگی بیشتر را مورد مطالعه قرار دهند. در این تحقیق روشی مناسب برای ترکیب رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور در صنعت ساخت ارائه شده است. روش پیشنهادی با درنظر گرفتن موارد مهمی که یک مدلساز طی انجام شبیه‌سازی با روش پویایی سیستم و عامل‌محور باید در نظر داشته باشد می‌تواند راهنمایی کامل برای مدلسازان باشد. در این روش پیشنهادی پنج مرحله برای ایجاد مؤثر یک مدل ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور پیشنهاد شده‌است. این مراحل به صورت قدم به قدم یک مدل ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور برای حل مشکلات پیچیده با توجه به ویژگی‌های آن مسأله ایجاد می‌کنند.برای ارزیابی عملکرد روش شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهادی، این روش بر روی یک پروژه واقعی پیاده شده و رفتار ناایمن گروه‌های مختلف کاری با توجه به تعاملات بین این گروه های کاری و نیز محیط اطراف مورد بررسی قرار گرفته و شبیه‌سازی می گردد. در ادامه مدت زمان انجام پروژه با در نظر گرفتن اثر تأخیرهایی که به علت رفتار ناایمن در اتمام پروژه ایجاد می‌شود پیش بینی می گردد.

کلمات کلیدی: مدلسازی ترکیبی، مدیریت ساخت، پروژه‌های ساخت، شبیه سازی پویایی سیستم، مدلسازی عامل‌محور.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	10.22065/jsce.2017.86046.1178
۱۳۹۶/۰۱/۲۵	۱۳۹۶/۰۳/۱۲	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۷/۰۳/۳۰		http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86046.1178

**نویسنده مسئول*: فرناد نصیرزاده

پست الکترونیکی: f.nasirzadeh@gmail.com

Hybrid simulation by combining system dynamics and agent-based modeling approaches in construction projects

Mostafa Khanzadi[1], Farnad Nasirzadeh[2]*, Mostafa Mir[3]

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
3- MSc student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Hybrid modeling enables us to use strengths of various simulation approaches. System dynamics is a continuous simulation approach which uses feedback loops, stocks and flows to simulate the complicated behavior of complex systems over time. Agent based modeling is a simulation methodology which uses some specified rules to simulate the behavior of agents in their surrounding environment. Combining of system dynamics and agent-based modeling approaches enhance the capabilities and strengths of individual simulation paradigms. Also, it enables modelers to study more sophisticated problems. This paper presents a novel framework to integrate system dynamics and agent-based approaches to be implemented on construction projects. The proposed approach can provide a complete guideline for modelers by accounting for the most important issues which should be considered by modeler during integrating system dynamics and agent-based approaches. The framework proposes five steps to develop hybrid system dynamics and agent-based models. This step by step process helps to solve complex construction problems considering features of the problem. To evaluate the performance of the proposed approach it is implemented in a real project to investigate the unsafe behavior of different workgroups in a construction site taking account of the interactions with other working groups as well as the surrounding environment. Finally, the project duration is predicted taking account of unsafe behavior of different working groups.

ARTICLE INFO

Received: 14/04/2017
Revised: 02/06/2017
Accepted: 24/06/2017

Keywords:
Hybrid simulation
Construction management
Construction projects
System dynamics
Agent-based modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.86046.1178

*Corresponding author: Farnad Nasirzadeh.
Email address: f.nasirzadeh@gmail.com

۱- مقدمه

در هر تحقیقی رسیدن به هدف مورد نظر نیازمند استفاده از ابزار مناسب و متناسب با هدف آن تحقیق می‌باشد. در تحقیقاتی که از شبیه‌سازی برای مدل‌سازی یک مفهوم یا پدیده استفاده می‌کنند، انتخاب روش شبیه‌سازی مناسب بسیار حائز اهمیت است. انتخاب روش شبیه‌سازی باید متناسب با هدف مورد نظر باشد. برای انتخاب روش شبیه‌سازی ویژگی‌هایی در ذهن مدلساز نقش می‌بندد که باید درنظر گرفته شود. روش شبیه‌سازی انتخاب‌شده باید قادر باشد دسته‌ای از عوامل که مدلساز خواهان استفاده از آن‌ها است را به خوبی درنظر بگیرد. به علت محدودیت‌هایی که بسیاری از روش‌های شبیه‌سازی دارند، یک روش شبیه‌سازی نمی‌تواند به تنهایی تمامی عوامل با دسته-بندی‌های مختلف را در نظر بگیردبدین ترتیب مدلساز ناچار به بهره‌گیری از دو و یا چند روش برای مدل‌سازی است. این محدودیت‌ها زمینه‌ساز استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی می‌شود. هرچه پیچیدگی‌های موجود در یک مسئله بیشتر می‌شود ضرورت استفاده از روش‌های ترکیبی بیشتر احساس می‌شود. محققان مزایای مختلفی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور بیان کرده‌اند. شیریتز و گلوبر [۱] بیان می‌کنند که یکپارچه‌سازی روش شبیه‌سازی پویایی سیستم و رویکرد مدلسازی عامل‌محور باعث ترکیب نقاط قوت دو رویکرد می‌شود. لورنز و جوست [۲] 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 این خاصیت را 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 [۲]. لاتیلا و همکاران [۳] مزایایی برای استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور برای ایجاد یک سیستم خبره بیان نمودند. آن‌ها دو مزیت برای استفاده از پویایی سیستم در عامل‌محور بیان داشتند. اول اینکه، خبره‌ها نمی‌توانند عقایدشان را با در نظر گرفتن عامل‌های فردی بیان کنند اما از وضعیت کلی بیشتر آگاه هستند، پس پویایی سیستم می‌تواند به فرد خبره برای ایجاد یک سیستم خبره پیشرفته کمک کند. دوم اینکه، انتقال یک مفهوم ذهنی به یک منطق ساده بسیار سخت است زیرا فاکتورهای زیادی روی تصمیمات واقعی اثر می‌گذارند. بنابراین پویایی سیستم در این موقعیت می‌تواند کمک کند زیرا این رویکرد برای مطالعه چگونگی ایجاد سیاست‌ها بسیار مفید است.

بی‌شک صنعت ساخت یکی از پیچیده‌ترین صنایع یک کشور است که در میزان مصرف منابع خام آن کشور تأثیر مستقیم دارد. این صنعت بزرگترین و چالش برانگیزترین صنایع در جهان است و ضمن مصرف بخش عظیمی از منابع ملی کشورها، در ایجاد بخش قابل‌توجهی از تولید ناخالص داخلی چه کشورهای در حال توسعه و چه کشورهای توسعه‌یافته نقش دارد [۴]. در این تحقیق تلاش می‌شود با توجه به ویژگی‌های فاکتورهای مؤثر بر صنعت ساخت، ضرورت استفاده از هرکدام از رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور و ترکیب آن‌ها بررسی شود و همچنین روش پیشنهادی برای ترکیب این دو رویکرد ارائه می‌شود. با مروری بر ادبیات موضوع می‌توان دید که تا کنون هیچ چارچوبی برای کمک به مدلسازان برای شبیه‌سازی ترکیبی رویکردهای عامل‌محور و پویایی سیستم در صنعت ساخت ارائه نشده است. در این تحقیق برای نخستین بار چارچوبی برای ترکیب روش‌های شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل‌محور ارائه گردیده است.

۲- رویکردها

۲-۱- رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم[1]

پویایی سیستم برای فهم رفتار سیستم‌های پیچیده و اثرات فاکتورهای سببی طی زمان مفید است [۵]. قدرت پویایی سیستم در توانایی برای در نظر گرفتن غیرخطی بودن در پویایی، بازخوردها و تأخیرهای زمانی نهفته است [۶]. پویایی سیستم بر حوزه‌هایی از موضوعات اجتماعی، صنعتی و محیطی تا سیستم‌های مدیریت پروژه با موفقیت اعمال شده است [۷].

1 System dynamics(SD)

۲-۱-۱- اجزای مدل سیستم پویا

اجزای اصلی یک سیستم پویا حلقه‌های بازخوردی می‌باشند. اما باید توجه داشت برای کمی کردن یک مدل کیفی سیستم باید ابزاری برای اندازه‌گیری و یا مقداردهی به متغیرهای موجود در سیستم فراهم آورد. به همین دلیل چهار بلوک ساختاری در مدل پویایی سیستم به کار می‌روند که عبارتند از [۸]:

- انبارشها یا متغیرهای حالت

انبارشها نمایشی تجمعی از واحدهای یک سیستم با جریان‌هایی به داخل و خارج آن‌ها که توسط بازخوردها و تأخیرها منظم شده است ارائه می‌دهند که نتیجه آن می‌تواند سیستمی باشد که عملکردش غیرخطی و درواقع غیرشهودی باشد [۹]. همچنین حالت‌ها با تجمع و انباشتن مابه‌التفاوت خروجی‌ها و ورودی‌ها منجر به ایجاد تأخیر در سیستم می‌شوند باید توجه داشت که حالت‌ها توسط جریان‌ها تغییر می‌کنند.

- نرخ‌ها یا جریان‌ها

جریان‌ها افزایش یا کاهش در انبارش‌ها یا متغیرهای حالت را سبب می‌شوند. جریان به عملیات جاری می‌گویند که محتوای مخزن را در طول دوره زمانی تعیین می‌کند.

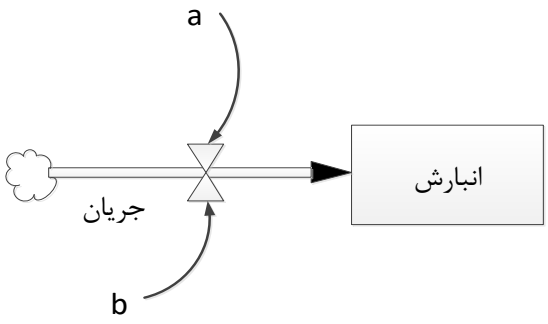
- پیکان‌ها یا ارتباط‌ها

در حلقه‌های علّی، پیکان‌ها نشان دهنده جهت و علامت تأثیر ارتباطات بین متغیرهای مختلف سیستم می‌باشد.

- برگردان‌ها یا مبدل‌ها

متغیری که آهنگ و نرخ کارکرد فرآیند سیستم را تعیین می‌کند. مبدل دارای نقشهای متفاوتی در یک سیستم است. اساسی‌ترین نقش مبدل در تعیین سرعت فرآیند سیستم است. سرعت تغییر محتوای متغیرهای حالت (انبارش) بر اساس سرعت مذکور است.

هر چهار بلوک ساختاری سیستم پویا و انواع بازخورد در شکل شماره ۱ نشان داده می‌شود.



شکل ۱: چهار بلوک ساختاری سیستم پویا و انواع بازخورد.

۲-۲- رویکرد مدلسازی عامل محور

مدل‌سازی عامل‌محور از میانه دهه ۱۹۹۰ میلادی برای حل مسائل مختلف از تجارت تا تکنولوژی به کار گرفته شده است [۶]. مثال‌هایی از کاربرد مدل‌سازی عامل‌محور شامل بهینه‌سازی زنجیره تأمین، مدل‌سازی رفتار مشتری، اثرات شبکه اجتماعی، مدیریت نیروی‌کار و مدیریت سبد پروژه می‌باشد [۶]. شبیه‌سازی عامل محور یک رویکرد است که در آن یک روند شبیه‌سازی حول یک مجموعه از عامل‌های خودگردان که با یکدیگر و محیط در تعامل هستند انجام می‌شود تا آنچه در واقعیت رخ خواهد داد شبیه‌سازی گردد [۱۰, ۱۱]. هر عامل به صورت منفرد موقعیتش را درک و بر اساس یک سری قوانین تصمیم‌گیری می‌کند [۱۱, ۱۲]. توانایی یک عامل منفرد از نظر دانش، منابع و دید محدود است [۱۳]. به همین علت در بیشتر مثال‌های مدل‌سازی، مدل‌سازان از چندین عامل برای مدل‌سازی استفاده می‌کنند، این مدل‌ها سیستم‌های چند عامله[2] نامیده می‌شوند [۱۴]. مدل‌سازی عامل محور یا سیستم‌های چند عامله شامل یک مجموعه از اعضا (عامل‌ها) هستند که توسط ویژگی‌هایی مشخص‌شده‌اند و برطبق قوانین مناسب تعریف شده در یک محیط داده‌شده با هم تعامل و اندرکنش دارند [۱۵].

۲-۳- مقایسه رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل محور

روش شبیه‌سازی پویایی سیستم و روش مدلسازی عامل‌محور دو رویکرد هستند که از شبیه‌سازی کامپیوتری برای جستجوی سیستم‌های غیرخطی و اجتماعی-اقتصادی استفاده می‌کنند در حالی که بر فهمیدن و پیش‌بینی کیفی رفتار سیستم تمرکز دارند [۱۴]. در حقیقت هر دو رویکردها دارای نقاط ضعف و قوتی می‌باشند و می‌توان از آن‌ها برای تکمیل یکدیگر استفاده نمود [۳]. علاوه بر بسیاری از تفاوت‌ها میان رویکردهای پویایی سیستم و عامل محور، تعدادی شباهت نیز وجود دارد که می‌توان به صورت زیر بیان نمود: هر دو رویکرد روی سیستم‌های اجتماعی با تصمیم‌گیری محلی تمرکز دارند و هر دو هدفی مشابه دارند که جستجو برای قواعدی که پویایی هر سیستم پیچیده را در بر می‌گیرد [۱۴, ۱۶] و همچنین هدف هر دو رویکرد، ایجاد و شبیه‌سازی یک سیستم است [۳, ۱۶].

۳- مدلسازی ترکیبی

شبیه‌سازی ترکیبی، شامل استفاده از چند رویکرد شبیه‌سازی می‌باشد و روشی است که استفاده از آن‌ها برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده جدید رو به افزایش است [۹]. علی‌رغم افزایش علاقه به استفاده از رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی، با در نظر گرفتن طبیعت و تنوع مدل‌های شبیه‌سازی ترکیبی، تعداد کمی راهنما برای مدلسازان وجود دارد [۹]. مدل‌های شبیه‌سازی ترکیبی در موقعیت‌های دارای مشکل برای ایجاد مدل‌های واقعی‌تر نیاز هستند [۳]. درحالی که یک سیستم ممکن است تنها توسط یک رویکرد شبیه‌سازی مدل شود، رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی می‌تواند برای افزایش اثربخشی و شفافیت مدل توسعه داده شود [۹]. مدل‌سازی ترکیبی در صنعت ساخت به دنبال آن است که رفتارهای پیچیده سیستم‌های ساخت را در نظر بگیرد [۱۷]. با این حال برای در نظر گرفتن رفتارهای پیچیده سیستم‌های ساخت، چارچوب مدل‌سازی ترکیبی باید قادر باشد تمامی انواع اندرکنش‌های درون مدل ترکیبی را درنظر بگیرد و برای کمک به تولیدکننده مدل، طراحی‌های مدل ترکیبی قابل ارائه، خوب تعریف‌شده و قابل‌فهم ایجاد نماید [۱۷]. رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور از مهم‌ترین روش‌های شبیه‌سازی موجود می‌باشند [۳].

1 Agent-Based Modeling(ABM)
2 Multi-Agents System

۳-۱- مدلسازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

به نظر می‌رسد سوینرد و مک‌نات [۹] کامل‌ترین طبقه‌بندی شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور را ارائه داده‌اند. آن‌ها برای یکسان‌سازی دید و دادن تعاریف مربوطه از کار شانتیکومار و سرجنت [۱۸] استفاده نموده‌اند. شانتیکومار و سرجنت [۱۸] چهار گروه برای شبیه‌سازی ترکیبی پیشنهاد داده‌اند. مدل‌های ترکیبی آن‌ها شامل مدل‌های شبیه‌سازی و مدل‌های تحلیلی می‌باشد.

چهار گروه پیشنهادی شانتیکومار و سرجنت [۱۸] به صورت زیر است:

- یک مدل که رفتارش طی زمان به وسیله جابجایی داده‌ها بین مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی بدست می‌آید.
- یک مدل که در آن مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی طی زمان به صورت موازی وظیفه خود را انجام می‌دهند و سپس با یکدیگر اندرکنش می‌کنند.
- یک مدل که در آن مدل شبیه‌سازی در یک مرحله قبل‌تر از مدل تحلیلی کار می‌نماید.
- یک مدل که در آن یک مدل شبیه‌ساز برای مدل کردن کل سیستم به کار می‌رود اما مقادیری برای قسمتی از سیستم یا پارامترهای ورودی از مدل تحلیلی تأمین می‌شود.

سوینرد و مک‌نات [۹] این چهار گروه را به شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور تعمیم داده و تعداد گروه‌ها را به سه عدد تقلیل دادند. سوینرد و مک‌نات [۹] به طبقه بندی شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور دیگری که در حوزه پایداری اقتصادی توسط مارتینز-مویانو و همکارانش [۱۹] استفاده شده بود نیز اشاره کرده است. مارتینز-مویانو و همکارانش [۱۹] سه نوع اندرکنش بین مدل پویایی سیستم و مدل عامل‌محور پیشنهاد داده‌اند که شامل جستجوی سیاست، مدل‌های در هم پیچیده و پاسخ بحران می‌شود [۹]. پاروناک و همکاران [۲۰] اظهار داشته‌اند: دو راه ممکن برای ترکیب رویکردهای عامل‌محور و پویایی سیستم وجود دارد، در یکی از این راه‌ها یک عامل می‌تواند با استفاده از معادلات پویایی سیستم مدل شود [۳]. سونیرد و مک‌نات [۹] شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرده‌اند که شامل: یکپارچه شده[1]، واسط[2] و ترتیبی[3] می‌باشد.

- یکپارچه شده: گروه یکپارچه شده، بازخورد بین مدل‌های عامل‌محور و پویایی سیستم را برای ارائه یک روند پیوسته و جاری ترکیب می‌نماید.
- 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.
- ترتیبی: مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور باید ابتدا اجرا شوند و خروجی یکی به عنوان ورودی استفاده شود.

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

پیشنهادهای مختلف برای شبیه‌سازی ترکیبی عامل‌محور و پویایی سیستم در جدول شماره ۱ آورده شده است.

1 Integrated
2 Interfaced
3 Sequential

جدول ۱:پیشنهادهای مختلف برای شبیه‌سازی ترکیبی

پاروناک [۲۰]	سوینرد و مک‌نات [۹]		مارتینز-مویانو و همکاران [۱۹]	شانتیکومار و سرجنت [۱۸]
--	واسط		--	گروه ۱
یک عامل با استفاده از معادلات پویایی سیستم مدل شود	عامل با ساختار درونی کامل			
عامل قسمتی از مدل پویایی سیستم بزرگ‌تر باشد	عامل انبارشده	یکپارچه‌شده	مدل‌های درهم‌پیچیده	گروه ۲
	پارامتر با رفتار ظاهر شونده			
--	ترتیبی		جستجوی سیاست و پاسخ بحران	گروه ۳ گروه ۴

موقعیت‌های مختلف در صنعت ساخت که می‌توان از رویکردهای پویایی سیستم یا عامل‌محور و یا هر دو آن‌ها می‌توان استفاده نمود در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲:رویکرد شبیه‌سازی ترجیحی در موقعیت‌های مختلف در صنعت ساخت

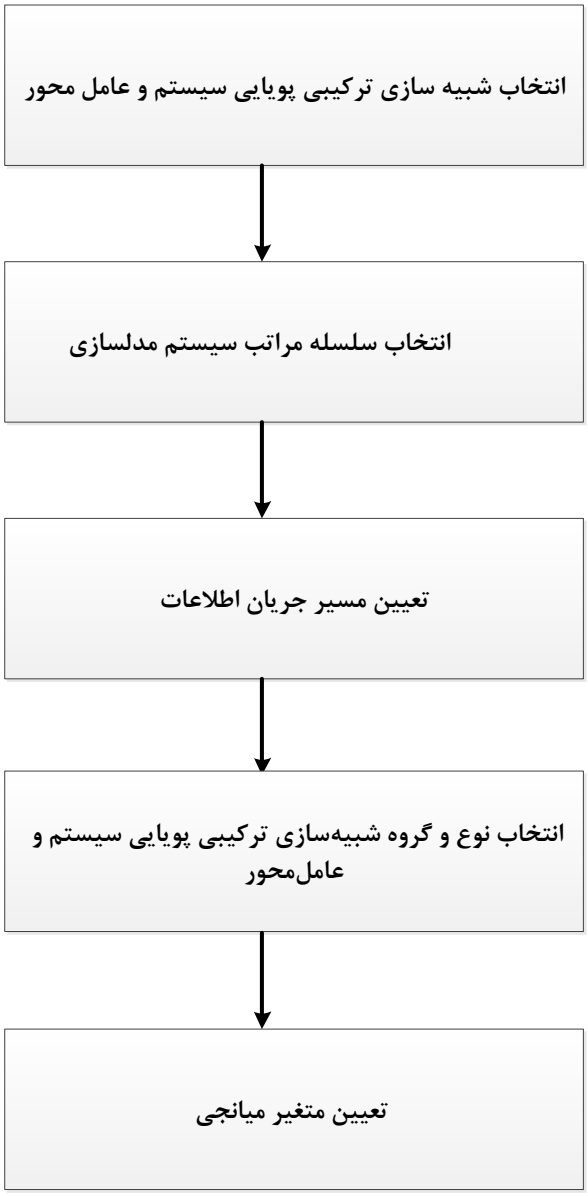
رویکرد ترجیحی	موقعیت	رویکرد ترجیحی	موقعیت
ABM	رابطه پیچیده بین اعضا	ABM	اعضا یکسان نیستند
SD	متغیر های تجمعی	ABMیاSD	داده در دسترس نیست
ABM	تصمیم‌گیری	SD	دنبال کرده یک سیاست
SD	اندازه‌گیری عملکرد	ABM	دارای خاصیت مکانی
SD	واحدهای یکسان	ABM	یادگیری
ABMیاSD	رفتار ظاهرشونده	SD	ارتباط پیچیده بین متغیرها

۴- روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی ترکیبی رویکرد پویایی سیستم و عامل محور

عبارت «چارچوب مدلسازی ترکیبی» به یک مجموعه از المان‌ها و مفاهیم پایه دلالت دارد که به سازندگان مدل ترکیبی، طی مرحله طراحی مفهومی و توسعه مدل ترکیبی کمک می‌نماید [۱۷]. با مروری بر ادبیات موضوع می‌توان دید که تا کنون هیچ چارچوبی برای کمک به مدلسازان برای شبیه‌سازی ترکیبی رویکردهای عامل‌محور و پویایی سیستم در صنعت ساخت ارائه نشده است.

در این تحقیق برای نخستین بار چارچوبی برای ترکیب روش‌های شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدلسازی عامل‌محور ارائه گردیده است. چارچوب مدلسازی ترکیبی پیشنهادی در این تحقیق در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، روند ایجاد شبیه‌سازی ترکیبی عامل‌محور و پویایی سیستم به پنج مرحله تقسیم شده است. اولین قدم انتخاب شبیه‌سازی ترکیبی عامل‌محور و پویایی سیستم است. در حقیقت مدلسازان در اولین گام باید مطمئن باشند که می‌خواهند از شبیه‌سازی ترکیبی عامل‌محور و پویایی سیستم استفاده کنند. دومین قدم سطوح مختلف در یک مدل ترکیبی را توضیح می‌دهد. در مرحله سوم مسیر جریان اطلاعات باید انتخاب شود. در مرحله چهارم مدلسازان نوع شبیه‌سازی ترکیبی عامل‌محور و پویایی سیستم را انتخاب می‌کنند و در آخرین مرحله متغیرهای میانجی[1] باید انتخاب شود. هر یک از این مراحل پنجگانه در ادامه به تفصیل توضیح داده شده است.

1 Interfaced Variables



شکل ۲: مراحل چارچوب پیشنهادی برای شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور.

۴-۱- انتخاب شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

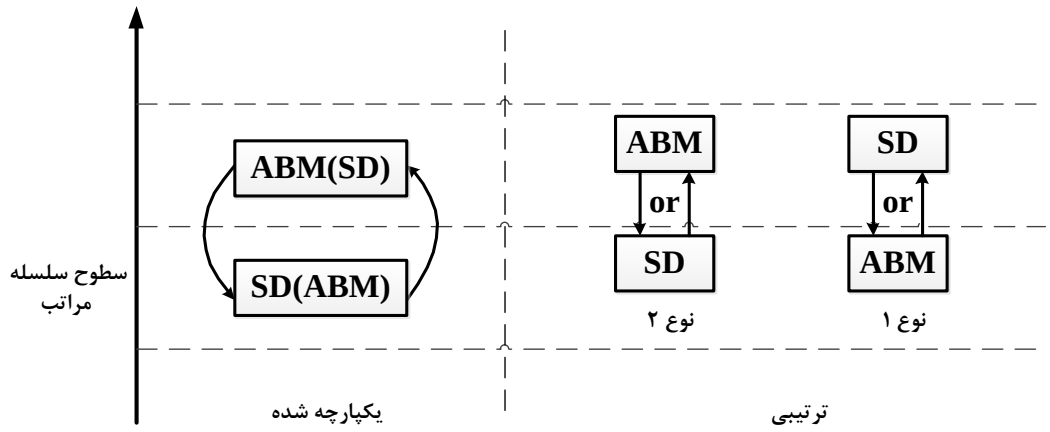
توجه مدلسازان به شبیه‌سازی ترکیبی به دلایلی همچون افزایش آشنایی با بیشتر از یک روش شبیه‌سازی و همچنین پیچیدگی که در بسیاری از حوزه‌ها وجود دارد در حال افزایش است [۹]. هر دو این دلایل برای صنعت ساخت نیز مصداق دارد. مدلسازان می‌توانند جنبه‌هایی از مسائل ساخت را توسط شبیه‌سازی ترکیبی در نظر بگیرند که یک روش شبیه‌سازی به تنهایی نمی‌تواند این کار را انجام دهد. لذا در اولین گام مدلساز باید تصمیم بگیرد که آیا باید از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور استفاده کنند یا خیر. زمانی که مدلسازان جنبه‌هایی از مسائلشان را نمی‌توانند توسط تنها یکی از این رویکردها حل کنند از شبیه‌سازی ترکیبی استفاده می‌نمایند.

۴-۲- انتخاب سلسله مراتب سیستم مدل‌سازی

مشخص کردن سلسله مراتبی که مدلسازان می‌خواهند استفاده کنند مسئله اصلی در شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل-محور می‌باشد. سلسله مراتب سیستم به دیدی که هر رویکرد شبیه‌سازی در مقایسه با رویکرد دیگر دارد بازمی‌گردد که شامل دو نوع است: بالا به پایین، پایین به بالا. سلسله‌مراتب برای دو گروه‌های یکپارچه شده و ترتیبی در شکل شماره ۳ ارائه شده است. در گروه واسط هیچ ارتباطی بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور در هنگام اجرای هر کدام وجود ندارد، بنابراین گروه واسط ممکن است هر کدام از سلسله‌مراتب بالا را داشته باشد. به همین دلیل این گروه در شکل شماره ۳ در نظر گرفته نشده است. زمانی که یک مدلساز فرآیند ساخت را مدل می‌کند، مدل پویایی سیستم ممکن است هر کدام از سلسله مراتب اشاره شده در بالا را در مقایسه با مدل عامل‌محور داشته باشد.

۴-۳- تعیین مسیر جریان اطلاعات

مسیر جریان اطلاعات به مسیر و جهتی که اطلاعات تولیدشده از یک مدل (به عنوان مثال عامل‌محور) به مدل دیگر (به عنوان مثال پویایی سیستم) حرکت می‌کنند گفته می‌شود. بر اساس هدف مدل‌سازی، مدلسازان می‌توانند در مورد نوع ارتباط بین مدل‌ها تصمیم-گیری کنند. زمانی که مدل پویایی سیستم به اطلاعاتی از مدل عامل‌محور نیاز دارد، اطلاعات از مدل عامل‌محور به مدل پویایی سیستم می‌روند و اگر مدل عامل‌محور به اطلاعاتی از مدل پویایی سیستم نیاز داشته باشد اطلاعات از مدل پویایی سیستم به مدل عامل‌محور می‌رود. یک مدل می‌تواند یکی یا هر دو و یا هیچ‌کدام از این دو نوع جریان اطلاعات را داشته باشد که مسیر جریان اطلاعات را تشکیل می‌دهد. مشخص کردن مسیر جریان اطلاعات می‌تواند برای انتخاب بهترین نوع شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور در مرحله بعد کمک کند. مسیر جریان اطلاعات در شکل شماره۳ توسط پیکان‌هایی نشان داده شده است.



شکل ۳:سلسله‌مراتب و مسیر انتقال اطلاعات برای گروه‌های ترتیبی و یکپارچه شده.

۴-۴- انتخاب نوع و گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

بر اساس دید به دست آمده در مرحله قبل و هدف مدل‌سازی، نوع و گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور را می‌توان تعیین کرد. در چارچوب پیشنهادی در این تحقیق، طبقه‌بندی شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور سوینرد و مک‌نات[۹] برای انتخاب گروه و نوع شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور استفاده شده است. همانطور که پیشتر اشاره شد، سوینرد و مک‌نات[۹] سه گروه برای شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور معرفی کرده‌اند:

یکپارچه‌شده

واسط

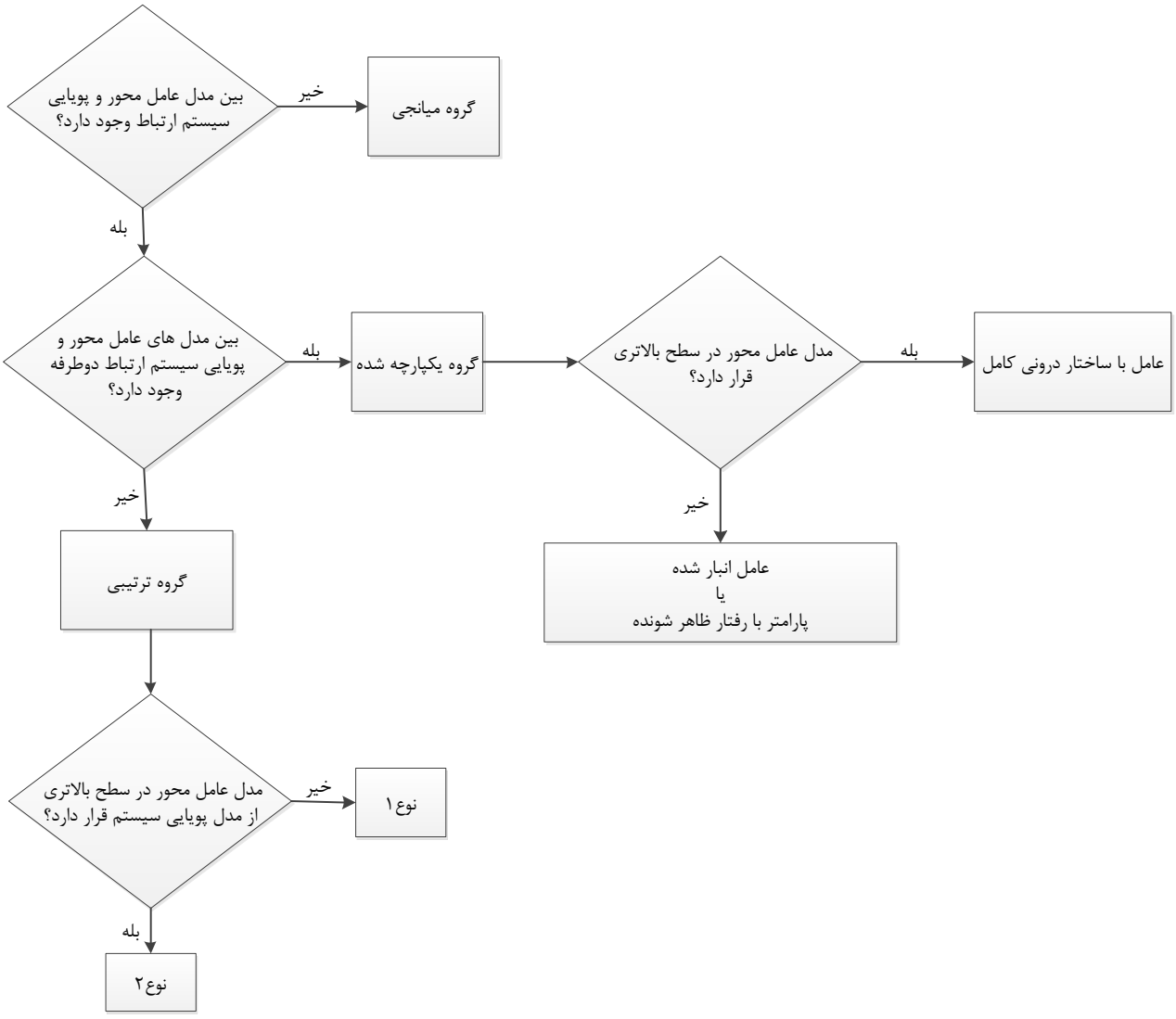
ترتیبی

بر اساس سلسله مراتب انتخاب‌شده برای سیستم و همچنین مسیر جریان اطلاعات انتخاب‌شده، مدلسازان می‌توانند تصمیم بگیرند از کدام گروه و نوع از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور استفاده کنند. در شکل ۴ روند انتخاب گروه و نوع شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور نشان داده شده است. برای مثال، زمانی که بین مدل‌های عامل‌محور و پویایی سیستم اندرکنش وجود دارد اما این اندرکنش دوطرفه نیست مدلساز باید از گروه ترتیبی از شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور استفاده کند. بر اساس سطح سلسله‌مراتب، گروه ترتیبی به دو نوع تقسیم شده‌اند.

ترکیبی از انواع ترکیبی فوق‌الذکر را نیز می‌توان استفاده کرد. برای مثال، دو مدل پویایی سیستم و یک مدل عامل محور استفاده می‌شوند. این روش می‌تواند برای مدلسازان ساخت بسیار مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، عامل‌هایی با ساختار درونی کامل وجود دارند. این عامل‌ها با عامل‌های دیگر و محیط اطرافشان اندرکنش می‌کنند. اطلاعات از تمامی عامل‌ها جمع می‌شود و به مشاهده‌کننده که در سطح بالایی قرار دارد فرستاده می‌شود. مشاهده‌کننده دارای یک دید کلی است و می‌تواند به عامل‌ها برای داشتن عملکرد بهتر کمک کند. در سایت ساخت این مشاهده‌کنندگان می‌توانند به عنوان مدیران در نظر گرفته شوند که بر اساس داده‌های دریافتی از موقعیت‌های عامل‌ها (کارگران یا وسائل نقلیه) یک پیغام جدید برای هر عامل برای عملکرد بهتر می‌فرستند.

۴-۵- انتخاب متغیر میانجی

در هر کدام از گروه‌ها و انواع شبیه‌سازی ترکیبی، متغیرهایی که داده‌ها را از یک مدل به مدل دیگر می‌فرستند وجود دارند که به آن‌ها متغیر میانجی گفته می‌شود. جریان اطلاعات در گروه یکپارچه‌شده به صورت چرخشی اتفاق می‌افتد. بدین معنی که هر مدل یک خروجی به مدل دیگر دارد و درعین‌حال از آن مدل ورودی می‌گیرد (شکل شماره۳). مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور در گروه شبیه‌سازی ترکیبی واسط، هیچ انتقال اطلاعات بین خودشان در طول اجرای این مدل‌ها ندارند. در گروه ترتیبی اطلاعات از یک مدل به مدل دیگر انتقال پیدا می‌کند (شکل شماره۳). در تمامی روند انتقال، متغیرهایی وجود دارند که انتقال اطلاعات را ممکن می‌سازند. انتخاب متغیر میانجی، انتخاب درگاه‌هایی برای انتقال اطلاعات از یک مدل به مدل دیگر می‌باشد.



شکل ۴:مراحل انتخاب گروه و نوع شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم وعامل‌محور.

۵- کاربرد روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی ترکیبی رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور، این روش در یک پروژه واقعی برای مدل کردن رفتار ناایمن گروه‌های‌کاری و اثر آن روی عملکرد پروژه به کار گرفته شده است. پروژه مورد مطالعه شامل نصب یک سازه فلزی به وزن ۲۳۰۰ تن می‌باشد. این پروژه توسط دو پیمانکار متفاوت انجام می‌شود. حجم کار اولیه‌ای که برای هرکدام از پیمانکاران درنظر گرفته شده است متفاوت می‌باشد که برای پیمانکاران A و B به ترتیب ۹۰۰، ۱۴۰۰ تن تعیین شده است.

چگونگی رفتار ایمن عوامل مختلف موجود در پروژه یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر عملکرد پروژه است. رفتار ناایمن کارگران حوادث و مصدومیت‌ها در محیط کارگاه را افزایش می‌دهد که این حوادث و مصدومیت‌ها باعث افزایش زمان پروژه می‌شود. اندازه‌گیری ایمنی برای گزارش ایمنی در یک سازمان، شناسایی مکان برای جلوگیری از حوادث و ارزیابی عملکرد برنامه‌های ایمن سازی ضروری است [۲۱, ۲۲]. یک محدودیت مرتبط با ارزیابی اثربخشی برنامه‌های ایمن‌سازی فقدان یک اندازه‌گیری مناسب از عملکرد ایمنی است [۲۱, ۲۳].

اندازه‌گیری‌های سنتی عملکرد ایمنی روی داده‌های بعضی انواع حوادث یا مصدومیت‌ها تکیه دارند [۲۴]. نمونه‌گیری رفتاری برای رفع بعضی از محدودیت‌های روش‌های ارزیابی رفتار ایمن سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. نمونه‌گیری رفتاری براساس مشاهدات رفتارهای نمونه‌گیری شده اتفاقی کارگران در محیط کار و ارزیابی اینکه آیا رفتار مشاهده شده ایمن است یا ناایمن قرار داده شده است [۲۱, ۲۵]. انواع رفتارهایی که مشاهده شده است شامل استفاده از تجهیزات محافظ شخصی، استفاده از تجهیزات برای کار در ارتفاع، استفاده از وسایل مکانیکی برای انجام کارها و حمل دستی مصالح می‌باشد. این روش به این دلیل استفاده شد که نمونه‌گیری رفتاری به عنوان یک روش قابل اتکا و حساس برای ارزیابی عملکرد ایمن پیشنهاد شده است [۲۶،۲۵،۲۱]. در این مطالعه به علت قابل‌اتکا بودن و معتبر بودن از روش نمونه‌گیری رفتاری استفاده می‌شود. نرخ رفتار ناایمن یکی از نشان‌دهنده‌های ایمنی است که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ رفتار ناایمن که به صورت درصد بیان می‌گردد، نسبت مجموع تعداد رفتار ناایمن مشاهده شده از کارگران به کل فعالیت‌های مشاهده شده از کارگران در مدت زمان معینی را نشان می‌دهد. قوانین محیط کار شامل استانداردهایی می‌باشد که افراد مشغول به کار در محیط کارگاهی تشویق به رعایت این قوانین می‌شوند. مدیران کارگاه برای کاهش میزان اتفاقات و آسیب‌دیدگی‌های کارگران مشغول به کار در کارگاه تلاش می‌کنند، نرخ رفتار ناایمن این افراد را کاهش دهند و به مقداری مطلوب نزدیک نمایند. نرخ رفتار ناایمن با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\text{نرخ رفتار ناایمن} = ۱۰۰ \times \left(\frac{\text{مجموع رفتار ناایمن}}{\text{مجموع رفتار ایمن} + \text{مجموع رفتار ناایمن}}\right) \qquad (۱)$$

مقدار نرخ رفتار ناایمن بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است. در مطالعه موردی مورد استفاده مقادیر اولیه نرخ رفتار ناایمن پیمانکاران A و B برای هر کدام به ترتیب ۴۰و ۷۵ بدست آمد. ویژگی‌های گروه‌های کاری مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: ویژگی‌های پیمانکاران

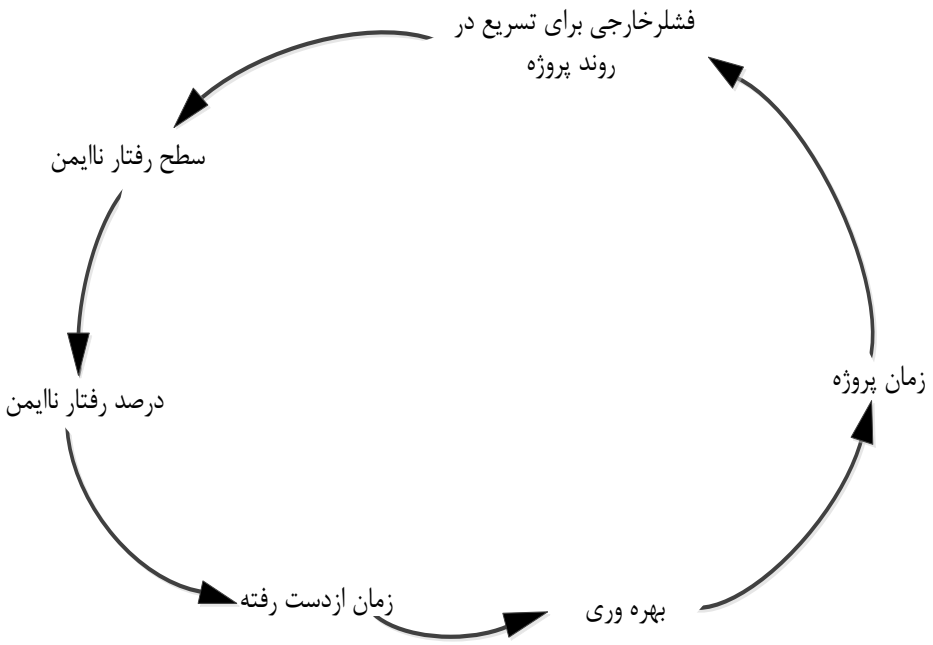
ویژگی‌ها	پیمانکار A	پیمانکار B
بهره‌وری اولیه (تن در روز)	۳	۴
حجم کار (تن)	۹۰۰	۱۴۰۰
نرخ رفتار ناایمن اولیه(درصد)	۴۰	۷۵

در این قسمت چگونگی اثرگذاری رفتارناایمن پیمانکاران بر رفتار ناایمن یکدیگر و اثر این ارتباط بین پیمانکاران بر عملکرد پروژه از نظر زمان اتمام پروژه با استفاده از مراحل پیشنهاد شده در قسمت قبل را نشان می‌دهیم. هرکدام از مراحل پنجگانه تشریح شده در قسمت قبل، در ادامه برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده تشریح می‌گردد.

۵-۱- انتخاب شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور

در مرحله اول باید مشخص شود برای مدل کردن مسئله استفاده از یک روش مدلسازی کافی است یا باید از روش ترکیبی برای مدلسازی استفاده کرد. نرخ رفتار ناایمن پیمانکاران متفاوت است و این باعث متفاوت بودن و ناهمسان بودن آن‌ها می‌شود. از طرف دیگر، رفتار پیمانکاران مختلف تحت تأثیر پیمانکاران دیگر موجود در محیط قرار می‌گیرد. بنابراین برای در نظر گرفتن ناهمسانی و همچنین اندرکنش بین این پیمانکاران استفاده از رویکرد عامل‌محور ضروری به نظر می‌رسد. در این مدل هر پیمانکار یک عامل در نظر گرفته می‌شود. بر رفتار ناایمن پیمانکاران عوامل مختلفی اثر می‌گذارند. برای درنظر گرفتن این عوامل به صورت همزمان بهترین روش رویکرد پویایی سیستم

است. مدل پویایی سیستم استفاده شده در این تحقیق در شکل شماره ۵ ارائه شده است. در این شکل عوامل مختلفی که بر رفتار ناایمن پیمانکاران اثر می‌گذارد و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر نشان داده شده‌اند. با توجه به استدلال‌های ارائه شده در این قسمت، استفاده از هر دو رویکرد مدلسازی پویایی سیستم و عامل‌محور ضروری به نظر می‌رسد که باعث استفاده از مدلسازی ترکیبی می‌شود.



شکل ۵: مدل پویایی سیستم رفتارناایمن.

۵-۲- انتخاب سلسله مراتب سیستم مدلسازی

همانطور که در شکل شماره ۵ مشاهده می‌شود مدل پویایی سیستم شامل عوامل اثرگذار بر رفتار ناایمن در سطح هرکدام از پیمانکاران می‌باشد. بنابراین مدل پویایی سیستم یک دید فردی برای هر کدام از پیمانکاران دارد. هر پیمانکار به عنوان یک عامل در مدل عامل‌محور در نظر گرفته شده است و رفتار هر پیمانکار بر اساس اطلاعاتی که از مدل پویایی سیستم دریافت می‌کند تعیین می‌شود. باتوجه به اینکه مدل پویایی سیستم تنها به جنبه فردی هرکدام از پیمانکاران توجه دارد اما مدل عامل‌محور محل اندرکنش بین پیمانکاران مختلف و محیط کارگاهی است،بنابراین مدل پویایی سیستم دارای دید پایین به بالا در مقایسه با مدل عامل‌محور است(مدل پویایی سیستم در سطح پایینتری از مدل عامل‌محور قرار دارد).

۵-۳- تعیین مسیر جریان اطلاعات

مسیرجریان اطلاعات مربوط به مسیر و جهتی است که اطلاعات از هرکدام از مدل‌ها به دیگری منتقل می‌شود. رفتار ناایمن هر پیمانکار که از رفتار ناایمن پیمانکاران دیگر و همچنین قوانین کارگاه اثر می‌پذیرد به عنوان ورودی به مدل پویایی سیستم وارد می‌شود. بنابراین مدل پویایی سیستم از مدل عامل‌محور ورودی می‌گیرد. ازطرف دیگر مقدار نرخ رفتارناایمن وارد شده به مدل پویایی سیستم تحت تأثیر عواملی که در مدل پویایی سیستم در نظر گرفته شده قرار می‌گیرند و باعث تغییر در نرخ رفتار ناایمن هر پیمانکاران می‌شود. مقدار تغییر داده شده نرخ رفتار ناایمن پیمانکار توسط مدل پویایی سیستم بوسیله آن پیمانکار در محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین اطلاعات بین مدل‌ها به صورت دوطرفه می‌باشد.

۵-۴- انتخاب نوع و گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور

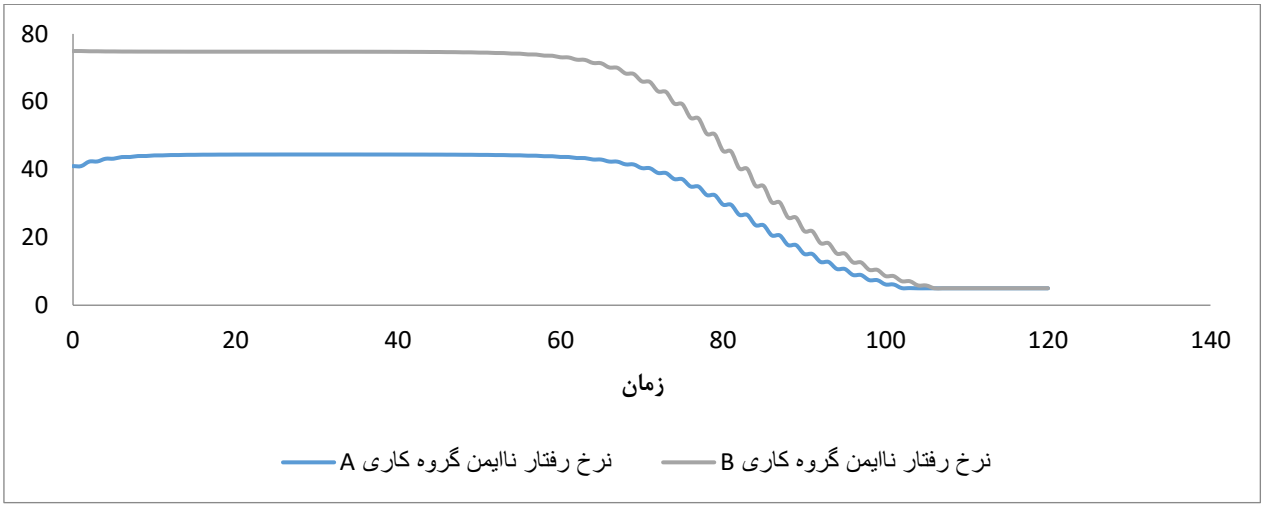
انتخاب گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور می‌تواند با استفاده از نتایج قدم‌های پیشین و شکل شماره ۴ انجام شود. همانطور که در قسمت ۵-۳ بیان شد، بین مدل‌های پویایی سیستم و عامل‌محور تبادل ارتباط انجام می‌شود و به دلیل اینکه این تبادل اطلاعات به صورت دوطرفه می‌باشد، گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور این مدل به صورت یکپارچه شده می‌باشد. و همانطور که در قسمت ۵-۲ بیان شد، در این مدل مدل پویایی سیستم در سطح پایین‌تری نسبت به مدل عامل‌محور قرار دارد بنابراین از بین سه نوع مدلسازی بیان شده برای گروه شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل محور یکپارچه شده، گروه "عامل با ساختار درونی کامل" انتخاب می‌شود.

۵-۵- تعیین متغیر میانجی

مدل‌های پویایی سیستم وعامل محور با استفاده از متغیر میانجی اطلاعات خود را تبادل می‌کنند. در مدل مورد نظر، مقدار متغیر "رفتار ناایمن" با در نظر گرفتن اندرکنش بین پیمانکاران و همچنین قوانین کارگاه توسط مدل عامل‌محور محاسبه می‌شود. مقدار نهایی متغیر رفتار ناایمن به عنوان ورودی برای مدل پویایی سیستم فرستاده می‌شود. و همینطور مقدار جدید رفتار ناایمن که توسط مدل پویایی سیستم بدست آمده است به عنوان ورودی به مدل عامل‌محور داده می‌شود تا در محیط کار مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین متغیر رفتار ناایمن به عنوان متغیر میانجی مشخص می‌شود.

۶- نتایج و بحث

با استفاده از مدل ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور پیشنهادی می‌توان رفتار ناایمن پیمانکاران مختلف و اثر آن روی عملکرد پروژه را شبیه‌سازی کرد. نرخ رفتار ناایمن هر پیمانکار بر اساس نسبت بین رفتارهای ناایمن مشاهده شده از نیروهای کاری پیمانکار به کل رفتارهای مشاهده شده از نیروهای آن پیمانکار در مدت زمان معین و به صورت درصد بیان می‌شود. مقدار رفتار ناایمن هر پیمانکار تحت تأثیر رفتار گروه‌های کاری دیگر و همچنین قوانین محیط کار است. شکل ۶ نشان می‌دهد رفتار ناایمن پیمانکاران مختلف چگونه تحت تأثیر یکدیگر و قوانین محیط کار تغییر می‌کند. همانطور که در این شکل نشان داده شده است نرخ رفتار ناایمن پیمانکاران اندازه‌گیری شده قبل از شروع پروژه جدید برای هرکدام از پیمانکاران به ترتیب برای پیمانکاران A و B مقدار ۴۰ و ۷۵ درصد می‌باشد. مقدار رفتار ناایمن پیمانکاران در روزهای اول تغییرات کمی دارد و مقدار رفتارناایمن پیمانکار A تحت تأثیر رفتار پیمانکار B مقداری افزایش می‌یابد و در ادامه مقدار رفتارناایمن هردو پیمانکار ثابت می‌ماند اما از حدود روز ۶۰ به بعد رفتار هر دو پیمانکار تحت تأثیر مقررات ایمنی کارگاه شروع به کاهش می‌کند و در حدود روز ۱۲۰ به مقدار مورد نظر مدیران کارگاه که ۵ درصد است می‌رسد. قابل ذکر است که کاهش رفتار ناایمن پیمانکاران تنها تحت تأثیر مقررات کارگاه صورت نمی‌گیرد بلکه با شروع تأثیر مقررات کارگاه بر اعضای یکی از پیمانکاران، اعضای پیمانکار دیگر نیز با مشاهده کاهش رفتار ناایمن گروه همکارش شروع به کاهش رفتار ناایمن می‌کند.



شکل۶: روند تغییر رفتار ناایمن پیمانکاران طی زمان پروژه.

همانطور که در جدول شماره ۴ مشاهده می‌شود، مقدار اولیه مدت زمان انجام پروژه بدون در نظر گرفتن اثر تأخیرهایی که به علت رفتار ناایمن در اتمام پروژه ایجاد می‌شود با توجه به مقادیر بهره‌وری اولیه برای پیمانکار A و B به ترتیب ۳۰۰ و ۳۵۰ روز می‌باشد. ولی زمانی که اثر تأخیرهای ناشی از رفتارناایمن پیمانکاران را با استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور اعمال می‌کنیم و اثر رفتار پیمانکاران بر یکدیگر و همینطور اثر مقررات ایمنی کارگاه را در نظر می‌گیریم، این مقادیر به ترتیب به ۳۱۹ و ۳۸۲ روز می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین افزایش زمان پروژه مربوط به پیمانکار B می‌باشد زیرا مقدار رفتارناایمن در بین اعضای این پیمانکار بیشتر بوده و بنابراین اتفاقات و آسیب دیدگی‌ها بیشتر است و ۳۲ روز به مدت پروژه به علت بالا بودن رفتار ناایمن اضافه می‌شود.

جدول ۴: زمان‌های اتمام کار پیمانکاران

نتایج / پیمانکاران	زمان اتمام کار بدون در نظر گرفتن اثر رفتار ناایمن(روز)	زمان اتمام کار با در نظر گرفتن رفتار ناایمن (روز)	درصد افزایش زمان ناشی از رفتار ناایمن
پیمانکار A	۳۰۰	۳۱۹	۶/۳۳
پیمانکار B	۳۵۰	۳۸۲	۹/۱۴

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد رفتار ناایمن گروه‌های کاری در ابتدا تحت تأثیر دیگر گروه‌های کاری مشغول در محیط کار می‌باشد اما به مرور زمان با توجه به مقررات کارگاه و میزان تأکید مدیران کارگاه بر اجرای ایمن فعالیت‌ها، رفتار گروه‌های کاری به رفتارهای ایمن تغییر می‌کند. همچنین بالا بودن نرخ رفتار ناایمن گروه‌های کاری در روزهای اولیه پروژه باعث ایجاد حوادث و کاهش بهره‌وری پیمانکاران و در نتیجه افزایش زمان اتمام وظایف محوله می‌شود. این افزایش زمان برای پیمانکاری که میزان بیشتری از رفتارهای ناایمن را تجربه کرده، بیشتر بوده است.

۷- نتیجه‌گیری

این تحقیق روشی نوین و کارامد برای ترکیب رویکردهای شبیه‌سازی پویایی سیستم و عامل‌محور در صنعت ساخت ارائه می‌دهد. با استفاده از رویکرد ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور پیشنهادی می‌توان از نقاط قوت دو رویکرد شبیه‌سازی به صورت همزمان استفاده

نمود و با استفاده از این ترکیب نقاط ضعف آن‌ها را برطرف نمود. روش شبیه‌سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور قادر است عوامل پیوسته در طول زمان و همچنین ویژگی‌هایی که مدل عامل‌محور قادر به اندازه‌گیری آن است را به صورت همزمان در نظر بگیرد.

برای ارزیابی عملکرد روش ارائه شده برای ترکیب رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور، این روش در یک پروژه واقعی برای اندازه‌گیری نرخ رفتار ناایمن پیمانکاران مشغول به کار در این پروژه مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه موردی، رفتار ناایمن نفرات هرکدام از پیمانکاران تحت تأثیر رفتار ناایمن پیمانکاران دیگر و همچنین تلاش‌های مدیران کارگاه برای کاهش رفتار ناایمن پیمانکاران مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اثر رفتار ناایمن پیمانکاران بر روی مدت زمان اتمام پروژه با توجه به اندرکنش‌های بین پیمانکاران و روابط درون کارگاه مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده نشان داده شد که زمان انجام پروژه بدون در نظر گرفتن اثر تأخیرهایی که به علت رفتار ناایمن در اتمام پروژه ایجاد می‌شود برای پیمانکار A و B به ترتیب ۳۰۰ و ۳۵۰ روز می‌باشد. ولی زمانی که اثر تأخیرهای ناشی از رفتارناایمن پیمانکاران را با استفاده از روش شبیه‌سازی ترکیبی رویکردهای پویایی سیستم و عامل‌محور اعمال می‌کنیم و اثر رفتار پیمانکاران بر یکدیگر و همینطور اثر مقررات ایمنی کارگاه را در نظر می‌گیریم، این مقادیر به ترتیب به ۳۱۹ و ۳۸۲ روز می‌رسد. در ادامه نشان داده شد که بیشترین افزایش زمان پروژه مربوط به پیمانکار B می‌باشد زیرا مقدار رفتارناایمن در بین اعضای این پیمانکار بیشتر بوده و بنابراین اتفاقات و آسیب دیدگی‌ها بیشتر است و ۳۲ روز به مدت پروژه به علت بالا بودن رفتار ناایمن اضافه می‌شود.

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه موردی می توان نتیجه گرفت که رویکرد شبیه سازی ترکیبی پویایی سیستم و عامل‌محور پیشنهادی قادر است به خوبی اهداف مورد نظر مدلسازان را برآورده سازد و پیچیدگی‌های غیرقابل اجتناب موجود در پروژه‌های ساخت را به خوبی در نظر بگیرد.

مراجع

[1] Schieritz, N. and Grobler, A. (2003). Emergent structures in supply chains-a study integrating agent-based and system dynamics modeling. In: Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences.

[2] Lorenz, T. and Jost, A. (2006). Toward an orientation framework in multi-paradigm modeling. In: Proceeding of the 24th International Conference System Dynamics Society.

[3] Lättilä, L., Hilletofth, P. and Lin, B. (2010). Hybrid simulation models–when, why, how?. Expert systems with applications, 37(12), 7969-7975.

[4] Mawdesley, M.J. and Al-Jibouri, S. (2009). Modelling construction project productivity using systems dynamics approach. International Journal of Productivity and Performance Management, 59(1), 18-36.

[5] Mostafavi, A., Abraham, D., Delaurentis, D, Sinfield, J. and Queiroz, C. (2012). Innovation Policy Assessment for Civil Infrastructure System-of-Systems. In: Construction Challenges in a Flat World in Construction Research Congress, ASCE.

[6] Wu, D.D., Kefan, X., Hua, L., Shi, Zh. and Olson, D.L. (2010). Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: an agent-based perspective. Technological Forecasting and Social Change, 77(6), 857-869.

[7] Nasirzadeh, F., Afshar, A. and Khanzadi, M. (2008). System dynamics approach for construction risk analysis. International Journal of Civil Engineering, 6(2), 120-131.

[8] Sterman, J. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin: McGraw-Hill.

[9] Swinerd, C. and McNaught, K.R. (2012). Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. Simulation Modeling Practice and Theory, 25, 118-133.

[10] Sanchez, S.M. and Lucas, T.W. (2002). Exploring the world of agent-based simulations: simple models, complex analyses. In: Proceedings of the 34th conference on winter simulation: exploring new frontiers, Winter Simulation Conference.

[11] Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K. and Mulky, A.R. (2003). Agent-based modeling and simulation in construction. In: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, IEEE.

[12] Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 7280-7287.
[13] Ren, Z. and Anumba, C. (2004). Multi-agent systems in construction–state of the art and prospects. Automation in Construction,13(3), 421-434.
[14] Schieritz, N. and Milling, P.M. (2003). Modeling the forest or modeling the trees. In: Proceedings of the 21st International Conference of the System Dynamics Society.
[15] Barbati, M., Bruno,G. and Genovese, A. (2012). Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review. Expert Systems with Applications, 39(5), 6020-6028.
[16] Phelan, S.E. (1999). A note on the correspondence between complexity and systems theory. Systemic Practice and Action Research, 12(3), 237-246.
[17] Alvanchi, A., Lee, S. and AbouRizk, S. (2011). Modeling framework and architecture of hybrid system dynamics and discrete event simulation for construction. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 26(2), 77-91.
[18] Shanthikumar, J. and Sargent, R. (1983). A unifying view of hybrid simulation/analytic models and modeling. Operations research, 31(6), 1030-1052.
[19] Martinez-Moyano, I. ,Sallach, D., Bragen, M. and Thimmapuram, P.R. (2007). Design for a multilayer model of financial stability: Exploring the integration of system dynamics and agent-based models. System Dynamics, 1-16.
[20] Parunak, H.V.D., Savit, R. and Riolo, R.L. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In: Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, Springer.
[21] Glendon, A.I. and Litherland, D.K. (2001). Safety climate factors, group differences and safety behavior in road construction. Safety science, 39(3), 157-188.
[22] Tarrants, W. (1970). A definition of the safety measurement problem. Journal of Safety Research, 2(3), 106-108.
[23] Rockwell, T. (1959). Safety performance measurement. Journal of Industrial Engineering, 10(1), 12-16.
[24] Choudhry, R.M., Fang, D. and Mohamed, S. (2007). The nature of safety culture: A survey of the state-of-the-art. Safety Science, 45(10), 993-1012.
[25] Tarrants, W.E. (1980).The measurement of safety performance.
[26] Fitch, H.G., Hermann, J. and Hopkins, B. (1976). Safe and unsafe behavior and its modification. Journal of Occupational and Environmental Medicine,18(9), 618-622.