مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۶۹-۷۹

Original Article

مدل‌سازی پویا نیاز به نیروی کار در پروژه‌های ساخت

شاهین دیربان * **(استادیار)**
دانشکده‌ی معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، اصفهان، ایران
سروش عباس‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان، ایران
مصطفی خانزادی (دانشیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه علم وصنعت، تهران، ایران

یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریت منابع انسانی، تأمین نیروی کار موردنیاز پروژه است که در جریان کار و پیشرفت پروژه تأثیر به‌سزایی دارد. در پژوهش حاضر، ابتدا با نگاهی دقیق‌تر، ضمن بررسی میزان نیاز به نیروی کار پروژه‌های ساخت براساس پیشرفت پروژه، مدل علی ـ معلولی آن با استفاده از روش پویایی سیستم به‌دست آورده شده است. سپس، ساختار حالت ـ جریان تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه‌های ساخت توسعه داده شده است. در ادامه، اطلاعات لازم جهت کمّی‌سازی مدل شبیه‌ساز توسعه داده شده، برای یک پروژه‌ی انبوه‌سازی مسکن جمع‌آوری شده است. مدل ارائه شده در پژوهش حاضر، امکان تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه‌های ساخت با لحاظ پویایی‌های موجود در پروژه را دارد. در نهایت، با استفاده از مدل ارائه شده، می‌توان برنامه‌ریزی لازم را جهت تأمین و تخصیص به موقع نیروی کار موردنیاز پروژه، قبل و در حین اجرای پروژه انجام داد و سیاست‌های لازم را جهت بهبود اجرای فرایند مذکور اعمال کرد.

واژگان کلیدی: مدیریت منابع انسانی، نیاز به نیروی کار، شبیه‌سازی، پروژه‌های ساخت، پویایی سیستم.

sh.dabirian@aui.ac.ir
s.abbaspour@khuisf.ac.ir
khanzadi@iust.ac.ir.ac.ir

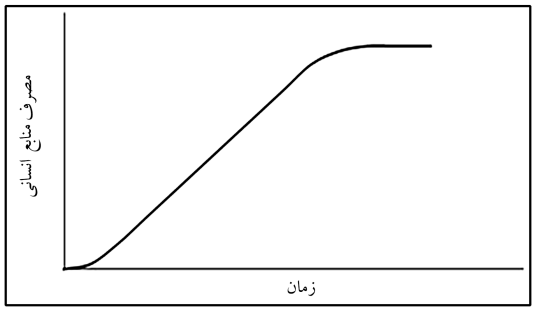
۱. مقدمه

مدیریت منابع انسانی به‌عنوان یک فرایند اساسی برای به‌کارگیری مؤثر نیروی کار، به منظور اجرای مطلوب پروژه محسوب می‌شود. اهداف شرکت یا پروژه فقط از طریق منابع انسانی حاصل می‌شود و موفقیت پروژه، تابع منابع انسانی است.[۱] به بیان واضح‌تر، موفقیت هر پروژه‌یی بستگی به عملکرد و در دسترس بودن منابع انسانی دارد. از آنجایی که معیار موفقیت هر پروژه براساس عملکرد آن سنجیده می‌شود، بنابراین می‌توان گفت مدیریت منابع انسانی، نقش کلیدی در تکمیل پروژه با بودجه‌ی تصویب شده، زمان برنامه‌ریزی شده و کیفیت موردانتظار دارد. یکی از عوامل تأثیرگذار مدیریت منابع انسانی در عملکرد پروژه، تشکیل تیم موردنیاز پروژه است. زمانی که یک پروژه‌ی جدید شروع می‌شود، پیکره‌ی منابع انسانی (چیدمان تیم پروژه) باید شکل بگیرد. این امر، نیاز به فرایندهای جدیدی همچون تخصیص نیروی کار به پروژه‌ی موردنظر را به وجود می‌آورد.[۲] با وجود ظهور تکنولوژی‌های پیشرفته و پیچیده، صنعت ساخت همچنان تا حد زیادی بر پایه‌ی منابع انسانی استوار است و موفقیت پروژه، ارتباط زیادی با مدیریت منابع انسانی دارد.[۳] بنابراین می‌توان گفت مدیریت منابع انسانی یکی از موضوعات مهم و قابل توجه در صنعت ساخت است. جهت دست‌یابی به اهداف عملکردی پروژه، باید به تأمین نیروی کار موردنیاز یک پروژه‌ی ساخت به‌عنوان بخش مهمی از اقدامات مدیریت منابع انسانی توجه شود. یکی از دلایل عمده‌ی شکست پروژه‌های ساخت، عدم تأمین به موقع نیروی کار موردنیاز پروژه است. از آنجایی که در پروژه‌ها همیشه یا نیروی کار مازاد یا کمبود نیروی کار وجود دارد،[۴] می‌توان گفت که تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه و تأمین آن، تأثیر به سزایی در جریان و پیشرفت پروژه دارد؛ درعین حال، تخمین دقیق نیروی کار می‌تواند کمک شایانی به کنترل نوسان‌های نیروی کار در طول اجرای پروژه کند. در واقع، حصول اطمینان از تشکیل تیم پروژه و کافی بودن نیروی کار پروژه‌های ساخت، یک وظیفه‌ی حیاتی است.[۵] روش‌های سنتی زمان‌بندی مانند CPM و PERT، به‌صورت ایستا زمان‌بندی پروژه را انجام می‌دهند که دلیلی بر ناکارآمدی روش‌های مذکور است. به‌عنوان مثال، یکی از اهداف به کارگیری روش PERT، محاسبه‌ی میزان احتمال خاتمه‌ی پروژه در زمان برنامه‌ریزی شده است که به‌صورت ایستا صورت می‌پذیرد. همچنین روش‌های دیگری، مانند روش زمان‌بندی زنجیره‌ی بحرانی، زمان‌بندی پروژه را با لحاظ وابستگی و محدودیت منابع انجام می‌دهد. از تفاوت‌های روش‌های مسیر بحرانی با زنجیره‌ی بحرانی می‌توان به این

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۲۶، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۱۷.
DOI:10.24200/J30.2018.2152.2115

موارد اشاره کرد: دست‌یابی به عملکرد مطلوب زمانی پروژه در روش مسیر بحرانی به کمک شناوری‌ها انجام می‌شود، در حالی که در روش مدیریت زنجیره‌ی بحرانی با استفاده از بافرها صورت می‌گیرد. در روش مسیر بحرانی، مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع به منظور رفع تضاد منابع و برآورد مسیر بحرانی انجام می‌شود، در حالی که در روش زنجیره‌ی بحرانی به منظور رفع تضاد منابع با حذف چندکارگی منابع در یک مقطع زمانی و پس از آن برآورد زنجیره‌ی بحرانی است. اما نکته‌ی قابل ذکر این است که روش پویایی سیستم می‌تواند هم از تاریخ تعهد شده‌ی اتمام پروژه محافظت کند که هم در روش مسیر بحرانی و هم در روش زنجیره‌ی بحرانی هدف است؛ و هم محدودیت منابع را با تخمین، تخصیص و تسطیح نیروی انسانی انجام دهد، که به واقعیت پروژه‌های ساخت نیز نزدیک‌تر است. در واقع روش پویایی سیستم می‌تواند مشکلات مربوط به محدودیت منابع و رسیدن به زمان برنامه‌ریزی شده را با به‌کارگیری سیاست‌های مختلف برطرف کند. پروژه‌های ساخت، ماهیتی پویا دارند. یکی از پویایی‌های ذاتی مذکور، تغییرات نیروی کار در طول پروژه است.[۶] به دلیل نوسان‌ها و تغییرات زیاد نیروی کار، پروژه بدون برنامه‌ریزی مؤثر قطعاً با کمبود و یا ازدیاد نیروی کار روبرو خواهد شد.[۷]

بنابراین، زمانی که تخمینی دقیق از نوسان‌های نیروی کار وجود داشته باشد، می‌توان با تخصیص مناسب و به موقع نیروی کار، پیشرفت پروژه را ارتقاء داد. یکی دیگر از پویایی‌های موجود در پروژه‌های ساخت، فرایند اجرای پروژه است. پویایی مذکور می‌تواند شامل تغییرات در محدوده‌ی پروژه، کار تکمیل شده، کار باقیمانده و چرخه‌ی دوباره‌کاری باشد.[۶] تغییرات در مقادیر و رفتارهای متغیرهای ذکر شده، بیانگر پویایی و پیچیده بودن پروژه‌های ساخت است و باید با نگاهی جامع‌تر، تمامی پویایی‌های جریان کار پروژه در طول زمان ارزیابی شود. بدین گونه، امکان تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه میسر می‌شود. بدون توجه به پویایی‌های جریان کار پروژه، نمی‌توان تخمین دقیقی از پویایی‌ها و تغییرات لحظه‌یی نیروی کار پروژه داشت. همچنین با توجه به اینکه جریان کار پروژه با نیروی کار موجود در پروژه به پیش می‌رود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هم جریان کار پروژه بستگی به تخمین دقیق نیاز به نیروی کار بستگی دارد و هم تخمین دقیق نیاز به نیروی کار به جریان کار پروژه. لذا آشکارا، برنامه‌ریزی نیروی کار، یکی از نگرانی‌های اصلی پیمانکاران و مدیران پروژه محسوب می‌شود. زمانی که فرایند ساخت در جریان است، پیمانکار یا مدیر پروژه باید از میزان نیروی کار استخدام شده اطلاع داشته باشد.[۸] به این منظور میزان نیروی کار موردنیاز پروژه باید قبل از شروع و در حین فرایند ساخت تخمین زده شود. تخمین نیروی کار موردنیاز پروژه چه در کوتاه‌مدت و چه در میان‌مدت و بلندمدت، همواره به‌عنوان دغدغه‌ی اصلی مدیران محسوب می‌شود و روش ارائه شده در پژوهش حاضر، جهت برطرف ساختن آن است. به نظر نمی‌رسد بدون درنظرگرفتن برخی از اتفاق‌ها و عدم قطعیت‌هایی که منجر به ایجاد پیچیدگی و پویایی‌ها در یک پروژه‌ی ساخت می‌شود، نظیر خطاهای انسانی و دوباره‌کاری‌ها، بتوان تخمینی صحیح از نیروی انسانی داشت. وجود این‌گونه پویایی‌ها قطعاً روند تأمین نیروی انسانی موردنیاز پروژه را با مشکل روبرو می‌سازد، چرا که نمی‌توان اتفاق‌های پروژه را پیش از اجرا پیش‌بینی کرد و برنامه‌ریزی‌های لازم را جهت تأمین نیروی انسانی انجام داد. در واقع، وجود ماهیت پویا و پیچیده در پروژه‌های ساخت، ضرورت ارائه‌ی مدلی را ایجاد می‌کند که توانایی درنظرگرفتن پویایی‌های مذکور را تا حد زیادی داشته باشد و بتواند میزان موردنیاز و زمان به‌کارگیری نیروی انسانی را در طول زمان، نه به‌صورت ایستا تخمین بزند و مبتنی بر واقعیت‌های پروژه‌های ساخت باشد. تخمین لحظه‌یی نیروی کار، یکی از محدودیت‌های مطالعات پیشین نیز محسوب شده است. بنابراین درنظرگرفتن ماهیت پویای پروژه‌های ساخت و لحاظ



شکل ۱. رفتار میزان نیروی کار پروژه به‌صورت تجمعی.

کلیه‌ی عوامل و متغیرهای مؤثر در آن‌ها، در کنار تخمین لحظه‌یی و گام به گام در طول زمان و به صورت پویا از مزیت‌های روش پیشنهادی در پژوهش حاضر است، که محدودیت‌های روش‌های پیشین ارائه شده را برطرف کرده است. هدف پژوهش حاضر، حل مشکل تأمین نیروی کار موردنیاز پروژه از طریق تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار در حین و قبل از اجرای پروژه است. در صورت محاسبه‌ی میزان نیروی کار پروژه به‌صورت تجمعی، رفتار مرجع آن شبیه به شکل ۱ است.[۹]

در صورتی که در شکل ۱، محور افقی، زمان و محور عمودی، میزان مصرف منابع انسانی پروژه فرض شود، میزان نیروی کار پروژه به مرور زمان تغییر خواهد کرد. به این معنا که در طول اجرای پروژه به دلیل عدم توانایی مدیران و یا پیمانکاران در تخمین دقیق میزان نیروی کار لازم پروژه، میزان نیروی کار نوسان‌هایی خواهد داشت، که متناسب با شیب نمودار تجمعی نیروی کار است. تاکنون مطالعات متعددی به منظور تخمین نیروی کار موردنیاز پروژه‌های ساخت و همچنین مدل‌سازی پویای تأمین نیروی کار موردنیاز انجام شده است، که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. به طورکلی روش‌های تخمین نیروی کار به ۴ دسته‌ی: تخمین قضاوتی، تخمین انباشت ـ جریان، مدل‌های تخمین سری‌های زمانی و مدل‌های اقتصادسنجی براساس رگرسیون تقسیم می‌شوند (جدول ۱).

تخمین، براساس قضاوت روشی ساده در پیش‌بینی نیروی کار با استفاده از دانش و تجربه‌ی خبرگان است[۱۰] از مطالعات صورت گرفته در تخمین نیروی کار براساس قضاوت می‌توان به پژوهش‌های انجام شده در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۹ اشاره کرد.[۱۰و۱۱] مدل‌های انباشت ـ جریان براساس اصول مارکوین است که برای جابه‌جایی‌های نیروی کار در سازمان استفاده شده است.[۱۲] در مطالعه‌یی که در سال ۲۰۱۲ انجام شد، یک مدل حالت ـ جریان برای تخمین بلندمدت نیروی کار ارائه شد که توانایی تخمین نیروی کار صنعت ساخت را برای ۱۰ سال آینده دارد. همچنین مدل ارائه شده براساس مفهوم گذار (ورودی و خروجی) بود.[۱۳] در ضمن پژوهشگران مختلفی در سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ با استفاده از سری‌های زمانی، نیروی کار ساخت را تخمین زده‌اند.[۱۴-۱۶] با اینکه تخمین مذکور براساس داده‌های پیشین صورت می‌گیرد، اما توانایی لحاظ پویایی‌های تأمین نیروی کار را ندارد. لذا مطالعات متعدد دیگری جهت مدل‌سازی اقتصادسنجی با استفاده از رگرسیون‌های چندگانه به منظور تخمین تقاضای نیروی کار ساخت انجام شده است.[۱۷-۲۰] در مدل‌های مذکور، عموماً متغیرهای اقتصادی، نظیر قیمت مصالح مصرفی و بهره‌وری نیروی کار لحاظ شده است. با اینکه مدل‌های مذکور می‌توانند نیروی کار موردنیاز را تخمین بزنند، ولی ۲ اشکال اصلی در آن‌ها مشاهده می‌شود: ۱. متغیرهای در نظر گرفته شده در مدل‌های مذکور و ارتباط آن‌ها با یکدیگر محدود است. در واقع، یک نگرش سیستم در آن‌ها وجود ندارد. ۲. عدم توانایی مدل‌های ذکر شده در لحاظ کردن متغیرهای مدل به‌صورت پویا و در طول زمان. بنابراین نیاز به مدلی است که ضمن

جدول ۱. روش‌های تخمین نیروی کار.

روش‌های تخمین و مدلسازی	اصلی لحاظ شده	دسته
با استفاده از پرسش از خبرگان، میزان نیاز به نیروی کار شناسایی می‌شود	تجربه خبرگان	تخمین بر اساس قضاوت
براساس نیروی کار موجود آغاز می شود تغییر مقادیر انباشت نیروی کار به دلیل ورود و خروج توانایی در تخمین نیروی کار بلند مدت (۵-۱۰)	استخدام و ترخیص نیروی کار، تعداد نیروی کار استخدام و ترخیص شده	تخمین انباشت جریان
ارائه‌ی الگویی جهت تخمین نیروی با استفاده از داده‌های تاریخی	داده‌های گذشته نیروی کار	تخمین سری‌های زمانی
توانایی تخمین خروجی ساخت، دستمزد، قیمت مصالح و بهره‌وری و تعداد نیروی کار را دارد	روابط علی بین تقاضا و تامین و متغیرهای غیروابسته	مدلسازی اقتصادسنجی با استفاده از رگرسیون

درنظرگرفتن پویایی‌های پروژه به همراه متغیرهای متعدد تأثیرگذار در آن، مشکلات اشاره شده را رفع کند.

تاکنون پژوهشگران بسیاری از پویایی سیستم و مفاهیم آن برای بررسی پویایی‌های مدیریت پروژه و نیروی کار صنعت ساخت استفاده کرده‌اند، که در ادامه شرح داده شده است. در سال ۱۹۹۵، با مطالعات صورت گرفته بر روی پویایی‌های پروژه، ساختار نیروی کار، دوباره‌کاری، کار در دسترس، کیفیت و محدوده‌ی پروژه به‌صورت کامل‌تر و به کمک پویایی سیستم مدل‌سازی شد. در پژوهش حاضر، زیرسیستم‌های محدوده و جریان کار پروژه و منابع توسعه داده شده است. در زیرسیستم جریان کار پروژه، میزان کار اولیه متناسب با محدوده‌ی پروژه بوده و همچنین میزان کار انجام شده و باقیمانده به همراه دوباره‌کاری لحاظ شده است. ضمن آنکه میزان نیروی کار موردنیاز نیز بررسی شده است.[۲۱] در پژوهش دیگری (۱۹۹۸)، یک مدل پویایی سیستم جهت بررسی فرایند توسعه‌ی محصول برای پروژه‌های چندفازه ارائه شد.[۲۲] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۱، ضمن بررسی مدیریت راهبردی پروژه‌های پیچیده با پویایی سیستم، به ناکارآمدی ابزار قدیمی مانند pert و cpm با درنظرگرفتن پویایی‌های ذاتی پروژه اشاره و تغییرات نیروی کار پروژه در پروژه‌های مختلف، همچون پروژه‌های نرم‌افزار و کشتی‌سازی را بررسی کردند.[۲۳]

در مطالعه‌ی صورت گرفته‌ی دیگری (۲۰۰۳)، سه سیاست مختلف جهت ارتقاء عملکرد هزینه و زمان پروژه در یک پروژه‌ی ساخت ارزیابی شد و در مدل ارائه شده، جریان کار پروژه شامل محدوده‌ی پروژه، دوباره‌کاری، بهره‌وری و نرخ تکمیل کار بود.[۲۴] در سال ۲۰۰۴ نیز با استفاده از پویایی سیستم، میزان نیروی کار موردنیاز، انجام یک فعالیت ساخت براساس نرخ ساخت موردنیاز و بهره‌وری میانگین به‌دست آورده شد در حالی که محاسبه‌ی میزان نیاز به نیروی کار پروژه، در راستای مدل‌سازی مدیریت منابع پروژه، شامل نیروی کار و مصالح مصرفی بود.[۲۵] همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۷)، ساختار مدل پویایی سیستم در قالب ۴ گروه: ویژگی‌های پروژه، چرخه‌ی دوباره‌کاری، کنترل پروژه، و آثار سیاست‌ها برای مدیریت پروژه بیان شد؛ و در زیرسیستم جریان کار پروژه‌ی مذکور، بهره‌وری، تعداد نیروی کار پروژه، و خطا در پیشرفت کار مؤثر بودند.[۲۶] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۱۱، تأثیر پویایی‌های سازمانی را بر روی برنامه‌ریزی و اجرای ساخت بررسی و میزان نیروی کار مطلوب به‌وسیله‌ی بهره‌وری را تعیین کردند. همچنین جریان کار پروژه‌ی مذکور، شامل کار برنامه‌ریزی شده برای انجام، نرخ انجام کار، دوباره‌کاری و کار تکمیل شده بوده است.[۲۷]

در سال ۲۰۱۵، نیز جریان کار پروژه‌های ساخت در ۲ فاز (طراحی و ساخت) با استفاده از پویایی سیستم مدل‌سازی شد و تمرکز مدل ساخته شده بر تغییرات محدوده، دوباره‌کاری و پیشرفت ساخت بود.[۲۸] نهایتاً در سال ۲۰۱۶، مدلی پویا جهت برنامه‌ریزی نیروی انسانی برای پروژه‌های زیر ساخت ارائه شد و تخمین تأمین و تقاضا نیروی کار ساخت به‌صورت کامل‌تر صورت گرفت و آموزش نیز به‌عنوان سیاست در نظرگرفته شد، در حالی که میزان نیاز به نیروی کار به‌صورت دقیق و لحظه‌یی محاسبه نشد.[۲۹]

همان‌طور که ذکر شد، مدل‌های تخمین نیروی کار پروژه در مطالعات پیشین، توانایی لحاظ تمامی عوامل مؤثر در تخمین نیروی کار را به‌صورت پویا ندارند. از این رو، مدل‌های پویایی سیستم توسعه داده شده، بیشتر خصوصیات ذاتی و پویای پروژه‌ها را در نظرگرفته‌اند. تفاوت مهم مدل‌های پویایی سیستم ارائه‌شده در مطالعات پیشین با پژوهش حاضر، توانایی مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر در تخمین دقیق و لحظه‌یی نیروی کار موردنیاز پروژه است. در واقع توانایی در تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه می‌تواند به برنامه‌ریزی برای تأمین نیروی کار قبل و در حین اجرای پروژه کمک شایانی بکند که در مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده است. در پژوهش حاضر، از پویایی سیستم جهت تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه‌های ساخت استفاده شده است.

۲. روش پژوهش

روش پویایی سیستم ارائه شده در سال ۱۹۶۱، این امکان را فراهم ساخته است تا پویایی‌های موجود در پروژه با درنظرگرفتن عوامل مؤثر در آن، به‌صورت دقیق ارزیابی شوند.[۳۰] روش مذکور قادر است سیستم‌های پیچیده نظیر پروژه را با درنظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر در آن شبیه‌سازی کند.[۳۱] به‌طورکلی، مدل‌سازی به کمک پویایی سیستم برای مدیریت و شبیه‌سازی فرایندهایی که شامل دو مؤلفه‌ی: ۱. داشتن تغییرات در طول زمان و ۲. داشتن بازخورد اطلاعاتی، مفید است.[۳۲] نمودارهای

پویایی سیستم برای فهم ساختار سیستم استفاده می‌شوند که شامل نمودارهای علی ـ معلولی و حالت ـ جریان هستند.[۳۳] مزیت روش مذکور، ترسیم رفتار سیستم با استفاده از مدل‌سازی فرایندهای بازخوردی سیستم از طریق نمودارهای حالت ـ جریان و روابط غیرخطی است. متغیرهای حالت به‌عنوان مثال، شامل نیروی کار می‌شوند؛ در حالی که متغیرهای جریان به‌عنوان مثال، شامل نرخ استخدام نیروی کار هستند.

۳. ساختار مدل

در بخش حاضر، ابتدا به منظور درک بهتر، ساختارکلی مدل در قالب زیرسیستم‌های مدل و نحوه‌ی ارتباط آن‌ها با یکدیگر نشان داده شده است. در ادامه، نمودار علی ـ معلولی مدل پژوهش ارائه و در آخر، زیرسیستم‌های پژوهش حاضر در قالب نمودار حالت ـ جریان بیان شده‌اند.

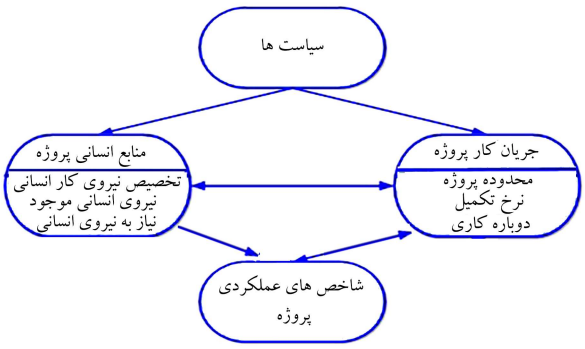
۱.۳. زیرسیستم‌های مدل

جهت توصیف بهتر ساختار مدل پویای سیستم پژوهش حاضر، مدل به ۲ زیرسیستم نیروی کار و زیرسیستم جریان کار پروژه و ۲ بخش اهداف عملکردی پروژه و سیاست‌ها تقسیم شده است. لازم به ذکر است که نیروی کار و جریان کار، پروژه‌ی زیرسیستم‌های اصلی پژوهش هستند که به‌صورت بازخوردی با هم در ارتباط هستند و بخش‌های شاخص‌های عملکردی و سیاست‌ها، از آن‌ها تأثیر می‌پذیرند و در آن‌ها تأثیر می‌گذارند (شکل ۲).

شکل ۲، زیرسیستم‌ها، بخش‌ها و تعامل‌های مهم موجود بین آن‌ها را نشان می‌دهد. زیرسیستم‌ها به واسطه‌ی متغیرهای مشترک با یکدیگر در ارتباط هستند و بدین‌گونه، زیرسیستم‌های جریان کار پروژه و منابع نیروی انسانی به یکدیگر مرتبط می‌شوند. همچنین دو زیرسیستم مذکور با بخش شاخص‌های عملکردی پروژه مرتبط هستند، با این تفاوت که زیرسیستم نیروی کار فقط در بخش شاخص‌های عملکردی تأثیر دارد و از آن تأثیری نمی‌پذیرد؛ ولی بخش شاخص عملکردی، در زیرسیستم جریان کار پروژه تأثیرگذار است. سیاست‌ها نیز در ۲ زیرسیستم جریان کار و منابع انسانی پروژه تأثیر می‌گذارند.

۱.۱.۳. زیرسیستم جریان کار پروژه

زیرسیستم جریان کار پروژه، شامل عناصری، مانند محدوده‌ی پروژه، نرخ تکمیل کار، دوباره‌کاری، خطاها و تحویل پروژه است.



شکل ۲. زیرسیستم‌های مدل و ارتباط بین آن‌ها.

۲.۱.۳. سیستم منابع انسانی پروژه

زیرسیستم منابع انسانی پروژه، شامل مواردی، همچون تخصیص نیروی کار، نیاز به نیروی کار، و نیروی کار موجود در پروژه است.

۳.۱.۳. بخش شاخص‌های عملکردی

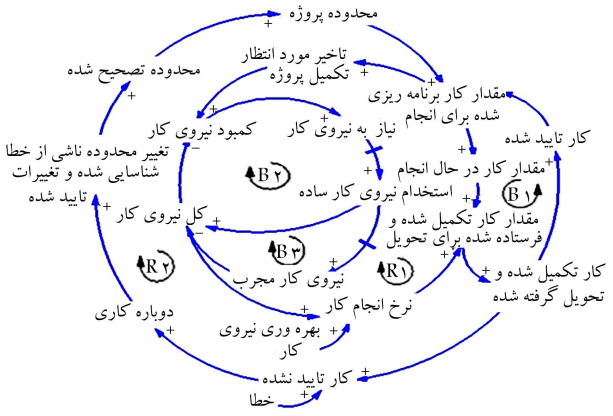
در بخش شاخص‌های عملکردی، عواملی همچون زمان باقیمانده برای انجام کار، زمان تحویل و دائم پروژه وجود دارند.

۴.۱.۳. بخش سیاست‌ها

بخش سیاست‌ها، شامل به‌کارگیری سیاست‌های استخدامی زمانی و کیفی نیروی کار پروژه جهت بهبود سیستم است.

۲.۳. نمودار علی ـ معلولی

ساختار بازخوردی، پیچیدگی‌های رفتار محیط را در طول زمان آشکار می‌کند.[۳۴] مطابق با شکل ۳، با افزایش خطاها، کار تأیید نشده افزایش می‌یابد و درنتیجه نیاز به انجام دوباره‌کاری بیشتری می‌شود. با افزایش دوباره‌کاری‌ها، محدوده به دلیل شناسایی خطا دچار تغییر می‌شود و میزان تصحیح شده‌ی آن افزایش می‌یابد. با افزایش محدوده‌ی کار، مقدار کار برنامه‌ریزی شده برای انجام بیشتر خواهد شد که به دنبال آن، کار در حال انجام و کار تکمیل شده افزایش می‌یابند. درنهایت کار تأیید نشده، مجدداً در حلقه‌ی تقویت R۱ افزایش خواهد یافت. در حالی که جهت به تعادل رساندن حلقه‌ی تقویت R۱، می‌توان به نیاز به جذب نیروی کار توجه کرد، اما حلقه‌ی متعادل‌کننده‌ی B۱ نیز وجود دارد که با بررسی و تأیید کار تحویل گرفته شده، مقدار کار برنامه‌ریزی شده برای انجام کاهش خواهد یافت، که نهایتاً منجر به کاهش میزان کار تکمیل شده و تحویل گرفته خواهد شد. زمانی که کار برنامه‌ریزی شده برای انجام کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود که تکمیل پروژه با تأخیر مواجه شود که این مسئله نیاز به نیروی کار را بیشتر می‌کند. با استخدام نیروی کار موردنیاز پروژه، نرخ انجام کار و به دنبال آن مقدار کار تکمیل شده و تحویل گرفته شده بیشتر می‌شود. درنهایت، با توجه به وجود خطا و دوباره‌کاری، مقدار کار برنامه‌ریزی شده در حلقه‌ی تقویت R۲ مجدداً افزایش می‌یابد. با افزایش کمبود نیروی کار پروژه، نیاز به نیروی کار بیشتر می‌شود که می‌توان با استخدام بیشتر، تعداد نیروی کار پروژه را افزایش داد و کمبود را جبران کرد (حلقه‌ی متعادل‌کننده‌ی B۲). ضمن آنکه نیروی کار تازه استخدام شده بعد از گذشت مدتی از پروژه، مجرب خواهند شد که کسب مهارت نیروی کار با تأخیر همراه خواهد بود (حلقه‌ی متعادل‌کننده‌ی B۳). لازم به ذکر است که تأمین نیروی کار موردنیاز پروژه نیز از طریق استخدام با تأخیر همراه است.

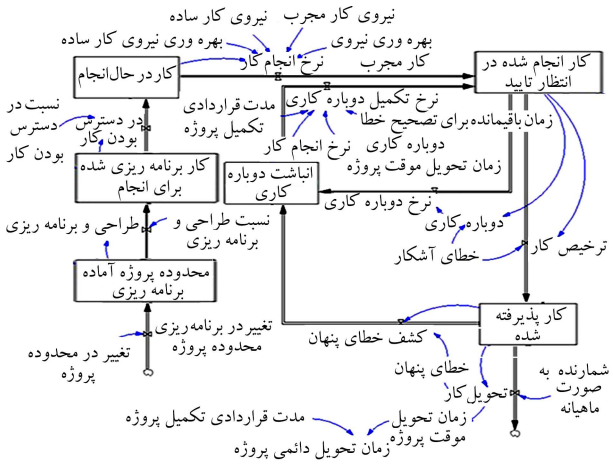


شکل ۳. نمودار علی ـ معلولی.

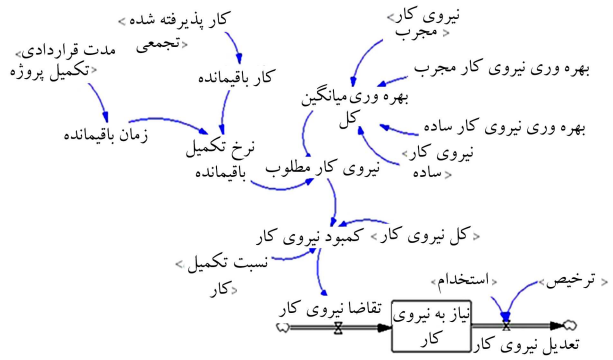
۳.۳. ساختار حالت ـ جریان

در پژوهش حاضر، زیرسیستم‌های توسعه داده شده‌ی جریان کار پروژه و نیروی کار پروژه توضیح داده شده است. توسعه‌ی هر قسمت از مدل حاضر و به‌دست آوردن فرمول جامع برآورد نیروی انسانی موردنیاز در پژوهش حاضر براساس توسعه‌ی قسمت‌های مختلف پژوهش‌های (نوشتارها و پایان‌نامه‌ها) پیشین در حوزه‌ی مدیریت پروژه بوده است. بنابراین فرمول ارائه شده، قابل به‌کارگیری در حوزه‌ی مدیریت پروژه است، با این فرض که اجرای آن پروژه بیشتر بر پایه‌ی منابع انسانی باشد و عمده‌ی منابع موردنیاز در آن پروژه، نیروهای کاری باشند. به بیان دیگر، اگر اجرای یک پروژه، ماشین‌محور باشد، شاید ایجاد تغییرات در مدل موردنیاز باشد؛ ولی در صورت نیروی کارمحور بودن پروژه، چنین مدلی می‌تواند مطلوب باشد. نکته‌ی قابل تأمل دیگر این است که مدل قادر به درنظرگرفتن تک فعالیت‌های پروژه است و برای لحاظ چند فعالیت باید از شبیه‌سازی پیشامدهای گسسته استفاده کرد، ولی به دلیل تک فعالیت بودن، از شبیه‌سازی پیشامدهای پیوسته استفاده شده است. از آنجایی که هدف از ساخت مدل پژوهش، بررسی میزان دقیق نیروی کار موردنیاز فعالیت‌های انواع پروژه‌های ساخت (ابنیه، راه، آب و فاضلاب و ...) است، بنابراین مدل توسعه داده شده‌ی پژوهش می‌تواند شامل تمامی فعالیت‌های یک پروژه‌ی ساخت، همچون سرامیک‌کاری و کاشی‌کاری در پروژه‌های ساختمانی و فعالیت‌های دیگر پروژه‌ها باشد. این تذکر لازم است که در مرحله‌ی اعتبارسنجی، مدل با استفاده از داده‌های فعالیت سرامیک‌کاری یک پروژه‌ی ساختمانی آزمون و ارزیابی شد و درنهایت، صحت آن تأیید شد. شکل ۴، ساختار حالت ـ جریان کار پروژه را نشان می‌دهد. مدل توسعه داده شده‌ی جریان کار پروژه با ۷ انباشت، شامل: محدوده‌ی پروژه، محدوده‌ی پروژه‌ی آماده‌ی برنامه‌ریزی، کار برنامه‌ریزی شده‌ی آماده‌ی انجام، کار در جریان، کار انجام شده در انتظار تأیید، دوباره‌کاری و کار پذیرفته شده است. ممکن است محدوده‌ی پروژه به دلایل متفاوتی همچون تغییرات در نقشه‌ها و تغییرات در درخواست کارفرما دچار تغییر شود که انباشت محدوده‌ی پروژه، مقدار مذکور را محاسبه می‌کند. پس از تأیید محدوده، مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی آن توسط انباشت محدوده‌ی پروژه‌ی برنامه‌ریزی شده مشخص خواهد شد. سپس مقدار ذکر شده به انباشت کار برنامه‌ریزی شده برای انجام، انتقال می‌یابد. با توجه به نرخ در دسترس بودن کار، کار در جریان محاسبه می‌شود. پس از مرحله‌ی اخیر، کار با توجه به نیروی کار موجود در پروژه و بهره‌وری آن‌ها انجام خواهد شد. لازم به ذکر است که مقدار نرخ تکمیل کار به منظور افزایش دقت، به‌صورت وزنی در نظر گرفته شده است. سپس کار موجود در انباشت کار انجام شده منتظر تأیید، با توجه به میزان خطا و دوباره‌کاری موردنیاز، به انباشت دوباره‌کاری انتقال می‌یابد. همچنین در صورت پذیرفته شدن نهایی کار، اگر خطاهای کشف نشده‌یی وجود نداشته باشد، دوباره به انباشت دوباره‌کاری منتقل می‌شود. پس از انجام دوباره‌ی کار، مجدداً کار بررسی می‌شود و درصورت وجود خطا، چرخه‌ی ذکر شده ادامه پیدا می‌کند و در غیر این‌صورت کار، تأیید نهایی خواهد شد. وجود خطا و دوباره‌کاری در حین فرایند اجرای پروژه به دلیل پایین بودن کیفیت کار نسبت به حالت مطلوب است. شایان ذکر است که زمان باقیمانده برای انجام دوباره‌کاری در طول پروژه، محدودیت دارد، به خصوص زمانی که دوباره‌کاری باید در اواخر پروژه انجام شود. این مسئله در مدل در نظر گرفته شده است. در انتها، زمانی که کار تأیید شده باشد، پروژه تحویل کارفرما می‌شود. در مدل توسعه داده شده‌ی پژوهش حاضر، زمان تحویل موقت و دائمی پروژه به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند.

تخمین دقیق و لحظه‌یی نیروی کار پروژه همیشه به‌عنوان یکی از دغدغه‌های اصلی پیمانکاران و صاحبان پروژه محسوب می‌شود که تاکنون به آن کاملاً پرداخته



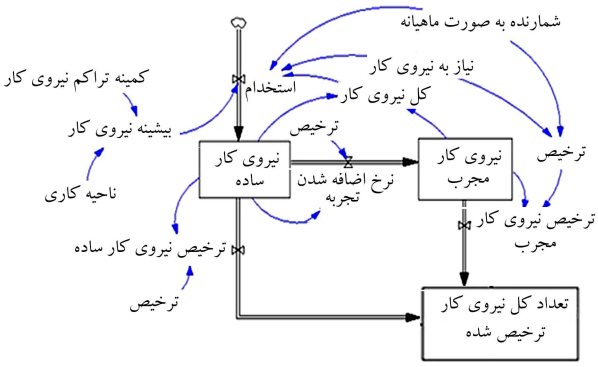
شکل ۴. نمودار حالت ـ جریان جریان کار پروژه.



شکل ۵. نمودار حالت ـ جریان نیاز به نیروی کار.

نشده است؛ لذا در پژوهش حاضر بر روی آن تمرکز شده است. مدل پویایی سیستم توسعه داده شده در پژوهش حاضر، توانایی تخمین دقیق و لحظه‌یی نیروی کار با درنظرگرفتن پویایی‌های جریان کار پروژه را دارد. مدل مذکور قادر است تغییرات و نوسان‌های نیاز به نیروی کار را پیش‌بینی کند. با توجه به شکل ۵، میزان کار باقیمانده براساس محدوده‌ی پروژه و کار تجمعی پذیرفته شده به‌دست خواهد آمد. با مشخص بودن کار و زمان باقیمانده برای انجام کار، نرخ تکمیل باقیمانده حاصل خواهد شد. نرخ کار مطلوب به همراه بهره‌وری کل میانگین نیروی کار، نیروی کار مطلوب را مشخص می‌کند. شایان ذکر است که جهت محاسبه‌ی دقیق‌تر بهره‌وری کل میانگین نیروی کار، مقدار مذکور به‌صورت وزنی محاسبه می‌شود، که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن در پیوست ارائه شده است. در ادامه، با توجه به مقایسه‌ی مقادیر نیروی کار مطلوب و کل نیروی کار موجود در پروژه، مقدار تقاضای نیروی کار محاسبه و به‌صورت نرخ، وارد انباشت نیاز به نیروی کار خواهد شد. از سوی دیگر، با توجه به میزان استخدام و ترخیص نیروی کار، میزان نیاز به نیروی کار تعدیل خواهد شد. با توجه به ماهیت یک مدل پویایی سیستم، که شامل مجموعه‌یی از معادلات دیفرانسیل است، می‌توان گفت که مدل نیاز به نیروی کار توسعه داده‌شده در پژوهش حاضر توانایی شبیه‌سازی و تخمین دقیق نیروی کار موردنیاز پروژه را دارد و می‌تواند نوسان‌ها و تغییرات لحظه‌یی نیروی کار پروژه را جهت تخصیص بهتر نیروی کار نشان دهد. روابط ریاضی استفاده‌شده بین متغیرها (معادلات مدل) برای ساختار نیاز به نیروی کار پروژه در پیوست به‌عنوان نمونه ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، استخدام نیروی کار به‌عنوان یک سیاست جهت تأمین نیروی



شکل ۶. نمودار حالت ـ جریان استخدام نیروی کار.

کار موردنیاز پروژه درنظر گرفته شده است. بخش حاضر، شامل ۳ انباشت: نیروی کار ساده، نیروی کار مجرب و کل نیروی کار ترخیص شده است (شکل ۶). با توجه به شکل مذکور، استخدام و ترخیص براساس نیاز به نیروی کار پروژه و میزان نیروی کار موجود صورت خواهد گرفت.

البته استخدام نیروی کار موردنیاز پروژه، محدودیت دارد که براساس ناحیه‌ی کاری و کمینه‌ی تراکم نیروی کار تعیین می‌شود. زمانی که استخدام صورت می‌گیرد، نیروی کار تازه استخدام شده، پس از مدتی مجرب خواهند شد. شایان ذکر است استخدام و ترخیص نیروی کار به‌صورت ماهیانه صورت خواهد گرفت، که دلیل آن، بزرگ‌تر بودن بازه‌ی زمانی بررسی وضعیت نیروی کار نسبت به بازه‌های زمانی دیگر است که مورد توجه بیشتر مدیران و صاحبان پروژه است.

به طورکلی، ۲ مشکل اساسی در تخمین نیروی کار موردنیاز پروژه مشاهده شده است:

۱. معمولاً پیمانکار یا مدیر پروژه، براساس حجم کار و زمان پروژه، یک تخمین اولیه از نیروی کار موردنیاز پروژه خواهند داشت که اغلب تمایل آن‌ها به استفاده از نیروی کار ثابت بیشتر می‌شود. به همین دلیل، قطعاً پروژه با تأخیرات روبرو خواهد شد. علت این موضوع وجود عواملی همچون خطاست. وجود خطا منجر به دوباره‌کاری خواهد شد، در حالی که عموماً پیش از آغاز اجرای پروژه به آن توجه نمی‌شود.

۲. استخدام نیروی کار موردنیاز پروژه بر چه اساسی و چگونه باید باشد؟ عموماً پیمانکار یا مدیر پروژه به دلیل وجود واقعیت‌ها و پویایی‌های ذاتی پروژه، مانند خطا و دوباره‌کاری، نمی‌تواند آگاهی کاملی از زمان به کارگیری و میزان نیروی کار موردنیاز پروژه داشته باشد. با بررسی مشکلات ذکر شده، می‌توان گفت که تعدیل نیروی کار در طول اجرای یک پروژه باعث تحمیل هزینه‌های مازاد به یک پروژه می‌شود. هزینه‌هایی که ناشی از استخدام و ترخیص ناآگاهانه‌ی نیروی کار به طور مداوم است. بنابراین می‌توان گفت که نیاز به روشی است تا بتوان تأمین دقیق نیروی کار پروژه را مدیریت کرد. برای حل مشکل ذکرشده، یک مدل پویا ارائه شده است که قادر به تخمین دقیق میزان نیاز به نیروی کار پروژه است. به این صورت که با تعیین میزان نیاز به نیروی کار براساس جریان کار پروژه، تعداد نیروی کار پروژه را از طریق استخدام و ترخیص اصلاح می‌کند و نوسان‌های نیروی کار را در طول اجرای پروژه به میزان کمینه می‌رساند.

۴.۳. ساخت مدل کمّی

اولین گام بعد از تهیه‌ی مدل کیفی، کمّی‌سازی مدل به‌کمک روابط ریاضی و معادلات است. جهت شبیه‌سازی و بررسی عددی نتایج حاصل از مدل پژوهش، روابط بین متغیرهای مدل فرموله می‌شوند. جهت فرموله‌کردن و ساخت مدل پیشنهادی، روابط منطقی بین متغیرها تعیین شده‌اند. اینگونه روابط به‌صورت بدیهی و منطقی بین متغیرها وجود دارند. به‌عنوان مثال، زمان باقیمانده برای انجام پروژه به این صورت محاسبه می‌شود:

روزهای سپری شده − مدت قراردادی پروژه = زمان باقیمانده‌ی انجام پروژه

همچنین برخی روابط بین متغیرها با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه‌های مشابه پیشین تعیین شده‌اند.

جدول ۲. کاربرد مدل پیشنهادی در یک پروژه‌ی نمونه.

متغیرهای مدل دسته	نام متغیر	مقدار	واحد
فعالیت	مدت قراردادی پروژه	۱۸۰	روز
	محدوده پروژه	۱۹۳۲۰	مترمربع
بهره‌وری	بهره‌وری نیروی کار ساده	۱٫۲۵	مترمربع / ساعت*نفر
	بهره‌وری نیروی کار مجرب	۱٫۸۷۵	
کیفیت	کیفیت مورد انتظار اولیه	٪۹۰	بدون بعد
	مدت زمان یافتن خطا	۷	روز
نیروی کار	تعداد اولیه‌نیروی کار ساده	۷	نفر
	مدت زمان تعدیل نیروی کار	۱	روز

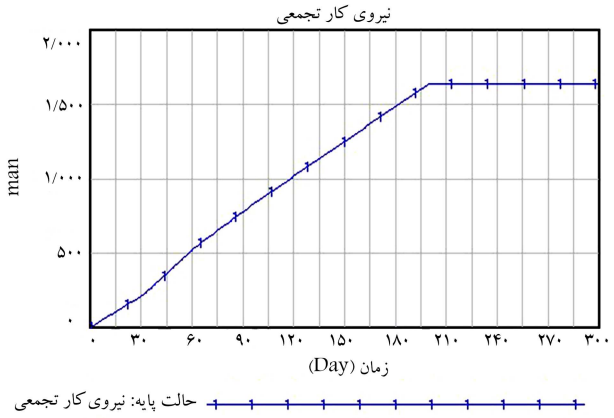
۴. اعتبارسنجی

به منظور نشان‌دادن کارایی و قابلیت‌های مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی و تخمین نیروی کار موردنیاز پروژه‌های ساخت، مدل پیشنهادی بر روی یک پروژه‌ی نمونه و برای فعالیت سرامیک‌کاری پیاده‌سازی شده است (جدول ۲).

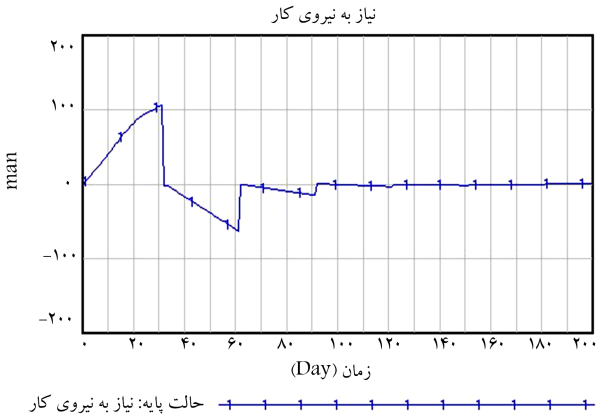
پروژه‌ی مورد مطالعه، بخشی از یک پروژه‌ی انبوه‌سازی مسکن ۱۰۰۰ واحدی در شهر اصفهان است. فرایند اعتبارسنجی مدل، جهت اعتمادسازی به نتایج مدل پیشنهادی انجام شده است. به منظور اعتباربخشی به مدل مذکور و نتایج شبیه‌سازی، آزمون‌های استاندارد مختلف پیشنهادی استرمن (۲۰۰۰) استفاده شده‌اند.[۳۲] آزمون‌های ذکر شده، شامل کفایت مرز مدل، ارزیابی ساختار مدل، سازگاری ابعادی، ارزیابی متغیرها، شرایط مرزی، بازخورد رفتاری، و تحلیل حساسیت است. در ادامه، مهم‌ترین روش‌های استفاده شده برای سنجش اعتبار رفتاری مدل ارائه شده‌اند.

۱.۴. بازسازی رفتار مرجع

پس از شبیه‌سازی متغیر میزان نیروی کار به‌صورت تجمعی، رفتاری مشابه تخمین حاصل شد که دلیلی بر صحت مدل است (شکل ۷). نحوه‌ی محاسبه‌ی نیروی کار موجود در پروژه به‌صورت تجمعی، انتگرال‌گیری از کل نیروی کار موجود در پروژه است. از آنجایی که در روز ۱۹۹، پروژه تحویل دائم می‌شود، بنابراین نیروی کاری از روز ۲۰۰ در پروژه وجود نخواهد داشت و تماماً ترخیص می‌شوند. در نتیجه، نیروی کار جدیدی از روز ۲۰۰ به بعد به‌صورت تجمعی وارد نخواهد شد و این موضوع باعث شده است که رفتار متغیر «نیروی کار به‌صورت تجمعی» از روز ۲۰۰ به بعد ثابت بماند.



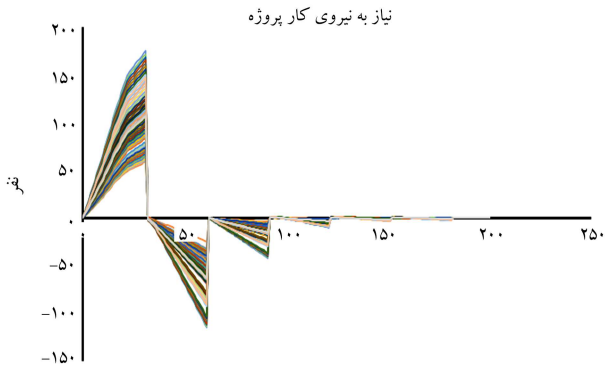
شکل ۷. نیروی کار تجمعی.



شکل ۸. وضعیت نیاز به نیروی کار در طول اجرای پروژه.

تجمعی بودن نمودار شکل ۷ به دلیل وجود نیروی کار در طول اجرای پروژه است. شیب نمودار در طول پروژه ثابت نیست که حاکی از وجود نوسان‌های نیروی کار است. به همین دلیل لازم است میزان نیاز به نیروی کار دقیقاً سنجیده شود، تا روند تعدیل و تخصیص نیروی کار تسهیل شود (شکل ۸).

مطابق شکل ۸، مقادیر نیاز به نیروی کار در طول فرایند اجرای پروژه متفاوت است. بدین معنا که به دلیل وجود پویایی‌های جریان کار پروژه، همچون خطاها و دوباره‌کاری‌ها، میزان نیاز به نیروی کار پروژه نیز تغییرات و نوسان‌هایی دارد. همچنین نوسان‌های مذکور تا زمان تحویل پروژه وجود خواهد داشت. علت وجود رفتار پرشی و نوسان‌ها در شکل مذکور، محاسبه‌ی مقادیر نیاز به نیروی کار در اوایل پروژه است؛ به این دلیل که در مدل پژوهش، پروژه با یک تعداد اولیه‌ی مشخص از نیروی کار آغاز می‌شود و پس از تحویل قسمتی از کار در ماه اول (بازه‌ی زمانی تحویل کار و محاسبه‌ی نیروی کار در base run ماهیانه است) نیاز به نیروی کار را می‌سنجد و براساس آن استخدام و یا ترخیص اتفاق خواهد افتاد. این رویه تا جایی که به کمینه‌ی مقدار خود برسد، ادامه خواهد داشت. میزان نیاز به نیروی کار در اوایل پروژه قطعاً تغییراتی خواهد داشت و این تغییرات در بازه‌های آغازین پروژه بیشتر است. مزیت مدل پژوهش حاضر، نوسان‌گیری از تغییرات ذکر شده است. درواقع هر چه پروژه پیشرفت می‌کند، نیروی کار مطلوب را در پروژه حفظ می‌کند و نوسان‌ها را به میزان کمینه می‌رساند. یکی از حالت‌های رفتاری روش پویایی سیستم، حالت رفتاری هدف‌جو است که در حلقه‌های متعادل‌کننده ایجاد می‌شود و رفتار متغیر موردنظر به یک هدف یا حالت مطلوب میل می‌کند.[۳۳]



شکل ۹. تحلیل حساسیت متغیر نیاز به نیروی کار.

پدیده‌ی ذکر شده در مورد رفتار متغیر نیاز به نیروی کار (شکل ۸) نیز صادق است، به این صورت که زمانی که پروژه با یک مقدار اولیه‌ی نیروی کار آغاز می‌شود، به دلیل کم بودن نیروی کار، نرخ انجام کار کاهش یافته است و این امر منجر به کاهش کار تحویل داده شده در بازه‌ی زمانی انتخابی (ماهیانه) و نهایتاً افزایش کار باقیمانده شده است. زمانی که کار باقیمانده افزایش یابد، میزان نیاز به نیروی کار نیز افزایش می‌یابد (سیر صعودی در ۳۰ روز اول). این افزایش باعث استخدام نیروی کار موردنیاز پروژه خواهد شد، که تعداد نیروی کار موجود در پروژه را افزایش می‌دهد. نهایتاً منجر به افزایش نرخ انجام کار می‌شود. در بازه‌ی دوم (۳۰ روز دوم)، زمانی که نرخ انجام کار به دلیل ذکر شده افزایش می‌یابد، کار باقیمانده‌ی کمتری خواهد ماند، که خود باعث کاهش نیاز به نیروی کار می‌شود و همان‌طور که شکل ۸ مشاهده می‌شود، در ۳۰ روز دوم نیاز به نیروی کار سیر نزولی دارد. این رویه تا پایان پروژه ادامه پیدا کرده است، به گونه‌یی که میزان خود را به سمت هدف، یعنی کمترین مقدار نیاز به نیروی کار، سوق دهد. به این طریق نیروی کار پروژه به میزان لازم تأمین و تخصیص داده شده‌است. ضمن آنکه با این مفهوم و رفتار، تسطیح نیروی انسانی نیز انجام شده است. این تذکر لازم است که اعداد مثبت نمودار نیاز به نیروی کار، بیانگر نیاز به استخدام بیشتر و اعداد منفی بیانگر نیروی کار مازاد و نیاز به ترخیص آن‌هاست. مدل سیستمی موجود، پس از پیش‌بینی دقیق نیاز به نیروی کار، نیروی کار موردنیاز پروژه را به‌صورت ماهیانه تأمین می‌کند و سیستم را به تعادل می‌رساند.

۲.۴. تحلیل حساسیت

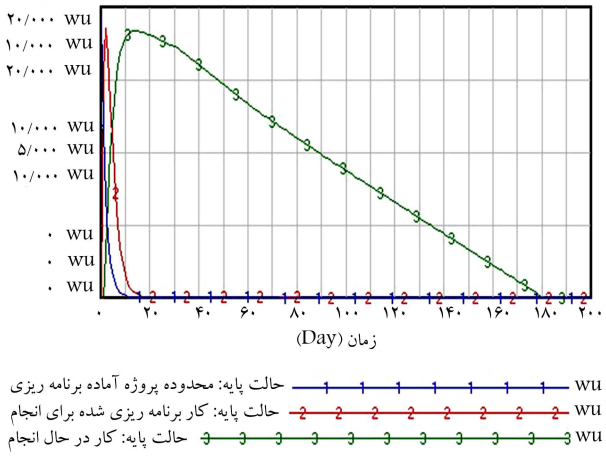
تحلیل حساسیت باید براساس مقایسه‌ی حالت پایه‌ی شبیه‌سازی با حالت‌های دیگر (بهتر و بدتر نسبت به پایه) باشد. برای انجام تحلیل حساسیت، ابتدا متغیرهای موردنظر باید شناسایی شوند، سپس یک بازه و محدوده‌ی تغییرات برای هر یک از متغیرهای موردنظر در نظرگرفته شود. رفتار مدل در زمان اعمال تغییر در فرضیات موردنظر نباید اختلاف و خطای آشکار و زیاد داشته باشد. درواقع الگوی رفتاری، یکسان است. بهترین و بدترین حالت رفتاری متغیر موردنظر مدل بر پایه‌ی تغییر فرضیات موردنظر به حالت مطلوب و یا حالت کمینه در عین درنظرگرفتن واقعیت‌های سیستم (پروژه) است.[۳۳] مقادیر متغیرهای بهره‌وری نیروهای کاری ساده و مجرب در یک محدوده‌ی منطقی تغییر پیدا کرده و تحلیل حساسیت روی آن انجام شده است. با اعمال تغییرات در محدوده‌ی متغیر بهره‌وری، انتظار دریافت الگوی رفتاری یکسان با نوسان‌های متفاوتی نسبت به حالت پایه‌ی رفتاری مدل است، که در شکل ۹ مشهود است.

مقادیر بهره‌وری نیروهای کاری در یک محدوده‌ی منطقی افزایش و کاهش یافته است و تأثیر آن در متغیر نیاز به نیروی کار بررسی شده است. تغییرات نمودارهای

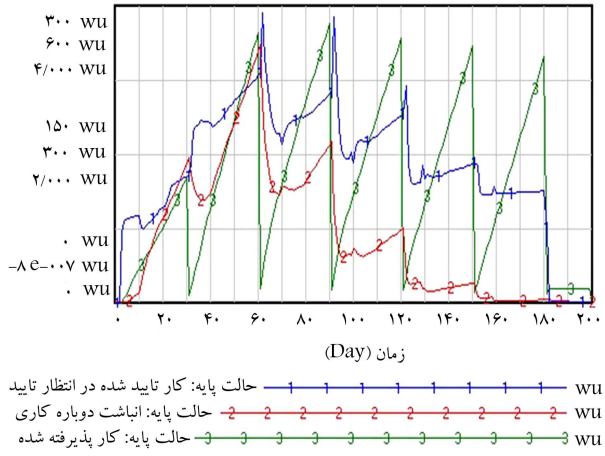
شکل ۹، با توجه به این موضوع که الگوی رفتاری مشابه نسبت به حالت پایه دارند، حاکی از صحت مدل است.

۵. نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی مدل کمّی پژوهش حاضر، براساس ورودی‌های داده‌های پروژه‌ی موردمطالعه به مدل پیشنهادی است. شکل‌های ۱۰ الی ۱۴، شبیه‌سازی رفتار مدل را برای پروژه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهند. شکل ۱۰، بیانگر رفتار متغیرهای محدوده‌ی پروژه که باید برنامه‌ریزی برای آن صورت گیرد، برنامه‌ریزی برای آماده کردن کار برای انجام و کار در حال انجام است. همان‌طورکه در نمودار واضح است، مقدار کار برنامه‌ریزی شده نیز به مرور در انباشت کار در حال جریان قرارگرفته و میزان آن به صفر رسیده است. اتمام مقدارکار در جریان در روز ۱۸۰ به معنای تکمیل پروژه بدون درنظرگرفتن پیچیدگی‌های موجود در آن است، در حالی که این امر با شرایط واقعی پروژه سازگار نیست. با توجه به شکل ۱۱، دوباره‌کاری در روز ۶۱ به بیشینه‌ی مقدار خود رسیده و پس از آن به مرور کاهش یافته است، که دلیل آن کاهش کار انجام‌شده‌ی در انتظار تأیید، کار پذیرفته شده و همچنین میزان خطاهاست. در روز ۲۰۰ نیز کل میزان کار پذیرفته شده به پایان رسیده است. این تذکر لازم است که



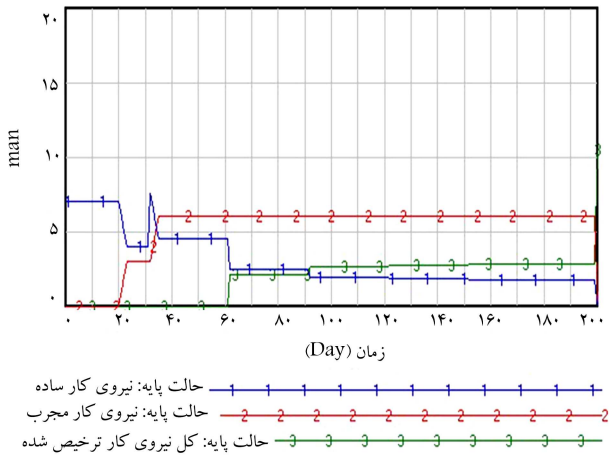
شکل ۱۰. محدوده‌ی پروژه‌ی آماده‌ی برنامه‌ریزی، کار برنامه‌ریزی شده برای انجام و کار در حال انجام.



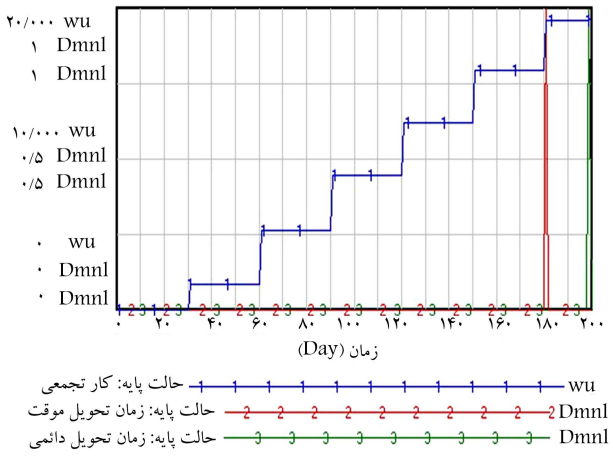
شکل ۱۱. کار تأیید شده در انتظار تأیید، انباشت دوباره‌کاری و کار پذیرفته شده.

علت رفتار نوسانی موجود در شکل ۱۱، به خصوص رفتارکار پذیرفته شده، به دلیل ماهیانه بودن زمان تأیید کار است.

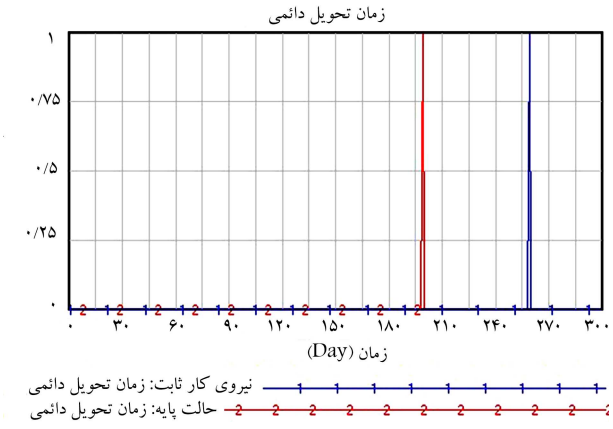
شکل ۱۲، وضعیت منابع انسانی موجود در پروژه را برای آینده شبیه‌سازی می‌کند. تعداد نیروی کار اولیه، ۷ نفر است که با تغییر میزان نیاز به نیروی کار، مقادیر نیروی کار تغییر کرده است. عموماً در آغاز پروژه تا یک زمان مشخص مقدار نیروی



شکل ۱۲. نیروهای کاری ساده، مجرب و میزان کل ترخیص.



شکل ۱۳. کار تجمعی و تحویل موقت و دائم پروژه.



شکل ۱۴. تأخیرات پروژه به دلیل استفاده از نیروی کار ساده.

کار ساده، افزایش پیدا می‌کند و سپس به دلیل مجرب‌شدن نیروی کار در طول زمان از مقدار آن کاسته می‌شود. بنابراین مطابق با شکل ۱۲ می‌توان گفت که از روز ۳۵ام پروژه، نیروی کار ساده شروع به کاهش کرده و مقدار نیروی کار مجرب نیز تا روز ۳۵ افزایش یافته و سپس مقدار آن تا زمان تحویل پروژه ثابت مانده است. علت رفتار مذکور، ترخیص نیروی کار و تداوم کاهش نیروی کار ساده با یک شیب ملایم است. نهایتاً در زمان تحویل پروژه، کل نیروی کار ترخیص شده‌اند. شایان ذکر است ترخیص نیروی کار، ابتدا از نیروی کار ساده صورت می‌گیرد و سپس نیروی کار مجرب، ترخیص می‌شوند.

اکنون مطابق با شکل ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که زمان تحویل موقت و دائم پروژه به ترتیب در روزهای ۱۸۱ و ۱۹۹ رقم خورده و تحویل موقت براساس تکمیل ۱۹۳۲۰ مترمربع سرامیک‌کاری صورت گرفته است. پس از تکمیل کامل کار و سپری شدن دوره‌ی تضمین، پروژه به کارفرما تحویل داده می‌شود.

اما در طول اجرای پروژه ممکن است پیمانکار یا مدیر پروژه به دلیل عدم آگاهی و توانایی در پژوهش نیروی کار موردنیاز خود، تصمیم به اجرای پروژه با نیروی کار ثابت اولیه بگیرد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در صورت اتخاذ چنین سیاستی، پروژه با تأخیری ۶۳ روزه به کارفرما تحویل داده می‌شود، که به معنای شکست پروژه است. همان‌طور که نمودارهای شبیه‌سازی نشان می‌دهند، امکان پیش‌بینی دقیق نیاز به نیروی کار پروژه میسر شده است، که می‌توان به کمک استخدام و ترخیص نیروی کار، میزان نیروی کار موردنیاز را تأمین و تعدیل کرد.

۶. به کارگیری سیاست‌ها

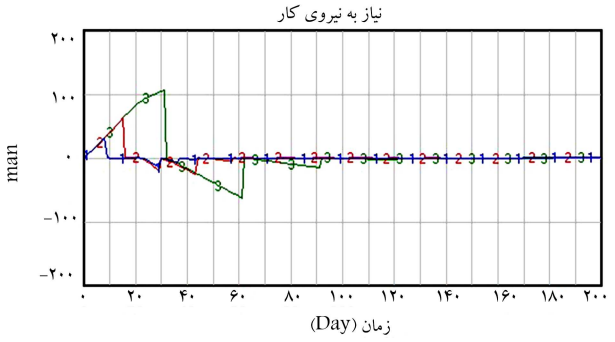
با مشاهده و بررسی نتایج شبیه‌سازی مهم‌ترین سیاست‌ها جهت تعدیل و کاهش نوسان‌ها، میزان نیاز به نیروی کار پروژه ارائه شده است. بهبود نوسان‌ها منجر به آسان‌ترشدن فرایند جذب و تعدیل نیروی کار پروژه خواهد شد. سیاست‌های مذکور، شامل این ۲ سیاست هستند: ۱. سیاست‌های زمانی استخدام نیروی کار، ۲. سیاست استخدام گروه‌های مختلف نیروی کار از لحاظ میزان تجربه.

۱.۶. استخدام نیروی کار بر مبنای زمان

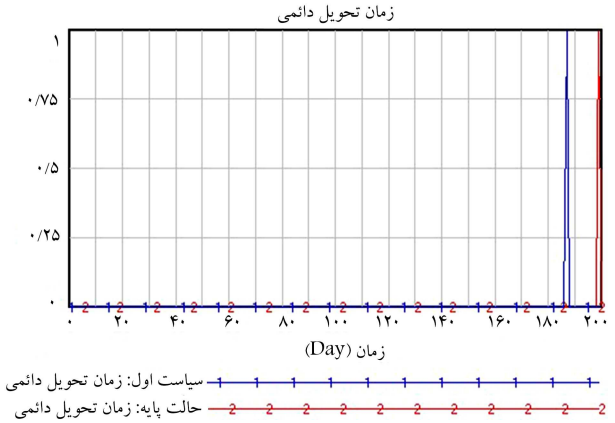
از آنجایی که در مدل پژوهش حاضر، تخمین نیروی کار موردنیاز پروژه به‌صورت ماهیانه صورت گرفته است، بنابراین سیاست‌های زمانی استخدام نیروی کار در ۲ بازه‌ی زمانی ۲ هفتگی و هفتگی بررسی شده‌اند. شکل ۱۵، نوسان‌های متغیر نیاز به نیروی کار پروژه را در ۲ بازه‌ی زمانی ۲ هفتگی و هفتگی در مقایسه با حالت پایه یعنی بازه‌ی زمانی ماهیانه نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۱۵، نوسان‌های بازه‌ی زمانی ۲ هفتگی از ماهیانه کمتر است و همچنین بازه‌ی زمانی هفتگی از ۲ هفتگی و ماهیانه کمتر است که بیانگر بهبود نوسان‌های تأمین نیروی کار است. زمانی که نوسان‌های نیاز به نیروی کار کمتر باشد، تعدیل و تخصیص نیروی کار موردنیاز پروژه آسان‌تر صورت خواهد گرفت. اگرچه بررسی میزان نیروی کار موردنیاز پروژه در بازه‌های زمانی کوچک‌تر، هزینه‌ی بیشتری دارد، اما ممکن است که به دلیل نیازسنجی و تخصیص بهتر نیروی کار، هزینه‌ی کل تکمیل پروژه در مقایسه با بازه‌های زمانی بزرگ‌تر را کاهش دهد.

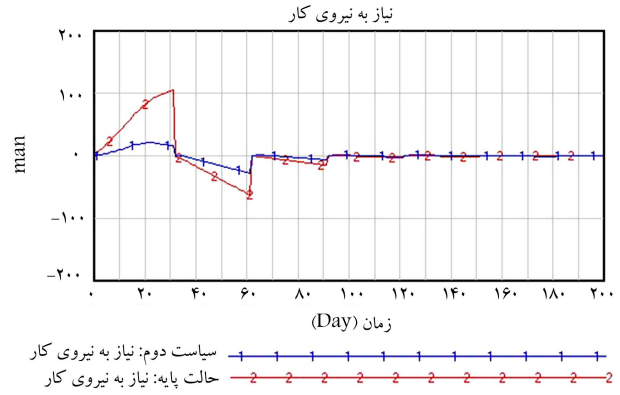
در صورتی که بازه‌های زمانی موردبررسی کوچک‌تر شوند، تأثیرهایی در زمان تحویل پروژه می‌گذارند. به‌عنوان مثال در شکل ۱۶، در صورت ماهیانه‌بودن بازه‌ی مدل، تحویل پروژه در روز ۱۹۹ خواهد بود؛ در حالی که در بازه‌ی زمانی ۲ هفتگی



شکل ۱۵. سیاست زمانی استخدام نیروی کار.



شکل ۱۶. زمان تحویل پروژه در بازه‌ی زمانی کوچک‌تر.

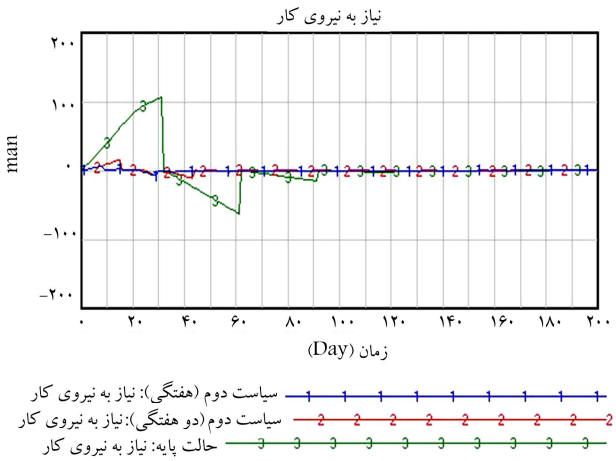


شکل ۱۷. سیاست کیفی استخدام نیروی کار.

در روز ۱۸۷ خواهد بود، که این امر نشان‌دهنده‌ی مزیت دیگری از بررسی ۲ هفتگی نیروی کار نسبت به ماهیانه در تأثیرگذاری در عملکرد زمانی پروژه است.

۲.۶. استخدام نیروی کار بر مبنی کیفیت

به کارگیری سیاست کیفی نیروی کار پروژه، یکی از سیاست‌های مؤثر در بهبود عملکرد پروژه‌هاست. استفاده از نیروهای کاری مختلف از نظر میزان تجربه می‌تواند نوسان‌های نیروی کار را در طول فرایند اجرای پروژه بهبود بخشد. مطابق با شکل ۱۷، در صورت استخدام نیروی کار مجرب درکنار نیروی کار ساده به‌صورت ماهیانه، نوسان‌های نیاز به نیروی کار پروژه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸. سیاست کیفی استخدام نیروی کار در بازه‌های مختلف زمانی.

شایان ذکر است که نسبت استخدام نیروی کار مجرب نسبت به نیروی کار ساده مطابق با واقعیات پروژه‌های ساخت، به میزان ۱ به ۳ است. همچنین، اگر بازه‌های زمانی استخدام نیروی کار مجرب کوچک‌تر شوند، نوسان‌های نیاز به نیروی کار پروژه به طرز قابل ملاحظه‌یی کمتر خواهند شد (شکل ۱۸).

۷. نتیجه‌گیری

تأمین نیروی کار موردنیاز پروژه‌ها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اقدام‌های مدیریت منابع انسانی، همواره یکی از نگرانی‌های مدیران و صاحبان پروژه بوده است. تخمین دقیق و لحظه‌یی میزان نیروی کار موردنیاز، پیش از آغاز پروژه و در حین اجرای آن می‌تواند این فرصت را در اختیار تصمیم‌گیران پروژه قرار دهد که برنامه‌ریزی لازم را جهت تأمین و تخصیص نیروی کار لازم پروژه انجام دهند. از طرفی، مدل‌های تخمین نیروی کار پیشنهاد شده در مطالعات پیشین، توانایی درنظرگرفتن تمامی عوامل مؤثر در تخمین نیروی کار و پیچیدگی‌ها و پویایی‌های ذاتی پروژه‌های ساخت را ندارند. از طرف دیگر، مدل‌های پویایی سیستم پیشنهاد شده در مطالعات پیشین نیز به‌صورت کلی به این موضوع پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش پویایی سیستم، مدلی توسعه داده شده است که توانایی تخمین دقیق و لحظه‌یی نیروی کار موردنیاز پروژه‌های ساخت را دارد، به گونه‌یی که مشکلات و معایب مطالعات پیشین را تا حد زیادی بر طرف می‌کند. جهت مدل‌سازی، ابتدا ماهیت پویای پروژه‌های ساخت، نیروی کار، و جریان کار پروژه بررسی شد. سپس با استفاده از روش پویایی سیستم، نمودارهای علی ـ معلولی و حالت ـ جریان ارائه شد. مدل توسعه داده‌شده‌ی پیشنهادی قادر است که ماهیت پویای پروژه‌های ساخت را در نظرگیرد و میزان دقیق نیروی کار موردنیاز پروژه را شبیه‌سازی کند. همچنین مدل مذکور با تخصیص بهینه‌ی نیروی کار، مشکلات ناشی از عدم کفایت نیروی کار را حل می‌کند و با کاهش نوسان‌های نیروی کار، تسطیح منابع انسانی را به کمک کمترین تعدیل ممکن نیروی کار انجام می‌دهد، که منجر به کاهش هزینه‌های پروژه می‌شود. با بررسی نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که اولاً، اجرای پروژه با نیروی کار ثابت، پروژه را با تأخیر روبرو می‌سازد؛ دوماً، در صورت استخدام یا ترخیص نیروی کار در طول اجرای پروژه، میزان نیاز به نیروی کار نوسان‌هایی را خواهد داشت. نهایتاً، ۲ سیاست استخدام نیروی کار از نظر زمان استخدام و کیفیت نیروی کار، جهت کاهش نوسان‌ها، نیاز به نیروی کار پروژه‌های ساخت پیشنهاد شد. با استفاده از مدل مذکور، تصمیم‌گیران پروژه می‌توانند ضمن آگاهی کامل از میزان نیاز به نیروی کار پروژه، برنامه‌ریزی لازم را جهت تأمین نیروی کار موردنیاز پیش از اقدام عملی انجام دهند. به منظور نشان دادن کارایی و قابلیت‌های مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی، این مدل بر روی بخشی از یک پروژه‌ی ساختمانی ۱۰۰۰ واحدی شهر اصفهان پیاده‌سازی شد. یکی از مزایای مدل پویایی سیستم ارائه شده، انعطاف‌پذیری آن برای کاربرد در پروژه‌های مختلف است.

منابع (References)

1. Armstrong, M., *A Handbook of Human Resource Management Practice*, Kogan Page (2003).
2. Huemann, M., Keegan, A. and Turner, J.R. "Human resource management in the project-oriented company: A review", *International Journal of Project Management*, **25**(3), pp. 315-323 (2006).
3. El-Gohary, Kh.M., Aziz, R.F. "Factors influencing construction labor productivity in Egypt", *Journal of Management in Engineering (ASCE)*, **30**(1), pp. 1-9 (2014).
4. Ho, P.H.K. "Forecasting construction manpower demand by gray model", *J. Constr. Eng. Manage. (ASCE)*, **136**(12), pp. 1299-1305 (2010).
5. Druker, J. and White, G. "Managing people in construction", Institute of Personnel and Development, London (1996).
6. Lyneis, J.M. and Ford, D.N. "System dynamics applied to project management: A survey, assessment, and directions for future research", *System Dynamics Review*, **23**(2-3), pp. 157-189 (2007).
7. Uwakweh, B.O. and Maloney, W.F. "Conceptual models for manpower planning for the construction industry in developing countries", *Constr. Manage. Economy*, **95**, pp. 451-465 (1991).
8. Uher, T. E. and Loosemore, M. "Essentials of construction project management", UNSW Press, Sydney, Australia (2004).
9. Flunweral, M., Helmes, F., Mojtahedzadeh, M. and Macdonald, R. "Operational labor productivity model", International System Dynamics Conference (2004).
10. Marshall, C. and Rossman, G.B. "Designing qualitative research, Sega, Los Angeles (1999).
11. Meehan, R.H. and Ahmed, S.B. "Forecasting human resources requirements: A demand model", *Hum. Resour. Plann.*, **13**(4), pp. 297-307 (1990).
12. Purkiss, C. "Corporate manpower planning: A review of models", *Eur. J. Oper. Res.*, **8**(4), pp. 315-323 (1981).
13. Sing, M.C.P., Love, P.E.D. and Tam, C.M. "Stock-flow model for forecasting labor supply", *J. Constr. Eng. Manage. (ASCE)*, **138**(6), pp. 707-715 (2012).
14. Persad, K.R., O' Connor, J.T. and Varghese, K. "Forecasting engineering manpower requirements for highway preconstruction activities", *J. Manage. Eng.*, **11**(3), pp. 41-47 (1995).
15. Bell, L.C. and Brandenburg, S.G. "Forecasting construction staffing for transportation agencies", *J. Manage. Eng.*, **19-3**(116), pp. 116-120 (2003).

16. Hanke, J.E., Wichern, D.W. and Reitsch, A.G. "Business forecasting", Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ (2009).

17. Wong, J.M.W., Chan, A.P.C. and Chiang, Y.H. "Forecasting construction manpower demand: A vector error correction model", *Build. Environ.*, **42**(8), pp. 3030-3041 (2008).

18. Sing, M.C.P., Love, P.E.D, and Tam, C.M. "Multiplier model for forecasting manpower demand", *J. Constr.Eng. Manage. (ASCE)*, **138**(10), pp.1161-1168 (2012).

19. Liu, J., Love, P.E.D., Sing, C.P., Carey, B. and et al. "Modeling australia's construction workforce demand: Empirical study with a global economic perspective", *J. Constr. Eng. Manage.*, **141**(4), pp. 1-13 (2014).

20. Sing, C.P., Edwards, D.J., Liu, J. and et al. "Forecasting private-sector construction works: VAR model using economic indicators", *J. Constr. Eng. Manage.*, **141**(11), pp.1-9 (2015).

21. Ford, D.N. "The dynamics of project management: An investigation of the impacts of project process and coordination on performance", PhD dissertation, MIT (1995).

22. Ford, D.N. and Sterman, J. "Dynamic modeling of product development processes", *System Dynamics Review*, **14**(1), pp. 31-68 (1998).

23. Lyneis, J.M., Cooper, K.G. and Els, Sh.A. "Strategic management of complex projects: A case study using system dynamics", *System Dynamics Review*, **17**(3), pp. 237-260 (2001).

24. Ogunlana, S.O., Li. H., and Sukhera, F.A. "System dynamics approach to exploring performance enhancement in a construction organization", *Journal of Construction Engineering and Management*, **129**(5), pp.528-536 (2003).

25. Park, M. "Model-based dynamic resource management for construction projects", *Automation in Construction, 2005*, **14**(5), pp. 585-598 (2004).

26. Lyneis, J.M. and Ford, D.N. "System dynamics applied to project management: A survey, assessment, and directions for future research", *Accepted for publication in System Dynamics Review*, **23**(2-3), pp. 157-189 (2007).

27. Son, J. and Rojas, E.M. "Impact of optimism bias regarding organizational dynamics on project planning and control", *Journal of Construction Engineering and Managemen*, **137**(2), pp. 147-157 (2011).

28. Parvan, K., Rahmandad, H. and Haghani, R. "Interphase feedbacks in construction projects", *Journal of Operations Management*, **39-40**, pp. 48-62 (2015).

29. Sing, M.C.P., Love, P.E.D., Edwards, D.J. and et al. "Dynamic modeling of workforce planning for infrastructure projects", *J. Manage. Eng.*, **36**(2), pp. 1-12 (2016).

30. Forrester, J.W. "Industrial dynamics", Productivity Pres, Cambridge, MA (1961).

31. Rodrigues, A.G. and Williams, T.M. "System dynamics in project management: Assessing the impacts of client behaviour on project performance", *Journal of the Operational Research Society*, **49**(1), pp. 2-15 (1998).

32. Richardson, G. "Introduction to the system dynamics review", *Syst. Dyn. Rev.*, **1**(1), pp. 1-5 (1985).

33. Sterman. "Business dynamics: System thinking and modeling for a complex world", McGraw-Hill, New York, NY, pp. 191-232 (2000).

34. Goodman, M.R. "Study notes in system dynamics", Productivity Press, Cambridge, MA (1989).

پیوست

به طور نمونه معادلات ساختار نیاز به نیروی کار پروژه ارائه شده است:

Remained work for project completion = MAX (۰,

Project Scope − Cumulative work accepted)

Remained duration for project completion ontime = MAX(۰

Contract Official Duration − Time)

Goal completion rate = IF THEN ELSE (Time Counter = ۰,

ZIDZ (Remained work for project completion

Remained duration for project completion on time), ۰)

Total labor mean productivity = ZIDZ

(Experienced Labor ∗ Productivity EL

+Newly Hired Labor ∗ Productivity NL),

(Experienced Labor + Newly HiredLabor))

Optimum workforce = ZIDZ(goal completion rate,

total labor mean productivity)/Standard Workhour

Labor shortfall = IF THEN ELSE(completion fraction <۰/۹۵,

optimum workforce − Total Labor, ۰)

Labor Demand = labor shortfall/labor shortfall reporting time

Labor Need = INTEG(Labor Demand − ((Time Period + ۱

∗Labor Adjustment); ۰)

Labor Adjustment = (Hiring − Turnover)/labor adjustment

time