مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۰۱-۱۱۰

Original Article

پیش‌بینی بهره‌وری نیروی انسانی و بررسی تأثیر آن در نحوه‌ی عملکرد پروژه

فرناد نصیرزاده * **(استادیار)**
گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران
پویا نوجه‌دهی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

میزان بهره‌وری نیروی انسانی تحت تأثیر مجموعه‌یی از عوامل و فاکتورهای اثرگذار است، که دارای تعاملات پیچیده‌یی با یکدیگر هستند. در این نوشتار، ابتدا نحوه‌ی تأثیر فاکتورهای مختلف اثرگذار در میزان بهره‌وری با درنظرداشتن ارتباطات پیچیده‌ی موجود بین این فاکتورها شبیه‌سازی و مدل کیفی بهره‌وری ساخته شده است در ادامه، اطلاعات لازم برای کمّی‌سازی مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شده، برای یک پروژه‌ی انبوه‌سازی مسکن مهر جمع‌آوری شده است. با استفاده از مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شده، می‌توان آثار مستقیم و غیرمستقیم فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی را شبیه‌سازی کرد. همچنین اثر بهره‌وری نیروی انسانی در عملکرد پروژه بر حسب هزینه، زمان، و کیفیت انجام پروژه ارزیابی شده است. در نهایت، می‌توان با شناسایی فاکتورها و عواملی که باعث کاهش بهره‌وری می‌شوند، عملکرد پروژه را بهبود داد.

واژگان کلیدی: بهره‌وری نیروی انسانی، پویایی سیستم، شبیه‌سازی، پروژه‌های ساخت.

f.nasirzadeh@gmail.com
p.nojedehi@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

بهره‌وری نیروی انسانی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده و اثرگذار در عملکرد پروژه‌های ساخت است.[۱] در حقیقت مقدار بهره‌وری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تخمین زمان و هزینه‌ی عملیات اجرای پروژه‌هاست.[۲] براساس بررسی‌های انجام‌شده، در پروژه‌های ساخت، هزینه‌های نیروی انسانی حدود ۳۳ الی ۵۰ درصد از کل بودجه‌ی پروژه را تشکیل می‌دهند.[۳]

اقتصاددانان بهره‌وری را نسبت بین کل منابع ورودی و کل محصول تولیدی تعریف می‌کنند.[۴] مدیران پروژه و متخصصان ساخت، بهره‌وری را نسبت بین ساعات کاری تولیدی و ساعات کاری استفاده‌شده تعریف می‌کنند.[۴] در این مطالعه، بهره‌وری نیروی انسانی نسبت کار انجام‌شده و زمان صرف‌شده برای اجرای کار تعریف شده است.

به‌طور کلی، درک و شناخت بهتر فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری می‌تواند تیم اجرای پروژه را به سمت استفاده‌ی کاراتر از منابع محدود، آماده‌کردن کارگران با پشتیبانی بهتر، افزایش انگیزه‌ی نیروهای کاری و افزایش تعهد آنها برای بهبود بهره‌وری رهنمون سازد.[۵] تاکنون مطالعات زیادی درخصوص بررسی اثرات فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی انجام شده است، که در این نوشتار به‌طور خلاصه مرور شده‌اند.

در سال ۲۰۰۵، مطالعاتی درخصوص تأثیر تغییر کارها[۱] در بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از یک مدل جدید بر پایه‌ی شبکه‌ی عصبی انجام شده است[۶] که برای ارزیابی کیفی میزان کاهش بهره‌وری در اثر تغییر در فعالیت‌های کارگاهی و نحوه‌ی تأثیر آنها ارائه شده بود. مطالعه‌ی دیگری نیز در سال ۲۰۰۸، درخصوص تأثیر اضافه‌کردن یک شیفت کاری جدید (شب‌کاری) بر روی بهره‌وری، به دو صورت کمّی و کیفی انجام شده است،[۷] که نتایج مدل پیشنهادی در مطالعه‌ی مذکور نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که شیفت کاری هم می‌تواند در بهبود عملکرد افراد و بهره‌وری آنها مؤثر باشد و هم می‌تواند زیان‌آور و کاهش‌دهنده باشد. تأثیر ناشی از اضافه‌کاری در بهره‌وری در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن از طریق روش‌های تحلیل استاتیکی مختلفی از قبیل P-Value، رگرسیون چندگانه، و آنالیز متغیرها و در قالب نمودارهای کمّی ارائه و همچنین کاهش میزان بهره‌وری براساس میزان افزایش ساعات کاری هفتگی نشان داده شده است.[۵] در سال ۲۰۰۵ نیز در مطالعه‌ی دیگری، بهره‌وری و مدت اجرای پروژه‌ی ساخت یک بزرگراه تحت تأثیر شرایط آب و هوایی (تأثیر باران) که یکی از عوامل مؤثر در آن است، با استفاده از اطلاعات تاریخی بارش‌های باران و دانش خبرگان و به‌کارگیری مفهوم مجموعه‌های فازی مورد ارزیابی و بررسی قرارگرفت.[۸] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۷ با استفاده از رویکرد پویایی سیستمی، تأثیرات منفی تغییر کارها، که از طرف کارفرما و یا پیمانکار به پروژه تحمیل می‌شود، از قبیل: کاهش بهره‌وری و ایجاد وقفه‌های کاری را مدل‌سازی

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۸، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۱۲، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱.

و رابطه‌ی بین تغییرات، وقفه‌های کاری، بهره‌وری و ذینفعان پروژه توسط حلقه‌های علت و معلولی را به‌صورت کیفی تبیین کردند.[۹] در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۹ از طریق آنالیز اطلاعات موجود و استفاده از نمونه‌های مستقل T-test، ارتباط بین بهره‌وری کارگاهی و اتوماسیون و یکپارچگی بین فعالیت‌های انتخابی (بتن‌ریزی، سازه‌های فلزی، الکتریکال، و لوله‌گذاری) پروژه‌های نمونه مورد بررسی قرار گرفت، که در نهایت تأثیر مثبت استفاده از یک سیستم اتوماسیون و یکپارچه‌ی اطلاعات در افزایش بهره‌وری نشان داده شد.[۱۰] در همان سال پژوهش دیگری درخصوص ارتباط بین دو موضوع تغییر در تکنولوژی مصالح و بهره‌وری نیروی انسانی انجام شد، که در آن از طریق آنالیز متغیرها (ANOVA)[۲] و آنالیز رگرسیون این نتیجه حاصل شد که فعالیت‌های با تغییر قابل توجه در شرایط مصالح، در درازمدت دارای بهبود بهتری بر روی فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری هستند.[۱۱] همچنین در مطالعات انجام‌شده‌ی دیگری در همان‌سال، رابطه‌ی بین بهره‌وری نیروهای کارگاهی و فضای کار (فشردگی فضای انجام فعالیت‌ها در کارگاه) بررسی و با استفاده از روش مدل‌سازی Agent-Based این نتیجه حاصل شد که عدم وجود فضای کافی در کارگاه و تداخل‌های کاری ناشی از فشردگی کارگاهی می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری افراد شود.[۱۲] تنها مطالعه‌یی که درخصوص مدل‌سازی بهره‌وری و فاکتورهای مؤثر در آن با استفاده از روش پویایی سیستمی انجام شده است، در سال ۲۰۱۰ بوده است؛ که در آن براساس نظر خبرگان ۵ فاکتور اصلی کنترل، برنامه‌ریزی، انگیزه، ایمنی، و توقف‌های کاری و یک فاکتور غیراصلی انتخاب شده است. در مدل پیشنهادی مذکور، فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری به‌صورت کیفی شبیه‌سازی شده است.[۱۳]

در مطالعات انجام‌شده‌ی پیشین، فقط اثر یکی از فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی مورد بررسی قرار گرفته است و اثرات همه فاکتورهای مؤثر به‌صورت هم‌زمان لحاظ نشده است، در حالی که بهره‌وری از فاکتورهای متعددی متأثر است که دارای ارتباطات و تعاملات پیچیده‌یی با یکدیگر هستند. ضمن اینکه در کارهای انجام‌شده‌ی پیشین، اثر بهره‌وری نیروی انسانی در عملکرد پروژه بر حسب مؤلفه‌های زمان، هزینه، و کیفیت انجام پروژه بررسی نشده است.

۲. روش تحقیق

در این مطالعه، برای رفع معایب پژوهش‌های انجام‌شده‌ی پیشین که در قسمت مقدمه جمع‌بندی شدند، بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستمی ـ به‌عنوان یک روش شبیه‌ساز بازخوردی شیءگرا ـ مدل‌سازی شده است. لذا ابتدا فاکتورها و عوامل مختلف مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی در پروژه‌های ساخت شناسایی و سپس ارتباطات پیچیده‌ی موجود بین عوامل شناسایی‌شده تعیین و نحوه‌ی تأثیر این عوامل در بهره‌وری نیروی انسانی با درنظرگرفتن کلیه‌ی تعاملات پیچیده‌ی موجود بین آنها به‌صورت کیفی شبیه‌سازی شده است. در مرحله‌ی بعد، روابط موجود بین فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی به‌صورت ریاضی تعیین و مدل کمّی بهره‌وری ساخته شده است. علاوه بر این، اثر میزان بهره‌وری نیروی انسانی در زمان و هزینه‌ی انجام پروژه پیش‌بینی شده است. در نهایت، پس از شناسایی فاکتورها و عواملی که باعث کاهش بهره‌وری می‌شوند، راه‌کارهایی برای بهبود بهره‌وری در نظر گرفته شده و با استفاده از مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شده، میزان کارآمدی هر یک از این راهکارها در بهبود عملکرد پروژه و دستیابی به اهداف زمانی، هزینه‌یی و کیفیت پروژه در یک محیط مجازی شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.[۱۴و۲۰]

۱.۲. روش پویایی سیستمی

پویایی سیستمی، که یک روش شبیه‌سازی بازخوردی شیءگراست، برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ معرفی شده است.[۱۵] روش مذکور قادر است سیستم‌های پیچیده را با درنظرگرفتن کلیه‌ی عوامل مؤثر در آن شبیه‌سازی کند. پویایی سیستمی، روشی دقیق و کارا برای بررسی و تحلیل سیستم‌های پیچیده‌ی صنعتی، مدیریتی، و اقتصادی محسوب می‌شود.[۱۶] سیستم‌های پویا به‌طورکلی سیستم‌هایی هستند که تعاملات بین عوامل مؤثر را در طول زمان شبیه‌سازی می‌کنند.[۱۳] مدل‌های پویایی سیستم با استفاده از فرآیندهای بازخورد، درک بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها را در طول زمان می‌دهند. تفکر سیستمی بر روابط علت و معلولی تأکید دارد و این روابط میان اجزاء سیستم باید به‌طور واضح و روان تعریف شود. رویکرد پویایی سیستم برای مدل‌سازی و مدیریت فرآیندهایی با این دو خصوصیت می‌تواند استفاده شود: ۱. فرآیندهایی که در گذر زمان تغییر می‌کنند، ۲. فرآیندهایی که بازخوردی از اطلاعات دارند.[۱۷و۱۸] هنر روش مذکور، ترسیم رفتار سیستم با استفاده از مدل‌سازی فرایندهای بازخوردی داخل سیستم از طریق ساختارهای حالت ـ جریان، تأخیرهای زمانی، و روابط غیرخطی است. در ساختار حالت ـ جریان، مصالح، هزینه، و یا به‌طور کلی ورودی‌های و خروجی‌هایی که در یک سیستم در جریان هستند، بررسی و نمایش داده می‌شوند. متغیرهای حالت یا انباره‌ها، به‌طور مثال موجودی از تولید، جمعیت و یا هزینه‌ها را در یک سیستم شامل می‌شود. در حالی که جریان شامل نرخ افزایش و یا کاهش انباره‌ها از قبیل تولیدات و یا کالاهای حمل‌شده می‌شود.[۱۹]

۳. ساختار مدل

مراحل مختلف شبیه‌سازی بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از مدل پیشنهادی در این قسمت توضیح داده شده است. شبیه‌سازی بهره‌وری نیروی انسانی در ۵ مرحله به این شرح انجام خواهد شد:

مرحله‌ی اول) ابتدا فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری شناسایی می‌شود.

مرحله‌ی دوم) تعیین مؤثرترین فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری.

مرحله‌ی سوم) براساس فاکتورهای شناسایی‌شده و رابطه‌ی موجود بین آنها، مدل کیفی بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از حلقه‌های بازخوردی علت و معلولی ساخته می‌شود.

مرحله‌ی چهارم) در ادامه، روابط پیچیده‌ی موجود بین فاکتورهای مختلف مؤثر در بهره‌وری توسط روابط ریاضی تعیین شده و مدل‌سازی کمّی بهره‌وری نیروی انسانی انجام می‌شود.

مرحله‌ی پنجم) با توسعه‌ی مدل کمّی ساخته‌شده، بهره‌وری نیروی انسانی شبیه‌سازی و مقدار آن پیش‌بینی می‌شود.

مرحله‌ی ششم) همچنین به منظور روشن‌شدن میزان اثر هر یک از فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری، آنالیز حساسیت انجام می‌شود.

مدل توسعه داده‌شده قادر است بهره‌وری نیروی انسانی را با درنظرگرفتن فاکتورهای مختلف مؤثر در آن شبیه‌سازی کند.

۴. شبیه‌سازی بهره‌وری نیروی انسانی

۱.۴. شناسایی فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی

بهره‌وری نیروی انسانی از فاکتورهای مختلفی که قابل مدیریت و یا غیر قابل مدیریت

هستند، متأثر است.[۹] در این مطالعه، فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری با استفاده از مطالعات کتابخانه‌یی شامل مرور مقالات و مطالعات پیشین شناسایی و در ادامه نیز با استفاده از انجام مصاحبه با مدیران و کارشناسان ارشد تعدادی از شرکت‌های پیمانکاری و همچنین پرکردن پرسشنامه، این فاکتورها مجدداً بررسی شده است.

۲.۴. تعیین مؤثرترین فاکتورهای مؤثر در بهره وری

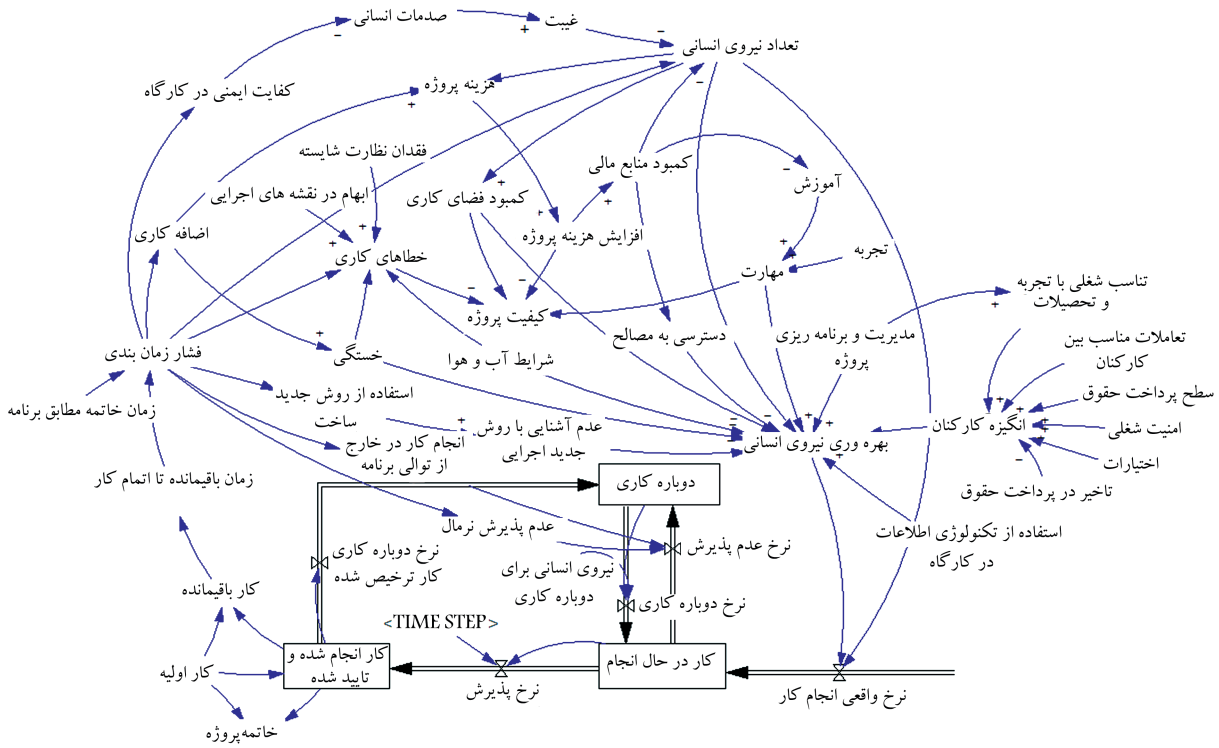
در این مطالعه، پس از شناسایی فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی از طریق مطالعات کتابخانه‌یی، از روش ارزش‌گذاری لایکهرت برای تعیین پارامترهای مؤثر در بهره‌وری و طبقه‌بندی میزان اهمیت آنها و حذف فاکتورهای کم‌اهمیت استفاده و میزان اهمیت فاکتورها به صورت ۵ مقدار: خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم ارزش‌گذاری شده است. همچنین در صورتی که فاکتوری از نظر خبرگان غیرمؤثر محسوب می‌شد، با گزینه‌ی «غیر مؤثر» حذف شده است.[۱۴و۲۰] در نهایت، با اهمیت‌ترین فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی تعیین و در ۲۶ مورد مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی شده‌اند. فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی، براساس نوع و حوزه‌ی اثر به ۵ دسته عوامل مرتبط با انگیزش کارکنان، عوامل مرتبط با خصوصیات کار، عوامل مرتبط با شرایط محیطی ـ فیزیکی، عوامل مرتبط با خصوصیات نیروی کار و عوامل مرتبط با مدیریت پروژه دسته‌بندی شده است (جدول ۱).

۳.۴. ساخت مدل کیفی بهره‌وری نیروی انسانی

مهم‌ترین هدف از مدل‌سازی، کسب دانش در مورد رفتار یک سیستم واقعی است.[۱۹] در واقع مدل‌سازی، ابزار مناسبی برای بررسی تصمیمات مختلف و آثار و نتایج حاصل از آنها در یک محیط مجازی و پیش از وقوع آنها در واقعیت است. همچنین در مواردی که انجام آزمایش در سیستم‌های فیزیکی ممکن نباشد (مانند بررسی اثرات رشد تکنولوژی در تولید ناخالص ملی) یا آزمایش سیستم‌های واقعی، هزینه‌ی بالایی

جدول ۱. عوامل مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی.[۱۴و۲۰]

دسته‌بندی اصلی	ردیف	معیار (فاکتور)
عوامل مرتبط با انگیزش کارکنان[۱۳]	۱	تأخیر در پرداخت حقوق کارکنان
	۲	مناسب بودن حقوق کارکنان با مسئولیت محوله
	۳	موقعیت مناسب شغلی براساس تجربه و تحصیلات
	۴	داشتن اختیارات کافی جهت انجام مسئولیت
	۵	روابط مناسب کاری ـ اخلاقی بین افراد
	۶	پاداش‌ها و مشوق‌های مالی
	۷	احساس امنیت شغلی
عوامل مرتبط با خصوصیات کار[۲۰]	۸	دوباره‌کاری و خطاهای کاری
	۹	ابهام در نقشه‌های اجرایی
	۱۰	دسترسی به مصالح
	۱۱	دسترسی به تجهیزات و ماشین‌آلات
	۱۲	پیچیدگی و اندازه‌ی پروژه یا فعالیت
	۱۳	اضافه‌کاری
عوامل مرتبط با شرایط محیطی ـ فیزیکی	۱۴	شرایط نامناسب آب و هوا[۸]
	۱۵	کمبود فضای کاری کافی[۱۲]
	۱۶	ایمنی کافی در کارگاه[۲۰]
عوامل مرتبط با خصوصیات نیروی کار[۲۰]	۱۷	آموزش نیروهای کاری قبل و در حین کار
	۱۸	مهارت افراد (میزان دانش و تجربه‌ی فرد در راستای کار محوله)
	۱۹	غیبت‌های کاری (عدم حضور در کار و یا مسئولیت محوله)
	۲۰	تعداد نیروی انسانی
عوامل مرتبط با مدیریت پروژه	۲۱	استفاده از روش‌های جدید ساخت (تغییر روش کار به دلیل تسریع و یا اجرای کار)[۱۵]
	۲۲	فشارهای خارجی برای کاهش مدت پروژه به دلیل تأخیرات[۱۵]
	۲۳	کافی‌بودن تعداد ناظران در حین کار
	۲۴	با صلاحیت‌بودن ناظران از لحاظ تجربه و دانش
	۲۵	مدیریت و راهبری کارآمد پروژه[۱۳]
	۲۶	استفاده از فناوری‌های جدید و IT در اجرا[۱۱]



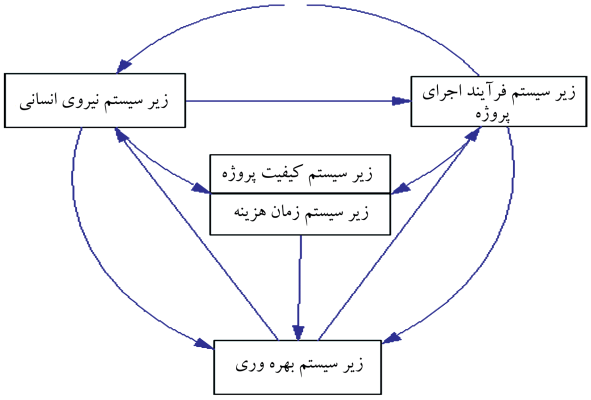
شکل ۱. مدل کیفی بهره‌وری نیروی انسانی.

داشته باشد (مانند ساخت و عملیاتی‌کردن نیروگاه‌ها برای مقایسه‌ی هزینه‌هایشان) معمولاً از مدل استفاده می‌شود.[۱۹]

فاکتورهایی که در مقدار بهره‌وری نیروی انسانی اثرگذار هستند، به‌ندرت مستقل از یکدیگر و غالباً برخی فاکتورها نتیجه‌ی برخی دیگر و یا یک یا چند عامل، علتی برای فاکتورهای دیگر هستند.[۷] روش پویایی سیستمی که یک روش شبیه‌سازی بازخوردی شیء‌گراست، قادراست سیستم‌های پیچیده را با درنظرگرفتن کلیه‌ی عوامل مؤثر در آن شبیه‌سازی کند و ابزار مناسبی برای مدل‌سازی بهره‌وری با درنظرگرفتن ساختار پیچیده‌ی عوامل و فاکتورهای مؤثر بر آن است.[۱۵] مدل‌سازی با روش پویایی سیستم در ۵ مرحله شامل: درک سیستم، درک مفهومی، ساختن مدل، اعتبارسنجی مدل، و تحلیل سیاست انجام می‌شود.

در این بخش روابط و تعاملات پیچیده بین فاکتورهای مختلف با استفاده از حلقه‌های بازخوردی علت و معلولی مدل‌سازی می‌شود. فاکتورهای مختلف مؤثر در بهره‌وری، به شکل حلقه‌های متعدد تشدیدکننده و متعادل‌کننده، میزان بهره‌وری نیروی انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ به نحوی که برخی عوامل مؤثر، در طول زمان بر یکدیگر و در بهره‌وری اثری افزایشی و تشدیدکننده و برخی دیگر اثرکاهشی و یا متعادل‌کننده دارند. مطابق شکل ۱، مدل دینامیک پیشنهادی دارای فاکتورهای مؤثر متعدد و نیز تعاملات پیچیده‌یی بین فاکتورهاست، بنابراین جهت درک بهتر بهره‌وری نیروی انسانی و اثرات مترتب از آن بر روی اهداف پروژه، مدل موجود به چندین زیرسیستم تقسیم می‌شود و بدین ترتیب شرایط ساده‌تری جهت درک آن برای کاربران ایجاد خواهد شد. در شکل ۲، نیز زیرسیستم‌های پیشنهادی به همراه چگونگی ارتباط بین آنها نشان داده شده است.

زیرسیستم‌های مدل پیشنهادی، شامل ۵ زیرسیستم: فرآیند اجرای پروژه، نیروی انسانی، مدت و هزینه‌ی اجرای پروژه، کیفیت پروژه، و بهره‌وری نیروی انسانی است؛ که در ادامه، هر یک از این زیرسیستم‌ها به‌طور خلاصه بررسی و از مابین آنها



شکل ۲. ارتباط بین زیرسیستم‌های مدل بهره‌وری نیروی انسانی.

به‌عنوان نمونه، دو زیرسیستم نیروی انسانی و کیفیت پروژه با جزئیات کامل ارائه شده‌اند.

الف) زیرسیستم فرآیند اجرای پروژه

به‌طور کلی فرآیند اجرای کار و اجزاء مؤثر در آن در این زیرسیستم شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور، مراحل اجرای کار، براساس کار موجود و نرخ واقعی انجام کار مدل‌سازی می‌شود. به‌طور کلی این زیرسیستم از ۳ انبارش «کار درحال انجام»، «کار انجام‌شده و تأییدشده» و «دوباره‌کاری» تشکیل شده است (شکل ۱).

ب) زیرسیستم نیروی انسانی

دراین زیرسیستم، میزان نیروی انسانی موردنیاز پروژه تعیین و شرایط تخصیص نیروی انسانی در زمان‌های مختلف و تحت شرایط متفاوت بررسی شده است (شکل ۳). به‌طور کلی از آنجائی که نیروی انسانی یکی از مهم‌ترین عوامل در شکست و یا

موفقیت پروژه‌های ساخت است، مدیریت و روند تخصیص آن به فعالیت‌های در حال انجام در طول پروژه، بسیار حائز اهمیت است. مطابق شکل ۳، تعداد نیروی انسانی براساس ۳ فاکتور: میزان کار باقی‌مانده، زمان باقی‌مانده تا تکمیل و بهره‌وری نیروی انسانی تعیین می‌شود.

در زیرسیستم پیشنهادی برای نیروی انسانی، می‌توان ۳ نوع سیاست اصلی را در تخمین و تخصیص نیروی انسانی در طول پروژه اتخاذ کرد که شامل: سیاست نیروی انسانی ثابت، سیاست نیروی انسانی متغیر و سیاست اضافه‌کاری می‌شود. در سیاست نیروی انسانی ثابت، تعداد نیروی انسانی در طول پروژه ثابت است. در حالی که در روش نیروی انسانی متغیر، تعداد نیروها در طول زمان قابل تغییر است. در سیاست اضافه‌کاری، ساعات کاری نیروها نسبت به حالت نرمال افزایش خواهد یافت. مطابق شکل ۳، اضافه‌کاری با توجه به اثر خستگی می‌تواند در بهره‌وری و کیفیت پروژه به‌صورت منفی تأثیر بگذارد.

یکی از روش‌هایی که برای کوتاه‌کردن زمان انجام کار استفاده می‌شود، فشار برای کاهش مدت پروژه (فشار زمان‌بندی) است. این سیاست از طرف دیگر می‌تواند منجر به کاهش سطح ایمنی در کارگاه شود. بنابراین تعداد صدمه‌دیدگان ناشی از حوادث ایمنی در کارگاه افزایش یافته و افزایش تعداد غیبت‌های کاری را به دنبال خواهد داشت. بدین ترتیب با کاهش تعداد افراد، بهره‌وری کاهش خواهد یافت. مطابق شکل ۳، در حالتی که تعداد نیروها از یک میزان بیشینه تجاوز کند، مشکل دیگری با عنوان کاهش فضای کاری اتفاق خواهد افتاد، که در بهره‌وری نیروی انسانی به‌صورت منفی اثرگذار خواهد بود.

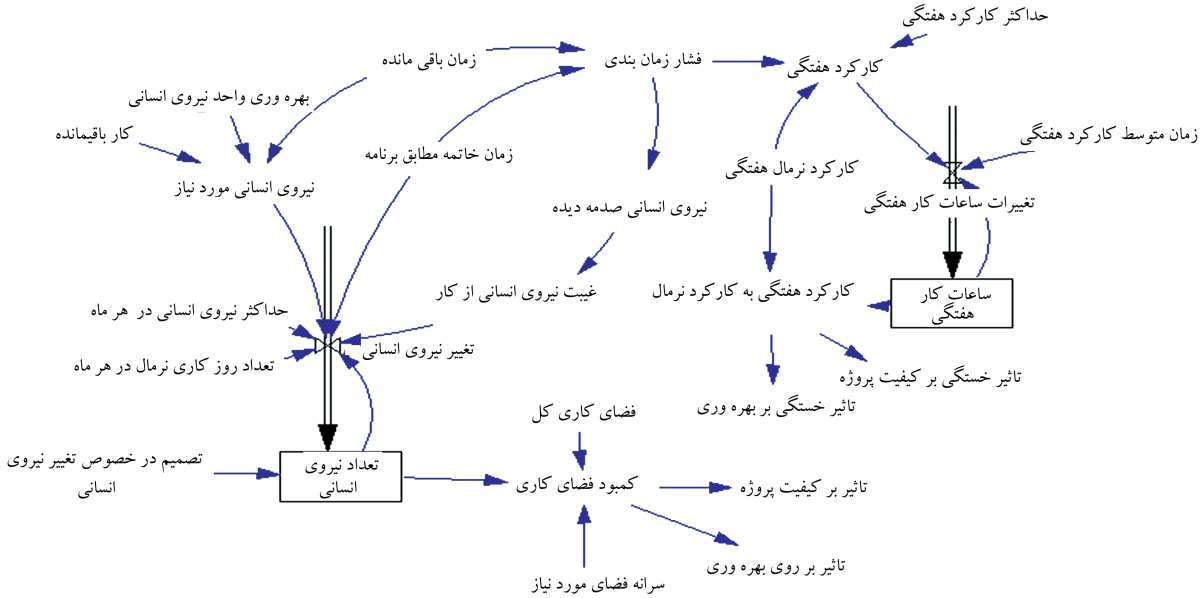
ج) زیرسیستم مدت و هزینه‌ی اجرای پروژه

در این زیرسیستم، با توجه به فاکتورهای مؤثر در زمان و هزینه‌ی پروژه، در هر مرحله از زمان، مدت اجرای پروژه و هزینه‌های ناشی از کارها در طول پروژه قابل تعیین است.

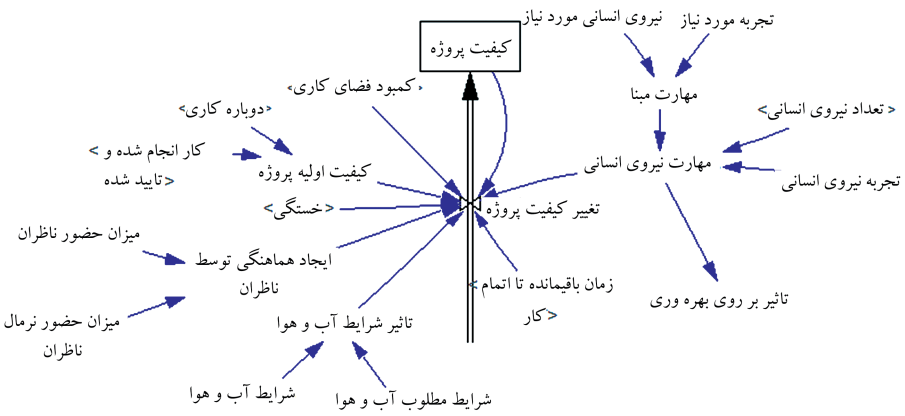
د) زیرسیستم کیفیت پروژه

در شکل ۴، مدل توسعه داده‌شده‌ی زیرسیستم کیفیت پروژه ارائه شده است. ورودی‌های این مدل فاکتورهای مؤثر در کیفیت هستند.

مطابق شکل ۴، کیفیت انجام پروژه در این زیرسیستم تحت تأثیر فاکتورهای متعددی همچون: کمبود فضای کاری (افزایش تداخلات کاری)، ایجاد هماهنگی توسط ناظران، تأثیر شرایط آب و هوا و خستگی و مهارت نیروی انسانی (آشنایی



شکل ۳. زیرسیستم نیروی انسانی.



شکل ۴. زیرسیستم کیفیت پروژه.

بیشتر با کار) است. مهارت نیروی انسانی در مدل پیشنهادی، براساس تعداد نیروی انسانی تخصیص‌یافته به پروژه در هر مقطعی از زمان و همچنین تجربه‌ی آنها محاسبه می‌شود. بدین ترتیب در صورت کاهش تعداد نیروها و یا کاهش تجربه‌ی آنها، تأثیر مهارت نیروی انسانی در کیفیت پروژه و همچنین بهره‌وری به‌صورت منفی و کاهشی خواهد بود. در این مدل مهارت نیروی انسانی در هر گام از مدل‌سازی با یک مهارت مبنا مقایسه و اثر آن در کیفیت و بهره‌وری لحاظ می‌شود.

هـ) زیرسیستم بهره‌وری نیروی انسانی

دراین زیرسیستم بهره‌وری نیروی انسانی به همراه مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در آن مدل‌سازی شده است.

۴.۴. ساخت مدل کمّی بهره‌وری نیروی انسانی

پس از تهیه‌ی مدل کیفی بهره‌وری نیروی انسانی، روابط ریاضی بین فاکتورهای اثرگذار تعیین می‌شود تا مدل پیشنهادی بتواند به‌صورت کمّی نیز میزان بهره‌وری را شبیه‌سازی کند. در حقیقت، کمّی‌سازی مدل کیفی، مستلزم فرموله‌کردن روابط میان اجزاء مدل است. برای کمّی‌سازی مدل پیشنهادی، روابط موجود بین متغیرها به ۲ روش تعیین شده است:

الف) تعیین روابط منطقی موجود بین متغیرها: این روابط گاهی به‌صورت فیزیکی و روشن بین اجزاء مدل وجود دارند و می‌توانند به‌راحتی فرموله شوند. به طور مثال هزینه‌ی کل نیروی انسانی، با داشتن مقدار دو فاکتور تعداد نیروی انسانی و هزینه‌ی واحد نیروی انسانی با استفاده از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است:

هزینه‌ی کل نیروی انسانی = تعداد نیروی انسانی × هزینه‌ی واحد نیروی انسانی (۱)

ب) تعیین روابط بین متغیرها با استفاده از رگرسیون و براساس اطلاعات گذشته: اما گاهی روابط بین اجزاء مدل، روشن نیست و فرموله‌کردن روابط نیاز به تخمین و انجام بعضی فرضیات به‌کمک متخصصان با تجربه و یا بررسی داده‌های مربوط به پروژه‌های مشابه پیشین دارد. در این حالت که رابطه‌ی موجود بین فاکتورها با استفاده از روابط ریاضی به‌راحتی قابل تعیین نیست، می‌توان با استفاده از رگرسیون بین داده‌های تاریخی مربوط به یک یا چند پروژه‌ی پیشین، روابط ریاضی بین فاکتورهای اثرگذار را تعیین کرد. مثلاً در پژوهش انجام‌شده، رابطه‌ی ریاضی بین خستگی و میزان کارکرد هفتگی، با داشتن اطلاعات پروژه‌های پیشین به‌صورت رابطه‌ی ۲ تعیین می‌شود:

خستگی = (۲٫۱۳۳ × LN(کارکرد هفتگی به کارکرد نرمال) + ۰٫۰۴۶۲) (۲)

۵.۴. شبیه‌سازی دینامیک بهره‌وری نیروی انسانی

با استفاده از مدل کمّی بهره‌وری توسعه داده‌شده در مرحله‌ی قبل، می‌توان مقدار بهره‌وری نیروی انسانی را با درنظرگرفتن تمامی عوامل مؤثر در آن در یک محیط دینامیک و مجازی، شبیه‌سازی و همچنین اثر بهره‌وری نیروی انسانی در عملکرد پروژه را بر حسب زمان و هزینه و کیفیت انجام کار تعیین کرد.

۵. کاربرد مدل در یک پروژه‌ی نمونه

به منظور نشان‌دادن کارایی و قابلیت‌های مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی میزان بهره‌وری نیروی انسانی، این مدل بر روی یک پروژه‌ی نمونه و برای فعالیت اجرای اسکلت بتنی به این شرح پیاده‌سازی شده است:

پروژه‌ی مورد مطالعه بخشی از پروژه‌ی انبوه‌سازی مسکن مهر استان قم است، که مشخصات آن به این شرح بوده است:

- کار اولیه: اجرای اسکلت بتنی به حجم ۶۰۰ مترمکعب شامل آرماتوربندی، قالب‌بندی، و بتن‌ریزی.
- تعداد نیروی انسانی اختصاص‌یافته: بتن‌ریزی توسط یک تیم متشکل از ۱۲ نفر انجام شده است.
- زمان موردنظر برای خاتمه‌ی کار: ۱۰ ماه.
- میزان بهره‌وری نرمال اولیه: ۵ مترمکعب اجرای اسکلت بتنی.
- میزان کاردکرد هفتگی نرمال: ۴۰ ساعت در هفته.
- میزان بیشینه‌ی کارکرد هفتگی: ۸۰ ساعت در هفته.

۱.۵. پیش‌بینی میزان بهره‌وری به ازاء مقادیر مختلف فاکتورهای مؤثر در آن

مدل شبیه‌ساز بهره‌وری توسعه داده‌شده این قابلیت را دارد که میزان بهره‌وری نیروی انسانی را با توجه به مقادیر فاکتورهای مختلف مؤثر در آن در یک محیط مجازی شبیه‌سازی و مقدار آن را پیش‌بینی کند. برای این منظور ابتدا مدل کیفی بهره‌وری پیشنهادی، با درنظرداشتن کلیه‌ی فاکتورهای مؤثر و روابط بین آنها در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی VENSIM توسعه داده‌شده و سپس روابط ریاضی موجود بین تمامی متغیرها در محیط نرم‌افزار تعریف و مدل کمّی شده است. مدل کمّی توسعه داده‌شده قادر است که مقادیر فاکتورهای مختلف مؤثر در بهره‌وری نیروی انسانی را به‌عنوان ورودی دریافت و میزان بهره‌وری و عملکرد پروژه بر حسب زمان، هزینه و کیفیت را به‌عنوان خروجی مدل، شبیه‌سازی و پیش‌بینی کند.

در جدول ۲، مقدار بهره‌وری نیروی انسانی (بر حسب مترمکعب بتن‌ریزی) به ازاء مقادیر مختلفی از فاکتورهای اثرگذار در آن نشان داده شده است.

جهت بررسی میزان تأثیر فاکتورهای مختلف در بهره‌وری، میزان تغییر در بهره‌وری نرمال، به ازاء ۵۰٪ کاهش در مقدار اولیه‌ی هر فاکتور در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش در میزان بهره‌وری مربوط به عدم مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب در پروژه است، که در شرایطی که شاخص این فاکتور ۰٫۵ باشد، با کاهشی حدود ۵۷٪ در میزان بهره‌وری روبرو خواهیم بود.

۲.۵. بررسی اثرتغییرات بهره‌وری در عملکرد پروژه

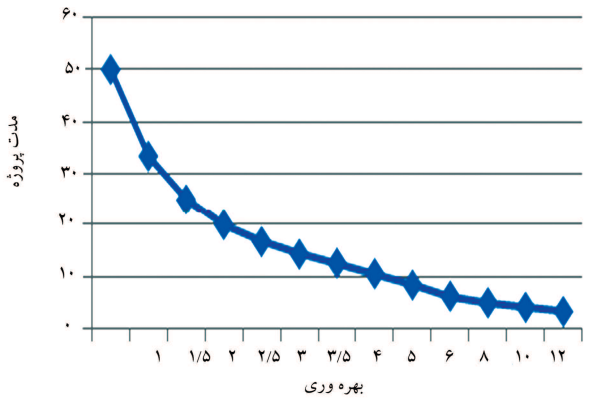
با استفاده از مدل شبیه‌ساز بهره‌وری توسعه داده‌شده می‌توان اثر تغییرات بهره‌وری در عملکرد پروژه را بر حسب زمان، هزینه، و کیفیت انجام پروژه در یک محیط مجازی شبیه‌سازی کرد. در نمودارهای ۵ و ۶، اثر تغییرات بهره‌وری نیروی انسانی در عملکرد پروژه بر حسب زمان و هزینه بررسی شده است. در ادامه نیز تأثیر تغییرات در فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری، بر روی کیفیت انجام کار ارائه شده است (شکل‌های ۷ الی ۱۰). مطابق شکل ۵، کاهش بهره‌وری سبب تطویل مدت پروژه

جدول ۲. پیش‌بینی میزان بهره‌وری به‌ازاء مقادیر مختلف فاکتورهای مؤثر.

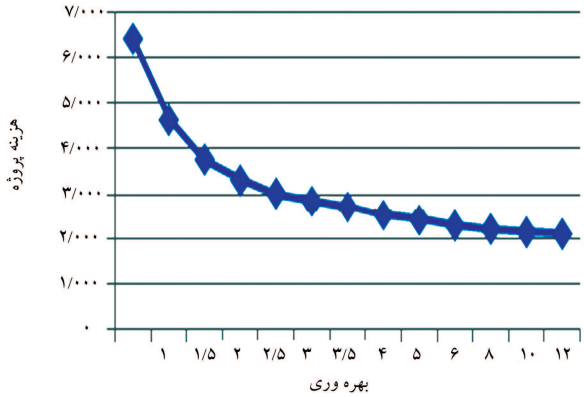
ردیف	دمای هوا	کمبود فضای کاری	مهارت	کارکرد هفتگی	مدیریت پروژه	انگیزه	کمبود مصالح	عدم آشنایی با روش جدید اجرا	بهره‌وری
۱	۲۰	۱	۱	۴۰	۱	۱	۱	۱	۵
۲	۱۷/۵	۰/۹۰۵	۰/۹	۴۰	۰/۹۰۲	۱	۱	۱	۳/۷۲
۳	۱۴	۰/۹۷۵	۰/۸	۴۲/۳	۰/۷۶	۱	۱	۱	۲/۵۱
۴	۲۵	۱	۰/۸	۴۰/۸۳	۰/۶۹۵	۱	۱	۱	۲/۹۸
۵	۷/۵	۰/۷۹۱	۰/۶	۷۷/۱۸	۰/۶۹۵	۱	۱	۱	۱/۵۲

جدول ۳. تغییرات بهره‌وری به ازاء تغییر ۵۰٪ در فاکتورهای مؤثر در آن.

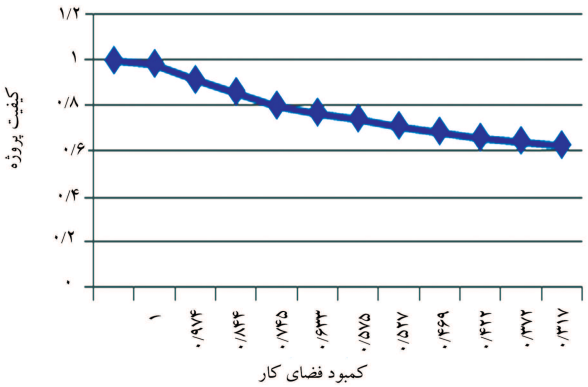
ردیف	فاکتورهای مؤثر	تغییر در فاکتور مؤثر	کاهش در بهره‌وری (٪)
۱	کمبود فضای کار	۵۰٪ کاهش	۴۰
۲	مهارت	۵۰٪ کاهش	۲۰
۳	شرایط آب وهوا	۵۰٪ کاهش	۱۱
۴	برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه	۵۰٪ کاهش	۵۷
۵	اضافه‌کاری	۵۰٪ افزایش	—
۶	کمبود مصالح	۰	۰
۷	عدم آشنایی با روش‌های جدید	۰	۰
۸	انگیزه‌ی کارکنان	۰	۰



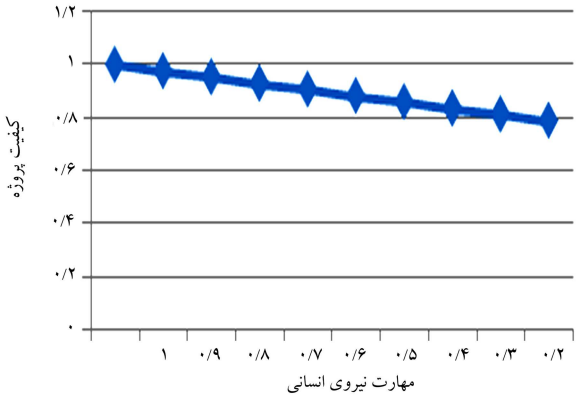
شکل ۵. تغییرات بهره‌وری و اثر آن در مدت پروژه.



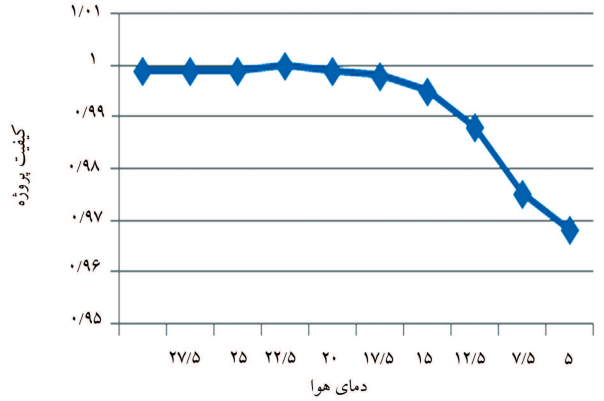
شکل ۶. تغییرات بهره‌وری و اثر آن در هزینه‌ی پروژه.



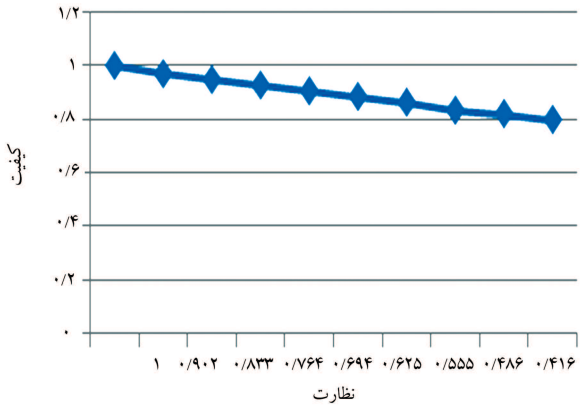
شکل ۷. تغییرات کیفیت در مقابل تغییر در مقدار فاکتور کمبود فضای کاری.



شکل ۸. تغییرات کیفیت در مقابل تغییر در مقدار فاکتور مهارت نیروی انسانی.



شکل ۹. تغییرات کیفیت در مقابل تغییر در مقدار فاکتور شرایط دمای هوا.



شکل ۱۰. تغییرات کیفیت در مقابل تغییر در مقدار فاکتور هماهنگی و نظارت (توسط ناظران).

می‌شود، به نحوی که کاهش بهره‌وری به نصف مقدار نرمال، با تقریباً دو برابرشدن زمان پروژه همراه خواهد بود.

از آنجائی که رابطه‌ی بین زمان و هزینه‌ی پروژه، یک رابطه‌ی مستقیم و ریاضی مشخص و روشن است، در نتیجه به دلیل کاهش بهره‌وری و تطویل پروژه، افزایش هزینه‌ها مورد انتظار است. در شکل ۶، نمودار تغییرات هزینه‌ی پروژه در مقابل بهره‌وری نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، با افزایش بهره‌وری، به دلیل کوتاه‌شدن زمان پروژه، هزینه‌های انجام پروژه نیز کاهش خواهد یافت.

تغییرات کیفیت انجام پروژه در مقابل تغییر در مقادیر فاکتورهای مؤثر در آن نیز در نمودارهای ۷ تا ۱۰ مشاهده می‌شود.

به‌طور نمونه فاکتور کمبود فضای کاری، مستقیماً هم بر روی بهره‌وری و هم در کیفیت انجام کار مؤثر است، که در شکل ۷، اثر آن در کیفیت قابل ملاحظه است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، کیفیت کار در اثر کمبود فضای کاری و افزایش فشردگی و تداخلات کاری، از شاخص ۱ که مربوط به شرایط مطلوب فضای کاری است تا حدود ۰/۶ که مربوط به شرایط با بیشینه‌ی تداخلات کاری است، تقلیل می‌یابد.

مهارت نیروی انسانی از دیگر فاکتورهای مؤثر در کیفیت است. به نحوی که افزایش تجربه و آشنایی هر چه بیشتر نیروهای کاری در افزایش کیفیت پروژه مؤثر است. تغییرات کیفیت پروژه در مقابل مقادیر مختلف این فاکتور در شکل ۸ مشاهده می‌شود. از دیگر فاکتورهایی که هم بهره‌وری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هم در کیفیت مؤثر است، شرایط آب و هوا (دمای هوای کارگاه) است که در این مطالعه، نسبت به فاکتورهای دیگر با توجه به نمودار ۹ اثر کمتری دارد. به نحوی که تغییرات دمایی در یک بازه‌ی ۲۴ درجه‌یی (از ۵ تا ۲۸ درجه بالای صفر)، حدود ۴٪ کیفیت پروژه را کاهش می‌دهد.

حضور ناظران در طول پروژه نیز می‌تواند شرایط هماهنگی فعالیت‌ها و نظارت بر روی نیروهای کاری و کارگران را افزایش و کیفیت انجام کار را بهبود دهد. مطابق شکل ۱۰، کاهش شاخص نظارت و هماهنگی توسط ناظران، کاهش کیفیت انجام پروژه را به دنبال دارد.

به‌عنوان جمع‌بندی و همان‌طور که در نمودارهای ارائه‌شده در این بخش ملاحظه می‌شود، افزایش بهره‌وری با کاهش زمان و هزینه‌ی پروژه همراه است و کاهش آن افزایش زمان و هزینه‌ی پروژه را سبب شده است. همچنین در این بخش، با بررسی و تحلیل اثر برخی فاکتورهای شناسایی‌شده بر روی کیفیت پروژه ملاحظه شده است که برخی از فاکتورها اثر افزایشی در کیفیت پروژه دارند و برخی دیگر به واسطه‌ی اثرگذاری منفی، سبب کاهش کیفیت می‌شوند. شیب منحنی تغییرات کیفیت به واسطه‌ی تغییر در مقدار فاکتورهای اثرگذار نیز با توجه به نمودارهای ارائه‌شده متفاوت است. برخی از فاکتورها همانند مهارت نیروی انسانی و یا هماهنگی و نظارت توسط ناظران، از لحاظ تأثیر در کیفیت پروژه دارای شیب ملایم‌تری هستند و در واقع اثرگذاری کمتری دارند و برخی فاکتورها مانند: کمبود فضای کاری و تداخل ناشی از آن، دارای شیب تغییرات تندتری هستند، که میزان تأثیر بیشتر این فاکتور را در کیفیت پروژه نشان می‌دهد.

۶. اعتبارسنجی مدل

جهت حصول اطمینان از قابل اعتمادبودن یک مدل، باید اعتبارسنجی مدل پیش از به‌کارگیری آن انجام شود. برای این منظور مجموعه‌یی از آزمون‌های اعتبارسنجی استاندارد، جهت حصول اطمینان از صحت نتایج به‌دست‌آمده بر روی مدل انجام شده است. تعدادی از آزمون‌های اعتبارسنجی که برای مدل بهره‌وری پیشنهادی استفاده شده است، در این قسمت توضیح داده شده‌اند:[۱۹]

- مناسب‌بودن مرز مدل: هدف از آن انطباق اهداف مورد انتظار از مدل با مرزهای تعیین‌شده است. بدین منظور از مرور ادبیات موضوع، مصاحبه با خبرگان، برداشت‌های میدانی و مدارک پروژه استفاده شده است.
- ارزیابی ساختار مدل: هدف از آن انطباق مدل با دانش و داده‌های موجود از سیستم واقعی است. این آزمون با استفاده از صحت‌سنجی مدل کیفی پروژه بر حسب دیاگرام‌های ترسیم‌شده‌ی مربوط به زیرسیستم‌ها و حلقه‌های بازخوردی نمایش داده‌شده و بازبینی و بررسی مستقیم معادلات ریاضی استفاده‌شده در مدل انجام شده است.
- آزمون سازگاری ابعادی: هدف این آزمون حصول اطمینان از این است که همه‌ی متغیرها از لحاظ ریاضی با هم سازگار هستند.
- آزمون شرایط مرزی: در این آزمون، رفتار واقعی مدل در شرایطی که ورودی‌های و سیاست‌های اعمال‌شده در حالت مرزی هستند، بررسی می‌شود. به ورودی‌های و سیاست‌های اعمال‌شده مقادیر مرزی داده و رفتار مدل و صحیح‌بودن آن بررسی می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، روشی جدید برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بهره‌وری نیروی انسانی ارائه شده است، که مشکلات و معایب کارهای گذشته را تا حدود زیادی بر طرف می‌کند. مدل پیشنهادی قادر است که با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم، طبیعت دینامیک پروژه‌های ساخت را در نظر گرفته و مقدار بهره‌وری نیروی انسانی را با درنظرداشتن مهم‌ترین عوامل و فاکتورهای اثرگذار شبیه‌سازی کند.

جهت درک بهتر مدل شبیه‌ساز بهره‌وری نیروی انسانی ارائه‌شده، مدل پیشنهادی به چندین زیرسیستم شامل: زیرسیستم فرآیند اجرای پروژه، زیرسیستم نیروی انسانی، زیرسیستم مدت و هزینه‌ی پروژه، زیرسیستم بهره‌وری نیروی انسانی و زیرسیستم کیفیت پروژه تقسیم شده است. مدل پیشنهادی می‌تواند با استفاده از حلقه‌های

بازخوردی علت و معلولی، میزان تأثیر کلی هر عامل اثرگذار در میزان بهره‌وری را با درنظرداشتن اثرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از آن عامل، در محیطی دینامیک شبیه‌سازی کند و در ادامه، میزان تأثیر بهره‌وری در عملکرد پروژه بر حسب زمان، هزینه و کیفیت انجام کار را پیش‌بینی کند.

به منظور نشان‌دادن کارایی و قابلیت‌های مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی میزان بهره‌وری نیروی انسانی، این مدل بر روی بخشی از پروژه‌ی انبوه‌سازی مسکن مهر استان قم پیاده‌سازی شده و میزان تأثیر فاکتورهای مختلف در بهره‌وری نیروی انسانی تعیین و همچنین اثر بهره‌وری بر اهداف پروژه شامل: هزینه، زمان، و کیفیت انجام کار به‌صورت کمّی نشان داده شده است.

یکی از مزایای مدل پویایی سیستم ارائه‌شده برای پیش‌بینی بهره‌وری، انعطاف‌پذیری آن برای کاربرد در پروژه‌های مختلف است. در صورتی که در یک پروژه، فاکتورهای جدید دیگری بر روی بهره‌وری مؤثر باشد، می‌توان به‌راحتی این فاکتورهای جدید را با استفاده از حلقه‌های بازخوردی علت و معلولی به مدل موجود اضافه و مقدار بهره‌وری را با درنظرداشتن این فاکتورهای جدید تعیین کرد.

پانوشت‌ها

1. change order
2. analaysis of variable

منابع (References)

1. Fayek, A.R. and Oduba, A. "Predicting industrial construction labor productivity using fuzzy expert systems", *Journal of Construction Engineering and Management,* **131**(8), pp 938-941 (2005).
2. Hwang, S. and Liu, L.Y. "Contemporaneous time series and forecasting methodologies for predicting short-term productivity", *Journal of Construction Engineering and Management,* **136**(9), pp. 1047-1055 (2010).
3. Hanna, A.S. "Quantifying the impact of change orders on electrical and mechanical labor productivity", *Research Rep.,* **3**, pp. 158-11 (2001).
4. Hanna, A.S., Taylor, C.S. and Sullivan, K.T. "Impact of extended overtime on construction labor", *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**(6), pp. 734-739 (2005).
5. Dai, J., Goodrum, M. and William, F.M. "Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(3), pp. 217-226 (2009).
6. Moselhi, O., Assem, I. and El-Rayes, K. "Change orders impact on labor productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**(3) pp. 354-359 (2005).
7. Hanna, A.S., Chul-Ki, C., Sullivan, K.T. and Lackney, J.A. "Impact of shift work on labor productivity for labor intensive contractor", *Journal of Construction Engineering and Management,* **134**(3), pp. 197-204 (2008).
8. Pan, N.F. "Assessment of productivity and duration of highway construction activities subject to impact of rain", *Journal of Expert Systems with Application*, **28**(2), pp. 313-326 (2005).
9. Ibbs, W., Nguyen, L.D. and Lee, S. "Quantified impacts of project change", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice,* **133**(1), pp. 45-52 (2007).
10. Zhai, D., Goodrum, P.M., Haas, C.T. and Caldas, C.H. "Relation between automation and integration of construction information systems and labor productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(8), pp. 746-753 (2009).
11. Goodrum, P.M., Zhai, D. and Yasin, M.F. "Relationship between changes in material technology and construction productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **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", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(7), pp. 657-667 (2009).
13. Mawdesley, M.J. and Al-Jibouri, S. "Modelling construction project productivity using systems dynamics approach", *International Journal of Productivity and Performance Management*, **59**(1), pp. 18-36 (2010).
14. Nasirzadeh, F. and Nojedehi, P. "Simulation of labor productivity using system dynamics", 7th Conference of Project Management, Tehran, Iran (1390).
15. Khanzadi, M., Nasirzadeh, F. and Alipour, M. "Integrating system dynamics and fuzzy logic modeling to determine concession period in BOT projects", *Journal of Automation in Construction,* **22**, pp. 368-376 (2012).
16. Rodrigues, A. "The role of system dynamics in project management: A comparative analysis with traditional models", International System Dynamics Conference (1994).

17. Richardson, G.P. and Pugh, A.L., *Introduction to System Dynamics Modeling with Dynamo*, MIT Press, Cambridge, Mass. (1981).

18. Nasirzadeh, F., Afshar, A. and Khanzadi, M. "System dynamics approach for construction risk analysis", *International Journal of Civil Engineering*, **6**(2), pp. (2008).

19. Sterman, J.D., *Bussiness Dynamics: System Thinking and Modeling for Complex World*, Mcgraw-hill (2000).

20. Nojedehi,P." Simulation of labor productivity in construction projects" Master Thesis,Islamic Azad University, Science and research Tehran branch, (1390).

پیوست

به‌طور نمونه برخی معادلات ریاضی که در زیرسیستم فرآیند اجرای پروژه استفاده شده است، به این شرح است:

Actual work rate = (amount of workforce × expected Workforce productivity).

Rework = INTEG(re − execution rate + rejection rate − rework rate, ۰).

Rework rate = IF THEN ELSE (rework ≤ ۰, ۰, rework ×assigned labor for rework).

Remained work to completion = IF THEN ELSE (initial workNwork checked and completed, initial work − work checked and completed, ۰).

Remaine time to completion = (remained work to completion /actual work rate).

Rejection rate = (rejection normal × work in progress) + (working out of sequence × work in progress).

Rejection normal = (۰٫۰۵ + IF THEN ELSE (schedule pressure ≤ ۱, ۰, schedule pressure × ۰٫۰۵)).

Schedule pressure = MIN(IF THEN ELSE (initial project duration ≤ remained time to completion, (remained time to completion)/(initial project duration), ۱), ۲).

Work checked and completed = INTEG(IF THEN ELSE (work checked and completedbinitial work, acceptance rate − re − execution rate, ۰), ۰).