مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۱۱-۱۲۰ (یادداشت فنی)

Research Note

ارائه‌ی یک رویکرد نرم‌افزاری مبتنی بر شبیه‌سازی چهاربُعدی جهت شناسایی پویای تداخل‌های زمانی ـ فضایی در پروژه‌های ساختمانی و ارزیابی کمّی تأثیر آن‌ها در بهره‌وری نیروی انسانی

علی میرزایی (کارشناس ارشد)
مجید پرچمی جلال* (استادیار)
دانشکده‌ی معماری، دانشگاه تهران
فرناد نصیرزاده (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران
یاسین زمانی (دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شریف

نادیده گرفتن فضا در زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی، باعث بروز تداخل‌های زمانی -فضایی می‌شود، که در آن‌ها فضاهای کاری موردنیاز فعالیت‌هایی که به‌صورت هم‌زمان اجرا می‌شوند، تداخل فیزیکی دارند. تداخل میان فضای موردنیاز نیروی انسانی، یکی از عوامل تأثیرگذار در بهره‌وری در پروژه‌های ساختمانی به‌شمار می‌رود. از طرفی، به‌کارگیری روش‌های فشرده‌سازی می‌تواند منجر به افزایش تعداد و شدت تداخل‌ها شود. در پژوهش حاضر، یک سیستم «شناسایی دینامیکی تداخل‌های زمانی ـ فضایی و ارزیابی کمّی تأثیر آن‌ها مبتنی بر شبیه‌سازی چهاربُعدی» با هدف بهبود روش‌های برنامه‌ریزی در پروژه‌های ساختمانی ارائه شده است. برای نخستین بار در حوزه‌ی تداخل‌های زمانی ـ فضایی ساختمانی به منظور شناسایی تداخل‌ها، حرکت نیروی انسانی با ۴ الگوی اجرایی و ۴ موقعیت شروع حرکت متفاوت شبیه‌سازی شده است. همچنین، شدت تداخل‌ها از طریق ارزیابی میزان افزایش تراکم نیروی انسانی در فضاهای کاری اندازه‌گیری شده است. بدین منظور علاوه بر ابعاد تداخل، درصد کاهش فضای سرانه‌ی در دسترس نیروی انسانی هر فعالیت بعد از بروز تداخل با توجه به فضای کمینه‌ی سرانه‌ی موردنیاز هر فعالیت محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: تداخل زمانی ـ فضایی، شبیه‌سازی چهاربُعدی، بهره‌وری نیروی انسانی، پروژه‌های ساختمانی.

amirzaei2@gmail.com
parchamijalal@ut.ac.ir
f.nasirzadeh@gmail.com
yasin.zamani@gmail.com

۱. مقدمه

کمبود فضای کار، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌آید.[۱و۲] فضا نیز همانند سایر محدودیت‌ها، نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت است.[۳] بدون درنظر داشتن یک برنامه‌ی مدیریت فضاهای کاری، کارگاه ساختمانی ممکن است دچار هرج و مرج شود و تداخل میان گروه‌های کاری مختلف افزایش یابد و مواردی نظیر اختلال درکار، کاهش بهره‌وری و تأخیرهای زمان‌بندی پدیدار شوند.[۴] فعالیت‌های یک پروژه نیازمند مجموعه‌یی از فضاهای کاری هستند تا بتوانند با بهره‌وری موردنظر و در سطح ایمنی کافی اجرا شوند.[۵] عدم مدیریت فضا و نادیده گرفتن آن در حین برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه، باعث بروز تداخل‌های زمانی ـ فضایی[۱] می‌شود که در آن‌ها فضا یا فضاهای موردنیاز فعالیت‌هایی که به‌صورت هم‌زمان اجرا می‌شوند (فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی[۲])، تداخل فیزیکی[۳] دارند.[۳] به‌عبارت دیگر، یک تداخل زمانی ـ فضایی شرایطی است که در آن منابع تخصیص‌یافته به چند فعالیت که هم‌پوشانی زمانی دارند، از یک فضای مشترک برای اجرای فعالیت‌ها استفاده کنند.[۶]

تداخل میان گروه‌های مختلف کاری و فضای موردنیاز آن‌ها، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بهره‌وری نیروی انسانی در پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌رود. تداخل‌های زمانی ـ فضایی می‌توانند تا ۴۰٪ از میزان بهره‌وری پروژه بکاهند.[۷] برنامه‌ریزی نامناسب فضاهای کاری می‌تواند منجر به بروز تداخل میان گروه‌های

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۶، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۱۶.
DOI:10.24200/J30.2018.1414

مختلف پیمانکاری و متعاقباً موجب افت بهره‌وری شود.[۸و۹] از سوی دیگر، هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی در پروژه‌های ساختمانی به‌صورت کلی حدود ۳۳ تا ۵۰ درصد از کل بودجه‌ی پروژه را تشکیل می‌دهند.[۱۰] بنابراین بهره‌وری پروژه‌های ساختمانی به‌صورت عمده به عملکرد نیروی انسانی وابسته است.[۱۱] علاوه بر اینکه تداخل میان گروه‌های مختلف کاری و فضای موردنیاز آن‌ها، به شدت موجب افت عملکرد فعالیت‌های متداخل می‌شود، می‌تواند عاملی برای تهدید ایمنی و ساخت‌پذیری کار باشد.[۱و۱۲]

با توجه به شرایط رقابتی و افزایش فشارها برای بهره‌برداری سریع‌تر از پروژه‌ها، در بسیاری از موارد فشرده‌سازی برنامه‌ی زمان‌بندی یک پروژه مدنظر قرار می‌گیرد. بسیاری از پیمانکاران بر این باورند که در بیشتر پروژه‌های ساختمانی، برنامه‌ی زمان‌بندی نیازمند فشرده‌سازی است.[۱۳] به‌کارگیری روش‌های فشرده‌سازی مانند اجرای موازی فعالیت‌ها (پیگیری سریع)[۴] و یا افزایش تعداد منابع جهت کوتاه‌تر ساختن مدت زمان اجرای فعالیت‌ها (پیش‌روی توفنده)[۵] می‌تواند منجر به افزایش احتمال بروز و شدت تداخل‌ها شود. بنابراین با اطمینان می‌توان گفت تداخل فضاهای کاری به وفور در پروژه‌های ساختمانی اتفاق می‌افتد.[۱] روش‌های فعلی و رایج زمان‌بندی پروژه‌ها، مانند: «روش مسیر بحرانی» و «نمودار میله‌ای» در برگیرنده‌ی اطلاعات فضایی فعالیت‌ها نیستند و در نتیجه به منظور برنامه‌ریزی فضاهای کاری و شناسایی تداخل‌های زمان ـ فضایی، کارایی لازم را ندارند.[۶و۱۴] از اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰، به مرور مطالعاتی در زمینه‌ی توسعه‌ی روش‌های مناسب جهت برنامه‌ریزی فضاهای کاری در پروژه‌های ساختمانی و شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی بالقوه در برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه آغاز شد. مطالعات مذکور عمدتاً بر ایجاد رویکرد مناسب جهت شناسایی و کمّی‌سازی فضای موردنیاز و فضای در دسترس در طبقات مختلف، ارائه‌ی الگوهای رفتاری و نحوه‌ی استفاده از انواع مختلف فضاهای کاری در پروژه‌های ساختمانی بلندمرتبه و توسعه‌ی روش برنامه‌ریزی فضا در پروژه‌های مذکور متمرکز بودند.[۱۵و۱۶]

در روش‌های مذکور، تداخل فضاهای کاری به‌صورت تجربی بر روی نقشه‌های دوبُعدی و از طریق تعیین انواع فضاهای موردنیاز، تخصیص فضاها و تعیین ترتیب موقعیت هر فضا براساس الگوهای اجرایی مشخص شناسایی می‌شوند. اخیراً با توسعه‌ی فنّاوری مدل‌سازی چهاربُعدی و تسهیل ایجاد مدل‌های چهاربُعدی در صنعت ساختمان، تلاش‌هایی در زمینه‌ی توسعه‌ی رویکردهای مبتنی بر مدل‌های مذکور در راستای ۱. تخصیص فضا یا فضاهای موردنیاز به فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی، ۲. شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی بالقوه و ۳. توسعه‌ی روش‌هایی جهت رفع و یا کاهش تداخل‌های زمانی ـ فضایی صورت گرفته است. مدل‌های چهاربُعدی از طریق اتصال برنامه‌ی زمان‌بندی به مدل سه‌بُعدی پروژه ساخته می‌شوند.[۱۷-۲۰] به عبارت دیگر، در یک مدل چهاربُعدی، اطلاعات زمانی و فضایی فعالیت‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند.

در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۲، به ارائه‌ی یک رویکرد نیمه‌خودکار برای تعریف و تولید فضاهای کاری موردنیاز فعالیت‌ها براساس روش ساخت تعیین‌شده برای آن‌ها و نیز شناسایی و اولویت‌بندی تداخل‌ها براساس یک چارچوب از پیش تعیین‌شده پرداخته شده است.[۳،۲۱و۲۲] در سال ۲۰۱۴، نیز یک رویکرد به منظور تولید فضای موردنیاز فعالیت‌ها و شناسایی و نمایش بصری تداخل‌های زمانی ـ فضایی از طریق شبیه‌سازی چهاربُعدی ارائه شده است.[۲۳] همچنین در سال ۲۰۱۵، یک چارچوب مدیریت فضاهای کاری در پروژه‌های ساختمانی، شامل تولید و تخصیص فضا و شناسایی و رفع تداخل‌های زمانی ـ فضایی ارائه شده است.[۶]

در پژوهش حاضر، یک سیستم «شناسایی دینامیکی تداخل‌های زمانی ـ فضایی و ارزیابی کمّی تأثیر آن‌ها مبتنی بر شبیه‌سازی چهاربُعدی» با هدف توسعه و بهبود روش‌های برنامه‌ریزی فضاهای کاری در پروژه‌های ساختمانی ارائه شده است. با درنظرگرفتن دو مورد از نقاط ضعف موجود در رویکردهای پیشنهادی در مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر در دو زمینه‌ی شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی و ارزیابی شدت آن‌ها، بهبودهایی صورت گرفته است. بر این اساس، به منظور شناسایی دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر تداخل‌ها، حرکت نیروی انسانی در فضای کاری تخصیص‌یافته به فعالیت‌ها با طراحی ۴ الگوی اجرایی مختلف و ۴ موقعیت شروع حرکت متفاوت شبیه‌سازی شده است. بنابراین، موقعیت دقیق و واقعی گروه‌های کاری تخصیص‌یافته به هر فعالیت در هر بازه‌ی زمانی، اجرای آن فعالیت مشخص شده است. همچنین نیاز به وجود سکوی پشتیبان از طریق یک الگوریتم درونی کاملاً خودکار و با توجه به موقعیت فضای نیروی انسانی در هر بازه از زمان بررسی و با تأیید نیاز مذکور، فضای اشغال‌شده تعریف شده است. متعاقباً از طریق یک مدل چهاربُعدی فضا ـ سوار[۶] که شامل ابعاد و موقعیت فضای نیروی انسانی و فضای اشغال‌شده توسط سکوی پشتیبان در هر روز است، تداخل‌های زمانی ـ فضایی شناسایی شدند. درنهایت شدت هر تداخل از طریق ارزیابی کمّی تأثیر آن در بهره‌وری نیروی انسانی فعالیت‌های متداخل و با استفاده از محاسبه‌ی میزان کاهش کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز نیروی انسانی هر فعالیت تعیین شده است.

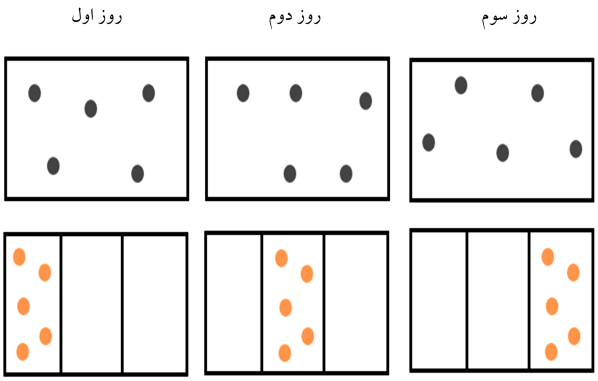
۲. توسعه‌ی سیستم شناسایی دینامیکی و ارزیابی کمّی تداخل مبتنی بر شبیه‌سازی چهاربُعدی

۱.۲. ارائه‌ی چارچوب انواع فضا

نخستین گام از فرایند برنامه‌ریزی فضاهای کاری، تعریف و تولید فضا یا فضاهای موردنیاز فعالیت‌هاست. بدین منظور، در ابتدا باید محدوده‌ی پژوهش درخصوص انواع فضای موردنظر مشخص شود. در مطالعات پیشین، دسته‌بندی‌های متفاوتی از انواع فضاهای موردنیاز در پروژه‌های ساختمانی ارائه شده است. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۰۲، انواع فضاهای موردنیاز در یک پروژه‌ی ساختمانی به ۳ دسته‌ی کلی فضاهای «بزرگ‌مقیاس»، «کوچک مقیاس» و «مسیر» تقسیم‌بندی شده‌اند. فضاهای بزرگ‌مقیاس، فضاهایی هستند که به‌صورت مستقیم برای اجرای فعالیت‌ها موردنیاز نیستند، بلکه به نوعی شرایط پشتیبانی از فعالیت‌های اصلی پروژه را فراهم می‌آورند. فضاهای مذکور، اغلب در طرح جانمایی کارگاه مورد توجه و برنامه‌ریزی قرار می‌گیرند. فضاهای کوچک‌مقیاس، فضاهایی هستند که به‌صورت مستقیم برای اجرای فعالیت‌ها موردنیاز هستند و معمولاً در مجاورت المان‌ها و اجزاء محصول نهایی پروژه قرار دارند.[۲۱و۲۴]

فضاهای مسیر نیز به منظور رفت و آمد نیروی انسانی و نقل و انتقال ماشین‌آلات و تجهیزات و مصالح ساختمانی موردنیاز هستند. عمده‌ی پژوهش‌ها در زمینه‌ی برنامه‌ریزی فضاهای کاری با استفاده از مدل‌های چهاربُعدی بر فضاهای کوچک‌مقیاس متمرکز هستند. فضای موردنیاز نیروی انسانی، فضای تجهیزات، فضای خطر، فضای اشغال‌شده توسط اجزاء محصول نهایی پروژه و فضای نگهداری مصالح پای‌کار از جمله انواع فضاهای کوچک‌مقیاس به شمار می‌روند.

در پژوهش حاضر، تأثیر تداخل‌های زمانی ـ فضایی در بهره‌وری نیروی انسانی مدنظر است. بدین منظور تمرکز اصلی بر فضای موردنیاز نیروی انسانی خواهد بود. از طرف دیگر، از آنجایی که در بسیاری از موارد فضای موردنیاز نیروی انسانی



شکل ۱. بالا: فضای نیروی انسانی از نوع ایستا؛ پایین: فضای نیروی انسانی پویا.

جدول ۱. طبقه‌بندی انواع تداخل براساس تأثیر ناشی از هر یک.

	فضای نیروی انسانی	فضای سکوی پشتیبان
فضای نیروی انسانی	تراکم/عدم ساخت‌پذیری	تراکم/عدم ساخت‌پذیری
فضای سکوی پشتیبان	تراکم/عدم ساخت‌پذیری	عدم ساخت‌پذیری

از طریق «سکوهای پشتیبان» فراهم می‌شود، فضای اشغال‌شده توسط آن‌ها نیز در سیستم پیشنهادی به‌صورت یک‌پارچه و هماهنگ با فضای نیروی انسانی شبیه‌سازی می‌شود. فضای موردنیاز نیروی انسانی براساس نوع منابع تخصیص‌یافته به فعالیت می‌تواند از نوع «پویا» و یا «ایستا» باشد (شکل ۱). در فضاهای کاری پویا، در هر بازه از زمان، یکی از زیربخش‌ها تحت تصرف و اشغال نیروی انسانی قرار خواهد داشت و براساس یک الگوی حرکتی معین، حرکت نیروی انسانی تا اتمام اجرای فعالیت ادامه خواهد یافت. در فضاهای کاری ایستا، تمامی فضای تخصیص‌یافته به نیروی انسانی در کل مدت زمان اجرای فعالیت موردنیاز خواهد بود.

۲.۲. طبقه‌بندی انواع تداخل

تداخل‌های زمانی ـ فضایی با توجه به اثری که در پی خواهند داشت، می‌توانند به انواع مختلفی طبقه‌بندی شوند. تعیین دقیق تأثیر تداخل‌ها به عوامل متعددی، نظیر: نوع فعالیت، منابع مورد استفاده، روش ساخت و حتی شرایط پروژه وابسته است. بنابراین ارائه‌ی یک چارچوب استاندارد و ثابت در این خصوص تا حد زیادی ناممکن است. در بسیاری از مطالعات پیشین، «تداخل طراحی»، «تراکم»، «آسیب»، «ساخت‌پذیری» به‌عنوان انواع تداخل‌های زمانی ـ فضایی ذکر شده است.[۵،۹،۲۲-۲۵،۲۶] در پژوهش حاضر، تداخل‌ها با توجه به نوع فعالیت‌های متداخل به دو دسته‌ی «تراکم» و «عدم ساخت‌پذیری» تقسیم شده‌اند. همان‌طورکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در اثر تداخل دو فضای نیروی انسانی، تداخل از نوع تراکم خواهد بود؛ چرا که در بخشی از فضا (فضای مشترک بین دو فعالیت) به دلیل افزایش تعداد نیروی انسانی، تراکم افزایش خواهد یافت. در صورتی که افزایش تراکم از حد معینی تجاوز کند، امکان اجرای هم‌زمان دو فعالیت وجود نخواهد داشت و مشکل عدم ساخت‌پذیری بروز خواهد کرد. در اثر تداخل فضای نیروی انسانی یک فعالیت با فضای اشغال‌شده توسط سکوی پشتیبان، بخشی از فضای در دسترس نیروی انسانی کاسته خواهد شد؛ بنابراین در بخش باقی‌مانده، تراکم افزایش خواهد یافت. در شرایط ذکرشده نیز مانند حالت قبل، در صورتی که افزایش تراکم از یک حد معین فراتر رود، تداخل از نوع «عدم ساخت‌پذیری» خواهد بود.

تداخل میان دو سکوی پشتیبان نیز از نوع «عدم ساخت‌پذیری» در نظرگرفته شده است.

۳.۲. ایجاد مدل چهاربُعدی

به منظور توسعه‌ی سیستم شناسایی و ارزیابی کمّی تداخل‌ها، ابتدا باید مدل چهاربُعدی پروژه از طریق اتصال برنامه‌ی زمان‌بندی به مدل سه‌بُعدی تولید شود. بدین منظور هر یک از فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی و المان‌های مدل سه‌بُعدی به‌صورت دو به دو و از طریق کد ساختار شکست کار هر فعالیت به یکدیگر متصل شدند. با ساخت مدل چهاربُعدی، برای هرکد ساختار شکست کار، پارامترهای زمانی شامل «تاریخ شروع»، «تاریخ پایان»، «نام فعالیت» و همچنین «تعداد نیروی انسانی» و «فضای کمینه‌ی سرانه» و پارامترهای فضایی شامل «نام المان»، «ابعاد المان» و «موقعیت المان» تعیین شدند.

۴.۲. تعریف و تولید فضای نیروی انسانی

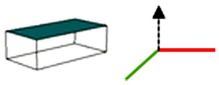
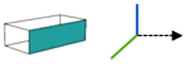
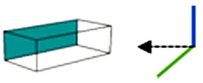
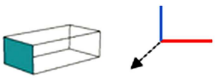
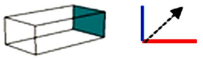
در رویکرد ارائه‌شده در پژوهش حاضر، بعد از ایجاد مدل چهاربُعدی، بر پایه‌ی ابعاد و موقعیت المان مرتبط با هر فعالیت و با استفاده از مفهوم «مکعب‌های احاطه‌گر راست‌گوشه (AABB)[۷]»، فضای نیروی انسانی تعریف و تولید شده است. براساس این مفهوم، فضای تخصیص‌یافته به هر فعالیت، مکعب مستطیل‌هایی هستند که در هر راستا با محورهای مختصات به‌صورت موازی قرار می‌گیرند. بنابراین، در روش مذکور، فضای نیروی انسانی مستقیماً به المان‌های مدل سه‌بُعدی تخصیص می‌یابد. به منظور تعریف فضای نیروی انسانی براساس ویژگی‌های المان، ۳ پارامتر «جهت‌گیری فضای نیروی انسانی»، «ضرایب اندازه شامل افست طول و عرض» و «مقدارگسترش عمود بر صفحه» طراحی و تعریف شده‌اند. جهت‌گیری، یک توصیف کیفی از موقعیت فضای نیروی انسانی نسبت به المان مرتبط است و در آن، موقعیت نسبی فضای نیروی انسانی نسبت به المان مربوط از طریق یکی از حالت‌های شش‌گانه‌ی جهت‌گیری انتخاب می‌شود (جدول ۲) ضرایب اندازه که افست طول (s_a) و افست عرض (s_b) هستند به ترتیب اندازه‌ی طول و عرض فضای نیروی انسانی را نسبت به ابعاد المان مرتبط تعیین می‌کنند. به عبارت دیگر، طول و عرض فضای نیروی انسانی به‌صورت نسبتی از طول و عرض المان تعریف می‌شوند، که از دو سو به یک میزان اعمال می‌شوند. همچنین مقدار گسترش (EV)، پارامتری است که برای هر یک از حالت‌های جهت‌گیری، عمق فضا را به میزان تعیین‌شده ایجاد می‌کند.

فضای نیروی انسانی زمانی تعریف می‌شود که ابعاد و موقعیت مطلق آن نسبت به نقطه‌ی صفر مدل مشخص شده باشد. لذا از طریق ابعاد و مختصات نقطه‌ی مبدأ المان و پارامترهای سه‌گانه‌ی فوق‌الذکر و محاسبه‌ی فواصل میان نقطه‌ی کمینه‌ی فضا و نقطه‌ی کمینه المان در راستای هر سه محور مختصات (ΔX، ΔY و ΔZ) و با استفاده از مکانیزم ماتریس انتقال، ابعاد و مختصات مطلق فضای نیروی انسانی تعیین شد (شکل ۲). ماتریس انتقال، روشی برای بیان کمّی رابطه‌ی موقعیتی میان دو شی گرافیکی است. در علوم کامپیوتر، از ماتریس انتقال به منظور تولید موقعیت مطلق یک شی از طریق یک‌سری توصیفات کیفی استفاده می‌شود.[۳،۲۷]

۵.۲. پویایی فضای نیروی انسانی

در بسیاری از موارد به منظور اجرای یک فعالیت، کل فضای تخصیص‌یافته به

جدول ۲. شش نوع جهت‌گیری ممکن برای تعیین موقعیت فضای نیروی انسانی نسبت به المان به همراه نمایش گرافیکی متناظر.

بالا	
پایین	
راست	
چپ	
جلو	
عقب	

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ ۱ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & R' & & \Delta_x^{(\cdot,S)} \\ & & & \Delta_y^{(\cdot,S)} \\ & & & \Delta_z^{(\cdot,S)} \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\cdot \\ Y_\cdot \\ Z_\cdot \\ ۱ \end{bmatrix} ; \quad R = \begin{bmatrix} ۱ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۱ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix}$$

$$\Delta x = -EV \qquad \Delta x = L$$

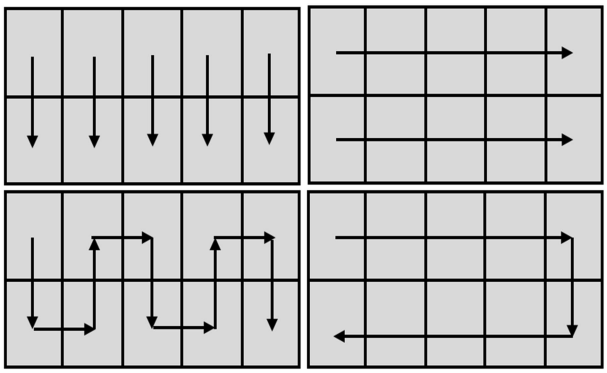
$$\Delta_y = Y_\cdot + \frac{-[(W * Sa) + L]}{۲} \qquad \Delta_y = Y_\cdot + \frac{-[(W * Sa) + L]}{۲}$$

$$\Delta_z = Z_\cdot + \frac{-[(H * Sb) + H]}{۲} \qquad \Delta_z = Z_\cdot + \frac{-[(H * Sb) + H]}{۲}$$

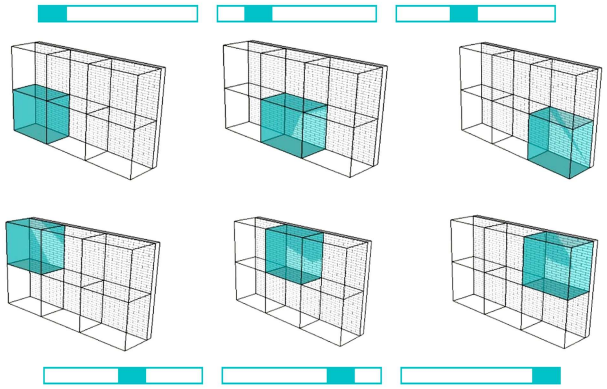
شکل ۲. مکانیزم ماتریس انتقال و روش محاسبه‌ی Δx، Δy، Δz برای جهت‌گیری‌های راست و چپ.

نیروی انسانی در کل مدت زمان اجرای فعالیت استفاده نخواهد شد. در شرایط ذکرشده، نیروی انسانی براساس یک الگوی حرکتی مشخص از یک بخش از فضا به بخش دیگر حرکت می‌کند و این الگو را تا زمان اتمام اجرای فعالیت ادامه می‌دهد.

به طور معمول نرخ تقاضای فضای یک فعالیت در طول مدت زمان اجرای آن ثابت نیست و به منابع تخصیص‌یافته به فعالیت وابسته است. با وجود این با درنظرگرفتن یک تقریب قابل قبول، می‌توان آهنگ تقاضای فضا برای نیروی انسانی فعالیت‌ها را ثابت در نظرگرفت.[۲۸] بنابراین در پژوهش حاضر، میزان کاری که در هر بازه از زمان (هر روز) توسط نیروی انسانی انجام می‌شود، مقدار ثابتی فرض شده است. از این روی، فضای اولیه‌ی نیروی انسانی تخصیص‌یافته به یک فعالیت در صورت پویا بودن، به زیر فضاهایی با ابعاد کاملاً یکسان تقسیم می‌شود. به منظور دست‌یابی به هدف مذکور، پارامترهایی طراحی و تعریف شده‌اند. «تعداد ستون‌ها



شکل ۳. الگوهای حرکتی ستونی، ردیفی، ستونی متوالی و ردیفی متوالی.



شکل ۴. شبیه‌سازی حرکت نیروی انسانی در دو بُعد.

(Cols)» بیانگر تعداد تقسیمات طولی و «تعداد ردیف‌ها (Rows)» بیانگر تعداد تقسیمات در راستای عرض صفحه هستند.

مطابق شکل ۳، چهار الگوی اجرایی «ستونی»، «ردیفی»، «ستونی متوالی» و «ردیفی متوالی» به منظور پیاده‌سازی مفهوم پویایی فضای نیروی انسانی طراحی شده است، که درکنار ۴ گزینه برای موقعیت شروع حرکت نیروی انسانی شامل «بالاچپ»، «بالاراست»، «پایین‌چپ»، و «پایین‌راست»، در مجموع ۱۶ گزینه‌ی اجرایی را ایجاد می‌کنند. حرکت نیروی انسانی در دو بُعد و با توجه به موقعیت نسبی فضای نیروی انسانی نسبت به المان، شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۴).

از طریق ۱۶ گزینه‌ی اجرایی مختلف، تعداد و شدت تداخل‌های زمانی ـ فضایی برای روش‌های ساخت متفاوت، قابل ارزیابی خواهد بود. از این روی، مدیر و یا برنامه‌ریز پروژه قادر خواهد بود تحلیل‌های «چه-اگر» را درخصوص برنامه‌ی زمان‌بندی و روش‌های اجرایی مختلف انجام دهد. از این طریق، سناریوی اجرایی بهینه که در آن تعداد و یا شدت تداخل‌ها نسبت به سایر گزینه‌ها کمتر است، انتخاب می‌شود.

۶.۲. فضای سکوی پشتیبان

در صورتی که ارتفاع بیشینه‌ی فضای نیروی انسانی نسبت به کف از حد معینی تجاوز کند، افراد به منظور اجرای فعالیت و دسترسی به ارتفاع موردنظر، به سکوی پشتیبان نیاز خواهند داشت. بنابراین، نیاز به وجود سکوی پشتیبان به موقعیت فضای نیروی انسانی وابسته است. در سیستم توسعه‌یافته در پژوهش حاضر، ارزیابی نیاز به سکوی پشتیبان و تولید فضای اشغال‌شده توسط آن به‌صورت کاملاً خودکار و با توجه به موقعیت فضای نیروی انسانی در هر بازه از زمان (روز) صورت گرفته است.

در صورتی که بیشینه‌ی ارتفاع فضای نیروی انسانی از ۲ متر بیشتر باشد، نیاز به وجود سکوی پشتیبان تأیید شده است.

۷.۲. شناسایی پویای تداخل‌های زمانی ـ فضایی

تداخل زمانی ـ فضایی زمانی رخ می‌دهد که فضای کاری دو یا تعداد بیشتری فعالیت موازی با یکدیگر تداخل فیزیکی داشته باشند. بنابراین، به منظور شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی، ابتدا باید فعالیت‌هایی که دارای هم‌پوشانی زمانی هستند، شناسایی شوند. بدین منظور در جدول زمانی پروژه، به ترتیب فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌شده در هر بازه از زمان (روز) مشخص می‌شوند و باید تمامی فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌شده که در یک روز، هم‌پوشانی زمانی دارند و نیز وجود یا عدم وجود تداخل فیزیکی بین فضاهای تخصیص‌یافته به آن‌ها بررسی شود. لذا در پژوهش حاضر، بر پایه‌ی یک الگوریتم شبیه‌سازی روزانه، تداخل فیزیکی بین فضاهای کاری فعالیت‌های فعال در هر روز و نیز تداخل‌ها با توجه به حرکت نیروی انسانی در فضا و در نتیجه، موقعیت فضای نیروی انسانی و فضای سکوی پشتیبان در هر روز شناسایی شدند. به منظور شناسایی تداخل‌های فیزیکی از آزمون تقاطع مکعب‌های احاطه‌کننده‌ی راست‌گوشه، استفاده شده است. در روش مذکور، به منظور بررسی وجود تداخل، در هر راستا دو شرط ارزیابی می‌شود. بنابراین، مطابق شکل ۵ به منظور تأیید وجود تداخل فیزیکی میان دو فضای سه‌بُعدی، در مجموع باید ۶ شرط بررسی شود. (در هر بعد دو شرط) در صورت تأیید مجموع ۶ شرط مذکور، وجود تداخل فیزیکی قطعی خواهد بود.

۸.۲. کمّی‌سازی تداخل

تداخل‌های زمانی ـ فضایی می‌توانند باعث کاهش بهره‌وری نیروی انسانی، بروز مشکل عدم ساخت‌پذیری، و مسائل ایمنی و کمبود کیفیت شوند[۱۲،۲۴و۲۸] به عبارت دیگر، تداخل‌های مذکور تأثیر منفی در عملکرد دارند. از آنجایی که هدف از برنامه‌ریزی فضای کاری، دست‌یابی به یک برنامه‌ی زمان‌بندی بهینه از منظر تداخل‌های زمانی -فضایی است، شاخص‌های دقیق و قابل اطمینانی جهت ارزیابی شدت تداخل، موردنیاز خواهد بود. در بیشتر مطالعات پیشین، نسبت میان ابعاد تداخل به ابعاد فضا به منظور مقایسه‌ی شدت تداخل‌ها استفاده شده است. بخش قابل توجهی از تأثیر تداخل‌ها، در سطح عملیاتی آشکار می‌شود. از آنجایی که بهره‌وری نیروی انسانی یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد کلی پروژه‌های ساختمانی است،[۲۹] در رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، مقایسه‌ی شدت تداخل‌ها از طریق کمّی‌سازی تأثیر آن‌ها در بهره‌وری نیروی انسانی انجام شده است. بدین منظور، «تراکم» به‌عنوان شاخص عملیاتی استفاده شد. بنابراین در پژوهش حاضر، مقایسه‌ی شدت تداخل‌ها از طریق هر دو شاخص: ۱. نسبت مساحت تداخل به مساحت فضای هر فعالیت و ۲. تراکم نیروی انسانی انجام شده است. کاهش در فضای سرانه‌ی موردنیاز منجر به کاهش بهره‌وری نیروی انسانی می‌شود.[۳۰-۳۲] لذا در پژوهش حاضر، تراکم نیروی انسانی پس از بروز تداخل به‌عنوان شاخصی مناسب جهت ارزیابی تأثیر تداخل در بهره‌وری نیروی انسانی و مقایسه‌ی تداخل‌ها از نقطه‌نظر میزان بحرانی بودن آن‌ها محاسبه شده است. کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز نیروی انسانی برای اجرای یک فعالیت، متناظر با بهره‌وری پایه در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که در اثر بروز تداخل، فضای سرانه‌ی در دسترس (A) برای هر فعالیت از کمینه‌ی فضای سرانه‌ی مورد نیاز (R) همان فعالیت کمتر شود، بهره‌وری نیروی انسانی کاهش خواهد یافت. ارقام متفاوتی درخصوص کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز برای اجرای فعالیت‌های ساختمانی با بهره‌وری کامل ذکر شده است.[۳۰،۳۳-۳۵] بنابراین، درنظر گرفتن یک مقدار معین و ثابت برای تمامی فعالیت‌های ساختمانی امری ناممکن است. در نتیجه در پژوهش حاضر، کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز نیروی انسانی هر فعالیت به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است، که باید توسط کاربر و بر پایه‌ی تجربه و تخصص وی تعیین شود. مطابق شکل ۶، ابعاد تداخل میان فضاهای دو فعالیت با استفاده از روابط استنتاج‌شده از مفهوم آزمون تقاطع محاسبه می‌شود.

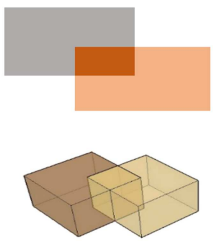
همان‌گونه که بیان شده است، تداخل میان دو فضای کاری باعث افزایش تراکم نیروی انسانی در هر دو فضا خواهد شد. این افزایش تراکم از طریق نسبت میان فضای سرانه‌ی در دسترس و کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز به صورت جداگانه برای هر فعالیت محاسبه می‌شود. در این راستا فرض می‌شود که نیروی انسانی تخصیص‌یافته به یک فعالیت به‌صورت یکنواخت در فضا پراکنده هستند. از طریق رابطه‌ی ۱، تعداد نیروی انسانی در فضای هر یک از فعالیت‌ها پس از بروز تداخل محاسبه می‌شود. در هر تداخل زمانی ـ فضایی، «فعالیت پایه» فعالیتی است که تأثیر تداخل در آن محاسبه می‌شود و فعالیت دیگر، «فعالیت متداخل» خواهد بود.

$$H_{ij} = H_i + \{(area_j + area_i) \times H_j \times (\frac{R_j}{R_i})\} \qquad (۱)$$

که در آن، تعداد نیروی انسانی فعالیت پایه با بخشی از تعداد نیروی انسانی فعالیت متداخل (با توجه به نسبت مساحت تداخل و مساحت فضای این فعالیت) جمع می‌شود. از آنجایی که کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز دو فعالیت می‌توانند اعداد غیریکسانی باشند، نسبت میان آن‌ها در رابطه‌ی مذکور تأثیر داده شده است (شکل ۷).

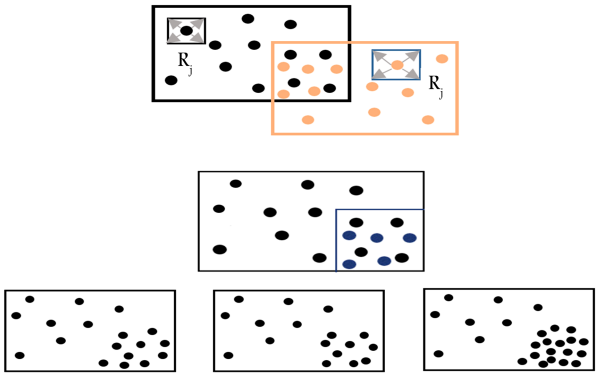
۱. $Xmin(A) + L(A) > Xmin(B)$
۲. $Xmin(A) < Xmin(B) + L(B)$
۳. $Ymin(A) + W(A) > Ymin(B)$
۴. $Ymin(A) < Ymin(B) + W(B)$

شکل ۵. شرایط وجود تداخل فیزیکی میان دو فضای کاری.



$$X(M) = |Min\{Xmax(A), Xmax(B)\} - Max\{Xmin(A), Xmin(B)\}|$$
$$Y(M) = |Min\{Ymax(A), Ymax(B)\} - Max\{Ymin(A), Ymin(B)\}|$$
$$Z(M) = |Min\{Zmax(A), Zmax(B)\} - Max\{Zmin(A), Zmin(B)\}|$$

شکل ۶. روابط محاسبه‌ی ابعاد تداخل.



شکل ۷. آثار متفاوت نسبت‌های مختلف میان کمینه‌ی فضای سرانه بر فعالیت پایه.

به عبارت دیگر، کمینه‌ی فضای سرانه‌ی فعالیت متداخل بر مبنای کمینه‌ی فضای سرانه‌ی فعالیت پایه در رابطه وارد می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نسبت‌های متفاوت میان کمینه‌ی فضای سرانه‌ی دو فعالیت می‌تواند آثار متفاوتی در تراکم فعالیت پایه داشته باشد. همچنین فضای سرانه‌ی در دسترس نیروی انسانی فعالیت پایه بعد از بروز تداخل محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۲). در شرایطی که فضای در دسترس از فضای موردنیاز کمتر باشد، کاهش فضای سرانه‌ی موردنیاز (RSD) برای فعالیت پایه از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود و در غیر این‌صورت میزان کاهش برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، کاهش بیش از ۵۰٪ در فضای سرانه به‌عنوان مشکل عدم ساخت‌پذیری گزارش می‌شود. در این شرایط امکان اجرای دو فعالیت به‌صورت هم‌زمان وجود نخواهد داشت.

$$A_{ij} = \frac{area_i}{H_{ij}} \qquad (۲)$$

$$RSD_i = \{۱ - (\frac{A_{ij}}{R_i})\} \qquad (۳)$$

که در آن‌ها: H_{ij}: تعداد نیروی انسانی فعالیت پایه بعد از تداخل، H_i و H_j: به ترتیب تعداد نیروی انسانی فعالیت پایه و متداخل، $area$: مساحت فضای نیروی انسانی، R_i و R_j: به ترتیب کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز برای فعالیت‌های پایه و متداخل، A_{ij}: فضای سرانه‌ی در دسترس فعالیت پایه پس از تداخل، RSD_i: کاهش کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز فعالیت پایه.

در شرایطی که تداخل میان فضای نیروی انسانی یک فعالیت با فضای اشغال‌شده توسط سکوی پشتیبان شناسایی شود، مساحت ناحیه‌ی تداخل از مساحت فضای نیروی انسانی کسر می‌شود (رابطه‌ی ۴). سپس فضای سرانه‌ی در دسترس، بعد از بروز تداخل محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۵)؛ و در صورتی که از کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز کمتر باشد، میزان کاهش فضای سرانه از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$area'_i = area_i - area_{ij} \qquad (۴)$$

$$A_{ij} = \frac{area'_i}{H_i} \qquad (۵)$$

$area'_i$: مساحت فضای نیروی انسانی فعالیت پایه بعد از بروز تداخل.

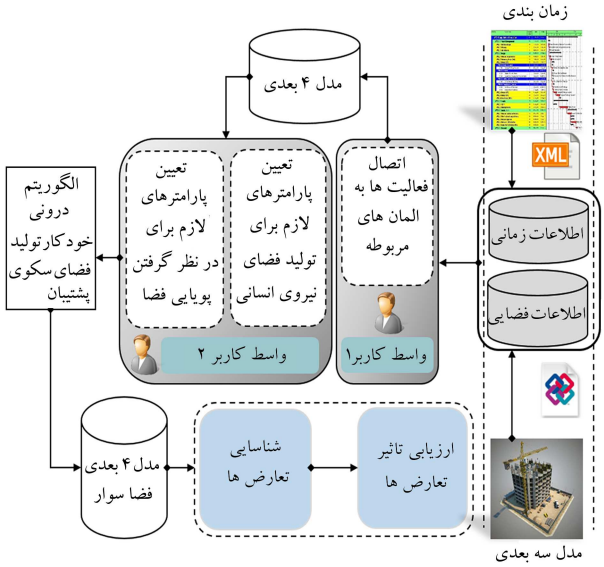
در پژوهش حاضر، نسبت میان کاهش فضای سرانه‌ی در دسترس و کاهش بهره‌وری نیروی انسانی یک فعالیت، یک رابطه‌ی خطی فرض شده است. تداخل میان دو سکوی پشتیبان، منجر به بروز مشکل عدم ساخت‌پذیری برای هر دو فعالیت درگیر در تداخل می‌شود.

۳. معماری سیستم

تمامی ماژول‌های سیستم شناسایی دینامیکی و ارزیابی کمّی تأثیر تداخل‌های زمانی ـ فضایی که در پژوهش حاضر ارائه شده است، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی $C\#$ در چارچوب NET و در محیط Visual studio پیاده‌سازی شده است.

مطابق با شکل ۸، ابتدا اطلاعات زمان‌بندی پروژه شامل تاریخ‌های شروع و پایان، کد ساختار شکست کار (WBS) و نام فعالیت‌ها به همراه تعداد نیروی انسانی تخصیص‌یافته و کمینه‌ی فضای سرانه‌ی موردنیاز برای هر فعالیت، تحت فرمت XML. از نرم‌افزار Office Project (MSP) و اطلاعات فضایی فعالیت‌ها شامل ابعاد و موقعیت المان‌ها از طریق فرمت IFC. از نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بُعدی استخراج شده‌اند. استفاده از فرمت IFC. به عنوان مدل‌های اطلاعاتی آزاد برای تبادل انواع داده‌های موردنیاز در صنعت ساختمان، که امکان تبادل داده میان نرم افزارهای مختلف مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) را فراهم کرده است، انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی را در راستای طراحی مدل سه‌بُعدی در تمامی نرم‌افزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان ایجاد می‌کند.

بعد از استخراج اطلاعات زمانی و فضایی پروژه، از طریق یک واسط کاربر که امکان اتصال دوبه‌دوی فعالیت‌ها و المان‌ها را فراهم می‌کند، مدل چهاربُعدی پروژه ساخته خواهد شد. در مدل مذکور، کد ساختار شکست کار (WBS)، نقش یک مرکز اطلاعاتی جهت اتصال انواع داده‌های موجود را ایفا می‌کند. اطلاعات مدل چهاربُعدی به منظور تولید یک مدل چهاربُعدی فضا ـ سوار استفاده خواهد شد. بدین منظور، ابتدا از طریق یک واسط کاربر، پارامترهای مربوط به تعریف و تولید فضای نیروی انسانی توسط کاربر وارد می‌شوند. سپس به منظور ایجاد قابلیت شناسایی دینامیکی تداخل‌های زمانی ـ فضایی، پارامترهای پویایی فضای نیروی انسانی شامل تعداد ستون‌ها و ردیف‌ها، الگوی حرکتی و موقعیت شروع حرکت توسط کاربر تعیین می‌شوند. بعد از آن، سیستم به‌صورت خودکار و از طریق یک الگوریتم درونی و با توجه به موقعیت فضای نیروی انسانی در هر روز، نیاز به وجود سکوی پشتیبان را بررسی و در صورت تأیید آن، فضای مربوط را تعریف و تولید



شکل ۸. معماری سیستم شناسایی دینامیکی و ارزیابی کمّی تأثیر تداخل‌های زمانی ـ فضایی.

می‌کند. در مرحله‌ی کنونی، یک مدل چهاربُعدی فضا ـ سوار تولید می‌شود که شامل اطلاعات زمانی و هندسی فضای نیروی انسانی و سکوی پشتیبان هر فعالیت در هر بازه از زمان (روز) است. در ساختار مذکور، ابعاد و موقعیت فضای نیروی انسانی و فضای اشغال‌شده توسط سکوی پشتیبان (در صورت وجود) هر فعالیت به همراه نام، تاریخ شروع و پایان آن، در یک غالب یک‌پارچه قرار می‌گیرند. در مرحله‌یی از این ساختار به منظور شبیه‌سازی چهاربُعدی فضاهای کاری و شناسایی دینامیکی، تداخل‌های زمانی ـ فضایی استفاده می‌شود. همچنین شدت هر تداخل شناسایی به‌صورت کمّی و از طریق اندازه‌گیری کاهش کمینه‌ی فضای سرانه‌ی نیروی انسانی فعالیت‌های درگیر در آن تداخل و متعاقباً میزان افت بهره‌وری نیروی انسانی آن‌ها تعیین می‌شود.

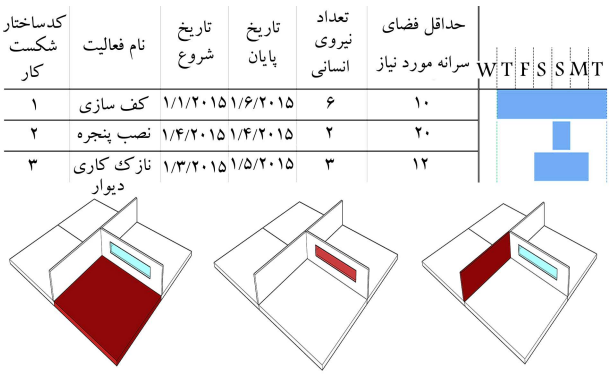
۴. ارزیابی عملکرد سیستم

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم شناسایی دینامیکی تداخل‌های زمانی ـ فضایی و ارزیابی کمّی تأثیر آن‌ها، از یک برنامه‌ی زمان‌بندی شامل سه فعالیت کف‌سازی، نازک‌کاری دیوار و نصب پنجره و مدل سه‌بُعدی مرتبط با آن، شامل سه المان: کف، دیوار و پنجره استفاده شده است (شکل ۹).

با اتصال دوبه‌دوی فعالیت‌ها به المان‌های سه‌بُعدی مرتبط با آن‌ها، یک مدل اطلاعاتی چهاربُعدی تولید خواهد شد. به منظور تولید فضای موردنیاز نیروی انسانی، پارامترهای جهت‌گیری، ضرایب اندازه و میزان گسترش برای هر سه فعالیت به ترتیب نمایش داده‌شده در جدول ۳ وارد شده‌اند. همچنین به منظور درنظرگرفتن ویژگی پویایی فضای نیروی انسانی، پارامترهای مربوط شامل الگوی حرکتی، تعداد ستون‌ها، ردیف‌ها و موقعیت شروع حرکت برای هر ۳ فعالیت تعیین شده‌اند.

الگوی حرکتی فعالیت نصب پنجره از نوع استاتیک در نظر گرفته شده است، چراکه نیروی انسانی برای اجرای فعالیت مذکور در مدت زمان یک روز، کل فضای تخصیص‌یافته را نیاز خواهد داشت. مدت زمان اجرای فعالیت کف‌سازی، ۶ روز برنامه‌ریزی و فضای نیروی انسانی فعالیت مذکور نیز به ۶ بخش یکسان تقسیم شد

کدساختار شکست کار	نام فعالیت	تاریخ شروع	تاریخ پایان	تعداد نیروی انسانی	حداقل فضای سرانه مورد نیاز
۱	کف سازی	۱/۱/۲۰۱۵	۱/۶/۲۰۱۵	۶	۱۰
۲	نصب پنجره	۱/۴/۲۰۱۵	۱/۴/۲۰۱۵	۲	۲۰
۳	نازک کاری دیوار	۱/۳/۲۰۱۵	۱/۵/۲۰۱۵	۳	۱۲



شکل ۹. برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل سه‌بُعدی متناظر با آن.

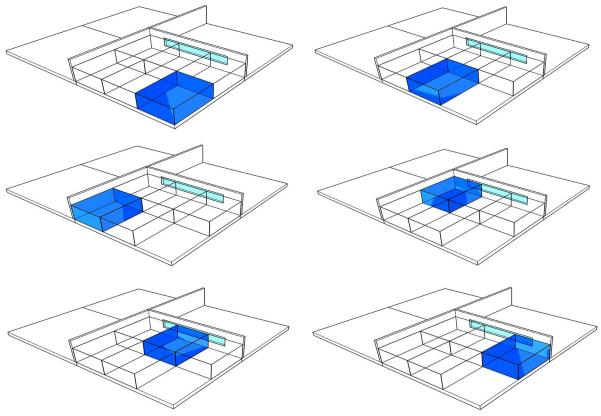
جدول ۳. پارامترهای تعریف فضای نیروی انسانی.

WBS code	جهت‌گیری	S_a	S_b	EV
۱	بالا	۱	۱	۲
۲	عقب	۱	۱	۲
۳	راست	۱	۱	۳

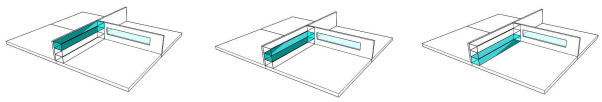
(۳ ستون و ۲ ردیف). در هر روز از مدت زمان اجرای فعالیت کف‌سازی، یکی از ۶ بخش تحت تصرف نیروی انسانی قرارگرفت و الگوی حرکتی فعالیت کف‌سازی از نوع «ردیفی» و موقعیت شروع حرکت برای آن «پایین‌راست» در نظر گرفته شد (شکل ۱۰). فضای نیروی انسانی فعالیت نازک‌کاری دیوار نیز به ۳ بخش یکسان تقسیم شد (۱ ستون و ۳ ردیف). الگوی حرکتی فعالیت مذکور از نوع «ستونی» و موقعیت شروع حرکت آن «بالاچپ» تعیین شده است (شکل ۱۱). با توجه به اینکه فضای فعالیت نازک‌کاری فقط شامل ۱ ستون می‌شود، موقعیت شروع حرکت «بالاچپ» و در این حالت «بالا» تفسیر شده است.

با تعیین موقعیت و ابعاد روزانه‌ی فضای نیروی انسانی هر فعالیت با توجه به ویژگی پویایی فضا، در مرحله‌ی بعد نیاز به وجود سکوی پشتیبان به‌صورت خودکار و بدون دخالت کاربر ارزیابی شده است. بدین منظور، در هر روز از مدت زمان اجرای یک فعالیت، ارتفاع بیشینه‌ی فضای نیروی انسانی نسبت به کف تعیین شد. در فعالیت کف‌سازی، ارتفاع بیشینه‌ی فضای نیروی انسانی در تمامی روزها ثابت و برابر با ۲ متر بود، بنابراین در تمامی مدت زمان اجرای فعالیت کف‌سازی، نیاز به وجود سکوی پشتیبان رد شد. ارتفاع بیشینه‌ی فضای نیروی انسانی فعالیت نازک‌کاری دیوار در روز اول از اجرای آن و نیز ارتفاع بیشینه‌ی فضای نیروی انسانی فعالیت نصب پنجره، از دو متر تجاوز می‌کرد. بنابراین نیاز به وجود سکوی پشتیبان در دو حالت مذکور تأیید و فضای آن تعریف و تولید شد. با تعریف فضای نیروی انسانی و فضای اشغال‌شده توسط سکوی پشتیبان برای هر فعالیت و در هر روز از مدت زمان اجرای آن، یک مدل چهاربُعدی فضا ـ سوار تولید شد که به منظور شبیه‌سازی دینامیکی فضاهای کاری و شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی استفاده شده است. بر این اساس، سیستم به صورت خودکار در هر روز تداخل‌های زمانی ـ فضایی را شناسایی و شدت هر یک را بر فعالیت‌های متداخل از طریق محاسبه‌ی کاهش فضای سرانه و افت بهره‌وری نیروی انسانی، به‌صورت کمّی اندازه‌گیری می‌کرد.

شکل ۱۲، نشان‌دهنده‌ی خروجی سیستم «شناسایی دینامیکی و ارزیابی کمّی

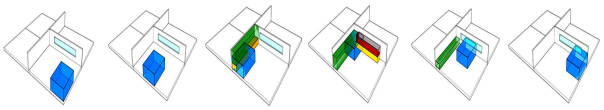


شکل ۱۰. الگوی حرکتی فعالیت کف‌سازی از نوع «ردیفی» و موقعیت شروع حرکت «پایین‌راست» در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱. الگوی حرکت «ستونی» و موقعیت شروع حرکت «بالا» برای فعالیت نازک‌کاری دیوار.

مشکل عدم ساخت‌پذیری	کاهش بهره وری	نوع تداخل	مختصات تداخل (m)			ابعاد تداخل (m)			کد ساختار شکست کار	شماره تداخل	تاریخ
			Z	Y	X	ارتفاع	عرض	طول			
yes	۰/۹۱۷ ۰	EH	۰	۳/۲۴	۱۶	۱	۵	۳	۱ ۳	۱	۱/۳/۲۰۱۵
yes	۰/۷۳۳ ۰	EH	۰	۱۱/۲۴	۱۸	۰/۲	۲	۲	۱ ۲	۲	
yes	۰/۷۴۴ ۰/۶۳	HH	۰	۸/۲۴	۱۶	۱/۵	۵	۳	۱ ۳	۳	۱/۴/۲۰۱۵
no	۰ ۰/۲۲۲	HH	۰	۱۱/۲۴	۱۸	۰/۲	۲	۱	۲ ۳	۴	



شکل ۱۲. جدول خروجی سیستم «شناسایی دینامیکی تداخل فضاهای کاری و ارزیابی کمّی تأثیر آن‌ها» به همراه نمایش گرافیکی تداخل‌های شناسایی شده در هر روز.

تأثیر تداخل‌های زمانی ـ فضایی» و نمایش گرافیکی تداخل‌های شناسایی‌شده است. بر این اساس در روز سوم، تداخل میان فضای نیروی انسانی فعالیت کف‌سازی با فضای نیروی انسانی و فضای سکوی پشتیبان فعالیت نازک‌کاری دیوار شناسایی شد. در این حالت به دلیل وجود تداخل میان فضای نیروی انسانی و سکوی پشتیبان، تداخل میان فضای نیروی انسانی دو فعالیت بی‌معنا بود. همچنین در روز چهارم، سه تداخل میان فعالیت کف‌سازی و نصب پنجره، کف‌سازی و نازک‌کاری دیوار، و نصب پنجره و نازک‌کاری دیوار شناسایی شد. ابعاد، موقعیت و نوع هر تداخل به همراه کد ساختار شکست کار فعالیت‌های متداخل و همچنین درصد کاهش بهره‌وری نیروی انسانی هر فعالیت و مشکل عدم ساخت‌پذیری در جدول خروجی سیستم گزارش شد. در اثر تداخل شماره‌ی یک که در روز سوم میان فضای نیروی انسانی فعالیت کف‌سازی و فضای سکوی پشتیبان فعالیت نازک‌کاری شناسایی شده است، افت بهره‌وری نیروی انسانی فعالیت کف‌سازی، ۹۱٪ محاسبه شده است که به‌معنای بروز مشکل عدم ساخت‌پذیری است. به عبارت دیگر، در روز سوم، امکان اجرای هم‌زمان دو فعالیت کف‌سازی و نازک‌کاری دیوار وجود ندارد. تداخل شماره‌ی دو در روز چهارم، میان فضای نیروی انسانی فعالیت کف‌سازی و سکوی پشتیبان فعالیت نصب پنجره شناسایی شد. در اثر تداخل مذکور، ۷۳٪ از بهره‌وری نیروی انسانی فعالیت نازک‌کاری دیوارکاهش یافت و در نتیجه، مشکل عدم ساخت‌پذیری باز هم بروزکرد. تداخل شماره‌ی سه در روز چهارم، میان فضای نیروی انسانی فعالیت‌های کف‌سازی و نازک‌کاری دیوار شناسایی شد که در اثر آن، فعالیت کف‌سازی به میزان ۷۴٪ و فعالیت نازک‌کاری به میزان ۶۳٪ با کاهش بهره‌وری نیروی انسانی مواجه بود. این تداخل نیز باعث بروز مشکل عدم ساخت‌پذیری برای هر دو فعالیت شده است. آخرین تداخل نیز در روز چهارم میان فضای نیروی انسانی فعالیت نازک‌کاری دیوار و سکوی پشتیبان فعالیت نصب پنجره شناسایی شد که در اثر آن، بهره‌وری نیروی انسانی فعالیت نازک‌کاری دیوار به میزان ۲۲٪ کاهش یافت.

همان‌طور که مشخص است، در صورتی که در یک تداخل، یکی از فعالیت‌ها با کاهش بهره‌وری بیش از ۵۰٪ مواجه شود، مشکل عدم ساخت‌پذیری برای هر دو فعالیت درگیر در تداخل در نظر گرفته می‌شود. در تداخل فضای نیروی انسانی و سکوی پشتیبان، در صورتی که کاهش بهره‌وری نیروی انسانی از ۵۰٪ کمتر باشد، فعالیت دیگر تحت هیچ‌گونه تأثیری ناشی از تداخل قرار نخواهد گرفت.

۵. نتیجه‌گیری

به منظور توسعه و بهبود روش‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین در زمینه‌ی برنامه‌ریزی و مدیریت فضاهای کاری در پروژه‌های ساختمانی به ویژه با استفاده از مدل‌سازی چهاربُعدی اطلاعات ساختمان، در پژوهش حاضر در دو زمینه‌ی شناسایی و تعیین شدت تداخل‌های زمانی ـ فضایی بهبودهایی ایجاد شده است. علی‌رغم پیشرفت‌های چشم‌گیر در مطالعات صورت‌گرفته به ویژه در سال‌های اخیر، محدودیت‌هایی در زمینه‌ی شناسایی تداخل‌ها و ارزیابی شدت تأثیر آن‌ها وجود دارد. در زمینه‌ی شناسایی تداخل‌ها در بیشتر مطالعات پیشین، حرکت منابع در فضا و به عبارت دیگر ویژگی پویایی فضاهای کاری نادیده گرفته شده است. در این شرایط فرض می‌شود که کل فضای تخصیص‌یافته به منابع یک فعالیت در کل مدت زمان اجرای فعالیت به‌صورت یکنواخت تحت تصرف خواهد بود. در صورتی که در بسیاری از موارد، منابعی مانند نیروی انسانی در هر بازه‌ی زمانی از اجرای فعالیت در یک بخش از کل فضای موردنیاز مشغول به کار خواهند بود و براساس یک الگوی حرکتی از پیش تعیین‌شده از یک بخش به بخش دیگر حرکت می‌کنند تا زمانی که اجرای فعالیت تکمیل شود. با صرف‌نظرکردن از این ویژگی مهم در بسیاری از موارد تداخل‌هایی شناسایی می‌شوند که در واقعیت رخ نخواهند داد. به عبارت دیگر، نادیده گرفتن حرکت منابع در فضا باعث شناسایی تداخل‌های غیرواقعی می‌شود و فرایند شناسایی تداخل‌های زمانی ـ فضایی را تا حد زیادی نامعتبر می‌سازد. بنابراین در رویکرد ارائه‌شده در پژوهش حاضر، حرکت نیروی انسانی در فضا با توسعه‌ی ۴ الگوی حرکتی و پارامترهای دیگری نظیر تعداد تقسیمات طولی و عرضی و موقعیت شروع حرکت شبیه‌سازی شده است. از این طریق با شناسایی پویای تداخل‌ها، نتایج قابل اطمینان‌تری حاصل می‌شود.

از طرف دیگر، در روش‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین، به منظور ارزیابی شدت تداخل‌ها به شاخص‌هایی نظیر نسبت حجم یا مساحت تداخل به حجم یا مساحت فضای فعالیت‌ها و یا نسبت میان مدت زمان تداخل به مدت زمان فعالیت‌ها اکتفا شده است. چنین شاخص‌هایی تأثیر تداخل‌های زمانی ـ فضایی در عملکرد پروژه را نادیده می‌گیرند و در نتیجه معیارهای مناسب و قابل اطمینانی جهت الویت‌بندی و مقایسه میان تداخل‌های شناسایی‌شده نخواهند بود. در رویکرد ارائه‌شده در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی شدت تداخل‌های زمانی ـ فضایی شناسایی‌شده، علاوه بر مساحت و ابعاد تداخل، افزایش تراکم نیروی انسانی بعد از بروز تداخل به‌صورت کمّی محاسبه می‌شود و مبنایی برای اندازه‌گیری کاهش بهره‌وری نیروی انسانی و در نتیجه مقایسه و الویت‌بندی تداخل‌ها قرار داده می‌شود.

پانوشت‌ها

1. time-space conflicts
2. time overlap
3. physical interference
4. fast tracking
5. crashing

6. space-loaded 4D model
7. axis aligned bounding box

منابع (References)

1. Su,X. and Cai, H. "Life cycle approach to construction workspace modeling and planning", *Journal of Construction Engineering and Management*, **140**(7), pp.1-12 (2014).
2. Chavada, R., Dawood, N. and Kassem, M. "Construction workspace management: The development and application of a novel nD planning approach and tool", *Journal of Information Technology in Construction*, **17**, pp. 213-236 (2012).
3. Akinci, B., Fischer, M. and Kunz, J. "Automated generation of work spaces required by construction activities", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(4), pp. 306-315 (2002).
4. Guo, S.J. "Identification and resolution of work space conflicts in building construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(4), pp. 287-295 (2002).
5. Wu, I. and Chiu, Y. "4D workspace conflict detection and analysis system", *Proceedings of the 10^{th} International Conference on Construction Applications of Virtual Reality* (2010).
6. Kassem, M., Dawood, N. and Chavada, R. "Construction workspace management within an Industry Foundation Class-Compliant 4D tool", *Automation in Construction*, **52**, pp. 42-58 (2015).
7. Mallasi, Z. "Identification and visualization of construction activities' workspace conflicts utilizing 4D CAD/VR tools", *Proceedings of the 1^{st} ASCAAD International Conference e-Design in Architecture*, pp. 235-253 (2004).
8. Kaming, P.F., Holt, G.D., Kometa, S.T. and Olomolaiye, P.O. "Severity diagnosis of productivity problems-A reliability analysis", *International Journal of Project Management*, **6**(6), pp. 107-113 (1998).
9. Dawood, N. and Mallasi, Z. "Construction workspace planning: assignment and analysis utilizing 4D visualization technologies", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**(7), pp. 498-513 (2006).
10. Hanna, A.S., Chang, C.K., 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).
11. Jarkas, A.M. "Buildability factors influencing concreting labor productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **138**(1), pp. 89-97 (2012).
12. Moon, H., Kim, H., Kim, C. and Kang, L. "Development of a schedule-workspace interference management system simultaneously considering the overlap level of parallel schedules and workspaces", *Automation in Construction*, **39**, pp. 93-105 (2013).
13. Gunduz, M. "A quantitative approach for evaluation of negative impact of overmanning on electrical and mechanical projects", *Building and Environment*, **39**(5), pp. 581-587 (2003).
14. Koo, B. and Fischer, M. "Feasibility study of 4D CAD in commercial construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **126**(4), pp. 251-260 (2000).
15. Thabet, W.Y. and Beliveau, Y.J. "A model to quantify work space availability for space constrained scheduling within a CAD environment", *Proceedings of the 5^{th} Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 110-116 (1993).
16. Riley, D.R. and Sanvido, V.E. "Patterns of construction-space use in multistory buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, **121**(4), pp. 464-473 (1995).
17. McKinney-Liston, K., Fischer, M. and Kunz, J. "4D annotator: A visual decision support tool for construction planners", *Computing in Civil Engineering*, , pp. 330-341 (1998).
18. Wang, H.J., Zhang, J.P., Chau, K.W. and Anson, M. "4D dynamic management for construction planning and resource utilization", *Automation in Construction*, **13**(5), pp. 575-589 (2004).
19. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and et al. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2^{nd} Ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons (2011).
20. Ma, Z., Shen, Q. and Zhang, J. "Application of 4D for dynamic site layout and management of construction projects", *Automation in Construction*, **14**(3), pp. 369-381 (2005).
21. Akinci, B., Fischer, M., Kunz, J. and et al. "Representing work spaces generically in construction method models", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(4), pp. 296-305 (2002).
22. Akinci, B., Fischer, M., Levitt, R. and Carlson, R. "Formalization and automation of time-space conflict analysis", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **16**(2), pp. 124-134 (2002).
23. Moon, H., Dawood, N. and Kang, L. "Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule", *Advanced Engineering Informatics*, **28**(1), pp. 50-65 (2014).
24. Choi, B., Lee, H., Park, M. and et al. "Framework for Work-Space planning using four-dimensional BIM in Construction Projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, **140**(9) (2014).
25. Riley, D.R. and Sanvido, V.E. "Space planning method for multistory building construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **123**(2), pp. 171-180 (1997).
26. Chua, D., Yeoh, K. and Song, Y. "Quantification of spatial temporal congestion in four-dimensional computer-aided design", *Journal of Construction Engineering and Management*, **136**(6), pp. 641-649 (2010).
27. Claus, B., Eyferth, K., Gips, C. and et al. "Reference space for spatial inference in text understanding", Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge, pp. 241-266 (1998).

28. Thabet, W.Y. and Beliveau, Y.J. "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory building", *Journal of Construction Engineering and Management*, **120**(1), pp. 96-115 (1994).

29. Klanac, G.P. and Nelson, E.L. "Trends in construction lost productivity claims", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, **130**(3), pp. 226-236 (2004).

30. Kaming, P.F., Olomolaiye, P.O., Holt,G.D. and et al. "Factors influencing craftsmen's productivity in Indonesia", *International Journal of Project Management*, **15**(1), pp. 21-30 (1997).

31. Mallasi, Z. and Dawood, N. "Assessing space criticality in sequencing and identifying execution patterns for construction activities using VR visualisations", ARCOM Doctoral Research Workshop: Simulation and Modelling in Construction, pp. 22-27 (2001).

32. Sanders, S.R. and Thomas, H.R. "Factors affecting masonry-labor productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, **117**(4), pp. 626-644 (1991).

33. Thomas, H.R. and Riley, D.R. "Fundamental principles for avoiding congested work areas-A case study", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **11**(4), pp. 197-205 (2006).

34. Smith, D.M. "An investigation of the space constraint problem in construction planning", Major Paper, MS, Virginia Polytechnic Institute and State University (1987).

35. 35. Winch, G. and North, S. "Critical space analysis", *Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(5), pp. 473-481 (2006).