مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۷-۵۰

Original Article

برنامه‌ریزی فضاهای اجرای کار منابع ساخت در سطح خرد با استفاده از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت بیم (BIM)

محمد روحانی (دکتری)
عبدالحسین حداد* (دانشیار)
غلامعلی شفابخش (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

برنامه‌ریزی فعالیت‌ها فقط بر مبنای زمان و هزینه و بدون درنظرگرفتن فضاهای موردنیاز اجرای کار، منجر به تداخل فضای کار منابع ساخت، کاهش بهره‌وری و در نتیجه انحراف از برنامه‌ی پیش‌بینی شده می‌شود. در این راستا، برنامه‌ریزی چندبعدی فضاهای اجرای کار در بستر فناوری اطلاعات ساختمان و قبل از شروع عملیات ساخت، درک کامل‌تری از شرایط مذکور را فراهم می‌آورد. پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک مدل پنج‌بعدی از فضاهای موردنیاز، تعداد و اندازه‌ی تداخلات بین آن‌ها را بر مبنای زمان شبیه‌سازی می‌کند. فرایند پژوهش در سه مرحله‌ی: ۱. تولید مدل اولیه (اطلاعات زمانی و هزینه‌یی فعالیت‌ها)، ۲. تعریف و تخصیص فضاهای کاری فعالیت‌های ساخت ۳. شبیه‌سازی تصویری و تشخیص تداخلات فضایی تعریف شده است. فرایند طراحی شده در پروژه‌ی موردی (سطح خرد) پیاده‌سازی شد و آنالیز اطلاعات به‌دست آمده، ضریب همبستگی هم‌جهت و مؤثری را بین متغیرهایی، مانند: تعداد فعالیت‌ها، تعداد و مجموع فاصله‌ی تداخلات نشان داد.

واژگان کلیدی: تعارضات فضایی، مدیریت فضای اجرای کار، مدل‌های پنج‌بعدی کد، منابع ساخت.

m.rohani@alum.semnan.ac.ir
ahadad@semnan.ac.ir
ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

فعالیت‌ها در سایت‌های ساخت، معمولاً توسط خرده‌پیمانکاران در مناطق محدود اجرا می‌شوند و هر پیمانکار فضای کار مختص خود را دارد که فضای مذکور به‌عنوان منبعی محدود و کلیدی در سایت پروژه در نظرگرفته می‌شود. با گذشت زمان و پیشرفت پروژه، نیازها و ویژگی‌های فضای کاری (نوع، اندازه و محل) و فعالیت‌های مرتبط با آن به‌طور مداوم تغییر می‌کنند.[۱] از طرف دیگر، با افزایش فشار به‌منظور تحویل سریع‌تر پروژه‌های ساخت، پیمانکاران باید میزان کار انجام شده را با افزایش منابع به‌کار رفته در واحد زمان افزایش دهند.[۲] این امر اهمیت مدیریت فضای اجرای کاررا که ذاتی پویا دارد بارز می‌کند.[۳] با عنایت بر این امر که کاستی‌های مربوط به برنامه‌ریزی فضای کار می‌تواند منجر به تراکم سایت پروژه، کاهش بهره‌وری، تداخلات فضایی و اختلال در زمان‌بندی، تغییر در مسیر بحرانی و یا تأخیر در تحویل به‌موقع پروژه شود،[۴-۷] ضروری است فضاهای موجود به‌صورت مؤثر سازمان‌دهی شوند تا تداخل‌های فضایی به میزان کمینه برسند.[۵]

ابزارهای دوبعدی فعلی زمان‌بندی پروژه‌ها مانند نمودارهای گانت چارت و شبکه‌های مسیر بحرانی، امکان برنامه‌ریزی و مدیریت فضای موردنیاز فعالیت‌های سطح خرد را برای ناظران فراهم نمی‌سازد.[۸] نرم‌افزارهای طراحی، مانند اتوکَد فاقد اطلاعات زمانی است و سایر نرم‌افزارهای زمان‌بندی نیز فاقد اطلاعات هندسی سه‌بعدی هستند و توانایی ارائه‌ی شرایط مربوط به منابع و فضای اجرای کار را ندارند.[۹] با گذشت زمان، شبیه‌سازی تصویری و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)[۱] اعتبار روزافزونی در بین پژوهشگران ساخت به دست آورده و به‌عنوان یکی از ۴ حوزه‌ی اصلی فناوری اطلاعات در صنعت ساخت مطرح شده است.[۱۰و۱۱] برعکس مدل‌های کلاسیک، مدل‌های چندبعدی کَد[۲] کاربران و برنامه‌ریزان کم‌تجربه را قادر به درک مشکلات و مسائل مربوط به برنامه‌ریزی می‌کنند.[۵] برنامه‌ریزی چندبعدی فضای ساخت، دربرگیرنده‌ی مسائلی، همچون: برنامه‌ی زمان‌بندی در فضای مجازی، برآورد هزینه با درنظرگرفتن محدودیت منابع، و شرایط فضایی در فرایند ساخت است.[۱۲و۱۳]

پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک روش‌شناسی نوین، سعی در ایجاد یک مدل روزانه برای برنامه‌ریزی پنج‌بعدی فضای اجرای کار منابع ساخت کرده است. در این راستا، فضاهای اجرای کار منابع و اجزاء ساخت طراحی و سپس با اطلاعات زمانی و هزینه‌یی فعالیت‌های مرتبط در بستر مدل‌سازی اطلاعات ساخت ترکیب شده‌اند.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۷/۵/۶، پذیرش ۱۳۹۷/۷/۱۴.
DOI:10.24200/J30.2018.50503.2316

هدف اصلی سیستم مذکور، کمک به ارتقاء شناخت برنامه‌ریزان از احتمال تداخلات فضایی براساس هم‌پوشانی‌های زمانی و تشخیص آن‌ها در مدل‌های چندبعدی براساس شرایط واقعی ساخت است.

۲. ادبیات موضوع

هر چند گستره‌ی مطالعات صورت گرفته در حوزه‌ی عنوان شده، بسیار وسیع و دسته‌بندی آن‌ها مشکل است، لیکن می‌توان مطالعات حوزه‌ی مدیریت فضاهای اجرای کار و روش‌های برنامه‌ریزی فضاها در سطح خرد را در این موارد بررسی کرد: تعریف و تخصیص فضاها، سرانه‌ها و میزان حجمی منابع، روش‌های تولید فضاها و ارتباط داده‌ها، تشخیص تعارضات و تراکم‌های فضایی و روش‌های شبیه‌سازی رایانه‌یی.

توسعه‌ی طبقه‌بندی فضاهای اجرای کار در طی دهه‌ی گذشته براساس مطالعات مختلف محقق شده است که نقش مهمی درکمیت‌گذاری میزان تعارضات فضاهای اجرای کار ایفا می‌کند. مدیریت فضای اجرای کار در سطح خرد در سال ۱۹۹۴ توسط تبت و بیلیوی،[۱۴] شروع شد. آن‌ها طبقات را به تعدادی منطقه تقسیم و سپس آن‌ها را به بلوک‌های کاری با منابع مشخص تقسیم‌بندی کردند. و برای نخستین بار فضاهای اجرای کار را به گروه فضاهای موردنیاز تجهیزات، نیروی انسانی، و فضای موردنیاز مصالح در سه بخش فعالیتی تقسیم کردند.[۱۵] همچنین ریلی و سانویدو (۱۹۹۵)،[۱۶] در سطحی مشابه، یک گستره‌ی متنوع از الگوی رفتاری فضاهای اجرای کار را هم‌زمان با پیشرفت فعالیت‌ها ارائه کردند و با تعریف ۱۲ نمونه‌ی فضای موردنیاز ساخت، یکی از کامل‌ترین دسته‌بندی‌ها و ساختارهای فضایی را به ثبت رساندند. آکینسی و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۷،۲] شش نوع فضای اجرای کار موردنیاز فعالیت‌های ساخت‌وساز را براساس سه دسته‌بندی سطح: کلان، خرد و مسیرها ارائه کردند. برخی پژوهشگران نیز بر مبنای اساس اصول مختلفی، مانند المان‌های اصلی منابع و اجزاء ساخت،[۱۸،۵] مراحل مدیریت و تولید فضاها،[۹] تشخیص فعالیت‌های ارزش‌افزوده و بدون ارزش‌افزوده،[۱۹،۳] و همچنین دیگر اصول ایمنی،[۲۰] حمایتی و فرایندی[۲۱،۶]، فضاهای تعریف شده در مطالعات پیشین را ارتقاء دادند و تکمیل کردند که در جدول ۱ ارائه شده است.

هم‌زمان با تعریف فضاهای اجرای کار، نیاز به سرانه‌های فضایی و اطلاعات مربوط به واحد حجمی کل منابع در محدوده‌ی پروژه‌ی موردنیاز است. براساس مطالعات انجام شده،[۹] اطلاعات فضایی موردنیاز منابع، شامل طیف وسیعی است و اعداد متفاوتی برای بهینه‌ی بهره‌وری نیروی انسانی مطرح شده است. چووا و همکاران (۲۰۱۰)،[۲۲] اندازه‌ی ۰٫۶ مترمکعب و کسلی و همکاران (۲۰۰۱)،[۲۳] محدوده‌ی ۹ تا ۱۹ مترمربع را به‌عنوان اندازه‌ی بهینه‌ی موردنیاز و مطلوب فضای اجرای کار برای هر نیروی انسانی پیشنهاد دادند که چنانچه سرانه‌ی فضایی به پایین‌تر از حد مذکور برسد، کارایی به میزان زیادی کاهش می‌یابد. سو (۲۰۱۳)،[۱۸] با ارائه‌ی فرمولی ضریب ابعاد ۰٫۹ مترمربع را در تعداد نیروی انسانی برای محاسبه‌ی مساحت موردنیاز استفاده کرده است. علاوه بر فضای موردنیاز انجام کار، در پژوهش دیگری (۲۰۱۷)، پیشرفت فعالیت‌ها براساس آنالیز کارآیی و بهره‌وری نیروی انسانی در محیط مدل‌سازی سه‌بعدی مطالعه و نتیجه‌گیری شده است که میزان و افزایش بهره‌وری پروژه از طریق شبیه‌سازی تصویری سه‌بعدی بر پایه‌ی مدل‌سازی اطلاعات کاملاً امکان‌پذیر است.[۲۴]

روش‌های نحوه‌ی تولید فضاهای مذکور در محیط‌های چندبعدی بسیار با اهمیت است. به‌طورکلی می‌توان دو راه برای تولید فضای کاری تعریف کرد: ورودی محور[۳] و شیء محور[۴]. جزئیات در روش ورودی محور، بر داده و اطلاعات وارد شده‌ی کاربر متکی است و نیاز به حجم ورود اطلاعات گسترده و حجیم دارد. روش ایجاد فضای اجرای کار بر مبنای مدل اجزاء ساخت بیشتر به‌صورت خودکار پیاده‌سازی می‌شود. آکینسی (۲۰۰۲)،[۱۷] از روشی ترکیبی براساس ادغام اطلاعات ورودی و مدل اجزاء ساخت بهره گرفت. در ادامه، روشی شیء محور (جزء) استفاده شد که به هر فعالیت براساس تقریب محیط اطراف آن، فضای کاری را اختصاص می‌دهد.[۲۱] استفاده از زبان برنامه‌نویسی SCQL برای ایجاد هندسه‌های موردنیاز فضای اجرای کار با استفاده از اشیاء مرجع یک مدل اطلاعات ساخت، روشی جدید بود و حوزه‌ی مذکور را ارتقاء داد.[۲۵] علاوه بر نحوه‌ی تولید فضاها، روش ارتباط اطلاعات فضایی و زمانی در محیط‌های چندبعدی، یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران بوده است. سه روش اصلی برای ایجاد ارتباط در مدل‌سازی چندبعدی ارائه شده است، که عبارت‌اند از: پیوند دستی، پیوند خودکار و مونتاژ دستی.[۲۶]

پژوهشگران به دنبال توسعه‌ی روشی مناسب برای شناسایی تعارضات فضای اجرای کار هستند و آن را با استفاده از روش‌های مختلف انجام می‌دهند. جو (۲۰۰۲)،[۵] تلاش کرد تا با علامت‌گذاری نقشه‌های ترسیمی اتوکد، فضاهای موردنیاز برای فعالیت‌ها را به‌صورت بلوک‌های دوبعدی مشخص کند. در سیستم مذکور، فضاهای لازم برای فعالیت‌ها در نقشه‌ها، شبیه‌سازی و برخوردهای فضایی را می‌توان شناسایی کرد. همچنین ایشان از روش نسبت حجمی تداخلات فضایی برای محاسبه‌ی میزان ازدحام و درجه‌ی تداخلات استفاده کرد. با توسعه‌ی ابزار و نرم‌افزارهای مدل‌سازی، در پژوهش دیگری (۲۰۰۲)،[۲] سعی در فرموله و خودکار کردن آنالیز تضاد زمان ـ فضا شد و نقطه‌ی عطفی را ازلحاظ تئوری و عملی در حوزه‌ی مذکور ایجاد کرد. پس از آن، یک تابع چندمعیاری طراحی و با تغییر ۳ خصوصیت تصویری، شامل: الگوهای اجرایی، نرخ و توزیع متفاوت میزان کار، کمیت‌های هفتگی کار و میزان بحرانی بودن فضاهای اجرای کاری سنجیده شد.[۶] در تابع ذکر شده از معیارهای زمانی و فضایی به‌طور هم‌زمان استفاده و نسبت حجمی، تعداد و انواع تعارضات و فعالیت‌های بحرانی به عنوان سایر عوامل سنجیده شده است. در این مسیر، مدل قبلی ارتقاء یافت و از ترکیب مدل‌های چهاربعدی کد و الگوریتم ژنتیک استفاده شد تا بهترین راهبردهای ساخت حاصل شود و تعارضات فضای ساخت به میزان کمینه برسد.[۲۷] استفاده‌ی ترکیبی از مدل‌سازی اطلاعات ساخت و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در جانمایی تجهیزات و تشخیص فضاهای متراکم اجرای کار همچنان بسیار موردتوجه است.[۲۸و۲۹] پژوهشگران دیگری،[۹و۳] نیز با بهره‌گیری از روش و محاسبه‌ی نسبت مجموع فضاهای کاری موردنیاز به مجموع فضاهای کاری در دسترس، میزان تعارضات و تراکم‌های فضایی را محاسبه کردند. هم‌زمان با سنجش تراکم فضایی، تداخلات فیزیکی و هندسی احجام به‌عنوان یکی از روش‌های مشهود در مدیریت فضاهای اجرای کار قرار گرفت.[۳۰] شبیه‌سازی فضاهای اجرای کار و اجزاء ساخت به‌صورت احجام هندسی با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت و تشخیص تداخلات فیزیکی آن‌ها در دوره‌ی طراحی پروژه می‌تواند منجر به یافته‌های بسیاری شود.[۳۱] این تداخلات می‌تواند به‌صورت تداخلات غیرمنعطف طراحی (اجزاء ساخت با یکدیگر)، تداخلات نیمه‌منعطف (فضاهای اجرای کار و اجزاء ساخت) و تداخلات منعطف (فضاهای اجرای کار با یکدیگر) خلاصه شود.[۳۲]

در یکی از آخرین مطالعات انجام شده در حوزه‌ی اشاره شده،[۳۳] سعی در تشخیص تداخلات بالقوه‌ی فضاهای کاری در طول فرایند نصب سازه‌های پیش‌ساخته توسط نیروهای انسانی شد. اطلاعات به‌دست آمده از مطالعه‌ی مذکور نشان داد که سیستم اشاره شده علاوه بر قابلیت تشخیص و آگاه‌سازی عوامل انجام کار در محل

جدول ۱. دسته‌بندی فضاهای مطالعه شده.

انواع فضاها	جزئیات انواع و کاربری فضاها	سطح فضاها	تابلت و بیلیوی (۱۹۹۴)	ریلی و ساندیور (۱۹۹۵)	آکینسی (۲۰۰۲)	جو (۲۰۰۲)	فورث و وینچ (۲۰۰۲)	داورد و ملاسی (۲۰۰۶)	مون (۲۰۰۹)	چن دو و چیو (۲۰۱۰)	المهدی (۲۰۱۱)	چاوادا (۲۰۱۲)	سینگ سو (۲۰۱۴)	کاسم و چاوادا (۲۰۱۵)	زنگ و تیزر (۲۰۱۵)	کروین کان (۲۰۱۸)	میرزایی (۲۰۱۸)
	فضاهای جانمایی سایت	سطح کلان		•			•			•							
	فضاهای اجزاء ساخت	سطح خرد			•		•	•		•	•			•	•	•	
	فضاهای اجرای کار و نصب	سطح خرد		•			•	•	•						•	•	
	فضای کاری نیروی انسانی	سطح خرد		•	•	•				•	•	•		•			•
فضای ابزار تجهیزات و سازه‌ها	ابزار و تجهیزات	سطح خرد	•	•	•	•		•		•	•		•	•			
	جابه‌جایی تجهیزات	مسیرها				•	•	•									
	تجهیزات و سازه‌های موقت	سطح کلان			•	•	•										
فضاهای مواد و مصالح	بارگیری مصالح	سطح کلان		•					•								
	ذخیره و دپوی مصالح	سطح خرد و کلان	•	•		•		•		•	•	•			•		
	جابه‌جایی مصالح	مسیرها		•			•	•	•	•							
	پیش‌ساختگی و سرهم‌بندی	سطح کلان		•				•	•							•	
	دورریز و مواد زائد	مسیرها		•		•					•						
	خطرپذیر			•	•						•					•	
فضاهای متفرقه	حفاظت شده	سطح خرد		•	•			•				•				•	
	ایمنی کار	و کلان							•						•		
	پشتیبانی کار							•								•	•

پروژه قبل از شروع سرهم‌بندی سازه‌یی می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار گروه طراحی سازه قرار دهد تا کیفیت طراحی جزئیات پیش ساخته را افزایش دهند. در این راستا، برای مدل‌سازی فضای کار موردنیاز نیروی انسانی، ۵ پارامتر، شامل: المان‌های پشتیبانی، المان هدف، طول و ارتفاع فضای اجرای کار، المان‌های موازی و المان‌های خطاپذیر معرفی شدند و براساس آن‌ها، سه دسته‌بندی تداخلات به نام‌های فضاهای بی‌ثبات، فضاهای متراکم و فضاهای بلوکه شده تعریف شدند. سپس شبیه‌سازی برای یک نمونه‌ی موردی انجام و آزمون‌های تراکم و بلوکه شدن برای نمونه‌ی مورد آزمایش، به‌صورت تصویری پیاده‌سازی شد که زمان‌بر شدن آزمون‌ها از محدودیت اصلی آن بود.

در مطالعه‌یی دیگر،[۳۴] از مدل‌سازی چهاربعدی برای تشخیص تراکم‌های فضایی و ارزیابی اثر آن‌ها درکارآیی پروژه استفاده شد. در ابتدا، فضای موردنیاز نیروی انسانی و همچنین فضاهای حمایتی و پشتیبانی براساس موقعیت مکانی و ابعاد جزء و المان ساخت با استفاده از چهار پارامتر (جهت‌گیری، موازی‌سازی عرضی، موازی‌سازی طولی و مقدار توسعه یا گسترش کار) به‌طور خودکار در محیط مدل‌سازی ایجاد شد. در واقع تداخلات فضایی بین فعالیت‌ها براساس جابه‌جایی فضای موردنیاز نیروی انسانی در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد. بدین منظور از تلفیق ۴ الگوی حرکتی اجرایی (ستونی، ردیفی، ستونی پیوسته، ردیفی پیوسته) و ۴ نقطه‌ی شروع اجرا، تعداد ۱۶ گزینه‌ی اجرایی برای هر فعالیت تعریف شد. سپس شدت تداخلات بر کاهش کارآیی نیروی انسانی درگیر در الگوهای مختلف اجرایی سنجیده و در بهره‌وری پروژه محاسبه شد.

با وجود مزیت‌های مطالعات پیشین، باز هم کاستی‌هایی مشاهده می‌شود که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. در برخی از مدل‌های ارائه شده از ابزارها و نرم‌افزارهای صنعتی و متفرقه به‌جای نرم‌افزارهای مهندسی و ساخت استفاده شده است که توسعه‌ی کاربردی، آن‌ها را در صنعت ساخت با مشکل مواجه می‌کند.[۳۵و۳۶] در مواردی از طریق نرم‌افزار اتوکد و یا افزونه‌یی بر آن، سعی در ایجاد محیط‌های چندبعدی شده است که این امر، اصل استفاده از ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساخت و قابلیت‌های آن را زیر سؤال می‌برد.[۵،۶و۲۱]

برخی پژوهشگران،[۲۵و۳۷] از زبان‌های برنامه‌نویسی و یا روش‌های پیشرفته‌ی تکنولوژی اطلاعات به‌منظور شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند که این مسئله سبب شده است تا کاربران عادی که با روش‌ها و ابزار ناآشنا هستند، با مشکل مواجه شوند. به‌طور کلی، مزیت پژوهشی مطالعه‌ی حاضر را می‌توان در توسعه و بازتعریف پایه‌یی فضاهای اجرای کار، محاسبات حجمی و پیکره‌بندی فضایی براساس روش‌های ساخت، ارائه‌ی مکانیسم‌های جدید در تشخیص تداخلات زمانی ـ فضایی و درنهایت پیاده‌سازی فرایند با استفاده از قابلیت ابزارها و نرم‌افزارهای تجاری موجود دانست. این نوآوری‌ها به‌طور کامل عبارت‌اند از:

- تعریف پایه‌یی فضاهای اجرای کار با استفاده از اصل اجزاء ساخت و ماهیت منابع موردنیاز و جمع‌بندی و پوشش کلیه‌ی فضاهای تعریف شده در مطالعات پیشین با درنظرگرفتن جامعیت و اقلیت تعداد آن‌ها.
- محاسبه‌ی احجام فضاهای اجرای کار و ارائه‌ی تیپ‌بندی و چیدمان ترکیب فضاهای اجرای کار براساس سه روش مختلف اجرای فعالیت در سطح خرد (طبقه).

- تشخیص سریع تداخلات براساس مکانیسم پوشش زمانی فعالیت‌ها و محاسبه‌ی تراکم فضایی براساس مجموع فاصله‌ی تداخلات احجام در روز.
- ارائه‌ی مدل‌سازی براساس بازه‌های روزانه و شکست احجام به بخش‌های روزانه، منجر به شبیه‌سازی واقعی و عملیاتی شده است که این امر کمک بسیاری به ارتقاء درک برنامه‌ریزان و اکیپ‌های اجرایی از شرایط روزانه‌ی کارگاهی کرده است.
- تعریف فرایند با استفاده از قابلیت‌های ابزارها و نرم‌افزارهای تجاری موجود (اتودسک رویت[5]، گوگل اسکچاپ[6]، مایکروسافت پراجکت[7]، ناویس‌ورک[8]) به جای استفاده از پلاگین‌ها[9] یا روش‌های سنگین برنامه‌نویسی به‌منظور استفاده در فضای جاری کارگاه.

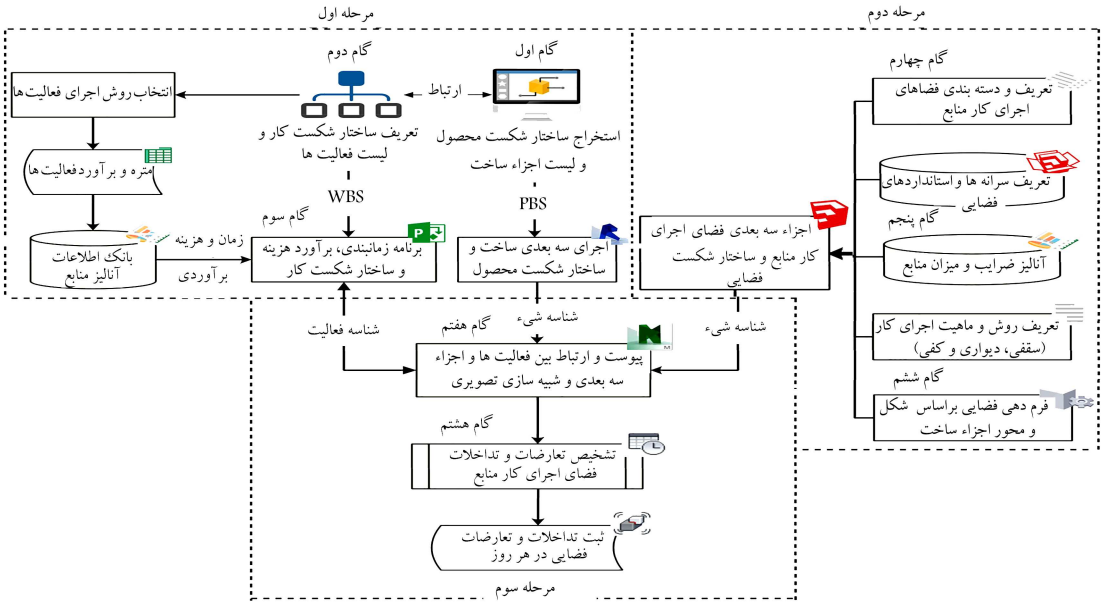
مدل‌سازی پنج‌بعدی کَد با استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی و در دسترس و با استفاده از مدارک موجود در زمان بسیار کوتاه انجام می‌پذیرد. در مدل‌های پیشین، بیشتر از برنامه‌ریزی دوبعدی در نرم‌افزار کَد و یا چهاربعدی در نرم‌افزارهای غیرمهندسی ساخت استفاده شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر با مرور مطالعات پیشین و تجزیه و تحلیل داده‌ها، یکی از روش‌های موجود انتخاب شده است که در صورت نیاز ارتقاء یابد و یا روشی نوین به‌صورت استدلالی برگزیده شود. فرایند پژوهش حاضر در سه مرحله دسته‌بندی شده است (شکل ۱). در مرحله‌ی اول، اطلاعات اولیه‌ی موردنیاز تولید و ساختار پایه‌ی مدل شکل گرفته است. بدین جهت، نحوه‌ی ایجاد و ارتباط کلیه‌ی اطلاعات و داده‌های موردنیاز در سه‌گام: ۱. ساختار شکست اجزاء ساخت (PBS)[10] ۲. ساختار شکست کار (WBS)[11] و ۳. برنامه‌ی زمان‌بندی تعریف شده است. سپس آنالیز منابع ساخت براساس روش‌های اجرایی منجر به تعیین زمان و هزینه‌ی فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی شد و براساس زمان فعالیت‌ها، اجزاء ساخت به اجزاء یک‌روزه شکسته شدند. دومین مرحله، مربوط به تعریف و شکل‌دهی ساختار فضایی پروژه است. فضای اجرای کار منابع ساخت در پژوهش حاضر براساس سه عامل: تعریف و دسته‌بندی فضاهای اجرای کار، سرانه‌های فضایی و میزان منابع موردنیاز اجزاء ساخت و همچنین تیپ‌بندی روش‌های ساخت، محاسبه و فرم‌دهی صورت گرفته است. درنهایت و در سومین مرحله، مدل پنج‌بعدی کَد، شبیه‌سازی و تداخلات فضای اجرای کار مشخص شده است. تعداد و اندازه‌ی تداخلات فضاهای اجرای کار منابع براساس فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی بررسی و سپس میزان بحرانی بودن فضاهای اجرای کار اکیپ‌های کاری در هر روز به‌صورت خودکار محاسبه شده است. در انتها، با پیاده‌سازی و اجرای گام‌به‌گام مدل طراحی شده در نمونه‌ی واقعی، میزان اعتبار آن تأیید شده است.

۴. تولید اطلاعات و ساختار پایه‌ی مدل (مرحله‌ی اول)

اولین گام در برنامه‌ریزی تصویری پروژه‌ها، دریافت اطلاعات ساخت و مدارک تولید شده‌ی پروژه از تخصص‌ها و حوزه‌های مختلف است.[۳۸] در پژوهش حاضر، برای تولید مدل‌های چهار/پنج بعدی کَد، اطلاعات سه‌بعدی اجزاء ساخت به‌دست آمده از نرم‌افزار رویت، در حوزه‌های مختلف (معماری، سازه، تأسیسات برقی، تأسیسات مکانیکی) و در فرمت IFC بر روی هم جانمایی شدند، تا ناهماهنگی‌های حوزه‌ی طراحی به میزان کمینه برسد. هرچند نرم‌افزارهای گوناگون مدل‌سازی اطلاعات ساخت (رویت اتودسک، ارشیکد و ...) با خروجی‌های متفاوت توسعه پیدا کرده‌اند، اما IFC همچنان به‌عنوان کامل‌ترین فرمت استفاده می‌شود.[۱۳] با توجه به قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساخت، در طی طراحی اجزاء به‌صورت سه‌بعدی، تمامی اطلاعات حجمی و سطحی تولید و محاسبه می‌شوند. هم‌زمان با فرایند تولید احجام در طراحی مهندسی، اجزاء ساخت با مشخصات تدوین شده ایجاد می‌شوند که فهرست اجزاء ذکر شده برای تدوین ساختار شکست محصول استخراج می‌شود. ساختار شکست کار، گستره‌ی (محدوده) پروژه را نشان می‌دهد و نه فقط به عنوان پلی برای ارتباط بین اطلاعات برنامه‌ی زمان‌بندی و مدل سه‌بعدی استفاده می‌شود، بلکه هسته‌ی اصلی کل، مدلی است که از طریق آن می‌توان مدل سه‌بعدی را به دیگر داده‌ها و اطلاعات پروژه مرتبط ساخت.[۱۲] برای تهیه و ارائه‌ی ساختار شکست کار، ایجاد ساختار شکست اجزاء امری ضروری است. گام دوم برای تشکیل



شکل ۱. روش‌شناسی پژوهش در سه مرحله.

مدل پایه، تهیه‌ی فهرست فعالیت‌های لازم برای ایجاد محصولات و اجزاء ساخت است. در این مرحله به‌صورت ماتریسی بین فعالیت‌ها و اجزاء متناظر ارتباط برقرار می‌شود و کُدهای هر دو ساختار با یکدیگر متناظر می‌شوند. در بسیاری از موارد ممکن است از اجرای یک فعالیت برای چند جزء نهایی ساخت و بالعکس برای ایجاد یک جزء نهایی ساخت از چند فعالیت استفاده شود؛ بنابراین ارتباط ۱ − ۱، ۱ − n یا n − ۱ حاصل می‌شود که باعث شکل‌دهی و ارتباط مؤثر دو ساختار می‌شود.

در گام سوم پژوهش حاضر، مدت زمان فعالیت‌ها با آنالیز منابع فعالیت‌ها و برآورد نرخ تولید آن‌ها محاسبه شده است. اکیپ‌ها و گروه‌های کاری تعریف شده برای هر فعالیت، نرخ تولید مشخصی در یک واحد زمانی دارند. با استفاده از آنالیز منابع لازم برای یک واحد کاری می‌توان میزان بازدهی و پیشرفت کاری یک گروه کاری را در یک روز کاری برآورد کرد. با توجه به آنالیز نفر ـ ساعت و حجم منابع تخصیص داده شده، زمان لازم برای اجرای واحد فعالیت مشخص می‌شود. در واقع، مقدار منابع موردنیاز برای یک واحد کاری در آنالیز فهرست‌بهاء در سه دسته‌ی: مصالح، ماشین‌آلات و نیروی انسانی تجزیه و تحلیل می‌شود. با وجود آنکه ضریب کمیت برای منابع مختلف اجرای یک واحد فعالیت، مقادیر متفاوتی دارد، لیکن مؤثرترین منبع در محاسبات زمان است. در آنالیز منابع نیروی انسانی با ضرایب نفر ـ ساعت متفاوت، منبعی که بیشترین تأثیر را در تکمیل یک واحد از انجام کار دارد، به‌عنوان عامل اصلی فعالیت یک اکیپ کاری، به‌منظور محاسبه‌ی زمان انجام فعالیت انتخاب می‌شود. در اجرای آیتمی مانند دیوارهای خارجی (بنّایی با بلوک سیمانی توخالی به ضخامت حدود ۲۰ سانتیمتر و ملات ماسه سیمان)، نیروی انسانی بنّای سفت‌کار با ضریب ۰٫۳ نفر ـ ساعت برای اجرای ۱ مترمربع از واحد فعالیت و از میان سه عامل نیروی انسانی (بنّای سفت‌کار، کمک بنّای سفت‌کار و کارگر ساده) در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی، میزان بازده اجرایی یک اکیپ کاری در واحد زمان از تقسیم واحد زمانی (D) (روز/۸ ساعت) بر میزان زمان موردنیاز برای تولید یک واحد فعالیت (R) به‌صورت رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$N = \frac{D}{R} \qquad (۱)$$

از طرفی با ایجاد تناظر بین ساختار شکست کار و ساختار شکست اجزاء و متره‌ی خودکار احجام اجزاء ساخت، میزان فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی مشخص می‌شود که این اطلاعات در پایگاه داده‌های مدل با کُد ساختار شکست مشخص ذخیره می‌شود. با تقسیم حجم کل برآوردی فعالیت (Q) بر نرخ تولید اکیپ کاری موردنیاز در واحد زمان (N) (یک روز)، مدت زمان کل انجام فعالیت بر حسب روز و در رابطه‌ی ۲ برآورد می‌شود:

$$T = \frac{Q}{N} \qquad (۲)$$

به‌عنوان مثال، مدت زمان لازم برای اجرای یک دیوار خارجی به مساحت ۴۱۸ مترمربع با بلوک‌های سیمانی براساس آنالیز بهاء منابع فهرست‌بهاء (جدول ۲) و رابطه‌های ۱ و ۲، تعداد ۱۵ روز است. نرخ تولید یک اکیپ کاری دیوارچینی در واحد زمانی یک روز، معادل ۲۷٫۹ مترمربع است، که با تقسیم مساحت کل بر متوسط کارایی روزانه، مدت زمان ۱۵ روز کاری محاسبه می‌شود.

با مشخص شدن مدت اجرای فعالیت، اجزاء حاصل شده از فعالیت‌ها به اجزاء ریزتری که حاصل بسته‌ها و اکیپ‌های کاری روزانه هستند، تجزیه می‌شود. این تقسیم اجزاء ساخت به ریزشدن برنامه‌ریزی و ارائه‌ی جزئیات برای فعالیت‌ها و منابع مرتبط در دوره‌های زمانی یک روزه کمک می‌کند. پس از تقسیم اجزاء ساخت به اجزاء یک روزه، مجدداً اجزا در محیط طراحی به‌صورت خودکار متره می‌شوند و احجام و مشخصات مربوط به هر جزء در بانک اطلاعاتی موردنظر ثبت می‌شود.

جدول ۲. آنالیز منابع بلوک‌چینی براساس آنالیز بهاء فهرست‌بهاء.

منابع خرد پویا			
نیروی انسانی	واحد	مقدار	ضریب عامل
کارگر ساده	نفر ـ ساعت	۱٫۳۵	۱
بنای سفت کار درجه ۱	نفر ـ ساعت	۰٫۰۸۲	۱
بنای سفت کار درجه ۲	نفر ـ ساعت	۰٫۳	۱
کمک بنای سفت کار	نفر ـ ساعت	۰٫۳	۱
منابع خرد ایستا			
مصالح	واحد	مقدار	ضریب عامل
ملات ماسه ـ سیمان	مترمکعب	۰٫۰۱۱	۱
بلوک سیمانی	قالب	۱۱٫۳۴	۱

۵. تعریف و شکل‌دهی ساختار فضایی (مرحله‌ی دوم)

در مرحله‌ی دوم، در سه گام، عوامل مؤثر در شکل‌گیری فضاهای اجرای کار منابع را که شامل: ۱. تعریف و دسته‌بندی فضاهای اجرای کار، ۲. سرانه‌های فضایی و محاسبه‌ی فضاهای موردنیاز منابع و ۳. تیپ‌بندی روش‌های اجرای کار و شکل‌دهی فضاهاست، بررسی می‌کند.

۱.۵. تعریف و دسته‌بندی فضاهای اجرای کار

آنالیز پیکربندی فضایی فرایند ساخت‌وساز نیاز به مجموعه‌یی از تعاریف انواع فضاها دارد. با توجه به ماهیت منحصربه‌فرد هر فرایند ساخت‌وساز، دسته‌بندی فضاها می‌تواند از موردی به مورد دیگر متفاوت باشد و در بعضی از آن‌ها، محدودیت‌های غیرقابل‌انعطاف در تعاریف مشاهده می‌شود. در طبقه‌بندی‌های مذکور از اصطلاحات گوناگون و جزئیات متفاوتی براساس محدوده‌ی متفاوت پروژه‌ها استفاده شده است، اما می‌توان با آنالیز و تحلیل دسته‌بندی‌های اشاره شده به مبانی مشخص و مشترکی با کارکرد و ماهیت یکسان در آن‌ها دست یافت.[۱۸]

میزان جزئیات و تعدد تعاریف فضایی در خروجی‌های حاصل از ارزیابی تعارضات سهم بسزایی دارد، اما این خود می‌تواند منجر به پیچیدگی در شبیه‌سازی از شرایط واقعی اجرای کار و یا عدم فهم صحیح از برنامه‌ریزی فضایی شود. در بعضی مطالعات با شکستن فضاهای موردنیاز و درنظرگرفتن حالت‌های مختلف برای آن‌ها تلاش شده است تا ارائه‌ی شبیه‌سازی فضای اجرای کار واقعی به نظر برسد که این روش‌ها منجر به پیچیدگی و زمان‌بر شدن فرایند شبیه‌سازی و ایجاد اطلاعات غیرضروری می‌شود. در سایر موارد با تعریف کلی فضاها، موانعی از جمله: عدم دقت مدل، کاهش میزان واقع‌گرایی و کیفیت خروجی‌های برنامه‌ریزی ایجاد می‌شود.[۱۸] بنابراین رعایت تعادل برنامه‌ریزی که بتواند انواع فضاهای موجود در شرایط واقعی را پوشش دهد و درعین‌حال باعث تعدد و ابهام فضایی نشود، ضروری به نظر می‌رسد.

جمع‌بندی صورت گرفته از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تمام تعاریف فضایی ارائه شده به‌نوعی در یکی از سه دسته‌ی کلی فضاهای خرد، کلان و مسیر قرار می‌گیرند. همچنین، تعداد زیادی از این فضاها با نسبت دادن شرایط حرکتی (ایستایی و پویایی) به منابع اجرای کار شکل گرفته‌اند. علاوه بر فضای موردنیاز منابع

جدول ۳. تعاریف فضایی براساس شرایط و سطح فضایی منابع و اجزاء ساخت.

طبقه‌بندی فضایی					
سطح فضایی		فضاهای سطح خرد		فضاهای سطح کلان		فضای مسیرها
شرایط فضایی		ایستا	پویا	ایستا	پویا	پویا
پروژه	اجزاء ساخت (دائمی)	فضای ثابت اجزاء ساخت	فضای توسعه‌ی اجزاء ساخت			
	نیروی انسانی (موقت)		فضای کار نیروی انسانی (فعال)	فضای تجمعی گروهی نیروی انسانی (منفعل)	فضای کارگروهی نیروی انسانی (فعال)	فضای مسیر و جابه‌جایی نیروهای انسانی
	ابزار و تجهیزات (موقت)	فضای تجهیزات ثابت (ژنراتور برق، دستگاه جوش)	فضای تجهیزات و ابزار قابل استفاده (مالچ، فرغون)	فضای سازه‌ها و تجهیزات موقت (تاورکرین، دفاتر اداری)	فضای کار، ماشین‌آلات ساخت (بیل مکانیکی)	فضای مسیر و جابه‌جایی تجهیزات
	مواد و مصالح (موقت)	فضای مصالح دپو شده و قابل استفاده		فضای ذخیره و نگهداری مصالح	فضای کار پیش‌ساختگی و سرهم‌بندی	فضای مسیر جابه‌جایی مصالح/ فضای دورریز و زباله

ساخت، فضای موردنیاز جزء نهایی ساخت به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین فضاهای کاری و فعالیت مطرح بوده است، چرا که اجزاء نهایی ساخت می‌توانند علاوه بر شکست فضاهای در دسترس فعالیت‌ها، محدودیت‌هایی در سطح و حجم برای فضاها و اکیپ‌های اجرای کار ایجاد کنند (مثال: سقف‌های کاذب، تیغه‌های داخلی، داکت‌های تأسیساتی).

در پژوهش حاضر، پایه‌های تعریف فضاهای اجرای کار با روشی بدیع و براساس جمع‌بندی مطالعات پیشین شکل گرفته است. در واقع تعداد چهار عامل فضایی که نیازهای فضاهای اجرای کار براساس آن‌ها شکل‌دهی می‌شود، تعریف شده است. جزء نهایی ساخت همراه با سه نوع منبع اصلی فعالیت‌های ساخت (نیروی انسانی، مصالح، ماشین‌آلات و تجهیزات) به‌عنوان پایه‌های شکل‌گیری و دسته‌بندی فضایی تعریف شده است. چهار عامل مذکور عبارت‌اند از: ۱. فضای اجزاء ساخت (دائمی)، ۲. فضای کار موردنیاز نیروی انسانی (موقت)، ۳. فضای کار موردنیاز ماشین‌آلات و تجهیزات (موقت) و ۴. فضای کار موردنیاز مصالح (موقت). عوامل ذکر شده‌ی اصلی فضاهای ساخت همراه با سطوح کلی تعریف شده برای فضاها (خرد، کلان و مسیر) و شرایط حرکتی فضاها (ایستا و پویا) ترکیب و دسته‌بندی شدند تا تعداد کل فضاهای قابل تعریف برای اجزاء و منابع ساخت را پدید آورد. سپس براساس تجربیات اجرایی و فضاهای اجرای کار ملموس و قابل تعریف در شرایط اجرایی کارگاه، تعداد ۱۵ فضا از ماتریس حاصل شده نام‌گذاری و مثال‌های عملی برای آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. به عنوان مثال، فضای کار ماشین‌آلات ساخت، مانند: بیل مکانیکی در دسته‌ی فضای کار موردنیاز ماشین‌آلات و تجهیزات در سطح کلان و شرایط پویا جای‌گذاری شده و یا در مثالی دیگر، فضای تجهیزات ثابت، مانند: ژنراتور برق در دسته‌ی فضای کار موردنیاز ماشین‌آلات و تجهیزات در سطح خرد و شرایط ایستا ثبت شده است. تعدد فضای همراه با منابع هر فعالیت منجر به زمان‌بر بودن و غیرضروری بودن محاسبه و شکل‌دهی تمامی فضاهای جزئی در شبیه‌سازی می‌شود. از طرفی خلاصه کردن فضاهای ذکر شده بدون درنظرگرفتن کلیات، باعث ناقص شدن مدل‌سازی می‌شود. پژوهش حاضر، در راستای تعریف جامع و مانع از فضاهای غیرضروری و بر مبنای هم‌پوشانی ذاتی و پایه‌یی شکل‌دهی به آن‌ها، تعداد ۱۵ فضای تعریف شده و مندرج در جدول ۳ را با یکدیگر ترکیب و به ۶ فضا تقلیل داده است که مطابق جدول ۴ عبارت‌اند از:

- فضای اصلی شماره‌ی ۱: فضای ثابت و قابل توسعه‌ی اجزاء ساخت،
- فضای اصلی شماره‌ی ۲: فضای کار منابع خرد ایستا،
- فضای اصلی شماره‌ی ۳: فضای کار منابع خرد پویا،
- فضای اصلی شماره‌ی ۴: فضای کار منابع کلان ایستا،
- فضای اصلی شماره‌ی ۵: فضای کار منابع کلان پویا،
- فضای اصلی شماره‌ی ۶: فضای پویای مسیر.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، فضاهای تعریف شده در فرایند اجرای کار، قابلیت توسعه و پیاده‌سازی در هر دو سطح خرد و کلان را دارند، اما در پژوهش حاضر، به‌علت محدوده‌ی نمونه‌ی موردی و روش‌های ساخت تعریف شده (جداره‌یی، سطحی و خطی) که سطح خرد است، فقط سه فضای تعریف شده‌ی اول برای شبیه‌سازی نمونه‌ی موردی محاسبه و مدل‌سازی شده‌اند.

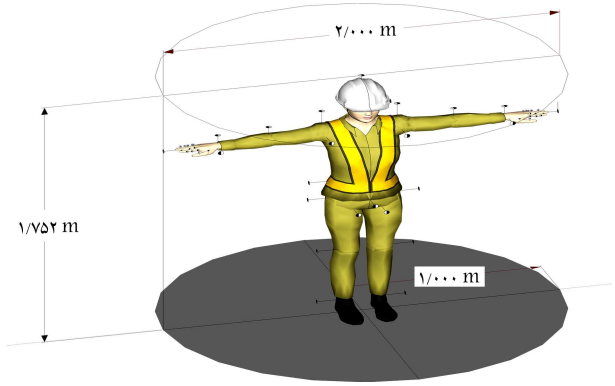
۲.۵. تعریف سرانه‌ها و محاسبه‌ی فضاهای موردنیاز منابع

پس از شرح ساختاری فعالیت‌ها و اهمیت منابع در اجرای فضای کار، تعریف سرانه‌ها و استانداردهای فضایی بسیار حائز اهمیت است. به‌منظور محاسبه‌ی میزان شدت تراکم فضاهای اجرای کار، اطلاعات مربوط به واحد حجمی کل منابع در محدوده‌ی پروژه موردنیاز است. برآورد فضای کاری نیروی انسانی در پروژه‌های ساخت، معمولاً توسط برنامه‌ریزان انجام می‌شود و یکی از چالش‌های موجود در برنامه‌ریزی آن‌هاست.[۱۳]

در پژوهش حاضر و براساس تعاریف فضایی، منابع در دو دسته‌ی فضاهای ایستا و پویا قرارگرفتند تا بتوانند شرایط حرکتی و مکانی هر منبع و فضای متناظر با آن را نمایش دهند. فضاهای منابع پویا برخلاف فضاهای ایستا، علاوه بر واحد و مقدار موردنیاز برای وجود منبع مذکور، به فضاهایی برای مسیر حرکتی، مانور و عملیات نیاز

جدول ۴. ترکیب فضاهای اجرای کار و تبدیل به ۶ فضای اصلی.

طبقه‌بندی فضایی						
سطح فضایی	فضاهای سطح خرد		فضاهای سطح کلان		فضای مسیرها	
شرایط فضایی	ایستا	پویا	ایستا	پویا	پویا	
اجزاء ساخت	فضای شماره‌ی ۱: فضای ثابت و قابل توسعه‌ی اجزاء ساخت					
پروژه: نیروی انسانی	فضای شماره‌ی ۲: فضای منابع خرد ایستا	فضای شماره‌ی ۳: فضای منابع خرد پویا	فضای شماره‌ی ۴: فضای منابع کلان ایستا	فضای شماره‌ی ۵: فضای منابع کلان پویا	فضای شماره‌ی ۶: فضای منابع کلان پویا	
پروژه: ابزار و تجهیزات						
پروژه: مواد و مصالح						



شکل ۲. سرانه‌ی فضایی یک نفر نیروی انسانی ایستا.

دارند. نحوه‌ی محاسبه‌ی فضاهای اجرای کار باید تضمین کند که فضای کاری هر نیروی انسانی به‌اندازه‌ی کافی بزرگ است تا تعامل بین آن‌ها و جابه‌جایی مصالح و تجهیزات به سهولت امکان‌پذیر باشد. با مطالعه‌ی استاندارد نویفرت[۱۲،۳۹] در رابطه با ابعاد و فضاهای موردنیاز نیروی انسانی در فعالیت‌های ساخت، تعداد ۱۴ حرکت و شرایط مختلف فضای اجرای کار مشخص شده است. یک نیروی فعال با واحد نفر ـ ساعت می‌تواند با قرارگرفتن در مرکز دایره‌یی با شعاع ۱ متر به‌صورت ایستا فعالیت کند. این وضعیت حجمی باعث ایجاد مساحتی در حدود ۳/۱۴ مترمربع و ۵/۵ مترمکعب برای هر نفر می‌شود. همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سرانه‌ی فضای موردنیاز برای یک نفر نیروی انسانی در حالت ایستا، معادل ۵/۵ مترمکعب است.

در پژوهش حاضر، از آنالیز منابع جهت محاسبه‌ی فضای نیروی انسانی و مصالح استفاده شده است. بدین منظور، واحد حجم فضای نیروی انسانی در مجموع نفر ـ ساعت نیروی انسانی موردنیاز واحد فعالیت (Mh_i) و طول خط فعالیت حرکت نیروی انسانی (l_{length}) ضرب شده است تا حجم کل فضای کاری موردنیاز منابع انسانی (فضای کار منابع خرد پویا) (V_{m^3}) براساس رابطه‌ی ۳ محاسبه شود:

$$V_{m^3} \geq (3/14 * r^2 * h) * (\sum_{i=1}^{n} Mh_i) * l_{length} \qquad (3)$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه‌ی ۳ به این صورت تعریف می‌شود:

- **واحد حجم فضای نیروی انسانی:** مقدار حجم فضای موردنیاز برای کار یک نفر نیروی انسانی در حالت ایستا بر حسب مترمکعب (این مقدار براساس حجم استوانه‌یی به ارتفاع (h) و شعاع (r) در نظرگرفته شده است که برای ارتفاع ۱/۷۵ متر و شعاع ۱ متر معادل ۵/۵ مترمکعب محاسبه شده است).
- **مجموع نفر ـ ساعت نیروی انسانی موردنیاز واحد فعالیت (Mh_i)** : پارامتر نفر ـ ساعت نیروی انسانی براساس آنالیز تجزیه‌ی بها و از مجموع حاصل‌ضرب مقدار نفر ـ ساعت موردنیاز برای اجرای واحد فعالیت در ضریب عاملیت آن منبع حاصل می‌شود (به‌عنوان مثال اگر برای اجرای ۱ مترمربع دیوارچینی براساس آنالیز فهرست بهاء، مقدار ۱/۳۵ نفر ـ ساعت کارگر ساده با ضریب عاملیت ۱ و مقدار ۰/۳ نفر ـ ساعت بنّای سفت‌کار با ضریب عاملیت ۱ و مقدار ۰/۳ نفر ـ ساعت کمک بنّای سفت‌کار نیاز است، مجموع نفر ـ ساعت نیروی انسانی موردنیاز برای واحد اجرای فعالیت، معادل ۱/۹۵ نفر ـ ساعت محاسبه می‌شود).
- **طول خط فعالیت حرکت نیروی انسانی (l_{length})** : طول خط فعالیت حرکت نیروی انسانی، عبارت از فاصله‌ی حرکتی موردنیاز برای انجام فعالیت موردنظر بر روی محور طولی جزء نهایی ساخت بر حسب متر است (به‌عنوان مثال، اگر منبع انسانی موردنظر برای اجرای دیوارچینی به مساحت ۲۶/۲۵ مترمربع با طول ۷/۵ متر و ارتفاع ۳/۵ متر کار می‌کند، طول خط فعالیت موردنظر معادل ۵/۵ متر است).

براساس فهرست تجهیزات و ماشین‌آلات موردنیاز و مقدار هر یک از آن‌ها برای تولید یک واحد فعالیت، می‌توان میزان حجمی هر دستگاه را تعریف کرد. به علت ماهیت غیرمصرفی تجهیزات و ماشین‌آلات، مقدار آن‌ها با اجرای فعالیت تغییر نمی‌کند و ثابت است، لذا مجموع مقدار دستگاه ـ ساعت در ضریب عاملیت آن دستگاه، به عنوان تعداد تجهیزات موردنیاز برای واحد فعالیت در نظرگرفته می‌شود. حاصل‌ضرب ناشی از حجم استاندارد تجهیزات و ماشین‌آلات ثابت در تعداد آن‌ها، به‌عنوان حجم کل برای فضای کاری نهایی موردنیاز ماشین‌آلات تعیین می‌شود. نظر به اینکه محدوده‌ی پژوهش حاضر در برنامه‌ریزی فضاهای اجرای کار در سطح خرد و قابل دسترس طبقات ساخت است، محاسبه‌ی فضای اجرای کار ماشین‌آلات موردنیاز نیست و برای نمونه‌ی موردی پژوهش حاضر ضرورتی ندارد. هر چند در مبنای تعریف و محاسبه‌ی فضاهای اجرای کار پژوهش حاضر، قابلیت کامل توسعه‌ی تعاریف و تعمیم آن‌ها برای برنامه‌ریزی پروژه‌های کلان و سایت‌ها وجود دارد.

مصالح موردنیاز، یگانه منبع در اجرای فعالیت‌های ساخت است که حالت مصرفی دارد و در ابتدای دوره‌ی زمانی در بیشینه‌ی حالت فضایی خود قرار دارد و با مصرف مقدار آن کاهش می‌یابد. با توجه به تخصیص فعالیت‌ها و فضاهای اجرای کار به صورت روزانه، در پژوهش حاضر، بیشترین فضای موردنیاز مصالح

در هر روز به‌عنوان حجم کل فضای کاری موردنیاز مصالح (V_{m^3}) در فعالیت‌های ساخت روزانه محاسبه شده است. نظر به اینکه واحد مصالح مختلف (مثال: کیلوگرم، مترمکعب، مترمربع، قالب و ...) برای اجرای یک واحد کار، متفاوت است، لذا باید حجم فضای کاری موردنیاز هر مصالح به‌طور جداگانه برای یک فعالیت محاسبه و حاصل آن‌ها تجمیع شود. بدین منظور، مجموع ناشی از حاصل‌ضرب واحد حجم فضای مصالح (v_s) در مقدار مصالح موردنیاز واحد فعالیت (U_{co}) و در مقدار جزء ساخت (A_r)، برای تعیین حجم فضای کاری کل موردنیاز مصالح (فضای کار منابع خرد ایستا) (V_{m^3}) مطابق رابطه‌ی ۴ حاصل می‌شود:

$$V_{m^3} \geq \sum(V_s * U_{co} * A_r) \qquad (۴)$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه‌ی ۴ به این صورت تعریف می‌شوند:

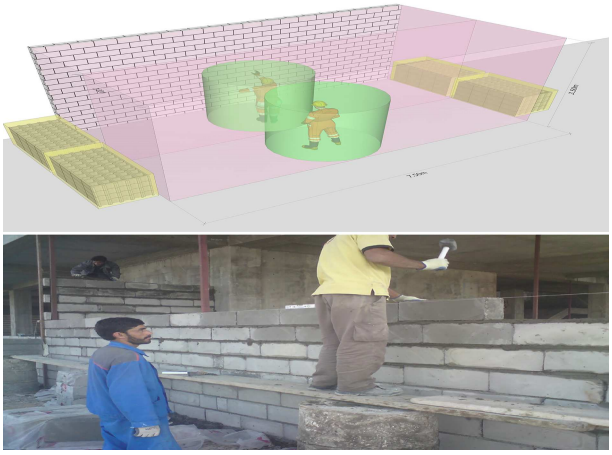
- **واحد حجم فضای مصالح (v_s)** : مقدار حجم فضایی موردنیاز برای واحد مصالح در حالت ایستا بر حسب مترمکعب است که براساس بانک‌های اطلاعاتی قابل حصول است (به‌عنوان مثال، یک قالب بلوک به عمق ۲۰ سانتی‌متر، طول ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، دارای واحد حجمی ۰٫۰۱۶ مترمکعب است).
- **مقدار مصالح موردنیاز واحد فعالیت (U_{co})**: پارامتر (U_{co}) براساس آنالیز تجزیه‌ی بها و از حاصل‌ضرب مقدار موردنیاز هر یک از مصالح برای اجرای واحد فعالیت در ضریب عاملیت آن منبع حاصل می‌شود (به‌عنوان مثال، اگر برای اجرای ۱ مترمربع دیوارچینی براساس آنالیز فهرست بها، مقدار ۱۱٫۳۴ قالب بلوک با ضریب عاملیت ۱ موردنیاز است، مجموع مقدار قالب موردنیاز برای واحد اجرای فعالیت، معادل ۱۱٫۳۴ قالب بلوک محاسبه می‌شود).
- **مقدار جزء ساخت (A_r)** : مقدار نهایی جزء ساخت بر حسب واحد فعالیت مرتبط مشخص می‌شود (به‌عنوان مثال، متوسط مساحت جزء ساخت برای اجرای دیوارچینی در یک قطاع یک روزه، معادل ۲۶٫۲۵ مترمربع است).

براساس روابط ۳ و ۴، یک اکیپ کاری برای تولید قطاع یک روزه‌ی دیوارچینی با مساحت ۲۶٫۲۵ مترمربع و طول خط ۵٫۵ متر، دست‌کم به ۱۱۷ مترمکعب فضای منابع انسانی نیاز دارد. با توجه به مساحت دیوارچینی و مقدار قالب بلوک سیمانی موردنیاز برای تولید ۱ مترمربع دیوارچینی، حجم مصالح موردنیاز معادل ۴٫۷۶ مترمکعب به‌صورت روزانه است، تا تعداد ۲۹۸ قالب بلوک سیمانی در محدوده‌ی کناری نیروی انسانی جای‌گذاری شود (شکل ۳). احجام مذکور برای عملیات دیوارچینی براساس رابطه‌های ذکر شده به این صورت محاسبه شده است:

$$\begin{cases} ۱۱۷/۸۶ \geq (۳/۱۴ * ۱ * ۳/۵) * (۱/۹۵) * ۵/۵ \\ ۴/۷۶ = (۰/۲ * ۰/۲ * ۰/۴) * ۱۱/۳۴ * ۲۶/۲۵ \end{cases}$$

۳.۵. تیپ‌بندی روش‌های اجرای کار و شکل‌دهی فضاها

در پژوهش حاضر با ترکیب اطلاعات ورودی محوری، مانند: تعاریف فضاهای اجرای کار، روش اجرای فعالیت و شکل جزء نهایی ساخت، فضای اجرای کار شکل‌دهی شده است. فرم فضاها و همچنین نحوه‌ی جای‌گذاری آن‌ها در مدل‌های چندبعدی تا حد زیادی به شکل جزء نهایی ساخت و همچنین روش اجرای فعالیت‌ها بستگی دارد. برای ترکیب فضاهای تعریف شده و روش‌های اجرا، نیاز به دسته‌بندی فعالیت‌های اشاره‌شده براساس خصوصیات مشترک آن‌هاست. در



شکل ۳. نمونه فضای اجرای کار ایجاد شده برای یک جزء ساخت در یک روز.

برنامه‌ریزی پروژه در سطح خرد (طبقه) می‌توان سه نوع تیپ برای تقسیم‌بندی فعالیت‌ها و روش‌های ساخت مطرح کرد. طبقه‌بندی روش‌های ساخت و فعالیت‌ها براساس مکان اجرا، محور اجزاء ساخت، و همچنین شکل حرکتی فعالیت‌ها ایجاد شده است. سه دسته‌ی ذکر شده عبارت‌اند از: الف) روش‌های جداره‌یی (محدوده‌یی و پیرامونی)، ب) فعالیت‌های سطحی (کفی و سقفی) و ج) فعالیت‌های خطی.

۱.۳.۵. فعالیت‌های تیپ جداره‌یی (محدوده‌یی و پیرامونی)

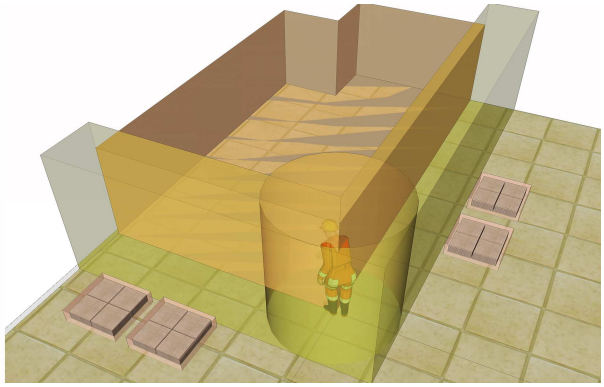
فعالیت‌های تیپ جداره‌یی، فعالیت‌هایی را شامل می‌شوند که فضای موردنیاز برای تکمیل یک جزء ساخت در فضای قابل‌دسترس طبقه، تداخل ایجاد نمی‌کند و فقط حریم طبقه را محدود می‌کند. فضای کار منابع ایستا و پویای خرد در راستای محور شکل‌گیری جزء نهایی ساخت قرار می‌گیرد. در امتداد محور توسعه‌ی جزء نهایی ساخت و در فضای داخلی مجاور شی نهایی، فضای نیروی انسانی و ابزار قابل استفاده (فضای کار منابع خرد پویا) قرار می‌گیرد. فضای تجهیزات ثابت و همچنین مصالح دپو شده و قابل دسترس طبقه (فضای کار منابع خرد ایستا)، در پشت و کناره‌های آن و به‌عنوان فضاهای پوششی جای‌گذاری می‌شود. فعالیت‌هایی مانند بلوک‌چینی و عملیات گچ و خاک در این دسته در نظر گرفته می‌شود.

۲.۳.۵. فعالیت‌های تیپ سطحی (کفی و سقفی)

در فعالیت‌های تیپ سطحی، علاوه بر فضای موردنیاز منابع، توسعه‌ی اجزاء نهایی ساخت نیز فضای سطح طبقه را اشغال می‌کند. به‌طوری که هم‌زمان با پیشرفت فعالیت و توسعه‌ی جزء ساخت، فضاهای کاری مذکور کاهش می‌یابد و بلااستفاده و غیرقابل دسترس می‌شود. فعالیت‌های مذکور که اجزاء توسعه یافته‌ی سطحی دارند، می‌توانند در کف و یا سقف اجرا شوند؛ بنابراین، دسترسی به فضای متناظر عمودی آن‌ها جهت اجرای ایمنی و تکمیل فرایند نهایی روزانه، بلوکه و غیرقابل‌دسترس می‌شود. فضای موردنیاز نیروی انسانی و ابزار قابل دسترس در طول خط نهایی جزء ساخت یک روز قرار می‌گیرد. همچنین فضای موردنیاز جهت تأمین و دسترسی به مصالح و تجهیزات ثابت در پشت فضای نیروی انسانی تعبیه می‌شود. از فعالیت‌های این گروه می‌توان به اجرای سرامیک کف، عملیات زیرسازی کف و غیره اشاره کرد (شکل ۴).

۳.۳.۵. فعالیت‌های تیپ خطی

فعالیت‌های تیپ خطی، بیشتر شامل فعالیت‌های سقفی و گاهی کفی است، که جزء ساخت نهایی در آن‌ها به فرم طولی و نامنظم است و فضاهای منابع موردنیاز



شکل ۴. فضای کار تیپ فعالیت سطحی.

شکل ۵. فضای کار تیپ فعالیت خطی.

باید در طول محور اجزاء مذکور شکل گیرد. فضای موردنیاز فعالیت‌های تیپ خطی برخلاف فعالیت‌های جداره‌یی، سطح طبقه را اشغال می‌کند؛ اما میزان آن به نسبت فعالیت‌های سطحی بسیار کمتر و به‌صورت خطی است و فضای کار منابع خرد پویا به‌موازات و در طول محور اصلی شی ساخت براساس محاسبات میزان منابع موردنیاز قرار می‌گیرد. فضای مربوط به مصالح و مواد اولیه با توجه به حجم کم آن‌ها و یا سرهم‌بندی در خارج سطح طبقه، قابلیت ترکیب با فضای نیروی انسانی را دارد. اجرای کانال‌های هوا، لوله‌کشی تأسیسات مربوط به اسپرینکلر[۱۳] و فن‌کوئل، اجرای سینی کابل و دیوارهای داخلی درای وال[۱۴] در این گروه جای می‌گیرند (شکل ۵).

همان‌طور که پیشتر عنوان شد، فرم‌دهی فضاهای اجرای کار با تکیه بر عوامل متعددی صورت پذیرفته است. در ابتدا، فضاهای اجرای کار بر پایه‌ی منابع و جزء نهایی ساخت تعریف و پس از آن فضاهای موردنیاز براساس محدوده‌ی پروژه و سطح برنامه‌ریزی انتخاب شده است. با آنالیز منابع و تعیین مقدار منابع مورداحتیاج برای ایجاد اجزاء ساخت یک روزه و همچنین تعریف سرانه‌های فضایی، میزان حجمی منابع ساخت برآورد شده است. در ادامه و با دسته‌بندی و تیپ‌بندی ماهیت روش‌های اجرایی، شکل‌گیری فضاهای ذکر شده و نحوه‌ی قرارگیری و چیدمان آن‌ها نسبت به یکدیگر و جزء نهایی ساخت ممکن شده و تیپ‌بندی اخیر، کمک بسزایی در سامان‌دهی فضاهای اجرای کار و ترکیب‌بندی این فضاها کرده است. درنهایت، مهم‌ترین عامل در فرم‌دهی فضایی که شکل جزء نهایی ساخت و محور خطی اجزاء مذکور است، استفاده و احجام هندسی شفاف فضاهای اجرای کار پویا و ایستا شکل‌دهی شده است.

۶. شبیه‌سازی مدل پنج بعدی کَد و تشخیص تداخلات فضای اجرای کار (مرحله‌ی سوم)

نیاز به مکانیزه شدن فرایند ایجاد مدل، علاوه بر تسریع در مدل‌سازی به خروجی‌ها اعتبار ویژه‌یی می‌بخشد. ارتباط بین اطلاعات به‌دست آمده از مراحل قبلی، شامل: مدل‌های سه‌بعدی اشیاء ساخت، مدل‌های سه‌بعدی فضاهای اجرای کار منابع و همچنین فعالیت‌های موجود در ساختار شکست کار، اهمیت ویژه‌یی دارد. در بیشتر مطالعات انجام شده، تأکید بر ارتباط‌های دوبه‌دو بین فضاهای اجرای کار (شی) و اجزاء سه‌بعدی ساخت (شی) و یا اجزاء سه‌بعدی (شی) و فعالیت‌ها مطرح بوده و ارتباط و ترکیب سه‌طرفه‌ی فعالیت‌های ساخت با فضاهای اجرای کار (شی) و اجزاء ساخت (شی) ایجاد نشده است. این مرحله خود نیز از دو گام شبیه‌سازی مدل‌های پنج‌بعدی فضای اجرای کار و همچنین ثبت تداخلات و تعارضات فضایی تشکیل می‌شود. در گام نخست، نحوه‌ی ارتباط اطلاعات و ورودی‌های به دست آمده از دو مرحله‌ی قبل در نرم‌افزار شبیه‌سازی جهت تولید مدل تشریح می‌شود.

در مطالعات پیشین، ارتباط در محیط شبیه‌سازی بین فعالیت‌ها و اجزاء سه‌بعدی متناظر اجزاء ساخت یا بین فعالیت‌ها و اجزاء سه‌بعدی متناظر با فضاهای اجرای کار برقرار شده است. پژوهش حاضر، با این رویکرد که اجزاء سه بعدی ساخت، ماهیتی پایدار دارند و پس از به وجود آمدن آن‌ها در شبیه‌سازی تا انتها دائمی[۱۵] می‌مانند و منجر به محدودیت‌هایی می‌شوند، لذا احجام ذکر شده را مجزا از احجام متناظر با فضاهای اجرای کار تعریف کرده است. از طرفی احجام متناظر با فضاهای اجرای کار که حالتی موقتی[۱۶] دارد، را به‌صورت نمایش موقت تعریف و هر کدام از این دو جزء (حجم) را به یک فعالیت مرتبط کرده است. در واقع در زمان‌بندی مربوط به هر فعالیت، علاوه بر شکست فعالیت به تعداد روزهای انجام آن کار، برای هر جزء ساخت و فضای اجرای کار به‌صورت مجزا فعالیت‌هایی تعریف می‌شود. سپس کلیه‌ی فعالیت‌های یک روزه‌ی مرتبط همراه اجزاء ساخت یک روزه و احجام فضای اجرای کار متناظر با آن‌ها به محیط شبیه‌سازی وارد و در فرایندی تکنیکال (فنی) به یکدیگر ارتباط می‌یابند. هر فعالیت یک روزه با دو حجم متناظر با جزء ساخت (پایدار) و فضای اجرای کار (موقت) ارتباط داده می‌شود و شبیه‌سازی می‌شود (تصویر). در انتها، شناسه‌ی فعالیت مرتبط و دو جزء ساخت و فضای اجرای کار با فرمت‌های مشخص در محیط BIM ارتباط داده می شوند که توضیحات فنی آن‌ها در ادامه ارائه شده است.

با ترکیب روش‌های خودکار و دستی، روشی نوین و آسان برای مدل‌سازی فضاهای اجرای کار ارائه شده است که هم‌زمان ارتباط بین فعالیت‌های ساخت، اجزاء سه‌بعدی ساخت و فضاهای سه‌بعدی منابع ساخت به بهترین نحو حاصل شود. در سیستم مذکور، ساختار اجزاء سه‌بعدی ساخت و همچنین فضاهای طراحی شده برای منابع ساخت با فرمت IFC [۱۷] و یا FBX [۱۸] به نرم‌افزار شبیه‌سازی داخل می‌شوند. مدل‌های سه‌بعدی اجزاء و فضاهای مذکور با کُدینگ تعریف شده، ترکیب و در پانل درخت انتخاب [۱۹] نرم‌افزار نویسورک[۲۰] قرار می‌گیرند. برنامه‌ی زمان‌بندی اولیه که شامل فهرست فعالیت‌ها و ساختار شکست است (گام‌های ۲ و ۳ مرحله‌ی اول) از نرم‌افزار زمان‌بندی مایکروسافت پروجکت به منبع اطلاعات نرم‌افزار شبیه‌سازی نویسورک اضافه و همگام شده است. با وارد کردن اطلاعات برنامه‌ی زمان‌بندی اولیه، فعالیت‌های اجرای کار و زمان انجام آن‌ها در قسمت زمان‌بندی

نرم‌افزار شبیه‌سازی مشاهده می‌شود، اما هنوز ارتباطی بین فعالیت‌ها و اجزاء سه‌بعدی حاصل نشده است. با اجرای فرمان خروج به مجموعه[21] نام فعالیت‌های موجود در برنامه‌ی زمان‌بندی به پانل مدیریت مجموعه‌ها[22] انتقال می‌یابد و شرایط را برای اتصال اجزاء سه‌بعدی به فعالیت‌ها مهیا می‌کند. در مرحله‌ی اخیر، آیتم ضمیمه شده به فعالیت‌های زمان‌بندی در مدیریت مجموعه‌ها به وجود می‌آید که با انتخاب و رها کردن[23] اجزاء سه‌بعدی متناظر با فضاهای اجرای کار و اجزاء ساخت در آیتم‌های مذکور می‌توان ارتباطی کامل و سه طرفه بین اجزاء سه‌بعدی ذکر شده و فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی ایجاد کرد. مدیر پروژه می‌تواند علاوه بر تکمیل ارتباط‌ها و توالی صحیح فعالیت‌ها، برنامه‌ی زمان‌بندی را در نرم‌افزارهای تخصصی برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌ی مایکروسافت پروجکت به‌روزرسانی و تأثیر زمانی، فضایی و هزینه‌یی آن را در مدل پنج‌بعدی ملاحظه کند.

دوره‌ها و بازه‌های زمانی شبیه‌سازی، نقش عمده‌یی در کیفیت، کارایی و اعتبار خروجی‌ها و اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی مدل‌ها ایفا می‌کند. مدل‌ها با بازه‌های زمانی بسیار کوچک (ساعتی)، نیاز به اجزاء سه‌بعدی با جزئیات فراوان دارند. تولید جزئیات اخیر، علاوه بر زمان‌بر بودن، بسیار طاقت‌فرساست و تضمینی برای بهینه بودن خروجی‌های شبیه‌سازی ایجاد نمی‌کند. از طرفی مدل‌هایی با بازه‌های زمانی زیاد (هفته‌یی و ماهانه)، توانایی پوشش کامل نیازها و اطلاعات برنامه‌ریزی را ندارند، که منجر به ایجاد مدلی معیوب می‌شود. در سیستم ذکر شده با تفکیک مدل‌های سه‌بعدی به اجزاء یک‌روزه‌ی ساخت، شبیه‌سازی در بازه‌ی روزانه صورت می‌گیرد. در اجرای پروژه‌های ساختمانی توسط اکیپ‌های مختلف، بازه‌های زمانی روزانه با ۸ ساعت کاری، برای شبیه‌سازی و بررسی میزان تعارضات و تداخلات فضای اجرای کار بسیار مناسب و عملیاتی است. همچنین دومین گام از مرحله‌ی سوم، مربوط به تشخیص هم‌پوشانی‌های زمانی و ثبت تداخلات فضایی به‌صورت تصویری در محیط شبیه‌سازی است. هم‌پوشانی زمانی بین فعالیت‌ها، پیش‌نیاز وقوع تداخلات فضایی است، اما شناسایی و ثبت نهایی تداخلات فضایی فقط با شبیه‌سازی تصویری ممکن و نهایی می‌شود. بنابراین، در ابتدا آزمون هم‌پوشانی زمانی بین هر جفت فعالیت ممکن در شبکه‌ی زمان‌بندی انجام می‌شود، تا فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی شناسایی شوند. این مورد کمک بسیاری در محدود کردن بازه‌ی بررسی تداخلات بین فعالیت‌ها می‌کند و جفت فعالیت‌های با عدم هم‌پوشانی زمانی، از بررسی تداخلات فضایی در محیط شبیه‌سازی حذف می‌شوند، هر چند تشخیص نهایی تداخلات فضایی در شبیه‌سازی به‌صورت تصویری و با استفاده از مکانیسم‌های هندسی ممکن است. بر این اساس، مکانیسمی مقایسه‌یی ارائه شده است تا زوج فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی براساس زمان‌های شروع و پایان فعالیت‌هایشان مشخص و فیلتر شوند. نحوه‌ی مقایسه‌ی زمان فعالیت‌های مذکور در جدول ۵ ارائه شده است.

اگر زمان شروع و پایان فعالیت اول به ترتیب (SD_1) و(FD_1) و زمان شروع و پایان فعالیت دوم به ترتیب (SD_2) و (FD_2) باشند، مقایسه‌ی زمان‌های شروع و پایان در ۴ حالت، عبارت‌اند از:

- اختلاف زمان شروع فعالیت دوم از زمان شروع فعالیت اول $(SD_2 - SD_1 = X_1)$،
- اختلاف زمان پایان فعالیت دوم از زمان پایان فعالیت اول $(FD_2 - FD_1 = Y_1)$،
- اختلاف زمان پایان فعالیت دوم از زمان شروع فعالیت اول $(FD_2 - SD_1 = Z_1)$،
- اختلاف زمان شروع فعالیت دوم از زمان پایان فعالیت اول $(SD_2 - FD_1 = V_1)$.

اگر ۴ متغیر حاصل از اختلاف زمان‌های فعالیت دوم نسبت به فعالیت اول، بزرگ‌تر از صفر (مثبت) و یا هر ۴ گزینه، کوچک‌تر از صفر (منفی) باشند، هیچ‌گونه هم‌پوشانی زمانی وجود نخواهد داشت؛ هر حالتی به غیر از دو حالت مطرح شده، مبین هم‌پوشانی زمانی بین دو فعالیت اول و دوم است. شرایط ذکر شده‌ی هم‌پوشانی زمانی، مطابق با پارامترهای تعریف شده در رابطه‌ی ۵ ارائه شده است:

$$IF((AND(X_1 \geq 0, Y_1 \geq 0, Z_1 \geq 0, V_1 \geq 0)) \\ +OR(AND(X_1 \leq 0, Y_1 \leq 0, Z_1 \leq 0, V_1 \leq 0)), \\ ''No-Overlap'',''Overlap'') \quad (5)$$

با انجام سنجش مقایسه‌یی از فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده، فهرست فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی استخراج می‌شود. سپس تعداد و اندازه‌ی تداخل هندسی احجام سه‌بعدی متناظر با فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی به‌صورت دو به دو در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی و ثبت می‌شود. درواقع، تشخیص برخورد هندسی هر فعالیت با تمامی فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی با آن بررسی می‌شود تا تعداد و مشخصات تداخلات تشخیص داده شود. در هر دوره‌ی شبیه‌سازی، فعالیت‌هایی که قبلاً بررسی شده‌اند، از فهرست حذف می‌شوند. در انتها، تعداد و اندازه‌ی فاصله‌ی تداخلات و تعارضات فضایی اجزاء سه‌بعدی با توجه به زمان وقوع آن‌ها در هرروز به‌صورت تصویری و عددی ثبت می‌شود.

چنانچه زمان انجام یک پروژه، d روز باشد و تعداد فعالیت‌های موجود در روز iاُم برابر n_i باشد، بیشترین و کمترین تعداد تداخلات در آن روز (d_i) در بازه‌ی صفر تا حاصل‌جمع اعداد متوالی طبیعی (عدد مثلثی) فعالیت‌های آن روز ممکن است. رابطه‌ی ۶، بازه‌ی ممکن برای تعداد تداخلات m_i را نشان می‌دهد:

$$0 \leq m_i \leq \sum_{k=0}^{n_i-1} k = \frac{(n_i-1)\,n_i}{2} \quad (6)$$

براساس امکان تداخلات محاسبه شده در هرروز و هم‌پوشانی‌های ممکن، شبیه‌سازی صورت‌گرفته و تداخلات اتفاق‌افتاده در هر روز ثبت می‌شود. چنانچه تعداد تداخلات ثبت شده در روز iاُم براساس اجرای شبیه‌سازی فضاهای اجرای کار معادل m_i و فاصله‌ی ایجاد شده از هر تداخل به‌اندازه‌ی l_{ij} باشد، مجموع فاصله‌ی تداخلات فضایی به‌صورت رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

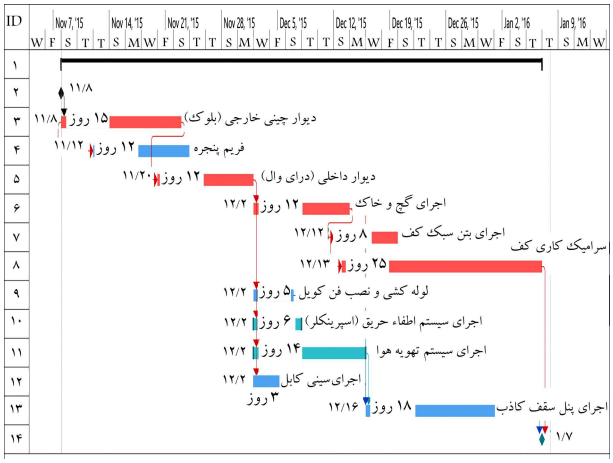
$$L_i = \sum_{j=1}^{m} l_{ij} \quad (7)$$

جدول ۵. محاسبه‌ی هم‌پوشانی زمانی فعالیت‌ها.

فعالیت			
نام	۱	۲	اختلاف ۱ و ۲
زمان شروع	(SD_1)	(SD_2)	
زمان پایان	(FD_1)	(FD_2)	
$SD_2 - SD_1$			X_1
$FD_2 - FD_1$			Y_1
$FD_2 - SD_1$			Z_1
$SD_2 - FD_1$			V_1

۷. نمونه‌ی موردی

پروژه‌ی اداری وزارت جهاد کشاورزی در ۳ فاز طراحی و در حال اجراست و در ناحیه‌ی ۳ تهران در خیابان طالقانی، جنب وزارت نفت قرار گرفته و طبقه‌ی ۱۶ آن



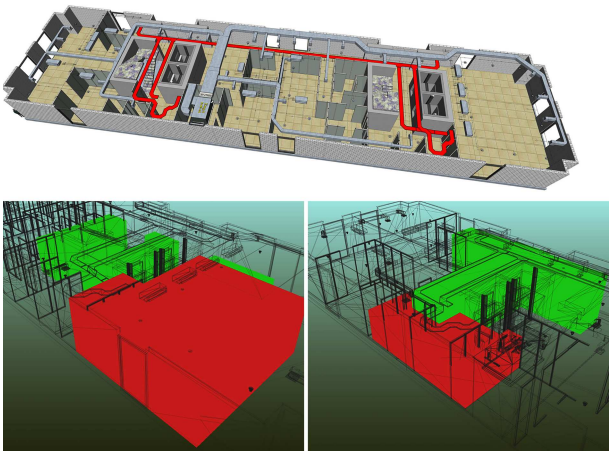
شکل ۶. برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌ی موردی.

با کاربری کامل اداری به مساحت ۸۰۱ مترمربع به‌عنوان نمونه‌ی موردی استفاده شده است. عملیات اجرایی توسط پیمانکاران جزء و اکیپ‌های اجرایی در قالب ۱۲ فعالیت مختلف و در ۳ بخش ابنیه، تأسیسات برقی و تأسیسات مکانیکی اصلی انجام شده است. مدل‌های سه‌بعدی اجزاء ساخت در حوزه‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار رویت اتودسک، طراحی و ساختار شکست اجزاء از مدارک مذکور استخراج شده است. علاوه بر ایجاد تناظر بین ساختار شکست اجزاء و ساختار شکست کار، متره‌ی اجزاء ساخت و فعالیت‌های متناظر به‌صورت خودکار صورت گرفته و در سیستم ثبت شده است. با آنالیز منابع و متره‌ی کلی فعالیت‌ها، زمان موردنیاز برای انجام فعالیت‌ها محاسبه و با نظرکارشناسان اجرایی روابط بین فعالیت‌ها تعیین شده است. اجرای عملیات تکمیلی طبقه‌ی ۱۶ پروژه‌ی حاضر به مدت ۶۰ روز کاری از تاریخ (۲۰۱۵/۱۱/۰۸) تا (۲۰۱۶/۰۱/۰۶) برنامه‌ریزی و اجزاء ساخت سه‌بعدی براساس تعداد روزهای فعالیت به اجزاء ساخت با حجم و مقدار یک روز شکسته شد. سپس اطلاعات ذکر شده در نرم‌افزار مایکروسافت پروجکت ثبت شد (شکل ۶).

اجزاء سه‌بعدی فضای اجرای کار منابع با توجه به معیارهای مطرح در نرم‌افزار گوگل اسکچاپ، طراحی و ایجاد شده است. نرم‌افزار اسکچاپ با داشتن خروجی‌های IFC و قابلیت بالا در سرعت کار، گزینه‌ی مناسبی برای تولید سه‌بعدی فضاهای اجرای کار است. با وارد کردن[۲۴] اجزاء سه‌بعدی و برنامه‌ی زمان‌بندی از نرم‌افزارهای مرتبط به نرم‌افزار شبیه‌سازی نویسورک، ارتباط بین فعالیت‌های برنامه‌ی زمان‌بندی، اجزاء سه‌بعدی ساخت و فضاهای اجرای کار به‌صورت نیمه‌خودکار برقرار شد.

زمان‌های شروع و پایان فعالیت‌های موجود در برنامه‌ی زمان‌بندی در رابطه‌ی ۵ جای‌گذاری و تعداد ۲۶ جفت فعالیت با هم‌پوشانی زمانی تشخیص داده شد. سپس میزان تداخلات و تعارضات زمانی ـ حجمی فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی در نرم‌افزار شبیه‌سازی، بررسی و برای دوره‌ی ۶۰ روزه، تعداد ۳۱ تعارض با تداخل بیشتر از حد ۰٫۵ متر مشخص شد. دو نمونه از تداخل‌های شبیه‌سازی و ثبت شده در روزهای ۴۳اُم و ۵۴اُم پروژه در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

با بررسی نتایج مشخص شد که روز سوم دسامبر سال ۲۰۱۵ (روز ۲۵اُم پروژه) با هم‌پوشانی زمانی ۵ فعالیت با مجموع فاصله‌ی تداخل ۱۴٫۲ متر، بحرانی‌ترین روز پروژه بوده است. روزهای ۱۴اُم و ۲۶اُم پروژه با تعداد ۳ تداخل در جایگاه بعدی قرار دارند. در شکل ۸الف، تعداد فعالیت‌های رخداده در هر روز با تعداد تداخلات فضایی ثبت شده در آن روز براساس شبیه‌سازی مقایسه شده است. شکل ۸ب،



شکل ۷. دو نمونه‌ی تداخل زمانی ـ فضایی ثبت شده در پروژه.

جدول ۶. مقایسه‌ی اطلاعات با استفاده از روش‌های همبستگی پیرسون و اسپیرمن.

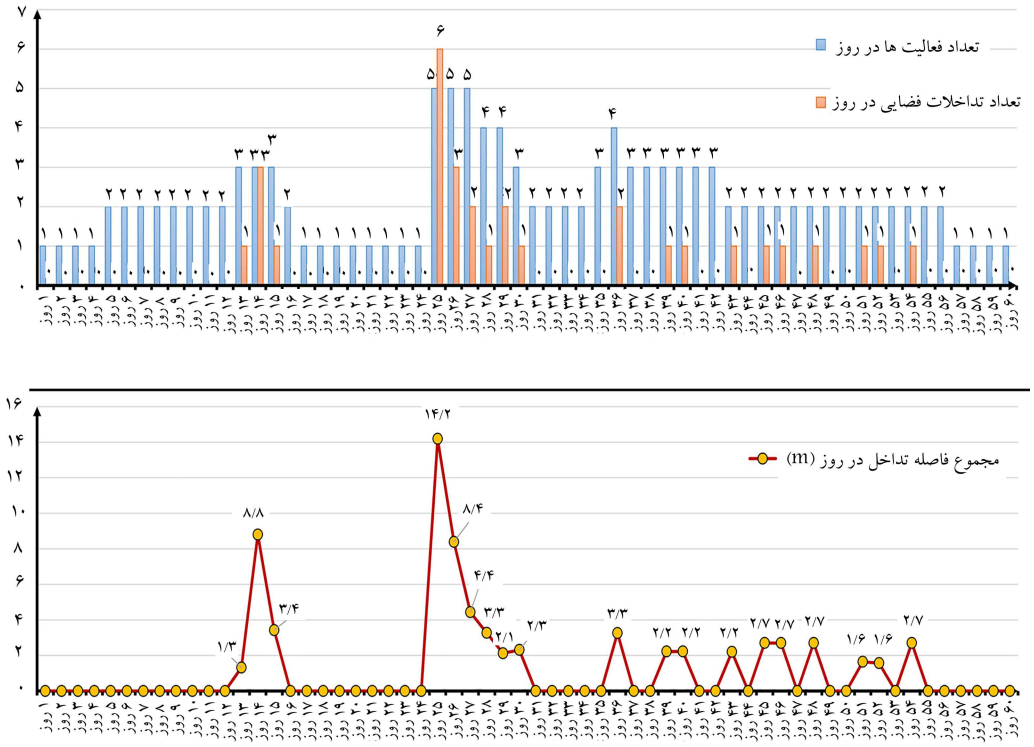
ضریب همبستگی اسپیرمن			
	n_i	m_i	l_i
m_i	۰٫۶۳۱		
l_i	۰٫۶۲۰	۰٫۹۸۵	
p_i	۱٫۰۰	۰٫۶۳۱	۰٫۶۲۰
ضریب همبستگی پیرسون			
	n_i	m_i	l_i
m_i	۰٫۷۲۰		
l_i	۰٫۶۸۶	۰٫۹۷۵	
p_i	۰٫۹۵۴	۰٫۷۸۸	۰٫۷۵۴

مجموع فاصله‌ی تداخل‌های فضاهای سه‌بعدی اجرای کار را بر حسب متر در هر روز نشان می‌دهد.

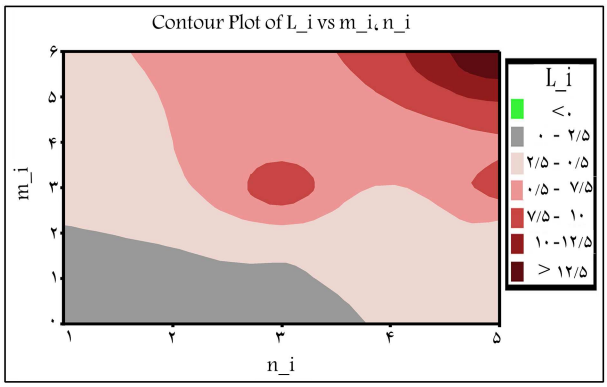
۸. آنالیز و اعتبارسنجی نتایج

در مرحله‌ی کنونی، ضریب همبستگی اطلاعات وارد شده و به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی در ۶۰ روز جهت صحت‌سنجی نتایج سنجیده می‌شود. نتایج همبستگی متغیرهای مستقل، مانند تعداد فعالیت‌های موجود در روز iاُم (n_i) و بیشترین تعداد تداخلات ممکن در آن روز (p_i) و همچنین متغیرهای وابسته، مانند تعداد تداخلات ثبت‌شده در روز iاُم (m_i) و مجموع فاصله‌ی تداخلات فضایی در آن روز (l_i) توسط دو روش ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن در جدول ۶ ارائه شده است. ضریب‌های همبستگی بین متغیرها با هر دو روش پیرسون و اسپیرمن، بسیار به هم نزدیک بودند و محدوده‌ی بالای ۰٫۶۲ در روش اسپیرمن و ۰٫۶۸ در روش پیرسون داشتند که ارتباط هم جهت و مؤثری را نشان می‌دهد. هر چند ضریب بالای بین متغیرهای (n_i) و (p_i) با توجه به رابطه‌ی ۶ قابل پیش‌بینی و واضح بود، اما در باقی موارد، اطلاعات نشان‌دهنده‌ی وابستگی مستقیم و بالا بوده‌اند.

هر چند هم‌پوشانی‌های زمانی فقط منجر به تداخلات فضای اجرای کار نمی‌شود و همچنین در تعارضات فضایی با تعداد برابر، میزان تداخلات در گستره‌ی متفاوتی براساس ماهیت و شرایط فضایی هر پروژه رخ می‌دهد، اما می‌توان با بررسی نسبت‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی، به آمار جالبی بین متغیرها دست یافت. با پیاده‌سازی



شکل ۸. نتایج تعداد و اندازه تداخلات در نمونه ورودی.



شکل ۹. نمودار کانتوری از مجموع فاصله‌ی تداخل فضایی به نسبت تعداد فعالیت‌ها و تداخلات.

مدل طراحی شده در یک طبقه‌ی واحد اداری، تعداد ۳۱ تداخل و تعارض فضای اجرای کار در ۱۹ روز از ۶۰ روز کل اجرای طبقه تشخیص داده شد. بیشینه‌ی تعداد تداخلات ممکن در ۴۴ روز کاری، ۱۰۸ عدد بوده است که براساس خروجی‌های شبیه‌سازی فقط تعداد ۳۱ تداخل معادل ۲۸٫۷٪ رخ داده است. هر چند میزان تداخلات فضایی در هر روز بر حسب تعداد متفاوت آن‌ها از ۱٫۶ متر تا ۱۴٫۴ متر متغیر بوده است اما با محاسبه‌ی مجموع فاصله‌ی تداخلات فضایی به میزان ۷۲٫۲ متر در کل شبیه‌سازی پروژه‌ی حاضر، متوسط هر تداخل فضایی معادل ۲٫۳ متر برآورد شد که می‌تواند تأثیر بالایی در کارآیی اکیپ های اجرایی و نیروهای انسانی فعال داشته باشد. شکل ۹، روابط بین سه متغیر را به‌صورت گرافیکی در دو بعد نشان می‌دهد. در نمودار کانتوری[۲۵] ارائه شده، مجموع فاصله‌ی تداخلات روزانه (l_i)، نسبت به دو متغیر تعداد فعالیت‌های موجود در روز iام (n_i) و همچنین تعداد تداخلات ثبت شده در روز iام (m_i) مشاهده می‌شود. همان‌طور که با افزایش فعالیت‌ها و تعداد تداخلات در روزهای کاری، مجموع فاصله‌ی تداخلات افزایش می‌یابد، اما روزهایی با تعداد ۳ و ۵ فعالیت، که دارای ۳ عدد تداخل ثبت شده هستند، در محدوده‌ی بالای ۷٫۵ تا ۱۰ متر از مجموع فاصله‌ی تداخلی جای دارند.

۹. نتیجه‌گیری

جریان کاری پویا در محیط پروژه‌های ساخت، نیاز به مدیریت فعال فضاهای اجرای کار منابع دارد. منابع فعالیت‌های ساخت، علاوه بر تعیین زمان و هزینه‌ی پروژه، شرایط و ترکیب‌بندی فضایی و سه‌بعدی منحصربه‌فردی را ایجاد می‌کنند. عدم درک شرایط فضای اجرای کار و تعارضات زمانی ـ فضایی منجر به کاهش محسوس بهره‌وری و کارآیی اکیپ‌های کاری و منابع می‌شود. تقلیل کارآیی پیمانکاران، باعث تغییر مشخصات زمانی، مانند: مسیر بحرانی، مدت‌زمان، و توالی فعالیت‌ها و همچنین هزینه‌های برنامه‌ریزی کل پروژه می‌شود. در پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک مدل پنج‌بعدی کَد از فعالیت‌های ساخت و منابع آن‌ها سعی در مدیریت هم‌زمان سه عامل: زمان، هزینه و فضای اجرایی شده است. همچنین با تعریف ماهیت روش‌های اجرای کار و فضاهای حاصل از روش‌های ذکر شده براساس محدوده و گستره‌ی پروژه، تعداد و مجموع فاصله‌ی تداخلات یافت شده از تعارضات فضایی در شبیه‌سازی، حالت واقع‌گرایانه‌یی یافته است.

در سیستم حاضر، با استفاده از ابزارها و نرم‌افزارهای در دسترس و پرکاربرد صنعت ساخت، تعارضات و تداخلات فضای اجرای کار برای اکیپ‌ها و نیروهای اجرایی به‌صورت روزانه بررسی و روزهای دارای بحران فضایی مشخص شده است. با مشخص کردن تعداد فعالیت‌های با هم‌پوشانی زمانی و همچنین تعداد و مجموع

فاصله‌ی تداخل‌های یافت شده می‌توان به دریافت کاملی از میزان تعارضات فضایی - زمانی در هر روز از پروژه رسید و اثر متقابل متغیرهای موردنظر را در یکدیگر سنجید. در مدل ارائه شده، همچنین اجزاء ساخت و فضاهای اجرای کار متناظر با آن‌ها به‌صورت قطاع‌های یک روزه طراحی و برنامه‌ریزی شده است که برنامه‌ریز را قادر می‌سازد تا در بازه‌ی مناسب روزانه، تعداد و میزان تعارضات را کاملاً درک کند. هر چند پژوهش حاضر، در تعریف فضاها جامعیت داشته و کلیه‌ی فضاهای خرد و کلان را پوشش داده و قابلیت تعمیم برای هر دو سطح را داشته است، اما روش‌های ساخت تعریف شده و نمونه‌ی موردی نوشتار حاضر، محدود به سطح خرد است. بنابراین محدوده‌ی بررسی پژوهش حاضر، فضاهای اجرای کار در سطح خرد و قابل دسترس طبقه است و ارتباط فضاهای عمودی و کلان، مانند سایت پروژه در مطالعات آتی قابل بررسی و کاوش است. علاوه بر مورد اشاره شده، ایجاد بانک‌های اطلاعاتی درخصوص استانداردها و سرانه‌های حجمی، ترکیب مدل‌سازی چندبعدی ساخت با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تعریف و توسعه‌ی راهبردهای حل تداخلات و همچنین بررسی میدانی به منظور مقایسه‌ی تداخلات در حالت شبیه‌سازی و شرایط واقعی کارگاه می‌توانند با هدف افزایش قابلیت توسعه و پیاده‌سازی فن‌آوری موردنظر به‌عنوان زمینه‌ی پژوهش‌های آتی موضوع پژوهش حاضر مطرح شود.

پانوشت‌ها

1. building information modeling (BIM)
2. 4D-CAD model
3. input based
4. object based
5. Autodesk revit
6. Google sketchup
7. Microsoft project
8. Navis work
9. plugin
10. product breakdown structure (PBS)
11. work breakdown structure (WBS)
12. Neufert standard
13. Sprinkler
14. Drywall
15. permanent
16. temporary
17. industry foundation class (IFC)
18. flimbox
19. selection tree
20. Naviswork manage
21. export to set
22. management sets
23. drag & drop
24. import
25. contour plot

منابع (References)

1. Kamat, V. and Martinez, J. "Visualizing simulated construction operations in 3D", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **15**(4), pp. 329-337 (2001).
2. Akinci, B., Fischen, M., Levitt, R. and et al. "Formalization and automation of time-space conflict analysis", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **16(2)**, pp. 124-134 (2002).
3. 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 (ITCon)*, **17**, pp. 213-236 (2012).
4. Chen Wu, I. and Chang Chiu, Y. "4D workspace conflict detection and analysis system", *In International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, Taipei, Taiwan (2010).
5. Guo, S. "Identification and resolution of work space conflicts in building construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(4), pp. 287-295 (2002).
6. Mallasi, Z. "Dynamic quantification and analysis of the construction workspace congestion utilising 4D visualisation", *Automation in Construction*, **15**(5), pp. 640-655 (2006).
7. Mofid, M., Hadjikhani, F. and et al. "An algorithm for solving space conflict in site construction", *Sharif Civil Engineering Journal*, **25**(51.1), pp. 61-68 (In Persian) (2010)
8. Jupp, J. "4D BIM for environmental planning and management", *Procedia Engineering*, **180**, pp. 190-201 (2017).
9. Winch, G. and North, S. "Critical space analysis", *Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(5), pp. 473-481 (2006).
10. Behzadan, A.H. "ARVISCOPE: Georeferenced visualization of dynamic construction processes in three-dimensional outdoor augmented reality", Dep. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor , MI, USA (2008).
11. Rohani, M., Fan, M. and Yu, C. "Advanced visualization and simulation techniques for modern construction management", *Indoor and Built Environment*, **23**(5), pp. 665-674 (2014).
12. Wang, H.J., Zhang, J.P. and Chau, K.W.A. "4D dynamic management for construction planning and resource utilization", *Automation in Construction*, **13**(5), pp. 575-589 (2004).
13. Heesom, D. "An analytical system for space planning on construction sites", Dep. of Civil and Environmental Engineering, University of Wolverhampton, Wolverhampton, UK (2004).
14. Thabet, W. and Beliveau, Y. "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings",

Journal of Construction Engineering and Management, **120**(1), pp. 96-116 (1994).

15. Thabet, W. and Beliveau, Y. "SCaRC: space-constrained resource-constrained scheduling system", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **11**(1), pp. 48-59 (1997).
16. Riley, D. and Sanvido, V. "Patterns of construction-space use in multistory buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, **121**(4), pp. 464-473 (1995).
17. 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).
18. Su, X. "A spatial temporal information model for construction planning", Dep. of Civil and Environmental Engineering, Purdue University,West Lafayette, Indiana, USA (2013).
19. Kassem, M., Dawood, N. and Chavada, R."Construction workspace management within an industry foundation class-compliant 4D tool", *Automation in Construction*, **5**(2), pp. 42-58 (2015).
20. Zhang, S., Teizer, J., Pradhananga, N. and et al. "Workforce location tracking to model, visualize and analyze workspace requirements in building information models for construction safety planning", *Automation in Construction*, **60**, pp. 74-86 (2015).
21. 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).
22. Chua , H.D.K., Yeoh, K.W. 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).
23. Kelsey, J., Winch, G. and Penn, A. "Understanding the project planning process: Requirements capture for the virtual construction site", University College London, Doc. No.15, UK, pp. 1-54 (2001).
24. Lee, J., Park, Y.-J., Choi, C.-H. and et al. "BIM-assisted labor productivity measurement method for structural formwork", *Automation in Construction*, **84**, pp. 121-132 (2017).
25. Marx, A. and Konig, M. "Modeling and simulating spatial requirements of construction activities", *In Simulation Conference (WSC)*, Washington, DC, USA.: IEEE (2013).
26. Waly, A.F. and Thabet, W.Y. "A virtual construction environment for preconstruction planning", *Automation in Construction*, 12(2), pp. 139-154 (2003).
27. Mallasi, Z. "Towards minimizing space-time conflicts between site activities using simple generic algorithm-the best execution strategy", *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, **14**(Special Issue Next Generation Construction IT: Technology Foresight, Future Studies, Roadmapping, and Scenario Planning), pp. 154-179 (2009).
28. Jang, H., Lee, S. and Choi, S. "Optimization of floor-level construction material layout using genetic Algorithms", *Automation in Construction*, **16**(4), pp. 531-545 (2007).
29. Amiri, R., Sardroud, J.M. and Soto, B.G.d. "BIM-based applications of metaheuristic algorithms to support the decision-making process: Uses in the planning of construction site layout", *Procedia Engineering*, **196**, pp. 558-564 (2017).
30. Mawlana, M., Hammad, A., Doriani, A. and et al. "Discrete event simulation and 4D modelling for elevated highway reconstruction projects", *In Proceedings of the XIVth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Moscow, Russia.: Moscow State University of Civil En-gineering (2012).
31. Parn, E.A., Edwards, D.J. and Sing, M.C.P. "Origins and probabilities of MEP and structural design clashes within a federated BIM model", *Automation in Construction*, **85**, pp. 209-219 (2018
32. Rohani, M., Shafabakhsh, G., Haddad, A. and et al. "Sensitivity analysis of workspace conflicts according to changing geometric conditions", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, **7**(1), pp. 1429-1435 (2017).
33. Qiankun, W., Zeng, G., Tingting, M. and et al. "Labor crew workspace analysis for prefabricated assemblies' installation: A 4D-BIM-based approach", *Engineering, Construction and Architectural Management*, **25**(3), pp. 374-411 (2018).
34. Mirzaei, A., Nasirzadeh, F., Parchami Jalal, M. and et al. "4D-BIM dynamic time-space conflict detection and quantification system for building construction projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, **144**(7), pp. 04018056 (2018).
35. Dawood, N., Scott, D., Sriprasert, E. and et al. "The virtual construction site (VIRCON) tools: An industrial evaluation", *Journal of information technology in construction (ITCon)*, **10**(Special Issue From 3D to nD modelling), pp. 43-54 (2005).
36. Elmahdi, A., Chen Wu, I. and Bargstadt, H.J. "4D grid-based simulation framework for facilitating workspace management", *in CONVR 2011 (International Conference on Construction Applications of Virtual Reality)*, Sendai, Miyagi, Japan (2011).
37. Moon, H.S., Dawood, N. and Kang, L.S. "Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule", *Advanced Engineering Informatics*, **28**(1), pp. 50-65 (2014).
38. Azhar, S., Nadeem, A., Mok, J. and Leung, B. "Building information modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects", *in 1st International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-I)*, Karachi, Pakistan (2008).
39. Neufert, E. and Neufert, P. "Neufert Architects' Data", 4th ed., USA: Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, 648 (2012).