مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
دی ۱۳۸۸، شماره‌ی پنجاه و یکم، ص. ۶۱-۶۸، (یادداشت فنی)

# الگوریتم حل تداخلات فضا در طول زمان در کارگاه‌های ساختمانی

**فرزاد حاجیخانی (کارشناس ارشد)**
**دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات**
**مسعود مفید (استاد)**
**دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف**
**فرید امیرغیاثوند (دانشجوی دکتری)**
**دانشکده‌ی کامپیوتر، دانشگاه تهران**
**پریسا محمدی (کارشناس)**
**دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر**

یکی از معیارهای سنجش صنعتی‌بودن کشورها حجم پروژه‌های عظیم عمرانی در آنهاست. عدم بهره‌گیری از دانش روز، بی‌توجهی به مدیریت ساخت صحیح و علمی، و استفاده از روش‌های قدیمی و ناکارآمد باعث شده است که بهره‌وری در این صنعت بسیار پایین‌تر از حد متعارف در کشورهای صنعتی باشد. در این نوشتار، با هدف بالابردن بازدهی کارگاه‌های ساختمانی، به بررسی عوامل این امر پرداخته شد. یکی از این عوامل تداخل منابع در طول زمان در فضای کارگاه است. بعد از مطالعه‌ی تحقیقات قبلی، بی‌توجهی به عامل زمان مورد توجه واقع شد و از آنجا که محدودیت فضای کاری بر بهره‌وری و مسیر بحرانی پروژه تأثیرگذار است، می‌بایست فضای موجود در کارگاه با دقت زیادی سازمان‌دهی شود تا تداخلات در سطح کارگاه کمینه شود و درنتیجه هزینه‌های مورد نیاز پروژه کاهش یابد. طرح جانمایی فضای کارگاه و برنامه‌ی زمان‌بندی فعالیت‌ها اگرچه به‌عنوان عوامل مستقل در یک پروژه دیده می‌شوند اما عدم توجه به وابستگی آنها موجب تغییرات چشمگیری در برنامه‌های زمانی، بودجه‌بندی و حتی عوامل ایمنی و انگیزشی افراد دخیل در پروژه می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تا با بهره‌گیری از علوم ریاضی، مدیریتی، بهینه‌سازی و برنامه‌نویسی، روشی برای برنامه‌ی زمان‌بندی فضا ارائه شود.

**واژگان کلیدی:** مدیریت ساخت، کارگاه ساختمانی، تداخل فضاها و الگوریتم.

g.hadjikhani@hotmail.com
mofid@sharif.edu
farid@0and1.com
p.mohammadi82@yahoo.com

## مقدمه

هدف از طرح‌ریزی جانمایی کارگاه عمرانی، تعیین کارها و وسایل و تجهیزات موقتی مورد نیاز و جادادن آنها در زمان و فضای موجود پروژه است به‌نحوی که باعث پیشرفت فرایند ساخت شود. این جانمایی برای هر پروژه‌یی ضروری است و بر اقتصاد، ایمنی و سایر جنبه‌های پروژه‌ها تأثیر بسیار دارد.[۱] با این وجود در عمل طرح‌ریزی جانمایی کارگاه اغلب با این تفکر ساخته نشده و حتی در بعضی پروژه‌ها یک طرح جانمایی مشخص وجود ندارد. این مسئله باعث می‌شود که بعضی تصمیمات با تأخیر گرفته شده و تنها زمانی اتخاذ شوند که کاملاً اجتناب‌ناپذیرند. برای مثال در تعداد بی‌شماری از پروژه‌ها تصمیم‌گیری برای تخلیه‌ی مصالح زمانی انجام می‌شود که مصالح به کارگاه ساختمانی انتقال یافته و در انتظار تخلیه باشند. هرکارگاه شلوغ عامل مهمی درکاهش بهره‌وری و تداخل برنامه‌ی زمان‌بندی و درنتیجه تأخیرات پروژه است. یک نقشه‌ی جانمایی مدون و جزءبه‌جزء که تخصیص فضا برای پیمانکاران مختلف در آن لحاظ شده باشد، این تداخلات را کاملاً آشکار کرده و بنابراین باعث پیشرفت کلی کار خواهند شد.

مطابق مرسوم، مهندسِ سایت کارگاه فعالیت‌های روزانه را مطابق با برنامه‌ی زمان‌بندی مرتب می‌کند؛ البته همین امر نیاز به تخصیص فضا به کارگران حرفه‌های مختلف و مصالح و تجهیزات متعدد در یک چهارچوب زمانی را مشخص می‌سازد. تداخلات فضایی متناوباً در بسیاری کارگاه‌ها به‌علت کمبود دستورالعمل‌هایی که همه‌ی پتانسیل‌های تداخلات فضایی را شناسایی کند، رخ می‌دهند.[۲] حتی یک مدیر پروژه‌ی با تجربه قادر به شناسایی تمامی این تداخلات نیست. به‌همین علت، این مشکلات تنها زمانی شناسایی می‌شوند که رخ داده‌اند. وقتی که یک تداخل فضایی در کارگاه رخ می‌دهد معمولاً پروژه وارد تأخیرات خواهد شد. از این رو اگر بتوان یک سیستم حمایت تصمیم[۱] برای کمک به مدیریت تدوین کرد که به شناسایی تداخلات فضایی بپردازد و پیشاپیش راه حل‌هایی را پیشنهاد کند، بهره‌وری کلیه‌ی پیمانکاران جزء و درنتیجه کل پروژه لزوماً افزایش خواهد یافت. لذا سعی شده است

*تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۷/۱۵، داوری ۱۳۸۷/۲/۱، پذیرش ۱۳۸۷/۷/۳۰.*

تا با ارائه یک الگوریتم سازنده و طراحی نرم‌افزار مرتبط گامی در راستای ارتقاء این امر برداشته شود.

## جانمایی کارگاه‌های ساختمانی و اهمیت آنها

هدف از طرح‌ریزی جانمایی کارگاه تعیین کارهای موقتی مورد نیاز و جادادن آنها در زمان و فضای موجود پروژه است، به‌نحوی که باعث پیشرفت فرایند ساخت شود. جانمایی کارگاه‌های ساختمانی جزئی از روند طرح تجهیزکارگاه است و قسمت بزرگی از اقتصاد پروژه را شامل می‌شود.[۳] جانمایی کارگاه‌های ساختمانی همچنین بر عواملی نظیر ایمنی پروژه تأثیر به‌سزایی دارد. با این وجود در عمل طرح‌ریزی جانمایی کارگاه اغلب با این تفکر ساخته نشده‌است. این مسئله باعث می‌شود که اخذ بعضی تصمیمات با تأخیر انجام شود و اتخاذ آنها فقط زمانی صورت بگیرد که کاملاً اجتناب‌ناپذیرند. برای مثال در تعداد بی‌شماری از پروژه‌ها تصمیم این که مصالح کجا انبار شوند زمانی اتخاذ می‌شوند که مصالح به کارگاه ساختمانی انتقال یافته و در انتظار تخلیه‌اند.

همچنین ساخت پروژه‌های عمرانی با پیمانکاران مختلفی درگیر است که در فضای محدودی کار می‌کنند. هر پیمانکارِ جزء نیازمند فضای کاری مشخص، فضای مورد نیاز تجهیزات، انبار مصالح و مسیرهای رفت‌وآمد و در نهایت فضایی حفاظت‌شده برای تکمیل کار خود است. کارگاه شلوغ عامل مهمی در کاهش بهره‌وری و تداخل برنامه‌ی زمان‌بندی یا به‌عبارت بهتر تأخیرات است. یک نقشه‌ی جانمایی مدون و جزء به جزء که تخصیص فضا برای پیمانکاران مختلف در آن لحاظ شده باشد، این تداخلات را کاملاً آشکار کرده و بنابراین باعث پیشرفت کلی کار خواهند شد.

## مسئله‌ی طرح‌ریزی کارگاه ساختمانی

دشواری در تعریف مسئله: از آنجا که تعریفِ بهترین بیان برای یک پروژه‌ی ساختمانی کار بسیار دشواری است، تعریفِ بهترین جانمایی سایت هم کار بسیار دشواری خواهد بود. نکته‌یی که از اهمیت بسیار حیاتی در یک پروژه برخوردار است ممکن است در پروژه‌یی دیگر از اهمیت کمی برخوردار باشد. در حقیقت حتی در جریان یک پروژه، چیزی که در یک روز مهم است ممکن است در روز دیگر مهم نباشد.

وابستگی به سایر وظایف مدیریتی: توسعه‌ی جانمایی یک سایت ارتباط نزدیکی به برنامه‌ریزی سایر وظایف داشته و کاملاً به روش‌های ساختِ مورد استفاده در کارگاه و سایر عواملِ مربوط به سایت وابسته است. جانمایی سایت نمی‌تواند قبل از برنامه‌ریزی فعالیت‌ها ایجاد شود و در عین حال بعضی از فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده از جانمایی سایت تأثیر می‌پذیرند. بدین‌معنی که مثلاً ترتیب و توالی عملیات مختلف یک کارگاه ساختمانی (برنامه‌ی زمان‌بندی) ممکن است به جانمایی‌های متفاوتی نیاز داشته باشد، اما بدون برنامه‌ی زمان‌بندی ایجاد یک جانمایی مناسب اگر غیرممکن نباشد بسیار دشوار خواهد بود.

دینامیک‌بودن مسئله: در جریان پیشرفت پروژه‌ی ساختمانی، نیازهای ساخت تغییر خواهند کرد و جانمایی کارگاه بایستی تغییر کند و یا بهبود یابد. با این‌که در یک بازه زمانی هر طرح جانمایی کارگاه بهینه خواهد بود اما ممکن است در سایر دوره‌های زمانی بهینه نباشد.[۴]

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که یک جانمایی کامل برای سایت باید شامل جنبه‌های زیر باشد:

۱. انواع تأسیسات موقتی که باید استقرار یابد و برپا شوند.

۲. مکان جغرافیایی تأسیسات مورد نظر؛

۳. زمان استقرار و برچیدن تأسیسات مذکور در طول پروژه.[۵]

بنابراین می‌توان گفت مسئله‌ی طرح‌ریزی جانمایی کارگاه در این خصوص است که پروژه به چه تأسیسات موقتی نیاز دارد و در چه زمان و درکجا باید برپا یا نصب شود.

## مروری بر تحقیقات انجام‌شده

از قدیم مهندس سایت کارگاه فعالیت‌های روزانه را مطابق با برنامه‌ی زمان‌بندی مرتب می‌کرد، گرچه همین مسئله نیاز به تخصیص فضا به کارگران حرفه‌های مختلف و مصالح و تجهیزات متعدد در یک دوره‌ی زمانی مشخص بوده است. تداخلات فضایی متناوباً در بسیاری کارگاه‌ها به‌علت کمبود دستورالعمل‌هایی که همه‌ی پتانسیل‌های تداخلات فضایی را شناسایی کند، رخ می‌دهند. حتی یک مدیر پروژه‌ی با تجربه قادر نیست همه‌ی این تداخلات را شناسایی کند. به‌همین علت، این مشکلات زمانی شناسایی می‌شوند که رخ داده‌اند. وقتی که یک تداخل فضایی در کارگاه رخ می‌دهد معمولاً پروژه وارد تأخیرات خواهد شد.

اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی فضا انجام شده است، اما تعداد بسیار کمی از آنها از یک دستورالعمل تفضیلی برای تحلیل الگوهای تداخلات زمانی استفاده کرده‌اند و در عین حال هیچ‌یک استراتژی‌های خود را شرح نداده‌اند.

برنامه‌ی زمان‌بندی فضا شامل و ترکیبی از همه‌ی المان‌های کاری است که تغییرات چارچوب زمانی یا برنامه‌ی زمان‌بندی در بحث آن قرار دارند؛ بنابر این تداخلات زمانی را بین این المان‌های کاری رفع کرده یا کاهش می‌دهد. این مسئله‌ی پیچیده با فضای مورد نظر به‌صورت یک منبع برخورد می‌کند که این منبع با زمان تغییر می‌کند. در سال ۹۳، «موو پلان[۲]» به‌منظور تعیین وسایل موقتی مربوط به روش سی.پی.ام[۳] تولید شد.[۶] در سال ۹۴ نیز تقاضای فضای کاری و موجودیت آن برای ساختمان‌های بلندمرتبه تعریف شد.[۷] آنها همچنین راهکار عامل ظرفیت فضا را ارائه کردند تا کاهش بهره‌وری ناشی از محدودیت‌های زمانی را توصیف کنند. اگرچه محققان بسیاری بر روی مسئله‌ی پیچیده تداخلات فضا ـ زمان کار کرده‌اند، تعداد کمی از تحقیقات یک دستورالعمل تفضیلی را برای تحلیل الگوهای تداخلات زمانی به کار برده و استراتژی‌های راه حل را ارائه کرده‌اند.

## ارائه‌ی الگوریتم برنامه‌ی زمان‌بندی فضا

در این تحقیق، هدف ایجاد یک برنامه‌ی زمان‌بندی از فعالیت‌ها با کوتاه‌ترین مدت زمان پروژه‌است به‌طوری که با محدودیت‌های فضایی مطابقت داشته باشد. این هدف با ساخت یک طرح عملی دینامیک (پویا)، به‌گونه‌یی که هزینه‌های حمل و جابه‌جایی منابع را کمینه کند، میسر خواهد شد.[۸] عملی‌بودن طرح دینامیک با برآورده‌کردن فضای مورد نیاز همه‌ی منابع به دست می‌آید، به‌طوری که مطمئن شویم که تمامی «محدودیت‌و روابط» میان آنها دیده شده و منابع با هزینه‌های جابه‌جایی گزاف (منابع ایستا)، جابه‌جا نشده‌اند.[۹]

در این نوشتار برای حل مسئله‌ی طرح‌ریزی کارگاه‌های ساختمانی الگوریتمی پیشنهاد شده است که ضمن ارائه‌ی پاسخی منطقی و قابل قبول برای چیدمان اشیا در کارگاه، با یک دید کلی و استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی و روش‌های

برنامه‌نویسی جدید، چشم‌اندازی کلی و تا حد امکان دقیق از برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌ی مدل‌شده ـ شامل فعالیت‌ها و منابع ـ مسئله را در حالت دینامیک حل کرده و چیدمان اشیا در کارگاه به‌نحوی انجام شود که در اشیاء محوطه‌ی کارگاه تداخلات پیش نیاید و درعین حال هزینه‌ی آن نیز درکل پروژه کمینه شود. در ارائه‌ی این الگوریتم سعی شده است تا با جابه‌جایی فعالیت‌هایی که باعث به‌وجود آمدن تداخل در محوطه‌ی کارگاه می‌شوند از بیشینه فضای خالی در کارگاه استفاده شود و البته زمان پروژه نیز طولانی نشود. به‌عبارت دیگر، همان‌گونه که در ادامه به‌طور کامل توضیح داده خواهد شد با استفاده از زمان شناوری فعالیت‌ها برای جابه‌جایی فعالیت‌ها استفاده خواهد شد. این امر سبب می‌شود که مسیر بحرانی پروژه که توسط نرم‌افزارهای کنترل پروژه به دست آمده طولانی‌تر نشود، و نیز تغییری در پیش‌نیاز فعالیت‌ها ایجاد نشود.

در این الگوریتم ابتدا منابع ثابت و فعالیت‌ها در پروژه‌ی مدل‌سازی شده و کارگاه ساختمانی نیز مدل می‌شود. سپس محاسبات انجام می‌شود و طرح نهایی جانمایی کارگاه و چیدمان منابع در کارگاه طی برنامه‌ی نوشته‌شده‌یی به نمایش درمی‌آید.

## اطلاعات ورودی

شاید مهم‌ترین گام در حل یک مسئله مدل‌سازی آن مسئله باشد، زیرا در صورت مدل‌سازی ناقص و یا اشتباه مجبور خواهیم بود که در مرحله‌ی پردازش اطلاعات با اطلاعات ناقص کارکرده و یا مسئله را به‌روشی نادرست و غیرکلی حل کنیم. در الگوریتم پیشنهادی این نوشتار موارد زیر به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند:

- سایت پلان؛
- منابع و تجهیزات در کارگاه؛
- فعالیت‌های پروژه؛
- روابط بین منابع پروژه.

در ادامه هریک از موارد فوق به تفضیل شرح داده شده‌اند.

## مشخصات سایت پلان[4]

اولین گام برای مدل‌سازی مسئله، مدل‌سازی کارگاه ساختمانی است. کارگاه ساختمانی مستطیلی به طول و عرض مشخص فرض شده است. در مدل‌سازی کارگاه، واحدی در نظر گرفته نشده است تا با نظر کاربر آن را به‌صورت دلخواه و با توجه به دقتی که تمایل به حل مسئله دارد، آن را مدل کند. به‌عنوان مثال با واردکردن عدد ۲۰ و ۱۰ به‌عنوان طول و عرض کارگاه می‌توان کارگاه را ۲۰ در ۱۰ متر، یا ۲۰ در ۱۰ کیلومتر در نظر گرفت. اما باید توجه داشت که تا اتمام مدل‌سازی از واحدهای یکسان برای مدل‌سازی سایر منابع نیز می‌توان بهره گرفت.

## مشخصات منابع و تجهیزات کارگاه[5]

یکی از مهم‌ترین و دشوارترین مراحل مدل‌سازی در الگوریتم پیشنهادی، مراحل مربوط به منابع و تجهیزات کارگاه است؛ زیرا همان‌طور که از نام آن پیداست عملا هدف از حل مسئله‌ی چیدمان همین منابع و تجهیزات است که برای تقسیم‌بندی کاربردی، آنها را به سه دسته‌ی کلی تقسیم کرده‌اند: الف) منابع ثابت[6]؛ ب) منابع ایستا[7]؛ ج) منابع متغیر[8]. نکته‌یی که در این تقسیم‌بندی وجود دارد این است که منابع ثابت از فعالیت‌ها مستقل‌اند، اما منابع ایستا و منابع متغیر وابسته به فعالیت‌ها هستند.

### الف) منابع ثابت

منابع ثابت منابعی هستند که به‌صورت ثابت در کارگاه در جایی مشخص و از پیش تعیین‌شده قرار دارند. فرض کنیم که درون سایت تعدادی درخت قرار دارند که نمی‌توان آنها را قطع کرد. طبیعی است که این درختان به هیچ‌یک از فعالیت‌های کارگاه وابسته نیستند و در برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه و نرم‌افزارهای مربوطه مدل نشده‌اند، اما به‌هر حال در کارگاه وجود دارند و جای معینی اشغال می‌کنند و در عین حال احتمالاً سبب مزاحمت‌هایی در چیدمان سایر منابع در محوطه‌ی کارگاه نیز خواهند شد. مسلم است که جای این نوع از منابع نیز ثابت و غیرقابل تغییر است. پس برای مدل‌سازی یک درخت در کارگاه کافی است که آن را به‌صورت مربعی فرضاً به طول و عرض ۱ متر مدل کنیم. از منابع ثابت همچنین می‌توان برای مدل‌سازی اشیایی که در زمان مشخصی به کارگاه وارد و از آن خارج می‌شوند، استفاده کرد. فرض کنیم برای نگهبانی کارگاه ساختمانی از یک کانکس استفاده می‌شود، اما بعد از یک سال از شروع پروژه، کانکس از کارگاه خارج خواهد شد و نگهبانی به محلی از ساختمان نیمه‌ساخته منتقل خواهد شد. کاربرد این نوع منبع را همچنین می‌توان در مواردی دانست که هدف برخلاف جای دادن یک شئ در کارگاه، این است که فضایی از کارگاه حتماً خالی باقی بماند و چیزی در آن جای نگیرد. فرض کنیم می‌خواهیم در جلو درب کارگاه، برای رفت و آمد وسایل نقلیه، فضایی به طول و عرض مشخص خالی بماند. کافی است که این فضای خالی را با یک منبع ثابت به‌همان طول و عرض برای مدت زمان مورد نظر مدل کنیم.

### ب) منابع ایستا

منابع دسته‌ی دوم از بسیاری جهات به دسته‌ی اول مشابه‌اند، اما تفاوتی بزرگ و غیر قابل چشم‌پوشی با آنها دارند که لزوم ایجاد آنها را روشن می‌سازد. فرض کنیم منبعی داریم که در تمام مدت حضور خود در کارگاه جای ثابتی دارد ولی نمی‌دانیم که زمان واردشدن آن منبع در کارگاه چه زمانی است. در عین حال نمی‌خواهیم جای آن منبع را الگوریتم تعیین کند. یک تاورکرین می‌تواند مثالی برای یک منبع ایستا باشد. محل تاورکرین را ممکن است مهندس سایت تعیین کند، اما زمان واردشدن و خارج‌شدن تاورکرین بستگی به فعالیت‌هایی دارد که نیاز به حضور تاورکرین دارند و بنابراین می‌توانیم آن را با یک منبع ایستا مدل‌سازی کنیم. مثلاً می‌توان کانکس نگهبانی را درصورت تمایل به آماده‌شدن محل ثانی وابسته کرد و زمان حضور آن را به فعالیت‌ها نسبت داد، اما در عین حال جای آن را توسط کاربر تعیین کرد. مثال بسیار مناسب دیگری که برای منابع ایستا می‌توان بیان کرد رمپ است که جای مشخصی دارد، اما به فعالیت‌های پروژه و تکمیل آنها بستگی دارد.

### ج) منابع متغیر

شاید بتوان گفت منابعی که با این دسته مدل‌سازی می‌شوند بیشترین تعداد را در بر می‌گیرند و گسترده‌ترین نوع منابع هستند. منابع این دسته، منابعی هستند که فقط طول و عرض و نام آنها را کاربر وارد می‌کند و زمان و مکان آنها را الگوریتم با توجه به فعالیتی که به آن تخصیص داده شده است، تعیین می‌کند. مثال‌های فراوانی برای مدل‌سازی این منابع وجود دارد. مثلاً کپه‌یی از شن یا ماسه که با طول و عرض فرضی توسط کاربر به یک فعالیت مثلاً بتن‌ریزی تخصیص داده می‌شود. این منبع می‌تواند در زمان‌های مختلف در کارگاه جابه‌جا شود و در جاهای خالی که در کارگاه باقی مانده است و توسط منابع ثابت و منابع ایستا اشغال نشده است، قرار بگیرد.

این منابع پس از منابع ثابت و منابع ایستا در کارگاه جای داده می‌شوند. این مسئله کاملاً منطقی و بدیهی است، زیرا این منابع جای مشخص و از پیش تعیین‌شده‌یی ندارند و هدف الگوریتم آن است که این منابع را با توجه به جاهای خالی باقی‌مانده در کارگاه به‌نحوی جای دهد که هزینه را نیز کمینه سازد.

## مشخصات فعالیت‌های پروژه[9]

هر پروژه در نرم‌افزارهای کنترل پروژه از فعالیت‌هایی تشکیل شده است. طبیعی است که در این الگوریتم نیز بخش بسیار مهمی از روند کار الگوریتم به فعالیت‌ها وابسته است. بنابراین فعالیت‌ها نیز در زمره‌ی اطلاعات ورودی قرار گرفته‌اند. با این پیش‌فرض که اطلاعات ورودی پروژه پس از محاسبه توسط یکی از نرم‌افزارهای کنترل پروژه به الگوریتم ارائه می‌شوند، نیازی به توضیح چگونگی محاسبه‌هایی که توسط نرم‌افزارهای کنترل پروژه ـ نظیر مایکروسافت پراجکت[10] یا پریماورا پراجکت پلاتر[11] ـ نیست. اطلاعات یک فعالیت در این نرم‌افزارها شامل زمان مورد نیاز برای انجام آن فعالیت، پیش‌نیازها و منابع است. اما چیزی که این فعالیت‌ها را در این الگوریتم از سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز می‌سازد، تخصیص منابعی با مشخصات و ابعاد ظاهری ذکرشده در قسمت‌های پیشین است. چنان که پیش‌تر ذکر شد، منابع به سه دسته‌ی مجزا تقسیم شده و دو دسته از آنها قابل تخصیص به فعالیت‌ها هستند: منابع ایستا و منابع متغیر.

## مشخصات روابط[12] مابین منابع پروژه

در دنیای واقعی، مهندس عمران همواره روابط بسیاری را برای قراردادن و چیدمان اشیاء و منابع در کارگاه در کنار هم مد نظر قرار می‌دهد. این روابط بسیار گسترده، پیچیده و وابسته به شرایط مختلف‌اند که بحث درباره‌ی تمامی آنها از موضوع این مقاله خارج است. برای بررسی مختصرِ چگونگی مطلوبیت در میان دو یا چند شیء و قرارگیری آنها و همسایگی‌شان، به ذکر چند مثال می‌پردازیم: فرض کنیم که در یک کارگاه ساختمانی می‌خواهیم محل قرارگیری خوابگاه کارگری و کانکس‌های اداری و فنی را مشخص کنیم. واضح است که هر مهندس سایت می‌داند که این دو منبع باید با فاصله‌ی مناسب از یکدیگر قرار داشته باشند و فاصله‌ی آنها نباید از حد معینی کم‌تر باشد. این مسئله اصولاً در طراحی‌های جانمایی کارگاه‌های ساختمانی به‌خوبی به چشم می‌آید، اما نکته‌ی قابل توجه این است که از این دست مسائل در یک کارگاه ساختمانی بسیار زیادند و درمورد مصالح ساختمانی نیز به چشم می‌خورند. مثلاً بهتر است که فاصله‌ی مصالحی که دائماً با آب سر و کار دارند از محل نگه‌داری سیمان جدا بوده و فاصله‌یی مناسب داشته باشند. از طرف دیگر فرض کنید که در بازه‌یی از زمان فعالیت زیادی بر روی دو نوع از مصالح ساختمانی به چشم می‌خورد و کارگران زیادی در دو گروه مختلف کار می‌کنند. بدیهی است که هرچه فاصله‌ی این دو گروه کاری از یکدیگر بیشتر باشد، تداخلات کاری کم‌تری در کارگاه به وجود می‌آید، مشکلات کار کم‌تر می‌شود، و سرعت انجام آن فعالیت‌ها افزایش می‌یابد. اما از طرف دیگر فرض کنید که قصد بتن‌ریزی در ناحیه‌یی از کارگاه را داریم. واضح است که منابعی که فعالیت بتن‌ریزی را تشکیل می‌دهند (شن، ماسه، سیمان و آب) باید تا حد امکان به یکدیگر نزدیک باشند، زیرا در صورت فاصله داشتن بین آنها انجام فعالیت بتن‌ریزی بسیار طولانی‌تر شده و اصلاً مطلوب نیست.

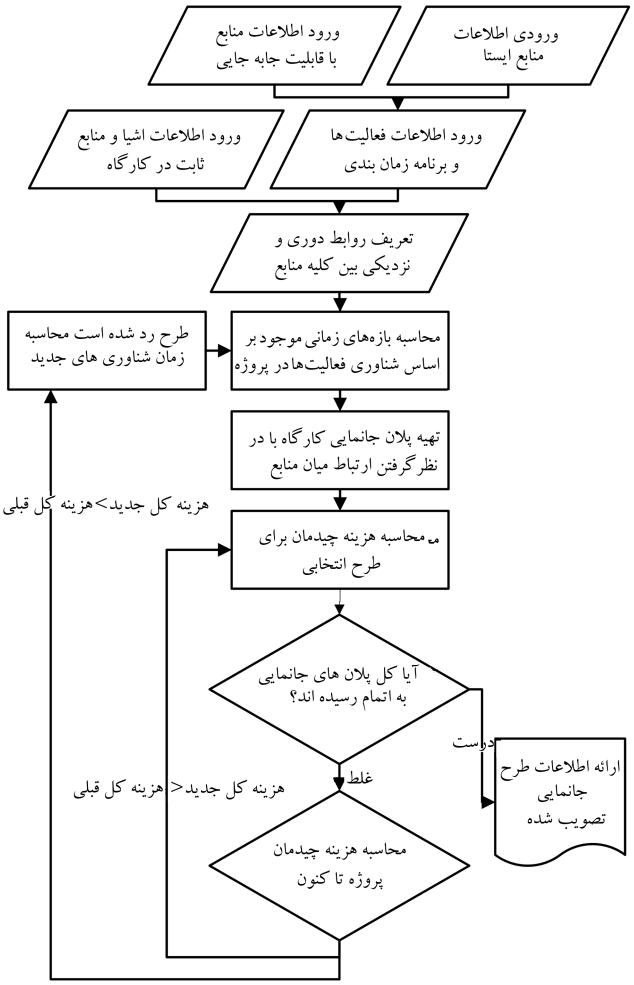
## تشریح روند اجرای الگوریتم

برای مشاهده‌ی چگونگی عملکرد الگوریتم، لازم است که الگوریتم در قالب یک فلوچارت ارائه شود تا خواننده بتواند نحوه‌ی اجرا را بهتر درک کند. در ادامه فلوچارت کلی چگونگی اجرای الگوریتم آورده شده است. نکته‌ی مهم در این رابطه این است که به‌علت استفاده از تکنیک‌های جدید و پیشرفته‌ی برنامه‌نویسی نظیر برنامه‌نویسی تماماً شیءگرا، دیگر مانند سالیان گذشته یک فلوچارت نمی‌تواند اجرای یک الگوریتم را در فضای یک‌بعدی کاغذ به نمایش بگذارد (شکل ۱).

## ساختار منطقی پروژه

هدف از این برنامه کمینه‌کردن هزینه‌ی ناشی از چینش اشیا در فضای کارگاهِ یک پروژه‌ی عمرانی است. این هزینه از حاصل‌جمع دو هزینه‌ی جزئی‌تر به‌دست می‌آید:

۱. هزینه‌ی نوع اول که ناشی از جابه‌جایی اشیا در طول پروژه به‌منظور جادادن اشیاء جدید در فضای کارگاه است.




شکل ۱. الگوریتم حل تداخلات فضایی در کارگاه‌های ساختمانی.

۲. هزینه‌ی نوع دوم که ناشی از کنار هم‌بودن اشیاء متضاد یا فاصله داشتن اشیاء مکمل است.

## منطق نرم‌افزاری مورد استفاده

**پروژه:** هر پروژه شامل تعدادی فعالیت است که در فضای کارگاه اجرا خواهد شد. تعدادی منبع ثابت نیز در زمان‌های خاص (بدون ارتباط با فعالیت‌ها) وجود دارند که در مدل در نظرگرفته شده‌اند.

**فعالیت:** هر فعالیت شامل زودترین تاریخ شروع، دیرترین تاریخ شروع، زمان اجرا، منابع مورد نیاز، فعالیت‌های پیشنیاز و منابع مورد نیاز است.

**منبع:** هر منبع شامل طول، عرض، رابطه تضاد یا تکمیل با سایر اشیا و هزینه جابه‌جایی است.

**هزینه:** منظور هزینه‌ی طرح جانمایی است که از دو هزینه‌ی شرح داده شده به دست می‌آید.[۱۰]

## الگوریتم‌های مورد استفاده

۱. الگوریتم تولید تمام برنامه‌های زمانی ممکن برای شروع قطعی فعالیت‌ها و استخراج پریود[۱۳]های مربوط به هر برنامه‌ی زمانی: در این الگوریتم ابتدا فعالیت‌ها با توجه به رابطه‌ی پیش‌نیازی بین آنها با استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی مکان‌نگر[۱۴] مرتب می‌شوند. سپس به‌صورت بازگشتی تمام حالات ممکن برای برنامه‌های زمانی تولید می‌شود.

۲. الگوریتم تولید تمام طرح‌های جانمایی[۱۵] مختلف برای هر پریود در هر برنامه‌ی زمانی: در این الگوریتم نیز از روش بازگشتی[۱۶] استفاده می‌شود. بدین‌صورت که ابتدا اولین شیء در اولین جای ممکن قرار داده می‌شود و الگوریتم به‌ازای شیء دوم به‌صورت بازگشتی فراخوانی می‌شود. در هر بار فراخوانی الگوریتم به‌ازای شیء $k$ام، درصورتی که $k$ کوچک‌تر از اندیس آخرین شیء $(n-1)$ باشد، این شیء در تمام جاهای باقی‌مانده‌ی ممکن از کارگاه قرار داده می‌شود و پس از هر بار قرارگرفتن در آن‌جا، الگوریتم به‌صورت بازگشتی با پارامتر $k+1$ فراخوانی می‌شود.

۳. الگوریتم محاسبه‌ی کم‌هزینه‌ترین توالی از طرح‌های جانمایی در یک برنامه‌ی زمانی داده‌شده: در این الگوریتم که از روش برنامه‌نویسی پویا استفاده شده است، ابتدا هزینه‌ی نوع دوم طرح‌های جانمایی پریود اول محاسبه می‌شوند. سپس به‌منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی هر طرح جانمایی از پریود دوم مانند طرح جانمایی، $i$ام به‌صورت زیر عمل می‌شود. کمینه‌ی حاصل‌جمع هزینه‌ی نوع دوم هر طرح جانمایی از پریود اول مانند $j$، و هزینه‌ی نوع اول تبدیل آن طرح جانمایی $i$ام به طرح جانمایی $j$ام.

تمام طرح‌های مربوط به دوره‌های بعدی نیز به طریق مشابه ساخته می‌شوند. این الگوریتم از دسته الگوریتم‌های پویا است که به‌دلیل استفاده از این روش ابتکاری به‌جای آن که مجبور باشیم تمام مسیرهای مختلف را به‌ازای تمام طرح‌های تمام دوره‌ها محاسبه کنیم که تعداد عملیات رایانه‌یی تقریباً برابر با ضریبی از $\prod_{i=1}^{n} l_i$ است که در آن $l_i$ برابراست با تعداد طرح‌های پریود $i$ام. نتها به‌ازای هر پریود، تمام طرح‌های پریود قبلی را مورد بررسی قرار می‌دهیم که تعداد عملیات رایانه‌یی تقریباً برابر است با ضریبی از $\sum_{i=1}^{n-1} l_i \times l_{i+1}$. مسلماً این تغییر تأثیر قابل ملاحظه‌یی در زمان عملکرد الگوریتم دارد.

پیچیدگی زمانی الگوریتم در حالت اول از مرتبه‌ی $O(\prod_{i=1}^{n} l_i)$ خواهد بود که در الگوریتم دوم به $O(\sum_{i=1}^{n-1} l_i \times l_{i+1})$ تقلیل یافته است. $l_i$ که تعداد طرح‌های پریود $i$ام است، در بدترین شرایط با مساحت کارگاه و تعداد اشیا رابطه‌ی نمایی دارد، لیکن در شرایطی که چینش اشیا در کارگاه دشوار باشد (که اصولاً در چنین شرایطی مسئله‌ی استفاده از روش‌هایی نظیر روش مطرح شده در این نوشتار مد نظر قرار می‌گیرد) این تعداد با مساحت کارگاه و تعداد اشیا رابطه‌یی شبه چندجمله‌یی پیدا می‌کند.

## اجرای برنامه‌ی زمان‌بندی فضا در طراحی جانمایی یک مثال

در قسمت‌های پیشین، کلیه‌ی قسمت‌های الگوریتم به‌طورکامل شرح داده شد. در این قسمت به‌عنوان نمونه‌ی یک مثال از کاربرد الگوریتم حل تداخلات فضایی در کارگاه‌های ساختمانی ارائه خواهد شد.

## مدل سازی

در نرم‌افزاری که برای این الگوریتم نوشته شده است، می‌توان پروژه‌های ایجادشده را با فرمت $xml$ ذخیره و بازکرد و علاوه بر استفاده در این نرم‌افزار، درصورت تمایل، در سایر نرم‌افزارهایی که از این متد برای بازکردن پروژه استفاده خواهند کرد، بهره گرفت. در این مثال منابع و فعالیت‌های نشان داده شده در جداول ۱ و ۲ به‌عنوان ورودی نرم‌افزار در نظرگرفته شده‌اند.

پس از مدل‌سازی منابع و فعالیت‌ها، نوبت به برقراری نحوه‌ی ارتباط بین منابع می‌رسد؛ با این کار مدل‌سازی به اتمام می‌رسد و کاربر می‌تواند الگوریتم را اجرا کند.

جدول ۱. منابع ثابت مدل شده در کارگاه مدل شده.

| منبع | نوع | طول | عرض | x | y |
|---|---|---|---|---|---|
| فنس ۱ | ثابت | ۲۲ | ۱ | ۷ | ۰ |
| فنس ۲ | ثابت | ۱ | ۱۹ | ۰ | ۰ |
| فنس ۳ | ثابت | ۱ | ۲۰ | ۲۹ | ۰ |
| فنس ۴ | ثابت | ۳۰ | ۱ | ۰ | ۱۹ |
| درب کارگاه | ثابت | ۶ | ۳ | ۱ | ۰ |
| کانکس | ثابت | ۶ | ۳ | ۱ | ۱۶ |
| اتاقک نگهبانی | ثابت | ۲ | ۴ | ۱ | ۳ |
| خوابگاه کارگری | ثابت | ۳ | ۶ | ۱ | ۷ |
| سرویس بهداشتی | ثابت | ۲ | ۲ | ۷ | ۱۷ |
| محل احداث بنا | ثابت | ۲۰ | ۱۸ | ۹ | ۱ |

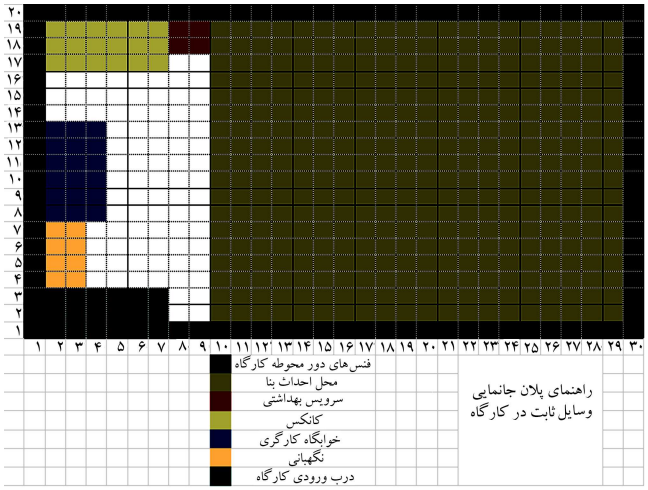
جدول ۲. فعالیت‌های به کار رفته در مثال کارگاه مدل شده.

| | فعالیت | مدت | منبع | نوع | طول | عرض |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | گودبرداری و پی کنی | ۱۰ | لودر | متغیر | ۶ | ۳ |
| ۱ | | | دپوی خاک | ایستا | ۵ | ۱۰ |
| ۲ | آرماتوربندی فونداسیون | ۵ | دپوی آرماتور | متغیر | ۱۲ | ۲ |
| ۲ | | | کارگاه آرماتوربندی | ایستا | ۲ | ۲ |
| ۳ | قالب‌بندی فونداسیون | ۳ | دپوی قالب | متغیر | ۶ | ۲ |
| ۳ | | | کارگاه قالب‌بندی | ایستا | ۲ | ۲ |
| ۴ | بتن‌ریزی فونداسیون | ۲ | بتونیر | متغیر | ۳ | ۲ |
| ۴ | | | شن و ماسه | متغیر | ۵ | ۵ |
| ۴ | | | سیلوی سیمان | ایستا | ۳ | ۳ |
| ۴ | | | تانکر آب | ایستا | ۳ | ۲ |
| ۵ | ساخت ستون | ۱۵ | دپوی آهن آلات | متغیر | ۷ | ۲ |
| ۵ | | | کارگاه اسکلت سازی | ایستا | ۲ | ۲ |
| ۶ | نصب ستون | ۵ | تاورکرین | ایستا | ۳ | ۳ |
| ۷ | ساخت تیر | ۱۰ | دپوی آهن آلات | متغیر | ۶ | ۳ |
| ۷ | | | کارگاه اسکلت سازی | ایستا | ۲ | ۲ |
| ۸ | نصب تیر | ۵ | تاورکرین | ایستا | ۳ | ۳ |

## بررسی خروجی‌های نرم‌افزار

در شکل ۲ تصویر کارگاه مدل شده آمده است. هدف از اجرای این برنامه جادادن منابع مورد نیاز این پروژه طبق برنامه‌ی زمان‌بندی فعالیت‌های مدل‌شده در برنامه و یافتن تداخلات فضایی در آن و ارائه‌ی راه حلی مناسب است. در شکل می‌توان به‌وضوح فضاهای اشغال‌شده یا خالی را برای جادادن منابع در کارگاه ملاحظه کرد.

پس از اجرای الگوریتم، نرم‌افزار شروع به تقسیم‌بندی زمان براساس برنامه‌ی زمان‌بندی شده می‌کند تا دریابد در هر پریود چه فعالیت‌هایی و درنتیجه چه منابعی




شکل ۲. کارگاه مدل شده در نرم‌افزار بدون در نظر گرفتن فعالیت‌ها (جانمایی خام کارگاه).

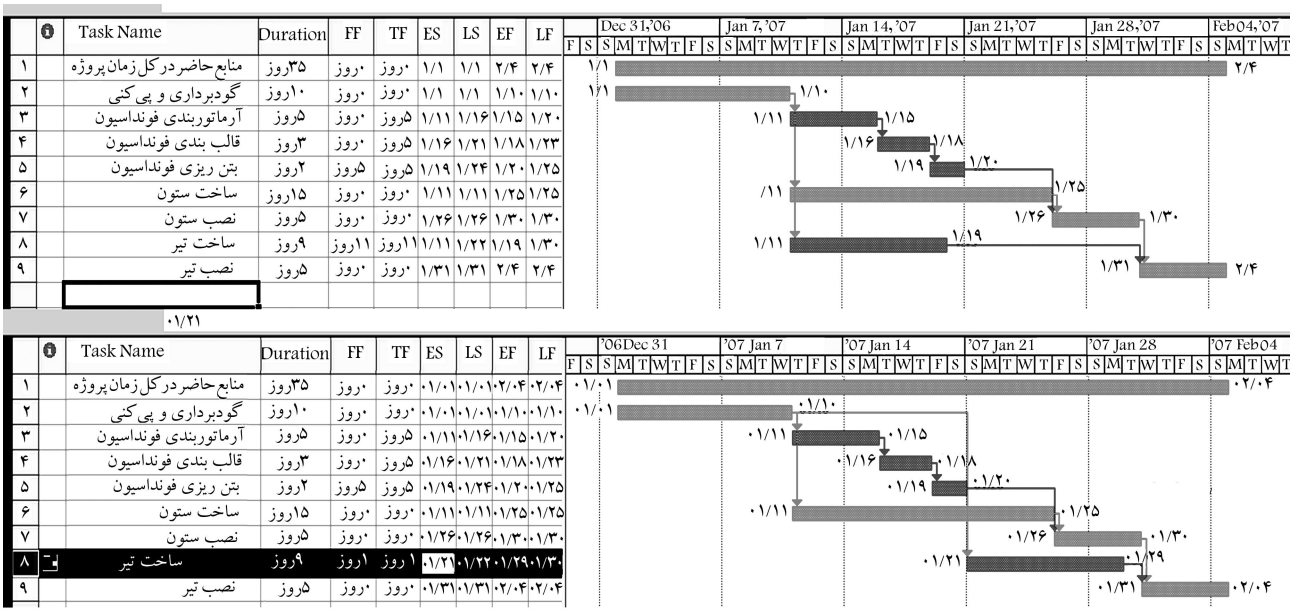
را باید در کارگاه جا دهد. جدول ۳ پریودهای حاصل از محاسباتِ مثال نمونه را نشان می‌دهد. این جدول مربوط به اولین محاسبه‌ی پریودهای الگوریتم است.

چنان که در جدول ۳ مشخص است در پریود سوم ساخت تیر، ساخت ستون و قالب‌بندی فونداسیون بر طبق خروجی نرم‌افزار $MSP$ هم‌زمان خواهند بود. اما نکته‌ی مهمی که در خروجی نرم‌افزار $MSP$ نادیده گرفته شده این است که منابع ساخت تیر نمی‌توانند به‌طور هم‌زمان با منابع ساخت ستون و قالب‌بندی در کارگاه جا داده شوند. شکل ۳ خروجی نرم‌افزار $MSP$ را نشان می‌دهد.

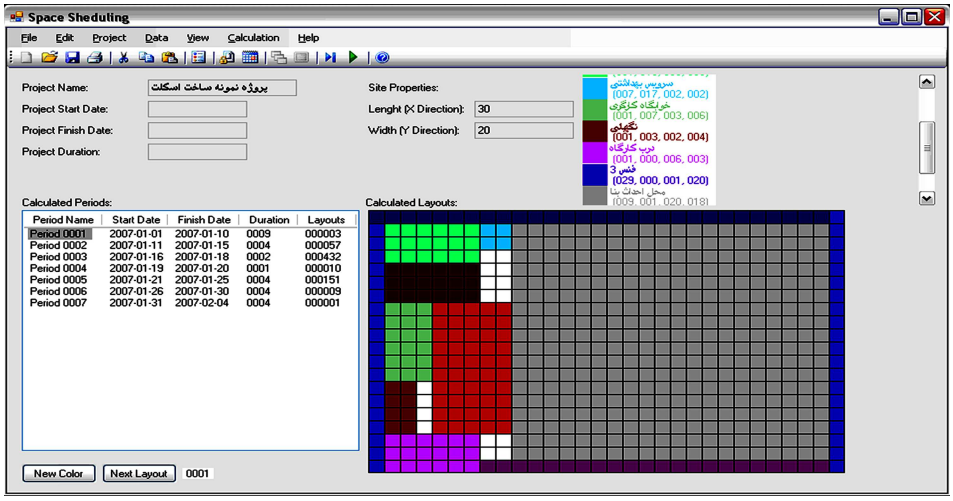
در مطلبی که پیش‌تر بدان اشاره شد پیداست که قرار است فعالیت ساخت تیر در تاریخ یازدهم اجرا شود. اما به‌علت کمبود فضای ساخت این امر ممکن نیست. در این حالت الگوریتم به تداخل فضایی برخورد می‌کند و به دنبال راهی برای حل این تداخل خواهد گشت. بنابراین با توجه به زمان‌های شناوری[17] فعالیت‌ها، آنها را بسته به زمان‌های شناوری جابه‌جا می‌کند تا بتواند این تداخل فضایی را حل کند. درنتیجه، زمان ساخت تیر را جابه‌جا کرده و آن را به سمت جلو هدایت می‌کند. پس از این جابه‌جایی دوباره پریودهای جدید را محاسبه کرده و جانمایی‌های جدید را طراحی می‌کند. حال اگر تداخل جدیدی مشاهده نشد، کار الگوریتم پایان یافته و خروجی‌ها را نمایش می‌دهد، وگرنه دوباره زمان‌های شناوری را مورد مطالعه قرار داده و پریودهای جدیدی را محاسبه خواهد کرد. بنابراین با وجود این که نرم‌افزار $MSP$ شروع آن را روز یازدهم پیش‌بینی کرده است، الگوریتم حل تداخلات فضایی اعلام

جدول ۳. لیست پریودهای موجود در مثال کارگاه مدل شده.

| فعالیت | شماره فعالیت | پایان | شروع | پریود |
|---|---|---|---|---|
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۱۰ | ۱/۱ | ۱ |
| گودبرداری و پی کنی | ۲ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۱۵ | ۱/۱۱ | ۲ |
| آرماتوربندی فونداسیون | ۳ | | | |
| ساخت ستون | ۶ | | | |
| ساخت تیر | ۸ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۱۸ | ۱/۱۶ | ۳ |
| قالب‌بندی فونداسیون | ۴ | | | |
| ساخت ستون | ۶ | | | |
| ساخت تیر | ۸ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۲۰ | ۱/۱۹ | ۴ |
| بتن‌ریزی فونداسیون | ۵ | | | |
| ساخت ستون | ۶ | | | |
| ساخت تیر | ۸ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۲۵ | ۱/۲۱ | ۵ |
| ساخت ستون | ۶ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۱/۳۰ | ۱/۲۶ | ۶ |
| نصب ستون | ۷ | | | |
| منابع حاضر در کل زمان پروژه | ۱ | ۲/۴ | ۱/۳۱ | ۷ |
| نصب تیر | ۹ | | | |




شکل ۳. خروجی‌های نرم‌افزار MSP برای مثال ارائه شده.




شکل ۴. خروجی نرم‌افزار در پریود اول.

می‌کند که تاریخ صحیح شروع این فعالیت، به‌نحوی که کلیه‌ی منابع بتوانند در کارگاه قرار بگیرند، روز بیست‌ویکم است (بخش پایینی شکل ۳). در خاتمه با در نظرگرفتن کلیه‌ی تداخلات خروجی نرم‌افزار نشان‌دهنده‌ی تاریخ شروع و پایان فعالیت‌ها، و نیز جانمایی مناسب کارگاه است (شکل ۴).

## نتیجه‌گیری

چنان که مشاهده شد، الگوریتم ارائه‌شده در این نوشتار برای حل تداخلات فضایی در کارگاه‌های ساختمانی به کار گرفته شد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان با اصلاح برنامه‌ی زمان‌بندی فعالیت‌ها از تأخیرات ناشی از تداخلات فضا در کارگاه‌های ساختمانی جلوگیری کرده و درنتیجه باعث کاهش هزینه‌های پروژه شد.

از این الگوریتم می‌توان در مدل‌سازی کارگاه‌های ساختمانی که در آنها معضل کمبود فضا به چشم می‌خورد، برای یافتن راه‌حلی مناسب به‌منظور ارائه‌ی یک طرح جانمایی کاربردی بهره گرفت. با مدل‌سازی دقیق‌تر از لحاظ برنامه‌ی زمان‌بندی و استفاده‌ی دقیق از زمان‌های شناوری و روابط میان فعالیت‌های موجود در پروژه می‌توان این برنامه را هرچه بیشتر با واقعیت‌های زمان‌بندی پروژه تطبیق داد و از دینامیک بودن الگوریتم یادشده استفاده‌ی کامل‌تری کرد.

نکته‌ی قابل ذکر در این زمینه این است که از این الگوریتم می‌توان در کارگاه‌های ساختمانی یا کارگاه‌ها و انبارهای مشابه که در آنها مسئله‌ی طرح‌ریزی جانمایی وجود دارد، اما در آنها مسئله‌ی زمان مطرح نیست نیز بهره گرفت. طبیعی است که این الگوریتم برای حل مسائلی نوشته شده که در آنها مسئله‌ی زمان به‌صورت دینامیک مطرح بوده و حل آن را برای نرم‌افزارهای موجود حال حاضر در صنعت برنامه‌ریزی و کنترل پروژه غیرممکن کرده است. چنان که گفته شد، نرم‌افزارهای موجود (نظیر مایکروسافت پراجکت و پریماورا پراجکت پلانر) به‌علت این‌که تنها از رابطه‌ی هزینه، مقدار و زمان در برنامه‌ی زمان‌بندی استفاده می‌نمایند، قادر به محاسبه‌ی فضای اشغال‌شده توسط منابع حاضر در پروژه نیستند و نمی‌توانند تداخلات فضا را در کارگاه‌های ساختمانی تشخیص دهند.

## پانوشت

1. decision support system
2. move plan
3. critical path method
4. site plan
5. resources
6. fixed resources
7. static resources
8. variable resources
9. task
10. microsoft project
11. primavera project planner
12. relations
13. period
14. topological sort
15. layout
16. back-track
17. floating time

## منابع


1. Zouein, P.P., and Tommelein, I.D. "Dynamic layout planning using a hybrid incremental solution method." *J. Constr. Engrg. And Mgmt.,* ASCE, **125**(6), pp. 400–408, (1999).

2. Zouein, P.P., and Tommelein, I.D. "Time-space tradeoff strategies for space-schedule construction." *Proc., 1st Congr. Comp. in Civ. Engrg.,* ASCE, New York, 2, 1180-1187, (1994).

3. Akinci, B.; Fischer, M., and Zabelle, T. "Proactive approach for reducing non-value adding activities due to time-space conflicts." *Proc., 6th Annu. Conf. Int. Group for Lean Constr.,* IGLC-6, Guaruja, Brazil, (1998).

4. Mawdesley, Michael J.; Saad H. Al-jibouri, and Hongbo Yang. "Genetic algorithms for construction site layout in project planning", *Journal of Construction Engineering And Management,* September/October (2002).

5. Mawdesley, M.J.; Cullingford, G., and Haddadi, A. "Site layout and resource scheduling: An approach to modelling movement around sites", *Proc., 5th Int. Symp. On Robotics in Constr.,* ISARC, Tokyo (1988).

6. Tommelein, I.D., and Zouein, P.P. "Interactive dynamic layout planning", *J. Constr. Engrg. and Mgmt.,* ASCE, **119**(2), pp. 266-287 (1993).

7. Thabet, W.Y., and Beliveau, Y.J. "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings", *J. Constr. Engrg. and Mgmt.,* ASCE, **120**(1), pp. 96-116 (1994).

8. Gua, S. et al, "Identification and resolution of work space conflicts in building construction", *Journal of Construction Engineering And Management,* July/August (2002).

9. Tommelein, I.D., and Zouein. "Associate member; ASCE; improvement algorithm for limited space scheduling", *Journal of Construction Engineering And Management,* March/April (2001).

10. Hadji Khani, F, "On the space interaction, in bulding-projects", MS Thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, (2008).