

حل مسأله مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی بر اساس ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه

داوود صداقت شایگان*، مهدی مشایخی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

چکیده

در این تحقیق به حل مسأله مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی بر اساس ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه پرداخته شد. مسأله تحقیق در حالت پویا (دینامیکی) در نظر گرفته شد و بر اساس موقعیت چیدمان و هزینه، بهینه‌یابی گردید. برای این کار دو دسته تجهیز ثابت و متحرک لحاظ شدند به طوری که ظرفیت جابه‌جایی تجهیزات حرکتی در بازه‌های متفاوت افق برنامه‌ریزی پروژه در نظر گرفته شود. برای حل مسأله تحقیق در ابعاد بزرگ و واقعی با شرایط دینامیکی از ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده شد. نحوه تخصیص و چیدمان تجهیزات در سه مرحله برای هر کدام از جواب‌ها در هر مرحله در ادامه ارائه شد. حل مسأله طی ده بار تکرار در نرم افزار گمز برای الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه انجام شد تا مکان‌های بهینه بر اساس فاکتورهایی از قبیل دسترسی و اندازه تجهیزات پایداری تاور، هزینه، سهولت سرویس دهی به بخش‌های مختلف و ایمنی محیط کارگاه مشخص شود.

کلمات کلیدی: مسأله مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی، الگوریتم علف‌های هرز، الگوریتم جستجوی ممنوعه.

*نویسنده مسئول: داوود صداقت شایگان

پست الکترونیکی: da.sedaghat@iau.ac.ir

در صنعت ساخت و ساز، مکانیابی و چیدمان تجهیزات نقش مهمی ایفا می کند زیرا یافتن مکان مناسب برای تجهیزات ساختمانی نه تنها می تواند بر هزینه ها تأثیر بگذارد، بلکه می تواند بر روند جابجایی مصالح ساختمانی نیز تأثیر بگذارد [۱]. برنامه ریزی چیدمان سایت های ساختمانی عبارتست از مشخص نمودن تجهیزات، ابزارها، ماشین آلات و تجهیزات دائمی یا موقت سایت جهت انجام عملیات فنی و اجرایی و اختصاص فضاهای متناسب میان آنها جهت دستیابی به اهداف مورد انتظار پروژه به شکل اثربخش [۲،۳]. وظیفه اصلی بهینه سازی فرایند برنامه ریزی چیدمان سایت های ساختمانی، دستیابی به چیدمانی از تجهیزات و عناصر دخیل در پروژه است به طوریکه که اهداف مدنظر طراحان و مهندسين را برآورده کند [۴، ۵]. به طور کلی، مسأله چیدمان در کارگاه های ساخت به سبب عدم قطعیت های موجود در تصمیم گیری، مقوله ای پیچیده است و به عوامل متعددی بستگی دارد و اهمیت اصلی آن در این است که با صرف زمان کوتاهی جهت طراحی بهینه چیدمان تجهیزات قبل از استقرار آنها، می توان از بروز بسیاری از خسارت ها و نارضایتی ها جلوگیری کرد و هزینه این فرایند را کاهش داد [۶]. زیرا ایجاد تغییرات و جابه جایی در چیدمان فضاها و تجهیزات روی کاغذ به مراتب ساده تر و کم هزینه تر از انتقال و جابه جایی واقعی آنها است [۷]. به منظور تامین اهداف مهندسی، مسئله برنامه ریزی چیدمان سایت های ساخت و ساز و مسائل مکانیابی تجهیزات ساختمانی به عنوان یک مسأله NP-hard در نظر گرفته می شود. بنابراین، محققان به طور گسترده ای از رویکردهای فراابتکاری برای حل این مسائل استفاده می کنند. کاوه و همکاران (۲۰۱۶) به حل مسأله مکانیابی تجهیزات سایت های ساخت و ساز با دو الگوریتم جدید CBO^۱ و ECBO^۲ پرداخته اند. الگوریتم CBO از فرمول ساده برای یافتن حداقل توابع هدف استفاده می کند و به هیچ پارامتر داخلی بستگی ندارد. به منظور بهبود قابلیت های اکتشافی CBO و جلوگیری از همگرایی زودرس، ECBO از مکانیزمی برای گریز از مسأله بهینه سازی محلی (مکانی) استفاده می کند [۸]. همچنین مطالعات مرتبط دیگری نیز در این زمینه انجام شده است [۹-۱۲]. تاو و همکاران (۲۰۲۲) به برنامه ریزی پویای چند هدفه سایت ساخت و ساز بر اساس BIM پرداخته اند. در این مدل، BIM و زمان بندی های ساخت و ساز، اطلاعات به روز شده پروژه ساختمانی را ارائه می کنند و تأثیر فاز ساخت و ساز بر چیدمان را بررسی میکند اما مکان یابی سایت را نمیتواند بهینه سازی کند [۱۳]. صلاح و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی مسأله مکان یابی سایت های ساختمانی با روش تحلیل شبکه اجتماعی (SNA) پرداخته اند. از طریق کاربرد SNA، شکاف های موجود در حوزه ادبیات تحقیق مشخص شده است و نتایج به دست آمده نشان داد اکثر مدل های پیشین در ادبیات تحقیق به اندازه کافی به نمایش واقعی تجهیزات، اثرات نویز^۳ یا تأثیر ساخت و ساز بر محیط اطراف نپرداخته اند و در این تحقیق بر نمایش واقعی تجهیزات تأکید شده است [۱۴]. مافپیرو و فکری (۲۰۲۳) از الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسأله برنامه ریزی چیدمان سایت ساخت و ساز استفاده کرده اند. رویکرد پیشنهادی عملکرد امیدوارکننده ای داشته اما به عوامل زمان و هزینه (بارگیری و تخلیه) توجهی نشده است [۱۵]. وون هون سان و سولیس از الگوریتم هیبریدی برای بهینه سازی چیدمان سایت های ساختمانی استفاده کرده اند. نتایج اعتبار سنجی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر به ارائه نتایج بهتر از نظر اکتشاف بهبود یافته، اجتناب از بهینه محلی، بهره برداری و همگرایی بوده راه حل های بهینه برتری برای مسائل طرح بندی سایت داشته که نشان می دهد این الگوریتم در حل مسائل محدود با فضاهای جستجوی متنوع دارای مزیت است اما کاربرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل واقعی با فضاهای جستجوی ناشناخته در نظر گرفته نشده است [۱۶]. شاه ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۳) به حل مسئله پیدمان سایت ساخت و ساز چند ذینفعی

^۱ Colliding bodies optimization

^۲ Enhanced colliding bodies optimization

^۳ Noise effects

با استفاده از الگوریتم PSO پرداخته است اما نتایج به دست آمده شامل محدودیت های مربوط به کاربرد الگوریتم PSO در خصوص بهینه سازی درسایت های با اندازه بزرگتر و بهینه سازی هزینه و ایمنی بوده است. همچنین در مقاله دیگری که اخیراً منتشر شده است [۱۷]. کاوه و همکاران (۲۰۲۴) از دو الگوریتم شامل الگوریتم جستجوی گرانشی و بهینه سازی تبادل حرارتی برای حل مسأله استفاده کردند و نشان دادند دو الگوریتم فوق در مقایسه با سایر الگوریتم های بهینه سازی، توانایی ارائه راه حل های بهتر را داشته اند اما تنها سه متغیر هزینه، دسترسی و اندازه تجهیزات در تابع هدف تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است اما فاکتورهایی از قبیل پایداری تاور، سهولت سرویس دهی به بخش های مختلف و ایمنی محیط کارگاه و ... در نظر گرفته نشده است [۱۸]. مرور تحقیقات پیشین نشان داد در مقالاتی مانند مقاله کاوه و همکاران مسأله مورد بررسی به صورت ایستا در نظر گرفته شده است و از مسأله بهینه سازی محلی (مکانی) استفاده شده است [۱۹]. در این مطالعه، تاثیر فاز ساخت و ساز بر چیدمان بررسی شده اما برنامه ریزی چیدمان سایت بهینه سازی نشده است. در مقاله ی مافیرو و فکری از الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسأله برنامه ریزی چیدمان سایت ساخت و ساز استفاده شده اما به عوامل زمان و هزینه (بارگیری و تخلیه) توجهی نشده است. در مقاله وون هون سان و سولیس (۲۰۲۳) از الگوریتم هیبریدی برای بهینه سازی چیدمان سایت های ساختمانی استفاده کرده اند اما این الگوریتم در حل مسائل محدود با فضاهای جستجوی متنوع دارای مزیت است اما کاربرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل واقعی با فضاهای جستجوی ناشناخته در نظر گرفته نشده است. در مقاله کاوه و همکاران (۲۰۲۴) برای حل مسأله مورد بررسی تنها سه متغیر هزینه، دسترسی و اندازه تجهیزات در تابع هدف تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است اما فاکتورهایی از قبیل پایداری تاور، سهولت سرویس دهی به بخش های مختلف و ایمنی محیط کارگاه در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر بعضی از پژوهشگران که در تحقیقات فوق مانند مقاله کاوه و همکاران (۲۰۱۶) و وون هون سان و سولیس (۲۰۲۳) یک چیدمان اولیه برای تجهیزات طراحی شده و فضای باقیمانده به اضافه کردن تجهیزات جدید اختصاص داده شده است اما طی این فرایند این امکان وجود دارد که فضای لازم برای تجهیزات بزرگتر که در مراحل بعدی قرار است وارد پروژه شوند وجود نداشته باشد یا چیدمان نهایی از حالت بهینگی خارج شود. بنابراین روش بهینه تر این است که تجهیزات به شکلی چیدمان شوند که فرایندهای اضافه از جمله فرایند حمل و دپوی مصالح و جانمایی دوباره ی تجهیزات مینیمم شود. برای این کار یکی از الگوریتم های هوش مصنوعی که میتواند در این راستا عملکرد مناسبی داشته باشد الگوریتم علف های هرز است. اما در تحقیقاتی که از این الگوریتم استفاده شده است مسأله برنامه ریزی چیدمان به صورت استاتیک (ایستا) در نظر گرفته شده است. در حالیکه این مسأله در فضای واقعی یک مسأله دینامیک (پویا) است. از سوی دیگر برای حل مسأله تحقیق، فاکتورهایی از قبیل دسترسی و اندازه تجهیزات پایداری تاور، هزینه، سهولت سرویس دهی به بخش های مختلف و ایمنی محیط کارگاه استفاده شده است.

دلیل استفاده از الگوریتم های علف های هرز و جستجوی ممنوعه برای حل مسأله تحقیق این بود که ابتدا جهت بهینه یابی مکان تجهیزات سایت و مینیمم کردن یا حذف فرایندهای اضافه از جمله فرایند حمل و دپوی مصالح و جانمایی دوباره ی تجهیزات از الگوریتم علف های هرز استفاده شد. اما در تحقیقاتی که از این الگوریتم استفاده شده است مسأله برنامه ریزی چیدمان به صورت استاتیک (ایستا) در نظر گرفته شده است. در حالیکه مسأله مورد بررسی در تحقیق، در فضای واقعی یک مسأله دینامیک (پویا) است بنابراین برای حل مسأله در فضای پویا از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای بهینه سازی فواصل بین تجهیزات و واحدها استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

مسائل مکان‌یابی سایت‌های ساخت و ساز را می‌توان به عنوان یک مسئله تخصیص درجه دوم مدل کرد که در آن هزینه‌های (C) مربوط به جریان^۱ (F) بین تاسیسات با توجه به مسافت طی شده (D) و مقدار جریان (F)، خطی است [۱۸، ۱۹]. هدف از چیدمان سایت ساخت و ساز اختصاص تعدادی از امکانات و تجهیزات از پیش تعیین شده (n) به طور منحصر به فرد به تعدادی مکان‌های از پیش تعیین شده (m) است و تعداد مکان‌ها باید برابر یا بیشتر از تعداد تأسیسات باشد [۱۹]. در مسئله مورد بررسی تحقیق، محدودیت اصلی مربوط به ارائه‌ی برنامه‌ریزی چیدمان از پیش تعیین‌شده به وسیله‌ی مدیران پروژه است. از آنجاییکه سایت‌های ساختمانی در طول مدت پروژه همواره در حال تغییر است و تجهیزات و مصالح به شکل پویا و پیوسته در طی مدت پروژه به سایت وارد می‌شوند یا از آن خارج می‌گردند و در هر مرحله از پروژه، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد نیاز پروژه طبق اولویت‌های پروژه تغییر می‌کنند و مدیران پروژه طی هر دوره با عنایت به شرایط سایت در مورد آن تصمیم‌گیری می‌کنند، لذا شرایط مکان‌یابی سایت منجر به تلاقی فضاها با یکدیگر و در نتیجه تغییرات مکرر در چیدمان تجهیزات پروژه می‌شوند. بنابراین پیدا کردن یک روش ترکیبی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی بر اساس ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه در تحقیق حاضر ارائه شده و همچنین مقالات دیگری در این زمینه بصورت کاربردی منتشر شده است [۱۸-۲۲]. طراحی شده است. گام‌های شبیه‌سازی این الگوریتم عبارتند از:

گام نخست: پخش دانه در مکان مورد بررسی؛

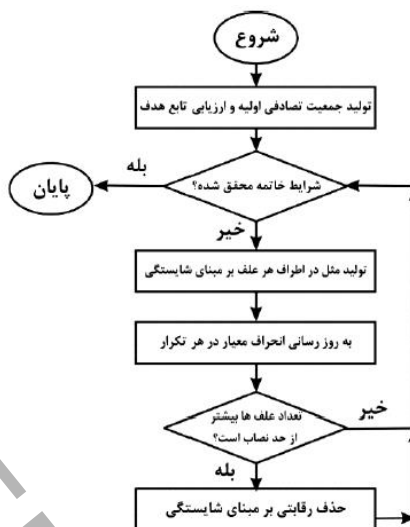
گام دوم: رشد (زاد و ولد) دانه‌ها بر اساس پراکندگی و مطلوبیت محیطی؛

گام سوم: تداوم حیات علف‌هایی که دارای مطلوبیت بیشتری هستند (مرحله‌ی حذف رقابتی)

گام چهارم: تداوم فرایند تا دستیابی به علف‌هایی با بهترین مطلوبیت.

بر این اساس فلوچارت الگوریتم در شکل ۱ ارائه شده است:

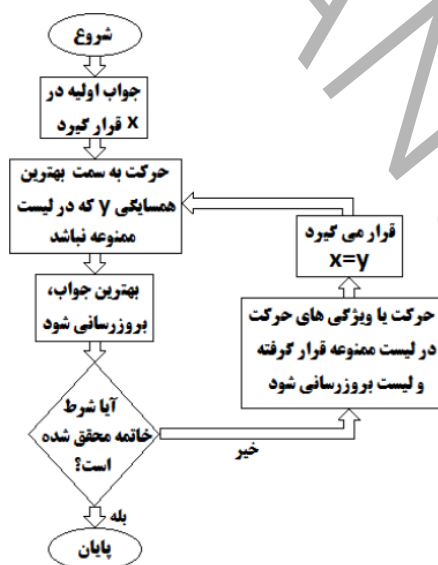
^۱ Flow



شکل (۱): فلوچارت مربوط به الگوریتم علف هرز

Figure 1. Flowchart of the weed algorithm

در ادامه از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای تعیین مقادیر بهینه استفاده شد تا با ترکیب دو الگوریتم به مکانیابی بهینه چیدمان تجهیزات سایت پرداخته شود. الگوریتم جستجوی ممنوعه یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌ها در زمینه حل مسائل بهینه سازی، به خصوص مسائل بهینه سازی مبتنی بر گراف و مسائل بهینه سازی ترکیبی می‌باشد. این الگوریتم با یک جواب اولیه برای مسأله مورد بررسی که با عنوان جواب فعلی نام‌گذاری می‌شود، آغاز خواهد شد. سپس جستجو برای یافتن جواب بهتر در همسایگی جواب فعلی، شروع خواهد شد. پاسخ جدید به عنوان جواب فعلی در نظر گرفته می‌شود و فرآیند جستجو دوباره تکرار می‌شود و تا زمانی ادامه می‌یابد که شرایط پایان از جمله مدت زمان اجرا یا دستیابی به اهداف مورد نیاز برای پاسخ و یا هر دو گزینه مورد نظر محقق شود. بر این اساس فلوچارت الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است:



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوعه

Figure 2. Flowchart of the forbidden search algorithm

جهت ترکیب دو الگوریتم، ابتدا جهت در نظر گرفتن شرایط پویا و بهینه‌سازی بهینه سازی فواصل بین تجهیزات و واحدها از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده شد سپس بر اساس پاسخ‌های به دست آمده، الگوریتم علف هرز برای و مینیمم کردن یا حذف فرایندهای اضافه از جمله فرایند حمل و دپوی مصالح و جانمایی دوباره‌ی تجهیزات و رسیدن به چیدمان بهینه اجرا گردید. در این تحقیق برای چیدمان تاورکرین مربوط به پروژه، فاکتورهایی از قبیل پایداری تاور، سهولت سرویس دهی به بخش های مختلف، دسترسی به مصالح، ایمنی محیط کارگاه و ... در نظر گرفته شد. همچنین عوامل سرویس دهی به بخش های مختلف طبق فواصل میان آنها و مسأله تأمین ایمنی نیز لحاظ شده است. تابع هدف کلی تحقیق بر اساس مقاله کاوه و همکاران [۱۸]. به شکل زیر است:

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \times D_{i,j} \quad (1)$$

که در آن F تابع هدف است. n تعداد تجهیزات و مکان ها است. ضریب $W_{i,j}$ نشان دهنده هزینه حمل و نقل واقعی به ازای واحد فاصله بین تجهیزات i و j (با در نظر گرفتن تعداد سفرهای انجام شده) یا وزن نزدیکی نسبی است که نشان دهنده نزدیکی مورد نیاز بین تجهیزات i و j است. همچنین $D_{i,j}$ نیز فاصله بین تجهیزات i و j است.

در ادامه بر اساس الگوریتم‌های مورد استفاده در تحقیق، به بازنمایی مسأله و مدل مورد نظر تحقیق پرداخته شده است. تابع هدف معادله ۲ مجموع چیدمان مجدد و هزینه جابجایی مصالح و تجهیزات را در طول افق برنامه‌ریزی به حداقل می رساند.

$$\min \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N A_{ijl} X_{t-1,ij} X_{til} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{ijkl} X_{tij} X_{tkl} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$X_{ij} = \{0,1\}, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

محدودیت مربوط به معادله ۳ تضمین می‌کند که هر بخش (واحد) به یک مکان در هر دوره اختصاص یابد. محدودیت ۴ تضمین می‌کند که هر مکان در هر دوره به یک بخش اختصاص یابد. همچنین محدودیت ۵، محدودیت‌های متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد. در این راستا معادله ۶ برای مینیمم کردن مجموع هزینه های حمل و نقل، چیدمان مجدد و هزینه‌های جابه‌جایی تجهیزات تا انبار پروژه در نظر گرفته شده است:

$$\min TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{F_{t-1}} \sum_{j=i+1}^{F_t} TCR_{ij}^t \times D_{ij}^t \quad (6)$$

معادله ۷ برای مینیمم کردن مجموع هزینه‌های جابه‌جایی تجهیزات متحرک در مراحل مختلف افق برنامه‌ریزی:

$$\min RC = \sum_{t=2}^T \sum_{m=1}^{NMF_t} RC_m^{t(t-1)} \quad (7)$$

معادله‌ی ۸، مجموع هزینه های ثابت و متحرک را نشان میدهد و در واقع هزینه جابه‌جایی هر کدام از تجهیزات تعیین می‌کند و چنانچه محل هر کدام از آنها به شکل جداگانه تغییر یابد باید مینیمم هزینه آن به شکل زیر محاسبه شود:

$$RC_m^{t(t-1)} = E_m \times \begin{cases} 0 & \varphi_m^t = \varphi_m^{t-1} \text{ AND } D_m^{t(t-1)} = 0 \\ (FRC_m + VRC_m D_m^{t(t-1)}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

در معادله ۸ اگر محل تجهیز تغییر کند هزینه مربوط به خود را دارد و اگر محل آن تغییر نکند هزینه برابر با صفر خواهد بود. E_m ضریبی است به این صورت که اگر تجهیز متحرک m در مراحل قبلی ($t-1$) وجود داشته باشد برابر با ۱ و در غیراینصورت برابر با ۰ خواهد بود.

معادله ۹ هزینه فاصله تجهیزات نسبت به انبار و هزینه‌ی جابه‌جایی میان تجهیزات و انبار است:

$$DC = \sum_{t=2}^T \sum_{j=1}^{F_t} C_0 D_{j0}^{t-1} D_{0j}^t \quad (9)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (10)$$

$$|x_o - x_i| \geq \frac{(Lx_o \cos \varphi_o + Ly_o \sin \varphi_o)}{2} + \frac{(Lx_i \cos \varphi_i + Ly_i \sin \varphi_i)}{2} \quad (11)$$

$$|y_o - y_i| \geq \frac{(Ly_o \cos \varphi_o - Lx_o \sin \varphi_o)}{2} + \frac{(Ly_i \cos \varphi_i - Lx_i \sin \varphi_i)}{2}$$

$$|X_{\text{site}} - x_i| \leq \frac{LX_{\text{site}} - (Lx_i \cos \varphi_i + Ly_i \sin \varphi_i)}{2}; \quad (12)$$

$$|Y_{\text{site}} - y_i| \leq \frac{LY_{\text{site}} - (Ly_i \cos \varphi_i - Lx_i \sin \varphi_i)}{2}$$

$$|x_i - x_j| \geq \left(\frac{Lx_i \cos \varphi_i + Ly_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Lx_j \cos \varphi_j + Ly_j \sin \varphi_j}{2} \right), \text{ or} \quad (13)$$

$$|y_i - y_j| \geq \left(\frac{Ly_i \cos \varphi_i + Lx_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Ly_j \cos \varphi_j + Lx_j \sin \varphi_j}{2} \right)$$

$$|x_i - x_j| \geq \left(\frac{Lx_i \cos \varphi_i + Ly_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Lx_j \cos \varphi_j + Ly_j \sin \varphi_j}{2} \right) + D_{ij}^{\min}, \text{ or} \quad (14)$$

$$|y_i - y_j| \geq \left(\frac{Ly_i \cos \varphi_i + Lx_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Ly_j \cos \varphi_j + Lx_j \sin \varphi_j}{2} \right) + D_{ij}^{\min}$$

$$|x_i - x_j| \leq \left(\frac{Lx_i \cos \varphi_i + Ly_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Lx_j \cos \varphi_j + Ly_j \sin \varphi_j}{2} \right) + D_{ij}^{\max}, \text{ and} \quad (15)$$

$$|y_i - y_j| \leq \left(\frac{Ly_i \cos \varphi_i + Lx_i \sin \varphi_i}{2} + \frac{Ly_j \cos \varphi_j + Lx_j \sin \varphi_j}{2} \right) + D_{ij}^{\max}$$

معادله ۱۰ فاصله از پیش تعیین شده مثلثی بین تجهیزات را نشان می‌دهد. معادله ۱۱ محدودیت همپوشانی بین تجهیزات و معادله ۱۲ محدودیت مرزی سایت را مشخص می‌کند. معادله ۱۳ نداشتن نقاط تلاقی بین تجهیزات را تعیین می‌کند. معادله ۱۴ محدودیت‌های حداقل فاصله بین تجهیزات را نشان می‌دهد و معادله ۱۵ محدودیت حداکثر فاصله بین تجهیزات را تعیین می‌کند.

۳- بحث و نتایج

برای مطالعه موردی و حل مسأله از دیتا ست لکسون و انسکور [۲۱] استفاده شد که شامل تست‌هایی با ۶، ۱۲، ۲۰، و ۳۰ بخش (واحد) (یعنی $N = 6, 12, 20, 30$) هر کدام با ۳ و ۵ دوره (یعنی $T = 3, 5$) بود. هر نمونه شامل چهار مسئله آزمایشی

است. بنابراین، ۳۲ مسأله آزمایشی در این مجموعه داده وجود دارد. مجموعه داده‌ها بر اساس شش عامل ارائه شده است: تعداد بخش‌ها (واحدها)، تعداد دوره‌های زمانی، نسبت هزینه‌های چیدمان مجدد و هزینه‌های جریان، درصد بخش‌های جدید در یک دوره، درصد مربوط به هر جفت از بخش‌ها با جریان مثبت و حداکثر تغییر جریان و یک جفت از بخش‌ها در یک دوره متوالی. مشخصات تجهیزات سایت در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱) مشخصات تجهیزات سایت

Table 1: Site equipment specifications

علائم اختصاری	تجهیزات سایت
f1	دفتر سایت
f2	اتاق کنترل برق، آب و سایر تاسیسات
f3	انبار
f4	اقامتگاه کارگران
f5	کارگاه فولاد آرماتور
f6	تاورکین
f7	کارگاه بتن و بچینگ

بر اساس تنظیم پارامترها در مطالعات پیشین تعداد کل راه حل‌های اولیه ($initial_n$) تولید شده برای هر مسئله در تست‌های الگوریتم جستجوی ممنوعه در جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۲) تعداد کل راه حل‌های اولیه ($initial_n$) تولید شده برای هر مسئله در تست‌ها

Table 2: Total number of initial solutions ($initial_n$) generated for each problem in the tests

اندازه مسأله		$initial_n$
N	T	
6	3	50
	5	50
12	3	100
	5	100
20	3	200
	5	400
30	3	600
	5	800

زمان محاسباتی برای تست‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است:

جدول ۳) زمان محاسباتی برای تست‌ها

Table 3: Computational time for tests

اندازه مسأله		زمان محاسباتی (min)
N	T	
6	3	0.33333
	5	0.5
12	3	1.5
	5	4
20	3	8
	5	12
30	3	15
	5	18

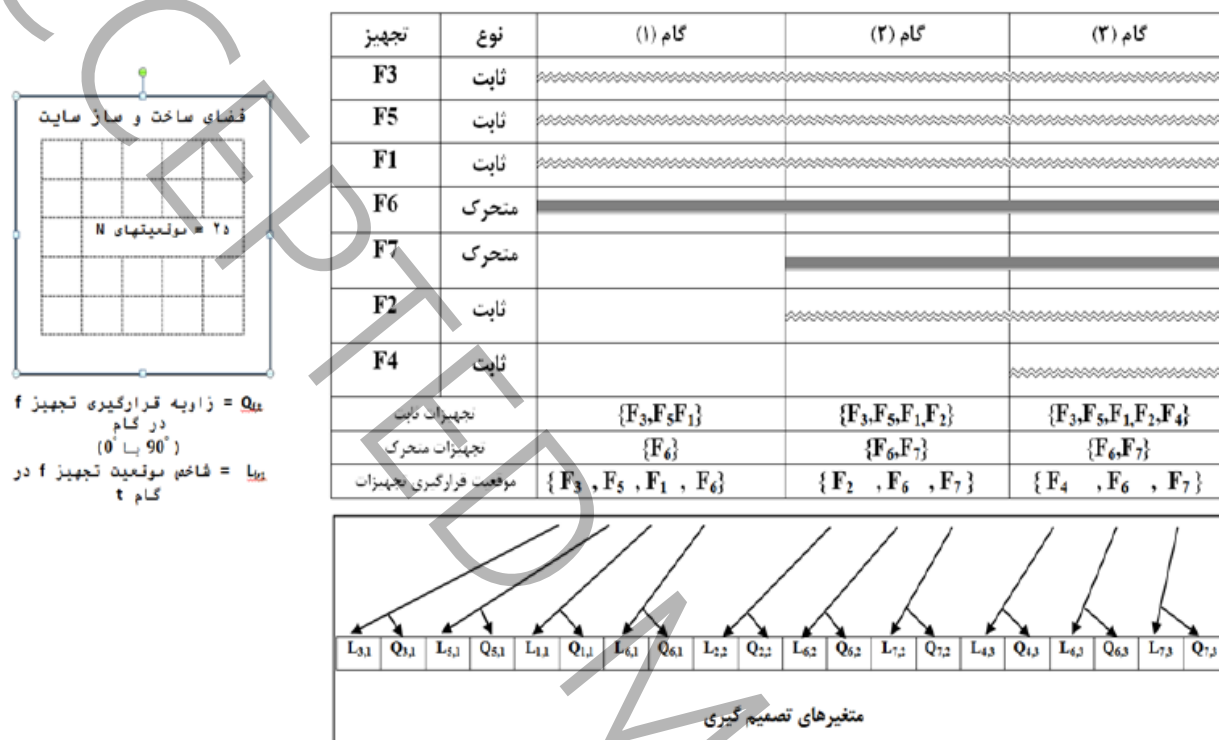
نتایج حل الگوریتم جستجوی ممنوعه در جدول ۴ آورده شده است:

جدول ۴) نتایج حل الگوریتم جستجوی ممنوعه

Table 4: Results of solving the forbidden search algorithm

Pro. size		Problem No.	TSbasic	TSfre	TSdriver	TSinten	TSfreedriver	TSfreinten	TSdriverinten	TSall	Best solution
N	T										
6	3	P01	267	267	267	267	267	267	267	267	267
		P02	260	260	260	260	260	260	260	260	260
		P03	363	363	363	363	363	363	363	363	363
	5	P04	299	299	299	299	299	299	299	299	299
		P05	442	442	442	442	442	442	442	442	442
		P06	586	586	586	586	586	586	586	586	586
		P07	424	424	424	424	424	424	424	424	424
		P08	428	428	428	428	428	428	428	428	428
		P09	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624
12	3	P10	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973
		P11	1661	1665	1661	1665	1661	1665	1661	1661	1661
		P12	2102	2097	2097	2102	2097	2097	2097	2097	2097
	5	P13	2930	2930	2943	2930	2930	2930	2943	2930	2930
		P14	3701	3703	3701	3701	3709	3703	3701	3701	3701
		P15	2779	2756	2756	2765	2756	2756	2756	2756	2756
		P16	3364	3364	3364	3366	3364	3382	3387	3364	3364
		P17	2758	2758	2822	2758	2758	2758	2822	2758	2758
		P18	5318	5318	5318	5318	5318	5318	5318	5318	5318
20	3	P19	3034	3054	3034	3034	3085	3102	3038	3034	3034
		P20	5873	5873	5873	5873	5869	5904	5873	5869	5869
		P21	4554	4588	4554	4554	4573	4588	4554	4573	4554
	5	P22	9734	9754	9745	9734	9724	9754	9745	9724	9724
		P23	4654	4677	4740	4654	4675	4667	4740	4675	4654
		P24	8979	8989	8979	8979	8979	8997	8989	8979	8979
		P25	7131	7142	7131	7131	7130	7142	7131	7130	7130
		P26	14528	14478	14563	14528	14487	14478	14563	14487	14478
		P27	8098	8136	8047	8059	8074	8120	8054	8049	8047
		P28	14933	14973	14901	14933	14945	14906	14901	14908	14901
30	3	P29	13396	13378	13463	13396	13374	13489	13463	13374	13374
		P30	25515	25536	25448	25515	25410	25536	25448	25428	25410
		P31	12163	12203	12163	12229	12204	12279	12163	12163	12163
	5	P32	24307	24369	24389	24334	24283	24391	24389	24283	24283

در جدول ۵ در ستون آخر نتایج بهترین جواب ارائه شده است و اعداد پررنگ نشان دهنده بهترین مقدار تابع هدف (OF) به دست آمده برای هر مسئله آزمون است. همگرایی نتایج به دست آمده مناسب است و زمان حل برابر با ۰/۰۲۶ محاسبه شده است. محل قرارگیری هر یک از تجهیزات ثابت و متحرک در شکل ۳ نشان داده شده است:



شکل (۳): محل قرارگیری هر یک از تجهیزات ثابت و متحرک

Figure 3. Location of each fixed and mobile equipment

۳-۱- حالت‌های مختلف مسأله و تعداد مراحل مکانیابی

در بین تمامی جواب‌ها، یک جواب با کمترین مقدار هزینه انتخاب شده است. نحوه تخصیص و چیدمان تجهیزات در سه مرحله برای هر کدام از جواب‌ها در هر مرحله در ادامه ارائه شده است. قبل از آن مشخصات پارامترهای ورودی بر اساس مختصات تجهیزات و هزینه‌های مربوط به آنها در جدول ۵ و برای مینیمم فاصله مجاز میان تجهیزات در جدول ۶ و برای ماکسیمم فاصله مجاز میان تجهیزات در جدول ۷ ارائه شده است:

جدول ۵) مشخصات پارامترهای ورودی بر اساس مختصات تجهیزات و هزینه‌های مربوط به آنها

Table 5: Input parameter specifications based on equipment coordinates and their related costs

عرض	طول	VRC	FRC	تجهیزات
۱۷۸	۵۴	۱۲۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰	f1
۳۵	۲۷	۷۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	f2
۲۴	۲۱	۵۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰۰	f3
۷	۷	۵۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰۰	f4

۲۵	۱۹	۸۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	f5
۴	۴	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	f6
۲۲	۲۲	۵۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰	f7

جدول ۶) پارامترهای ورودی برای مینیمم فاصله مجاز میان تجهیزات سایت

Table 6: Input parameters for minimum allowable distance between site equipment

f7	f6	f5	f4	f3	f2	f1	تجهیزات
۶۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۰	f1
۶۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	۰	۶۰	f2
۶۰	۲۵	۴۲	۲۵	۰	۶۰	۶۰	f3
۶۰	۱۴	۳۳	۰	۲۵	۶۰	۶۰	f4
۶۰	۳۳	۰	۳۳	۴۲	۶۰	۶۰	f5
۶۰	۰	۳۳	۱۴	۲۵	۶۰	۴۰	f6
۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	f7

جدول ۷) پارامترهای ورودی برای ماکسیمم فاصله مجاز میان تجهیزات سایت

Table 7: Input parameters for maximum allowable distance between site equipment

f7	f6	f5	f4	f3	f2	f1	تجهیزات
۳۰۳	۸۸	۲۳۹	۲۰۰	۲۱۲	۳۴۳	۰	f1
۲۷۵	۸۸	۲۰۴	۱۶۹	۱۸۴	۰	۳۴۳	f2
۱۶۲	۸۸	۷۹	۴۳	۰	۱۸۴	۲۱۲	f3
۱۳۷	۱۱۱	۶۴	۰	۴۳	۱۶۹	۲۰۰	f4
۱۷۴	۶۲	۰	۶۴	۷۹	۲۰۴	۲۳۹	f5
۸۸	۰	۶۲	۱۱۱	۸۸	۸۸	۸۸	f6
۰	۸۸	۱۷۴	۱۳۷	۱۶۲	۲۷۵	۳۰۳	f7

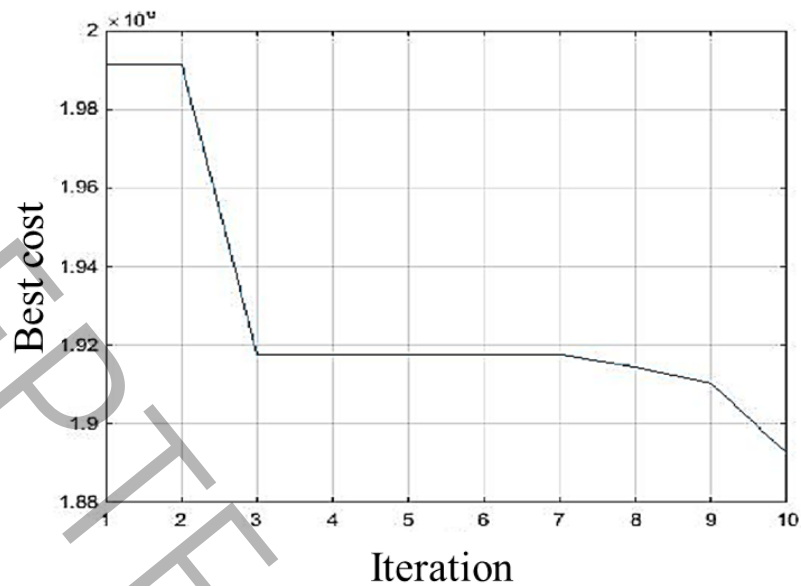
در جدول ۸ پارامترهای ورودی برای هزینه سفر میان تجهیزات سایت مشخص شده است:

جدول ۸) پارامترهای ورودی برای هزینه سفر میان تجهیزات سایت

Table 8: Input parameters for travel cost between site equipment

f7	f6	f5	f4	f3	f2	f1	تجهیزات
۱۲۴	۷۱	۸۷	۷۲	۸۴	۱۲۹	۰	f1
۱۰۳	۶۱	۷۵	۶۱	۶۹	۰	۱۲۹	f2
۶۶	۱۹	۳۲	۱۸	۰	۶۹	۸۴	f3
۵۲	۹	۲۴	۰	۱۸	۶۱	۷۲	f4
۶۷	۲۱	۰	۲۴	۳۲	۷۵	۸۷	f5
۵۳	۰	۲۱	۹	۱۹	۶۱	۷۱	f6
۰	۵۲	۶۷	۵۲	۶۶	۱۰۳	۱۲۴	f7

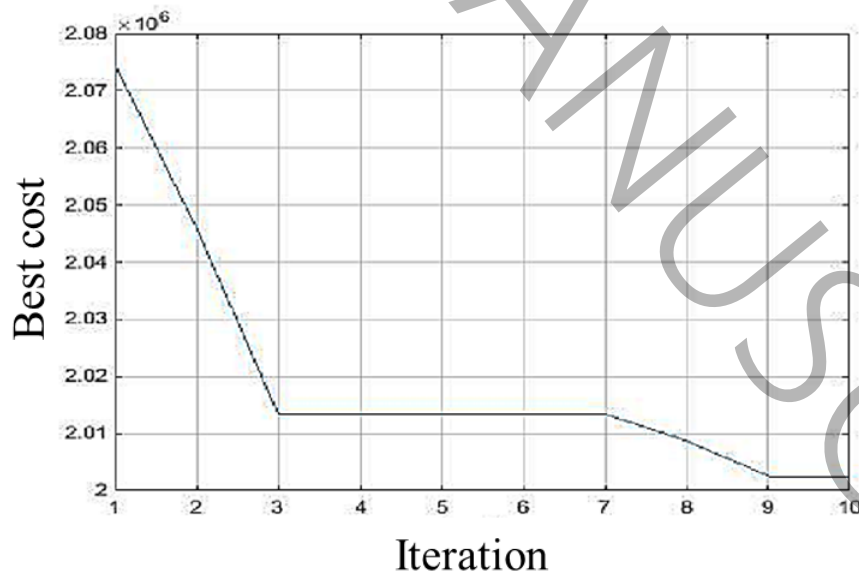
نتایج پاسخ بهینه برای هزینه بر اساس نرم افزار GAMZ در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل (۴): نتایج پاسخ بهینه برای هزینه در الگوریتم علف هرز

Figure 4: Results of the optimal response for cost in the weed algorithm

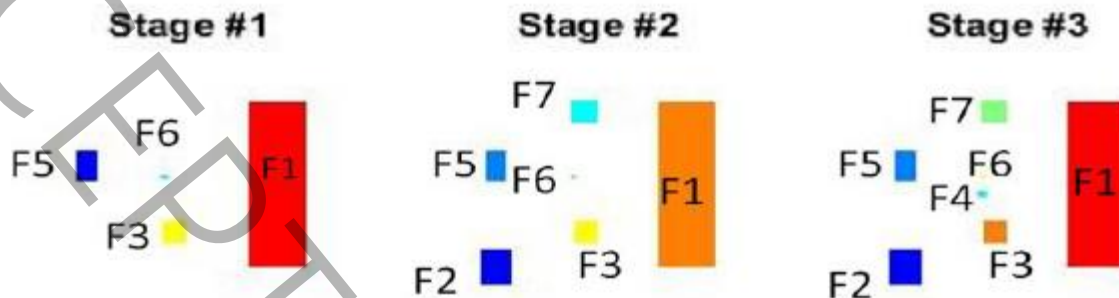
شکل ۴ نشانگر حل مسأله طی ده بار تکرار در نرم افزار برای الگوریتم علف هرز است و در پایان مقدار بهینه که کمترین هزینه را داشته باشد مشخص شد. طبق نمودار ۱ مقادیر هزینه از ۱/۹۹ هزار دلار به ۱/۸۹ هزار دلار کاهش یافته است. شکل ۵ نتایج پاسخ بهینه برای هزینه بر اساس نرم افزار GAMZ در الگوریتم جستجوی ممنوعه را نشان می دهد:



شکل (۵): نتایج پاسخ بهینه برای هزینه در الگوریتم جستجوی ممنوعه

Figure 5: Results of the optimal response for cost in the forbidden search algorithm

در اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه مشاهده می‌شود که مقدار هزینه از ۱/۹۹ هزار دلار به ۱/۹۳ هزار دلار کاهش یافته است. در خصوص موقعیت چیدمان بهینه پاسخ‌های هر الگوریتم در سه مرحله مشخص شده است. در شکل ۶ موقعیت چیدمان تجهیزات سایت بر اساس نتایج الگوریتم علف هرز مشخص شده است:

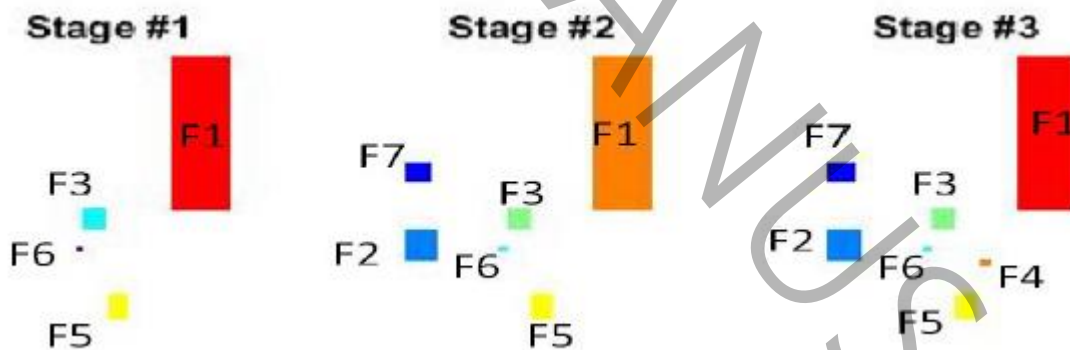


شکل (۶): موقعیت چیدمان تجهیزات سایت بر اساس نتایج الگوریتم علف هرز

Figure (6): Location of site equipment layout based on the results of the weed algorithm

در شکل شماره ۳ مشخص است که تجهیز شماره f3 (انبار) به عنوان یکی از تجهیزات ثابت که دارای مختصات $x=90$ و $y=170$ است در تمام مراحل چیدمان سایت باید بقیه تجهیزات با توجه به حداقل و حداکثر فواصل ممکن، نسبت به تجهیز f3 مکانیابی گردند یعنی فواصل باید با توجه به موقعیت انبار مکانیابی و تعیین شوند. بر اساس نتایج شکل ۳ در مرحله اول باید تجهیزات f1، f3، f5 و f6 چیدمان شوند در مرحله دوم باید تجهیزات شماره f2 و f7 مکانیابی گردند. در نهایت و در مرحله سوم باید تجهیز f4 اضافه شود.

در شکل ۴ موقعیت چیدمان تجهیزات سایت بر اساس نتایج الگوریتم جستجوی ممنوعه مشخص شده است:



شکل (۷): موقعیت چیدمان تجهیزات سایت بر اساس نتایج الگوریتم جستجوی ممنوعه

Figure (7): Location of site equipment layout based on the results of the forbidden search algorithm

در نتایج شکل ۷ نیز مشخص است که فواصل باید با توجه به موقعیت انبار مکانیابی و تعیین شوند. همچنین در مرحله اول باید تجهیزات f1، f3، f5 و f6 به صورت شکل ۴ چیدمان شوند در مرحله دوم باید تجهیزات شماره f2 و f7 به صورت شکل ۴ مکانیابی گردند. در نهایت و در مرحله سوم نیز باید تجهیز f4 اضافه گردد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به حل مسأله مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی بر اساس ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه پرداخته شد. مرور تحقیقات پیشین نشان داد در مقالاتی مانند مقاله کاوه و همکاران مسأله مورد بررسی به صورت ایستا در نظر گرفته شده است و از مسأله بهینه‌سازی محلی (مکانی) استفاده شده است. در مقاله تائو و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر فاز ساخت و ساز بر چیدمان بررسی شده اما برنامه ریزی چیدمان سایت بهینه‌سازی نشده است. در مقاله‌ی ماقفیروه و فکری (۲۰۲۳) از الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسأله برنامه ریزی چیدمان سایت ساخت و ساز استفاده شده اما به عوامل زمان و هزینه (بارگیری و تخلیه) توجهی نشده است. در مقاله هون سان و سولیس (۲۰۲۳) از الگوریتم هیبریدی برای بهینه‌سازی چیدمان سایت‌های ساختمانی استفاده کرده‌اند اما این الگوریتم در حل مسائل محدود با فضاهای جستجوی متنوع دارای مزیت است اما کاربرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل واقعی با فضاهای جستجوی ناشناخته در نظر گرفته نشده است. در مقاله کاوه و همکاران (۲۰۲۴) نیز برای حل مسأله مورد بررسی تنها سه متغیر هزینه، دسترسی و اندازه تجهیزات در تابع هدف تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است اما فاکتورهایی از قبیل پایداری تاور، سهولت سرویس دهی به بخش‌های مختلف و ایمنی محیط کارگاه و ... در نظر گرفته نشده است. بنابراین برای حل مسأله مورد بررسی در تحقیق علاوه بر در نظر گرفتن حالت پویا (دینامیک)، فاکتورهایی از قبیل دسترسی و اندازه تجهیزات پایداری تاور، هزینه، سهولت سرویس دهی به بخش‌های مختلف و ایمنی محیط کارگاه استفاده شد. همچنین لازم به ذکر است دلیل استفاده از الگوریتم‌های علف‌های هرز و جستجوی ممنوعه برای حل مسأله تحقیق این بود که ابتدا جهت بهینه‌یابی مکان تجهیزات سایت و مینیمم کردن یا حذف فرایندهای اضافه از جمله فرایند حمل و دپوی مصالح و جانمایی دوباره‌ی تجهیزات از الگوریتم علف‌های هرز استفاده شد. اما در تحقیقاتی که از این الگوریتم استفاده شده است مسأله برنامه ریزی چیدمان به صورت استاتیک (ایستا) در نظر گرفته شده است. در حالیکه مسأله مورد بررسی در تحقیق، در فضای واقعی یک مسأله دینامیک (پویا) است بنابراین برای حل مسأله در فضای پویا از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای بهینه‌سازی فواصل بین تجهیزات و واحدها استفاده شد.

- برای حل مسأله تحقیق، دو دسته تجهیز ثابت و متحرک لحاظ شدند به طوری که ظرفیت جابه‌جایی تجهیزات حرکتی در بازه‌های متفاوت افق برنامه‌ریزی پروژه در نظر گرفته شود. برای حل مسأله تحقیق در ابعاد بزرگ و واقعی با شرایط دینامیکی از ترکیب الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده شد. برای مطالعه موردی و حل مسأله از دیتا ست لکسون و انسکور استفاده شد که شامل تست‌هایی با ۶، ۱۲، ۲۰، و ۳۰ بخش (واحد) (یعنی $N = 6, 12, 20, 30$) هر کدام با ۳ و ۵ دوره (یعنی $T = 3, 5$) بود. لذا تعداد ۳۲ مسأله آزمایشی بر اساس شش عامل و هفت تجهیز مورد بررسی قرار گرفت.
- در بین تمامی جواب‌ها، یک جواب با کمترین مقدار هزینه انتخاب شده است. نحوه تخصیص و چیدمان تجهیزات در سه مرحله برای هر کدام از جواب‌ها در هر مرحله در ادامه ارائه شد. حل مسأله طی ده بار تکرار در نرم افزار گمز برای الگوریتم علف‌های هرز و الگوریتم جستجوی ممنوعه انجام شد تا مقدار بهینه که کمترین هزینه را داشته باشد مشخص شود. طبق نتایج حاصل از الگوریتم علف‌های هرز مقادیر هزینه از ۱/۹۹ هزار دلار به ۱/۸۹ هزار دلار کاهش یافت. در اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه مقدار هزینه از ۱/۹۹ هزار دلار به ۱/۹۳ هزار دلار کاهش یافت.
- در خصوص موقعیت چیدمان بهینه، پاسخ‌های هر الگوریتم در سه مرحله مشخص شد. بر این اساس مشخص شد تجهیز شماره $f3$ (انبار) به عنوان یکی از تجهیزات ثابت باید موقعیت اولیه در نظر گرفته شود و در تمام مراحل چیدمان سایت، بقیه تجهیزات با توجه به حداقل و حداکثر فواصل ممکن، نسبت به تجهیز $f3$ مکانیابی گردند یعنی فواصل باید با توجه به موقعیت انبار مکانیابی و تعیین شوند. نتایج هر دو الگوریتم نشان داد در مرحله اول باید تجهیزات $f1, f3, f5$ و $f6$ چیدمان شوند در مرحله دوم باید تجهیزات شماره $f2$ و $f7$ مکانیابی گردند. در نهایت و در مرحله سوم باید تجهیز $f4$ اضافه شود.

- در پژوهش‌های آتی می‌توان جهت سنجش اعتبار مدل پیشنهادی در این تحقیق از روش‌ها و الگوریتم‌های حل دیگری مانند الگوریتم ALO, PSO بهره گرفت. در مقاله‌ی حاضر هدف اصلی بهینه‌یابی مکان تجهیزات سایت و مینیمم کردن یا حذف فرایندهای اضافه از جمله فرایند حمل و دپوی مصالح و جانمایی دوباره‌ی تجهیزات بوده است، در حالیکه می‌توان اهداف دیگری از قبیل ایمنی نیروهای انسانی یا ایمنی تمامی تجهیزات نیز مورد بررسی قرار گیرد. از سوی دیگر در این مقاله جهت لحاظ کردن فاصله میان تجهیزات از رویکر فاصله متعامد بهره گرفته شد اما در تحقیقات آتی از دیگر روش‌های موجود برای لحاظ کردن فاصله بین تجهیزات می‌توان بهره گرفته شود. همچنین با عنایت به مشخصه‌های تاورکین در کارگاه‌های ساختمانی، می‌توان علاوه بر محدودیت‌های مورد بررسی در این تحقیق محدودیت‌های دیگری را اعمال نمود و مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد.

ضمایم

برای طراحی مدل تحقیق نمادگذاری‌ها و پارامترهای زیر در نظر گرفته شده است:

جدول (۱): نمادگذاری و پارامترهای مسأله تحقیق

Table (1): Notation and parameters of the research problem

نماد	پارامتر	نماد	پارامتر
i, j	تجهیزات سایت	t	دوره زمانی
F_{t-1}	تعداد تجهیزات ثابت و متغیر در دوره $t-1$	T	تعداد مراحل ساخت یا تعداد دوره‌ها در افق برنامه ریزی
φ_i, φ_j	جهت‌یابی محل تجهیزات i و j	F_t	تعداد تجهیزات ایستا و پویا (ثابت و متحرک) در مرحله t
$TCR_{i,j}^t$	میزان هزینه سفر (دلار بر متر) بین تجهیزات i و j در مرحله t	$D_{ij}^{\min}, D_{ij}^{\max}$	حداقل و حداکثر فاصله بین تجهیزات i و j
NMF_t	تعداد تجهیزات متحرک در مرحله t	C_0	هزینه انبارداری
FRC_m	هزینه‌های ثابت مکانیابی مجدد برای تجهیزات متحرک m	D_{j0}^{t-1}	فاصله بین تجهیز j و انبار در مرحله $t-1$
VRC_m	هزینه‌های متغیر مکانیابی مجدد برای تجهیزات متحرک m	D_{0j}^t	فاصله بین انبار و تجهیز j در مرحله t
$\varphi_m^t, \varphi_m^{t-1}$	جهت‌یابی محل تجهیزات متحرک m در مرحله t و $t-1$	x_0, y_0	مختصات متعامد انبار از مرکز سایت
X_i, Y_i	مختصات متعامد از مرکز تجهیزات i	Lx_0, Ly_0	طول و عرض تعریف شده از انبار
X_{site}, Y_{site}	مختصات متعامد از مرکز سایت	Lx_i, Ly_i	طول و عرض تعریف شده تجهیز i
TC	هزینه جابه‌جایی تجهیزات	RC	هزینه مکانیابی مجدد تجهیزات
D_{ij}^t	فاصله از پیش تعیین شده (m) بین تجهیزات i و j در مرحله t	$RC_i^{t(t-1)}$	هزینه مکانیابی مجدد از تجهیزات موقت i در مرحله t از موقعیت قبلی در مرحله $t-1$
$D_m^{t(t-1)}$	فاصله از پیش تعیین شده بین مکان‌ها و تجهیزات متحرک m در مرحله t و $t-1$		
DC	هزینه جابه‌جایی	D_{j0}^{t-1}	فاصله بین تجهیز j و انبار در مرحله $t-1$
D_{0j}^t	فاصله بین انبار و تجهیز j در مرحله t	l	مکان‌ها (محل‌ها)

تعداد واحدها و مکان‌ها	N	واحدها	k
فاصله بین مکان j و l	D_{jl}	هزینه چیدمان مجدد واحد i از مکان j به l در زمان t	A_{tijl}
هزینه جریان مواد از بخش i در مکان j به بخش k در مکان l در دوره t	$C_{tijkl} = F_{tik} * D_{jl}$	جریان (F) از واحد یا بخش i به واحد k در زمان t	F_{tik}
برابر است با ۱ اگر بخش i برای مکان j در زمان t در نظر گرفته شده باشد. در غیر اینصورت برابر با ۰ است.			X_{tij}

مراجع

1. Balakrishnan, J., Jacobs, F.R., and Venkataramanan, M.A. (1992). Solution for the Constrained Dynamic Facility Layout Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 57, pp. 280-286.
2. Benjaoran, V., & Peansupap, V. (2019). Grid-based construction site layout planning with Particle Swarm Optimisation and Travel Path Distance. *Construction Management and Economics*, 38(8), 673–688. <https://doi.org/10.1080/01446193.2019.1600708>.
3. Cai, W. Chen, H. and Zhang, J. (2020). An Enhanced Invasive Weed Optimization in Resource-Constrained Project Scheduling Problem," *11th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)*, Qingdao, China, pp. 1-7, doi: 10.1109/iCAST51195.2020.9319493.
4. Chiang, W. and Kouvelis, P. (1996). An Improved Tabu Search Heuristic for Solving Facility Layout Design Problems," *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 9. pp. 2565-2585.
5. Ghadiri, A, Sedaghat Shayegan, D. and Amirkardoust, A. (2022). Multi-objective firefly optimization algorithm for construction site layout planning", *Iranian Journal of optimization*, Volume 14, Issue 4, Page: 245 - 260.
6. Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*, 1(3), 190-206.
7. Hansen, S. (2024). Lessons Learned from Construction Site Layout Planning Practices. *Ingeniería e Investigación*, 44(1), e107160. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.107160>.
8. Sedaghat Shayegan, D, Lork, A, Hashemi, AH. (2022). Optimum cost design of reinforced concrete slabs using Mouth Brooding Fish (MBF) algorithm, *J Appl Eng Sci*; 10(23): ISSUE 1 ART.NO. 290: pp. 95-100.
9. Sedaghat Shayegan, D. (2022). Optimum cost design of reinforced concrete slabs using a metaheuristic algorithm, *Int J Optim Civil Eng* 2022; 12(4): 545-55.
10. Shahebrahimi, S. S. Lork, A. Sedaghat Shayegan, D. Amir Kardoust, A. (2023). Solving the Problem of Multi-Stakeholder Construction Site Layout Using Metaheuristic Algorithms, *Power System Technology*, Vol. 47 No. 4, 169-181.
11. Shahebrahimi, S. S. Lork, A. Sedaghat Shayegan, D. and Amir Kardoust, A. Shayegan, D. (2023). Solving the Problem of Multi-Stakeholder Construction Site Layout Using Metaheuristic Algorithms, *Power System Technology*, Volume 47 Issue 4. :231-249.

12. Shahebrahimi, S. S., Lork, A.D., Sedaghat Shayegan, D. and Kardoust, A. A. (2024). Impact of construction site layout planning optimization on Construction Project Management (Case Study of Launcher/ Receiver Stations in Pipeline Projects in
13. Tao, G., Feng, H., Feng, J. et al. (2022). Dynamic Multi-objective Construction Site Layout Planning Based on BIM. *KSCE J Civ Eng* 26, 1522–1534. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0708-y>.
14. Salah, M.; Khallaf, R.; Elbeltagi, E.; Wefki, H. (2023). Construction Site Layout Planning: A Social Network Analysis. *Buildings* , 13, 2637. <https://doi.org/10.3390/buildings13102637>.
15. Maghfiroh, M. & Fikri, M. R. (2023). Cuckoo search algorithm for construction site layout planning, *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)* 12(2):851-860.
16. Vu Hong Son, P., & Souliisa, F. (2023). A Hybrid Ant Lion Optimizer (ALO) Algorithm for Construction Site Layout Optimization. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 7(4), 50-71. doi: 10.22115/scce.2023.365303.1540.
17. Hawarneh, A. A., Bendak, S., & Ghanim, F. (2021). Construction site layout planning problem: Past, present and future. *Expert Systems With Applications*, 168, 114247. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114247>.
18. Kaveh, A., Khanzadi, M., Alipour, M. et al. (2016). Construction Site Layout Planning Problem Using Two New Meta-heuristic Algorithms. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 40, 263–275 <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0041-0>.
19. Kaveh, A., Shirzadi Javid, A. A., Vazirinia, Y. (2024). “Physics-inspired Metaheuristics for Construction Site Layout Planning Problem”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(1), pp. 68–87. <https://doi.org/10.3311/PPci.22902>.
20. Kaku, B.K. and Mazzola, J.B. (1997). A Tabu-Search Heuristic for the Dynamic Plant Layout Problem,” *Inform Journal on Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384.
21. Lacksonen, T.A. and Ensore, E.E. (1993) Quadratic Assignment Algorithms for the Dynamic Layout Problem,” *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 503-517.
22. Mehrabian, A.R. and. Lucas, C, (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization, *Ecological Informatics*, Vol.1,pp 366–355.
23. Osman, HM, Georgy, ME, Ibrahim, ME. (2003). A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms. *Automat Construct* 12(6):749–764.
24. Saberi, AA, Ahmadi, H, Sedaghat Shayegan, D, Amirkardoust, A. (2023). Prediction of electricity consumption using three meta-heuristic algorithms. *Int J Optim Civil Eng*. 13(1):111–125.
25. Saberi, AA. & Sedaghat Shayegan, D. (2021). Optimization of Haraz Dam reservoir operation using CBO metaheuristic algorithm. *Journal Int J Optim Civ Eng* 11(4):599–610. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14648.85636>.
26. Khorasan Province), *Int J Optim Civil Eng*. 4(1):83–93.
27. Tsegay, F. G., Mwanaumo, E., & Mwiya, B. (2023). Construction site layout planning practices in inner-city building projects: space requirement variables, classification and

relationship. *Urban, Planning and Transport Research*, 11(1).
<https://doi.org/10.1080/21650020.2023.2190793>.

28. Yang, B., Fang, T., Luo, X. et al. (2022). A BIM-Based Approach to Automated Prefabricated Building Construction Site Layout Planning. *KSCE J Civ Eng* 26, 1535–1552 <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0746-x>.
29. Zavari, M., Shahhosseini, V., Ardeshir, A., & Sebt, M. H. (2022). Multi-objective optimization of dynamic construction site layout using BIM and GIS. *Journal of Building Engineering*, 52, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104518>.
30. Zhao, S. and Li, Z. (2014). Multi-objective Optimization for Construction Site Layout Planning Problem under Fuzzy Random Environment, *Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Beijing, China, 2014, pp. 641-645, doi: 10.1109/CSO.2014.148.