

ارائه‌ی الگوریتم جست‌وجوی ممنوع با استراتژی تنوع برای حل مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات

نجمه بزرگی (کارشناس ارشد)

مصطفی عابدزاده* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۳
دوری ۱ - ۳۰ شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۱۷-۱۰۹، (پادداشت شرفی)

در ارتباط با «مسئله‌ی چیدمان تسهیلات» تحقیقات زیادی صورت گرفته است. هدف آن یافتن موقعیت دپارتمان در سطح کارخانه برای دوره‌های زمانی است، به‌گونه‌ی که دپارتمان‌ها هم‌پوشانی نداشته باشند و مجموع هزینه‌ی جابه‌جایی و چیدمان مجدد کمینه شود. به‌منظور اطمینان از عملکرد خوب سیستم تولیدی باید تغییرات پارامترهای مسئله در طی زمان در نظر گرفته شود. با توجه به پویا بودن تسهیلات تولیدی، مسئله‌ی چیدمان تسهیلات در حالت ایستا یک سناریوی واقعی نیست. در این مقاله مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات با فرض تساوی مساحت دپارتمان‌ها به‌وسیله‌ی الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع با استراتژی تنوع - شامل ساختار حافظه مبتنی بر تکرار، تابع جریمه و لیست ممنوع پویا - حل شده است. رویکرد پیشنهادی با دو مجموعه داده شاخص و معروف از ادبیات موضوع ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های قبلی عملکرد بهتری داشته و در بیشتر موارد جواب‌های بهتری ارائه داده است.

واژگان کلیدی: مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات، جست‌وجوی ممنوع، لیست ممنوع پویا، استراتژی تنوع.

bozorgi.najmeh@gmail.com
abedzadeh@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

مسئله‌ی استقرار تسهیلات به تعیین مؤثرترین آرایش دپارتمان درون یک کارخانه یا سیستم اداری می‌پردازد. محققین در مورد تعریف دقیق و رایج مسائل چیدمان توافق ندارند؛ برخی مسئله‌ی چیدمان تسهیلات را شامل آراستن n تسهیل با مساحت نابرابر در یک فضای مفروض می‌دانند به‌گونه‌ی که در محدوده‌ی طول و عرض کارخانه بگنجد و هزینه‌ی کل حمل و نقل مواد و هزینه‌ی فضای از دست رفته را نیز کمینه سازد. عده‌ی دیگر نیز آن را یک مسئله‌ی بهینه‌سازی می‌دانند، به‌نحوی که با در نظر گرفتن سیستم جریان مواد و تعاملات مختلف بین تسهیلات هنگام طراحی چیدمان، چیدمان‌هایی کارا ایجاد کنند.^[۱]

ساده‌ترین مورد مسئله‌ی استقرار تسهیلات (FLP)^۱، مسئله‌ی استقرار دپارتمان‌ها با اندازه یکسان است، به‌طوری که مقدار جریان مواد میان هر جفت دپارتمان در طول برنامه‌ریزی تغییر نکند. این مسائل، مسائل چیدمان ایستای تسهیلات (SFLP)^۲ با دپارتمان‌های یکسان خوانده می‌شوند که در سال ۱۹۷۵ به‌صورت مسائل تخصیص درجه دو (QAP)^۳ فرمول‌بندی شد.^[۲] در این مدل کف کارخانه به‌گرایدهایی با مستطیل‌های یکسان (مکان‌ها) تقسیم می‌شوند. در واقع مسئله اختصاص دپارتمان‌ها به مکان‌هاست به‌گونه‌ی که هیچ دو دپارتمانی به یک مکان مشابه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۱/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۸، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۲۸.

اختصاص داده نشوند و مجموع هزینه‌های تخصیص و جابه‌جایی مواد نیز کمینه شود.^[۲]

در محیط پویا جریان مواد بین هر جفت دپارتمان در طول برنامه‌ریزی تغییر می‌کند. همچنین ممکن است اندازه دپارتمان‌ها متناسب با این تغییرات، تغییر کند. این تغییرات بعضاً ناشی از تغییر در جریان مواد، اتمام تولید بعضی محصولات، معرفی محصول جدید، تغییر در تقاضای محصول، و تغییر در طراحی محصول ذکر شده است.^[۳] در این حالت علاوه بر هزینه‌ی جابه‌جایی مواد هزینه‌ی بازآرایی نیز مد نظر قرار می‌گیرد. هزینه‌ی بازآرایی دپارتمان‌ها در دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود: هزینه‌ی ثابت و هزینه‌ی متغیر. هزینه‌ی ثابت هزینه‌ی ثابت است مستقل از تعداد دپارتمان‌هایی که آرایش مجدد می‌یابند؛ در مقابل هزینه‌ی متغیر بر مبنای مسافتی که دپارتمان‌ها جابه‌جا می‌شوند، و نیز نسبت به اندازه دپارتمان‌ها کاهش یا افزایش می‌یابد.^[۴]

رایج‌ترین معیار مورد استفاده برای تعیین کارایی استقرار تسهیلات کمینه‌سازی هزینه‌ی انتقال مواد است. افزون بر آن، هدف‌های مهم دیگری نیز برای ارزیابی استقرار تسهیلات در نظر گرفته شده است: کمینه‌سازی سرمایه‌گذاری تجهیزات، کمینه‌سازی زمان کل تولید، بهره‌برداری مؤثر از فضای موجود، تسهیل فرایند تولید و ساختار سازمانی، حفظ انعطاف‌پذیری عملیات و آرایش تسهیلات، کمینه‌سازی تنوع در نوع تجهیزات حمل و نقل، ایجاد آسودگی کارکنان، ایمنی و محیط کار راحت،^[۵] و نیز ارتقاء بهره‌برداری مؤثر از نیروی انسانی.^[۶]

اهداف مهم دیگر عبارت‌اند از: بیشینه‌سازی معیار مجاورت و همسایگی، کمیته‌سازی هزینه‌ی تخصیص دپارتمان‌ها به مکان‌ها، کمیته‌سازی زمان حرکت مواد بین دپارتمان‌ها،^[۱۷] برآورد نیازهای طراحی و ظرفیت محصول و سازگار ساختن کارخانه با تغییرات آینده.^[۸]

چنان که پیش‌تر بیان شد، در سال ۱۹۵۷ برای نخستین بار مسئله‌ی چیدمان تسهیلات با دپارتمان‌های دارای مساحت یکسان، با استفاده از مسئله‌ی تخصیص درجه دو (QAP) فرموله شد.^[۱۱] کاربردهای گسترده‌ی در برنامه‌ریزی شهری، استقرار پانل‌های کنترلی و طراحی سیم دارد؛ این مسئله هر دپارتمان را به یک مکان تخصیص می‌دهد.^[۹] برخی از محققین برای حل QAP از روش تعویض جفتی استفاده کرده‌اند.^[۱۲] در هر تکرار این هیوریستیک دو مرکز کاری (دپارتمان) همسایه را برای تعویض مکان‌هایشان کاندید می‌کند. این الگوریتم در نهایت جفت‌هایی را انتخاب می‌کند که بیشترین مقدار بهبود را در تابع هدف داشته باشند. این الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که دیگر بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود. مسئله‌ی استقرار تسهیلات با مساحت نابرابر، با در نظر گرفتن حالت گسسته به صورت مسائل پوششی درجه دو فرمول‌بندی^[۱۳] و برای حل مسئله یک الگوریتم شاخه و کرانه بهبود داده شده است.^[۱۴] در سال ۱۹۸۹ یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح برای حالت پیوسته مسئله‌ی چیدمان تسهیلات با دپارتمان‌های دارای مساحت نابرابر ارائه شد که در آن برای هر دپارتمان از دو متغیر صفر و یک^۴ استفاده شده است.^[۱۵] در سال ۲۰۰۰ نیز یک فرمول برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP)^۵ و یک هیوریستیک دوفازی برای حل مسئله‌ی استقرار تسهیلات با دپارتمان‌های دارای مساحت نابرابر معرفی شد، به‌گونه‌ی که در آن چهار شکل متفاوت برای هر دپارتمان -- و با سه بار چرخش ۹۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت از جهت اصلی -- در نظر گرفته شد.^[۱۳] رزنیلات (۱۹۸۶) اولین فردی بود که مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات (DFLP)^۶ با دپارتمان‌های هم‌اندازه را معرفی کرد. هدف او کمیته‌سازی مجموع هزینه‌ی جابه‌جایی مواد و بازاریابی بوده است. او هزینه‌ی بازاریابی مجدد را C_{km} در نظر گرفت که به بازاریابی از یک چینش (A_k) به چینش دیگر (A_m) مربوط می‌شود. نگارنده از این روش برای حل این مسئله بهره برده است.^[۱۲] در پاره‌ی از مطالعات از برنامه‌ریزی خطی (LP) برای حل چیدمان پویای تسهیلات (DFLP) با دپارتمان‌های غیرهم‌شکل و با مساحت نابرابر استفاده شده است.^[۱۳] و در پاره‌ی دیگر فرمول برنامه‌ریزی عدد صحیح را با استفاده از پنجره‌های زمانی برای حل DFLP با دپارتمان‌های هم‌شکل و با مساحت نابرابر به کار برده‌اند. هر پنجره‌ی زمانی شامل یک تعداد دوره‌های زمانی است که جریان مواد میان دپارتمان‌ها در این دوره با هم ادغام می‌شود. نویسندگان یک سری SFLP را برای هر پنجره‌ی زمانی با استفاده از MILP حل می‌کنند. بازاریابی چیدمان در ابتدای دوره‌ی زمانی اتفاق می‌افتد و طول این پنجره‌های زمانی بر مبنای انجام موازنه بین هزینه‌ی جابه‌جایی مواد و هزینه‌ی بازاریابی ماشین‌آلات تعیین می‌شود.^[۱۵] محققین هیوریستیک جدیدی برای حل مسائل استقرار پویا ارائه داده‌اند که شامل ۳ فاز است. در اولین فاز مجموعه‌ی ماندگار^۷ از استقرار تعیین می‌شود؛ در دومین فاز از برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله‌ی کوتاه‌ترین مسیر برای تمام مجموعه‌ی ماندگار استفاده می‌شود؛ و در فاز سوم از روش تعویض جفتی و استراتژی معکوس برای جست‌وجو در جواب‌های به دست آمده از مرحله دوم استفاده می‌شود. آزمایشات عددی برای مسئله‌ی با ۴۸ دپارتمان حل شده است. الگوریتم پیشنهادی مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات (DFLP) را در یک زمان منطقی حل می‌کند و جواب با کیفیت مشابه دیگر روش‌ها را به دست می‌آورد.^[۱۶]

تیت و اسمیت (۱۹۹۵) الگوریتم ژنتیک را برای حل FLP با دپارتمان‌های

دارای شکل متغیر و مساحت نابرابر توسعه داده‌اند. نویسندگان از ساختار نواری منعطفی که توسط تانگ (۱۹۹۱) توسعه داده شده برای ایجاد استقرار استفاده کرده‌اند. مساحت کف کارخانه در یک جهت به نوارهایی با عرض‌های مختلف تقسیم می‌شود؛ دپارتمان‌ها در میان این نوارها اختصاص می‌یابند.^[۱۷] دانکر و همکاران (۲۰۰۳) نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل FLP با دپارتمان‌های هم‌شکل و مساحت نابرابر بهره برده‌اند.^[۱۸]

در سال ۲۰۰۵ الگوریتمی برای حل DFLP با مساحت‌های نابرابر و با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شد. نگارنده از تحلیل واریانس آماری برای یافتن بهترین اندازه سایت چینش استفاده کرده است. علاوه بر این از قاعده‌ی بر مبنای سیستم خبره دپارتمان‌های دارای مساحت نابرابر در یک فضای پیوسته‌ی بدون هم‌پوشانی متصل به هم استفاده شده است.^[۱۹]

اسکورین کاپو (۱۹۹۰) اولین کسی بود که الگوریتم جست‌وجوی ممنوع را برای حل SFLP به کار برد. این الگوریتم توسط گاور (۱۹۸۹) معرفی شد^[۲۰] و سپس چیانگ و کوالیس (۱۹۹۶) اجرای جدیدی از آن را برای حل QAP معرفی کردند.^[۲۱] این الگوریتم استراتژی لیست ممنوع با اندازه پویا، و استراتژی تنوع و شدت که در برگیرنده تابع جریمه است، را شامل می‌شود. بعدها محققین از الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوع احتمالی، شبیه‌سازی تبرید، و جست‌وجوی ممنوع هیبریدی برای حل QAP استفاده کردند.^[۲۲] کاکو و مازولا (۱۹۹۷) الگوریتم جست‌وجوی ممنوع را برای DFLP به کار برده‌اند؛ هیوریستیک TS از یک فرایند افزایشی و تنوع‌سازی تشکیل شده است.^[۲۳] محققان هیوریستیک جست‌وجوی ممنوع بر مبنای درخت برش و منحنی مرزی را ارائه داده‌اند که هدف آن کمیته‌سازی هزینه‌ی جریان است. درخت برش ارائه شده تسهیلات با شکل ثابت و تسهیلات با شکل منعطف را با استفاده از منحنی مرزی با هم تلفیق کرده است.^[۲۴] مکندال و هاگوییان (۲۰۱۰) نیز هیوریستیک جست‌وجوی ممنوع را برای حل DFLP با دپارتمان‌های مساحت نابرابر به کار برده‌اند. نگارندگان چرخش دپارتمان‌ها را آزاد (افقی، عمودی) و فضای حل مسئله را پیوسته در نظر گرفته‌اند.^[۲۵]

هیراگو و آلفا (۱۹۹۲) الگوریتم SA هیبریدی را برای حل FLP به کار برده‌اند. آن‌ها از الگوریتم جریمه^۸ برای تولید جواب اولیه استفاده کرده‌اند و سپس جواب حاصل را با استفاده از SA بهبود بخشیده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم هیبریدی SA در مقایسه با الگوریتم SA بهتر عمل می‌کند.^[۲۶] بایکاسگو و گیندی (۲۰۰۱) اولین کسانی بودند که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را برای DFLP به کار بردند.^[۲۷] مکندال و همکاران (۲۰۰۶) نیز دو هیوریستیک شبیه‌سازی تبرید را برای مسئله استقرار تسهیلات پویا معرفی کرده‌اند. اولین هیوریستیک (هیوریستیک SAI) یک هیوریستیک SA رو به جلو است. هیوریستیک نوع دوم هیوریستیک SAII خوانده می‌شود، که استراتژی رو به عقب یا رو به جلو را به هیوریستیک نوع اول اضافه می‌کند. تمام گام‌های اجرایی آن مشابه SAI است به غیر از گام پنجم که در آن استراتژی رو به عقب و جلو را اعمال می‌کند.^[۲۸] کاپوسامی (۲۰۰۱) سه نوع هیوریستیک SA برای DFLP ارائه داد: در اولین هیوریستیک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مستقیماً اجرا می‌شود؛ در دومین هیوریستیک از استراتژی حرارت‌دهی مجدد برای شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌شود؛ و در سومین هیوریستیک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، مفهوم پنجره‌های زمانی و روش تعویض جفتی رو به عقب با هم ترکیب می‌شود.^[۶] دانگ و همکاران (۲۰۰۹) روشی جدید برای حل مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات تحت شرایط محیطی پویا معرفی کرده‌اند. ممکن است با معرفی یک محصول جدید افزودن ماشین جدیدی به خط تولید ضرورت یابد، یا با تغییر در روند تولید محصول نیازمند از رده خارج کردن ماشین‌های موجود از خط تولید

$$Y_{ijlt} = X_{ij(t-1)} * X_{ilt}, \quad i, j, l = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

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

که در آن N تعداد دپارتمان‌ها و مکان‌ها، T تعداد دوره‌های زمانی، A_{ijlt} هزینه جابه‌جایی دپارتمان از مکان j به مکان l در دوره t ، C_{ijklt} هزینه جابه‌جایی مواد میان دپارتمان i که در مکان j قرار گرفته و دپارتمان k که در مکان l قرار گرفته در دوره t است. دو متغیر صفر و ۱ X_{ijlt} و Y_{ijlt} چنین تعریف می‌شود:

Y_{ijlt} : اگر دپارتمان در ابتدای دوره زمانی t از مکان j به مکان l جابه‌جا شود مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد داشت.

X_{ijlt} : اگر دپارتمان i در ابتدای دوره زمانی t به مکان تخصیص یابد مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد داشت.

تابع هدف برای کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ی بازآرایی و هزینه‌ی جریان میان دپارتمان‌ها استفاده می‌شود. محدودیت اول تضمین می‌کند که هر مکان فقط به یک دپارتمان در هر دوره اختصاص داده شده، و محدودیت دوم تضمین می‌کند که دقیقاً یک دپارتمان به هر مکان در هر دوره اختصاص یافته است. محدودیت سوم کمک می‌کند تا اگر دپارتمان‌ها در مکان‌های معین در دوره‌های متوالی جابه‌جا شد، هزینه‌ی بازآرایی به تابع هدف اضافه شود. در این مدل جریان میان دپارتمان‌ها، فاصله‌ی میان مکان‌ها و هزینه‌ی بازآرایی به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود.

۳. «جست‌وجوی ممنوع» پیشنهادی

جست‌وجوی ممنوع روشی عمومی است که در سال ۱۹۸۹ توسط گلوور^{۱۰} پیشنهاد شد. این روش براساس جست‌وجوی همسایه بنا شده است. در این روش عملکرد حافظه‌ی انسان شبیه‌سازی شده است. حافظه‌ی انسان با به‌کارگیری ساختمانی مؤثر و در عین حال ساده از اطلاعات، آنچه را در قبل رؤیت شده ذخیره می‌کند. این مرکز همچنین فهرستی از حرکات منع‌شده را تنظیم می‌کند و این فهرست همواره براساس آخرین جست‌وجوها منظم می‌شود. این روش از انجام هرگونه عملیات مجدد و تکراری جلوگیری می‌کند. در رویکرد پیشنهادی ابتدا یک چیدمان اولیه به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود؛ به‌عنوان مثال با فرض داشتن ۴ دپارتمان و ۲ دوره، دپارتمان اول به‌طور تصادفی در مکان ۲ از دوره اول، و دپارتمان ۲ در مکان ۱ قرار می‌گیرد و به‌همین منوال ۴ دپارتمان در ۲ دوره استقرار می‌یابند. بعد از ایجاد جواب اولیه، هزینه محاسبه می‌شود. سپس در هر تکرار همسایگی‌های لازم برای جواب فعلی ایجاد می‌شود و چینی‌شی که کم‌ترین هزینه را دارد به‌عنوان بهترین حرکت انتخاب می‌شود. جواب حاصل به‌عنوان جواب اولیه برای تکرار بعد در نظر گرفته می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا شرایط توقف احراز شود و الگوریتم خاتمه یابد. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱.۳. نمایش جواب

نمایش جواب برای DFLP چنین تعریف شده است:

$$\pi = (\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^T)$$

باشیم. نگارندگان مسئله‌ی هیوریستیک اضافه و حذف ماشین‌ها، از الگوریتم حراج برای حل مسئله‌ی کوتاه‌ترین مسیر و از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای بهبود جواب تولید شده استفاده کرده‌اند.^[۲۹]

دوربگو (۱۹۹۶) اولین کسی بود که الگوریتم کلونی مورچگان را برای مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد به‌کاربرد. گامبردلا و همکاران (۱۹۹۹) سیستم مورچگان هیبریدی^۹ (HAS-QAP) را برای حل QAP ارائه داده‌اند. HAS-QAP یک هیوریستیک از نوع بهبوددهنده است (و نه از نوع سازنده‌ی آن) و با هیوریستیک سنتی مورچگان تفاوت دارد.^[۳۰] مکندال و شانگ (۲۰۰۶) سه سیستم هیبریدی مورچگان (HAS) را برای حل DFLP با دپارتمان‌های هم‌اندازه معرفی کرده‌اند. اولین تکنیک (HASI) نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی سیستم هیبریدی مورچگان است که توسط گامبردلا و همکاران (۱۹۹۹) برای حل QAP ارائه شده است؛ دومین تکنیک (HASII) اصلاح‌شده‌ی تکنیک نخست (HASI) است که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را جایگزین هیوریستیک تعویض جفتی می‌کند؛ و در نهایت سومین تکنیک (HASIII) اصلاح‌شده‌ی HASI است که استراتژی رو به عقب و جلو را به هیوریستیک تعویض جفتی اضافه می‌کند.^[۳] با یکاسگو و همکاران (۲۰۰۶) از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل DFLP استفاده کرده‌اند. نویسندگان محدودیت بودجه را نیز در نظر گرفته‌اند و نتایج امیدبخشی از آزمون آن به دست آورده‌اند.^[۳۱] الگوریتم پیشنهادی کماردین و وانگ (۲۰۰۹) از روش درخت برش برای نمایش مسئله و از چندین نوع جست‌وجوی محلی برای بهبود مسئله‌ی ارائه‌شده استفاده کرده‌اند. این اولین بار است که الگوریتم کلونی مورچگان برای FLP با مساحت نابرابر استفاده می‌شود.^[۳۲]

در این مقاله مسئله‌ی چیدمان پویا با رویکرد جست‌وجوی ممنوع، با در نظر گرفتن استراتژی تنوع حل شده است. در بخش دوم مدل ریاضی مسئله‌ی چیدمان پویا با در نظر گرفتن دپارتمان‌های مساوی نشان داده شده و در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی جست‌وجوی ممنوع ارائه شده است. بخش چهارم نتایج عددی الگوریتم مورد استفاده را برای دو مجموعه داده شاخص و معروف از ادبیات موضوع نشان می‌دهد. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری مبحث پرداخته است.

۲. مدل ریاضی مسئله

مدل ریاضی مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات با دپارتمان‌های مساوی، به‌صورت تعمیم مدل‌سازی مسئله‌ی تخصیص درجه دوم است. با این تفاوت که در آن t اندیس زمان است و هزینه‌ی بازآرایی دپارتمان‌ها در دو دوره متوالی در نظر گرفته می‌شود. مدل ریاضی این مسئله عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \text{cost} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{t=1}^T A_{ijlt} Y_{ijlt} \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{t=1}^T C_{ijklt} X_{ijlt} X_{klt} \end{aligned} \quad (1)$$

Subject

$$\sum_{j=1}^N X_{ijlt} = 1, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

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

جفتی ممکن در هر دوره در نظر گرفته می‌شود. هر تعویض به‌عنوان یک حرکت تعریف می‌شود.

هیوریستیک تعویض جفتی کاهش‌دهنده تمام حرکات کاندید در همسایگی جواب فعلی را جست‌وجو و بهترین حرکت را برای تعویض انتخاب می‌کند. اگر N دپارتمان و T دوره داشته باشیم، تعداد حرکات در هر دوره $\frac{N(N-1)}{2}$ است. در نتیجه تعداد کل حرکات $T \times \frac{N(N-1)}{2}$ است. در این مقاله علاوه بر در نظر گرفتن تعویض جفتی برای ایجاد همسایگی از استراتژی دیگری به نام استراتژی معکوس^{۱۱} (وارونه کردن) استفاده شده است. در این استراتژی علاوه بر جابه‌جا کردن مراکز دو دپارتمان انتخاب‌شده برای تعویض، مراکز دپارتمان‌هایی که بین این دو دپارتمان قرار می‌گیرند نیز معکوس می‌شوند. مثلاً اگر جواب جاری ما $\pi = (3, 4, 2, 1)$ باشد و استراتژی معکوس روی مراکز دپارتمان‌های ۱ و ۴ در دوره ۱ اعمال شود همسایگی ایجاد شده برای این تعویض برابر با $\pi = ((4, 2, 1, 3), (3, 4, 2, 1))$ است. تعداد حرکت ایجاد شده از این استراتژی در هر تکرار برابر با $T \times \frac{N(N-1)}{2}$ است. در نتیجه تعداد کل تکرارها در هر دوره $T \times N(N-1)$ است. بهترین حرکت قابل قبول، حرکتی است که ممنوع (تابو) نباشد یا این که هزینه‌ی کل آن از تمام هزینه‌های حرکت‌های انجام شده کم‌تر باشد (معیار رضایت). بهترین حرکت قابل قبول به‌عنوان جواب کنونی تکرار بعد در نظر گرفته می‌شود.

۳.۳. استراتژی تنوع

استراتژی تنوع که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته شامل ساختار حافظه مبتنی بر تکرار^{۱۲}، تابع جریمه^{۱۳} برای حرکات غیر بهبوددهنده و لیست پویای ممنوع^{۱۴} به‌عنوان استراتژی حافظه‌ی نزدیک است. جزئیات هرکدام از این استراتژی‌های در ادامه آورده شده است.

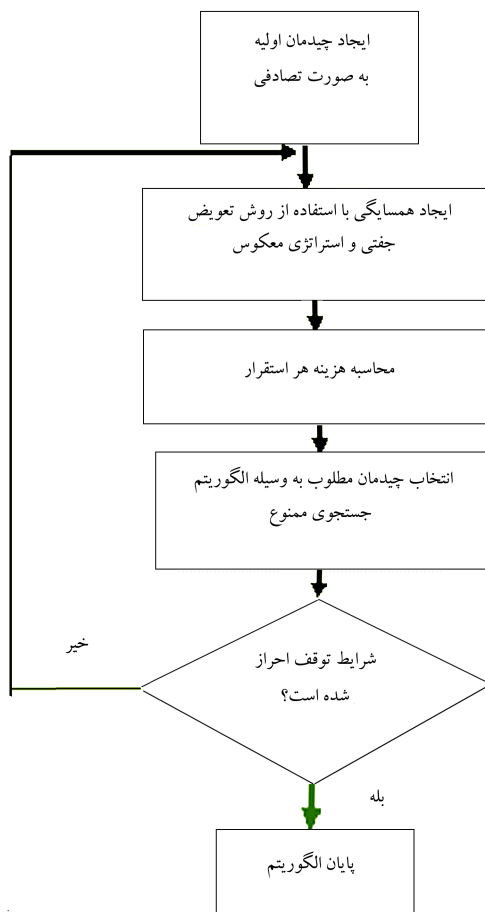
۴.۳. حافظه‌ی مبتنی بر تکرار

ساختار حافظه‌ی مبتنی بر تکرار برای حفظ کردن رد حرکات تکراری به کار گرفته می‌شود. اطلاعات در مثلث پایینی آرایه ممنوع $tabu[t][i][k]$ در جایی که $I > k$ ثبت می‌شود. مقدار $tabu[t][i][k]$ زمانی که $I > k$ باشد، نشان‌گر تعداد دفعاتی است که مکان دپارتمان‌های i و k در دوره t به‌عنوان بهترین حرکت قابل قبول انتخاب شده است. یک نمونه از لیست ممنوع که برای حافظه‌ی مبتنی بر تکرار استفاده می‌شود در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ممنوعه‌ی $tabu[4][1][1]$ برابر با ۱ است که نشان می‌دهد دپارتمان ۱ و ۴ در دوره ۱ یک‌بار عوض شده است.

	۱	۲	۳	۴
۱				۴
۲				
۳				
۴	۱			

$t=1$

شکل ۳. لیست ممنوع با ساختار حافظه‌ی مبتنی بر تکرار.



شکل ۱. فلوچارت رویکرد پیشنهادی.

۲	۳	۱	۴
$t=1$			
۱	۲	۳	۲
$t=2$			

شکل ۲. جواب DFLP با چهار دپارتمان و ۲ دوره.

در حالی که π جواب برای DFLP و π^t استقرار در دوره t باشد داریم:

$$\pi = (\pi^{t1}(1), \pi^{t2}(2), \dots, \pi^t(N))$$

که در آن، $\pi^t(i)$ مکان دپارتمان i در دوره t ، T تعداد دوره‌ها، و N تعداد دپارتمان‌هاست. به‌طور مثال جواب DFLP با ۴ دپارتمان و ۲ دوره ($T = 2, N = 4$) که در شکل ۲ مفروض است چنین نشان داده می‌شود.

$$\pi = ((3, 1, 2, 4), (3, 4, 2, 1))$$

۲.۳. ساختار همسایگی

تکنیک جست‌وجوی محلی که در هیوریستیک جست‌وجوی ممنوع مورد استفاده قرار می‌گیرد، «تعویض جفتی کاهش‌دهنده» است. ایده اصلی این هیوریستیک، یافتن بهترین جواب تعویض جفتی در همسایگی جواب فعلی است. بنابراین تمام تغییرات

جدول ۱. اندازه‌ی لیست پویای ممنوع.

اندازه لیست پویای ممنوع	درصد کاهش هزینه‌ی کل ($PR(\pi)$)
$TL\beta = \gamma NT$	$\geq \beta$
UB	$a \leq PR(\pi) < \beta$
$LB + (UB - LB) * PR(\pi)/a$	$0 \leq PR(\pi) \leq a$
مقدار TLd در تکرار قبل	$PR(\pi) < 0$

علاوه بر این از یک تابع جریمه برای جریمه‌کردن حرکات غیر بهبود دهنده استفاده می‌شود. به عبارت دیگر تابع جریمه برای حرکات تکراری ثبت شده در مثلث پایینی آرایه‌ی ممنوع، مقدار جریمه‌ی برای حرکات غیر بهبوددهنده در نظر گرفته است. تابع جریمه به هزینه‌ی کل حرکات غیر بهبوددهنده اضافه می‌شود. اگر حرکتی بهبوددهنده باشد دیگر جریمه نمی‌شود. بنابراین تابع جریمه برای تعویض مکان دپارتمان i و k در دوره t چنین تعریف می‌شود.^[۵]

$$p(t, i, k) = \begin{cases} 0 & \Delta TC_{ik}(\pi^t) > 0 (TC(\pi^t) < TC(\pi)) \\ a * tabu[t][i][k] & \text{Otherwise} \end{cases}$$

در حالی که a پارامتر مقدار جریمه است. اگر بهترین حرکت قابل قبول یک حرکت بهبوددهنده باشد، تابع جریمه در نظر گرفته نمی‌شود و بالعکس.

۵.۳. اندازه‌ی لیست پویای ممنوع

اندازه لیست پویای ممنوع (طول تابو)، استراتژی مبتنی بر حافظه‌ی نزدیک است که برای متنوع‌کردن فضای جست‌وجو به کار برده می‌شود. طول تابو پویا که با TLd نشان داده می‌شود میان یک کران پایین (LB) و یک کران بالا (UB) متغیر است. مقدار تغییر آن از یک تکرار به تکرارهای دیگر بستگی به درصد کاهش هزینه‌ی کل بهترین جواب قابل قبول $TC(\pi_{best}^t)$ از جواب کنونی $TC(\pi)$ دارد. محاسبه‌ی درصد کاهش $PR(\pi)$ چنین است:

$$PR(\pi) = [TC(\pi) - TC(\pi_{best}^t)] * 100 / TC(\pi)$$

نحوه‌ی تنظیم TLd به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

۴. نتایج محاسباتی

تمامی محاسبات و مدل‌سازی الگوریتم ارائه‌شده با استفاده از نرم‌افزار متلب (نسخه ۷/۹)، و با رایانه‌ی شخصی مدل Core(TM) ۲ Duo, ۲/۵GHz PC. انجام شده است. الگوریتم پیشنهادی توسط دو مجموعه داده معروف موجود، به‌عنوان مسائل آزمایشی در ادبیات موضوع ارزیابی شده است. مجموعه داده اول توسط بلکریشن و چنگ (۲۰۰۰) و مجموعه داده دوم توسط لکسن و انسکور (۱۹۹۳) توسعه داده شده است. اولین مجموعه داده که از بلکریشن و چنگ گرفته شده است شامل مسائلی با ۱۵، ۳۰ و ۵ دپارتمان و دارای ۱۰ دوره است. هر مسئله شامل ۸ مسئله‌ی آزمایشی است، و در نتیجه ۳۲ مسئله در این مجموعه وجود دارد. در این مجموعه مقدار هزینه‌ی بازآرایی دپارتمان‌ها برای هر دپارتمان متفاوت

است، ولی در دوره‌های مختلف یکسان است. دومین مجموعه داده که از لکسن و انسکور اتخاذ شده، دارای مسائلی با ابعاد ۶، ۱۲، ۲۰ و ۳۰ دپارتمان و دارای ۳ و ۵ دوره است. هر یک از این مسائل دارای ۴ سری مسئله‌اند و بنابراین ۳۲ مسئله در این مجموعه داده وجود دارد. هزینه‌ی بازآرایی دپارتمان‌ها برای تمام دپارتمان‌ها و در تمام دوره‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

برای مجموعه داده اول پس از ۵ بار اجرای الگوریتم پیشنهادی با استراتژی تنوع، بهترین جواب از نتایج به دست آمده به‌همراه بهترین جواب حاصل از هیوریستیک TS با استراتژی تقویت/گسترش (TSAll) و هیوریستیک احتمالی (PTS) -- که توسط مکندال و لیو (۲۰۰۵) ارائه شده -- در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. علاوه بر الگوریتم‌های ارائه‌شده توسط بایکاسگو و گیندی (۲۰۰۱) که از الگوریتم SA استفاده کرده‌اند، الگوریتم GA بلکریشن و همکاران (۲۰۰۳)، اریل و همکاران (۲۰۰۳) رویکرد برنامه‌ریزی پویا را به کار برده‌اند (DP)، مکندال و شانگ (۲۰۰۵) سیستم هیبرید مورچگان (HAS) را ارائه داده‌اند و مکندال و همکاران (۲۰۰۵) هیوریستیک SA را ارائه داده‌اند. بهترین جواب حاصل از دیگر الگوریتم‌ها در زیر ستون بهترین جواب آمده است. در ستون آخر درصد انحراف بهترین جواب حاصله از هیوریستیک پیشنهادی از بهترین جواب یافت شده از ادبیات موضوع تحت عنوان درصد بهبود برای هر مسئله زیر ستون آخر آمده است. در آخرین ردیف تعداد بهترین جواب‌های به دست آمده از هر هیوریستیک آورده شده است. اعداد پر رنگ شده در جدول نشان‌گر بهترین مقدار تابع هدف به دست آمده برای هر مسئله‌ی مورد نظر است.

الگوریتم پیشنهادی در کل ۳۲ مسئله بهترین جواب را به دست آورده است که در حالت ۶ دپارتمان با ۵ و ۱۰ دوره جواب‌های حاصله برابر با بهترین جواب‌های به دست آمده است، ولی در حالت ۱۵ دپارتمان جواب حاصل بهبود خوبی نسبت به دیگر روش‌ها داشته و در تمام موارد هزینه را کاهش داده است. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی عملکرد بسیار خوبی برای این مجموعه داده داشته است.

برای مجموعه داده ۲ پس از ۵ بار اجرای الگوریتم پیشنهادی با استراتژی تنوع بهترین جواب از نتایج به دست آمده، به همراه بهترین جواب TSbasic، TSAll و PTS که توسط مکندال و لیو (۲۰۰۵) به دست آمده در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. مکندال و لیو در TSbasic ساده‌ترین حالت جست‌وجوی ممنوع را در نظر گرفته‌اند، TSAll هیوریستیک جست‌وجوی ممنوع با استراتژی تقویت و گسترش است و PTS هیوریستیک جست‌وجوی احتمالی است. در این جداول لکسن و انسکور (۱۹۹۳) الگوریتم صفحه‌ی برش ۱۵ (برش مسطح) (CP) را ارائه داده‌اند.^[۳۴] کاکو و مازولا (۱۹۹۷) از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع (TS-KM)، مکندال و شانگ (۲۰۰۵) از سیستم هیبریدی مورچگان استفاده کرده‌اند، و مکندال و همکاران (۲۰۰۵) نیز هیوریستیک SA را معرفی کرده‌اند. بهترین جواب حاصل از دیگر الگوریتم‌ها در زیر ستون بهترین جواب آمده است. در ستون آخر درصد انحراف بهترین جواب به دست آمده از هیوریستیک پیشنهادی از بهترین جواب یافت شده از ادبیات موضوع تحت عنوان درصد بهبود برای هر مسئله زیر ستون آخر آمده است. در آخرین ردیف تعداد بهترین جواب‌های به دست آمده از هر هیوریستیک آورده شده است. اعداد پر رنگ شده در جدول نشان‌گر بهترین مقدار تابع هدف به دست آمده برای هر مسئله‌ی آزمون شده است.

چنان که اعداد و ارقام در جدول ۴ نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی برای ۱۶ مسئله بهترین جواب را در بر داشته است، در حالی که سایر روش‌ها فقط توانسته‌اند

برای ۸ مسئله از این ۱۶ مسئله بهترین جواب را به دست آورند. این نتایج نشان‌گر عملکرد خوب الگوریتم پیشنهادی است.

الگوریتم پیشنهادی در جدول شماره ۵ برای ۱۰ مسئله از ۱۶ مسئله بهترین جواب را به دست آورده است. برای ۶ مسئله‌یی که الگوریتم مقدار بهینه را به دست نیاورده، مقدار انحراف آن از مقدار بهینه آن اندک است و نشان‌دهنده عملکرد خوب این الگوریتم است.

۵. نتیجه‌گیری

چینش تسهیلات تأثیر چشمگیری در کارایی حمل و نقل مواد در سیستم‌های تولیدی دارد و از همین رو برای تولیدکننده اهمیت زیادی دارد. چینش مؤثر تسهیل به بهبود سود و بهره‌وری می‌انجامد. علاوه بر این برآورد شده است که هزینه‌ی حمل و نقل مواد بین ۲۰ تا ۵۰ درصد هزینه‌ی کل عملیات را در بر می‌گیرد. از آنجا که برنامه‌ریزی

چینش مؤثر یک تسهیل هزینه‌ی حمل و نقل مواد را ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد در پی آنیم که با در نظر گرفتن تغییرات جریان مواد میان دپارتمان‌ها در طول دوره‌های زمانی متفاوت و عدم هم‌پوشانی دپارتمان‌ها، مجموع هزینه‌ی جابه‌جایی و چیدمان مجدد کمینه شود. در این نوشتار از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع با لیست پویای ممنوعه و استراتژی تنوع برای حل مسئله‌ی چیدمان پویای تسهیلات استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی با دو مجموعه داده معروف از ادبیات موضوع آزمایش شده و نتایج خوبی را داشته است. به عبارت دیگر، الگوریتم پیشنهادی توانسته برای مجموعه داده‌ی لکسن و انسکور، برای ۲۶ مسئله از ۳۲ مسئله بهترین جواب را به دست آورد. این در حالی است که روش‌های دیگر در بهترین حالت برای ۱۶ مسئله از ۳۲ مسئله بهترین جواب را به دست آورده‌اند. از طرف دیگر برای مجموعه داده دوم آزمون شده رویکرد پیشنهادی برای تمام ۳۲ مسئله بهترین جواب را به دست آورده است، در حالی که روش‌های دیگر فقط برای ۱۴ مسئله از ۳۲ مسئله بهترین جواب را به دست آورده‌اند؛ و این نشان‌گر عملکرد بسیار خوب الگوریتم است. در مجموع، درصد بهبود الگوریتم پیشنهادی برای مجموعه داده اول ۱/۲۳ و برای مجموعه داده دوم ۲/۳۸ بوده است.

جدول ۲. جواب حاصل برای مسائل ۶ دپارتمان از مجموعه داده اول.

میانگین زمان	انحراف از بهترین جواب (%)	بهترین جواب حاصل	SA	HAS	GA	SA-EG	DP	PTS	TSAII	TSbasic	TS-NM	شماره مسئله	ابعاد مسئله	
													T	N
۸,۴۴۶	۰	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	۱۰۶۴۱۹	P01	۵	
۱۱,۳۵۴	۰	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	۱۰۴,۸۳۴	P02		
۱۲,۷۶۶	۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	۱۰۴,۳۲۰	P03		
۹,۹۹۴	۰	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	۱۰۶,۳۹۹	P04		
۱۰,۴۵	۰	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	۱۰۵,۶۲۸	P05		
۹,۹۸۲	۰	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۴,۰۵۳	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	۱۰۳,۹۸۵	P06		
۹,۴۷۴	۰	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۴۷	۱۰۶,۴۴۷	۱۰۶,۴۳۹	۱۰۶,۴۴۷	۱۰۶,۴۴۷	P07		
۱۰,۲۹۶	۰	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۶,۱۵۲	۱۰۳,۷۷۱	۱۰۶,۱۵۲	۱۰۳,۷۷۱	P08		
۲۴,۹۱۶	۰	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	۲۱۴,۳۱۳	P09	۱۰	
۲۰,۶۴۳۶	۰	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	۲۱۲۱۳۴	P10		
۲۳,۰۱۲	۰	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	۲۰۷۹۸۷	P11		
۲۳,۱۶۶	۰	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۷۴۱	۲۱۲,۷۴۷	۲۱۲,۷۴۱	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۵۳۰	۲۱۲,۵۳۰	P12		
۲۰,۷	۰	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۴۴	۲۱۱,۰۷۲	۲۱۱,۰۲۲	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۰۶	۲۱۰,۹۰۶	P13		
۲۵,۴۷۴	۰	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۱۰,۰۰۰	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	۲۰۹,۹۳۲	P14		
۲۲,۰۳۲	۰	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۵,۴۵۲	۲۱۴,۴۳۸	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	۲۱۴,۲۵۲	P15		
۱۹,۶۲	۰	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	۲۱۲,۵۸۸	P16		
			۱۶	۱۶	۱۰	۱۳	۱۳	۱۴	۱۶	۱۲	۱۶			

جدول ۳. جواب حاصل برای مسائل با ۱۵ دپارتمان از مجموعه داده اول.

میانگین زمان	انحراف از بهترین جواب (%)	بهترین جواب حاصل	SA	HAS	GA	SA-EG	DP	PTS	TSAll	TSbasic	TS-NM	شماره مسئله	ابعاد مسئله	
													T	N
۱۵۵,۷۷۴۲	۲,۷۱	۴۸۰, ۴۵۳	۴۸۰, ۴۵۳	۴۸۰, ۴۵۳	۴۸۴, ۰۹۰	۴۸۱, ۳۷۸	۴۸۲, ۱۲۳	۴۸۰, ۴۵۳	۴۸۰, ۴۵۳	۴۸۰, ۴۵۳	۴۶۷۷۸۵	P17	۵	
۱۸۲,۰۹۶	۱,۶۵	۴۷۸, ۸۱۶	۴۸۴, ۷۶۱	۴۸۴, ۷۶۱	۴۸۵, ۳۵۲	۴۷۸, ۸۱۶	۴۸۵, ۷۰۲	۴۸۴, ۷۶۱	۴۸۴, ۷۶۱	۴۸۴, ۷۶۱	۴۷۱۰۴۴	P18		
۱۴۱,۸۶۸	۲,۳۹	۴۸۷۸۸۶	۴۸۸, ۷۴۸	۴۸۸, ۷۴۸	۴۸۹, ۸۹۸	۴۸۷۸۸۶	۴۹۱, ۳۱۰	۴۸۹, ۲۶۵	۴۸۹, ۰۵۸	۴۸۹, ۳۳۵	۴۷۶۵۱۴	P19		
۱۵۲,۰۸۸	۲,۳۴	۴۸۱, ۶۲۸	۴۸۴, ۴۰۵	۴۸۴, ۴۴۶	۴۸۴, ۶۲۵	۴۸۱, ۶۲۸	۴۸۶, ۸۵۱	۴۸۴, ۶۲۱	۴۸۴, ۴۴۶	۴۸۴, ۶۲۱	۴۷۰۵۹۴	P20		
۱۱۴,۵۱۸	۲,۶۶	۴۸۴, ۱۷۷	۴۸۷, ۸۸۲	۴۸۷, ۷۲۲	۴۸۹, ۸۸۵	۴۸۴, ۱۷۷	۴۹۱, ۱۷۸	۴۸۷, ۷۵۳	۴۸۷, ۸۲۲	۴۸۷, ۸۲۲	۴۷۲۱۷۶,	P21		
۱۴۹,۶۸۲	۲,۲۸	۴۸۲۳۲۱	۴۸۷, ۱۴۷	۴۸۶, ۶۸۵	۴۸۸, ۶۴۰	۴۸۲۳۲۱	۴۸۹, ۸۴۷	۴۸۶, ۴۹۳	۴۸۶, ۴۹۳	۴۸۶, ۴۹۳	۴۷۱۵۵۶	P22		
۱۱۶,۲۵۸	۲,۵۸	۴۸۵, ۳۸۴	۴۸۷, ۱۴۷	۴۸۶, ۶۸۵	۴۸۸, ۶۴۰	۴۸۵, ۳۸۴	۴۸۹, ۱۵۵	۴۸۶, ۲۶۸	۴۸۶, ۲۶۸	۴۸۶, ۲۶۸	۴۷۳۱۶۷	P23		
۱۲۰,۴۴۸۶	۲,۷۴	۴۸۹, ۰۷۲	۴۹۰, ۸۱۲	۴۹۱, ۰۱۶	۵۰۰, ۷۷۹	۴۸۹, ۰۷۲	۴۹۷, ۵۷۷	۴۹۰, ۵۵۱	۴۹۰, ۵۵۱	۴۹۰, ۵۵۱	۴۷۶۰۲۳	P24		
۶۲۱,۲۸۸	۲,۷۷	۹۷۹, ۴۶۸	۹۷۹, ۴۶۸	۹۸۰, ۳۵۱	۹۸۷, ۸۸۷	۹۸۲۲۹۸	۹۸۳, ۰۷۰	۹۸۰, ۹۰۶	۹۸۰, ۳۹۹	۹۸۳, ۰۶۱	۹۵۳۰۵۴	P25	۱۰	
۷۵۶,۸	۲,۱	۹۷۳, ۱۷۹	۹۷۸, ۰۶۵	۹۷۸, ۲۷۱	۹۸۰, ۶۳۸	۹۷۳, ۱۷۹	۹۸۳, ۸۲۶	۹۷۸, ۸۱۵	۹۷۷, ۳۹۹	۹۷۸, ۸۷۴	۹۵۳۱۲۶	P26		
۶۶۹,۲۳۹۳	۲,۰۲	۹۷۸, ۰۲۷	۹۸۲, ۳۹۶	۹۷۸, ۰۲۷	۹۸۵, ۸۸۶	۹۸۵, ۳۶۴	۹۸۸, ۶۳۵	۹۸۳, ۸۹۸	۹۸۱, ۱۷۲	۹۸۲, ۹۴۴	۹۵۸۶۲۳	P27		
۹۵۲,۳۳۸	۲,۸۷	۹۷۲, ۰۱۹	۹۷۲, ۷۹۷	۹۷۴, ۶۹۴	۹۷۶, ۰۲۵	۹۷۴, ۹۹۴	۹۷۶, ۴۵۶	۹۷۲, ۰۱۹	۹۷۲, ۰۱۹	۹۷۲, ۳۲۵	۹۴۴۹۱۴	P28		
۷۲۸,۶۹۶	۲,۲۲	۹۷۵, ۴۹۸	۹۷۷, ۱۸۸	۹۷۹, ۱۹۶	۹۸۲, ۷۷۸	۹۷۵, ۴۹۸	۹۸۲, ۸۹۳	۹۷۷, ۵۳۴	۹۷۷, ۶۵۷	۹۷۸, ۰۳۳	۹۵۴۳۳۳	P29		
۷۰۷,۶۱۸	۲,۳۹	۹۶۷, ۶۱۷	۹۶۷, ۶۱۷	۹۷۱, ۵۴۸	۹۷۳, ۹۱۲	۹۶۸, ۳۲۳	۹۷۴, ۴۳۶	۹۶۷, ۶۱۷	۹۷۰, ۰۸۵	۹۶۹, ۱۲۴	۹۴۵۰۵۶	P30		
۷۶۲,۳۴۶	۲,۷	۹۷۸, ۶۸۱	۹۷۹, ۱۱۴	۹۸۰, ۷۵۲	۹۸۲, ۸۷۲	۹۷۷, ۴۱۰	۹۸۲, ۷۹۰	۹۷۹, ۵۱۳	۹۷۸, ۶۸۱	۹۷۹, ۸۸۱	۹۵۲۹۸۳	P31		
۷۱۶,۰۱۸	۳,۰۸	۹۸۳, ۶۷۲	۹۸۳, ۶۷۲	۹۸۵, ۷۰۷	۹۸۷, ۷۸۹	۹۸۵, ۰۴۱	۹۸۸, ۵۸۴	۹۸۵, ۱۰۵	۹۸۴, ۱۷۷	۹۸۵, ۱۰۵	۹۵۴۲۷۸	P32		

۱۶

جدول ۴. جواب حاصل برای مسائل با ۱۲, ۶ دپارتمان از مجموعه داده دوم.

میانگین زمان	انحراف از بهترین جواب (%)	بهترین جواب حاصل	SA	HAS	TS-KM	CP	PTS	TSAll	TSbasic	TS-NM	شماره مسئله	ابعاد مسئله	
												T	N
۱۰,۶۸۶	۰,۰۰	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	۲۶۷	P01	۳	
۶,۹۸۶	۰,۰۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	P02		
۷,۶۰۴	۱۵,۹۷	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۱۳	P03		
۸,۶۳۶	۱۹,۱۲	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۹۹	۲۵۱	P04		
۹,۶۰۶	۹,۹۵	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۰۲	P05	۵	
۱۱,۹۳	۵,۴۰	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	۵۵۶	P06		
۱۰,۴۸۶	۰,۰۰	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	۴۲۴	P07		
۱۱,۴۱	۰,۰۰	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	۴۲۸	P08		
۱۶,۷۳۴	۰,۰۰	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	۱۶۲۴	P09	۱۲	
۱۴,۵۲	۰,۰۰	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	P10		
۱۳,۴۱۴	۶,۴۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۶۶۱	۱۵۶۱	P11		
۱۶,۳۷۴	۴,۵۹	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۰۹۷	۲۱۰۲	۲۰۰۵	P12		
۲۶,۴	۱,۱۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۹۳۰	۲۸۹۸	P13	۵	
۳۵,۷۳۲	۱,۵۴	۳۷۰۱	۳۷۰۱	۳۷۰۱	۳۷۰۱	۳۷۲۶	۳۷۰۱	۳۷۰۱	۳۷۰۱	۳۶۴۵	P14		
۲۵,۹۰۶	۰,۰۰	۲۷۵۶	۲۷۵۶	۲۷۵۶	۲۷۵۶	۲۷۵۶	۲۷۵۶	۲۷۷۹	۲۷۷۹	۲۷۵۶	P15		
۲۹,۸۱	۰,۰۰	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	۳۳۶۴	P16		

جدول ۵. جواب حاصل برای مسائل با ۳۰، ۲۰ دپارتمان از مجموعه داده دوم.

میانگین زمان	انحراف از بهترین جواب (%)	بهترین جواب حاصل	SA	HAS	TS-KM	CP	PTS	TSAII	TSbasic	TS-NM	شماره مسئله	ابعاد مسئله	
												T	N
۶۰,۲۵۲	۰,۰۰	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۲۷۶۳	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۲۷۵۸	P17	۳	۲۰
۷۶,۶۱۴	۰,۰۰	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	۵۳۱۸	P18		
۶۱,۳۹۸	۷,۱۳	۳۰۳۴	۳۰۳۴	۳۰۳۴	۳۰۵۶	۳۰۴۸	۳۰۳۴	۳۰۳۴	۳۰۳۴	۲۸۳۲	P19		
۸۷,۵۱۸	۳,۳۵	۵۸۶۹	۵۸۷۳	۵۸۸۱	۵۹۰۳	۵۸۷۳	۵۸۶۹	۵۸۶۹	۵۸۷۳	۵۶۷۹	P20	۳	۲۰
۱۹۵,۷۴	۲,۶۴	۴۵۵۴	۴۵۵۴	۴۵۷۵	۴۶۰۵	۴۵۸۱	۴۵۵۴	۴۵۷۳	۴۵۵۴	۴۴۳۷	P21		
۲۹۲,۲۹	۰,۱۸	۹۷۲۴	۹۷۲۴	۹۷۲۴	۹۷۴۶	۹۸۲۵	۹۷۳۶	۹۷۲۴	۹۷۳۴	۹۷۰۷	P22		
۲۷۹,۰۴	-۰,۲۸	۴۶۵۴	۴۶۶۰	۴۶۵۴	۴۶۵۴	۴۶۵۴	۴۶۵۴	۴۶۷۵	۴۶۵۴	۴۶۶۷	P23	۳	۲۰
۳۳۳,۸۱	۰,۰۰	۸۹۷۹	۸۹۷۹	۸۹۷۹	۸۹۷۹	۸۹۸۵	۸۹۷۹	۸۹۷۹	۸۹۷۹	۸۹۷۹	P24		
۴۳۸,۰۵	-۰,۶۵	۷۱۳۰	۷۱۳۰	۷۱۳۰	۷۱۳۰	۷۱۶۳	۷۱۳۰	۷۱۳۰	۷۱۳۱	۷۱۷۷	P25		
۴۵۵,۳۰	-۰,۶۰	۱۴۴۷۸	۱۴۴۷۸	۱۴۴۷۸	۱۴۴۷۸	۱۴۵۸۳	۱۴۴۷۸	۱۴۴۸۷	۱۴۵۲۸	۱۴۵۶۶	P26	۳	۲۰
۵۱۹,۴۵	۱,۴۸	۸۰۴۹	۸۰۷۰	۸۰۶۶	۸۱۱۵	۸۰۶۶	۸۰۷۵	۸۰۴۹	۸۰۹۸	۷۹۳۲	P27		
۳۶۴,۱۵	۰,۹۹	۱۴۹۰۱	۱۴۹۰۱	۱۴۹۲۵	۱۴۹۲۵	۱۴۹۴۰	۱۴۹۱۳	۱۴۹۰۸	۱۴۹۳۳	۱۴۷۵۵	P28		
۲۴۰,۱,۶۵	۰,۰۶	۱۳۳۷۴	۱۳۳۷۴	۱۳۳۷۴	۱۳۶۰۶	۱۳۷۱۹	۱۳۳۷۹	۱۳۳۴	۱۳۳۹۶	۱۳۳۶۶	P29	۳	۲۰
۲۴۷۱,۷۸	-۰,۶۱	۲۵۴۲۸	۲۵۴۲۲	۲۵۵۲۱	۲۵۵۸۳	۲۶۰۲۷	۲۵۴۸۴	۲۵۴۲۸	۲۵۵۱۵	۲۵۵۸۵	P30		
۱۴۴۱,۰۶	-۰,۷۸	۱۲۱۴۸	۱۲۱۷۰	۱۲۱۶۳	۱۲۱۶۳	۱۲۳۵۱	۱۲۱۴۸	۱۲۱۶۳	۱۲۱۶۳	۱۲۲۴۳	P31		
۱۴۸۷,۲۱	-۰,۹۴	۲۴۲۰۰	۲۴۳۰۰	۲۴۲۰۰	۲۴۲۰۰	۲۴۴۰۹	۲۴۲۰۰	۲۴۲۸۳	۲۴۳۰۷	۲۴۴۳۰	P32	۳	۲۰

پانوشتها

1. facility layout problem (FLP)
2. static facility layout problem (SFLP)
3. quadratic assignment problem (QAP)
4. binary
5. mixed integer linear programming (MILP)
6. dynamic facility layout problem (DFLP)
7. viable set
8. penalty algorithm
9. hybrid ant system
10. Glover
11. reversion
12. frequency based memory
13. penalty function
14. dynamic tabu list
15. cutting plane

منابع (References)

1. Bozorgi, N. and Abedzadeh, M. "Facility layout problem: Review", First National Congress of Industrial engineering, Hamedan (2010).
2. Koopmans, T.C. and Beckmann, M.J. "Assignment problems and the location of economic activities", *Econometrica*, **25**, pp. 53-76 (1957).
3. Mckendall Jr, A.R. and Shang, J. "Hybrid ant system for the dynamic facility layout problem", *Computers & Operations Research*, **33**, pp. 790-803 (2006).
4. Balakrishnan, J. and Cheng, C.H. "Dynamic layout algorithm", *Omega, Int. J. Mgmt Sci*, **26**(4), pp. 507-521 (1997).
5. Liu, W.H. "Tabu search heuristic for the dynamic facility layout problem", MS Dissertation, Department of Industrial and Management System Engineering, Morganton, West Virginia (2005).
6. Kuppasamy, S. "Simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem", MS Dissertation, Department of Industrial and Management System Engineering, Morganton, West Virginia (2001).
7. Hakobyan, A. "Heuristic for dynamic facility layout problem with unequal area problem", PhD Dissertation, Department of Industrial and Management System Engineering, Morganton, West Virginia (2008).
8. Shang, J. "Ant colony heuristic for the dynamic facility layout problem", MS Dissertation, Department of Industrial and Management System Engineering, Morganton, West Virginia (2002).
9. Meller, R. and GAu, k. "The facility layout problem", *Journal of Manufacturing System*, **15**(5), pp. 351-366 (1996).
10. Hillier, F.S. "Quantitative tools for plant layout analysis", *The Journal of Industrial Engineering*, **14**, pp. 33-40 (1963).
11. Bazaraa, M.S. "Computerized layout design: A branch and bound approach", *AIIE Transactions*, **7**, pp. 432-438 (1975).
12. Heragu, S.S. "Knowledge based approach to machine cell layout", *Computers & Industrial Engineering*, **17**, pp. 37-42 (1989).
13. Kim, J.G. and Kim, Y.D. "Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points", *International Journal of Production Research*, **38**, pp. 4635-4653 (2000).

14. Montreuil, B. and Venkatadri, U. "Strategic interpolative design of dynamic manufacturing systems layouts", *Management Science*, **37**, pp. 682-694 (1991).
15. Yang, T. and Peters, B.A. "Flexible machine layout design for dynamic and uncertain production environment", *European Journal of Operational Research*, **108**, pp. 49-64 (1998).
16. Erel, E., Ghosh, J.B. and Simon, J.T., "New heuristic for the dynamic layout problem", *Journal of the Operational Research Society*, **54**, pp. 1275-1282 (2003).
17. Tate, D.E. and Smith, A.E. "A genetic approach to the quadratic assignment problem", *Computers and Operations Research*, **22**, pp. 73-83 (1995).
18. Dunker, T., Radons, G. and Westkamper, E. "A coevolutionary algorithm for a facility layout problem", *International Journal of Production Research*, **41**, pp. 3479-3500 (2003).
19. Wang, M.J., Hu, M.H. and Ku, M.Y. "A Solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm", *Computers in Industry*, **56**, pp. 207-220 (2005).
20. Skarin-Kapov, J. "Tabu search applied to the quadratic assignment problem", *ORSA Journal on Computing*, **2**(1), pp. 33-45 (1990).
21. Chiang, W. and Kouvelis, P. "An improved tabu search heuristic for solving facility layout design problems", *International Journal of Production Research*, **34**(9), pp. 2565-2585 (1996).
22. Chiang, W. and Chiang, C. "Intelligent local search strategies for solving facility layout problems with the quadratic assignment problem formulation", *European Journal of Operational Research*, **106**, pp. 457-488 (1998).
23. Kaku, B.K. and Mazzola, J.B. "A tabu-search heuristic for the dynamic plant layout problem", *Inform Journal on Computing*, **9**(4), pp. 374-384 (1997).
24. Scholz, D., Petrick, A. and Domschke, W. "A slicing tree and tabu search based heuristic for the unequal area facility layout problem", *European Journal of Operational Research*, **197**, pp. 166-178 (2009).
25. Mckendall Jr, A.R. and Hakobyan, A. "Heuristic for the dynamic facility layout problem with unequal area departments", *European Journal of Operational Research*, **201**, pp. 171-182 (2010).
26. Heragu, S.S. and Alfa, A.S. "Experimental analysis of simulated annealing based algorithm for the layout problem", *European Journal of Operational Research*, **57**, pp. 190-202 (1991).
27. Baykasglu, A. and Gindy, N.N.Z. "A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem", *Computers & Operations Research*, **28**, pp. 1403-1426 (2001).
28. Mckendall Jr, A.R., Shang, J. and Kuppusamy, S. "Simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem", *Computer & Operational Research*, **33**, pp. 2431-2444 (2006).
29. Dong, M., Wu, Ch. and Hou, F. "Shortest path based simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem under dynamic business environment", *Expert System With Applications*, **36**, pp. 11221-11232 (2009).
30. Gambardella, L.M., Taillard, E.D. and Dorigo, M. "Ant colonies for the quadratic assignment problem", *Journal of Operational Research Society*, **50**, pp. 167-176 (1999).
31. Baykasoglu, A., Dereli, T. and Sabuncu, I. "An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems", *International Journal of Management Science*, **34**, pp. 385-396 (2006).
32. Komarudin Wong, K.Y. "Applying ant system for solving unequal area facility layout problems", *European Journal of Operational Research*, **202**, pp. 730-746 (2010).
33. Balakrishnan, J., Cheng, C.H, Conway, D.G. and Lau, C.M. "A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem", *Production Economics*, **86**, pp. 107-120 (2003).
34. Lacksonen, T.A. and Ensore, E.E. "Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problems", *International Journal of Production Research*, **31**, pp. 503-517 (1993).