مهندسی صنایع و مدیریت شریف
دوره‌ی ۱ - ۲۹، شماره‌ی ۱، ص. ۵۳-۶۲

Original Article

استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب کاراترین چیدمان مبتنی بر ساختار نواری منعطف

مصطفی عابدزاده* **(استادیار)**
مصطفی مزینانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

«چیدمان تسهیلات» مسئله‌یی است که به تعیین موقعیت دپارتمان‌ها در کف کارخانه می‌پردازد. رایج‌ترین هدف در این مسئله کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل مواد است. بیشتر محققین به چندمنظوره‌بودن ماهیت مسائل چیدمان اذعان دارند و بنابراین، در تعیین مکان مناسب تسهیلات در نظرگرفتنِ اهداف مختلف ضرورت می‌یابد. از این‌رو در این نوشتار با در نظرگرفتن اهداف مختلف و به‌کارگیری یک رویکرد چندمرحله‌یی ــ شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم opt-۲ و شیوه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها ــ یک چیدمان کارا برای مسئله‌ی چیدمانِ مبتنی بر ساختار نواریِ منعطف تعیین می‌شود. در این نوع چیدمان، دپارتمان‌ها به‌صورت پیوسته به نوارهایی موازی با عرض‌های مختلف اختصاص می‌یابند. رویکرد پیشنهادی برای چندین مسئله‌ی موجود در ادبیات موضوع آزمایش شده است. نتایج به دست آمده نشان‌گر مؤثربودن رویکرد پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: مسئله‌ی چیدمان تسهیلات، ساختار نواری منعطف، الگوریتم ژنتیک، تحلیل پوششی داده‌ها، الگوریتم opt-۲.

abedzadeh@kntu.ac.ir
mostafamazinani@sina.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از مسائل مهم در مهندسی صنایع، پیدا کردن موقعیت دپارتمان‌ها در کف کارخانه در قالب مسئله‌ی چیدمان تسهیلات (FLP)[۱] است. محققین مسئله‌ی چیدمان را یک مسئله‌ی بهینه‌سازی می‌دانند که تلاش می‌کند با در نظرگرفتن سیستم حمل‌ونقل مواد و تعاملات مختلف بین تسهیلات، چیدمان‌هایی کارا ایجادکند.[۱]

از آنجا که یکی از عوامل مؤثر در عملکرد سیستم محل قرارگیری تسهیلات آن سیستم است، تحقیقات زیادی در ارتباط با این مسئله و تحت شرایط مختلف صورت گرفته است. ازجمله شرایط قابل بررسی «نوع نمایش فضای مسئله» است. مرور تحقیقات انجام‌شده حاکی از آن است که بیشتر تحقیقات انجام‌شده از یک چیدمان گسسته با هدف کمینه‌سازی هزینه استفاده می‌کند. این در حالی است که محققین مدل‌های پیوسته را مناسب‌تر می‌دانند[۲] زیرا مدل‌های گسسته برای تعیین محل دقیق تسهیلات کاربردی ندارند و در مسائلی که دپارتمان‌ها دارای مساحت نابرابرند کارآمد نیستند.

بدین‌منظور در این نوشتار از نوعی چیدمان پیوسته به‌نام ساختار نواری منعطف (FBS)[۲] استفاده شده است. در چیدمان مبتنی بر ساختار نواری منعطف (FBS)، طرح استقرار به نوارهای عمودی یا افقی تقسیم می‌شود که عرض هر نوار منعطف، و وابسته به تعداد دپارتمان‌هایی است که در آن نوار قرار می‌گیرند؛ عرض هر نوار از تقسیم مجموع مساحت دپارتمان‌های اختصاص‌یافته به آن نوار بر طرف کوچک طرح استقرار حاصل می‌شود. همچنین تعداد نوارها و تعداد دپارتمان‌هایی که در هر نوار قرار می‌گیرند قابل تغییرند (منعطف‌اند). در شکل ۱ نمونه‌یی از چیدمان مبتنی بر ساختار نواری منعطف نشان داده شده است.

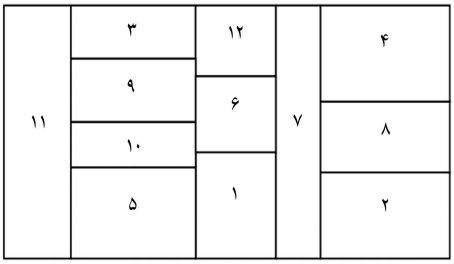
FBS پیکربندی چیدمان ممکن را محدود می‌کند اما از ویژگی‌های مطلوبی نظیر سادگی مسائل گسسته و تا حدی بهینگی مسائل پیوسته برخوردار است.

از آنجا که مسئله‌ی چیدمان تسهیلات از نوع NP-hard است،[۲] به‌منظور حل چنین مسائلی در یک مدت زمان معقول و با کیفیت خوب، انتخاب یک الگوریتم فراابتکاری قدرت‌مند ضروری است. امروزه از الگوریتم ژنتیک (GA)[۳] به‌دلیل قابلیت آن در جست‌وجوی موازی، در فضاهای پیچیده و برای جلوگیری از رسیدن به جواب بهینه‌ی محلی در بسیاری از زمینه‌ها استفاده می‌شود. در این نوشتار از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی چیدمان تسهیلات با ساختار نواری منعطف استفاده می‌شود.

در نهایت با توجه به چندمنظوره بودن مسائل چیدمان، بدیهی است که در نظرگرفتن معیارهای مختلف هنگام تعیین چیدمانِ مناسب منجر به بهبود عملکرد تسهیلات خواهد شد. بدین‌منظور در این نوشتار پس از تولید یک چیدمان کم‌هزینه (چیدمان اولیه) توسط الگوریتم ژنتیک، از آن به‌عنوان چیدمان پایه برای الگوریتم

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۸/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۴/۶، پذیرش ۱۳۹۰/۹/۲۸.



شکل ۱. نمونه‌یی از چیدمان مبتنی بر ساختار نواری منعطف با نوارهای عمودی.

بهینه‌سازی جفتی (2-opt) استفاده می‌شود. سپس برای هریک از چیدمان‌های ایجادشده توسط الگوریتم 2-opt، چهار معیار هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد، مجاورت درخواستی، فاصله‌ی درخواستی و نسبت شکل محاسبه می‌شود؛ کاراترین این معیارها با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)[۴] انتخاب می‌شود. تحلیل پوششی داده‌ها یکی از شیوه‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)[۵] است که در سال‌های اخیر کاربرد آن در مسائل چیدمان اهمیت خاصی یافته است. با توجه به تحقیقات اندکِ صورت‌گرفته در این زمینه و نیز وجود محدودیت‌ها و شرایط خاص مشاهده‌شده در تحقیقات موجود، در این نوشتار با استفاده از مدل‌های جدید تحلیل پوششی داده‌ها به توسعه و کاربرد بیشتر این شیوه در مسائل چیدمان تسهیلات خواهیم پرداخت.

۲. مرور ادبیات موضوع

در ادبیات موضوع چیدمان، برخی از محققین از یک رویکرد جالب تحت عنوان «ساختار نواری منعطف» برای ارائه‌ی طرح چیدمان استفاده کرده‌اند. این رویکرد که حالت محدودشده‌یی از مسائل چیدمان پیوسته است، برای اولین‌بار در سال ۱۹۹۱ ارائه شد.[۳] پس از مطرح‌شدن این ایده، تیت و اسمیت[۴] از الگوریتم ژنتیک، برای حل مسئله‌ی چیدمان تسهیلات مبتنی بر ساختار نواری منعطف استفاده کردند. آن‌ها جواب‌های مسئله را با دوکروموزم نمایش دادند. کروموزم اول نشان‌گر جایگشت دپارتمان‌ها بود که ترتیب قرارگرفتن دپارتمان‌ها را درون هر نوار نمایش می‌داد و کروموزم دوم شامل اطلاعاتی درباره‌ی تعداد نوارها و نقاط شکست بود.

در سال ۲۰۰۱، محققین با در نظرگرفتن نقاط ورودی و خروجی برای دپارتمان‌ها، از الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده کردند.[۵] کلتورل ـکوناک برای حل مسئله‌ی چیدمان مبتنی بر ساختار نواری منعطف از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع استفاده کردند.[۶] انیا و همکارانش نیز از الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی چیدمان با ساختار نواری منعطف وقتی که تقاضای تولید متغیر است بهره بردند.[۷] آنان برای این منظور از اعداد فازی برای محاسبه‌ی جریان مواد استفاده کردند.

کوناک و همکارانش یک برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP)[۶] برای مسئله‌ی مبتنی بر ساختار نواری منعطف ارائه دادند.[۸] این کار اولین رویکرد دقیق برای یافتن راه حل بهینه‌ی FBS است. آن‌ها با استفاده از محدودیت‌هایی مدل‌شان را استحکام بخشیدند و توانستند مسائلی تا ۱۴ دپارتمان را به‌صورت دقیق حل کنند. این محدودیت‌ها شامل حذف جواب متقارن و افزایش حد پایین مسئله و حذف جواب‌های تبهگن[۷] است. در سال ۲۰۰۶ پژوهش‌گران مسئله‌ی چیدمان تسهیلات را تحت شرایط عدم قطعیت هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد در یک مقیاس پیوسته با استفاده از امید ریاضی و انحراف استاندارد مربوط به پیش‌بینی تولید در نظر گرفتند و برای حل آن از یک الگوریتم ژنتیک با رمزگانِ مبتنی بر پایه‌ی اعدادِ تصادفی استفاده کردند.[۹]

محققین با در نظرگرفتن چندین معیار، مسئله‌ی چیدمان مبتنی بر FBS را در حالت چندمنظوره بررسی کردند[۱۰] و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش الکتر[۸] و در نظرگرفتن معیارهای هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد، میزان مجاورت درخواستی، میزان فاصله‌ی درخواستی و نسبت شکل، مسئله را حل کردند. آن‌ها با استفاده از تابع هدف نسبت شکل، محدودیت‌های نسبت شکل را حذف کردند. این امر همواره سبب تولید چیدمان‌های ممکن در مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک ــ بدون نیاز به راهکاری خاص در برخورد با محدودیت نسبت شکل ــ می‌شد. در سال ۲۰۰۷ نیز کلتورل ـکوناک و همکارانش FBS را برای مسئله‌ی چیدمان مجدد تسهیلات (FRLP)[۹] در نظر گرفتند و آن را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع حل کردند.[۱۱] دیگر محققین نیز با در نظرگرفتن فرضیاتی از قبیل فضای راهرو و نقاط ورودی و خروجی برای مسئله‌ی چیدمان مبتنی بر FBS، از الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده کردند.[۱۲]

در سال ۲۰۱۰ وانگ و کمارودین[۱۳] و کلتورل ـکوناک و همکارانش[۱۴] از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله‌ی چیدمان مبتنی بر FBS استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از دپارتمان‌های مجازی فضای خالی را نیز برای این مسئله در نظر گرفتند.

برخی از محققین معتقدند که اهمیت ارزیابی یک طرح چیدمان کم‌تر از اهمیت تولید آن نیست، و چون رویه‌ی ارزیابی طراحی چیدمان کارا نیازمند در نظرگرفتن معیارهای کمی و کیفی است از روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی طرحِ ارائه‌شده بهره می‌گیرند. تحلیل پوششی داده‌ها، روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است که توانایی اندازه‌گیری کارایی نسبی واحدهایی با چندین ورودی و چندین خروجی مشابه را دارد. این شیوه‌در ابتدا به‌منظور اندازه‌گیری کارایی معرفی شد، اما پس از مدتی مورد توجه متخصصین حوزه‌ی تصمیم‌گیری قرار گرفت و به‌عنوان یکی از شیوه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پذیرفته شد. به این ترتیب که گزینه‌های مورد ارزیابی به‌عنوان یک واحد تصمیم‌گیری (DMU)[۱۰] فرض شد و با در نظرگرفتن معیارهای منفی به‌عنوان «ورودی»، و معیارهای مثبت به‌عنوان «خروجی» واحدهای تصمیم‌گیری، مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) در این رابطه حل می‌شود. عدد کارایی به دست آمده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به‌کار می‌رود.[۱۵]

در سال ۲۰۰۳ محققین با خاطرنشان کردن این نکته که مسائل جانمایی جزو مسائل چندمنظوره‌اند، از DEA و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[۱۱] برای حل این‌گونه مسائل استفاده کردند.[۱۶] در روش پیشنهادی آن‌ها ابتدا به‌کمک برنامه‌ی رایانه‌یی اسپیرال تعدادی چیدمان مناسب به‌عنوان آلترناتیو طراحی می‌شد. سپس با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) معیارهای کیفی سنجیده می‌شد و در نهایت، با توجه به اطلاعات خروجی از AHP و اطلاعات کمّی اولیه، و نیز با استفاده از شیوه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها کارآمدترین آلترناتیو تعیین می‌شد. این محققین «هزینه» را اصلی‌ترین عامل ورودی در نظرگرفتند و با این استدلال که تغییر هزینه در مرحله‌ی طراحی ناچیز است، مسئله‌ی خود را به یک مسئله‌ی DEA با ورودی ثابت تبدیل کردند و برای حل آن از مدل DEA فاقد ورودی[۱۷] بهره جستند. به این ترتیب با داشتن مقادیر خروجی، از DEA برای رتبه‌بندی و انتخاب نهایی بهترین طرح استفاده کردند. شایان ذکر است که روش پیشنهادی این محققین[۱۶] به گزارش نگارندگان این نوشتار اولین کاربرد DEA در حوزه‌ی طراحی چیدمان است.

ارتی و همکارانش[۱۸] این روش را با کمی تغییر برای ارائه‌ی چیدمانی کارا و استوار در شرایط پویا به کار برده‌اند. آنان‌فرض ثابت‌بودن ورودی‌ها را حذف کرده و معیارهایی که تمایل به کاهش آن‌ها وجود دارد را به‌عنوان ورودی در نظر گرفته‌اند. ارتی و

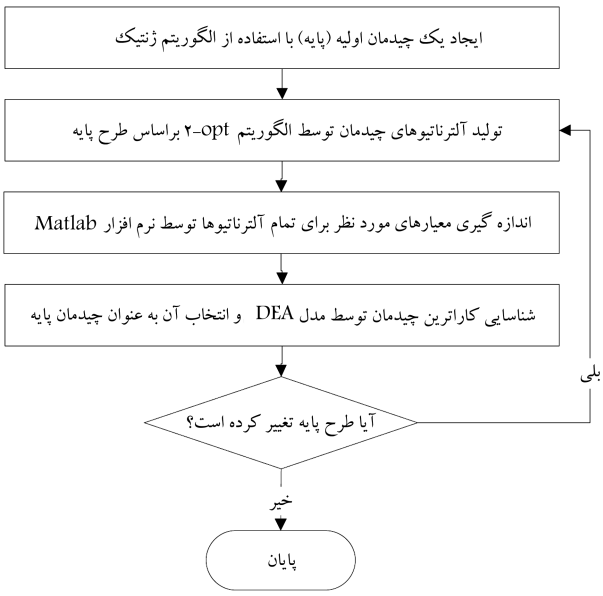
همکارانش اندازه‌ی معیارهای کیفی را از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با استفاده از نرم‌افزار Export choice به دست آوردند. همچنین برای تولید آلترناتیوهای مورد نیاز از یک ابزار رایانه‌یی طراحی چیدمان به‌نام ویزفکتوری[12] استفاده کردند. پس از تولید گزینه‌های مناسب که تحت سناریوهای مختلف تقاضا خوب عمل می‌کنند، از مدل مینیماکس[13] تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب بهترین چیدمان استفاده می‌شود. همچنین امین و طلوع[19] با استفاده از داده‌های ارتی و همکارانش،[18] و نیز با معرفی یک مدلِ برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) که قادر به شناسایی کاراترین واحد تصمیم‌گیری (DMU) بود، کاراترین چیدمان را شناسایی کردند.

با توجه به تحقیقات اندک صورت‌گرفته در زمینه‌ی چیدمان چندمنظوره، و نیز وجود محدودیت‌ها و شرایط خاصی که در تحقیقات موجود مشاهده شده، این نوشتار می‌کوشد با استفاده از یک مدل جدید DEA و الگوریتم ۲-opt بسط و گسترش کاربرد DEA در مسائل جانمایی را هدف گرفته است. استفاده از شیوه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها مزایای متعددی دارد، به‌طوری که می‌توان اهداف را بدون نرمال‌سازی در فرم طبیعی خودشان به‌کار برد. همچنین اهداف نیاز به وزن‌دهی ندارند (وزن‌دهی اهداف توسط خود مدل صورت می‌گیرد).

در این نوشتار ابتدا به‌منظور ایجاد یک چیدمان اولیه‌ی کم‌هزینه‌ی مبتنی بر ساختار نواری منعطف، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، از نظر رمزگان جواب اولیه، تابع جریمه و عملگرهای جهش و تقاطع با الگوریتم‌های ژنتیکِ مطرح‌شده در ادبیات موضوع متفاوت است. سپس با ارائه‌ی مدل مختلط عدد صحیح و تحلیل پوششی داده‌ها و ترکیب این مدل با الگوریتم ۲-opt، کاراترین چیدمان به دست می‌آید.

۳. رویکرد پیشنهادی

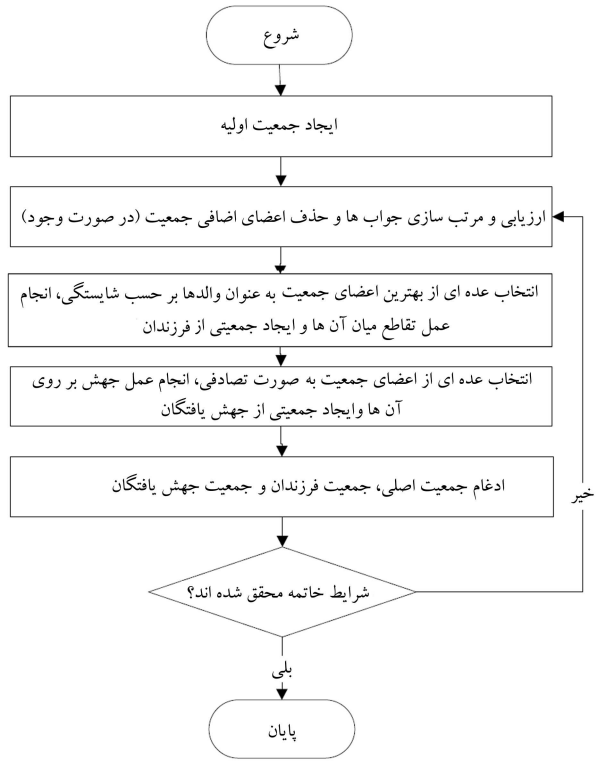
با توجه به این که مهم‌ترین هدف در مسائل چیدمان کمینه‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد است، ابتدا یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی چیدمان تسهیلات ــ که فقط معیار هزینه را در نظر می‌گیرد ــ ارائه می‌شود. این چیدمان به‌عنوان چیدمان پایه‌ی الگوریتم ۲-opt قرار گرفته است. سپس در یک فرایند تکرارپذیر، با تولید آلترناتیوهای مختلف چیدمان توسط الگوریتم ۲-opt، و انتخاب کاراترین آن‌ها با استفاده از رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها، هم‌زمان چندین هدف مد نظر قرار می‌گیرد. شکل ۲ مراحل رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل رویکرد پیشنهادی.

۱.۳. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

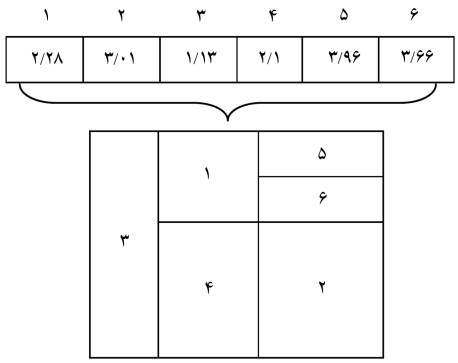
الگوریتم ژنتیک، نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که بر پایه‌ی سازوکارهای تکامل و طبیعت ژن‌ها استوار است. ایده‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک توسط هالند[14] مطرح شد.[20] الگوریتم‌های ژنتیک با جمعیتی موسوم به کروموزوم ــ که همان جواب‌های کدگذاری شده‌ی مسئله‌اند ــ کار می‌کنند. هرکروموزوم از واحدهای پایه‌یی به‌نام ژن ساخته می‌شود. تابع برازش تعیین‌کننده‌ی میزان موفقیت کروموزوم‌هاست. جمعیت اولیه معمولاً به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود و پس از آن الگوریتم ژنتیک وارد حلقه‌یی می‌شود که در آن به ایجاد نسل‌های متوالی از جواب‌ها می‌پردازد، به این امید که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت‌های قدیم باشند، زیرا روش‌های مورد استفاده برای انتخاب جمعیت‌های جدید، با توجه به مناسب بودن آن‌ها اعمال شده‌اند. پس بهترین‌ها شانس بیشتری برای تولید مثل خواهند داشت. ایجاد نسل



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم ژنتیک.

جدید با استفاده از سه عمل اصلی انتخاب، تقاطع و جهش انجام می‌شود. جمعیت جدید نیز با توجه به شرط خاتمه مورد ارزیابی مجدد قرار می‌گیرد. اگر شرط خاتمه محقق نشود، این عملیات دوباره تکرارمی‌شود تا نسل بهینه‌تر دیگری به وجود آید. هرچند ممکن است هیچ‌یک از این راه حل‌ها جواب بهینه نباشند، بعضی از آن‌ها در مقایسه‌با دیگر راه‌حل‌ها به جواب بهینه نزدیک‌ترند. در شکل ۳ فلوچارت مراحل الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده، تعداد بهینه‌ی نوارها، تعداد دپارتمان‌هایی



شکل ۴. نمونه‌یی از کروموزوم مسئله و چیدمان مربوط به آن.

که در هر نوار قرار می‌گیرد، و نیز ترتیب قرارگیری دپارتمان‌ها در هر نوار به‌منظور کمینه‌کردن هزینه به دست می‌آید. در ادامه مراحل الگوریتم ژنتیک پیشنهادی تشریح می‌شود.

۱.۱.۳. کدگذاری

اولین گام در به‌کارگیری و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، نمایش جواب‌های مسئله به‌صورت یک کروموزوم است. در رمزگان استفاده‌شده در این تحقیق هر کروموزم از N ژن تشکیل شده که هر ژن عددی تصادفی بین ۱ و $B+1$ است. قسمت صحیح این عدد معرف شماره نوار و قسمت اعشاری آن نمایانگر اولویت قرارگیری دپارتمان در نوار است (اعداد کوچک‌تر از اولویت بالاتری برخوردارند). شکل ۴ طرحی را نشان می‌دهد که در آن ۶ دپارتمان در ۳ نوار جانمایی شده‌اند.

به‌عنوان مثال در طرح فوق ژن مرتبط با دپارتمان ششم (ششمین ژن کروموزوم جواب) دارای مقدار ۳٫۶۶ است. یعنی این دپارتمان در نوار سوم قرار می‌گیرد و چون در مقایسه با سایر دپارتمان‌های این نوار (دپارتمان ۲ با مقدار ۳٫۰۱ و دپارتمان ۵ با مقدار ۳٫۹۶) دارای رتبه‌ی دوم است، در طرح چیدمان دپارتمان‌ها در نوار سوم، اولویت دوم را به خود اختصاص داده است.

۲.۱.۳. تابع شایستگی

ارزیابی جواب‌ها برمبنای هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد صورت می‌گیرد. بنابراین هزینه‌ی کم‌تر معرف شایستگی بهتر خواهد بود. هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد از طریق رابطه‌ی ۱ حساب می‌شود:

$$Cost_s = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i}^{N} C_{ij}F_{ij}d_{ij} \qquad (1)$$

که در آن N تعداد دپارتمان‌ها، F_{ij} جریان مواد بین دپارتمان‌های i و j است. همچنین C_{ij} هزینه‌ی حمل هر واحد مواد در هر واحد فاصله بین دپارتمان‌های i و j، و d_{ij} فاصله‌ی مستطیلی بین مرکز دپارتمان‌های i و j است. باید توجه داشت که در هنگام تولید جواب‌ها، ممکن است برخی جواب‌ها دارای دپارتمان‌هایی با شکل‌های غیرعملی (نشدنی) باشند ــ یعنی دپارتمان‌ها یا خیلی پهن و یا خیلی باریک باشند. در مسائل با ساختار نواری منعطف به‌منظور جلوگیری از تولید چنین جواب‌هایی از معیار «بیشینه نسبت طول به عرض» ($\alpha_i^{\max}$) استفاده می‌شود. اگر α_i نسبت طول به عرض به دست آمده‌ی دپارتمان i از یک جواب (چیدمان) باشد، این جواب شدنی است اگر و فقط اگر $\alpha_i \leq \alpha_i^{\max}$ به ازای هر دپارتمان i باشد. اگر در داده‌های مسئله به‌جای $\alpha_i^{\max}$، اطلاعات کمینه طول کناری مجاز ($l_i^{\min}$) داده شده باشد در این‌صورت $\alpha_i^{\max}$ با استفاده از رابطه‌ی $\alpha_i^{\max} = a_i \times (l_i^{\min})^{-2}$ محاسبه می‌شود.

الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده، با در نظر گرفتن جریمه برای جواب‌های نشدنی، از انتخاب آن‌ها جلوگیری می‌کند. تابع جریمه عبارت است از:

$$p_s = \left(Cost_{feas}^{\min} - Cost_{all}^{\min}\right) \times \left(\sqrt{n_s\left(1+\sum_{i=1}^{N}\max\{0,\alpha_i-\alpha_i^{\max}\}\right)}\right)^k \qquad (2)$$

که در آن $Cost_{feas}^{\min}$ کم‌ترین هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد مربوط به جواب‌های شدنی و $Cost_{all}^{\min}$ کم‌ترین هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد مربوط به جواب‌های شدنی یا نشدنی است که در طی جست‌وجو تاکنون به دست آمده‌اند. همچنین k پارامتر شدت و n_s تعداد دپارتمان‌های ناقض محدودیت شکل است. در بیشتر تحقیقات انجام‌شده یا از n_s یا از $\sum_{i=1}^{N}\max\{0,\alpha_i,\alpha_i^{\max}\}$ به‌عنوان ضریب تابع جریمه استفاده شده است. در این نوشتار از میانگین هندسی آن‌ها به‌عنوان ضریب تابع جریمه استفاده شده است. این کار سبب تمایز بیشترِ حالاتِ مختلفِ چیدمان‌های نشدنی می‌شود. تابع هزینه با در نظرگرفتن جریمه برای چیدمان‌های نشدنی عبارت است از:

$$Cost_s^p = Cost_s + \left(Cost_{feas}^{\min} - Cost_{all}^{\min}\right) \times \left(\sqrt{n_s\left(1+\sum_{i=1}^{N}\max\{0,\alpha_i-\alpha_i^{\max}\}\right)}\right)^k \qquad (3)$$

۳.۱.۳. روش انتخاب

در این الگوریتم از روش «چرخه‌ی رولت» برای انتخاب استفاده شده است. بدین صورت که احتمال انتخاب «کروموزوم با برازندگی بالاتر» بیشتر است. احتمال انتخاب متناظر با هر کروموزوم، براساس برازندگی آن کروموزوم از طریق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$p_s = \frac{e^{-\beta\frac{Cost_s^p}{Cost_{\max}^p}}}{\sum_{i=1}^{n} e^{-\beta\frac{Cost_i^p}{Cost_{\max}^p}}} \qquad (4)$$

که در آن $Cost_s^p$ هزینه‌ی کروموزوم i و $Cost_{max}^p$ بیشترین هزینه‌ی به دست آمده است. β نیز پارامتر شدت است و طوری تنظیم می‌شود که نیمی از کروموزم‌ها ۸۰ درصد احتمال انتخاب را داشته باشند.

۴.۱.۳. عملگر تقاطع

عملگر تقاطع استفاده‌شده در این تحقیق تقاطع یکنواخت پیوسته است. در تقاطع یکنواخت پیوسته ابتدا دو کروموزوم انتخاب می‌شود. سپس یک کروموزوم تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و ۱، هم‌طول با کروموزم‌های موجود، تولید می‌شود. در نهایت با استفاده از روابط ۵ و ۶ فرزندان ایجاد می‌شوند:

$$y_{1i} = \lambda_i x_{1i} + (1-\lambda_i)x_{2i} \quad \forall\ i = 1,2,...,N \qquad (5)$$

$$y_{2i} = \lambda_i x_{2i} + (1-\lambda_i)x_{1i} \quad \forall\ i = 1,2,...,N \qquad (6)$$

که در آن x_{1i} و x_{2i}ها به‌ترتیب ژن‌های والدین اول و دوم، و y_{1i} و y_{2i}ها به‌ترتیب ژن‌های فرزندان اول و دوم هستند. همچنین λ_i ژن کروموزوم تصادفی است. نحوه‌ی انجام عملیات تقاطع در شکل ۵ نشان داده شده است.

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
والد ۱	۳/۳۸	۱/۷۸	۳/۷۲	۱/۷	۲/۶۷	۲/۴۹	۲/۶	۱/۷۸
والد ۲	۲/۷۸	۳/۴۲	۳/۹۳	۲/۲۳	۳/۲۵	۱/۵۵	۳/۲۳	۱/۶۱
کروموزوم تصادفی	۰/۳۶	۰/۵۵	۰/۷۴	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۲۷	۰/۱۱	۰/۲۶
فرزند ۱	۲/۹۹	۲/۵۱	۳/۷۷	۲/۲۱	۳/۱۸	۱/۸	۳/۱۶	۱/۶۵
فرزند ۲	۳/۱۶	۲/۶۸	۳/۸۷	۱/۷	۲/۷۳	۲/۲۳	۲/۶۶	۱/۷۳

شکل ۵. نمایش چگونگی انجام عملیات تقاطع.

۵.۱.۳. عملگر جهش

در این مقاله از سه عملگر جهش مختلف استفاده شده است:

۱. یک ژن به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و سپس با یک عدد تصافی بین ۱ و $B+1$ که براساس رابطه‌ی ۷ تولید می‌شود، جایگزین می‌شود.

$$x'_i = \begin{cases} x_i + ((B+1) - x_i)\tanh(kz) & \tanh(kz) \geq 0 \\ x_i + (x_i - 1)\tanh(kz) & \tanh(kz) < 0 \end{cases} \quad (۷)$$

x_i مقدار ژن تصادفی انتخاب‌شده، x'_i مقدار جایگزین‌شده، z یک عدد تصادفی نرمال استاندارد و k ضریب آن است. استفاده از روش فوق سبب می‌شود جهش‌ها در همسایگی ژن قبلی و با احتمال بیشتری صورت گیرد و از تغییرات خیلی زیاد جلوگیری شود.

۲. سه ژن به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و سپس از بین جابه‌جایی‌های دوتایی و سه‌تایی این ژن‌ها، جابه‌جایی که منجر به کم‌ترین هزینه می‌شود، صورت می‌پذیرد.

۳. با استفاده از الگوریتم opt-۲ تمام جابه‌جایی‌های دوتایی ژن‌های یک کروموزوم انجام می‌شود، و از بین آن‌ها جابه‌جایی که منجر به کم‌ترین هزینه می‌شود انتخاب خواهد شد.

۶.۱.۳. انتخاب نسل جدید

در این نوشتار جمعیت قبلی، جمعیت فرزندان و جمعیت جهش‌یافتگان برحسب شایستگی مرتب می‌شود و به تعداد کروموزوم‌های نسل اولیه، بهترین‌ها به‌ترتیب برای نسل جدید انتخاب می‌شوند.

۷.۱.۳. شرط توقف

در این نوشتار شرط توقف، تولید بدون بهبود تعداد مشخصی جواب با بهترین برازش جمعیت درنظرگرفته شده است.

۲.۳. ایجاد آلترناتیوهای چیدمان و ارزیابی کارایی چیدمان‌های کاندید

بیشترِ تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه‌ی چیدمان تسهیلات بر کمینه‌کردن هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد تمرکز داشته‌اند بدون آن که دیگر اهداف را نیز مد نظر قرار دهند، حال آن‌که مسائل مربوط به چیدمان تسهیلات ماهیت چندمنظوره دارند و باید عامل‌های دیگری به‌جز هزینه برای ارزیابی طرح‌های چیدمان مد نظر قرار گیرد. محققین با بررسی مقالات چندمنظوره به این نتیجه رسیدند که نبود چارچوبی کلی و مناسب برای ارزیابی چیدمان‌های مختلف باعث شده که پژوهش‌گران با توجه به نظرات شخصی خود به ارزیابی طرح‌های چیدمان بپردازند.[۱۰] از این‌رو آن‌ها سه معیار کمّی مناسب ــ علاوه بر هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد ــ برای ارزیابی مسائل چیدمان پیشنهاد دادند. در این نوشتار از معیارهای مشابه استفاده شده که عبارت‌اند از:

الف) میزان مجاورت درخواستی

در کارخانجات تولیدی ممکن است دو دپارتمان دارای اپراتور یا دستگاه مشترک باشند؛ بنابراین بهتر است این دپارتمان‌ها مجاور هم باشند. نرخ نزدیکی نشان‌گر میزان ضرورت استقرار این دپارتمان‌ها در مجاورت یکدیگر است. اندازه‌ی این معیار با توجه به نرخ نزدیکی و طول مرز مشترک محاسبه می‌شود:

$$\text{میزان مجاورت درخواستی} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i}^{N} D_{ij}co_{ij} \quad (۸)$$

D_{ij} نشان‌دهنده‌ی نرخ نزدیکی دپارتمان‌های i و j است و co_{ij} نیز طول مرز مشترک بین دو دپارتمان را نشان می‌دهد.

ب) میزان فاصله‌ی درخواستی

گاهی به دلایلی مثل سروصدا یا لرزش، لازم است بعضی دپارتمان‌ها از یکدیگر فاصله‌ی مشخصی داشته باشند:

$$\text{میزان فاصله‌ی درخواستی} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i}^{N} E_{ij}d'_{ij} \quad (۹)$$

E_{ij} بیان‌گر نرخ فاصله‌ی درخواستی بین دو دپارتمان i و j به‌ازای یک واحد مسافت، و نیز d'_{ij} فاصله‌ی اقلیدسی بین مرکز دپارتمان‌های i و j است.

ج) نسبت شکل

در رویکردهای موجود برای حل مسئله‌ی طراحی چیدمان برای هر دپارتمان، مساحت مورد نیاز به‌عنوان «ورودی» مسئله در نظرگرفته می‌شود و از فاکتور بیشترین نسبت شکل (نسبت طول به عرض) استفاده می‌شود. این فاکتور در بیشتر مسائل در قالب محدودیت بیان می‌شود. در شرایط واقعی با توجه به نوع کار و تجهیزات، برای هر دپارتمان یک شکل بهینه وجود دارد. معیار نسبت شکل، از اختلاف نسبت شکل به دست آمده (α) با مقدار نسبت شکل ایده‌آل (α^*) حاصل می‌شود.

$$\text{نسبت شکل} = \sum_{i=1}^{N} |\alpha_i - \alpha_i^*| \quad (۱۰)$$

چنان‌که اشاره شد مهم‌ترین هدف در مسائل چیدمان تسهیلات، کمینه‌کردن هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد است. در این مقاله نیز به این هدف ارزش بیشتری داده شده است. بدین‌منظور چیدمان به دست آمده از الگوریتم ژنتیک، که چیدمانی کم‌هزینه است، به‌عنوان چیدمان پایه‌ی الگوریتم opt-۲ قرار گرفته و آلترناتیوهای مختلف چیدمان ایجاد می‌شود. برای هر چیدمان کاندید چهار معیار شامل هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد، میزان مجاورت درخواستی، میزان فاصله‌ی درخواستی و نسبت شکل محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از شیوه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها کاراترین چیدمان کاندید انتخاب می‌شود. بعد از شناسایی کاراترین چیدمان از میان چیدمان‌های کاندید مجدداً آن را به‌عنوان چیدمان پایه‌ی الگوریتم opt-۲ در نظرگرفته و این رویه تکرار می‌شود. چنانچه در دو مرحله‌ی متوالی چیدمان کارا تغییر نکند، الگوریتم خاتمه می‌یابد. یادآور می‌شود که در هر مرحله تعداد $\binom{N}{2}$ چیدمان کاندید تولید می‌شود.

نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره شود این است که در شیوه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها، معیارهایی که زیادبودن‌شان مناسب و کم‌بودن‌شان نامناسب است (شامل معیارهای میزان مجاورت درخواستی و میزان فاصله‌ی درخواستی) به‌عنوان «خروجی»، و معیارهایی که کم‌بودن‌شان مطلوب است (شامل معیارهای هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد و نسبت شکل) به‌عنوان «ورودی» تحلیل پوششی داده‌ها در نظرگرفته

می‌شوند. بنابراین دو ورودی و دو خروجی داریم. اما با توجه به این که در این تحقیق سعی شده به معیار هزینه وزن بیشتری داده شود، معیار نسبت شکل به یک خروجی تبدیل می‌شود. از این رو برای معیار نسبت شکل از رابطه‌ی ۱۱ استفاده می‌شود:

$$\text{نسبت شکل} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{|\alpha_i - \alpha_i^*|} \qquad (11)$$

۳.۳. مدل تحلیل پوششی داده‌ها برای محاسبه‌ی کاراترین چیدمان

نکته‌ی قابل توجه در بسیاری از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها این است که باید برابر با تعداد گزینه‌های مورد ارزیابی یک مدل برنامه‌ریزی خطی حل شود. سپس مقدار تابع هدفِ حاصل از مدل‌های حل‌شده (کارایی)، معیار رتبه‌بندی گزینه‌ها خواهند بود. بنابراین در صورت وجود n گزینه، پیداکردن بهترین گزینه (رتبه‌ی اول) نیز مستلزم حل n مدل برنامه‌ریزی خطی خواهد بود. همچنین در مدل‌های کلاسیک تحلیل پوششی داده‌ها، ممکن است تعداد زیادی DMU کارا شوند. با توجه به رویکرد چندمرحله‌یی الگوریتم پیشنهادی باید یک چیدمان به‌عنوان «چیدمان پایه» برای مرحله‌ی بعد انتخاب شود. بنابراین انتخاب کاراترین چیدمان از بین چیدمان‌های به‌ظاهر کارا از اهمیت بالایی برخوردار است.

اخیراً مدل‌های جدید تحلیل پوششی داده‌ها مطرح شده‌اند که توانایی شناسایی کاراترین واحد را دارد. از جمله‌ی این مدل‌ها، می‌توان به مدل مینیماکس ارتی و همکاران[۱۸] اشاره کرد. این مدل با استفاده از روش سعی و خطا کاراترین DMU را شناسایی می‌کند که این خود نقطه‌ی ضعف این مدل به حساب می‌آید. برای رفع این مشکل امین و طلوع[۱۹] براساس مدل مینیماکس پیشنهادی ارتی و همکارانش،[۱۸] مدل DEA دو مرحله‌یی ارائه داده‌اند که به‌کمک آن می‌توان با حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی و یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح، بهترین گزینه (کاراترین DMU) را تعیین کرد. عملکرد این مدل چنان بود که از میان n گزینه، گزینه‌یی به‌عنوان کاراترین (برترین) انتخاب می‌شد. ضعف این مدل این بود که همواره ناکارایی یک DMU مقدار صفر و بقیه DMUها مقدار ۱ بود. یعنی بین DMUهای ناکارا رتبه‌بندی صورت نمی‌گرفت. امین[۲۱] در سال ۲۰۰۹ با تغییرات اندکی در مدل مرحله‌ی دوم توانست این ضعف را برطرف کند و رویکرد پیشنهادی را بهبود بخشد. اما این امر سبب غیرخطی شدن مدل مرحله‌ی دوم شد. در این مقاله با برطرف‌کردن این ضعف، مدل غیرخطی مرحله‌ی دوم به یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح تبدیل شده و از آن برای شناسایی کاراترین چیدمان در مراحل رویکرد پیشنهادی استفاده شده است. خطی‌کردن مدل امین سبب می‌شود که نرم‌افزارهایی که قادر به حل مدل‌های غیرخطی نیستند بتوانند این مدل را حل کنند، زمان حل نیز به میزان قابل توجهی کاهش یابد. در ادامه به مدل پیشنهادی امین و نحوه‌ی خطی‌سازی مدل مرحله‌ی دوم پرداخته‌ایم. در مدل دومرحله‌یی امین، ابتدا ε^* که بیشینه مقدار ε است، با استفاده از مدل مرحله‌ی اول محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از ε^* را کوک[۱۵] و همکاران[۲۲] به‌منظور تمایز بهترِ DMUها پیشنهاد کردند. مدل مرحله‌ی اول، تعمیم‌یافته‌ی مدل کوک و همکاران است که در ادامه آمده است.

مدل مرحله‌ی اول برای شناسایی ε^*.

$$\max \varepsilon^* = \varepsilon \qquad (12)$$

$Subject\ to:$

$$\sum_{i=1}^{m} w_j x_{ij} \le 1 \quad j = 1, ..., n \qquad (13)$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} w_i x_{ij} \le 0 \quad j = 1, ..., n \qquad (14)$$

$$w_i - \varepsilon \ge 0 \qquad i = 1, ..., m \qquad (15)$$

$$u_r - \varepsilon \ge 0 \qquad r = 1, ..., s \qquad (16)$$

در مدل مرحله‌ی اول، n تعداد DMUها، m تعداد ورودی‌ها، و s تعداد خروجی‌هاست. همچنین x_{ij} نشان‌گر iامین ورودی واحد jام، y_{rj} نشان‌گر rامین خروجی واحد jام، w_i وزن تخصیص داده‌شده به ورودی iام، و u_r وزن تخصیص داده‌شده به خروجی rام است. پس از محاسبه‌ی مقدار ε^* از مدل مرحله‌ی اول، این مقدار در مدل مرحله‌ی دوم جایگذاری شده و با حل مدل مرحله‌ی دوم که در ادامه آمده، کاراترین DMU شناسایی می‌شود.

مدل مرحله‌ی دوم برای شناسایی کاراترین DMU.

$$\min Z = M \qquad (17)$$

$Subject\ to:$

$$M - d_j \ge 0 \qquad j = 1, ..., n \qquad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{m} w_i x_{ij} \le 1 \qquad j = 1, ..., n \qquad (19)$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} w_i x_{ij} + d_j = 0 \quad j = 1, ..., n \qquad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \theta_j = n - 1 \qquad (21)$$

$$\theta_j - d_j \beta_j = 0 \qquad j = 1, ..., n \qquad (22)$$

$$w_i \ge \varepsilon^* \qquad i = 1, ..., m \qquad (23)$$

$$u_j \ge \varepsilon^* \qquad r = 1, ..., s \qquad (24)$$

$$d_j \ge 0, \beta_j \ge 1, \theta_j \in \{0, 1\} \qquad j = 1, ..., n \qquad (25)$$

در مدل مرحله‌ی دوم، M بیشترین میزان عدم‌کارایی و d_j میزان عدم کارایی jامین واحد تصمیم‌گیری (DMU) است. اما عاملی که باعث غیرخطی شدن مدل امین می‌شود، محدودیت $\theta_j - d_j \beta_j = 0$ است. با توجه به این که $\beta_j \ge 1$ ، می‌توان با تقسیم طرفین معادله بر β_j به محدودیت زیر رسید.

$$\frac{\theta_j}{\beta_j} - d_j = 0 \qquad j = 1, 2, ..., n \qquad (26)$$

حال با تغییر متغیر $\gamma_j = \frac{1}{\beta_j}$ محدودیت زیر حاصل می‌شود:

$$\theta_j \gamma_j - d_j = 0 \qquad j = 1, 2, ..., n \qquad (27)$$

همچنین داریم:

$$\beta_j \ge 1 \Rightarrow 0 < \frac{1}{\beta_j} \le 1 \Rightarrow 0 < \gamma_j \le 1 \qquad j = 1, 2, ..., n \qquad (28)$$

بنابراین می‌توان از محدودیت ۲۷ به‌جای محدودیت ۲۱ استفاده کرد. همچنان مدل غیرخطی است، اما محدودیت $\theta_j \gamma_j - d_j = 0$ را می‌توان به فرم خطی تبدیل کرد. چنانچه در محدودیتی دو متغیر در هم ضرب شده باشند (xy) به‌طوری که یکی از آن‌ها (x) متغیری مقید (≥ 0) و دیگری (y) متغیر باینری باشد، می‌توان آن محدودیت را مطابق روش زیر خطی کرد:

$$x' \le My \qquad (29)$$

$$x' \le x + M(1 - y) \qquad (30)$$

$$x' \ge x - M(1 - y) \qquad (31)$$

$$x, x' \ge 0, y = \{0, 1\} \qquad (32)$$

که در آن M عددی بزرگ است. بنابراین متغیر x' را می‌توان با حاصل‌ضرب متغیرهای x و y جایگزین کرد. از محدودیت‌های فوق نتیجه می‌شود که چنانچه متغیر y مقدار صفر به خود بگیرد متغیر x' صفر می‌شود و چنانچه متغیر y مقدار ۱ بگیرد، متغیر x' مقداری برابر متغیر x اختیار می‌کند. در مدل مسئله با توجه به این که متغیر γ_j نمی‌تواند مقداری بیشتر از ۱ اختیار کند، مقدار M برابر ۱ فرض شده است. محدودیت‌های فوق را برای مسئله می‌توان چنین بیان کرد:

$$\gamma'_j - d_j = ۰ \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۳۳)$$
$$\gamma'_j \le \theta_j \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۳۴)$$
$$\gamma'_j \le \gamma_j + (۱ - \theta_j) \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۳۵)$$
$$\gamma'_j \ge \gamma_j - (۱ - \theta_j) \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۳۶)$$
$$\gamma'_j \ge ۰, l \le \gamma_j \le ۱ \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۳۷)$$

گفتنی است در رابطه‌ی ۳۷، l مقدار مثبت بسیارکوچکی است. بنابراین مدل مسئله را می‌توان در حالت برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح بازنویسی کرد:
مدل MILP پیشنهادی برای شناسایی کاراترین DMU.

$$\min Z = M \qquad (۳۸)$$

$Subject\ to:$

$$M - d_j \ge ۰ \qquad j = ۱, ..., n \qquad (۳۹)$$
$$\sum_{i=۱}^{m} w_i x_{ij} \le ۱ \qquad j = ۱, ..., n \qquad (۴۰)$$
$$\sum_{r=۱}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=۱}^{m} w_i x_{ij} + d_j = ۰ \qquad j = ۱, ..., n \qquad (۴۱)$$
$$\sum_{j=۱}^{n} \theta_j = n - ۱ \qquad (۴۲)$$
$$\gamma'_j - d_j = ۰ \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۴۳)$$
$$\gamma'_j \le \theta_j \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۴۴)$$
$$\gamma'_j \le \gamma_j + (۱ - \theta_j) \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۴۵)$$
$$\gamma'_j \ge \gamma_j - (۱ - \theta_j) \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۴۶)$$
$$w_i \ge \varepsilon^* \qquad i = ۱, ..., m \qquad (۴۷)$$
$$u_r \ge \varepsilon^* \qquad r = ۱, ..., s \qquad (۴۸)$$
$$d_j, \gamma'_j \ge ۰, l < \gamma_j \le ۱, \theta \in \{۰, ۱\} \qquad j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۴۹)$$

۴. مثال‌های عددی و مقایسه‌ی نتایج

در این بخش با حل چندین مثال، کارایی رویکرد پیشنهادی بررسی می‌شود. با توجه به این که مسئله‌ی «چیدمان تسهیلات با ساختار نواری منعطف» قبلاً توسط محققین دیگری مورد بررسی قرار گرفته، از داده‌ها و مثال‌های معروف موجود در ادبیات موضوع به‌منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده، و نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی مقایسه شده است. مسائل نمونه‌یی مورد استفاده در این نوشتار و خلاصه ویژگی‌های آن‌ها ــ نظیر اندازه، محدودیت شکل، و مرجع داده‌های اولیه ــ در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم 2-opt برای محاسبه‌ی آلترناتیوهای چیدمان در نرم‌افزار MATLAB ۲۰۰۹ برنامه‌نویسی، و از نرم‌افزار گمز ۲۳/۳ برای حل مدل DEA پیشنهادی استفاده شده است. تمامی مسائل نمونه‌یی در رایانه‌یی با پردازنده‌ی دوهسته‌یی ۲/۲ گیگاهرتز و حافظه‌ی اصلی ۴ گیگابایت در سیستم عامل

جدول ۱. مسائل نمونه‌یی.

مساله	تعداد دپارتمان‌ها	ابعاد طرح استقرار	محدودیت شکل	مرجع داده‌ها
VC۱۰	۱۰	۵۱×۲۵	$l^{\min} = ۵$	[۲۳]
VC۱۰Rs	۱۰	۵۱×۲۵	$l^{\min} = ۵$	[۲۳]
VC۱۰Ra	۱۰	۵۱×۲۵	$\alpha^{\max} = ۵$	[۲۴]
BA۱۲	۱۲	۱۰×۶	$l^{\min} = ۱$	[۲۵]
BA۱۴	۱۴	۹×۷	$l^{\min} = ۱$	[۲۵]
NUG۱۲	۱۲	۴×۳	$\alpha^{\max} = ۴$	[۲۶]
NUG۱۵	۱۵	۳×۵	$\alpha^{\max} = ۴$	[۲۶]
AB۲۰	۲۰	۳۰×۲۰	$\alpha^{\max}$=متغیر	[۲۷]

ویندوز ۷ حل شده‌اند. در این مثال‌ها عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نسبت به رویکردهای دیگر نظیر الگوریتم ژنتیک تیت و اسمیت،[۴] مدل ترکیبی فازی و ژنتیک انیا و همکاران،[۷] رویکرد MILP کوناک و همکاران[۸] و الگوریتم‌های کلونی مورچگان وانگ و کمارودین،[۱۳] و کلتورل ـکوناک و همکارانش[۱۴] مقایسه شده است. به‌منظور همسان‌سازی با این مقالات تنها نوارهای عمودی به کار برده می‌شود.

مسئله‌ی AB۲۰ که توسط آرمورو بوفا[۲۷] ارائه شد، هنوز به‌عنوان یک مسئله‌ی چیدمان نسبتاً بزرگ که نمی‌تواند در مدت زمان منطقی به‌صورت بهینه حل شود، در نظرگرفته می‌شود. تیت و اسمیت،[۴] AB۲۰ را برمبنای ساختار نواری منعطف و بیشینه نسبت طول به عرض‌های مختلف بین ۱/۷۰۶۷۷ تا ۱۰۰۰ بررسی کردند. بعداً انیا و همکاران[۷] مسائل مشابهی را با استفاده از مدل ترکیبی فازی و ژنتیک حل کردند و برخی از نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک تیت و اسمیت را بهبود بخشیدند. در سال ۲۰۱۰ وانگ و کمارودین[۱۳] و کلتورل ـکوناک و همکارش[۱۴] با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان نتایج تحقیقات قبلی را بیشتر بهبود دادند. به دلیل آن که رویکردهای گذشته مبتنی بر FBS است، داده‌های این مسائل می‌توانند مقایسه‌ی خوبی را برای ارزیابی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با نسبت‌های طول به عرض مختلف ارائه دهد. در جدول ۲ نتایج به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در پنج بار اجرای آن ارائه شده است. بهترین جواب به دست آمده به‌خوبیِ جواب‌های حاصل از تحقیقات قبلی است. در جدول ۲ بهترین جواب هر مسئله درکل تحقیقات انجام‌شده به‌صورت پررنگ نشان داده شده است. واضح است که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی بسیار موفقیت‌آمیز بوده و در مقایسه با رویکردهای گذشته در ۱۱ حالت از ۱۲ حالت نسبت طول به عرض عملکرد بهتری داشته است. این ۱۱ جواب جدید، بهترین جواب‌های شناخته‌شده برای مسئله‌ی AB۲۰ با بیشینه نسبت طول به عرض‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

در جدول ۳ جزئیات بهترین جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای مسئله‌ی AB۲۰ ارائه شده است. در این جدول جواب‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی کدگذاری شده‌اند. نوارها با نماد (|) از یکدیگر جدا شده‌اند و ترتیب دپارتمان‌ها درون هر نوار از پایین به بالا است. باید به این نکته توجه داشت که مقادیر بیشینه نسبت طول به عرض ۱۰۰۰، ۵۰ و ۲۵ غیرعادی است و برای مسئله‌ی چیدمان زیادند. به هر حال این‌گونه مسائل برای اثبات این که الگوریتم ژنتیک قادر به جست‌وجوی چیدمان‌های بسیار متنوعی است، اهمیت دارد. برای مثال برای $\alpha^{\max} = ۱۰۰۰$ بهترین جواب شامل یک نوار است. در

جدول ۲. مقایسه‌ی مسئله‌ی AB۲۰.

α^{max}	تیت و اسمیت [۴]	انیا و همکاران [۷]	کوناک و همکاران [۸]	کلتورل-کوناک و کوناک [۱۴]	وانگ و کمارودین [۱۳]	بهترین جواب GA پیشنهادی	میانگین جواب GA پیشنهادی	تعداد تکرار بهترین جواب	درصد بهبود (٪)	زمان حل (ثانیه)
۱۰۰۰	۱۶۳۸٫۵	۱۶۳۸٫۵	-	۱۶۳۸٫۵	-	۱۵۸۷٫۹۱	۱۵۸۷٫۹۱	۵	۳٫۰۹	۳۱۳
۵۰	۳۰۰۹٫۵	۳۰۰۹٫۵	-	۲۷۰۶٫۵	-	**۲۳۸۱٫۸۶**	۲۳۸۱٫۸۶	۵	۱۱٫۹۹	۳۲۹
۲۵	۳۵۳۵٫۱	۳۵۳۵٫۱	-	۳۵۲۶٫۵	-	**۳۳۹۱٫۹۵**	۳۳۹۱٫۹۵	۵	۳٫۸۲	۳۳۶
۱۵	۴۲۹۶٫۱	۴۱۴۰٫۵	-	۴۱۱۹٫۸	-	**۴۰۴۳٫۹۱**	۴۰۴۳٫۹۱	۵	۱٫۸۴	۳۳۴
۱۰	۴۶۳۳٫۳	۴۴۴۰٫۷	-	۴۴۴۰٫۷	-	**۴۳۶۴٫۷۴**	۴۳۹۶٫۲۳	۴	۱٫۷۱	۳۷۲
۷	۵۲۵۵	۴۷۹۳٫۵	-	۴۷۹۳٫۵	-	**۴۷۱۷٫۵۳**	۴۸۲۹٫۵۲	۲	۱٫۵۸	۳۵۶
۵	۵۵۲۴٫۷	۵۳۹۷٫۶	-	۵۲۹۷٫۶	-	**۵۱۸۳٫۵۲**	۵۱۹۲٫۱۳	۴	۲٫۱۵	۳۸۳
۴	۵۷۴۳٫۱	۵۳۷۰٫۹	-	۵۳۶۰٫۸	-	**۵۱۸۳٫۵۲**	۵۲۰۶٫۷۱	۳	۳٫۳۱	۳۷۴
۳	۵۸۳۲٫۶	۵۵۹۴٫۳	-	۵۵۹۴٫۳	-	**۵۳۶۹٫۳**	۵۳۸۶٫۰۸	۳	۴٫۰۲	۳۹۲
۲	۶۱۷۱٫۱	۶۰۲۳٫۲	-	۵۸۴۵٫۳	-	**۵۶۷۷٫۸۳**	۵۷۲۳٫۹۲	۲	۲٫۸۷	۴۱۳
۱٫۷۵	۷۲۰۵٫۴	۶۴۵۳٫۱	۶۸۹۰٫۸۲	۵۸۴۵٫۳	**۵۶۷۷٫۸۳**	**۵۶۷۷٫۸۳**	۵۷۴۲٫۳۷	۲	۰	۴۱۷
۱٫۷۰۶۶۷	۶۶۶۲٫۹	۶۰۲۹٫۳	-	۵۸۴۵٫۳	-	**۵۶۷۷٫۸۳**	۵۸۶۳٫۴۶	۱	۲٫۸۷	۴۵۲

احتمال جهش =۰٫۲، احتمال تقاطع =۰٫۸، جمعیت اولیه =۷۰، شرط خاتمه =۱۰۰۰

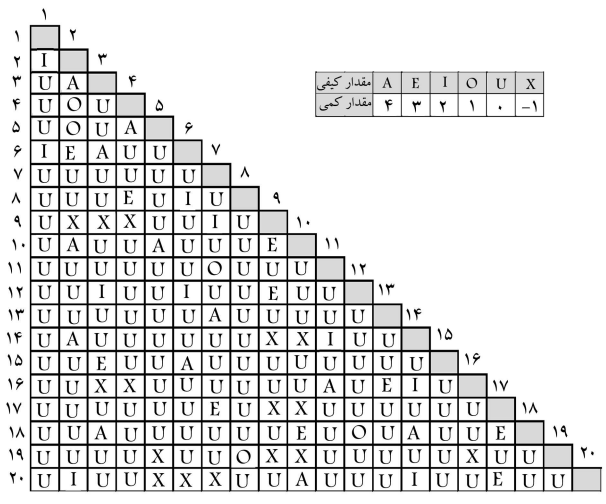
جدول ۳. جواب مسئله‌ی AB۲۰.

α^{max}	بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی
۱۰۰۰	۱،۱۸،۵،۲۰،۸،۷،۶،۲،۴،۱۹،۳،۱۰،۱۴،۹،۱۵،۱۲،۱۷،۱۳،۱۶،۱۱
۵۰	۱۱|۱۶|۱۳ |۱۷|۱۲|۱۵|۹|۱۴|۱۰|۳|۱۹|۴|۲|۶|۷|۸|۲۰|۵|۱۸|۱
۲۵	۱|۱۱|۱۶ |۱۷|۱۲|۱۳|۱۵|۱۰|۱۴|۳|۱۹|۴|۲|۵،۹،۸،۷،۶|۲۰|۱۸
۱۵	۱۱|۱۶|۱۷|۱۲|۱۵|۲۰،۸،۷،۲،۴،۱۹،۹،۱۰،۱۴،۳،۱۳|۵،۶،۱|۱۸
۱۰	۱۱|۱۶|۱۷|۱۲|۱۵،۱۳،۱۴،۱۰،۹،۱۹،۳،۱|۵،۲۰،۸،۷،۲،۴،۶،۱۸
۷	۱۱|۱۶|۱۷|۱۳،۱۲|۱۵،۱۴،۱۰،۹،۳،۱|۵،۱۹|۲۰،۸،۷،۶،۲،۴،۱۸
۵-۴	۱۱،۱۶|۱۵،۱۷|۱۳،۱۴،۱۰،۹،۱۲|۳،۱۹|۲۰،۸،۷،۲،۴،۶|۱،۵،۱۸
۳	۱۱،۱۶|۱۵،۱۳،۱۷|۱۴،۱۰،۹،۱۲|۳،۱۹،۵|۱،۲،۴،۷،۸،۶|۱۸،۲۰
۱٫۷۰۶۶۷-۱٫۷۵-۲	۱۶،۱۷|۱۱،۱۵،۱۲ |۱۳،۱۴،۹،۱۰ |۱،۳،۱۹|۵،۸،۷،۲،۴|۲۰،۶،۱۸

حالی که برای $\alpha^{max} = ۵۰$ بهترین جواب شامل ۲۰ نوار است. نتایج حل مسئله‌ی AB۲۰ نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به‌طور مؤثری قادر به جست‌وجوی جواب‌ها با ساختارهای بسیار مختلفی بوده و توانایی پیداکردن جواب‌های شدنی با بیشینه نسبت طول به عرض پایین و به کوچکی ۱٫۷۰۶۶۷ را دارد.

در جدول ۴ نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای مسائل دیگری که قبلاً در مقالات FBS مورد استفاده قرارگرفته‌اند ارائه شده است. بیشتر این مسائل توسط مدل MILP کوناک و همکاران[۸] به‌صورت دقیق حل شده‌اند و جواب بهینه‌ی آن‌ها موجود است. نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی می‌تواند جواب‌های بهینه‌ی FBS را پیدا کند. در جدول ۴ بهترین جواب FBS برای هر مسئله به‌صورت پررنگ نشان داده شده است. جدول ۵، نحوه‌ی نمایش چیدمان حاصل از بهترین جواب‌های به دست آمده را نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه‌ی کاراترین چیدمان برای یک مثال عددی، از مسئله‌ی AB۲۰ با بیشینه نسبت طول به عرض ۲ استفاده می‌شود. برای انجام این کار، نیاز به اطلاعاتی برای نرخ نزدیکی و نسبت شکل ایده‌آل است. بدین‌منظور ماتریس نرخ نزدیکی به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. همچنین عدد طلایی ($\alpha_i^* = ۱٫۶۶$) به‌عنوان مقدار ایده‌آل نسبت طول به عرض برای همه‌ی دپارتمان‌ها در نظرگرفته شده است. شکل ۶، نمودار رابطه‌ی فعالیت‌های تصادفی تولیدشده برای مسئله‌ی AB۲۰ را نشان می‌دهد.

با انجام تعویض‌های دوتایی توسط الگوریتم 2-opt روی چیدمان اولیه به دست



شکل ۶. ماتریس نرخ نزدیکی و جدول میزان ارزش روابط کیفی.

جدول ۴. مسائل نمونه‌یی دیگر.

مسئله	کوناک و همکاران [۸]	کلتورل-کوناک و کوناک [۱۴]	وانگ و کمارودین [۱۳]	بهترین جواب GA پیشنهادی	میانگین جواب GA پیشنهادی	تعداد تکرار بهترین جواب	درصد بهبود (٪)	زمان حل (ثانیه)
VC۱۰	-	۲۰۳۲۰٫۵۲	-	۲۰۳۲۰٫۵۲	۲۰۳۲۰٫۵۲	۵	۰	۸۷
VC۱۰Rs	۲۲۸۹۹٫۶۵	۲۲۸۹۹٫۶۵	۲۲۸۹۹٫۶۵	۲۲۸۹۹٫۶۵	۲۲۸۹۹٫۶۵	۵	۰	۸۳
VC۱۰Ra	۲۱۴۶۳٫۰۷	۲۱۴۶۳٫۰۷	۲۱۴۶۳٫۰۷	۲۱۴۶۳٫۰۷	۲۱۴۶۳٫۰۷	۵	۰	۹۴
BA۱۲	۸۸۰۱٫۳۳	۸۸۰۱٫۳۳	۸۷۸۶	۸۷۸۶	۸۸۹۲٫۵۲	۳	۰	۲۱۸
BA۱۴	۵۰۰۴٫۵۵	۵۰۰۴٫۵۵	۵۰۰۴٫۵۵	۵۰۰۴٫۵۵	۵۰۳۷٫۴۷	۴	۰	۲۵۴
Nug۱۲	۲۶۵٫۵	۲۶۲٫۰۰۳	۲۶۲٫۰۰۳	۲۶۲٫۰۰۳	۲۶۲٫۰۰۳	۵	۰	۱۰۷
Nug۱۵	۵۲۶٫۷۵	۵۲۴٫۷۵	۵۳۶٫۷۵	۵۲۴٫۷۵	۵۲۴٫۷۵	۵	۰	۱۳۹

احتمال جهش =۰٫۲، احتمال تقاطع =۰٫۸، جمعیت اولیه =۴۰، شرط خاتمه =۵۰۰.

جدول ۵. بهترین جواب‌های مسائل.

مسئله	بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی
VC۱۰	۱|۲،۶|۹|۱۰،۷|۸،۴|۵،۳
VC۱۰Rs	۳،۵|۹،۱۰،۸|۲،۴|۶،۷|۱
VC۱۰Ra	۳،۵،۸،۱۰|۹،۴،۷|۲،۶|۱
BA۱۲	۴|۱۰،۵،۹|۱۱،۸،۱۲|۳،۲،۱|۶،۷
BA۱۴	۷،۸،۱۴|۴|۲|۹،۶،۱۲،۱۳|۳|۱|۱۱،۵،۱۰
Nug۱۲	۳،۲،۱۰،۶،۱،۵|۱۲،۹،۱۱،۷،۸،۴
Nug۱۵	۱،۴،۳،۲،۱۴،۱۳،۷،۸،۹،۱۱|۱۰،۱۵،۶،۵،۱۲

جدول ۶. مقدار معیارها برای طرح چیدمان.

	هزینه‌ی حمل و نقل مواد	مجاورت درخواستی	فاصله درخواستی	نسبت شکل
جواب کم‌هزینه‌ی تولیدشده توسط الگوریتم ژنتیک	۵۶۷۷٫۸۳	۱۹۶٫۴۵	۷۴٫۲۴	۴٫۵۳
کاراترین چیدمان به‌دست آمده از الگوریتم DEA و 2-opt	۵۸۷۲	۷۱۲٫۶۱	۹۶٫۰۸	۶٫۲۲

آمده از الگوریتم ژنتیک، تعداد ۱۹۰ آلترناتیو چیدمان به دست می‌آید. سپس چهار معیار ذکرشده برای تمامی آلترناتیوها محاسبه، و در نهایت داده‌های به دست آمده وارد مدل DEA دومرحله‌یی پیشنهادی می‌شود. با اجرای مدل مرحله‌ی اول مقدار اپسیلون به دست می‌آید و سپس این مقدار در مدل مرحله‌ی دوم وارد و کاراترین تعویض شناسایی می‌شود. در جدول ۶ مقدار هریک از معیارهای جواب ابتدایی و کارا ارائه شده است. اطلاعات این جدول بیان‌گر آن است که در چیدمان کارا معیارهای میزان مجاورت درخواستی و میزان فاصله‌ی درخواستی بهبود چشم‌گیری داشته‌اند. البته افزایش این معیارها سبب صرف مقدار بیشتری هزینه شده است. در جدول

جدول ۷. کم هزینه‌ترین و کاراترین جواب.

	بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی	
چیدمان پایه (اولیه)	۱۷،۱۶|۱۲،۱۵،۱۱|۱۰،۹،۱۴،۱۳|۱۹،۳،۱|۴،۲،۷،۸،۵|	۱۸،۶،۲۰
چیدمان کارا (نهایی)	۱۷،۱۶|۱۲،۱،۱۱|۱۰،۹،۱۴،۱۳|۱۹،۳،۱۵|۴،۲،۷،۸،۵|	۱۸،۶،۲۰

۷ چگونگی نمایش جواب اولیه و نهایی (کارا) نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، الگوریتم تکرارپذیر 2-opt پس از یک مرحله تکرار با جابه‌جایی دپارتمان‌های ۱ و ۱۵ به چیدمان کارایی رسیده که دیگر نمی‌توان آن را بهبود داد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به این نکته که تصمیم‌گیری درمورد مسائل جانمایی از نوع تصمیمات راهبردی محسوب می‌شود، لذا بررسی مسائل چیدمانی که چندین معیار را هم‌زمان در نظر بگیرد ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به این که مهم‌ترین معیار در مسائل چیدمان «هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد» است، منطقی است که این معیار مورد توجه بیشتری قرار گیرد. بنابراین انتخاب چیدمان اولیه‌ی مبتنی بر معیار هزینه می‌تواند منجر به جواب‌های بهتری شود. بدین‌منظور یک الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن چیدمان اولیه پیشنهاد شده است. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی می‌تواند جواب‌های مسائل نمونه‌یی را به‌خوبیِ الگوریتم‌های قبلی به دست آورد و حتی در برخی موارد آن‌ها را بهبود دهد. همچنین با خطی‌کردن مدل تحلیل پوششی داده‌ها که قادر به شناسایی کاراترین DMU است، کاراترین چیدمان که علاوه بر «هزینه» معیارهای دیگری را نیز مد نظر قرار می‌دهد، تعیین می‌شود.

به‌عنوان تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که برای حل مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری که تحلیل پوششی داده‌ها را در فاز انتخاب و تابع برازش به کار می‌برند، استفاده شود. بررسی این مسائل در حالت چندمنظوره با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چندمنظوره نظیر NSGA-II،NRGA و MOPSO از دیگر تحقیقات آتی است.

پانوشت‌ها

1. facility layout problem
2. flexible bay structure
3. genetic algorithm
4. data envelopment analysis
5. multiple criteria decision making
6. mixed integer linear programming
7. degenerate solution
8. ELECTRE
9. facility relayout problem
10. decision making unit
11. analytic hierarchy process
12. Viz Factory
13. Minimax
14. Holland
15. Cook

منابع (References)

1. Shayan, E. and Chittilappilly, A. "Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure", *Int. J. of Production Research*, **42**(19), pp. 4055-4067 (2004).
2. Drira, A., Pierreval, H. and Hajri-Gabouj, S. "Facility layout problems: A survey", *Annual Reviews in Control*, **31**, pp. 255-267 (2007).
3. Tong, X. "SECOT: A sequential construction technique for facility design", Thesis (PhD), University of Pittsburgh (1991).
4. Tate, D.M. and Smith, A.E. "Unequal-area facility layout by genetic search," *IIE Transactions*, **27**(2), pp. 465-472 (1995).
5. Arapoglu, R.A., Norman, B.A. and Smith, A.E. "Locating input and output points in facilities design: A comparison of constructive, evolutionary, and exact methods", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **5**(2), pp. 192-203 (2001).
6. Kulturel-Konak, S., Norman, B.A., Coit, D.W. and Smith, A.E. "Exploiting tabu search memory in constrained problems", *INFORMS J. on Computing*, **16**(2), pp. 241-254 (2004).
7. Enea, M., Galante, G. and Panascia, E. "The facility layout problem approached using a fuzzy model and a genetic search", *J. of Int. Manufacturing*, **16**(2), pp. 303-316 (2005).
8. Konak, A., Kulturel-Konak, S., Norman, B.A. and Smith, A.E. "A new mixed integer programming formulation for facility layout design using flexible bays", *Operations Research Letters*, **34**, pp. 660-672 (2006).
9. Norman, B.A. and Smith, A.E. "A continuous approach to considering uncertainty in facility design", *Computers & Operations Research*, **33**, pp. 1760-1775 (2006).
10. Aiello, G., Enea, M. and Galante, G. "A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **22**, pp. 447-455 (2006).
11. Kulturel-Konak, S., Smith, A.E. and Norman, B.A. "Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments", *IIE Transactions*, **39**(2), pp. 747-761 (2007).
12. Alagoz, O., Norman, B.A. and Smith, A.E. "Determining aisle structures for facility designs", *IIE Transactions*, **40**(2), pp. 1019-1031 (2008).
13. Komarudin, W.K.Y. "Solving facility layout problems using flexible bay structure representation and Ant System algorithm", *Expert Systems with Applications*, **37**, pp. 5523-5527 (2010).
14. Kulturel-Konak, S. and Konak, A. "Unequal area flexible bay facility layout using ant colony optimization", *Int. J. of Production Research*, **49**(7), pp. 1877-1902 (2011).
15. Sarkis, J. "A comparative analysis of DEA as a discrete alternative multiple criteria decision tool", *European J. of Operational Research*, **123**, pp. 543-557 (2000).
16. Yang, T. and Kuo, C.A. "A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem", *European J. of Operational Research*, **147**, pp. 128-136 (2003).
17. Lovell, C.A.K. and Pastor, J.T. "Radial DEA models without inputs or without outputs", *European J. of Operational Research*, **118** pp. 46-51 (1999).
18. Ertay, T., Ruan, D. and Tuzkaya, U.R. "Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems", *Information Sciences*, **176** pp. 237-262 (2006).
19. Amin, G.R. and Toloo, M. "Finding the most efficient DMUs in DEA: An improved integrated model", *Computers Industrial Eng.* **52** pp. 71-77 (2007).
20. Holland, J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor (1975).
21. Amin, G.R. "Comments on finding the most efficient DMUs in DEA: An improved integrated model", *Computers & Industrial Eng.* **56** pp. 1701-702 (2009).
22. Cook, W.D., Kress, M. and Seiford, L.M. "Data envelopment analysis in the presence of both quantitative and qualitative factors", *J. of Operational Research Society*, **47**, pp. 945-953 (1996).
23. VanCamp, D.J., Carter, M.W. and Vanelli, A. "A nonlinear optimization approach for solving facility layout problems", *European J. of Operational Research*, **57**(2), pp. 174-189 (1992).
24. Gau, K.Y. and Meller, R.D. "An iterative facility layout algorithm", *Int. J. of Production Research*, **37**(2), pp. 3739-3758 (1999).
25. Bazaraa, M.S. "Computerized layout design: A branch and bound approach", *AIIE Transactions*, **7**(2), pp. 549-560 (1975).
26. Nugent, C.E., Vollman, T.E. and Ruml, J. "An experimental comparison of techniques for the assignment of facilities to locations", *Operations Research*, **16**(2), pp. 150-173 (1968).
27. Armour, G.C and Buffa, E.S. "A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities", *Management Science*, **9**, pp. 294-309 (1963).