

بهبود کیفیت سیستم‌های چندجزئی در فاز طراحی از طریق بهینه‌سازی چیدمان اجزاء برای ارتقاء عملکرد و تعمیرپذیری (مطالعه موردی: فاصله یاب لیزری)

مهدی مرادی گوهره

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه اراک، اراک، ایران. m-moradygohareh@araku.ac.ir

احسان منصوری*

(نویسنده مسئول) استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه اراک، اراک، ایران. e-mansouri@araku.ac.ir

مهدی کرباسیان

دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه‌ی جدید برای تعیین جانمایی اجزای سیستم‌های چندجزئی جهت بهبود کیفیت در فاز طراحی، ارائه شده است. اهداف این مدل شامل حداکثرسازی دسترس‌پذیری به اجزاء، نزدیکی دوری اجزاء با برهم‌کنش مثبت/منفی، وجود فضای خالی اطراف اجزاء جهت تعمیرپذیری بهتر و کاهش حجم هستند. مدل مذکور از نظر متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها از رویکرد جدیدی برای تعیین چیدمان استفاده می‌کند که برای اهداف فوق مناسب است. به عنوان مطالعه موردی، از این مدل برای تعیین چیدمان اجزای یک فاصله‌یاب لیزری استفاده شده است. ابتدا، در قالب تصمیم‌سازی گروهی و با استفاده از وزن‌دهی با روش بردار ویژه، مسئله به حالت تک‌هدفه تبدیل و در ادامه، مدل تک‌هدفه در لینگو کدننگاری و حل شد. نتایج نشان داد که جواب حاصل ۸۲/۷ درصد به حالت ایدئال نزدیک است و دسترس‌پذیری به عنوان مهمترین تابع هدف و الزامات فضای آزاد جهت تعمیرپذیری، ۱۰۰ درصد با حالت ایدئال منطبق هستند.

واژگان کلیدی: سیستم‌های چند جزئی، بهبود کیفیت طراحی، چیدمان، دسترس‌پذیری.

۱- مقدمه

میان حداقل چهار مورد آن یعنی عملکرد، قابلیت اطمینان، دوام و تعمیرپذیری، بر کیفیت در طراحی تأکید ویژه دارد [1]. به بیان دیگر، اگر محصول نهایی، عملکردی متناسب با انتظارات، نیاز حداقلی به تعمیر، کمترین مراجعه مشتری به بخش خدمات پس از فروش را داشته، به میزان کافی عمر کند و در صورت نیاز به خدمات پس از فروش و تعمیرات، این امور به سهولت صورت پذیرد، باید در فاز طراحی، مقدمات آن فراهم گردد و طراحان در هماهنگی با هم و با اشراف اطلاعاتی نسبت به امکانات و منابع تولید اقدام کنند و از رویه‌هایی چون طراحی پشت درهای بسته دوری گزینند. بسیاری از محصولات امروزی را می‌توان تحت عنوان سیستم چندجزئی نام‌گذاری کرد که برای آن‌ها چیدمان

در گذار از تعریف سنتی کیفیت (یعنی تناسب برای استفاده) به سمت مفهوم مدرن‌تر آن یعنی کاهش پراکندگی، تمرکز از روی کیفیت در تطابق به سمت کیفیت در طراحی و تطابق، میل پیدا کرده است. کیفیت در فاز طراحی با نگاه سنتی، به این معناست که طراحان در مراحل مختلف طراحی، ملاحظات کیفی را مدنظر قرار داده و محصولی را طراحی کرده‌اند که تولید با کیفیت آن ممکن باشد. این دیدگاه با مفهوم کاهش پراکندگی، که هسته‌ی اصلی بهبود کیفیت است، برهم‌کنش مثبت بیشتری را نشان می‌دهد. مونته‌گومری ابعاد یازده‌گانه‌ای برای کیفیت بر می‌شمرد که در این

* (Corresponding author) e-mansouri@araku.ac.ir

چیدمان، با هدف کاهش هزینه‌های جابه‌جایی مواد و انبارهای در جریان ساخت، کاهش زمان‌های تحویل، ایجاد بهبود در فضاهای موجود، سازگاری واحد صنعتی برای تغییرات آینده، فراهم نمودن محیطی امن و راحت برای کارکنان و نیز افزایش بهره‌وری، توسعه یافته‌اند [۳]. همان‌طور که یک چیدمان ضعیف ممکن است موجب افزایش هزینه‌های تولید یا کاهش رضایتمندی ذینفعان شود [۴]. یک چیدمان خوب هم می‌تواند هزینه‌های تولید را بین ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد [۳].

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، ابعاد چیدمان به صورت یک، دو یا سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. منظور از چیدمان یک بعدی، چگونگی استقرار تجهیزات در یک خط مستقیم (مانند خط مونتاژ) با هدف کاهش مجموع فاصله‌های زوجی بین اجزاست [۶] و [۷]. در چیدمان دوبعدی، تجهیزات در یک سطح و در راستای محورهای x و y استقرار می‌یابند. اما منظور از استقرار سه‌بعدی در ادبیات موضوع، در نظر گرفتن فضای سه‌بعدی ($3D$) برای استقرار تجهیزات و یا چیدمان دوبعدی در طبقات مختلف ($n-2D$) است [۲] و [۱۰]. مسائل استقرار سه‌بعدی در فضای سه‌بعدی ($3D$)، عمدتاً به صورت چیدمان تجهیزات (قطعات) با شکل‌های مختلف در یک کارگاه (محفظه) و با عنوان سیستم چندجزئی در نظر گرفته می‌شود.

یک سیستم چندجزئی، از یک محفظه و مجموعه‌ای از اجزای در ارتباط با هم تشکیل شده که دارای یکپارچگی است و بسیاری از مهندسی‌ها در هنگام طراحی، باید ملاحظات مختلفی از جمله الزامات کیفی و تعمیرپذیری را در آن مدنظر قرار دهند. بنابراین چیدمان و جانمایی اجزا در یک سیستم چندجزئی از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا از یک سو باید شکل مناسبی برای چیدمان مانند موقعیت مکانی و جهت‌دهی در نظر گرفته شود (بهینه‌سازی بسته‌بندی^۱) و از سوی دیگر لازم است ملاحظات و الزامات کل فضای چیدمان از منظر سازه‌های پشتیبانی کننده مانند انتخاب مواد مناسب برای رعایت حداکثر وزن سازه مدنظر قرار گیرد (بهینه‌سازی توپولوژی^۲) [۹].

با اینکه مطالعات مختلف و متعددی در حوزه‌ی سیستم‌های چندجزئی در ادبیات موضوع وجود دارد اما این مطالعات بیشتر در حوزه‌ی بهینه‌سازی توپولوژی توسعه یافته و از دیدگاه مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی بسته‌بندی، تلاش‌های کمتری صورت گرفته است. یکی از نخستین مطالعات در سال ۱۹۹۹ منتشر و در آن

اجزاء، یک پارامتر مهم از جنبه‌های مختلف و در ابعاد چهارگانه‌ی کیفیتی ذکر شده است. در این میان، سوال مهم این است که برای یک سیستم چند جزئی از قبیل موتور خودرو، یخچال و تلویزیون چگونه باید اجزای مختلف در کنار یکدیگر قرار گیرند تا ضمن تضمین عملکرد مدنظر، تعمیرپذیری تسهیل شود، خرابی کاهش یابد و عمر سیستم بیشینه گردد.

در بسیاری از سیستم‌های چندجزئی به علت چیدمان نامناسب اجزاء، در صورت وقوع خرابی یک جزء، تعمیر آن امری بسیار دشوار بوده و در مواردی دسترسی به جزء آسیب‌دیده برای تعمیرکاران به مثابه‌ی یک پروژه‌ی بسیار سنگین است. گاهی اوقات برخی از اجزا به علت نزدیکی بیش از حد به یکدیگر و به علت تولید گرما، لرزش و صدا باعث خرابی جزء همسایه خود می‌شوند. برخی مواقع حتی در صورت دسترسی آسان به یک جزء برای انجام خدمات تعمیر، فضای کافی در اطراف آن وجود ندارد. همچنین گاهی پیش می‌آید که به علت دوری برخی از اجزای مرتبط نسبت به هم، عملکرد کلی سیستم تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در همه‌ی این موارد سوال این است که در فاز طراحی چگونه می‌توان به مواجهه با این موارد کیفیتی پرداخت. به طور مشخص سوالی که در این پژوهش به آن پاسخ داده می‌شود این است که برای مواجهه‌ی فوق، چگونه می‌توان از طریق بهینه‌سازی چیدمان اجزاء، کیفیت محصول را افزایش داد. بنابراین مسئله پیش رو عبارت است از چیدمان مجموعه‌ای از اجزای یک سیستم چند جزئی به صورت سه‌بعدی با در نظر گرفتن ملاحظات کیفی مانند دسترس‌پذیری، تعمیرپذیری و حفظ ارتباط بین اجزای مختلف، به گونه‌ای با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر حجم سیستم، مطلوب‌ترین چیدمان برای اجزا مشخص شده تا کیفیت محصول مورد نظر در حد مطلوبی قرار گیرد.

در ادامه و در بخش ۲ به مرور ادبیات موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. مسئله تحقیق در بخش ۳ تشریح شده و در بخش ۴ مدل ریاضی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. بخش ۵ به مطالعه‌ی موردی اختصاص یافته و در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

تعیین چیدمان و جانمایی از موضوعات قدیمی و در عین حال پویا در بسیاری از علوم مهندسی است. مسئله چیدمان اجزا یکی از مسائل پیچیده در برنامه‌ریزی ریاضی محسوب می‌شود که از منظر مدل‌سازی و محاسباتی دارای پیچیدگی زیادی است [۲]. مسائل

تدوین شده و در نهایت، با کمک روش شبیه‌سازی تبرید راه‌حلی برای آن پیشنهاد شده است.

در مطالعه‌ی دیگری، ژانگ و همکاران برای چیدمان اجزای ماهواره، یک روش ترکیبی با استفاده از تکنیک‌های محاسبات نرم ارائه دادند [20]. دوتنگ و همکاران از یک رویکرد دو سطحی برای جانمایی اجزای خودرو از طریق مورفینگ شکل^{۱۱} استفاده کردند [21]. در سال ۲۰۱۴، مطالعه‌ای در زمینه‌ی بهبود تعمیرپذیری چیدمان سیستم‌های چند جزئی انجام شد [22]. در این پژوهش، رابطه‌ی بین طراحی چیدمان و تعمیرپذیری به تفصیل بیان شده که در آن سه عامل سادگی^{۱۱}، دسترس‌پذیری^{۱۲} و ارگونومی^{۱۳} به عنوان عوامل کلیدی معرفی شده‌اند. کرباسیان و همکاران یک مدل ریاضی چند هدفه برای حداکثرسازی قابلیت تعمیرپذیری در سیستم‌های چندجزئی با رویکرد طراحی ماژولار و بر مبنای تکنیک *DSM* ارائه دادند [23]. نتایج این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی به صورت همزمان بر تعمیرپذیری و طراحی چیدمان تاثیرگذار است.

مطالعه‌ی دیگری توسط چن و همکاران در خصوص طراحی چیدمان بهینه‌ی اجزای ماهواره با استفاده از روش دایره محدود^{۱۴} انجام شده است [12]. در این پژوهش از محدودیت‌های سازگاری، شکوهی و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مدل ریاضی ارائه دادند که در آن امکان چیدمان بخش‌های مختلف را به صورت سه بعدی و در طبقات مختلف فراهم می‌کرد [24]. مطالعه‌ی پس‌بسی و همکاران، یکی از پژوهش‌های اخیر در زمینه‌ی بهینه‌سازی چیدمان سه‌بعدی اجزاست [10]. یکی از مفروضات این مطالعه، ثابت بودن

یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به منظور تخصیص اجزای سیستم در فضای دوبعدی یا سه‌بعدی ارائه شد. تابع هدف این مدل، به منظور حداقل‌سازی هزینه‌ی افقی و عمودی حمل و نقل، هزینه‌ی لوله‌کشی^{۱۵}، هزینه‌ی ساخت طبقات و کل مساحت اشغال شده برای تأسیسات شیمیایی، تدوین شده و با استفاده از روش‌های دقیق، جواب‌های مدنظر به دست آمده است [16]. باربوسا و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک مدل ریاضی عددصحیح مخلوط برای چیدمان سه بعدی در سطوح مختلف ارائه دادند [17]. در این مدل ملاحظات شامل چرخش اجزا، محدودیت فاصله بین اجزا، ارتباط بین اجزا، شکل‌های منتظم و غیرمنتظم، دسترس‌پذیری و نیز امکان استقرار در طبقات مختلف مدنظر قرار گرفت. در مقاله‌ی دیگری در سال ۲۰۰۳ از روش تعادل گریز از مرکز برای چیدمان اولیه، و از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی چیدمان تعمیرپذیری و دسترس‌پذیری استفاده شده و قواعد مشخصی برای برخی از قطعات خاص در نظر گرفته شده است. مطالعه‌ی دیگری نیز در خصوص بهینه‌سازی بسته‌بندی دوبعدی با استفاده از روش دایره محدود انجام شده است که در آن هر جزء با کمک گروهی از دایره‌هایی که با یکدیگر همپوشانی ندارند نشان داده شده است [13]. دیگری در سال ۲۰۰۳ از روش تعادل گریز از مرکز برای چیدمان اولیه، و از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی چیدمان استفاده شده است [18]. گولانی و همکاران، مدلی برای چیدمان سه‌بعدی تجهیزات ساخت نیمه‌رسانا^{۱۶} ارائه دادند [19]. این مدل ریاضی با عنوان *3D-QAP*، برای حل سه زیر مسئله‌ی مختلف

جدول ۱: خلاصه‌ای از دسته بندی مسائل چیدمان در ادبیات موضوع

مرجع	شرح	نوع دسته‌بندی
[2,5]	گسسته/پیوسته/ شبکه (استقرار روی گره یا کمان)	فضای جواب
[6,7]	یک‌بعدی/ دوبعدی/ سه‌بعدی	ابعاد چیدمان
[3,8-10]	یک طبقه (SFLP)/ چند طبقه (MFLP)	تعداد طبقات
[8,11-13]	منتظم/ نامنتظم	شکل اجزا
[3,8,11,14]	ایستا/ پویا	ماهیت مسئله
[3,14,15]	برنامه‌ریزی ریاضی (LP, MIP, NLP, MINLP)، منحنی پرکننده فضا ^{۱۷} ، برش درخت ^{۱۸} ، ساختار فضای انعطاف‌پذیر ^{۱۹} ، تقسیم فضا ^{۲۰} ، دنباله - جفت ^{۲۱}	مدل‌سازی
[3,14]	مکان‌یابی، چیدمان بخش‌ها، چیدمان اجزای سیستم (بسته‌بندی/ توپولوژی)	کاربرد
[2,3,14]	اقلیدسی، پله‌ای، LP-Norm	فاصله
[3,8,15]	دقیق، ابتکاری، فرآبتکاری، شبیه‌سازی، هوش مصنوعی (فازی، شبکه عصبی)	روش حل مدل
[3,8,14]	قطعی/ غیرقطعی (تصادفی، فازی)	ماهیت اطلاعات

۳- توصیف مسئله

با توجه محتوای جدول ۱، پژوهش حاضر از منظر کاربرد، یک مسئله چیدمان اجزا با رویکرد بهینه‌سازی بسته‌بندی و به صورت سه‌بعدی است که شکل اجزا در آن منتظم بوده و بر مبنای اطلاعات قطعی و ایستا شکل گرفته است. مدل‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی با ترکیبی از متغیرهای غیرخطی، عددصحیح و پیوسته و به صورت چندهدفه انجام شده و فاصله‌ی اجزا به صورت پله‌ای در نظر گرفته شده و از یک روش دقیق، برای تعیین جواب بهینه استفاده شده است. فرض می‌شود که یک جعبه با ابعاد مشخص مدنظر باشد. هدف، جانمایی تعدادی قطعه با ابعاد معلوم درون این جعبه به صورت سه‌بعدی است به طوری که در آن چهار تابع هدف ناظر بر کیفیت بهینه و تعدادی محدودیت سخت و نرم رعایت شوند. حداکثر کردن دسترس‌پذیری کل، اولین شاخص کیفیتی در مدل است. فرض کنید در شکل ۱ برای جعبه‌ی بزرگ از وجه فوقانی $(+X\gamma)$ یک درب تعبیه شده باشد. به این ترتیب اگر نیاز به دسترسی به یک قطعه برای تعمیر یا بازرسی باشد، تنها می‌توان از این وجه به آن قطعه دست یافت. اکنون اگر قرار باشد تعمیرکار به قطعه‌ی ۱ دسترسی پیدا کند واضح است که دو قطعه‌ی ۲ و ۳ مسیر دسترسی به آن را سد کرده‌اند. بنابراین شاخص کیفیتی دسترس‌پذیری قطعه‌ی ۱ برابر با دو است.

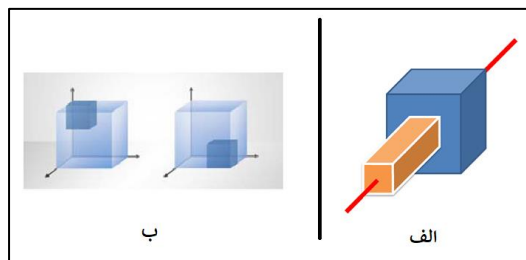
اگر علاوه بر وجه فوقانی، وجه پیش‌رو $(-X\alpha)$ نیز دارای درب باشد، دسترس‌پذیری قطعه‌ی ۱، به یک کاهش خواهد یافت زیرا دسترس‌پذیری به صورت حداقل تعداد قطعات سدکننده از طریق تمامی وجوه مجاز (درب دار) تعریف می‌شود. اگر مجموع دسترس‌پذیری تمامی قطعات محاسبه شود، دسترس‌پذیری کل به دست می‌آید که به عنوان یک شاخص برای حداقل‌سازی در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است. هر چند که دسترس‌پذیری باید حداکثر شود اما از نظر ریاضی تابع هدف دسترس‌پذیری کل از نوع حداکثرسازی نیست.

سطح مقطع (طول و عرض) تمامی تجهیزات در چیدمان است که کاربرد این مدل را محدود می‌کند. رویکرد مدل‌سازی در این مطالعه به گونه‌ای است که هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌های جابه‌جایی مواد بین تجهیزات (ماشین‌ها) خواهد بود. عالمی پروین و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ یک مدل ریاضی جدید برای مسائل چیدمان در فضای نابرابر پویای تصادفی^{۱۵} ارائه دادند تا به کمک آن مجموع هزینه‌های جابه‌جایی مواد و مجموع کل هزینه‌های حمل و نقل را حداقل نمایند [25]. برای حل این مدل از الگوریتم الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد که نتایج به دست آمده بیانگر کارایی و اثربخشی بسیار زیاد الگوریتم پیشنهادی بود.

در یک سیستم چندجزئی، چیدمان به صورت سه بعدی^{۱۶} بوده و موضوعاتی مانند دسترس‌پذیری و تعمیرپذیری از اهمیت زیادی برخوردار است که در نظر گرفتن آنها در چیدمان لازم به نظر می‌رسد. از طرفی مسائل سه بعدی با انجام تغییراتی قابلیت تبدیل به مسئله چند طبقه^{۱۷} را دارند که از آن می‌توان برای چیدمان بخش‌ها و حتی تجهیزات نیز استفاده نمود.

همچنین استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین چیدمان به جهت امکان مدل‌سازی طیف وسیعی از شرایط و ویژگی‌ها، در میان محققین بسیار پرطرفدار است. استفاده از برنامه‌ریزی عددصحیح^{۱۸} کمتر مورد اقبال بوده است زیرا بسیاری از مسائل دنیای واقعی خارج از این محدوده هستند [26-28]. از آنجایی که استفاده از مدل‌های عددصحیح مخلوط^{۱۹} ابزارهای بیشتری برای مدل‌سازی شرایط دنیای واقعی در اختیار قرار می‌دهد لذا مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [29-31]. اما برخی از ویژگی‌های دنیای واقعی، از قبیل توابع هدف این تحقیق، تنها از طریق ترکیبی از متغیرهای غیرخطی، عدد صحیح و پیوسته قابل مدل‌سازی هستند (MINLP). به علت پیچیدگی ذاتی و مشکلاتی که در حل این گونه مسائل مطرح است محققین کمتر به آنها پرداخته‌اند و بیشتر سعی کرده‌اند تا با نوعی تقریب از مدل‌های عددصحیح و عددصحیح مخلوط استفاده کنند. با این حال، استفاده از مدل‌های MINLP با توجه به افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها و تنوع ایجاد شده در ابزارها و روش‌های حل اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [32-35].

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که مطالعات بسیار محدودی در زمینه چیدمان سیستم‌های چندجزئی در حالت سه‌بعدی انجام شده است. از سوی دیگر با توجه به اهمیت بهبود کیفیت و نیز ارتقای عملکرد و تعمیرپذیری در سیستم‌های چندجزئی، مطالعه‌ای که به صورت همزمان این عوامل را در چیدمان اجزاء در نظر بگیرد انجام نشده است.

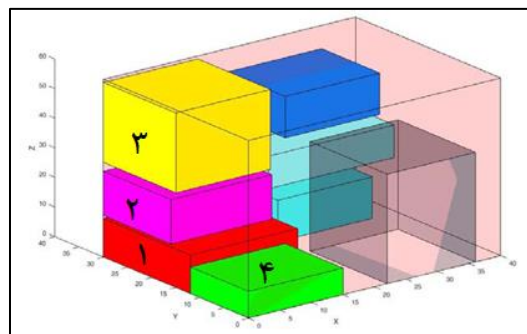


شکل ۳: نمایش الزام هم محوری برای دو قطعه و هم‌جواری قطعات با وجوه خارجی

برای بعضی از قطعات، این امکان وجود دارد که در صورت نیاز به تنظیم یا تعمیر، آنها را از جعبه خارج کرده و عملیات مورد نیاز را انجام داد. اما بعضی دیگر از اجزا باید بدون جدا شدن از کل مجموعه، تعمیر یا تنظیم شوند. در این صورت، باید فضای خالی کافی برای انجام عملیات در نظر گرفته شود. چنانچه این فضا نقض شود به معنی کاهش کیفیت است و جریمه‌ای متناسب در تابع هدف اعمال می‌شود که شاخص سوم کیفیتی مورد مطالعه در این پژوهش است. هر چند که معمولاً از طرف طراحان ابعاد تقریبی برای کل سیستم (جعبه) تعیین می‌شود، اما از نظر عملیاتی مناسب خواهد بود که این ابعاد به عنوان یک حد بالا در نظر گرفته شود و سعی بر این باشد که تا جای ممکن جعبه کوچکتر باشد. در حالت کلی حجیم شدن سیستم به معنی یک نقص کیفیتی است که تبعات منفی زیادی را به دنبال دارد. بدین منظور، تابع شاخص کیفیتی چهارم به حداقل‌سازی حجم سیستم است که غیرخطی می‌باشد.

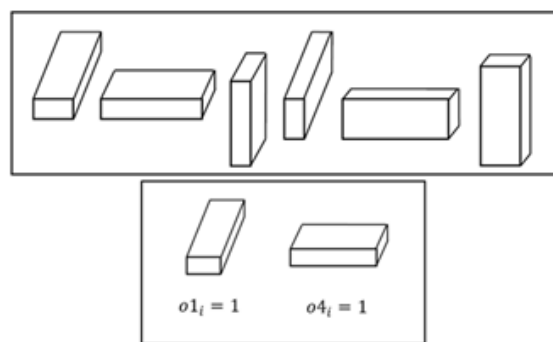
۴- تشریح مدل

- در مدل ریاضی این پژوهش، مجموعه‌های زیر تعریف شده‌اند:
- P : مجموعه‌ی کل قطعات که باید چیدمان بهینه‌ی آنها درون جعبه تعیین شود
 - IO : مجموعه‌ی قطعاتی که باید جهت‌دهی اولیه برای آنها حفظ شود
 - A_x, A_y, A_z : مجموعه‌ی زوج قطعاتی که باید در راستای محور x ، y و z هم‌محور باشند
 - B_x, B_y, B_z : مجموعه‌ی قطعاتی که باید با حفظ جهت‌دهی اولیه به وجه انتهایی xy ، xz و yz ختم شوند
 - Tlx, Tly, Tlz : حداکثر طول، عرض و ارتفاع جعبه



شکل ۱: نمونه‌ای از جانمایی ۸ قطعه درون یک جعبه

در هر مسئله‌ی تعیین چیدمان، ممکن است در مورد برخی از قطعات خاص محدودیت‌های خاصی از نظر جهت‌دهی^{۲۰} مطرح باشد اما اغلب قطعات چنین محدودیتی ندارند و بهتر است از هر جهتی که مناسب‌تر باشد در جعبه قرار داده شوند. مطابق شکل ۲، برای هر قطعه، شش جهت‌دهی مختلف قابل تصور است که بهترین جهت‌دهی با حل مدل ریاضی به دست خواهد آمد.



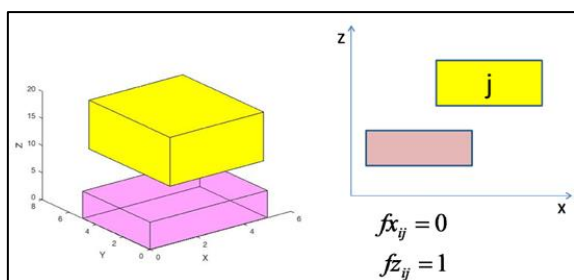
شکل ۲: شش جهت‌دهی ممکن برای یک قطعه‌ی فرضی

در چیدمان اجزایی نظیر عدسی‌ها، آینه‌ها و برخی اجزای دوار معمولاً الزام هم‌محور بودن مطرح است (شکل ۳-الف). طبیعی است که در صورت وجود این الزام، جهت‌دهی اولیه باید حفظ شود. همچنین، اجزایی از قبیل عدسی‌هایی و خنک‌کننده‌ها برای کارکرد صحیح باید با محیط خارج ارتباط داشته باشند (شکل ۳-ب).

در بعضی مواقع اگر دو قطعه از هم بسیار دور یا بسیار نزدیک باشند تبعاتی از نظر عملکرد به وجود می‌آید. برای این منظور فاصله‌ی این زوج قطعات باید در محدوده‌ی خاصی باشد و در صورت تخطی از این محدوده، جریمه‌ای برای مجموع زوج قطعات در قالب تابع هدف در مدل وارد می‌شود که در واقع شاخص کیفیتی ناظر بر عملکرد کل سامانه است. در نتیجه، دومین تابع هدف مدل ریاضی این پژوهش مربوط به الزامات فاصله بین برخی زوج قطعات است.

از جهت‌دهی استفاده می‌شود. برای نمایش حجم جعبه از متغیرهای تصمیم xl, yl و zl استفاده می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده طول جعبه در راستای محور x, y و z بعد از جانمایی هستند.

از مهمترین بخش‌های هر مدل تعیین جانمایی سه‌بعدی، محدودیت‌هایی هستند که تضمین می‌کنند قطعات پس از جانمایی با هم تداخل ندارند و فضای مشترکی را اشغال نمی‌کنند. لذا شش متغیر تصمیم صفر-یک $fx_{ij}, fy_{ij}, fz_{ij}, xi_{ij}, yi_{ij}$ و z_{ij} برای فراهم آوردن امکان مدل‌سازی محدودیت‌های ذکر شده و نیز محاسبه‌ی دسترس‌پذیری کل تعریف شده‌اند. به عنوان مثال متغیر fx_{ij} در صورتی مقدار یک خواهد داشت که قطعه‌ی j در راستای محور x و بعد از قطعه‌ی i و کاملاً جدا از آن قرار گیرد. همچنین x_{ij} زمانی مقدار ۱ خواهد داشت که در راستای محور x قطعه‌ی j منفک از قطعه‌ی i بوده ($fx_{ij} = 1$) و در راستای y و z تداخل داشته باشد.



شکل ۴: نمایش سه بعدی ارتباط منفک بودن و تداخل قطعات با متغیرهای تصمیم

در شکل ۴ مشخص است که قطعات i و j در راستای محور z کاملاً از هم جدا و در راستای x و y متداخل هستند. به همین دلیل $z_{ij} = 1$ و $fz_{ij} = 1$ همچنین با توجه به تعریف، معلوم است که $z_{ji} = fx_{ij} = fx_{ji} = fy_{ij} = fy_{ji} = fz_{ji} = 0$ لازم به ذکر است اگر $z_{ij} = 1$ باشد به این مفهوم است که چنانچه یک درب در وجه فوقانی $(+xy)$ جعبه باشد، قطعه‌ی j راه دسترسی به قطعه‌ی i را از آن درب سد کرده است و اگر یک درب در وجه تحتانی جعبه $(-xy)$ باشد، قطعه‌ی i دسترسی به قطعه‌ی j را از آن درب سد کرده است. برای وضوح بهتر مدل، سه متغیر تصمیم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- $pdist_{ij}$: فاصله‌ی بین قطعات i و j
- pdr_{ij} : شاخص الزامات فاصله‌ای جفتی بین قطعات i و j
- mdr_i : شاخص الزامات فاصله‌ای تعمیرپذیری مربوط به قطعه‌ی i

- lz_i و ly_i, lx_i : ابعاد هر یک از قطعات (اجزا) - طول، عرض و ارتفاع
 - min_pdr_{ij} و max_pdr_{ij} : الزام حداقلی و حداکثری فاصله بین قطعه‌ی i و j
 - $w_min_dist_{ij}$ و $w_max_dist_{ij}$: وزن (اهمیت) الزام حداقلی و حداکثری فاصله بین قطعه‌ی i و j
- متناظر با تابع هدف دوم که تخطی از الزامات فواصل جفتی است، اگر فاصله‌ی دو قطعه‌ی i و j از مقدار min_pdr_{ij} بیشتر یا از max_pdr_{ij} کمتر شود، به ازای هر واحد از این تخطی، به ترتیب جریمه‌ای معادل $w_min_dist_{ij}$ یا $w_max_dist_{ij}$ در تابع هدف منظور می‌شود. اگر برای زوج قطعه‌ای الزام رعایت فاصله وجود نداشته باشد، مقدار min_pdr_{ij} برابر صفر و مقدار max_pdr_{ij} برابر بینهایت منظور خواهد شد. فواصل در این پژوهش به صورت منتهن یا پله‌ای در نظر گرفته شده است. علاوه بر شاخص کیفیتی الزامات فواصل و متناظر با هر قطعه $(Vi \in P)$ ، پارامترهایی برای شاخص الزامات تعمیرپذیری نیز لازم است:

- n_dri : الزام فاصله نگهداری و تعمیرات اطراف قطعه‌ی i
 - n_frqi : فراوانی اقدامات نگهداری و تعمیرات قطعه‌ی i
- مطابق این الزامات باید از سه جهت اصلی x, y و z برای قطعه‌ی i به اندازه n_dri فضای خالی در نظر گرفته شود و هیچ قطعه‌ی دیگری در این محدوده مستقر نشود. در صورت نقض، به ازای هر واحد فاصله‌ی نقض شده جریمه‌ای به اندازه‌ی n_frqi در تابع هدف منظور خواهد شد. برای قطعاتی که چنین الزامی در مورد آن‌ها وجود ندارد، مقدار n_frqi برابر صفر منظور می‌شود.
- متغیرهای تصمیم اصلی در مدل پیشنهادی SX_i, SY_i و SZ_i هستند که نشان‌دهنده‌ی مختصات شروع قطعه i بر روی محورهای x, y و z می‌باشند. علاوه بر متغیرهای تصمیم اصلی، از متغیرهای کمکی ex_i, ey_i و ez_i برای نمایش مختصات پایان قطعات استفاده می‌شود. برای تعیین جهت‌دهی هر قطعه، شش متغیر تصمیم ناسازگار صفر-یک به صورت $01_i, 02_i, 03_i, 04_i, 05_i$ و 06_i تعریف می‌شود. مثلاً اگر 04_i برابر یک شود، قطعه‌ی i به صورتی می‌چرخد که بُعد X و Y و جابجا شوند. این شرایط در شکل ۲ نمایش داده شده است.

با توجه به تغییر جهت‌دهی هر قطعه، طول، عرض و ارتفاع آن با آنچه به عنوان ورودی از ابتدا به مدل داده می‌شود (lx_i, ly_i, lz_i) متفاوت خواهد بود. در نتیجه از متغیرهای تصمیم olx_i, oly_i و olz_i برای نشان دادن طول، عرض و ارتفاع قطعات بعد

$$xl = \max_{i \in P} (ex_i) \quad \forall i \in P \quad (12)$$

$$yl = \max_{i \in P} (ey_i) \quad \forall i \in P \quad (13)$$

$$zl = \max_{i \in P} (ez_i) \quad \forall i \in P \quad (14)$$

$$xl \leq Tlx \quad (15)$$

$$xl \leq Tlx \quad (16)$$

$$zl \leq Tlz \quad (17)$$

$$pdist_{ij} = \left| sx_i + \frac{1}{2}olx_i - sx_j - \frac{1}{2}olx_j \right| + \left| sy_i + \frac{1}{2}oly_i - sy_j - \frac{1}{2}oly_j \right| + \left| sz_i + \frac{1}{2}olz_i - sz_j - \frac{1}{2}olz_j \right| \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (18)$$

$$pdr_{ij} = \begin{cases} w_min_dist_{ij} \left(\min_{pdr} \quad ij - pdist_{ij} \right) & \text{if } pdist_{ij} < \min_pdr_{ij} \\ w_max_dist_{ij} \left(pdist_{ij} \max_{pdr} \quad ij \right) & \text{if } pdist_{ij} > \max_pdr_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in P \quad \& j > i \quad (19)$$

$$mdr_i = \begin{cases} n_{frq_i} \left(n_{dr_i} - \min_{j \in P} (pdist_{ij}) \right) & \text{if } n_{dr_i} > \min_{j \in P} (pdist_{ij}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in P \quad (20)$$

$$ex_i \leq sx_j + M(1 - fx_{ij}) \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (21)$$

$$\frac{1}{M} + sx_j \leq ex_i + Mfx_{ij} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (22)$$

$$ey_i \leq sy_j + M(1 - fy_{ij}) \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (23)$$

$$\frac{1}{M} + sy_j \leq ey_i + Mfy_{ij} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (24)$$

$$ez_i \leq sz_j + M(1 - fz_{ij}) \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (25)$$

$$\frac{1}{M} + sz_j \leq ez_i + Mfz_{ij} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (26)$$

$$fx_{ij} + fx_{ji} + fy_{ij} + fy_{ji} + fz_{ij} + fz_{ji} \geq 1 \quad \forall i, j \in P \quad \& i > j \quad (27)$$

$$x_{ij} \geq fx_{ij} - fy_{ij} - fy_{ji} - fz_{ij} - fz_{ji} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (28)$$

$$y_{ij} \geq fy_{ij} - fx_{ij} - fx_{ji} - fz_{ij} - fz_{ji} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (29)$$

$$z_{ij} \geq fz_{ij} - fx_{ij} - fx_{ji} - fy_{ij} - fy_{ji} \quad \forall i, j \in P \quad \& i \neq j \quad (30)$$

$$ex_i = xl \quad \forall i \in B_x \quad (31)$$

در مدل ریاضی این پژوهش، چهار تابع هدف مد نظر هستند. QI_1 (شاخص کیفیتی ۱) برای در نظر گرفتن دسترس پذیری کل، QI_2 الزامات فواصل جفتی کل، QI_3 برای در نظر گرفتن الزامات فواصل تعمیرپذیری و QI_4 نیز برای محاسبه‌ی حجم سیستم نهایی پس از چیدمان تعیین شده‌اند. اگر در راستای x + وجه yz (+) قطعه‌ی i مسیر دسترسی به قطعه‌ی i را سد کرده باشد $x_{ij} = 1$ در نتیجه $\sum_{j \in P, j \neq i} x_{ij}$ تعداد قطعاتی است که مسیر دسترسی به قطعه‌ی i را از درب فرضی وجه yz + سد کرده‌اند. با همین استدلال می‌توان $\sum_{j \in P, j \neq i} x_{ji}$ ، $\sum_{j \in P, j \neq i} y_{ji}$ و $\sum_{j \in P, j \neq i} z_{ji}$ را برای وجه دیگر حساب کرد. لازم به ذکر است که نیازی به طرح رابطه‌ی $\sum_{j \in P, j \neq i} z_{ji}$ وجود ندارد زیرا فرض بر این است که از جهت کف جعبه $(-xy)$ دربی تعبیه نمی‌شود. بر این اساس توابع هدف مدل پیشنهادی در روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) قابل مشاهده است.

$$\text{Minimize } QI_1 = \sum_{i \in P} \min \left(\sum_{j \in P, j \neq i} x_{ij}, \sum_{j \in P, j \neq i} x_{ji}, \sum_{j \in P, j \neq i} y_{ij}, \sum_{j \in P, j \neq i} y_{ji}, \sum_{j \in P, j \neq i} z_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\text{Minimize } QI_2 = \sum_{i \in P} \sum_{j > i} pdr_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Minimize } QI_3 = \sum_{i \in P} mdr_i \quad (3)$$

$$\text{Minimize } QI_4 = xl \times yl \times zl \quad (4)$$

$$o1_i + o2_i + o3_i + o4_i + o5_i + o6_i = 1 \quad \forall i \in P \quad (5)$$

$$olx_i = o1_i l x_i + o2_i l x_i + o3_i l z_i + o4_i l y_i + o5_i l y_i + o6_i l z_i \quad \forall i \in P \quad (6)$$

$$oly_i = o1_i l y_i + o2_i l z_i + o3_i l x_i + o4_i l x_i + o5_i l z_i + o6_i l y_i \quad \forall i \in P \quad (7)$$

$$olz_i = o1_i l z_i + o2_i l y_i + o3_i l y_i + o4_i l z_i + o5_i l x_i + o6_i l x_i \quad \forall i \in P \quad (8)$$

$$ex_i = sx_i + olx_i \quad \forall i \in P \quad (9)$$

$$ey_i = sy_i + oly_i \quad \forall i \in P \quad (10)$$

$$ez_i = sz_i + olz_i \quad \forall i \in P \quad (11)$$

جریمه‌ی ناشی از رعایت نشدن حریم فضای معمیراتی اطراف قطعه‌ی i را نشان می‌دهد.

از مهمترین جنبه‌های مسئله، نحوه‌ی مدل‌سازی صحیح متغیر از $fx_{ij}, fy_{ij}, fz_{ij}$ و برقراری ارتباط درست بین این سه متغیر و متغیرهای تصمیم‌جانی است. ابتدا محدودیت‌ها متناظر برای جهت x در روابط (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده و در روابط (۲۳) الی (۲۶) به سادگی در جهت‌های y و z توسعه داده شده‌اند. به منظور اطمینان از اینکه قطعات فضای مشترکی را اشغال نکرده و تداخل ندارند، برای هر زوج قطعه‌ی متمایز i و j حداقل یکی از شش حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر قطعه‌ی i در راستای x کاملاً منفک و جلوتر از قطعه‌ی j باشد $(fx_{ji} = 1)$ و اگر بر عکس باشد $(fx_{ij} = 1)$ خواهد بود. همان‌طور که در رابطه‌ی (۲۷) مشاهده می‌شود به دلیل وجود تقارن بین i و j عبارت $i > j$ باعث جلوگیری از نوشتن محدودیت‌های تکراری می‌شود. این رابطه تضمین عدم اشغال فضای فیزیکی مشابه را ایجاد می‌کند. ارتباط بین متغیرهای تعیین‌دسترس‌پذیری (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) و متغیرهای تصمیم $fx_{ij}, fy_{ij}, fz_{ij}$ نیز در رابطه‌های (۲۸) الی (۳۰) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگر $x_{ij} = 1$ باشد لازم است $fx_{ij} = 1$ و $fy_{ji} = fz_{ji} = fz_{ij} = 0$ باشد. برای قطعاتی که لازم است در مجاورت وجوه خارجی جعبه باشند محدودیت‌های (۳۱) الی (۳۳) در نظر گرفته شده است. الزام هم‌محوری از طریق محدودیت‌های (۳۴) الی (۳۶) تضمین شده است. محدودیت (۳۷) نیز ایجاب می‌کند که اگر دو قطعه‌ی i و j الزام هم‌محوری دارند نباید جهت‌دهی اولیه‌ی آنها تغییر کند. رابطه‌ی (۳۸) برای تضمین جهت‌دهی اولیه برای اعضای IO است. روابط (۳۹) الی (۴۸) دامنه‌ی متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که مدل ریاضی این پژوهش شامل متغیرهای تصمیم پیوسته‌ی محدود، پیوسته‌ی نامحدود و صفر-یک است.

مسئله جانی‌سبندی از نظر سطح پیچیدگی محاسباتی به کلاس NP -Hard تعلق دارد [2,22,36]. اگر تعداد اجزایی که در جعبه قرار می‌گیرد، یعنی اندازه‌ی مجموعه‌ی P, n نامیده شود، تعداد متغیرهای مدلی که شرح داده شد برابر $6n^2 + 15n + 3$ خواهد بود. از طرف دیگر تعداد محدودیت‌ها نیز در بدترین حالت $4n^2 + 37n + 6$ خواهد شد.

$$ey_i = yl \quad \forall i \in B_y \quad (32)$$

$$ez_i = zl \quad \forall i \in B_z \quad (33)$$

$$sx_i + \frac{lx_i}{2} = sx_j + \frac{lx_j}{2} \quad \forall (i,j) \in A_x \quad (34)$$

$$sy_i + \frac{ly_i}{2} = sy_j + \frac{ly_j}{2} \quad \forall (i,j) \in A_y \quad (35)$$

$$sz_i + \frac{lz_i}{2} = sz_j + \frac{lz_j}{2} \quad \forall (i,j) \in A_z \quad (36)$$

$$o1_i + o1_j = 2 \quad \forall (i,j) \in A_x \cup A_y \cup A_z \quad (37)$$

$$o1_i = 1 \quad \forall i \in IO \quad (38)$$

$$0 \leq sx_i \leq Tlx \quad \forall i \in P \quad (39)$$

$$0 \leq sy_i \leq Tly \quad \forall i \in P \quad (40)$$

$$0 \leq sz_i \leq Tlz \quad \forall i \in P \quad (41)$$

$$0 \leq ex_i \leq Tlx \quad \forall i \in P \quad (42)$$

$$0 \leq ey_i \leq Tly \quad \forall i \in P \quad (43)$$

$$0 \leq ez_i \leq Tlz \quad \forall i \in P \quad (44)$$

$$0 \leq olx_i, oly_i, olz_i \quad \forall i \in P \quad (45)$$

$$0 \leq xl, yl, zl + o6_i lz_i \quad \forall i \in P \quad (46)$$

$$o1_i, o2_i, o3_i, o4_i, o5_i, o6_i \in \{0,1\} \quad (47)$$

$$\forall i \in P$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, fx_{ij}, fy_{ij}, fz_{ij} \in \{0,1\} \quad (48)$$

$$\forall i, j \in P$$

رابطه‌ی (۵) نشان می‌دهد که هر قطعه تنها می‌تواند یکی از جهت‌دهی‌های شش‌گانه را داشته باشد. با توجه به متغیر جهت‌دهی که برای هر قطعه برابر یک می‌شود، باید ارتباط صحیحی بین طول، عرض و ارتفاع اولیه (ورودی به مدل) و طول، عرض و ارتفاع واقعی بعد از جهت‌دهی برقرار شود (روابط (۶)، (۷) و (۸)). با معلوم بودن مقادیر طول، عرض و ارتفاع بعد از جهت‌دهی، می‌توان ارتباط بین مختصات شروع و پایان هر قطعه را مطابق روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) در نظر گرفت. روابط (۱۲) الی (۱۴) تعریف ابعاد اشغال شده‌ی جعبه را نشان می‌دهد. روابط (۱۵) الی (۱۷) ایجاب می‌کند که هیچ قطعه‌ای فراتر از ابعاد جعبه جانی‌سبندی نشود. برای تعیین فاصله‌ی مرکز به مرکز بین دو قطعه‌ی i و j از رابطه‌ی (۱۸) استفاده می‌شود. رابطه‌ی (۱۹) جریمه‌ی ناشی از نزدیک شدن بیش از حد یا دور شدن بیش از حد دو قطعه‌ی i و j نسبت به هم را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی (۲۰)

۵- مطالعه موردی: دستگاه فاصله یاب لیزری

باشند. علاوه بر این، قطعه‌ی ۱ باید با قطعه‌ی ۳ در راستای محور Y هم‌محور باشد و همین رابطه بین قطعات ۲ و ۴ نیز وجود دارد. بدیهی است که جهت‌دهی این چهار قطعه باید ثابت بماند. جهت مواجهه با توابع هدف چندگانه، از روش وزن‌دهی با استفاده از روش بردار ویژه استفاده شد [۳۷] تا مسئله به حالت تک‌هدفه تبدیل گردد. ابتدا لازم بود تا از نظر مقیاس، توابع هدف یکسان یا به‌هم‌نگار گردند زیرا برد این توابع به محدوده‌های متفاوتی تعلق دارند که مقایسه آنها را مشکل می‌کند. در این راستا، رابطه (۴۹) مورد استفاده قرار گرفت که در آن QI شاخص کیفیتی جامع، H_j حد بالای تابع هدف Z_j و W_j وزن تابع هدف Z_j است.

$$\text{Minimize } QI = \sum_{i \in P} W_j \frac{QI_j}{H_j} \quad (49)$$

با توجه به مشخص بودن ابعاد حداکثری جعبه ($30 \times 30 \times 45$)، مقدار H_4 برابر 40.500 سانتی‌متر مکعب است. برای به دست آوردن H_j به ازای $j = 2, 3, 4$ تابع هدف $Max QI_j$ در کنار محدودیت‌های (۵) تا (۴۸)، با کمک زبان برنامه‌نویسی لینگو (نسخه‌ی ۱۸) کدننگاری شد. در ادامه، اوزان توابع هدف با استفاده از نظرات (مقایسات زوجی) ۳ نفر از متخصصین اپتیکی-دفاعی و روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) [۳۸] به وسیله نرم‌افزار اکسپرت چویس^{۲۱} محاسبه شد که جزئیات مربوطه در پیوست ۱ قابل مشاهده است. مطابق نتایج، $(W_1, W_2, W_3, W_4) = (0.719, 0.149, 0.79, 0.053)$ و $(H_1, H_2, H_3) = (1.23, 5.1, 3.05)$ با توجه به معلوم شدن مقادیر H_j و W_j به ازای $j = 1, 2, 3, 4$ تابع هدف رابطه‌ی (۴۹) به همراه محدودیت‌های روابط (۵) تا (۴۸) در قالب زبان برنامه‌نویسی لینگو نسخه‌ی ۱۸ کدننگاری شد که نتیجه در پیوست ۲ قابل مشاهده است. کدننگاری مذکور برای تعیین جانمایی قطعات فاصله‌یاب لیزری حل شد که نتیجه مطابق جدول و شکل ۵، در مدت زمان ۴۷ دقیقه بر روی یک رایانه با پردازشگر *Corei5 6500*، سرعت $3.2GH$ و ۴ گیگابایت حافظه به دست آمد که با توجه به این زمان، برای این مسئله نیاز به تدوین روش فراابتکاری نبود.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، قطعات ۳ و ۴ که عدسی‌های دریافت‌گر و منبع هستند در مجاورت وجه $+XZ$ قرار گرفته‌اند. هم‌محور بودن قطعه‌ی ۲ با ۴ و ۱ با ۳ نیز در شکل ۵ و جدول ۴ منعکس شده است. مقادیر توابع هدف در جواب بهینه‌ی فوق به صورت $(QI_1, QI_2, QI_3, QI_4) = (0, 20, 0, 35055)$ است که شاخص کیفیتی کل برابر 0.11727 را به دست می‌دهد.

فاصله‌یاب لیزری، ابزاری است که از پرتو لیزر برای یافتن فاصله‌ی اشیاء بهره می‌برد. عمومی‌ترین گونه‌ی فاصله‌یاب لیزری براساس زمان پرواز هدف به وسیله‌ی فرستادن یک پالس لیزر به سوی هدف و اندازه‌گیری زمان بازگشت به فرستنده کار می‌کند. مشخصات فاصله‌یاب لیزری که چیدمان قطعات آن در این پژوهش مدنظر قرار گرفته در جدول ۲ آمده است. همچنین طبق نظر خبرگان، حداکثر حجم جعبه 40.500 سانتی‌متر مکعب تعیین شده است که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب 45 ، 30 و 30 سانتی‌متر خواهد بود. مقادیر پارامترهای حداقل و حداکثر فواصل جفتی بین قطعات نیز با توجه به نظر خبرگان در جدول ۳ آمده است و فرض شده که $\forall i, j \in P, w_{\min_dist_{ij}} = w_{\max_dist_{ij}} = 1$ باشد.

جدول ۲: مشخصات و پارامترهای قطعات فاصله‌یاب لیزری

شماره قطعه	نام قطعه	lx_i	ly_i	lz_i	n_dr_i	n_freq_i
۱	دریافت‌گر	۲۵	۱۲	۱۷	۱۵	٪۴۵
۲	منبع	۱۵	۱۵	۱۷	۱۵	٪۲۷
۳	عدسی دریافت‌گر	۱۶	۱۴	۱۵	۴.۵	٪۹
۴	عدسی منبع	۱۵	۱۲	۱۴	۱۱.۵	٪۹
۵	خنک‌کننده	۲۷	۱۸	۱۳	۴.۵	٪۶
۶	کنترل	۱۴	۱۵	۱۲	۳	٪۳

جدول ۳: مقادیر پارامترهای max_pdr_{ij} و min_pdr_{ij}

شماره قطعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	-	۰-∞	۲-۵	۰-∞	۱۵-∞	۰-∞
۲	-	-	۰-∞	۲-۵	۱۵-∞	۰-∞
۳	-	-	-	۰-∞	۰-∞	۰-∞
۴	-	-	-	-	۰-∞	۰-∞
۵	-	-	-	-	-	۰-∞
۶	-	۰-∞	۲-۵	۰-∞	۱۵-∞	۰-∞

در فاصله‌یاب لیزری الزامات هم‌محوری و هم‌جواری با وجوه خارجی برای برخی از قطعات وجود دارد. قطعه‌ی ۱ و ۳، دریافت‌کننده و تقویت‌کننده نور از محیط خارج و قطعه‌ی ۲ و ۴، منبع و ارسال‌کننده‌ی لیزر به محیط خارج هستند. بنابراین قطعات ۳ و ۴ که عدسی‌های دریافت و ارسال هستند باید در مجاورت وجه $+XZ$ قرار گیرند تا با محیط خارج ارتباط داشته

می‌آیند. به این ترتیب، این توابع در جواب بهینه‌ی حاصل از وزن‌دهی که در جدول، نمایش داده شده است، به ترتیب ۰، ۲۱ و ۳ درصد از مقدار بهینه‌ی خود فاصله گرفته‌اند. با توجه به اینکه وزن این توابع در مجموع کمتر از ۲۹ درصد می‌باشد، این انحرافات کاملاً رضایت‌بخش به نظر می‌رسد. مشابه شاخص دسترس‌پذیری، شاخص الزامات فاصله‌ای تعمیرپذیری نیز به مقدار بهینه‌ی خود رسیده که در نتیجه‌ی آن در جواب جدول، تمامی الزامات فاصله‌ای در محدوده‌ی مجاز خود بوده و هیچ دو قطعه‌ای بیش از اندازه به هم نزدیک یا از هم دور نیستند. در مورد QI_4 ، نتایج به صورت ملموسی قابل بیان است. از یک طرف حداقل حجم فوق ایدئال (مجموع حجم قطعات) برابر ۲۳۶۴۳ است که جواب جدول افزایشی در حدود ۴۸ درصد را نسبت به آن نشان می‌دهد. از سمت دیگر، حداقل حجم قابل دستیابی با توجه به شکل فیزیکی اجزا، ۳۴۰۲۰ است که در این حالت جواب بهینه‌ی جدول افزایشی کمتر از ۳ درصد را منعکس می‌کند که با توجه به وزن پایین QI_4 کاملاً رضایت‌بخش است.

شاخص کیفیتی جامع، که مطابق رابطه‌ی (۴۹) تعریف شد، عددی بین ۰ و ۱ است که در حالت ایدئال برابر صفر خواهد شد. به این ترتیب می‌توان " $1 - QI$ " درصد را به عنوان شاخص نزدیکی جواب به حالت ایدئال تعریف کرد که اگر $QI = 0$ این شاخص برابر ۱۰۰٪ می‌شود و اگر $QI = 1$ شاخص مذکور به ۰٪ تنزل می‌یابد. به این ترتیب، چیدمان قطعات دستگاه فاصله‌یاب لیزری مطابق جدول به میزان ۸۲٪ درصد به حالت ایدئال نزدیک است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

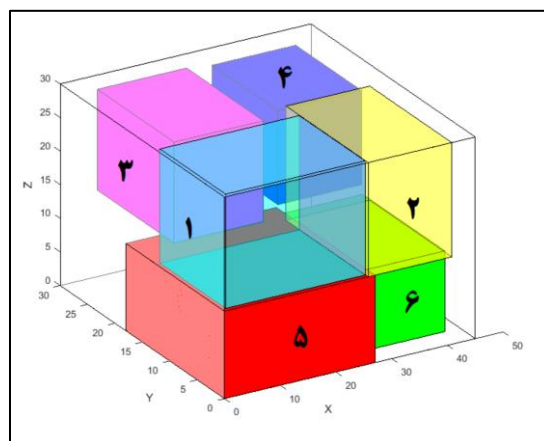
با توجه به مطالب مطرح شده و اطلاعات ارائه شده جدول ۱، پژوهش حاضر از منظر کاربرد، یک مسئله چیدمان اجزا با رویکرد بهینه‌سازی بسته‌بندی و به صورت سه‌بعدی است که شکل اجزا در آن منتظم بوده و بر مبنای اطلاعات قطعی و ایستا شکل گرفته است. مدل‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی با ترکیبی از متغیرهای غیرخطی، عددصحیح و پیوسته و به صورت چندهدفه انجام شده و فاصله‌ی اجزا به صورت پله‌ای در نظر گرفته شده و در نهایت با استفاده از یک روش دقیق، جواب بهینه به دست آمده است.

در این مقاله بحث شد اگر قرار باشد محصول نهایی، عملکردی متناسب با انتظارات، نیاز حداقلی به تعمیرات، کمترین مراجعه

جدول ۴: چیدمان بهینه‌ی اجزای فاصله‌یاب لیزری مطابق وزن‌های مستخرج از نظرات متخصصین برای توابع هدف

وزن هدف	۷۰۶۲۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶
قطعه شروع	S_x	۰/۷۰۶۲۵	۰/۵	۱۳	۲۵/۷۰۶۵۲	۱۲/۵	۳۰
	S_y	۲۵/۷۸۳۱۲	۰	۱۳	۴۰/۷۸۳۱۲	۱۵	۳۰
	S_z	۵/۲۰۶۵۲۵	۱۴/۵	۱۴	۲۱/۲۰۶۵۲	۲۸/۵	۲۹
قطعه پایان	E_x	۲۵/۷۸۳۱۲	۱۶/۵	۱۴/۵	۴۰/۷۸۳۱۲	۲۸/۵	۲۸/۵
	E_y	۰	۰	۰	۲۷	۱۸	۱۳
	E_z	۲۷	۱/۵	۱	۴۱	۱۶/۵	۱۳

در تفسیر جواب فوق، مهمترین نکته این است که از نظر متخصصین، تابع هدف اول (دسترس‌پذیری) با اختلاف نسبت به سایر توابع هدف مهم‌تر است ($W_1 = 71.9\%$). شاید به همین دلیل است که تلاش شده تا با تعبیه‌ی ۵ درب (از حداکثر ۶ درب امکان‌پذیر)، کیفیت محصول از نظر شاخص دسترس‌پذیری، حتی قبل از حل مدل و بهینه‌سازی چیدمان، در بهترین شرایط ممکن قرار گیرد. از طرف دیگر، $H_1 = 1$ نیز بیان می‌کند که با وجود ۵ درب، در بدترین چیدمان از نظر شاخص دسترس‌پذیری، تنها به یکی از اجزا دسترسی مستقیم وجود ندارد. طبیعتاً، در جواب منعکس شده در جدول، این شاخص به مقدار بهینه‌ی خود رسیده است.



شکل ۵: نمایش استقرار بهینه‌ی اجزای فاصله‌یاب لیزری مطابق اطلاعات جدول ۴

از طرف دیگر، مقادیر بهینه‌ی مطلق (ایدئال) برای سایر توابع هدف به صورت $(QI_2^*, QI_3^*, QI_4^*) = (16.5, 0, 34020)$ است که با حداقل‌سازی تابع هدف نظیر، در کنار روابط (۵) تا (۴۸) به دست

نهایی، در حد بهینه خود قرار گرفتند (انحراف صفر درصد از حالت ایدئال داشتند)،

- شاخص کیفیتی الزامات مربوط به برهم کنش‌های منفی و مثبت اجزا و شاخص حجم کلی سیستم در جواب بهینه به ترتیب ۲۱ و ۳ درصد از مقدار ایدئال خود منحرف شدند که با توجه به وزن ۲۰ درصد مجموع این دو شاخص، کاملاً رضایت‌بخش به نظر می‌رسد،
- شاخص جامع کیفیتی، $۸۲/۷$ درصد نزدیکی جواب بهینه به حالت ایدئال را نشان داد،
- با توجه به اینکه تمامی مدل‌های اجرا شده در این پژوهش در کمتر از یک ساعت منجر به یافتن جواب بهینه گردیدند، نیازی به استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری احساس نشد. هر چند در این تحقیق با صرف زمان منطقی، حصول به جواب‌های بهینه‌ی دقیق ممکن گردید، اما مدل *MINLP* این تحقیق برای مسائل بزرگتر قطعاً به روش‌های حل سریع‌تری نیاز دارد. بنابراین به منظور تحقیقات آتی، با توجه به ساختار متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های نوینی که در این تحقیق توسعه داده شدند، اعمال روش‌های فراابتکاری همسایگی محور و جمعیت‌محور بر روی مدل این تحقیق بسیار هموار است. همچنین، استفاده از روش‌های تقریبی برای برآورد شاخص‌های کیفیتی الزامات فاصله‌ای تعمیراتی و جفتی که ساختار غیرخطی دارند، می‌تواند منجر به افزایش سرعت الگوریتم حل گردد.

۷- منابع

- [1] Montgomery, D. C., 2019, *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons.
- [2] Daskin, M. S., 2011, *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, John Wiley & Sons.
- [3] Ahmadi, A., Pishvaei, M. S., and Jokar, M. R. A., 2017, "A Survey on Multi-Floor Facility Layout Problems," *Comput. Ind. Eng.*, 107, pp. 158–170.
- [4] Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., and Hajipour, V., 2013, "A Multi-Objective Facility Location Model with Batch Arrivals: Two Parameter-Tuned Meta-Heuristic Algorithms," *J. Intell. Manuf.*, 24(2), pp. 331–348.
- [5] Feng, J., and Che, A., 2018, "Novel Integer Linear Programming Models for the Facility Layout Problem with Fixed-Size Rectangular Departments," *Comput. Oper. Res.*, 95, pp. 163–171.
- [6] Anjos, M. F., and Vieira, M. V. C., 2017, "Mathematical Optimization Approaches for

مشتری به بخش خدمات، انجام سریع و با سهولت تعمیرات و عمری کافی داشته باشد، لازم است در فاز طراحی مقدمات آن فراهم گردد. از طرفی بسیاری از سیستم‌هایی که با آن‌ها سر و کار داریم به صورت یک سیستم چندجزئی بوده که در آن چیدمان اجزا از اهمیت زیادی برخوردار است. بر این اساس در فاز طراحی سیستم‌های چندجزئی، می‌توان در خصوص چگونگی جانمایی اجزای مختلف با در نظر گرفتن الزامات کیفی-تعمیرپذیری، در بهینه‌ترین حالت ممکن تصمیم‌گیری نمود. پژوهش حاضر با هدف دستیابی به حداکثر عملکرد و تعمیرپذیری، به توسعه‌ی یک مدل چندهدفه‌ی *MINLP* جدید برای تعیین چیدمان بهینه سیستم‌های چندجزئی به صورت سه‌بعدی و بر مبنای اطلاعات قطعی و ایستا پرداخته است. شیوه‌ی تعریف متغیرها و محدودیت‌های جانمایی از نوآوری‌های این تحقیق به شمار می‌آید و بستر مناسبی برای مدل‌سازی الزامات کیفیتی فراهم می‌آورد. این مدل از طریق تعیین چیدمان، بهینه‌سازی شاخص‌های کیفیتی دسترس‌پذیری، تعمیرپذیری، عملکرد و حجم را مدنظر قرار داده است. به بیان دیگر، چیدمان اجزا از طریق مدل این تحقیق به گونه‌ای تعیین می‌شود که:

- حداکثر دسترسی به اجزا از سمت مناسب قابل حصول باشد،
- اجزایی که بر روی همدیگر برهم‌کنش مثبت دارند نزدیک به هم و اجزایی که برهم‌کنش منفی و مخرب دارند دور از هم قرار گیرند،
- فضای خالی متناسب در اطراف هر جزء تعبیه شود تا تعمیرات احتمالی را در فاز بهره‌برداری تسهیل کند،
- حجم اشغالی کل سیستم جهت سهولت کاربری حداقل شود. به منظور بررسی کیفیت جواب‌های مدل پیشنهادی، مطالعه‌ی موردی تعیین اجزای یک فاصله‌یاب لیزری مد نظر قرار گرفت. برای حل مدل، ابتدا بر اساس روش وزن‌دهی از طریق روش بردار ویژه، مسئله به حالت تک‌هدفه تبدیل گردیده است. برای به دست آوردن وزن‌ها، از نظرات ۳ نفر از متخصصین حوزه‌ی اپتیکی-دفاعی برای استخراج ماتریس مقایسات زوجی در قالب تصمیم‌سازی گروهی استفاده گردیده است. نتایج حاصل از حل مدل تک‌هدفه نشان می‌دهد که:
- مطابق نظرات خبرگان، دسترس‌پذیری با وزنی بیش از ۷۱ درصد مهمترین شاخص کیفیتی در فاصله‌یاب لیزری تعیین شد،
- مقادیر شاخص کیفیتی دسترس‌پذیری و الزامات مربوط به فضای خالی تعمیراتی اطراف قطعات، در جواب بهینه‌ی

- 664–677.
- [20] Zhang, B., Teng, H.-F., and Shi, Y.-J., 2008, "Layout Optimization of Satellite Module Using Soft Computing Techniques," *Appl. Soft Comput.*, 8(1), pp. 507–521.
- [21] Dong, H., Guarneri, P., and Fadel, G., 2011, "Bi-Level Approach to Vehicle Component Layout with Shape Morphing," *J. Mech. Des.*, 133(4).
- [22] Luo, X., Yang, Y., Ge, Z., Wen, X., and Guan, F., 2014, "Layout Problem of Multi-Component Systems Arising for Improving Maintainability," *J. Cent. South Univ.*, 21(5), pp. 1833–1841.
- [23] Karbasian, M., Mohebi, B., Khayambashi, B., Berah, M. C., and MoradyGohareh, M., 2015, "Maximum Maintainability of Complex Systems via Modulation Based on DSM and Module Layout. Case Study: Laser Range Finder," *Int. J. Ind. Eng. Prod. Res.*, 26(4), pp. 269–285.
- [24] Targhi, N. S., Sabzehparvar, M., and Ebrahimzad, S., 2019, "A Mathematical Model for Robust Facility Layout Problem in 3D Space with Possibility of Floors," 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference (IIIEC), IEEE, pp. 158–164 (persian).
- [25] Alamiparvin, R., Mehdizadeh, E., and Soleimani, H., 2021, "A New Mathematical Model for Stochastic Dynamic Unequal Area Facility Layout Problems," *J. Qual. Eng. Prod. Optim.*
- [26] Suzuki, A., Fuchino, T., Muraki, M., and Hayakawa, T., 1991, "Equipment Arrangement for Batch Plants in Multi-Floor Buildings with Integer Programming," *J. Chem. Eng. Japan*, 24(6), pp. 737–742.
- [27] Kohara, D., Yamamoto, H., and Suzuki, A., 2008, "Efficient Algorithms Based on Branch and Bound Methods for Multi Floor Facility Layout Problems," *Proceedings of the 9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, Bali, Indonesia*, pp. 387–395.
- [28] Hahn, P., Smith, J. M., and Zhu, Y.-R., 2010, "The Multi-Story Space Assignment Problem," *Ann. Oper. Res.*, 179(1), pp. 77–103.
- [29] Ahmadi, A., and Jokar, M. R. A., 2016, "An Efficient Multiple-Stage Mathematical Programming Method for Advanced Single and Multi-Floor Facility Layout Problems," *Appl. Math. Model.*, 40(9–10), pp. 5605–5620.
- [30] Izadinia, N., Eshghi, K., and Salmani, M. H., 2014, "A Robust Model for Multi-Floor Layout Problem," *Comput. Ind. Eng.*, 78, pp. 127–134.
- [31] Ha, J.-K., and Lee, E. S., 2016, "Development of an Optimal Multifloor Layout Model for the Generic Liquefied Natural Gas Liquefaction Process," *Korean J. Chem. Eng.*, 33(3), pp. 755–764.
- Facility Layout Problems: The State-of-the-Art and Future Research Directions," *Eur. J. Oper. Res.*, 261(1), pp. 1–16.
- [7] Samarghandi, H., Taabayan, P., and Jahantigh, F. F., 2010, "A Particle Swarm Optimization for the Single Row Facility Layout Problem," *Comput. Ind. Eng.*, 58(4), pp. 529–534.
- [8] Drira, A., Pierreval, H., and Hajri-Gabouj, S., 2007, "Facility Layout Problems: A Survey," *Annu. Rev. Control*, 31(2), pp. 255–267.
- [9] Zhu, J., Zhang, W., and Beckers, P., 2009, "Integrated Layout Design of Multi- component System," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 78(6), pp. 631–651.
- [10] Besbes, M., Zolghadri, M., Affonso, R. C., Masmoudi, F., and Haddar, M., 2020, "3D Facility Layout Problem," *J. Intell. Manuf.*, pp. 1–26.
- [11] Do, Q. H., and Chen, J.-F., 2014, "A Hybrid Fuzzy AHP-DEA Approach for Assessing University Performance," *WSEAS Trans. Bus. Econ.*, 11(1), pp. 386–397.
- [12] Chen, X., Yao, W., Zhao, Y., Chen, X., and Zheng, X., 2018, "A Practical Satellite Layout Optimization Design Approach Based on Enhanced Finite-Circle Method," *Struct. Multidiscip. Optim.*, 58(6), pp. 2635–2653.
- [13] Zhang, W., and Zhang, Q., 2009, "Finite-Circle Method for Component Approximation and Packing Design Optimization," *Eng. Optim.*, 41(10), pp. 971–987.
- [14] Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Ghomi, S. M. T. F., and Fakhrzad, M. B., 2018, "Classification of Facility Layout Problems: A Review Study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 94(1), pp. 957–977.
- [15] Shouman, M. A., Nawara, G. M., Reyad, A. H., and El-Darandaly, K., 2001, "Facility Layout Problem (FL) and Intelligent Techniques: A Survey," 7th International Conference on Production Engineering, Design and Control, Alexandria, Egypt, February.
- [16] Georgiadis, M. C., Schilling, G., Rotstein, G. E., and Macchietto, S., 1999, "A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout," *Comput. Chem. Eng.*, 23(7), pp. 823–840.
- [17] Barbosa-Póvoa, A. P., Mateus, R., and Novais, A. Q., 2002, "Optimal 3D Layout of Industrial Facilities," *Int. J. Prod. Res.*, 40(7), pp. 1669–1698.
- [18] Sun, Z.-G., and Teng, H.-F., 2003, "Optimal Layout Design of a Satellite Module," *Eng. Optim.*, 35(5), pp. 513–529.
- [19] Golany, B., Gurevich, A., and Paz Puzailov, E., 2006, "Developing a 3D Layout for Wafer Fabrication Plants," *Prod. Plan. Control*, 17(7), pp. 755–764.

- ¹⁶ 3D Facility Layout Problem
- ¹⁷ Multi-Floor Facility Layout Problem
- ¹⁸ Integer Programming
- ¹⁹ Mixed Integer Programming
- ²⁰ orientation
- ²¹ Expert Choice

پیوست‌ها:

پیوست ۱: جزئیات ماتریس مقایسات زوجی شاخص‌های کیفیتی (توابع هدف)، مستخرج از نظرات متخصصین

جدول ۶: جزئیات ماتریس مقایسات زوجی

مقیاسات زوجی	شاخص	مقیاسات زوجی				وزن بدست آمده با استفاده از روش بردار ویژه	نرخ ناسازگاری
		Q/1	Q/2	Q/3	Q/4		
مقیاسات اول	Q/1	۱	۷	۸	۹	۰/۷۰۳	۰/۰۸
	Q/2		۱	۳	۵	۰/۱۷۵	
	Q/3			۱	۲	۰/۰۷۵	
	Q/4				۱	۰/۰۴۷	
مقیاسات دوم	Q/1	۱	۸	۹	۹	۰/۷۳۴	۰/۰۴
	Q/2		۱	۱	۳	۰/۱۱۴	
	Q/3			۱	۲	۰/۰۹۸	
	Q/4				۱	۰/۰۵۴	
مقیاسات سوم	Q/1	۱	۸	۸	۹	۰/۷۲۰	۰/۰۸
	Q/2		۱	۳	۴	۰/۱۵۹	
	Q/3			۱	۱	۰/۰۶۴	
	Q/4				۱	۰/۰۵۷	
H_j	۱	۳۳/۵	۱۳/۰۵	۴/۰۰۰			
وزن نهایی بدست آمده از طریق میانگین	۰/۷۱۹	۰/۱۴۹	۰/۰۷۹	۰/۰۵۳			

763.

[32] Che, A., Zhang, Y., and Feng, J., 2017, "Bi-Objective Optimization for Multi-Floor Facility Layout Problem with Fixed Inner Configuration and Room Adjacency Constraints," *Comput. Ind. Eng.*, 105, pp. 265–276.

[33] MoradyGohareh, M., and Mansouri, E., 2020, "A Mixed Integer Nonlinear Programming for Facility Layout Problem with Maintenance Constraints," *J. Mod. Process. Manuf. Prod.*, 9(4), pp. 27–37.

[34] Lee, C. J., 2015, "Optimal Multi-Floor Plant Layout Based on the Mathematical Programming and Particle Swarm Optimization," *Ind. Health*, 53(6), pp. 491–497.

[35] Lee, C. J., 2014, "Optimal Multi-Floor Plant Layout Based on the Mathematical Programming," *Computer Aided Chemical Engineering*, Elsevier, pp. 1477–1482.

[36] Fakoor, M., and Taghinezhad, M., 2016, "Layout and Configuration Design for a Satellite with Variable Mass Using Hybrid Optimization Method," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, 230(2), pp. 360–377.

[37] Ghodsypour, S. H., 2018, *Multiple Objective Decision Making (MODM): Methods for a Posteriori Articulation of Preference Information Given*, Amirkabir University of Technology Publication (persian).

[38] Ghodsypour, S. H., 2019, *Analytical Hierarchy Process*, Amirkabir University of Technology Publication (persian).

پانویس‌ها:

- ¹ Packing optimization
- ² Topology optimization
- ³ the cost of piping
- ⁴ Space-filling curve
- ⁵ Slicing tree
- ⁶ Flexible bay structure
- ⁷ Space portioning
- ⁸ Sequence-pair
- ⁹ Wafer fabrication plants
- ¹⁰ Shape morphing
- ¹¹ Simplicity
- ¹² Accessibility
- ¹³ Ergonomics
- ¹⁴ Finite-circle
- ¹⁵ Stochastic Dynamic Unequal Area

