

# مدل سازی ریاضی برای گروه بندی ماشین ها در سیستم های هدایت شونده ی خودکار زوجی براساس «استراتژی جریان متوازن»

رضا توکلی مقدم (دانشیار)

گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

میر بهادر قلی آریانزاد (استاد)

دانشکده ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

حامد کاظمی پور (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوند

امیر صالحی پور (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

در سیستم باربران خودکار زوجی ایستگاه های کاری به چند ناحیه ی غیر هم پوشا تقسیم، و به هر ناحیه یک باربر خودکار تخصیص می یابد. در برنامه ریزی چنین سیستمی موارد مختلفی از جمله تقسیم بندی ایستگاه های کاری، تعیین مکانی برای تأسیس ایستگاه های انتقال بین حلقه های مجاور، جهت جریان در هر حلقه، و... مطرح می شود. یکی از موارد حائز اهمیت در چنین سیستمی نحوه ی تقسیم بندی ماشین ها به گروه های غیر هم پوشا، با در نظر گرفتن جریان بین و میان حلقه ی است. در این نوشتار، با استفاده از «استراتژی جریان متوازن» یک برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح<sup>۱</sup> جدید برای گروه بندی ماشین ها در سیستم باربران خودکار زوجی، برای کمینه سازی همزمان جریان های درون حلقه ی و بین حلقه ی مبتنی بر سیستم های تولید سلولی<sup>۲</sup> و استراتژی حلقه های متوازن<sup>۳</sup> ارائه می شود. سپس با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی با کمک الگوریتم شبیه سازی تیرید<sup>۴</sup> (SA) و با استفاده از توابع جریمه روش حلی برای مدل پیشنهادی ارائه می شود. مدل ریاضی بیان شده، توسط نرم افزار Lingo 8 و الگوریتم SA پیشنهادی برای چند مسئله ی کوچک که به طور تصادفی تهیه شده اند، حل و براساس تابع هدف و زمان محاسبات با یکدیگر مقایسه می شوند. در انتها نیز با توجه به الگوریتم شبیه سازی تیرید نتایج محاسباتی برای مثال های بیشتر ارائه می شود.

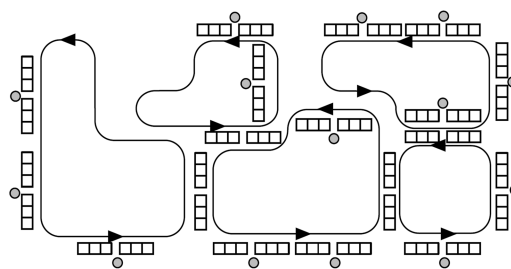
واژگان کلیدی: باربران خودکار زوجی، برنامه ریزی ریاضی، حداقل سازی جریان، سیستم تولید سلولی.

## ۱. مقدمه

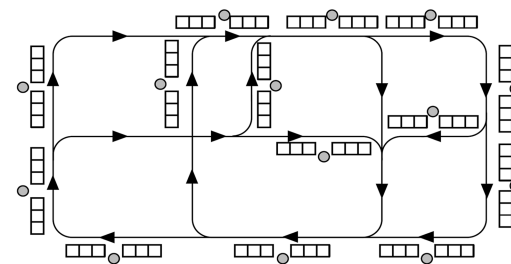
چیدمان سنتی (شکل ۲)، تلفیقی از سیستم های کوتاه ترین مسیر دوطرفه و تک حلقه ی یک طرفه ی مطرح شده در سیستم های AGV است.<sup>[۱]</sup> با توجه به تعاریف انجام شده تعداد AGV های مورد نیاز در این سیستم برابر تعداد حلقه ها است. با توجه به شکل های ۱ و ۲، در سیستم های زوجی نکات گوناگونی مطرح می شود که در این نوشتار یکی از این نکات با عنوان «نحوه ی گروه بندی ماشین ها» مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از جمله مزایایی که برای سیستم باربران خودکار زوجی مطرح شده است می توان به موارد زیر اشاره کرد:<sup>[۲]</sup>

- ساده سازی کنترل در هر حلقه به دلیل استفاده از یک AGV در هر حلقه؛
- حذف تداخل ها و مشکلات ترافیکی؛
- تعیین مکان بهینه ی تسهیلات برای هر ایستگاه کاری؛

مزایای چیدمان های حلقه ی در ساده سازی، کارایی بالا، کمترین هزینه های ضروری، و انعطاف پذیری در تولید نخستین بار توسط آفن تاکیس مورد مطالعه قرار گرفت.<sup>[۱]</sup> مسئله ی مطرح شده بعد از وی توسط بسیاری از دانشمندان مورد ملاحظه قرار گرفت و باعث شد که مفهوم چیدمان زوجی در مورد سیستم های هدایت شونده ی خودکار (AGV) مطرح شود. «سیستم باربران خودکار زوجی»<sup>۵</sup> نخستین بار توسط بزر و سرینوآسان مطرح شده<sup>[۳]</sup>، و بیشتر تحقیقات در این زمینه به آن ها ارجاع داده می شود. چیدمان زوجی مبتنی بر تقسیم ایستگاه های کاری به چند ناحیه ی بسته ی (حلقه) غیر هم پوشا است که در هر حلقه یک سیستم AGV برای انتقالات درون ناحیه یی به آن تخصیص داده شده است. همچنین مکان هایی میان حلقه های مجاور برای تبادل قطعات تولیدی تعیین می شوند که در این مکان ها تبادل دوطرفه مکرراً امکان پذیر خواهد بود. چنان که از تعریف برمی آید چیدمان زوجی (شکل ۱) برخلاف



شکل ۱. چیدمان زوجی [۲]



شکل ۲. چیدمان سنتی [۱]

الگوریتم پیشنهادی‌شان را در مقابل الگوریتم‌های دیگر مورد بررسی قرار دادند. در ادامه، شالابی و همکاران در ادامه یک الگوریتم دو مرحله‌ی برای گروه‌بندی ماشین‌ها در سیستم AGV ارائه دادند. [۱۳] در مرحله‌ی اول تولید حلقه و ارزیابی آن، و در مرحله دوم حل دقیق مدل ریاضی به منظور انتخاب حلقه‌ها گنج‌آید شده است. الگوریتم پیشنهادی شامل سه هدف کلی است: کمینه‌سازی کل هزینه‌ی حمل‌ونقل، کمینه‌سازی حداکثر بار کاری سیستم، و کمینه‌سازی تعداد سفرهای میان‌حلقوی. لیبو فقط از یک چارچوب تحلیلی به منظور تولید شکل تقسیم شده در سیستم AGV و تعیین مکان ایستگاه‌های ترانزیتی میان سلولی استفاده کرد. [۱۴]

لاپورته با استفاده از روش فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع<sup>۶</sup>، الگوریتمی را برای طراحی سیستم AGV ارائه کرد. [۱۴] برای این منظور، وی ابتدا با استفاده از روش‌های موجود یک پاسخ اولیه برای چیدمان زوجی تولید کرد، و سپس با هدف کمینه‌سازی بیشترین بار کاری و با استفاده از الگوریتم TS جواب‌هایی با کیفیت بالا برای مسئله‌ی چیدمان زوجی به دست آورد. پاسخ‌هایی که فراهانی و همکارانش در این خصوص -- با استفاده از الگوریتم ترکیبی GA-TS -- به دست آورد بهتر بود. [۱۵] عرب و همکاران در بخش اول یک نوشتار دوقسمتی، با استفاده از الگوریتم TS به عنوان روش جست‌وجوی همسایگی روشی برای تعیین طراحی بهینه در سیستم‌های تک‌حلقه‌ی ارائه کردند. [۱۶] در بخش دوم نیز با استفاده از تقسیم‌بندی سلسله‌مراتبی و ضریب تشابه<sup>۷</sup> روشی برای تقسیم‌بندی بخش‌های کاری در سیستم‌های AGV مطرح کردند. تحقیقات در مورد سیستم‌های AGV در زمینه‌هایی نظیر تعیین مکان ایستگاه‌های ترانزیتی نیز انجام شده است. به طور مثال، هانگ الگوریتمی برای یافتن یک نقطه‌ی بهینه‌ی انتقال در هر ناحیه معرفی کرد. [۱۷] وی فرض کرد که در چیدمان ماشین‌های موجود در هر حلقه، چیدمان حلقه‌ها در کنار هم معلوم و جریان در حلقه‌ها در یک جهت باشد. سپس با استفاده از فرضیات و ماتریس جریان میان ماشین‌ها به حل ریاضی برای یافتن یک نقطه‌ی بهینه‌ی انتقال بار میان حلقه‌ها پرداخت و با استفاده از آن یک الگوریتم ریاضی برای یافتن ایستگاه ترانزیتی در هر حلقه با کم‌ترین هزینه برای انتقال ارائه کرد. اولین نوآوری نوشتار حاضر را می‌توان در استفاده از راهکار ایجاد جریان متوازن میان حلقه‌ها (که به شکل‌گیری حلقه‌هایی با جریان مواد بسیار نزدیک می‌انجامد) و ارائه‌ی مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح به منظور تخصیص ماشین‌ها به حلقه‌ها نام برد. نوآوری دوم این نوشتار استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید در حل مدل ریاضی، و دست‌یابی به جواب‌های با کیفیت بالا است که بسیار نزدیک به جواب‌های بهینه است.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر، در بخش ۲ ضمن تعریف مسئله، مدل‌سازی ریاضی برای آن ارائه می‌شود. در بخش سوم یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مسئله طراحی، و سپس چند مسئله‌ی نمونه که به طور تصادفی تولید شده‌اند توسط الگوریتم‌های دقیق و همچنین الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل می‌شوند. نتایج محاسباتی در بخش ۴ آورده شده‌اند. بخش پایانی نیز به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

## ۲. مدل ریاضی برای تقسیم‌بندی ماشین‌ها

هر حلقه‌ی کمینه‌سازی با دو ماشین یا ایستگاه کاری تشکیل می‌شود. در تمام این نوشتار فقط از مؤلفه‌ی طولی ماشین‌ها برای چیدمان استفاده می‌شود. در این بخش، مسئله‌ی تقسیم‌بندی و تخصیص ماشین‌ها به حلقه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مسئله هدف تخصیص ماشین‌ها به هر حلقه است به گونه‌ی که

- حمایت تأثیرگذار از اجرای گروهی؛

- افزایش انعطاف‌پذیری به دلیل افزایش / کاهش ایستگاه‌ها؛

- ساده‌سازی عملیات تولیدی در هر حلقه.

درخصوص مسائل متنوعی که در سیستم‌های زوجی مطرح می‌شوند، افراد زیادی به تحقیق پرداخته‌اند، به عنوان مثال گادمن و ولد مکان‌یابی ایستگاه‌های کاری در یک حلقه را، در شرایطی که از یک سیستم AGV با  $n$  نقطه‌ی گذاشت و برداشت استفاده می‌شود، در نوشتاری مورد بررسی قرار داده‌اند. [۵] یکی از مهم‌ترین مباحثی که در سیستم‌های AGV زوجی مطرح می‌شود -- یعنی گروه‌بندی ماشین‌ها به حلقه‌های مختلف -- برای اولین بار توسط بزر و سرینواسان از طریق ارائه‌ی مدلی تحلیلی که بررسی AGV در یک حلقه می‌پردازد، مورد مطالعه قرار گرفته است. [۶] وین و ایگلو یک چیدمان زوجی با مسیر متغیر را برای سیستم AGV طراحی کردند و نشان دادند که تقسیم‌بندی ماشین‌ها در سیستم زوجی AGV به طور مستقیم بر عملکرد سیستم تأثیرگذار است. [۷] آنها الگوریتمی ابتکاری برای تقسیم‌بندی سیستم AGV براساس مفهوم مسیر متغیر در هر حلقه ارائه کردند. هو و هسیه نیز مسائل جریان متوازن در حلقه‌ها، کمینه‌سازی جریان میان‌حلقوی، و کمینه‌سازی فاصله‌ی طی شده توسط جریان را مورد بررسی قرار دادند. [۸] آن‌ها برای گروه‌بندی ایستگاه‌های کاری ابتدا با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری تخصیصی امکان‌پذیر برای هر حلقه ارائه کرده و سپس تخصیص به دست آمده را به کمک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهینه کردند. هسیه و شائیز به موضوع گروه‌بندی ماشین‌ها پرداخته‌اند. [۹] آن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های موجود برای حل مسئله‌ی K فروشنده‌ی دوره‌گرد، الگوریتمی برای گروه‌بندی ماشین‌ها ارائه کردند. محققین با استفاده از ایده‌ی وسایل چندباره، الگوریتمی با اهداف کمینه‌سازی بیشترین بار کاری AGV در سیستم و کمینه‌سازی تعداد حلقه‌ها، برای گروه‌بندی ماشین‌ها در حلقه‌های تولیدی مطرح کردند. [۱۰] فهمی و همکاران یک الگوریتم دو مرحله‌ی برای گروه‌بندی ماشین‌ها پیشنهاد کردند، که در آن سه هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی جریان مواد، کمینه‌سازی بیشترین بار کاری، و کمینه‌سازی تعداد انتقال‌های میان‌حلقه‌ی لحاظ شده است. آن‌ها از راهکار مسیریابی کوتاه‌ترین زمان برای اولین سفر استفاده کردند، و سپس با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد

- در توانایی های AGV های مورد استفاده در این مسئله تفاوتی قائل نمی شویم.
- زمان راه اندازی وسایل در زمان عملیات بر روی قطعات لحاظ شده است.
- ایستگاه های عملیاتی، توالی عملیات ها، تعداد مورد نیاز تسهیلات از قبل معلوم است.

### ۱.۲. متغیر تصمیم

تنها متغیر تصمیم در مدل ارائه شده،  $x_{ij}$  است که یک متغیر ۰ و ۱ بوده و مطابق زیر تعریف می شود:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به حلقه } j \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

### ۲.۲. پارامترها و اندیس ها

پارامترها و اندیس های مدل ریاضی عبارتند از:

- $i, k$ : اندیس های ماشین ها (برابر یکی از مقادیر ۱ تا  $n$ )
- $j, l$ : اندیس های حلقه ها (برابر یکی از مقادیر ۱ تا  $N$ )
- $f_{ik}$ : میزان جریان میان ماشین های  $i$  و  $k$ ؛
- $f_i$ : میزان کل جریان از سایر ماشین ها تا ماشین  $i$ ، یعنی:

$$f_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}, \forall i$$

- $T$ : زمان های در دسترس هر AGV در دوره ی برنامه ریزی برحسب واحد زمان؛
- $t_i$ : متوسط زمان گذاشت، برداشت و فرایند هر قطعه روی ماشین  $i$  برحسب واحد زمان؛
- $t_j^l$ : زمان گوناگونی در حلقه ی  $j$ ؛
- $\eta, \eta'$ : ضریب حد بالا و پایین جریان در هر حلقه؛
- $N$ : تعداد کل حلقه هایی که باید ایجاد شوند.

### ۳.۲. مدل ریاضی

با توجه به تعاریف انجام شده و راهکار حلقه های متوازن، در این بخش مسئله ی تحت بررسی به صورت مسئله ی برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح فرموله می شود. مدل مذکور را مدل شماره ۱ می نامیم

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} x_{ij} x_{kl}, \quad i \neq k, j \neq l \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 2, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\eta \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} x_{ij} x_{kl} \right) \leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} x_{ij} x_{kl},$$

$$j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

جریان درون و میان حلقوی کمینه شود؛ یعنی:

$$\min Z = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x), g(x)\} \quad (1)$$

در رابطه ی ۱ عبارت  $f_j(x)$  که در آن  $j = 1, \dots, N$  (تعداد حلقه ها) و  $g(x)$  جزء توابع هدف در تابع هدف  $Z$  هستند، به ترتیب مربوط به جریان درون و میان حلقوی هستند که باید کمینه سازی شوند. با فرض این که  $f_{ik}$  جریان میان ماشین های  $i$  و  $k$  است ( $i, k = 1, \dots, n$ ) داریم:

$$f_j(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^n f_{ik} x_{ij} x_{kj}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq k}}^N \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq l}}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} x_{ij} x_{kl} \quad (3)$$

که

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به حلقه } j \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

پرواضح است که تابع هدف فوق یک مسئله ی تصمیم گیری چندمعیاره است. با توجه به این که در حالت کلی یکی از راه حل های این دسته از مسائل تبدیل آن ها به یک مسئله ی تک منظوره است، در این نوشتار با استفاده از استراتژی حلقه های متوازن، قسمت هایی از تابع هدف که بر جریان درون حلقوی دلالت دارند ( $f_j(x)$ )، به صورت دسته یی از محدودیت ها در مدل لحاظ می شوند. لازم به ذکر است که دلیل استفاده از استراتژی حلقه های متوازن، عدم حذف ماشین ها از حلقه ها است. به عبارت بهتر اگر نتوان ماشین را از سیستم حذف کرد، به هنگام بررسی تخصیص های متفاوت توسط مدل ریاضی (حل مدل ریاضی)، زمانی که ماشینی از حلقه یی به حلقه ی دیگر تخصیص می یابد جریان درون آن حلقه کم می شود، ولی هم زمان جریان میان حلقوی زیاد می شود. بنابراین می توان از استراتژی بیان شده به منظور تبدیل مسئله ی چندمنظوره ی فوق به یک مسئله ی تک منظوره بهره جست، چرا که در این صورت با حل مسئله، جریان های درون و میان حلقوی تا حد ممکن به هم نزدیک می شوند.

این مسئله بسیار شبیه به سیستم تولید سلولی است [۷]. بنا بر این با توجه به مفاهیم سیستم تولید سلولی و براساس توضیحات مربوط به مفاهیم مطرح شده، مدل ریاضی جدیدی در این نوشتار ارائه می شود که در آن هدف تخصیص  $n$  ماشین به  $N$  حلقه ی مشخص است، به گونه یی که علاوه بر کمینه سازی جریان میان حلقوی و تأمین محدودیت ها، جریان بین حلقه های متفاوت تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک باشد. در انتهای نوشتار در مورد تعداد بهینه ی حلقه ها توضیحاتی ارائه خواهد شد. در ادامه، ابتدا متغیرهای تصمیم و پارامترهای مدل تعریف می شوند و سپس مدل ریاضی همراه با محدودیت های آن بیان می شود. در مدل سازی ریاضی، برای مسئله ی مطرح شده در این نوشتار فرضیاتی در نظر گرفته شده است. این فرضیات قبل از مدل سازی ریاضی آورده شده است:

- مسیر راهنما در حلقه ها در سیستم AGV یک جهتی است.
- هر ایستگاه در آن واحد فقط یک کار انجام می دهد، و اولین مواجهه اولین خدمت است.
- کلیه ی وسایل در اوقات کاری بدون شکست و خرابی به کار خود ادامه می دهند.

مقدار را می‌گیرد، پس می‌توان این عامل مشترک را جایگزین عبارت‌های  $f_{it_i}$  در محدودیت مطرح شده کرد:

$$t'_j(x_{1j} + x_{2j} + x_{3j} + \dots + x_{nj}) \leq T$$

و پس از فاکتورگیری محدودیت  $1^0$  را به دست آورد:

$$t'_j \left( \sum_{i=1}^n x_{ij} \right) \leq T, \quad \forall j$$

در حقیقت محدودیت‌های ۹ و ۱۰ بحث امکان پذیر بودن مسئله را بررسی می‌کنند و در صورت عدم وجود جواب ممکن برای مدل ریاضی، باید تعداد حلقه‌ها یا ضرایب حد بالا و پایین در حلقه‌ها تغییر داده شود. چنان که در شرح مدل ریاضی گفته شد، مدل مطرح شده از نوع برنامه‌ریزی  $0$  و  $1$  است و محدودیت‌های ۱۱ این نکته را متذکر می‌شوند.

### ۲.۳.۲. خط‌سازی مدل ریاضی

با دقت در مدل ۱ می‌توان دریافت که تابع هدف و برخی از محدودیت‌ها غیرخطی‌اند. می‌توان با به‌کارگیری مفاهیمی ساده تابع هدف و برخی از محدودیت‌ها را به معادل خطی آن‌ها تبدیل کرد. در اینجا با بهره‌گیری از روش معروف خطی‌سازی مسئله‌ی تخصیص مضاعف، متغیر تصمیم جدید  $y_{ijkl}$  را که متغیر  $0$  و  $1$  است چنین تعریف می‌کنیم:

$$y_{ijkl} = x_{ij} x_{kl}$$

$$y_{ijkl} = \begin{cases} 1 & \text{اگر مقادیر } x_{ij} \text{ و } x_{kl} \text{ هر دو } 1 \text{ باشند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

در ادامه، محدودیت‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ را به مسئله اضافه، و تابع هدف ۴ را با معادل خطی آن (یعنی تابع هدف ۴-۱) جایگزین می‌کنیم. پرواضح است که محدودیت‌های ۹ را نیز می‌توان با محدودیت‌های ۹-۱ جایگزین کرد. در این صورت مدل ۲ حاصل می‌شود که حل آن بسیار ساده‌تر از مدل ۱ است. مدل ۲:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} y_{ijkl}, \quad i \neq k, j \neq l \quad (1-4)$$

s.t.

Constraints(5), (6), (10) and (11)

$$\eta \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} y_{ijkl} \right) \leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} y_{ijkj} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1-7)$$

$$\eta' \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} y_{ijkl} \right) \geq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} y_{ijkj} \quad (1-8)$$

$$j = 1, 2, \dots, N \quad (1-9)$$

$$x_{ij} + x_{kl} - 2y_{ijkl} \geq 0, \quad \forall i, j, k, l \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N y_{ijkl} = n(n-1)/2 \quad (16)$$

$$k > i \quad (17)$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, l$$

$$\eta' \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} x_{ij} x_{kl} \right) \geq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} x_{ij} x_{kl}, \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$t'_j = \max_i \{f_{it_i} x_{ij}\}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq T/t'_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (11)$$

تابع هدف در مدل ۱ و در معادله ۴، کمیته‌سازی کل جابه‌جایی‌های میان حلقوی است. کاملاً واضح است این تابع هزینه‌ی را شامل می‌شود که در آن  $l \neq j$  است یعنی جریان میان حلقوی کمیته می‌شود. محدودیت ۵ نشان‌دهنده این است که هر ماشین فقط به یک حلقه تعلق دارد. محدودیت ۶ بر این مطلب تأکید دارد که در هر حلقه‌ی کمیته‌سازی دو ماشین باید وجود داشته باشد. همان‌طور که در ابتدا مطرح شد باید درون حلقه‌های تولیدی توازن جریان وجود داشته باشد که محدودیت‌های ۷ و ۸ بر این مطلب تأکید می‌کنند. در این دو محدودیت  $\eta$  و  $\eta'$  دامنه‌ی تغییرات جریان در حلقه‌های تشکیل شده هستند و عبارت‌اند از:

$$\eta = \frac{1}{N} - \Delta \quad (12)$$

$$\eta' = \frac{1}{N} + \Delta \quad (13)$$

که در آن‌ها  $N$  تعداد حلقه‌ها و  $\Delta$  ضریب تعادل جریان است که توسط کاربر / تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود، به طوری که  $(0 \leq \Delta < \frac{1}{N})$ . انتخاب  $\Delta$  کوچک به مفهوم نزدیک شدن جریان حلقه‌های متفاوت به یکدیگر و ایجاد حلقه‌های متوازن‌تر است، چرا که دامنه‌ی تغییرات جریان هر حلقه کوچک شده و بنابراین جریان حلقه‌ها بسیار به هم نزدیک می‌شود. از طرف دیگر، انتخابی  $\Delta$  بزرگ به معنای ایجاد حلقه‌هایی با جریان‌های نامتعادل تر است. حد بالای  $\Delta$  در رابطه‌ی فوق از منفی شدن  $\eta$  جلوگیری می‌کند و انتخاب حد پایین  $\Delta$  اختیاری است و منجر به تولید یک دامنه‌ی تغییر برای حدود  $\eta$  و  $\eta'$  می‌شود. قبل از توضیح محدودیت‌های ۹ و ۱۰ توجه به نکته‌ی زیر ضروری به نظر می‌رسد:

- محدودیت ظرفیت و توانایی AGV ها در هر حلقه برابر  $T/t' \leq \sum_{i=1}^n x_{ij}$  است.

### ۱.۳.۲. اثبات

می‌دانیم کل زمان مورد نیاز در هر حلقه باید از کل زمان در دسترس روی هر AGV در دوره‌ی برنامه‌ریزی کم‌تر باشد؛ پس در هر حلقه داریم:

$$t_1 x_{1j} + t_2 x_{2j} + t_3 x_{3j} + \dots + t_n x_{nj} \leq T \quad (14)$$

این رابطه به‌وضوح بیان می‌کند که کل زمان مورد نیاز در حلقه نباید از کل زمان در دسترس برای هر AGV بیشتر شود. ذکر این نکته بسیار ضروری است که در یک فرایند عملیاتی، همیشه ماشین گلوگاه زمان تولید را تعیین می‌کند. بنابراین باید زمان عملیات در ماشین گلوگاه محاسبه شود. می‌توان نشان داد که زمان گلوگاه در هر حلقه از محدودیت ۹ به دست می‌آید، یعنی:

$$t'_i = \max_j (f_{it_i} x_{ij}), \quad \forall j$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که محدودیت ۱۴ باید با توجه به معادله و توضیحات بالا تصحیح شود. با توجه به این که هنگامی که مقدار  $x_{ij} = 1$  شود،  $t'_j$  بیشترین

### ۱.۳. پارامترهای مدل شبیه‌سازی تبرید

$T_0$ : دمای اولیه (پارامتری برای اندازه‌گیری تمایل پذیرش جواب فعلی برای قرار گرفتن در تکرار بعد)؛

$\alpha$ : نرخ سرد شدن یا ضریب کاهش دما؛

$\beta$ : ضریب تعدیل دمای اولیه؛

$n$ : شمارنده‌ی تعداد جواب‌های پذیرفته‌شده در هر دما؛

$r$ : شمارنده‌ی تعداد انتقالات دما؛

$Z_{X^{Best}}$ : بهترین مقدار تابع هدف تاکنون؛

$Z_{X^n}$ : مقدار تابع هدف برای جواب فعلی به‌عنوان نقطه‌ی شروع تکرار بعد؛

$E_1$ : بیشترین تعداد مراحل در یک دما؛

$MMT$ : بیشترین تعداد انتقالات دما.

### ۲.۳. الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید

این الگوریتم برای یافتن جواب مدل طراحی شده است. در شکل ۳ نحوه‌ی عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نمایش داده شده است. الگوریتم با استفاده از یک جواب اولیه (جواب فعلی) کار خود را شروع می‌کند، و در هر تکرار با استفاده از

با وجود این که در مدل ۲ بسیاری از محدودیت‌ها خطی شده‌اند و این مسئله به‌خودی خود باعث سهولت حل آن نسبت به مدل ۱ می‌شود، به‌دلیل محدودیت‌های  $10^6$  هنوز مدل مذکور غیرخطی است. غیرخطی بودن مدل باعث می‌شود که به‌هنگام استفاده از نرم‌افزار LINGO برای حل مسائل نمونه‌ی مبتنی بر مدل ۲، جواب‌های ارائه‌شده توسط LINGO جواب‌های بهینه‌ی محلی‌اند نه جواب‌های بهینه‌ی مطلق.

### ۳. طراحی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

از مقایسه‌ی توابع هدف در مدل‌های ۱ و ۲ با تابع هدف در مدل «مسئله‌ی تخصیص مضاعف»<sup>۸</sup> و مسئله‌ی P-Median که هر دو از دسته مسائل NP-Hard هستند<sup>[۱۸]</sup>، به‌راحتی می‌توان پیچیدگی و دشواری حل مدل‌های ۱ و ۲ -- و به‌خصوص مدل ۲ -- را بررسی کرد. می‌دانیم که حل این دسته از مسائل بسیار زمان‌بر است و همین امر باعث استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرابابتکاری برای حل آن‌ها می‌شود. در این نوشتار، برای حل مسئله از الگوریتم فرابابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است.<sup>[۲۰، ۱۹]</sup> ابتدا پارامترهای الگوریتم، و سپس الگوریتم طراحی شده برای حل مسئله توضیح داده خواهند شد.

```

Begin
 $r = 0$ 
Generate (X) such as feasible solution
 $X^{Best} = X$ 
Calculate objective function with penalty at  $X^{Best}$  point
 $T_0 = Z_{X^{Best}} \beta$ 
Repeat
  For n=1 to  $E_1$  do
  Begin
  Select one of two operators for produce  $X^n$  as neighbor adjacent randomly
   $\Delta Z = Z_{X^n} - Z_{X^{Best}}$ 
  If  $\Delta Z < 0$  then  $X^{Best} = X^n$ 
  Else
  Begin
  Randomize ( $y \sim U(0, 1)$ )
   $W = e^{-\frac{\Delta Z}{T_r}}$ 
  If  $y \leq w$  then  $X^{Best} = X^n$ 
  End
  End
 $a_r = X^{Best}$ 
 $a'_r = Z_{X^{Best}}$ 
 $r = r + 1$ 
 $T_r = T_{r-1} * \alpha$ 
Until ( $r > MMT$ ) or ( $T_r = 0$ )
Report minimum  $a'_r$  against  $a_r$  as the Best Objective Function Value
End

```

شکل ۳. الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید.

$$\max \left[ \left\{ \sum_{i=1}^n X_{ij} - T^* \setminus t'_j \right\}, 0 \right]^2$$

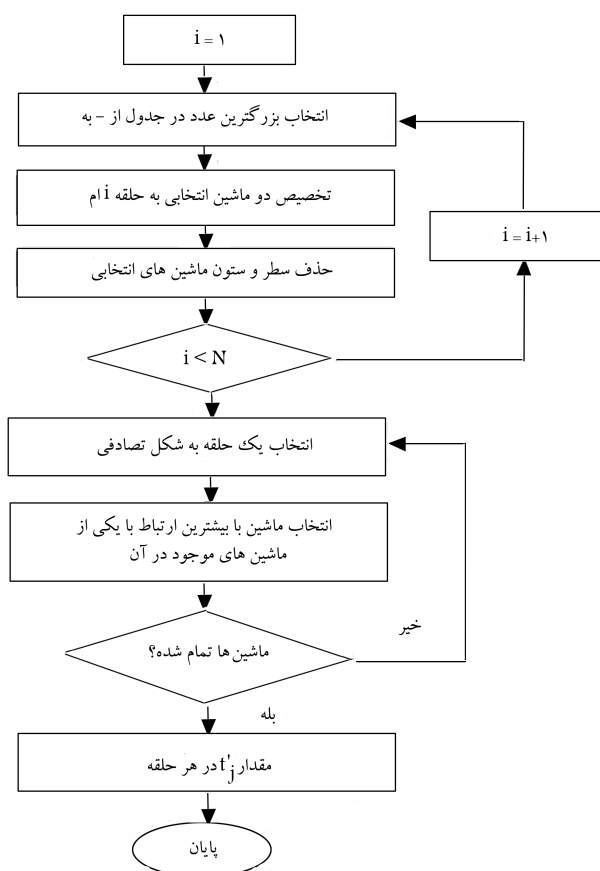
s.t.

$$\text{Constraints}(5, 6, 9 - 1, 11, 16) \quad (20)$$

این مدل متشکل از تابع هدف ۲۱ و محدودیت‌های ۶، ۵، ۹-۱، ۱۱ و ۱۵ و معادل مدل ۲ است. حال می‌توان با استفاده از مدل ۳ ادعا کرد که با هر تخصیص کاملاً تصادفی ماشین‌ها به حلقه‌ها، به شرط قرار دادن کمیته‌سازی دو ماشین در هر حلقه و به دست آوردن مقدار  $t'_j$  از محدودیت‌های ۷ یا ۷-۱ جواب موجه اولیه برای مدل ۱ تولید می‌شود. با در نظر گرفتن مدل ۳ و توضیحات داده شده، برای تولید جواب موجه اولیه با کیفیت بالا، از مفهوم روش درخت پوششی تعدیل شده<sup>۱۸</sup> با تغییر مطابق شکل ۴ استفاده می‌شود.

### ۴.۳. تولید جواب موجه همسایه

برای جست‌وجوی فضای ممکن برای یافتن جواب‌های بهتر (کاهش تابع هدف در مسائل کمیته‌سازی و افزایش تابع هدف در مسائل بیشینه‌سازی)، در الگوریتم شبیه‌سازی پیشنهادی باید نحوه‌ی پیش‌روی در فضای ممکن معرفی شود. در این قسمت برای بالابردن کارایی الگوریتم پیشنهادی دو ساختار همسایگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختارهای همسایگی به عنوان الگوریتم‌های جست‌وجوی محلی اقدام به جست‌وجوی جواب‌های بهتر در فضای جواب می‌کنند. در هر تکرار الگوریتم، یکی از این دو همسایگی به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود.



شکل ۴. فلوجارت تولید حل اولیه.

همسایگی‌های مورد استفاده (الگوریتم‌های ابتکاری) اقدام به جست‌وجوی فضای جواب به‌منظور بهبود جواب فعلی می‌کند. در صورت یافتن جواب بهتر (کاهش تابع هدف در مسائل کمیته‌سازی و افزایش تابع هدف در مسائل بیشینه‌سازی)، این جواب به‌عنوان جواب فعلی پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت، این جواب به‌صورت احتمالی (که براساس توزیع یکنواخت محاسبه می‌شود) پذیرفته می‌شود، الگوریتم SA پیشنهادی در این نوشتار مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. در طراحی هر الگوریتم SA، مواردی که بررسی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد عبارت‌اند از:

- تولید جواب موجه اولیه؛
- تولید جواب موجه همسایه؛
- مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم SA.

### ۳.۳. تولید جواب موجه اولیه

یکی از موارد مهم در استفاده از کلیه‌ی الگوریتم‌های بهبوددهنده‌ی فراابتکاری تولید جواب موجه اولیه برای شروع است. در این نوشتار، به‌منظور استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای تولید جواب موجه اولیه ابتدا باید مدل ریاضی را به‌گونه‌ی بازسازی کرد که کلیه‌ی محدودیت‌های مدل ریاضی ارضاء شوند. در بیشتر موارد برای استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، از روش لاگرانژین برای بازسازی مدل استفاده می‌شود. برای این منظور، محدودیت‌هایی که ارضاء آن‌ها در تخصیص‌های خاص امکان‌پذیر نیست، به تابع هدف منتقل می‌شوند. با توجه به این که محدودیت‌ها به‌صورت «کوچک‌تر مساوی» هستند از معادله‌ی جریمه در این مثال خاص با توضیحات تکمیلی زیر استفاده می‌شود.<sup>۱۸</sup> بنابراین در صورت کلی مسئله‌ی ۱۸ هم‌ارز با مسئله‌ی ۱۹ می‌شود.

$$\min C = f(x) \quad (18)$$

s.t.

$$g_i(x) \leq b_i \forall i$$

$$\min \{f(x) + r \times p(x)\} \quad (19)$$

$$\text{where, } p(x) = \sum_{i=1}^m \max \{ (g_i(x) - b_i), 0 \}^r$$

در این قسمت مدل ۳ معرفی می‌شود. با توجه به توضیحات بالا تابع هدف مدل ۳ را به‌صورت مجموعه‌ی از محدودیت‌های ۷ و ۸ و ۱۰ که به تابع هدف مدل ۲ انتقال داده شده بازسازی، و بعد از ساده‌سازی آن را ثبت می‌کنیم. مدل ۳:

$$\min \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} X_{ij} X_{kl} + r \sum_{j=1}^N \left( \left[ \eta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} Y_{ijkl} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} Y_{ijkj} \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ik} Y_{ijkj} - \eta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^N f_{ik} Y_{ijkl} \right]^2 \right) \right)$$

جدول ۱. مقادیر پارامترها.

مسئله	تعداد ماشین	تعداد حلقه	پارامترها			
			$T$	$t_i$	$\eta'$	$\eta$
۱	۵	۲	۴۰۰۰	[۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵]	۰٫۹	۰٫۱
۲	۶	۲	۲۰۰۰	[۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱]	۰٫۸۵	۰٫۱۵
۳	۷	۲	۱۰۰۰	[۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱]	۰٫۸	۰٫۲
۴	۸	۲	۴۰۰۰	[۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱]	۰٫۷۵	۰٫۲۵
۵	۹	۲	۹۰۰۰	[۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱ و ۱]	۰٫۸	۰٫۲

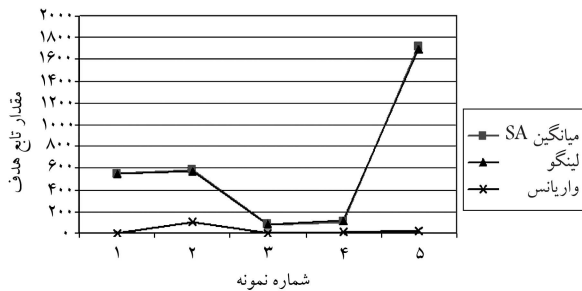
تصادفی که از توزیع یکنواخت با پارامترهای  $(U \sim (0, 100))$  و  $(U \sim (0, 10))$  پیروی می‌کنند، به دست آمده‌اند. جدول ۱ نیز نشان‌گر پارامترهای مورد نیاز الگوریتم‌های دقیق و فراابتکاری SA است. در جدول ۲ که در آن نتایج محاسباتی ارائه شده است، نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم‌های دقیق (که در قالب نرم‌افزار LINGO به کار گرفته شده‌اند) با نتایج حاصل از الگوریتم SA (که با زبان برنامه‌نویسی دلفی نوشته شده)، مقایسه شده است. اولین ستون در جدول ۲ نشان‌دهنده شماره‌ی مسائل نمونه و نیز تقسیم‌بندی نتایج براساس الگوریتم‌ها است. ستون دوم و سوم به ترتیب نشان‌دهنده تعداد متغیرها و تعداد محدودیت‌های مدل ریاضی‌اند. به‌عبارت بهتر ستون‌های دوم و سوم نشان‌دهنده ابعاد مدل ریاضی هستند. ستون چهارم نشان‌گر زمان محاسبات برحسب ثانیه است. ستون پنجم مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد، علی‌رغم استفاده از الگوریتم‌های دقیق در نرم‌افزار LINGO، به‌دلیل ماهیت غیرخطی مدل ریاضی، نتایج حاصله نتایج بهینه‌ی محلی‌اند نه بهینه‌ی مطلق. آخرین ستون در جدول ۲ نشان‌دهنده ماشین‌های تخصیص داده شده به حلقه‌ها هستند. نتایج حاصل از الگوریتم SA، از بهترین جواب‌های یافته‌شده در ۱۰ اجرای الگوریتم SA حاصل شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، الگوریتم SA در بیشتر موارد جواب LINGO و حتی بهتر از آن را در مدت زمانی بسیار کم‌تر به دست آورده است. برای درک بهتر، در

- همسایگی اول: میزان جریان در داخل حلقه‌ها (حلقه‌های تولیدشده در جواب اولیه) را به دست آورده، سپس از حلقه‌های با بیش از دو ماشین و بیشترین جریان درون حلقوی، ماشینی به‌طور تصادفی انتخاب شده و به حلقه‌ی با کم‌ترین جریان انتقال داده می‌شود.
- همسایگی دوم: از حلقه‌ی با تعداد ماشین بیشتر (با بیش از دو ماشین) یک ماشین به‌طور تصادفی انتخاب، و به حلقه‌ی با تعداد ماشین کم‌تر انتقال داده می‌شود.

در این نوشتار، پارامترهای الگوریتم SA با استفاده از سعی و خطا و انتخاب بهترین پارامترها، تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که شرط توقف در الگوریتم SA پیشنهادی تعداد انتقالات دما یا دمای نهایی صفر است.

#### ۴. نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی مربوط به حل پنج مسئله‌ی نمونه -- توسط الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم فراابتکاری SA -- با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جداول «ا-ز» به این مسائل نمونه که بیان‌گر میزان جریان بین ماشین‌های مختلف است، با استفاده از اعداد



شکل ۵. تجزیه جواب‌های SA در مقابل Lingo 8 برای پنج مسئله.

جدول ۲. مقایسه‌ی حل Lingo 8 با الگوریتم SA پیشنهادی (مشخصات PC: CPU3 GHz, 1024 MB RAM, Windows XP).

متغیرهای تصمیم با مقدار یک	مقدار تابع هدف بهینه‌ی ناحیه‌ی $10^*$	زمان محاسباتی (ثانیه)	تعداد محدودیت‌ها	تعداد متغیرها	شماره‌ی مسئله	
					لینگو	SA
$x_{11}, x_{21}, x_{32}, x_{41}, x_{52}$	۵۴۷	۷	۱۰۵	۱۱۲	لینگو	۱
	۵۴۷	۱٫۶۲	*	*	SA	
	۰	بهبود یافته	*	*	خطا	
$x_{12}, x_{21}, x_{31}, x_{42}, x_{52}, x_{62}$	۵۷۳	۳۵	۱۴۸	۱۵۸	لینگو	۲
	۵۷۳	۲٫۱۲۵	*	*	SA	
	۰	بهبود یافته	*	*	خطا	
$x_{12}, x_{22}, x_{31}, x_{41}, x_{52}, x_{61}, x_{71}$	۸۰	۲۳۰	۱۹۹	۲۱۲	لینگو	۳
	۸۰	۳	*	*	SA	
	۰	بهبود یافته	*	*	خطا	
$x_{11}, x_{21}, x_{32}, x_{42}, x_{51}, x_{62}, x_{71}, x_{82}$	۱۱۸	۱۸۴۷	۲۵۸	۲۷۴	لینگو	۴
	۱۰۷	۳٫۳۱	*	*	SA	
	بهبود یافته	بهبود یافته	*	*	خطا	
$x_{11}, x_{22}, x_{31}, x_{41}, x_{52}, x_{61}, x_{72}, x_{82}, x_{92}$	۱۶۹۴	۲۵۵۸۶	۳۲۵	۳۴۴	لینگو	۵
	۱۷۱۵	۳٫۳۲۵	*	*	SA	
	٪۱٫۲	بهبود یافته	*	*	خطا	

\* local optimum

جدول ۳. مقادیر پارامترها برای مثال‌های بیشتر.

شماره مسئله	پارامترها		
	$T$	$t_i$	$\eta'$
۶	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۱۵
۷	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۲
۸	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۰۹
۹	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۰۵۷
۱۰	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۰۵
۱۱	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۴۵
۱۲	۵۰۰۰	۱ به‌ازای تمامی $i$ ها	۰٫۳۸

جدول ۴. مقایسه‌ی حل 8 Lingo با الگوریتم SA پیشنهادی برای مثال‌های بیشتر.

شماره مسئله	تعداد ماشین‌ها	تعداد حلقه‌ها	تعداد متغیرها	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	بهترین حل به دست آمده توسط Lingo در ده ساعت
۶	۱۰	۲	۴۲۲	۵٫۸۱۲	۲۱۵۸	۲۱۹۴
۷	۱۱	۲	۵۰۸	۱۲٫۸۱۲	۳۱۲۷	۳۲۷۸
۸	۱۲	۳	۱۳۳۵	۱۵٫۷۹۲	۴۷۶۵	مقداری گزارش نشده است.
۹	۱۵	۳	۲۰۷۳	۱۷٫۲۲۵	۶۶۶۴	مقداری گزارش نشده است.
۱۰	۲۰	۴	۶۴۸۴	۲۰٫۱۶	۱۵۷۷۶	مقداری گزارش نشده است.
۱۱	۲۴	۴	۹۳۱۶	۲۰٫۲۸۲	۲۱۰۰	مقداری گزارش نشده است.
۱۲	۳۰	۵	۲۲۶۵۵	۲۱٫۳۵	۲۵۵۹۸	مقداری گزارش نشده است.

شکل ۵ نیز نتایج دو الگوریتم (دقیق و SA) برای ۵ مسئله‌ی نمونه آورده شده است. در جداول ۳ و ۴ به ترتیب پارامترها و نتایج محاسبات برای مثال‌ها و مقایسات بیشتر آورده شده است.

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که پارامترهای  $\eta$  و  $\eta'$  و برای نمونه‌های بالا طبق معادلات ۱۲ و ۱۳ و توضیحات مربوطه به دست آمده است. تمامی مقادیر جدول «از - به» در جدول ۴ غیر از نمونه‌ی ۱۱ مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر تا صد هستند. به‌منظور راحتی محاسبه، تمامی  $i$ ها در پارامترهای  $t_i$  در مسائل ۶ تا ۱۲، معادل ۱ در نظر گرفته شده‌اند. در مسئله‌ی ۱۱، با بهره‌گیری از روش جدید تقسیم‌بندی ماشین‌ها، میزان جریان میان‌حلقوی (تابع هدف) از مقدار ۲۴۰۰ به ۲۱۰۰ (با استفاده از الگوریتم SA پیشنهادی) بهبود یافته است. همچنین با در نظر گرفتن بقیه‌ی پارامترهای مطرح شده<sup>[۶]</sup> مشخص می‌شود که در مورد مسئله‌ی ۱۱ مجموع طول حلقه‌ها نیز کاهش یافته است. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص شده نرم‌افزار 8 Lingo فقط در مدت زمان ۱۰ ساعت برای مسائل ۶ و ۷ جواب ممکن تولید کرده و برای مسائل ۸ تا ۱۱ در این مدت زمان حتی جواب ممکن نیز تولید نکرده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با استفاده از استراتژی حلقه‌های متوازن، مدل ریاضی غیرخطی برای گروه‌بندی ماشین‌ها در سیستم‌های AGV زوجی با در نظر گرفتن دو هدف کمیته‌سازی جریان درون و میان‌حلقوی ارائه شد. با توجه به نوع مدل و پیچیدگی مسئله از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید (SA) برای حل مدل ریاضی استفاده شد. با استفاده از الگوریتم‌های دقیق و فراابتکاری SA چندین مسئله حل شده و نتایج آن‌ها مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصله حاکی از هم‌گرایی بالای الگوریتم SA پیشنهادی و همچنین توانایی بالای این الگوریتم در یافتن جواب‌های با کیفیت بالا هستند. به‌طور کلی وجه امتیاز این نوشتار نسبت به تحقیقات گذشته ارائه‌ی مدل ریاضی با توانایی ایجاد حلقه‌های متوازن جریان است که به‌طور هم‌زمان جریان درون و میان‌حلقوی را کمیته‌سازی می‌کند. در این نوشتار، تعداد حلقه‌ها معلوم فرض شده است که می‌توان با تحلیل حساسیت مناسب با حل مدل ریاضی برای تعداد حلقه‌های متفاوت و در نظر گرفتن هزینه‌ی تأسیس حلقه‌های بیشتر در مقابل هزینه‌ی جریان میان‌حلقوی تعداد بهینه‌ی حلقه‌ها را نیز مشخص کرد.

## پانویس

1. non-linear integer programming (NLIP)
2. cellular manufacturing system (CMA)
3. balanced loop strategy
4. simulated annealing algorithm (SA)
۵. در این نوشتار، واژه «زوجی» معادل فارسی واژه انگلیسی tandem au-tandem tomatod guided vehicle برگردان شده و مفهوم آن عبارت است از چند حلقه که در کنار هم با ارتباطات متقابل، قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است در هر حلقه یک یاربر خودکار تبادل جریان بین ماشین‌های مستقر در حلقه را به عهده دارد.
6. tabu search algorithm
7. similarity coefficient
8. quadratic assignment problem (QAP)
9. modified spanning tree (MST)

## منابع

1. Afentakis, P. "A loop layout design problem for flexible manufacturing systems", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **33**(1), pp. 175-196 (1989).
2. Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M. "Tandem configurations for automated guided vehicle systems offer simplicity and flexibility" *Industrial, Engineering*, **21**(2), pp. 23-27 (1989).
3. Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M. "Tandem configurations for automated guided vehicle systems and the analysis of single-vehicle loops", *IIE Transactions*, **23**(1), pp. 72-82 (1991).
4. Zanjiranid Farahani, R., developing an efficient approach to optimal design of AGV systems, Ph.D. Thesis, Sharif



- University of Technology, Tehran, Iran, (in farsi) (2000)
5. Gadmann, A.G.R.M. and Velde, S.L. "Positioning AGV in a loop layout", *European Journal of Operation Research*, **127**, pp. 565-573 (2000).
  6. Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M. "Tandem AGV systems: a partitioning algorithm and performance comparison with conventional AGV systems" *European Journal of Operational Research*, **63** (2), pp.173-192 (1992).
  7. Yu, W. and Egbelu, P.J. "Design of variable path tandem layout for AGV", *Journal of Manufacturing System*, **20**(5), pp. 305-319 (2001).
  8. Ho, Y.C. and Hsieh, P.F. "A machine-to-loop assignment layout methodology for tandem AGVS with multiple-load vehicle", *International Journal of Production Research*, **42**(4), pp. 801-832 (2004).
  9. Hsieh, L.F. and Sha, D.Y. "A design process for AGV systems", *Integrated Manufacturing System*, **7**(6), pp. 30-38 (1996).
  10. Kim, K.S. and Jae, M. "A design for a tandem AGVS with multi-load AGVs", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **22**, pp.744 -752 (2003).
  11. Fahmy, S.A.; Shalaby, M.A. and Elmekawy, T.Y. "A multi-objective partitioning algorithm for tandem AGV system", *35th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, pp.715-720 (2005).
  12. Shalaby, M.A.; Elmekawy, T.Y. and Fahmy, S.A. "A cost based evaluation of a zones formation algorithm in tandem AGV systems", *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, DOI 10.1007/s00170-005-0163-1,(2005).
  13. Liu, F.H. and Chen, J.T. "Analytical framework for designing the divided automated guided vehicle system", *International Journal of Industrial Engineering*, **4**(2), pp. 90-102 (1997).
  14. Laporte, G.; Zanjirani Farahani, R. and Miandoabchi, E. "Designing efficient method for tandem AGV network design problem using tabu search", *Applied Mathematics and computation*, **183**(2), pp. 1410-1421 (2006).
  15. Zanjirani Farahani, R.; Laporte, G.; Miandoabchi, E. and Bina, S. "Designing efficient methods for the tandem AGV network design problem using tabu search and genetic algorithm", *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, Article in press.
  16. Arabe, A.; Chetto, H. and Radouance, L. "Flow path design for AGV system", *Studies in information and control*, **8**(2), pp. 97-106 (1999).
  17. Huang, C. "Design of material transportation for tandem AGVS", *International Journal of Production Research*, **35**(4), pp. 943-953 (1997).
  18. Heragu, Sunderesh. *Facilities Design*, PWS Publishing Company, (1997).
  19. Eglese, R.W., "Simulated annealing: a tool for operational research", *International journal of Operation Research*, **46**, pp. 271-281 (1990).
  20. Hillier, F.S. and Lieberman, G.J. *Operations Research*, McGraw-Hill International Edition, Eight edition, (2005).
  21. Asgharpour, M.J, *Advance Operations Research*, Tehran University Press, (in farsi)(2002)

Archive of SID