

# مدل سازی ریاضی و حل مسئله زمان بندی تولید کار کارگاهی انعطاف پذیر با جریان های معکوس

فاطمه سلیمانی نیا<sup>۱</sup>، اسماعیل مهدی زاده<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی

۲. دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۱/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۰۵/۱۵، تاریخ تصویب ۹۶/۰۶/۰۶)

## چکیده

یکی از مسائل مهم در سیستم های تولید کارگاهی انعطاف پذیر، توجه به جریان های معکوس درون شبکه مونتاژ/ جداسازی است. در این پژوهش، مسئله زمان بندی تولید کار کارگاهی انعطاف پذیر با رویکرد جریان های معکوس که از دو جریان کارها (مستقیم و معکوس) در هر مرحله متشکل است، بررسی می شود. این مسئله زمانی کاربرد دارد که شما با دو جریان مواجه باشید که جریان (کار) رفت از مرحله اول به آخر و جریان (کار) برگشت از مرحله آخر به اول به کار برده شود سپس یک مدل ریاضی از مسئله با هدف کمینه سازی معیار بیشینه زمان تکمیل کارها یا به عبارتی  $C_{max}$  ارائه می شود. با توجه به پیچیدگی حل و Np-hard بودن این مسئله، از الگوریتم ژنتیک بهره می گیریم. همچنین با استفاده از طراحی آزمایش ها و روش تاگوچی، مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک را برآورد می کنیم. تحلیل نتایج، بیانگر کارایی الگوریتم ژنتیک برای حل مدل پیشنهادی است.

**واژه های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، جریان های معکوس، روش تاگوچی، زمان بندی تولید، طراحی آزمایش ها، کار کارگاهی انعطاف پذیر، مدل سازی ریاضی.

## مقدمه

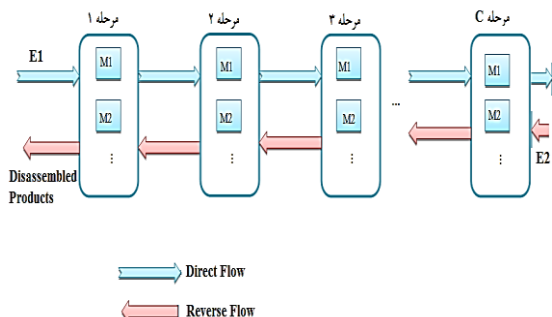
ارزش از محصولات برگشتی و استفاده شده، بسیار مدنظر قرار گرفته و به عنصری کلیدی در امر مونتاژ تبدیل شده است. زمان بندی جداسازی قطعات، یکی از مسائل عملیاتی مهم در سیستم های جداسازی است که به طور معمول ممکن است به منزله مسئله تعیین تعداد و زمان انقضای محصول، ضمن برآورده کردن نیازمندی از قطعات آن ها در یک افق برنامه ریزی باشد [۳]. نویسندگان، فرایند جداسازی را به روش های متفاوتی دسته بندی می کنند. گزینه های جداسازی برحسب درجه مورد نیاز دمونتاز به صورت اوراق سازی<sup>۱</sup>، تولید دوباره، مرمت و نوسازی<sup>۲</sup>، تعمیر و فروش دوباره<sup>۴</sup> فهرست می شوند [۴-۵]. از آنجا که به دلایل مختلف، جریان مواد و قطعات در جهت عکس مونتاژ موضوعی اجتناب ناپذیر است، فرایند جداسازی قطعات امری ضروری به شمار می آید. خط جداسازی مناسب ترین بستر برای عملیات جداسازی است. برخلاف جریان همگرا در محیط مونتاژ، در جداسازی قطعات پروسه فرایند واگراست؛ یعنی یک محصول به تعداد زیادی زیرمجموعه و بخش تقسیم می شود.

موضوع ضروری برای مدل سازی مسئله زمان بندی تولید کار کارگاهی منعطف<sup>۱</sup>، در نظر گرفتن جریان های معکوس در این سیستم است. زنجیره تأمین و لجستیک معکوس از جمله مهم ترین موضوعات مورد پژوهش در حوزه تولید و توزیع در بیست سال اخیر بوده است [۱]. طراحی شبکه لجستیک، تصمیمی راهبردی است که به منظور تعیین محل تسهیلات، ظرفیت آن ها، تعداد رده ها در زنجیره و نحوه ارتباط تسهیلات با یکپارچه سازی تصمیم های راهبردی طراحی شبکه انجام می شود [۲]. در زمان بندی تولید، جریان های معکوس از طریق واحد تولیدی تحت عنوان مونتاژ/ جداسازی مطرح می شوند، البته علی رغم کاربرد در بخش های مختلف صنعتی (صنعت خودرو، صنعت الکترونیک، سیستم های جنگ افزاری و...) تحقیقات پیرامون این دسته از جریان های معکوس کمتر صورت گرفته است. جداسازی قطعات به دلیل نگرانی های زیست محیطی، مسئولیت های اجتماعی، افزایش اهمیت اقتصادی، افزایش سطح آگاهی جامعه و توانایی بازیابی

عملیات جداسازی و مونتاژ مشترک را توسعه دادند. این الگوریتم برای توصیف و فرایند مورد نیاز داده‌ها و اطلاعات به کار برده شده است. نمودار و تانیمیزو [۱۷] یک متدولوژی برای زمان‌بندی و برنامه‌ریزی جداسازی بهینه را به منظور حداقل کردن روند و زمان جداسازی قطعات با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. عبدالجواد و همکاران [۱۸] نیز الگوریتم ابتکاری ترکیبی هیبریدی را برای مسئله زمان‌بندی تولید کار کارگاهی با رویکرد جریان‌های معکوس به منظور جداسازی قطعات ارائه دادند. گفتنی است ارائه‌دادن مدل برنامه‌ریزی ریاضی در حالت‌های مختلف خطی یا عدد صحیح برای مسئله جریان معکوس در زمان‌بندی تولید کار کارگاهی منعطف، یکی از ضعف‌های موجود در ادبیات پژوهش تاکنون است. با توجه به جدیدبودن مسئله و بررسی‌نشدن آن در ادبیات موضوع، مسئله جریان معکوس موضوع اصلی پژوهش مدنظر است.

### تعریف مسئله

در این قسمت به معرفی مسئله و بیان فرضیه‌های موجود در آن پرداخته می‌شود. در این مسئله مجموعه‌ای از ماشین‌ها و کارها (جریان مستقیم و معکوس) وجود دارند. جریان مستقیم از مرحله اول به مرحله آخر وارد می‌شود و جریان معکوس نیز از مرحله آخر به مرحله اول صورت می‌گیرد. هر کار (مستقیم و معکوس) شامل  $n$  موقعیت است که هر یک از آن‌ها باید با ماشین پردازش شود، این مسئله تعمیم‌یافته زمان‌بندی تولید کار کارگاهی با جریان‌های معکوس است [۱۸]. هدف تخصیص کارها به ماشین‌های مناسب و تعیین توالی عملیات روی ماشین‌های هر مرحله به نحوی است که تابع هدف  $(C_{max})$  حداقل شود. در شکل ۱ نمای کلی از رویکرد جریان‌های معکوس نشان داده می‌شود.



شکل ۱. نمای کلی از رویکرد جریان‌های معکوس

بیشتر ادبیات موجود درباره جریان‌های معکوس در زنجیره تأمین بحث می‌کنند. آخرین تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه به دندو و مندز [۶]، عثمانی و ژانگ [۷] و گیری و همکاران [۸] مربوط می‌شود. ادبیات مطرح‌شده در زمینه سیستم‌های تولید کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس بسیار محدود است. ادبیات مرتبط، برنامه‌ریزی و ترتیب قطعات جداسازی شده و درباره مطالعه موردی در این زمینه بحث کرده‌اند. گانگور و گوپتا [۹] اولین معرفی از مسئله بالانس خط جداسازی (DLBP) را ارائه کردند و الگوریتمی برای حل DLBP با وجود خرابی با هدف تخصیص وظایف به ایستگاه‌های کاری از طریق احتمالاتی که هزینه قطعات معیوب را به حداقل می‌رساند بسط دادند. گوپتا و همکاران [۱۰] روش‌هایی را پیشنهاد دادند که راه‌حلی برای برنامه‌ریزی بازسازی اجزا تأمین می‌کرد. آن‌ها تعداد و نوع محصولات را به منظور برآورده کردن تقاضا برای یک گروه از اجزا درحالی‌که هزینه‌های جداسازی و ازبین‌بردن را به حداقل می‌رساند، تعیین کردند.

کنگار و گوپتا [۱۱] تحقیقاتی در زمینه مفهوم راندمان (بازدهی) طراحی، و تصمیمات چندمنظوره را برای محصولات الکترونیکی پس از وارد شدن به چرخه محیط زیست بررسی کردند. گنزالز و آدنسودیا [۱۲] از روش تحقیقات پراکنده فراابتکاری برای یافتن توالی جداسازی قطعات بهینه برای محصولات پیچیده با هزینه‌های جداسازی وابسته به توالی استفاده کردند. زیبایی و سجادی [۱۳] الگوریتمی ژنتیکی ارائه دادند که به منظور جداسازی مشکلات توازن خطوط جداسازی توسعه داده شده است. ایلگین و گوپتا [۱۴] بر روی حس‌گرهای جاداده‌شده در محصولات کار کردند. آن‌ها تأثیر اطلاعات فراهم‌شده به وسیله این حس‌گرها را بر روی عملکرد خط جداسازی ماشین ظرف‌شویی ارزیابی کردند. ون و گونارو [۱۵] از روش شناسایی رادیوفرکانسی استفاده کردند تا داده‌ها را از طریق چرخه زمانی محصولات ردیابی، و الگوریتم ژنتیکی که توالی جداسازی قطعات را به منظور حداکثرسازی سود با توجه به مقدار باز یافت و هزینه جداسازی تعیین می‌کند پیشنهاد دادند. لی و همکاران [۱۶] یک مدل ریاضی مونتاژگرا از فرایند عملیات تعمیر و نگهداری مشترک واقعی (CVM) ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم کنترلی، فرایند

**مفروضات**

در این مدل، دو نوع کار مستقیم و معکوس وجود دارد. یکی از فرضیه های اصلی مسئله این است که همه کارهای مستقیم در نخستین مرحله از کارهای معکوس، و تمام کارهای معکوس در آخرین مرحله از کارهای مستقیم پیشی می گیرند (بر روی هر ماشین). همه کارهای مستقیم و معکوس از یکدیگر مستقل، و در زمان صفر برای پردازش موجود هستند. باید توجه داشت که انعطاف پذیری بر روی ترتیب عملیات است. برای هر کار، در هر مرحله  $m$  ماشین  $(S=1,2,\dots,m_k)$  موجود است که همگی از یکدیگر مستقل، و به طور پیوسته موجود هستند. با هر ماشین حداکثر می توان یک کار را در یک زمان انجام داد، از سوی دیگر هر کار تنها بر روی یک ماشین انجام می شود (هر ماشین در یک لحظه چند عملیات را با هم پردازش نمی کند و تنها به پردازش یک عملیات می پردازد). ماشین های هر ایستگاه (stage) و هر جفت ایستگاه متفاوت، و ماشین های مسیر مستقیم و معکوس یکسان است. بریدگی<sup>۷</sup> نیز مجاز نیست؛ به عبارت دیگر وقتی عملیات روی یک ماشین در حال انجام است، تا زمان تکمیل، کار از روی ماشین برداشته نمی شود. زمان انجام یک عملیات (زمان پردازش)، با ماشین های مختلف متفاوت، و همواره مقداری مثبت است، همچنین زمان آماده سازی ماشین ها نادیده گرفته شده است و زمان حمل و نقل بین ماشین ها و مراحل وجود ندارد.

**مدل سازی ریاضی**

در این بخش، مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)<sup>۸</sup> برای مسئله مورد نظر ارائه شده و نمادهای کاربردی به شرح زیر است:

$$J = \{j_1, \dots, j_n\} \text{ : مجموعه تمام کارها؛}$$

$$E_1 = \{j_1, \dots, j_{s_1}\} \text{ : مجموعه کارهای مستقیم؛}$$

$$E_2 = \{j_{s_1+1}, \dots, j_n\} \text{ : مجموعه کارهای معکوس.}$$

**پارامترها**

$$j \text{ : شاخص کار } j = \{1, \dots, n\}$$

$$k \text{ : شاخص مراحل } k = \{1, \dots, c\}$$

$S$ : شاخص ماشین ها در هر مرحله  $\{1, \dots, m_k\}$ ؛

$O_{kjs}$ : عملیات کار  $j$  در مرحله  $k$ ام روی ماشین  $s$ ام؛

$i$ : شاخص موقعیت (وضعیت)  $i = \{1, \dots, n\}$ ؛

$h$ : شاخص موقعیت (وضعیت) قبلی  $h = \{1, \dots, i\}$ ؛

$p_{kjs}$ : زمان پردازش کار  $j$  در مرحله  $k$ ام روی ماشین

$M$ ام؛ عددی بسیار بزرگ.

**متغیرها**

$C_{\max}$ : زمان تکمیل آخرین کار روی ماشین پایانی؛

$t_{kj}$ : زمان شروع کار  $j$ ام در مرحله  $k$ ام؛

$P'_{kj}$ : زمان پردازش واقعی کار  $j$ ام در مرحله  $k$ ام.

**متغیر تصمیم (باینری)**

$x_{jki}^s$ : اگر کار  $j$  در موقعیت  $i$  روی ماشین  $s$  در مرحله  $k$

$k$ ام انجام شود ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$$\text{Min} Z = C_{\max} \tag{1}$$

$$\sum_{S=1}^{m_k} \sum_{i=1}^n x_{jki}^s = 1 \tag{2}$$

$$\forall j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, c$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jki}^s \leq 1 \tag{3}$$

$$\forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, c; S \in m_k$$

$$t_{1j} \leq M \left( 1 - \sum_{S=1}^{m_1} x_{j11}^s \right) \tag{4}$$

$$\forall j = 1, \dots, S_1$$

$$t_{cj} \leq M \left( 1 - \sum_{S=1}^{m_c} x_{jc1}^s \right) \tag{5}$$

$$\forall j = S_1 + 1, \dots, n$$

$$P'_{kj} = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{m_k} p_{kjs} x_{jki}^s \tag{6}$$

$$\forall j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, c$$

$$t_{kj} + P'_{kj} - t_{(k+1)j} \leq 0 \tag{7}$$

$$\forall k = 1, \dots, c-1; j = 1, \dots, S_1$$

$$t_{kj} + P'_{kj} - t_{(k-1)j} \leq 0$$

عبارات ۷ و ۸ محدودیت‌های تقدمی بین عملکردهای کارها را نشان می‌دهد. در عبارت ۹ نیز می‌بینیم که  $C_{\max}$ ، با زمان پایان آخرین کار انجام‌شده برابر است (درمورد کارهای *direct*). عبارت ۱۰ بیان می‌کند که  $C_{\max}$  با زمان پایان آخرین کار انجام‌شده برابر است (درمورد کارهای *reverse*). درواقع، عبارات ۹ و ۱۰ بیانگر این هستند که *makespan* معادل زمان پایان آخرین کار انجام‌شده است ( *completion time*). در عبارت ۱۱ می‌بینیم که اگر کار  $q$  در مرحله  $k$ ام بعد از کار  $z$ ام انجام شود، زمان شروع به کار  $q$  باید با زمان شروع به کار  $z$ ام به‌علاوه زمان پردازش آن برابر باشد. در ادامه، مثالی را با نرم‌افزار Lingo 16 حل کرده‌ایم که به تشریح عملکرد آن می‌پردازیم. در این مثال سه *stage* (مرحله) داریم و حداکثر تعداد ماشین‌ها ۳ است. در *stage* 1 و 2 دو ماشین، و در *stage* 3 نیز سه ماشین قرار دارد. در مجموع، شش کار داریم که شامل سه کار مستقیم و سه کار معکوس است. کارهای  $z_1, z_2, z_3$  کارهای مستقیم (*direct*) و کارهای  $z_4, z_5, z_6$  کارهای معکوس (*reverse*) هستند. زمان پردازش به‌صورت تصادفی در بازه اعداد [۱, ۹] در نظر گرفته شده است.

در شکل ۲، گانت چارت مربوط به خروجی Lingo16 را از حل مدل پیشنهادی نمایش داده شده است.

#### اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

هر مدل ریاضی پس از ایجاد یا توسعه‌اش باید ارزیابی شود. فاکتورهایی که در ارزیابی مدل مدنظر قرار می‌گیرد عبارت است از زمان حل، فاصله از جواب بهینه، ابعاد مسئله حل‌شدنی. ابعاد یک مسئله زمان‌بندی را معمولاً تعداد کارها و تعداد ایستگاه‌های کاری آن تعیین می‌کند. برای ارزیابی آنالیز رفتار مدل پیشنهادی، با انتخاب پنج مسئله در ابعاد کوچک که داده‌های آن در جدول ۱ به‌صورت تصادفی تولید شده است، کاربردی بودن مدل را با استفاده از نسخه ۱۶ نرم‌افزار لینگو بررسی می‌شود. در این نرم‌افزار تنها می‌توان مسائل را در سایز کوچک حل کرد و در ابعاد بالا کارایی ندارد، همچنین زمان‌های پردازش به‌صورت تصادفی بین یک تا ده انتخاب شده است. مسائل نمونه در جدول از نظر ابعاد به‌نحوی انتخاب شده‌اند که با نرم‌افزار لینگو نمی‌توان پاسخ بهینه محلی برای آن‌ها یافت.

$$\forall k = 2, \dots, c; j = S_1 + 1, \dots, n \quad (8)$$

$$t_{cj} + P'_{cj} \leq C_{\max} + M \left( 1 - \sum_{s=1}^{m_s} x_{jei}^s \right) \quad (9)$$

$$j = 1, \dots, S_1; i = 1, \dots, n$$

$$t_{1j} + P'_{1j} \leq C_{\max} + M \left( 1 - \sum_{s=1}^{m_s} x_{jli}^s \right) \quad (10)$$

$$j = S_1 + 1; i = 1, \dots, n$$

$$t_{kq} + M \left( 1 - x_{qk(i+1)}^s \right) \geq t_{kj} + P'_{kj} + M \left( 1 - x_{jkh}^s \right) \quad (11)$$

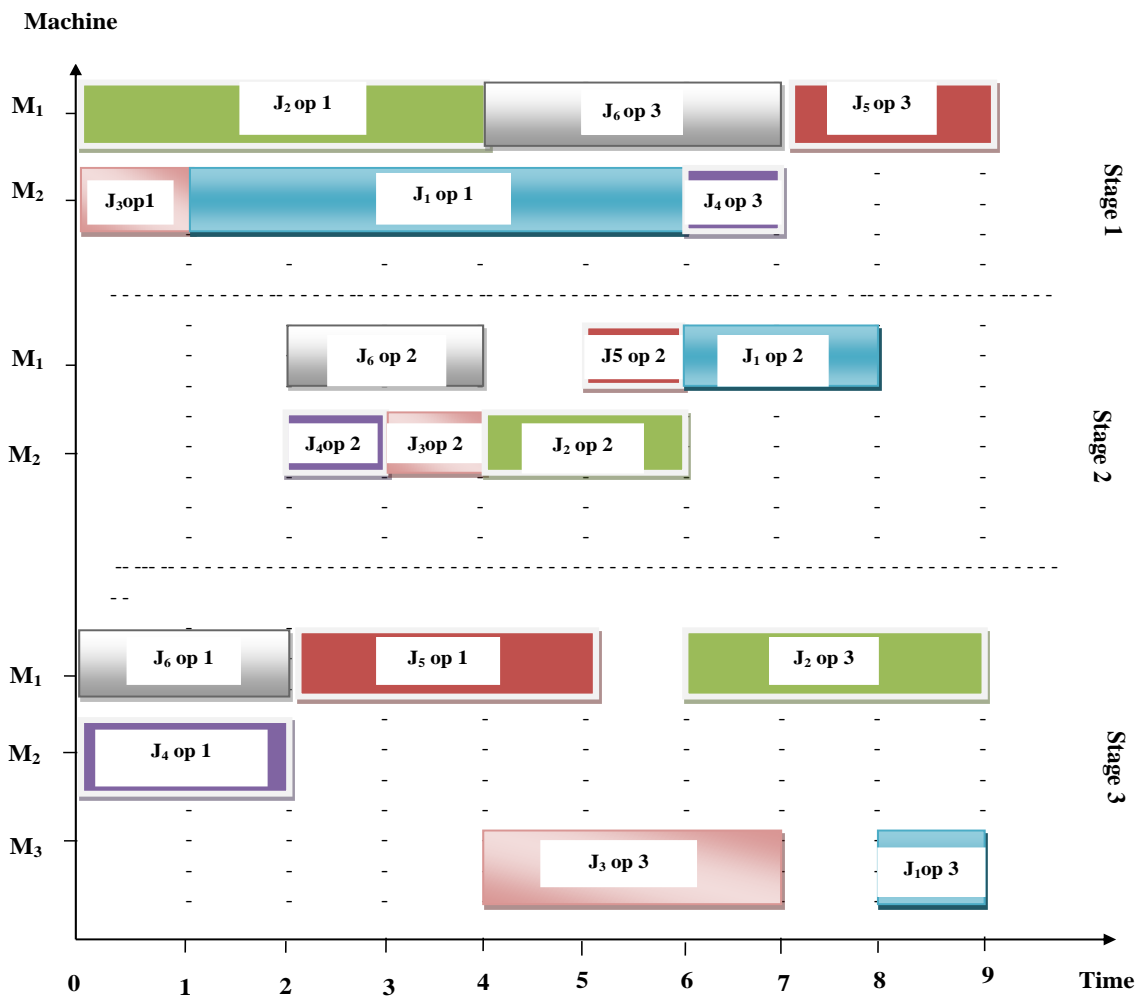
$$\forall j, q = 1, \dots, n; \forall k = 1, \dots, c;$$

$$\forall i = 1, \dots, n - 1;$$

$$\forall h = 1, \dots, i; \forall S = 1, \dots, m_k$$

$$x_{jki}^s \in \{0, 1\} \quad (12)$$

تابع هدف بیانگر کمینه‌سازی زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین است. در محدودیت ۲ بیان می‌شود که هر کار در هر مرحله، تنها در یک موقعیت و تنها روی یک ماشین در این مرحله انجام‌شدنی است. عبارت ۳ بیانگر این است که در یک موقعیت از یک مرحله و در یک ماشین، حداکثر یک کار انجام می‌شود. عبارت ۴ نشان می‌دهد که اگر کار مستقیم  $z$  در اولین موقعیت از نخستین مرحله انجام شود (روی هر ماشین)، زمان شروع عملیات بر روی کار مستقیم  $z$  در مرحله اول صفر است. در عبارت ۵ می‌بینیم که اگر کار معکوس  $z$  در نخستین موقعیت از آخرین مرحله انجام شود (روی هر ماشین)، زمان شروع عملیات بر روی این کار در مرحله آخر صفر است. در عبارت ۶ زمان پردازش واقعی کار  $z$  در مرحله  $k$ ام نشان داده می‌شود. عبارت ۷ بیان می‌کند که برای کارهای مستقیم، زمان شروع فعالیت  $z$ ام در هر مرحله‌ای برابر است با زمان شروع همان فعالیت در ایستگاه (مرحله) قبلی به‌علاوه زمان پردازشش (محدودیت پیش‌نیازی کارهای *direct* (مستقیم) را نشان می‌دهد). در عبارت ۸ می‌بینیم که برای کارهای غیرمستقیم زمان شروع فعالیت  $z$ ام در هر مرحله‌ای برابر است با زمان شروع همان فعالیت در ایستگاه (مرحله) بعدی به‌علاوه زمان پردازشش (محدودیت پیش‌نیازی کارهای *reverse* را نشان می‌دهد). درواقع



شکل ۲. نمایش گانت چارت مربوط به کارهای مستقیم و معکوس خروجی Lingo 16

جدول ۱. نتایج و زمان انجام محاسبات با نرم افزار لینگو ۱۶ برای نمونه سائز کوچک به منظور سنجش اعتبار مدل

کار مستقیم	کار معکوس	مرحله	حداکثر تعداد ماشینها در هر مرحله	$C_{max}$ Lingo (بهینه)	Time Lingo (sec)
۲	۲	۳	۳	۸	۲/۳۴
۲	۲	۵	۳	۱۰	۹/۲۸
۳	۳	۳	۳	۹	۱۱/۷۰
۳	۳	۴	۳	۱۰	۳۶۷/۹۷
۳	۳	۵	۳	۱۱	۳۰۰۹/۷۸۴

### روش حل مسئله

بهینه سازی متعددی مانند برنامه ریزی خطی، غیرخطی و پویا به عنوان روش های دقیق و همچنین روش های مکاشفه ای مختلف برای حل آنها استفاده شده است. باید توجه داشت که زمان محاسباتی روش های دقیق بسیار زیاد، و در اغلب موارد با افزایش ابعاد مسئله در حل این نوع مسائل ناتوان است.

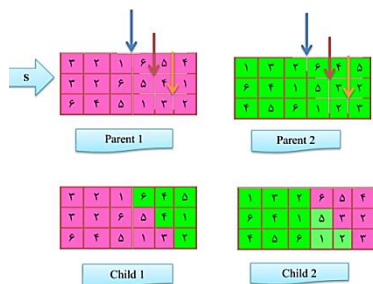
پس از ارائه مدل پیشنهادی، روش (های) کاربردی برای حل مدل از جمله مباحث مهم در مسائل بهینه سازی است. امروزه مسائل بهینه سازی ترکیباتی، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است؛ به طوری که روش های

۱. حالتی که در مرحله اول کارهای مستقیم پیش از کارهای معکوس، در مرحله آخر کارهای معکوس پیش از کارهای مستقیم، و در مراحل میانی کارهای مستقیم و معکوس به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

۲. حالتی که در تمام مراحل کارهای مستقیم و معکوس به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

پس از بررسی انجام شده در مورد طراحی کروموزوم پیشنهادی، مشخص شد که حالت اول از حالت دوم بهتر است؛ بنابراین، ما حالت اول را در این پژوهش برای طراحی کروموزوم الگوریتم ژنتیک در نظر می‌گیریم.

شایان ذکر است که عملگر تقاطع استفاده شده در این پژوهش، بر روی رشته کروموزومی S از نوع عملگر تقاطع تک نقطه‌ای، و بر روی رشته کروموزومی m از نوع عملگر تقاطع یکنواخت است. از آنجا که نحوه عملکرد تقاطع تک نقطه‌ای بر روی رشته کروموزومی S، به صورت جایگشتی از کل کارها است، اگر بر روی هر سطر اعمال شود پاسخ بهتری حاصل خواهد شد.



شکل ۴. عملگر تقاطع تک نقطه‌ای

در روش عملگر تقاطع یکنواخت نیز ابتدا دو والد انتخاب، سپس برای هر یک از سطرها این دو، رشته‌ای از اعداد صفر و یک  $\beta \in [0,1]$  هم‌اندازه با طول کروموزومها به صورت تصادفی تولید می‌شود که Alpha نام دارد سپس مطابق شکل ۵ و رابطه ۱۳، از ابتدای Alpha شروع می‌کنیم؛ اگر صفر بود از والد دوم و اگر یک بود از والد اول انتخاب می‌کنیم. برای ایجاد فرزند دوم برعکس عمل می‌کنیم.

$$Y_1 = \beta X_1 + (1 - \beta) X_2 \quad (13)$$

$$Y_2 = \beta X_2 + (1 - \beta) X_1$$

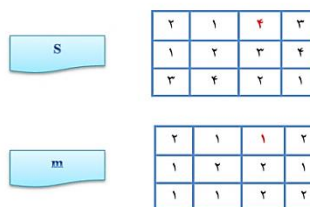
Alpha :

۰	۱	۰	۰	۱	۱
۰	۰	۱	۱	۰	۱
۱	۱	۰	۰	۱	۰

شایان ذکر است که مسئله زمان‌بندی تولید کار کارگاهی منعطف با جریان‌های معکوس از مسائل با پیچیدگی سخت است و از آنجا که جزء مسائل Np-hard است [۱۸] ارائه روشی دقیق برای بهینه‌سازی مسئله مورد نظر در یک زمان منطقی، بسیار سخت و دور از ذهن است. در این پژوهش از طراحی کروموزوم الگوریتم ژنتیک ۹ برای حل استفاده شده است، این الگوریتم با عملگرهای تقاطع ۱۰، جهش ۱۱ و انتخاب نقاط مختلف، فضای پاسخ مسئله را جست‌وجو می‌کند.

### نحوه نمایش پاسخ

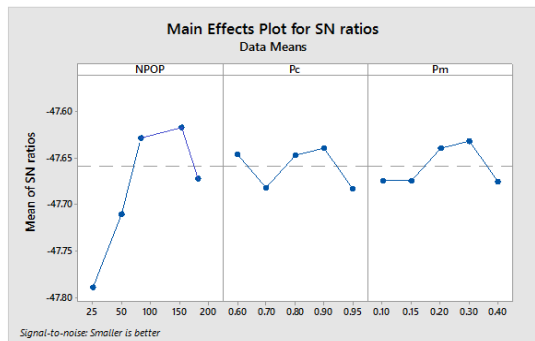
مهم‌ترین بخش الگوریتم‌های فراابتکاری نحوه نمایش جواب‌هاست. طراحی یک کروموزوم مناسب، مهم‌ترین مرحله در اعمال کردن الگوریتم ژنتیک در فرایند حل مسئله است، بدین منظور کروموزومها باید طوری طراحی شوند که پاسخ مسئله مورد نظر را در بر بگیرند. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در این پژوهش، از دو رشته کروموزومی S و m استفاده شده که رشته کروموزومی S و m به صورت یک ماتریس  $C*N$  است، C نشان‌دهنده تعداد مراحل و N نیز جایگشتی از کل کارها (مستقیم و معکوس) است. در واقع، رشته کروموزومی S نحوه قرارگرفتن ترتیب کارها در هر مرحله، و رشته کروموزومی m نیز نشان‌دهنده نحوه قرارگرفتن ماشین‌ها در هر مرحله است. در شکل ۳، نحوه نمایش کروموزوم برای مثالی با چهار کار نشان داده شده است. در این شکل عدد چهار در سطر اول رشته کروموزومی S و عدد یک در سطر اول رشته کروموزومی m بیان‌کننده این است که کار چهار (معکوس) در مرحله اول روی ماشین یک قرار دارد.



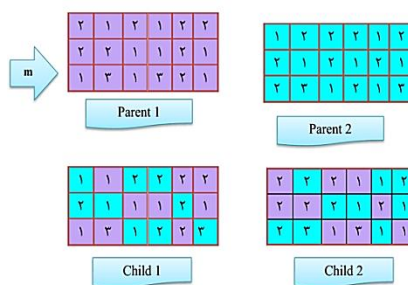
شکل ۳. نحوه نمایش کروموزوم پیشنهادی

### ساختار طراحی کروموزوم

در این پژوهش، کروموزوم به دو صورت طراحی شده است.



شکل ۶. نتایج تنظیم پارامتر الگوریتم ژنتیک



شکل ۵. فرایند عملگر تقاطع یکنواخت

در این پژوهش همچنین از سه عملگر جهش جابه جایی، جانشینی و معکوس برای رشته کروموزومی  $s$  استفاده شده، برای رشته کروموزومی  $m$  نیز جهش یکنواخت به کار برده شده است؛ برای مثال ۵۰ درصد از اعضا (ماتریس  $C*N$ ) به صورت تصادفی انتخاب، سپس بازتولید می شود.

### تنظیم پارامتر الگوریتم پیشنهادی

از آنجا که خروجی الگوریتم های فراابتکاری به شدت به مقادیر ورودی آنها وابسته است، در این بخش با استفاده از طراحی آزمایش های تاگوچی ۱۲ مقادیر بهینه پارامترها را تعیین می کنیم [۱۹]. در این مقاله، شرط توقف در نظر گرفته شده زمان است که با توجه به ابعاد مسئله (کوچک، متوسط و بزرگ) متفاوت است. زمان اجرای نمونه های تصادفی برای سایز کوچک ۲۰۰ ثانیه، برای سایز متوسط ۴۰۰ ثانیه و برای سایز بزرگ ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش کارایی حساسیت الگوریتم های بهینه سازی به پارامترهای ورودی شان، پارامترهای ورودی شامل تعداد جمعیت، احتمال تقاطع، احتمال جهش با استفاده از روش طراحی الگوریتم تاگوچی در بهترین مقدار خود تنظیم شده است. برای تنظیم پارامتر الگوریتم پیشنهادی از نرم افزار Minitab 17 استفاده شده است. سطوح پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک را می توان در جدول ۲ نمایش داد.

جدول ۲. معرفی سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترهای بررسی شده	$N_{pop}$	$p_c$	$P_m$
	۲۵	۰/۶	۰/۱
	۵۰	۰/۷	۰/۱۵
سطوح معرفی شده	۱۰۰	۰/۸	۰/۲۰
	۱۵۰	۰/۹	۰/۳۰
	۲۰۰	۰/۹۵	۰/۴۰

### نتیجه گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، مسئله کار کارگاهی منعطف با رویکرد جریان های معکوس بررسی شد. با توجه به بررسی نکردن این مسئله در ادبیات موضوع، ابتدا مدل ریاضی با در نظر گرفتن تابع هدف کمینه سازی معیار بیشینه زمان تکمیل کارها ارائه شد. با توجه به NP-hard بودن مسئله،

به منظور تولید مسائل تصادفی، سه دسته مسئله کوچک، متوسط و بزرگ که هر یک شامل ۱۰ نمونه است طراحی کرده ایم (۱۸، ۲۰] و تعدادی نمونه تصادفی). برای مسائل کوچک تعداد کل کارها بین ۲ تا ۶، برای مسائل متوسط تعداد کل کارها بین ۶ تا ۲۰ و برای مسائل بزرگ تعداد کل کارها را بین ۲۰ تا ۴۰ در نظر گرفته ایم. حداکثر تعداد ماشین های هر مرحله سه در نظر گرفته شده و زمان های پردازش مربوط به مسائل ایجاد شده به صورت تصادفی در بازه [۱، ۹۹] با توزیع یکنواخت تعیین شده است. نتایج محاسباتی به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه سازی مسئله، ارزیابی و مطالعه شده است. برای برنامه نویسی الگوریتم ژنتیک از نرم افزار Matlab-2013 a و برای اجرای الگوریتم از یک نت بوک با مشخصات ۲/۳ گیگاهرتز (Core 5) و کارت حافظه ۶ گیگابایت استفاده کرده ایم. مدل پیشنهادی در ابعاد مختلف ابتدا با نرم افزار Lingo، سپس با استفاده از الگوریتم GA حل شده است. به منظور ارزیابی بردن تبعات حاصل از تصادفی بودن نتایج، هر یک از مجموعه مسائل نمونه، ۵ بار اجرا شده و متوسط نتایج به دست آمده مبنای مقایسه ها قرار گرفته است. مدل پیشنهادی در ابعاد مختلف ابتدا با نرم افزار Lingo، سپس با استفاده از الگوریتم GA حل شده و نتایج در جدول ۳ آمده است.

مدل‌سازی مسئله، زمان نصب و تحویل قطعات در نظر گرفته شود. زمان پردازش کارهای مستقیم و معکوس ممکن است قابلیت انقطاع داشته باشد. استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری برای بررسی سرعت و دقت حل مسئله و مقایسه نتایج آن با الگوریتم‌های پیشنهادی. همچنین، توسعه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای چنین مسئله‌ای با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت نیز ارزشمند است.

الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با در نظر گرفتن ساختار طراحی کروموزوم مدل ارائه شده پیشنهاد شد.

به منظور تحقیقات آتی پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:  
توسعه مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسئله جریان معکوس در حالت چندهدفه، فرض وجود زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی در مسئله جریان معکوس، فرض وجود دوره‌ای در دسترس نبودن ماشین‌ها، در

جدول ۳. نتایج محاسباتی عملکرد نرم‌افزار لینگو ۱۶ و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در سایز کوچک، متوسط و بزرگ

Size Problem	اطلاعات مسئله				نتایج Lingo		نتایج GA			
	شماره مسئله	تعداد کارهای مستقیم	تعداد کارهای معکوس	مراحل	حداکثر تعداد ماشین در هر مرحله	نتایج لینگو	زمان لینگو	بهترین پاسخ	میانگین پاسخ‌ها	میانگین زمان‌ها
Small Problem	۱	۲	۲	۲	۳	۷	۶	۷	۲/۷	۴۲/۸۸
	۲	۲	۲	۳	۳	۱۶	۳	۱۶	۱۵/۶	۸۴/۳۵
	۳	۲	۲	۴	۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴/۴	۱۱۷/۷۰
	۴	۲	۲	۵	۳	۲۳	۲۰	۲۳	۲۳/۲	۵۳/۶۶
	۵	۲	۲	۶	۳	۲۴	۲۳	۲۷	۲۷/۶	۱۰۵/۱۲
	۶	۲	۲	۷	۳	۲۸	۳۵	۲۹	۲۸/۶	۱۸۲/۳۲۶
	۷	۳	۳	۲	۳	۶	۱۱۳	۷	۷/۲	۹۵/۴۹
	۸	۳	۳	۳	۳	۲۵	۱۵۰	۲۵	۲۵/۲	۱۲۳/۵۴
	۹	۳	۳	۴	۳	۲۳	۲۷۰	۲۳	۲۳/۴	۱۴۷/۱۷
	۱۰	۳	۳	۵	۳	۲۷	۱۹۰۳	۲۹	۳۰/۲	۱۶۴/۱۰۳
Medium Problem	۱۱	۴	۴	۲	۳	---	---	۸	۸	۲۵۹/۶۳
	۱۲	۴	۴	۳	۳	---	---	۳۴	۳۴/۲	۲۶۱/۳۰
	۱۳	۴	۴	۴	۳	---	---	۲۹	۲۹/۸	۲۹۹/۸
	۱۴	۵	۵	۲	۳	---	---	۱۰	۱۰/۶	۲۳۸/۳۳
	۱۵	۵	۵	۳	۳	---	---	۳۷	۳۷/۶	۲۴۷/۵۶
	۱۶	۵	۵	۴	۳	---	---	۴۲	۴۲/۲	۲۶۹/۲۲
	۱۷	۷	۷	۲	۳	---	---	۴۴	۴۴	۳۰۲/۳۱
	۱۸	۷	۷	۳	۳	---	---	۵۰	۵۰/۲	۳۳۲/۶
	۱۹	۱۰	۱۰	۲	۳	---	---	۲۸	۲۸/۴	۳۵۴/۶
	۲۰	۱۰	۱۰	۳	۳	---	---	۶۷	۶۷/۴	۳۹۹/۰۲
Large Problem	۲۱	۱۴	۱۴	۲	۳	---	---	۳۳	۳۴/۲	۷۶۸/۳
	۲۲	۱۴	۱۴	۳	۳	---	---	۹۳	۹۵/۴	۷۹۸/۴
	۲۳	۱۶	۱۶	۲	۳	---	---	۳۶	۳۶/۸	۸۱۴/۳
	۲۴	۱۶	۱۶	۳	۳	---	---	۱۰۳	۱۰۳/۸	۸۲۵/۴
	۲۵	۱۷	۱۷	۲	۳	---	---	۴۰	۴۱	۸۴۰/۳
	۲۶	۱۷	۱۷	۳	۳	---	---	۱۰۴	۱۰۵/۲	۸۶۹/۶۹
	۲۷	۱۸	۱۸	۲	۳	---	---	۴۸	۴۸/۲	۹۰۲/۳۳
	۲۸	۱۸	۱۸	۳	۳	---	---	۱۱۸	۱۱۸/۴	۹۳۴/۵
	۲۹	۲۰	۲۰	۲	۳	---	---	۱۳۳	۱۳۳/۶	۹۵۵/۴
	۳۰	۲۰	۲۰	۳	۳	---	---	۱۲۷	۱۲۷/۲	۹۹۹/۱۲



## منابع

1. Beheshtinia, M.A., Ghasemi, A. and Farokhnia, M. (2016). "Production and Transportation Scheduling and Allocation of Orders in the Supply Chan", *Journal of Industrial Engineering*, University of Tehran, Vol.50, No.2, PP. 191-203.
2. YousefiBabadi, A. and Shishebori, D. (2015). "Robust Optimization of integrated reverse logistic network design at uncertain conditions", *Journal of Industrial Engineering*, University of Tehran, Vol.49, No.2, PP. 299-313.
3. Kim, H.J., Lee, D.H. and Xirouchakis, P. (2007). "Disassembly scheduling: literature review and future research directions." *International Journal of Production Research*, Vol.45, No.18-19, PP.4465-4484.
4. Brennan, L., Gupta, S.M. and Taleb, K.N. (1994). "Operations planning issues in an assembly/disassembly environment, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol.14, No.9, PP.57-67.
5. Duta, L., Filip, F.G. and Popescu, C. (2008), Evolutionary programming in disassembly decision making", *Int. J. Comput. Commun. Control*, Vol.3, No.3, PP.282-286.
6. Dondo, R.G. and Méndez, C.A. (2016). "Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.88, No.???, PP.170-184.
7. Osmani, A. and Zhang, J. (2017), Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain– A logistic case study in Midwestern United States", *Land Use Policy*, Vol.61, No.1, PP.420-450.
8. Giri, B.C., Chakraborty, A. and Maiti, T. (2017). Pricing and return product collection decisions in a closed-loop supply chain with dual-channel in both forward and reverse logistics", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.42, No.???, PP.104-123.
9. Gungor, A. and Gupta, S.M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures", *International Journal of Production Research*, Vol.39, No.7, PP.1427-1467.
10. Gupta, S.M., McGovern, S.M. and Kamarthi, S.V.J. (2003). "Solving disassembly sequence planning problems using combinatorial optimization", In *Proceedings of the 2003 Northeast Decision Sciences Institute Conference* (PP. 178-180).
11. Kongar, E. and Gupta, S.M. (2002), A multi-criteria decision making approach for disassembly-to-order systems", *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol.11, No.2, PP.171-183.
12. González, B. and Adenso-D. B. (2006). "A scatter search approach to the optimum disassembly sequence problem", *Computers and Operations Research*, Vol.33, No.6, PP.1776-1793.
13. Ziaee, M. and Sadjadi, S.J. "Mixed binary integer programming formulations for the flow shop scheduling problems. A case study: ISD projects scheduling", *Applied mathematics and computation*, Vol.185, No.1, PP.218-228.
14. Ilgin, M.A. and Gupta, S.M. (2011). "Recovery of sensor embedded washing machines using a multi-kanban controlled disassembly line". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.27, No.2, PP.318-334.
15. Gonnuru, V.K. (2013). "Disassembly planning and sequencing for end-of-life products with RFID enriched information", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.29, No.3, PP.112-118.
16. Li, X. et al. (2015). "Assembly oriented control algorithm of collaborative disassembly and assembly operation in collaborative virtual maintenance process", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.36, No.1, PP.95-108.
17. Nonomiya, H. and Tanimizu, Y. (2017). "Optimal Disassembly Scheduling with a Genetic Algorithm", *Procedia CIRP*, Vol.61, No.1, PP.218-222.
18. Abdeljaouad, M.A. et al. (2015). "Job-shop production scheduling with reverse flows", *European Journal of Operational Research*, Vol.244, No.1, PP.117-128.
19. Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., Hajiaghaei-Keshteli, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011). "Solving a capacitated fixed-charge transportation problem by artificial immune and genetic

algorithms with a Prüfer number representation”, *Expert Systems with Applications*, Vol.38, No.8, PP.10462-10474.

20. Taillard, E. (1993). “Benchmarks for basic scheduling problems”. *European Journal of Operational Research*, Vol.64, No.2, PP.278-285.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Flexible Job-shop Scheduling
2. Refurbishing
3. Cannibalizing
4. Resail
5. Disassembly Line Balancing Problem
6. Collaborative Virtual Maintenance
7. Pre-emption
8. Mixed-Integer Linear Programming
9. Genetic Algorithm
10. Crossover
11. Mutation
12. Taguchi Experimental Design