نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269
نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
سال دوازدهم، شماره بیست و چهارم، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۵-۱۵
www.ier.basu.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.28743.2153

مدل‌سازی ریاضی برای مسأله برنامه‌ریزی تولید با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان در یک شرکت قطعه‌سازی خودرو

مسعود لطیفیان[۱]، رضا توکلی مقدم[۲*]، امیر حسین لطیفیان[۳]، مهدی کاشانی[۴]

۱. دکتری مدیریت تکنولوژی، گروه مدیریت تکنولوژی، دانشکده مدیریت، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دکتری مدیریت انتقال تکنولوژی، گروه مدیریت تکنولوژی، دانشکده مدیریت، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴. کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۲/۱۰/۱۱
پذیرش ۱۴۰۳/۰۲/۱۳
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
سیستم تولید سلولی
برنامه‌ریزی تولید
بهینه‌سازی ریاضی
قابلیت اطمینان
الگوریتم ژنتیک

خلاصه

در زمینه‌ی مسأله تشکیل سلول، مقالات و تحقیقات اندکی به خرابی یا قابلیت اطمینان ماشین‌ها پرداخته‌اند. عموماً در مسأله تشکیل سلول فرض براین است که اکثر ماشین‌ها ۱۰۰ درصد قابل اطمینان هستند، با این وجود در مسائل واقعی چنین اتفاقی نمی‌افتد. خرابی ماشین‌ها می‌تواند به‌شدت بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد و باعث می‌شود کارها در تاریخ مقرر انجام نپذیرد. سیستم تولید سلولی، یکی از فلسفه‌های فناوری گروهی است که با تقسیم یک سیستم بزرگ به چندین زیرسیستم کوچک، کنترل و مدیریت سیستم تولید را تسهیل می‌کند. هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسأله برنامه‌ریزی تولید در واحدهای صنعتی با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان است که شرایط استفاده از مسیرهای جایگزین برای قطعات را ایجاد می‌نماید و منجربه کمینه‌سازی هزینه‌های ازدست‌رفته و همچنین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود. ازآنجائی‌که مسأله پیشنهادی از نوع چندجمله‌ای غیرقطعی سخت است برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. مدل ریاضی ارائه شده با حداقل کردن هزینه‌های خرابی ماشین‌ها باعث کاهش هزینه‌های سیستم، نگهداری و تعمیرات، و حرکات بین و درون سلولی گردید.

۱. مقدمه

پس از انقلاب صنعتی و افزایش رقابت بین تولیدکنندگان و بالا رفتن انتظارات مشتریان نیاز به تحول عظیم در سیستم‌های تولیدی احساس شد. در کنار این مسأله به‌وجود آمدن مسائلی چون کاهش زمان راه‌اندازی، افزایش حجم تولید، افزایش تنوع قطعات، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری در ابزار و تجهیزات، کاهش فضای موردنیاز، کنترل سراسری بهتر و موارد بسیار دیگر، ابعاد جدیدی را در بازار رقابت تولیدکنندگان به‌وجود آورد که استراتژی تکنولوژی گروهی یکی از راهبردهای طراحی شده برای پاسخ‌گویی به این نیازها است [۱].

به‌عنوان یک کاربرد عملی از مفهوم تکنولوژی گروهی می‌توان به یک سیستم تولید سلولی[۲] (CMS) اشاره کرد که به شرکت سازنده در زمینه‌ی کاهش کمبود قطعات، زمان راه‌اندازی و هزینه‌های سیستم، زمان‌های تکمیل، الزامات فضای کارخانه و همچنین مسیرهای مواد کمک می‌کند. به‌طور کلی، یک CMS را می‌توان با چهار تصمیم فرعی مهم طراحی کرد: طرح‌بندی گروهی، تشکیل

* نویسنده مسئول: رضا توکلی مقدم
تلفن: ۸۲۰۸۴۱۸۳-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: tavakoli@ut.ac.ir

2. Cellular Manufacturing System

سلول، زمان‌بندی گروهی و مدیریت اپراتور [۲،۳]. بسیاری از مطالعات قبلی در این زمینه با حل مشکل تشکیل سلول سروکار داشتند. بررسی کامل آثار مربوط به تشکیل سلول را می‌توان در تحقیقات [۲، ۶-۴] یافت. علاوه‌بر این، دو مشکل طرح‌بندی گروهی و زمان‌بندی گروهی از طریق چارچوب CMS ارائه شده برای رسیدن به یک سیستم تولید بهینه در دنیای واقعی بررسی می‌شوند [۷].

سیستم‌های سلولی انواع مختلفی از مزیت‌ها را نسبت‌به سیستم‌های تولید سنتی ارائه می‌دهند. از مزایای اصلی سیستم تولید سلولی می‌توان به کنترل تولید، کنترل کیفیت بهتر محصولات، افزایش انعطاف در تولید، نیاز به فضای کمتر در تولید، کاهش زمان راه‌اندازی، زمان تولید، موجودی در جریان ساخت و هزینه‌های جابه‌جایی مواد اشاره کرد [۸]. یکی از جدیدترین سیستم‌های ساخت، تولید سلولی است. هدف تولید سلولی دستیابی به مزایای سیستم تولید محصول محور با حجم و تنوع متوسط با برنامه‌ریزی یک گروه (سلول) از ماشین‌ها با گروهی از قطعات است [۹].

در مسأله تشکیل سلول باید جنبه‌های متعددی از مسأله را مدنظر قرار داد، از همه مهم‌تر این‌که ماشین‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها و ابزار تخصیص‌یافته به آن‌ها مهم‌ترین مسائلی است که باید به درستی به آن برخورد نمود [۱۰]. قابلیت اطمینان یک جزء، عبارت است از احتمال این‌که آن جزء کار موردنظر را تحت شرایط معین در فاصله‌ی زمانی مشخصی انجام دهد. چون‌که سیستم‌های موردنظر تعمیرپذیر هستند مشخص است که با افزایش استفاده از سیستم و همچنین افزایش عمر آن، قابلیت اطمینان سیستم کاهش خواهد یافت (نرخ خرابی افزایش خواهد یافت) [۱۱]. لذا توجه به خرابی ماشین‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل در موفقیت سازمان و درنهایت ارتقاء سطح کمی وکیفی سازمان می‌باشد. قابلیت اطمینان ماشین‌های چندکاره یکی از عوامل مهمی است که امروزه بسیاری از مدیران به‌دنبال راه‌هایی برای بهینه‌سازی آن می‌باشند [۱۲]. جنبه مهم دیگر در زمینه‌ی سیستم تولید سلولی بحث مربوط به هزینه است. این هزینه‌ها شامل هزینه جابه‌جایی بین سلولی است. با درنظر گرفتن موارد مطرح شده نیاز به طراحی بهینه یک سیستم تولید سلولی برای کاهش هزینه‌های نگهداری و جابه‌جایی با درنظرگرفتن قابلیت اطمینان برای ماشین‌ها به‌منظور کاهش هزینه‌های خرابی در این حوزه می‌باشد.

بنابراین هدف از پژوهش حاضر ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسأله برنامه‌ریزی تولید در واحدهای صنعتی با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های جابه‌جایی بین سلولی است که این امر منجربه کمینه‌سازی هزینه‌های ازدست‌رفته و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود. ازآنجاکه مسأله پیشنهادی از نوع NP-Hard است برای حل آن از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در تحقیق پیش‌رو به‌عنوان نوآوری ابتدا یک مدل ریاضی جهت حداقل کردن خرابی ماشین‌ها و میانگین زمان بین دو خرابی ماشین‌ها ارائه شده و قابلیت اطمینان مسیر به‌صورت مجزا درنظرگرفته شد و در گام دوم با مفهوم ناهمگونی سعی در تخصیص ماشین‌ها به سلول‌های متفاوت داشته تا از هزینه بیش‌ازحد خرابی جلوگیری شود. لازم به ذکر است که این تحقیق از نوع مطالعه موردی بوده و داده‌های موردنیاز برای تست مدل پیشنهادی براساس مفروضات و نظرات خبرگان شبیه‌سازی شده است.

۲. پیشینه تحقیق

در ادامه در جدول (۱) خلاصه بررسی پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع تحقیق پیشنهادی در سال‌های اخیر از منظر نوع مسأله و روش‌های حل مورد استفاده اشاره شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تاکنون تحقیقات فراوانی در حوزه طراحی تولید سلولی پذیرفته است و مدل‌های زیادی برای مناسب‌سازی مسأله با دنیای واقعی بررسی گردیده است. ازآنجایی‌که در سیستم‌های تولید سلولی، قطعات توسط گروهی از ماشین‌های وابسته به یکدیگر پردازش می‌شوند، بنابراین قابلیت اطمینان ماشین‌ها نقش مهمی در کارکرد سلول ایفا می‌کنند [۱۳]. لذا در این پژوهش تلفیقی از سیستم تولید سلولی و قابلیت اطمینان ماشین‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش به معرفی نمادها، پارامترها و مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت مسأله برنامه‌ریزی تولید پرداخته شده است:

مجموعه‌ها

I	نماد مجموعه قطعات
r	نماد مجموعه مسیرهای تولید قطعات
s	نماد مجموعه عملیات قطعات در مسیرهای تولید
j	نماد مجموعه ماشین‌ها
k	نماد مجموعه سلول‌ها

پارامترهای مدل

$C1_i$	هزینه حمل‌ونقل بین سلولی قطعه i
$C2_i$	هزینه حمل‌ونقل درون سلولی قطعه i
α_{ri}	هزینه بارگذاری قطعه i در مسیر تولید r
D_i	میزان تقاضای قطعه i
λ_{sirj}	زمان انجام عملیات s روی قطعه i در مسیر r توسط ماشین j
L_k	حد پایین تعداد ماشین‌ها در سلول k
U_k	حد بالای تعداد ماشین‌ها در سلول k
a_{sirj}	برابر یک است اگر عملیات s روی قطعه i در مسیر r توسط ماشین j بتواند انجام شود و در غیر این صورت برابر صفر است
B_j	هزینه شکست ماشین j

جدول (۱): خلاصه بررسی پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع

منابع	سال	نوع مسأله				روش حل			متدولوژی/ رویکرد
		تئوری تصمیم	بهینه‌سازی ریاضی	تحلیل آماری	سایر موارد	قطعی	غیرقطعی		
							ابتکاری	فراابتکاری	
فاروقی و همکاران [۱۴]	۲۰۱۹		✓				✓		رویکرد بهینه‌سازی استوار
امیرقدسی و همکاران [۱۵]	۲۰۲۰	✓	✓			✓			روش بهترین-بدترین، روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای، مدل برنامه‌ریزی آرمانی
گلی و همکاران [۴]	۲۰۲۱		✓					✓	الگوریتم ژنتیک ترکیبی و یک الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ
داهویی و همکاران [۱۶]	۲۰۲۱	✓	✓			✓			روش ویکور، روش ماباک، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح
خو و همکاران [۱۸]	۲۰۲۱				✓	✓			مدل‌سازی معادلات ساختاری
رفیعی و همکاران [۷]	۲۰۲۲		✓				✓		رویکرد بهینه‌سازی استوار
لطیفیان و همکاران [۱۹]	۲۰۲۲	✓	✓			✓			سوارا فازی، کوپراس فازی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط چندهدفه
کاظمی و همکاران [۲۰]	۲۰۲۲	✓	✓					✓	روش محدودیت اپسیلون تقویت شده و الگوریتم NSGA-II
عرب احمدی و همکاران [۲۱]	۲۰۲۳	✓	✓					✓	روش محدودیت اپسیلون تقویت شده و الگوریتم NSGA-II
مطالعه حاضر			✓					✓	الگوریتم ژنتیک

$MTBF_j$ میانگین زمان بین دو شکست ماشین j

Rel_{jr} قابلیت اطمینان ماشین j در مسیر تولید r

T_j سود حاصل از صرفه‌جویی در زمان تولید توسط ماشین نوع j

وجه تمایز عمده مطالعه حاضر با سایر مطالعات صورت گرفته می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱- لحاظ نمودن قابلیت اطمینان (در بکارگیری) ماشین آلات
۲- کاهش هزینه های جا به جایی بین سلولی
۳- استفاده از روش سناریو محور جهت مقابله با غیر قطعی بودن تقاضای مشتریان
۴- بهینه سازی پاسخگویی به تقاضا در جهت حداقل کردن سفارشات عقب افتاده

لازم به ذکر است که موارد فوق زمینه تطابق بیشتر مدل با شرایط واقعی را فراهم آورده است.

متغیرهای تصمیم

R_{ir} برابر یک است اگر مسیر r برای تولید قطعه i آماده‌سازی شود و در غیر این صورت برابر صفر است.

Z_{jk} برابر یک است اگر ماشین j به سلول k تخصیص یابد و در غیر این صورت برابر صفر است.

X_{srijk} برابر یک است اگر عملیات s روی قطعه i در مسیر r توسط ماشین j انجام شود و در غیر این صورت برابر صفر است.

$W_{s(s+1)rijj'kk'}$ متغیر خطی‌سازی

تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\begin{aligned}\text{Min } Z &= \sum_{i=1}^{P}\sum_{r=1}^{R_i}\sum_{k=1}^{C}\sum_{\substack{k'=1\\k'\neq k}}^{C}\sum_{j=1}^{S_{ir}-1}\sum_{j'=1}^{M}\sum_{s=1}^{M} C1_i\, D_i\, W_{s(s+1)rijj} \\ &+ \sum_{i=1}^{P}\sum_{r=1}^{R_i}\sum_{k=1}^{C}\sum_{\substack{k'=1\\k'\neq k}}^{C}\sum_{j=1}^{S_{ir}-1}\sum_{\substack{j'=1\\j\neq j'}}^{M}\sum_{s=1}^{M} C2_i\, D_i\, W_{s(s+1)rijj'} \\ &+ \sum_{j=1}^{S_{ir}-1}\sum_{k=1}^{M}\sum_{i=1}^{P}\sum_{r=1}^{R_i}\sum_{s=1}^{M}\frac{R_{ir}\, D_i\, \lambda_{sirj}\, B_j}{MTBF_j} \\ &+ \sum_{r=1}^{R_i}\sum_{i=1}^{P}\alpha_{ri}\, R_{ir}\end{aligned} \quad (۱)$$

$$-\sum_{j=1}^{M}\sum_{r=1}^{R_i}\sum_{i=1}^{P}\sum_{s=1}^{M}\sum_{k=1}^{M} Rel_{jr}\, T_j\, X_{srijk}$$

s.t.

$$\sum_{r=1}^{R_i} R_{ir} = 1 \qquad \forall i \qquad (۲)$$

$$\sum_{k=1}^{C}\sum_{j=1}^{M} a_{sirj}\, X_{srijk} = R_{ir} \qquad \forall s,r,i \qquad (۳)$$

$$X_{srijk} \le Z_{jk} \qquad \forall r,s,i,j,k \qquad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^{M} Z_{jk} \ge L_k \qquad \forall k \qquad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^{M} Z_{jk} \le U_k \qquad \forall k \qquad (۶)$$

$$\sum_{k=1}^{M} Z_{jk} = 1 \qquad \forall j \qquad (۷)$$

$$X_{srijk} + X_{(s+1)rij'k'} \le 1 + W_{s(s+1)rijj'kk'} \qquad \forall r,s,i,j,k,j',k' \qquad (۸)$$

$$X_{srijk} + X_{(s+1)rij'k'} \le 2\, W_{s(s+1)rijj'kk'} \qquad \forall r,s,i,j,k,j',k' \qquad (۹)$$

$$R_{ir}, X_{srijk}, Z_{jk}, W_{s(s+1)rijj'kk'} \in \{0,1\} \qquad \forall r,s,i,j,k,j',k' \qquad (۱۰)$$

تابع هدف (عبارت (۱)) به کمینه‌سازی هزینه‌ها می‌پردازد. قسمت اول مربوط به هزینه جابه‌جایی بین‌سلولی است. قسمت دوم مربوط به هزینه جابه‌جایی درون‌سلولی است. قسمت سوم هزینه خرابی و شکست ماشین‌ها را محاسبه می‌کند. قسمت چهارم مربوط به هزینه نصب ماشین‌ها است و درنهایت قسمت پنجم قابلیت اطمینان ماشین‌ها را محاسبه می‌کند.

محدودیت (۲) تضمین می‌کند هر قطعه تنها از یک مسیر تولید شود. به این صورت قطعه تولیدی تنها در یک سلول و توسط یک ماشین تولید شود. محدودیت (۳) و محدودیت (۴) تضمین می‌کند اگر ماشینی به سلولی تخصیص پیدا کرد عملیات آن نیز در همان سلول و مسیر انجام شود. محدودیت‌های (۵) و (۶) حد بالا و پایین یک سلول را نشان می‌دهد و محدودیت (۷) تضمین می‌کند که هر ماشین تنها به یک سلول اختصاص یابد. عبارات (۸) الی (۱۰) نیز مربوط به محدودیت‌های خطی‌سازی مدل هستند.

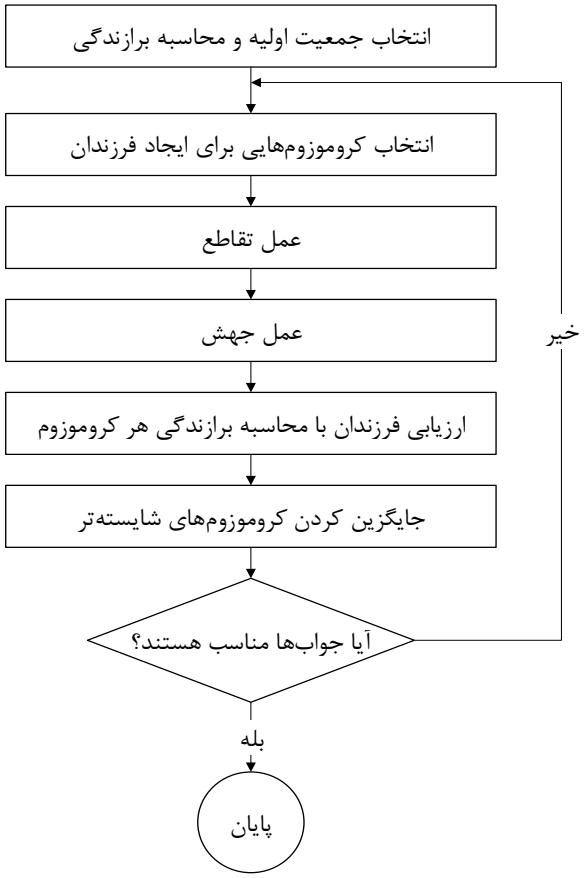
۴. معرفی الگوریتم ژنتیک

ایده‌ی اصلی الگوریتم‌های ژنتیک بر پایه‌ی نظریه‌ی داروین است. براساس نظریه‌ی داروین نسل‌هایی که از ویژگی‌ها و خصوصیات برتری نسبت‌به نسل‌های دیگر برخوردارند شانس بیشتری نیز برای بقا و تکثیر خواهند داشت و ویژگی‌ها و خصوصیات برتر آن‌ها به نسل‌های بعدی آنان نیز منتقل خواهد شد. جواب مسأله‌ای که از طریق الگوریتم ژنتیک حل می‌شود مرتباً بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از جواب‌ها که از طریق کروموزوم‌ها نشان داده می‌شود شروع می‌گردد. در این الگوریتم جواب‌های حاصل از یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می‌شود که عمل تولید نسل جدید با ترکیب و یا جهش ۴ همراه خواهد بود. در این فرآیند امید است که جمعیت جدید نسبت‌به جمعیت قبلی بهتر باشد. انتخاب بعضی از جواب‌ها (کروموزوم‌ها) از میان کل جواب‌ها (والدین) به‌منظور ایجاد جواب‌های جدید (فرزندان) براساس میزان مطلوبیت آن‌ها است که این کار با استفاده از تابع برازش صورت می‌گیرد. طبیعی است که جواب‌های مناسب‌تر شانس بیشتری برای تولید مجدد داشته باشند. این فرآیند تا برقراری شرطی که ازپیش تعیین شده است (مانند تعداد جمعیت‌ها یا میزان بهبود جواب) ادامه می‌یابد [۲۲].

به‌طور کلی مراحل الگوریتم ژنتیک به‌شرح شکل (۱) نمایش داده شده است. در ادامه نیز گام‌های الگوریتم ژنتیک برای مسأله مورد بررسی در این پژوهش یعنی تخصیص مناسب ماشین‌ها به سلول‌ها و قطعات به سلول‌ها توضیح داده می‌شود.

۴-۱. ساختار کروموزوم

کروموزوم مورد استفاده برای حل این مسأله بدین صورت ساختار یافته است که در ابتدا به تعداد ماشین‌ها مورد استفاده در سیستم، ژن یا همان خانه‌های قابل مقداردهی درنظر گرفته می شود. درواقع شماره هر ژن بیانگر شماره ماشین مورد استفاده بوده و اعداد داخل هر خانه یا همان ژن‌های کروموزوم، بیانگر سلولی است که ماشین مربوطه بدان تخصیص می‌یابد.



شکل (۱). نمودار مراحل الگوریتم ژنتیک

بر طبق شکل (۲)، برای کروموزوم مورد استفاده در حل مسأله، برای مثال ماشین شماره ۱ به سلول ۵ تخصیص یافته است. به‌عنوان مثالی دیگر ماشین شماره ۲ و شماره ۵ به سلول ۲ تخصیص یافته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود امکان تخصیص یک ماشین به بیشتر از یک سلول که درواقع همان پاسخ‌های ناموجه مسأله است، وجود ندارد.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۵	۲	۷	۱	۲	۳	۴	۳

شکل (۲). نمایشی از کروموزوم طراحی شده برای حل مسأله

۴-۲. تولید جمعیت اولیه

در این پژوهش، نیز جمعیت به‌شکل تصادفی تولید شده و تعداد اعضای جمعیت، ۲,۵ برابر طول کروموزوم (تعداد ژن‌ها) است. برای مثال در مسأله‌ای با ۸ ماشین، ابتدا کروموزومی با طول ۸ درنظر گرفته و سپس اعداد صحیح تصادفی بین ۱ تا ۸ در سلول‌ها قرار می‌گیرد. درنهایت به اندازه ۲,۵ برابر تعداد ژن‌ها کروموزوم تولید شده و جمعیت حاصل می‌گردد که در این مثال معادل ۲۰ خواهد بود، مطابق شکل (۳).

۱	۲	۳	۱
۲	۳	۱	۲
۴	۴	۱	۲
۴	۱	۲	۱
۲	۲	۴	۳
۱	۲	۲	۳
۴	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۱
۴	۲	۴	۲
۱	۳	۲	۴

شکل (۳). نمایشی از نمونه‌ی جمعیت اولیه

۴-۳. تابع برازندگی

قبل از انجام عملگرهای تقاطع و جهش باید هر کروموزوم توسط تابع هدف مسأله به‌منظور محاسبه احتمال حضور در نسل بعد، ارزیابی گردد. از آن جا که الگوریتم ژنتیک با تابع برازندگی بیشینه سازی کار می کند و تابع این مسأله از جنس کمینه‌سازی است، بنابراین باید تابع مسأله را به بیشینه سازی تبدیل نمود. بنابراین برای حل مسأله از تابع برازندگی زیر استفاده می شود. که در آن T_i تابع هدف مسأله اصلی است.

$$F_i = \frac{1}{1+T_i} \qquad (۱۱)$$

۴-۴. عملگرهای ژنتیک

برای تولید نسل بعدی، یک مجموعه‌ی جدید از کروموزوم‌ها که فرزندان نام دارند، توسط عملگرهای ژنتیکی مانند: جایگزینی، تقاطع و جهش تولید می‌شوند.

۴-۴-۱. عملگر جایگزینی

هدف از جایگزینی، انتخاب والدین شایسته در هر نسل برای حضور در نسل بعد است. در این پژوهش برای جایگزینی از استراتژیِ نمونه گیری تصادفی باقیمانده بدون سیاست جایگزینی استفاده می‌شود. بر طبق این روش؛ ابتدا برای هر کروموزوم طبق فرمول زیر و براساس احتمال وجود هر کروموزوم در نسل بعد، کپی‌هایی تولید می‌شود. که تعداد این کپی‌ها از فرمول زیر حاصل می‌گردد:

$$e(i) = P_i \times Popsize \qquad (۱۲)$$

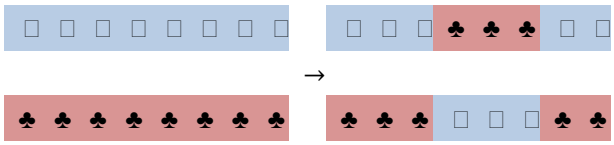
که در آن:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum F_i} \qquad (۱۳)$$

در این روش ابتدا به تعداد قسمت صحیح $e(i)$، از هر کروموزوم یک کپی تولید شده و در استخر لقاح قرار داده می‌شود؛ سپس براساس قسمت اعشاری کروموزوم‌ها که ابتدا به شکل اعداد بین ۰ و ۱ استاندارد شده اند، قسمت باقی‌مانده و خالی استخر لقاح پر می شود. بدین منظور ابتدا عددی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود و براساس اعداد استاندارد شده‌ی تولیدی از قسمت کسری $e(i)$ به نحوی که از هر کروموزوم حداکثر یک کپی اضافه تهیه شود، استخر لقاح، تکمیل می‌گردد. در این مسأله اندازه استخر لقاح برابر با اندازه جمعیت اولیه است.

۴-۴-۲. عملگر تقاطع

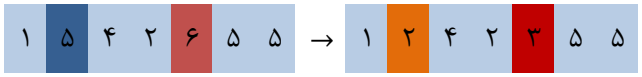
با استفاده از عملگر ترکیب، دو کروموزوم با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا کروموزومی بهتر به دست آید. در این تحقیق عملگر تقاطع دو نقطه‌ای براساس شکل (۴) استفاده شده است.



شکل (۴). نمایشی از عملگر تقاطع

۴-۴-۳. عملگر جهش

در الگوریتم ژنتیک بعد از این‌که یک عضو جدید به‌وجود آمد، هر ژن آن با احتمال جهش (Pm) که توسط کاربر تعیین می‌شود، جهش می‌یابد. اگر مرحله جهش صورت نگیرد، فرزندان بلافاصله بعد از ترکیب و بدون هیچ تغییری به‌وجود می‌آیند. اگر تغییر صورت بگیرد، یک یا بیش‌از یک قسمت از کروموزوم تغییر می‌کند. عملگر جهش فقط بر روی یک کروموزوم عمل می‌کند و به‌صورت تصادفی یکی از ژن‌های آن کروموزوم را تغییر می‌دهد. شکل (۵) نمایشی از عملگر جهش است.



شکل (۵). نمایشی از عملگر تقاطع

۴-۵. انتخاب نسل جدید

پس‌از انجام عملگرهای ژنتیک که به‌طور کامل توضیح داده شده است، رشته‌ای جدید که فرزندان نامیده می‌شود، تولید خواهد شد. فرزندان با کمک تابع برازندگی ارزیابی شده و فرزندانی که دارای برازندگی کم هستند، توسط استراتژی بیان شده جایگزین می‌گردند. هدف از استراتژی جایگزینی، تولید نسلی است که از متوسط نسل قبل بهتر است.

۴-۶. معیار توقف

الگوریتم ژنتیک تا زمانی‌که معیار توقف برآورده شود به تولید نسل ادامه می‌دهد. در این پژوهش دو معیار توقف درنظر گرفته شده است. ۱) تولید تعداد نسل ازپیش تعیین شده؛ ۲) عدم بهبود در تعداد نسل ازپیش تعیین شده. هر کدام از معیارهای فوق حاصل شدند، الگوریتم به پایان رسیده و جواب حاصل گزارش می‌شود.

۵. نتایج

در این بخش به ارائه نتایج محاسباتی تحقیق خواهیم پرداخت به‌طوری‌که ابتدا مسأله در اندازه کوچک در نرم‌افزار گمز مورد حل قرار گرفت و سپس توسط الگوریتم ژنتیک نیز حل گردید. جدول (۲) حل مسأله در ابعاد کوچک مسأله را نشان می‌دهد.

جدول (۲). ابعاد مسأله برای واحد صنعتی مورد مطالعه (مثال ۱)

تعداد سلول (k)	تعداد ماشین‌ها (j)	تعداد عملیات (s)	تعداد مسیرها (r)	تعداد قطعات (i)
۲	۹	۴	۴	۸

در راستای حل مدل مقدار پارامترها برای مسأله موردی به‌شرح جدول (۳) ارائه شده است. پس از حل مدل در نرم‌افزار GAMS نتایج مربوط به واحد صنعتی مورد مطالعه گزارش می‌گردد که مهم‌ترین آن تخصیص مسیر جایگزین برای جلوگیری از خرابی ماشین‌ها و تقاضای ازدست‌رفته است که این مقدار به‌شرح جدول (۴) است.

همان‌طور که در تابع هدف بالا قابل مشاهده است هر قطعه فقط به یک مسیر تخصیص پیدا کرده است که نشانه از جواب درست مدل دارد. حال پس‌از اینکه قطعه به مسیر تخصیص پیدا کرد حال باید متغیر تخصیص بهینه عملیات بر روی قطعه در هر مسیر را نشان دهیم که به‌شرح جدول (۵) است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، عملیات مختلف توسط ماشین‌های مختلف در سلول‌های مختلف بر روی قطعات مختلف انجام شده است و مسیر هر قطعه نیز تعیین شده است. حال پس‌از این‌که این متغیر تعیین شد به تعیین تخصیص ماشین به سلول خواهیم پرداخت که مطابق با جدول (۶) است. این جدول نشان می‌دهد که هر ماشین در یک سلول قرار گرفته است و بیانگر همان چیزی است که در مدل مشاهده کردیم.

جدول (۳). اطلاعات ورودی مدل (مثال ۱)

C_{1_i}	در بازه [10; 30] درنظر گرفته شده است – بر مبنای میلیون تومان
C_{2_i}	در بازه [10; 30] درنظر گرفته شده است – بر مبنای میلیون تومان
α_{ri}	در بازه [900; 1,000] درنظر گرفته شده است – بر مبنای میلیون تومان
D_{il}	در بازه [5; 135] درنظر گرفته شده است – بر مبنای عدد
D_{im}	در بازه [10; 145] درنظر گرفته شده است – بر مبنای عدد
D_{iu}	در بازه [15; 150] درنظر گرفته شده است – بر مبنای عدد
λ_{sirj}	در بازه [1,000; 3,000] درنظر گرفته شده است – بر مبنای ثانیه
L_k	برابر با ۱
U_k	برابر با ۵
B_j	در بازه [1,000; 2,000] درنظر گرفته شده است – بر مبنای میلیون تومان
$MTBF_j$	در بازه [3,000; 9,000] درنظر گرفته شده است – بر مبنای ثانیه
Rel_{jr}	در بازه [0.85, 1] درنظر گرفته شده است – بر مبنای درصد
T_j	در بازه [30; 60] درنظر گرفته شده است – بر مبنای میلیون تومان

جدول (۴). مسیر بهینه تولید برای تخصیص قطعه به مسیر

	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳
قطعه۱		×	
قطعه۲		×	
قطعه۳	×		
قطعه۴		×	
قطعه۵	×		
قطعه۶		×	
قطعه ۷			×
قطعه ۸	×		

در نهایت نیز مقدار بهینه تابع هدف به‌ازای مقادیر تقاضا به‌شرح جدول (۷) گزارش گردید. حال بعد از این‌که مسأله در نرم‌افزار گمز حل گردید مسأله را می‌خواهیم در ابعاد بالا توسط الگوریتم فراابتکاری حل کنیم. در این پژوهش، الگوریتم پیشنهادی تحقیق به زبان سی شارپ، و به‌کمک نرم‌افزار ویژوال استودیو ۲۰۱۲ پیاده‌سازی شده است. برنامه‌ی مزبور بر روی لپ تاپ با پردازنده Intel Core i7 با سرعت ۳,۲ گیگا هرتز و بر روی ویندوز ۷ اجرا شده است. طبق مطالب بیان شده برای حل مسأله پارامترهای الگوریتم ژنتیک به‌شرح جدول (۸) در نظر گرفته شد.

جدول (۵). تخصیص بهینه عملیات به قطعه و مسیر و ماشین

عملیات	قطعه	مسیر	ماشین	سلول	
				سلول ۱	سلول ۲
۱	۱	۲	۱		×
۱	۲	۲	۱		×
۱	۳	۱	۷	×	
۱	۴	۲	۱		×
۱	۵	۱	۱		×
۱	۶	۲	۱		×
۱	۷	۳	۱		×
۱	۸	۱	۱		×
۲	۱	۲	۱		×
۲	۳	۱	۷	×	
۲	۴	۲	۱		×
۲	۵	۱	۱		×
۲	۶	۲	۱		×
۲	۷	۳	۱		×
۲	۸	۱	۱		×
۳	۱	۲	۱		×
۳	۳	۱	۷	×	
۳	۴	۲	۱		×
۳	۵	۱	۱		×

جدول (۶). تخصیص بهینه ماشین به سلول

شماره ماشین	سلول ۱	سلول ۲
۱		×
۲		×
۳	×	
۴	×	
۵	×	
۶	×	
۷	×	
۸		×
۹		×

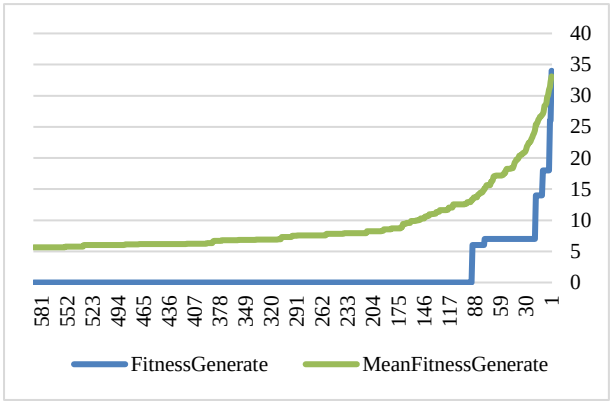
جدول (۷). مقادیر بهینه تابع هدف

تابع هدف با حد پایین تقاضا	تابع هدف با حد متوسط تقاضا	تابع هدف با حد بالای تقاضا
۶،۱۲۷	۶،۵۸۰	۶،۰۶۰

جدول (۸): مقادیر مربوط به پارامترهای الگوریتم ژنتیک

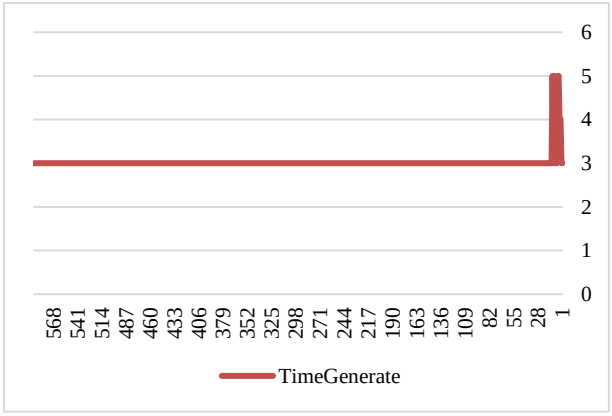
اندازه جمعیت	تعداد پاسخ‌های مشابه برای توقف حل مسأله	تعداد نسل	P_m	P_c
۲۰= ۸ × ۲،۵	۵۰۰	۳،۰۰۰	۰،۱	۰،۸۵

همچنین برای این‌که NP-Hard بودن مسأله اثبات شود مثال‌هایی در ابعاد مختلف توسط نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفت که در جدول (۹) بیان شده‌اند. شایان ذکر است m برابر با ماشین و p برابر با قطعه و r تعداد مسیر و c تعداد سلول و o تعداد عملیات است. همان‌طور که از این جدول مشاهده می‌کنیم نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک در ابعاد پایین به یک جواب واحد رسیدند اما در ابعاد بالا الگوریتم ژنتیک به‌خوبی در زمان مناسب به جواب بهینه همگرا شده است. در ادامه نیز معیارهای آنلاین حل مسأله توسط الگوریتم ژنتیک مطابق نمودارهای است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود که نرخ رسیدن به پاسخ نهایی بعد از تولید ۱۰۰ نسل به مقدار ثابتی رسیده است و میانگین پاسخ‌ها نیز در حال نزدیک شدن به جواب نهایی است. یعنی در اجراهای بیشتر، احتمالاً تمامی اعضای جمعیت برابر خواهند بود.



شکل (۶). نرخ پاسخ و میانگین برازندگی در هر نسل مثال ۱

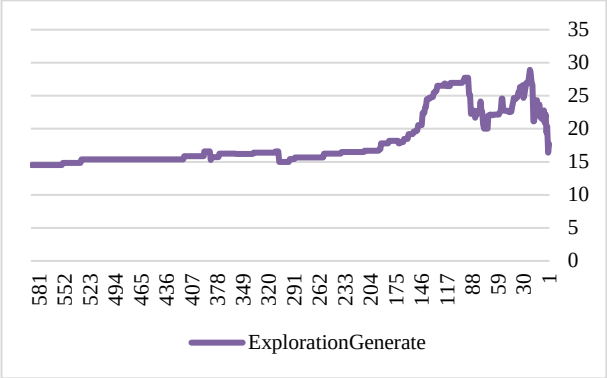
طبق شکل (۷) در برخی اجراهای نخست مدت‌زمان اجرای برنامه برای هر نسل متغیر بوده ولی به تدریج به مقداری ثابت رسیده است. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که در ابتدا تنوع بالا بوده و رفته رفته از تنوع در اعضای یک نسل کاسته می‌شود. این موضوع خود بیانگر اجرای درست ماهیت الگوریتم ژنتیک توسط برنامه است.



شکل (۷). مدت زمان اجرا برای هر نسل

جدول (۹): مقایسه نتایج و اعتبار سنجی مسأله

زمان حل ژنتیک	زمان حل گمز (ثانیه)	تابع هدف ژنتیک			تابع هدف گمز			ابعاد مسأله				
		بالا	وسط	پایین	بالا	وسط	پایین	s	c	r	p	m
۲	۱۰	۶۰۶۰	۶۵۸۰	۶۱۲۷	۶۰۶۰	۶۵۸۰	۶۱۲۷	۴	۲	۴	۸	۹
۱۰	۵۶۰	۹۶۶۳	۸۵۶۵	۷۴۸۵	۹۶۶۳	۸۵۶۵	۷۴۸۵	۳	۵	۸	۶	۱۰
۱۰	-	۱۳۶۵	۱۲۰۲۰	۹۵۶۵	-	-	-	۵	۸	۱۰	۱۰	۱۲
۲۰	-	۱۸۴۲۰	۱۵۶۵۰	۱۳۶۵۰	-	-	-	۵	۱۰	۱۰	۱۲	۱۴
۲۰	-	۱۹۴۵۳	۱۶۶۶۰	۲۵۶۵۰	-	-	-	۱۰	۱۰	۱۴	۱۴	۱۶



شکل (۸). میزان تنوع اعضای هر جمعیت در نسل‌های متوالی

مدل ریاضی ارائه شده با حداقل کردن هزینه‌های خرابی ماشین‌ها درواقع باعث کاهش کلیه هزینه‌های سیستم شد. همچنین با کاهش خرابی‌ها، منجربه کاهش هزینه‌های جابه‌جایی، نگهداری سلولی و بین سلولی گردید. ازطرفی نیز با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان باعث استفاده از مسیرهای جایگزین گردید که این امر منجربه کمینه‌سازی هزینه‌های ازدست‌رفته و همچنین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود.

امروزه داشتن یک سیستم مناسب جهت پاسخ‌گویی به نیازهای مشتریان امری ضروری است از این‌رو طراحی یک مدل جهت حداکثر کردن پاسخ‌گویی امری ضروری است. همچنین داشتن سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب دارای اهمیت بسیار زیادی در سیستم است در این تحقیق با درنظر گرفتن میانگین زمانی بین دو خرابی و مسیرهای جایگزین سعی در کاهش خرابی ماشین‌ها داشتیم اما یک سیستم دوره‌ای مناسب می‌تواند به‌خوبی این امر را انجام دهد که کمترین خرابی رخ دهد. درنهایت، حوزه‌های زیر می‌توانند زمینه‌های جذابی برای انجام تحقیقات آتی قلمداد شوند:

- درنظر گرفتن سایر توابع هدف: در تحقیقات آتی می‌توان توابع هدف متداول نظیر زمان تکمیل کارها، درنظر گرفتن نیروی انسانی، میزان جریان برگشتی و سایر عوامل را مدنظر قرار داد.
- درنظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترها: در تحقیق حاضر کلیه‌ی پارامترها به‌صورت قطعی درنظر گرفته شده‌اند می‌توان پارامترها را در شرایط عدم قطعیت در آینده بررسی نمود.
- استفاده از رویکرد فازی در حل این مسائل.

مراجع

[1] Dodgson, M. (2018). "Technological collaboration in industry: strategy, policy and internationalization in innovation, Routledge". https://doi.org/10.4324/9781351265607

[2] Bouaziz, H., D., Bardou., M., Berghida, S., Chouali, A., Lemouari. (2023). "A novel hybrid multi-objective algorithm to solve the generalized cubic cell formation problem". Computers & Operations Research, 150: p. 106069. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106069.

[3] Liu, C., J. Wang., J.Y.-T. Leung. (2016). "Worker assignment and production planning with learning and forgetting in manufacturing cells by hybrid bacteria foraging algorithm". Computers & Industrial Engineering, 96: p. 162-179. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.020.

[4] Goli, A., E.B. Tirkolaee, N.S. Aydın. (2021). "Fuzzy integrated cell formation and production scheduling considering automated guided vehicles and human factors". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 29(12): p. 3686-3695. ttps://doi.org/10.1109/TFUZZ.2021.3053838.

[5] Chaudhuri, B., R. Jana, P.K. Dan. (2020). "A review on the multi-objective cell formation problem in cellular manufacturing systems". International Journal of Manufacturing Technology and Management, 34(2): p. 188-209. https://doi.org/10.1504/IJMTM.2020.106207.

[6] Batsyn, M.V., E.K. Batsyna, I.S. Bychkov, (2020). "NP-completeness of cell formation problem with grouping efficacy objective". International Journal of Production Research, 58(20): p. 6159-6169. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1668072.

[7] Rafiee, M., V., Kayvanfar. A., Mohammadi. F., "Werner. (2022). "A robust optimization approach for a cellular manufacturing system considering skill-leveled operators and multi-functional machines". Applied Mathematical Modelling, 107: p. 379-397. https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.02.028.

[۸] خیرخواه، ا.س. قجری، ع.، (۱۳۹۷). "یکپارچه‌سازی طراحی سیستم‌های تولید سلولی و برنامه‌ریزی تولید با نگرش تولید متوازن"، مهندسی صنایع و مدیریت شریف، دوره ۱-۳۴، شماره ۲/۱، ص۵۳-۶۴. https://doi.org/10.24200/J65.2018.20057.

[9] Dekkers, R. (2018). Group technology: Amalgamation with design of organisational structures. International Journal of Production Economics, 200: p. 262-277. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.018.

[10] Karoum, B., Y.B. Elbenani, (2017). "A clonal selection algorithm for the generalized cell formation problem considering machine reliability and alternative routings". Production Engineering, 11(4): p. 545-556. https://doi.org/10.1007/s11740-017-0751-6.

[۱۱] کرباسیان، م. قندهاری، م. عابدی، س.، (۱۳۸۹). "بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه مبتنی‌بر قابلیت اطمینان سیستم برمبنای هزینه و قابلیت اطمینان وابسته به مکان اجزاء سیستم"، علمی پژوهشی مدیریت تولید وعملیات، دوره ۱-۱، ص ۱۹-۳۰.

https://jpom.ui.ac.ir/article_19760.html.

[۱۲] رفیعی، م. محمدی طلب، ع.، (۱۳۹۵). "ارائه یک مدل ریاضی با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی سیستم تولید پویا با درنظر گرفتن ماشین‌آلات چندکاره"، پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال چهارم شماره نهم، ص ۲۸۱-۲۹۵.
https://doi.org/10.22084/ier.2017.1827.

[۱۳] کریمی، ب. نیاکی، س.ت.ا. حاله، ح. نادری، ب.، (۱۳۹۶). "مدل‌سازی قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکاردر سیستم‌های تولید سلولی: حل با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته با مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب"، پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال پنجم شماره یازدهم، ص ۱۳۱-۱۴۷.
https://doi.org/10.22084/ier.2017.13881.1627.

[14] Farughi, H., S. Mostafayi, A. Afrasiabi, (2019). "Bi-objective robust optimization model for configuring cellular manufacturing system with variable machine reliability and parts demand: A real case study". Journal of Industrial Engineering and Management Studies, 6(2): p. 120-146. https://doi.org/10.22116/jiems.2019.93028.

[15] Amirghodsi, S., Bonyadi Naeini, A. & Makui, A. (2022). "Dual model for selecting technology and technology transfer method using a combination of the Best-Worst Method (BWM) and goal programing". Scientia Iranica, 29(5): p. 2628-2646 . https://doi.org/10.24200/SCI.2020.53925.3511.

[16] Dahooie, J. H., Qorbani, A.R. & Daim, T. (2021). "Providing a framework for selecting the appropriate method of technology acquisition considering uncertainty in hierarchical group decision-making: Case study: Interactive television technology". Technological Forecasting and Social Change, 168, 120760.
https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120760.

[17] Sadat Khorasgani, S.M., M. Ghaffari, (2018). "Developing a cellular manufacturing model considering the alternative routes, tool assignment, and machine reliability". Journal of Industrial Engineering International, 14(3): p. 627-636.
https://doi.org/10.1007/s40092-017-0239-1.

[18] Xu, J.; Wang, X.; Liu, F.; (2021). "Government subsidies, R&D investment and innovation performance: Analysis from pharmaceutical sector in China". Technology Analysis & Strategic Management, 33(5): p. 535-553.
https://doi.org/10.1080/09537325.2020.1830055.

[19] Latifian, M.; Keramati, M.A.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; (2022). "A Bi-objective model of research and development in battery manufacturing industry to improve customer satisfaction". International Journal of Engineering, 35(11): p. 2077-2091.
https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.11B.03.

[20] Kazemi, M., A., Sadegheih., M.M., Lotfi, M.A., Vahdat. (2022). "Developing a bi-objective schedule for an online cellular manufacturing system in an MTO environment". Soft Computing,. 26(2): p. 807-828.
https://doi.org/10.1007/s00500-021-06402-z.

[21] Arabahmadi, R., Mohammadi, M., Samizadeh, M., Rabbani, M., Gharibi, M.(2023). "Facility location optimization for technical inspection centers using multi-objective mathematical modeling considering uncertainty". Journal of Soft Computing and Decision Analytics, Volume 1, Issue 1 (2023) 181-208.
https://doi.org/10.31181/jscda11202314.

[22] Mirjalili, S., A., Safaa Sadiq, H., Faris. (2020). "Genetic algorithm: Theory, literature review, and application in image reconstruction". Nature-inspired optimizers: p. 69-85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12127-3_5.

[۲۳] شهابی، ف. شاهبندرزاده، ح. بالویی جامخانه، ه.، (۱۴۰۲). "بهینه‌سازی یک سیستم تولید سلولی پویا با درنظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات، همراه با پایش توالی دوره‌های عملیات"، مدیریت صنعتی، دوره ۱۵، شماره ۳، ص ۵۰۷-۵۳۲.
https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.356073.1008035.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2024, Volume 12., No. 24., pp. 5-15
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.28743.2153

A Mathematical Model for a Production Planning Problem Considering Reliability in an Automotive Parts Company

Masoud Latifian[1], Reza Tavakkoli-Moghaddam[2*], Amir Hossein Latifian[3], Mahdi Kashani[4]

[1.] Ph.D. Technology Management, Department of Technology Management, Faculty of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2.] Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[3.] Ph.D. Technology Transfer Management, Department of Technology Management, Faculty of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[4.] M.A Industrial Management , Department of Industrial Management, Faculty of Management & Economy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 1 January 2024
Accepted 2 May 2024

***Keywords*:**

Cellular Manufacturing System
Production Planning
Mathematical Optimization
Reliability
Genetic Algorithm

ABSTRACT

A few studies have addressed the failure or reliability of machines regarding cell formation problems. The general assumption in cell formation is that most machines are 100% reliable; however, they are not in a practical situation. Machine failure can severely affect the system performance and cause a delay in the scheduled date. A cellular manufacturing system is a philosophy among group technology ones, which is controlled by dividing a large system to multiple smaller sub-systems and facilitate manufacturing system management. This study presents a mathematical programming model for production planning problems in industrial units with reliability that prepares the conditions to utilize alternative routes for parts, which minimizes the lost costs along with maintenance costs. Since the considered problem is an NP-hard one, a genetic algorithm is used to solve the model. The presented mathematical model minimizes system costs, and the costs related to intra- and inter-cellular movements and maintenance by minimizing the costs of machine failures.

[*] Corresponding author. R. Tavakkoli-Moghaddam
Tel.:021-82084183; E-mail address: tavakoli@ut.ac.ir