

مسئله تشکیل سلول احتمالی با رویکرد نظریه صف و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

پرویز فتاحی^{۱*}، امیر سامان خیرخواه^۲، بهمن اسمعیل نژاد^۳

۱. دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء

۲. دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا

۳. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا

(تاریخ دریافت ۹۲/۱۲/۰۳ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۴/۱۰/۲۱ - تاریخ تصویب ۹۵/۰۳/۰۲)

چکیده

در این تحقیق مسئله تشکیل سلول احتمالی با توسعه مدلی در چارچوب نظریه صف با پارامترهای احتمالی تقاضا، زمان پردازش و قابلیت اطمینان مطرح شده است. در اینجا، ماشین خدمت‌دهنده محسوب می‌شود و قطعه مشتری فرض می‌شود. به دلیل NP-Hard بودن مسئله تشکیل سلول، به کاربردن روش‌های دقیق به زمان بسیار طولانی برای حل نیاز دارند. در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی توده ذرات تعدیل‌شده‌ای برای حل ارائه شده است و از آنجا که کیفیت الگوریتم‌های فرا ابتکاری تا حد زیادی به پارامترها و عملگرهای انتخابی بستگی دارد، برای تنظیم پارامترها از تکنیک طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد نتایج الگوریتم فرا ابتکاری توده ذرات تعدیل‌شده و الگوریتم ژنتیک از روش قطعی شاخه و کران نرم‌افزار لینگو استفاده شده است. بررسی‌ها نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری ارائه‌شده از لحاظ کیفیت جواب نهایی و زمان حل در مقایسه با روش شاخه و کران نرم‌افزار لینگو است. در نهایت، نتایج مثال‌های عددی نشان‌دهنده تأثیر معنادار در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، روی ساختار بلوک‌های ماشین - قطعه است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فرا ابتکار، قابلیت اطمینان، مسئله تشکیل سلول، نظریه صف.

مقدمه

به‌طور سنتی، محققان روی مسئله CM در شرایط قطعی تمرکز کرده‌اند، درحالی‌که برای کاربردهای واقعی در افق برنامه‌ریزی ممکن است هریک از پارامترهای ورودی مسئله CM کلاسیک از قبیل زمان فرایند (از کارافتادگی ماشین، غیبت از کار کارگرها، تغییرات سفارش و بسیاری از حوادث غیردوره‌ای)، زمان‌های آماده‌سازی و تقاضاها تغییر کند و در نظر گرفتن آن‌ها به نتیجه‌گیری غلط منجر شود. در نتیجه، توسعه مدل‌ها برای مسئله تشکیل سلول در محیط عدم قطعیت حوزه مهمی برای تحقیق است که در مطالعات قبلی کمتر بررسی شده است. در این پژوهش، مسئله تشکیل سلول در شرایط عدم قطعیت با رویکرد صف بررسی شده است. از تئوری صف برای هر سیستم تولیدی یا خدماتی از جمله سیستم‌های تولید سلولی استفاده می‌شود؛ برای مثال، در یک کارگاه تولیدی، قطعات در

مفهوم فناوری گروهی (GT)^۱ به‌منظور کاهش زمان راه‌اندازی، اندازه دسته‌ها و فواصل جابه‌جایی مطرح شده است. در سیستم GT تلاش می‌شود انعطاف‌پذیری تولید کارگاهی و بهره‌وری بالای سیستم خط جریان به‌طور هم‌زمان صورت گیرد [۱]. تولید سلولی^۲ (CM) مفهومی مبتنی بر GT است و در آن ابتدا قطعات مشابهی که روی ماشین‌های یکسانی پردازش می‌شوند، تعیین می‌شوند و سپس به‌عنوان یک سلول گروه‌بندی می‌شوند. سه گام اساسی در طراحی CM، تشکیل سلول^۳ (CF)، جانمایی ماشین داخل سلول و جانمایی سلول است [۲]. مسئله CF مسئله گروه‌بندی قطعه - ماشین نامیده می‌شود و مفروضات آن عبارت‌اند از: مجموعه انواع قطعات معین، پردازش‌های مورد نیاز، تقاضای نوع قطعه و منابع در دسترس (ماشین‌ها، ابزارآلات و...) [۳].

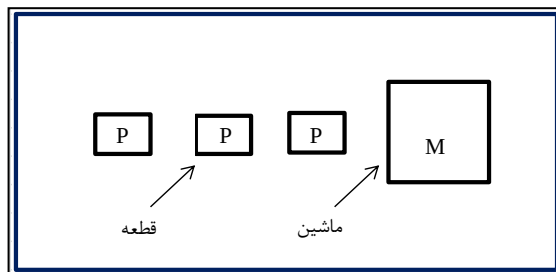
صف، منتظر ماشین کاری می‌شوند. در این پژوهش نیز فرض شده است هر ماشین یک خدمت‌دهنده و هر قطعه مشتری است که خدمت‌دهنده‌ها باید به آن خدمت بدهند. در نتیجه، شکل سلول‌ها به صورت یک سیستم صف مدل شده است. هدف ما حداقل سازی جابه‌جایی‌های بین سلولی است. در مطالعات قبلی در این حوزه بیشتر زمان پردازش، قابلیت اطمینان و تقاضای احتمالی بررسی شده است که این پژوهش‌ها در ادامه به ترتیب معرفی می‌شوند.

قضاوتی و سعیدی مهرآباد [۴] مدل ریاضی برای مسئله تولید سلولی یکپارچه‌شده با زمان‌بندی گروهی در یک فضای عدم قطعیت ارائه دادند. این مدل به طور هم‌زمان تشکیل سلول و تصمیمات زمان‌بندی را بهینه‌سازی می‌کند و در آن فرض شده است که زمان پردازش قطعات روی ماشین‌ها احتمالی هستند و توسط سناریوهای گسسته ارائه شده‌اند. مدل آن‌ها هزینه کلی مورد انتظار شامل حداقل هزینه دیرکرد در میان تمامی قطعات، هزینه زیر قرارداد برای عناصر استثنایی و هزینه استفاده کم منابع را حداقل سازی می‌کند. قضاوتی و سعیدی مهرآباد [۵] هر ماشین را خدمت‌دهنده و هر قطعه را مشتری فرض کردند که خدمت‌دهنده‌ها باید به مشتری‌ها خدمت ارائه دهند؛ بنابراین، شکل سلول‌ها یک سیستم صف تعریف شده است که از طریق تئوری صف بهینه‌سازی می‌شود. احتمال اینکه هر خدمت‌دهنده مشغول باشد، حداکثرسازی شده است و سلول‌های بهینه و خانواده قطعات تشکیل شده است.

در ادامه، پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه قابلیت اطمینان مرور می‌شود. داس و همکاران [۶] خرابی ماشین را توزیع وایبل در نظر گرفتند و مدلی ارائه دادند که با حداقل سازی کل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، با سیاست نگهداری و تعمیرات گروهی و احتمال خرابی ماشین، فاصله زمانی تعمیرات پیشگیرانه و زمان‌بندی برای انجام دادن عملیات تعمیرات پیشگیرانه روی هر ماشین را تعیین می‌کرد. داس و همکاران [۷] مسئله طراحی سیستم CM را ارائه دادند که شامل تخصیص ماشین‌ها به سلول‌ها و انتخاب مسیر پردازش با بالاترین قابلیت اطمینان برای هر قطعه می‌شد و کل هزینه عملیات تولیدی، ماشین تحت بهره‌برداری و جابه‌جایی مواد بین سلولی را حداقل سازی کردند. رویکرد پیشنهادی آن‌ها با حداقل سازی تأثیر خرابی

ماشین از طریق قرارداد مسیره‌های پردازش جایگزین درمورد خرابی هر ماشین به دنبال یافتن مسیری است که عملکرد بالای سیستم CM را تضمین کند. داس [۸] رویکرد طراحی سیستم CM ای را ارائه کرد که مسیره‌های پردازشی با حداکثر قابلیت اطمینان را برای انواع قطعات انتخاب می‌کرد، هزینه‌های سیستم را بهینه‌سازی می‌کرد و عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌داد. این رویکرد به کاربر سیستم CM کمک می‌کند تا با کاستن اختلافات موجود در برآوردن موعدهای تحویل، حفظ انعطاف‌پذیری مورد نیاز و بهبود عملکرد کلی سیستم CM در بازار مطمئن عمل کند. برای اینکه کاربر یا طراح نرخ خرابی مناسب را برای موقعیت خاص انتخاب کند، داس مدل تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر گزینه‌های توزیع وایبل و توزیع نمایی را ارائه داد. زمانی که کاربر می‌خواهد سیستم قابلیت اطمینان بالایی داشته باشد، در مدل طراحی سیستم CM برای پیکربندی سلول از توزیع وایبل استفاده می‌شود. جبل عاملی و همکاران [۹] تأثیرات خرابی ماشین بر مسئله تشکیل سلول را با دیدگاه جدیدی بررسی کردند. در دیدگاه‌های سنتی، قابلیت اطمینان سیستم به صورت تابعی صریح از عناصر سازنده سیستم مدل می‌شود، اما آن‌ها در مدل خود قابلیت اطمینان ماشین را در عباراتی مبتنی بر تأثیرات هزینه و زمان مدل کردند. آن‌ها نشان دادند در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هزینه‌های جابه‌جایی را افزایش می‌دهد، اما از اساس موجب کاهش کل هزینه‌ها و کل زمان در سیستم CM می‌شود. جبل عاملی و ارکات [۱۰] در مدلی که ارائه داده‌اند، مسیره‌های پردازش جایگزین را برای انواع قطعات و قابلیت اطمینان ماشین در نظر گرفته‌اند. براساس مثال‌های عددی حل شده از سوی این محققان، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تأثیر مهمی بر بلوک‌های مورب ماتریس ماشین-قطعه دارد. بررسی‌های چونگ و همکاران [۱۱] برای مسئله تشکیل سلول نشان داد در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تأثیرات مهمی بر کاهش هزینه کل سیستم دارد. رویکرد یکپارچه رافعی و همکاران [۱۲] برای تحلیل بهتر سیستم‌های تولیدی ارائه شد، زیرا جنبه‌های مختلف سیستم‌های تولیدی به هم مرتبط‌اند. آن‌ها برای توزیع زمان خرابی ماشین از توزیع وایبل استفاده کردند و برای کاهش نرخ خرابی فعالیت‌ها، تعمیر پیشگیرانه و اصلاحی را در نظر گرفتند.

در ادامه، پیشینه تحقیقات صورت گرفته در زمینه تقاضای احتمالی بیان می شود. اصغرپور و جوادیان [۱۳] سه توزیع نرمال، دوجمله ای و بتا را برای تقاضا در نظر گرفتند و مجموع هزینه های خرید ماشین، عملیات، حمل و نقل داخل و بین سلولی، جابه جایی ماشین و مجموع میانگین نوسانات تقاضای انواع قطعات در طول افق برنامه ریزی را حداقل سازی کردند. در مدل ریاضی توکلی مقدم و همکاران [۱۴]، تقاضای قطعات توزیع نرمال دارد و هدف مسئله حداقل کردن هزینه های کل جابه جایی داخل و خارج سلولی و مسئله جانمایی سلول به طور هم زمان است. براساس نتایج آن ها، با تغییر سطح اطمینان، جانمایی های داخلی و بین سلولی تغییر می کند. ایگلز و همکاران [۱۵] زمان های پردازش و تقاضای مشتری را غیرقطعی و با توزیع نرمال در نظر گرفتند. هدف آن ها طراحی سیستم CM ای بود که خانواده قطعاتی با شبیه ترین قطعات تشکیل و تعداد سلول ها و ماشین ها برای سطح ریسک خاصی حداقل سازی شود.



شکل ۱. سیستم صف برای مدل ارائه شده

برای محاسبه قابلیت اطمینان یک سیستم تولیدی باید قابلیت اطمینان مسیرهای پردازش محاسبه شود. بیشتر محققان قابلیت اطمینان یک مسیر را با ضرب قابلیت اطمینان ماشین ها محاسبه می کنند. محاسبه قابلیت اطمینان به صورت سری ایراداتی دارد که جیل عاملی و همکاران [۹] آن ها را به این صورت بیان کرده اند: ۱. در پیکربندی سری، سیستم زمانی کار می کند که همه عناصر سیستم در شرایط کاری مناسبی باشند. مشخص است در مسیر پردازش قطعات این طور عمل نمی شود، زیرا قطعه می تواند برای پردازش به کار خود ادامه دهد، حتی اگر بیشتر از یک ماشین خراب باشد؛ برای مثال، اگر ماشینی در مسیر پردازش قطعه ای خراب شود، ماشین های موجود در ادامه مسیر پردازش قطعه، تا جایی که قطعات برای پردازش آن ها تمام شود، به کار ادامه می دهند. به علاوه، این خرابی بر دیگر ماشین های موجود در قبل مسیر پردازش قطعه تأثیر نمی گذارد. از این رو، ما نمی توانیم قابلیت اطمینان تک تک ماشین ها را برای به دست آوردن قابلیت اطمینان مسیر پردازش، ضرب کنیم. ۲. خرابی ماشین

براساس مطالعات قبلی، در محیط عدم قطعیت، زمان پردازش، تقاضای قطعه، ترکیب محصول، زمان بین دو ورود قطعه و... در طول افق زمانی تغییر می کند؛ بنابراین، در طول افق برنامه ریزی هریک از پارامترهای مسئله ممکن است تغییر زیادی داشته باشد و بر تصمیم گیری تأثیر بگذارد. از این رو، در تحقیق حاضر برای غلبه بر این مشکل، فرض می شود زمان پردازش برای قطعات روی ماشین ها، زمان ورود برای قطعات به سلول ها و در دسترس بودن ماشین ها احتمالی هستند که موجب انعطاف پذیری بیشتر برای تحلیل چارچوب تولید می شود. در ادامه این پژوهش، مدل پیشنهادی و چگونگی در نظر گرفتن قابلیت اطمینان توضیح داده می شود. سپس رویه حل مدل معرفی می شود. پس از ارائه و تحلیل نتایج محاسباتی، نتیجه گیری بیان می شود.

مدل پیشنهادی

در این تحقیق، مدل ریاضی ارائه شده از سوی قضاوتی و سعیدی مهرآباد [۵] با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و تغییر در ساختار مدل توسعه داده می شود. برای مدل سازی از تئوری صف استفاده می شود و قطعه مشتری و ماشین

به دست می آید:

$$N(t) = \frac{t}{MTBF} \quad (1)$$

با ضرب MTTR در تعداد خرابی محاسبه شده در معادله ۱، کل زمان تعمیر $(T(t))$ به صورت زیر به دست می آید:

$$T(t) = \frac{t \times MTTR}{MTBF} \quad (2)$$

به منظور به دست آوردن کل زمان برای ماشین، زمان تعمیر به زمان تولیدش اضافه می شود. در نتیجه، میانگین کل زمان برای ماشین j به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} j \text{ میانگین کل زمان برای ماشین} &= \frac{E_j(t) \times MTTR_j}{MTBF_j} + E_j(t) = \frac{MTTR_j}{\mu_j \times MTBF_j} + \frac{1}{\mu_j} \\ j \text{ میانگین کل زمان برای ماشین} &= \frac{1}{\mu_j} \left(\frac{MTTR_j + MTBF_j}{MTBF_j} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

که $E_j(t)$ امید ریاضی زمان تولید ماشین j است. در نهایت، نرخ پردازش با به حساب آوردن قابلیت اطمینان به صورت رابطه ۴ است:

$$\begin{aligned} j \text{ نرخ پردازش برای ماشین} &= \mu_j \left(\frac{MTBF_j}{MTTR_j + MTBF_j} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

همان طور که پیش بینی شد، مقدار نرخ پردازش با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کاهش یافت. بر این اساس، قابلیت اطمینان در مدل فقط بر نرخ پردازش تأثیر می گذارد. با توجه به مدل صف و شکل ۱ زمانی که طول می کشد تا یک قطعه برای پردازش روی یک ماشین خاص وارد شود (کمترین زمان ورود قطعه از بین همه زمان های ورود قطعاتی که به پردازش به این ماشین نیاز دارند) دارای توزیع نمایی است که نرخ ورود آن با پارامتر λ_{eff} (نرخ ورود مؤثر) نشان داده می شود [۱۶]؛ $\lambda_{eff} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ که در آن n تعداد قطعاتی است که برای پردازش روی همین ماشین می آیند و λ_i نرخ ورود قطعه i است. در ادامه، با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل ریاضی مسئله به صورت زیر ارائه می شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^C \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M \frac{\lambda_i a_{ij} x_{ik} y_{jk}}{\mu_j \left(\frac{MTTR_j + MTBF_j}{MTBF_j} \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^C x_{ik} = 1 \quad (6)$$

در کل زمانی اتفاق می افتد که ماشین ها تحت شرایط عملیاتی باشند. علاوه بر این، به دلیل تفاوت در زمان های پردازش، همه ماشین ها به جز ماشین های گلوگاه، مقداری زمان بیکاری در دوره دارند. در محاسبه قابلیت اطمینان به صورت سری، کل زمان مسیر پردازش شامل زمان بیکاری و زمان پردازش است، اما دوره زمان بیکاری نباید در محاسبه قابلیت اطمینان برای تک ماشین ها در نظر گرفته شود. در نتیجه، نمی توان از قاعده ضرب برای به دست آوردن قابلیت اطمینان مسیر استفاده کرد. در ادامه، اجزای مدل ریاضی به تفکیک اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم ارائه می شود.

اندیس ها

i : اندیس قطعات ($i = 1, \dots, P$)

j : اندیس ماشین ها ($j = 1, \dots, M$)

k : اندیس سلول ها ($k = 1, \dots, C$)

پارامترها

λ_i : میانگین نرخ ورود برای قطعه i (تعداد قطعات وارد شده در واحد زمان)

μ_j : میانگین نرخ پردازش برای ماشین j (تعداد قطعات پردازش شده در واحد زمان)

M_{max} : حداکثر تعداد ماشین های مجاز در یک سلول

$MTBF_j$: میانگین زمان بین خرابی ها برای ماشین j

$MTTR_j$: میانگین زمان تعمیر برای ماشین j

a_{ij} : یک است اگر قطعه i روی ماشین j پردازش شود، در غیر این صورت مقدار آن صفر است.

متغیرهای تصمیم

x_{ik} : یک است اگر قطعه i به سلول k تخصیص داده شود، در غیر این صورت مقدار آن صفر است.

y_{jk} : یک است اگر ماشین j به سلول k تخصیص داده شود، در غیر این صورت مقدار آن صفر است.

مدل ریاضی

برای بررسی تأثیر قابلیت اطمینان بر مسئله تشکیل سلول، دو تعریف ارائه می شود. تعداد خرابی ماشین در طول دوره تولید $(N(t))$ ، از طریق تقسیم زمان تولید بر MTBF

$$1.5V_{ijk} - x_{ik} - y_{jk} \leq 0 \quad (۱۳)$$

رویه حل مدل

مسئله تشکیل سلول از نوع مسائل NP-hard است. در نتیجه، با افزایش اندازه مسئله، جواب بهینه از طریق روش‌های دقیق، در زمان معقوله به دست نمی‌آید. در این تحقیق، مسئله CF پیشنهادی با استفاده از الگوریتم PSO تعدیل می‌شود (توسعه روش منبع [۱۷]) و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی حل می‌شود و با الگوریتم شاخه و کران حاصل از نرم‌افزار لینگو ۱۱ مقایسه می‌شود.

الگوریتم توده ذرات تعدیل شده

کندی و ابرهات [۱۸ و ۱۹] الگوریتم PSO را برای دسته‌ای از مسائل بهینه‌سازی ارائه دادند که ماهیت پیوسته بر جواب‌های آن‌ها حاکم است. الگوریتم PSO یک الگوریتم تکاملی است و با یک جمعیت اولیه از جواب‌های تصادفی شروع می‌شود. هر جواب بالقوه یک ذره ($\vec{x}$) نام دارد که در یک ابرضا با سرعتی که در هر مرحله به آن تخصیص داده می‌شود، در حال پرواز از موقعیتی به موقعیت دیگر است. بهترین مقدار تابع برازندگی (تابع هدف) ذره i - که تا به حال به دست آمده است - در متغیری به نام $pbest_i$ و بردار موقعیت آن در p_i که مختص آن ذره است، ذخیره می‌شود. بهترین مقدار تابع برازندگی مربوط به بردار موقعیت تمام ذرات جمعیت است - که تا به حال پیدا شده است - در متغیری به نام $gbest$ و بردار موقعیت آن در p_g ذخیره می‌شود. در ادامه، ساختار اجزای الگوریتم PSO پیشنهادی برای مسئله مورد بررسی شرح داده می‌شود.

ساختار ذره

در این پژوهش، در PSO تعدیل شده (MPSO)، هر ذره از دو قسمت تشکیل می‌شود؛ قسمت اول مربوط به سلول‌هایی است که به ماشین‌ها تخصیص می‌یابند و قسمت دوم سلول‌هایی است که به قطعات اختصاص یافته‌اند (شکل ۲).

$$\sum_{k=1}^C y_{jk} = 1 \quad \forall j \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^C y_{jk} \leq M_{max} \quad \forall k \quad (۸)$$

$$\sum_{k=1}^C \sum_{i=1}^P \lambda_i a_{ij} x_{ik} y_{jk} < \mu_j \left(\frac{MTBF_j}{MTTR_j + MTBF_j} \right) \quad (۹)$$

$$x_{ik}, y_{jk} \in \{0,1\} \quad (۱۰)$$

تابع هدف ۵ میانگین بهره‌وری (احتمال مشغول بودن) ماشین‌ها در سلول‌ها را حداکثرسازی می‌کند. در رابطه تابع هدف ۵ نرخ ورود مؤثر، مجموع نرخ ورود قطعاتی است که به پردازش روی ماشین نیاز دارند و ماشین و قطعه در یک سلول هستند. در نظر گرفتن قابلیت اطمینان موجب افزایش مقدار تابع هدف شده است. محدودیت ۶ تضمین می‌کند هر قطعه باید فقط به یک سلول تخصیص یابد. محدودیت ۷ تضمین می‌کند هر ماشین باید فقط به یک سلول تخصیص داده شود. محدودیت ۸ موجب می‌شود تعداد ماشین‌ها در هر سلول، کمتر از حداکثر تعداد ماشین‌های مجاز در هر سلول باشد. محدودیت ۹ برای جلوگیری از ناپایداری سیستم صف است؛ یعنی موجب می‌شود نرخ ورود به هر سیستم صف کمتر از نرخ خدمت‌دهی باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سبب می‌شود ضریب $\left(\frac{MTBF_j}{MTTR_j + MTBF_j} \right)$ که مقداری کمتر از یک دارد به μ_j ضرب شود و در نتیجه فضای جواب نسبت به حالتی که قابلیت اطمینان در نظر گرفته نشده است کوچک‌تر می‌شود. محدودیت ۱۰ نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

خطی‌سازی مدل ریاضی

در مدل ریاضی ارائه شده، تابع هدف ۵ و محدودیت ۹ غیرخطی است. برای خطی‌سازی آن‌ها، متغیر صفر و یک جدید V_{ijk} تعریف و دو رابطه ۱۲ و ۱۳ به مدل اضافه می‌شود [۲۰]:

$$V_{ijk} = x_{ik} \times y_{jk} \quad (۱۱)$$

$$V_{ijk} - x_{ik} - y_{jk} + 1.5 \geq 0 \quad (۱۲)$$

	ماشین ۱	...	ماشین M	قطعه‌ی ۱	...	قطعه‌ی P
شماره‌ی سلول	۱	...	۱	۳	...	۳

شکل ۲. نمونه‌ای از ساختار ذره

بهینه برای مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌ها شروع می‌شود. هر راه‌حل از طریق یک کروموزوم نمایش داده می‌شود. مراحل الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با در نظر گرفتن ساختار کروموزوم ارائه شده برای الگوریتم MPSO به صورت زیر است:

۱. جمعیت اولیه با استفاده از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی تولید می‌شود (فلوچارت شکل ۳).
۲. مقدار تابع برازندگی هر کروموزوم از طریق تابع هدف خطی‌سازی شده محاسبه می‌شود.
۳. جمعیت جدید با تکرار گام‌های زیر تولید می‌شود:

الف) عملگر تقاطع

۱. انتخاب دو کروموزوم والد از جمعیت از طریق روش انتخاب رقابتی صورت می‌گیرد. در این روش، یک زیرمجموعه کوچکی از کروموزوم‌ها (معمولاً دو یا سه) به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و با هم رقابت می‌کنند. سرانجام در این رقابت، براساس میزان برازندگی، یکی از آن‌ها پیروز و برای تقاطع انتخاب می‌شود.

۲. عملگر تقاطعی استفاده شده در این الگوریتم، عملگر تقاطعی تک‌نقطه‌ای است. عددی تصادفی بین ۱ و $M+P$ (M تعداد ماشین‌ها و P تعداد قطعات) برای تقاطع دو کروموزوم از جمعیت منتخب، انتخاب می‌شود. این عملگر دو کروموزوم را از یک نقطه می‌شکند و بخش‌های شکسته شده دو کروموزوم را جابه‌جا می‌کند. بدین ترتیب، دو کروموزوم جدید به دست می‌آید. بعد از تقاطع، شدنی بودن دو محدودیت ۸ و ۹ بررسی می‌شود. اگر دو محدودیت شدنی باشند، رویه ادامه می‌یابد، در غیر این صورت دو کروموزوم حاصل از تقاطع حذف می‌شود.

ب) قسمتی از جمعیت اولیه به طور تصادفی انتخاب و جهش داده می‌شوند. عملگر جهش مقدار یک آرایه از کروموزوم اولیه را تغییر می‌دهد. عددی بین ۱ و $M+P$

موقعیت اولیه ذرات (جمعیت اولیه) از طریق روش ابتکاری ارائه شده در فلوچارت شکل ۳ به دست می‌آید. جواب‌های اولیه تولید شده با این الگوریتم همیشه موجه‌اند.

رویه بهبود

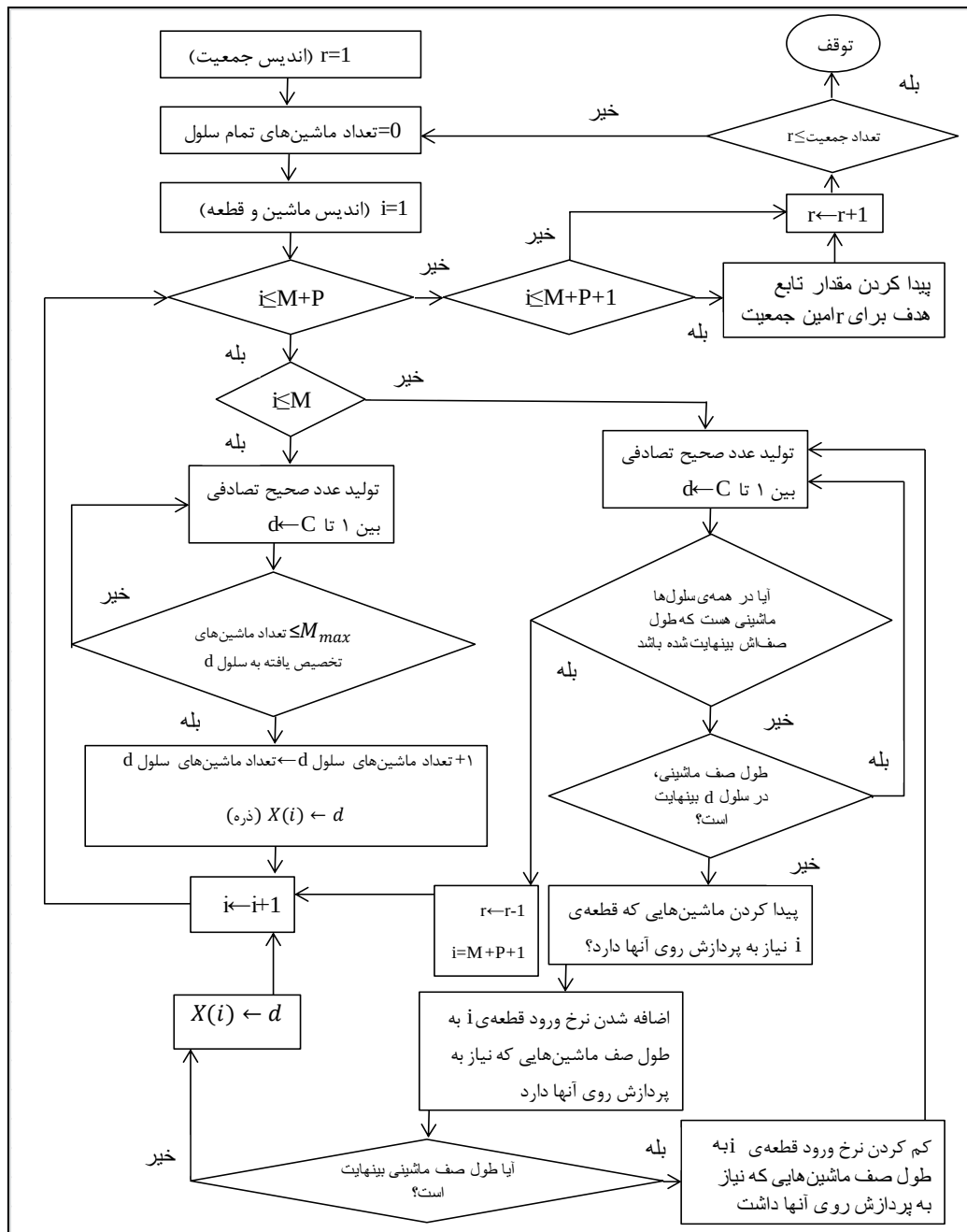
فرایند به‌روزرسانی براساس $\vec{p}_i$ و $\vec{p}_g$ است و در ادامه شرح داده می‌شود. هدف بردار سرعت در به‌روزرسانی، بردار موقعیت تمایل دادن بردار $\vec{x}_i$ به طرف بردارهای p_i و $\vec{p}_g$ بنا به ضربی است. در MPSO این کار با همان هدف، اما با روشی متفاوت از PSO استاندارد انجام می‌گیرد. موقعیت‌های مؤلفه‌هایی از بردارهای $\vec{x}_i$ و $\vec{p}_i$ که معادل نیستند، در بردار P قرار می‌گیرد. بردار Q، هم طول با بردار P، با مؤلفه‌های صفر و یک، به طور تصادفی تولید می‌شود. در هر موقعیت بردار Q، اگر مؤلفه مقدار صفر بگیرد، تغییری انجام نمی‌گیرد، اما اگر یک باشد، مقدار مؤلفه همان موقعیت P انتخاب می‌شود، این مؤلفه بردار P درواقع موقعیتی از بردار $\vec{p}_i$ را نشان می‌دهد که باید در $\vec{x}_i$ جای‌گذاری شود. سپس شدنی بودن محدودیت‌های ۸ و ۹ بررسی می‌شود، اگر برقرار بود رویه ادامه می‌یابد، وگرنه تغییر ایجاد شده به حالت اول برگردانده می‌شود و مؤلفه بعدی P که از طریق Q مشخص شده است امتحان می‌شود (مانند مثالی در شکل ۴). در ادامه، این فرایند با موقعیت جدیدی که برای $\vec{x}_i$ ایجاد شده است ($\vec{x}_i'$) و $\vec{p}_g$ تکرار می‌شود و مثل قبل، شدنی بودن محدودیت‌های ۸ و ۹ بررسی و مقدار تابع برازندگی برای پیدا کردن $pbest_i$ و $gbest$ استفاده می‌شود. در نهایت، معیار توقف (تعداد تکرارها) بررسی می‌شود. این فرایند برای هر ذره در توده ذرات صورت می‌گیرد.

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

الگوریتم ژنتیک یک روش حل مسئله است که از علم ژنتیک برای مدل حل مسئله استفاده می‌کند. این الگوریتم یک تکنیک جست‌وجو را برای یافتن راه‌حل‌های نزدیک به

۴. اندازه جمعیت جدید با جمعیت اولیه برابر است و از بین بهترین کروموزوم‌های جمعیت قبلی، تقاطع و جهش انتخاب می‌شود.
۵. معیار توقف (تعداد تکرار) بررسی می‌شود.
۶. اگر شرط توقف برقرار نباشد، باید به گام ۲ رفت.

به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس عملگر جهش مقاله مهدوی و همکاران [۲۰] استفاده می‌شود. بعد از جهش، شدنی بودن دو محدودیت ۸ و ۹ بررسی می‌شود. اگر دو محدودیت شدنی باشند رویه ادامه می‌یابد، در غیر این صورت کروموزوم حاصل از جهش حذف می‌شود.



شکل ۳. الگوریتم ابتکاری برای تولید جمعیت اولیه موجه

$$x_i = [3 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2] \rightarrow x_i - p_i = [1 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0] \rightarrow \begin{cases} P = [1 \ 3 \ 4] \\ Q = [1 \ 0 \ 1] \end{cases} \rightarrow x'_i = [2 \ 1 \ 1 \ 3 \ 2]$$

شکل ۴. مثالی برای نحوه انجام دادن مرحله اول الگوریتم MPSO

جدول ۲. نتایج تنظیم پارامترها برای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

اندازه	۸×۱۱	۹×۱۸	۱۶×۳۰
جمعیت	۴۰۰	۱۳۰۰	۶۴۰۰
تعداد تکرار	۵۰	۱۱۰	۱۱۰
تقاطع	۰/۶	۰/۶	۰/۷
جهش	۰/۳	۰/۵	۰/۳
تعداد اعضای رقابت	۲	۲	۲

به دلیل پیچیدگی محاسباتی، مدل پیشنهادی در زمان ۵۴۰۰ ثانیه یا حتی زمان بیشتر حل نمی‌شود؛ بنابراین، برای حل مسائل، بازه‌ای برای مقدار بهینه تابع هدف، از طریق مقادیر F_{bound} و F_{best} به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار لینگو ایجاد می‌شود. طبق راهنمای نرم‌افزار لینگو، F_{best} بهترین مقدار قابل قبول را برای تابع هدف نشان می‌دهد. بدیهی است بهترین مقدار تابع هدف هرگز نمی‌تواند از مقدار F_{bound} تجاوز کند و نزدیک بودن این دو مقدار نشان می‌دهد جواب فعلی یا مقدار بهینه است یا نزدیک به آن است. نتایج حل با استفاده از نرم‌افزار لینگو ۱۱، الگوریتم MPSO پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای مدل در حالت‌های با در نظر گرفتن خرابی ماشین و بدون آن، در جداول ۳ و ۴ گزارش شده است. الگوریتم MPSO پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای هر مسئله ده بار اجرا شده است و مقدار خطا، با میانگین جواب‌ها و بهترین جواب به دست آمده از طریق الگوریتم شاخه و کران، حاصل از نرم‌افزار لینگو ۱۱ به ترتیب از طریق دو رابطه $G_{ave} = [(Z_{ave} - F_{best}) / F_{best}] \times 100$ و $G_{best} = [(Z_{best} - F_{best}) / F_{best}] \times 100$ محاسبه شده است که Z_{ave} میانگین جواب‌های حاصل از حل الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای ده بار حل یک مسئله، Z_{best} بهترین جواب بین ده بار حل یک مسئله و F_{best} بهترین جواب حاصل از حل مدل با الگوریتم شاخه و کران در نرم‌افزار لینگو است. G_{best} فاصله نسبی بین F_{best} و Z_{best} و G_{ave} فاصله نسبی بین F_{best} و Z_{ave} را نشان

نتایج محاسباتی

برای اندازه‌گیری کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی و رفتار مدل، نوزده مثال به صورت تصادفی تولید شد. مدل ارائه شده در بخش ۲، با الگوریتم‌های پیشنهادی که با نرم‌افزار Matlab2013a کد شده‌اند و نرم‌افزار لینگو ۱۱ در کامپیوتر core i5 با CPU 2.5GHz، RAM 2.95GB حل شده‌اند. برای تنظیم پارامترها سه مسئله با اندازه‌های کوچک (۸×۱۱)، متوسط (۹×۱۸) و بزرگ (۱۶×۳۰) انتخاب و پارامترهای مناسب با استفاده از تحلیل آثار عمده انتخاب شدند. به دلیل کم بودن تعداد پارامترهای (دو پارامتر) الگوریتم MPSO از روش فاکتوریل کامل برای تنظیم پارامترها استفاده شد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی هم به دلیل زیاد بودن تعداد پارامترها (پنج پارامتر) از روش تاگوچی استفاده شد. تنظیم پارامترها برای هر دو الگوریتم در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است.

جدول ۱. نتایج تنظیم پارامترها برای MPSO پیشنهادی

اندازه	۷×۹	۹×۱۸	۱۶×۳۰
جمعیت	۴۰۰	۱۴۰۰	۶۴۰۰
تعداد تکرار	۵۰	۱۰۰	۱۰۰

برای حل قطعی مدل پیشنهادی از نرم‌افزار لینگو ۱۱ استفاده شده است. مسائلی که در بازه زمانی کمتر از ۵۴۰۰ ثانیه (۱/۵ ساعت) حل می‌شوند، از نوع مسائل کوچک و متوسط در نظر گرفته می‌شوند و به مسائل که بیشتر از این زمان، برای حلشان زمان نیاز است، مسائل بزرگ گفته می‌شود. حداکثر زمانی که به هر مسئله برای حل در نرم‌افزار لینگو داده می‌شود ۵۴۰۰ ثانیه است.

می‌دهد. در دو رابطه بررسی کیفیت ارائه شده، F_{best} اساس بررسی عملکرد است؛ بنابراین، از آنجاکه در مدل مورد بررسی تابع هدف حداکثرسازی است، مقدار مثبت G_{best} و G_{ave} در مسائل بزرگ نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری است و در مسائل اندازه کوچک و متوسط هم، فاصله نسبی میانگین و بهترین جواب بین ده بار اجرای الگوریتم فرا ابتکاری به صفر نزدیک است که نشان‌دهنده خطای کم الگوریتم فرا ابتکاری است. برای مقایسه دو الگوریتم فرا ابتکاری به ترتیب از سه رابطه ۱۴، ۱۵ و ۱۶ استفاده می‌شود:

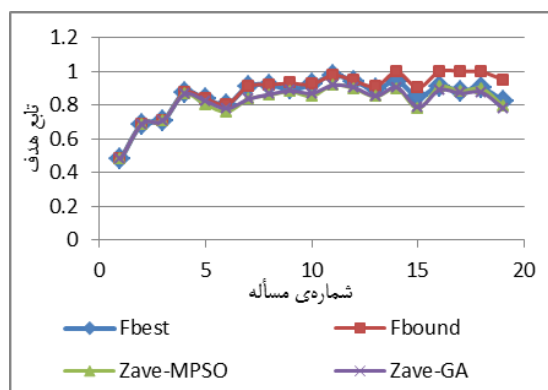
۱۴ و ۱۵ استفاده می‌شود:

$$Ga^{ave} = (Z_{ave}^{MPSO} - Z_{ave}^{GA}) / Z_{ave}^{MPSO} \quad (14)$$

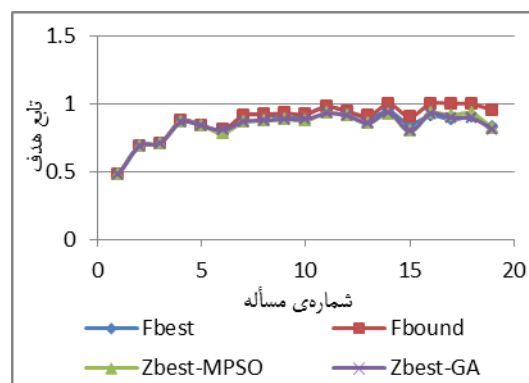
$$Ga^{best} = (Z_{best}^{MPSO} - Z_{best}^{GA}) / Z_{best}^{MPSO} \quad (15)$$

$$R = (T_{MPSO} - T_{GA}) / T_{GA} \quad (16)$$

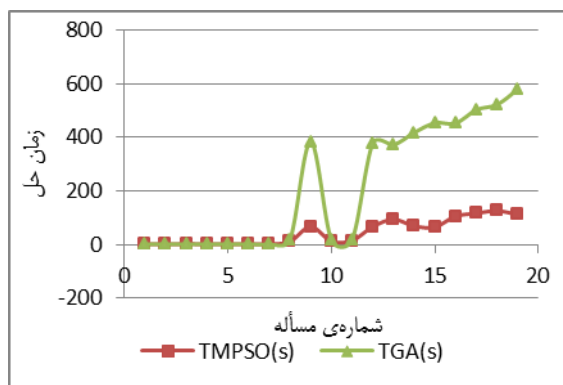
شکل ۵ و ۶ رفتار مقادیر Z_{best} و Z_{ave} به دست آمده از MPSO پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را در برابر



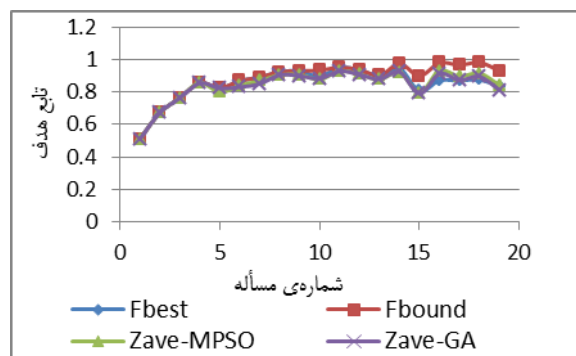
شکل ۴. مقایسه نتایج بین B&B لینگو، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم MPSO در میانگین جواب‌ها



شکل ۵. مقایسه نتایج بین B&B لینگو، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم MPSO در بهترین جواب‌ها



شکل ۶. مقایسه زمان‌های حل

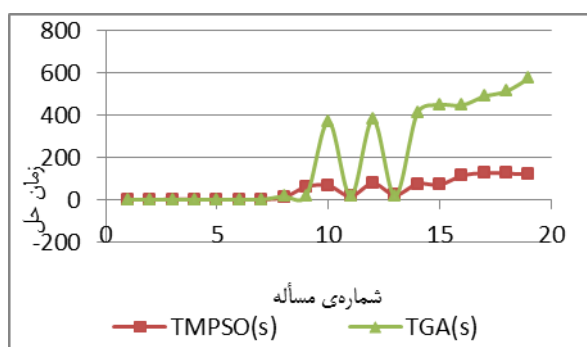


شکل ۷. مقایسه نتایج بین B&B لینگو، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم MPSO در میانگین جواب‌ها

جدول ۳. مقایسه عملکردن جواب‌های شاخه و کران، الگوریتم MPSO و ژنتیک پیش‌بینی در حالت بدون در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها

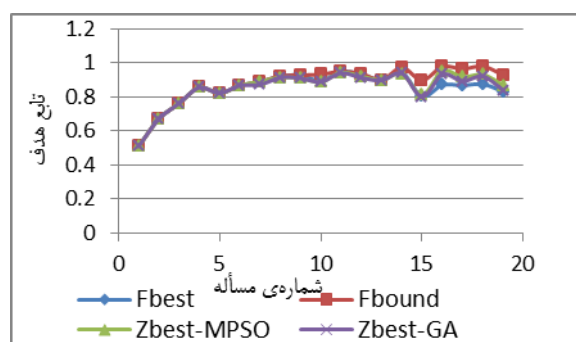
Problem No.	P	M	C	Mmax	B&B		MPSO			GA			MPSO & GA comparison(%)							
					Fbest	Fbound	TB&B(s)	Zave	Zbest	TMPSO(s)	Gap-ave(%)	Gap-best(%)	Zave	Zbest	TGA(s)	Gap-ave(%)	Gap-best(%)	Ga-ave	Ga-best	R
1	4	4	2	2	4781/-	-	-	4781	-4781	1/-	-/-	-/-	-4781	-4781	1/4	-/-	-/-	-/-	-28.57	
2	5	5	2	2	9859/-	-	-	9859	-9859	1/-	-/-	-/-	9859	-9859	1.5	-/-	-/-	-/-	-33.33	
3	7	6	2	2	7075/-	-	-	7075	-7075	2/8	-/-	-/-	7075	-7075	1/4	-/-	-/-	-/-	100/-	
4	8	6	2	4	8733/-	-	-	8733	-8733	1/3	-17.5	-17.5	8733	-8733	1/4	-17.5	-17.5	-/-	-71.4	
5	9	7	2	4	8377/-	3	3	8377	-8377	1/4	-9.1	-/-	8377	-8377	1.5	-1.5	-/-	-/-	-9.09	
6	11	8	2	4	8038/-	24	24	8038	-8038	1.5	-5.8	-5.8	8038	-8038	1.5	-3.1	-/-	-/-	-/-	
7	12	9	2	4	9113/-	25	25	9113	-9113	2/-	-8.2	-5.7	9113	-9113	1.5	-8.43	-/-	-/-	33.33	
8	18	8	2	5	9207/-	2244	2244	9207	-9207	11.6	-9.7	-5.3	9207	-9207	171	-9.2	-/-	-/-	-32.16	
9	17	10	2	5	8927/-	2429	2429	8927	-8927	9.9	-17.5	-17.4	8927	-8927	28.5	-17.4	-/-	-/-	-82.7	
10	18	9	2	5	9229/-	2449	2449	9229	-9229	12.9	-10.2	-5.2	9229	-9229	172	-5.1	-/-	-/-	-2.43	
11	19	9	2	5	9775/-	1284	1284	9775	-9775	1.5	-5.8	-5.8	9775	-9775	172	-5.1	-/-	-/-	-12.79	
12	20	9	2	5	9814/-	2422	2422	9814	-9814	9.7	-9.2	-3.1	9814	-9814	278	-9.2	-/-	-/-	-82.7	
13	19	10	2	5	8942/-	2422	2422	8942	-8942	9.4	-9.8	-5.3	8942	-8942	272	-9.8	-/-	-/-	-74.7	
14	24	11	4	5	9458/-	2422	2422	9458	-9458	9.7	-9.8	-1.9	9458	-9458	418	-9.8	-/-	-/-	-82.7	
15	24	14	4	5	8849/-	2422	2422	8849	-8849	9.8	-8.2	-5.7	8849	-8849	2.7	-5.7	-/-	-/-	-8.5	
16	20	16	4	5	9155/-	1	2422	9155	-9155	10.9	-1.9	1.5	9155	-9155	2.7	-1.9	-/-	-/-	-7.6	
17	25	20	4	7	8882/-	1	2422	8882	-8882	11.9	-1.1	2.6	8882	-8882	5.7	-1.1	-/-	-/-	-7.6	
18	27	20	5	7	8995/-	2422	2422	8995	-8995	12.5	-1.2	2.7	8995	-8995	2.7	-1.2	-/-	-/-	-7.6	
19	23	22	5	7	8852/-	2422	2422	8852	-8852	11.8	-2.2	-1.4	8852	-8852	2.7	-1.4	-/-	-/-	-8.1	
average											-3.55	-1.8				-2.6	-1.8	-/-	-3.44	

الگوریتم‌های فرا ابتکاری و الگوریتم شاخه و کران حاصل از نرم‌افزار لینگو در حالت بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ارائه شده است، برای حالت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هم قابل ارائه است. همچنین، آزمون t برای بررسی جواب‌های دو الگوریتم فرا ابتکاری در جدول ۶ ارائه می‌شود و نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری مهم بین دو الگوریتم فرا ابتکاری است.



شکل ۱۰. مقایسه زمان‌های حل

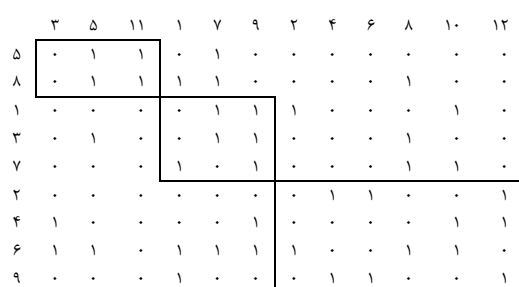
شکل‌های ۷ و ۹ رفتار مقادیر Z_{best} و Z_{ave} به‌دست‌آمده از MPSO و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را در برابر F_{best} و F_{bound} طبق اطلاعات به‌دست‌آمده از جدول ۴ نشان می‌دهد. شکل ۱۰ زمان حل الگوریتم‌های فرا ابتکاری و الگوریتم شاخه و کران حاصل از نرم‌افزار لینگو را به‌صورت مقایسه‌ای نمایش می‌دهد. تحلیلی که برای مقایسه جواب‌ها و زمان‌های حل



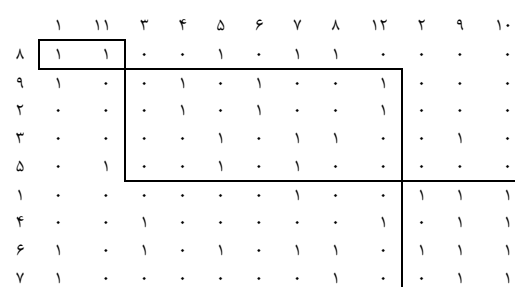
شکل ۹. مقایسه نتایج بین B&B لینگو، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم MPSO در بهترین جواب‌ها

جدول ۵. جزئیات آماری آزمون t

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair1 MPSO-GA	-0/00071	0/01165	0/00267	-0/00633	0/00490	/268	18	0/792



شکل ۱۲. جواب بهینه برای مسئله ۷ با در نظر گرفتن خرابی ماشین



شکل ۱۱. جواب بهینه برای مسئله ۷ بدون در نظر گرفتن خرابی ماشین

بدون در نظر گرفتن خرابی ماشین استفاده شده است. علت بهتر شدن و بدتر شدن تابع هدف با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان این است که دو تأثیر متفاوت بر مدل می‌گذارد (فضای جواب کوچک‌تر و مقدار تابع هدف بزرگ‌تر) و مقدار

برای مقایسه تأثیر خرابی ماشین که در جدول ۷ آورده شده است، بهترین جواب‌های حاصل از الگوریتم شاخه و کران به‌دست‌آمده از نرم‌افزار لینگو، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم MPSO پیشنهادی در دو حالت با و

طریق الگوریتم MPSO، ژنتیک پیشنهادی و الگوریتم شاخه و کران حاصل از نرم افزار لینگو برای مسائل با اندازه های متفاوت حل شد. در مسائل کوچک و متوسط کارایی الگوریتم های فرا ابتکاری با استفاده از جواب های بهینه به دست آمده از نرم افزار لینگو مقایسه شد. در برخی از مسائل بزرگ که نرم افزار لینگو نتوانست در طول بازه ۱/۵ ساعت جواب بهینه سراسری را پیدا کند، الگوریتم های MPSO و ژنتیک پیشنهادی، جواب بهتری از بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم شاخه و کران، در طول زمان خیلی کمتری به دست آوردند. در تحقیقات آتی پیشنهاد می شود حالت پویا و اضافه کردن مسئله مکان یابی در نظر گرفته شود.

تابع هدف از تأثیر این دو حاصل می شود. جواب بهینه مسئله ۷ نیز برای نشان دادن تأثیر قابلیت اطمینان در دو حالت برای مدل ارائه شده است. براساس نتایج، در نظر گرفتن خرابی ماشین تأثیر معناداری بر ماتریس ماشین - قطعه دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، مدل احتمالی برای مسئله تشکیل سلول، با پارامترهای احتمالی تقاضا، زمان پردازش و قابلیت اطمینان ارائه شده است. مدل در چارچوب نظریه صف ارائه شد و با هدف حداکثرسازی بهره وری ماشین ها به دنبال تشکیل سلول های بهینه بود. مثال های عددی نشان داد در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در مدل تأثیر معناداری بر ماتریس های ماشین - قطعه می گذارد. مدل پیشنهادی از

جدول ۶. جزئیات آماری آزمون t

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair1 MPSO-GA	۰.۰۵۷۲/۰	۰.۱۲۳۵/۰	۰.۰۲۸۳/۰	۰.۰۰۲۳/-۰	۰.۱۱۶۷/۰	۲/۰.۱۹	۱۸	۰/۰.۵۹

جدول ۷. مقایسه جواب ها در دو حالت با در نظر گرفتن خرابی ماشین و بدون در نظر گرفتن خرابی ماشین

شماره‌ی مسأله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
بدون در نظر گرفتن خرابی	۰/۴۷۸۱	۰/۶۸۶۴	۰/۷۰۷۵	۰/۸۷۳۳	۰/۸۳۷۳	۰/۸۰۳۸	۰/۹۱۱۳	۰/۹۲۰۷	۰/۹۰۱۲	
با در نظر گرفتن خرابی	۰/۵۰۹۴	۰/۶۷۲۱	۰/۷۶۲۸	۰/۸۵۶۹	۰/۸۲۳۱	۰/۸۶۸۴	۰/۸۹۰۴	۰/۹۲۳۱	۰/۹۲۹۲	
درصد کاهش	۶/۵۵	-۲/۰۸	۷/۸۲	-۱/۸۸	-۱/۷۰	۸/۰۴	-۲/۲۹	۰/۲۶	۳/۱۱	
شماره مسأله	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
بدون در نظر گرفتن خرابی	۰/۹۲۲۶	۰/۹۷۷۵	۰/۹۴۱۴	۰/۸۹۶۴	۰/۹۵۳۲	۰/۸۵۰۲	۰/۹۲۱۴	۰/۹۰۶۴	۰/۹۲۷۳	۰/۸۲۶
با در نظر گرفتن خرابی	۰/۸۹۸۴	۰/۹۵۱۴	۰/۹۳۳۳	۰/۹۰۱۲	۰/۹۴۶۶	۰/۸۰۰۷	۰/۹۴۳۵	۰/۹۰۴۵	۰/۹۳۳۸	۰/۸۵۶۱
درصد کاهش	-۲/۶۲	-۲/۶۷	-۰/۸۶	۰/۵۴	-۰/۶۹	-۵/۸۲	۲/۴۰	-۰/۲۱	۰/۷۰	۳/۶۴

مراجع

1. Singh, N. and Rajamani, D. (1996). *Cellular manufacturing systems: design, planning and control*, 1th Ed, Chapter 1, Chapman & Hall Pub. Co., London.

2. Ahi, A., Aryanezhad, M. B., Ashtiani, B. and Makui, A. (2009). "A novel approach to determine cell formation, intracellular machine layout and cell layout in the CMS problem based on TOPSIS method", *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 5, PP. 1478- 1496.
 3. Papaioannou, G. and Wilson, J. M. (2010). "The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): Review and directions for future research", *European Journal of Operational Research*, Vol. 206, No. 3, PP. 509- 521.
 4. Ghezavati, V. R. and Saidi-Mehrabad, M. (2010). "Designing integrated cellular manufacturing systems with scheduling considering stochastic processing time", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 5- 8, PP. 701- 717.
 5. Ghezavati, V. R. and Saidi-Mehrabad, M. (2011). "An efficient hybrid self-learning method for stochastic cellular manufacturing problem: A queuing-based analysis", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 3, PP. 1326- 1335.
 6. Das, K., Lashkari, R. S. and Sengupta, S. (2007a). "Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, No. 1, PP. 162- 180.
 7. Das, K., Lashkari, R. S. and Sengupta, S. (2007b). "Reliability consideration in the design and analysis of cellular manufacturing systems", *International Journal of Production Economics*, Vol. 105, No1, PP. 243- 262.
 8. Das, K. (2008). "A comparative study of exponential distribution vs Weibull distribution in machine reliability analysis in a CMS design", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, No. 1, PP. 12- 33.
 9. Ameli, M. S. J., Arkat, J. and Barzinpour, F. (2008). "Modelling the effects of machine breakdowns in the generalized cell formation problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 7- 8, PP. 838- 850.
 10. Ameli, M. S. J. and Arkat, J. (2008). "Cell formation with alternative process routings and machine reliability consideration", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 7-8, PP. 761- 768.
 11. Chung, S. H., Wu, T. H. and Chang, C. C. (2011). "An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 60, No. 1, PP. 7- 15.
 12. Rafiee, K., Rabbani, M., Rafiei, H. and Rahimi-Vahed, A. (2011). "A new approach towards integrated cell formation and inventory lot sizing in an unreliable cellular manufacturing system", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 4, PP. 1810- 1819.
 13. Asgharpour, M. J. and Javadian, N. (2004). "Solving a stochastic cellular manufacturing model by using genetic algorithms", *International Journal of Engineering Transactions A*, Vol. 17, No. 2, PP. 145- 156.
 14. Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B. and Safaei, N. (2007). "Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 184, No. 2, PP. 721- 728.
 15. Egilmez, G., Suer, G. A. and Huang, J. (2012). "Stochastic cellular manufacturing system design subject to maximum acceptable risk level", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 4, PP. 842- 854.
 16. Frederick, G. J. L. and Hillier, S. (2001). *Introduction to Operations Research*, 7th Ed., Chapter 17, McGraw-Hill Pub. Co., New York.
 17. Duran, O., Rodriguez, N. and Consalter, L. A. (2010). "Collaborative particle swarm optimization with a data mining technique for manufacturing cell design", *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 2, PP. 1563- 1567.
 18. Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV.*, Perth, WA, Vol. 4, PP. 1942- 1948.
-

19. Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). "A new optimizer using particle swarm theory", *In Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science.*, Nagoya, Japan. PP. 39- 43.
20. Mahdavi, I., Paydar, M. M., Solimanpur, M. and Heidarzade, A. (2009). "Genetic algorithm approach for solving a cell formation problem in cellular manufacturing", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 3, PP. 6598- 6604.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Group Technology
 2. Cellular Manufacturing
 3. Cell Formation
 4. Weibull Distribution
 5. First Come, First Service
 6. Modified Particle Swarm Optimization
-