



## Applying Scatter Search Algorithm Based on TOPSIS to Multi-Objective Cellular Manufacturing System Design

M. Ranjbar-Bourani, R. Tavakkoli-Moghaddam\*, H. Amoozad-Khalili & S.M. Hashemian

M. Ranjbar-Bourani, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University- South Tehran Branch, Tehran, Iran.

R. Tavakkoli-Moghaddam\*, Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

H. Amoozad-Khalili, Faculty Member of Islamic Azad University-Nowshahr Branch, Nowshahr, Iran.

S.M. Hashemian, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University-South Tehran Branch, Tehran, Iran.

### Keywords

Cell formation problem,  
Multi-objective optimization,  
TOPSIS, Scatter search

### ABSTRACT

This paper presents a multi-objective cell formation problem considering alternative process routes and machine utilization. Three conflicting objectives, namely 1) minimizing the total cost consisting inter-cell movements, procurement, operation and maintenance; 2) maximizing the total machine utilization in the manufacturing system; 3) minimizing the deviation levels between the cell utilization (i.e., balancing the workload between cells) are considered. Since this problem is NP-hardness, a multi-objective scatter search (MOSS) method based on TOPSIS is designed in order to find locally Pareto-optimal frontier. To demonstrate the efficiency of the proposed MOSS, a number of test problems are solved and the related results are compared with the well-known multi-objective genetic algorithm, called NSGA-II, based on some quality measures. The computational results indicate the superiority of the proposed MOSS compared to the foregoing NSGA-II.

© (نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید) شماره ۲، جلد ۲۱، ۱۳۸۹

## به کارگیری الگوریتم جستجوی پراکنده مبتنی بر روش Topsis در طراحی سیستم تولید سلولی چند هدفه

مهدی رنجبر بورانی، رضا توکلی مقدم، حسین عموزاد خلیلی و سید محمد هاشمیان

### چکیده:

در این مقاله، یک مدل چندهدفه برای مسأله تشکیل سلول تولیدی با در نظر گرفتن مسیریهای عملیاتی چندگانه و حداکثر بهره‌گیری از ماشین‌ها، ارائه می‌شود. سه هدف متعارض شامل: (۱) حداقل نمودن کل هزینه‌های حرکات بین سلولی، خرید ماشین‌ها، عملیات و نگهداری و تعمیرات، (۲) حداکثر نمودن سطح بهره‌گیری از ماشین‌ها در سیستم تولیدی و (۳) حداقل نمودن انحراف

### کلمات کلیدی

مسأله تشکیل سلول،  
بهبودسازی چندهدفه،  
روش تاپسیس،  
الگوریتم جستجوی پراکنده

تاریخ وصول: ۸۸/۲/۵

تاریخ تصویب: ۸۹/۳/۲۶

مهدی رنجبر بورانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ranjbar.mehdi@yahoo.com

دکتر رضا توکلی مقدم، استاد گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، tavakoli@ut.ac.ir

حسین عموزاد خلیلی، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نوشهر، amoozad\_ie@iauns.ac.ir

سید محمد هاشمیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، hashemianmohamad@yahoo.com

میان سطوح بهره‌گیری از سلول‌ها (یعنی بالانس نمودن بارکاری بین سلول‌ها) ارایه می‌شود. از آن جایی که مدل ریاضی پیشنهادی، جزء مدل‌های ریاضی پیچیده است؛ یک الگوریتم جستجوی پراکنده چند هدفه برای به دست آوردن جواب‌های موثر طراحی می‌شود. برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم جستجوی پراکنده چند هدفه بر مبنای روش تاپسیس با الگوریتم NSGA-II که اخیراً مورد توجه قرار گرفته، بر روی مسایل نمونه مختلف و بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری گوناگون، مقایسه می‌شود. نتایج محاسباتی، کارایی الگوریتم پیشنهادی را نسبت به الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد.

## ۱. مقدمه

در این مقاله، مسأله‌ای در نظر گرفته شده است که اهمیت زیادی در صنایع داشته و حل آن می‌تواند برای علم و صنعت موثر باشد. بسیاری از مسائل مشابه وجود دارند که با دسته‌بندی آنها می‌توان راه حل مناسبی جهت مجموعه‌ای از مشکلات یافت و بدین ترتیب در زمان صرفه جویی کرد که این واقعیت کار تولید سلولی است که با سازماندهی تجهیزات تولیدی در گروه‌ها و سلول‌های مستقل جهت تکمیل و ساخت خانواده‌هایی از قطعات با مشخصه‌های تولیدی مشابه استفاده می‌شود. در مجموع سیستم تولید سلولی یک فلسفه تولیدی است که در آن قطعات به منظور بهره‌برداری از تشابهات آنها در طراحی و ساخت، شناسایی و طبقه‌بندی می‌شوند. به طور کلی سیستم تولید سلولی جزء روش‌های نوین تولید می‌باشد که در سال‌های اخیر بخش صنعت از مزایای آن بهره‌مند شده است [۱].

در این نوشتار، مدل ریاضی جدیدی برای مسأله تشکیل تولید سلولی پیشنهاد و طراحی شده است که کاهش مجموع هزینه‌های زیر با توجه به انعطاف‌پذیری مسیر جریان به صورت هدف در مدل در نظر گرفته شده است. این هزینه‌ها شامل هزینه خرید ماشین، هزینه عملیاتی ماشین، هزینه نگهداری و تعمیرات ماشین و هزینه حمل و نقل بین سلولی قطعات است. همچنین حداکثر نمودن میزان استفاده از ماشین‌ها در تضاد با کاهش عدم بالانس بار کاری بین سلول‌ها است که در قالب تابع هدف سوم در نظر گرفته شده است. بنابراین در کنار کاهش مجموع هزینه‌ها دو هدف حداقل میزان انحرافات نیز به شکل زیر در نظر گرفته شده است [۲].

- حداقل نمودن میزان عدم به کارگیری کل ماشین‌های موجود در سیستم تولیدی
- حداقل نمودن عدم بالانس بار کاری بین سلول‌های مختلف.

با توجه به پیچیدگی حل این مسأله آن را جزء خانواده مسائل NP-hard در نظر می‌گیرند [۳]. بنابراین به کارگیری روش‌هایی که جواب بهینه تولید می‌کنند تنها برای مسائل با اندازه‌های کوچک میسر است. هدف این مقاله، ارایه الگوریتمی کارا برای حل مسأله تشکیل سلول در سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن شرایط توضیح داده شده با به کارگیری الگوریتم جستجوی پراکنده چند هدفه است.

## ۲. سیستم تولید سلولی

پیشرفته‌ترین کاربرد تکنولوژی گروهی در عرصه تولید، تولید سلولی است. امروز صنایع تولیدی زیر فشار شدیدی از جانب بازارهای رقابتی جهانی، قرار دارند. چرخه عمر کوتاه‌تر محصول، کوتاه‌تر شدن سیکل عرضه محصول به بازار و خواسته‌های متعدد و گوناگون مشتریان، تولید کنندگان را وادار کرده است تا کارایی و بهره‌وری فعالیت‌ها و فرایند تولیدی خود را بهبود دهند. در واقع باید سیستم‌های تولیدی خود را بهبود دهند [۴ و ۵]. در واقع باید سیستم‌های تولیدی خود را به نحوی تغییر دهند که قادر باشند محصولات خود را با کمترین هزینه، بالاترین کیفیت و در سریع‌ترین زمان ممکن جهت تحویل به موقع به مشتریان، تولید نماید. هم چنین این سیستم‌ها باید قادر باشند تا خود را سریعاً با تغییرات در تقاضا و طراحی محصولات، بدون نیاز به سرمایه‌گذاری مجدد زیاد، سازگار سازند [۶].

## ۳. مسائل بهینه سازی چند هدفه

با توجه به مطالب بیان شده در بخش قبل، می‌توان دریافت که به علت وجود تضاد بین سه تابع هدف در نظر گرفته شده، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای حل مسأله مورد نظر مناسب‌تر از روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه است. بنابراین، در ادامه این بخش، توضیحاتی در مورد اصول و مبانی بهینه‌سازی چندهدفه ارائه خواهد شد.

تفاوت اساسی بین مسائل بهینه‌سازی چندهدفه و تک هدفه در وجود تابع‌های هدف گوناگون و متضاد در مسائل چندهدفه است. وجود چنین تابع‌های هدفی، دستیابی به جواب (جواب‌های) بهینه را از طریق به کارگیری الگوریتم‌های متداول مسائل بهینه‌سازی تک هدفه غیرممکن می‌سازد. برای آشنایی بیشتر با ماهیت مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، تعریف‌های کلیدی زیر ارایه می‌گردند (در تمامی تعریف‌ها، مدل کمینه‌سازی زیر با  $p$  متغیر تصمیم‌گیری و  $q$  تابع هدف در نظر گرفته شده است) [۷].

$$\text{Min } y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)) \quad (1)$$

$$x, y \in R^p, q > 1$$

### ۳-۱. تعریف ارتباط غالب<sup>۱</sup>

خرید ماشین، عملیات، نگهداری و تعمیرات ماشین‌ها، حمل و نقل بین سلولی آنها می‌باشد.

در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه گوییم بردار  $\bar{x}_1$  بر بردار  $\bar{x}_2$  غلبه می‌نماید هر گاه دو شرط زیر برقرار باشد:

$$f_i(\bar{x}_1) \leq f_i(\bar{x}_2) \quad ; \quad \forall i=1, \dots, q \quad (2)$$

$$f_i(\bar{x}_1) < f_i(\bar{x}_2) \quad ; \quad \exists i=1, \dots, q \quad (3)$$

### ۴-۱. نتایج مورد انتظار از روش طراحی

طی فرآیند طراحی سیستم تولید سلولی، باید خروجی زیر به دست آید.

۱. تخصیص عملیات هر نوع قطعه به انواع ماشین‌ها.
۲. تخصیص انواع ماشین‌ها به سلول‌ها.
۳. تعداد هر نوع ماشین داخل هر سلول.

### ۴-۲. پارامترهای ورودی مدل

مقادیر پارامترهای ورودی که در ابتدای دوره از افق برنامه‌ریزی مشخص شوند عبارتند از:

۱. تقاضای مورد نیاز از هر نوع قطعه در هر دوره.
۲. زمان مورد نیاز برای یک ماشین برای انجام عملیات یک قطعه.
۳. قابلیت هر ماشین در انجام عملیات.
۴. مقدار زمان در دسترس برای هر ماشین در هر دوره.

### ۴-۳. محدودیت‌های مدل

محدودیت‌های زیر باید در مدل لحاظ شوند:

۱. ظرفیت ماشین‌ها برای تولید انواع قطعات مشخص شده در سطح تقاضای مشخص شده، در هر دوره باید کافی باشد.
۲. اندازه سلول‌ها باید مشخص باشد. برای این منظور می‌توان از حدود بالا و پایین برای ماشین‌های داخل سلول استفاده کرد.
۳. تعداد سلول‌ها باید از قبل مشخص باشد. این کار می‌تواند توسط مدیریت یا طراح سیستم صورت گیرد.

### ۴-۴. نمادهای مدل

#### ۴-۴-۱. اندیس‌ها

$c$  = نماد سلول‌های تولیدی ( $c=1, \dots, C$ )

$m$  = نماد انواع ماشین‌ها ( $m=1, \dots, M$ )

$P$  = نماد انواع قطعات ( $p=1, \dots, P$ )

$j$  = نماد عملیات مورد نیاز قطعه  $p$  ( $j=1, \dots, Jp$ )

#### ۴-۴-۲. پارامترهای ورودی

$tjpm$  = زمان مورد نیاز جهت انجام عملیات  $j$  از قطعه  $p$  بر روی ماشین  $m$

$BP$  = اندازه دسته‌هایی از قطعات نوع  $p$  که باید جابه‌جا شوند.

$\gamma p$  = هزینه حرکت بین سلولی برای هر دسته از قطعه  $p$

$\alpha m$  = هزینه خرید یک واحد از ماشین نوع  $m$

$\beta m$  = هزینه عملیاتی به ازای هر ساعت استفاده از ماشین نوع  $m$

$Mm$  = هزینه نگهداری ماشین نوع  $m$  در طول دوره

بنابراین هدف اصلی در این گونه مسائل، پیدا کردن مجموعه‌ای از نقاط است که بر نقاط دیگر غالب باشند. برای درک بیشتر موضوع دو تعریف زیر بیان می‌گردند.

### ۳-۲. تعریف نقاط بهینه موضعی

برداری مانند  $\bar{x}$  به صورت موضعی بهینه در نظر گرفته می‌شود هر گاه به ازای  $\delta > 0$  نتوان بردار دیگری مانند  $\bar{x}_1$  پیدا نمود، به طوری که این بردار بتواند بر بردار  $\bar{x}$  در کره‌ای به مرکز  $\bar{x}$  و شعاع  $\delta$  غلبه کند. در این حالت بردار  $\bar{x}$  را به صورت موضعی جواب غیر مغلوب می‌نامند.

### ۳-۳. تعریف نقاط بهینه سراسری

برداری مانند  $\bar{x}$  به صورت سراسری بهینه در نظر گرفته می‌شود هر گاه در کل فضای جواب نتوان بردار دیگری مانند  $\bar{x}_1$  پیدا نمود، به طوری که این بردار بتواند بر بردار  $\bar{x}$  غلبه کند. در این حالت بردار  $\bar{x}$  را به صورت سراسری جواب غیرمغلوب یا پارتو می‌نامند.

### ۴. مدل ریاضی

در نظر داریم با استفاده از توسعه مدل‌های معرفی شده در ادبیات موضوع، یک مدل چند هدفه و غیرخطی عدد صحیح (INLP) برای مسأله تشکیل سلول تولیدی با سه هدف متضاد زیر ارائه نماییم [۶]. با این تفاوت که در این مقاله سه تابع هدف را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

۱. حداقل نمودن هزینه‌های سیستم شامل هزینه خرید، هزینه نگهداری، هزینه عملیات و هزینه حرکات بین سلولی.
۲. حداکثر نمودن میزان بهره‌گیری از ماشین‌ها.
۳. بالانس بار کاری بین سلول‌های مختلف.

سیستم تولیدی مورد نظر از چندین نوع قطعه تشکیل شده که هر یک نیاز به انجام تعدادی عملیات با توالی مشخص روی ماشین‌های مختلف با ظرفیت محدود دارند. محدودیت‌های اصلی شامل حداکثر سلول، ظرفیت ماشین، سرمایه‌گذاری بر روی ماشین‌ها می‌باشد. اهداف عمده مدل، انتخاب برنامه تولیدی با کمترین مجموع هزینه

<sup>1</sup>. Domination Relation

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{J_p} D_p \cdot t_{jpm} \cdot X_{jpmc} \leq T_m \times N_{mc} \quad \forall m, c \quad (8)$$

$$Z_{jpc} = \alpha_{jpm} \times \sum_{m=1}^M X_{jpmc} \quad \forall j, p, c \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M N_{mc} \leq UB \quad \forall c \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M N_{mc} \geq LB \quad \forall c \quad (11)$$

$$cu_c = \left( \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} D_p \cdot t_{jpm} \cdot X_{jpmc} \right) / \left( \sum_{m=1}^M T_m \cdot N_{mc} \right) \forall c \quad (12)$$

$$ou = \left( \sum_{c=1}^C cu_c \times \left( \sum_{m=1}^M T_m \cdot N_{mc} \right) \right) / \left( \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M T_m \cdot N_{mc} \right) \quad (13)$$

$$X_{jpmc}, Z_{jpc} \in (0,1) \text{ and } N_{mc} \geq 0 \quad \forall j, p, m, c \quad (14)$$

همان گونه که مشاهده می شود تابع هدف مدل فوق شامل سه هدف عمده می باشد.

۱. تابع هدف اول (رابطه ۴) یک معادله عدد صحیح غیرخطی است که مجموع هزینه های سرمایه گذاری ماشین ها، هزینه های عملیاتی، هزینه های جابه جایی بین سلولی قطعات و هزینه نگهداری و تعمیرات ماشین ها را حداقل می سازد. عبارت اول، هزینه جابه جایی بین سلولی قطعات را محاسبه می کند. این هزینه برابر است با مجموع حاصل ضرب حرکات بین سلولی هر نوع قطعه در هزینه جابجایی متناظر هر دسته از آن نوع قطعه. بدیهی است که توالی عملیات مستقیماً بر هزینه حمل بین سلولی اثر می گذارد؛ زیرا چنانچه دو عملیات متوالی یک قطعه در یک سلول انجام نپذیرند، یک واحد هزینه حمل و نقل بین سلولی ایجاد می شود. ضریب ۰/۵ در این عبارت به این دلیل است که هر واحد انتقال قطعات یا جابجایی ماشین ها، دو بار در محاسبات منظور شده است. عبارت دوم، هزینه نگهداری و تعمیرات ماشین ها را در افق برنامه ریزی حداقل می سازد. عبارت سوم، هزینه خرید تمام ماشین هایی که در طول افق برنامه ریزی مورد نیاز می باشند، را محاسبه می کند عبارت چهارم، هزینه های عملیاتی ماشین ها را محاسبه می نماید که حاصل ضرب ساعت های مورد نیاز ماشین ها در هزینه های عملیاتی متناظرشان است.

۲. تابع هدف دوم (رابطه ۵) نیز به صورت غیرخطی و کسری می باشد که انحراف معیار استفاده از کل ماشین ها سیستم را نسبت به حالت ایده آل که عدد یک است را کمینه می کند. که باعث حداقل نمودن تغییرات بار کاری سلول ها شده، جریان

$Dp$  = تقاضای قطعه  $p$

$Tm$  = ظرفیت در دسترس هر واحد از ماشین نوع  $m$  (ساعت)

$LB$  = حد پایین تعداد ماشین های داخل سلول

$UB$  = حد بالای تعداد ماشین های داخل سلول

$\alpha_{jpm} = 1$ : اگر عملیات  $j$  از قطعه  $p$  بتواند توسط ماشین  $m$  انجام شود.

• در غیر این صورت

$Ou$  = درصد استفاده از کل ماشین ها موجود سیستم

$Cuc$  = درصد استفاده از ماشین ها سیستم در سلول  $c$

#### ۴-۴-۳. متغیرهای تصمیم

$Nmc$  = تعداد ماشین های نوع  $m$  که در سلول  $c$  مورد استفاده قرار گرفته اند.

$ymc = 1$ : تخصیص ماشین نوع  $m$  به سلول  $c$

• در غیر این صورت

$x_{jpmc} = 1$ : تخصیص عملیات  $j$  از قطعه  $p$  به ماشین  $m$  در سلول  $c$

• در غیر این صورت

$Z_{jpc} = 1$ : تخصیص عملیات  $j$  از قطعه نوع  $p$  به سلول  $c$

• در غیر این صورت

#### ۴-۴-۴. فرمول ریاضی

استراتژی مدلی که مورد بررسی قرار می گیرد به این صورت است که ابتدا سلول ماشین ها با مکانیزی که بر اساس محاسبه میزان تشابه بین ماشین ها کار می کند، شکل می گیرد. سپس خانواده قطعات با استفاده از میزان تشابه بین قطعات و سلول های شکل گرفته، به سلول های مربوط تخصیص می یابد. بنابراین این امر منجر به پیچیدگی مدل شده و مقدار زمان مورد نیاز برای آن افزایش می یابد [۶].

$$\text{Min } F_1 = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \left[ \frac{D_p}{B_p} \right] \times \gamma_p \cdot \sum_{j=1}^{J_p-1} \sum_{c=1}^C |Z_{(j+1)pc} - Z_{jpc}| + \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mc} \cdot M_m + \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mc} \cdot \alpha_m + \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{J_p} D_p \cdot X_{jpmc} \cdot t_{jpm} \cdot O_m \quad (4)$$

$$\text{Min } F_2 = |ou - 1| \quad (5)$$

$$\text{Min } F_3 = \sum_{c=1}^C |cu_c - ou| \quad (6)$$

s.t.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \alpha_{jpm} \cdot X_{jpmc} = 1 \quad \forall j, p \quad (7)$$

عبارتست از: به حداقل رساندن مجموع کل هزینه‌ها، کاهش عدم بهره‌گیری از ماشین‌ها و کاهش عدم بالانس بار کاری بین سلول‌ها است. در این مقاله، نحوه عملکرد الگوریتم جستجوی پراکنده توضیح داده شده و نحوه حرکت الگوریتم جهت دستیابی به حل مناسب بیان خواهد شد.

به طور خاص الگوریتم جستجوی پراکنده برای حل مدل مربوط به این مسأله به شرح زیر بیان شود: یک بردار حل اولیه برای تضمین یک سطح (حد) بحرانی از گوناگونی ایجاد می‌کنیم و یک فرآیند طراحی شده فرا ابتکاری برای مسأله مفروض جهت تلاش برای بهبود حل‌ها به کار می‌بریم. یک زیر مجموعه از بهترین بردارها را به عنوان حل‌های مرجع کاندید می‌کنیم. بدیهی است که مبنای هر رویکرد فرا ابتکاری، نحوه نمایش جواب می‌باشد. این موضوع شدیداً به ماهیت مسأله مورد بررسی یعنی تعداد و بعد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل وابسته است. در بسیاری از تحقیقات مشابه، جهت نمایش جواب شدنی از ساختار خطی استفاده شده است. اگر چه استفاده از ساختار خطی در ادبیات موضوع بسیار متداول می‌باشد ولی با افزایش تعداد محدودیت‌های مدل بعد متغیرهای تصمیم‌گیری و همچنین اندازه مسأله این ساختار کارایی خود را از دست می‌دهد. چرا که ارضای قیود و تطبیق متغیرهای تصمیم با ساختار ارائه شده، کدنویسی را بسیار پیچیده و ناکارآمد خواهد ساخت. جهت کاهش این پیچیدگی‌ها می‌توان به جای ساختار تک بعدی (خطی) از ساختار دو بعدی (ماتریسی) برای نمایش جواب استفاده کرد. این امر درک مسأله را افزایش داده و موجب کارایی در کدنویسی خواهد شد. در این مقاله، از یک ساختار ماتریسی استفاده شده است [۱۱].

## ۲-۵. نحوه نمایش جواب

در تمام الگوریتم‌های فرا ابتکاری، به دلیل نیاز به حل شدنی در شروع کار، لازم است حل شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم. به این ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. شکل (۱)، یک حل شدنی برای مسأله مورد نظر را در قالب میکروسکوپیکی نشان می‌دهد. در این شکل سه ماتریس بیانگر شکل کلی جواب مسأله به صورت  $[[X]_{R \times P} | [Y]_{R \times P} | [N]_{M \times C}]$  است.

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1P} & | & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1P} & | & n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1C} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2P} & | & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2P} & | & n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2C} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{R1} & x_{R2} & \dots & x_{RP} & | & y_{R1} & y_{R2} & \dots & y_{RP} & | & n_{M1} & n_{M2} & \dots & n_{MC} \end{pmatrix}$$

شکل ۱. نحوه نمایش میکروسکوپیکی جواب

همانطور که مشاهده می‌شود ماتریس  $[X]_{R \times P}$  مربوط به اختصاص عملیات قطعه مورد نیاز به ماشینی است که توانایی پردازش آن را

مواد در داخل هر سلول را تسهیل و یکنواخت نموده و منجر به حداقل شدن WIP درون سلول‌ها می‌گردد [۸].  
۳. تابع هدف سوم (رابطه ۶) انحراف معیار بار کاری بین سلول‌های مختلف را کمینه می‌سازد چرا که وجود اختلاف قابل ملاحظه در بار کاری سلول‌ها می‌تواند منشأ مشکلات زیادی در امر مدیریت سیستم تولید به ویژه در بعد نیروی انسانی آن باشد. این مسأله می‌تواند اختلافات زیادی را در میزان نیاز به اضافه کاری در سلول‌های مختلف و درآمد پرسنل ایجاد نماید. بنابراین در قالب کمینه‌سازی انحراف معیار از میانگین بار کاری سلول‌ها تعریف می‌شود.

محدودیت ۵ تضمین می‌کند که در هر دوره، هر عملیات از هر قطعه، تنها به یک ماشین و یک سلول تخصیص یافته است. محدودیت ۶ کافی بودن ظرفیت ماشین‌ها برای برآورده کردن تقاضای قطعات را فراهم می‌کند. به نحوی که زمان مورد نیاز برای تولید قطعات از ظرفیت ماشین‌ها تجاوز ننموده و کل تقاضا نیز برآورده می‌شود؛ همچنین این محدودیت تعداد مطلوب هر نوع ماشین در هر سلول را تعیین می‌کند. محدودیت ۷ بیان می‌کند در صورتی که حداقل یک عملیات از قطعه ای خاص در سلولی خاص صورت بگیرد مقدار  $Z_{jpc}$  یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. این عبارت برای محاسبه تعداد حرکات بین سلولی استفاده می‌شود. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب حدود پایین و بالای اندازه سلول‌ها و تعداد ماشین‌هایی که در هر سلول می‌توانند قرار گیرند، را مشخص می‌سازند. محدودیت ۱۲ درصد استفاده از ماشین‌ها را در هر سلول محاسبه می‌کند. بدیهی است در صورتی که ماشین‌ها زمان بیشتری را تحت عملیات قطعات مختلف قرار گیرند مقدار این عبارت بیشتر خواهد بود. محدودیت ۱۳ میزان استفاده از کل ماشین‌ها را در قالب میانگین وزنی از کل درصد استفاده از ماشین‌ها محاسبه می‌نماید. محدودیت ۱۴ نوع متغیرهای مسأله را نشان می‌دهد [۹].

## ۵. ساختار پیشنهادی روش جستجوی پراکنده چند

### هدفه

در این بخش، اجزای طراحی شده برای ساختار پنج‌گانه روش فرا ابتکاری جستجوی پراکنده به صورت کامل مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت.

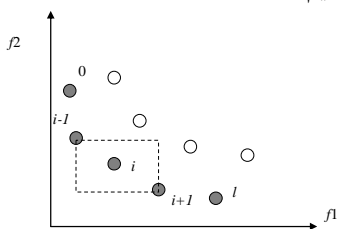
### ۱-۵. ساختار کلی روش پیشنهادی جستجوی پراکنده

همانطور که می‌دانیم الگوریتم جستجوی پراکنده در قیاس با سایر روش‌های فرا ابتکاری دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است و باتوجه به ماهیت پیچیده مسأله از آن برای حل استفاده شده است. از سال ۱۹۹۰ تا سال‌های اخیر میزان به کارگیری این الگوریتم همواره افزایش داشته است [۱۰]. هدف الگوریتم پیشنهادی

#### ۴-۵. مکانیزم رتبه‌بندی بر اساس ارتباط غالب

رتبه‌بندی براساس تعداد جواب‌هایی که جواب فعلی را مغلوب می‌کند به اضافه عدد یک به دست می‌آید. معیار انتخاب برای حضور اجزا برای نسل بعد، ابتدا بر اساس رتبه‌های است که به مجموعه‌ای از حل‌ها تعلق می‌گیرد. هر چه رتبه کمتر باشد نشانگر این مطلب است که آن جزء کمتر مغلوب دیگر اجزاء شده است.

حل‌های غالب (غیر مغلوب<sup>۱</sup>)، حاصل از نسل آخر را به آرشیو جواب‌های پارتو منتقل می‌کنیم. حل‌های با رتبه کمتر به مرز بهینه پارتو نزدیک‌ترند. به طور کلی جهت‌گیری همه الگوریتم‌های چند هدفه به صورتی است که به جواب‌های نزدیک به مرز بهینه بیشتری، دسترسی پیدا کنند. در حقیقت زمانی که رتبه یک مجموعه یکسان باشد برای انتخاب اجزاء مورد نیاز، نیازمند به معیار دیگری برای انتخاب هستیم که در این مقاله، از معیار فاصله ازدحام<sup>۲</sup> استفاده شده است. برای محاسبه معیار فاصله ازدحام هر یک از توابع هدف مد نظر را برای حالت مینیم سازی، به صورت صعودی مرتب می‌شود. سپس عناصر مرزی مربوط به هر یک از توابع مقدار فاصله ازدحام مربوطه بی نهایت در نظر گرفته می‌شود. برای سایر عناصر میانی مجموعه، فاصله ازدحام از محاسبه قدر مطلق فاصله تابع هدف نرمال شده عناصر مجاور محاسبه می‌شود [۱۳ و ۱۴]. در شکل (۳)، ۵ دایره که با رنگ تیره نشان داده شده‌اند دارای رتبه یکسان هستند، برای محاسبه فاصله ازدحام عنصر  $i$  ام، کافی است طول و عرض مستطیلی که به عناصر مجاور متصل است را با هم جمع کنیم [۱۴].



شکل ۳. محاسبه فاصله ازدحام

#### ۵-۵. آرشیو جواب‌های پارتو

در بسیاری از پژوهش‌ها از یک لیست مجازی خارجی به نام لیست آرشیو جواب‌های پارتو برای نگهداری جواب‌های غالب به دست آمده در طی فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. هدف اصلی از به کارگیری این لیست، کاهش احتمال از بین رفتن یک جواب غالب پیدا شده در طی فرایند حل مسأله است. ظرفیت لیست آرشیو پارتو معمولاً به صورت محدود در نظر گرفته می‌شود. این لیست، به منظور دستیابی به جواب‌های غالب که به صورت سراسری بهینه هستند، مرحله به مرحله به روز رسانده می‌شود. اگر یک جواب غالب

دارد. که مقدار  $R$  از رابطه  $R = \max_{p=1}^P \{J_p\}$  به دست می‌آید که بیانگر حداکثر تعداد عملیات به ازای کلیه قطعات است. در رویکرد تصادفی برای ماتریس  $[X]_{R \times P}$  از مجموعه ماشین‌هایی که توانایی آن<sup>۳</sup> جام آن عملیات بر روی ماشین مورد نظر را دارند یکی به طور تصادفی انتخاب می‌شود. ماتریس  $[Y]_{R \times P}$  مربوط به تخصیص عملیات مورد نظر قطعات به سلول می‌باشد. در رویکرد تصادفی عملیات مربوط به قطعات به یک سلول  $C, 1, \dots, C$  اختصاص می‌یابد.

$$N_{mc} = \left[ \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} D_p \cdot t_{jpm} \cdot X_{jpmc}}{T_m} \right] \quad \forall m, c \quad (15)$$

ماتریس  $[N]_{M \times C}$  نشان دهنده تعداد ماشین‌ها مورد نیاز از نوع  $m$  می‌باشد که در سلول  $C$  مورد نیاز است. تعداد ماشین‌ها مورد نیاز از رابطه (۱۵) به دست می‌آید زمانی ماتریس  $N_{M \times C}$  شدن خواهد بود که مجموع هر ستون در بازه حد بالا و پایین تعداد ماشین‌ها در سلول قرار بگیرد.

#### ۳-۵. نحوه تولید جواب‌های پراکنده اولیه

در این مقاله، برای یکسان‌سازی شرایط پیاده سازی دو الگوریتم جستجوی پراکنده برای تولید جواب‌های اولیه از مکانیزم تصادفی استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای کنترل تولید جواب اولیه از لحاظ گوناگونی، تابعی با نام نرخ تشابه میان یک جفت از جواب‌ها تعریف می‌شود. این تابع به این‌گونه عمل می‌کند، جوابی که اخیراً تولید شده اگر از میزان مشخصی از این شاخص کمتر بود، برای ادامه روند تولید، به چرخه تولید جواب‌های اولیه وارد می‌شود. شکل (۲) نحوه محاسبه نرخ تشابه را نشان می‌دهد.

$$SR_{pq}^x = \frac{\text{similar genes}}{\text{total genes}} = \frac{5}{9}$$

$$SR_{pq}^y = \frac{\text{similar genes}}{\text{total genes}} = \frac{3}{9}$$

$X_p$			$Y_p$		
2	3	2	1	1	2
2	1	1	1	2	3
3	0	4	2	0	1
1	0	0	3	0	0
$X_q$			$Y_q$		
2	1	2	1	2	3
3	3	1	3	2	1
3	0	3	3	0	1
4	0	0	2	0	0

$$SR_{pq} = SR_{pq}^x + SR_{pq}^y$$

شکل ۲. نحوه محاسبه نرخ تشابه به همراه ارائه یک نمونه

مثال

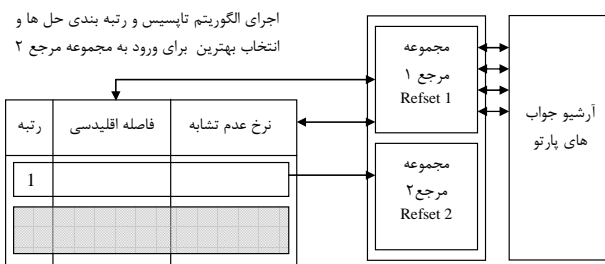
<sup>1</sup> Non-Dominated

<sup>2</sup> Crowding Distance

رویکرد بر این موضوع استوار است که جواب غالب جدید تنها در حالتی به آرشیو اضافه می‌گردد که نسبت به تمام جواب‌های موجود در آرشیو متفاوت باشد. این رویکرد باعث می‌گردد که علاوه بر از دست ندادن جواب غالب جدید، جواب‌های پارتوی متنوع و متفاوتی در آرشیو پارتو نگهداری گردند.

#### ۶-۵. به روز رسانی مجموعه مرجع

در این مقاله، مجموعه مرجع از دو زیر مجموعه به نام‌های RefSet1 (جواب‌های با کیفیت) و RefSet2 (جواب‌های پراکنده) تشکیل شده است. بیشینه ظرفیت این دو زیرمجموعه به ترتیب  $b_1$  و  $b_2$  است. به عبارت دیگر داریم  $|Refset| = b_1 + b_2$ . برای تشکیل مجموعه مرجع، ابتدا زیر مجموعه RefSet1 تشکیل می‌گردد. بدین منظور از آرشیو پارتو حداکثر  $b_1$  جواب غالب، انتخاب و به زیر مجموعه RefSet1 اضافه می‌شوند. سپس کمینه فاصله اقلیدسی<sup>۳</sup> و نرخ عدم تشابه<sup>۴</sup> بین هر یک از جواب‌های بهبود یافته بخش با جواب‌های موجود در RefSet1 محاسبه می‌گردد. جواب‌های موجود بر اساس رویه TOPSIS مرتب می‌گردند. سپس از بین این جواب‌ها، حداکثر  $b_2$  جواب غیر تکراری انتخاب گردیده و به زیر مجموعه RefSet2 اضافه می‌گردند. لازم به ذکر است که محاسبه نرخ عدم تشابه، همانند نرخ تشابه است با این تفاوت که عناصر غیر یکسان ماتریس  $X$  و  $Y$  بر عناصر غیر صفر تقسیم می‌شود. نحوه عملکرد به گونه ای است که حداقل فاصله اقلیدسی و نرخ عدم تشابه توسط الگوریتم تاپسیس حداکثر می‌شود. در این مقاله، به جای استفاده از ماکسی مین<sup>۵</sup> از یکی از ابزارهای MADM<sup>۶</sup> بعد از تشخیص حداقل شاخص مورد نظر به ازای گزینه‌های مختلف استفاده شده است. به روز رسانی مرجع با استفاده از روش تاپسیس در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. به روز رسانی مرجع با استفاده از روش تاپسیس

#### ۶. الگوریتم NSGA-II<sup>۷</sup>

این الگوریتم نوعی الگوریتم ژنتیک می باشد که بر اساس رابطه

جدید در یک مرحله از مراحل حل مسأله پیدا شود، یکی از حالت‌های زیر ممکن است رخ دهد:

- آرشیو جواب‌های پارتو به صورت کامل پر نشده است و جواب غالب جدید بر برخی از اعضای آرشیو پارتو غلبه می‌کند. در این حالت، اعضای مغلوب از آرشیو خارج شده و عضو جدید وارد می‌گردد.
- آرشیو جواب‌های پارتو به صورت کامل پر نشده است و جواب غالب جدید بر هیچ یک از اعضای آرشیو پارتو غلبه نمی‌کند. در این حالت، عضو جدید به آرشیو اضافه می‌گردد.
- آرشیو جواب‌های پارتو به صورت کامل پر شده است و جواب غالب جدید بر برخی از اعضای آرشیو پارتو غلبه می‌کند. در این حالت، اعضای مغلوب از آرشیو خارج شده و عضو جدید وارد می‌گردد.
- آرشیو جواب‌های پارتو به صورت کامل پر شده است و جواب غالب جدید بر هیچ یک از اعضای آرشیو پارتو غلبه نمی‌کند. در این حالت، نمی‌توان جواب غالب جدید را به آرشیو اضافه کرد [۱۵].

برای کاهش احتمال از بین رفتن جواب غالب جدید (حالت چهارم)، روش‌های زیادی ایجاد گردیده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های خوشه‌بندی و  $k$  امین نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۱</sup> اشاره کرد. اما در اغلب این روش‌ها هیچ گونه تضمینی برای از بین نرفتن ماهیت اصلی جواب‌های غالب موجود در آرشیو وجود ندارد. به عبارت دیگر، این روش‌ها از رویکردهایی برای اضافه کردن جواب‌های غالب جدید استفاده می‌کنند که ممکن است به حذف یا تغییر چشمگیر در ساختار برخی از جواب‌های غالب موجود در آرشیو منجر گردد. در این مقاله، از یک آرشیو پارتو با ظرفیت پویا<sup>۲</sup> برای مقابله با این نقصان استفاده شده است. فرض کنید که ظرفیت آرشیو پارتو، که با Arch-Size نشان داده می‌شود، به صورت یک مقدار از پیش تعیین‌شده که باید قبل از اجرای الگوریتم جستجوی پراکنده مشخص گردد، در نظر گرفته می‌شود. اگر یک جواب غالب جدید پیدا شود، یکی از دو حالت زیر برای به روزرسانی آرشیو پارتو لحاظ می‌گردد:

(۱) اگر در اثر افزودن جواب غالب جدید، ظرفیت آرشیو از بیشینه مقدار خود تجاوز نکند، این جواب غالب، اضافه شده و آرشیو به روز می‌گردد.

(۲) اگر در اثر افزودن جواب غالب جدید، ظرفیت آرشیو از بیشینه مقدار خود تجاوز کند، این جواب غالب در صورتی به آرشیو اضافه می‌گردد که فاصله‌اش نسبت به نزدیک‌ترین جواب غالب موجود در آرشیو از مقدار  $\lambda$  کمتر نباشد. فاصله بین جواب غالب جدید و جواب موجود به صورت فاصله اقلیدسی در نظر گرفته می‌شود. مزیت این

<sup>3</sup>. Euclidean Distance

<sup>1</sup>. Dissimilarity Rate

<sup>5</sup>. Max-Min

<sup>6</sup>. Multiple Attribute Decision Making

<sup>7</sup>. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

<sup>1</sup>. K-Nearest Neighbor Method

<sup>2</sup>. Adaptive Pareto Archive

است. این آزمایشات بر روی یک کامپیوتر لب تاپ<sup>۲</sup> ۲/۶۶ GHz و 2GB حافظه با سیستم عامل ویندوز Vista انجام شده است. اطلاعات مربوط به ۱۱ نمونه مسأله به صورت تصادفی تولید شده است.

برای مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی، تعدادی از شاخص‌های اندازه‌گیری مختص روش‌های چند تابع هدفه که در ادبیات موضوع بسیار پر کاربرد هستند به کار گرفته شده‌اند. نمونه مسایل به صورت تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت، تولید شده و سپس حل شده است [۱۸].

هر مسأله به وسیله کدی به صورت M-P-O-C-T نشان داده شده است که به ترتیب عدد M بیانگر تعداد ماشین، P نمایش دهنده تعداد قطعات، O نمایانگر تعداد عملیات هر قطعه، C نشانگر تعداد سلول‌های مجاز و T تعداد دوره‌ها می‌باشد. پارامترهای MOSS و NSGA-II بعد از اجراهای متوالی، مطابق جداول (۱) و (۲) تنظیم می‌گردد.

جدول ۱. پارامترهای روش NSGA-II

اندازه آرشیو	نرخ جهش	نرخ تقاطع	تعداد نسل	جمعیت
۳۰	۰/۰۵	۰/۹۵	۲۰۰	۱۰۰

جدول ۲. پارامترهای روش جستجوی پراکنده

اندازه آرشیو	نرخ جهش	نرخ تقاطع	تعداد تکرار	تعداد تکرار	تعداد	جمعیت		
آرشیو	جهش	تقاطع	محلی	بدون تغییر	$\lambda$	نسل		
۳۰	۰/۰۵	۰/۷۵	۵	۳	۲۰	۱۵	۲۰۰	۱۰۰

جدول ۳. اطلاعات مربوط به قطعات و ماشین‌ها

اطلاعات مربوط به قطعات	
اندازه دسته قطعات	U(۴۰ و ۵۰)
هزینه انتقال هر دسته	U(۴۰ و ۵۰)
مقدار تقاضا برای قطعات	U(۶۰۰ و ۱۰۰۰)
زمان پردازش قطعات (دقیقه)	U(۱۵ و ۲۰)
اطلاعات مربوط به ماشین	
هزینه خرید هر نوع ماشین	U(۱۰۰۰ و ۲۰۰۰)
هزینه نگهداری و تعمیرات	U(۱۰۰ و ۱۵۰)
هزینه عملیات به ازای هر ساعت	U(۶ و ۱۰)
زمان در دسترس برای هر ماشین	U(۵۰۰ و ۶۰۰)

غالب و مغلوب برای تعیین جواب پارتو عمل می‌نماید. این روش، جواب‌های جدید را با استفاده از اپراتورهای جهش مربوط به الگوریتم ژنتیک پیدا کرده و جواب با کیفیت را بر اساس رابطه غالب و مغلوب تولید می‌کند. این روش، جستجوی خود را از حل اولیه تصادفی شروع کرده و در همسایگی این حل، به منظور رسیدن به حل کمکی الگوریتم را ادامه می‌دهد.

لازم به ذکر است که حل اولیه در بین حل‌های موجود در جمعیت جواب‌ها، حلی است که نسبت به نقطه آرمانی کمترین فاصله اقلیدسی را دارا باشد. همچنین هر یک از جواب‌های موجود در جمعیت جواب‌ها، به عنوان حل کمکی برای این حل اولیه استفاده می‌گردد. نقطه آرمانی نقطه‌ای است مختصات آن شامل اجزایی است که از حل توابع هدف توسط نرم‌افزارهای بهینه ساز به دست آمده است [۱۶ و ۱۷].

گام‌های اجرایی تولید جواب اولیه به شرح زیر است:

- قرار بده  $t=0$  و جمعیت تصادفی  $PO$  را با اندازه  $N$  تولید نمایید.
- توابع هدف ارزیابی شوند و بر اساس ارتباط غالب و مغلوب رتبه‌بندی شوند.
- بر اساس نرخ‌های تعیین شده، تعدادی جواب به عنوان فرزند توسط معیار انتخاب تورنمنت<sup>۱</sup> با جایگزینی، انتخاب می‌شوند.
- عملگرهای جهش و تقاطع بر عناصر انتخاب اثر داده می‌شود.
- فرزندان جدید بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌شوند.
- فرزندان جدید و جمعیت فعلی با هم ترکیب و اساس ارتباط غالب و مغلوب رتبه‌بندی شوند.
- معیار انتخاب، ابتدا بر اساس ارتباط غالب و در صورتی که اجزا دارای رتبه یکسان باشند، بر اساس فاصله ازدحام، انتخاب می‌شوند.

۸)  $N$  حل منتخب را برگزیده و معیار توقف کنترل می‌شود.

برای انتخاب زمانی که به اجزاء بارتبه یکسان برخوردیم، حلی را انتخاب می‌کنیم که فاصله ازدحام کمتری داشته باشد. بعد از اینکه رتبه‌بندی صورت پذیرفت، حل‌های همان نسل را بر اساس ستون رتبه به صورت صعودی مرتب می‌کنیم و  $N$  حل منتخب را برای نسل بعدی آماده می‌کنیم. همین فرآیند الگوریتم ژنتیک را تا تکرار معینی، انجام می‌دهیم [۱۸ و ۱۹].

## ۷. نتایج محاسباتی

### ۷-۱. تولید نمونه مسایل و تنظیم پارامتر الگوریتم

کارایی مدل پیشنهادی برای مسأله تشکیل سلول تولیدی به وسیله ۱۱ مسأله نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تمام مسایل به وسیله نرم افزار MATLAB نسخه ۷/۶ کد نویسی شده و اجرا گردیده

<sup>۲</sup>. Laptop Computer

<sup>۱</sup>. Tournament



$$d_i = \min_j (|f_1^i(\bar{x}) - f_1^j(\bar{x})| + |f_2^i(\bar{x}) - f_2^j(\bar{x})|) \quad (17)$$

$$S = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2 \right]^{1/2} \quad j=1,2,\dots,n, i \neq j \quad (18)$$

$\bar{d}$  مقدار میانگین  $d_i$  ها می باشد و  $n$  تعداد عناصر منحنی پارتو می باشد. ابتدا  $d_i$  برای هر نقطه پارتو محاسبه می شود. برای محاسبه این پارامتر، از نزدیکترین نقاط همسایه استفاده می شود. در ادامه  $S$  محاسبه می شود که همان شاخص فاصله بندی می باشد. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده پراکندگی بیشتر و بهتر جوابها می باشد [۲۰].

### ۷-۲-۳. شاخص کیفیت (QM<sup>5</sup>)

شاخص تعداد جوابها پارتو به تنهایی نمی تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی دو الگوریتم باشد. زیرا که مشخص نیست که چه تعداد از جوابهای پارتو ارایه شده توسط یک الگوریتم دارای کیفیت بالا می باشند. شاخص کیفیت با در کنار هم قرار گذاشتن جوابهای غالب تولید شده هر دو الگوریتم مثلاً  $A$  و  $B$  و محاسبه نسبت سهم هر روش در تعداد جوابهای پارتو نهایی محاسبه می شود [۱۴و۱۳].

جدول (۵)، آنالیز واریانس مربوط به تعداد جوابهای غالب الگوریتمها و مسایل نمونه را در سطح ۵ درصد نشان می دهد. با توجه به اینکه مقدار  $p$ -value نسبت به مقدار آلفا مقدار کمتری را دارد، بنابراین با اطمینان می توان گفت که بین میانگینهای روشهای مختلف، نمونه مسایل مختلف و اثر تعاملی بین انواع روشها و نمونه مسایل، تفاوت بین میانگینها معنی دار بوده و تصادفی نمی باشد.

جدول (۴) نتایج محاسباتی هر دو الگوریتم را در قالب شاخصهای عنوان شده و زمانهای اجرا برای ۱۱ مسأله نمونه نشان می دهد. با توجه به این جدول، از ستونهای تعداد جوابهای پارتو و شاخص کیفیت می توان نتیجه گرفت که در تمام مسائل اجرا شده، الگوریتم پیشنهادی جوابهای با کیفیت و غالب بیشتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II تولید می کند.

با توجه به ستون شاخص نسبت به فرناحیه ای و شکل (۵)، همانطور که مشاهده می شود، میزان این شاخص در اغلب مسائل نمونه در الگوریتم MOSS در مقایسه با الگوریتم NSGA-II نسبت به بهترین شاخص یعنی عدد ۱، از انحراف معیار کمتری برخوردار است.

## ۷-۲. شاخص های اندازه گیری برای مقایسه نتایج حاصل از NSGA-II با MOSS

برای مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی، تعدادی از شاخصهای اندازه گیری به شرح زیر استفاده می شود.

### ۷-۲-۱. شاخص نسبت فرناحیه ای (HARM<sup>1</sup>)

شاخص تعداد جوابهای پارتو (NPS<sup>2</sup>)، جوابهای بهینه پارتو به دست آمده توسط هر الگوریتم را نشان می دهد. از آنجایی که تعداد جوابهای بهینه پارتو برایمان مشخص نیست، مستلزم آن است که از طریق روش شمارشی جامع<sup>۳</sup> کل جوابهای بهینه هر مسأله را به دست آوریم. بعد از مشخص شدن جوابهای بهینه هر مسأله و مقایسه آن با جوابهای غالب هر الگوریتم به تعداد جوابهای غیرمغلوب بهینه هر الگوریتم پی برد. اما از آنجا که به دست آوردن نقاط بهینه غالب هر مسأله از طریق روش شمارشی جامع حتی برای مسائل با ابعاد کوچک امری زمان بر می باشد؛ لذا در راستای مقایسه تعداد جوابهای پارتو شاخص نسبت فرناحیه ای را تعریف می نماییم.

$$HARM = \frac{H_{es}}{H_{sc}} \quad (16)$$

در رابطه فوق  $H_{es}$ ، ناحیه ای است که توسط مجموعه حل های عملی مرز پارتو اشغال می شوند.  $H_{sc}$  ناحیه ای است که توسط حل های تئوریک مرز پارتو اشغال می شوند. از آنجایی که به دست آوردن حل های تئوریک، به طور عملی امکان پذیر نیست، لذا در این مقاله حل های غالب تولید شده توسط هر دو الگوریتم به عنوان حل تئوریک خواهد بود. اگر مقدار شاخص نسبت فرناحیه ای کمتر از عدد ۱ باشد، این بدین معناست که نقاط سطح محلی پارتوی عملی بر روی سطح محلی پارتوی مشترک، گسترده نمی شود. در صورتی که مقدار شاخص نسبت فرناحیه ای بیشتر از عدد ۱ باشد، این بدین معناست که نقاط سطح محلی پارتوی عملی از سطح محلی پارتوی مشترک، دور می شود. بنابراین مطلوب آن است که مقدار شاخص نسبت فرناحیه ای به عدد ۱ نزدیک باشد.

### ۷-۲-۲. شاخص فاصله بندی (SM<sup>4</sup>)

شاخص فاصله بندی می تواند در تشخیص یکنواختی پراکندگی جوابها در منحنی پارتو به ما کمک نماید. این شاخص به صورت زیر محاسبه می شود:

<sup>1</sup>. Hyper Area Ratio Metric

<sup>2</sup>. Number of Pareto Solutions

<sup>3</sup>. Comprehensive Enumeration

<sup>4</sup>. Spacing Metric

<sup>5</sup>. Quality Metric

جدول ۴. عملکرد دو الگوریتم در حل نمونه مسایل، بر حسب شاخص های عملکرد و زمان اجرا

شماره	ابعاد مسئله M-P-O-C	زمان اجرا (ثانیه)		شاخص نسبت فرا ناحیه ای		شاخص فاصله بندی		شاخص کیفیت	
		NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS
۱	۵-۵-۲-۲	۴۵	۷۵	۱/۱	۰/۹۵	۱/۵۵	۱/۳	۱۷/۲	۲۲
۲	۵-۶-۳-۳	۶۷	۸۸	۰/۸	۱/۰۵	۲/۹	۲/۴۵	۱۸/۵	۲۳
۳	۶-۶-۳-۲	۷۱	۱۰۳	۱/۲۵	۰/۹۵	۲/۷۷	۲/۳	۲۰/۵	۲۶/۴
۴	۷-۶-۳-۳	۷۵	۱۰۶	۰/۸	۰/۸۸	۲/۷۵	۲/۴۵	۲۰	۲۶
۵	۶-۷-۳-۳	۸۳	۱۱۳	۱/۵۵	۱/۳	۳/۱۵	۲/۷	۲۴	۲۷/۵
۶	۷-۷-۳-۳	۸۵	۱۲۳	۱/۱	۱	۳/۱	۲/۵۵	۲۰	۲۵
۷	۷-۸-۳-۳	۹۰	۱۲۸	۰/۸۵	۱۰/۵	۳/۴۵	۲/۷۵	۱۸	۲۳
۸	۸-۸-۵-۵	۱۰۵	۱۲۳	۱/۳	۱/۲	۲/۹	۲/۳	۱۴/۵	۱۹
۹	۸-۹-۴-۵	۱۱۰	۱۴۸	۰/۸۵	۱	۳/۸۵	۲/۸	۱۷/۵	۲۵
۱۰	۹-۸-۳-۶	۱۵۰	۱۸۸	۱/۳	۰/۹۵	۳/۵۴	۲/۶	۱۹	۲۶
۱۱	۱۰-۸-۵-۶	۱۶۰	۲۰۳	۱/۲	۱/۱۵	۳/۹	۳/۳	۲۰	۵

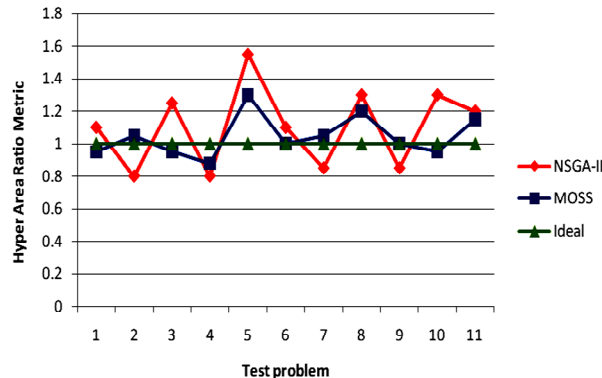
جدول ۵. تحلیل واریانس مربوط به عملکرد دو الگوریتم و نمونه مسایل در تولید جواب های غالب

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F
Test Problems	558.61	10.00	55.86	43.40	0.00	1.94
Algorithms	610.30	1.00	610.30	474.19	0.00	3.95
Interaction	67.04	10.00	6.70	5.21	0.00	1.94
Within	113.26	88.00	1.29			
Total	1349.21	109.00				

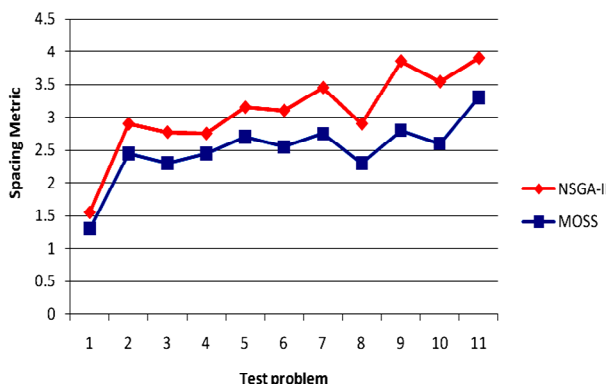
با استفاده از ستون شاخص فاصله بندی در جدول مذکور، پراکندگی کاراتر جواب های تولید شده توسط الگوریتم پیشنهادی قابل نتیجه گیری می باشد. شکل (۶) شاخص فاصله بندی در ۱۱ نمونه مثال توسط دو الگوریتم را نشان می دهد. همان طور که در مورد این شاخص مطرح شد، هر چه این شاخص مقدار کمتری به خود بگیرد، حاکی از این موضوع است که جواب های غالب از پراکندگی بیشتری برخوردار بوده و نقاط بیشتری از فضای حل تحت پوشش خود قرار می دهند. زمان لازم برای اجرای دو الگوریتم نیز در ستون جدول (۴) را نشان می دهد که حاکی از زمان بیشتر مورد نیاز توسط الگوریتم MOSS می باشد. می توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی به دلیل اینکه از مکانیزمی برخوردار است که مقدار بیشتری فضای حل را جستجو می کند، طبعاً زمان بیشتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II برای حل مسأله یکسان، صرف می نماید.

### ۸. جمع بندی

در این مقاله، به کارگیری یک الگوریتم جستجوی پراکنده برای حل مسأله تشکیل سلول تولیدی با در نظر گرفتن مسیرهای عملیاتی چندگانه و حداکثر بهره گیری از ماشین ها به صورت چندهدفه، ارایه شده است. برای افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی در تولید



شکل ۵. مقدار شاخص نسبت فرا ناحیه ای برای دو الگوریتم



شکل ۶. مقدار شاخص فاصله بندی برای دو الگوریتم

[8] Burbidge, J.L., "Comments on Clustering Methods for Finding GT Group and Families", J. of Manufacturing Systems, 12(5), 1993, pp. 428-429.

[9] Schaller, E., "A Methodology for Integrating Cell Formation and Production Planning in Cellular Manufacturing", Annals of Operations Research, 77, 1998, pp 1-21.

[10] Glover, F., "Scatter Search and Path Relinking", In: D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (Eds.), New methods in optimization, McGraw Hill Co., 1999.

[11] Arkat, J., Saidi Mehrabad, M., Abbasi, B., "Applying Simulated Annealing to Cellular Manufacturing System Design", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32(5), 2007, pp.

[12] Yasuda, K., Hu, L., Yin, Y., "A Grouping Genetic Algorithm for the Multi-Objective Cell Formation Problem", Int. J. of Production Research, 43(4), 2005, pp. 829-853.

[13] Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L., "Comparison of Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Empirical Results", J. of Evolutionary Computation, 8(2), 2000, pp. 173-195.

[14] Zitzler, E., Thiele, L., "Multi Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and Strength-Pareto Approach", IEEE Transaction on Evolutionary Computers, 1999, pp. 1-14.

[15] Beausoleil, R.P., "MOSS Multiobjective Scatter Search Applied to Non-Linear Multiple Criteria Optimization", Eur. J. of Operational Res., 169, 2006, pp. 426-449.

[16] Glover, F., "A Template for Scatter Search and Path Relinking, in Artificial Evolution", In: J.-K. Hao, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer and D. Snyers (Eds.), Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1998, pp. 13-54.

[17] Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B., Safaei, N., "Design of a Facility Layout Problem in Cellular Manufacturing Systems with Stochastic Demands", Applied Mathematics and Computation, 184(2), 2007, pp. 721-728.

[18] Venugopal, V., Narendran, T., "A Genetic Algorithm Approach to the Machine Component Grouping Problem with Multiple Objectives", Computer & Industrial Engineering, 22(4), 1992, pp. 469-480.

[19] Zhao, C., Wu, Z., "A Genetic Algorithm for Manufacturing Cell Formation with Multiple Routes and Multiple Objectives", Int. J. of production Research, 38(2), 2000, pp. 385-395.

[20] Agrawal, D., Sahu, S., Ray, P.K., "Cell Formation in Cellular Manufacturing: A Multi-Objective Genetic Algorithm Approach", The 3rd Int. Conf. on Group Technology and Cellular Manufacturing, Groningen: the Netherlands, 2006, pp. 401-410.

جواب‌های برتر و نامطلوب برای ایجاد گوناگونی بیشتر، به منظور جستجوی بهتر فضای حل، از روش چند معیاره تاپسیس بهره جسته ایم. اهداف متعارض حداقل کردن هزینه کل شامل هزینه حرکات بین سلولی، هزینه خرید ماشین‌ها، هزینه عملیات و نگهداری و تعمیرات؛ حداکثر نمودن سطح بهره‌گیری از ماشین‌ها در سیستم تولیدی و حداقل کردن انحراف میان سطوح بهره‌گیری از سلول‌ها (یعنی بالانس نمودن بارکاری بین سلول‌ها) در مدل در نظر گرفته شده است.

به دلیل ماهیت پیچیده این مسأله، الگوریتم جستجوی پراکنده با ویژگی‌های خاص خود، برای یافتن جواب‌های موثر طراحی شد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم جستجوی پراکنده چند هدفه با یکی از بهترین الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه یعنی NSGA-II، بر روی مسایل نمونه مختلف و بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری مختلف، مقایسه شد. نتایج محاسباتی، کارایی بهتر الگوریتم پیشنهادی را نسبت به الگوریتم ژنتیک در سه شاخص بیان شده نشان داده است. گرچه زمان حل مسایل توسط الگوریتم جستجوی پراکنده کمی بیشتر است، اما برتری کیفیت جواب‌های الگوریتم MOSS نسبت به NSGA-II به اندازه‌ای است که افزایش زمان حل نسبت به کیفیت الگوریتم پیشنهادی، قابل اغماض است.

### مراجع

[1] Mitrofanov, S.P., *Scientific Principles of Group Technology*, Technical Report, National Lending Library, London, 1996.

[2] Mansouri, S.A., Mottar-Husseini, S.H., Zegordi, S.H., "A Genetic Algorithm for Multiple Objective Dealing with Exceptional Element in Cellular Manufacturing", Production Planning & Control, 14, 2003, pp. 437-446.

[3] Burbidge, J., Dale, B., "Planning the Introduction and Predicting the Benefits of Group Technology", Engineering Costs and Production Economics, 8, 1984, pp. 117-128.

[4] Adeil, G., Rajamani, D., Strong, D., "Cell Formation Considering Alternative Routings", International Journal of Production Research, 34(5), 1996, pp. 1961-1980.

[5] Selim, H., Askin R.G., Vakharia, A.J., "Cell Formation in Group Technology: Review Evaluation and Directions for Future Research", Computers and Industrial Engineering, 22(2), 1997, pp. 215-225.

[6] Tavakkoli-Moghaddam, R., Ranjbar-Bourani, M., Mirzahosseini, H., Aryanezhad M.B., "A New Multi-Objective Model for a Cell Formation Problem Considering Machine Utilization and Alternative Process Routes", Int. J. of Engineering, Transaction A: Basic, 22(1), 2009, pp. 21-32.

[7] Deb, K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, 2003.