

# روش حل SA جهت تشکیل سلول‌های تولیدی با تقاضای فازی

فرناز برزین پور  
دانشجوی دکتری

سیدحسام الدین زگردی  
استادیار

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

سیستم تولید سلولی سیستمی مؤثر برای تولید اقتصادی خانواده قطعات می باشد. در مرحله طراحی سلول تولیدی، شناسایی خانواده قطعات و تشکیل سلول های ماشینی از مهمترین مراحل می باشند که نگرش های مختلفی جهت حل آن ارائه شده است. این مسائل از نظر پیچیدگی محاسباتی، جزو مسائل NP-Complete بوده و لذا کاربرد روش های بهینه سازی در آن فقط به مسائل کوچک محدود شده و روش های ابتکاری جهت حل آن مد نظر است. یکی از روش های مؤثر در این زمینه روش (SA) Simulated Annealing می باشد. علاوه بر این، بسیاری از روش های حل مطرح شده در ادبیات موضوع براساس اطلاعات دقیق و قطعی بوده، در حالیکه اغلب اطلاعات ورودی به صورت نادقیق می باشند. تئوری مجموعه های فازی نیز ابزاری برای نشان دادن عدم قطعیت در مسائل دنیای واقعی است.

در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی ریاضی جهت تشکیل سلول های ماشینی با دو تابع هدف ارائه شده است که عبارتند از: حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی و حداقل کردن تغییرات بار کاری در درون سلول. جهت واقعیتر کردن مدل، تقاضا به صورت فازی در نظر گرفته شده و الگوریتمی براساس روش SA جهت حل مدل مورد نظر پیشنهاد شده است. الگوریتم مورد نظر به وسیله مسائل نمونه تست شده و آنالیزی در مورد پارامترهای کنترل SA انجام شده است. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی بالای الگوریتم ارائه شده جهت حل مسئله تشکیل سلول تولیدی با تقاضای فازی می باشد.

## *A Simulated Annealing Scheme for Solving Cell Formation Problem with Fuzzy Demand*

S. H. Zegordi  
Assistant Professor

F. Barzinpour  
Ph.D. Student

Industrial Engineering Department,  
Tarbiat Modarres University

### Abstract

*Cellular Manufacturing System, is an effective system for economical production of forming of parts. The identification of part families and machine cells are the main steps of the process. Many approaches have been developed for this problem in the literature. This problem, from computational point of view is NP-Complete. Hence, the application of optimization methods fail to solve relatively large size problems.*

*In this paper, attempt has been made to apply Simulated Annealing (SA) which is an efficient tool for combinatorial problems to solve cellular Manufacturing Systems. Demand for each part due to its inherent uncertainty volume of intercell moves and minimizing total within cell load variation has been taken into account. Analysis on the controlling parameters of SA has been performed and the reasonable results have been provided.*

### Keyword

*Cellular Manufacturing System-Fuzzy Number -Simulated Annealing\_ Multiple Objectives.*

### مقدمه

سیستم تولید سلولی<sup>۱</sup> به عنوان راه حلی مؤثر برای تولید اقتصادی بسیاری از قطعات و محصولات در سطح جهانی مطرح است. نخستین گام در طراحی سیستم تولید سلولی، تعیین خانواده قطعات<sup>۲</sup> و سلول‌های ماشینی<sup>۳</sup> است. به عبارت دیگر، سیستم تولید سلولی به عنوان کاربردی از تکنولوژی گروهی است که شامل فرآیند ساخت مجموعه‌ای از قطعات مشابه می‌باشد که توسط گروهی از ماشین آلات که به سلول<sup>۴</sup> اختصاص یافته‌اند، انجام می‌شود. بدین ترتیب از تکنولوژی گروهی<sup>۵</sup> جهت گروه‌بندی قطعات و ماشین آلات استفاده می‌شود که مرحله‌ای اساسی در مسئله تشکیل سلول‌ها است. در سیستم تولید سلولی، تعدادی از ماشین آلات که معمولاً از لحاظ عملکرد متفاوت می‌باشند، در یک سلول تولیدی گروه‌بندی شده که به آن سلول ماشینی گفته می‌شود. این سلول مسئول تکمیل عملیات مربوط به قطعات مشابهی است که در یک گروه قرار دارند و به عنوان خانواده قطعات شناخته می‌شوند.

این سیستم در بسیاری از محیط‌های صنعتی با موفقیت اجرا شده است و برخی از مزایای آن عبارتند از کاهش زمان راه‌اندازی، کاهش موجودی در حال ساخت، کاهش هزینه حمل و نقل، بهبود کیفیت، بهبود جریان مواد و کنترل بهتر تولید.

در سال‌های اخیر روش‌های حل متعددی جهت مسئله تشکیل سلول تولیدی ارائه شده است. این روش‌ها عمدتاً شامل روش طبقه‌بندی و کدگذاری<sup>۶</sup>، تکنیک آنالیز جریان تولید (PFA)<sup>۷</sup>، تکنیک‌های مبتنی بر دسته‌بندی<sup>۸</sup>، تکنیک‌های ماتریسی، تکنیک‌های ریاضی و روش‌های جدید می‌باشند. مرور کلی بر این روش‌های حل در مراجع [۱] و [۲] آمده است. یک دسته از روش‌ها براساس برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشند. سلیم و همکاران [۳] طبقه‌بندی جامعی از روش‌های حل برنامه‌ریزی ریاضی براساس نوع مسئله و تابع هدف ارائه کرده‌اند. برخی از توابع هدفی که در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده‌اند، عبارتند از: حداقل تعداد قطعات استثنایی، حداقل کردن تعداد، هزینه و یا فاصله حاصل از حرکات بین سلولی، حداقل کردن

تغییرات بارکاری در درون سلول، حداقل کردن هزینه دو برابر کردن ماشین آلات، حداکثر کردن جمع شباهت‌ها و حداکثر کردن میزان بهره‌برداری از ظرفیت تولید.

از بین توابع هدف مطرح شده، دو تا از مهمترین توابع هدف عبارتند از حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی و دیگری حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول. در ارتباط با حداقل کردن تعداد حرکات بین سلولی، سوفیانوپولو [۴] یک مدل ریاضی با توجه به توالی انجام عملیات و حداکثر ظرفیت سلول ارائه کرده است. اما او در مدل خود، تقاضای قطعه را به عنوان یک عامل مهم جهت تعیین حجم حرکات بین سلولی در نظر نگرفته است.

در ارتباط با حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول، وناگوپال و نارندران [۵] در سال ۱۹۹۲ مدل ریاضی را با توجه به فاکتورهای کلیدی نظیر ظرفیت ماشین، میزان تقاضا و زمان انجام عملیات ارائه کرده‌اند. در این مدل محدودیتی روی ظرفیت سلول‌ها در نظر گرفته نشده است.

وناگوپال و نارندران [۶] مقاله دیگری در سال ۱۹۹۲ جهت مدل ریاضی با هدف حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی و حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول ارائه کرده‌اند. در این مدل، توالی انجام عملیات جهت محاسبه حجم حرکات بین سلولی در نظر گرفته نشده است.

بسیاری از روش‌های حل مطرح شده در ادبیات موضوع، براساس اطلاعات دقیق و قطعی بوده، در حالی که اغلب اطلاعات ورودی به صورت نادقیق می‌باشند. تئوری مجموعه‌های فازی<sup>۹</sup> نیز ابزاری برای نشان دادن عدم قطعیت در مسائل دنیای واقعی است. یک دسته از این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر دسته‌بندی فازی می‌باشند. در این گروه روش سووانگ نیز [۷] با استفاده از دسته‌بندی فازی می‌باشد که در آن از ویژگی طراحی قطعات شامل صافی سطح، تolerانس ابعادی و ... استفاده شده است. همچنین چو و هایا [۸] روشی را مبتنی بر دسته‌بندی فازی ارائه کرده‌اند که در آن از اطلاعات مربوط به مسیر تولید جهت تشکیل خانواده قطعات و سلول‌های ماشینی استفاده شده است.

گیندی و همکاران [۹]، الگوریتم توسعه یافته‌ای را جهت روش دسته‌بندی فازی با معرفی یک معیار اعتباری جدید براساس تراکم در هر دسته و تکرار ماشین‌ها ارائه

داده اند. ژانگ و وانگ [۱۰] ضمن معرفی ماتریس قطعه - ماشین به فرم فازی، کاربرد این مفهوم را در الگوریتم های شناخته شده یعنی روش SLINK<sup>۱</sup> و ROC<sup>۱۱</sup> بیان کرده اند. همچنین نارایاناسوامی و همکاران [۱۱] ماتریس قطعه - ماشین فازی را ارائه نموده اند. در ارتباط با مدل های برنامه ریزی ریاضی فازی و روش های حل آن، ژوارک و همکاران [۱۲] مدل ریاضی فازی را جهت حداقل کردن هزینه عملیاتی و هزینه جابجایی مواد و قطعات، تحت شرایطی که تقاضا و ظرفیت ماشین نیز به صورت فازی است، ارائه کرده اند. تسایی و همکاران [۱۳] نیز یک مدل برنامه ریزی مختلط فازی را ارائه کرده و عملگرهای جدید فازی را معرفی نموده اند.

در این مقاله، مدلی جهت گروه بندی ماشین آلات با در نظر گرفتن اهداف دوگانه گسترش داده شده است. این اهداف عبارتند از: حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی و حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول. به علاوه جهت واقعی تر کردن مسئله، حجم تقاضا در دوره های مشخص به صورت فازی و حداکثر ظرفیت سلول نیز به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. به جهت پیچیدگی، مسائل تشکیل سلول تولیدی حتی در حالت تک هدف آن، جزو مسائل NP-Complete طبقه بندی شده اند [۵]. به همین دلیل در این مطالعه از روش SA که در حل مسائل پیچیده ترکیبی قابلیت بالایی از خود نشان داده است، جهت حل این مسئله بکار گرفته شده است. بر این اساس الگوریتمی ارائه شده و عملکرد آن با استفاده از مسائل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. مابقی این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲ مدل ریاضی جهت مسئله تشکیل سلول ماشینی ارائه می شود. بخش ۳ ضمن معرفی فرم کلی الگوریتم SA، الگوریتم پیشنهادی SA و پارامترهای آن را مورد بررسی قرار داده و مطالعات انجام شده در این رابطه بررسی می شود. در بخش ۴ نتایج محاسباتی ارائه شده و در نهایت نتیجه گیری در بخش ۵ آمده است.

## ۲- مدل سازی ریاضی

### ۲-۱- ساختار ریاضی مدل

در این مقاله، مسئله تشکیل سلول تولیدی با دو تابع هدف مدنظر می باشد. این اهداف عبارتند از: ۱- حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی، ۲- حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول تولیدی، اهداف فوق با

هم در تعارض می باشند، چرا که کاهش تغییرات بارکاری درون سلول مستلزم انتقال بخشی از وظایف ماشین ها به یکدیگر است که این امر موجب افزایش حرکت قطعات بین سلول ها شده و با هدف حداقل کردن حرکات بین سلولی تضاد دارد. در این مدل، حداکثر ظرفیت سلول مدنظر است و جهت واقعی تر کردن مسئله، حجم تقاضای قطعات در یک دوره مشخص، فازی در نظر گرفته شده است. قطعات همگی شناخته شده هستند و فرض می شود، ماشین آلات مورد نیاز جهت تولید آنها موجود می باشند. از هر ماشین یک عدد موجود است و توالی انجام عملیات و زمان انجام عملیات از قبل مشخص و قطعی می باشند. جهت تولید هر قطعه به یک مجموعه از عملیات نیاز است که هر کدام از آنها توسط یک نوع ماشین انجام می شوند و همچنین تنها از یک فرآیند ساخت برای تولید قطعه می توان استفاده کرد. مدل ریاضی به صورت زیر می باشد:

$$S_{m \times n} = [s_{ij}] \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (۱)$$

(۲) اگر  $p$  امین عملیات مربوط به قطعه  $j$  توسط ماشین  $i$  انجام شود.  

$$S_{ij} = \begin{cases} P \\ 0 \end{cases}$$
 در غیر اینصورت

$$\delta_{rtj} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{اگر } s_{ij} \neq 0 \text{ و } s_{rj} = 1 \text{ باشد} \\ \text{در غیر اینصورت} \end{matrix} \quad (۳)$$

$$y_{rt} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{اگر ماشین } r \text{ و } t \text{ در یک سلول قرار گرفته باشند} \\ \text{در غیر اینصورت} \end{matrix} \quad (۴)$$

$$\begin{matrix} r = 1, \dots, m-1 \\ t = r+1, \dots, m \end{matrix}$$

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{t_{ij} \cdot \tilde{D}_j}{T_i} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (۵)$$

$$\tilde{m}_{lj} = \frac{\sum_{i=1}^m x_{il} \cdot \tilde{w}_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{il}} \quad \begin{matrix} l = 1, \dots, k \\ j = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (۶)$$

$$\tilde{C}_{rt} = \sum_{j=1}^n \tilde{D}_j \cdot \delta_{rtj} \quad \begin{matrix} r = 1, \dots, m-1 \\ t = r+1, \dots, m \end{matrix} \quad (۷)$$

متغیر تصمیمی که در این مدل مدنظر می باشد به صورت زیر تعریف می شود:

$$x_{il} = \begin{cases} 1 & \text{اگر } i = 1, \dots, m \text{ امین ماشین در سلول } l \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad l = 1, \dots, k \quad (8)$$

مدل ریاضی به شرح زیر است:

$$\text{Min } \tilde{F}_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^k x_{il} \cdot \sum_{j=1}^n (\tilde{w}_{ij} - \tilde{m}_{lj})^2 \quad (9)$$

$$\tilde{F}_2 = \sum_{r=1}^{m-1} \sum_{t=r+1}^m \tilde{C}_{rt} \cdot (1 - y_{rt}) \quad (10)$$

S. t.:

$$\sum_{l=1}^k x_{il} = 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{il} \geq 1 \quad l = 1, \dots, k \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{il} \leq U \quad l = 1, \dots, k \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^k (x_{rl} \cdot x_{tl}) = y_{rt} \quad \begin{matrix} r = 1, \dots, m-1 \\ t = r+1, \dots, m \end{matrix} \quad (14)$$

$$x_{il} = \{0, 1\} \quad \forall i, l$$

در این مدل رابطه (۹)، جهت اولین تابع هدف یعنی حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول تولیدی در نظر گرفته شده است. در واقع در صورتی که ماشین  $i$  به سلول  $l$  تخصیص پیدا نماید، میزان تغییرات بارکاری ماشین  $i$  از متوسط بارکاری سلول  $l$  به واسطه تولید تمام قطعات، محاسبه شده و سعی در مینیمم کردن آن می باشد.

تابع هدف موجود در رابطه (۱۰)، جهت حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی در نظر گرفته شده است. جهت محاسبه حجم حرکات بین سلولی، تقاضای هر قطعه و همچنین توالی انجام عملیات در نظر گرفته شده است. در این تابع هدف فقط حجم حرکات بین سلولی مد نظر است، به همین منظور متغیر  $y_{rt}$  طوری تعریف شده است که در صورتی که ماشین های  $r$  و  $t$  در یک سلول باشند،  $y_{rt} = 1$  شده و در نتیجه  $(1 - y_{rt} = 0)$  می شود و در واقع حرکات داخل هر سلول در نظر گرفته نمی شود. محدودیت (۱۱) نشان دهنده این است که هر ماشین

باید به یک سلول تخصیص پیدا کند. محدودیت (۱۲) بررسی می کند که هیچ سلولی خالی نباشد و محدودیت (۱۳) کنترل می کند که حداکثر تعداد  $U$  ماشین در هر سلول قرار بگیرد.

محدودیت (۱۴) به طور ضمنی مقدار متغیر  $y_{rt}$  را تعیین می نماید. چرا که در صورتی که ماشین  $r$  در سلول  $l$  باشد ( $x_{rl} = 1$ )، و ماشین  $t$  نیز در سلول  $l$  باشد ( $x_{tl} = 1$ ) ماشین  $r$  و  $t$  در یک سلول قرار دارند و مقدار  $y_{rt}$  برابر ۱ می شود. این حالت فقط در یک صورت اتفاق می افتد، در بقیه مواقع در صورتی که  $x_{rl}$  یا  $x_{tl}$  یا هر دو برابر صفر باشند، مقدار متغیر  $y_{rt}$  برابر صفر می شود. متغیر تصمیم در این مدل  $x_{il}$  است که به فرم صفر - یک می باشد.

## ۲-۲- نحوه محاسبه تابع هدف کلی

در این مدل ریاضی، از دو تابع هدف استفاده شده است. از آنجایی که اهداف فوق در تعارض و تضاد با یکدیگر هستند، دستیابی به جواب بهینه که تمامی اهداف فوق را به طور همزمان بهینه نماید، میسر نیست. به همین منظور باید از روش حل مسائل با چند تابع هدف استفاده نمود. با بررسی که روی این دسته از روش های حل انجام شد و باتوجه به ساختار و ویژگی خاص مدل مورد نظر، از رابطه زیر جهت محاسبه تابع هدف کلی استفاده شده است:

$$\text{Max } Z = \left[ \frac{f_{1\max} - f_1(x)}{f_{1\max} - f_{1\text{opt}}} \right] + \left[ \frac{f_{2\max} - f_2(x)}{f_{2\max} - f_{2\text{opt}}} \right] \quad (15)$$

که در این رابطه:

$$f_{1\text{opt}} = f_1(x_1^*) \quad (16)$$

$$f_{2\text{opt}} = f_2(x_2^*) \quad (17)$$

$$f_{1\max} = f_1(x_1^{\#}) \quad (18)$$

$$f_{2\max} = f_2(x_2^{\#}) \quad (19)$$

در رابطه (۱۵)، مقادیر به صورت نرمال تبدیل شده اند و تابع هدف کلی عبارت است از ماکزیمم کردن این مقادیر نرمال شده، در این مدل جهت به دست آوردن مقادیر ایده آل هر یک از توابع هدف و همچنین تابع هدف کلی از

یک الگوریتم SA جداگانه استفاده شده است.

### الف - نحوه تولید فضای همسایگی

روش‌های حل را از نظر تولید فضای همسایگی می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد. یک روش انتخاب تصادفی جواب از بین فضای جواب امکان‌پذیر است و در روش دیگر برای انتخاب فضای همسایگی از روش خاصی استفاده می‌شود [۱۴]. در اغلب روش‌های SA برای حل مسائل برای سیستم تولید سلولی، از روش تصادفی برای تولید فضای همسایگی با توجه به شرایط و محدودیت‌های مسئله مورد نظر استفاده شده است. اما در برخی مسائل مثل مسئله طرح استقرار که توسط نگردی و همکاران ارائه شده از ساختار ویژگی خاص مسئله در قالب جدول MDT<sup>۱۲</sup> استفاده شده است [۱۴].

### ب - درجه حرارت اولیه

تعداد تکرارها در طول فرایند آنیل کردن به طور نسبی به درجه حرارت اولیه بستگی دارد. جهت تعیین درجه حرارت اولیه معمولاً دو روش عمده وجود دارد. در یک سری از روش‌ها، درجه حرارت اولیه به عنوان یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود که باید قبل از اجرای فرایند آنیل کردن، تعیین شود. در روش دیگر، با استفاده از اطلاعات به دست آمده از اجرای تکرارهایی قبل از شروع الگوریتم SA اصلی، درجه حرارت اولیه را تعیین می‌کنند.

### ج - نحوه تغییر درجه حرارت

نحوه تغییر درجه حرارت در احتمال پذیرش جواب‌های بد در الگوریتم SA، نقش دارد. چرا که اگر درجه حرارت بسیار بالا باشد، تعداد زیادی از جواب‌های بد پذیرفته می‌شود که منجر به خارج شدن از نقطه بهینه محلی می‌گردد. در مقابل در درجه حرارت پایین احتمال قبول جواب‌های نه چندان بد بسیار پایین است. در ارتباط با نحوه کاهش درجه حرارت در ادبیات SA، دو روش کلی وجود دارد. یک روش استفاده از یک تابع کاهش درجه حرارت می‌باشد که برخی از آنها عبارتند از [۱۵]:

$$T_h = T_{h-1} - (\text{مقدار ثابت}) \quad (21)$$

$$T_h = a_h \cdot T_{h-1} \quad 0 < a_h < 1 \quad (22)$$

$$T_h = \frac{(\text{مقدار ثابت})}{1 + h} \quad (23)$$

### ۳- روش SA

#### ۳-۱- فرم کلی الگوریتم SA

مفهوم SA در واقع یک آنالوژی بین فرایند آنیل کردن فیزیکی در جامدات و فرایند حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. الگوریتم SA یک روش بهبود دهنده است که سعی در فرار از قرار گرفتن در نقطه بهینه محلی دارد. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی، جواب جدید تنها در صورت بهبود هدف پذیرفته می‌شود، این در حالی است که در روش SA، نه تنها جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود، پذیرفته می‌گردد بلکه جواب‌های بد نیز با احتمال زیر پذیرفته می‌شوند:

$$P(\Delta f) = \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) \quad (20)$$

که در آن  $\Delta f$ ، میزان تغییر در تابع هدف و  $T$  درجه حرارت می‌باشد. اگر این احتمال از یک عدد تصادفی یکنواخت بین [۰، ۱] بیشتر باشد، جواب نامناسب هم پذیرفته می‌شود. فرم کلی الگوریتم SA در جدول ۱، ارائه شده است.

#### ۳-۲- پارامترهای کنترل در SA

روش SA نسبت به پارامترهای کنترلی حساس می‌باشد و تعیین پارامترهایی که جواب‌های خوب ایجاد نماید، بسیار مشکل است. به منظور بررسی حساسیت پارامترها در SA، حداقل دو روش مختلف موجود است. یکی از این روش‌ها، حل مسئله با استفاده از ساختار ویژگی خاص مسئله و یا اطلاعاتی است که در طول اجرای فرایند آنیل کردن حاصل می‌شود. روش دیگر کاهش تعداد پارامترهای کنترلی به عنوان متغیر ورودی به مسئله است. هر چقدر تعداد پارامترها بیشتر باشد، هماهنگی بین آنها مشکل‌تر و ایجاد جواب‌هایی با کیفیت بالا بسیار دشوار است [۱۴].

مهمترین پارامترهایی که در هنگام اجرای الگوریتم

SA باید بررسی شوند عبارتند از:

الف - نحوه تولید فضای همسایگی

ب - درجه حرارت اولیه

ج - نحوه تغییر درجه حرارت

د - شرط تعادل

ه - شرط توقف

$$T_h = \frac{(\text{مقدار ثابت})}{\log(1+h)} \quad (24)$$

روش دیگر جهت کاهش درجه حرارت با استفاده از اطلاعات به دست آمده در آزمایشات قبل از اجرای الگوریتم SA است. در این دسته، کونولی در حل مسائل QAP<sup>۱۲</sup>، درجه حرارت اولیه و درجه حرارت نهایی را براساس آزمایشات قبلی در الگوریتم SA محاسبه کرده است. با استفاده از درجه حرارت اولیه و نهایی، ضریبی محاسبه می شود که در تابع کاهش درجه حرارت نقش دارد، این تابع به صورت رابطه (۲۵) است [۱۴].

$$T_{h+1} = \frac{T_h}{1 + \beta \cdot T_h} \quad \beta = \frac{T_0 - T_f}{MT_0 - T_f} \quad (25)$$

#### د) شرط تعادل

در هر روش SA نیاز است تا پس از انجام یک سری تکرار در درجه حرارت معین، حالت تعادل بررسی شود که آیا فرایند آنیل کردن در همان درجه حرارت ادامه پیدا کند و یا متوقف شده و به درجه حرارت بعدی برود. تعداد تعویض ها در هر درجه حرارت جهت بررسی شرط تعادل را که به آن «تکرار» یا «دوره»<sup>۱۴</sup> گفته می شود، در برخی مسائل ثابت و برخی دیگر در طول اجرای الگوریتم SA از یک تابع استفاده می نماید. برخی از این توابع عبارتند از [۱۵]:

$$N_h = (\text{مقدار ثابت}) \quad (26)$$

$$N_h = \frac{(\text{مقدار ثابت})}{\log(T_h)} \quad (27)$$

$$N_h = \frac{N_h - 1}{a} \quad (28)$$

در روش ویلهلم و وارد [۱۶]، علاوه بر تعداد تعویض ها در هر درجه حرارت، از یک شرط تعادل نیز جهت بررسی نقطه تعادل سیستم در آن درجه حرارت استفاده می شود. اگر این شرط برقرار بود، درجه حرارت کاهش داده شده و فرایند آنیل کردن بعدی تکرار می شود. در غیر این صورت، تعویض های جدید برای دستیابی به یک دوره در همان درجه حرارت انجام شده و دوباره شرط تعادل بررسی می شود. همچنین در روش نگریدی و همکاران [۱۴]، از ساختار مسئله در فرم MDT جهت بررسی شرط تعادل استفاده شده است.

#### ه- شرط توقف

برخی از معیارهای توقف، جهت مسائل مختلف SA به شرح زیر می باشد:

- رسیدن به یک درجه حرارت نهایی
- براساس تعداد کل تعویض های پذیرفته شده در طول فرایند آنیل کردن
- براساس انجام تعداد کل مراحل تعیین شده
- بررسی یک تابع جهت رسیدن به نقطه انجماد

#### ۳-۳- پارامترهای کنترل الگوریتم SA پیشنهادی

در این بخش پارامترهای کنترلی الگوریتم SA پیشنهادی مطرح می شود. یکی از این پارامترها، مکانیزم تولید جواب اولیه امکان پذیر است. برای این منظور با توجه به حداکثر ظرفیت سلول، حداقل تعداد سلول ها محاسبه شده و ماشین ها به صورت تصادفی به آنها تخصیص پیدا می کنند. سپس در صورت عدم برقراری شرط حداکثر ظرفیت سلول، جواب به دست آمده با مکانیزمی تبدیل به جواب امکان پذیر می شود. مکانیزم تولید فضای همسایگی به صورت تصادفی بوده و یکی از سه روش تعویض مقابل انتخاب می شود: (۱) انتقال یک ماشین به یک سلول جدید (۲) انتقال یک ماشین به یک سلول موجود با توجه به حداکثر ظرفیت سلول (۳) جابجایی دو ماشین در دو سلول.

جهت محاسبه درجه حرارت اولیه، تعداد آزمایشات قبل از شروع فرایند آنیل کردن استفاده می گردد. به این ترتیب که با ۱۰۰ بار آزمایش و تولید جواب، بدون در نظر گرفتن تغییرات حاصل در تابع هدف، میزان تغییر در تابع هدف محاسبه شده و ماکزیمم مقدار آن به عنوان  $T_0$  منظور می شود. یعنی:

$$T_0 = \max \{-\Delta f\} \quad (29)$$

جهت بررسی شرط تعادل در هر درجه حرارت، پس از انجام یک دوره از تعویض ها در آن درجه حرارت، یک شرط بررسی می شود. اگر این شرط برقرار بود، درجه حرارت کاهش داده شده و فرایند آنیل کردن دوباره شروع می شود، در غیر این صورت در همان درجه حرارت یک دوره تعویض جدید انجام می شود. این شرط به صورت زیر است:

$$\frac{|\bar{f}_e - \bar{f}_g|}{\bar{f}_g} \leq \varepsilon \quad (30)$$

که در آن  $\varepsilon 1$ ، یک عدد مثبت و کوچک است،  $\bar{f}_e$  میزان متوسط تابع هدف برای تمام حالت های پذیرفته شده در هر دوره و  $\bar{f}_g$ ، متوسط مقادیر  $\bar{f}_e$  برای تمام دوره های قبلی در درجه حرارت  $T_r$  است.

طول دوره (e) برابر ۱۵ در نظر گرفته شده است. جهت کاهش درجه حرارت از تابع هندسی به فرم  $T_{r+1} = \alpha \cdot T_r$  استفاده شده که پس از بررسی های انجام شده،  $\alpha = 0.9$  تعیین شد. جهت کنترل شرط توقف، یکی از دو حالت زیر بررسی می شود:

- رسیدن به درجه حرارت نهایی

- برقراری رابطه (۳۳)

$$V = \left[ \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c f_i^2 \right] - \bar{f}^2 \quad (31)$$

$$S = \frac{V}{T_r^* (\bar{f}_0 - \bar{f})} \quad (32)$$

$$S \leq \varepsilon 2 \quad (33)$$

### ۳-۴- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم کامل روش SA پیشنهادی باتوجه به پارامترهای آن که در بخش قبل مطرح شد، در ادامه توضیح داده می شود. از آنجایی که مدل مورد نظر شامل دو تابع هدف می باشد، جهت حل مسئله نیاز است تا مقادیر هر کدام از توابع هدف و تابع هدف کلی محاسبه شود. در نتیجه سه الگوریتم SA جداگانه باید جهت حل این مدل اجرا شود. ساختار این الگوریتم ها مشابه بوده و تنها تفاوت در مقادیر تابع هدف و برخی پارامترها می باشد. به همین منظور در زیر ساختار کلی الگوریتم SA پیشنهادی که در هر سه الگوریتم مشابه بوده، توضیح داده می شود. نمودار گردش مراحل این الگوریتم در شکل (۱) نشان داده شده است.

مرحله ۰: مقادیر پارامترهای ورودی  $\varepsilon 1, \varepsilon 2, M, e$  را قرار دهید.

مرحله ۱: جواب اولیه امکان پذیر ( $a_0$ ) و همچنین مقادیر  $T_0$  و  $T_r$  را محاسبه کنید.

مقادیر  $t$  و  $c$  را برابر صفر قرار دهید. ( $r$  مربوط به تعداد دفعات انجام فرایند آنیل کردن و  $t$  مربوط به تعداد جواب های پذیرفته شده در یک درجه حرارت و  $c$  مربوط به تعداد جواب های پذیرفته شده در هر دوره می باشد.) مقدار  $T_r$  را برابر  $T_0$  قرار دهید.

مرحله ۲: میزان تابع هدف را به ازای جواب امکان پذیر اولیه محاسبه کنید ( $f_0$ ). این مقدار را به عنوان حداقل مقدار تابع هدف در  $E$  قرار دهید ( $E = f_0$ ) و جواب اولیه را نیز به عنوان بهترین جواب تاکنون در نظر بگیرید،  $a^* = a_0$ .

مرحله ۳: تخصیص جدید ( $a_i$ ) را در همسایگی تخصیص قبلی ( $a_i$ ) باتوجه به مکانیزم تعویض همسایگی ایجاد کنید.

مرحله ۴: میزان تغییر تابع هدف را به ازای تخصیص جدید محاسبه کنید. یعنی:

$$\Delta f = f_j - f_i \quad (34)$$

اگر  $\Delta f \leq 0$  باشد، به مرحله ۶ بروید.

مرحله ۵: یک عدد تصادفی مانند  $y$  را بین صفر و یک انتخاب کنید.  $y \sim U(0, 1)$

مقدار  $P(\Delta f)$  را به صورت زیر محاسبه کنید:

$$P(\Delta f) = \exp \left[ \frac{-\Delta f}{T_r} \right] \quad (35)$$

اگر  $y \leq P(\Delta f)$  باشد به مرحله ۶ بروید و در غیر این صورت به مرحله ۳ بروید.

مرحله ۶: تخصیص جدید پذیرفته می شود و  $c = c + 1$ . اگر مقدار تابع هدف به ازای تخصیص جدید از بهترین مقدار تابع هدف تاکنون بهتر باشد، ( $E > f_j$ ) این مقدار را جایگزین مقدار قبلی نمایید. اگر  $c < e$  باشد، به مرحله ۳ بروید. در غیر این صورت به مرحله بعد بروید. مرحله ۷:  $c$  را مساوی صفر قرار دهید.

الف) شرط تعادل را بررسی کنید. اگر تعداد جواب های پذیرفته شده در درجه حرارت  $T_r$  (یعنی  $t$ ) از ماکزیمم تعداد جواب ها در هر درجه حرارت (یعنی  $M$ ) بیشتر باشد به مرحله ۸ بروید. در غیر این صورت شرط (ب) را بررسی کنید.

ب) شرط زیر را بررسی کنید:

$$\frac{|\bar{f}_e - \bar{f}_g|}{\bar{f}_g} \leq \varepsilon 1 \quad (36)$$

اگر شرط بالا برقرار بود به مرحله بعد بروید. در غیر این صورت به مرحله ۳ بروید.

مرحله ۸: مقادیر  $V, \bar{f}$  و  $S$  را محاسبه کنید و  $t = 0$  قرار دهید.

الف) اگر  $T_r \leq T_r$  باشد، به مرحله (۱۰) بروید. در غیر این صورت به قدم (ب) بروید.  
 ب) اگر  $S \leq \varepsilon_2$  باشد، به مرحله ۱۰ بروید، در غیر این صورت به مرحله بعد بروید.  
 مرحله ۹: مقدار  $T_{r+1} = 0/9 \times T_r$  را محاسبه کنید و  $r = r + 1$  قرار دهید.  
 مرحله ۱۰: جواب نهایی را مشخص کنید. ( $E$  و  $a^*$ )  
 مرحله ۱۱: توقف.

#### ۴ - نتایج محاسباتی

از آنجایی که مدل مورد نظر نسبت به مدل های قبلی در این زمینه جدید می باشد، امکان مقایسه با نتایج کارهای انجام شده قبلی وجود ندارد. در ارتباط با تابع هدف اول یعنی حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول، روش ناگوپال و نارندران [۵]، وجود دارد. در این مقاله، حداکثر ظرفیت سلول مدنظر نبوده ولی نتایج محاسباتی نشان می دهد که در تمامی جواب ها حداقل ۲ ماشین در هر سلول قرار گرفته اند، یعنی به طور ضمنی حد پایینی برای ظرفیت سلول در نظر گرفته شده است. همچنین جواب ها به نحوی می باشند که ماتریس قطری - بلوکی کامل ایجاد شود که این با هدف حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول تولیدی در تناقض می باشد. به همین علت مقایسه ای با این روش انجام نشده است.

در رابطه با تابع هدف حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی، سوفیانوپولو [۴]، مدلی ارائه کرده است ولی میزان تقاضا را جهت تعیین حرکات بین سلولی در نظر نمی گیرد، به همین جهت مقایسه ای با آن انجام نشده است.

از آنجایی که تقاضا در مدل پیشنهادی به صورت فازی در نظر گرفته شده است، برای بیان این مفهوم از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است، جهت تولید جواب ها نیز از عملگرهای جبری فازی استفاده شده و همچنین جهت مقایسه آنها توسط روش رتبه بندی، جواب های فازی تبدیل به مقادیر قطعی شده و با هم مقایسه شده اند.

جهت اجرای الگوریتم SA، آنالیزی روی نتایج محاسباتی انجام شده است. به جهت حساسیت الگوریتم SA نسبت به پارامترهای کنترلی، آنالیزی روی برخی از این پارامترها انجام شده است. چهار مسئله با اندازه های مختلف در نظر گرفته شده و با مقادیر مختلف  $M$ ،  $\varepsilon_1$  و

$\varepsilon_2$  الگوریتم اجرا شده است، مقادیر پارامترها عبارتند از:  $\varepsilon_1 = 0/005, 0/008, 0/01$  و  $M = 75, 100, 150$  و  $\varepsilon_2 = 0/01, 0/08, 0/5$ .

جدول (۲) و جدول (۳) نتایج به دست آمده از قرار دادن مقادیر پارامترهای مختلف را نشان می دهد. جدول (۲) نتایج مربوط به تابع هدف اول یعنی حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول تولیدی می باشد و جدول (۳) نتایج مربوط به تابع هدف دوم یعنی حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی است. پس از مقایسه و بررسی نتایج برای مسائل مختلف، مقادیر پارامترها به صورت زیر تعیین شد:

- در مورد تابع هدف اول:  $\varepsilon_1 = 0/005, \varepsilon_2 = 0/01, M = 150$

- در مورد تابع هدف دوم:  $\varepsilon_1 = 0/005, \varepsilon_2 = 0/01, M = 100$

جهت الگوریتم که شامل دو تابع هدف می باشد نیز آنالیزی روی پارامترها انجام شده و مقادیر  $M = 150$  و  $\varepsilon_1 = 0/005$  و  $\varepsilon_2 = 0/01$  تعیین شد.

جهت بررسی نتایج محاسباتی مدل مورد نظر، پنج مسئله در اندازه های مختلف که داده های آن تا حدودی از مسئله و ناگوپال و نارندران [۵] اقتباس شده، مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی روند جواب های به دست آمده، هر مسئله با ۵ جواب اولیه که به صورت تصادفی تولید شده اند، اجرا شد. برای هر جواب اولیه، ۵۰ بار مدل مورد نظر اجرا شده که از بین آنها بهترین جواب و متوسط جواب های به دست آمده و همچنین بهترین زمان و متوسط زمان محاسباتی در جدول (۴) ارائه شده است. برای هر مسئله متوسط کل جواب ها و متوسط بهترین جواب ها از لحاظ کیفیت جواب و زمان محاسباتی و همچنین انحراف استاندارد آنها مشخص شده است.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که در مورد مسائل با اندازه کوچک، بهترین جواب به دست آمده برای هر جواب اولیه در طول اجراهای مختلف یکسان است. در مورد مسائل با اندازه متوسط نیز این مسئله صدق می کند. اما در مسائل با اندازه بزرگ (مسئله  $30 \times 15$ )، بهترین جواب به دست آمده در طول اجراهای مختلف کمی تفاوت دارد. با بررسی روند تغییرات زمان محاسباتی در مسائل مختلف، این نکته واضح است که زمان محاسباتی، با افزایش اندازه مسئله به صورت نمایی افزایش پیدا می کند.



$T_i$ :	میزان دسترسی به ماشین $i$ در یک دوره زمانی مشخص
$\tilde{D}_j$ :	تقاضای تولید قطعه $z$ در یک دوره زمانی، به صورت فازی
$\tilde{W}_{ij}$ :	بارکاری ماشین $i$ به واسطه تولید قطعه $z$ ، به صورت فازی
$\tilde{m}_{lj}$ :	متوسط بارکاری سلول $l$ به واسطه تولید قطعه $z$ ، به صورت فازی
$U$ :	حداکثر تعداد ماشین آلات در هر سلول
$S$ :	ماتریس توالی عملیات
$s_{ij}$ :	عناصر ماتریس توالی عملیات
$\tilde{C}_{\pi}$ :	تعداد دفعات قرار گرفتن ماشین $i$ و $t$ پشت سر هم جهت تولید تمام قطعات، به صورت فازی
$\delta_{rtj}$ :	در صورت نیاز قطعه $z$ به دو ماشین $i$ و $t$ ، آیا این دو ماشین پشت سر هم قرار دارند یا خیر؟
$f_1(x)$ :	تابع هدف اول
$f_2(x)$ :	تابع هدف دوم
$x_1^*$ :	بردار جواب ایده آل تابع هدف اول
$x_2^*$ :	بردار جواب ایده آل تابع هدف دوم
$f_{1opt}$ :	مقدار ایده آل تابع هدف اول
$f_{2opt}$ :	مقدار ایده آل تابع هدف دوم
$f_{1max}$ :	بیشترین مقدار تابع هدف اول
$f_{2max}$ :	بیشترین مقدار تابع هدف دوم
$\Delta f$ :	میزان تغییر در تابع هدف
$\exp(x)$ :	تابع نمایی یعنی $e$ به توان $x$
$T_0$ :	درجه حرارت اولیه
$T_f$ :	درجه حرارت نهایی
$T_h$ :	درجه حرارت در مرحله $h$
$a_h$ :	ضریب ثابت بین صفر و یک در مرحله $h$
$N_h$ :	تعداد تعویض ها در مرحله $h$ ، جهت بررسی شرط تعادل
$\beta$ :	ضریب مورد نظر در تابع محاسبه درجه حرارت در مرحله $h$
$r$ :	تعداد دفعات انجام فرایند آنتیل کردن
$t$ :	تعداد کل جواب های پذیرفته شده در هر درجه حرارت
$c$ :	تعداد جواب های پذیرفته شده تا پایان هر دوره در هر درجه حرارت
$\alpha$ :	عدد مثبت و نزدیک به یک
$M$ :	حداکثر تعداد تعویض های پذیرفته شده در هر درجه حرارت

جدول (۵)، نتایج حاصل از بهترین جواب به دست آمده برای مسئله تشکیل سلول تولیدی با اندازه های مختلف را نشان می دهد. در این جدول برای هر اندازه از مسئله مورد نظر، بهترین مقدار تابع هدف اول، بهترین مقدار تابع هدف دوم و در نهایت بهترین مقدار تابع هدف کلی حاصل از آنها آمده است. زمان حاصل از این جواب نیز برحسب ثانیه مشخص شده است. نحوه تخصیص ماشین آلات به سلول های تولیدی و همچنین تعداد سلول های حاصل از بهترین جواب به دست آمده نیز مشخص می باشد. به عنوان مثال در مسئله که شامل ۹ قطعه و ۹ ماشین است. (۹×۹)، تعداد سلول های تعیین شده برابر ۵ سلول می باشد (k = ۵) و نحوه تخصیص ماشین آلات به این سلول ها عبارتند از:

سلول اول شامل ماشین های ۲، ۶ و ۹ می باشد. ماشین ۴ و ۸ در سلول دوم قرار دارند. ماشین ۳ به سلول سوم و ماشین های ۱ و ۵ به سلول چهارم تخصیص پیدا کرده اند. ماشین ۷ در سلول پنجم قرار دارد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل تشکیل سلول تولیدی با دو تابع هدف ارائه شده است. این توابع هدف عبارتند از حداقل کردن حجم حرکات بین سلولی و حداقل کردن تغییرات بارکاری در درون سلول تولیدی. به جهت واقعی تر کردن مدل، تقاضا به صورت فازی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که مسئله مورد نظر، جزو مسائل NP-Complete می باشد، روش SA جهت حل آن استفاده شده است. برای این منظور الگوریتم پیشنهادی SA جهت حل آن معرفی شده و آنالیزی در مورد پارامترهای آن انجام شده است. الگوریتم مورد نظر به وسیله مسائل نمونه تست شده و نتایج به دست آمده حاکی از کارایی بالای الگوریتم ارائه شده می باشد.

## فهرست پارامترها

$i$ :	اندیس مربوط به ماشین آلات
$j$ :	اندیس مربوط به قطعات
$l$ :	اندیس مربوط به سلول
$m$ :	تعداد ماشین آلات
$n$ :	تعداد قطعات
$k$ :	تعداد سلول ها
$t_{ij}$ :	زمان انجام عملیات قطعه $z$ توسط ماشین $i$

<p>S: تابعی جهت بررسی شرط توقف در هر درجه حرارت</p> <p><b>زیر نویس ها</b></p> <p>1- Cellular Manufacturing System</p> <p>2- Part Family</p> <p>3- Machine Cell</p> <p>4 - Cell</p> <p>5- Group Technology</p> <p>6- Classification and coding</p> <p>7- Production FLOW Analysis</p> <p>8- Clustering</p> <p>9- Fuzzy Set Theory</p> <p>10- Single Linkage Clustering</p> <p>11- Rank Order Clustering</p> <p>12- Move Desirability Table</p> <p>13- Quadratic Assignment Problem</p> <p>14- Epoch</p>	<p>e: طول «دوره» یا تعداد تعویض های پذیرفته شده، جهت بررسی شرط تعادل</p> <p>e1: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط تعادل سیستم در درجه حرارت <math>T_h</math></p> <p>e2: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط توقف (نقطه انجماد)</p> <p>fi: مقدار تابع هدف در حالت i</p> <p><math>\bar{f}_e</math>: متوسط تابع هدف برای تمام حالت های پذیرفته شده در هر «دوره» در هر درجه حرارت</p> <p><math>\bar{f}_g</math>: متوسط مقادیر <math>\bar{f}</math> برای تمام دوره های قبلی در هر درجه حرارت</p> <p><math>\bar{f}</math>: متوسط تابع هدف برای کلیه حالت های پذیرفته شده تا رسیدن به شرط تعادل در هر درجه حرارت</p> <p><math>\bar{f}</math>: متوسط تابع هدف برای کلیه حالت های پذیرفته شده تا رسیدن به شرط تعادل در هر درجه حرارت اولیه</p> <p><math>f_0</math>: مقدار تابع هدف به ازای جواب اولیه</p> <p>V: میزان تغییرات تابع هدف در هر درجه حرارت</p>
--	--

جدول (۱) فرم کلی الگوریتم SA.

<p>- جواب اولیه <math>i</math> را از مجموعه جواب های امکان پذیر <math>S</math> انتخاب کنید. <math>i \in S</math></p> <p>- درجه حرارت اولیه <math>T_0</math> را انتخاب کنید. <math>T_0 &gt; 0</math></p> <p>- فرآیند کاهش درجه حرارت را تعیین کنید.</p> <p>- تابع مربوط به تعداد تعویض ها در هر درجه حرارت را انتخاب کنید.</p> <p>- شمارنده مربوط به تغییر درجه حرارت را مساوی صفر قرار دهید. <math>t = 0</math></p> <p>- حلقه زیر را تکرار کنید - فرآیند انجماد.</p> <p>- شمارنده مربوط به تعداد تعویض ها در هر درجه حرارت را مساوی صفر قرار دهید. <math>n = 0</math></p> <p>- حلقه زیر را تکرار کنید - فرآیند برقراری تعادل (در هر درجه حرارت)</p> <p>- جواب <math>j</math> را در همسایگی جواب <math>i</math> ایجاد کنید.</p> <p>- مقدار <math>df = f(j) - f(i)</math> را محاسبه کنید.</p> <p>- اگر <math>df &lt; 0</math>، جواب جدید را بپذیرید. <math>j := i</math></p> <p>در غیراینصورت، عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک انتخاب کنید. <math>x \sim u(0, 1)</math></p> <p>اگر <math>x &lt; \exp\left(-\frac{df}{T}\right)</math> باشد، پس <math>j := i</math></p> <p>- <math>n := n + 1</math></p> <p>- تا برقراری رابطه <math>n = N(t)</math> حلقه را تکرار کنید.</p> <p>- <math>t := t + 1</math></p> <p>- درجه حرارت جدید را محاسبه کنید. <math>T := T(t)</math></p> <p>- تا برقراری شرط توقف، حلقه را تکرار کنید.</p>
--

جدول (۲) میزان تغییرات بارکاری در درون سلول و زمان محاسباتی جهت اجرای الگوریتم برای تمام مقادیر M, ε2 و ε1.

شماره	انفازه	ε1	M = ۷۵						M = ۱۰۰						M = ۱۵۰					
			/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱		/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱		/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱	
			Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time
۱	۵×۸	/۰۱	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۶۳۱	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۰۸	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۶۳۱	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۵	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۱۷۰۶	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
۲	۹×۹	/۰۱	۱۰۳۹	۵	۱۷۰۹	۵	۱۷۰۹	۵	۱۰۵۸	۷	۱۱۱۹	۶	۱۰۹۶	۵	۱۱۱۹	۹	۱۰۳۹	۸	۱۰۳۹	۸
		/۰۸	۱۲۲۵	۳	۱۰۹۶	۳	۱۰۵۸	۳	۱۰۹۶	۳	۱۰۹۶	۵	۱۱۱۹	۲	۱۰۳۹	۷	۱۰۳۹	۵	۱۰۳۹	۵
		/۵	۱۴۰۵	۳	۱۶۰۲	۳	۳۶۰۲	۲	۳۶۰۲	۲	۲۱۹۰	۲	۳۳۲۹	۲	۱۷۱۷	۲	۳۰۰۶	۲	۳۳۲۹	۲
۳	۹×۱۰	/۰۱	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۰۸	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۵	۰	۲	۰	۲	۳۱۱۲	۱	۲۶۹	۳	۳۱۱۲	۲	۱۰۸۸	۲	۲۶۵۳	۱	۰	۲	۰	۲
۴	۱۵×۲۰	/۰۱	۱۰۲۷	۱۳	۱۰۲۷	۱۱	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۱۵	۱۰۲۷	۷	۵۷۰۶	۱۰	۱۰۲۷	۱۳	۱۰۲۷	۱۵	۱۰۲۷	۱۵
		/۰۸	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۱۲	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۷	۱۰۲۷	۱۵	۱۵۲۷۰	۳	۱۰۲۷	۱۲
		/۵	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۷	۱۵۵۸۲	۲	۱۴۴۷۰	۳	۱۳۹۸۰	۶	۱۰۲۷	۹	۱۰۲۷	۱۲	۱۵۱۲۱	۳	۱۵۳۵۵	۳

\* زمان محاسباتی براساس ثانیه می باشد.

جدول (۳) حجم حرکات بین سلولی و زمان محاسباتی جهت اجرای الگوریتم برای تمام مقادیر M, ε2 و ε1.

شماره	انفازه	ε1	M = ۷۵						M = ۱۰۰						M = ۱۵۰					
			/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱		/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱		/۰۰۵		/۰۰۸		/۰۱	
			Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time	Obj. Func.	CPU Time
۱	۵×۸	/۰۱	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۶۳۱	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۰۸	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۶۳۱	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۵	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۱۷۰۶	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
۲	۹×۹	/۰۱	۱۰۳۹	۵	۱۷۰۹	۵	۱۷۰۹	۵	۱۰۵۸	۷	۱۱۱۹	۶	۱۰۹۶	۵	۱۱۱۹	۹	۱۰۳۹	۸	۱۰۳۹	۸
		/۰۸	۱۲۲۵	۳	۱۰۹۶	۳	۱۰۵۸	۳	۱۰۹۶	۳	۱۰۹۶	۵	۱۱۱۹	۲	۱۰۳۹	۷	۱۰۳۹	۵	۱۰۳۹	۵
		/۵	۱۴۰۵	۳	۱۶۰۲	۳	۳۶۰۲	۲	۳۶۰۲	۲	۲۱۹۰	۲	۳۳۲۹	۲	۱۷۱۷	۲	۳۰۰۶	۲	۳۳۲۹	۲
۳	۹×۱۰	/۰۱	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۰۸	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲
		/۵	۰	۲	۰	۲	۳۱۱۲	۱	۲۶۹	۳	۳۱۱۲	۲	۱۰۸۸	۲	۲۶۵۳	۱	۰	۲	۰	۲
۴	۱۵×۲۰	/۰۱	۱۰۲۷	۱۳	۱۰۲۷	۱۱	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۱۵	۱۰۲۷	۷	۵۷۰۶	۱۰	۱۰۲۷	۱۳	۱۰۲۷	۱۵	۱۰۲۷	۱۵
		/۰۸	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۱۲	۱۰۲۷	۱۰	۱۰۲۷	۷	۱۰۲۷	۱۵	۱۵۲۷۰	۳	۱۰۲۷	۱۲
		/۵	۱۰۲۷	۸	۱۰۲۷	۷	۱۵۵۸۲	۲	۱۴۴۷۰	۳	۱۳۹۸۰	۶	۱۰۲۷	۹	۱۰۲۷	۱۲	۱۵۱۲۱	۳	۱۵۳۵۵	۳

\* زمان محاسباتی براساس ثانیه می باشد.

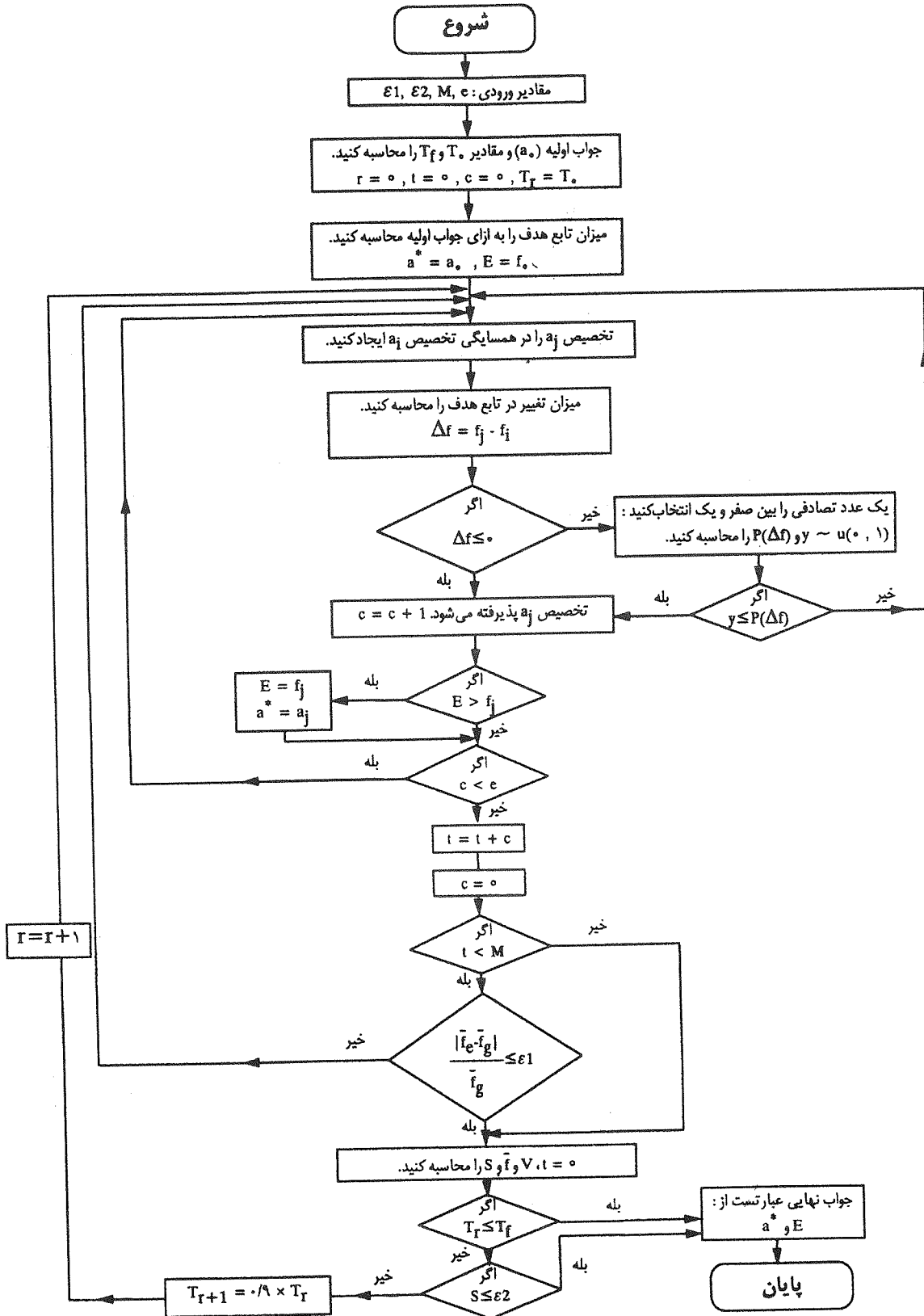
جدول (۲) مقایسه نتایج مسائل تشکیل سلول تولیدی با اندازه های متفاوت.

Prob. Size	Best Obj.Func.	Initial Solution	Obj. Func. ( $\times 10^2$ )		CPU Time	
			Best	Mean	Best	Mean
5 × 8	120.859	1	120.859	120.859	0.01	0.9
		2	120.859	120.859	0.01	0.8
		3	120.859	120.859	0.03	0.9
		4	120.859	120.859	0.02	0.7
		5	120.859	120.859	0.01	0.7
		Ave.	120.859	120.859	0.016	0.8
		S.D.	0.0	0.0	0.0089	0.1
9 × 9	112.242	1	112.242	111.621	3.0	3.1
		2	112.242	112.185	3.0	3.6
		3	112.242	112.136	3.0	3.4
		4	112.242	112.242	3.0	3.5
		5	112.242	112.079	3.0	3.5
		Ave.	112.242	112.053	2.8	3.42
		S.D.	0.0	0.248	0.447	0.192
9 × 10	113.037	1	113.037	112.678	2.0	3.4
		2	113.037	112.644	3.0	3.6
		3	113.037	112.685	3.0	3.6
		4	113.037	112.996	3.0	3.8
		5	113.037	113.037	3.0	3.5
		Ave.	113.037	112.808	2.8	3.58
		S.D.	0.0	0.191	0.447	0.148
10 × 20	133.544	1	133.544	132.959	10.0	11.0
		2	133.544	132.203	9.0	11.2
		3	133.544	129.724	8.0	10.7
		4	133.544	130.295	9.0	10.8
		5	133.544	131.401	9.0	11.0
		Ave.	133.544	131.316	9	10.94
		S.D.	0.0	1.329	0.707	0.195
15 × 30	100.000	1	100.000	91.591	31.0	33.3
		2	98.643	87.371	23.0	24.7
		3	100.000	94.928	33.0	31.3
		4	100.000	93.942	24.0	25.8
		5	96.596	86.763	31.0	32.3
		Ave.	99.048	90.919	28.4	29.48
		S.D.	1.491	3.726	4.561	3.945

جدول (۵) بهترین جواب به دست آمده برای مسئله تشکیل سلول تولیدی با اندازه های مختلف.

Prob.Size	Best Obj.Func.	Best Obj.Func.1	Best Obj.Func.2	CPU Time	Solution
5 × 8	120.859	24.000	619	0.01	k = 3 cell 1 : 1 , 5 cell 2 : 2 , 3 cell 3 : 4
9 × 9	112.242	9.667	2024	3.0	k = 5 cell 1 : 2 , 6 , 9 cell 2 : 4 , 8 cell 3 : 3 cell 4 : 1 , 5 cell 5 : 7
9 × 10	113.037	28.833	784	3.0	k = 4 cell 1 : 5 , 6 , 9 cell 2 : 1 , 3 , 8 cell 3 : 2 , 7 cell 4 : 4
10 × 20	133.544	80.500	1139	8.0	k = 6 cell 1 : 1 , 5 cell 2 : 7 cell 3 : 8 , 9 cell 4 : 3 , 6 cell 5 : 2 cell 6 : 4 , 10
15 × 30	100.000	731.600	1027	24.0	k = 3 cell 1 : 4 , 5 , 6 , 8 , 9 cell 2 : 1 , 2 , 3 , 7 , 10 cell 3 : 11,12,13,14,15

شکل (۱) نمودار گردش مراحل الگوریتم پیشنهادی SA.



- [1] Heragu, S. "Group Technology and Cellular Manufacturing", IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics, Vol. 24, No. 2, 203-215. (1994).
- [2] Singh, N. and Rajamani, D., "Cellular Manufacturing Systems: An Invited Review", European Journal of Operational Research, Vol. 6, No. 3, 284-291, (1993).
- [3] Selim, H. M., and Askin, R.G. and Vakharia, J., "Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for Future Research", Computers Ind. Engng., Vol. 34, No. 1, 3-20, (1998).
- [4] Sofianopoule, S., "Application of Simulated Annealing to a Linear Model for the Formulation of Machine Cells in Group Technology", Int. J. Prod. Res., Vol. 35, No. 2, 501-511, (1997).
- [5] Venugopal, V., and Narendran, T.T., "Cell Formation in Manufacturing Systems Through Simulated Annealing: An Experimental Evaluation", European Journal of Operational Research, 63, 409-422, (1992 a).
- [6] Venugopal, V., and Narendran, T.T., "A Genetic Algorithm Approach to the Machine-Component Grouping Problem with Multiple Objectives", Computers Ind. Engng., vol 22, No. 4, 469-480, (1992 b).
- [7] Xu, H., and Wang, H. P., "Part Family Formation for GT Applications Based on Fuzzy Mathematics", Int. J. Prod. Res., Vol. 27, No. 9, 1637-1651, (1989).
- [8] Chu, C.H., and Hayya, J.C., "A Fuzzy Clustering Approach to Manufacturing Cell Formation", Int. J. Prod. Res., Vol. 29, No. 7, 1475-1487, (1991).
- [9] Gindy, N. N.Z., and Ratchev, T.M., and Case, K., "Component Grouping for GT Applications-a Fuzzy Clustering Approach with Validity Measure", Int. J. Prod. Res., Vol. 33, No. 9, 2493-2509, (1995).
- [10] Zhang, C., and Wang, H.P., "Concurrent Formation of part Families and Machine Cells Based on the Fuzzy set Theory", Journal of Manufacturing systems, Vol. 11, No. 1, 61-67, (1992).
- [11] Narayanaswamy, P., and Boctor, C.R., and Rajamani, D., "Fuzzy Logic Concepts Applied to Machine-Component Matrix Formation in Cellular Manufacturing "European Journal of Operational Research, 93, 88-9, (1996).
- [12] Szwarc, D., and Rajamani, D., and Boctor, C.R., "Cell Formation Considering Fuzzy Demand and Machine Capacity", Int. J. Adv. Manuf. Technology, 13, 134-147, (1997).
- [13] Tsai, C., and Chu, C., and Barta, T. A., "Modeling and Analysis of a Manufacturing Cell Formation Problem with Fuzzy Mixed-Integer Programming", IIE Transactions, 29, 533-547, (1997).
- [14] Zegordi, S. H., and Itoh, K., and Enkawa, T., and Chung, S.L., "Simulated Annealing Scheme Incorporating Move Desirability Table For Solution of Facility Layout problems", Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 38, No. 1, 1-20, March (1995).
- [15] Souilah, a., "Simulated Annealing for Manufacturing Systems Layeout Design", European Journal of Operational Research, 82, 592-614 (1995).
- [16] Wilhelm, M.R. and Ward, T. L., "Solving Quadratic Assignment Problem by Simulated Annealing", IIE Transactions, 107-119, March (1987).