ارائه روش SA جهت زمانبندی در سیستم تولیدسلولی بادرنظرگرفتن فرآیندتولیدچندگانه

فرناز برزین پور
دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
barzinpour1900@yahoo.com

سید حسام الدین ذگردی
دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
zegordi@modares.ac.ir

واژه‌های کلیدی
سیستم تولید سلولی– زمانبندی– Simulated Annealing – فرآیند تولید چندگانه – زمان آماده سازی– قطعات بین سلولی

چکیده

سیستم تولید سلولی، سیستمی مناسب جهت تولید اقتصادی خانواده قطعات است. زمانبندی سلول تولیدی نقش مؤثری در اجرای موفقیت آمیز سیستم‌های تولید سلولی به عهده دارد. در این مقاله، مدل ریاضی جدیدی جهت زمانبندی خانواده قطعات و همچنین قطعات در هر خانواده در سیستم تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی ارائه شده است. در این مدل پیشنهادی، زمان آماده سازی جهت هر خانواده قطعه وابسته به توالی عملیات فرض شده و امکان قطعات بین سلولی وجود دارد. به علت وجود انعطاف پذیری در سیستم سلولی، این امکان وجود دارد که هر قطعه برنامه فرآیندی مختلف تولید شود. تابع هدف در این مدل حداقل کردن بیشترین زمان ساخت (C_{max}) است. این مسئله از نقطه نظر پیچیدگی محاسباتی جزو مسائل NP-hard است. از این رو یک روش Simulated Annealing (SA) پیشنهادی جهت حل آن ارائه شده است. علاوه براین به جهت اهمیت مکانیزم همسایگی در روش SA، روش تولید همسایگی جدید DIS معرفی شده است. جهت بررسی تاثیر مکانیزم های همسایگی در الگوریتم SA پیشنهادی، مسائلی در اندازه های مختلف تولید شده و روش تولید همسایگی پیشنهادی با سایر روش های تولید همسایگی مقایسه شده است. در نهایت نتایج بدست آمده نشان دهندهٔ کارایی روش تولید همسایگی جدید در مقایسه با سایر روش‌ها است.

1- مقدمه

سیستم تولید سلولی (CMS)[1] ، سیستمی مؤثر برای تولید اقتصادی خانواده قطعات است. در این سیستم تعدادی از ماشین‌آلات که معمولا از لحاظ عملکرد متفاوت هستند، در یک سلول تولیدی گروه‌بندی شده که به آن "سلول ماشینی[2] " گفته می‌شود. این سلول مسئول تکمیل عملیات مربوط به قطعات مشابهی است که در یک گروه قرار دارند و به عنوان "خانواده قطعه[3] " شناخته می‌شوند. تعیین خانواده قطعات و سلول‌های ماشینی از عمده مسائل طراحی سلول‌های تولیدی است.

زمانبندی قطعات و خانواده قطعات، نقش مؤثری در اجرای موفقیت آمیز سیستم تولید سلولی به عهده دارد [1]. بطور کلی هدف از زمانبندی در سیستم‌های تولید سلولی، تعیین توالی انجام قطعات در هر خانواده و تعیین توالی انجام خانواده قطعات در سلول های تولیدی است. ویژگی خاصی که زمانبندی در سیستم‌های فوق را از روش‌های سنتی زمانبندی متمایز می کند این است که نیازهای آماده سازی جهت قطعات در هر خانواده قطعه مشابه است. از این رو لازم است قبل از شروع عملیات هر خانواده قطعه یک آماده سازی اصلی انجام شود ولی ممکن است که برای تولید هر قطعه به آماده سازی جزئی نیز نیاز باشد [2] و [3]. یک دسته از روش های زمانبندی در سیستم های تولید سلولی، روشهای "زمانبندی گروهی[4]" هستند که در این دسته روشها زمانبندی در دومرحله انجام می شود. در مرحله اول توالی انجام کارها در هر خانواده مشخص شده و در مرحله بعد، اولویت انجام خانواده قطعات در سلول ها مشخص می گردد. مطالعاتی در زمینه طبقه بندی این دسته از روش های زمانبندی انجام شده است ([4]، [5] و [6]).

یکی از مهمترین توابع هدف در مسئله زمانبندی در سیستم های تولید سلولی، کاهش مدت زمان ساخت (C_{max}) است. کمینه کردن این هدف باعث افزایش نرخ خروجی و سرعت فرآیند ساخت و تولید می‌شود که یکی از اهداف مهم زنجیره تأمین ساخت و تولید است. کاهش مدت زمان ساخت منجر به کوتاهتر شدن سیکل تولید و رسیدن سریع محصول به دست مشتری می‌گردد. در این رابطه، "بیکر" قضایایی را جهت حل مسئله زمانبندی خانواده قطعات در حالت جریان کارگاهی با دو ماشین و با فرض زمان آماده سازی مستقل از توالی عملیات ارائه کرده است [7]. "اسکورین کاپوف" و همکارش یک روش جستجوع ممنوع (TS[5]) ارائه کرده اند و با روش Simulated Annealing (SA) مقایسه نموده اند [8]. در سال 1995، "لاجندران" و همکاران عملکرد چندین روش ابتکاری را در دو مرحله بررسی نموده اند. در مرحله اول توالی قطعات در هر خانواده قطعه ودر مرحله دوم توالی خانواده قطعات مشخص می‌گردد [9]. همچنین "اسچالر" روش حل ابتکاری را در دو مرحله ارائه کرده است بطوریکه در مرحله اول از روش شاخه و کران جهت تعیین توالی خانواده قطعات و در مرحله دوم از روش تعویض جفتی جهت تعیین توالی کارها در هر خانواده استفاده کرده است [10].

ماشین‌آلات در سیستم های تولید سلولی به نحوی گروهبندی می‌شوند که "قطعات بین سلولی[6]" وجود نداشته و یا حداقل شوند [11]. منظور از "قطعات بین سلولی" قطعاتی هستند که عملیات ساخت آنها در بیش از یک سلول انجام می‌شود. ولی علی‌رغم این مسئله، تحقیقات انجام‌شده در زمینه اجرای سیستم‌های تولید سلولی نشان می‌دهد که وجود قطعات بین سلولی در سیستم های سلولی در دنیای واقعی اجتناب ناپذیر است [1] و [12]. یکی از محدودیت های روش های زمانبندی گروهی این است که در اغلب موارد فرض می‌شود که قطعات بین سلولی وجود ندارد واین فرض مهم و واقعی را در نظر نمی‌گیرند. چرا که وجود قطعات بین سلولی باعث پیچیدگی جریان مواد و زمانبندی در سیستم های تولیدی می‌شود. در ارتباط با در نظرگرفتن امکان قطعات بین سلولی در زمانبندی تحقیقات محدودی انجام شده‌است [13] و [14].

با توجه به اهمیت انعطاف پذیری درسیستم‌های تولیدی، در اغلب مسائل تولید سلولی به این ویژگی کمتر توجه شده است [15]. یکی از سطوح انعطاف‌پذیری، استفاده از ماشین آلاتی است که قابلیت تولید قطعات با فرآیندهای تولیدی متفاوت را دارند که زمان تولید جهت هر عملیات در فرآیند موردنظر متفاوت است. در این صورت با در نظر گرفتن این نوع انعطاف‌پذیری در سیستم سلولی، جهت تولید قطعات در

---

[1] Cellular Manufacturing System (CMS)

[2] Machine Cell

[3] Part Family

[4] Group Scheduling

[5] Tabu Search

[6] Intercellular Part

هر خانواده از فرآیندهای تولیدی متفاوت (توسط ماشین‌های مختلف) می‌توان استفاده کرد که به صورت "برنامه فرآیند چندگانه[1]" مطرح می‌گردد. "برنامه فرآیند" هر قطعه شامل توالی عملیات و ماشین آلات مورد نیاز در توالی مورد نظر است. در مسائل CMS در صورت وجود "برنامه فرآیند چندگانه"، در اغلب موارد انتخاب فرآیند تولید در مرحله تشکیل سلول تولیدی در نظر گرفته می‌شود. سپس در مرحله بعد زمانبندی انجام می‌شود. این در حالی است که بخشهای تعیین برنامه فرآیند هر قطعه و زمانبندی قطعات برهم اثرگذار هستند و نگاه یکپارچه به برنامه ریزی فرآیند و زمانبندی می‌تواند موجب استفاده بهتر از منابع تولید و بهبود اهداف زمانبندی شود که در زمینه سیستم تولید سلولی کمتر مورد توجه واقع شده‌است.

در سال 1999 "اله وردی" و همکاران مسائل زمانبندی را در ارتباط با در نظر گرفتن زمان و هزینه های آماده سازی بررسی و طبقه‌بندی کرده‌اند. در این تحقیق اشاره شده است که در اغلب مطالعات انجام شده در مسائل زمانبندی در سیستم های سلولی، زمان آماده‌سازی مستقل از توالی فرض شده‌است، در حالی که در بسیاری از شرایط واقعی از جمله ساخت مدارات برد الکترونیکی، زمان آماده سازی بین خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات است [16] و [17].

در این مقاله یک مدل ریاضی جدید با فرض های کاربردی جهت زمانبندی در سیستم های تولید سلولی انعطاف پذیر با ساختار جریان کارگاهی[2] ارائه شده‌است. هدف از این مدل حداقل کردن زمان ساخت قطعات (C_{max}) است و فرضهای کاربردی نظیر زمان آماده‌سازی خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات، امکان وجود قطعات بین سلولی و امکان ساخت از طریق "برنامه فرآیند چندگانه" در نظر گرفته‌شده‌است. مسئله فوق از نظر پیچیدگی محاسباتی جزو مسائل NP-hard است [17]. به جهت قابلیت زیاد الگوریتم SA[3] در حل مسائل پیچیده ترکیبی [18]، در این مقاله الگوریتم SA جهت حل این مسئله پیشنهاد شده‌است. علاوه بر این به دلیل تأثیر چگونگی تولید همسایگی در الگوریتم SA، در این تحقیق مکانیزم تولید همسایگی جدید DIS [4] پیشنهاد شده است. جهت بررسی کارایی الگوریتم SA پیشنهادی، مسائلی در اندازه های مختلف تولید شده و اثر مکانیزم همسایگی جدید با دو روش همسایگی دیگر مقایسه شده‌است.

مابقی این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش 2 مدل ریاضی جهت مسئله زمانبندی در سیستم های تولید سلولی ارائه شده است. در بخش 3، ویژگی الگوریتم پیشنهادی SA پیشنهادی و مراحل آن معرفی شده است. نحوه نمایش جواب و مکانیزم های تولید همسایگی در بخش 4 ارائه شده که شامل روش پیشنهادی DIS است. در بخش 5 مراحل و پارامترها در الگوریتم SA پیشنهادی معرفی شده است. در بخش 6 طراحی مسائل عددی و در بخش 7 نتایج محاسباتی ارائه شده است. در نهایت نتیجه گیری در بخش 8 آمده است.

2- مدلسازی ریاضی

در این مقاله، مسئله زمانبندی در سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن شرایط کاربردی و وجود انعطاف پذیری در فرآیند تولید مدنظر بوده و در این راستا مدل ریاضی جدیدی ارائه شده‌است. هدف از مسئله زمانبندی در این مقاله، تعیین برنامه فرآیندی هر قطعه، تعیین توالی عملیات قطعات در هر خانواده و تعیین توالی ورود خانواده قطعات در هر سلول است. تابع هدف این مدل، حداقل کردن زمان ساخت (C_{max}) درتولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی است. در این مدل ریاضی، با توجه به ویژگی ها و شرایط کاربردی، فرض‌هایی به صورت زیر مدنظر است:

- زمان آماده سازی جهت هر خانواده قطعه وابسته به توالی ورود خانواده های قطعه به سلول است.
- عملیات هر خانواده می تواند در بیشتر از یک سلول انجام شود و در واقع امکان وجود "قطعات بین سلولی" درنظرگرفته شده است.
- برخی از قطعات دارای "برنامه فرآیندی چندگانه" هستند که توسط ماشین های مختلف قابل انجام است.

[1] Alternative Process Plan
[2] Flow shop
[3] Simulated Annealing (SA)
[4] Directed Interchange Scheme

- سلول های تولیدی از ساختار جریان کارگاهی برخوردارند و ترتیب عبور قطعات از ماشین ها در هر خانواده قطعه یکسان است.
- زمانهای عملیات معلوم و ثابت می باشند و زمان آماده سازی جزئی هم در آنها دیده شده است.
- گروههای کاری و سلولهای تولیدی از قبل مشخص هستند.
- همه قطعات در شروع دوره زمانبندی در سیستم تولیدی وجود دارند.
- ماشین آلات تولیدی همیشه در دسترس بوده و خرابی و قطع جریان عملیات وجود ندارد.

- **پارامترهای مدل ریاضی**

N : تعداد کل قطعات $\quad i = 1, 2,\ldots, N$

M : تعداد کل ماشین‌آلات $\quad j = 1, 2,\ldots, M$

PF : تعداد خانواده قطعات $\quad f = 1, 2,\ldots, PF$

K : تعداد سلول ها $\quad k = 1, 2,\ldots, K$

n_f : تعداد قطعات در خانواده f $\quad f = 1, 2,\ldots, PF$

m_k : تعداد ماشین‌آلات در سلول k $\quad k = 1, 2,\ldots, K$

AP_i: مجموعه برنامه‌های فرآیند جهت تولید قطعه i ام $\quad p_i = 1,\ldots,AP_i$

P_{ifjkp_i}: مدت زمان انجام عملیات قطعه i از خانواده f توسط ماشین j از سلول k تحت فرآیند p_i

S_{rf}: مدت زمان آماده سازی اگر خانواده f بلافاصله بعد از خانواده r وارد سلول شوند.

$R^{j}_{ifp_i}$: برابر مقدار یک است اگر قطعه i از خانواده f تحت فرآیند p_i به ماشین j نیاز داشته‌باشد و در غیر اینصورت صفر است .

Q : یک عدد مثبت و بزرگ

C_{max}: بیشترین زمان تکمیل قطعات

در این مسئله، فرض شده‌است که N قطعه به PF خانواده قطعه و M ماشین در K سلول گروهبندی شده‌اند به طوریکه در هر خانواده قطعه n_f قطعه و در هر سلول m_k ماشین وجود دارد:

$$N = \sum_{f=1}^{PF} n_f \qquad (1)$$

$$M = \sum_{k=1}^{K} m_k \qquad (2)$$

این مسئله به صورت یک مدل ریاضی از نوع عدد صحیح مختلط، به شرح زیر مدلسازی شده است. متغیرهای تصمیم و روابط به صورت زیر است:

- **متغیرهای تصمیم:**

$$X_{isf} = \begin{cases} 1 & \text{اگر در توالی عملیات خانواده } f \text{ ،قطعه } i \text{ قبل از قطعه } s \text{ قراربگیرد.} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$Y_{frk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر خانواده قطعه } f \text{ قبل از خانواده قطعه } r \text{ به سلول } k \text{ وارد شود.} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$Z_{ifp_i} = \begin{cases} 1 & \text{اگر فرآیند تولید } p_i \text{ برای تولید قطعه } i \text{ از خانواده } f \text{ انتخاب شود.} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

C_{ifjk} = زمان تکمیل قطعه i از خانواده f روی ماشین j از سلول k

براساس متغیر C_{ifjk} ، متغیرهای C_{max} و C_{if} محاسبه می‌شوند که:

C_{max} : بیشترین زمان تکمیل قطعات

C_{if} : زمان تکمیل قطعه i از خانواده f

- **تابع هدف:**

تابع هدف در مدل ریاضی فوق عبارتست از حداقل کردن زمان ساخت قطعات (C_{max}) در سیستم سلولی که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Min } C_{max} = \text{Max}\,(C_{if}) \qquad f = 1,\dots,PF \;,\; i = 1,\dots,n_f \qquad (3)$$

- **محدودیت های مدل:**

(4) و (5)

$$C_{sfjk} - C_{ifjk} + Q.(1 - X_{isf}) \geq P_{sfjkp_s}.Z_{sfp_s}.R^{j}_{sfp_s}$$

$$C_{ifjk} - C_{sfjk} + Q.X_{isf} \geq P_{ifjkp_i}.Z_{ifp_i}.R^{j}_{ifp_i}$$

$i , s = 1,..,n_f \quad f = 1,\dots,PF$
$j = 1,\dots,m_k \quad k = 1,\dots,K$
$p_i = 1,\dots,AP_i \quad p_s = 1,\dots,AP_s$

- روابط (4) و (5) توالی انجام عملیات دو قطعه از یک خانواده قطعه را تضمین می‌کند. بطوریکه اگر دو قطعه i و s از خانواده قطعه f به عملیات توسط ماشین j نیاز داشته باشند، تداخل زمانی بین آنها ایجاد نشود.

(6) و (7)

$$C_{irjk} - C_{ufjk} + Q.(1 - Y_{frk}) \geq P_{irjkp_i} + S_{rf}$$

$$C_{ufjk} - C_{irjk} + Q.Y_{frk} \geq P_{ufjkp_u} + S_{fr}$$

$i = 1,\dots,n_r \quad u = 1,\dots,n_f$
$r,f = 1,\dots,PF$
$j = 1,\dots,m_k \quad k = 1,\dots,K$
$p_i = 1,\dots,AP_i \quad p_u = 1,\dots,AP_u$

- محدودیت‌های (6) و (7) ترتیب ورود خانواده‌ها به سلول را کنترل می‌کند. به این ترتیب که زمان تکمیل عملیات خانواده قطعه‌ای که دیرتر وارد سلول شده‌است، بیشتر از زمان تکمیل عملیات خانواده قطعه‌ای است که زودتر وارد سلول شده‌است.

$$\sum_{p_i=1}^{AP_i} Z_{ifp_i} = 1 \qquad f = 1,...,PF \quad i = 1,...,n_f \qquad (8)$$

- رابطه (8) تضمین میکند که هر قطعه i فقط توسط یک فرآیند تولیدی انجام شود.

$$C_{1fjk} \geq (S_{rf} + P_{1fjkp_1}).Z_{1fp_1}.R^{j}_{1fp_1} \qquad r, f = 1,...,PF \quad j = 1,...,m_k \quad k = 1,...,K \qquad (9)$$

- رابطه (9) مشخص می‌کندکه زمان تکمیل اولین قطعه از خانواده f حداقل از مدت زمان انجام عملیات آن بزرگتر باشد.

$$C_{if} \geq C_{ifjk} \qquad i = 1,...,n_i \quad f = 1,...,PF \quad j = 1,...,m_k \quad k = 1,...,K \qquad (10)$$

- رابطه (10) نحوه محاسبه زمان تکمیل هر قطعه را نشان می‌دهد.

$$X_{isf} = 0,1 \qquad Y_{frk} = 0,1 \qquad Z_{ifp_i} = 0,1 \qquad C_{ifjk} \geq 0 \qquad (11)$$

- رابطه (11) نوع متغیرهارا مشخص می‌کند.

3-الگوریتم SA پیشنهادی

مفهوم SA در واقع یک آنالوژی بین فرآیند آنیل کردن فیزیکی در جامدات و فرآیند حل مسائل بهینه سازی ترکیبی است. الگوریتم SA یک روش بهبود دهنده است که سعی دارد از قرارگرفتن در نقطه بهینه محلی فرار کند. در الگوریتم های بهینه سازی محلی، جواب جدید تنها در صورت بهبود تابع هدف پذیرفته می‌شود. این در حالی است که در روش SA ، نه تنها جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود، پذیرفته می‌گردد بلکه جواب های نامناسب نیز به طور احتمالی پذیرفته می شوند که این احتمال به صورت رابطه (12) محاسبه می‌شود:

$$P(\Delta f) = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) \qquad (12)$$

که در آن Δf ، میزان تغییرات در تابع هدف و T نشان دهنده درجه حرارت است. اگر این احتمال از یک عدد تصادفی بین صفر و یک بیشتر باشد، جواب نامناسب هم پذیرفته می‌شود. ویژگی خاص الگوریتم SA پیشنهادی در بررسی شرط تعادل و شرط توقف در الگوریتم پیشنهادی است.

شرط تعادل:

بطور کلی در روش‌های SA ، تعداد جواب پذیرفته شده و یا تعداد کل جواب تولید شده در هر درجه حرارت (T_r) به عنوان مبنایی برای بررسی شرط تعادل در آن درجه حرارت منظور می‌شود. به تعداد تعویض‌ها در هر درجه حرارت جهت بررسی شرط تعادل، "دوره [1] " گفته

[1] Epoch

می‌شود. این تعداد به عنوان پارامتر الگوریتم SA است که باید تعیین گردد. در الگوریتم SA پیشنهادی از دو معیار جهت بررسی شرط تعادل استفاده می‌شود. به این ترتیب که در هر درجه حرارت به اندازه "طول دوره" (e) جواب پذیرفته شده ایجاد می‌شود. یک معیار رسیدن به حداکثر تعداد جوابهای پذیرفته شده (M) در هر درجه حرارت است که به عنوان مبنایی برای رسیدن به شرط تعادل درنظر گرفته می‌شود (معمولا M به صورت مضربی از e درنظر گرفته می شود. جهت کاهش زمان محاسباتی، در صورت عدم برقراری این معیار، معیار دیگری پیشنهاد شده است. به این ترتیب که نسبت متوسط مقادیر تابع هدف جهت جوابهای پذیرفته شده در این دوره با متوسط مقادیر تابع هدف جهت جوابهای پذیرفته شده در دوره‌های قبلی مقایسه می‌شود. اگر این نسبت زیاد باشد، نشان‌دهنده میزان نوسان در جوابهای بدست آمده است. درنتیجه سیستم به حالت تعادل نرسیده است و مجدد در آن درجه حرارت، به اندازه "طول دوره" باید جواب پذیرفته شده ایجاد شود. هر بار کنترل می‌شود که مجموع تعداد جوابهای پذیرفته شده در هر درجه حرارت از حداکثر تعداد جوابهای پذیرفته شده (M)، بیشتر نباشد. به این ترتیب در برخی حالت‌ها قبل از رسیدن به حداکثر تعداد جوابهای پذیرفته شده، سیستم به حالت تعادل می‌رسد.

شرط توقف:

جهت بررسی شرط توقف نیز از دو معیار استفاده شده است. یک معیار رسیدن به درجه حرارت نهایی است. معیار دیگر برمبنای نسبت میزان پراکندگی جوابهای پذیرفته شده در درجه حرارت فعلی به تفاوت متوسط مقادیر تابع هدف جهت جوابهای پذیرفته شده در درجه حرارت اولیه و درجه حرارت فعلی است. در صورتیکه این نسبت کم باشد، یعنی سیستم به حالت انجماد رسیده و متوقف می‌شود. در غیراینصورت با کاهش درجه حرارت، الگوریتم پیشنهادی ادامه پیدا می‌کند.

- **پارامترهای الگوریتم SA پیشنهادی**

T_0 : درجه حرارت اولیه

T_f : درجه حرارت نهایی

T_r : درجه حرارت در مرحله r ام

M : حداکثر تعداد تعویض های پذیرفته شده در هر درجه حرارت

e : تعداد تعویض های پذیرفته شده در هر "دوره" جهت بررسی شرط تعادل

α : ضریب کاهش درجه حرارت در هر مرحله (عدد اعشاری بین صفر و یک)

$\varepsilon 1$: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط تعادل سیستم در درجه حرارت T_r

$\varepsilon 2$: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط توقف (نقطه انجماد)

$\bar{f}_e(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای کلیه حالت های پذیرفته شده در هر "دوره" در درجه حرارت T_r

$\bar{f}_g(T_r)$: متوسط مقادیر $\bar{f}_e$ برای تمام دوره های قبلی در درجه حرارت T_r

$\bar{f}(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای کلیه حالت های پذیرفته شده تا رسیدن به شرط تعادل در درجه حرارت T_r

- **مراحل الگوریتم SA پیشنهادی:**

مرحله صفر: مقادیر اولیه پارامترهای ورودی $\varepsilon 1$ ، $\varepsilon 2$ ، M و e را قراردهید.

مرحله 1 : جواب امکان‌پذیر اولیه (a_0) و مقادیر T_0 و T_f رامحاسبه کنید. مقدار T_r را برابر T_0 قرار دهید.

مقادیر r ، t و n را مساوی صفر قراردهید. (r مربوط به تعداد دفعات انجام فرآیند آنیل کردن، t مربوط به تعداد جوابهای پذیرفته شده در هر درجه حرارت و n مربوط به تعداد جوابهای پذیرفته شده در هر "دوره" است).

مرحله 2: میزان تابع هدف را به ازای جواب امکان‌پذیر اولیه محاسبه کنید (f_0). این مقدار را به عنوان حداقل مقدار فعلی تابع هدف قرار دهید ($E = f_0 (T_r)$) و جواب اولیه را به عنوان بهترین جواب تا کنون در نظر بگیرید ($a^* = a_0$).

مرحله 3: جواب جدید (a_j) را در همسایگی جواب قبلی (a_i) با توجه به مکانیزم تولید همسایگی ایجاد کنید.

مرحله 4: میزان تغییر تابع هدف را به ازای جواب جدید محاسبه کنید:

$$\Delta f (T_r) = f_j (T_r) - f_i (T_r) \qquad (13)$$

اگر $\Delta f (T_r) \le 0$ باشد، به مرحله 6 بروید.

مرحله 5: یک عدد تصادفی مانند y را بین صفر و یک انتخاب کنید. مقدار $P (\Delta f)$ را به صورت زیر محاسبه کنید:

$$P (\Delta f) = \exp [-\Delta f (T_r) / T_r] \qquad (14)$$

اگر $y > P (\Delta f)$ به مرحله 3 بروید.

مرحله 6: جواب جدید پذیرفته می‌شود و $n = n + 1$.

اگر مقدار تابع هدف به ازای جواب جدید از بهترین مقدار تابع هدف تا کنون بهتر باشد، این مقدار را جایگزین مقدار قبلی نمایید.

اگر $n < e$ باشد، به مرحله 3 بروید.

مرحله 7: $n = 0$ و $t = t + e$

شرط تعادل را بررسی کنید:

الف) اگر $t > M$ باشد ، به مرحله 8 بروید.

ب) اگر رابطه (15) برقرار بود، به مرحله 3 بروید.

$$\frac{\left|\bar{f}_e(T_r) - \bar{f}_g(T_r)\right|}{\bar{f}_g(T_r)} > \varepsilon 1 \qquad (15)$$

مرحله 8: مقادیر $V (T_r)$, $S (T_r)$ را محاسبه کنید: $t = 0$

$$V(T_r) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i^{\,2}(T_r) - \left[\bar{f}(T_r)\right]^2 \qquad (16)$$

$$S(T_r) = \frac{V(T_r)}{T_r * \left[\bar{f}(T_0) - \bar{f}(T_r)\right]} \qquad (17)$$

الف) اگر $T_r \le T_f$ باشد، به مرحله 10 بروید.

ب) اگر $S (T_r) \le \varepsilon 2$ باشد، به مرحله 10 بروید.

مرحله 9 : مقدار درجه حرارت T_{r+1} را محاسبه کنید. $r = r + 1$

$$T_{r+1} = 0.9 * T_r \quad (18)$$

مرحله 10: جواب نهایی را مشخص کنید. (a^* و E)

4- مکانیزم تولید همسایگی در الگوریتم SA پیشنهادی

4-1-نحوه نمایش جواب:

جهت مسئله زمانبندی در سیستم تولید سلولی، لازم است توالی عملیات کارها در هر خانواده و توالی ورود خانواده‌ها به سلولهای تولیدی تعیین گردد. در برخی از تحقیقات این دو تصمیم را به صورت سلسله مراتبی در نظر می‌گیرند ([17] و [19]). یعنی در ابتدا توسط یکسری الگوریتم‌های ابتکاری یا فوق ابتکاری، توالی قطعات در هر خانواده مشخص شده، سپس با ثابت فرض شدن این توالی قطعات، توالی ورود خانواده‌ها به سلولهای تولیدی تعیین می‌گردد. این نوع نگرش به مسئله باعث از بین رفتن بخشی از فضای جواب می‌شود. جهت از بین بردن این ضعف در این تحقیق، فضای جواب به صورت دوبعدی طراحی شده است، بطوریکه هر دو تصمیم به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب که، یک نوع ساختار جواب جهت توالی کارها در خانواده‌ها در نظر گرفته می‌شود، که شامل ماتریس به ابعاد تعداد خانواده و حداکثر تعداد قطعات در هر خانواده است. جهت توالی ورود خانواده‌های قطعه به سلولها، از یک آرایه به طول تعداد خانواده‌های قطعه استفاده شده‌است.

4-2-نحوه تولید همسایگی:

در این مقاله، جواب اولیه جهت مسئله زمانبندی در سیستم تولید سلولی به صورت تصادفی تولید می‌شود. مکانیزم تولید همسایگی از اهمیت زیادی در روش SA برخوردار است [20]. با توجه به بررسی همزمان فضای جواب و تأثیر آن بر مقدار تابع هدف، در هر مرحله از الگوریتم یکی از دو نوع ساختار زیر انتخاب می‌شود:

1) جابجایی در توالی عملیات دو قطعه در یک خانواده
2) جابجایی در توالی ورود دو خانواده قطعه در سلول های تولیدی

پس از انتخاب ساختار جواب، براساس یکی از روش‌های زیر یک جواب جدید در همسایگی جواب فعلی تولید می‌گردد.

- **روش پیشنهادی جابجایی جهت دار (DIS)[1]**

در این روش ابتدا یک خانواده به طور تصادفی انتخاب می‌گردد. یک عدد تصادفی بین یک و تعداد کارها درآن خانواده انتخاب می‌شود. این عدد نشان دهندهٔ موقعیت انتخاب شده در توالی کارها در آن خانواده است. متناسب با این موقعیت، تعیین همسایگی به صورت زیر انجام می‌شود:

- در صورتیکه موقعیت انتخاب شده اولین موقعیت در توالی کارها باشد، کار این موقعیت با کار بعدی جابجا می‌شود.
- در صورتیکه موقعیت انتخاب شده آخرین موقعیت در توالی کارها باشد، کار این موقعیت با کار قبلی جابجا می‌شود.
- در صورتیکه موقعیت انتخاب شده جزو موقعیت‌های میانی باشد، وضعیت‌های مجاور در چپ و راست براساس مقدار تابع هدف انتخاب می‌شوند. به این ترتیب که هر وضعیتی که مقدار تابع هدف مناسبتری داشته باشد، به عنوان حرکت بعدی انتخاب می‌گردد. این استراتژی باعث حرکت در جهت بهبود تابع هدف می‌شود.

ایده اصلی این مکانیزم پیشنهادی بر مبنای جستجوی جهت دار در فضای جواب است. به این ترتیب که با انتخاب جواب بهتر در موقعیتهای

[1] Directive Interchange Scheme

مجاور، سعی بر این است که جستجوی مناسب تری در فضای جواب انجام شود.

به عنوان مثال، فرض می‌شود که خانواده (1) انتخاب شده و در این خانواده موقعیت سوم انتخاب می‌گردد:

2	3	5	8	6

کار در موقعیت سوم، کار 5 است. این کار دو موقعیت مجاور یعنی موقعیت‌های دو و چهار دارد که به ترتیب کارهای 3 و 8 در آن قرار دارند. در این صورت میزان تابع هدف به ازای هر دو حالت محاسبه شده و فرض می‌شود که تغییر در جهت چپ (کار در موقعیت دوم) مناسب باشد. به این ترتیب کار در موقعیت سوم (کار 5) با کار در موقعیت دوم (کار 3) جابجا شده و جواب جدید را تولید می‌کند.

2	5	3	8	6

- **روش جابجایی تصادفی (RIS)[1]**

در این روش ابتدا یک خانواده به طور تصادفی انتخاب می‌گردد. سپس دو موقعیت تصادفی در این خانواده انتخاب شده و کارهای موجود در این موقعیت‌ها جابجا می‌شوند [20] . به عنوان مثال خانواده (1) انتخاب می‌شود. ترتیب کارها در این خانواده به صورت زیر است:

2	3	5	8	6

دو موقعیت 2 و 4 به طور تصادفی انتخاب شده و کارها در این موقعیت‌ها تعویض می‌شوند:

2	8	5	3	6

- **روش جابجایی مجاور (AIS)[2]**

در این روش مشابه با روش DIS پس از انتخاب خانواده قطعه، یک موقعیت در توالی کارها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در صورتیکه این موقعیت جزو موقعیت‌های میانی باشد، موقعیت مجاور به صورت احتمالی انتخاب می‌شود[20]. در روش تولید همسایگی AIS، استراتژی انتخاب موقعیت‌های مجاور به صورت تصادفی بوده و روندی جهت حرکت در راستای بهبود جوابها وجود ندارد.

5- تعیین مراحل و پارامترها در الگوریتم SA پیشنهادی

روش SA نسبت به پارامترهای کنترلی حساس بوده و تعیین پارامترهایی که جواب های خوب ایجاد نماید، بسیار مهم است. مهمترین مراحلی که در هنگام اجرای الگوریتم SA باید بررسی شوند عبارتند از: درجه حرارت اولیه، نحوه تغییر درجه حرارت، شرط تعادل و شرط توقف. در این بخش نحوه تعیین مراحل و پارامترها در الگوریتم SA پیشنهادی توضیح داده‌می‌شود:

[1] Random Interchange Scheme

[2] Adjacent Interchange Scheme

- **تنظیم درجه حرارت اولیه:** درجه حرارت اولیه، از طریق انجام یکسری آزمایشات قبل از شروع الگوریتم SA اصلی محاسبه می‌گردد. به این ترتیب که توسط روش تولید همسایگی، 100 جواب جدید بدون در نظر گرفتن تغییرات حاصل در تابع هدف، تولید شده و میزان تغییر در تابع هدف به ازای دو جواب متوالی (Δf) محاسبه شده و حداکثر مقدار آن به عنوان درجه حرارت اولیه منظور می‌شود. یعنی:

$$T_0 = \max \{ - \Delta f \} \qquad (19)$$

- **تنظیم درجه حرارت نهایی:** درجه حرارت نهایی بر اساس درجه حرارت اولیه و توسط رابطه (20) محاسبه می‌گردد:

$$T_f = 0.08 * T_0 \qquad (20)$$

- **نحوه تغییر درجه حرارت:** جهت کاهش درجه حرارت، از تابع هندسی به فرم رابطه (21) استفاده شده است. پس از بررسی های انجام شده و آزمایشات عددی در مسائل مختلف، ضریب α برابر 0/9 ($\alpha = 0/9$) تعیین شد، یعنی در هر مرحله درجه حرارت به میزان 10 درصد کاهش پیدا می کند.

$$T_{r+1} = \alpha * T_r \qquad (21)$$

- **شرط تعادل:** جهت بررسی شرط تعادل، پس از رسیدن به یکسری جوابهای پذیرفته شده به اندازه طول " دوره " ، رابطه (15) بررسی می‌شود. اگر این شرط برقرار نبود، درجه حرارت کاهش داده شده و مجدد فرآیند آنیل کردن انجام می‌شود، در غیر اینصورت در همان درجه حرارت یک دوره همسایگی جدید تولید می‌شود. طول دوره (e) برابر 15 در نظر گرفته شده است.

- **شرط توقف:** جهت توقف الگوریتم SA پیشنهادی، یکی از دو شرط زیر باید تحقق پیدا کند:
  - رسیدن به درجه حرارت نهایی
  - برقراری رابطه (17)

- **تنظیم پارامترهای $\varepsilon 1$, $\varepsilon 2$ و M :** به جهت حساسیت الگوریتم SA نسبت به پارامترهای کنترلی، آنالیزی در ارتباط با برخی از این پارامترها انجام شده است. در این راستا جهت تعیین پارامترهای $\varepsilon 1$ و M که در شرط تعادل تاثیر دارند و پارامتر $\varepsilon 2$ که شرط توقف را تحت تاثیر قرار می‌دهد، پنج مسئله با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده و برای هرمسئله الگوریتم SA با مقادیر مختلف پارامترهای فوق اجرا شده است. مقادیر اولیه پارامتر ها عبارتند از:

$\varepsilon 2 = 0.01$ و 0.08 و 0.5 $\qquad$ $\varepsilon 1 = 0.005$ و 0.008 و 0.01 $\qquad$ M = 75 و 100 و 150

پس از طراحی آزمایشات و نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم SA پیشنهادی، مقادیر پارامترها به صورت زیر تعیین گردید:

$\varepsilon 2 = 0.01 \qquad \varepsilon 1 = 0.005 \qquad M = 150$

6- طراحی مسائل عددی

جهت بررسی نحوه عملکرد الگوریتم SA پیشنهادی، پنج دسته مسئله در سایز های مختلف که مشخصات آنها از ادبیات گرفته شده، در جدول (1) ارائه شده است. این اطلاعات شامل چگونگی تشکیل سلول تولیدی (خانواده قطعات و سلول تولیدی) است و فاقد زمان

انجام عملیات و زمان آماده سازی خانواده قطعات است. زمان انجام عملیات هر قطعه بصورت تصادفی از توزیع یکنواخت [25 و 1] و زمان آماده‌سازی از توزیع یکنواخت [50 و 1] تولید می شود [16].

در این مقاله، برنامه کامپیوتری الگوریتم SA پیشنهادی با هر سه نوع مکانیزم همسایگی توسط زبان Borland C^{++} نوشته شده و توسط کامپیوتر شخصی Pentium III اجرا شده‌است. جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، جهت هر سایز مسئله (P1 – P5)، 5 مسئله متفاوت به صورت تصادفی تولید شده است (Sample = 1- 5). به جهت بررسی حساسیت الگوریتم SA پیشنهادی نسبت به جواب اولیه ، هر مسئله با 5 جواب اولیه متفاوت (Initial Solution) که به صورت تصادفی تولید شده، اجرا شده است. با هر جواب اولیه، الگوریتم پیشنهادی 5 بار اجرا شده، یعنی برای هر مسئله 25 اجرا انجام شده است.

Problem	Source	Size		
		N	M	K
P1	Venagupal and Narandran [21]	8	5	2
P2	Solimanpur et al. [13]	10	8	3
P3	Harahalakis et al. [22]	20	20	5
P4	Srinivasan et al. [23]	30	16	4
P5	Chandraskharan and Rajagopalan [24]	40	24	7

جدول (1) – مشخصات مسائل نمونه

نتایج محاسباتی جهت مسائل با اندازه های مختلف در جدول (2) ارائه شده‌است. مقادیر موجود در این جداول از سمت چپ به‌این صورت است : ستون دوم، میانگین جواب های اولیه در 25 اجرا برای هر مسئله است. ستون های 3 تا 5 به ترتیب، بهترین جواب بدست آمده، میانگین و انحراف معیار جوابهای نهایی الگوریتم SA پیشنهادی با مکانیزم همسایگی جدید DIS در 25 اجرای هر مسئله است. ستونهای 6 تا 8 به ترتیب نشان دهنده همین مقادیر جهت الگوریتم پیشنهادی با مکانیزم همسایگی AIS است و ستونهای 9 تا 11 مقادیر فوق را با درنظر گرفتن مکانیزم همسایگی RIS نشان می‌دهد.

7- نتایج محاسباتی

نتایج محاسباتی مسائل با پنج سایز مختلف در جدول (2) ارائه شده است. این نتایج در مورد مسائل P1 و P2 نشان دهنده تأثیر یکسان هر سه مکانیزم در عملکرد الگوریتم SA پیشنهادی است. بطوریکه در 25 اجرای هر مسئله نمونه ، الگوریتم SA پیشنهادی توانسته است به بهترین جواب برسد و با توجه به تولید تصادفی جواب اولیه ، نسبت به جواب اولیه حساس نمی باشد.

در مسئله P3 استفاده از مکانیزم همسایگی جدید DIS توانسته است نسبت به مکانیزم RIS ، 4٪ دستیابی به میانگین جوابهای خوب را بهبود دهد. این بهبود نسبت به روش AIS ، 3/5٪ است. علاوه بر این، میزان پراکندگی جوابهای بدست آمده توسط مکانیزم DIS نسبت به دوروش دیگر کمتر است. در مسئله P4 استفاده از مکانیزم DIS نسبت به مکانیزم RIS ، 7٪ و نسبت به مکانیزم AIS ، 11/3٪ دستیابی به میانگین جوابها را بهبود داده است. در مسئله P5 میزان بهبود جواب حاصل از بکارگیری مکانیزم پیشنهادی DIS نسبت به دو روش دیگر به طور متوسط 6٪ است.

زمانهای پردازش حاصل از الگوریتم SA پیشنهادی با مکانیزم های همسایگی مختلف به طور متوسط کمتر از یک ثانیه بوده است.

Prob.	Sample	Mean Initial Solution	Neighborhood scheme								
			"Proposed DIS Scheme"			"AIS Scheme"			"RIS Scheme"		
			Best Solution	Mean Solution	S.D.	Best Solution	Mean Solution	S.D.	Best Solution	Mean Solution	S.D.
P1	1	124	95	95	0	95	95	0	95	95	0
	2	133	127	127	0	127	127	0	127	127	0
	3	119	99	99	0	99	99	0	99	99	0
	4	137	124	124	0	124	124	0	124	124	0
	5	92	85	85	0	85	85	0	85	85	0
P2	1	273	163	163	0	163	163	0	163	163	0
	2	300	221	221	0	221	221	0	221	221	0
	3	252	160	160	0	160	160	0	160	160	0
	4	284	195	195	0	195	195	0	195	195	0
	5	297	223	223	0	223	223	0	223	223	0
P3	1	379	217	**218**	1.14	217	222	5.78	217	222	5.17
	2	357	196	**197**	1.38	196	203	6.41	196	205	6
	3	323	**201**	**203**	2.14	201	209	4.64	204	210	4.45
	4	340	**187**	**194**	6.61	188	204	6.71	188	205	7.61
	5	340	**181**	**187**	4.24	183	197	6.21	188	197	4.99
P4	1	546	**276**	**295**	9.77	307	344	22.31	298	317	10.52
	2	567	**299**	**311**	7.88	320	351	22.03	319	336	13.04
	3	529	**269**	**279**	6.56	295	316	18.99	287	300	10.88
	4	538	**315**	**325**	6.44	334	363	21.73	329	345	9.32
	5	521	**287**	**294**	5.93	298	322	17.72	296	312	8.25
P5	1	504	**270**	**305**	13.52	289	311	11.25	295	312	11.98
	2	493	**285**	**300**	11.67	293	313	9.02	300	315	11.29
	3	515	**296**	**317**	12.8	305	328	10.38	314	332	7.59
	4	537	**303**	**319**	11.73	310	328	12.03	314	333	10.55
	5	522	**291**	**316**	11.21	303	322	13.87	309	332	12.12

جدول (2) – نتایج محاسباتی تأثیر مکانیزم های همسایگی در الگوریتم SAپیشنهادی

8- نتیجه گیری

در این تحقیق، مدل ریاضی جدیدی جهت زمانبندی خانواده قطعات و همچنین قطعات در هر خانواده در سیستم تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی ارائه شده است. ویژگی خاص این مدل در نظر گرفتن شرایط و فرض های کاربردی است. در این مدل پیشنهادی، به علت وجود انعطاف پذیری در سیستم سلولی، قابلیت تولید قطعات توسط برنامه های فرآیندی مختلف وجود دارد. علاوه بر این زمان آماده سازی جهت هر خانواده قطعه وابسته به توالی عملیات فرض شده و امکان قطعات بین سلولی وجود دارد. تابع هدف در این مدل حداقل کردن بیشترین زمان ساخت (C_{max}) است. به جهت NP-hard بودن مسئله مورد نظر، یک الگوریتم SA پیشنهادی جهت حل آن ارائه شده است. همچنین مکانیزم همسایگی جدید DIS جهت الگوریتم فوق معرفی شده است. عملکرد الگوریتم SA پیشنهادی با مکانیزم های همسایگی مختلف بررسی شده و نتایج محاسباتی نشان دهنده این است که مکانیزم همسایگی پیشنهادی DIS از کارایی بیشتری در رسیدن به بهترین جواب برخوردار است.

منابع و مراجع

1. Wemmerlov, U. and Hyer, N. L., Cellular Manufacturing in U.S. Industry: A Survey of Users, International Journal of Production Research, 27, 1511-1530, 1989.
2. Suresh, S.N. and Kay, J.M., Group Technology and Cellular Manufacturing A State - of - the - Art Synthesis of Research and Practice, Kluwer Academic Publishers, 1998.
3. Irani, S. I., Handbook of Cellular Manufacturing Systems, John Wiley & Sons Inc., 1999.
4. Mahmoodi, F., Dooley, K. J. and Starr, P. J., An Investigation of Dynamic Group Scheduling Heuristics in a Job shop Manufacturing Cell, International Journal of Production Research, 28:9, 1695-1711, 1990.
5. Frazier, G.V., An Evaluation of Group Scheduling Heuristics in a Flow-line Manufacturing Cell, International Journal of Production Research, 34:4, 959- 976 1996.
6. Krishnamoorthy, B. and Kamath, M., Scheduling in a Cellular Manufacturing Environment: A Review of Recent Research, Engineering Valuation and Cost Analysis, 2, 409-423, 2000.
7. Baker, K., Scheduling Groups of Jobs in the Two-Machine Flow Shop, Mathematical Computers and Modeling, 13:3, 29- 36, 1990.
8. Skorin - Kapov, J. and Vakharia, A. J., Scheduling a Flow – line Manufacturing Cell: a Tabu Search Approach, International Journal of Production Research, 31:7, 1721-1734, 1993.
9. Logendran, R., Mai, L. and Talkington, D., Combined Heuristics for Bi-level Group Scheduling Problems, International Journal Production Economics, 38, 133- 145, 1995.
10. Schaller, J. E., A New Lower Bound for the Flow Shop Group Scheduling Problem, Computers and Industrial Engineering, 41, 151-161, 2001.
11. Rajendran, C. and Ziegler, H., Heuristics for Scheduling in Flowshops and Flowline-based Manufacturing Cells to Minimize the Sum of Weighted Flow time and Weighted Tardiness of Jobs, Computers and Industrial Engineering, 37, 671-690, 1999.
12. Wemmerlov, U. and Johnson, D. J., Empirical Finding on Manufacturing Cell Design, International Journal of Production Research, 38:3, 481-507, 2000.
13. Solimanpur, M., Vrat, P., and Shanker, R., A Heuristic to Minimize Makespan of Cell Scheduling Problem, International Journal Production Economics, 88:3, 231-241, 2004.
14. Yang, w. h. and Liao, C. J., Group Scheduling on Two Cells with Intercell Movement, Computers and Operations Research, 23:10, 997-1006, 1996.
15. Allahverdi, A., Gupta, J.N.D. and Aldowaisan, T., A Review of Scheduling Research

Involving Setup Consideration, Omega, International Journal of Management Science, 27, 219-239, 1999.
16. Mungwattana, A., Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production Requirements With Presence of Routing Flexibility, Doctoral Dissertation, The Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2000.
17. Schaller, J. E., Gupta, J. N. D., and Vakharia, A. J., Scheduling a Flow line Manufacturing Cell with Sequence Dependent Family Setup Times, European Journal of Operational Research, 125, 324 – 339, 2000.
18. Vakharia, A. J. and Chang, Y. L., A Simulated Annealing Approach to Scheduling a Manufacturing Cell, Naval Research Logistics, 37, 559-577, 1990
19. Chien, C.H., Scheduling in a Flow Line Manufacturing Cells System Considering Intercellular Parts: The Tabu Search Approach, Doctoral Dissertation, University of Texas, Arlington, US., 1997
20. Sridhar, J. and Rajandran, C., Scheduling in a Cellular Manufacturing System: A Simulated Annealing Approach, International Journal of Production Research, 31:12, 2927-2945, 1993.
21. Venagupal, 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.
22. Harhalakis, G., Nagi, R. and Proth, J. M., An Efficient Heuristic in Manufacturing Cell Formation for Group Technology Applications, International Journal of Production Research, 28:1, 185-198, 1990.
23. Srinivasan, G., Narendran, T. T. and Mahadevan, B., An Assignment Model for the part family problem in Group Technology, International Journal of Production Research, 28:1, 185-198, 1990.
24. Chandrasekharan, M. P. and Rajagopalan, R.: Groupability, An Analysis of the properties of Binary Data Metrics for Group Technology, International Journal of Production Research, 27:6, 1035-1052, 1989.