

ارائه روش SA برای زمان بندی در سیستم های تولید سلولی با در نظر گرفتن زمان آماده سازی

سید حسام الدین ذگردی
دانشیار

بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

فرناز برزین پور
دانشجوی دکتری

چکیده

در این مقاله یک، مدل ریاضی برای زمان بندی خانواده قطعات و همچنین زمان بندی قطعات در هر خانواده در سیستم تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی ارائه شده است. در این مدل، زمان آماده سازی برای هر خانواده قطعه وابسته به توالی عملیات فرض شده و تابع هدف آن حداقل کردن بیشترین زمان تکمیل (C_{max}) است. این مسئله از نقطه نظر پیچیدگی محاسباتی جزء مسائل NP-Complete است و از این رو یک روش (SA) Simulated Annealing کارا جهت حل آن ارائه شده است. جهت بررسی الگوریتم پیشنهادی، مسائلی در اندازه های مختلف تولید شده و با الگوریتم ابتکاری "CMN" مقایسه شده است. در نهایت نتایج به دست آمده، نشان دهنده کارایی بالای الگوریتم SA پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ابتکاری "CMN" است.

کلمات کلیدی

زمان بندی، سیستم تولید سلولی، زمان تکمیل، زمان آماده سازی وابسته به توالی عملیات، Simulated Annealing

A Simulated Annealing Scheme for Scheduling in Cellular Manufacturing Systems with Setup Time

F. Barzinpour
Ph. D. Candidate

Industrial Engineering Department, Engineering Faculty,
Tarbiat Modarres University

S.H. Zegordi
Associate Professor

Abstract

In this paper, we present a mathematical model for the scheduling problem of part family and jobs with each family in a flow shop manufacturing cells where the setup times for each family are sequence-dependent. It is desired to minimize the makespan (C_{max}). This problem from computational point of view is NP-Complete and we developed an efficient Simulated Annealing (SA) scheme to solve this problem. Performance of the proposed algorithm is tested on generated problems in different size and is compared to another "CMN" heuristic method. It is shown that results obtained by the proposed method are superior to those of another "CMN" method.

Keywords

Scheduling, Cellular Manufacturing, Completion Time, Sequence-dependent Setup, Simulated Annealing

سیستم تولید سلولی (CMS)^۱، سیستمی مؤثر برای تولید اقتصادی خانواده قطعات است. در این سیستم تعدادی از ماشین آلات که معمولاً از لحاظ عملکرد متفاوت هستند، در یک سلول تولیدی گروه‌بندی می‌شود که به آن "سلول ماشینی"^۲ گفته می‌شود. این سلول مسئول تکمیل عملیات مربوط به قطعات مشابهی است که در یک گروه قرار دارند و به عنوان "خانواده قطعه"^۳ شناخته می‌شوند. تعیین خانواده قطعات و سلول‌های ماشینی از عمده مسائل طراحی سلول‌های تولیدی است.

زمان بندی قطعات و خانواده قطعات، نقش مؤثری در اجرای موفقیت آمیز سیستم تولید سلولی به عهده دارد [۱]. بطور کلی هدف از زمان بندی در سیستم‌های تولید سلولی، تعیین توالی انجام قطعات در هر خانواده و تعیین توالی انجام خانواده قطعات در سلول‌های تولیدی است. ویژگی خاصی که زمان بندی را در سیستم‌های فوق از روش‌های سنتی زمان بندی متمایز می‌کند این است که نیازهای آماده‌سازی برای قطعات در هر خانواده قطعه مشابه است. از این رو لازم است قبل از شروع عملیات هر خانواده قطعه آماده‌سازی اصلی انجام شود ولی ممکن است که برای تولید هر قطعه نیز آماده‌سازی جزئی نیاز باشد [۲]. یک دسته از روش‌های زمان بندی در سیستم‌های تولید سلولی، روش‌های "زمان بندی گروهی"^۴ است. مطالعاتی در زمینه طبقه‌بندی این دسته از روش‌های زمان بندی انجام شده است ([۴]، [۵] و [۶]).

یکی از مهمترین توابع هدف در مسئله زمان بندی در سیستم‌های تولید سلولی، کاهش مدت زمان ساخت (C_{max}) است. نتیجه این هدف، کوتاهتر شدن سیکل تولید و رسیدن سریع محصول به دست مشتری است. در این رابطه، "بیکر"^۵ قضایایی را جهت حل مسئله زمان بندی خانواده قطعات در حالت جریان کارگاهی با دو ماشین و با فرض زمان آماده‌سازی مستقل از توالی عملیات ارائه کرده است [۷]. "اسکورین کاپوف"^۶ و همکارش یک روش جستجو ممنوع (TS)^۷ ارائه و با روش Simulated Annealing (SA) مقایسه کرده‌اند [۸]. در سال ۱۹۹۵، "لاجندران"^۸ و همکاران عملکرد چندین روش ابتکاری را در دو مرحله بررسی کرده‌اند. در مرحله اول توالی قطعات در هر خانواده قطعه و در مرحله دوم توالی خانواده قطعات مشخص می‌گردد [۹]. "اسچالر"^۹ روش حل ابتکاری را در دو مرحله ارائه کرده است به طوری که در مرحله اول از روش شاخه و کران برای توالی خانواده قطعات و در مرحله دوم از روش تعویض جفتی برای تعیین توالی کارها در هر خانواده استفاده شده است [۱۰].

ماشین آلات در سیستم‌های تولید سلولی به نحوی گروه‌بندی می‌شوند که "قطعات بین سلولی" وجود نداشته باشد و یا به حداقل برسد [۱۱]. وجود قطعات بین سلولی باعث پیچیدگی جریان مواد و زمان بندی در سیستم‌های تولیدی می‌شود. براساس تحقیقات انجام شده در اجرای سیستم‌های سلولی در اواخر دو دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، نشان داده شده است وجود قطعات بین سلولی در سیستم‌های سلولی موجود در دنیای واقعی اجتناب‌ناپذیر است [۱] و [۱۲]. یکی از محدودیت‌های روش‌های زمان بندی گروهی این است که در اغلب موارد فرض می‌شود که قطعات بین سلولی وجود ندارد و این فرض مهم و واقعی را در نظر نمی‌گیرند. در ارتباط با در نظر گرفتن امکان قطعات بین سلولی در زمان بندی تحقیقات محدودی به انجام رسیده است [۱۳] و [۱۴].

در سال ۱۹۹۹ "اله وردی"^{۱۱} و همکاران مسائل زمان بندی را در ارتباط با در نظر گرفتن زمان و هزینه‌های آماده‌سازی بررسی و طبقه‌بندی کرده‌اند. در این تحقیق اشاره شده است که در اغلب مطالعات انجام شده در مسائل زمان بندی در سیستم‌های سلولی، زمان آماده‌سازی مستقل از توالی فرض شده است، در حالی که در بسیاری از شرایط واقعی، زمان آماده‌سازی بین خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات است [۱۵]. در این ارتباط "اسچالر" و همکاران در سال ۲۰۰۰ مسئله زمان بندی در سیستم سلولی با ساختار جریان کارگاهی را در نظر گرفته‌اند به طوری که زمان آماده‌سازی در هر خانواده قطعه وابسته به توالی عملیات است و هدف حداقل کردن زمان تکمیل کارها (C_{max}) است. در این راستا ترکیبی از الگوریتم‌های ابتکاری برای تعیین توالی کارها در هر خانواده و توالی خانواده قطعات بررسی شده است. بهترین الگوریتم ابتکاری در بین ۱۱ الگوریتم ترکیبی، الگوریتم "CMN"^{۱۱} است که در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول از الگوریتم "CDS"^{۱۲} (C) جهت توالی قطعات در هر خانواده و در مرحله دوم از الگوریتم "NEH" اصلاح شده^{۱۳} (MN) جهت توالی انجام خانواده‌های قطعات استفاده می‌شود. کاربرد این تحقیق در تولید و ساخت مدارات برد الکترونیکی است [۱۶].

در این تحقیق یک مدل ریاضی جدید برای زمان بندی در سیستم‌های تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی^{۱۴} ارائه

شده است. هدف از این مدل حداقل کردن زمان تکمیل کارها (C_{max}) است و فرضیات کاربردی نظیر زمان آماده‌سازی خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات، امکان وجود قطعات بین سلولی و امکان وجود چندین ماشین در سلول، در نظر گرفته شده است. مسئله فوق از نظر پیچیدگی محاسباتی جزو مسائل NP-Complete است [۱۶] و لذا روش‌های دقیق در ارتباط با آنها کارایی ندارند. به همین دلیل در این مطالعه از الگوریتم SA که در حل مسائل پیچیده ترکیبی قابلیت بالایی از خود نشان داده است، جهت حل این مسئله استفاده شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی توسط مسائل در اندازه‌های مختلف تست شده و با بهترین الگوریتم ارائه شده توسط "اسچالر" و همکاران یعنی الگوریتم ابتکاری "CMN" مقایسه شده است [۱۶]. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله زمان بندی در سیستم تولید سلولی است.

باقی این مقاله به صورت زیر سازماندهی می‌شود: در بخش ۲ مدل ریاضی جهت مسئله زمان بندی در سیستم‌های تولید سلولی ارائه می‌شود. در بخش ۳ ضمن معرفی فرم کلی الگوریتم SA، الگوریتم پیشنهادی SA و تعیین پارامترهای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. طراحی آزمایش‌های عددی در بخش ۴ ارائه شده که شامل بررسی روش مقایسه، نحوه تولید مسائل مختلف و طراحی روش انجام آزمایش هاست. در بخش ۵ نتایج محاسباتی بررسی شده و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۶ آمده است.

۱- مدل سازی ریاضی

در این مقاله، مسئله زمان بندی در سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن شرایط کاربردی و واقعی مدنظر بوده و در این راستا مدل ریاضی جدیدی ارائه شده است. هدف از این مدل به حداقل رساندن زمان تکمیل (C_{max}) در تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی (Flow Shop) است. هدف از مسئله زمان بندی در این مقاله، تعیین توالی عملیات قطعات در هر خانواده و تعیین توالی ورود خانواده قطعات در هر سلول است. به جهت در نظر گرفتن شرایط واقعی، امکان وجود قطعات بین سلولی وجود دارد و به همین دلیل ممکن است بعضی از خانواده قطعات به بیش از یک سلول نیاز داشته باشند. در این مدل ریاضی، با توجه به ویژگی‌ها و شرایط کاربردی، فرض‌هایی به صورت زیر مدنظر است:

- گروه‌های کاری و سلولهای تولیدی از قبل مشخص هستند.
- همه قطعات در شروع دوره زمان بندی در سیستم تولیدی وجود دارند.
- ماشین آلات تولیدی همیشه در دسترس هستند و خرابی و قطع جریان عملیات وجود ندارد.
- زمان آماده‌سازی بین خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات منظور شده است.
- زمانهای عملیات معلوم و ثابت هستند و زمان آماده‌سازی جزئی هم در آنها دیده شده است.
- عملیات هر خانواده می‌تواند در بیشتر از یک سلول انجام شود و در واقع امکان وجود قطعات بین سلولی در نظر گرفته شده است.
- امکان وجود ماشین‌های متعدد در سلول وجود دارد.
- ترتیب ماشین‌آلات برای انجام قطعات در هر خانواده قطعه یکسان است (Flow Shop) و این امکان وجود دارد که بعضی از این قطعات به برخی از ماشین‌آلات در این ترتیب تکنولوژیکی نیاز نداشته باشند.
- در این مسئله، فرض شده است که N قطعه به PF خانواده قطعه و M ماشین در K سلول گروه بندی شده‌اند به طوری که در هر خانواده قطعه z n قطعه و در هر سلول z m ماشین وجود دارد:

$$N = \sum_{j=1}^{PF} n_j \quad (1)$$

$$M = \sum_{l=1}^K m_l \quad (2)$$

همچنین زمان آماده‌سازی برای هر یک از ماشین‌آلات وابسته به توالی انجام خانواده قطعات بر روی این ماشین‌آلات است. به این ترتیب S_{rf}^k نشان‌دهنده زمان آماده‌سازی جهت ماشین k است به شرطی که خانواده قطعه f بلافاصله بعد از خانواده قطعه r وارد سلول شود. در صورتی که خانواده z نخستین خانواده قطعه‌ای باشد که به سلول وارد می‌شود، زمان آماده‌سازی آن بر روی ماشین k برابر S_z^k است. زمان انجام عملیات قطعه i از خانواده قطعه z توسط ماشین k از سلول l برابر P_{ijkl} است. این مسئله به صورت یک مدل ریاضی از نوع عدد صحیح مختلط، به شرح زیر مدل سازی شده است. متغیرهای تصمیم و روابط به صورت زیر است:

متغیرهای تصمیم:

$$X_{isj} = \begin{cases} 1 & \text{اگر قطعه } i \text{ قبل از قطعه } s \text{ در توالی عملیات خانواده } z \text{ قرار بگیرد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall i, s = 1, \dots, n_j & (3) \\ \forall j = 1, \dots, PF \end{matrix}$$

$$Y_{rjl} = \begin{cases} 1 & \text{اگر خانواده } r \text{ قبل از خانواده } z \text{ در سلول } l \text{ وارد شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall r, j = 1, \dots, PF & (4) \\ \forall l = 1, \dots, K \end{matrix}$$

$$C_{ijkl} = \begin{matrix} \forall i = 1, \dots, n_j & \forall j = 1, \dots, PF & (5) \\ \forall k = 1, \dots, m_i & \forall l = 1, \dots, K \end{matrix}$$

زمان تکمیل قطعه i از خانواده z روی ماشین k از سلول l

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

$$C_{max} = \text{Max} \{ C_{n_j, j, m_i, l} \} \text{Min} \quad (6)$$

$j = 1, \dots, PF$
 $l = 1, \dots, K$

محدودیت‌های مدل ریاضی به فرم زیر است:

$$C_{ij(l)} \geq P_{ij(l)} + S_i^{(l)} \quad \forall i, j, l \quad (7)$$

$$C_{ij(k+1)l} - C_{ijkl} \geq P_{ij(k+1)l} \quad \forall i, j, k, l \quad (8)$$

$$C_{sjkl} - C_{ijkl} + Q(1 - X_{isj}) \geq P_{sjkl} \quad \forall i, s \in n_j \quad \forall j, k, l \quad (9)$$

$$C_{ijkl} - C_{sjkl} + Q \cdot X_{isj} \geq P_{ijkl} \quad \forall i, s \in n_j \quad \forall j, k, l \quad (10)$$

$$C_{ujkl} - C_{irkl} + Q(1 - Y_{rjl}) \geq S_{rj}^k \cdot P_{ujkl} \quad \forall u \in n_j \quad \forall i \in n_r \quad \forall j, r \quad \forall k, l \quad (11)$$

$$C_{irkl} - C_{ujkl} + Q \cdot Y_{rjl} \geq S_{jr}^k \cdot P_{irkl} \quad \forall u \in n_j \quad \forall i \in n_r \quad \forall j, r \quad \forall k, l \quad (12)$$

$$X_{isj} = 0, 1 \quad Y_{rjl} = 0, 1 \quad C_{ijkl} \geq 0 \quad (13)$$



- رابطه (۷) تضمین می‌کند که زمان تکمیل هر قطعه بر روی اولین ماشین از مجموع زمان عملیات و زمان آماده‌سازی مرتبط با خانواده این قطعه، بیشتر باشد.
- رابطه (۸) تضمین می‌کند که زمان شروع قطعه از خانواده قطعه زیر روی ماشین (k+1) ام در سلول I بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل این قطعه بر روی ماشین قبلی در این سلول است. به این ترتیب محدودیت‌های تکنولوژیکی جهت هر قطعه تضمین می‌شود.
- روابط (۹) و (۱۰) تضمین می‌کنند که در هر زمان بیش از یک قطعه در هر ماشین انجام نشود. در هر وضعیت یکی از این دو رابطه تحقق پیدا می‌کند.
- روابط (۱۱) و (۱۲) ترتیب ورود خانواده‌ها به سلول را کنترل می‌کند. به این ترتیب که در صورت وجود قطعات بین-سلولی، در هر سلول امکان ورود بیش از یک خانواده قطعه وجود دارد. در این حالت زمان شروع عملیات قطعه‌ای که خانواده آن دیرتر وارد سلول شده است، بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل عملیات قطعه‌ای است که خانواده آن زودتر وارد سلول شده است.

۳- روش SA

۳-۱- فرم کلی الگوریتم SA

مفهوم SA در واقع یک آنالوژی بین فرآیند آنیل کردن فیزیکی در جامدات و فرآیند حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است. الگوریتم SA یک روش بهبود دهنده است که سعی دارد از قرارگرفتن در نقطه بهینه محلی فرار کند. 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 به طور احتمالی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$P(\Delta f) = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) \quad (14)$$

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. فرم کلی الگوریتم SA در جدول (۱) ارائه شده است. روش SA نسبت به پارامترهای کنترلی حساس بوده و تعیین پارامترهایی که جواب‌های خوب ایجاد کند، بسیار مهم است. مهمترین مراحل که در هنگام اجرای الگوریتم SA باید بررسی شوند عبارتند از: روش تولید همسایگی، درجه حرارت اولیه، نحوه تغییر درجه حرارت، شرط تعادل و شرط توقف.

۳-۲- الگوریتم SA پیشنهادی

به تعداد تعویض‌ها در هر درجه حرارت جهت بررسی شرط تعادل، "تکرار" یا "دوره"^{۱۵} گفته می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، در هر درجه حرارت (T_r) جواب‌های جدید به گونه‌ای تولید می‌شوند که به تعداد "دوره" (e) جواب پذیرفته شده ایجاد شده باشد. سپس جهت بررسی شرط تعادل در درجه حرارت فوق، اگر تعداد "دوره" از حداکثر تعداد جواب‌های پذیرفته شده (M) در هر درجه حرارت بیشتر باشد، درجه حرارت کاهش داده شده و مرحله بعد شروع می‌شود. در غیر این صورت رابطه (۷) بررسی می‌شود و در صورت برقرار نبودن این رابطه، درجه حرارت کاهش داده می‌شود و به مرحله بعد رفته و در غیر اینصورت در درجه حرارت فعلی، به تعداد "دوره"، جواب پذیرفته شده تولید می‌شود.

الگوریتم SA پیشنهادی جهت مسئله زمان بندی در سیستم تولید سلولی در ادامه توضیح داده می‌شود:

مرحله صفر: مقادیر اولیه پارامترهای ورودی ϵ_1 ، ϵ_2 ، M و e را قرارد دهید.

مرحله ۱: جواب امکان پذیر اولیه (a_0) و مقادیر T_0 و T_r را محاسبه کنید. مقدار T_r را برابر T_0 قرار دهید.

مقادیر t ، n و τ را مساوی صفر قرارد دهید. τ 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 ۲: میزان تابع هدف را به ازای جواب امکان پذیر 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 ۳: جواب جدید (a_j) را در همسایگی جواب قبلی (a_i) با توجه به مکانیزم تولید همسایگی ایجاد کنید.
 مرحله ۴: میزان تغییر تابع هدف را به ازای جواب جدید محاسبه کنید:

$$\Delta f(T_r) = f_j(T_r) - f_i(T_r) \quad (15)$$

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

جدول (۱) فرم کلی الگوریتم SA.

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

مرحله ۵: یک عدد تصادفی مانند y را بین صفر و یک انتخاب کنید. مقدار $P(\Delta f)$ را به صورت زیر محاسبه کنید:

$$P(\Delta f) = \exp[-\Delta f(T_r) / T_r] \quad (16)$$

اگر $y > P(\Delta f)$ به مرحله ۳ بروید.

مرحله ۶: جواب جدید پذیرفته می شود 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 ۳ بروید.

مرحله ۷: $n = 0$ و $t = t + e$

شرط تعادل را بررسی کنید:

الف - اگر $t > M$ باشد، به مرحله ۸ بروید.

ب - اگر رابطه (۱۷) برقرار بود، به مرحله ۳ بروید.

$$\frac{|\bar{f}_e(T_r) - \bar{f}_g(T_r)|}{\bar{f}_g(T_r)} > \varepsilon 1 \quad (17)$$

مرحله ۸: مقادیر $S(T_r)$ ، $V(T_r)$ را محاسبه کنید:

$$t = 0$$

$$V(T_r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i^2(T_r) - [\bar{f}(T_r)]^2 \quad (18)$$

$$S(T_r) = \frac{V(T_r)}{T_r * [\bar{f}(T_0) - \bar{f}(T_r)]} \quad (19)$$

الف - اگر $T_r \leq T_f$ باشد، به مرحله ۱۰ بروید.

ب - اگر $S(T_r) \leq \varepsilon 2$ باشد، به مرحله ۱۰ بروید.

مرحله ۹: مقدار درجه حرارت T_{r+1} را محاسبه کنید. $r = r + 1$

$$T_{r+1} = 0.9 * T_r \quad (20)$$

مرحله ۱۰: جواب نهایی را مشخص کنید. (E و a^*)

۳-۳- تعیین مراحل و پارامترها در SA پیشنهادی

همان طور که در بخش قبل مطرح شد، تعیین پارامترها در الگوریتم SA بسیار مهم و پیچیده است. به همین منظور در این بخش نحوه تعیین مراحل و پارامترها در الگوریتم SA توضیح داده می شود:

– روش تولید همسایگی: هدف از مسئله زمان بندی مورد نظر در سیستم تولید سلولی، تعیین توالی انجام عملیات قطعات در هر خانواده و تعیین توالی ورود خانواده قطعات به سلول تولیدی است به نحوی که بیشترین زمان تکمیل (C_{max}) حداقل شود. در این مسئله جواب اولیه به صورت تصادفی تولید می شود. با توجه به ساختار مسئله، مکانیزم تولید همسایگی به صورت تصادفی بوده و یکی از دو روش زیر انتخاب می شود:

۱- جابجایی در توالی عملیات دو قطعه در یک خانواده

۲- جابجایی در توالی ورود دو خانواده قطعه در سلول های تولیدی

– تنظیم درجه حرارت اولیه: درجه حرارت اولیه، از طریق انجام آزمایش هایی قبل از شروع الگوریتم SA اصلی محاسبه می شود. به این ترتیب که توسط روش تولید همسایگی، ۱۰۰ جواب جدید بدون در نظر گرفتن تغییرات حاصل در تابع هدف، تولید شده و میزان تغییر در تابع هدف به ازای دو جواب متوالی محاسبه و حداکثر مقدار آن به عنوان درجه حرارت اولیه منظور می شود. یعنی:

$$T_0 = \max \{ -\Delta f \} \quad (21)$$

– تنظیم درجه حرارت نهایی: درجه حرارت نهایی بر اساس درجه حرارت اولیه و توسط رابطه (۲۲) محاسبه می شود:

$$T_f = 0.08 * T_0 \quad (22)$$

– نحوه تغییر درجه حرارت: جهت کاهش درجه حرارت، از تابع هندسی به فرم رابطه (۲۳) استفاده می شود که پس از بررسی و آزمایش های متعدد، $\alpha = 0.9$ تعیین شده است: یعنی، در هر مرحله از رسیدن به شرط تعادل، در صورت برآورده نشدن شرط توقف، درجه حرارت ۱۰ درصد کاهش داده می شود.

$$T_{f+1} = \alpha * T_f \quad (23)$$

– شرط تعادل: جهت بررسی شرط تعادل، پس از رسیدن به یکسری جواب های پذیرفته شده به اندازه طول "دوره" رابطه (۱۷) بررسی می شود. اگر این شرط برقرار نبود، درجه حرارت کاهش داده شود و مجدداً فرآیند آنیل کردن انجام می شود، در غیر این صورت در همان درجه حرارت یک دوره همسایگی جدید تولید می شود. طول دوره (e) برابر ۱۵ 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 (۱۹)

– تنظیم پارامترهای ϵ_1 , ϵ_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 ϵ_1 و M که در شرط تعادل تاثیر دارند و پارامتر ϵ_2 که شرط توقف را تحت تاثیر قرار می دهد، چهار مسئله با اندازه های مختلف در نظر گرفته می شوند و برای هر مسئله الگوریتم SA با مقادیر مختلف پارامترهای فوق اجرا شده است. مقادیر اولیه پارامترها عبارتند از:

$$M = 75 \text{ و } 100 \text{ و } 150 \quad \epsilon_1 = 0.005 \text{ و } 0.008 \text{ و } 0.01 \quad \epsilon_2 = 0.01 \text{ و } 0.08 \text{ و } 0.5$$

پس از طراحی آزمایش های و نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم SA پیشنهادی، مقادیر پارامترها به صورت زیر تعیین شد:

$$M = 150 \quad \epsilon_1 = 0.005 \quad \epsilon_2 = 0.01$$

۴- طراحی آزمایش های عددی

۴-۱- الگوریتم مقایسه

در این مقاله الگوریتم SA پیشنهادی با بهترین روش ابتکاری ارائه شده توسط "اسچالر" و همکاران در سال ۲۰۰۰ یعنی روش "CMN"، مقایسه شده است. در تحقیق آنها مسئله زمان بندی در سیستم تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی و فرض زمان آماده سازی خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات در نظر گرفته شده است. هدف از زمان بندی آنها حداقل کردن زمان تکمیل قطعات در سیستم (C_{max}) است. آنها ترکیباتی از روش های ابتکاری را در دو مرحله بررسی کرده اند. در بین ۱۱ الگوریتم ترکیبی دو مرحله ای، روش "CMN" (مخفف حروف اول نام الگوریتمها) به عنوان کاراترین روش جهت مسئله فوق شناخته شده است. در روش فوق در مرحله اول از روش توسعه داده شده CDS جهت مسئله زمان بندی در سیستم های تولید سلولی ("وآخاریا"^{۱۷} و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۱۷])، استفاده شده است. در مرحله دوم، از روش "NEH اصلاح شده" جهت تعیین توالی خانواده قطعات استفاده شده است [۱۷]. در این روش ابتدا متوسط زمان آماده سازی جهت هر خانواده قطعه توسط رابطه (۲۴) محاسبه و سپس زمان پردازش مؤثر از رابطه (۲۵) محاسبه می شود:

$$\bar{S}_f^k = \left\{ \sum_{r=1}^{PF} S_{fr}^k \right\} / PF \quad \forall k, f \quad (24)$$

$$E_{fkl} = \bar{S}_f^k + \sum_{i \in n_f} P_{ifkl} \quad \forall k, f, l \quad (25)$$

۴-۲- طراحی مسائل عددی

برای بررسی الگوریتم SA پیشنهادی، چهار دسته مسئله در سایزهای مختلف از ادبیات گرفته شده است که در جدول (۲) آمده است. این اطلاعات شامل چگونگی تشکیل سلول تولیدی (خانواده قطعات و سلول تولیدی) است و فاقد زمان انجام عملیات و زمان آماده‌سازی خانواده قطعات است. زمان انجام عملیات هر قطعه بصورت تصادفی از توزیع یکنواخت [۲۵] و [۱] و زمان آماده‌سازی از توزیع یکنواخت [۵۰] و [۱] مطابق روش "اسچالر" و همکاران تولید می‌شود [۱۶].

جدول (۲) ابعاد مسائل عددی گرفته شده از ادبیات.

Problem	Source	Size ^a		
		N	M	K
P1	Venagupal and Narandran (1992) [18]	8	5	2
P2	Solimanpur et al. (2004) [13]	10	8	3
P3	Harahalakis et al. (1990) [19]	20	20	5
P4	Srinivasan et al. (1990) [20]	30	16	4

^a N: number of parts M: number of machines K: number of cells

۴-۳- طراحی روش انجام آزمایش‌ها

در این مقاله، برنامه کامپیوتری هر دو الگوریتم SA پیشنهادی و الگوریتم "CMN" توسط زبان Borland C++ نوشته و توسط کامپیوتر شخصی Pentium II اجرا شده است. برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، برای هر سایز مسئله P1-P4، ۵ مسئله متفاوت به صورت تصادفی تولید شده است (Problem No. = 1-5). برای بررسی حساسیت الگوریتم SA پیشنهادی نسبت به جواب اولیه، هر مسئله با ۵ جواب اولیه متفاوت (Initial Solution) که به صورت تصادفی تولید شده، اجرا می‌شود. با هر جواب اولیه، الگوریتم پیشنهادی ۵ بار اجرا شده، یعنی برای هر مسئله ۲۵ اجرا انجام می‌شود. نتایج محاسباتی براساس تفاوت در اندازه مسئله در جداول (۳) تا (۶) ارائه شده است. مقادیر موجود در این جداول از سمت چپ به این صورت است: ستون دوم، میانگین جواب‌های اولیه در ۲۵ اجرا برای هر مسئله است. ستون‌های ۳ تا ۵ به ترتیب، بهترین جواب بدست آمده، میانگین و انحراف معیار جواب‌های نهایی الگوریتم SA پیشنهادی در ۲۵ اجرای هر مسئله است. ستون ۶، متوسط زمان پردازش براساس ثانیه است. ستون‌های ۷ و ۸ مربوط به بهترین جواب و زمان پردازش در روش ابتکاری "CMN" است. آخرین ستون در هر جدول نشان‌دهنده درصد کاهش در بهترین جواب بدست آمده (%PRBS) از الگوریتم SA پیشنهادی در مقایسه با روش "CMN" است.

%PRBS : Percentage Reduction in the Best Solution

۵- نتایج محاسباتی

نتایج محاسباتی در جداول (۳) تا (۶) برای مسائل با چهار سایز مختلف ارائه شده است. جدول (۳) نشان‌دهنده نتایج حاصل از مسئله P1 است. در این سایز مسئله، الگوریتم SA پیشنهادی توانسته است در هر ۲۵ اجرای هر مسئله به بهترین جواب؛ یعنی، حداقل مقدار C_{max} دست پیدا کند و همچنین با مقایسه میانگین جواب نهایی و میانگین جواب‌های اولیه،

مشخص می‌شود که "الگوریتم SA پیشنهادی" نسبت به جواب اولیه حساس نبوده است و کارایی بالایی در نحوه جستجو و انتخاب جواب‌های خوب دارد. به جهت کوچک بودن ساینز مسئله، "الگوریتم CMN" توانسته است بهترین جواب حاصل از الگوریتم SA را بدست آورد.

جدول (۳) مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از مسئله P1.

Problem No.	"Proposed SA" Method						"CMN" Method		% PRBS
	Mean Initial Solution	Best Solution	No. of Best Solution	Solution		Mean CPU Time (s)	Best Solution	CPU Time (s)	
				Mean	S.D.				
1	124.2	95	25	95	0	0.012	95	0.000	0.0
2	132.6	127	25	127	0	0.010	127	0.000	0.0
3	119	99	25	99	0	0.010	99	0.000	0.0
4	137	124	25	124	0	0.010	124	0.000	0.0
5	92	85	25	85	0	0.010	85	0.000	0.0
Average									0.0

نتایج حاصل از مسئله P2 در جدول (۴) ارائه شده است. در این ساینز مسئله نیز "الگوریتم SA" توانسته است در هر ۲۵ اجرای هر مسئله به بهترین جواب دست پیدا کند و با توجه به تولید جواب اولیه به صورت تصادفی، نسبت به جواب اولیه حساس نیست و این نشان‌دهنده قابلیت بالای الگوریتم پیشنهادی در تولید جواب‌های خوب است. بهترین جواب بدست آمده توسط "الگوریتم CMN" در همه مسائل تولید شده در این ساینز بیشتر از بهترین جواب حاصل از الگوریتم SA است و الگوریتم SA توانسته است به طور متوسط در کل پنج مسئله تولید شده، ۱۰/۷٪ بهترین جواب‌های بدست آمده را کاهش دهد. نمودار حاصل از این مقایسه در شکل (۱) ارائه شده است.

نتایج حاصل از مسائلی با ساینز بزرگتر (مسئله P3 و P4) به ترتیب در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است. با افزایش ساینز مسئله، الگوریتم SA پیشنهادی از قابلیت بالاتری در پیدا کردن بهترین جوابها در مقایسه با "الگوریتم CMN" برخوردار است. در اکثر تکرارها، الگوریتم SA توانسته است بهترین جواب را بدست آورد. این در حالی است که در سایر حالت‌ها نیز دامنه تغییرات جواب‌های به دست آمده در مقایسه با میانگین جواب‌ها کم بوده و نشان دهنده کارایی الگوریتم در جهت پیدا کردن بهترین جوابهاست. مقایسات نتایج این دو ساینز مسئله در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. زمان‌های پردازش حاصل از هر دو الگوریتم در مسائل با ساینزهای مختلف، بسیار کوتاه و به طور متوسط کمتر از ۰/۵ ثانیه است.

جدول (۴) مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از مسئله P2.

Problem No.	"Proposed SA" Method						"CMN" Method		% PRBS
	Mean Initial Solution	Best Solution	No. of Best Solution	Solution		Mean CPU Time (s)	Best Solution	CPU Time (s)	
				Mean	S.D.				
1	272.8	163	25	163	0	0.035	209	0.000	22.0
2	300.0	221	25	221	0	0.031	234	0.000	5.6
3	252.4	160	25	160	0	0.030	199	0.000	19.6
4	283.8	195	25	195	0	0.030	204	0.000	4.4
5	297.0	223	25	223	0	0.029	227	0.000	1.8
Average									10.7

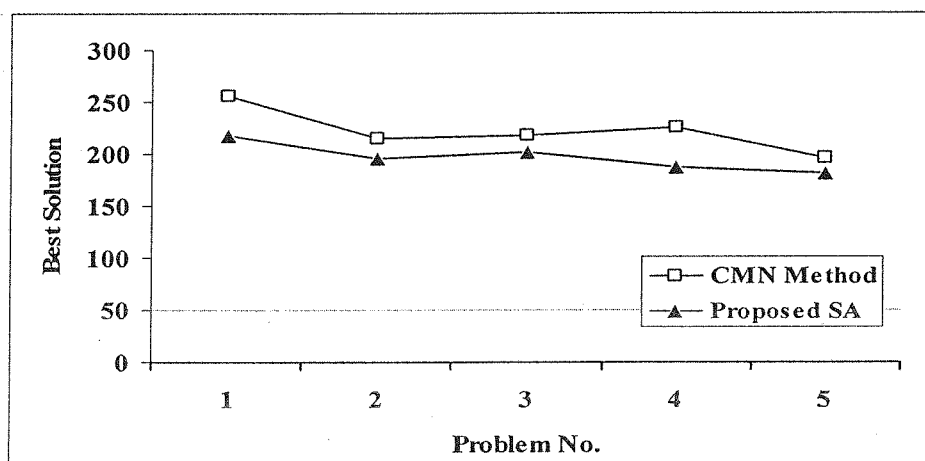


جدول (۵) مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از مسئله P3.

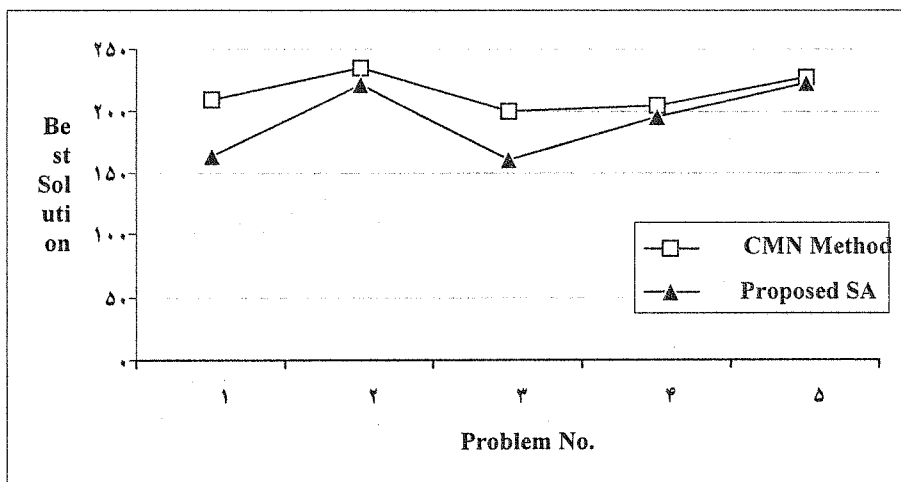
Problem No.	"Proposed SA" Method						"CMN" Method		% PRBS
	Mean Initial Solution	Best Solution	No. of Best Solution	Solution		Mean CPU Time (s)	Best Solution	CPU Time (s)	
				Mean	S.D.				
1	378.6	217	11	219.7	4.42	0.263	256	0.001	15.2
2	357.4	196	8	199.0	3.41	0.279	214	0.002	8.4
3	323.4	202	9	207.3	5.01	0.267	217	0.000	6.9
4	339.8	187	7	198.3	8.65	0.287	225	0.001	16.9
5	339.8	181	14	186.8	7.55	0.284	196	0.003	7.7
Average									11.0

جدول (۶) مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از مسئله P4.

Problem No.	"Proposed SA" Method						"CMN" Method		% PRBS
	Mean Initial Solution	Best Solution	No. of Best Solution	Solution		Mean CPU Time (s)	Best Solution	CPU Time (s)	
				Mean	S.D.				
1	545.8	313	7	320.80	9.35	0.415	421	0.004	25.7
2	567.2	317	7	331.4	12.53	0.413	407	0.003	22.1
3	529.4	284	5	298.5	8.51	0.412	353	0.006	19.5
4	537.8	329	3	341.0	6.46	0.450	378	0.002	13.0
5	520.8	307	8	314.32	6.88	0.416	417	0.005	26.4
Average									21.3



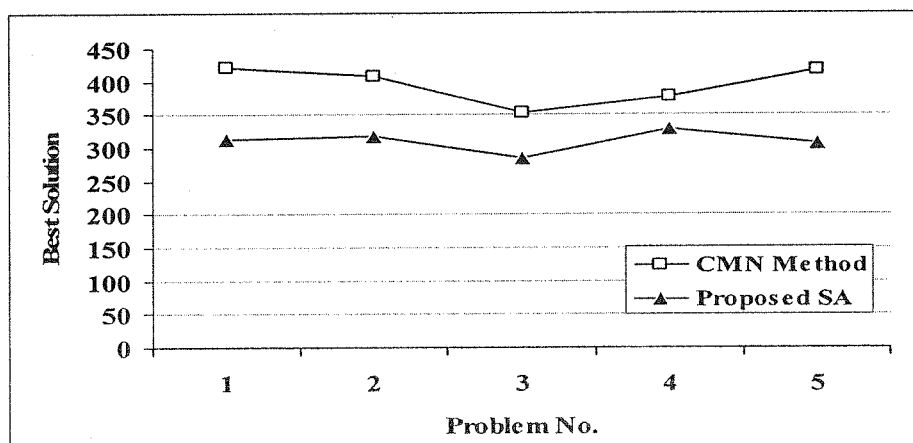
شکل (۱) مقایسه نتایج محاسباتی در مسئله P2.



شکل (۲) مقایسه نتایج محاسباتی در مسئله P3.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل ریاضی جدید برای زمان بندی در سیستم‌های تولید با سلولی ساختار جریان کارگاهی^{۱۴} ارائه شده است. هدف از این مدل حداقل کردن زمان تکمیل کارهاست (C_{max}) و فرضیات کاربردی نظیر زمان آماده‌سازی خانواده قطعات وابسته به توالی عملیات، امکان وجود قطعات بین سلولی و امکان وجود چندین ماشین در سلول، در نظر گرفته شده است. مسئله فوق از نظر پیچیدگی محاسباتی جزو مسائل NP-Complete است و برای همین روش‌های دقیق در ارتباط با آنها کارایی ندارند. به همین دلیل در این مطالعه از الگوریتم SA جهت حل این مسئله استفاده شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی توسط مسائل در اندازه‌های مختلف تست و با بهترین الگوریتم ارائه شده توسط "اسچالر" و همکاران یعنی الگوریتم ابتکاری "CMN" مقایسه شده است. نتایج محاسباتی نشان دهنده کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله زمان بندی در سیستم تولید سلولی است. با افزایش اندازه مسئله، الگوریتم SA در مقایسه با الگوریتم "CMN" از قابلیت بالاتری در پیدا کردن بهترین جواب‌ها برخوردار است.



شکل (۳) مقایسه نتایج محاسباتی در مسئله P4.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله وظیفه خود می‌دانند که از داوران محترم مقاله قدردانی نمایند. همچنین از آقای دکتر محمد اقدسی و آقای دکتر عزیزاله معماریانی به جهت رهنمودهای ارزشمند آنها در جهت انجام این تحقیق سپاس‌گزاری می‌شود.

فهرست علائم

$i = 1, 2, \dots, N$: تعداد کل قطعات
$k = 1, 2, \dots, M$: تعداد کل ماشین‌آلات
$j = 1, 2, \dots, PF$: تعداد خانواده قطعات
$l = 1, 2, \dots, K$: تعداد سلول‌ها
$j = 1, 2, \dots, PF$: تعداد قطعات در خانواده j
$l = 1, 2, \dots, K$: تعداد ماشین‌آلات در سلول l
P_{ijkl}	: مدت زمان انجام عملیات قطعه i از خانواده j توسط ماشین k از سلول l
S_{rf}^k	: مدت زمان آماده‌سازی بر روی ماشین k جهت انجام عملیات خانواده f که بلافاصله بعد از خانواده r وارد سلول شده‌اند.
S_j^k	: مدت زمان آماده‌سازی بر روی ماشین k در حالتی که خانواده j اولین خانواده قطعه‌ای است که در سلول وارد می‌شود.
C_{max}	: بیشترین زمان تکمیل قطعات
Q	: یک عدد مثبت و بزرگ
T_0	: درجه حرارت اولیه
T_r	: درجه حرارت نهایی
M	: حداکثر تعداد تعویض‌های پذیرفته شده در هر درجه حرارت
ε_1	: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط تعادل سیستم در درجه حرارت T_r
ε_2	: عدد مثبت و کوچک، جهت بررسی شرط توقف (نقطه انجماد)

$\bar{f}_e(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای کلیه حالت‌های پذیرفته شده در هر "دوره" در درجه حرارت T_r
$\bar{f}_g(T_r)$: متوسط مقادیر \bar{f}_e برای تمام دوره‌های قبلی در درجه حرارت T_r
$\bar{f}(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای کلیه حالت‌های پذیرفته شده تا رسیدن به شرط تعادل در درجه حرارت T_r

زیر نویس‌ها

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1- Cellular Manufacturing System (CMS) | 9- Schaller |
| 2- Machine Cell | 10- Allahverdi |
| 3- Part Family | 11- CDS-Modified NEH (CMN) |
| 4- Group Scheduling | 12- Campbell, Dudek, Smith (CDS) |
| 5- Baker | 13- Modified NEH |
| 6- Skorin-Kapov | 14- Flow shop |
| 7- Tabu Search (TS) | 15- Epoch |
| 8- Logendran | 16- Vakharia |

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] 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).
- [17] Vakharia, A. J. and Chang, Y. L., A Simulated Annealing Approach to Scheduling a Manufacturing Cell, *Naval Research Logistis*, 37, 559-577 (1990).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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, 145-152 (1990).

