

حل مسئله استقرار تجهیزات در سیستم ساخت سلولی به کمک الگوریتم شبیه‌سازی آنیل کاری تحت شرایط تقاضای متغیر مشتری

محمدباقر ایرانشاهیⁱ؛ علی شاهندهⁱⁱ؛ سید محمد معطر حسینیⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، مدلی برای حل مسئله استقرار تجهیزات در سیستم ساخت سلولی ارائه شده است. در این مدل به هر دو مسئله استقرار تجهیزات درون سلولی و بین سلولی توجه و سعی شده است هزینه کل حمل و نقل مواد به حداقل برسد. ضمناً فرض بر این است که نرخ تقاضا در خلال دوره عمر محصول تغییر می‌کند. به خاطر پیچیدگی مسئله، یک الگوریتم شبیه‌سازی آنیل کاری بهبودیافته برای حل آن ارائه شده است. این الگوریتم مکانیزم تولید ترکیبات همسایگی را تغییر داده و اصلاح می‌کند. این مکانیزم جدید، می‌تواند یک ترکیب همسایگی که همه محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا می‌کند، تولید کند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده، جواب با کیفیت مطلوب را، در حالی که به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد، تولید می‌کند. شایان ذکر است که این الگوریتم برای وقتی که اندازه مسئله افزایش می‌یابد، عملکرد بهتری در مدت زمان معقول دارد.

کلمات کلیدی

سیستم ساخت سلولی (CMS)، استقرار تجهیزات، دوره عمر محصول، شبیه‌سازی آنیل کاری (SA).

A simulated Annealing Solving for Facility Layout Problems under Variable Demand in Cellular Manufacturing System

M. B. Iranshahi; A. Shahandeh; S. M. Moattar Husseini

ABSTRACT

This paper proposes a mathematical model to solve facility layout problem in CMS. Its objective is to solve both inter-cell and intra-cell facility layout problems simultaneously, so that the material handling costs are minimized. It has been assumed that the demand rate varies over the product life cycle. Due to the complexity of the case, an improved simulated annealing algorithm has been developed to provide the optimal solution to this problem. This algorithm can always generate a neighborhood configuration that satisfies all of the zoning constraints. The results indicated that the proposed approach can yield satisfactory solutions within reasonable time.

KEYWORDS

Cellular Manufacturing System, Facility Layout; Product Life Cycle; Simulated Annealing

ⁱ کارشناس ارشد مهندسی صنایع؛ دانشگاه صنعتی اصفهان: Iranshahi@idro.org

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی صنایع؛ دانشگاه صنعتی اصفهان: ali-nook@cc.iut.ac.ir

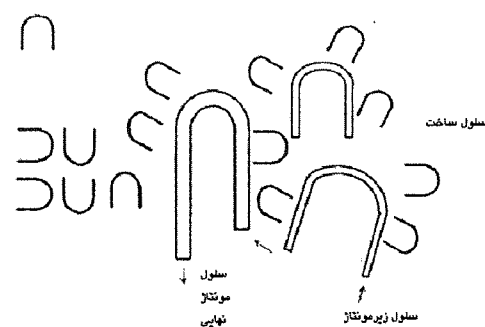
ⁱⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی صنایع؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران): moattarh@aut.ac.ir

در جریان، حمل و نقل نامرتب ماده و ... را نتیجه می‌دهد. گرچه مسأله استقرار در CMS نقش مهمی را در سطح کارگاه بازی می‌کند؛ اما این مسأله توجه پژوهشگران را به اندازه مسأله تشکیل سلول به خود جلب نکرده و فقط تعداد کمی از پژوهشگران این مسئله را بررسی کرده‌اند. تیو [۱۹] و تزنگ [۲۰]، مدل‌هایی برای حل مسایل استقرار تجهیزات تک‌سلولی ارائه کرده‌اند. آلفا و همکارانش [۵] مدلی برای حل مسایل استقرار تجهیزات در CMS ارائه کرده‌اند. مدل آلفا فرض می‌کند که محل سلول‌ها از پیش تعیین شده است، از این رو مدل وی فقط مسایل استقرار درون سلولی را حل می‌کند. داس [۱۰] مدلی برای حل مسایل استقرار بین سلولی مطرح کرد. این مدل، استقرار درون سلولی را بررسی نکرده است؛ هر چند که استقرار درون سلولی بر استقرار بین سلولی تاثیرگذار است. سوفیانوپائولو [۱۶]، مسأله تشکیل سلول را به عنوان یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی با هدف مینیم کردن تعداد حرکات بین سلولی با رعایت محدودیت‌های اندازه سلول، مدل‌سازی کرده و آن را به کمک رهیافت SA حل کرد. ادیل و همکارانش [۲] مدل تخصیص را به همراه الگوریتم SA برای مسأله تشکیل سلول به کار بردند. ذوالفقاری و لیانگ [۲۳] مسأله تشکیل سلول و خانواده قطعه را با در نظر گرفتن زمان‌های پردازش عملیات و ظرفیت ماشین‌ها به کمک رهیافت SA حل کردند. عبدالمللا و تابون [۲] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین گروه‌های ماشین‌آلات و خانواده‌های قطعات، با هدف بالابردن بهره‌وری کل مطرح کردند و یک الگوریتم SA کارآمد برای حل مسایل با اندازه بزرگ گسترش دادند. کاوکس و همکارانش [۹] مسأله ساخت سلولی را با برنامه‌های پردازش متغیر و محدودیت ظرفیت ماشین حل کردند. مسیرهای حرکت، ظرفیت ماشین‌ها و مقدار قطعاتی که باید تولید شوند؛ مجهولات مسأله است. بایکازوغلو و همکارانش [۷] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح با اهداف چندگانه برای تشکیل همزمان سلول‌های ماشین-قطعه ارائه دادند. مینیم‌سازی عدم تشابه نیازمندی‌های تولید و توالی عملیات در سلول‌های تشکیل شده و مینیم‌سازی بالانس نبودن بارگذاری کار از اهداف مدل است. زامبر و ویلارینهو [۲۲] رهیافت SA را برای تشکیل سلول با ماشین‌های یکسان چندگانه بکار بردند. مدل برنامه‌ریزی ریاضی این مسأله، جریان بین سلولی را مینیم می‌کند. تیواری و روی [۱۸] مسأله دسته‌بندی قطعه را با بکاربردن یک الگوریتم SA پیوندی حل کردند. الگوریتم SA ارائه شده برای حل مسأله طبقه‌بندی قطعه،

در سال‌های اخیر، بعضی تغییرات اساسی از قبیل تقاضای متغیر مشتری، دوره عمر^۱ کوتاه محصول و افزایش رقابت بین‌المللی، در صنایع رخ داده است. یک شرکت برای رویارویی و پاسخ‌گویی به این تغییرات و باقی ماندن در بازار باید انعطاف‌پذیری کافی به منظور عرضه محصولات با کیفیت بالاتر و هزینه پایین‌تر را در مقایسه با رقبا داشته باشد. برای نیل به این هدف، در سالیان اخیر، سیستم‌های تولیدی نوین ارائه شده است. در میان آنها، سیستم ساخت سلولی^۲ در عین برخورداری از مزایای انعطاف‌پذیری سیستم کارگاهی^۳، از کارایی سیستم جریانی^۴ نیز به طور همزمان برخوردار است و به عنوان یک سیستم ساخت که می‌تواند چالش‌های مورد اشاره فوق را برطرف سازد، مورد توجه قرار گرفته است [۸].

ساختار اصلی CMS در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختار، مرکب از یک سلول مونتاژ نهایی، سلول‌های زیرمونتاژ و سلول‌های ساخت است [۸]. در این سلول‌ها، هر سلول مونتاژ و زیرمونتاژ مرکب از سلول‌های ساخت و ایستگاه‌های کاری است. معمولا تشکیل یک سیستم ساخت سلولی، طی سه مرحله زیر اجرا می‌شود [۱۷]:

- ۱- تشکیل سلول: گروه‌بندی قطعات به خانواده‌های قطعه و اختصاص ماشین‌آلات به سلول‌ها به وسیله فرایند تولید قطعات
- ۲- استقرار تجهیزات^۱: استقرار سلول‌ها در داخل سطح کارگاه (استقرار بین سلولی) و استقرار ماشین‌آلات در داخل هر سلول (استقرار درون سلولی)
- ۳- برنامه‌ریزی زمان‌بندی: زمان‌بندی کارها در هر سلول



شکل (۱): ساختار اصلی سیستم ساخت سلولی

درمیان این مراحل، استقرار تجهیزات، اولین موردی است که به جریان متفاوت مواد و هزینه‌های حمل و نقل ماده منجر می‌شود. استقرار دارای طراحی بد؛ بهره‌وری کم، افزایش کار

شکل U شناخته شده است. به علاوه حمل و نقل ماده در امتداد شکل U جریان می‌یابد.

۵ - ایستگاه‌های کاری به عنوان سلول‌ها، در نظر گرفته می‌شوند.

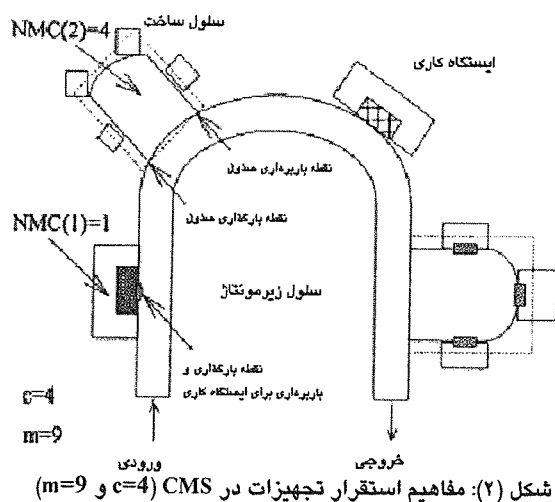
۶ - فاصله بین هر دو ماشین همسایه در یک سلول مساوی است.

۷ - فاصله بین هر دو سلول همسایه، مساوی است.

۸ - نقطه بارگذاری^{۱۱} و باربرداری در مرکز هر ماشین یا ایستگاه کاری است.

۹ - نقطه بارگذاری برای سلول در نقطه ورودی سلول و نقطه باربرداری برای سلول، نقطه خروجی سلول است.

۱۰- شکل و فضای کارگاه محدود و منحصر به فرد نیست.



با این فرض که همه هزینه‌ها در نقطه میانی دوره‌ها رخ می‌دهند، ارزش فعلی هزینه حمل و نقل هر قطعه t بر واحد فاصله برای دوره yام به صورت زیر است:

$$C_{ty} = C_t(P/F, r, y-0.5), \quad \forall t = 1, 2, \dots, part; \quad (1)$$

$$y = 1, 2, \dots, u$$

مقدار تولید قطعه t برای سال yام عبارت است از:

$$T_{ty} = \sum_{d=1}^{prod} P_{dy} \cdot PP_{dt}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, part; \quad (2)$$

$$y = 1, 2, \dots, u$$

ارزش فعلی هزینه حمل و نقل قطعه t بر واحد فاصله برای

افق برنامه‌ریزی به صورت زیر است:

به طور قابل ملاحظه‌ای فضای جستجو را به منظور یافتن انطباق نمونه اولیه، مینیمم و همگرایی سریع جواب را تضمین می‌کند. وانگ و همکارانش [۲۱] مدلی برای حل هر دو مسأله استقرار تجهیزات بین سلولی و درون سلولی در CMS ارائه کردند. هیچ یک از این تحقیقات، مفهوم دوره عمر محصول را در مدل داخل نکرده‌اند. همچنین، مدل‌های مذکور فرض می‌کنند که نرخ تولید در طی افق برنامه‌ریزی^{۱۱}، یک ثابت شناخته شده است؛ گرچه براساس تحقیق احمد [۴]، تقاضای محصول در خلال دوره عمر محصول، ثابت نیست؛ بنابراین، این فرض، معقول و منطقی است؛ به این دلیل که هر محصول، دوره عمر خاص خود را دارد و یک نرخ تقاضای^{۱۱} متغیر در محیط تولید واقعی فراهم می‌کند؛ یعنی تقاضای محصول در خلال زمان تغییر می‌کند. باس [۶] یک مدل رشد برای پیش‌بینی زمان خرید اولیه مصرف‌کنندگان جدید ارائه کرد.

از این رو، هدف این مقاله ارائه یک مدل است که هزینه کل حمل و نقل مواد را تحت شرایط تقاضای متغیر مشتری، مینیمم و هر دو مسأله استقرار تجهیزات بین سلولی و درون سلولی را به طور همزمان حل کند. مدل ارائه شده، یک مدل تخصیص از مرتبه چهارم است. به دلیل پیچیدگی مسأله، یافتن جواب بهینه با بکار بردن الگوریتم دقیق غیرعملی است. اگر الگوریتم دقیق بکار گرفته شود، با افزایش اندازه مسأله، زمان محاسباتی مورد نیاز برای حل مسأله نیز با سرعت زیادی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای حل مسأله باید از الگوریتم‌های ابتکاری کمک گرفت. الگوریتم شبیه‌سازی آنبیل‌کاری^{۱۱} یک الگوریتم جستجوی محلی است که قادر به یافتن جواب رضایت‌بخش برای مسایل مشکل به طور کارآمد می‌باشد [۱۱]، [۱۴]. بنابراین، در این مقاله، الگوریتم SA برای حل مسأله استقرار تجهیزات بکار گرفته می‌شود.

۲- مدل‌سازی مسأله

در این بخش، مسأله استقرار تجهیزات در CMS با توجه به فرضیات زیرمدل‌بندی می‌شود. در ارایه مدل، از مفاهیمی استفاده شده که در شکل (۲) نشان داده شده است.

۱ - افق برنامه‌ریزی این مدل، دوره عمر محصول است.

۲ - هزینه‌ها در نقطه میانی دوره‌های افق برنامه‌ریزی رخ می‌دهند.

۳ - ابتدا سلول تشکیل می‌شود؛ یعنی این مسأله؛ که چه نوع ماشینی به هر سلولی متعلق است، شناخته می‌شود.

۴ - هر سلول به شکل U استقرار داده می‌شود. طول و عرض

۳- الگوریتم شبیه‌سازی آنیل کاری

۳-۱- مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی آنیل کاری

کیرکپاتریک و همکارانش [۱۲] مفهوم الگوریتم SA را در سال ۱۹۸۲ معرفی کردند. این الگوریتم یک مقایسه و تشبیه میان فرایند آنیل‌کاری فیزیکی جامدات و فرایند حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی بزرگ است. جواب‌ها در یک مسأله ترکیبی معادل حالات یک سیستم فیزیکی است و هزینه یک جواب معادل انرژی یک حالت است [۱]. در فرایند جستجو، الگوریتم SA نه تنها جواب‌های بهتر را قبول می‌کند؛ بلکه با یک احتمال مشخص جواب‌های همسایگی بدتر را نیز قبول می‌کند. این بدان معنی است که الگوریتم SA توانایی گریز از مینیمم محلی را دارد. بنابراین، در مقایسه با الگوریتم‌های جستجوی محلی می‌تواند جواب‌های با کیفیت بالا را بیابد که به مقدار زیادی به انتخاب جواب اولیه بستگی ندارد؛ به عبارت دیگر، الگوریتم SA کارا و قوی می‌باشد. اضافه بر این، اثبات شده است که زمان محاسباتی این الگوریتم حد بالایی چندجمله‌ای دارد [۱].

رویه SA شامل چهار جزء اساسی است [۱۵]:

ترکیبات: همه جواب‌های ممکن برای مسأله؛ یعنی حالات مختلف مجموعه حرکت: یک مجموعه از انتقالات مجاز است. این انتقالات باید به مشتمل شدن و تحت نفوذ درآوردن همه ترکیبات قادر باشد.

تابع هزینه: یک مقدار که نشان می‌دهد هر ترکیب داده شده چقدر خوب است.

برنامه‌ریزی خنک‌سازی: برای آنیل‌کاری (حرارت دادن و سپس سرد کردن) مسأله از یک جواب تصادفی به یک جواب منجمد شده خوب استفاده می‌شود.

برای استفاده از الگوریتم SA، در ابتدا باید در مورد دمای اولیه، قوانین کاهش دما، تعداد انتقالات در هر مقدار از دما و وقتی که آنیل‌کاری باید متوقف شود، تصمیم‌گیری کرد. آنگاه می‌توان رویه شبیه‌سازی آنیل‌کاری شریدهار و راجندران را برای یافتن جواب به صورت زیر بکار برد [۱۷]:

گام ۱: یک ترکیب اولیه S تولید کنید.

گام ۲: یک دمای اولیه $T > 0$ را انتخاب کنید.

گام ۳: تا وقتی که هنوز معیار توقف ارضا نشده باشد

گام ۳.۱: دفعه حلقه زیر را انجام دهید.

گام ۳.۱.۱: یک همسایگی S' از S را بردارید.

گام ۳.۱.۲: $\Delta = \text{cost}(S') - \text{cost}(S)$

گام ۳.۱.۳: اگر $\Delta \leq 0$ ، آنگاه $S = S'$ قرار دهید.

$$MC_t = \sum_{y=1}^u C_{t,y} T_{t,y}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, part; \quad (2)$$

سرانجام، ارزش فعلی هزینه حمل و نقل ماده بر واحد فاصله برای افق برنامه‌ریزی؛ که قطعات از ماشین i به ماشین j جریان می‌یابند، عبارت است از:

$$TMC_{ij} = \sum_{r=1}^{part} MC_r MP_{rj} = \sum_{r=1}^{part} \sum_{y=1}^u \sum_{d=1}^{prod} C_{r,y} P_{dy} P_{dr} MP_{rj}, \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

از این رو، مسأله استقرار تجهیزات برای CMS تحت

شرایط تقاضای متغیر به صورت زیر فرمول‌سازی می‌شود:

$$\min \sum_{p=1}^c \sum_{q=1}^c \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m TMC_{ij} \cdot D_{ijkl} \cdot X_{ik} \cdot X_{jl} \cdot Y_{E,p} \cdot Y_{E,q} \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m X_{ik} = 1, \quad \forall k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ik} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{b=1}^c Y_{bp} = 1, \quad \forall p = 1, 2, \dots, c \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^c Y_{bp} = 1, \quad \forall b = 1, 2, \dots, c \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^{p-1} \sum_{b=1}^c Y_{br} \cdot NMC(b) < \sum_{k=1}^m k \cdot X_{ik}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^m k X_{ik} \leq \sum_{r=1}^p \sum_{b=1}^c Y_{br} \cdot NMC(b), \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$\begin{cases} X_{ik} = 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به موقعیت ماشین } k \text{ تخصیص داده شود.} \\ X_{ik} = 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_{bp} = 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به موقعیت ماشین } k \text{ تخصیص داده شود.} \\ Y_{bp} = 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

تابع هدف (۵)، هزینه کل حمل و نقل ماده در سطح کارگاه در خلال افق برنامه‌ریزی را برای این سیستم مینیمم می‌کند. محدودیت‌های (۶) و (۷) تضمین می‌کنند که هر موقعیت ماشین، به یک ماشین، و هر ماشین به یک موقعیت ماشین تخصیص می‌یابد. محدودیت‌های (۸) و (۹) تضمین می‌کنند که هر موقعیت سلول به یک سلول، و هر سلول به یک موقعیت سلول تخصیص می‌یابد. سرانجام، محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)، محدودیت‌های منطقه‌ای^{۱۲} هستند که تضمین می‌کنند که ماشین‌های موجود در یک سلول E_i ، به همان موقعیت سلول تخصیص داده می‌شود؛ به عبارت دیگر، موقعیت ماشین k باید بین تعداد کل ماشین‌ها در $p-1$ سلول اول و تعداد کل ماشین‌ها در p سلول اول باشد.

گام ۱.۳: اگر $\Delta > 0$ ، آنگاه با احتمال $\exp(-\Delta/T)$ ، $S = S'$ قرار دهید.
 گام ۲.۳: $T = rT$ قرار دهید.
 گام ۴: به S بازگردید.

گام (۱.۱.۲) به عنوان مکانیزم تولید ترکیبات همسایگی شناخته شده است. به طور کلی، مکانیزم تولید برای مسایل استقرار تجهیزات بدون محدودیت‌های منطقه‌ای به طور تصادفی دو ماشین را انتخاب می‌کند و موقعیت دو ماشین انتخاب شده را تعویض می‌کند.

منظور از محدودیت‌های منطقه‌ای، محدودیت‌هایی شامل الزام تخصیص یک ماشین به مکان خاص یا برعکس، ممنوع بودن تخصیص یک ماشین به یک محل خاص یا محدودیت در مورد همسایگی بعضی ماشین‌هاست.

کاتولیز و همکارانش [۱۲] دو رهیافت متفاوت برای وجود محدودیت‌های منطقه‌ای در مسأله استقرار تجهیزات ارائه دادند. رهیافت اول، به عنوان الگوریتم SA اجباری^{۱۰} ارائه می‌شود. این رهیافت هنگام تولید ترکیبات اولیه و همسایگی، محدودیت‌های منطقه‌ای را در نظر می‌گیرد. آنها همچنین مکانیزم تولید را به صورت زیر اصلاح کردند [۱۲]:

گام ۱.۳: یک همسایگی تصادفی S' را از S بردارید. (به طور تصادفی دو ماشین انتخاب کنید، آنگاه محل ماشین‌های انتخابی را تعویض کنید). اگر S' محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا می‌کند، با گام (۲.۱.۳) ادامه دهید. در غیر این صورت، گام (۱.۱.۳) را تکرار کنید.

رهیافت دوم، به عنوان یک الگوریتم SA جریمه‌دار^{۱۱} عرضه می‌شود. به جای بکاربردن مضارب لاگرانژ، محدودیت‌های منطقه‌ای در محاسبه تابع هزینه بکار می‌روند. این رهیافت، عبارات بزرگ جریمه را برای هر ترکیب؛ که از محدودیت‌ها تخلف کند، تحمیل می‌کند. این امر در بیشتر اوقات، الگوریتم را به انتخاب ترکیب‌هایی مجبور می‌کند که محدودیت‌ها را ارضا می‌کنند.

۲-۳- برنامه خنک‌سازی

برنامه خنک‌سازی مورد استفاده در این قسمت، برگرفته از روش کاتولیز [۱۲] است.

۳-۲-۱- دمای اولیه

در مقایسه فیزیکی، دمای اولیه باید به اندازه کافی بالا باشد؛ برای این که جسم جامد به اندازه کافی گرم شود تا همه اجزای آن به طور تصادفی در فاز مایع قرارگیرند. این بدان

معنی است که در شروع فرایند آنیل‌کاری، انتقالات قادر به رسیدن به همه حالات و گرفتن همه ترکیبات ممکن هستند. به وسیله این خاصیت، الگوریتم می‌تواند جوابی بیابد که تا حد زیادی به ترکیب اولیه وابسته نیست. دمای اولیه T_0 می‌تواند به وسیله مفهوم متوسط انتقال با افزایش هزینه تعیین شود که در شروع فرایند آنیل‌کاری با احتمال P_0 پذیرفته می‌شود. افزایش هزینه متوسط، یعنی $\bar{\Delta}$ ، به وسیله انتقالات با افزایش هزینه محاسبه می‌شود؛ یعنی $\bar{\Delta}$ میانگین همه افزایش هزینه‌ها در انتقالات با افزایش هزینه است، که قبل از شروع فرایند اصلی آنیل‌کاری به وسیله اجرای آزمایشی مدل به دست می‌آید. در محاسبه، T_0 به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_0 \approx \frac{\bar{\Delta}}{\ln(P_0^{-1})} \quad (۱۲)$$

تعداد انتقالات برای محاسبه $\bar{\Delta}$ کسری از تعداد کل ترکیبات همسایگی است (SAMPLE). تعداد کل ترکیبات همسایگی از مرتبه m^2 است.

۳-۲-۲- تعداد تکرارها در هر دما

فرایند آنیل‌کاری، یک ترکیب را به یکی از همسایگانش با احتمال مشخص انتقال می‌دهد. این موضوع معادل با یک زنجیره مارکوف^{۱۲} است، بنابراین می‌توان هر مقدار از دما را به عنوان یک زنجیره مارکوف رسیدگی کرد. تعداد انتقالاتی که پذیرفته می‌شوند، در مقادیر پایین‌تر دما کمتر است، از این رو، باید حد بالایی زنجیره مارکوف را تعیین کرد. حد بالا (LENPERCENT) می‌تواند یک نسبت از تعداد کل ترکیبات همسایگی باشد. بر اساس مکانیزم تولید، اندازه همسایگی از مرتبه m^2 است.

۳-۲-۳- قوانین کاهش دما

وقتی که تعداد انتقالات به حد بالایی طول زنجیره مارکوف برسد، یک مقدار مشخص دما کاهش می‌یابد. پارامتر کنترل؛ یعنی نسبت کاهش دما، معمولاً طوری انتخاب می‌شود که تغییرات دمایی کوچک باشد؛ چون اگر تغییر دما کم باشد، زنجیره مارکوف، آسان‌تر به حالت تعادل می‌رسد. از این رو، قانون کاهش دما به صورت زیر بکار برده می‌شود:

$$T_k = rT_{k-1} \quad (۱۳)$$

پارامتر کنترل r (ATIO) $k=1,2,3,\dots$ k به 1 است.

وقتی که سیستم منجمد می‌شود، فرایند آنیل‌کاری خاتمه می‌یابد؛ یعنی مقدار تابع هزینه بعد از یک تعداد مشخص از زنجیره‌های مارکوف متوالی بهبود نمی‌یابد. در این تحقیق، فرایند آنیل‌کاری وقتی خاتمه می‌یابد که یکی از دو شرط زیر ارضا شود:

۱- تعداد انتقالات پذیرفته شده کمتر از یک کسر از تعداد کل انتقالات انجام شده (MINPERCENT) باشد.

۲- بهترین ترکیب فعلی برای تعداد $\ln|\Theta|$ از گام‌های کاهش دما بدون تغییر باقی بماند. آرتز و کورست [۱] نشان دادند که حد بالای تعداد کل گام‌های کاهش دما؛ یعنی تعداد زنجیره‌های مارکوف، متناسب با $\ln|\Theta|$ است. فضای جواب است که بر مجموعه محدود از همه جواب‌های ممکن دلالت می‌کند. در مسأله مورد نظر، Θ معادل با فاکتوریل m است؛ هر چند که بیشتر عناصر موجود در Θ به خاطر وجود محدودیت‌های منطقه‌ای زیاد، جواب‌های قابل قبول و موجه هستند. بنابراین، $\ln|\Theta|$ به عنوان حد بالای تعداد زنجیره‌های مارکوف بکار برده می‌شود.

۴- الگوریتم SA بهبودیافته

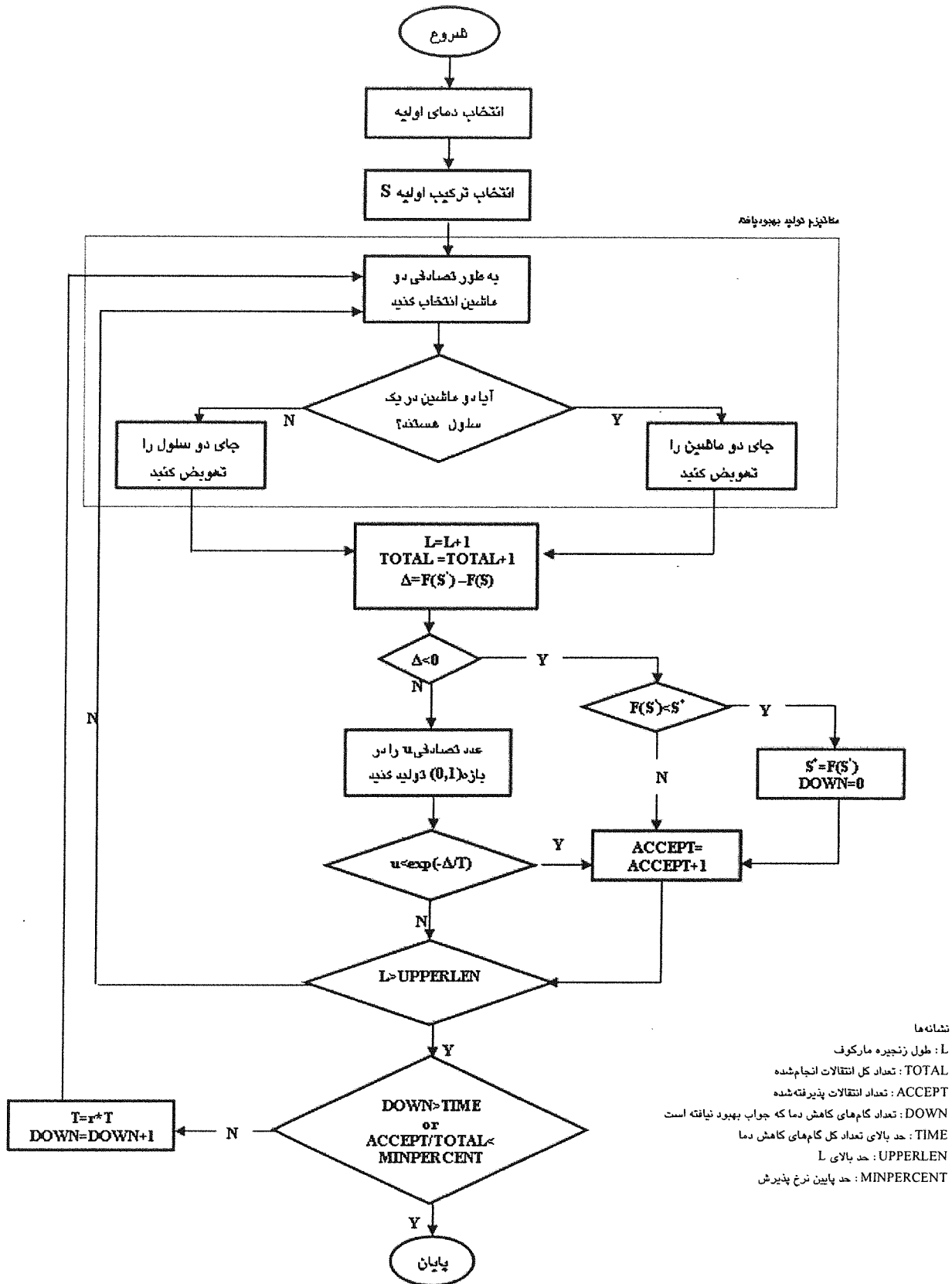
مسأله استقرار تجهیزات در CMS: که در بخش (۲) نشان

داده شد، برای تولید یک ترکیب همسایگی؛ که همه محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا کند، خیلی پیچیده است. اضافه بر این، اگر ترکیب تولید شده قابل قبول باشد؛ یعنی همه محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا کند، روش اجبار، کارایی خود را از دست می‌دهد؛ به خاطر این که به سادگی در دام حلقه تولید ترکیب همسایگی میفتد و در آن حبس می‌شود و بخش مهمی از زمان آزمایش را به خود اختصاص می‌دهد. برای گریز از این دام، وانگ و همکارانش [۲۱] یک مکانیزم تولید همسایگی جدید معرفی کردند که همیشه می‌تواند یک ترکیب همسایگی؛ که همه محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا می‌کند، تولید کند. مکانیزم جدید تولید به صورت زیر شرح داده می‌شود:

گام ۱.۱.۳: یک همسایگی تصادفی S' را از S بردارید. (به طور تصادفی دو ماشین را انتخاب کنید، آنگاه محل ماشین‌های انتخابی را تعویض کنید). اگر S' محدودیت‌های منطقه‌ای را ارضا کند، با گام (۲.۱.۳) الگوریتم SA ادامه دهید. در غیر این صورت، به حالت اصلی برگردید. محل سلول‌هایی را که ماشین‌های انتخاب‌شده به آنها تعلق دارند تعویض کنید. S' را با این ترکیب جدید جایگزین کنید و با گام (۲.۱.۳) الگوریتم ادامه دهید.

رویه آنیل‌کاری بهبودیافته^{۱۸} در شکل (۳) نشان داده شده

است [۲۱].



شکل (۳): رویه شبیه‌سازی آنیل‌کاری بهبود یافته

۵- نتایج محاسباتی

به منظور آزمایش و اعتباربخشی به مدل، مقادیر پارامترها برگرفته از مقاله وانگ و همکارانش [۲۱] است. جدول (۱) مقادیر پارامترهای بکار رفته در فرایند آنیلکاری را نشان می‌دهد.

الگوریتم SA بهبودیافته با زبان پاسکال برنامه‌نویسی شده و روی یک کامپیوتر پنتیوم IV با "CPU" ۴/۸ گیگاهرتز، اجرا شده است.

برای تایید کیفیت جواب الگوریتم SA، مسایلی با ابعاد مختلف از مسأله ۸ ماشینی و ۳ سلولی تا مسأله ۵۰ ماشینی و ۲۰ سلولی آزمایش شده است. مسایل آزمایشی از نمونه مسایل استاندارد ذکر شده؛ که در مقالات کاتولیز و چیانگ، وانگ و ادیل استفاده شده بود، انتخاب شدند. جواب‌های بهینه مسایل آزمایشی به وسیله شمارش کامل به دست آمده‌اند. جدول (۲) جواب بهینه و زمان محاسباتی هر مسأله آزمایشی را نشان می‌دهد. چون که شمارش کامل وقت‌گیر است، جواب‌های بهینه فقط برای مسایل آزمایشی ۱۴ ماشینی و ۵ سلولی و کوچک‌تر از آن به دست آمده است. جدول (۳)، کیفیت جواب حاصل از الگوریتم SA را نشان می‌دهد. هر مسأله آزمایشی ۱۰ بار و با جواب اولیه تصادفی متفاوت اجرا می‌شود. در همه مسایل آزمایشی، بهترین جواب حاصل از ۱۰ اجرا برابر با جواب بهینه است. این نتیجه، توانایی الگوریتم SA را در یافتن جواب بهینه نشان می‌دهد. از جدول (۳) همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که وقتی اندازه مسأله تا ۵۰ ماشین و ۲۰ سلول افزایش می‌یابد، میانگین هزینه ۱۰ اجرا فقط در حدود ۳٪ بدتر از بهترین جواب شناخته شده است. حتی در بدترین حالت، اختلاف بدترین هزینه ۱۰ اجرا با بهترین جواب بیشتر از ۶٪ نیست. نتایج مقایسه در شکل (۴) ترسیم شده است. جدول (۴) میانگین زمان محاسباتی ۱۰ اجرا را برای هر مسأله آزمایشی نشان می‌دهد. می‌توان دید که زمان محاسباتی الگوریتم SA در دامنه قابل قبول و معقولی قرار دارد. در همه مسایل آزمایشی، زمان محاسباتی الگوریتم SA به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از زمان محاسباتی روش شمارش کامل است.

همچنین از جداول (۲) و (۴) می‌توان مشاهده کرد که هر چه ابعاد مسأله افزایش می‌یابد، کارایی محاسباتی الگوریتم SA نیز افزایش می‌یابد. در مسأله ۸ ماشینی و ۳ سلولی، زمان اجرای الگوریتم SA، ۱/۸ زمان شمارش کامل است. در مسئله ۱۰ ماشینی و ۴ سلولی زمان اجرای الگوریتم SA، ۱/۱۱ زمان شمارش کامل است. در مسأله ۱۲ ماشینی و ۵ سلولی، زمان اجرای الگوریتم SA، تقریباً ۱/۱۸۶ زمان شمارش کامل است. در مسأله ۱۴ ماشینی و ۵ سلولی، زمان اجرای الگوریتم SA، تقریباً ۱/۳۹۱ زمان شمارش کامل است. کارایی محاسباتی الگوریتم SA به خصوص در مسایل با اندازه بزرگ کاملاً مشهود است. ضمن این که باید در نظر داشت که در مسایل بزرگ و هنگامی که اندازه مسأله از حد معینی فراتر رود، به دست آوردن جواب از طریق روش‌های دقیق و ریاضی امکان‌پذیر نیست، چرا که با توجه به فضای جوابی که باید جستجو شود زمان محاسباتی موردنیاز در این حالت، ممکن است چندین سال یا حتی چندین قرن باشد؛ لذا در چنین مواردی تنها چاره مسأله، استفاده از روش‌های ابتکاری و فوق‌ابتکاری است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در بررسی تحقیقاتی

مقدار	پارامتر
0.40	P_0
0.85	RATIO
0.95m ²	LENPERCENT
0.40	MINPERCENT
Ln n	TIME
0(m ²)	تعداد کل همسایگی‌ها
0.12m ²	تعداد انتقالات برای محاسبه Δ

جدول (۲): جواب‌های بهینه مسایل آزمایشی

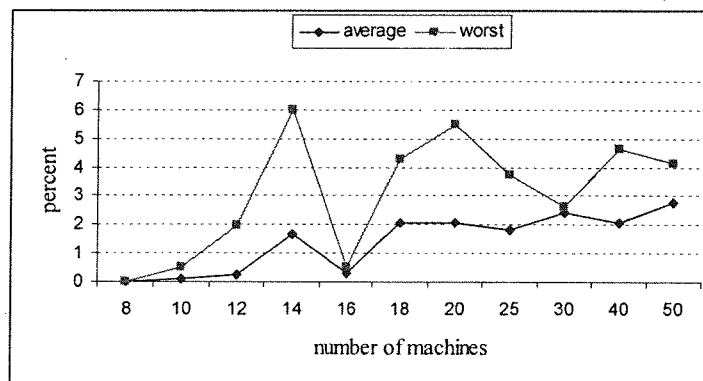
اندازه مسأله				
m=14,c=5	m=12,c=5	m=10,c=4	m=8, c=3	
794625.50	216655.88	232790.61	231212.40	جواب بهینه
10782.91	2465.47	22.70	2.26	زمان (ثانیه)

جدول (۳): کیفیت جواب الگوریتم شبیه‌سازی آنیل‌کاری

اندازه مسأله	بهترین جواب	درصد خطا	میانگین جواب	درصد خطا	بدترین جواب	درصد خطا
m=8, c=3	231212.40	0.00	231212.40	0.00	231212.40	0.00
m=10, c=4	232790.61	0.00	233014.16	0.10	233908.34	0.48
m=12, c=5	216655.88	0.00	217160.00	0.23	220951.77	1.98
m=14, c=5	794625.50	0.00	805030.56	1.67	842171.19	5.98
m=16, c=6	546093.38	-	547824.38	0.32	548916.94	0.52
m=18, c=7	1851240.88	-	1889798.45	2.08	1930070.25	4.26
m=20, c=8	1605118.25	-	1637863.03	2.04	1693025.25	5.48
m=25, c=10	224715.75	-	228760.63	1.80	233120.12	3.74
m=30, c=12	264843.56	-	271226.29	2.41	271835.43	2.64
m=40, c=15	393252.48	-	401432.3	2.08	411460.07	4.63
m=50, c=20	577840.50	-	593731.11	2.75	601647.53	4.12

جدول (۴): زمان محاسباتی (ثانیه) الگوریتم شبیه‌سازی آنیل‌کاری

اندازه مسأله							
m=20,c=8	m=18,c=7	m=16,c=6	M=14,c=5	m=12,c=5	m=10,c=6	m=8,c=3	
681.81	257.89	84.68	22.19	8.38	1.67	0.21	بهترین
1063.55	318.33	143.87	27.61	13.26	2.11	0.27	میانگین
1605.70	389.00	209.75	40.47	18.23	2.74	0.41	بدترین
M=50,c=20	m=40,c=15	m=30,c=12	m=25,c=10				
19412.99	8668.63	2823.96	2277.25				بهترین
28342.96	10575.73	4941.93	3871.32				میانگین
41664.15	15017.54	6622.19	4955.29				بدترین



شکل (۴): درصد خطا در مقایسه با بهترین جواب شناخته شده

۶- نتایج

سلولی که ماشین i به آن تخصیص یافته است. E_i :

تعداد کل ماشین آلات در سیستم مشتمل بر ایستگاه‌های کاری

m :

ارزش فعلی هزینه حمل و نقل قطعه t بر واحد فاصله برای افق

برنامه‌ریزی MC_t :

$$MP_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{اگر قطعه } t \text{ از ماشین } i \text{ به ماشین } j \text{ جریان یابد.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

تعداد ماشین آلات تخصیص یافته به محل سلول p

$NMC(p)$

انواع قطعه $part$:

مقدار قطعه t مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول d

PP_{dt} :

انواع محصول $prod$:

تقاضای محصول d برای سال y P_{dy} :

فاکتور ارزش فعلی سال y برای نرخ بهره سالانه $r\%$

$(P/F, r, y)$:

ارزش فعلی هزینه حمل و نقل ماده بر واحد فاصله برای افق

برنامه‌ریزی که قطعات از ماشین i به ماشین j حرکت کرده و

جریان می‌یابند. TMC_{ij} :

مقدار تولید قطعه t برای سال y T_{iy} :

افق برنامه‌ریزی u :

$$X_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به موقعیت ماشین } k \text{ تخصیص داده شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Y_{bp} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین } i \text{ به موقعیت ماشین } k \text{ تخصیص داده شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

در این مقاله، مدلی برای مینیمم‌سازی هزینه کل حمل و نقل ماده در CMS ارائه شد. این مدل هر دو مسأله استقرار تجهیزات بین سلولی و درون سلولی را به طور همزمان حل کرده است و فرض می‌کند که نسبت تقاضا در خلال افق برنامه‌ریزی تغییر می‌کند. از آنجا که به دلیل پیچیدگی و سختی مسأله، بکار بردن الگوریتم دقیق برای یافتن جواب بهینه کارآمد نبوده؛ یک الگوریتم SA برای حل این مدل انتخاب و بکار برده شد.

نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم SA قادر به یافتن جواب بهینه برای مسایل آزمایشی است. در حالت میانگین، الگوریتم SA می‌تواند جواب‌هایی با اختلاف نسبتاً کم نسبت به جواب بهینه به دست آورد. حتی در بدترین حالت، باز هم جواب‌های حاصل از اجرای الگوریتم SA دارای کیفیت بالایی است. نتایج محاسباتی همچنین نشان می‌دهد که الگوریتم SA جواب مسایل بزرگ را در چارچوب زمانی معقول و منطقی ارائه می‌کند.

۷- تقدیر و تشکر

تهیه‌کننده این مقاله برخود لازم می‌داند که از خانم مهندس مریم آذربایی، به خاطر هم‌فکری‌هایی که داشته‌اند، تشکر کند.

۸- ضمیمه: فهرست نشانه‌های بکار رفته در مدل

متغیرها و نشانه‌های بکار رفته در مدل به صورت زیر

تعریف می‌شوند:

تعداد کل سلول‌ها مشتمل بر ایستگاه‌های کاری c :

هزینه حمل و نقل ماده بر واحد فاصله برای هر قطعه t C_t :

ارزش فعلی هزینه حمل و نقل هر قطعه t بر واحد فاصله برای

سال y C_{iy}

فاصله درون سلولی بین ماشین i و ماشین j وقتی که ماشین i

به موقعیت ماشین k و ماشین j به موقعیت ماشین l تخصیص

یافته باشد. DA_{ikjl} :

فاصله بین سلولی بین ماشین‌های i و j وقتی که ماشین i به

موقعیت ماشین k و ماشین j به موقعیت ماشین l تخصیص

یافته باشد.

DR_{ikjl} :

فاصله کل حمل و نقل ماده بین ماشین‌های i و j

D_{ikjl} :

$$D_{ikjl} = DR_{ikjl} + DA_{ikjl}$$

[۱۳] Kouvelis, P., Chiang, W. C. and Fitzsimmons, J., "Simulated annealing for machine layout problems in the presence of zoning constraints", *European Journal of Operational Research*, 57, pp. 203-223, (1992).

[۱۴] Pirlot, M., "General local search methods", *European Journal of Operational Research*, 92, pp. 493-511, (1996).

[۱۵] Rutenbar, R. A., "Simulated annealing algorithms: an overview", *IEEE Circuits Devices Mag*, January, pp. 19-26, (1989).

[۱۶] Sofianopoulou, S., "Application of Simulated annealing to a linear model for the formulation of machine cells in group technology", *International Journal of Production Reserarch*, Vol. 35, No. 2, pp. 501-511, 1997.

[۱۷] Sridhar, J. and Rajendran, C., "Scheduling in a cellular manufacturing system: a simulated annealing approach", *International Journal of Production Research*, 31, pp. 2927-2945, (1993).

[۱۸] Tiwary, M. K. and Roy, D., "Solving a part classification problem using simulated annealing-like hybrid algorithm", *Robotics and Integrated Manufacturing*, in press article, 2003.

[۱۹] Twu, C. S., Facility Layout Problem in Cellular Manufacturing Systems, Master's thesis, Department of Industrial Management Science, National Cheng Kung University, Taiwan, (1993).

[۲۰] Tzeng, S. W., Simulated Annealing for Facility Layout Problem in Cellular Manufacturing Systems, Master's thesis, Department of Industrial Management Science, National Cheng Kung University, Taiwan, (1994).

[۲۱] Wang, T. Y., Lin, H. C. and Wu, K. B., "An improved simulated annealing for facility layout problems in cellular manufacturing systems", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 309-319, (1998).

[۲۲] Xambre, A. R. and Vilarinho, P. M., "A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines", *European Journal of Operational Research*, in press article, 2003.

[۲۳] Zolfaghari, S. and Liang, M., "Machine cell/part family formation considering processing times and machine capacities: A simulated annealing approach", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 34, No. 4, pp. 813-823, 1998.

[۱] Aarts, E. and Korst, J., *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*, John Wiley & Sons, New York, (1989).

[۲] Abdelmola, A. I. and Taboun, S. M., "Productivity model for the cell formation problem: a Simulated annealing approach", *Computer & Industrial Engineering*, 37, pp. 327-330, 1999.

[۳] Adil, G. K., Rajamani, D. and Strong, D., "Assignment allocation and Simulated annealing algorithms for cell formation", *IIE Transactions*, 29, pp. 53-67, 1997.

[۴] Ahmed, N. U., "A design and implementation model for life cycle cost management system", *Information and Management*, 28, pp. 261-269, (1995).

[۵] Alfa, A. S., Chen, M. and Heragu, S. S., "Integrating the grouping and layout problems in cellular manufacturing systems", *Computer & Industrial Engineering*, 23, pp. 55-58, (1992).

[۶] Bass, F. M., "A new product growth for model consumer durables", *Management Science*, 15, pp. 215-227, (1969).

[۷] Baykasoglu, A., Gindy, N. N. Z. and Cobb, R. C., "Capability based formulation and solution of multiple objective cell formation problems using simulated annealing", *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 258-274, 2001.

[۸] Black, J. T., *the Design of the Factory with a Future*, McGraw-Hill, New York, (1991).

[۹] Caux, C., Bruniaux, R. and Pierreal, H., "Cell formation with alternative process plans and machine capacity: A new combined approach", *International Journal of Production Economics*, 64, pp. 279-284, 2000.

[۱۰] Das, S. K., "A facility layout method for flexible manufacturing systems", *International Journal of Production Research*, 31, pp. 279-297, (1993).

[۱۱] Eglese, R. W., "Simulated Annealing: A tool for Operational Research", *European Journal of Operational Research*, 46, pp. 271-281, (1990).

[۱۲] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, (1983).

- ¹ Life Cycle
- ² Cellular Manufacturing System
- ³ Job Shop
- ⁴ Flow Shop
- ⁵ Lead Time
- ⁶ Setup Time
- ⁷ Work in Process
- ⁸ Facility Layout
- ⁹ Planning Horizon
- ¹⁰ Demand Rate
- ¹¹ Simulated Annealing
- ¹² Loading Point
- ¹³ Zoning Constraints
- ¹⁴ Cooling Schedule
- ¹⁵ Compulsion Simulated Annealing Algorithm
- ¹⁶ Penalty Simulated Annealing Algorithm
- ¹⁷ Markov Chain
- ¹⁸ Improved Simulated Annealing Algorithm