

طراحی سلولهای ساخت با استفاده از یک مدل دومرحله‌ای و یک الگوریتم ابتکاری

فریماه مخاطب رفیعی*

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۵/۱۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۹/۱)

چکیده - یک مدل دومرحله‌ای برای طراحی سلولهای ساخت ارائه شده است. در مرحله اول این مدل برای اولین بار با تعداد سلول به صورت یک متغیر تصمیم‌گیری برخورد شده است. در مرحله دوم با استفاده از تعداد معلوم سلول و استفاده از دو تابع هدف حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم و حداکثر کردن مشابهت در گروه قطعات تخصیص داده شده به سلولها، طراحی سلول انجام می‌شود. به دلیل اینکه جواب حاصل از مرحله دوم با دو تابع هدف متفاوت منجر به جوابهایی می‌شود که نمی‌توانند همزمان اهداف فوق را ارضا کنند، یک روش ابتکاری با استفاده از مفهوم ضریب مشابهت سلولی پیشنهاد شده است که جوابهای خوبی را ایجاد می‌کند.

واژگان کلیدی: سلول سوخت، ضریب مشابهت سلولی، مدل دومرحله‌ای، الگوریتم ابتکاری

Design of Manufacturing Cells with Two-Phase Model and A Heuristic Algorithm

F. Mokhtab Rafiee

Department of Industrial Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *A Two-phase model for configuring a cellular manufacturing system is proposed. In phase (I), for the first time, number of cells is considered as a decision variable. In phase (II), pursuing two different objectives, one minimization of under-load and the other, maximization of similarity of parts within a group, the design procedure is performed. As one can not have these two objects together, a heuristic algorithm based on cellular similarity coefficient and integration of two objects is proposed. The results confirmed that the proposed heuristic procedure has reasonable outcomes.*

Keywords: *manufacturing cell, cellular similarity coefficient, two-phase model, heuristic algorithm*

* - استادیار

اندیسهها:	S_{ij} ضریب مشابهت قطعه i و j . اگر $i=j$ مقدار صفر خواهد داشت.
C سلول $c=1,2,\dots,C$	$\beta_{jm}=0$ در غیر این صورت
J قطعه $j=1,2,\dots,J$	$\beta_{jm}=1$ اگر ماشین m در مسیر قطعه j باشد
m ماشین $m=1,2,\dots,n_j$	γ عددی اختیاری و بزرگتر از یک
n_j تعداد ماشین موجود در مسیر قطعه j	t_{jm} زمان عمل قطعه j بر روی ماشین m ($m \in j$)
مقادیر ورودی:	مقادیر خروجی
b_m زمان در دسترس ماشین m	N_{mc} تعداد ماشین نوع m در سلول c
d_j تقاضای قطعه j در دوره مورد بررسی	U_{mc} ظرفیت استفاده نشده از ماشین m در سلول c
M تعداد ماشینهای غیرمشابه موجود در سیستم	$X_{jc}=0$ در غیر این صورت
N_{max} حداکثر تعداد ماشین غیرمشابه در یک سلول (اندازه سلول)	$X_{jc}=1$ اگر قطعه j به سلول تخصیص یابد

۱- مقدمه

تولید دسته‌ای از نظر کاربرد در جهان نسبت به سایر روشها از جایگاه خاصی برخوردار است. مشخصات اصلی تولید دسته‌ای، تولید انواع بسیاری از محصولات در دسته‌های کوچک است. تنوع محصولات، طراحان را درگیر مرحله طراحی می‌کند که اثر قابل ملاحظه‌ای بر هزینه‌های ساخت، کیفیت و زمانهای تحویل می‌گذارد. تولید محصولات متنوع همچنین باعث بالا رفتن هزینه‌هایی مثل سرمایه گذاری تجهیزات، هزینه‌های ابزار و زمانهای طولانی آماده سازی و هزینه‌های کنترل کیفیت و ... می‌شود. به هر حال برای رقابت در بازار جهانی، بالا بردن بهره‌وری در تولید دسته‌های کوچک امری حیاتی است. به این منظور روشهای جدید برای کاهش هزینه محصول، کاهش مدت تحویل و بهبود کیفیت برای افزایش سهم قابل کسب از بازار سوددهی لازم است. تکنولوژی گروهی^۱ (GT) حلقه‌ای بین طراحی و ساخت فراهم می‌کند. کاربرد مفهوم GT امکان تولید دسته‌های کوچک را می‌دهد. این در حالی است که از مزایای تولید انبوه برخوردار شده و از انعطاف پذیری تولید کارگاهی نیز بهره می‌برد.

GT روشی است که از مشابهت محصولات و فعالیتها در ساخت و خدمات مهندسی استفاده می‌کند. در زمینه ساخت می‌توان GT را به عنوان یک فلسفه تعریف کرد که طبق آن

قطعات مشابه را شناسایی کرده و آنها را به گروهها تقسیم می‌کند تا از مشابهت آنها در ساخت و طراحی استفاده کند. یکی از کاربردهای فلسفه GT در تولید، ساخت سلولی^۲ (CM) است. CM در رابطه با ایجاد و اجرای سلولهای ساخت است که به تولید گروهی از قطعات تخصیص داده شده‌اند.

برای معرفی CM ابتدا باید سلول را تعریف کرد. یک سلول مجموعه‌ای از ماشینهاست که می‌تواند کاملاً به صورت دستی اداره شوند و یا ممکن است از درجه خودکاری بالا بهره ببرند که در این صورت سیستم تولیدی انعطاف پذیر^۳ (FMS) پیشرفته‌ترین نوع آن را تشکیل می‌دهد. بدون توجه به سطح خودکاری یک سلول، اولین مسئله‌ای که در پیاده‌سازی CM مطرح می‌شود شکل دهی سلول^۴ (CF) است.

تشکیل گروه قطعات و گروه ماشین آلاتی که این قطعات را پردازش خواهند کرد CF نامیده می‌شود. مسئله CF را می‌توان با این سؤال نیز بیان کرد: "اگر تعداد، انواع و ظرفیت ماشین آلات تولیدی و نیز انواع و مقدار قطعاتی که باید ساخته شوند و همچنین مسیر تولید هر قطعه نیز معلوم باشد، کدام ماشینها و کدام قطعات مربوط به آن ماشینها باید گروه‌بندی شوند تا سلول ایجاد شود؟". پس از تشکیل سلولها ممکن است به دلیل اینکه تعدادی قطعه به یک ماشین یا ماشینهای خاصی احتیاج داشته باشند، سلولها کاملاً مجزا نباشند. به چنین ماشینهایی ماشین

گلوگاه گفته می‌شود.

گروه ماشینها و روشهای مبتنی بر مدل‌های ریاضی در تشکیل سلولها برای روشن شدن روش ارائه شده در مقاله در بخشهای بعدی بررسی خواهند شد.

۲- تعریف مسئله

در دو دهه قبل، تحقیقات قابل ملاحظه‌ای مستقیماً در این رابطه انجام شده است. در این زمینه جدیدترین مقاله مروری توسط حسن سلیم و همکارانش [۱] ارائه شده است که ۱۷۹ مقاله را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس منطق به کار برده شده در شکل‌دهی سلول، می‌توان CF را به سه گروه تقسیم کرد [۲].

الف- فقط تشکیل گروه قطعات یا فقط تشکیل سلول ماشینها کیویزیک [۳] در مورد تشکیل گروه قطعات، نشان داد که داشتن مسیرهای متفاوت موجب تشکیل گروههای مناسبتری از قطعات شده لذا سلولهای همگن‌تری ایجاد می‌کند. آتامانی [۴] دو معیار مشابهت ماشینها را برای تشکیل سلولها معرفی کرد.

ب- تشکیل گروه قطعات و سپس تشکیل سلول ماشینها کارامانی و پارسایی [۵] یک روش دومرحله‌ای برای شناسایی گروه قطعات توسط یک معیار عدم مشابهت ابداع کردند. در روش آنها گروه‌بندی سلولها بر اساس هزینه‌های عملیاتی انجام می‌گیرد.

ج- تشکیل همزمان گروه قطعات و سلولها راجامانی و همکاران [۶] یک مدل ریاضی برای تشکیل گروه قطعات و سلولها ارائه کردند. در مدل ایشان آماده‌سازی قطعات وابسته به توالی هستند.

روشهای گروه‌بندی قطعات برای شناسایی قطعاتی استفاده می‌شوند که به یکدیگر شبیه‌اند. برخی روشها فقط توجه خود را معطوف به گروه‌بندی ماشینها در سلولها می‌کنند، اغلب این روشها فرض می‌کنند که گروه‌بندی قطعات قبلاً انجام شده است. روشهای گروه‌بندی قطعه-ماشین برای شناسایی گروه قطعات و گروه ماشینها به ترتیب و یا همزمان به کار می‌روند.

کار انجام شده در این مقاله در گروه سوم قرار می‌گیرد یعنی به طور همزمان گروه قطعات و سلول ماشینها تشکیل می‌شوند. مفهوم مشابهت یا ضریب مشابهت برای تعیین گروه قطعات و

۱-۲- ضریب مشابهت برای تشکیل گروه قطعات

استفاده از ضریب مشابهت دو ماشین برای تشکیل سلولها، اولین بار توسط مک‌اولی [۷] معرفی شد. بحثهای زیادی در رابطه با ضریب مشابهت فوق مطرح شدند. برای معنی‌دار بودن این ضریب مشابهت باید تمام ماشینها تقریباً تعداد مشابهی از قطعات را پردازش کنند. اگر دو ماشین مجموعه مشابهی از قطعات را پردازش کنند و یکی از آن دو ماشین قطعات بیشتری را نیز پردازش کند ضریب مشابهت بین این دو ماشین بسیار پایین خواهد بود. در حالی که ماشین با مجموعه کمتر قطعات به تعبیری صد در صد مشابه با ماشین با تعداد بیشتر قطعات است و ترکیب آنها در یک سلول ممکن است.

واخاریا و مرلوف [۸] یک ضریب مشابهت برای گروه‌بندی قطعات استفاده کرده‌اند. این ضریب مشابهت با توجه به نسبت انواع ماشین لازم برای دو قطعه که دارای ترتیب یکسانی باشند به دست می‌آید.

در این مقاله ضریب مشابهتی استفاده می‌شود که برخلاف ضرایب مشابهت یاد شده که بین دو ماشین و یا دو قطعه تعریف می‌شود براساس مشابهت بین دو سلول تعریف می‌شود لذا نه به تعداد قطعه تخصیص داده شده به ماشین بستگی دارد و نه به توالی در مسیر تولید یک قطعه وابسته است.

۲-۲- مدل‌های ریاضی برای تشکیل گروه ماشینها

تعداد زیادی مدل ریاضی برای مسئله تشکیل سلولها ارائه شده است. از این گروه می‌توان از چوبینه [۹] که یک دستورالعمل دومرحله‌ای برای تشکیل سلولها را ارائه کرده نام برد. در مرحله اول گروه قطعات تشکیل می‌شوند و در مرحله دوم سلول ماشینها با یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با اعداد صحیح^۵ (IP) شکل می‌گیرند. راجامانی و همکارانش [۶] سه

$$\text{Max}_{st} \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \gamma^c U_{mc} \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C X_{jc} = 1 \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J d_j t_{jm} X_{jc} + U_{mc} = b_m N_m \quad \forall m \in j \quad \forall c \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J n_j X_{jc} - \sum_{J_1=1}^{J-1} \sum_{j_2=j_1+1}^J \beta_{j_1 m} \beta_{j_2 m} X_{j_1 c} X_{j_2 c} + \\ & \sum_{j_1=1}^{J-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{J-1} \sum_{j_3=j_2+1}^J \beta_{j_1 m} \beta_{j_2 m} \beta_{j_3 m} X_{j_1 c} X_{j_2 c} X_{j_3 c} + \\ & \dots + (-1)^{P+1} \sum_{j_1=1}^{J-P+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{J-P+2} \dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{j_p=j_{p-1}+1}^J \sum_m \beta_{j_1 m} \dots \beta_{j_p m} X_{j_1 c} \dots X_{j_p c} + \dots \leq N_{\max} \quad \forall c$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jc} \geq 0 \quad \forall c \quad (5)$$

$$N_{mc}, U_{mc} \geq 0 \quad \forall m, c, X_{jc} = 0, 1 \quad \forall j, c \quad (6)$$

γ عدد مثبت و بزرگی است. مقدار C حداکثر برابر J تعداد قطعات است و این فرضی قابل قبول است یعنی هر قطعه به یک سلول تخصیص یابد. رابطه (۱) تابع هدف جمع ظرفیت بدون استفاده ماشینها در سلولهاست که ضرایب آنها به صورت نمایی افزایش می یابند. ماشین آلات متعلق به سلولهای اولیه در ابتدا با تخصیص قطعات پر می شوند و اگر از یک نوع ماشین خاص بیشتر احتیاج باشد، سلول بعدی در نظر گرفته می شود. با این روش سلول i برای هر $i \leq J$ قبل از سلول i در ابتدا تکمیل می شود. در نتیجه حداقل تعداد سلول لازم به دست خواهد آمد. محدودیت (۲) ما را مطمئن می سازد که هر قطعه تنها به یک سلول تخصیص داده شود. محدودیت (۳) نیز با توجه به تخصیص قطعات مختلف به یک سلول مقدار ظرفیت بدون استفاده از هر ماشین موجود در سلول را با توجه به تعداد لازم آن ماشین در سلول به دست می آورد. طبق تابع هدف، U_{mc} با ضریب بزرگتر، بیشترین مقدار خود را یعنی b_m را خواهد داشت. محدودیت (۴) مربوط به اندازه سلول است. این

مدل IP ارائه کرده اند که همزمان گروه قطعات و گروه ماشینها را تعیین می کنند. نکته قابل توجه در مدل های ریاضی که به طور کامل در مقاله حسن سلیم [۱] بررسی شده اند این است که تعداد سلولها در این مدلها مقداری معلوم است.

در این مقاله یک روش بر مبنای مدل ریاضی دومرحله ای با متغیرهای پیوسته و صفر و یک و عدد صحیح^۶ (MIP) ارائه می شود که در مرحله اول آن تعداد سلولها معلوم می شود و در مرحله دوم آن با انتخاب یکی از دو تابع هدف حداکثر کردن مشابهت موجود بین سلولها و یا حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم، گروه قطعات و سلولهای مرتبط آنها تعیین خواهد شد. بخش (۳) به ارائه مدل دومرحله ای اختصاص دارد. در بخش (۴) روش ابتکاری طراحی سلول معرفی می شود. در بخش (۵) آزمایشهایی برای مقایسه دو روش ابتکاری و مدل دومرحله ای ارائه می شود. بخش (۶) به بررسی نتایج و ارائه پیشنهادات تخصیص داده شده است.

۳- ارائه یک مدل دومرحله ای

در مرحله اول، تعداد سلولها با انتخاب قطعات به عنوان سلولهای اولیه و ادغام آنها با یکدیگر تعیین می شود. در مدل مرحله دوم با انتخاب تابع هدف مناسبی عمل تخصیص به نحو مطلوب انجام خواهد گرفت.

۳-۱- مدل ریاضی مرحله اول

با استفاده از این مدل و تابع هدف خاص آن، تعداد سلول تعیین خواهد شد. مسئله تشکیل سلول با توجه به مجهول بودن تعداد سلولها که در این مقاله مطرح می شود مدل طراحی شده را بسیار پیچیده تر از مدل های ارائه شده با در نظر گرفتن تعداد معلوم سلول در مسائل CF کرده است. در این مدل هدف حداقل کردن تعداد سلولها با تخصیص هر چه بیشتر قطعات به سلولهای ساخت است. این کار با هدف حداکثر کردن تخصیص و حداکثر فشردگی کردن سلولها به صورت زیر انجام می گیرد و چون همه ترکیبها بررسی می شوند، حداقل تعداد سلولها با فشردگی ترین تخصیص به دست می آید.

از نوع صفر و یک است تعریف می شود و دو محدودیت زیر به ازای هر y_k اضافه می شود:

$$\sum_{j=1}^{n_k} x_j - (n_k - 1) \leq y_k$$

$$\frac{1}{n_k} = \sum_{j=1}^{n_k} x_j \geq y_k$$

در روابط فوق $n_k = \sum_{j=1}^{n_k} x_j$ است.

برای یک مثال با هفت قطعه، $P=2,3,4,5,6,7$ است. یعنی ترکیبات دوتایی، سه تایی، چهارتایی، پنج تایی، شش تایی و هفت تایی وجود خواهند داشت. در این صورت تعداد $21=7!/5!1=7!/5!2=21$ دوتایی و به همین ترتیب ۳۵ سه تایی و ۳۵ چهارتایی و ۲۱ پنج تایی و ۷ شش تایی و ۱ هفت تایی به دست می آیند. در نتیجه تعداد متغیرهای صفر و یک از این نوع ۱۲۰ خواهد شد. در ضمن تعداد سلولهای اولیه هم به همان تعداد قطعات یعنی ۷ است. ابعاد مسئله در حالت کلی به صورت زیر است:

محدودیت (۲) J

$$\sum_{j=1}^J n_j \quad (۳) \text{ محدودیت}$$

محدودیتهای اضافه شده به جای محدودیت (۴)

$$2J \sum_{p=2}^J \frac{J!}{(J-p)! p!}$$

$$J^2 + \sum_{p=2}^J \frac{J!}{(J-p)! p!}$$

متغیرهای صفر و یک:

$$\sum_{j=1}^J n_j$$

متغیرهای پیوسته:

$$\sum_{j=1}^J n_j$$

متغیرهای صحیح:

به طور کلی بزرگی ابعاد مسئله مربوط به تعداد ماشینها و تعداد قطعات می شود. طبق مطالعاتی که جی کومار [۱۴] انجام داده است تعداد متوسط انواع قطعات در سیستمهای انعطاف پذیر در آمریکا ۱۰ است. جی کومار در همین مطالعات اندازه

محدودیت سقفی برای اندازه سلول یعنی حداکثر تعداد ماشین آلات غیرمشابه در سلول را مشخص می کند. سمت راست محدودیت (۵) در این مدل برابر صفر است و امکان اینکه سلولهای خالی در انتها به دست آیند را فراهم می کند. محدودیت (۶) هم مربوط به تعریف متغیرهاست.

برای روشن شدن محدودیت (۴) فرض کنید که سه قطعه A، B و C با مسیر تولیدشان داده شده اند.

۱-۲-۳-۴-۶ قطعه A

۲-۴-۵-۷ قطعه B

۳-۲-۴-۵-۷ قطعه C

پس از تخصیص سه قطعه به یک سلول تعداد ماشینهای غیرمشابه در سلول ۷ خواهد بود در حالی که مجموع تمام ماشین آلات $14=5+4+5$ است. لذا برای یافتن تعداد ماشینهای غیرمشابه غیرتکراری باید به صورت زیر عمل شود:

$$A \cup B \cup C - A \cap B - A \cap C - B \cap C + A \cap B \cap C$$

$$(5+4+5) - (2) - (3) - (4) + (2)$$

$$= 14 - 9 + 2 = 7$$

همان طور که مشاهده می شود این محدودیت غیرخطی است. خوشبختانه چندین روش برای خطی کردن محدودیت فوق وجود دارد. مروری بر روشهای مناسب در مقاله استک [۱۰] انجام شده است. در این مقاله از روش به کار برده شده در مقاله شنگر [۱۱] استفاده می شود. به این منظور به جای هر عنصر غیرخطی که از حاصل ضرب X_{j_i} ها به دست می آید یک متغیر صفر و یک و دو محدودیت اضافه می شود. C تعداد سلولهای پر شده و به دست آمده از این مرحله به عنوان مقدار ورودی به مرحله دوم خواهد رفت.

۱-۱-۳- ابعاد مدل ریاضی

محدودیت (۴) غیرخطی است و همان طور که بیان شد به جای هر عنصر غیرخطی که از حاصل ضرب X_{j_i} ها به دست می آید یک متغیر صفر و یک و دو محدودیت اضافه می شود. به عنوان مثال برای هر حاصل ضرب $x_1 x_2 \dots x_{n_k}$ یک متغیر y_k که

به عنوان مثال برای قطعه A و قطعه B با فرض اینکه ماشینهای لازم برای ساخت این دو قطعه تشکیل دو سلول مستقل بدهند ضریب مشابهت سلولی برابر ۰/۵ است.

۴- روش ابتکاری طراحی سلول

این روش ابتکاری با استفاده از مفهوم ضریب مشابهت سلولی به نحوی کار می کند که امکان طراحی سلولهای کاملاً مجزا را فراهم می کند. این کار از طریق قبول ماشینهای مشابه در سلولهای مختلف صورت می گیرد. موارد بسیاری وجود دارند که داشتن ماشینهای تکراری در سلولهای مختلف از حرکات بین سلولی و ماشین گلوگاه اقتصادترند. برای مثال اگر زمان پردازش روی یک ماشین از ظرفیت ماشین بیشتر باشد، داشتن بیش از یک ماشین اجتناب ناپذیر است، علاوه بر این وقتی مقدار لازم از هر قطعه و نیز هزینه حمل بین سلولی بالا باشند، حرکات بین سلولی مطلوب نخواهند بود لذا داشتن ماشینهای مشابه در سلولها لازم خواهد بود.

این روش ابتکاری برحسب قابلیتایی که به دنبال تعریف می شود به صورت دو الگوریتم به نامهای A و B قابل اجرا هستند. الگوریتم A می تواند با توجه به حداکثر تعداد ماشین قابل تخصیص به سلول به صورتی انعطاف پذیر و با توجه به اندازه سلول که ناشی از فضای در دسترس برای مکانیابی سلول و نیز محدودیت سیستم حمل مواد است، طراحی سلول را انجام دهد [۱۲]. الگوریتم B نیز با توجه به قابلیت بیشتر آن می تواند با استفاده از معیار حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم ترکیب مناسب را با مفهوم ضریب مشابهت ایجاد کند. مسیر تولید قطعات و زمانهای پردازش و تقاضای هر قطعه، اطلاعات کلی مورد نیاز برای این روش هستند.

۴-۱- الگوریتم پیشنهادی با محدودیت در اندازه سلول (الگوریتم A)

در این الگوریتم اندازه سلول (CELLSIZE) به عنوان حداکثر تعداد ماشین غیرمشابه در سلول تعریف می شود. از

متوسط تعداد ماشین یک سلول در آمریکا را ۷ اعلام کرده است.

۳-۲- مدل مرحله دوم

تابع هدف این مدل می تواند یکی از دو تابع هدف زیر باشد:

تابع هدف (۱): حداقل کردن جمع ظرفیتهای بدون استفاده ماشینها در سلولها (ظرفیت بدون استفاده سیستم)

$$\text{Min} \sum_{c=1}^{C^*} \sum_{m=1}^M U_{mc}$$

تابع هدف (۲): حداکثر کردن شباهتهای بین سلولی

$$\text{Max} \sum_{c=1}^{C^*} \sum_i \sum_j S_{ij} X_{ic} X_{jc}$$

هر یک از این دو تابع هدف با محدودیتهای (۲)، (۳)، (۴)،

(۵) و (۶) قابل حل است. در این حالت C^* تعداد سلول است که از مرحله اول به دست می آید و نیز سمت راست محدودیت (۵) به صورت بزرگتر یا مساوی ۱ تعریف می شود تا حداقل یک قطعه به هر سلول تخصیص داده شود.

۳-۲-۱- تعریف ضریب مشابهت

در بیشتر حالات برای ساخت یک قطعه به بیش از یک ماشین نیاز است و تمام ماشینهای لازم برای ساخت یک قطعه را می توان به عنوان یک سلول در نظر گرفت. بنابراین منطقی است که شباهت بین سلولها را به جای شباهت ماشینها در نظر گرفت. مفهوم ضریب مشابهت سلولی که ذیلاً بیان می شود بر پایه مشابهت سلولها بنا شده است [۱۲]. دو سلول i و j را در نظر بگیرید. S_{ij} ضریب مشابهت دو سلول به صورت زیر تعریف می شود:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{m_i=1}^{n_i} \sum_{m_j=1}^{n_j} \beta_{im_i} \beta_{jm_j}}{\min \left(\sum_{m_i=1}^{n_i} \beta_{im_i}, \sum_{m_j=1}^{n_j} \beta_{jm_j} \right)}$$

مشابهت در هر تکرار می‌شود و بهتر است عددی نزدیک به ۱ باشد. β حداقل ضریب مشابهت مورد نظر در ادغام سلولهاست.

$$\text{قدم ۱} \quad S=1, \max_j \{n_j\} \leq L \leq N_{\max}$$

قدم ۲ الگوریتم A را اجرا کن و معیار جمع ظرفیت بدون استفاده سیستم را محاسبه کن.

$$U = \sum_c \sum_m U_{mc}$$

قدم ۳ اگر $SIM = \alpha S$ ، اگر $SIM < \beta$ به قدم ۵ برو

قدم ۴ الگوریتم A را اجرا کن و U' معیار جمع ظرفیت بدون استفاده سیستم این اجرا را به دست آورد.

اگر $U' < U$ در این صورت $S = SIM$ و $L = L$ به قدم ۳ برو.

اگر $U' \geq U$ به قدم ۳ برو.

$$\text{قدم ۵} \quad L = L - 1$$

اگر $L < \max_j \{n_j\}$ به قدم ۶ برو.

در غیر این صورت $S = 1$ به قدم ۲ برو

قدم ۶ پایان

۵- انجام آزمایشات

اجراهای اولیه از مثالهای عددی بزرگ به علت صرف وقت زیاد در رسیدن به جواب بهینه نشان دادند که با توجه به محدودیت سقف حداکثر تعداد ماشین در سیستم نمی‌توان برای مسائل بزرگ و یا حتی در حد متوسط از نظر جی کومار مقایسه‌ای بین مدل دومرحله‌ای و روش ابتکاری انجام داد. به این منظور مطالعه به دو دسته تقسیم شد. دسته اول مربوط به حل مثالهایی در مقیاس کوچک و مقایسه دو روش بهینه و ابتکاری است که در این دسته، محدودیت سقف حداکثر تعداد ماشین در سیستم در مدل بهینه وجود دارد. دسته دوم مثالهایی در مقیاس متوسط که محدودیت سقف حداکثر تعداد ماشین وجود ندارد و تنها مدل مرحله دوم با تابع هدف حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده و با معلوم بودن تعداد سلول استفاده می‌شود. تعداد سلول لازم پس از تعیین آن توسط الگوریتم پیشنهادی B به عنوان پارامتر ورودی به مدل مرحله دوم وارد

طرف دیگر حداقل ضریب مشابهت بین سلولی (MINSIM) برای قطعات (سلولهای اولیه) و در ادامه در ادغام سلولهای اولیه طراحی مدل استفاده می‌شوند. این دو مقدار در ابتدا توسط کاربر تعیین می‌شوند. این الگوریتم در دو مرحله کار می‌کند.

۴-۱-۱- مرحله اول

قدم ۱ $Q = \emptyset$ مجموعه قطعات متعلق به سلول اولیه و

$$G = \{j | j=1, \dots, 14\}$$

قدم ۲ j^* را با $\max_j \{n_j\}$ انتخاب کن، در صورت وجود بیش از یک گزینه، اولی را انتخاب کن.

قدم ۳ S_{ij}^* را برای $\forall i \neq j^*$ محاسبه کن

$$\text{قدم ۴} \quad Q = \left\{ i \mid S_{ij^*} = 1, i \neq j^* \right\}$$

$$G = \{j \mid j \notin Q\}$$

۴-۱-۲- مرحله دوم

قدم ۱ S_{ij} را برای $\forall j \in G$ محاسبه کن و آنها را برحسب S_{ij} به ترتیب نزولی مرتب کن. این ترتیب سلولهای قابل بررسی را نشان می‌دهد.

قدم ۲ دو سلول C_i و C_j را که بیشترین ضریب مشابهت را دارند انتخاب کن.

قدم ۳ اگر $S_{ij} < \text{MINSIM}$ است به قدم ۵ برو

قدم ۴ دو سلول C_i و C_j را ادغام کن، اگر اندازه سلول از CELLSIZE کوچکتر است ادغام پذیرفته است دو اندیس i و j را از G حذف کرده و ترکیب جدید را به آن اضافه کن.

به قدم ۱ برو.

قدم ۵ G اندیس سلولهای نهایی را مشخص می‌کند.

قدم ۶ پایان

۴-۲- الگوریتم پیشنهادی بدون محدودیت (الگوریتم B)

در این الگوریتم S ضریب مشابهت و L اندازه اولیه سلول است. α عددی کوچکتر از ۱ است که باعث کاهش ضریب

جدول (۱) اگر سه قطعه ۱، ۳ و ۳ به یک سلول و سه قطعه ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به یک سلول دیگر تخصیص داده شوند، مشابهت سیستم از میانگین مشابهت سلولی از هر یک از دو سلول که به صورت زیر به دست می‌آیند، نتیجه می‌شود. در هر سلول قطعه با طولانیترین مسیر تولید به عنوان مبنا انتخاب شود. مثلاً در سلول اول قطعه ۳ دارای مسیر ۱-۲-۶-۸ است و انتخاب می‌شود. سپس مشابهت سلولی دو قطعه ۱ و ۲ با آن به دست آمده و میانگین این دو، مشابهت سلول اول را نشان می‌دهد. در این حالت $S_{13}=0.7$ و $S_{23}=1$ لذا مشابهت سلول اول 0.85 است. در سلول دوم نیز قطعه ۱۱ مبنای محاسبه قرار گرفته و $S_{11,12}=0.5$ و $S_{13,11}=0.5$ است لذا مشابهت سلول دوم 0.5 است. مشابهت سیستم از میانگین این دو مقدار به دست آمده و برابر با 0.68 است.

۵-۱-۲- معیار ادغامی

این معیار به دلیل اینکه می‌تواند اثر هر دو عامل مشابهت سیستم و ظرفیت بدون استفاده سیستم را توأم نشان دهد برای مقایسه روشها پیشنهاد می‌شود. این معیار به صورت زیر تعریف می‌شود و می‌تواند در سطح سلول و سیستم هر دو استفاده شود.

$$\text{ظرفیت بدون استفاده سیستم (سلول)} \\ \text{معیار ادغامی} = \frac{\text{مشابهت سیستم (سلول)}}{\text{ظرفیت بدون استفاده سیستم (سلول)}}$$

در ادامه مثال فوق سلول اول با مشابهت سلول 0.85 و سلول دوم با مشابهت سلول 0.5 با ظرفیتهای بدون استفاده متفاوت مورد نظر است. اثر معیار ادغامی با ذکر مثال عددی روشنتر می‌شود. فرض می‌شود که $U_1=1000$ و $U_2=1000$ است، در این صورت $2000 = 1000 \times 0.85$ معیار ادغامی (۱) و $2000 = 1000 \times 0.5$ معیار ادغامی (۲) است. به این ترتیب سلول اول نسبت به سلول دوم مناسبتر است. با استفاده از این معیار، ظرفیت بدون استفاده برای سلول با افزایش مشابهت سلول کمتر و با کاهش مشابهت سلول بیشتر می‌کند.

۵-۱-۳- بررسی نتایج

جدول (۲) نتایج ۲۰ اجرای مدل مرحله اول برای به دست

شده است. در این رابطه نیز لازم به توضیح است که بالا رفتن ابعاد مسئله منجر به افزایش زمان حل شده و امکان مقایسه را فراهم نمی‌کند، لذا تصمیم گرفته شد که به مسائل در مقیاس متوسط اکتفا شود.

اطلاعات یک مسئله نمونه شامل ۱۴ قطعه و ۸ ماشین متنوع با سایر اطلاعات لازم در جدول (۱) مشاهده می‌شود. برای حل این مسئله و سایر اجراها از $\gamma=10$ استفاده شده است و زمان دسترس هر ماشین ۴۸۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. از نرم‌افزار LINGO برای حل مدلها استفاده شده است. الگوریتم ابتکاری و نیز برنامه لازم برای ایجاد مسائل با Microsoft Fortron 4 نوشته شده‌اند. مسائل نمونه روی یک رایانه پنتیوم ۳ حل شده‌اند.

۵-۱-۱- آزمایشات دسته اول (مقایسه مستقیم)

همان طور که قبلاً اشاره شد به دلیل اینکه اجرای اولیه از روش بهینه در مقیاس نسبتاً بزرگ دارای زمان حل طولانی بود، ۱۰ مسئله نمونه با ۷ قطعه و ۵ ماشین متنوع که در مسیر تولید هر قطعه حداکثر ۴ ماشین وجود دارند به صورت تصادفی ایجاد شدند. با استفاده از مدل دومرحله‌ای و روش ابتکاری این مسائل حل شدند. لازم به ذکر است که این مسائل حداکثر تعداد ماشین آلات در یک سلول برابر ۵ یعنی تعداد ماشینهای متفاوت در سیستم و حداقل برابر ۴ یعنی تعداد ماشین در مسیر تولید هر قطعه می‌تواند باشد. لذا مدل دومرحله‌ای برای هر مسئله دو بار حل می‌شود.

برای مقایسه نتایج می‌توان از دو معیار استفاده کرد. اولین معیار، مشابهت سیستم و معیار دوم ظرفیت بدون استفاده سیستم است. با ترکیب این دو معیار نیز می‌توان از معیار دیگری که ذیلاً توضیح داده می‌شود استفاده کرد. این معیار از این به بعد به نام معیار ادغامی نامیده خواهد شد.

۵-۱-۱-۱- مشابهت سیستم

برای تعریف مشابهت سیستم از تعریف به کار برده شده در مشابهت سلولی استفاده می‌شود. به عنوان مثال با اطلاعات

جدول ۱- اطلاعات مربوط به مثال

تقاضای قطعه	زمان (دقیقه)	مسیر تولید	قطعه
۳۵	۵-۶-۷	۱-۲-۷	۱
۲۶	۸	۲	۲
۷۸	۴-۸-۸-۴	۱-۲-۶-۸	۳
۹۰	۵-۶-۷	۳-۵-۸	۴
۴۵	۶	۳	۵
۵۳	۳-۳-۸-۴	۱-۲-۶-۸	۶
۲۴	۷-۶-۷	۳-۴-۵	۷
۷۸	۷-۸	۲-۷	۸
۵۶	۶-۶-۶	۳-۵-۸	۹
۲۳	۵-۸-۹-۸	۲-۵-۶-۷	۱۰
۸۹	۳-۷-۸-۶	۱-۲-۶-۷	۱۱
۱۷	۳-۷	۲-۸	۱۲
۲۳	۴-۶	۲-۸	۱۳
۵۶	۵-۸-۸	۳-۵-۸	۱۴

جدول ۲- الف- نتایج اجرای مدل مرحله اول و مرحله دوم با تابع هدف ۱ با روش ابتکاری

روش ابتکاری		مدل مرحله دوم (تابع هدف)			مدل مرحله اول		
معیار ادغامی	تعداد سلول	معیار ادغامی	زمان حل	تعداد سلول	زمان حل (دقیقه)	حداکثر سقف	اجرا
					***	۴	۱
۲۰۷۳	۲	۲۰۷۳	۲	۲	۵۹	۴	۲
					***	۴	۳
۲۱۷۱	۲	۲۱۷۱	۲۷	۲	۲۴۵	۴	۴
۲۵۵۱	۲	۱۵۹۱	۵	۲	۱۰۵	۴	۵
۱۹۲۳	۲	۱۹۲۳	۲/۵	۲	۱۵۰	۴	۶
۱۹۷۷	۲	۲۴۵۷	۱۳۸	۳	۲۵۶	۴	۷
۳۹۸۱	۳	۳۵۰۱	۱۱۴	۳	۲۵۰	۴	۸
۱۹۰۴	۳	۱۹۰۴	۱۳۰	۳	۵۴	۴	۹
۲۸۵۸	۳	۲۳۷۱	۸۷	۳	۴۸۱	۴	۱۰

جدول ۲-ب- نتایج اجرای مدل مرحله اول و مرحله دوم با تابع هدف ۱ با روش ابتکاری

روش ابتکاری		مدل مرحله دوم (تابع هدف)			مدل مرحله اول		
معیار مقایسه	تعداد سلول	معیار مقایسه	زمان حل	تعداد سلول	زمان حل (دقیقه)	حداکثر سقف	اجرا
۱۲۱۱	۱	۱۲۱۱	۰/۵	۱	۱	۵	۱
۲۰۷۳	۱	۲۰۷۳	۱	۲	۵	۵	۲
۱۷۰۳	۳	۱۳۱۸	۳	۲	۲۲	۵	۳
۱۲۱۱	۱	۱۲۱۱	۰/۵	۱	۱	۵	۴
۲۵۵۱	۲	۱۵۹۱	۴/۵	۲	۸	۵	۵
۱۴۴۳	۱	۱۴۴۳	۰/۵	۱	۰/۵	۵	۶
۱۹۷۷	۲	۱۰۹۳	۲	۲	۴	۵	۷
۱۱۰۱	۱	۱۱۰۱	۰/۵	۱	۵	۵	۸
۱۹۰۴	۲	۱۰۰۴	۵	۲	۲/۵	۵	۹
۹۳۸	۱	۹۳۸	۰/۵	۱	۲/۵	۵	۱۰

جدول ۳- نتایج اجرای مدل مرحله دوم با تابع هدف (۲)

معیار مقایسه	زمان حل (دقیقه)	اجرا
۱۲۱۱	۰/۵	۱
۵۴۳۳	۲/۵	۲
۵۴۶۷	۸۶	۳
۱۲۱۱	۱	۴
۵۹۱۱	۲/۵	۵
۱۴۴۳	۱	۶
۶۲۹۷	۸/۵	۷
۱۱۰۱	۱	۸
۴۷۸۴	۵/۵	۹
۹۳۸	۱	۱۰

آوردن تعداد سلول لازم و به دنبال آن اجرای مدل مرحله دوم مربوط به حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم را همراه با نتایج روش ابتکاری نشان می‌دهد. در دو اجرای ۱ و ۳ در حالت حداکثر تعداد سقف ۴ در هر سلول زمان حل بیش از ۲۶ ساعت شد. مرحله دوم با تابع هدف حداکثر مشابهت بین سلولی تنها با حداکثر سقف ۵ حل شد. جدول (۳) نتایج ۱۰ اجرا در این حالت را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که این تابع هدف نیز با روش یاد شده خطی شده است.

جدول (۴) خلاصه نتایج را نشان می‌دهد. در این جدول متوسط نتایج در حالات حداکثر سقف ۴ و ۵ آورده شده‌اند و اعداد به نزدیکترین عدد صحیح گرد شده‌اند. زمان اجرای روش ابتکاری به لحاظ اینکه بسیار ناچیز است به جداول اضافه نشده است. در حالت حداکثر سقف برابر ۴ با تنها ۸ درصد افزایش در معیار ادغامی زمان متوسط از حدود ۲۶۳ دقیقه به حدود صفر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که زمان دو اجرای ۱ و ۳ در این متوسط گیری وارد نشده‌اند. در حالت حداکثر سقف ۵ زمان متوسط در مدل دوم مرحله‌ای بسیار کمتر از حالت قبل است و معیار ادغامی تنها ۲۴ درصد بیشتر شده است. از طرف

دیگر برای مسائلی با این مجموعاً ۵۰ درصد اوقات دو روش بهینه و ابتکاری جوابهای یکسانی را ایجاد کرده‌اند. نتیجه مدل مرحله دوم با تابع هدف ۲ به دلیل اینکه مدل به نحوی طراحی شده است که ظرفیت بدون استفاده را حداقل نمی‌کند و صرفاً در جهت حداکثر کردن مشابهت‌هاست از حداکثر تعداد ماشین

جدول ۴- خلاصه نتایج

روش ابتکاری	تابع هدف ۲		تابع هدف ۱		مدل مرحله اول	
	معیار ادغامی	متوسط زمان	معیار ادغامی	متوسط زمان	متوسط زمان	حداکثر سقف
۲۴۳۰	-	-	۲۲۵۰	۶۳	۲۰۰	۴
۱۶۱۱	۳۳۸۰	۱۱	۱۲۹۸	۲	۵	۵

از دو اجرای ۱ و ۳ صرف نظر شده است.

در جدول فوق اعداد گرد شده‌اند.

به عنوان ورودی به مدل بهینه مرحله دوم با تابع هدف (۱) وارد می‌شود. این آزمایش برای مثالهایی با ابعاد متوسط انجام می‌گیرد که مجموعاً با ۱۴ قطعه و ۸ ماشین متنوع ایجاد شده است. با در نظر گرفتن حداکثر سقف ماشین در هر سلول که در این آزمایش از ۴، حداکثر تعداد ماشین در مسیر هر قطعه تا ۸ که تعداد ماشین آلات متنوع است مسائل حل شده‌اند. حداکثر سقف تعداد ماشین از ۴ الی ۸ منجر به جوابهایی از ۱ الی ۶ سلول شدند. با اطلاعات مربوط به این مسائل و نیز تعداد سلولهای معلوم بعد از حل مسائل با روش پیشنهادی، مدل مرحله دوم با تابع هدف (۱) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مقایسه برحسب تعداد سلول در جدول (۶) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد سلولها روش ابتکاری توانسته سلولهای همگنتری را به دست آورد.

۶- نتیجه گیری

یک مدل دو مرحله‌ای برای طراحی سلولهای ساخت ارائه شد. در مرحله اول با در نظر گرفتن حداکثر تعداد ممکن سلول و با تخصیص قطعات به سلولها، حداقل تعداد سلول ممکن به دست می‌آید. این حداقل تعداد سلول به عنوان یک پارامتر معلوم به مرحله دوم وارد می‌شود. مدل مرحله دوم می‌تواند با دو تابع هدف مختلف برای حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم و یا حداکثر کردن مشابهت سلولها حل شود. یک روش ابتکاری با استفاده از مفهوم ضریب مشابهت سلولی پیشنهاد شده است.

مشابه در هر سلول استفاده می‌کند. لذا این مدل به تنهایی نمی‌تواند جوابگوی طراحی سلول باشد.

به طور کلی تنوع ماشین آلات می‌تواند منجر به تنوع مسیرهای تولید هر قطعه شود و باعث کاهش مشابهت مسیر تولید هر قطعه شود. لذا تصمیم گرفته شد که اثر تنوع ماشین آلات در مسیر تولید قطعات که امکان دارد در ترکیب سلولهای ناهمگن یعنی با مشابهت سلولی کمتر مؤثر باشد مورد آزمایش قرار گیرد. با حفظ تعداد ماشین لازم در مسیر تولید هر قطعه سه گروه آزمایش با تنوع ماشین آلات ۵ (مجموعه اجراهای اولیه)، ۷ و ۹ انجام شدند. در هر گروه از نتیجه ۱۰ اجرا استفاده شد. حداکثر سقف ماشین در سلول برابر ۵ در نظر گرفته شد. نتایج در جدول (۵) مشاهده می‌شوند. همان طور که در جدول (۵) دیده می‌شود با زیاد شدن ماشین آلات متنوع یا به عبارتی قطعاتی با مسیرهایی با اختلاف بیشتر، روش ابتکاری نتایج بهتری را ایجاد می‌کند. لازم به توضیح است که روش ابتکاری با حفظ حداکثر ضریب مشابهت می‌تواند سلولهای همگنتری را ایجاد کند. حال آنکه روش بهینه توانایی حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده را دارد ولی همواره قادر به تشکیل سلولهای همگن نیست.

۵-۲- آزمایشات دسته دوم (مقایسه غیر مستقیم)

همان طور که اشاره شد در این دسته در ابتدا الگوریتم پیشنهادی B با هدف حداقل کردن ظرفیت بدون استفاده سیستم استفاده می‌شود. سپس تعداد سلول به دست آمده در این مرحله

جدول ۵- اثر تنوع ماشین آلات

تنوع ماشین آلات	روش دومرحله‌ای	روش ابتکاری
۵	۱۲۹۸	۱۶۱۱
۷	۴۷۰۲	۳۲۶۰
۹	۳۹۷۳	۳۰۷۸

جدول ۶- مقایسه غیر مستقیم روش ابتکاری با مدل مرحله دوم با تابع هدف ۱

سلول	ابتکاری	مدل مرحله دوم	درصد تفاوت نسبت به بهینه
۱	-	-	۰
۲	۳۴۱۱	۲۲۹۳	۴۹
۳	۱۶۶۵	۱۴۲۷	۱۷
۴	۱۳۹۶	۱۴۸۸	-۶
۵	۱۱۸۶	۱۳۹۶	-۱۵
۶	۹۳۱	۱۱۴۴	-۱۰

سلولهای همگنتری را ایجاد کند. در صورتی که ابعاد مسئله بزرگ شود به عبارتی تعداد قطعات افزایش یابد و نیاز به سلولهای بیشتری باشد، روش ابتکاری جوابهای بالنسبه بهتری را ایجاد می‌کند.

بدون شک تکمیل مدل ریاضی فوق و در نظر گرفتن عوامل دیگری مثل تخصیص گروه کارگران [۲] و یا در نظر گرفتن محدودیتهای خاص در مسیر تولید قطعات [۱۳] هر چند می‌تواند باعث پیچیده‌تر شدن مدل و دشواری حل آن شود ولی زمینه‌آرزشی برای ادامه مطالعات را فراهم می‌آورد. به این خاطر روشهای ابتکاری دیگری نیز برای مسئله CF با محدودیتهای جدید لازم خواهد بود. در نظر گرفتن این مسائل و سایر محدودیتهاست که مسئله طراحی سلول را پس از گذشت دو دهه هنوز هم در صدر مطالعات قرار داده است.

اجراهای اولیه از مدل دومرحله‌ای نشان دادند که با بزرگ شدن ابعاد مسئله زمان حل بسیار زیاد می‌شود. همچنین انجام چند اجرا نشان داد که مدل مرحله دوم با تابع هدف حداکثر کردن مشابهت سلولی نمی‌تواند به تنهایی معیار قابل قبولی در طراحی سلول باشد.

همان طور که اشاره شد زمان رسیدن به جواب بهینه با استفاده از مدل دومرحله‌ای عاملی محدودکننده است. جوابهای به دست آمده از روش ابتکاری با ۸ الی ۲۴ درصد ظرفیت بدون استفاده بیشتر در زمان بسیار ناچیزی به دست می‌آیند. در عمل و با توجه به اینکه طراحی سلولها با اطلاعات قطعی صورت می‌گیرند، در صورت هر افزایشی در تقاضا، این ظرفیت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان دادند که روش ابتکاری با افزایش تنوع ماشین آلات در سیستم می‌تواند

واژه نامه

- | | | |
|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Group Technology | 3. Flexible Manufacturing System | 5. Integer Programming |
| 2. Cellular Manufacturing | 4. Cell Forming | 6. Mixed Integer Programming |

1. Selim, H., Askin, R., and Vakharia, A., "Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for Future Research," *Computers and Industrial Engineering*, No. 34, Vol. 1, pp. 3-20, 1998.
2. Jeon, G., Leep, H. and Parsaei, H., "A Cellular Manufacturing System Based on New Similarity Coefficient which Considers Alternative Routes during Machine Failure," *Computers and Industrial Engineering*, No. 34, Vol. 1, pp. 21-36, 1998.
3. Kusiak, A., "The Generalized Group Technology Concept," *International Journal of Production Research*, No. 25, Vol. 4, pp. 561-569, 1987.
4. Atmani, A., Lashkari, R., and Caron, R., "A Mathematical Programming Approach to Joint Cell Formation and Operation Allocation in Cellular Manufacturing," *International Journal of Production Research*, No. 33, Vol. 1, pp. 1-15, 1995.
5. Kamarani, A., and Parsaei, H., "A Group Technology Based Methodology for Machine Cell Formation in a Computer Integrated Manufacturing Environment," *Computers and Industrial Engineering*, No. 24, Vol. 3, pp. 431-447, 1993.
6. Rajamani, D., Singh, N., and Aneja, Y., "A Model for Cell Formation in Manufacturing Systems with Sequence Dependence," *International Journal of Production Research*, No. 30, Vol. 6, pp. 1227-1235, 1992.
7. McAuley, J., "Machine Grouping for Efficient Production," *The Production Engineer*, No. 51, Vol. 2, pp. 53-57, 1972.
8. Vakharia, A., and Wemmorlov, U., "Designing of Cellular Manufacturing System: a Material Flow Approach Based on Operation Sequences," *IIE Transactions*, No. 22, Vol. 1, pp. 84-97, 1990.
9. Choobineh, F., "A Frame Work for the Design of Cellular Manufacturing Systems," *International Journal of production Research*, No. 26, Vol. 7, pp. 1161-1172, 1988.
10. Stecke, K., "Formation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems," *Management Science*, No. 29, Vol. 3, pp. 273-288, 1983.
11. Shanker, K., and Tzen, Y., "A Loading and Dispatching Problem in a Random Flexible Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, No. 23, Vol. 3, pp. 579-590, 1985.
12. Luong, L., "A Cellular Similarity Coefficient Algorithm for the Design of Manufacturing Cells," *International Journal of Production Research*, No. 6, Vol. 1, pp. 1756-1766, 1993.
13. Gupta, T., "Design of Manufacturing Cells for Flexible Environment Considering Alternative Routing," *International Journal of Production Research*, No. 31, Vol. 6, pp. 1259-1273, 1993.
14. Jaikumar, R., "Postindustrial Manufacturing," *Harvard Business Review*, pp. 69-76, 1986.