ارائهٔ یک مدل ریاضی جدید دوهدفه برای پیکربندی سلول به‌صورت پویا براساس بهره‌وری گروهی با درنظرگرفتن تخصیص اپراتور

مجتبی کرمانشاهی[1]، نیکبخش جوادیان[2*]، محمدمهدی پایدار[3]

۱. کارشناس ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۰۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۷/۰۸/۰۲، تاریخ تصویب: ۹۷/۰۶/۲۳)

چکیده

در جهان رقابتی حاضر، لزوم کمینه‌سازی هزینه‌ها و زمان تولید و افزایش میزان بهره‌وری در سیستم‌های تولیدی، بیش‌ازپیش احساس می‌شود؛ زیرا با کاهش هزینه‌های ناشی از تولید، قیمت تمام‌شده کالا نیز کاهش می‌یابد و اگر زمان تولید کاهش یابد متعاقب آن زمان پاسخگویی به سفارش مشتری هم کاهش می‌یابد. در این مقاله، مدل ریاضی دوهدفه برای مسئلهٔ آرایش سلولی بر پایهٔ افزایش میزان بهره‌وری گروهی در محیط پویا با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور ارائه شده است. ازجمله مزیت‌های این مدل عبارت است از: در نظر گرفتن افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای، پیکربندی مجدد سیستم، ظرفیت ماشین، تعداد اپراتور در دسترس و انعطاف‌پذیری در تخصیص اپراتور است. اهداف مدل پیشنهادی شامل افزایش میزان بهره‌وری گروهی در کل دوره‌ها و کاهش هزینه‌های سیستم شامل خرید ماشین، تعمیرات و نگهداری، هزینهٔ متغیر ماشین، هزینهٔ راه‌اندازی و از دور خارج‌کردن ماشین‌ها و همین‌طور هزینهٔ حقوق، استخدام و اخراج است. این مدل به روش اپسیلون-محدودیت اصلاح‌شده تقویت‌شده حل و درنهایت نتایج به‌دست‌آمده بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: آرایش سلول‌ها، بهره‌وری گروهی، تخصیص اپراتور، سیستم‌های تولید سلولی پویا، فناوری گروهی.

مقدمه

امروزه سیستم‌های تولید مختلفی در جهان صنعتی وجود دارند که هریک از آن‌ها با درنظرگرفتن ویژگی‌های تولید مانند حجم تولید، تنوع محصول، ماهیت محصول، کیفیت و... انتخاب می‌شوند. فناوری گروهی یکی از این سیستم‌های تولیدی است که اولین بار میتروفانف [۱] آن را ارائه کرد و سپس بوربیج [۲] به توسعهٔ آن پرداخت. تولید سلولی کاربرد موفق از مفهوم فناوری گروهی در سیستم‌های تولیدی است که در آن قطعات مشابه و ماشین‌های متفاوت داخل سلول‌ها گروه‌بندی می‌شوند. این گروه‌بندی امکان استفاده از ماشین‌ها را با بازدهی بالا که پیش‌ازاین استفاده از آن‌ها در یک سیستم تولید کارگاهی به‌دلیل زمان بسیار راه‌اندازی اقتصادی نبوده میسر کرده است. تعدادی از مزایای حاصل از سیستم تولید سلولی در مقایسه با سایر سیستم‌های تولیدی از نظر عملکرد سیستم شامل کاهش میزان و هزینهٔ حمل‌ونقل، کاهش زمان راه‌اندازی، کاهش زمان تولید، کاهش اندازهٔ بسته‌ها، کاهش میزان موجودی در جریان ساخت، کاهش فضای مورد نیاز و استفادهٔ بهینه از فضاها، تمرکز تخصص، کنترل آسان‌تر موجودی، کاهش زمان تحویل، کنترل بهتر و ساده‌تر فرایند عملیات و... [۳-۴]. تعدادی از پژوهش‌هایی که در زمینهٔ آرایش سلول در سیستم‌های تولید سلولی براساس ماتریس باینری قطعه–ماشین وجود دارد، در ادامه بررسی شده است. مهدوی و همکاران [۵] یک مدل ریاضی را برای مسئلهٔ آرایش سلول بر پایهٔ مفهوم بهره‌برداری سلول ارائه کردند. هدف این مدل مینیمم‌کردن تعداد پوچ‌های درون سلول‌ها برای دستیابی به میزان بالاتری از بهره‌برداری سلول‌ها بود. مهدوی و ماهادوان [۶] به‌منظور حل هم‌زمان مسئلهٔ آرایش سلول و چیدمان ماشین‌آلات درون سلول‌ها، روش ابتکاری CLASS را ارائه کردند. توکلی‌مقدم و همکاران [۷] به ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حل مسئلهٔ آرایش سلول در محیطی پویا پرداختند. توابع هدف

[*] نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۱۱۲۴۱۹۶۱ Email: nijavadian@ustmb.ac.ir

به‌کاررفته در مدل آن‌ها عبارت است از مینیمم‌کردن هم‌زمان حرکات بین سلولی و هزینهٔ مربوط به ماشین‌آلات. از سوی دیگر، به‌دلیل NP-hard بودن ماهیت مسئلهٔ آرایش سلول، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را نیز پیشنهاد کردند. مهدوی و همکاران [۸] مدلی را برای حل مسئلهٔ آرایش سلول با هدف مینیمم‌کردن تعداد عناصر استثنائی و تعداد پوچ‌ها ارائه کردند و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئلهٔ آرایش سلول به‌کار گرفتند. پایدار و سعیدی مهرآباد [۹] محدودیت برنامه‌ریزی خطی را برای مسئلهٔ شکل‌دهی سلول بر پایهٔ بهره‌وری گروهی ارائه دادند و از الگوریتم ترکیبی شامل ژنتیک و جست‌وجوی همسایگی برای حل آن استفاده کردند. بیشتر مدل‌های ریاضی که در زمینهٔ مسئلهٔ آرایش سلول ارائه شدند در شرایط ایستا هستند؛ به صورتی که سلول‌ها تنها برای یک دوره و با تقاضای از قبل مشخص‌شده شکل‌دهی می‌شوند؛ از این‌رو برای مقابله با این شرایط و نزدیکی به جهان پویای واقعی، برنامه‌ریزی چنددوره‌ای درنظر گرفته می‌شود که هریک از دوره‌ها تقاضای متفاوتی دارند؛ بنابراین آرایش سلول برای یک دوره ممکن است برای دورهٔ بعدی بهینه و مؤثر نباشد. برای غلبه بر این مشکل تعدادی از نویسندگان، مدل‌های ریاضی را با درنظرگرفتن آرایش مجدد سلول برای چندین دوره ارائه دادند. آرایانژاد و همکاران [۱۰] مدل جدید ریاضی را که به‌طور هم‌زمان به مسئلهٔ آرایش سلول و تخصیص اپراتور می‌پردازد، ارائه دادند. آن‌ها انعطاف‌پذیری مسیر تولید قطعات، انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات و امکان پیشرفت اپراتور از یک سطح مهارت به یک سطح مهارت بالاتر را درنظر گرفتند. بجستانی و همکاران [۱۱] مدل ریاضی را به‌منظور مینیمم‌سازی هم‌زمان اختلاف بار کاری سلول‌ها و تابعی از هزینه‌های مختلف مانند هزینهٔ ماشین‌آلات، هزینهٔ حمل بین سلولی مواد و هزینهٔ چیدمان مجدد ماشین‌آلات ارائه کردند. همچنین الگوریتم جست‌وجوی پراکنده چندهدفه را برای حل مسئلهٔ آرایش سلول پویا درنظر گرفتند. باقری و بشیری [۱۲] مدل جدید ریاضی را برای مسئلهٔ آرایش سلول با درنظرگرفتن چیدمان بین سلولی و مسئلهٔ تخصیص اپراتور در محیط تولید سلولی پویا ارائه دادند.

یکی از روش‌های افزایش بهره‌وری تخصیص مناسب اپراتور برای تولید قطعات به‌کمک ماشین‌آلات است. از ماتریس برخورد قطعه، ماشین و اپراتور $R = [r_{imw}]$ می‌توان برای مسئلهٔ آرایش سلول استفاده کرد. مهدوی و همکاران [۱۳] مدل جدید ریاضی را برای مسئلهٔ آرایش سلولی براساس سه بعد قطعه، ماشین و اپراتور ارائه کردند که نمایش مکعبی از تخصیص را در سیستم‌های تولید سلولی نشان می‌دهد. پایدار و سعیدی مهرآباد [۱۴] مدل برنامه‌ریزی دوهدفهٔ احتمالی را برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، تهیه و توزیع در زنجیرهٔ تأمین و آرایش مجازی سلول‌ها به‌طور هم‌زمان در شبکهٔ چنددوره‌ای ارائه دادند. مهدوی و همکاران [۱۵] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای طراحی سیستم‌های تولید سلولی در محیط پویا ارائه دادند. آن‌ها برنامه‌ریزی تولید چنددوره‌ای، پیکربندی مجدد سیستم، ظرفیت ماشین، تکثیر ماشین، مدت‌زمان اپراتور در دسترس و تخصیص اپراتور را درنظر گرفتند. کیا و همکاران [۱۶] ک مدل برنامه‌ریزی ریاضی را برای شکل‌دهی درون سلول‌ها در سیستم تولید سلولی پویا با در نظرگرفتن چندین مسیر تولید ارائه دادند. آن‌ها در این مدل چندین ویژگی مانند چیدمان درون سلول، توالی عملیات، زمان عملیات، چندین مسیر تولید و تکثیر ماشین برای طراحی سیستم تولیدی را ادغام کردند. در این پژوهش مدل ریاضی دو هدفه از مسئلهٔ آرایش سلول چنددوره‌ای براساس افزایش بهره‌وری گروهی در محیطی پویا با درنظرگرفتن انعطاف‌پذیری در تخصیص اپراتور ارائه شده است.

تعریف مسئله

در این بخش، مدل ریاضی دوهدفه از مسئلهٔ آرایش سلولی براساس بهره‌وری گروهی با درنظرگرفتن تخصیص اپراتور در محیط پویا ارائه شد که در آن تابع هدف اول مقدار کل بهره‌وری گروهی را ماکزیمم و تابع هدف دوم هزینه‌های کل سیستم را مینیمم می‌کند. بدیهی است چیدمان بهینهٔ یک دوره لزوماً برای دورهٔ برنامه‌ریزی بعد بهینه نخواهد بود؛ زیرا تغییرات حجم جابه‌جایی‌های بین سلولی در میان چیدمان‌های مختلف کاملاً به میزان تغییرات حجم تقاضا در میان‌دوره‌های برنامه‌ریزی وابسته است. تغییرات شامل افزودن ماشین‌آلات جدید به سلول، حذف ماشین‌آلات از سلول و جابه‌جایی ماشین‌آلات بین سلول‌هاست. هدف از مدل‌سازی ریاضی تشکیل خانوادهٔ قطعات و ماشین‌آلات با

هدف مینیم‌سازی جابه‌جایی بین سلولی، پوچ‌ها و هزینه‌های سیستم تولیدی است. برای کاهش جابه‌جایی بین سلولی و پوچ‌ها از معیاری با عنوان بهره‌وری گروهی استفاده می‌شود. فرمول ریاضی مربوط به بهره‌وری گروهی در رابطۀ ۱ بیان می‌شود:

$$\mu = \frac{e - e_0}{e + e_v} \qquad (1)$$

در رابطۀ ۱، e تعداد کل «یک»های موجود در ماتریس قطعه-ماشین، e_v تعداد کل پوچ‌ها و e_0 نیز تعداد کل عناصر استثنایی را نشان می‌دهد.

فرضیه‌های مدل

- زمان پردازش هر عمل روی هر قطعه و روی هر ماشین مشخص شده است.
- تقاضا برای هر قطعه در هر دوره مشخص شده است.
- ظرفیت هر ماشین مشخص شده است.
- مدت‌زمان دردسترس‌بودن هر اپراتور مشخص شده است.
- تعداد سلول داده شده و در تمام طول دوره ثابت است.
- تنها یک اپراتور برای پردازش هر قطعه بر روی دستگاه مربوط اختصاص داده شده است.
- حقوق هر اپراتور مشخص شده است. این هزینه‌ها برای هر اپراتور در هر سلول و در هر دوره صرف‌نظر از اینکه آیا اپراتور فعال یا غیرفعال است درنظر گرفته شده است.
- پیکربندی دوباره سیستم شامل حذف و اضافه ماشین به هر سلول و جابه‌جایی از یک سلول به سلول دیگر بین دوره‌ها انجام می‌شود.
- پیکربندی دوباره سیستم شامل حذف و اضافه اپراتور (استخدام، اخراج) از هر سلول بین دوره‌ها انجام می‌شود.
- هزینۀ تعمیرات و نگهداری و هزینه‌های بالاسری از هر ماشین مشخص شده است. این هزینه‌ها برای هر ماشین در هر سلول و در هر دوره، صرف‌نظر از اینکه آیا دستگاه فعال یا غیرفعال است در نظر گرفته شده است.
- در این مسئله فرض می‌شود که در اولین دوره هیچ ماشینی در دسترس نیست و یک سیستم جدید باید راه‌اندازی شود؛ بنابراین در اولین دوره باید تعدادی از ماشین‌آلات به‌منظور برآورده‌کردن محدودیت ظرفیت ماشین‌آلات خریداری شود. در دورۀ بعدی اگر این ظرفیت از ماشین‌آلات نتواند پاسخگوی تقاضای این دوره باشد، تعدادی ماشین دیگر باید خریداری و به سیستم موردنظر اضافه شود.

مدل‌سازی ریاضی مسئله

در این بخش، مدل ریاضی دوهدفه با اهداف ماکزیمم‌سازی بهره‌وری گروهی و مینیمم‌سازی هزینه‌های سیستم ارائه می‌شود. در ابتدا نمادگذاری‌های استفاده‌شده توضیح داده می‌شود و سپس ارائۀ مدل ریاضی مفروض صورت می‌گیرد.

ثوابت

Q: تعداد قطعات

W: تعداد اپراتورها

M: تعداد ماشین‌آلات

C: تعداد سلول‌ها

T: تعداد دوره‌ها

اندیس‌ها

i:	قطعات اندیس	$(i = 1, 2, ..., Q)$
w:	اندیس اپراتورها	$(w = 1, 2, ..., W)$
m:	اندیس ماشین‌ها	$(m = 1, 2 ..., M)$
k:	اندیس سلول‌ها	$(k = 1, 2, ..., C)$
t:	اندیس دوره‌ها	$(t = 1, 2, ..., T)$

پارامترها

r_{imw}: اگر ماشین m توانایی انجام‌دادن عملیات روی قطعۀ i راه به‌کمک اپراتور w داشته باشد یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

a_{im}: اگر قطعۀ i به ماشین m نیاز داشته باشد یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

LM_k: حداقل تعداد ماشین‌آلات سلول k

LW_w: حداقل تعداد اپراتوران در سلول k

LP_k: حداقل تعداد قطعات در سلول k

AM_m: تعداد دردسترس ماشین m

AW_w: تعداد دردسترس اپراتور w

RW_{wt}: مدت‌زمان دردسترس‌بودن اپراتور w در دورهٔ t

RM_{mt}: مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین m در دورهٔ t

Ti_{imw}: مدت‌زمان عملیات قطعهٔ i روی ماشین m به‌کمک اپراتور w

D_{it}: میزان تقاضای قطعهٔ i در دورهٔ t

C_m: هزینهٔ خرید ماشین m

α_m: هزینه‌های تعمیرات و نگهداری ماشین m

β_m: هزینهٔ انجام‌دادن عملیات در واحد زمان ماشین m

δ_m^{ins}: هزینهٔ نصب ماشین m

δ_m^{Uni}: هزینهٔ از دور خارج‌کردن ماشین m

HI_{wt}: هزینهٔ استخدام اپراتور w در دورهٔ t

FI_{wt}: هزینهٔ اخراج اپراتور w در دورهٔ t

Sa_{wt}: هزینهٔ دستمزد اپراتور w در دورهٔ t

متغیرهای تصمیم

Y_{ikt}: اگر قطعهٔ i در سلول k و در دورهٔ t پردازش شود یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

Z_{wkt}: اگر اپراتور w به سلول k در دورهٔ t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

X_{mkt}: اگر ماشین m به سلول k در دورهٔ t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

G_{imwkt}: اگر قطعهٔ i به‌کمک ماشین m و اپراتور w در سلول k و در دورهٔ t پردازش شود یک و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

NW_{wt}: تعداد اپراتور w تخصیص‌یافته به سیستم در دورهٔ t

K_{mt}^{+}: تعداد ماشین m اضافه‌شده از انبار به سلول‌ها در دورهٔ t

K_{mt}^{-}: تعداد ماشین m خارج‌شده از سلول‌ها به انبار در دورهٔ t

K_{mt}^{p}: تعداد ماشین m خریداری‌شده در دورهٔ t

L_{wt}^{+}: تعداد اپراتور w اضافه‌شده به سلول‌ها در دورهٔ t

L_{wt}^{-}: تعداد اپراتور w خارج‌شده از سلول‌ها در دورهٔ t

مدل ریاضی

$$Max\,TVGE=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{P}D_{it}\left(\frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W}r_{imw}-\sum_{k=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W}\left[X_{mkt}\left(2-Y_{ikt}-Z_{wkt}\right)G_{imwkt}\right]}{\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W}r_{imw}+\sum_{k=1}^{C}\left[\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W}X_{mkt}.Y_{ikt}.Z_{wkt}-\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W}X_{mkt}.Y_{ikt}.Z_{wkt}.G_{imwkt}\right]}\right) \quad (۲)$$

$$\begin{aligned}Min\,TC=&\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}C_m.K_{mt}^{p}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\alpha_m.X_{mkt}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{C}\sum_{w=1}^{W}\sum_{m=1}^{M}\beta_m.Ti_{imw}.G_{imwkt}.D_{it}\\&+\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\delta_m^{ins}.K_{mt}^{+}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\delta_m^{Uni}.K_{mt}^{-}\\&+\sum_{t=1}^{T}\sum_{w=1}^{W}HI_{wt}.L_{wt}^{+}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{w=1}^{W}FI_{wt}.L_{wt}^{-}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{w=1}^{W}Sa_{wt}.NW_{wt}\end{aligned} \quad (۳)$$

:Subject to

$$\sum_{w=1}^{W}\sum_{i=1}^{I}G_{imwkt}.Ti_{imw}.D_{it}\leq X_{mkt}.RM_{mt} \qquad \forall m,k,t \quad (۴)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{I}G_{imwkt}.\mathrm{Ti}_{imw}.D_{it}\leq NW_{wt}.RW_{wt} \qquad \forall w,k,t \quad (۵)$$

$$\sum_{k=1}^{C}X_{mkt}=\sum_{k=1}^{C}X_{mk(t-1)}+K_{mt}^{+}-K_{mt}^{-}+K_{mt}^{P} \qquad \forall m,t \quad (۶)$$

$$NW_{wt} = NW_{w(t-1)} + L^{+}_{wt} - L^{-}_{wt} \qquad \forall w,t \qquad (۷)$$

$$K^{+}_{mt} \le \sum_{t=2}^{t-1} K^{-}_{mt} - \sum_{t=3}^{t-1} K^{+}_{mt} \qquad \forall m, t = 3,...,T \qquad (۸)$$

$$\sum_{k=1}^{C} X_{mkt} \le AM_{m} \qquad \forall m,t \qquad (۹)$$

$$\sum_{k=1}^{C} Z_{wkt} \le AW_{w} \qquad \forall w,t \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{w=1}^{W} Z_{wkt} \ge LW_{k} \qquad \forall k,t \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{m=1}^{M} X_{mkt} \ge LM_{k} \qquad \forall k,t \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i=1}^{I} Y_{ikt} \ge LP_{k} \qquad \forall k,t \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{k=1}^{C} Z_{wkt} = NW_{wt} \qquad \forall w,t \qquad (۱۴)$$

$$Y_{ikt} = \min(1, D_{it}) \qquad \forall i,t \qquad (۱۵)$$

$$G_{imwkt} \le r_{imw} \,.\, X_{mkt} \qquad \forall i,m,w,k,t \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{k=1}^{C} \sum_{w=1}^{W} G_{imwkt} = a_{im} \,.\sum_{k=1}^{C} Y_{ikt} \qquad \forall i,m,t \qquad (۱۷)$$

$$X_{mkt}\,, Z_{wkt}\,, Y_{ikt}\,, G_{imwkt} \in \{0,1\} \qquad \forall i,m,w,k,t \qquad (۱۸)$$

$$L^{+}_{wt}, L^{-}_{wt}, NW_{kt} \ge 0 \qquad \forall w,k,t \qquad (۱۹)$$

$$K^{+}_{mt}, K^{-}_{mt}, K^{p}_{mt} \ge 0 \qquad \forall m,t \qquad (۲۰)$$

در این مدل، رابطهٔ ۲ به دنبال ماکزیمم‌کردن بهره‌وری گروهی در کل دوره‌هاست. رابطهٔ ۳ نیز هزینهٔ کل سیستم را مینیمم می‌کند که شامل ۸ بخش است. بخش اول هزینهٔ خرید ماشین‌های جدیدی است که به ماشین‌های در دسترس اضافه می‌شود تا کمبود ظرفیت به‌وجودآمده به‌دلیل تغییر تقاضا کاهش یابد. بخش دوم هزینهٔ تعمیرات نگهداری ماشین و بخش سوم هزینهٔ متغیر ماشین است. بخش چهارم و پنجم هزینهٔ نصب و راه‌اندازی و هزینه از دور خارج‌کردن ماشین‌آلات و بخش ششم و هفتم هزینهٔ استخدام و اخراج اپراتورها هستند. بخش هشتم نیز هزینهٔ دستمزد اپراتورهاست. روابط ۴ و ۵ به‌ترتیب محدودیت مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین‌آلات و اپراتورها را تضمین می‌کند. براساس رابطهٔ ۶، تعداد ماشین m که در دورهٔ t استفاده می‌شود، برابر است با تعداد ماشین m استفاده‌شده در دورهٔ $t-1$ به اضافهٔ تعداد ماشین جدید m که در دورهٔ t خریداری می‌شود، به‌اضافه تعداد ماشین m که به سیستم آورده می‌شود منهای تعداد ماشین m که از سیستم در دورهٔ t خارج می‌شود. رابطهٔ ۷ تضمین می‌کند که تعداد اپراتور w

که در دورهٔ t استفاده می‌شود، برابر است با تعداد اپراتور w استفاده‌شده در دورهٔ $t-1$ بعلاوه تعداد اپراتور جدید w که در دورهٔ t به سیستم اضافه (استخدام) می‌شود، منهای تعداد اپراتور w که از سیستم در دورهٔ t خارج (اخراج) می‌شود. با توجه به رابطهٔ ۸، تعداد ماشین m که در دورهٔ t از انبار به سلول‌ها اضافه می‌شود، نباید بیشتر از تعداد ماشین موجود در انبار باشد. رابطهٔ ۹ تضمین می‌کند که تعداد کل ماشین m تخصیص داده‌شده به‌کل سلول‌ها نباید بیشتر از تعداد ماشین د دسترس m باشد. براساس رابطهٔ ۱۰، تعداد کل اپراتور w تخصیص داده‌شده به‌کل سلول‌ها نباید بیشتر از تعداد اپراتور دردسترس w باشد. روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ حداقل تعداد اپراتورها، ماشین‌آلات و قطعات را که در هر سلول می‌توان تخصیص داد مشخص می‌کنند. رابطهٔ ۱۴ تضمین می‌کند که تعداد کل اپراتورها w که در هر دوره به سلول‌های مختلف تخصیص داده می‌شود برابر است با تعداد اپراتور w تخصیص داده‌شده به سیستم در دورهٔ t. براساس رابطهٔ ۱۵ قطعهٔ i یا به یک سلول تخصیص داده می‌شود، یا اصلاً به هیچ سلولی در دورهٔ t تخصیص داده نمی‌شود. رابطهٔ ۱۶ تضمین می‌کند که زمانی عملیات قطعهٔ i توسط اپراتور w روی ماشین m در سلول k در دورهٔ t پردازش می‌شود که ماشین m در سلول k در دورهٔ t تخصیص داده شود و اپراتوری وجود داشته باشد که توانایی کار روی قطعهٔ i و ماشین m را داشته باشد. براساس رابطهٔ ۱۷، تنها یک اپراتور برای پردازش هر قطعه بر روی هر نوع دستگاه مربوط اختصاص داده می‌شود و البته این اطمینان را می‌دهد که این مدل برای انجام کارها با اپراتورها مختلف انعطاف‌پذیر است؛ یعنی اگر قطعه‌ای برای انجام عملیات به ماشین m نیاز داشته باشد، بیش از یک نوع اپراتور وجود دارد که توانایی خدمت‌رسانی به ماشین m را داشته باشد. براساس رابطهٔ ۱۸، این نوع متغیر تصمیم از نوع باینری و روابط ۱۹ و ۲۰ از نوع متغیر تصمیم عدد صحیح هستند.

در این بخش، تابع هدف مدل ریاضی پیشنهادی خطی‌سازی می‌شود. رویهٔ خطی‌سازی شامل دو لم است که به‌صورت مفصل در ادامه اثبات خواهد شد. عبارات غیرخطی در تابع هدف حاصل‌ضرب متغیرهای تصمیم باینری است که با استفاده از متغیرهای باینری کمکی E_{imwkt}، F_{imwkt}، S_{imwkt} ، H_{imwkt}، L_{imwkt} خطی‌سازی می‌شوند.

خطی‌سازی

لم ۱. برای خطی‌سازی مدل از متغیرهای کمکی جدیدی به‌صورت صفر و یک شامل $E_{imwkt} = X_{mkt}G_{imwkt}$ و $F_{imwkt} = X_{mkt}Y_{ikt}Z_{wkt}$ استفاده می‌کنیم. استفاده از متغیرهای کمکی جدید مستلزم افزودن محدودیت‌های زیر به مدل است.

$$E_{imwkt} \geq X_{mkt} + G_{imwkt} - 1.5 \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۱}$$

$$1.5 \times E_{imwkt} \leq X_{mkt} + G_{imwkt} \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۲}$$

$$F_{imwkt} \geq X_{mkt} + Y_{ikt} + Z_{wkt} - 2.5 \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۳}$$

اثبات ۱. ابتدا ثابت می‌کنیم که افزودن متغیر کمکی باینری E_{imwkt} را می‌توان با افزودن محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ در مدل جایگزین کرد. دو حالت زیر را درنظر بگیرید:

مورد ۱: $X_{mkt}G_{imwkt} = ۱$

این مورد زمانی رخ می‌دهد که $X_{mkt} = G_{imwkt} = ۱$؛ بنابراین محدودیت ۲۱ که به‌صورت $E_{imwkt} \geq ۰/۵$ درخواهد آمد تضمین می‌کند که $E_{imwkt} = ۱$.

مورد ۲: $X_{mkt}G_{imwkt} = ۰$

این مورد در اثر یکی از موارد زیر می‌تواند رخ دهد:

$X_{mkt} = ۰$ و $G_{imwkt} = ۱$

$X_{mkt} = ۱$ و $G_{imwkt} = ۰$

$X_{mkt} = ۰$ و $G_{imwkt} = ۰$

در تمامی این موارد داریم $E_{imwkt} = ۰$، زیرا محدودیت ۲۱ که اکنون به‌صورت ۱/۵- یا $E_{imwkt} \geq -۰/۵$ است، تضمین می‌کند که $E_{imwkt} = ۰$. همین رویه برای متغیر کمکی باینری F_{imwkt} نیز صادق است.

لم ۲. عبارات غیرخطی در مدل ریاضی تابع هدف با استفاده از $S_{imwkt} = F_{imwkt}G_{imwkt}$ ، $H_{imwkt} = Y_{ikt}E_{imwkt}$ ، $L_{imwkt} = Z_{wkt}E_{imwkt}$ تحت محدودیت‌های زیر خطی‌سازی می‌شوند.

$$S_{imwkt} \geq F_{imwkt} + G_{imwkt} - 1.5 \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۴}$$

$$1.5 \times S_{imwkt} \leq F_{imwkt} + G_{imwkt} \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۵}$$

$$H_{imwkt} \geq Y_{ikt} + E_{imwkt} - 1.5 \quad \forall i,m,w,k,t; \tag{۲۶}$$

$1.5 \times H_{imwkt} \le Y_{ikt} + E_{imwkt}$ $\quad \forall i, m, w, k, t;$ (۲۷)

$L_{imwkt} \ge Z_{wkt} + E_{imwkt} - 1.5$ $\quad \forall i, m, w, k, t;$ (۲۸)

$1.5 \times L_{imwkt} \le Z_{wkt} + E_{imwkt}$ $\quad \forall i, m, w, k, t;$ (۲۹)

دو حالت زیر را درنظر بگیرید:

مورد ۱: $F_{imwkt}G_{imwkt} = 1$

مورد ۱ زمانی رخ می‌دهد که $F_{imwkt} = G_{imwkt} = 1$؛ بنابراین محدودیت ۲۴ که به‌صورت $S_{imwkt} \ge 0/5$ درخواهد آمد تضمین می‌کند که $S_{imwkt} = 1$.

مورد ۲: $F_{imwkt}G_{imwkt} = 0$

این مورد در اثر یکی از موارد زیر می‌تواند رخ دهد:

$F_{imwkt} = 0$ و $G_{imwkt} = 1$

$F_{imwkt} = 1$ و $G_{imwkt} = 0$

$F_{imwkt} = 0$ و $G_{imwkt} = 0$

در تمامی این موارد داریم $S_{imwkt} = 0$؛ زیرا محدودیت ۲۵ به‌صورت $1.5 \times S_{imwkt} \le 0$ یا ۱ درخواهد آمد. همین رویه برای متغیرهای کمکی H_{imwkt} و L_{imwkt} نیز صادق است.

همچنین عبارت $min(1, D_{it})$ در محدودیت 15 غیرخطی است و می‌تواند با محدودیت‌های خطی زیر جایگزین شود:

$\sum_{k=1}^{C} Y_{ikt} \le 1$ $\quad \forall i, t;$ (۳۰)

$D_{it} \le A \times \sum_{k=1}^{C} Y_{ikt}$ $\quad \forall i, t;$ (۳۱)

$D_{it} \ge \sum_{k=1}^{C} Y_{ikt}$ $\quad \forall i, t;$ (۳۲)

روش دقیق اپسیلون – محدودیت

به‌احتمال زیاد روش اپسیلون- محدودیت بهترین روش برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفهٔ گسسته است. این روش را اولین بار هایمس و همکاران [۱۷] معرفی کردند که پس از این در کتاب چانکونگ و هایمس [۱۸] به‌طور مفصل تشریح شد، اما این روش هیچ‌گونه تضمینی در یافتن جبههٔ پارتوی بهینه ندارد؛ زیرا روش اپسیلون- محدودیت تنها سعی در بهینه‌سازی تابع هدف اصلی دارد و هیچ‌گونه توجهی به بهینه‌سازی سایر توابع هدف که به‌صورت محدودیت درآمده‌اند ندارد؛ به‌طوری‌که در بیشتر موارد مقادیر آن‌ها در هر تکرار برابر حد بالای تعریف‌شده آن‌ها می‌شود؛ یعنی $f_2 = \varepsilon_2^k, \dots, f_p = \varepsilon_p^k$.

برای جلوگیری از چنین رویدادی، روش اپسیلون-محدودیت تقویت‌شده، توابع هدف تبدیل‌شده به محدودیت‌های نامساوی را با معرفی متغیرهای مازاد مثبت به مجموعه‌ای از تساوی‌ها تبدیل می‌کند، سپس به تقویت تابع هدف با افزودن مجموع مقادیری که این متغیرهای مازاد می‌گیرند می‌پردازد. بنا بر گفته‌های فوق، روش اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده را می‌توان از روی روش اپسیلون- محدودیت معمولی به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} & Max\left\{ f_1(x) + \delta \times (s_2 + s_3 + \dots + s_p) \right\} \\ & \text{Subject to} \quad f_2(x) - s_2 = \varepsilon_2, \\ & \qquad f_3(x) - s_3 = \varepsilon_3, \dots, \\ & \qquad f_p(x) - s_p = \varepsilon_p, \\ & x \in S, s_i \in R^+ \end{aligned} \quad (۳۳)$$

در رابطهٔ ۳۷ معمولاً مقدار δ عدد کوچکی بین 10^{-3} تا 10^{-6} انتخاب می‌شود. همین تغییرات ساده سبب می‌شود که روش اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده به جبههٔ پارتوی بهینه بینجامد. این روش را ماوروتاس [۱۹] ارائه کرد و اثبات بهینگی آن نیز در مقالهٔ وی به تشریح مطرح شده است.

روش اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده اصلاح‌شده برای حل مدل پیشنهادی

این روش اندکی از روش اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده بهبود یافته است؛ بدین‌صورت که در روش اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده، توالی بهینه‌سازی توابع هدف $f_2 - f_p$ برای ما بی‌اهمیت است؛ یعنی اولویتی برای بهینه‌سازی توابع هدف وجود ندارد. درحالی‌که در روش بهبودیافتهٔ اپسیلون- محدودیت تقویت‌شده توالی بهینه‌سازی توابع هدف ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال در این رابطه ابتدا به‌دنبال بهینه‌سازی تابع هدف f_1 و به همین ترتیب توابع هدف $f_2, f_3, \dots$ خواهیم بود

$$\text{Max}\left\{ \begin{array}{l} f_1(x) + \delta \times (s_2/r_2 + 10^{-1} \times s_3/r_3 \\ + \dots + 10^{-(p-2)} \times s_p/r_p) \end{array} \right\} \quad (۳۴)$$

روش لکزیکوگراف

به‌منظور اجرای روش اپسیلون-محدودیت، باید بازهٔ توابع هدف را بیابیم. بدین‌منظور از روش لکزیکوگراف برای پیداکردن $m-1$ تابع هدفی که در محدودیت قرار می‌گیرد استفاده می‌کنیم. به‌طورکلی روش لکزیکوگراف به‌صورت زیر

اجرا می‌شود: ابتدا اولین تابع هدفی که اولویت بالاتری از نظر تصمیم‌گیرنده دارد بهینه می‌شود، $\max f_1 = z_1^*$، سپس تابع هدف دوم به‌منظور حفظ تابع هدف اول در حالت بهینگی با اضافه‌کردن محدودیت $f_1 = z_1^*$ بهینه می‌شود. فرض می‌کنیم $\max f_2 = z_2^*$، سپس بهینه‌کردن تابع هدف سوم به‌منظور حفظ جواب‌های بهینهٔ قبلی با اضافه‌کردن محدودیت‌های $f_1 = z_1^*$ و $f_2 = z_2^*$ صورت می‌گیرد و همین روند برای توابع هدف بعدی به‌کار می‌رود.

حل مثال عددی

این مثال شامل ۲ سلول، ۴ ماشین، ۴ قطعه و ۳ اپراتور است. داده‌های مربوط به ماتریس قطعه- ماشین و ماتریس اپراتور- ماشین به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است. با توجه به جدول ۱، قطعه ۳ به‌کمک ماشین‌های ۱ و ۳ می‌تواند پردازش شود، همچنین مقدار تقاضای هر قطعه در هر دوره آمده شده است. جدول ۲ توانایی اپراتورها در انجام کار با ماشین‌های مختلف را نشان می‌دهد؛ برای مثال، اپراتور ۱ توانایی کار با ماشین‌های ۱ و ۳ را دارد. همچنین در این جدول، داده‌های مربوط به هزینهٔ اپراتورها در هر دوره آمده است. زمان پردازش عملیات در جدول ۳ مشاهده می‌شود. جدول ۴ اطلاعات مربوط به ماشین مانند تعداد ماشین دردسترس، هزینهٔ عملیاتی، هزینهٔ خرید ماشین، هزینهٔ تعمیرات نگهداری، هزینهٔ نصب و از دور خارج‌کردن ماشین‌آلات و مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین‌آلات آمده است.

مثال فوق به‌کمک روش مطرح‌شده حل شده و ۳ پاسخ پارتو F_1=(۳۳۷۰،۱۰۲۸۲۷/۳۳)، (۱۰۳۰۸۷/۳۴۲۸،۸۶/۶۷) =F_2 و F_3 = (۴۱۶۶،۱۰۳۴۴۳/۳۳) به‌دست آمده است. این پاسخ‌ها را تنها تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌کند و هیچ اولویتی برای انتخاب آن‌ها وجود ندارد. در جدول ۵، تخصیص قطعات، ماشین‌آلات و اپراتورها به سلول‌های مختلف برای ۳ پاسخ فوق آمده است.

جدول ۱. ماتریس قطعه- ماشین

		Machine type				D_{i1}	D_{i2}	D_{i3}
		۱	۲	۳	۴			
Part type	۱	۱	۰	۱	۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰
	۲	۰	۱	۰	۰	۲۰۰	۰	۵۰۰
	۳	۱	۰	۱	۰	۴۰۰	۹۸۰	۰
	۴	۰	۰	۰	۱	۷۰۰	۷۵۰	۳۰۰

جدول ۲. ماتریس اپراتور- ماشین

		Machine type				Worker information											
		۱	۲	۳	۴	AW_w	SA_{w1}	SA_{w2}	SA_{w3}	HI_{w1}	HI_{w2}	HI_{w3}	FI_{w2}	FI_{w3}	RW_{w1}	RW_{w2}	RW_{w3}
Worker	۱	۱	۰	۱	۰	۲	۴۳۵	۴۴۰	۵۰۰	۲۴۰	۲۶۰	۲۸۵	۱۴۵	۱۵۰	۳۰	۳۰	۳۰
	۲	۰	۱	۰	۰	۲	۴۶۰	۴۸۵	۴۹۰	۲۶۰	۲۹۰	۲۹۵	۱۴۵	۱۵۰	۳۰	۳۰	۳۰
	۳	۱	۰	۱	۱	۲	۴۵۰	۴۶۵	۵۰۰	۲۶۵	۲۷۰	۲۸۵	۱۵۵	۱۶۰	۳۰	۳۰	۳۰

جدول ۳. زمان پردازش عملیات

	Part 1			Part 2			Part 3			Part 4		
	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
M_1	۰/۰۴		۰/۰۲				۰/۰۲		۰/۰۳			
M_2					۰/۰۳							
M_3	۰/۰۱		۰/۰۲							۰/۰۳		۰/۰۴
M_4								۰/۰۳	۰/۰۴		۰/۰۲	۰/۰۴

جدول ۴. زمان پردازش عملیات

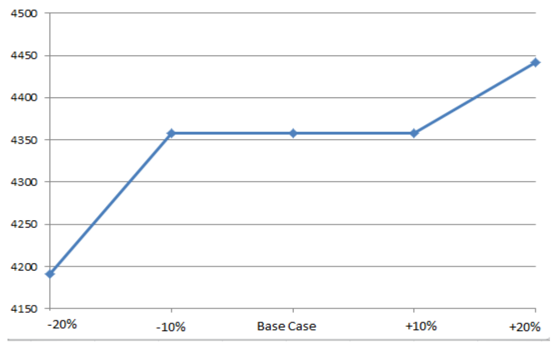
Machine type	Machine information								
	AM_M	α_m	C_m	β_m	δ_m^{ins}	δ_m^{uni}	RM_{m1}	RM_{m2}	RM_{m3}
۱	۲	۶۲۰	۱۵۰۰۰	۲۰	۴۵۰	۱۴۰	۳۰	۳۰	۳۰
۲	۲	۸۱۰	۲۰۰۰۰	۳۰	۴۳۰	۱۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۳	۲	۷۳۰	۱۸۰۰۰	۲۵	۴۶۰	۱۵۰	۳۰	۳۰	۳۰
۴	۲	۶۷۰	۱۷۰۰۰	۲۸	۴۵۰	۱۶۰	۳۰	۳۰	۳۰

جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم استفاده‌شده برای حل مثال

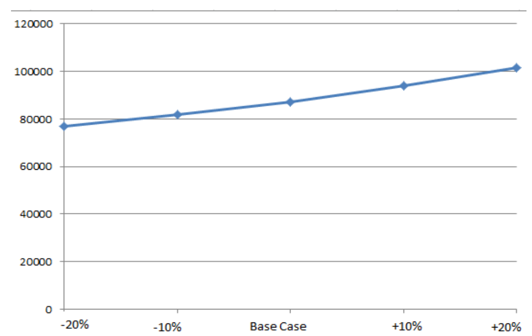
Period	Seed	Parts assigned to		Machines assigned to		Worker assigned to	
		Cell 1	Cell 2	Cell 1	Cell 2	Cell 1	Cell 2
Period 1	F_1	۱,۲,۳	۴	۱,۲,۳	۴	۲	۳
	F_2	۱,۲,۳	۴	۱,۲,۳	۴	۱,۲	۳
	F_3	۱,۲,۳	۴	۱,۲,۳	۴	۲	۳
Period 2	F_1	۱,۳	۴	۱,۳	۱,۴	۱	۳
	F_2	۴	۱,۳	۱,۴	۱,۳	۳	۳
	F_3	۱	۳,۴	۱,۳	۱,۴	۳	۳
Period 3	F_1	۲	۱,۴	۲	۱,۳,۴	۲	۳
	F_2	۲	۱,۴	۲	۱,۳,۴	۲	۳
	F_3	۱,۴	۲	۱,۳,۴	۲	۳	۲

تحلیل حساسیت

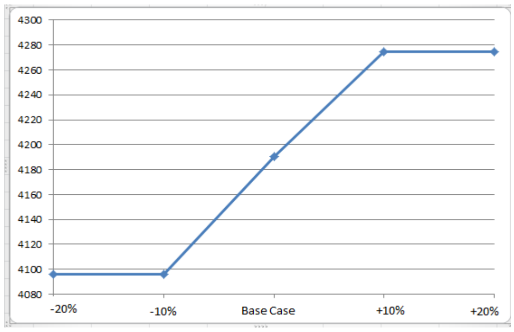
در این بخش، تحلیل حساسیت دربارهٔ برخی پارامترهای مهم مسئله صورت گرفته است. به همین منظور تأثیر تغییرات دو پارامتر مهم مدل یعنی تقاضا و مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین‌ها بر روی دو هدف مسئله بررسی شده است. شکل ۱ نشان‌دهندهٔ رفتار تغییراتی تابع هدف بهره‌وری گروهی در مقایسه با افزایش یا کاهش مقدار تقاضاست. به ازای ۱۰ درصد افزایش یا کاهش میزان تقاضا، تغییرات ملموسی مشاهده نشده است؛ در صورتی که با افزایش ۲۰ درصد میزان تقاضا بهره‌وری گروهی افزایش و با کاهش ۲۰ درصد تقاضا بهره‌وری گروهی کاهش خواهد یافت. شکل ۲ نشان‌دهندهٔ رفتار تغییراتی تابع هدف هزینه کل در مقایسه با افزایش یا کاهش مقدار تقاضاست. براین‌اساس با افزایش میزان تقاضا، هزینهٔ کل افزایش می‌یابد و با کاهش آن هزینهٔ کل کم می‌شود که این تغییرات به‌صورت خطی است.



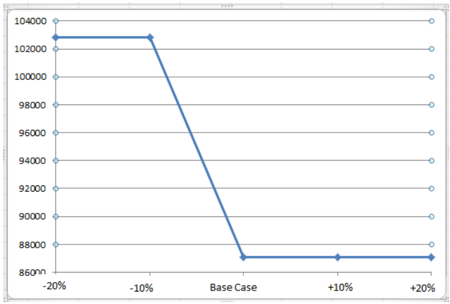
شکل ۱. تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا بر تابع هدف بهره‌وری گروهی



شکل ۲. تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا بر تابع هدف هزینهٔ کل



شکل ۳. تحلیل حساسیت پارامتر مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین بر بهره‌وری گروهی



شکل ۴. تحلیل حساسیت پارامتر مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین بر هزینهٔ کل

شکل ۳ نشان‌دهندهٔ رفتار تغییراتی تابع هدف بهره‌وری گروهی در مقایسه با افزایش یا کاهش پارامتر مدت‌زمان دردسترس بودن ماشین است. براین‌اساس، به‌طورکلی با تغییر پارامتر مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین در بازه ۱۰ درصد- تا ۱۰ درصد، رفتار تابع هدف بهره‌وری گروهی به‌صورت خطی است و به ازای مقادیر خارج از این بازه تغییرات ملموسی مشاهده نمی‌شود. شکل ۴ نشان‌دهندهٔ رفتار تغییراتی تابع هدف هزینهٔ کل در مقایسه با افزایش یا کاهش مقدار مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین است. براساس این شکل، با کاهش مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین، هزینهٔ کل افزایش می‌یابد، اما با افزایش این پارامتر میزان هزینهٔ کل تغییری نمی‌کند. باید توجه داشت که با کاهش بیش از ۱۰ درصد مدت‌زمان دردسترس‌بودن ماشین، تابع هدف هزینه رفتار ثابتی دارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل ریاضی دوهدفه برای آرایش سلولی بر پایهٔ افزایش میزان بهره‌وری گروهی در محیطی پویا با درنظرگرفتن تخصیص اپراتور ارائه شد. مدل پیشنهادی چندین ویژگی طراحی مانند زمان انجام‌دادن عملیات، چندین اپراتور برای یک کار، از دور خارج‌کردن ماشین‌آلات بیکار از سیستم یا برگرداندن آن‌ها به سیستم تولیدی، ظرفیت ماشین، تعداد اپراتور دردسترس، جابه‌جایی بین سلولی برای قطعات و اپراتورها و پیکربندی مجدد سیستم را به‌طور همزمان ادغام می‌کند. این مدل می‌تواند بهترین آرایش سلول و تخصیص اپراتور را برای هر قطعه در هر دوره در طول دورهٔ برنامه‌ریزی مشخص کند. رابطهٔ غیرخطی این مدل ریاضی به‌کمک تعدادی از متغیرهای کمکی، خطی و عملکرد مدل پیشنهادی با مثالی بررسی شد. زمان حل موردنیاز برای به‌دست‌آوردن پاسخ بهینهٔ این مثال نشان می‌دهد دستیابی به پاسخ بهینه در زمانی معقول از نظر محاسباتی پیچیده است؛ بنابراین باید برای حل مدل پیشنهادی در مثال‌های بزرگ‌تر از رویکرد ابتکاری یا فراابتکاری استفاده کرد.

منابع

1. Mitranov, S. P. (1966). The Scientific Principles of Group Technology. National Lending Library For Science and Technology (Great Britain)
2. Burbidge, J. L. (1971). "Production Flow Analysis", Production Engineer, Vol. 4, No. 50, PP. 139-152.
3. Heragu, S. S. (1994). "Group Technology and Cellular Manufacturing", Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, Vol. 24, No. 2, PP. 203-215.
4. Wemmerlöv, U., and Hyer, N. L. (1989). "Cellular Manufacturing in the US Industry: A Survey of Users", The International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 9, PP. 1511-1530.
5. Mahdavi, I. et al. (2007). "Designing a New Mathematical Model for Cellular Manufacturing System Based on Cell Utilization", Applied Mathematics and Computation, Vol. 190, No. 1, PP. 662-670.
6. Mahdavi, I., and Mahadevan, B. (2008). "CLASS: An Algorithm for Cellular Manufacturing System and Layout Design Using Sequence Data", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 24, No. 3, PP. 488-497.

7. Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., and Sassani, F. (2008). “A New Solution for a Dynamic Cell Formation Problem wth Alternative Routing and Machine Costs Using Simulated Annealing”, Journal of the Operational Research Society, Vol. 59, No. 4, PP. 443-454.
8. Mahdavi, I. et al. (2009). “Genetic Algorithm Approach for Solving a Cell Formation Problem in Cellular Manufacturing”, Expert Systems with Applications, Vol. 36, No. 3, PP. 6598-6604.
9. Paydar, M. M., and Saidi-Mehrabad, M. (2013). “A Hybrid Genetic-Variable Neighborhood Search Algorithm for the Cell Formation Problem Based on Grouping Efficacy”, Computers and Operations Research, Vol. 40, No. 4, PP. 980-990.
10. Aryanezhad, M. B., Deljoo, V., and Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J. (2009). “Dynamic Cell Formation and the Worker Assignment Problem: A New Model”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 41, No. 3-4, PP. 329-342.
11. Bajestani, M. A. et al. (2009). “A Multi-Objective Scatter Search for A Dynamic Cell Formation Problem”, Computers and Operations Research, Vol. 36, No. 3, PP. 777-794.
12. Bagheri, M., and Bashiri, M. (2014). “A New Mathematical Model Towards the Integration of Cell Formation with Operator Assignment and Inter-Cell Layout Problems in a Dynamic Environment”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, No. 4, PP. 1237-1254.
13. Mahdavi, I. et al. (2012). “A New Mathematical Model for Integrating All Incidence Matrices in Multi-Dimensional Cellular Manufacturing System”, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 31, No. 2, PP. 214-223.
14. Paydar, M. M., and Saidi-Mehrabad, M. (2015). “Revised Multi-Choice Goal Programming for Integrated Supply Chain Design and Dynamic Virtual Cell Formation with Fuzzy Parameters”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 28, No. 3, PP. 251-265.
15. Mahdavi, I. et al. (2010). “Designing a Mathematical Model for Dynamic Cellular Manufacturing Systems Considering Production Planning and Worker Assignment”, Computers and Mathematics with Applications, Vol. 60, No. 4, PP. 1014-1025.
16. Kia, R. et al. (2013). “A Simulated Annealing for Intra-Cell Layout Design of Dynamic Cellular Manufacturing Systems with Route Selection, Purchasing Machines and Cell Reconfiguration”, Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 30, No. 4.
17. Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., and Wismer, D. A. (1971). “On A Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization”, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol. 1, No.۳, PP. 296-297.
18. Chankong, V., and Haimes, Y. Y. (1983). Multi-Objective Decision Making: Theory and Methodology. North-Holland.
19. Mavrotas, G. (2009). “Effective Implementation of the E-Constraint Method in Multi-Objective Mathematical Programming Problems”, Applied Mathematics and Computation, Vol. 213, No. 2, PP. 455-465.

واژه‌های انگلیسی به‌ترتیب استفاده در متن

1. Group Technology
2. Cell configuration
3. Grouping efficacy
4. Dynamic cellular manufacturing systems
5. Operator assignment