

Developing the dynamic cell formation and production planning considering the inter/intra-cell material handling equipment

(Document Type: Research Paper)

Ahmad Sadegheih*

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
sadegheih@yazd.ac.ir

Saeed Dehnavi-Arani

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
saeed.dehnavi86@gmail.com

Abstract: In this paper, a new integrated mathematical model of the production planning and dynamic cellular manufacturing system (DCMS) wherein the product mix and/or volume is different from one period to another has been developed. So far, literature review indicates that the key role of Material Handling Equipment (MHE) has not been considered in the developed model, while ignoring such role will lead to wrong results. In other words, ignoring characteristics such as MHE capacity and inter and intra-cell movement times cannot be justifiable especially in shops in which, the movement times for parts are considerable compared to their processing times. The proposed model covers concepts such as inter/intra-cell movement, reconfiguration, subcontracting, inventory and backorder, lead time for subcontracted parts, optimal lot sizing in each period, number of inter/intra-cell MHE assigned to manufacturing system, number of MHE purchased and sold in each period and price of purchasing/selling for each inter/intra-cell MHE. A numerical example and sensitivity analysis have been used to verify the proposed mathematical model.

Keywords: Dynamic Cellular Manufacturing System, Dynamic Cell Formation Problem, Material Handling Equipment, Production Planning

Introduction: Due to the global market competition, the manufacturing systems are changing from traditional configurations such as flow shop and job shop toward structures such as Cellular Manufacturing System (CMS). On the other hand, customer demands are different from one period to another. In such conditions, companies that use CMS should change their cell configurations every period. In other words, a new Dynamic Cell Formation Problem (DCFP) is needed to be performed for each period. The objective is to handle a DCFP together with a production planning policy by manufacturers. This integrated problem was proposed by Bulgak and Bektas (2009) for the first time. They developed a mixed integer nonlinear mathematical model and solved several computational examples by CPLEX. In another study, Safaee and Tavakkoli Moghaddam (2009) studied an integrated model of DCFP and production planning. Their model included the outsourcing and lead time concepts together. Then, other studies proposed DCFP and production planning together with others subjects such as worker assignment, machine breakdown, company layout, etc. In this paper, the roles of inter/intra cell Material Handling Equipment (MHE) and DCFP and production planning are studied, simultaneously.

* Corresponding author

Copyright © 2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

Mehodology/Approach: First, a new mixed integer nonlinear mathematical model is proposed considering DCFP, production planning and the role of inter/intra cell MHE. Due to the complexity of nonlinear models, a transformation is occurred from the nonlinear developed model to a linear one. Then, the linear model is coded in commercial software named ‘GAMS’. Several examples are run on GAMS to validate the proposed model. Finally, the sensitivity analysis is performed on a number of important parameters.

Findings and Discussion: In order to illustrate the effect of MHE on the DCFP and production planning, two numerical examples were investigated with and without MHE. The first difference between these two examples was in objective function value as represented in Table 3 regardless of MHE and in Table 5 regarding MHE. The second difference was in production planning as it addressed in Table 4 regardless of MHE and Table 6 regarding MHE. The third difference was in cell configuration as represented in Figure 2. Finally the forth difference was in the number of MHE used in manufacturing system regardless and regarding MHE as addressed in Tables 7 and 8, respectively. All Tables and Figures proved that MHE management can play an effective role in a manufacturing system.

Conclusion: In this paper, the integrated model of DCFP, production planning and MHE was investigated. A mixed integer nonlinear mathematical model was developed and then transformed into a linear one. To validate the proposed model, a numerical example was presented and this example was solved without and with MHE. Finally, a sensitivity analysis was performed on a number of important parameters.

References

- Defersha, F. M., & Chen, M. (2006). “A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems”. *International Journal of Production Economy*, 103(2), 767-783.
- Saidi-Mehrabad, M., & Safaei, N. (2007). “A new model of dynamic cell formation by a neural approach”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9), 1001-1009.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M.B., Safaei, N., & Azaron, A. (2005). “Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics”. *Applied Mathematical Computation*, 170(2), 761-780.

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۰، پیاپی ۱۹، شماره ۲، پاییز زمستان ۱۳۹۸

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

صص: ۵۵-۷۳ (نوع مقاله: پژوهشی)

توسعه مسئله یکپارچه تشکیل سلولی پویا و برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن وسایل جابه‌جاکننده مواد بین و درون سلول‌ها

احمد صادقیه^{۱*}، سعید دهنوی آرانی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، sadegheih@yazd.ac.ir

۲- دانشجوی دکترای صنایع، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه یزد، یزد، ایران، saeed.dehnavi86@gmail.com

چکیده: در این مقاله مدل ریاضی یکپارچه جدیدی از سیستم تولید سلولی پویا و برنامه‌ریزی تولید، توسعه داده شده است که ترکیب یا حجم محصول از یک دوره نسبت به دوره دیگر متفاوت است. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده هیچ‌یک از مقالات پیشین در رابطه با مسئله تشکیل سلول پویا، نقش کلیدی تجهیزات جابه‌جایی مواد را در توسعه مدل‌های خود در نظر نگرفته‌اند؛ درحالی‌که نادیده گرفتن نقش این وسایل نتایج اشتباهی از واقعیت را به دنبال خواهد داشت. به عبارت دیگر، نادیده گرفتن برخی از ویژگی‌ها نظیر ظرفیت تجهیزات و زمان حرکت درون و بین سلولی وسایل جابه‌جاکننده توجه‌پذیر نیست؛ به‌ویژه در کارگاه‌هایی که نمی‌شود از مدت زمان جابه‌جایی قطعات بین ایستگاه‌ها چشم‌پوشی کرد. مدل پیشنهادی این مقاله مفاهیمی نظیر حرکت درون سلولی و بین سلولی، پیکربندی مجدد، قرارداد فرعی، موجودی و سفارش معوق، زمان انتظار برای قطعات در قراردادهای فرعی، مقدار و حجم تولید بهینه در هر دوره، تعداد تجهیزات درون و بین سلولی تخصیص داده شده به سیستم تولید، تعداد تجهیزات خریداری و فروخته شده در هر دوره و قیمت خرید / فروش برای هر یک از تجهیزات درون سلولی و بین سلولی را پوشش می‌دهد. مدل ریاضی پیشنهادی با یک مثال عددی و تحلیل حساسیت مربوطه اعتبارسنجی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید سلولی پویا، مسئله تشکیل سلول پویا، سیستم جابه‌جایی مواد، برنامه‌ریزی تولید

مقدمه

به دلیل وجود بازار جهانی رقابتی، شرکت‌های تولیدی در حال تغییر طرح سیستم‌های تولیدی از پیکربندی‌های سنتی نظیر جریان کارگاهی و تولید کارگاهی به سمت پیکربندی‌های جدید نظیر سیستم تولید سلولی (CMS^۱) هستند. سیستم‌های تولید سلولی مفاهیم تکنولوژی گروهی با کاربرد صنعتی (GT^۲) هستند که نه تنها شامل مزایای حجم تولید و کارایی جریان کارگاهی‌ها هستند، دربرگیرنده تنوع محصول و انعطاف‌پذیری تولید کارگاهی‌ها نیز هستند؛ باین حال CMS دارای چندین مزایای مهم نظیر کاهش در موجودی در جریان ساخت، زمان‌های راه‌اندازی، زمان بازده، هزینه‌های جابه‌جایی مواد، ساده‌سازی زمان‌بندی و بهبود کیفیت است (ومبرلوف^۳ و هیر^۴، ۱۹۸۷).

در منابع و مطالعات، طراحی CMS به چهار مسئله اصلی طبقه‌بندی می‌شود که شامل ۱- مسئله تشکیل سلول (CFP^۵)؛ ۲- مسئله طرح‌بندی درون‌سلولی و بین‌سلولی؛ ۳- مسئله زمان‌بندی گروهی و ۴- مسئله تخصیص منبع است. مسئله CFP نخستین مرحله در CMS برای ایجاد مجموعه‌ای از سلول‌های ماشینی و خانواده‌های قطعات متناظر با هدف بهینه‌سازی تابع هدف است. مقالات نخست در خصوص CMS که موسوم به CMS کلاسیک است، فرض کرده‌اند ترکیب محصول و تقاضای قطعه در افق برنامه‌ریزی ثابت است؛ اگرچه در محیط واقعی پویا یک افق برنامه‌ریزی به چندین دوره کوچک‌تر تقسیم‌شدنی است و در آن هر دوره دارای ترکیب محصول و حجم تقاضای قطعه متفاوتی است. باین حال راه‌حل بهینه برای CFP در دوره جاری برای دوره بعدی کارآمد و بهینه نیست (صفایی و همکاران، ۲۰۰۸). در نتیجه مفهوم سیستم تولید سلولی پویا (DCMS^۶) به وسیله آرهیل^۷ و همکاران (۱۹۹۶) برای توسعه راه‌حل بهینه برای هر دوره با توجه به تقاضای آن دوره و غلبه بر معایب CMS کلاسیک معرفی شد. در DCMS راه‌حل بهینه CFP از طریق پیکربندی مجدد سلول تولیدی برای هر دوره به دست می‌آید. در واقع پیکربندی مجدد متشکل از جابه‌جایی ماشین‌های موجود در سیستم سلول، افزودن ماشین‌های جدید به سلول‌ها و حذف ماشین‌های موجود از سلول‌ها است. به علاوه مسائل برنامه‌ریزی تولید نظیر قرارداد فرعی، موجودی و سفارش معوق، اندازه و حجم تولید بهینه و زمان انتظار سفارش در DCMS قرار داده می‌شود (بولگاک^۸ و بکتاس^۹، ۲۰۰۹). در این مقاله اقدام به تلفیق برنامه‌ریزی تولید و DCMS در یک مدل ریاضی جامع با توجه به نقش وسایل جابه‌جایی مواد (MHE) درون و برون‌سلولی شده است که به ترتیب مسئول انتقال قطعات بین سلول‌ها و درون سلول‌ها هستند. در طی چهاردهم گذشته پژوهش‌های زیادی در رابطه با مسائل اصلی CMS انجام شده و در عین حال منابع مربوط به این رشته بسیار غنی است. در همه مقالات منتشر شده قبل از ۱۹۹۵ مسائل CMS همانند CFP‌ها در شرایط ایستایی در نظر گرفته شده‌اند. در این مسائل سلول‌ها برای یک دوره زمانی تشکیل می‌شوند و ترکیب و تقاضای محصول ثابت است. به دلیل شرایط پویای محیط کسب‌وکار امروزی که در آن ترکیب محصول و تقاضای قطعات در هر دوره زمانی متفاوت از بقیه دوره‌ها است، CMS کلاسیک با در نظر گرفتن شرایط ایستا پاسخگو نیست و نیاز به مدل‌هایی با در نظر گرفتن شرایط نوسانی امروزی است. از روش‌های مناسب برای حل این مسئله در CMS، مسئله تشکیل سلولی پویا (DCFP) است. طی دهه‌های اخیر علاقه زیادی به انجام پژوهش‌ها در توسعه مدل‌ها و راه‌حل‌ها برای DCFP مشاهده شده است؛ برای مثال بالاکریشن^{۱۰} و هوانگ چنگ^{۱۱} (۲۰۰۵) چارچوب انعطاف‌پذیری برای مدل‌سازی تولید سلولی در یک DCFP طراحی کردند. آنها برای برآورده کردن تقاضای پویا از دو مرحله استفاده کردند؛ مرحله نخست شامل پیکربندی سلول بهینه در محیط ایستا است و مرحله دوم شامل به‌کارگیری برنامه‌ریزی پویا با استفاده از هزینه جابه‌جایی مواد بهینه مرحله نخست برای به دست آوردن راه‌حل بهینه در شرایط پویا است (بالاکریشن و

هوانگ چنگ، ۲۰۰۵). توکلی-مقدم و همکاران (۲۰۰۵) مدلی ریاضی برای DCFP ارائه کردند. در مدل آنها تقاضاها پویا ولی قطعی است. آنها طرح‌های جایگزین (انعطاف‌پذیری مسیریابی) و تعداد متغیری از مفاهیم سلول را در مدل DCFP برای نخستین بار اضافه کردند (توکلی مقدم و همکاران، ۲۰۰۵- الف). در مقاله دیگری، این پژوهشگران از مدل قبلی خود در مقاله توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۵ الف) با انضمام هزینه عملیاتی برای هر ماشین استفاده کردند (توکلی مقدم و همکاران، ۲۰۰۵- ب). در مقاله‌ای جامع‌تر، دفرشا^{۱۲} و چن^{۱۳} (۲۰۰۶) مدلی را در نظر گرفتند که از پیکربندی سلول، مسیریابی جایگزین، توالی عملیات، واحدهای چندگانه ماشین‌های مشابه، ظرفیت ماشین، تعدیل حجم کار در میان سلول‌ها، هزینه عملیاتی، هزینه برون‌سپاری کارها، هزینه مصرف ابزار، هزینه راه‌اندازی و سایر محدودیت‌های عملی استفاده می‌کند (دفرشا و چن، ۲۰۰۶- الف). دفرشا و چن (۲۰۰۶) مدل DCFP قبلی را توسعه داده‌اند. در این مدل محدودیت مجاورت ماشین و تقسیم کار در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر، دو مفهوم در این مقاله استفاده شده است که عبارتند از ۱- سفارش‌های بزرگ به دسته‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و فرصتی برای پردازش هم‌زمان سفارشات بیش از یک مرکز کاری (تقسیم حجم کار) فراهم می‌کند و ۲- مجموعه‌ای از جفت ماشین باید در یک سلول قرار گیرد (مجاورت ماشین) (دفرشا و چن، ۲۰۰۶- ب). سعیدی مهرباد و صفایی (۲۰۰۷) از رویکرد شبکه عصبی برای DCFP استفاده کردند. در این رویکرد تعداد سلول‌های تشکیل‌شده، متغیر تصمیم مدل پیشنهادی است. با مقایسه نتایج در شبکه عصبی و راه‌حل‌های بهینه LINGO، آنها ادعا کردند شبکه عصبی روش قوی‌تر و قابل اطمینان‌تری است (سعیدی مهرباد و صفایی، ۲۰۰۷). به این ترتیب آریانژاد و همکاران (۲۰۰۹) مدل جدیدی برای تخصیص هم‌زمان کار و DCFP ارائه داده‌اند. آنها هر دو سطح ماشین و سطح مهارت را در مدل جدید خود در نظر گرفتند. مدل‌های چندهدفه نیز برای DCFP در منابع ارائه شده‌اند (آریانژاد و همکاران، ۲۰۰۹). در این بخش مقاله وانگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۹) نخستین مقاله‌ای است که مدل سه‌هدفه شامل حداقل کردن هزینه‌های جابه‌جایی، بیشینه‌سازی سرعت مصرف و استفاده از ظرفیت ماشین و حداقل کردن تعداد کل حرکات درون‌سلولی را در نظر می‌گیرد. آنها از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده (SS) استفاده کردند؛ زیرا DCFP مسئله‌ای سخت بوده است و نشان داد SS دارای نتایج رضایت‌بخشی از حیث درصد فاصله و زمان اجرا حتی برای مسائل آزمایشی بزرگ-مقیاس است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹). باجستانی و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل دوهدفه را توسعه دادند که نخستین هدف، حداقل کردن هزینه‌هایی نظیر استهلاک ماشین، هزینه‌های جابه‌جایی مواد درون‌سلولی و هزینه جابه‌جایی ماشین و دومین هدف، حداقل کردن تغییرات بار سلولی کل است (باجستانی و همکاران، ۲۰۰۹). هم‌چنین قطب‌الدینی و همکاران (۲۰۱۱) مدل دوهدفه‌ای را توسعه دادند که متشکل از حداقل کردن مجموع هزینه‌های متنوع و حداکثر کردن مجموع نسبت کار حداقل برای کل دوره‌ها است. آنها از GAMS برای اعتبارسنجی مدل و از رویکرد تجزیه برای حل مسائل آزمایشی بزرگ‌تر با روشی دقیق استفاده کردند. برخی از پژوهشگران مدل یکپارچه DCFP و برنامه‌ریزی تولید را در پژوهش‌های خود در نظر گرفته‌اند؛ به عبارت دیگر آنها روش یکپارچه‌ای را تدوین کرده‌اند که در آن سطح موجودی، تولید، برون‌سپاری و هزینه‌ها همراه با سایر پارامترها و متغیرهای DCFP در نظر گرفته شده است (قطب‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۱). در این گروه بالگاک و بکتاش (۲۰۰۹) رویکرد یکپارچه‌ای برای طراحی CMS در نظر گرفتند که در آن تصمیم پیکربندی مجدد سیستم و برنامه‌ریزی تولید در نظر گرفته می‌شود (بالگاک و بکتاش، ۲۰۰۹). صفایی و توکلی مقدم (۲۰۰۹) نیز به‌طور هم‌زمان برنامه‌ریزی تولید و DCFP را پیشنهاد کردند. آنها جابه‌جایی مواد درون‌سلولی و بین‌سلولی را با فرض توالی عملیات و برون‌سپاری جزئی را با فرض زمان انتظار برای آیتم

های سفارش شده اضافه کردند. عملکرد مدل آنها با دو مثال عددی تأیید شد (صفایی و توکلی مقدم، ۲۰۰۹). از طرف دیگر یک مدل جامع از جمله DCFP، برنامه‌ریزی تولید و مسئله تخصیص کارگر در مقاله مهدوی و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است. ساکسنا^{۱۵} و جین^{۱۶} (۲۰۱۰) ویژگی‌های مهم تولید نظیر اثر خرابی ماشین، برنامه‌ریزی تولید، اندازه‌دسته انتقالی برای حرکت درون سلولی و میان سلولی، تقسیم حجم کار، برنامه‌پردازش جایگزین و ... را در نظر گرفتند (ساکسنا و جین، ۲۰۱۰). در مدل یکپارچه چندهدفه DCFP برنامه‌ریزی تولید، جوادیان و همکاران (۲۰۱۱) دو هدف را در مدل خود مطرح کردند. نخستین هدف حداقل کردن مجموعه هزینه‌ها و دومین هدف حداقل کردن تغییرات بار کل سلول بود (جوادیان و همکاران، ۲۰۱۱). در برخی از مقالات، مشاهده شد که طراحی سیستم زنجیره‌تأمین با DCFP تلفیق می‌شود؛ برای مثال ساکسنا و جین (۲۰۱۰) مدل یکپارچه طراحی زنجیره‌تأمین و تولید سلولی پویا را با در نظر گرفتن مسائل مختلف نظیر مناطق با چند کارخانه، بازارهای چندگانه، دوره‌های چندزمانه، پیکربندی مجدد ترکیب کردند (ساکسنا و جین، ۲۰۱۲). برخی پژوهشگران به‌طور هم‌زمان روی مسائل طرح‌ریزی و DCFP کار کردند. کیا و همکاران (۲۰۱۲) مدل طراحی گروهی DCMS را با مسیریابی فرایند جایگزین، تقسیم حجم کار و پیکربندی مجدد انعطاف‌پذیر ارائه کردند (کیا و همکاران، ۲۰۱۲). باقری و بشیری (۲۰۱۴) نیز DCFP را با مسئله چیدمان و گمارش کارگر در محیط پویا در نظر گرفتند (باقری و بشیری، ۲۰۱۴). همچنین مقالاتی وجود دارند که پارامترهای آنها با عدم قطعیت همراه است؛ برای مثال صفایی و همکاران (۲۰۰۸) از رویکرد برنامه‌نویسی فازی برای DCFP با تقاضاهای غیرقطعی و ظرفیت ماشین موجود استفاده کردند (صفایی و همکاران، ۲۰۰۸). یک DCMS یکپارچه و برنامه‌ریزی تولید با ماشین‌های غیرقابل اطمینان در مقاله سخایی و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده است. نیکان و همکاران (۲۰۱۶) مدل ریاضی چندمنظوره‌ای را با عدم قطعیت هزینه و تقاضا پیشنهاد کردند. هدف اصلی این مطالعه در نظر گرفتن معیارهای اجتماعی نظیر خطرات بالقوه ماشین و فرصت‌های شغلی در مدل پیشنهادی بود (نیکان و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین زهره‌وند و همکاران (۲۰۱۶) مدل تصادفی دو منظوره‌ای را توسعه دادند. نخستین تابع هدف مدل توسعه‌یافته، حداقل کردن هزینه‌های کل بود؛ درحالی‌که دومین تابع هدف حداکثر کردن استفاده از نیروی کار در سیستم تولید سلولی بود. آنها تقاضا را برای دوره‌های مختلف غیرقطعی در نظر گرفتند (زهره‌وند و همکاران، ۲۰۱۶).

همه مقالات موجود در منابع DCMS، نقش MHE را در کارگاه‌ها به دو دلیل نادیده گرفته‌اند که عبارتند از ۱- آنها فرض می‌کنند MHS اولیه تخصیص داده‌شده به سیستم تولید برای انتقال هر مقدار از تولید بهینه کافی است؛ ۲- آنها فرض می‌کنند زمان جابه‌جایی قطعات کمتر از زمان پردازش است و در می‌تواند مدل نادیده گرفته شود. باین‌حال در محیط واقعی، وقتی که تعداد جابه‌جایی زیاد است احتمال دارد MHE بیشتری باتوجه به ظرفیت MHE نیاز باشد. از سوی دیگر اگر کارگاه قادر به ارائه MHE بیشتر نباشد باید اندازه بهینه محصول کاهش یابد؛ در نتیجه در این پژوهش مدلی یکپارچه از برنامه‌ریزی تولید و DCMS باتوجه به نقش مؤثر MHE توسعه داده شده است. به‌طور خلاصه مقاله برای رسیدن به اهدافی شامل توسعه مدل جدیدی با در نظر گرفتن تولید سلولی پویا، برنامه‌ریزی تولید و نقش MHE، همچنین بررسی تغییرات جواب‌هایی اعم از تخصیص کارها به سلول‌ها، ماشین‌آلات به سلول‌ها، مقدار تولید محصولات، موجودی‌ها، برون‌سپاری، تعداد وسایل جابه‌جاکننده مواد، زمان‌های حمل و نقل قطعات بین ایستگاه‌ها در مدل توسعه‌داده‌شده در برابر مدل پایه‌ای است. نوآوری مقاله نیز در نظر گرفتن زمان، ظرفیت و به‌طور کلی نقش MHE در سیستم‌های تولید سلولی پویا همراه با برنامه‌ریزی است.

روش پژوهش

در این بخش مدل یکپارچه DCFP و برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن نقش MHE درون‌سلولی و بین‌سلولی پیشنهاد می‌شود. فرض بر این است که تعدادی قطعات، انواع ماشین و سلول‌ها وجود دارند و موقعیت و محل آنها قبلاً در سیستم تولیدی تعیین شده است. به علاوه هیچ‌گونه MHE درون‌سلولی و بین‌سلولی در ابتدای افق برنامه‌ریزی وجود ندارد و مدل باید قادر به دست آوردن تعداد بهینه MHE در همه ادوار باشد. لازم به ذکر است فاصله بین ماشین‌ها درون هر سلول و فاصله بین سلول‌ها در سلول‌های تولیدی مشابه است. این موجب مطرح شدن فرض زمان‌های مساوی برای مدل از هر ماشین با سایر ماشین‌های درون سلول و از هر سلول به سلول دیگر می‌شود. تنوع و مقدار تقاضایی که از سمت مشتری به شرکت تولیدی داده می‌شود در دوره‌های مختلف تغییر می‌کند و برای انعطاف پذیری در سیستم نیاز است که در هر دوره پیکره‌بندی مجدد سلول‌ها اتفاق افتد. برای ایجاد رفتار بهینه برای کنترل نوسانات تقاضا، در هر دوره لازم است سیاست‌های تغییر تشکیل سلولی، سیاست‌های برنامه‌ریزی تولید و سیاست‌های مدیریت وسایل جابه‌جاکننده قطعات در شرکت اعمال شود. انتخاب سیاست بهینه با توجه به هزینه‌های تحمیلی به سیستم با استفاده از مدل‌سازی ریاضی انجام می‌شود. علاوه بر مفروضات ذکر شده، این مسئله براساس فرضیات زیر تدوین و بیان می‌شود.

- ۱- هر قطعه شامل تعداد عملیاتی است که باید در عملیات به ترتیب شماره‌گذاری استفاده شود.
- ۲- زمان پردازش برای همه عملیات مربوط به نوع قطعه در انواع ماشین‌های مختلف از قبل مشخص و تعیین شده است.
- ۳- هر ماشین دارای ظرفیت و ظرفیت زمانی مشخص و پایدار در سرتاسر افق برنامه‌ریزی است.
- ۴- هزینه ثابت هر ماشین مشخص است. این هزینه شامل نگهداری، مخارج عمومی، هزینه‌های اجاره و هزینه‌های سرویس هر ماشین است. در اینجا هزینه‌های خرید و فروش برای ماشین‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.
- ۵- هزینه متغیر هر نوع ماشین از قبل مشخص است. این هزینه بستگی به حجم کار تخصیص داده شده به ماشین دارد.
- ۶- هزینه جابه‌جایی برای هر نوع ماشین از یک سلول به سلول دیگر مشخص است. همه ماشین‌ها قادر به حرکت به سمت هر سلول هستند. این هزینه شامل مجموع هزینه‌های حذف، تغییر و نصب است. زمان لازم برای جابه‌جایی صفر است.
- ۷- قطعات در یک دسته بین و درون سلول‌ها جابه‌جا می‌شوند. به علاوه دسته‌های درون و بین‌سلولی مربوط به انواع قطعات دارای اندازه‌ها و هزینه‌های متفاوتی هستند. فرض می‌شود فاصله بین هر جفت سلول‌ها و هر جفت ماشین در هر سلول یکسان است.
- ۸- هزینه ثابت هر یک از سلول‌های درونی و میانی معلوم است.
- ۹- هزینه‌های متغیر هر سلول درونی و میانی معلوم است. این هزینه‌ها وابسته به حجم کار تخصیص داده شده به MHE هستند.
- ۱۰- همه MHE‌های درون‌سلولی و بین‌سلولی را می‌توان خرید یا فروخت. فرض بر این است که قیمت خرید و فروش در دوره‌های زمانی مشخص و ثابت است.

- ۱۱- حداکثر تعداد سلول‌هایی که در هر دوره تشکیل می‌شوند از قبل مشخص و معلوم است.
- ۱۲- اندازه حداکثر و حداقل سلول از قبل مشخص است.
- ۱۳- نگهداری و تعویق سفارش موجودی‌ها بین دوره‌های با هزینه‌های معلوم مجاز است.
- ۱۴- برون‌سپاری جزئی مجاز است. به عبارت دیگر مقدار کل یا بخشی از تقاضای انواع قطعات را می‌توان در هر دوره به صورت برون‌سپاری به شرکت دیگری واگذار کرد. همچنین فاصله زمانی بین ارائه و دریافت سفارشات (زمان انتظار سفارش) از قبل ثابت و مشخص است.

اندیس‌ها

i : شاخص انواع قطعات ($i = 1, \dots, I$)

C : شاخص سلول‌های تولیدی ($c = 1, \dots, C$)

j : شاخص عملیات که متعلق به قطعه i ($j = 1, \dots, O_i$) است

t : شاخص دوره‌های زمانی ($t = 1, \dots, H$)

m : شاخص انواع ماشین ($m = 1, \dots, M$)

پارامترهای ورودی

O_i : تعداد عملیات برای قطعه i

I : تعداد قطعات

M : تعداد ماشین‌ها

C : تعداد سلول‌ها

D_{it} : تقاضا برای قطعه i در دوره t

B_i^{inter} : اندازه دسته برای حرکت درون سلولی قطعه i

B_i^{intra} : اندازه دسته برای حرکت بین سلولی قطعه i

α_m : هزینه ثابت نوع ماشین m در هر دوره

γ^{inter} : هزینه متغیر MHE درون سلولی استفاده شده (هزینه حرکت درون سلولی برای هر دسته)

γ^{intra} : هزینه متغیر MHE بین سلولی استفاده شده (هزینه حرکت بین سلولی) برای توجیه CMS، فرض می‌شود،

$$(\gamma^{intra} / B_i^{intra}) < (\gamma^{inter} / B_i^{inter}) \text{ است.}$$

β_m : هزینه متغیر نوع ماشین m برای هر واحد زمانی

δ_m : هزینه جابه‌جایی هر نوع ماشین m

T_m : ظرفیت زمانی ماشین نوع m در هر دوره

UB : اندازه حداکثر سلول

UEB : حداکثر MHE بین سلولی مجاز در سیستم تولید

$UIBC$: حداکثر MHE درون سلولی مجاز در سلول C

pc^{intra} : قیمت خرید برای هر MHE درون سلولی

pc^{inter} : قیمت خرید برای هر MHS بین سلولی

sc^{intra} : قیمت فروش برای هر MHS درون سلولی

sc^{inter} : قیمت فروش برای هر MHS بین سلولی

λ_i : هزینه واحد برون‌سپاری قطعه i

l : زمان انتظار که در آن $l \leq H - 1$ است

Av : زمان موجود در هر دوره زمانی

η_i : هزینه حمل موجودی به‌ازاء هر قطعه i در طی هر دوره.

P_i : هزینه سفارش معوقه به‌ازاء هر قطعه i در طی هر دوره.

Z : عدد مثبت بزرگ.

t^{intra} : زمان درون سلولی برای انتقال یک دسته از هر ماشین به ماشین دیگر

t^{inter} : زمان بین سلولی برای انتقال یک دسته از هر سلول به سلول دیگر

pt_{jim} : زمان پردازش لازم برای انجام عملیات j هر نوع قطعه i در ماشین m

a_{jim} : در صورتی که عملیات j هر نوع قطعه i را بتوان در ماشین m انجام داد، برابر با یک و در غیراین صورت برابر با صفر است.

fc^{inter} : هزینه ثابت MHE بین سلولی استفاده شده (یعنی هزینه استهلاک).

fc^{intra} : هزینه ثابت MHE درون سلولی استفاده شده (یعنی هزینه استهلاک).

متغیرهای تصمیم

N_{mct} : تعداد ماشین‌های m تخصیص داده شده به هر سلول C در دوره t .

K_{mct}^+ : تعداد ماشین‌های m افزوده شده به هر سلول C در دوره t .

K_{mct}^- : تعداد ماشین‌های m خارج شده از هر سلول C در دوره t .

U_t^{inter} : تعداد MHE تخصیص داده شده بین سلول‌ها در هر دوره t .

U_{ct}^{intra} : تعداد MHE تخصیص داده شده درون سلول C در دوره t .

$V_t^{p.inter}$: تعداد MHE بین سلولی خریداری شده در دوره t .

$V_t^{s.inter}$: تعداد MHE بین سلولی فروخته شده در دوره t .

$V_{ct}^{p.intra}$: تعداد MHE درون سلولی خریداری شده در دوره t برای سلول C .

$V_{ct}^{s.intra}$: تعداد MHE درون سلولی فروخته شده در دوره t برای سلول C .

P_{it} : تعداد قطعه نوع i تولید شده در دوره t .

y_{it} : در صورتی که $P_{it} > 0$ برابر با یک و در غیراین صورت صفر است.

S_{it} : تعداد قطعات نوع i برون‌سپاری شده در دوره t .

In_{it}^+ : سطح موجودی قطعه نوع i در پایان دوره t .

In_{it}^- : سطح سفارش معوق قطعه نوع i در پایان دوره t .

x_{jimct} : در صورتی که عملیات j قطعه نوع i روی ماشین نوع m در سلول c در دوره t انجام شود، برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با صفر است.

مدل ریاضی: در این بخش، مدل ریاضی یکپارچه مسئله در حال مطالعه ارائه می‌شود. با استفاده از شاخص‌های بالا،

مدل پیشنهادی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\min Z = \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mch} \alpha_m \quad 1a$$

$$+ \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m P_{it} p_{tjim} x_{jimct} \quad 1b$$

$$+ \sum_{t=1}^H U_t^{inter} f_c^{inter} \quad 1c$$

$$+ \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C U_{ct}^{intra} f_c^{intra} \quad 1d$$

$$+ 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left| \frac{P_{it}}{B_i^{inter}} \right| \gamma^{inter} \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \quad 1e$$

$$+ 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left| \frac{P_{it}}{B_i^{intra}} \right| \gamma^{intra} \left(\sum_{m=1}^M |x_{(j+1)imct} - x_{jimct}| - \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \right) \quad 1f$$

$$+ 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \delta_m (K_{mct}^+ + K_{mct}^-) \quad 1g$$

$$+ \sum_{t=1}^H V_t^{p.inter} p_c^{inter} \quad 1h$$

$$+ \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C V_{ct}^{p.intra} p_c^{intra} \quad 1i$$

$$- \sum_{t=1}^H V_t^{s.inter} s_c^{inter} \quad 1j$$

$$- \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C V_{ct}^{s.intra} s_c^{intra} \quad 1k$$

$$+ \sum_{t=1}^H \sum_{i=1}^I (\eta_i In_{it}^+ + \rho_i In_{it}^- + \lambda_i S_{it}) \quad 1l$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M a_{jim} x_{jimct} = y_{it} \quad \forall j, i, t \quad 2$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} P_{it} p_{tj} x_{jimct} \leq T_m N_{mct} \quad \forall m, c, t \quad 3$$

$$1/2 \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left[\frac{P_{it}}{B_i^{inter}} \right] t^{inter} \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \leq Av U_t^{inter} \quad \forall t \quad 4$$

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left[\frac{P_{it}}{B_i^{intra}} \right] t^{intra} \left(\sum_{m=1}^M |x_{(j+1)imct} - x_{jimct}| - \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \right) \leq Av U_{ct}^{intra} \quad \forall c, t \quad 5$$

$$\sum_{m=1}^M N_{mct} \leq UMB \quad \forall c, t \quad 6$$

$$U_t^{inter} \leq UEB \quad \forall t \quad 7$$

$$U_{ct}^{intra} \leq UIB_c \quad \forall c, t \quad 8$$

$$N_{mct(t-1)} + K_{mct}^+ - K_{mct}^- = N_{mct} \quad \forall m, c, t \quad 9$$

$$U_{(t-1)}^{inter} + V_t^{p.inter} - V_t^{s.inter} = U_t^{inter} \quad \forall t \quad 10$$

$$U_{c(t-1)}^{inter} + V_{ct}^{p.intra} - V_{ct}^{s.intra} = U_{ct}^{intra} \quad \forall c, t \quad 11$$

$$In_{it}^+ - In_{it}^- = In_{i(t-1)}^+ - In_{i(t-1)}^- + P_{it} + S_{i(t-1)} - D_{it} \quad \forall i, t \quad 12$$

$$In_{iH}^+ = 0 \quad \forall i \quad 13$$

$$In_{iH}^- = 0 \quad \forall i \quad 14$$

$$P_{it} \leq Zy_{it} \quad \forall i, t \quad 15$$

$$P_{it} \geq y_{it} \quad \forall i, t \quad 16$$

$$y_{it}, x_{jimct} \in \{0,1\}, N_{mct}, K_{mct}^+, K_{mct}^-, P_{it}, S_{it}, In_{it}^+, In_{it}^-, U_t^{inter}, U_{ct}^{intra}, V_t^{p.inter}, V_t^{s.inter}, V_{ct}^{p.intra}, V_{ct}^{s.intra} \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall i, j, m, c, t \quad 17$$

تابع هدف مدل پیشنهادی متشکل از معادلات (1a) - (1l) است. معادله (1a) نشان‌دهنده هزینه ثابت ماشین‌ها در سیستم تولیدی است. این هزینه با مجموع حاصل ضرب تعداد ماشین‌های استفاده‌شده در دوره‌های زمانی و هزینه ثابت هر ماشین برابر است؛ در واقع این هزینه امکان تکرار ماشین اضافی را نداده است و به این ترتیب مدل را مجبور به حداکثرکردن عملکرد و بهره‌وری ماشین می‌کند. معادله (1b) به صورت مجموع هزینه متغیر ماشین‌ها است. هزینه‌های متغیر با مجموع حاصل ضرب حجم کار تخصیص‌داده‌شده به هر نوع ماشین در هر سلول و هزینه مربوطه به دست می‌آید. این هزینه‌ها موجب توازن و تعدیل حجم کارها برای هر نوع ماشین می‌شوند. معادله (1c) هزینه‌های ثابت استفاده از MHE بین سلولی است که برابر با حاصل ضرب مجموع تعداد MHS بین سلولی استفاده‌شده در همه دوره‌های زمانی و هزینه ثابت مربوطه است. معادله (1d) هزینه ثابت کل را برای MHE درون سلولی استفاده‌شده در همه سلول‌ها محاسبه می‌کند. معادلات (1e) و (1f) مجموع هزینه‌های متغیر به ترتیب برای MHE درون و بین سلولی هستند. این دو هزینه به صورت هزینه‌های جابه‌جایی مواد درون و بین سلولی کل در همه مقالات قبلی معرفی شده‌اند؛ زیرا هدف گنجاندن این توابع هدف حداقل‌کردن حرکات درون و بین سلولی قطعات بدون توجه به ظرفیت MHE بوده است. با این حال هدف مدل این پژوهش تعادل و توازن حرکات درون و بین سلولی قطعات روی MHE درون و

بین سلولی متفاوت استفاده شده در سیستم تولید است؛ در نتیجه آنها به صورت هزینه متغیر برای MHE بین سلولی در (1e) و برای MHE درون سلولی در (1f) با توجه به ظرفیت های MHE معرفی می شود. معادله (1g) هزینه های جابه جایی ماشین ها را محاسبه می کند. این مجموع تعداد ماشین های جابه جاشده (افزوده شده یا خارج شده) و هزینه مربوطه آنها است. ضرایب $1/2$ در معادله (1g)-(1e) در نظر گرفته شده است؛ زیرا حرکت قطعات درون و بین سلول و جابه جایی هر ماشین دوبار در محاسبات در نظر گرفته می شود. توصیف دقیق این ضرایب در مقاله صفایی و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است (صفایی و همکاران، ۲۰۰۸). هزینه های خرید MHE درون سلولی در دوره های زمانی که مجموع حاصل ضرب تعداد MHE بین سلولی خریداری شده و قیمت هر MHE بین سلولی و هزینه خرید MHE درون سلولی در همه سلول ها در همه دوره های زمانی است. این نیز مجموع حاصل ضرب تعداد MHE درون سلولی خریداری شده برای همه سلول ها در همه دوره های زمانی است و به ترتیب در معادلات (1h) و (1i) نشان داده شده است. معادلات (1j) و (1k) درآمد و سود به دست آمده با فروش MHE درون و برون سلولی است؛ به همین دلیل آنها در تابع هدف دارای علامت منفی هستند. در واقع درآمد فروش حاصل از MHE بین سلولی برابر با مجموع MHE درون سلولی فروخته شده برای همه دوره های زمانی است و درآمدهای یکسان برای MHE درون سلولی نیز مجموع MHE درون سلولی فروخته شده در همه سلول ها برای همه دوره های زمانی است. معادله (1l) مجموع هزینه های برنامه ریزی تولید از جمله هزینه حمل موجودی، هزینه تعویق سفارش و هزینه های برون سپاری را محاسبه می کند. نخستین معادله نشان دهنده مجموع حاصل ضرب سطح موجودی برای هر قطعه در پایان یک دوره زمانی و هزینه مرتبط است. همچنین دومین معادله به صورت مجموع حاصل ضرب سطح سفارش معوقه برای هر قطعه در پایان یک دوره معین و هزینه مربوطه و معادله سوم مجموع حاصل ضرب تعداد قطعات برون سپاری شده و هزینه مربوطه است. با معادله ۲ اطمینان حاصل می شود که هرگونه عملیات مربوط به هر قطعه به یک ماشین و یک سلول در یک دوره زمانی تخصیص داده می شود؛ به خصوص اگر تعداد این قطعات تولید شده در یک دوره زمانی بزرگتر از صفر باشد. معادله ۳ نشان می دهد از ظرفیت ماشین در هر سلول در هر دوره زمانی تجاوز نشده است و به این ترتیب تقاضا برآورده خواهد شد. معادله ۳ و ۵ موجب اطمینان از این می شود که زمان موجود برای MHE درون و بین سلولی از حد مجاز تجاوز نکرده است؛ به عبارت دیگر این دو قید نشان می دهند زمان کل هزینه شده برای حرکت بین سلولی قطعات تولید شده در هر دوره می تواند بیش از حاصل ضرب زمان موجود در هر دوره باشد و تعداد حرکات بین سلولی در این دوره علاوه بر زمان مصرف شده برای حرکت درون سلولی قطعات تولید شده در هر سلول می تواند بیش از حاصل ضرب زمان موجود در هر دوره و تعداد حرکات بین سلولی استفاده شده در هر سلول برای آن دوره باشد. با معادله ۶ اطمینان حاصل می شود که حداکثر اندازه سلول نقض نشده است؛ یعنی تعداد کل ماشین های استفاده شده در هر سلول در هر دوره زمانی باید کوچکتر مساوی حداکثر کران تعریف شده برای همه سلول ها باشد. در معادله ۷ کران بالاتر برای تعداد MHS بین سلولی در هر دوره تعیین می شود؛ در واقع این کران بالاتر، ظرفیت استفاده از MHE بین سلولی در میان سلول های تولید کننده است. از سوی دیگر معادله ۸ نشان می دهد از ظرفیت MHS درون سلولی در هر سلول تجاوز نشده است. با معادله ۹ که یک قید متعادل کننده برای ماشین ها است اطمینان حاصل می شود که تعداد ماشین ها در دوره جاری برابر با تعداد ماشین ها در دوره پیشین به علاوه تعداد ماشین های جابه جاشده و منهای تعداد ماشین های خارج شده است. معادله ۱۰ یک قید متوازن کننده برای MHE بین سلولی است. این معادله نشان می دهد، تعداد MHE بین

سلولی استفاده‌شده در دوره جاری برابر با تعداد MHE بین‌سلولی استفاده‌شده در دوره پیشین علاوه بر تعداد MHE بین‌سلولی خریداری‌شده منهای تعداد MHE بین‌سلولی فروخته‌شده در دوره جاری است. معادله ۱۱ مشابه با معادله ۱۰ است؛ با این حال تنها تفاوت آنها در MHE درون‌سلولی است. این نشان می‌دهد، تعداد MHE درون‌سلولی استفاده‌شده در هر سلول برای دوره جاری برابر با تعداد MHE درون‌سلولی استفاده‌شده در یک سلول در دوره پیشین به علاوه تعداد MHE بین‌سلولی خریداری‌شده برای آن سلول منهای تعداد MHE درون‌سلولی فروخته‌شده برای آن سلول در دوره جاری است. معادله ۱۲ یک قید متوازن‌کننده موجودی بین دوره‌ها برای هر نوع قطعه در هر دوره است؛ به عبارت دیگر سطح موجودی/ سفارش معوقه قطعه در پایان هر دوره برابر با سطح موجودی/ سفارش معوقه همان قطعه در پایان دوره پیشین منهای تعداد تولید در دوره جاری به‌علاوه تعداد تولید برون‌سپاری‌شده با در نظر گرفتن زمان انتظاری است که در دوره جاری منهای نرخ تقاضای قطعه در دوره جاری دریافت می‌شود. چون سطح موجودی و سفارش معوقه در هر دوره با علامت‌های مخالف نشان داده شده است و مدل‌ها به مدل خطی تبدیل می‌شوند، یکی از این متغیرها (متغیر سطح موجودی یا سفارش معوقه) می‌تواند در هر دوره بزرگ‌تر از صفر باشد و دیگری برابر با صفر خواهد بود. معادلات ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند سطح موجودی یا سفارش معوقه در دوره گذشته برابر با صفر است. این دو قید به این دلیل در مدل قرار دارند که تقاضای کل همه انواع قطعات باید در طی افق برنامه ریزی برآورده شود. معادله ۱۵ نشان می‌دهد تعداد قطعات تولیدشده در هر دوره می‌تواند بزرگ‌تر از صفر باشد؛ به خصوص اگر $y_{it} = 1$ باشد، اگرچه اگر $y_{it} = 0$ باشد، این مقدار برابر با صفر خواهد بود. معادله ۱۶ نشان می‌دهد، اگر $y_{it} = 1$ به‌ازای هر قطعه در هر دوره باشد تعداد این قطعه تولیدشده در همان دوره باید بزرگ‌تر از صفر باشد. در نهایت مقادیر متغیرهای تصمیم با قیود موجود در معادله ۱۷ محدود می‌شوند.

خطی‌سازی مدل پیشنهادی: متاسفانه مدل ریاضی پیشنهادی شامل چندین متغیر غیرخطی است. در اینجا از روش خطی به‌کاررفته در مقاله صفایی و توکلی مقدم (۲۰۰۹) برای خطی‌سازی مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. برای خطی‌سازی عبارت (1e)، دو متغیر کمکی نظیر W_{jict}^1 و W_{jict}^2 نیاز است. در نتیجه جمله مطلق به‌صورت زیر تبدیل می‌شوند.

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \\ &= \frac{1}{2} \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left[\frac{P_{it}}{B_i^{inter}} \right] \gamma^{inter} (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) \end{aligned} \quad 1e'$$

به‌علاوه قید (۱۸) باید به‌صورت زیر به مدل افزوده شود.

$$\sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} = W_{jict}^1 - W_{jict}^2 \quad \forall j, i, c, t \quad 18$$

برخلاف روش ذکرشده، معادله ۱۸ غیرخطی است؛ زیرا حاصل‌ضرب دو متغیر P_{it} و $W_{jict}^1 + W_{jict}^2$ است. به همین منظور، در اینجا باید متغیر کمکی دیگری نظیر φ_{jict}^1 به‌صورت زیر تعریف شود.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left[\frac{P_{it}}{B_i^{inter}} \right] \gamma^{inter} (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) = \\ & \frac{1}{2} \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left[\frac{\varphi_{jict}^1}{B_i^{inter}} \right] \gamma^{inter} \end{aligned} \quad 1e''$$

قیدهای (۱۹) و (۲۰) زیر باید به مدل اصلی افزوده شوند.

$$\varphi_{jict}^1 \geq P_{it} - Z(1 - W_{jict}^1 - W_{jict}^2) \quad \forall j, i, c, t \quad 19$$

$$\varphi_{jict}^1 \leq P_{it} + Z(1 - W_{jict}^1 - W_{jict}^2) \quad \forall j, i, c, t \quad 20$$

برای خطی‌سازی تابع قسمت صحیح^۱ در جمله^۱ $1e''$ ، متغیر عدد صحیح L_{jict}^1 تعریف شده در جمله^۱ $1e'''$ و دو قید ۲۲ و ۲۳ به صورت زیر است.

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{\varphi_{jict}^1}{B_i^{inter}} \right\rfloor \gamma^{inter} = 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} L_{jict}^1 \gamma^{inter} \quad 1e'''$$

$$L_{jict}^1 \leq \frac{\varphi_{jict}^1}{B_i^{inter}} \quad \forall j, i, c, t \quad 21$$

$$L_{jict}^1 \geq \frac{\varphi_{jict}^1}{B_i^{inter}} - 1 \quad \forall j, i, c, t \quad 22$$

مشابه با محاسبه بالا، برای خطی‌سازی جمله^۱ (1f) دو متغیر کمکی O_{jimct}^1 و O_{jimct}^2 تعریف می‌شوند. جمله تبدیل شده یا ترانسفورم شده $1f'$ به صورت زیر است.

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{P_{it}}{B_i^{intra}} \right\rfloor \gamma^{intra} \left(\sum_{m=1}^M |x_{(j+1)imct} - x_{jimct}| - \left| \sum_{m=1}^M x_{(j+1)imct} - \sum_{m=1}^M x_{jimct} \right| \right) \quad 1f'$$

$$= 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{P_{it}}{B_i^{intra}} \right\rfloor \gamma^{intra} \left\{ \sum_{m=1}^M (O_{jimct}^1 + O_{jimct}^2) - (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) \right\}$$

که در آن باید قید زیر وارد مدل شود.

$$O_{jimct}^1 + O_{jimct}^2 = x_{(j+1)imct} - x_{jimct} \quad \forall j, i, m, c, t \quad 23$$

حال، φ_{jict}^2 به صورت یک متغیر کمکی تعریف و در جمله زیر استفاده می‌شود.

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{P_{it}}{B_i^{intra}} \right\rfloor \gamma^{intra} \left\{ \sum_{m=1}^M (O_{jimct}^1 + O_{jimct}^2) - (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) \right\} = \quad 1f''$$

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{\varphi_{jict}^2}{B_i^{intra}} \right\rfloor \gamma^{intra}$$

که در آن قیده‌های زیر به مدل اصلی افزوده می‌شوند.

$$\varphi_{jict}^2 \geq P_{it} - Z \left(1 - \sum_{m=1}^M (O_{jimct}^1 + O_{jimct}^2) + (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) \right) \quad \forall j, i, c, t \quad 24$$

$$\varphi_{jict}^2 \leq P_{it} + Z \left(1 - \sum_{m=1}^M (O_{jimct}^1 + O_{jimct}^2) + (W_{jict}^1 + W_{jict}^2) \right) \quad \forall j, i, c, t \quad 25$$

در نهایت متغیر صحیح L_{jict}^2 تعریف و در جمله^۱ $1f'''$ با تابع قسمت صحیح به صورت زیر جایگزین می‌شود.

$$1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} \left\lfloor \frac{\varphi_{jict}^2}{B_i^{intra}} \right\rfloor \gamma^{intra} = 1/2 \sum_{t=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} L_{jict}^2 \gamma^{intra} \quad 1f'''$$

هم‌چنین قیود زیر باید به مدل افزوده شوند.

$$L_{jict}^2 \leq \frac{\varphi_{jict}^2}{B_i^{intra}} \quad \forall j, i, c, t \quad 26$$

$$L_{jict}^2 \geq \frac{\varphi_{jict}^2}{B_i^{intra}} - 1 \quad \forall j, i, c, t \quad 27$$

جمله^۱ (1b) و معادله^۳ با تعریف ψ_{jimct} که متغیری کمکی است و دو قید زیر خطی می‌شوند.

$$\sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m P_{it} p_{tjim} x_{jimct} = \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m p_{tjim} \psi_{jimct} \quad 1b'$$

¹ integer part function

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} pt_{jim} \psi_{jimct} \leq T_m N_{mct} \quad \forall m, c, t \quad 28$$

$$\psi_{jimct} \geq P_{it} - Z(1 - x_{jimct}) \quad \forall j, i, m, c, t \quad 29$$

$$\psi_{jimct} \leq P_{it} + Z(1 - x_{jimct}) \quad \forall j, i, m, c, t \quad 30$$

خطی‌سازی معادلات ۴ و ۵ دقیقاً مشابه با جملات (1e), (1f) است. در نهایت معادلات ۴ و ۵ به قیود ۳۱ و ۳۲ به صورت زیر تبدیل می‌شوند.

$$1/2 \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} L_{jict}^1 \gamma^{inter} \leq Av U_t^{inter} \quad \forall t \quad 31$$

$$1/2 \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i-1} L_{jict}^2 \gamma^{intra} \leq Av U_{ct}^{intra} \quad \forall c, t \quad 32$$

مدل خطی نهایی ۱ به صورت زیر نوشته می‌شوند.

مدل ۱:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mch} \alpha_m + \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m pt_{jim} \psi_{jimct} + (1e''') \quad 33 \\ & + (1f''') + (1g) + (1h) + (1i) + (1j) + (1k) + (1l) \\ & \text{Eq. (2), Eqs. (6)-(32),} \\ & W_{jict}^1, W_{jict}^2, O_{jimct}^1, O_{jimct}^2 \in \{0,1\} \\ & L_{jict}^1, L_{jict}^2, \varphi_{jict}^1, \varphi_{jict}^2, \psi_{jimct} \geq 0 \text{ and integer.} \end{aligned}$$

بحث

مثال‌ها در این بخش برای تأیید عملکرد مدل پیشنهادی ارائه می‌شوند. برای کاهش پیچیدگی مدل پیشنهادی در بخش آخر، متغیرهای تصمیم W_{jict}^2, V_{it} و O_{jimct}^2 به صورت متغیرهای پیوسته و باتوجه به ویژگی‌های آنها در مدل ۱ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه امکان بازنویسی مدل دیگر موسوم به مدل ۲ با کاهش متغیرهای ذکر شده به صورت زیر وجود دارد.

مدل ۲:

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mch} \alpha_m + \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m pt_{jim} \psi_{jimct} + (1c) + (1d) + \quad 34 \\ & (1e''') + (1f''') + (1g) + (1h) + (1i) + (1j) + (1k) + (1l) \\ & \text{Eq. (2), (6)-(16), Eqs. (18)-(32),} \\ & W_{jict}^1, O_{jimct}^1, x_{jimct} \in \{0,1\} \\ & L_{jict}^1, L_{jict}^2, \varphi_{jict}^1, \varphi_{jict}^2, \psi_{jimct}, W_{jict}^2, O_{jimct}^2, y_{it}, N_{mct}, K_{mct}^+, K_{mct}^-, P_{it}, S_{it}, In_{it}^+, In_{it}^-, U_t^{inter}, \\ & U_{ct}^{intra}, V_t^{p.inter}, V_t^{s.inter}, V_{ct}^{p.intra}, V_{ct}^{s.intra} \geq 0 \text{ and integer.} \end{aligned} \quad 35$$

برای مشاهده بهتر اثر MHE درون و بین سلولی روی راه‌حل‌های به دست آمده، مدل یکپارچه که برنامه‌ریزی تولید و DCMS را با حذف نقش MHEها لحاظ می‌کند برای مدل ۳ معرفی شده است. مدل ۳ که مدل مقاله صفایی و همکاران (۲۰۰۸) است به صورت زیر است.

مدل ۳:

$$\min Z_2 = \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C N_{mch} \alpha_m + \sum_{t=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{O_i} \beta_m pt_{jim} \psi_{jimct} + (1c) + \quad 36$$

$$e''') + (1f''') + (1g) + (1l)1(1d) + ($$

Eq. (۲), Eqs. (۶), (۹), (۱۲)-(۱۶), (۱۸)-(۳۲), (۳۵).

در اینجا از مثال عددی موجود در مقاله صفایی و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شده است. در این مثال فرض می شود سه نوع قطعه، سه نوع ماشین، حداکثر سه سلول و سه دوره وجود دارند که در آن هر نوع قطعه دارای سه عملیات است و باید به ترتیب پردازش شوند (صفایی و همکاران، ۲۰۰۸). به علاوه هر عملیات می تواند با دو ماشین جایگزین، انجام شود. سایر اطلاعات در جدول ۱ نشان داده شده است. هر دو مدل ۲ و ۳ در نرم افزار Intel (R) Core TM i7-2670QM CPU@2.2 به یک سیستم شخصی مجهز به ۲۴،۱،۲GAMS کدگذاری و روی یک سیستم شخصی مجهز به ۶ گیگ و ویندوز ۷ اجرا شده است. تابع هدف بهینه و برنامه تولید برای مدل ۳ (بدون توجه به نقش MHE) در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به مثال عددی

اطلاعات ماشین					I۱			I۲			I۳					
T_m (hour)	α_m \$	β_m \$	δ_m \$		۱	۲	۳	1	2	3	1	2	3			
۴۵۰	۱۸۰۰	۸	۹۰۰	M۱	۰/۹۳	۰/۵۵		۰/۶۴	۰/۴۸		۰/۷۱		۰/۸۹			
۴۵۰	۱۴۰۰	۱۰	۸۰۰	M۲		۰/۹۱	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۳۹	۰/۷۶		۰/۷۷				
۴۵۰	۲۲۰۰	۶	۶۰۰	M۳	۰/۸۹		۰/۴۵			۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۸۷			
D_{it}				دوره اول			۸۰۰				۹۵۰			۴۵۰		
				دوره دوم			۱۰۰۰					۰			۳۰۰	
				دوره سوم			۸۵۰					۳۴۰			۰	
B_i^{inter} B_i^{intra} λ_i η_i ρ_i l_0							۳۵				۴۰			۲۵		
							۶					۸			۹	
							۱۵						۱۲			۱۴
							۱۳						۱۴			۱۶
							۳۸						۳۶			۴۰
							۵۰						۰			۱۰۰
$\gamma^{inter} = ۵۰$		$\gamma^{intra} = ۵$		$t^{inter} = ۰/۱۵$			$t^{intra} = ۰/۰۵$			$Av = ۵۰۰$			$l = ۱$			
$pc^{inter} = ۲۰۰۰۰$		$pc^{intra} = ۵۰۰۰$			$sc^{inter} = ۱۳۵۰۰$			$sc^{intra} = ۳۴۰۰$			$UEB = ۴$					
$UB = ۴$		$UIB_c = ۳$			$fc^{inter} = ۵۰۰$			$fc^{intra} = ۲۰۰$								

جدول ۲- مقادیر بهینه تابع هدف برای مثال بدون MHE

Z^{best}	هزینه ثابت ماشین	هزینه متغیر ماشین	هزینه جابه جایی بین سلولی	هزینه جابه جایی درون سلولی	هزینه پیکربندی مجدد	هزینه کسری، موجودی و برون سپاری
۱۹۱۳۹۱	۴۳۲۰۰	۶۵۱۷۶	۶۵۵۰	۸۵	۱۲۷۰۰	۶۳۶۸۰

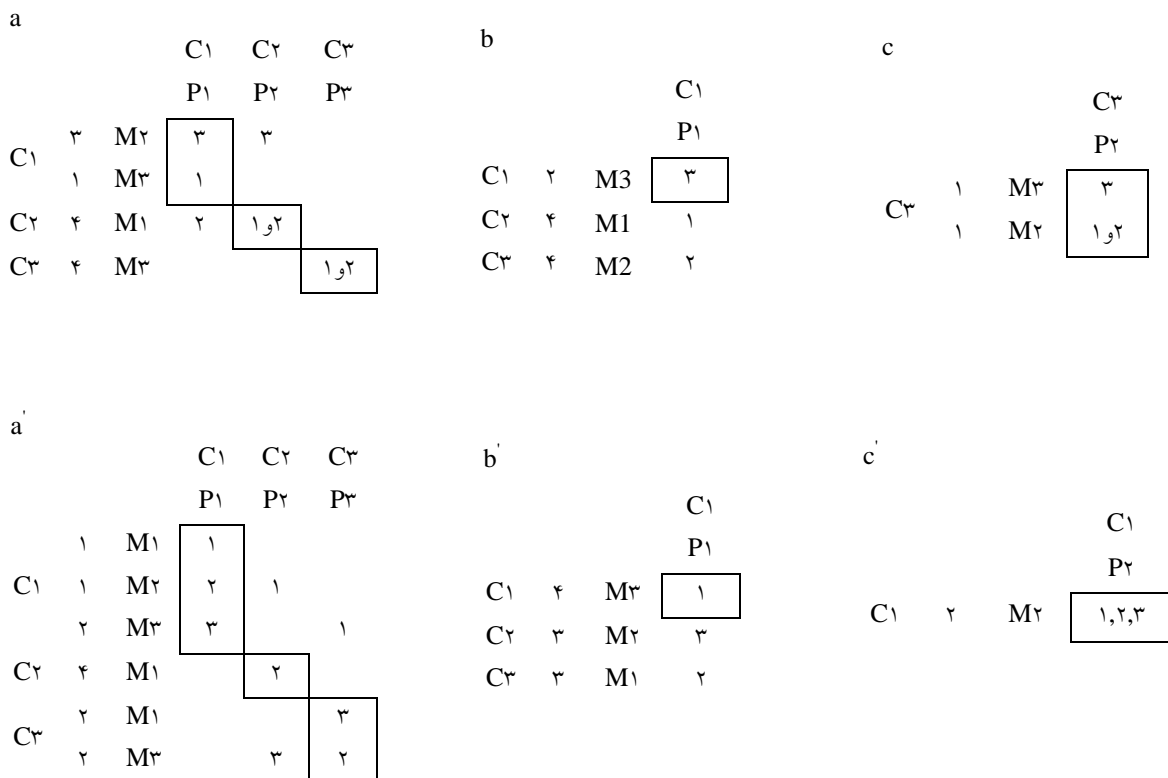
جدول ۳- برنامه بهینه تولید برای مثال بدون MHE

	t=۱			t=۲			t=۳		
	I۱	I۲	I۳	I۱	I۲	I۳	I۱	I۲	I۳
P_{it}	۳۹۳	۱۰۲۷	۵۹۸	۱۵۰۵				۲۷۳	
S_{it}			۴۹۲	۲۵۲					
In_{it}^+	۵۰*	۲۷	۱۰۰*	۱۹۸	۲۷				
In_{it}^-	۳۷۵		۱۵۲						
D_{it}	۸۰۰	۱۰۰۰	۸۵۰	۹۵۰	۰	۳۴۰	۴۵۰	۳۰۰	۰

* موجودی اولیه

به‌علاوه پیکربندی‌های سلولی بهینه برای سه دوره متناظر با راه‌حل بهینه مدل ۳ در شکل ۱ (a, b, c) نشان داده شده‌اند؛ برای مثال در نخستین دوره (شکل ۱. a) ماشین‌های $M2$ و $M3$ و قطعه نوع ۱ به سلول ۱، $M1$ و قطعه نوع ۲ به سلول ۲ و $M3$ و قطعه نوع ۳ به سلول ۳ تخصیص داده می‌شود. عدد نشان‌داده شده در دومین ستون تعداد ماشین‌های لازم است؛ برای مثال، سه $M2$ ، یک $M3$ ، چهار $M1$ و چهار $M3$ باید به ترتیب در سلول ۱، ۲ و ۳ قرار گیرند. هم‌چنین دو حرکت بین سلولی برای عملیات ۲ از قطعه نوع ۱ و ۳ از قطعه نوع ۲ در دوره نخست (شکل ۱. a) وجود دارد.

همان‌طورکه نشان داده شده است تشکیل سلول بهینه از مدل ۳ متفاوت است؛ به عبارت دیگر با در نظر گرفتن نقش MHE در مدل یکپارچه DCFP و برنامه‌ریزی تولید، تشکیل سلول بهینه با برنامه‌ریزی تولید بهینه تغییر می‌کند.



شکل ۱- پیکربندی بهینه برای مدل بدون MHE در (a, b, c) و برای مدل با MHE در (a', b', c')

با در نظر گرفتن اطلاعات ارائه شده درخصوص MHE درون و بین سلولی در جدول ۲ تابع هدف بهینه و برنامه تولید برای مدل ۲ در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

در این حالت، پیکربندی‌های سلولی بهینه در شکل ۱ (a', b', c') نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن MHE درون و بین سلولی در یک DCMS برنامه‌ریزی تولید یکپارچه اثر معنی‌داری روی هزینه، برنامه‌های تولید و پیکربندی سلول‌ها در مقایسه با جدول ۳ و شکل ۱ (a, b, c) دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، ارزش تابع بهینه بدون MHE و با MHE به ترتیب ۱۹۱۳۹۱ و ۲۰۲۵۶۰ است. با این حال این دو مقدار مشابه و مقایسه پذیر نیستند؛ زیرا هزینه‌های ثابت برای MHE در مدل ۳ در نظر گرفته نشده است. برای مقایسه این دو مقدار باید هزینه محاسبه شده برای استفاده از MHE در مدل بدون MHE در نظر گرفته شود. این مقدار در رابطه ۳۷ محاسبه شده است.

$$\left\{ \left[\left(\frac{(393 \times 2 + 1027 \times 2 + 1505 \times 3) \times 0/15}{500} \times 500 \right) + \left(\frac{(393 \times 1 + 1027 \times 1 + 598 \times 2 + 273 \times 2) \times 0/05}{500} \times 200 \right) \right] \times 3 \right\} + \{ [(3 \times (20000 - 13500)) + (3 \times (5000 - 3400))] \} \cong 26800 \quad 37$$

به عبارت دیگر هزینه کل برای مدل بدون MHE برابر است با (۲۱۸۱۹۳ = ۲۶۸۰۰ + ۱۹۱۳۹۱). همان‌طو که مشاهده می‌شود هزینه‌ها با مدیریت MHE کاهش داده می‌شود. فرض اساسی برای محاسبه این فرمول این است که MHE لازم برای انتقال محصولات در دوره نخست حاصل می‌شود. در برنامه‌ریزی تولید، مجموع قطعات تولید شده بدون مدل MHE برابر با ۳۷۹۶ است؛ در حالی که با مدل MHE برابر با ۳۷۷۳ است؛ یعنی بدون MHE $3796 - 3773 = 23$ نوع قطعه کمتر از مدل MHE تولید می‌شود؛ زیرا ارائه این ۲۳ نوع قطعه با برون‌سپاری به صرفه‌تر است.

جدول ۴- مقادیر بهینه تابع هدف برای مثال با در نظر گرفتن MHE

Z^{best}	هزینه ثابت ماشین	هزینه متغیر ماشین	هزینه ثابت MHE بین سلولی	هزینه ثابت MHE درون سلولی	هزینه متغیر MHE بین سلولی	هزینه متغیر MHE درون سلولی
۲۰۲۵۶۰	۴۴۰۰۰	۶۰۴۷۷	۴۰۰	۵۰	۸۲۵۰	۳۱۰
هزینه پیکربندی مجدد	هزینه خرید MHE بین سلولی	هزینه خرید درون MHE سلولی	هزینه فروش MHE بین سلولی	هزینه فروش MHE درون سلولی	هزینه تعویق، موجودی و برون سپاری	
۱۴۸۰۰	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۳۵۰۰	۳۴۰۰	۶۶۱۷۳۳	

جدول ۵- برنامه بهینه تولید برای مثال با در نظر گرفتن MHE

	t=1			t=2			t=3		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
P_{it}	۳۷۶	۷۷۴	۷۵۰	۱۵۷۳				۳۰۰	
S_{it}		۲۲۶	۳۴۰	۲۰۱					
In_{it}^+	۵۰*		۱۰۰*	۲۴۹					
In_{it}^-	۳۷۴	۲۲۶							
D_{it}	۸۰۰	۱۰۰۰	۸۵۰	۹۵۰	۰	۳۴۰	۴۵۰	۳۰۰	۰

* موجودی اولیه

برای این مثال جدول ۶ و ۷ نشان‌دهنده تعداد MHE استفاده‌شده، خریداری‌شده و فروخته‌شده برای MHE درون و بین سلولی در کل افق زمانی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر تعداد MHE در سیستم موجب بهبود کارایی سیستم تولید می‌شود.

جدول ۶- تعداد بهینه MHE بین سلولی استفاده، خریده و فروخته‌شده

MHE بین سلولی	دوره		
	اول	دوم	سوم
MHE استفاده‌شده	۲	۱	۱
MHE خریداری‌شده	۲	۰	۰
MHE فروخته‌شده	۰	۱	۰

جدول ۷- تعداد بهینه MHE درون سلولی استفاده، خریده و فروخته‌شده در سلول‌های مختلف

MHE درون سلولی	دوره								
	نخست			دوم			سوم		
	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳
MHE استفاده‌شده	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
MHE خریداری‌شده	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۰	۲
MHE فروخته‌شده	۲	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱
MHE بین سلولی	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰

نتیجه‌گیری

این مقاله مدل یکپارچه مسئله تشکیل سلول پویا (DCFP) و برنامه‌ریزی تولید را با در نظر گرفتن نقش وسایل جابه‌جایی مواد (MHE) بررسی کرد. در این پژوهش یک الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تدوین و سپس با افزودن چندین متغیر و قیود، خطی شد. برای مشاهده اثر MHE روی راه‌حل‌های مدل، یک مثال ارائه شده است. با مقایسه بین عملکرد مدل با و بدون MHE، اثر آنها نشان داده شد که نتیجه می‌شود مدیریت MHE می‌تواند یک راه‌حل را با هزینه‌های کمتر پیدا کند. به علاوه استنباط می‌شود برنامه‌ریزی تولید بهینه با در نظر گرفتن MHE در سیستم تولیدی تغییر می‌یابد. مدل پیشنهادی با روش CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شد. در نهایت پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده نقش MHE در DCFP، تلفیق شده با سایر مسائل نظیر گمارش کارگر، چیدمان گروه و زمان‌بندی، در نظر گرفتن پارامترهایی که در مدل ریاضی دارای عدم قطعیت هستند و بررسی برخی از MHE‌های خاص نظیر وسایل نقلیه هدایت‌شده اتوماتیک در نظر گرفته شود.

References

- Aryanezhad, M. B., Deljoo, V., & Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J. (2009). "Dynamic cell formation and the worker assignment problem: A new model". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3-4), 329-342.
- Arzi, Y., Bukchin, J., & Masin, M. (2001). "An efficiency frontier approach for the design of cellular manufacturing systems in a lumpy demand environment". *European Journal of Operational Research*, 134(2), 346-364.

- Bagheri, M., & Bashiri, M. (2014). "A new mathematical model towards the integration of cell formation with operator assignment and inter-cell layout problems". *Applied Mathematical Modelling*, 38(4), 1237–1254.
- Bajestani, M. A., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A. R., & Khoshkhou, G. B. (2009). "A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem". *Computers & Operations Research*, 36(3), 777–794.
- Balakrishnan, J., & Hung Cheng, C. (2005). "Dynamic cellular manufacturing under multiperiod planning horizons". *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), 516–530.
- Bulgak, A. A., & Bektas, T. (2009). "Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration". *European Journal of Operational Research*, 192(2), 414–428.
- Defersha, F. M., & Chen, M. (2006). "A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing" systems. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 767–783.
- Defersha, F. M., & Chen, M. (2006). "Machine cell formation using a mathematical model and a genetic-algorithm-based heuristic". *International Journal of Production Research*, 44(12), 2421–2444.
- Ghotboddini, M. M., Rabbani, M., & Rahimian, H. (2011). "A comprehensive dynamic cell formation design: Benders' decomposition approach". *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2478–2488.
- Javadian, N., Aghajani, A., Rezaeian, J., & Sebdani, M. J. G. (2011). "A multi-objective integrated cellular manufacturing systems design with dynamic system reconfiguration". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1–4), 307–317.
- Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., & Khorrami, J. (2012). "Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing". *Computers & Operations Research*, 39(11), 2642–2658.
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M., & Solimanpur, M. (2010). "Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment". *Computers & Mathematics with Applications*, 60(4), 1014–1025.
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016). "A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria". *Applied Mathematical Modelling*, 40(4), 2674–2691.
- Rheault, M., Drolet, J. R., & Abdounour, G. (1996). "Dynamic cellular manufacturing system (DCMS)". *Computers & Industrial Engineering*, 31(1), 143–146.
- Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., & Jabal-Ameli, M. S. (2008). "A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system". *European Journal of Operational Research*, 185(2), 563–592.
- Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Sassani, F. (2008). "A fuzzy programming approach for a cell formation problem with dynamic and uncertain conditions". *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 215–236.
- Safaei, N., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). "Integrated cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems". *International Journal of Production Economics*, 120(2), 301–314.
- Saidi-Mehrabad, M., & Safaei, N. (2007). "A new model of dynamic cell formation by a neural approach". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9–10), 1001–1009.
- Sakhaii, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M., & Vatani, B. (2013). "A robust optimization

- approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines". *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 169–191.
- Saxena, L. K., & Jain, P. K. (2011). "Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 11–34.
- Saxena, L. K., & Jain, P. K. (2012). "An integrated model of dynamic cellular manufacturing and supply chain system design". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(1–4), 385–404.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M.-B., Safaei, N., & Azaron, A. (2005). "Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics". *Applied Mathematics and Computation*, 170(2), 761–780.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., & Babakhani, M. (2005). "Solving a dynamic cell formation problem with machine cost and alternative process plan by memetic algorithms". *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3777 LNCS, 213–227.
- Wang, X., Tang, J., & Yung, K. (2009). "Optimization of the multi-objective dynamic cell formation problem using a scatter search approach". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(3–4), 318–329.
- Wemmerlöv, U., & Hyer, N. L. (1987). "Research issues in cellular manufacturing". *International Journal of Production Research*, 25(3), 413–431.
- Zohrevand, A. M., Rafiei, H., & Zohrevand, A. H. (2016). "Multi-objective dynamic cell formation problem: A stochastic programming approach". *Computers & Industrial Engineering*, 98, 323–332.

¹- Cellular manufacturing system
²- Group Technology
³- Wemmerlöv
⁴- Hyer
⁵- Cell Formation Problem
⁶- Dynamic cellular manufacturing system
⁷- Rheault
⁸- Bulgak
⁹- Bektas
¹⁰- Balakrishnan
¹¹- Hung Cheng
¹²- Defersha
¹³- Chen
¹⁴- Wang
¹⁵- Saxena
¹⁶- Jain