International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2017)

December 2017, Volume 28, Number 4
Pp 543-558

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Operator Learning-Forgetting Uncertainty Consideration in Cellular Manufacturing System: a Case Study from Saipa Car Manufacturing Company

Majid Rafie* & Atiyeh Mohamaditalab

Majid Rafie, *Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology*
Atiyeh Mohamaditalab, *M.S.c student in industrial engineering, Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology*

Keywords

Cellular manufacturing system;
Assignment operator;
Learning and Forgetting operator;
Operator skill levels;
Robust Optimization

ABSTRACT

One of the most important issue in every manufacturing system is the operator management. In this paper the operator assignment problem has been studied within a cellular manufacturing system. The most important novelty of this research is to consider the operator learning, forgetting effects. Actually an operator skill level can be increased or decreased based on the time spending on a machine and with a specified too. Moreover, operator related issues like hiring, firing and salary have been regarded in the proposed model. Besides this, the model parameters uncertainty has been considered and a robust optimization approach has been developed to solve the model, efficiently. Using the proposed approach, the model solution remains feasible even optimal in all uncertain parameter level. In order to verify and validate the proposed model, some numerical examples are generated randomly and solved using the Gams optimization package. Also a case study taken from literature has been investigated. Data are taken from Saipa car manufacturing company in order to demonstrate the model performance. Finally the managerial insights, are discussed in details.

© 2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 4, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۸، زمستان ۱۳۹۶
صفحـــه ۵۴۴- ۵۵۸

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

تخصیص اپراتور با در نظرگیری اثر یادگیری و فراموشی در یک سیستم تولید سلولی در شرایط عدم قطعیت: مطالعه موردی (شرکت سایپا)

مجید رفیعی* و عطیه محمدی طلب

کلمات کلیدی

سیستم تولید سلولی، تخصیص اپراتور، یادگیری و فراموشی اپراتور، سطوح مهارتی اپراتور، بهینه‌سازی استوار.

چکیده:

یکی از مهمترین مسائل در سیستم تولید سلولی مبحث تخصیص منابع به خصوص نیروی انسانی می‌باشد. نوآوری این پژوهش نسبت به کارهای انجام شده، در نظرگیری اثر یادگیری و فراموشی اپراتور ضمن خدمت است، مسئله‌ای که می‌تواند در میزان مهارت کسب شده‌ی اپراتور در انتهای دوره‌ی برنامه‌ریزی و تخصیص فعالیت‌ها در دوره‌ی آتی موثر واقع شود. در این مدل عواملی دیگر همچون استخدام و اخراج، حقوق و دستمزد، سطح‌بندی مهارتی و جابه‌جایی اپراتور پرداخته شده است و سعی در ارائه‌ی مدلی جامع در مبحث تخصیص نیروی انسانی شده است. در این مطالعه یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌سازی عدم قطعیت در سیستم تولید سلولی ارائه شده است. استواری مدل ارائه شده باعث شده است تا جواب بدست آمده به ازای تمامی مقادیر پارامترهای غیرقطعی، شدنی بودن خود را حفظ نماید و در این محیط غیر قطعی به دنبال یافتن جواب بهینه باشد. مدل ارائه شده با استفاده از تکنیک‌های خطی‌سازی به مدلی خطی تبدیل شده‌است. پس از کدنویسی مدل ارائه شده، با استفاده از نرم‌افزار گمس به تحلیل-هایی از جمله بررسی مقادیر بهینه و زمان حل هر یک از مدل‌های خطی و غیرخطی پرداخته شده است. همچنین یک مطالعه موردی از مرکز ریخته گری شرکت سایپا مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده هزینه استخدام اپراتور بیشترین تاثیر را بر روی میزان بهینه تابع هدف در شرایط عدم قطعیت مدل داشته است.

۱. مقدمه

مسئله سیستم تولید سلولی را می‌توان کاربرد عملی فلسفه تکنولوژی گروهی به حساب آورد که هدف از آن دسته بندی ماشین آلات و قطعات به نحوی می‌باشد که حرکات بین سلولی و درون سلولی قطعات کمینه گردد. البته این هدف، هدف سنتی و ابتدایی این مسئله می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام یافته توسط ومرلو و هایر در سال ۱۹۸۹، شرکتهای مورد مطالعه، عوامل زیر را از مزیت‌های عمده بکارگیری سیستم تولید سلولی بیان کرده اند:

کاهش زمان آماده سازی
کاهش موجودی در جریان ساخت
کاهش هزینه جابجایی مواد
کاهش هزینه مستقیم و غیر مستقیم اپراتور
بهبود کیفیت ساخت
بهبود در روند جریان مواد
بهبود در استفاده از فضا
بهبود روحیه کارمندان

مهمترین تفاوتی که می‌توان بین سیستم های سنتی تولید کارگاهی و سیستم تولید سلولی برشمرد، در استراتژی گروه بندی آنها می‌باشد. در سیستم های کارگاهی، ماشین‌آلات بر اساس شباهت‌های عملکردی مورد دسته بندی قرار می‌گیرند و قطعه به عنوان یک عضو اساسی از تولید، مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در سیستم تولید سلولی، ماشین آلات به طریقی در سلول‌های تولیدی، دسته بندی می‌شوند که خانواده و گروه

تاریخ وصول: ۹۴/۸/۳۰
تاریخ تصویب: ۹۵/۱۱/۲۰

عطیه محمدی طلب، کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف
mohamaditalab88@gmail.com
***نویسنده مسئول مقاله: مجید رفیعی**، استادیار دانشگاه صنعتی شریف .
rafiee@sharif.edu

خاصی از محصولات تشکیل یابد. معمولا لزومی ندارد که ماشین-آلات موجود در هر سلول تولیدی دارای عملکردها و کارکردهای یکسانی باشند. در حالت کلی یک سیستم سلولی شامل موارد زیر می باشد:

۱- پیکربندی سلول‌ها : دسته بندی قطعات و ماشین آلات بر اساس عملیات و شباهت‌های تولیدی و تشکیل خانواده قطعات.
۲- چیدمان گروهی: تعیین وطراحی چیدمان ماشین آلات در داخل هر سلول و همچنین چیدمان خود سلول‌ها به شکلی بهینه یا نزدیک به بهینه.
۳- زمان‌بندی گروهی: زمان‌بندی خانواده قطعات به طوری که در کم‌ترین زمان ممکن (یا تاخیر ممکن) عملیات تولید پایان پذیرد.
۴- تخصیص منابع : عبارت است از تخصیص منابع انسانی و همچنین تجهیزات به ماشین آلات، به گونه ای که کم‌ترین هزینه تدارک این تجهیزات را متحمل شویم.

هر مطالعه ای بر روی سیستم‌های تولیدی، زمانی می‌تواند مفید بوده و در جامعه صنعتی مورد کاربرد واقع شود که اغلب این موارد را شامل شود. در غیر این‌صورت، صرفا یک مطالعه آکادمیک محسوب شده و این عامل باعث جدایی صنعت از حوزه علوم و مخصوصا نوآوری‌های آن خواهد شد. بحث تخصیص منابع (نیروی انسانی) از سال ۲۰۱۰ به یکی از مسائل به روز در سیستم تولید سلولی تبدیل شده است. ابتدا به موضوعاتی همچون استخدام و اخراج اپراتور، حقوق و دستمزد پرداخته‌اند. بحث آموزش اپراتور و توجه به سطوح مهارتی آن‌ها بحث مهم و جالب توجه‌ی است که خیلی کم به آن پرداخته شده و بیشتر به ارائه بحث‌های کیفی در این حوزه پرداخته شده است. در مقالات صحبتی از ارتقای مهارت اپراتور در حجم کاری محوله در دوره‌ی کاری وی نشده است و به افزایش مهارت وی توسط آموزش اشاره شده است. باقری و بشیری (۲۰۱۴)، تخصیص اپراتور به ماشین را در محیط پویا مد نظر قرار دادند. مدل ارائه‌شده، یک مدل غیرخطی مختلط عدد صحیح و پیوسته می‌باشد که مسائل پیکربندی سلول، تعیین چیدمان سلول‌ها در محیط تولیدی و تخصیص اپراتور به ماشین و سلول به طور هم‌زمان مورد توجه قرار می‌دهد. دخالت دادن عواملی مانند حرکات درون‌سلولی و بین سلولی قطعات، وابسته به فاصله دو سلول، هزینه انتقال ماشین از سلولی به سلول دیگر در بین دو دوره تولیدی متوالی و هزینه های استخدام، اخراج و دستمزد اپراتور از ویژگی‌های خاص این مدل می باشد. [۱] رفیعی و قدسی (۲۰۱۳)، یک مدل ریاضی دو هدفه برای حل هم‌زمان مسائل تخصیص اپراتور و پیکربندی سلول، ارائه داده‌اند. کمینه سازی هزینه های خرید و جابجایی و بالاسری ماشین‌آلات، حرکات بین سلولی و درون سلولی قطعات و حرکات بین سلولی اپراتور توسط تابع هدف اول مورد نظر بوده است. تابع هدف دوم ضریب استفاده از اپراتورها را افزایش می‌دهد. از آنجا که مدل ارائه شده مدلی از نوع مسائل سخت می‌باشد، از الگوریتم مورچگان برای حل مدل، استفاده شده است. همچنین به منظور بهبود عملکرد الگوریتم ارائه شده، این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک ترکیب شده است. [۲] سعیدی مهرآباد و همکاران (۲۰۱۳)، برنامه‌ریزی تولید را یک فعالیت حیاتی در هر سیستم تولید می‌دانند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید در محیط پویا طراحی شده است که ویژگی‌های مهم تولید در آن پوشش داده شده است که عبارتند از: چند دوره‌ای بودن برنامه‌ریزی تولید، توالی عملیات، پیکربندی مجدد، ماشین‌آلات همسان، ظرفیت ماشین‌آلات و آموزش اپراتور همین طور محدودیت‌های اصلی شامل برآورد تقاضا، ماشین‌آلات در دسترس، ظرفیت زمانی ماشین‌آلات، زمان در دسترس بودن اپراتور و آموزش می‌باشد. [۳] مهدوی و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل ریاضی برای مسئله تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور به ماشین ارائه داده اند. در مدل ارائه شده عواملی مثل ظرفیت ماشین ، چند دوره ای بودن افق برنامه ریزی و زمان بیکاری کارگر در نظر گرفته شده است. هدف مدل ارائه شده ، کمینه کردن هزینه های سفارش پس افت و نگهداری موجودی ، جابجایی بین سلولی قطعات ، استخدام و اخراج و حقوق کارگران می‌باشد. مفروضات مهم مدل ارائه شده به این شکل است که پارامترهایی مانند میزان تقاضا، زمان پردازش، میزان ساعت در دسترس کارگر، ظرفیت ماشین ، تعداد سلول‌ها، هزینه های تولیدی و بالاسری، هزینه های تقاضاهای پس افتاده و هزینه های کارگر، در تمامی دوره های تولیدی مشخص می باشد. همچنین محدودیت‌های اصلی مقاله ارائه شده، عبارتند از ظرفیت ماشین، ظرفیت کارگر در دسترس و همچنین حجم تولید. مدل ارائه شده پس از خطی سازی بر روی دو مثال نمونه، حل و کارائی آن مورد تایید قرار گرفته است. مهدوی و همکاران **[۴]** یک مدل ریاضی برای در نظرگیری و حل همزمان مساله پیکربندی و تعیین چیدمان ماشین ارائه داده اند. هدف مدل ارائه شده کاهش هزینه های حرکات بین سلولی و درون سلولی قطعات و همینطور هزینه سرمایه گذاری ماشین آلات میباشد.

جدول ۱. ویژگی‌های پوشش داده شده در مقالات سیستم تولید سلولی

شماره	ویژگی‌های پوشش داده شده در مدل ریاضی
۱	توالی عملیات
۲	جابه‌جایی قطعات
۲- الف	جابه‌جایی قطعات بین سلول‌ها
۲- ب	جابه‌جایی قطعات درون سلول‌ها
۳	پیکربندی مجدد
۴	زمان/ هزینه‌ی عملیات ماشین‌آلات
۵	ماشین‌آلات چند کاره
۶	تخصیص اپراتور
۶-الف	استخدام و اخراج
۶-ب	حقوق و دستمزد اپراتور
۶-ج	اموزش اپراتور
۶-د	جابه‌جایی بین سلولی اپراتور
۶-ه	سطح بندی مهارتی اپراتور
۷	عدم قطعیت

خواکسار حقانی و همکاران [۵] یکمدل ریاضی برای ترکیب مساله سیستم تولید سلولی با برنامه ریزی تولید ارائه داده اند. بسیاری از عوامل اساسی تولید مانند ظرفت ماشین آلات در مدل ارائه شده توسط آنها در نظر گرفته شده است. همچنین مهدوی و همکاران [۶] یک مفهوم جدید به نام تعاملات کارگران در محیط کارگاه سلولی را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده اند.

عوامل پوشش داده شده در مقالات سیستم تولید سلولی به صورت جزئی در جدول(۱) نمایش داده شده است. موارد نارنجی رنگ در جدول (۱) عوامل در نظر گرفته در این مطالعه می‌باشد. با توجه به مقالات جدول(۲) می‌توان خلاء تحقیقاتی پوشش داده شده و خلاقیت این مقاله را ملاحظه کرد. در این مقاله مهارت اپراتور به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲. مقالات سیستم تولید سلولی

	۱	۲		۳	۴	۵	۶					۷
		الف	ب				الف	ب	ج	د	ه	
تحقیق فعلی	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*
دیپ و سینگ[۷]	*	*	*	*	*							
رنا[۸]	*	*		*	*							*
اسماعیل نژاد و همکاران[۹]	*				*							*
وو و سوزوکی[۱۰]	*	*			*							
الهورانی[۱۱]	*	*	*		*							
یوالتاس[۱۲]	*				*							
نوری[۱۳]	*	*	*		*		*	*		*		
کومار و شارما[۱۴]	*	*										
سخایی و همکاران[۱۵]	*	*	*	*			*		*			*
نیکانا و همکاران[۱۶]	*	*	*	*	*		*	*				*
اروزان[۱۷]	*				*							
بروسکو[۱۸]	*											
وونا و لوگندران[۱۹]	*				*							
هالت و بشیرزاده[۲۰]	*	*			*							

یدالهی و همکاران[۲۱]	*	*	*																			
ایگلمازو همکاران[۲۲]	*				*																	*
پارک و همکاران[۲۳]																				*		
شریفی و همکاران[۲۴]	*	*			*	*																
بایکسوقلو و گورکملی[۲۵]	*																					
محمدی و فورقانی[۲۶]	*	*	*		*																	
بوتاکی[۲۷]	*																			*		
جبل عاملی و مشرف جوادی[۲۸]	*																					
راجا و آنبومالار[۲۹]	*	*																				
کاو و چین[۳۰]	*								*													
سور و همکاران[۳۱]	*																					
اوساما[۳۲]	*	*			*	*																
حسن‌زاده و همکاران[۳۳]	*	*			*	*																
پایدار و همکاران[۳۴]	*	*	*		*																	*

	۱	۲			۳	۴	۵	۶				۷			
		الف		ب				الف		ب		ج		د	ه
تحقیق فعلی	*	*		*		*	*	*		*				*	*
اگیلماز و سور[۳۵]	*														*
جوادیان و همکاران[۳۶]	*	*				*									
کیا و همکاران[۳۷]	*	*		*		*									
پایدار و سعیدی مهرآباد[۳۸]	*					*									*
مهدوی و همکاران[۳۹]	*	*		*											
سعیدی مهرآباد و همکاران[۳]	*					*						*			
رفیعی و قدسی[۲]		*		*		*								*	
باقری و بشیری[۱]		*		*		*		*		*		*			
پایدار و همکاران[۴۰]	*	*		*		*									
مجازی دلفرد[۴۱]		*		*		*									
بشیری و باقری[۴۲]	*	*		*				*		*		*			
چنگ و همکاران[۴۳]	*	*													
رضاییان زیدی و همکاران[۴۴]	*	*		*											
سلیمان‌پور و همکاران[۴۵]	*	*				*									
ابدولقادری و همکاران[۴۶]	*														
الهورانی[۴۷]	*	*													
اشکین[۴۸]	*	*				*						*			*
فانا و فنگ[۴۹]	*	*		*		*				*		*			*
لی و آهن[۵۰]	*	*													
لینان و همکاران[۵۱]	*	*				*									

در ارتباط با عدم قطعیت تا کنون مطالعات کمی در حوزه سیستم تولید سلولی ارائه شده است. به عنوان مثال سخایی و همکاران [۱۵] یک مدل ریاضی برای سیستم تولید سلولی با در نظر گیری عدم قطعیت ارائه داده و آن را با رویکرد بهینه سازی استوار حل کرده اند. با این حال در مدل ارائه شده توسط آن ها هیچ گونه تحلیل جامعی بر روی رفتار مدل در شرایط عدم

قطعیت ارائه نشده است. همچنین اسماعیل نژاد و همکاران [۹] مدلی ریاضی برای طراحی سیستم تولید سلولی ارائه داده اند که در آن رفتار احتمالی پارامترها مورد توجه بوده است. اما در بسیاری از مواقع رفتار عدم قطعیت پارامترها از توزیع خاصی پیروی نمیکند و لذا نیاز به رویکردی داریم که بتواند مساله را در شرایط عدم وجود اطلاعات از توزیع پارامترها مدل کند. پایدار و همکاران[۳۴] یک مدل بهینه سازی استوار برای ترکیب مساله سیستم تولید سلولی با انتخاب توزیع کننده در مساله زنجیره تامین ارائه داده اند. با اینکه در رویکرد آنها بهینه سازی استوار به خوبی در نظر گرفته شده است، اما رفتار اپراتور به عنوان کلیدی ترین منبع تولیدی مورد توجه نبوده است.

با نگاهی به مطالعات انجام گرفته در زمینه عدم قطعیت در سیستم تولید سلولی در میابیم که هنوز مطالعه جامعی که بتواند پارامترهای بیشتری از سیستم تولید سلولی را در یک چارچوب استوار در نظر بگیرد وجود نداشته است. این مقاله سعی دارد این خلاء تحقیقاتی را پوشش دهد.

۲. مدل ریاضی

هر اپراتور دارای سطحی از توانایی برای کارکردن با هر ابزاری می-باشد. براساس حداقل توانایی موردنیاز برای کارکردن با ابزار، حق استخدام شدن در هر دوره تولیدی برای اپراتور وجود دارد. اگر اپراتوری در دوره‌ای استخدام شود، براساس مدت زمان کار با یک ابزار، توانایی وی در کار کردن با آن ابزار افزایش می‌یابد. اگر در دوره‌ای استخدام نشود به علت وجود فراموشی و دور ماندن از کار، توانایی وی برای کار کردن با ابزارها کاهش می‌یابد. در انتهای هر دوره براساس به روزرسانی توانایی کارکردن هر اپراتور با هر ابزار، مقیاسی برای سطح بندی اپراتورها انتخاب می‌شود(برای مثال میانگین توانایی). متناسب با سطح‌بندی به اپراتورها دستمزد پرداخت می‌شود. در واقع قدرت یادگیری در حین کار برای اپراتور مد نظر قرار گرفته است که تا به حال در هیچ کار تحقیقاتی دیده نشده است. یکی از مزایای در نظر گرفتن یادگیری و فراموشی در متعادل ساختن هزینه‌های استخدام، اخراج، حقوق و دستمزد و توجه به اپراتور است. توجه و اهمیت دادن به اپراتور در سیستم‌های تولیدی عامل بسیار مهمی است، باعث شکوفایی در محیط کار و در نهایت بالا رفتن کیفیت محصولات می‌شود.

۲-۱. مفروضات:

- میزان تقاضا برای هر نوع قطعه در هر دوره تولیدی مختلف در نظر گرفته شده است ولی عددی مشخص و معلوم می‌باشد.
- توالی عملیات مشخص و معلومی برای هر قطعه در نظر گرفته شده است.
- ماشین‌آلات چندکاره بوده و تخصیص ابزار به هر ماشین، ماشین به هر سلول و عملیات هر قطعه به ابزار مشخص شده است.
- اپراتورها توان جابه‌جایی در بین سلول‌ها را دارند. مسیرهای مختلفی می‌تواند برای هر اپراتور وجود داشته باشد و خروجی این مدل، یافتن مسیر بهینه‌ی اپراتور نمی‌باشد.
- حداکثر ظرفیت کاری برای اپراتورها در هر دوره تولیدی مشخص شده است.
- در هر دوره از بین افراد براساس توانایی و کمینه کردن هزینه‌های مطرح شده در تابع هدف، عده‌ای استخدام می-شوند و عده‌ای بی‌کار می‌مانند.
- افراد استخدامی در هر دوره بایستی در دوره قبل بی‌کار باشند، یعنی افرادی استخدامی در هر دوره، افراد بی‌کار در دوره‌ی قبل هستند.
- اثر یادگیری و فراموشی اپراتور مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که اگر یک اپراتور در یک دوره تولیدی مشغول به کار شود، با ابزارهایی که مشغول به کار است به میزان حجم کاری با آن ابزار به مهارت وی افزوده می‌شود و اگر با ابزاری کار انجام ندهد به علت حضور در محیط کار، رویت ماشین‌آلات و نحوی کار ابزار از مهارت وی کاسته نمی‌شود و ثابت باقی می‌ماند. اگر اپراتوری در دوره‌ای به کار گرفته نشود، به علت فراموشی، از سطح مهارتی وی در تمامی ابزارها کاسته می‌شود.

براساس به روز رسانی مهارت‌ها در انتهای هر دوره‌ی تولیدی، برای هر اپراتور میانگین مهارتی بدست می‌آید و براساس این مقیاس، اپراتورها سطح‌بندی می‌شوند و براساس سطح بندی در هر دوره حقوق دریافت می‌کنند.

۲-۲. اندیس‌ها

- اندیس ماشین‌آلات و تعداد کل ماشین آلات $m, m' = 1,..,M$
- اندیس ابزارها و تعداد کل ابزارها $g, g' = 1,..,G$
- اندیس سلول‌ها وتعداد کل سلول‌ها $c, c' = 1,..,C$
- اندیس قطعات تولیدی وتعداد کل قطعات تولیدی $i = 1..,I$
- اندیس دوره‌های تولیدی و تعداد کل دوره‌های تولیدی $t = 1,..,T$

- اندیس عملیات هر قطعه i در هر دوره تولیدی و تعداد کل این عملیات $j = 1,..,O_i$
- اندیس اپراتورها و تعداد کل اپراتورها $k = 1,..,K$
- اندیس سطوح مهارتی اپراتور و تعداد کل سطوح مهارتی $l = 1,..,L$

۳-۲. پارامترها

- هزینه استخدام و اخراج اپراتور H, F
- هزینه دستمزد اپراتور که در سطح l ام قرار دارد SA_l
- هزینه هر واحد حرکت بین سلولی برای اپراتور $movek$
- توانایی کارکردن با ابزار g برای اپراتور k ام که در ابتدای دوره‌ی اول قرار دارد $a_{kg}^{t=1}$
- حداقل توانایی لازم برای کارکردن با ابزار g ام aw_g
- مرزهای سطح توانایی کار کردن اپراتور با ابزارها ∂_l
- میزان کاهش و افزایش توانایی اپراتور ω_1, ω_2
- حداقل تعداد اپراتور مورد نیاز، در هر دوره تولیدی $\min EM$
- حداکثر ظرفیت زمانی کاری اپراتور $captime$
- میزان تقاضای قطعه i ام در دوره تولیدی t ام D_i^t
- فاصله‌ی سلول c و c' $dis_{cc'}$
- زمان پردازش عملیات j ام قطعه i ام توسط ابزار g ام روی ماشین m ام $time_{ijgm}$
- اگر ماشین m ام در دوره t ام به سلول c ام تخصیص یابد : ۱؛ در غیر اینصورت : ۰ $\left(X_{mc}^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- اگر ابزار g ام روی ماشین m ام در دوره‌ی t ام نصب شود : ۱؛ در غیر اینصورت : ۰ $\left(Y_{gm}^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- اگر عملیات j ام قطعه i ام در دوره t ام بر روی ابزار g ام انجام شود :۱؛ در غیر اینصورت : ۰ $\left(P_{ijg}^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- حجم کاری با ابزار g در دوره t $\left(\eta_g^t = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{O_i}\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} p_{ijg}^t \times y_{gm}^t \times x_{mc}^t \times time_{ijgm} \times D_i^t\right)$
- امکان جابه‌جایی اپراتور بین سلولی توسط تغییر ابزار $\left(\sigma_{gmcg'm'c'}^t = y_{gm}^t \times x_{mc}^t \times y_{g'm'}^t \times x_{m'c'}^t\right)$

۴-۲. متغیرهای تصمیم

- اگر اپراتور k در دوره‌ی t ام مشغول به کار باشد: ۱؛ در غیر اینصورت:۰ $\left(b_k^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- اگر اپراتور k در دوره t ام استخدام شود : ۱؛ در غیر اینصورت : ۰ $\left(h_k^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- اگر اپراتور k در دوره t ام در سطح t ام قرار گیرد: ۱؛ در غیر اینصورت :۰ $\left(le_{lk}^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- اگر اپراتور k در دوره‌ی t ام با ابزار g مشغول به‌کار باشد:۱؛ در غیر اینصورت : ۰ $\left(w_{kg}^t = \begin{cases}1;\\0;\end{cases}\right)$
- توانایی کارکردن با ابزار g در ابتدای دوره‌ی t برای اپراتور k ام $\left(a_{kg}^{t\geq 2}\right)$

۵-۲. مدل غیر خطی

مدل ارائه شده، یک مدل غیرخطی مختلط عدد صحیح می‌باشد که به صورت ذیل ارائه می‌شود:

$$\min \quad OF1-1=$$

$$\sum_{k=1}^{K}\left(h_k^1\times H\right)+\sum_{t=2}^{T}\sum_{k=1}^{K}\left(h_k^t\times H+(1-b_k^t)\times F\right) \quad (۱-۱)$$

$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{g=1}^{G}\sum_{g'=1}^{G}\sum_{m=1}^{M}\sum_{m'=1}^{M}\sum_{c,c'\neq c}^{C} w_{kg}^t\times w_{kg'}^t\times\sigma_{gmcg'm'c'}^t\times dis_{c,c'} \quad (۱-۲)$$

$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{g=1}^{G}\eta_g^t\times w_{kg}^t\times le_{lk}^t\times SA_l \quad (۱-۳)$$

Subjected to:

$$b_k^1=h_k^1 \qquad \forall k; \quad (۲)$$

$$b_k^{t+1}(1-b_k^t)=h_k^{t+1} \qquad \forall t=1,\ldots,T-1,\forall k; \quad (۳)$$

$$h_k^{t+1}\le 1-b_k^t \qquad \forall t=1,\ldots,T-1,\forall k; \quad (۴)$$

$$\sum_{k=1}^{K} b_k^t\ge \min EM \qquad \forall t; \quad (۵)$$

$$w_{kg}^t\le b_k^t \qquad \forall k,g,t; \quad (۶)$$

$$\sum_{k=1}^{K} w_{kg}^t=\sum_{m=1}^{M} y_{gm}^t \qquad \forall g,t; \quad (۷)$$

$$\sum_{g=1}^{G} w_{kg}^t\ge b_k^t \qquad \forall k,t; \quad (۸)$$

$$w_{kg}^t\times aw_g\le a_{kg}^t \qquad \forall k,g,t; \quad (۹)$$

$$a_{kg}^{t+1}=b_k^t\times a_{kg}^t+w_{kg}^t\times\omega_1\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{O_i}\eta_g^t+(1-b_k^t)\max(a_{kg}^t-\omega_2,0) \qquad \forall t=1,\ldots,T-1,\forall k,g; \quad (۱۰)$$

$$\sum_{l=1}^{L}\partial_l\times le_{(l+1)k}^t\le\frac{\sum_{g=1}^{G}a_{kg}^t}{G}\le\sum_{l=1}^{L}\partial_l\times le_{lk}^t \qquad \forall l=1,\forall k,t; \quad (۱۱)$$

$$\sum_{l=1}^{L} le_{lk}^t=1 \qquad \forall k,t; \quad (۱۲)$$

$$\sum_{g=1}^{G}\eta_g^t\times w_{kg}^t\le captime\times b_k^t \qquad \forall k,t; \quad (۱۳)$$

$$w_{kg}^t,h_k^t,b_k^t,le_{kl}^t\in\{0,1\}$$
$$a_{kg}^t\ge 0 \quad (۱۴)$$

جمله‌ی (۱-۱)، (۱-۲) و (۱-۳) به ترتیب مربوط به هزینه‌ی استخدام و اخراج، جابه‌جایی بین سلولی اپراتور و حقوق و دستمزد اپراتور می‌باشد. در دوره‌ی اول از بین اپراتورها، افرادی استخدام می‌شوند و به کار گرفته می‌شوند. در دوره‌های آتی بسته به میزان توانایی اپراتور، تعدادی اخراج، استخدام و مشغول به کار باقی می‌مانند. اپراتور توان جابه‌جایی بین سلول‌ها را دارد. مدل به گونه‌ای طراحی شده است که این جابه‌جایی را مینیمم سازد. حقوق و دستمزد اپراتور بر حسب سطوحی که در آن قرار می‌گیرد، پرداخت می‌شود. جمله‌ی (۲) و (۳) مربوط به متعادل ساختن وضعیت استخدام، اخراج و مشغول به کار است. جمله‌ی (۴)، شرط استخدام را بیان می‌کند که فرد استخدامی حتما در دوره‌ی قبل بی‌کار بوده است. جمله‌ی (۵) مربوط به حداقل تعداد اپراتور مشغول به کار در

هر دوره می‌باشد. جمله‌ی (۶) و (۷) بیان می‌کند شرط تخصیص ابزار به اپراتور، به کارگیری اپراتور در دوره می‌باشد و اگر به کارگرفته شد بایستی تخصیص ابزار صورت گیرد تا بیکار باقی نماند. جمله‌ی (۸) مربوط به تخصیص ابزارهای مشغول به کار به یک اپراتور است. جمله‌ی (۹) مربوط به تخصیص ابزار به اپراتوری است که حداقل توانایی لازم برای کارکردن با آن ابزار را داشته باشد. جمله‌ی (۱۰) مربوط به به روز رسانی توانایی اپراتورها در انتهای هر دوره تولیدی می‌باشد. جمله‌ی (۱۱) و(۱۲) مربوط به سطح‌بندی اپراتورها در انتهای هر دوره تولیدی می‌باشد و این که هر اپراتور در یک سطح حتما قرار گیرد. جمله‌ی (۱۳)، ظرفیت زمان کاری اپراتور می‌باشد. جمله‌ی (۱۴) مربوط به محدودیت علامتی متغییرهای مدل می‌باشد.

۶-۲. تکنیک خطی سازی:

با توجه به تکنیک‌های مطرح شده در ذیل، مدل غیرخطی به مدل خطی تبدیل می‌شود.

۱-۶-۲تکنیک شماره ۱

عبارت $Z = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n$ را در نظر بگیرید. دراین عبارت فرض بر این است که متغیر $X_i (i = 1,..,n)$ یک متغیر صفر و یک می‌باشد. واضح است که متغیر Z تنها در صورتی مقدار ۱ خواهد گرفت که تمامی $X_i (i = 1,..,n)$ ها مقدار ۱ بگیرند. اگر حداقل یکی از $X_i (i = 1,..,n)$ ها مقدار صفر به خود بگیرد، حاصل ضرب این متغیرها نیز مقدار صفر خواهد گرفت. با توجه به این نکته، با اضافه کردن چند محدودیت می‌توان Z را که یک متغیر باینری می‌باشد، جای‌گزین حاصل ضرب متغیرهای صفر و یک نمود. این محدودیت‌ها به شکل ذیل می‌باشند:

$$Z \le X_i \quad \forall i = 1,..,n$$

$$Z \ge \sum_{i=1}^{n} X_i - (n-1)$$

۲-۶-۲. تکنیک شماره ۲

برای ماکزیمم کردن مقدار دو عبارت در مسئله‌ی مینیمم سازی می‌توان از تکنیک زیر برای خطی سازی استفاده نمود:

$$\min \quad T \qquad \cdots\cdots\rightarrow \qquad \begin{array}{l} \min \quad Z \\ St: \\ Z \ge X \\ Z \ge a \end{array}$$

$$St: \quad T = \max(X, a)$$

۳-۶-۲. تکنیک شماره ۳

عبارت $Z = Y \times X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n$ را در نظر بگیرید. دراین عبارت فرض بر این است که متغیر $X_i (i = 1,..,n)$ یک متغیر صفر و یک و متغیر Y یک متغیر صحیح از نوع بزرگ‌تر یا مساوی صفر می‌باشد. واضح است که متغیر Z تنها در صورتی مقدار Y را به خود خواهد گرفت که تمامی $X_i (i = 1,..,n)$ها مقدار ۱ بگیرند. اگر حداقل یکی از $X_i (i = 1,..,n)$ ها مقدار صفر به خود بگیرد حاصل ضرب این متغیرها نیز مقدار صفر خواهد گرفت. با توجه به این نکته، با اضافه کردن چند محدودیت می‌توان Z را جایگزین حاصل ضرب متغیرهای صحیح از نوع صفر و یک و بزرگتر مساوی صفر نمود. این محدودیت‌ها به شکل ذیل می‌باشند:

$$Z \le M_\infty X_i \quad \forall i = 1,..,n$$

$$Z \le Y$$

$$Z \ge Y - (n - \sum_{i=1}^{n} X_i) M_\infty$$

جملات (۱-۲) تا (۱-۳)، (۳)، (۱۰) در مدل ارائه شده باعث غیر خطی شدن مدل گشته‌اند. لذا متغیرهای جدید به شکل ذیل تعریف می‌شود:

$$WW^t_{kgg'} = w^t_{kg} \times w^t_{kg'}$$

$$WL^t_{kgl} = w^t_{kg} \times le^t_{lk}$$

$$B^t_k = b^{t+1}_k \times (1 - b^t_k)$$

$$Z = \max(a^t_{kg} - \omega_2, 0)$$

$$BA^t_{kg} = b^t_k \times a^t_{kg}$$

$$BZ^t_k = (1 - b^t_k) \times Z$$

با در نظرگیری متغیرهای جدید، محدودیت‌های زیر به مدل اصلی اضافه خواهد شد:

$$WW^t_{kgg'} \ge w^t_{kg} + w^t_{kg'} - 1 \qquad (۱۵)$$

$$^t_{gg'} \le w^t_{kg} \qquad (۱۶)$$

$$^t_{gg'} \le w^t_{kg'} \qquad (۱۷)$$

$$_{l} \ge w^t_{kg} + le^t_{lk} - 1 \qquad (۱۸)$$

$$_{l} \le w^t_{kg} \qquad (۱۹)$$

$$_{l} \le le^t_{lk} \qquad (۲۰)$$

$$: b^{t+1}_k + (1 - b^t_k) - 1 \qquad (۲۱)$$

$$: b^{t+1}_k \qquad (۲۲)$$

$$: (1 - b^t_k) \qquad (۲۳)$$

$$a^t_{kg} - \omega_2 \qquad (۲۴)$$

$$0 \qquad (۲۵)$$

$$_{} \ge a^t_{kg} - M_\infty (1 - b^t_k) \qquad (۲۶)$$

$$\le a^t_{kg} \qquad (۲۷)$$

$$_{} \le M_\infty \times b^t_k \qquad (۲۸)$$

$$\ge Z - M_\infty [1 - (1 - b^t_k)] \qquad (۲۹)$$

$$\le Z \qquad (۳۰)$$

$$\leq M_{\infty} \times (1-b_k^t) \qquad (۳۱)$$

با انجام عملیات خطی سازی، مدل ارائه شده به یک مدل خطی مختلط عدد صحیح تبدیل می‌شود. با حفظ تابع هدف ۱-۱ و محدودیت‌های ۲، ۴ تا ۱۱،۹تا ۱۴ و اضافه شدن محدودیت‌های خطی سازی بالا، توابع هدف و محدودیت‌های غیرخطی به شکل ذیل تغیر می‌کنند:

۷-۲. مثال عددی

$$\min \quad OF1-2 =$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{g=1}^{G}\sum_{g'=1}^{G}\sum_{m=1}^{M}\sum_{m'=1}^{M}\sum_{c,c'\neq c}^{C} WW_{kgg'}^{t} \times \sigma_{gmcg'm'c'}^{t} \times dis_{c,c'} \qquad (۳۲\text{-}۱)$$

$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{g=1}^{G} WL_{kgl}^{t} \times \eta_g^t \times SA_l \qquad (۳۲\text{-}۲)$$

Subjected to:

$$B_k^t = h_k^{t+1} \qquad \forall k, t; \qquad (۳۳)$$

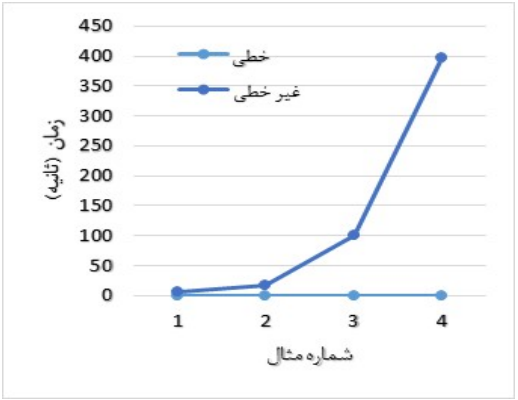
$$a_{kg}^{t+1} = w_{kg}^t \times \omega_1 \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{O_i} \eta_g^t + BZ_k^t + BA_{kg}^t \qquad \forall k, g, t; \qquad (۳۴)$$

$$FB_k^t, WW_{kgg'}^t, WL_{kgl}^t \in \{0,1\}$$
$$BA_{kg}^t, FZ_k^t, z, a_{kg}^t \geq 0 \qquad (۳۵)$$

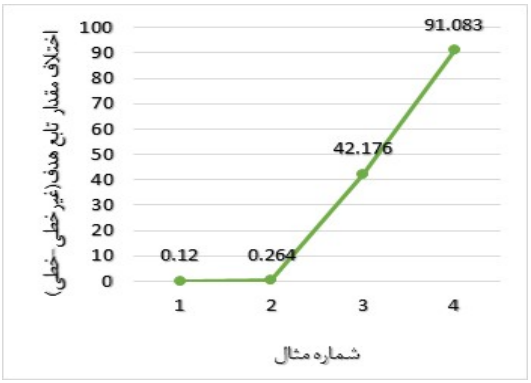
جداول(۳) به تشریح چهار مثال عددی حل شده پرداخته‌اند. نمودارهای (۱)و (۲) به بررسی زمان حل و اختلاف مقادیر بهینه از لحاظ خطی و غیرخطی بودن مدل پرداخته است.

جدول ۳. ابعاد مثال عددی حل شده از مدل، مقادیر بهینه و زمان حل مدل (خطی- غیرخطی)

ویژگی مثال	اپراتور	قطعه	ماشین	سلول	دوره	ابزار	مدل خطی		مدل غیرخطی	
							مقدار بهینه	زمان حل (ثانیه)	مقدار بهینه	زمان حل (ثانیه)
۱	۴	۲	۳	۲	۲	۵	۹۶,۱۳۵	۰,۰۱	۹۶,۲۵۵	۷
۲	۴	۲	۳	۲	۳	۵	۱۰۴,۳۵۲	۰,۲	۱۰۴,۶۱۶	۱۷
۳	۸	۴	۳	۲	۲	۷	۲۱۱,۳۱	۰,۳	۲۵۳,۴۸۶	۱۰۰
۴	۱۲	۶	۵	۳	۲	۱۰	۳۰۷,۲۴۷	۰,۴	۳۹۸,۳۳	۳۹۶



نمودار (۱) اختلاف مقدار تابع هدف خطی از غیر خطی



نمودار(۲) مقایسه زمان حل مدل‌های خطی و غیر خط

همین طور بر اساس مقاله ارائه شده توسط باقری و بشیری [۱] مرکز ریخته گری شرکت سایپا به عنوان یکی از دو رکن اساسی تولید کننده خودرو در کشور مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات ورودی این مرکز از طریق مکاتبات اخذ شده و مطابق با جدول شماره ۴ می‌باشد:

جدول ۴. اطلاعات مثال مطالعه موردی: توالی عملیات (زمان انجام عملیات) و تقاضای هر قطعه در هر دوره تولیدی

	ماشین آلات								
قطعات	M1 (cutting)	M2 (conventional lathe)	M3 (milling)	M4 (grinding)	M5 (heating)	M6 (CNC milling)	M7 (tool grinding)	Demand Period1	Demand Period2
1. Plate guide pin	1(1)	2(7)			(3(2)			400	300
2. Pierce punch	1(.5)	3(7)	7(7)	5(20)	4(3)	2(3)	6(3)	200	400
3. Block D01		1-3(.5-.5)	2-4(5-7)		5(3)			200	100
4. Stop D02		1-3(.5-1)	2-4(3-7)					400	200
5. Guide	1(1)	2-6(40-10)		4(28)	3(5)		5(3)	3000	2000
6. Stop D01		1-3(.5-1)	2-4(3-7)					400	600
7. Shaft D03	1(.5)	2(12)	3(3)		4(2)			400	700
8. Bottom Die		1-3(.5-3)			4(2)	2(20)	5(3)	100	200
9. Pierce punch	1(.5)	2-7(3-4)		5(15)	4(3)	3(15)	6(2)	200	0
10. Pin D08	1(.5)	2(2)		4(1)	3(.5)			200	400
11. Pin P01	1(.5)	2(5)	3(8)		4(1)			400	600
12. Master gage	1(1)	2(7)	3-5(4-5)		4(2)			1200	600

در این بخش ۱۴ اپراتور مشغول به کار می‌باشند که بر اساس توانایی شان وظیفه کنترل ماشین آلات را عهده دار شده‌اند. هر قطعه با یک ابزار خاص بر روی ماشین آلات پردازش می‌شود و در واقع چندگانگی ابزار وجود ندارد. مساله برای دو دوره تولید مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظرگیری عدم قطعیت در هزینه‌های مربوط به اپراتورها مدل حل شده است. میزان بهینه تابع هدف در حالت قطعی ۲۵۶۳۵۴ بدست آمده است. با افزایش عدم قطعیت و در حداکثر عدم قطعیت میزان بهینه تابع هدف به ۴۵۸۷۹۵رسیده است. بیشترین تاثیر را بر این افزایش عدم قطعیت میزان هزینه استخدام اپراتور داشته است.

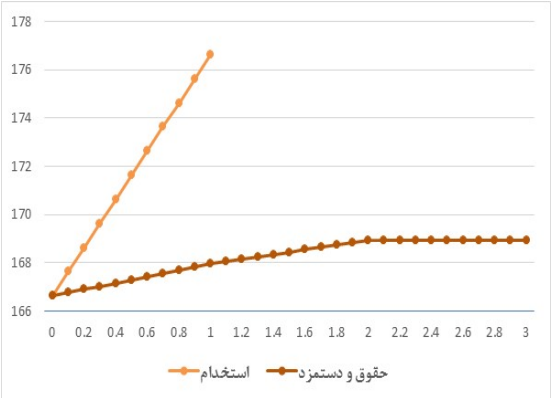
۳. عدم قطعیت

موضوع بهینه‌سازی در شرایط عدم اطمینان در دهه ۱۹۵۰ توسط دانتزیک با ارائه بهینه‌سازی تصادفی و کارنس و کوپر با ارائه بهینه‌سازی در شرایط محدودیت‌های احتمالی مطرح گردید[۵۲, ۵۳]. با اینکه این دو رویکرد (بهینه‌سازی تصادفی و بهینه‌سازی در شرایط محدودیت‌های احتمالی) بر اصول و روش-های تحلیل متفاوتی مبتنی هستند، بر فرض "مشخص بودن توزیع احتمال پارامترهای تصادفی مدل "بنا شده‌اند. به عبارتی از اطلاعات موجود برای این پارامترها، برای تبدیل مدل تصادفی به مدل قطعی استفاده می‌شود. مدل قطعی نهایی می‌تواند به صورت برنامه‌ریزی خطی، غیر خطی و غیره باشد. امروزه بهینه-سازی تصادفی، خود را به عنوان یکی از ابزارهای توانمند مدلسازی عدم اطمینان تحت شرایطی که اطلاعات کافی و مشروح در مورد توزیع احتمال پارامترهای مدل مشخص باشد، توسعه داده است. اما واضح است که در مسائل دنیای واقعی، تصمیم‌گیرنده چنین اطلاعات دقیقی را در اختیار ندارند.[۵۴] این مساله نیاز به تکنیک‌های کمی - که عدم اطمینان پارامترهای مدل را بدون نیاز به بررسی توزیع احتمال آنها در نظر می‌گیرند- را آشکار می سازد. این رویکرد در ادبیات موضوع با عنوان بهینه‌سازی استوار مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه-سازی استوار زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تحلیل‌گر به دنبال جوابی است که به ازای تمامی مقادیر ممکن برای پارامتر دارای عدم قطعیت خوب رفتار کند (شدنی باقی بماند). سویستر اولین کسی بود که رویکرد بهینه‌سازی استوار را برای یک مساله خطی مطرح نمود. با این رویکرد که جواب مساله بهینه‌سازی باید به ازای تمامی مقادیر ممکن برای پارامترهای مدل، شدنی باقی بماند. پس به ازای بدترین حالت ممکن، متغیرها شدنی باقی خواهند ماند. در رویکرد سویستر به تمامی پارامترهای مدل اجازه می‌دهیم که از مقدار اسمی خود نوسان نموده و مقادیری را اختیار نمایند که مقدار تابع هدف در بدترین وضعیت خود قرار گیرد. به عبارتی این مدل برای اینکه بتواند محافظه‌کارانه‌ترین حالت ممکن را برای تصمیم‌گیرنده ایجاد کند، بدبینانه‌ترین شرایط را در نظر می‌گیرد. رویکرد برتسیماس و سیم به تصمیم-گیرنده این اختیار را می‌دهد که میزان محافظه‌کاری را با تعریف یک پارامتر Γ تعیین نماید که می‌توان در زیر تبدیل شده‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح به مدل بهینه‌سازی استوار با رویکرد برتسیماس و سیم را مشاهده کرد. [۵۵]

با در نظرگیری روابط بالا، با حفظ محدودیت‌های ۲، ۴ تا ۱۱،۹تا ۳۵،۳۴،۳۳،۳۱ مدل بهینه‌سازی استوار مدل خطی با در نظر گیری عدم قطعیت پارامتر هزینه‌ی استخدام و اخراج، فاصله بین دو سلول، حقوق دستمزد در هر سطح به صورت ذیل می‌باشد.

مثال عددی با ابعاد ۶ اپراتور، ۴ ماشین، ۴ قطعه، ۲ سلول، ۷ ابزار، ۳ دوره و ۳ سطح مهارتی در نظر گرفته شد. تخصیص در این مثال عددی به نحوی است که در دوره اول از ۴ اپراتور استفاده کرده و در دو دوره بعدی از ۶ اپراتور استفاده کرده است و اخراجی صورت نگرفته است. به نحوی عملیات قطعه به اپراتور تخصیص داده شده که نیازی به جابه‌جایی اپراتور دیده نمی شود. در حقیقت مقادیر دو

تابع هدف اخراج و جابه‌جایی در این مثال عددی، صفر بوده و تاثیر عدم قطعیت روی پارامتر هزینه‌ی اخراج و فاصله بین دو سلول دیده نمی‌شود ولی تاثیر هزینه استخدام و حقوق دستمزد در نمودار (۳) به خوبی قابل مشاهده است.



نمودار ۳. تاثیر عدم قطعیت پارامترهای هزینه‌ی استخدام و حقوق و دستمزد روی مدل ارائه شده

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یه مدل ریاضی برای تخصیص اپراتور به ماشین در سیستم تولید سلولی ارائه شده است. مهمترین نوآوری مدل ارائه شده در نظر گیری اثر یادگیری و فراموشی اپراتور برای کار با ابزار نصب شده بر روی ماشین‌آلات می‌باشد. در واقع سطح مهارت اپراتور با اثر یادگیری و فراموشی وی می‌تواند تغییر کند. از دیگر ویژگی‌های مدل ارائه شده در نظر گیری هزینه‌های مرتبط با اپراتور شامل استخدام، اخراج و دستمزد می‌باشد. همچنین عدم قطعیت پارامترها نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده است. از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای برخورد با عدم قطعیت در این مقاله بهره برده‌ایم. رویکرد ارائه شده توانایی ارائه جواب‌های شدنی و حتی بهینه را به ازای مقادیر مختلف پارامتر غیر قطعی دارا می‌باشد. با استفاده از مثال‌های عددی مختلف کیفیت مدل ارائه شده مورد آزمون قرار گرفته و تحلیل‌های مدیریتی ارائه شده است. این مثال ها در جداول شماره ۳ و ۴ آورده شده اند. همچنین برای بررسی بهتر موضوع از اطلاعات واقعی موجود در شرکت سایپا استفاده شده است. تاثیر عدم قطعیت در پارامترهای مختلف بر اساس نمودار ۳ بررسی و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. بر اساس این نمودار، تاثیر عدم قطعیت بر استخدام اپراتور تاثیرگذارتر از حقوق و دستمزد اپراتور میباشد.

اپراتور به عنوان کلیدی ترین منبع تولیدی باید مورد توجه مدیران تصمیم گیر در حوزه سیستم تولید سلولی قرار گیرد. بر اساس تحلیل های صورت گرفته در این مقاله هزینه استخدام اپراتور در صورت افزایش میزان عدم قطعیت به صورت نمایی افزایش خواهد داشت و لذا نیازمند کنترل بیشتر از سوی مدیریت میباشد. همینطور دیگر رویکرد مدیریتی مستخرج از این مقاله کنترل جابجایی اپراتورها در دوره های مختلف تولیدی میباشد که تاثیر بسزایی در میزان هزینه ها خواهد داشت و بایستی به صورت کنترل شده و دقیق انجام پذیرد.

حل مدل با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به عنوان مطالعه آتی پیشنهاد گردد. همچنین در نظر گیری مسئله زمان‌بندی فعالیت‌ها در چارچوب ارائه شده در این مقاله می‌تواند به عنوان پژوهش‌های آتی مورد توجه محققین قرار گیرد.

۵. منابع

[1] M. Bagheri and M. Bashiri, "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, pp. 1237-1254, 2014.

[2] H. Rafiei and R. Ghodsi, "A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization," Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, pp. 2308-2316, 2013.

[3] M. Saidi-Mehrabad, M. M. Paydar, and A. Aalaei, "Production planning and worker training in dynamic manufacturing systems," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 32, pp. 308-314, 2013.

[4] I. A. P. Mahdavi, M. M.A Solimanpur, M.A Saidi-Mehrabad, M., "A Mathematical Model for Integrating Cell Formation Problem with Machine Layout," International Journal of Industiral Engineering & Producion Research, Vol. 21, pp. 61-70, 2010.

[5] F. A. J. Khaksar-Haghani, N.A Tavakkoli-Moghaddam, R.A Baboli, A.A Kia, R., "A Comprehensive Mathematical Model for the Design of a Dynamic Cellular Manufacturing System Integrated with Production Planning and Several Manufacturing Attributes," International Journal of Industiral Engineering & Producion Research, Vol. 22, pp. 199-212, 2011.

Industrial Engineering International, Vol. 11, pp. 87-100, 2015.

[15] M. Sakhaii, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Bagheri, and B. Vatani, "A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines," Applied Mathematical Modelling, 2015.

[16] F. Niakan, A. Baboli, T. Moyaux, and V. Botta-Genoulaz, "A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria," Applied Mathematical Modelling, 2015.

[17] İ. Erozan, O. Torkul, and O. Ustun, "Proposal of a nonlinear multi-objective genetic algorithm using conic scalarization to the design of cellular manufacturing systems," Flexible Services and Manufacturing Journal, Vol. 27, pp. 30-57, 2015.

[18] M. J. Brusco, "An iterated local search heuristic for cell formation," Computers & Industrial Engineering, 2015.

[19] Y. Won and R. Logendran ",Effective two-phase p-median approach for the balanced cell formation in the design of cellular manufacturing system," International Journal of Production Research, Vol. 53, pp. 2730-2750, 2015.

[20] K. Halat and R. Bashirzadeh, "Concurrent scheduling of manufacturing cells considering sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 77, pp. 1907-1915, 2015.

[21] M. S. Yadollahi, I. Mahdavi, M. M. Paydar, and J. Jouzdani, "Design a bi-objective mathematical model for cellular manufacturing systems considering variable failure rate of machines," International Journal of Production Research, Vol. 52, pp. 7401-7415, 2014.

[22] G. Egilmez, B. Erenay, and G. A .Süer, "Stochastic skill-based manpower allocation

[6] I. A. B. Mahdavi, Behrang, A Bootaki, Paydar, Mohammd Mahdi, "Manufacturing Cell Configuration Considering Worker Interest Concept Applying a Bi-Objective Programming Approach," International Journal of Industiral Engineering & Producion Research, Vol. 25, pp. 41-53, 2014.

[7] K. Deep and P. K. Singh, "Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic algorithm," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 35, pp. 155-163, 2015.

[8] P. Renna and M. Ambrico, "Design and reconfiguration models for dynamic cellular manufacturing to handle market changes," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 28, pp. 170-186, 2015.

[9] B. Esmailnezhad, P. Fattahi, and A. S. Kheirkhah, "A stochastic model for the cell formation problem considering machine reliability," Journal of Industrial Engineering International, pp. 1-15, 2015.

[10] L. Wu and S. Suzuki, "Cell formation design with improved similarity coefficient method and decomposed mathematical model," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 1-18, 2015.

[11] F. Alhourani, "Cellular manufacturing system design considering machines reliability and parts alternative process routings," International Journal of Production Research, pp. 1-18, 2015.

[12] B. Ulutas, "Assessing the number of cells for a cell formation problem," IFAC-PapersOnLine, Vol. 48, pp. 1122-1127, 2015.

[13] H. Nouri, "Development of comprehensive model and BFO algorithm for dynamic cellular manufacturing system," Applied Mathematical Modelling, 2015.

[14] S. Kumar and R. K. Sharma, "Development of a cell formation heuristic by considering realistic data using principal component analysis and Taguchi's method," Journal of

[30] Y. Kao and C.-C. Chen ",Automatic clustering for generalised cell formation using a hybrid particle swarm optimisation," International Journal Of Production Research, Vol. 52, pp. 3466-3484, 2014.

[31] G. A. Süer, O. K. Ates, and E. M. Mese, "Cell loading and family scheduling for jobs with individual due dates to minimise maximum tardiness," International Journal of Production Research, Vol. 52, pp. 5656-5674, 2014.

[32] M. Ossama, A. M. Youssef, and M. A. Shalaby, "A Multi-period Cell Formation Model for Reconfigurable Manufacturing Systems," Procedia CIRP, Vol. 17, pp. 130-135, 2014.

[33] M. Hassannezhad, M. Cantamessa, F. Montagna, and F. Mehmood, "Sensitivity analysis of dynamic cell formation problem through meta-heuristic," Procedia Technology, Vol. 12, pp. 186-195, 2014.

[34] M. M. Paydar, M. Saidi-Mehrabad, and E. Teimoury, "A robust optimisation model for generalised cell formation problem considering machine layout and supplier selection," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 27, pp. 772-78, 2014.

[35] G. Egilmez and G. Süer, "The impact of risk on the integrated cellular design and control," International Journal of Production Research, Vol. 52, pp. 1455-1478, 2014.

[36] B. Javadi, F. Jolai, J. Slomp, M. Rabbani, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "An integrated approach for the cell formation and layout design in cellular manufacturing systems," International Journal of Production Research, Vol. 51, pp. 6017-6044, 2013.

[37] R. Kia, H. Shirazi, N. Javadian, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "A multi-objective model for designing a group layout of a dynamic cellular manufacturing system," Journal of Industrial Engineering International, Vol. 9, pp. 1-14, 2013.

[38] M. M. Paydar and M. Saidi-Mehrabad, "Revised multi-choice goal programming for in a cellular manufacturing system," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 33, pp. 578-588, 2014.

[23] J. Park, H. Bae, T.-C. Dinh, and K. Ryu, "Operator allocation in cellular manufacturing systems by integrated genetic algorithm and fuzzy data envelopment analysis," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 75, pp. 465-477, 2014.

[24] S. Sharifi, S. S. Chauhan, and N. Bhuiyan, "A dynamic programming approach to GA-based heuristic for multi-period CF problems," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 33, pp. 366-375, 2014.

[25] A. Baykasoglu and L. Gorkemli, "Agent-based dynamic part family formation for cellular manufacturing applications," International Journal of Production Research, Vol. 53, pp. 774-792, 2015.

[26] M. Mohammadi and K. Forghani, "A novel approach for considering layout problem in cellular manufacturing systems with alternative processing routings and subcontracting approach," Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, pp. 3624-3640, 2014.

[27] B. Bootaki, I. Mahdavi, and M. M. Paydar, "A hybrid GA-AUGMECON method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills," Computers & Industrial Engineering, Vol. 75, pp. 31-40, 2014.

[28] M. S .Jabal-Ameli and M. Moshref-Javadi, "Concurrent cell formation and layout design using scatter search," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 71, pp. 1-22, 2014.

[29] S. Raja and V. Anbumalar, "An effective methodology for cell formation and intra-cell machine layout design in cellular manufacturing system using parts visit data and operation sequence data," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, pp. 1-14, 2014.

integrated supply chain design and dynamic virtual cell formation with fuzzy parameters," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 28, pp. 251-265, 2015.

[39] I. Mahdavi, E. Teymourian, N. T. Baher, and V. Kayvanfar, "An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 32, pp. 655-663, 2013.

[40] M. M. Paydar, M. Saidi-Mehrabad, and R. Kia, "Designing a new integrated model for dynamic cellular manufacturing systems with production planning and intra-cell layout," International Journal of Applied Decision Sciences, Vol. 6, pp. 117-143, 2013.

[41] V. M. Dalfard, "New mathematical model for problem of dynamic cell formation based on number and average length of intra and intercellular movements," Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, pp. 1884-1896, 2013.

[42] M. Bashiri and M. Bagheri, "A Two Stage Heuristic Solution Approach for Resource Assignment during a Cell Formation Problem," International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects, Vol. 26, p. 943, 2013.

[43] C.-C. Chang, T.-H. Wu, and C.-W. Wu, "An efficient approach to determine cell formation, cell layout and intracellular machine sequence in cellular manufacturing systems ",Computers & Industrial Engineering, Vol. 66, pp. 438-450, 2013.

[44] J. R. Zeidi, N. Javadian, R. Tavakkoli-Moghaddam, and F. Jolai, "A hybrid multi-objective approach based on the genetic algorithm and neural network to design an incremental cellular manufacturing system," Computers & Industrial Engineering, Vol. 66, pp. 1004-1014, 2013.

[45] M. Solimanpur and A. Elmi, "A tabu search approach for cell scheduling problem with makespan criterion," International Journal of Production Economics, Vol. 141 ,pp. 639-645, 2013.

[46] M. Abdulkader, M. ElBeheiry, N. Afia, and A. El-Kharbotly, "Scheduling and sequencing in four machines robotic cell: Application of genetic algorithm and enumeration techniques," Ain Shams Engineering Journal, Vol. 4, pp. 465-474, 2013.

[47] F. Alhourani, "Clustering algorithm for solving group technology problem with multiple process routings," Computers & Industrial Engineering, Vol. 66, pp. 781-790, 2013.

[48] R. G. Askin, "Contributions to the design and analysis of cellular manufacturing systems," International Journal of Production Research, Vol. 51, pp. 6778-6787, 2013.

[49] J. Fan and D. Feng, "Design of cellular manufacturing system with quasi-dynamic dual resource using multi-objective GA," International Journal of Production Research, Vol. 51, pp. 4134-4154, 2013.

[50] K. Lee and K.-I. Ahn, "GT efficacy: a performance measure for cell formation with sequence data," International Journal of Production Research, Vol. 51, pp. 6070-6081, 2013.

[51] J. Lian, C. Liu, W. Li, S .Evans, and Y. Yin, "Formation of independent manufacturing cells with the consideration of multiple identical machines," International Journal of Production Research, Vol. 52, pp. 1363-1400, 2014.

[52] G. B. Dantzig, "Linear programming under uncertainty ",Management science, Vol. 1, pp. 197-206, 1955.

[53] A. Charnes and W. W. Cooper, "Chance-constrained programming," Management science, Vol. 6, pp. 73-79, 1959.

[54] D. Bertsimas and A. Thiele, "Robust and data-driven optimization: Modern decision-making under uncertainty," INFORMS tutorials in operations research: models, methods, and applications for innovative decision making, p. 137, 2006.

[55] D. Bertsimas and M. Sim, "The price of robustness," Operations research, Vol. 52, pp. 35-53, 2004.