

استفاده از روش شناسی رویه پاسخ و برنامه ریزی آرمانی بر پایه شبیه سازی در سلول رباتیک جهت بهینه یابی توالی عملیات

بهاره ویسی*

(نویسنده مسئول) دکتری مهندسی صنایع، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی st_b_vaisi@azad.ac.ir

هیوا فاروقی

دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان سنندج، ایران، h.farughi@uok.ac.ir

صدیق رئیسی

دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، Raissi@azad.ac.ir

چکیده: تمرکز اصلی این مقاله بر بهره گیری از رویکرد شبیه سازی کامپیوتری در مدل سازی در حضور عوامل مختلف عدم قطعیت و نیز استفاده از روش شناسی رویه پاسخ بر روی نتایج متنوع شبیه سازی در مساله تعیین توالی بهینه ورود قطعات به سلول تولیدی رباتیک سه ماشینه بر اساس سیاست حرکتی S_6 با در نظر گرفتن تولید قطعات مختلف در هر سیکل تولیدی است. تابع چگالی احتمال خرابی و زمان تعمیر ماشین ها دارای توزیع نمایی بوده و حداقل کردن زمان سیکل بر اساس سیاست حرکتی S_6 و حداکثر کردن خروجی در این سلول رباتیک همراه با کمینه سازی هزینه های عملیاتی به عنوان اهداف اصلی بهینه سازی مساله منظور شده است. نتایج شبیه سازی مثال های عددی متعدد حاکی از آن است که این رویکرد، در زمان رسیدن به جواب بهینه نسبت به رویکردهای پیشین مدل سازی بهبود قابل توجه دارد.

واژگان کلیدی: سلول تولیدی رباتیک، توالی ورود قطعات، شبیه سازی، روش شناسی رویه پاسخ، طراحی آزمایش ها.

۱- مقدمه

یک هدف متمرکز می شوند ممکن است برای بهینه سازی معیارها یا اهداف دیگر ضعیف عمل کنند، چرا که بیشتر آن ها با هم در تضاد هستند. ایجاد تعادل بین چند هدف مختلف، بینش مفیدی را در اختیار تصمیم گیرنده قرار می دهد. با توجه به هزینه های مختلف ربات و ماشین ها در این سلول ها و پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر معیار هزینه، ایجاد تعادل بین هزینه و زمان می تواند بهره وری سلول رباتیک را افزایش دهد. بنابراین در حوزه مسائل واقعی زمان بندی، بهتر است مسائل با در نظر گرفتن بیش از یک معیار مد نظر قرار گیرند. مرور جامعی از مدل های مورد استفاده در زمان بندی دو و چند معیاره در [۱] دیده می شود. داوانده و همکاران [۲] در مقاله ای شمایی از مسائل زمان بندی سلول

سلول تولیدی انعطاف پذیر شامل تعدادی ماشین است که به وسیله ربات برای تخلیه/بارگذاری قطعات و جابجایی بین ماشین ها خدمت دهی می شود. سلول رباتیک که یک سلول تولیدی انعطاف پذیر است به جهت امکان دستیابی به حداکثر بهره وری در تولید و نیز امکان تغییر سریع ساختارهای تولید مطابق با تقاضای مشتری، در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. به علاوه، استفاده از یک سیستم انعطاف پذیر می تواند هزینه های تولید را کاهش داده و کیفیت را افزایش دهد.

در اکثر مسائل زمان بندی سلول های رباتیک، یک تابع هدف در نظر گرفته شده است. الگوریتم هایی که عمدتاً روی بهینه کردن

*(Corresponding author): st_b_vaisi@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

دوره ۱۰/ شماره ۴

صفحات: ۳۲۷-۳۲۸

رباتیک ارائه داده و ضمن مرور پژوهش‌های صورت گرفته، شکاف‌های تحقیقاتی را به خوبی معرفی نموده‌اند. در اکثر تحقیقات گذشته، فرآیند تولید بر اساس استقرار فلوشاپ در نظر گرفته شده است. گلتکین و همکاران [۳]، فرض فلوشاپ در سلول رباتیک سه ماشین را نادیده گرفته و با در نظر گرفتن زمان‌های پردازش قطعات روی ماشین‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم، حدود پایین جدیدی برای سیکل‌های یک و دو واحده تحت تعریف جدیدی از مسئله فلوشاپ برای سیاست‌های حرکتی ربات ارائه دادند. یک مدل زمان‌بندی دو معیاره که همزمان زمان سیکل و کل هزینه تولید را در سلول تولیدی دو و سه ماشینه حداقل می‌کند با لحاظ کردن تولید قطعات مشابه توسط گلتکین و همکاران [۴] در نظر گرفته شد. آن‌ها ادعا کردند که هزینه‌های تولید اولین بار است که به‌عنوان تابع هدف در مسائل زمان‌بندی سلول‌های رباتیک در نظر گرفته شده است. در مطالعات قبلی در حوزه سلول تولیدی رباتیک، عمدتاً زمان‌بندی بر اساس یک معیار صورت گرفته یعنی حداقل کردن زمان سیکل یا حداکثر کردن خروجی سلول. از جمله تحقیقاتی که در آن‌ها بهینه‌سازی یک هدف یا معیار مورد توجه قرار گرفته است می‌توان به [۵]، [۲]، [۶]، [۷] و [۸] اشاره نمود. همچنین برخی از تحقیقات در سال‌های اخیر بهینه‌سازی چند هدفه/معیاره در سلول‌های رباتیک را مورد توجه قرار داده‌اند که از آن جمله می‌توان به [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] اشاره نمود.

در زمینه دسترس‌پذیری سیستم‌های رباتیک مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است که هیچکدام مشخصاً در ارتباط با سلول رباتیک نبوده است. از جدیدترین تحقیقات انجام شده در این حوزه مطالعه گلتکین و همکاران [۱۵] است. در این پژوهش، در یک خط تولید جوش نقطه ای کاملاً اتومات رباتیک با افزودن محدودیت‌های مربوط به عمر ابزار، دوره‌های در دسترس نبودن ناشی از زمان‌های استراحت (چای و ناهار) در نظر گرفته شده و مدل ریاضی ارائه شده سعی در همپوشانی دوره‌های عدم دسترس‌پذیری با دوره‌های تعویض ابزار دارد.

از نقطه نظر نوع قطعه، برخی مقالات، تولید قطعات یکسان را در نظر گرفته‌اند که در این مسائل توالی ورود قطعات بی‌معنی خواهد بود و مسئله صرفاً محدود به یافتن سیکل حرکات ربات در جهت حداقل کردن زمان سیکل خواهد بود. از طرف دیگر در مسائلی که تولید چندین قطعه مختلف را مد نظر قرار می‌دهند، مسئله یافتن توالی حرکات ربات و توالی ورود قطعات به سلول به صورت همزمان مدنظر قرار می‌گیرد تا منجر به حداقل کردن زمان سیکل شود. در حل مسائل مطرح شده برای حالت تولید

قطعات متفاوت، برای برخی از آن‌ها از الگوریتم معروف گیلومر و گوموری استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات [۱۶] و [۱۷] اشاره کرد و در برخی دیگر، مانند [۵] و [۱۸] مسئله بر اساس مسئله فروشنده دوره گرد فرموله شده است. در تعدادی از پژوهش‌ها نظیر [۱۹]، [۲۰] و [۲۱] نیز از الگوریتم‌های خاص یا ابتکاری برای حل مدل استفاده شده است. در پژوهش جدیدی که توسط باتور و ارول [۲۲] صورت گرفته، مسئله زمان‌بندی در سلول رباتیک دو ماشین‌های که قطعات مختلف تولید می‌کند در نظر گرفته شده است. در این سلول تولیدی فرض شده که ربات و ماشین‌ها هرگز دچار خرابی نمی‌شوند و در نتیجه نیازمند تعمیر نیستند. یافتن توالی حرکات ربات، توالی ورود قطعه به سلول رباتیک و نیز نحوه تخصیص عملیات پردازشی به ماشین‌ها طوری که زمان اتمام تولید مجموعه مشخصی از قطعات حداقل شود، هدف محققین بوده و جهت حل مسئله از روش متاهوریستیک شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند. بر اساس دانش محققین در هیچ یک از مطالعات پیشین، برای حل مسئله تعیین توالی قطعات مختلف ورودی به سلول رباتیک، از بهینه‌سازی به کمک شبیه‌سازی استفاده نشده است. در محیط‌های صنعتی لازم است که کارهای متفاوتی در طول زمان‌های مشخصی انجام شود، ایجاد وقفه بین این کارها سیستم تولیدی را با هزینه‌های هنگفتی مواجه می‌سازد. این امر، توجه به بحث نگهداری و تعمیرات را پر اهمیت می‌سازد. مطالعات بسیار کمی در حوزه نگهداری و تعمیرات و بررسی قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولیدی رباتیک انجام شده که هیچ کدام نیز مشخصاً به سلول تولیدی رباتیک مربوط نمی‌شود نظیر این مطالعات را در [۲۳] و [۲۴]، می‌توان ملاحظه نمود. همچنین، در مطالعات پیشین بحث عدم قطعیت ناشی از وجود خرابی در ماشین‌ها در سلول رباتیک مطرح نشده است.

ساختار مقاله حاضر به صورت زیر در ادامه آورده شده است: در ادامه این بخش، تعریف مسئله و مفروضات مساله تحقیق ارائه می‌شود. جهت مواجهه با عدم قطعیت‌های لحاظ شده در مساله، یک مدل شبیه‌سازی کامپیوتری در بخش ۲ توسعه داده می‌شود. در بخش ۳ سناریوهای ممکن از طریق طراحی آزمایش معرفی و ارزیابی شده و از طریق روش‌شناسی روبه پاسخ و مثال‌های عددی مربوطه، موضوع توالی بهینه ورود قطعات مطرح می‌شود. نتیجه‌گیری و پیشنهادات نیز در بخش‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شود.

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

۱-۱ تعریف مسئله

(۴ حرکت به سمت ماشین سوم (۵) انتظار برای تکمیل عملیات تولید قطعه $i-2$ (در صورت لزوم) (۶) تخلیه قطعه $i-2$ از ماشین سوم (۷) حمل قطعه $i-2$ (محصول) برای قرار دادن آن در ناحیه خروجی (۸) تخلیه قطعه در ناحیه خروجی (۹) حرکت به سمت ماشین دوم (۱۰) انتظار جهت تکمیل عملیات بر روی قطعه $i-1$ ام (در صورت لزوم) (۱۱) تخلیه قطعه $i-1$ از روی ماشین دوم (۱۲) انتقال قطعه $i-1$ به سمت ماشین سوم (۱۳) بارگذاری قطعه $i-1$ روی ماشین سوم (۱۴) حرکت به سمت ماشین اول (۱۵) انتظار در صورت لزوم جهت تکمیل عملیات قطعه i ام (۱۶) تخلیه قطعه i از ماشین اول (۱۷) انتقال قطعه i به ماشین دوم (۱۸) بارگذاری قطعه i ام روی ماشین دوم و نهایتاً (۱۹) برگشت ربات به محل ناحیه ورودی. بر اساس کدگذاری معرفی شده سیاست S_6 به صورت $A_{01} A_{34} A_{23} A_{12}$ تعریف شده است [۳] و [۵].

با در نظر گرفتن مشخصه‌های پارامترهای اصلی در جدول ۱، زمان سیاست حرکتی S_6 توسط رابطه ۱ قابل محاسبه است.

جدول ۱- مشخصه‌های پارامترهای مسئله اصلی

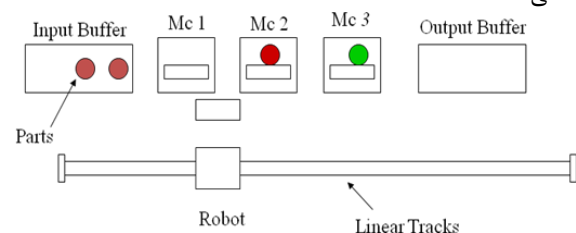
نوع	تعریف	پارامتر
قطعی	زمان بارگذاری/تخلیه	ϵ
قطعی	زمان سفر ربات بین دو ایستگاه متوالی	δ
تصادفی	زمان سیکل حرکتی ربات بر اساس سیاست S_6	T_{S_6}
تصادفی	زمان بیکاری ربات در مقابل ماشین‌ها	W
قطعی	توالی حرکت ربات از ایستگاه q به p $q = 1, 2, 3, 4$ و $p = 0, 1, 2, 3$	A_{pq}
قطعی	زمان‌های پردازش قطعه i بر اساس درصد عملیات پردازشی انجام شده توسط ماشین	t_i

$$T_{S_6} = 8\epsilon + 12\delta + W \quad (1)$$

هدف اصلی این پژوهش، تعیین توالی ورود قطعات در یک سلول رباتیک سه ماشینه غیر قابل اطمینان با هدف حداقل کردن زمان سیکل و کل هزینه‌های تولیدی است. این سلول رباتیک در معرض خرابی‌های تصادفی ماشین‌ها می‌باشد و لازم است زمان‌هایی برای تعمیر ماشین‌ها در نظر گرفته شود. بر اساس

در این پژوهش، یک سلول رباتیک سه ماشینه در نظر گرفته می‌شود. این سیستم تولیدی، شامل سه ماشین کنترل عددی مشابه است که دارای اولویت یکسان برای انجام عملیات بوده و هر کدام از این ماشین‌ها، وظیفه انجام بخشی از عملیات پردازشی لازم برای تولید قطعات را عهده دار هستند. عملیات بارگذاری، تخلیه قطعات و انتقال قطعات بین ماشین‌ها در سلول تولیدی توسط یک ربات تک نگهدارنده انجام می‌شود. سیاست‌های حرکتی موجود در سلول رباتیک سه ماشینه به صورت سیاست‌های S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 و S_6 معرفی شده اند [۵]. در این پژوهش تمرکز ما بر سیاست حرکتی S_6 می‌باشد زیرا بدلیل پیچیدگی بسیار زیادی که دارد کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در قسمت بعد، فرآیند عمومی سیاست حرکتی S_6 برای سلول رباتیک خطی توصیف می‌شود.

در این سلول تولیدی فرض می‌شود ماشین‌ها غیر قابل اطمینان هستند و در طول انجام عملیات پردازشی قطعات امکان خرابی دارند. همچنین فرض می‌شود متوسط زمان لازم تا خرابی ماشین‌ها و متوسط زمان تعمیر آن‌ها از توزیع نمایی پیروی می‌کند. در نظر گرفتن خرابی در ماشین‌ها سبب وجود عدم قطعیت در زمان‌های انتظار ربات و نیز زمان سیکل سلول رباتیک خواهد شد. شمایی از سلول رباتیک مورد نظر در این تحقیق در شکل ۱ ملاحظه می‌شود. لازم به ذکر است که سیستم تولید در سلول رباتیک فلوشاپ بوده و نوع استقرار نیز خطی است.



شکل ۱- طرح استقرار در سلول رباتیک خطی سه ماشینه

۱-۲ ویژگی‌های فرآیند عمومی سیاست S_6

بر اساس سیاست حرکتی S_6 ابتدا ربات در مقابل ناحیه ورودی قرار می‌گیرد. سپس عملیات زیر به صورت متوالی توسط ربات انجام می‌پذیرد: (۱) برداشتن قطعه i ام از ناحیه ورودی (۲) حرکت به سمت ماشین اول (۳) بارگذاری قطعه روی ماشین اول

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

- ۱- ماشین‌ها در سلول ربانیک از نوع CNC و مشابه‌اند و قادر به انجام تمام عملیات های پردازشی لازم برای تولید قطعات هستند.
- ۲- قطعات همیشه در ناحیه ورودی در دسترس بوده و همیشه فضای خالی در ناحیه خروجی برای تخلیه محصول تولیدی وجود دارد.
- ۳- قطعات تولیدی در سلول ربانیک مورد نظر، مختلف هستند.
- ۴- هر قطعه برای تولید نیازمند تعدادی عملیات پردازشی است که بایستی توسط ماشین‌ها انجام شود، درصدی از کل عملیات لازم برای تولید هر قطعه، روی ماشین اول، درصد دیگری روی ماشین دوم و مابقی روی ماشین سوم انجام می‌شود.
- ۵- انبار میانی بین ماشین‌ها وجود ندارد و هر قطعه یا در حال پردازش روی ماشین‌ها است یا توسط ربات در حال انتقال است.
- ۶- زمان تولید به صورت پیوسته می‌باشد.
- ۷- ماشین‌ها و ربات می‌توانند فقط یک قطعه را پردازش یا حمل نمایند.
- ۸- نوع حرکت ربات تک نگهدارنده در سلول به صورت خطی و سلول دارای سه ماشین می‌باشد.
- ۹- سیاست حرکتی ربات به صورت S_6 می‌باشد.
- ۱۰- ماشین‌ها دچار خرابی تصادفی می‌شوند و در صورت بروز خرابی نیازمند تعمیر می‌باشند.
- ۱۱- زمان خرابی و تعمیر ماشین‌ها تصادفی و از توزیع نمایی با پارامترهای معین پیروی می‌کنند.
- ۱۲- زمان پردازش هر قطعه روی هر ماشین بدون توجه به

دانش محققین در کارهای قبلی صورت گرفته با دیدگاه مدل‌سازی ریاضی، این رفتار تصادفی در سلول ربانیک در نظر گرفته نشده است.

کل هزینه‌های تولید شامل هزینه‌های ماشین‌کاری، ابزار و تعمیرات پیشگیرانه است [۲۵]. در بسیاری از مقالات مانند مقاله حاضر، هزینه مربوط به ابزار، ثابت در نظر گرفته شده و لذا، در بهینه‌سازی تابع هدف هزینه تأثیری ندارد. در مدل ریاضی برای محاسبه کل هزینه تولید، پارامترها و متغیرهای زیر دخیل است:

C_o	هزینه ماشین‌کاری (دقیقه/دلار)
C_{PM}	هزینه یک بار تعمیر پیشگیرانه (ویزیت/دلار): (هزینه تنظیمات در نظر گرفته نمی‌شود)
C_{TOOL}	هزینه ابزار (ابزار/دلار): فرض می‌شود که تعویض ابزار در یک سیکل عملیاتی وجود ندارد
p_j	نرخ شکست یا خرابی مورد انتظار برای ماشین J
H	مدت زمان عملیات شبیه‌سازی (طول دوره مشاهده)
n	تعداد قطعات تولید شده بر حسب نوع و بر اساس درصد عملیات پردازشی صورت گرفته توسط هر ماشین در طی دوره شبیه‌سازی
N	تعداد کل قطعات تولیدی در دوره شبیه‌سازی
F	کل هزینه (واحد/زمان/دلار)
TTF	زمان بین خرابی‌ها (واحد زمان)
TTR	زمان بین تعمیرات (واحد زمان)

بر این اساس کل هزینه تولید به ازای هر سیکل عملیاتی طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

۳-۱ مفروضات

مرور ادبیات نشان می‌دهد که زمان‌بندی سلول‌های تولیدی انعطاف‌پذیر عمدتاً در شرایط قطعیت انجام شده و پژوهش‌های بسیار محدودی در این حوزه در محیط عدم قطعیت صورت گرفته است. در این مقاله فرض بر این است که ماشین می‌تواند دو وضعیت سالم و خراب مستقل از یکدیگر داشته باشد و خرابی/تعمیر می‌تواند ثابت یا وابسته به زمان باشد بصورت $\lambda(t)$ و $\mu(t)$. اگر این نرخ‌ها در طی زمان ثابت باشند می‌توان آنها را دارای توزیع نمایی در نظر گرفت در غیر اینصورت توزیع‌های متناوب مانند وایبول، گاما یا توابع چگالی دیگر برای مدل‌سازی قابل استفاده است. مفروضات پایه برای این مقاله به صورت زیر است:

$$F = \sum_{i=1}^n n C_o t_i + \sum_{j=1}^3 C_{PM} P_j H + N C_{TOOL} \quad (2)$$

توقف‌های ناشی از خرابی به صورت قطعی تعیین می‌شود.

۴-۱ مثال‌ها

قابلیت اجرای رویکرد بهینه‌سازی به کمک شبیه‌سازی، توسط مثال‌هایی از مقالات قبلی به شرح زیر مورد آزمون قرار گرفته است [۱۸]. در مثال‌های زیر هر رنگ که با حرف مشخصی هم نمایش داده شده نمایانگر یک نوع قطعه است. مثال ۱- سه نوع قطعه مختلف با زمان‌های پردازش ذکر شده به شرح زیر تولید می‌شوند: آبی (B) با زمان ۵۷، قرمز (R) با زمان

برای این منظور نرم افزار شبیه سازی اینترپرایز داینمیکس (ED) جهت مدل سازی توالی قطعات ورودی به سلول رباتیک مورد نظر در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. این بسته نرم افزاری شبیه سازی، آسان کاربرد بوده و دارای کتابخانه وسیعی برای کمک به کاربران جهت انتخاب مناسب ترین عناصر برای

Y_1 میانگین زمان سیکل حرکتی در دوره شبیه سازی

Y_2 میانگین هزینه عملیاتی هر قطعه در دوره شبیه سازی

Y_3 تعداد محصول خروجی در طی دوره شبیه سازی

مدل سازی ساده چیدمان های مورد نظر است. در مرور ادبیات شبیه سازی، مطالعات جدیدی بر روی استفاده از شبیه سازی در سیستم های تولیدی وجود دارد که از آن جمله عبارتند از [۲۸]، [۲۹]، [۳۰] و ... به علاوه، در حوزه کاربرد شبیه سازی، مرور جامعی در زمینه کاربرد شبیه سازی در تولید بین سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳ توسط [۳۱] انجام شده است. مورتیز و همکاران [۳۲] نیز در مقاله ای، نقاط برجسته در توسعه ابزارهای شبیه سازی را مورد مرور قرار داده اند. آن ها کاربردهای صنعتی اخیر شبیه سازی، تکامل، پیشرفت ها و روند آتی شبیه سازی در سیستم های تولیدی را در نظر گرفته اند. اگرچه بر اساس دانش محققین، از ابزار شبیه سازی در زمان بندی سلول رباتیک قبلا استفاده نشده است، مرور جامعی همراه با تحلیل روند آتی در زمینه زمان بندی سیستم های تولیدی انعطاف پذیر، که تکنیک های شبیه سازی را به عنوان ابزار تحلیل به کار برده است توسط [۳۳] انجام شده است.

شکل ۲ چیدمان مدل شبیه سازی برای سلول رباتیکی که سه نوع قطعه مختلف را تولید می کند، با استفاده از عناصر نرم افزار ED نشان می دهد.

برای ایجاد تخمین های مناسب در تنظیمات اجرا، همه مدل های شبیه سازی برای مدت زمان طولانی (بیش از ۱۰۰۰۰ ساعت) پس از یک دوره آماده سازی اولیه ۵۰ ساعته اجرا می شوند. همچنین سه معیار عملکردی به صورت زیر تعریف و مورد استفاده قرار می گیرد.

۸۴ و بنفش (P) با زمان ۸۷ دقیقه. زمان بارگذاری/تخلیه (E) و زمان جابجایی بین ماشین ها و ناحیه ورودی/خروجی (δ) به ترتیب ۱ و ۲ دقیقه است.

مثال ۲- سلول رباتیک یک نوع قطعه با زمان پردازش ۵۷ دقیقه تولید می کند. زمان بارگذاری/تخلیه (E) و زمان جابجایی (δ) نیز به ترتیب ۱ و ۲ دقیقه است.

پارامترها و سایر مقادیر در نظر گرفته شده به شرح جدول ۲ می باشد. لازم به ذکر است که یک نوع ابزار در کل پروسه تولید در نظر گرفته شده است و مقادیر پارامترها نیز ثابت است.

جدول ۲- مشخصه های پارامترهای مورد نیاز

$C_{PM}=35$	$C_o=50$	$C_{TOOL}=45$
TTF= NegExp(۱۰)	TTR= NegExp(۲)	

۲- توسعه مدل شبیه سازی

امروزه، با توجه به افزایش عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مانند زمان بین خرابی ها، زمان بین تعمیرات و زمان های سیکل ناشی از خرابی ماشین ها و سایر عوامل سلول های تولیدی رباتیک، نیازمند تصمیمات پیچیده ای برای تعیین توالی ورود قطعات هستند که توسط مدل های شبیه سازی کامپیوتری قابل پشتیبانی است. این روش از اوایل دهه ۶۰ میلادی توسعه پیدا کرده و یکی از قابل استفاده ترین ابزارهای تحلیلی در علم مدیریت محسوب می شود [۲۶]. برای تحلیل سلول رباتیک مورد نظر در این مقاله، ترکیب شبیه سازی کامپیوتری و دیدگاه بهینه سازی برنامه ریزی خطی برای مواجهه با عدم قطعیت بکار می رود. مهمترین مشخصه این روش، قابلیت بالای آن در آزمایش همزمان متغیرهای تصادفی مختلف است. در نظر گرفتن عدم قطعیت در تعداد قطعات ورودی، توالی ورود آن ها یا زمان بین ورودها، به علاوه زمان سیکل و تنظیمات تصادفی نیز منجر به پیچیدگی بالایی می شود. بهینه سازی چنین سیستم هایی توسط مدل های برنامه ریزی ریاضی بسیار مشکل بوده و لذا نگرش بهینه سازی از طریق شبیه سازی می تواند در این زمینه کارساز باشد. همانگونه که فو [۲۷] اشاره کرده است، شبیه سازی کامپیوتری رابط کارآمدی بین پژوهش عملیاتی و علم کامپیوتر است. هر چند که مدل های شبیه سازی به عنوان روش مدل سازی توصیفی شناخته شده اند، مدل کامپیوتری پایه که برای موارد دیگر قابل استفاده باشد توسط متخصصین سنتی شبیه سازی به عنوان کار پیچیده ای شناخته نشده است.

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

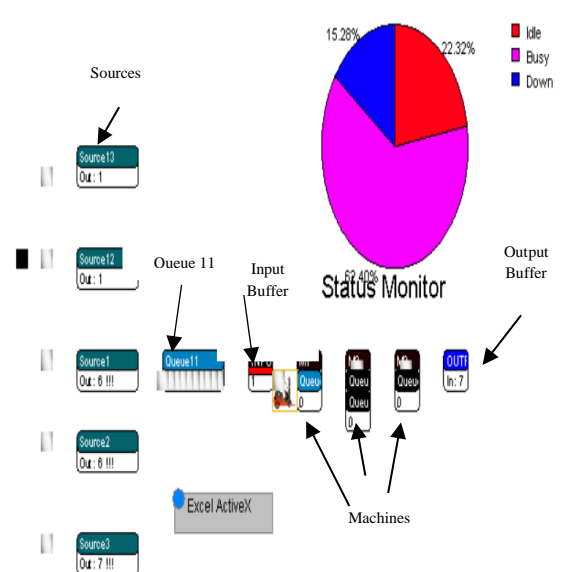
بهینه ورود قطعات مختلف به سلول رباتیک سه ماشینه دارای سیاست حرکتی S_6 ربات توسعه داده شود.

۳- روش‌شناسی رویه پاسخ

روش‌شناسی رویه پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری مفید است که برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها و در حل مسائل مهندسی قابل استفاده است. روش‌شناسی رویه پاسخ تاثیر متغیرهای مستقل را بر متغیر وابسته مشخصی به نام پاسخ تحلیل می‌کند. کاربرد گسترده روش‌شناسی رویه پاسخ در صنعت و مشخصاً شرایطی است که متغیرهای ورودی مختلفی بر تعدادی معیار عملکردی یا مشخصه کیفی که پاسخ نامیده می‌شود تاثیرگذار است [۳۴].

طراحی آزمایش‌ها یک روش علمی برای شناسایی فاکتورهای مهم در فرآیند برای حل مسئله است. با اجرای طرح‌های آزمایشی، مقدار بهینه پاسخ‌ها و یا شرایطی که در آن، پاسخ‌های مغایر از سازگاری مناسبی برخوردارند، قابل محاسبه است. معمولاً فاکتورهای زیادی در مسائل مهندسی درگیر است و در نظر گرفتن آن‌ها با یکدیگر و نیز تعاملشان دارای اهمیت است. در این مقاله روش‌شناسی طراحی آزمایش کسری در طراحی آزمایش‌ها برای ایجاد سناریو استفاده می‌شود. روش‌شناسی طراحی آزمایش کسری، تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد و فقط بخشی از اجراها برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۵].

در این مقاله متغیرهای ورودی شامل x_1, x_2, x_3 و x_4 بوده و به ترتیب به‌عنوان درصد عملیات انجام شده هر قطعه توسط ماشین دوم، درصد عملیات انجام شده هر قطعه توسط ماشین سوم، رنگ اولین قطعه ورودی به ماشین‌های دوم و سوم، نوع توالی ورود قطعات به سلول رباتیک می‌باشد. فاکتورهای مورد استفاده در آزمایش و سطوح آن برای ایجاد سناریوهای مثال ۱ در جدول ۳ نشان داده می‌شود. برای ایجاد سناریوها بر اساس روش‌شناسی طراحی آزمایش کسری، با تنظیمات صورت گرفته در نرم‌افزار Minitab و بر اساس جدول ۳ و طراحی آزمایش کسری، سناریوها ایجاد می‌شوند.



شکل ۲- خروجی نرم افزار شبیه‌سازی برای سلول رباتیک سه ماشینه

۲-۲ نتایج شبیه‌سازی

ابتدا مدل شبیه‌سازی برای مثال ۲ در شرایط عدم امکان خرابی ماشین‌ها اجرا می‌شود. بر اساس مدل طراحی شده در ED، با ۹۵٪ سطح اطمینان نتیجه‌گیری می‌شود که میانگین زمان سیکل حرکتی S_6 و هزینه عملیاتی به ترتیب برابر با ۸۶,۷۱۹۱ و ۱۸۷,۵ می‌باشد.

۲-۳ اعتبارسنجی

برای آزمودن اعتبار مدل شبیه‌سازی، آزمون فرض من-ویتنی برای مقایسه تفاوت آماری بین میانگین زمان سیکل جهت تولید روزانه بر اساس مدل شبیه‌سازی پس از ۲۵ بار تکرار مدل و میانگین زمان سیکل واقعی (نتایج بدست آمده از رابطه ۱ به‌عنوان نتایج واقعی لحاظ گردیده است) به کار رفته است. P-value بیشتر از ۰.۸۵ نشان داد که هیچ سطح معناداری مشخصی برای رد برابری دو میانگین وجود ندارد. پس اعتبار مدل شبیه‌سازی را نمی‌توان رد کرد.

در نتیجه، تعدادی سناریو بر اساس روش طراحی آزمایش‌ها برای یافتن بهترین توالی ورود قطعات در مثال‌های طراحی شده ایجاد می‌شود. هدف این است که روش جدیدی علاوه بر مدل‌سازی ریاضی و نیز روش‌های ابتکاری برای تعیین توالی

لازم به ذکر است که خطای مشاهده (باقیمانده) بر اساس فرمول $E_i = Y_i - \hat{Y}_i, i = 1, 2, 3$ محاسبه می‌شود و مقادیر آن در ستون مربوطه در جدول ۴ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که مقدار پیش بینی \hat{Y}_i ها با پارامتر \hat{Y}_i نشان داده می‌شود.

۳-۱ کفایت مدل خطی

نمودار احتمالی نرمال (شکل ۳) اطلاعات در مورد خطاهای مشاهده (باقیمانده‌ها) را نشان می‌دهد. این نمودار بیان می‌کند که خطاها به صورت نرمال توزیع ند و مدل پیشنهادی معتبر است.

در این مقاله، تعیین مقادیر بهینه یا ترجیحی توابع هدف جهت کسب بهترین کیفیت سطح پاسخ ممکن در محدوده آزمون مشخص شده، مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، برای حل مدل سه هدفه مبتنی بر مدل سطح پاسخ ایجاد شده در روابط (۳)، (۴) و (۵) روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آرمانی در بخش بعدی بر روی مدل (۶) توسعه می‌یابد.

۳-۲ روش برنامه‌ریزی آرمانی

برنامه‌ریزی آرمانی از قدیمی‌ترین مدل‌های موجود در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره است که با کاربردهای وسیع به‌کارگیری شده است. تلاش در برنامه‌ریزی آرمانی بر آن است که منطق مدل‌های ریاضی بهینه تواما با تمایل تصمیم‌گیرنده در تامین مقاصد مشخصی از اهداف مختلف مورد توجه قرار بگیرند. مسئله برنامه‌ریزی آرمانی برای سیاست حرکتی S_6 ربات در مثال ۱ به صورت زیر فرموله می‌گردد.

حل و اجرای روش برنامه‌ریزی آرمانی برای تولید جواب‌های بهینه در مسئله چند هدفه فوق، با استفاده از نرم‌افزار لینگو انجام می‌شود.

لازم به ذکر است که مقادیر آرمان‌ها بر اساس بهترین مقادیر بدست آمده برای هر هدف از اجرای شبیه‌سازی و بر اساس جدول ۴ تعیین شده است.

جدول ۳- فاکتورهای مختلف مورد استفاده در آزمایش و سطوح آن‌ها برای سناریوها

محدوده			متغیرهای ورودی
(+۱)	۰	(-۱)	(X)
۴۰	۳۰	۲۰	x_1
۴۰	۳۰	۲۰	x_2
Red	Purple	Blue	x_3
B-R-P	R-B-P	B-P-R	x_4

مثال ۱ بر اساس سیاست حرکتی S_6 اجرا می‌شود و هدف، بدست آوردن میانگین زمان سیکل حرکتی S_6 ، میانگین هزینه و تعداد محصول خروجی بدست آمده در زمان شبیه‌سازی است. اصولاً، کسب حداکثر محصول خروجی توسط حداقل هزینه و کمینه نمودن زمان سیکل مطلوب نظر است. مدل شبیه‌سازی بر

$$\begin{aligned} & \text{Min } \hat{Y}_1 & (۶) \\ & \text{Min } \hat{Y}_2 \\ & \text{Max } \hat{Y}_3 \\ & \text{S.T.} \\ & -1 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

اساس سناریوهای ایجاد شده توسط نرم افزار ED اجرا می‌شود. مدل سطح پاسخ درجه اول وقتی استفاده می‌شود که تابع توزیع تجمعی پاسخ، خطی باشد. در این مقاله، مدل سطح پاسخ درجه اول برای بیان رفتار سیستم و رابطه بین پارامترهای ورودی و پاسخ پارامترهای خروجی استفاده شده است. مدل سطح پاسخ درجه اول برای توابع هدف این مقاله در روابط ۳، ۴ و ۵ نشان داده می‌شود.

$$\hat{Y}_1 = \quad (۳)$$

$$61.68304 - 7.0973x_1 - 2.861x_2 - 0.0766x_3 + 1.65x_4 + E_1$$

$$\hat{Y}_2 = \quad (۴)$$

$$21344.487 - 2304.6875x_1 - 1138.4625x_2 + 7.58775x_3 + 314.425x_4 + E_2$$

$$\hat{Y}_3 = \quad (۵)$$

$$31051.64 + 3358.47x_1 + 1579.781x_2 - 15.156x_3 - 581.844x_4 + E_3$$

Y_i خروجی متجانس مورد انتظار برای پاسخ و x_i پارامترهای ورودی آن هاست که بایستی به همراه سایر پارامترهای نامعلوم تخمین زده شوند. خطای مشاهده شده در مدل رویه پاسخ با E_i نشان داده می‌شود.

نتایج اجرای مدل شبیه‌سازی و نیز مدل سطح پاسخ بر اساس معیارهای عملکردی تعریف شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^3 (d_i^+ + d_i^-) \quad \text{S. t.} \tag{۷}$$

$$61.68304 - 7.0973x_1 - 2.861x_2 - 0.0766x_3 + 1.65x_4 - d_1^+ + d_1^- = 49.1544 \tag{۸}$$

$$21344.487 - 2304.6875x_1 - 1138.4625x_2 + 7.58775x_3 + 314.425x_4 - d_2^+ + d_2^- = 17651.809 \tag{۹}$$

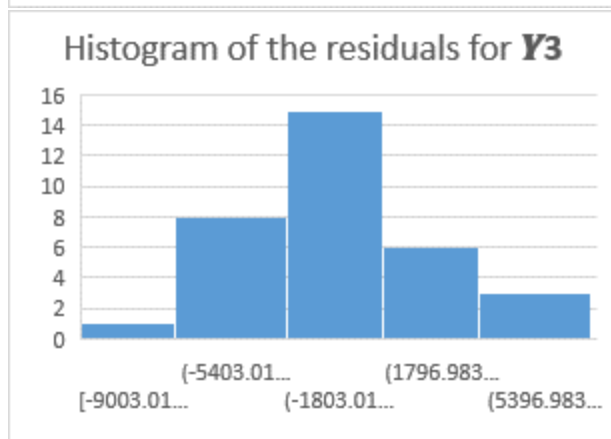
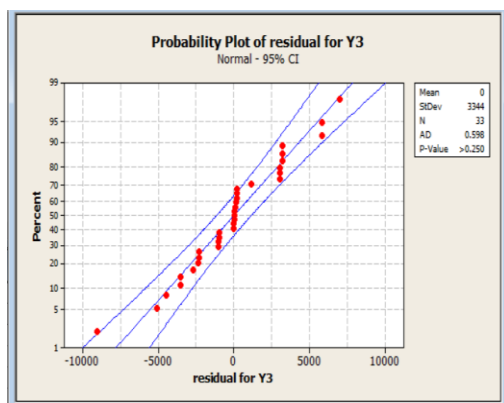
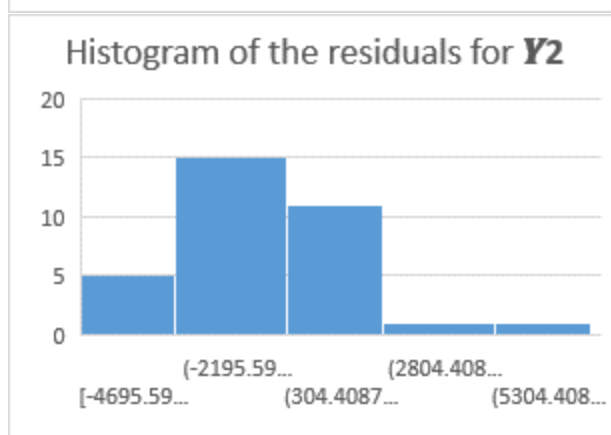
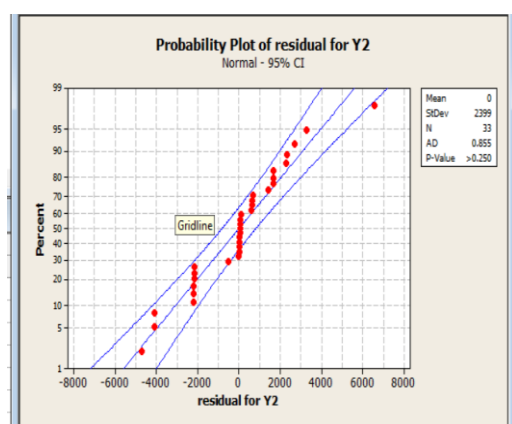
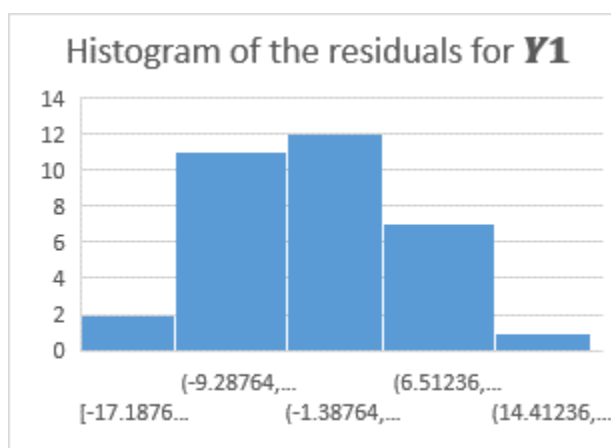
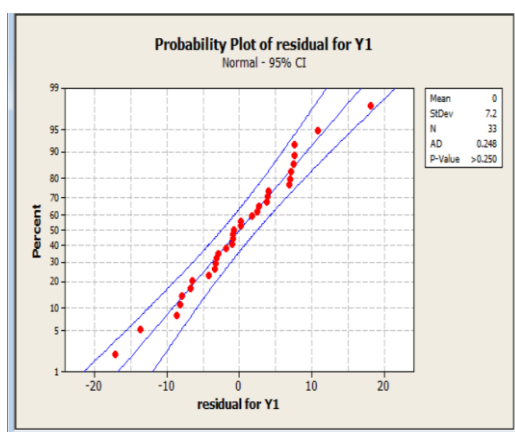
$$31051.64 + 3358.47 x_1 + 1579.781x_2 - 15.156x_3 - 581.844x_4 - d_3^+ + d_3^- = 36629 \tag{۱۰}$$

$$-1 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, 2 \tag{۱۱}$$

$$x_3, x_4 = -1 \text{ or } 0 \text{ or } 1$$

جدول ۴- خروجی نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی و مدل رویه پاسخ برای مثال ۱

Run	X_i				PFM			Residual		
	شماره سناریو	M_2 (x_1)	M_3 (x_2)	Col. Seq. (x_3) (x_4)	Y_1	Y_2	Y_3	\widehat{Y}_1	\widehat{Y}_2	\widehat{Y}_3
۱	-۱	-۱	-۱	۱	۶۹,۹۸۹۵	۲۵,۰۹۴,۷۲۴	۲۵۷۱۸	-۳,۳۷۸۴۴	۰,۲۴۹۷۵	۱۷۱,۲۹۹
۲	-۱	۱	-۱	۱	۵۰,۴۵۸۳	۱۸۱۲۱,۹۵۸	۳۵۶۷۳	-۱۷,۱۸۷۶	-۴۶۹۵,۵۹	۶۹۶۶,۷۳۷
۳	-۱	-۱	۱	-۱	۷۰,۰۴۶۹	۲۵۱۱۵,۱۴۳	۲۵۶۹۷	۰,۱۳۲۱۶	۶۳۴,۳۴۳۳	-۹۸۳,۰۷۷
۴	-۱	۱	-۱	-۱	۶۸,۲۷۰۳	۲۴۴۸۰,۶۳۲	۲۶۳۶۶	۳,۹۲۴۳۶	۲۲۹۱,۹۳۳	-۲۵۰۳,۹۵
۵	-۱	۱	۱	۱	۷۵,۰۹۰۶	۲۴۴۷۸,۷۸۳	۲۶۳۶۸	۷,۵۹۷۸۶	۱۶۴۶,۰۵۸	-۲۳۰۷,۹۵
۶	۱	۱	۱	۱	۶۴,۰۰۸	۲۰۹۰۵,۷۹۷	۳۰۸۹۸	۱,۰۷۸۱۱۸۶	۲۶۸۲,۴۴۷	-۴۴۹۴,۸۹
۷	۱	-۱	-۱	۱	۶۶,۲۳۵۵	۲۳۷۵۴,۱۹۸	۲۷۱۷۶	۷,۰۶۲۱۶	۳۳۶۹,۰۹۹	-۵۰۸۷,۶۴
۸	۱	۱	-۱	-۱	۴۹,۱۵۵	۱۷۶۵۷,۰۷۹	۳۶۶۱۸	-۰,۹۹۶۳۴	۷۷,۷۵۴۷۵	۳۱,۱۰۹
۹	-۱	۱	۱	-۱	۵۵,۵۰۷۳	۱۸۱۲۳,۴۷۱	۳۵۶۷۰	-۸,۶۸۵۴۴	-۴۰۸۰,۴	۵۸۳,۳۶۱
۱۰	۱	۱	۱	-۱	۴۹,۱۵۴۴	۱۷۶۵۷,۰۷۶	۳۶۶۱۸	-۰,۸۴۳۷۴	۶۲,۵۷۶۲۵	۶۱,۴۲۱
۱۱	-۱	-۱	-۱	۱	۷۷,۰۸۴۱	۲۵۱۲۵,۸۵۱	۲۵۶۸۶	۳,۷۱۶۱۶	۳۱,۳۷۶۷۵	۱۳۹,۲۹۹
۱۲	۱	۱	۱	۱	۵۵,۹۳۵۱	۱۸۲۶۲,۴۱۵	۳۵۳۹۷	۲,۶۳۶۹۶	۳۹,۰۶۵۲۵	۴,۱۰۹
۱۳	۱	-۱	۱	-۱	۴۹,۱۶۴۳	۱۷۶۵۹,۹۵۴	۳۶۶۱۲	-۶,۵۵۵۸۴	-۲۲۱۱,۴۷	۳۲۱۶,۹۸۳
۱۴	-۱	۱	-۱	۱	۷۵,۱۴۶۵	۲۴۴۹۷,۲۸	۲۶۳۴۸	۷,۵۰۰۵۶	۱۶۷۹,۷۳۱	-۲۳۵۸,۲۶
۱۵	-۱	۱	۱	۱	۷۵,۰۹۳۳	۲۴۴۷۹,۷۰۹	۲۶۳۶۷	۷,۶۰۰۵۶	۱۶۴۶,۹۸۴	-۲۳۰۸,۹۵
۱۶	۱	-۱	۱	۱	۵۶,۱۲۳۶	۱۸۳۲۳,۱۳۷	۳۵۲۷۹	-۲,۸۹۶۵۴	-۲۱۷۷,۱۴	۳۰۴۵,۶۷۱
۱۷	-۱	۱	۱	-۱	۵۰,۴۶۲۸	۱۸۱۲۳,۴۷۲	۳۵۶۷۰	-۱۳,۷۲۹۹	-۴۰۸۰,۴	۵۸۳,۳۶۱
۱۸	۱	۱	-۱	۱	۴۹,۲۲۱	۱۷۶۸۰,۵۹۴	۳۵۶۶۹	-۴,۲۳۰۳۴	-۵۲۷,۵۸	۱۱۴۵,۷۹۷
۱۹	۱	۱	-۱	۱	۵۵,۹۶۲۳	۱۸۲۷۱,۱۳۶	۳۵۳۸۰	۲,۵۱۰۹۶	۶۲,۹۶۱۷۵	-۴۳,۲۰۳
۲۰	-۱	-۱	۱	-۱	۷۰,۱۴۸۹	۲۵۱۵۱,۲۰۲	۲۵۶۶۰	-۰,۲۳۴۱۶	۶۷,۴۰۲۳	-۱۰۲۰,۰۸
۲۱	-۱	-۱	۱	۱	۷۰,۰۴۰۲	۲۵۱۱۳,۱۹۵	۲۵۶۹۹	-۳,۱۷۴۵۴	۳,۵۴۵۲۵	۱۸۲,۶۱۱
۲۲	-۱	۱	-۱	-۱	۶۸,۳۰۵۷	۲۴۴۹۳,۵۷۹	۲۶۳۵۲	۳,۹۵۹۷۶	۲۳۰۴,۸۸	-۳۵۱۷,۹۵
۲۳	۱	-۱	-۱	-۱	۵۴,۰۵۴۸	۱۷۶۵۱,۸۰۹	۳۶۶۲۹	-۱,۸۱۸۵۴	-۲۲۰۴,۴۴	۳۲۰۱,۶۷۱
۲۴	۱	۱	۱	-۱	۴۹,۱۸۹۷	۱۷۶۷۰,۰۲۷	۳۶۵۹۱	-۰,۸۰۸۴۴	۷۵,۵۲۷۲۵	۳۴,۴۲۱
۲۵	-۱	-۱	-۱	-۱	۷۶,۹۱۷۱	۲۵۰۷۱,۴۲۶	۲۵۷۴۲	۶,۸۴۹۱۶	۶۰۵۸,۰۱۸	-۹۶۸,۳۸۹
۲۶	-۱	-۱	۱	۱	۶۹,۹۷۴۱	۲۵۰۸۸,۸۹۵	۲۵۷۲۴	-۳,۲۴۰۶۶	-۲۰,۷۵۴۸	۲۰۷,۶۱۱
۲۷	-۱	-۱	-۱	-۱	۷۷,۰۶۴۵	۲۵۱۱۹,۰۳۵	۲۵۶۹۳	۶,۹۹۶۵۶	۶۵۳,۴۱۰۸	-۱۰۱۷,۳۹
۲۸	۱	۱	-۱	-۱	۴۹,۲۳۳۳	۱۷۶۸۴,۹۲	۳۶۵۶۰	-۰,۹۱۸۰۴	۱۰۵۵۹۵۸	-۲۶,۸۹۱
۲۹	.	.	.	.	۶۳,۴۵۳۴	۲۲۷۶۱,۴۱۷	۲۸۳۶۷	۱,۷۷۰۳۶	۱۴۱۶,۹۳	-۲۶۸۴,۶۴
۳۰	۱	-۱	۱	-۱	۷۳,۷۸۹۴	۲۶۴۵۰,۸۷۶	۲۴۳۹۴	۱۸,۰۶۹۲۶	۶۵۷۹,۴۵۱	-۹۰۰۳,۰۲
۳۱	۱	-۱	-۱	۱	۵۰,۹۹۸۷	۱۸۳۱۴,۸۷۷	۳۵۲۹۵	-۸,۱۷۴۶۴	-۲۱۷۰,۲۲	۳۰۳۱,۳۵۹
۳۲	۱	-۱	-۱	-۱	۴۹,۱۷۲۵	۱۷۶۶۲,۸۳۳	۳۶۶۰۶	-۶,۷۰۰۸۴	-۲۱۹۳,۴۲	۳۱۷۸,۶۷۱
۳۳	۱	-۱	۱	۱	۵۱,۰۱۷۳	۱۸۳۲۱,۵۸۷	۳۵۲۸۲	-۸,۰۰۲۸۴	-۲۱۷۸,۶۹	۳۰۴۸,۶۷۱



شکل ۳- نمودارهای مربوط به باقیمانده‌ها برای توابع هدف جهت کفایت مدل خطی

$$x_1^*=1 \quad x_2^*=1 \quad x_3^*=0 \quad x_4^*=0$$

$$۱\text{هدف}=۵۱,۷۲۵ \quad ۲\text{هدف}=۱۷۹۰۱,۳۴ \quad ۳\text{هدف}=۳۵۹۹۰$$

با اجرای شبیه‌سازی برای سناریوی بهینه بدست آمده از روش برنامه‌ریزی آرمانی، نتایج زیر بر اساس معیارهای عملکردی تعریف شده بدست می‌آید.

$$\begin{array}{ccc} Y_3 & Y_2 & Y_1 \\ ۳۵۴۰۴ & ۱۱۲۵۱,۱۰۱۳ & ۵۰,۱۴۲۳ \end{array}$$

جلد ۱۰- شماره ۴- زمستان ۱۳۹۹

۴- نتایج و بحث

با اجرای روش برنامه‌ریزی آرمانی در نرم افزار لینگو، نتایج زیر بدست آمده است.

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

نگهدارنده برای جابجایی قطعات استفاده شود برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

۶- منابع

- [1] Hoogeveen, H. (2005) "Multicriteria Scheduling", *European Journal of Operational Research*, 167: 592-623.
- [2] Dawande, M., Geismar, H., Sethi, S. P., Sriskandarajah, C. (2005). Sequencing and scheduling in robotic cells: recent developments, *Journal of Scheduling*, Vol. 8, No. 5, 387-426.
- [3] Gultekin, H., Akturk, M.S. Karasan, O.E. (2007) "Scheduling in a Three-Machine Robotic Flexible Manufacturing Cell", *Computers & operations research*, 34(8): 2463-2477.
- [4] Gultekin, H., Akturk, M. S., Karasan, O.E. (2010) "Bi Criteria Robotic Operation Allocation in a Flexible Manufacturing Cell", *Computers & operations research*, 48(4): 779-789.
- [5] Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J. & Kubiak, W. (1992). Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 4, 331-358.
- [6] Dawande, M., Sriskandarajah, C. & Sethi, S. P. (2002). On throughput maximization in constant travel-time robotic cells, *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol 4, 296-312.
- [7] Geismar, H. N., & Pinedo, M. (2010). Robotic cells with stochastic processing times. *IIE Transactions*, Vol. 42, No. 12, 897-914.
- [8] Al-Salem, M., Haouari, M., Kharbeche, M., & Khallouli, W. (2016). A free-slack-based Genetic Algorithm for the robotic cell problem with controllable processing times. In *Heuristics, Metaheuristics and Approximate Methods in Planning and Scheduling*. 77-93. Springer International Publishing.
- [9] Feng, J., Che, A., Wang, N. (2014). Bi-objective cyclic scheduling in a robotic cell with processing time windows and non-

به استناد جواب‌های بدست آمده از روش برنامه‌ریزی آرمانی مشخص می‌شود که سناریوی برتر دارای مشخصات زیراست. در شرایطی که ۲۰٪ پردازش عملیات مربوط به تولید یک قطعه بر روی ماشین اول، ۴۰٪ عملیات پردازشی روی ماشین دوم و ۴۰٪ مابقی عملیات پردازشی قطعه روی ماشین سوم صورت بگیرد و همزمان با آن اولین قطعه‌ای که در شروع سیکل اولیه روی ماشین‌های دوم و سوم قرار می‌گیرد بنفش (Purple) باشد، با اتخاذ توالی ورود قطعات به صورت R-B-P می‌توان به حداقل زمان سیکل S_6 و هزینه عملیاتی و حداکثر خروجی قابل اکتساب در مدت شبیه‌سازی دست یافت.

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و روش‌شناسی رویه پاسخ در جدول ۴، واضح است که نزدیکی قابل قبولی بین جواب‌ها موجود است و این نشانگر دقت پیش‌بینی صورت گرفته با روش‌شناسی رویه پاسخ است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی مبتنی بر بهینه‌سازی به کمک شبیه‌سازی برای تعیین توالی ورود قطعات در یک سلول رباتیک سه ماشینیه ارائه شده است که به دلیل امکان خرابی تصادفی ماشین‌ها پارامترهای مرتبط با زمان سیکل و زمان انتظار ربات در مقابل ماشین‌ها دارای عدم قطعیت است. این سلول رباتیک قطعات مختلف تولید می‌کند و در آن ربات دارای سیاست حرکتی S_6 می‌باشد. با یافتن بهترین سناریوها برای توالی ورود قطعه به سلول تولیدی، دستیابی به زمان حداقل سیکل و کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی در کنار بهینه‌سازی خروجی تولید به طور همزمان میسر می‌شود. بر این اساس، سناریوهای مختلف بر پایه روش‌شناسی طراحی آزمایش کسری در راستای روش سطح پاسخ در طراحی آزمایش برای مثال طراحی شده، ایجاد گردیده و پس از تایید کفایت مدل خطی، به منظور بهینه‌سازی مدل از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده گردیده است. نتایج بیانگر این است که رویکرد پیشنهادی قادر است مدل‌سازی سناریوهای مختلف را در شبیه‌سازی‌های آتی با صرف کمترین هزینه، زمان و منابع نسبت به آزمایش سیستم واقعی امکان پذیر سازد. بنابراین بهبود سیستم تولیدی، قبل و در حین فعالیت قابل دستیابی خواهد بود. تعیین توالی بهینه ورود قطعات به سلول رباتیکی که قطعات مختلف تولید می‌کند در حالت m ماشینیه و نیز در شرایطی که تعداد ربات هم افزایش یابد یا از ربات دو

- [18] Batur, G. D., Karasan, O. E., & Akturk, M. S. (2012). Multiple part-type scheduling in flexible robotic cells. *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, No. 2, 726-740.
- [19] Hall, N.G., Kamoun, H. and Sriskandarajah, C. (1997) "Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells", *Operations Research*, Vol. 45, No. 3, 421-439, doi:10.1287/opre.45.3.421
- [20] Abdekhodaee, A. H., Wirth, A., & Gan, H. S. (2006). Scheduling two parallel machines with a single server: the general case. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, No. 4, 994-1009.
- [21] Abdulkader, M. M. S., ElBeheiry, M. M., Afia, N. H., & El-Kharbotly, A. K. (2013). Scheduling and sequencing in four machines robotic cell: Application of genetic algorithm and enumeration techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, No. 3, 465-474.
- [22] Batur, G. D., & Erol, S. (2016). Using simulated annealing for flexible robotic cell scheduling. *Gazi University Journal of Science*, Vol. 29, No. 3, 573-582.
- [23] Savsar, M., Aldaihani M. (2008), Modeling of machine failures in a flexible manufacturing cell with two machines served by a robot, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 93, No. 10, 1551-1562.
- [24] Hamasha, M. M., Alazzam, A., Hamasha, S., Aqlan, F., Almeanazel, O., Khasawneh, M. T. (2015). Multi machine flexible manufacturing cell analysis using a markov chain-based approach, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 3, 439-446.
- [25] Akturk, M. S. & Gurel, A. S. (2007). Machining conditions-based preventive maintenance. *International journal of production research*, Vol. 45, No. 8: 1725-1743.
- [26] Pidd, M. *Computer Simulation in Management Science*. 1986. Reprinted with corrections, Wiley.
- [27] Fu, M. C. (2002). Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14(3), 192-215.
- Euclidean travel times, *International Journal of Production Research*, 52(9): 2505-2518.
- [10] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2018). Two-Machine Robotic Cell Sequencing under Different Uncertainties. *Int. J. Simul. Model*, 17, 284-294.
- [11] Ghadiri Nejad, M., Shavarani, S. M., Vizvári, B., et al. (2018). Trade-off between process scheduling and production cost in cyclic flexible robotic cells. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96.
- [12] Far, M. H., Haleh, H., & Saghaei, A. (2019). A fuzzy bi-objective flexible cell scheduling optimization model under green and energy-efficient strategy using Pareto-based algorithms: SATPSPGA, SANRGA, and NSGA-II. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3853-3879.
- [13] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2020). Schedule-Allocate and Robust Sequencing in Three-Machine Robotic Cell under Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [14] Foumani, M., Razeghi, A., & Smith-Miles, K., (2020). Stochastic optimization of two-machine flow shop robotic cells with controllable inspection times: From theory toward practice. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101822.
- [15] Gultekin, H., Tula, A., & Akturk, M. S. (2016). Automated robotic assembly line design with unavailability periods and tool changes. *European Journal of Industrial Engineering*, Vol. 10, No. 4, 499-526, doi:10.1504/EJIE.2016.078142.
- [16] Kise, H., Shioyama, T., & Ibaraki, T. (1991). Automated two-machine flow shop scheduling: a solvable case. *IIE transactions*, Vol. 23, No. 1, 10-16, doi:10.1080/07408179108963836
- [17] Logendran, R. and Sriskandarajah, C. (1996) "Sequencing of robot activities and parts in two-machine robotic cells", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 12, 3447-3463.

and operation: literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241-261.

[32] Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: review and challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213-229.

[33] Chan, F. T., & Chan, H. K. (2004). A comprehensive survey and future trend of simulation study on FMS scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15(1), 87-102.

[34] Myer, R. H., & Montgomery, D. C. (2002). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiment*. John Wiley and Sons, New York.

[35] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.

[28] Vinod, K. T., Prabakaran, S., & Joseph, O. A. (2019). Dynamic due date assignment method A simulation study in a job shop with sequence-dependent setups. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(2), 421-437.

[29] Linnéusson, G., Ng, A. H., & Aslam, T. (2020). A hybrid simulation-based optimization framework supporting strategic maintenance development to improve production performance. *European Journal of Operational Research*, 281(2), 402-414.

[30] Kbah, Z., Erdil, N. O., & Aqlan, F. (2020). RISK ASSESSMENT IN OIL AND GAS INDUSTRY USING SIMULATION AND BOW-TIE ANALYSIS. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 27(1).

[31] Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). *Simulation for manufacturing system design*