

# زمان بندی در سلول های تولیدی رباتیک دوماشینه با در نظر گرفتن وابستگی

## زمان پردازش و زمان تعویض ابزار

واحد مرادی<sup>۱</sup>، مهدی یوسفی نژاد عطاری<sup>۲\*</sup>، هیوا فاروقی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۳۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۷/۰۷/۱۸، تاریخ تصویب: ۹۸/۰۱/۱۷)

### چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله زمان بندی در سلول های تولیدی رباتیک دوماشینه بررسی شده است. مجموعه ای از قطعات گوناگون به کمک سلول تولیدی رباتیک تولید می شود و هر قطعه برای تکمیل شدن به تعدادی ابزار روی هر ماشین نیاز دارد. با توجه به اینکه مخزن ابزار ماشین ها ظرفیت محدودی دارد، ضروری است درباره نحوه تعویض ابزارها و زمان لازم برای این کار تصمیم گیری شود. همچنین فرض شده است زمان پردازش هر قطعه روی ماشین دوم، تابعی از عمر ابزارهای ماشین اول باشد. براساس زمان تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش به عمر ابزارها به منزله دو فرض جدید، مدل برنامه ریزی ریاضی برای کمینه سازی زمان سیکل در یک سلول تولیدی رباتیک دوماشینه ارائه شد. همچنین پس از تحلیل تأثیر آن ها بر زمان سیکل، مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزار GAMS و الگوریتم ژنتیک حل شد.

واژه های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، تعویض ابزار، زمان بندی، سلول های تولیدی رباتیک.

### مقدمه

جایگزینی آن ها با ابزارهای جدید، مسئله ای است که به

تصمیم گیری نیاز دارد [۲].

بررسی فرایند ساخت چنین قطعاتی نشان می دهد هرچه عمر ابزارها در مرحله خشن کاری کمتر باشد، سطح دقیق تری ایجاد می شود و زمان پردازش در مرحله پولیش کاری کمتر خواهد بود. این مسئله بدین معناست که زمان پردازش روی یک ماشین وابسته به عمر ابزار در ماشین قبلی است. در نتیجه توجه به چنین فرضی مسئله را به دنیای واقعی نزدیک تر می کند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه امروزه خطوط تولیدی انعطاف پذیر توانایی ساخت قطعات مختلفی را دارند، اگر فرض کنیم برای تولید مجموعه ای از قطعات روی هر ماشین به تعدادی ابزار نیاز داریم و هر ماشین می تواند به صورت هم زمان چند ابزار را در مخزن ابزار نگه دارد و بدون نیاز به تعویض ابزار از آن ها استفاده کند، تصمیم گیری صحیح در مورد توالی پردازش قطعات و اینکه چه ابزاری در چه مرحله ای روی مخزن ابزار ماشین استفاده شود، به کاهش زمان تولید منجر شود [۳]. مسئله ترتیب ورود قطعات و نحوه جابه جایی قطعه های

در صناعی مانند ساخت قطعات خودرو، مدیریت ابزار پارامتری مهم در کنترل هزینه ها و زمان تولید است. همچنین مدیریت و برنامه ریزی صحیح ربات ها در سیستم های تولیدی رباتیک می تواند به کاهش هزینه های تولید و افزایش سرعت تولید منجر شود. با بررسی فرایند ساخت قطعاتی مانند میل لنگ خودروها که می توان ساخت آن ها را در سلول های تولیدی رباتیک بررسی کرد [۱] نتیجه می گیریم برای ساخت این قطعات به منظور افزایش سرعت تولید می توان عملیات ساخت را به کمک ماشین های CNC انجام داد؛ بدین صورت که عملیات براده برداری ها و سوراخ کاری های خشن با استفاده از ماشین که قدرت بیشتر و دقت کمتری دارد انجام می شود. عملیات پولیش کاری و ظریف کاری نیز به کمک ماشینی با دقت بالاتر و قدرت کمتر برای رسیدن به دقت نهایی صورت می گیرد. همچنین عملیات بارگذاری و باربرداری آن ها روی ماشین ها با ربات انجام می شود. به دلیل سختی بسیار در مواد اولیه چنین قطعاتی، عمر ابزارها کم است و زمان مناسب برای

براین اساس مجموعه کارهای لازم برای پردازش قطعات روی ماشین به گونه‌ای صورت می‌گرفت که به برآورده شدن هدف مسئله منجر می‌شد. همچنین برای حل این مدل از الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه استفاده شد [۱۴]. این مسئله را یانسی و همکاران با استفاده از الگوریتم شمارشی حل کردند [۱۵]. آمایا و همکاران نیز برای حل این مسئله از الگوریتم فراابتکاری ممتیک بهره بردند [۱۶]. کاتانزارو و همکاران مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی را برای مسئله تعویض ابزار ارائه کردند که کارایی و سرعت محاسباتی آن از مدل‌های قبلی ارائه شده در مقالات [۵]، [۸] و [۱۱] بیشتر بود [۱۷]. چاوز و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ روش فراابتکاری هیبرید را بر پایه الگوریتم ژنتیک برای مسئله کمینه کردن تعداد تعویض ابزار ارائه کردند [۱۸].

بررسی مقالات مورد نظر نشان می‌دهد، براساس دانش نویسندگان مقاله در بیشتر پژوهش‌های مرتبط، زمان تعویض ابزار نادیده گرفته شده است و مدل‌های ارائه شده تنها به تعیین توالی ورود قطعات به سلول، زمان بندی پردازش قطعات روی ماشین‌ها و کمینه کردن تعداد تعویض ابزارها پرداخته است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، زمان تعویض ابزار پارامتری جدید در سلول‌های تولیدی رباتیک است که به زمان پردازش قطعات روی ماشین‌ها اضافه می‌شود.

همچنین در این مقاله فرض شده است که قطعات گوناگونی به کمک سلول تولیدی رباتیک دوماشینه تولید می‌شوند. زمان پردازش هر قطعه روی ماشین دوم نیز وابسته به عمر ابزار مورد نیاز آن قطعه روی ماشین اول است. در نتیجه زمان پردازش یک قطعه روی ماشین دوم به این بستگی دارد که پردازش آن چه زمانی روی ماشین دوم شروع می‌شود. مشابه چنین فرضی در پژوهش‌های [۱۹]، [۲۰] بررسی و جمع‌آوری شده است؛ البته موضوع بررسی تولید در سلول‌های تولیدی در مقالات دیگری نیز مدنظر قرار گرفته است [۳۰].

در بخش دوم، تعریف ساختار مسئله پژوهش و چارچوب اصلی مفاهیم استفاده شده در این مقاله تشریح شده است. در بخش سوم نیز مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای کمینه‌سازی زمان سیکل در سلول رباتیک دوماشینه مسئله

مختلف میان ایستگاه‌ها در سلول‌های تولیدی رباتیک می‌تواند نرخ تولید را افزایش دهد [۴].

زمانی که قطعه‌ای برای پردازش به ماشین تخصیص می‌یابد، همه ابزارهای لازم برای عملیات روی قطعه مورد نظر در مخزن ابزار ماشین نصب می‌شود. با توجه به ظرفیت محدود مخزن، باید ابزارهای جدید جایگزین برخی ابزارهای موجود در مخزن شوند که این فرایند تعویض ابزار نامیده می‌شود [۵]. در معرفی مسائل مربوط به تعویض ابزار، مسئله توالی عملیات و نحوه جایگزینی ابزارها به منظور پردازش عملیات لازم برای تولید قطعه مورد نظر مطرح شده و الگوریتم  $KTNS^1$  برای توالی بهینه انجام کارها و تعداد بهینه تعویض ابزارها معرفی شده است [۳]. از دیدگاه کراما و همکاران، این مسئله در حالتی که ظرفیت مخزن ابزار ماشین بیشتر از دو باشد، NP-hard است؛ بنابراین برای حل این مسئله مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه شد و حل آن به کمک روش فراابتکاری صورت گرفت. نتایج نیز به کمک نتایج الگوریتم  $KTNS$  مقایسه شد [۶]. پروال و فینکه مسئله تعویض ابزار را در حالتی بررسی کردند که زمان تعویض ابزار به نوع ابزارها وابسته نبود. آن‌ها در این پژوهش حداکثر کردن جریان نقدینگی در شبکه را مدنظر قرار دادند [۷]. هرتز و همکاران نیز دو رویکرد ابتکاری را برای حل مسائل تعویض ابزار به کار بردند و ادعا کردند این روش‌ها زمان حل مسئله را بسیار کاهش می‌دهند [۸]. الفوزان و السلطان از الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه برای حل مسئله مطرح شده تانگ و دیناردو استفاده کردند [۹]. آکتورک و همکاران نیز احتمال سایش را برای ابزار در نظر گرفتند و با هدف کمینه کردن دامنه عملیات<sup>۲</sup> به مدل‌سازی مسئله پرداختند [۱۰]. لاپورته و همکاران مدل ریاضی دیگری را ارائه کردند که آزادی‌سازی خطی<sup>۳</sup> آن به مراتب از مدل تانگ و دیناردو بهتر بود [۱۱]. در سال ۲۰۰۵، الگوریتمی مبنی بر جست‌وجوی پرتو برای حل مسائل تعویض ابزار روی یک ماشین انعطاف‌پذیر ارائه شد [۱۲]. کراما و همکاران این مسئله را در حالتی که ابزارها متفاوت و غیرهمسان هستند، با فرض معلوم بودن توالی ورود قطعات به سلول تولیدی مطالعه کردند و نشان دادند این مسئله NP-complete است [۱۳]. در سال ۲۰۰۸، مدلی برای کمینه کردن تعداد تعویض ابزار ارائه شد.

جابه‌جایی مجموعه‌ای از قطعات مختلف به کمک ربات میان ایستگاه‌ها توسط سلول تولیدی رباتیک است؛ به‌طوری‌که ابتدا و انتهای سیکل مشابه هم باشند. در این سیاست‌ها  $A_{ij}$  عبارت است از اینکه ربات، قطعه را از ناحیه/ ماشین  $i$  به ناحیه/ ماشین  $j$  جابه‌جا کند. ناحیه ورودی با اندیس صفر، ماشین‌ها به ترتیب با اندیس‌های ۱ و ۲ و ناحیه خروجی با اندیس ۳ مشخص می‌شوند. توالی کارها براساس این سیاست‌ها به صورت  $S_1: A_{01}A_{12}A_{23}$  و  $S_2: A_{01}A_{-}$   $A_{12}$  است. جزئیات این سیاست‌های حرکتی در مطالعه ستهی و همکارانش تشریح شده است [۲۱]. در جدول ۱، زمان سیکل برای تولید هر قطعه به کمک این سیاست‌های حرکتی آمده است.

جدول ۱. زمان سیکل برای تولید هر قطعه براساس سیاست‌های حرکتی تعریف‌شده در سلول تولیدی رباتیک دوماشین

یک‌واحد سیکل‌های زمان	
$S_1$	$T_{\sigma(k)}^1 = n(6\varepsilon + 6\delta) + \sum_{k=1}^n (a_{\sigma(k)} + b_{\sigma(k)})$
	$T_{\sigma(k)\sigma(k+1)}^2 = n(4\varepsilon + 4\delta) +$
$S_2$	$\sum_{k=1}^n \max \{ \max \{ b_{\sigma(k)}, 4\delta + 2\varepsilon \}, a_{\sigma(k+1)} \}$

اندیس‌های مورد استفاده در این پژوهش به شکل زیر هستند.  $m$  اندیس شماره ماشین‌هاست و مقادیر ۱ و ۲ را می‌گیرد.  $i$  و  $j$  اندیس شمارنده قطعات هستند و مقادیر  $1, 2, 3, \dots, n$  را می‌گیرند.  $k$  اندیس شمارنده توالی قطعات است؛ به‌طوری‌که هر جایگاه در ترتیب ورود قطعات با این اندیس نشان داده می‌شود و مقادیر  $1, 2, 3, \dots, n$  را می‌گیرد.  $s, t$  اندیس شمارنده ابزار هستند و روی هر ماشین مقادیر  $1, 2, 3, \dots, T_m$  قرار می‌گیرد.

پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش به شکل زیر هستند.  $A_{i,s,m}$  یک پارامتر ورودی و باینری است، نیاز قطعات به ابزارها را بیان می‌کند و زمانی برابر یک است که قطعه  $i$  روی ماشین  $m$  به ابزار  $s$  نیاز داشته باشد. در غیر این صورت، مقدار آن صفر خواهد بود.  $n$  تعداد کل قطعات تولیدی است که مقدار عدد صحیح می‌گیرد.  $W_m^k$  زمان انتظار ربات روبه‌روی ماشین  $m$  را در توالی ورود قطعات  $k$

مورد بررسی با فرض تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش مشاهده می‌شود. در بخش چهارم، تحلیل فضای جواب در مسائل نمونه‌ای و حل مدل ریاضی صورت می‌گیرد و در بخش پنجم، نتایج و جمع‌بندی مقاله و پیشنهاد‌های آتی آمده است.

### تعریف مسئله

سلول‌های تولیدی رباتیک شامل یک یا چند ربات برای جابه‌جایی قطعات میان ماشین‌ها/ ایستگاه‌های کاری و یک یا چند ماشین CNC برای پردازش قطعات هستند. جابه‌جایی قطعات به کمک ربات به صورت تکراری و پشت سر هم در سلول تولیدی تکرار می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که زمان کل تولید (زمان سیکل) به حداقل برسد [۲۱، ۳۱]. در بیشتر مقالات ارائه‌شده در حوزه زمان‌بندی سلول‌های تولیدی رباتیک، فرض سیکلی بودن تولید و توالی حرکات ربات براساس سیاست حرکتی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. همچنین زمان پردازش روی ماشین‌ها ثابت فرض شده و به زمان تعویض ابزار توجهی نشده است [۲۲، ۲۳، ۲۶].

ماشین‌های مورد بررسی از نوع CNC هستند و در صورت تجهیز مخزن ابزار به ابزارهای لازم برای پردازش عملیات، انعطاف‌پذیری و قابلیت تولید قطعات مختلف را دارند. به دلیل محدود بودن ظرفیت مخزن ابزار ماشین، ضروری است برای امکان تولید قطعات مختلف و پردازش عملیات مرتبط با تولید هر قطعه، برخی ابزارهای موجود در مخزن با ابزارهای لازم دیگر جایگزین شوند که این مسئله مستلزم صرف زمان برای تعویض ابزار خواهد بود. همچنین در این مسئله فرض می‌شود برای تکمیل عملیات قطعات، هر قطعه باید به ترتیب روی هر دو ماشین پردازش شود. زمان پردازش قطعات روی ماشین دوم به عمر ابزار مورد نیاز قطعه مورد نظر روی ماشین اول وابسته است. ماشین‌ها نمی‌توانند هنگام پردازش قطعه توقف داشته باشند. همچنین سیاست حرکتی ربات از قطعه‌ای به قطعه دیگر نیز نمی‌تواند تغییر کند.

### زمان سیکل

زمان سیکل برابر مجموع زمان‌های لازم برای پردازش و

### مدل ریاضی مسئله

در این بخش، ابتدا براساس مفاهیم و فرضیه‌های قبلی در مورد مسائل مربوط به مسئله تعویض ابزار، رویکرد جدیدی برای محاسبه تعداد تعویض ابزار ارائه می‌شود و پس از آن، مسئله وابستگی زمان پردازش به عمر ابزار بررسی خواهد شد. زمانی باید ابزار یک قطعه را تعویض کرد که در مرحله قبلی یک یا چند ابزار مورد نیاز قطعه روی ماشین نباشند. در مسائل مربوط به محاسبه، تعداد تعویض ابزار توالی ورود قطعات و نحوه قرارگیری ابزارها در هر مرحله بررسی می‌شود. در این مقاله، به منظور بیان رویکرد پیشنهاد شده برای محاسبه تعداد تعویض ابزار از مثالی عددی استفاده شد؛ برای مثال فرض کنید تعداد کل ابزارهای مورد نیاز برای همه قطعات مورد نظر در یک سلول ۵ باشد و قطعه شماره ۱ به ابزارهای شماره ۱ و ۳ نیاز داشته باشد. در این صورت ماتریس  $A_{is}$  تعریف شده برای این قطعه به صورت رابطه ۱ خواهد بود.

$$A_{is} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

براساس مثال ۱، اگر شرایط روابط ۱، ۲ و ۳ به صورت هم‌زمان برقرار باشند، تعداد تعویض ابزار در توالی  $k$  ام برابر

$$\text{است با } \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^{T_i} |B_{k-1,si} - B_{ksi}| \right] \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n X_{jk} * A_{js} * B_{ks} = A_{js} \quad \forall s = \dots T_i \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n X_{jk} * A_{js} * B_{ks} = A_{js} \quad \forall s = \dots T \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (4)$$

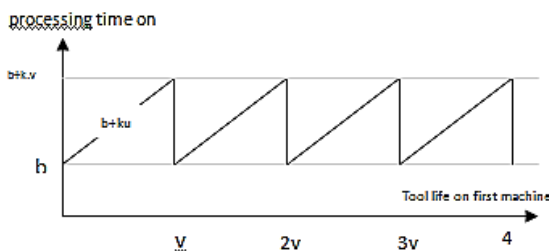
مثال ۱: فرض کنید یک ماشین وجود دارد و سه قطعه تولید می‌شود. برای تکمیل قطعات به پنج ابزار نیاز داریم و ظرفیت مخزن ابزار ماشین ۳ است؛ برای مثال فرض کنید می‌خواهیم برای توالی ۳ > ۲ > ۱ از قطعات، محاسبه تعویض ابزار را بررسی کنیم و قطعات به ابزارهای زیر براساس رابطه ۵ نیاز دارند.

بیان می‌کند.  $a_{\sigma(k)}$  برابر مجموع زمان پردازش قطعه و تعویض ابزار روی ماشین اول در توالی ورود قطعات  $k$  است. این متغیر یک متغیر عدد صحیح به‌شمار می‌آید.  $b_{\sigma(k)}$  برابر مجموع زمان پردازش قطعه و تعویض ابزار روی ماشین دوم در توالی ورود قطعات  $k$  است. این متغیر یک متغیر عدد صحیح محسوب می‌شود.  $P_{i,s,m}$  متغیر زمان مورد نیاز برای پردازش قطعه  $i$  به کمک ابزار  $s$  روی ماشین  $m$  است که متغیر ورودی مسئله به‌شمار می‌آید و مقادیر عدد صحیح می‌گیرد.  $q$  زمان مورد نیاز برای یک بار تعویض ابزار و جزو متغیرهای ورودی مسئله است. این متغیر عدد صحیح محسوب می‌شود.  $\varepsilon$  زمان باربرداری و بارگذاری قطعه به کمک ربات از ورودی، ماشین‌ها و خروجی است و پارامتر ورودی و متغیر عدد صحیح به‌شمار می‌آید. این زمان برای همه ایستگاه‌ها برابر است.  $\delta$  زمان جابه‌جایی ربات میان هر دو ایستگاه متوالی است. این متغیر نیز یک متغیر ورودی است و مقادیر عدد صحیح می‌گیرد.  $K_f$  ضرب ثابت مربوط به ابزار  $t$  است که بستگی به جنس ابزار دارد.  $T_m$  تعداد کل ابزارهای موجود روی ماشین  $m$  است. این متغیر ورودی مسئله محسوب می‌شود.  $C_m$  ظرفیت مخزن ابزار ماشین  $m$  است و مقادیر عدد صحیح می‌گیرد. مقدار آن نیز همیشه کوچک‌تر یا مساوی  $T_m$  است

متغیرهای تصمیم در این پژوهش به صورت زیر هستند.  $CH_{k,m}$  مجموع تعداد تعویض ابزارها در مرحله  $k$  روی ماشین را بیان می‌کند و مقادیر عدد صحیح می‌گیرد.  $T_{\sigma(k)}^f$  زمان سیکل برای تولید  $n$  قطعه مختلف براساس سیاست حرکتی  $S_f$  و توالی ورود  $\sigma(k)$  است. این متغیر یک متغیر عدد صحیح و متغیر تصمیم‌گیری به‌شمار می‌آید.  $X_{ik}$  متغیر تصمیم‌گیری و باینری است که توالی ورودی قطعات را مشخص می‌کند. این متغیر زمانی برابر یک است که قطعه  $i$  در  $k$  امین جایگاه از توالی ورود قطعات قرار بگیرد. در غیر این صورت این متغیر صفر است.  $B_{k,s,m}$  متغیر تصمیم‌گیری و باینری است که وضعیت ابزارها روی ماشین‌ها را در هر مرحله بیان می‌کند و زمانی برابر یک است که ابزار  $s$  در توالی  $k$  روی ماشین  $m$  قرار بگیرد. در غیر این صورت مقدار آن برابر صفر خواهد بود.  $u_{t,k}$  برابر عمر ابزار  $t$  در توالی  $k$  است و یک متغیر بزرگ‌تر از صفر است.

در مورد تولید میل‌لنگ بیان شد، اگر همه عملیات سوراخ‌کاری و خشن‌کاری تا رسیدن قطعه خام استوانه‌ای شکل به شکل میل‌لنگ به ماشین اول واگذار شوند، هر عملیات به ابزار متفاوتی نیاز خواهد داشت. در عمل نیز کالیبراسیون ماشین‌ها با توجه به ابزارهای نو انجام می‌شود، اما با توجه به اینکه در عمل عملیات ماشین‌کاری منجر به خوردگی ابزارها می‌شود، عمق براده‌برداری‌ها در طول زمان با استفاده از ابزاری خاص کمتر خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه در هر مرحله از پولیش‌کاری سطح بسیار نازکی از قطعه برداشته می‌شود، عملیات پولیش و ظریف‌کاری قطعه تا رسیدن به ابعاد مورد نظر روی ماشین دوم به زمان بیشتری نیاز خواهد داشت. از آنجا که عملیات ماشین‌کاری هر قسمت از قطعه با توجه به شکل ظاهری آن قطعه به کمک ابزارهای متفاوتی انجام می‌شود، زمان پولیش‌کاری روی هر قسمت از سطح قطعه وابسته به عمر ابزاری است که آن قسمت از سطح را براده‌برداری کرده است. هرچه عمر آن ابزار بیشتر شود، زمان پولیش آن قسمت روی ماشین دوم بیشتر می‌شود.

اگر زمان پردازش روی ماشین دوم (b) را تابعی خطی از عمر ابزار روی ماشین اول فرض کنیم، همچنین k ضریب ثابت مربوط به آن ابزار باشد و عمر ابزار را در طول زمان عمر خود با u نشان دهیم، تابع زمان پردازش روی ماشین دوم b+k.u خواهد بود. چنین تابعی در پژوهش‌های بسیاری برای وابستگی زمان پردازش در نظر گرفته شده است [۱۹]. فرض کنید عمر مفید ابزار v باشد؛ در نتیجه پس از پردازش به کمک ابزار، به اندازه v واحد زمانی ابزاری جدید روی ماشین اول نصب می‌شود. سپس بار دیگر زمان پردازش روی ماشین دوم برابر b خواهد بود. در شکل ۱، زمان پردازش روی ماشین دوم در طول زمان پردازش به کمک ابزار آمده است.



شکل ۱. تابع زمان پردازش روی ماشین دوم وابسته به عمر ابزار

$$A_{1s} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A_{2s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, A_{3s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه ۵، قطعه اول به ابزارهای ۱ و ۳، قطعه دوم به ابزارهای ۳ و ۴ و ۵ و قطعه سوم به ابزارهای ۲ و ۵ نیاز دارد. با توجه به اطلاعات داده شده اگر بخواهیم در توالی سوم، یعنی هنگام ورود قطعه شماره ۳ تعداد تعویض ابزار را محاسبه کنیم (k=3)، با توجه به تعریف ماتریس  $B_{is}$  در مرحله k-1 یعنی مرحله ۲ این ماتریس حتماً به شکل رابطه ۵ است؛ زیرا باید برای پردازش قطعه دوم همه ابزارهای مورد نیاز آن روی ماشین باشند.

$$B_{2s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

از سوی دیگر، چون قطعه ۳ در توالی سوم قرار دارد، براساس شرط سوم تنها  $X_{33}$  عدد می‌گیرد و مابقی برابر صفر خواهند بود. اکنون برای اینکه شرط اول برای توالی k=3 برقرار باشد، باید مؤلفه‌های دوم و پنجم  $B_{3s}$  عدد ۱ بگیرند. همچنین برای اینکه شرط دوم برقرار باشد، یکی از مؤلفه‌های اول، سوم یا چهارم باید عدد ۱ بگیرند. اکنون در هر سه حالت، تعداد تعویض ابزار را به ترتیب روابط ۷ تا ۹ محاسبه می‌کنیم.

$$CH_3 = \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^{T_k} (B_{k-1,si} - B_{k,si}) \right] = \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} * [(1-0) + (1-0) + (0-1) + (0-1) + (1-1)] = 2$$

$$CH_3 = \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^{T_k} (B_{k-1,si} - B_{k,si}) \right] = \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} * [(0-0) + (1-0) + (1-1) + (0-1) + (1-1)] = 1$$

$$CH_3 = \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^{T_k} (B_{k-1,si} - B_{k,si}) \right] = \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} * [(0-0) + (1-0) + (0-1) + (1-1) + (1-1)] = 1$$

در ادامه، فرض وابستگی زمان پردازش قطعات روی ماشین دوم به عمر ابزارها روی ماشین اول بررسی خواهد شد. با توجه به مثال بررسی شده در دنیای واقعی، که

با توجه به فرضیه‌های پژوهش حاضر می‌توان مدلی از برنامه‌ریزی را ارائه کرد که بتواند بهترین سیاست حرکتی ربات، بهترین توالی ورود قطعات و بهترین تعداد تعویض ابزار را با در نظر گرفتن زمان تعویض ابزار روی هر دو ماشین و وابستگی زمان پردازش روی ماشین دوم به عمر ابزارهای ماشین اول با هدف کمینه‌سازی زمان سیکل محاسبه کند.

### مدل ریاضی مسئله

در این بخش، روش مدل‌سازی مسئله کمینه‌کردن زمان سیکل در سلول تولیدی رباتیک دو ماشین با فرض وجود تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش ارائه می‌شود. همچنین با توجه به جدول ۱، زمان سیکل به پارامترهای  $a_{\sigma(k)}$  و  $b_{\sigma(k)}$  بستگی دارد که به ترتیب زمان پردازش قطعات روی ماشین‌های ۱ و ۲ هستند. اکنون با توجه به فرضیه‌های جدید در این پژوهش، زمان تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش روی ماشین دوم، پارامترهایی تأثیرگذار در زمان سیکل خواهند بود؛ از این‌رو زمان کل پردازش روی قطعه در ماشین اول می‌تواند برابر مجموع زمان انجام عملیات ماشین روی قطعه به اضافه زمان تعویض ابزار روی هر قطعه باشد که این زمان در ماشین دوم به عمر ابزار در ماشین اول بستگی خواهد داشت. در نتیجه می‌توان زمان کل پردازش قطعه  $i$  را روی ماشین  $m$  در توالی  $k$  ام به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه کرد.

$$a_{\sigma(k)} = \sum_{i=1}^n \left( X_{i,k} * \left( (CH_{k,1} * q) + \sum_{t=1}^{T_1} (A_{t,1} * P_{t,1}) \right) \right) \quad (12)$$

$$\forall k = 1, \dots, n$$

$$b_{\sigma(k)} = \sum_{i=1}^n \left( X_{i,k} * \left( (CH_{k,2} * q) + \sum_{s=1}^{T_2} \sum_{t=1}^{T_1} (P_{t,s,2} + K_t * u_{t,k}) \right) \right) \quad (13)$$

$$\forall k = 1, \dots, n$$

اکنون با توجه به آنچه در این پژوهش آمده است، مدل برنامه‌ریزی کمینه‌سازی زمان سیکل در سلول‌های تولیدی رباتیک دو ماشین با فرض وجود تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش روی ماشین دوم به عمر ابزارهای ماشین اول ارائه می‌شود.

$$\text{Min} C_{\text{opt}} \quad (14)$$

$$C_{\text{opt}} = \min(T_{\sigma(k)}^1, T_{\sigma(k)\sigma(k+1)}^2) \quad (15)$$

$$T_{\sigma(k)}^1 = n(8\varepsilon + 8\delta) + \sum_{k=1}^n (a_{\sigma(k)} + b_{\sigma(k)}) \quad (16)$$

با توجه به اینکه  $n$  قطعه مختلف به کمک سلول تولیدی رباتیک تولید می‌شوند، توالی ورود قطعات به صورت  $\sigma(k)$  است. همچنین قطعه  $i$  روی ماشین  $m$  به ابزارهای  $A_{i,t,m}$  نیاز دارد و زمان پردازش به کمک هر ابزار برای این قطعه روی ماشین  $m$  برابر  $P_{i,t,m}$  است؛ از این‌رو زمان پردازش روی ماشین دوم در توالی  $k$  ام برابر زمان پردازش قطعه‌ای است که در مرحله  $k$  روی ماشین دوم پردازش می‌شود. این زمان وابسته به عمر ابزار همه ابزارهای مورد نیاز این قطعه روی ماشین اول است. در نتیجه تابع زمان پردازش توالی  $k$  روی ماشین دوم براساس توضیحات این بخش، برابر رابطه ۱۰ است.

$$(10)$$

$$b_{\sigma(k)} = \sum_{s=1}^{T_2} \sum_{t=1}^{T_1} \sum_{i=1}^n X_{i,k} * (P_{i,s,2} + K_t * u_{t,k}) \quad \forall k = 1, \dots, n$$

اگر فرض کنیم عمر همه ابزارها برابر زمان سیکل برای  $n$  قطعه است؛ یعنی پس از تولید هر  $n$  قطعه، کل ابزارهای ماشین اول با ابزاری نو جایگزین می‌شوند، در رابطه ۱۰ عمر ابزار  $t$  در مرحله  $k$   $(u_{t,k})$  برابر مجموع عمر ابزار قبل از مرحله  $k-1$  است. مدت زمان پردازش نیز به کمک آن ابزار در مرحله  $k-1$  است و این مقدار برابر رابطه ۱۱ است. همچنین به دلیل اینکه عمر ابزار برابر کل زمان سیکل است و در یک سیکل همیشه عمر ابزار  $(u_{t,k})$  کمتر از عمر ابزارها است  $(v)$ ، باقیمانده پس از تقسیم  $u_{t,k}/v$  همیشه برابر  $u_{t,k}$  خواهد بود. دلیل توجه به این فرض شرط یکسان بودن شروع و پایان یک سیکل برای تولید  $n$  قطعه است؛ بنابراین از آنجا که زمان تولید در یک سیکل کمینه می‌شود، باید وضعیت کل اجزای سیستم در ابتدا و انتهای سیکل برای تولید  $n$  قطعه یکسان باشد. اگر به چنین فرضی توجه نشود، ضروری است ابزارها را دیرتر یا زودتر از عمرشان جایگزین کرد. براساس رابطه ۱۱، اگر قطعه  $i$  در توالی  $k-1$  قرار گرفته باشد و این قطعه به ابزار  $t$  نیازمند نباشد، عمر ابزار تغییری نمی‌کند، اما اگر قطعه  $i$  در توالی  $k-1$  قرار بگیرد و به ابزار  $t$  نیاز داشته باشد، عمر ابزار  $t$  به اندازه  $P_{i,t,1}$  افزایش خواهد یافت.

$$u_{t,k} = u_{t,k-1} + \left( \sum_{i=1}^n X_{i,k-1} * A_{t,i,1} * P_{i,t,1} \right) \quad (11)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T_1, \quad k = 2, 3, \dots, n$$

همچنین با توجه به فرض عمر همه ابزارها در توالی

$$k=1 \text{ برابر صفر است، یعنی } u_{t,1}=0.$$

سیکل‌ها برای  $n$  قطعه براساس سیاست‌های حرکتی  $S_1$  و  $S_2$  محاسبه می‌شود. در محدودیت ۱۶، زمان تولید  $n$  قطعه براساس سیاست حرکتی  $S_1$  و در محدودیت ۱۷، زمان تولید مجموع  $n$  قطعه در سیاست حرکتی  $S_2$  محاسبه می‌شود. محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۰ تعداد تعویض ابزار را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ نیز به فرض سیکلی بودن ورود قطعات مربوط هستند. در محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴ به ترتیب زمان‌های پردازش کل و مجموع زمان‌های تعویض ابزار روی ماشین‌های اول و دوم با در نظر گرفتن وابستگی زمان پردازش به عمر ابزار محاسبه می‌شود. محدودیت ۲۵ نیز مربوط به فرض سیکلی بودن ورود قطعات است. براساس محدودیت ۲۶، عمر ابزار در توالی‌های ۲ تا  $n$  روی ماشین اول محاسبه می‌شود. محدودیت ۲۷ نیز به فرض جایگزینی ابزارهای نو در ابتدای هر سیکل مربوط است. با توجه به محدودیت ۲۸، هر قطعه تنها در یک توالی و همه قطعات در توالی قرار می‌گیرند.

براساس مدل ارائه شده می‌توان مسئله سلول‌های تولیدی رباتیک را با در نظر گرفتن وابستگی زمان پردازش به عمر ابزار، هم‌زمان با مسائل تعویض ابزار بررسی کرد. این مدل برنامه‌ریزی با هدف کمینه کردن زمان سیکل می‌تواند سیاست حرکتی بهینه ربات را برای جابه‌جایی قطعات در سلول‌های تولیدی رباتیک دوماشینه و نحوه ترتیب ورود قطعات به این سلول تولیدی، همچنین نحوه تعویض ابزارها را در هر مرحله از پردازش قطعات مشخص کند.

### تحلیل مدل برنامه‌ریزی و حل مسائل عددی

در این بخش، پس از بررسی حل مسائل عددی در مدل برنامه‌ریزی ارائه شده در بخش سوم، فضای جواب و نحوه مدل‌سازی آن تشریح می‌شود. از آنجاییکه در نرم‌افزار گمز حل کننده بارون یکی از بهترین نرم‌افزارها در حل مدل‌های غیرخطی است؛ بنابراین به منظور راستی‌آزمایی، بررسی کیفیت جواب‌ها و همچنین زمان حل، مدل ریاضی ارائه شده در نرم‌افزار گمز کدنویسی شده است. سپس با استفاده از اطلاعات موجود در مطالعه فاروقی و همکاران و با فرض اطلاعات جدول ۲، نتایج حل مسئله کدنویسی شده در نرم‌افزار گمز در جدول ۳ آمده است. این نرم‌افزارها به کمک لپ‌تاپ با CPU برابر ۲/۵ گیگاهرتز و RAM چهار

$$T_{\sigma(k)\sigma(k+1)}^2 = n(4\epsilon + 4\delta) + \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n \left( \max \left\{ \max \left\{ b_{\sigma(k)}, 4\delta + 2\epsilon \right\}, a_{\sigma(k+1)} \right\} \right) \quad (18)$$

$$CH_{k,m} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{T_m} |X_{i,k} * X_{i,(k-1)} * (B_{(k-1),t,m} - B_{k,t,m})| \right]$$

$$\forall k = 2, \dots, n \quad m = 1, 2 \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^n X_{i,k} * A_{i,s,m} * B_{k,s,m} = A_{i,s,m}$$

$$\forall i = 1, \dots, n \quad s = 1, \dots, T_m \quad m = 1, 2 \quad (20)$$

$$\sum_{s=1}^{T_1} B_{k,s,m} = C_m$$

$$\forall k = 1, \dots, n \quad m = 1, 2 \quad (21)$$

$$X_{i,0} = X_{i,n}$$

$$\forall i = 1, \dots, n \quad (22)$$

$$B_{0,t,m} = X_{n,t,m}$$

$$\forall i = 1, \dots, n \quad t = 1, \dots, T_m \quad m = 1, 2 \quad (23)$$

$$a_{\sigma(k)} = \sum_{i=1}^n \left( X_{i,k} * \left( (CH_{k,1} * q) + \sum_{t=1}^{T_1} (A_{i,t,1} * P_{i,t,1}) \right) \right)$$

$$b_{\sigma(k)} = \sum_{i=1}^n \left( X_{i,k} * \left( (CH_{k,2} * q) + \sum_{s=1}^{T_2} \sum_{t=1}^{T_1} (P_{i,s,2} + K_t * u_{i,k}) \right) \right) \quad (24)$$

$$\forall k = 1, \dots, n \quad (25)$$

$$a_{\sigma(n+1)} = \sum_{i=1}^n X_{i,1} a_{\sigma(1)} \quad (26)$$

$$u_{i,k} = u_{i,k-1} + \left( \sum_{i=1}^n X_{i,k-1} * A_{i,j,1} * P_{i,j,1} \right)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T_1 \quad , \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (27)$$

$$u_{i,1} = 0$$

$$k = 2, 3, \dots, n \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^n X_{i,k} = 1$$

$$\forall i = 1, \dots, n$$

در بخش ۲، نوع پارامترها و حدود آن‌ها بیان شده است. در انتهای مدل ارائه شده نوع متغیرها تعیین نشده است و تنها متغیرهای ورودی مسئله و متغیرهای تصمیم مشخص شده‌اند. در این مدل، برنامه‌ریزی ریاضی رابطه ۱۴ تابع هدف مسئله است که برابر کمترین زمان سیکل میان زمان‌های دو سیاست حرکتی است. در محدودیت ۱۵، زمان سیکل بهینه و سیاست حرکتی بهینه برای توالی حرکات ربات به دست می‌آید که با کمترین زمان سیکل از میان زمان سیکل‌های دوگانه حرکتی در سلول تولیدی دوماشینه برابر است. در محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب زمان

مگابایت اجرا شده‌اند. در این مثال، فرض شده است پردازش چهار قطعه مختلف باید به کمک دو ماشین صورت بگیرد و روی هر ماشین از ۵ ابزار استفاده شود. همچنین ۴ برابر ۱،  $\delta$  برابر ۲ و  $q$  برابر ۲ هستند.

اکنون برای بررسی تأثیر تغییرات زمان تعویض ابزار بر زمان سیکل بهینه براساس اطلاعات جدول ۱، زمان تعویض ابزار در بازه ۰ تا ۵ واحد زمانی با فاصله ۰/۱ تغییر کرده و تغییرات زمان سیکل به زمان تعویض ابزار در شکل ۲ آمده است. هرچه این زمان بیشتر شود، متوسط زمان سیکل از آن بالاتر می‌رود. فرض دیگر این پژوهش، وابستگی زمان

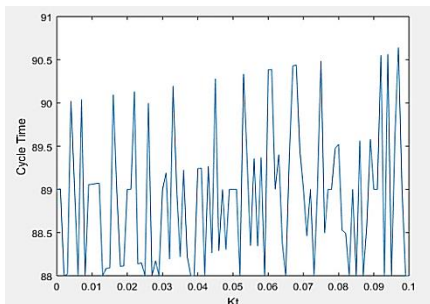
پردازش روی ماشین دوم به عمر ابزارهای ماشین اول است. در شکل ۳، تأثیر تغییرات مقدار  $K_t$  بر زمان سیکل آمده است. براین اساس، مقدار  $K_t$  برای همه ابزارها روی ماشین اول در مثال بررسی شده براساس اطلاعات جدول ۱ برابر در نظر گرفته شده و این مقدار از ۰ تا ۰/۱ با گام ۰/۰۰۱ تغییر یافته است. همچنین در هر بار مقدار بهینه تابع هدف محاسبه شده است. براساس شکل ۳، تغییر مقدار  $K_t$  تأثیری مستقیم بر مقدار زمان سیکل دارد. براساس شکل ۴ نیز دو فرض جدید این مقاله می‌تواند تأثیر مستقیمی بر زمان تولید داشته باشند.

جدول ۲. نتایج حل مسئله کدنویسی شده در نرم افزار گمز

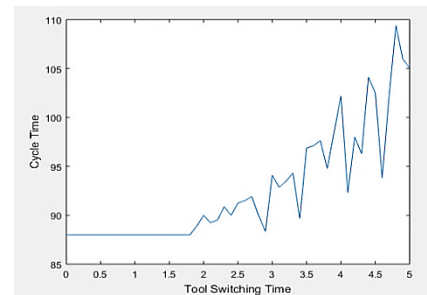
قطعات		$K_t$	قطعات								$C_m$	
			۴		۲		۲		۱			
$A_{4s2}$	$P_{4s2}$	$A_{1s2}$	$P_{1s2}$	$A_{2s2}$	$P_{2s2}$	$A_{3s1}$	$P_{3s1}$	$A_{2s1}$	$P_{2s1}$	$A_{1s1}$	$P_{1s1}$	
۱	۲	۱	۲	۰	۰	۱	۲	۱	۴	۱	۲	۱
۰	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۲
۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۳
۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۴
۱	۲	۱	۲	۰	۰	۱	۳	۰	۰	۱	۱	۵
$C_2=3$						$C_1=3$						

جدول ۳. جواب‌های بهینه اجرای مسئله به کمک نرم افزار گمز

زمان اجرا برحسب ثانیه	زمان بهینه سیکل	سیاست بهینه حرکتی ربات	وجود ابزار در هر مرحله از ورود قطعات				توالی بهینه ورود قطعات		
			$B_{ks1}$	$B_{ks2}$					
			۱	۰	۱	۰	۱	۰	
			۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
۱۵/۷۸	۸۸	$S_2$	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۲ ۴ ۳ ۱
			۰	۰	۱	۱	۱	۰	
			۰	۰	۱	۱	۱	۰	



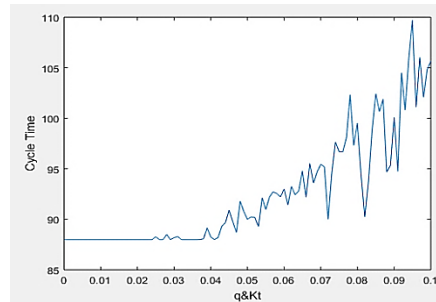
شکل ۳. نمودار تغییرات زمان سیکل نسبت به  $K_t$



شکل ۴. نمودار تغییرات زمان سیکل نسبت به زمان تعویض ابزار



با توجه به جدول ۴، نرم‌افزار گمز در حل مدل ریاضی ارائه‌شده در حالتی که ابعاد مسئله  $1 * 2 * 3 * n$  است، برای تعداد قطعات بیشتر از ۸ در زمان ۷۲۰۰ ثانیه به جواب نمی‌رسد. در نتیجه در ابعاد بزرگ‌تر پیچیدگی مسئله بیشتر خواهد شد و برای حل چنین مسائلی به الگوریتم‌های فراابتکاری نیاز است.



شکل ۴. نمودار تغییرات زمان سیکل نسبت به تغییر هم‌زمان زمان تعویض ابزار و  $K_t$

### الگوریتم ژنتیک به منظور حل مدل برنامه‌ریزی ارائه‌شده

با توجه به اینکه تعویض ابزار، مسئله NP-hard است [۳]، برای رسیدن به جواب بهینه مسئله تعویض ابزار در حالتی که ظرفیت مخزن ابزار روی ماشین‌ها بیشتر از ۲ باشد، باید از روش‌های فراابتکاری استفاده کرد. الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> یکی از کاربردی‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که پروفیسور هالند معرفی کرد [۲۹]. در استفاده از الگوریتم ژنتیک و مقایسه آن با نتایج حل به کمک نرم‌افزار گمز، برای مسائل تعویض ابزار و تولید انعطاف‌پذیر می‌توان به پژوهش فاروقی اشاره کرد. همچنین برای حل مسئله تعیین توالی قطعات و تعیین نحوه تعویض ابزار از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. افزون بر این، قدم‌های الگوریتم ژنتیک در این مقاله برای حل مسئله مورد نظر، براساس مطالعه فاروقی و همکاران است [۲۸]. هدف اصلی در مسئله پژوهش حاضر، تعیین توالی ورود قطعات و وجود ابزارها در هر مرحله است؛ بنابراین می‌توان هر کروموزوم را جایگشت اعداد صحیح ۱ تا  $n$  در نظر گرفت. هر جایگشت از این اعداد یک کروموزوم است و توالی ورود قطعات ۱ تا  $n$  را مشخص می‌کند. با توجه به مثال جدول ۲ یک کروموزوم به‌عنوان نمونه در شکل ۵ آمده است. در این شکل، یک کروموزوم با ۴ قطعه، همچنین هر یک از ظرفیت‌های ماشین‌های ابزار به اندازه ۳ و در مجموع ۵ ابزار روی هر ماشین در نظر گرفته شده است. در این کروموزوم، ردیف اول شامل توالی ورودی قطعات است؛ برای مثال ژن ۱ در ردیف اول به این معنی است که اولین قطعه ورودی به سلول، قطعه ۲ است. به همین ترتیب ژن ۲ مربوط به توالی دومین قطعه ورودی یعنی قطعه ۴ است. در این کروموزوم، ترتیب قطعات عبارت است از: قطعه ۲، قطعه ۴ و قطعات ۱ و ۳. همچنین ردیف‌های ۲ تا ۴ در شکل نمایانگر ابزارهای مربوط به ماشین اول تا سوم هستند؛ برای مثال ژن اول مربوط به

اکنون به منظور بررسی زمان حل مسئله به کمک نرم‌افزار گمز و کارکرد این نرم‌افزار برای حل مسئله ارائه‌شده در این مقاله مسائلی با سایزهای مختلف حل شده‌اند که نتایج آن‌ها در جدول ۴ آمده است. در این پژوهش، سایز مسائل با عبارت  $n * T_m * C_m * A_i$  نشان داده شده است که در آن  $n$  تعداد قطعات مختلف،  $T_m$  تعداد کل ابزارها روی ماشین‌ها،  $C_m$  ظرفیت مخزن ابزار ماشین‌ها و  $A_i$  تعداد ابزارهای مورد نیاز هر قطعه روی ماشین‌هاست. در این پژوهش، حداکثر زمان حل این مسائل ۷۲۰۰ ثانیه بود.

جدول ۴. نتایج حل مسائل با سایزهای گوناگون به کمک گمز

گمز		مسئله
زمان	مقدار تابع هدف	$n * T_m * C_m * A_i$
01/0	123	$2 * 4 * 3 * 2$
05/0	6/148	$3 * 4 * 3 * 2$
25/0	155	$4 * 4 * 3 * 2$
56/1	182	$5 * 4 * 3 * 2$
23/11	320	$6 * 4 * 3 * 2$
73/11	580	$7 * 4 * 3 * 2$
66/836	6/789	$8 * 4 * 3 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$9 * 4 * 3 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$10 * 4 * 3 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$11 * 4 * 3 * 2$
04/1	123	$2 * 10 * 5 * 2$
68/1	6/148	$3 * 10 * 5 * 2$
96/24	155	$4 * 10 * 5 * 2$
00/156	182	$5 * 10 * 5 * 2$
20/1123	320	$6 * 10 * 5 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$7 * 10 * 5 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$8 * 10 * 5 * 2$
بدون جواب	بدون جواب	$9 * 10 * 5 * 2$

نسبت سیگنال به نویز نام دارد. هدف روش تاگوچی، حداکثر کردن این نشانگر است [۳۰]. به منظور استفاده از این روش در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، سه دسته پارامتر برای حل مثال عددی با سایز  $5 * 8 * 13 * 30$  آزمایش شده و مقادیر آنها در جدول ۶ آمده است. براساس پارامترهای جدول ۶، طراحی آزمایش برای روش تاگوچی براساس جدول ۷ در نظر گرفته شده و مقدار تابع هدف در هر حالت برای مثال مدنظر محاسبه شده است.

جدول ۶. سه دسته پارامتر طراحی آزمایش‌های روش تاگوچی

	3	2	1		
A	4000	3000	2000	Max it	
B	90	80	70	Psize	
C	4/0	80/0	5/0	Pc	
D	5/0	2/0	4/0	Pm	

جدول ۷. محاسبه مقدار تابع هدف در آزمایش‌های روش تاگوچی

هدف تابع مقدار	A	B	C	D
1223	1	1	1	1
1320	1	1	1	2
1256	1	3	3	3
1267	2	1	2	3
1223	2	2	3	1
1311	2	3	1	2
1320	3	1	3	2
1256	3	2	1	3
1268	3	3	2	1

با استفاده از مقادیر تابع هدف در جدول ۷، از نرم‌افزار مینیتب برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک به روش تاگوچی استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۸ آمده است. با توجه به اینکه تابع هدف مسئله کمینه‌سازی است بر این اساس طبق جدول ۸، پارامترهایی که میانگین کمتری دارند و تغییرات سیگنال به نویز آنها بالاتر است، برای استفاده از الگوریتم ژنتیک انتخاب شده‌اند.

اندازه مسائل براساس تعداد قطعات مختلف به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شده است. حداکثر زمان برای حل هر یک از این مسائل به ترتیب ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه است. در جدول ۹، اطلاعات مربوط به نحوه دسته‌بندی آمده است.

قطعه ۲ است. هنگام نصب قطعه مزبور به ماشین اول ابزارهایی که با عدد ۱ مشخص شده‌اند، روی مخزن ابزار برای پردازش این قطعه قرار دارند؛ یعنی ابزارهای ۱، ۲ و ۵. سپس هنگام ورود قطعه ۴ در ژن دوم، ابزارهای ۲ و ۴ به جای ابزارهای ۱ و ۵ روی ماشین اول تعویض می‌شوند که در این صورت ۲ تعویض ابزار صورت گرفته است. در الگوریتم ژنتیک، پارامترهای ورودی مسئله که مربوط به زمان هستند، با واحد ثانیه عدد صحیح تصادفی با تابع توزیع یکنواخت فرض شده‌اند. بازه‌های این تابع توزیع برای هر یک از پارامترها در جدول ۵ آمده است.

ردیف	ژن ها	۱	۲	۳	۴
۱	توالی قطعات (جایگشت)	۲	۴	۱	۳
۲	ابزارها روی مخزن ابزار ماشین اول	۱	۰	۱	۱
		۱	۱	۰	۰
		۰	۱	۱	۰
		۱	۰	۱	۱
۳	ابزارها روی مخزن ابزار ماشین دوم	۰	۱	۱	۱
		۱	۰	۱	۰
		۱	۰	۰	۰
		۱	۱	۱	۱
۴	ابزارها روی مخزن ابزار ماشین سوم	۱	۱	۰	۱
		۱	۰	۰	۰
		۰	۱	۱	۱
		۰	۱	۱	۰
		۱	۰	۱	۱

شکل ۵. نمونه کروموزوم در الگوریتم ژنتیک

جدول ۵. بازه پارامترها

$P_{i,m}$	(30 2)
$\varepsilon$	(5 2)
$\delta$	(5 2)
$C_m$	(10 2)
$T_m$	(15 5)
$q$	(7 2)
$K_t$	(001/0 01/0)

به منظور تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک از روش تاگوچی استفاده شد که یکی از کاربردی‌ترین روش‌های آماری برای تحلیل حساسیت خروجی یک فرایند در حوزه طراحی آزمایش‌هاست. در این روش، داده‌های تکراری آزمایش‌ها به نشانگر تغییرات تبدیل می‌شود که تبدیل

آمده است. شرط توقف برای الگوریتم بیشترین تعداد تکرار هر دور از الگوریتم ژنتیک (Max-it) و زمان آن در نظر گرفته شده است.

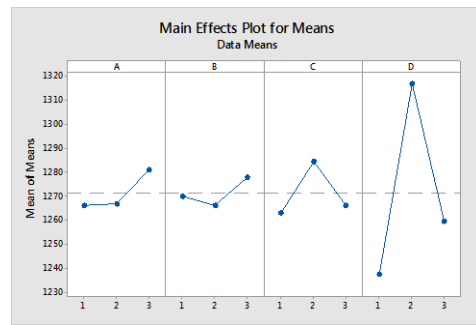
جدول ۱۰. مقادیر تابع هدف برای مسائل با سایز کوچک

مسئله	مثال	ژنتیک الگوریتم		
		کمترین	متوسط	بیشترین
1	1	150	150	150
2	2	249	249	249
3	4* 8 * 5	388	388	388
4	4	235	235	235
5	5	510	510	510
1	1	495	495	495
2	2	644	642	640
3	3	590	590	590
4	10 * 9 * 4*2	188	5/186	185
5	5	315	315	315

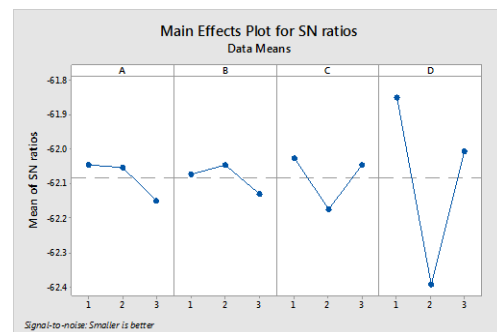
جدول ۱۱. مقادیر تابع هدف برای مسائل با سایز متوسط

مسئله	مثال	ژنتیک الگوریتم		
		کمترین	متوسط	بیشترین
1	1	524	536	542
2	2	714	722	730
3	15* 12 * 6*3	768	5/815	863
4	4	768	768	768
5	5	830	860	890
1	1	950	5/1056	1163
2	2	1020	5/1122	1125
3	3	958	975	992
4	20 * 15 * 8*4	1170	5/1174	1179
5	5	407	408	409
1	1	1450	1450	1450
2	2	1852	5/1918	1985
3	3	1552	1552	1552
4	4	4320	4320	4320
5	5	4582	4582	4582

با توجه به نتایج این بخش می‌توان گفت حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده در پژوهش حاضر با سایز متوسط و بزرگ بدون استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، در زمانی معقول به نتیجه نمی‌رسد. در جدول ۱۰ جواب‌های الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار گمز مقایسه شده است که نشان‌دهنده کارایی ۹۷/۵ درصدی این الگوریتم است.



شکل ۶. میانگین میانگین‌ها برای روش تاگوچی



شکل ۷. تغییرات سیگنال به نویز در روش تاگوچی

جدول ۸. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	2000
Max - it	2000
Psize	80
Pc	5/0
Pm	4/0

جدول ۹. دسته‌بندی مسائل

تعداد قطعات	دسته‌بندی
4-5-7-8-10	کوچک
15-20-30	متوسط
40-60-80	بزرگ

الگوریتم ژنتیک براساس مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش به کمک نرم‌افزار متلب کدنویسی شد. همچنین با استفاده از لپ‌تاپ (با CPU برابر ۲/۵ گیگاهرتز و RAM چهار مگابایت) مسائلی با سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ به منظور مقایسه بهتر کارکرد الگوریتم ژنتیک اجرا شده شدند که نتایج آن‌ها در جدول‌های ۱۰-۱۲ آمده است. در این مثال‌ها، زمان توقف الگوریتم ژنتیک برای مسائل به ترتیب ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه است. هر مثال ۱۰ بار به کمک الگوریتم اجرا شده و کمترین، متوسط و بیشترین مقدار تابع هدف برای هر مسئله در ده بار اجرای هر مثال

جابه‌جایی قطعات میان ایستگاه‌ها به کمک ربات (سیاست حرکتی ربات) برای محاسبه زمان سیکل است. برای حل این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌کردن زمان سیکل ارائه و این مدل در نرم‌افزار گمز حل شد. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک برخی مسائل عددی حل شدند که نتایج آن با کدنویسی مدل در نرم‌افزار گمز مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد حل مدل به کمک نرم‌افزار گمز تنها برای مسائل با سایز کوچک در زمانی معقول به جواب می‌رسد. همچنین حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به جواب بهینه به زمان کمتری نیاز دارد. از آنجا که حل مسائل با سایز متوسط و بزرگ به کمک نرم‌افزار گمز در زمان معقول به جواب بهینه نمی‌رسد، باید از روش‌های فراابتکاری استفاده کرد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش به عمر ابزار دو فرض برای مسائل سلول تولیدی رباتیک در نظر گرفته شده‌اند. همچنین می‌توان به صورت هم‌زمان سیاست حرکتی بهینه ربات، ترتیب بهینه ورود قطعات و نحوه تعویض ابزار بهینه را با هدف کمینه‌کردن زمان سیکل برای تولید مجموعه‌ای از قطعات مختلف مدل‌سازی کرد و در مورد آن‌ها تصمیم گرفت. مطالعات آتی در این موضوع می‌تواند تغییر تابع هدف با تصمیم‌گیری چندمعیاره در این مسائل باشد. همچنین می‌توان این مدل برنامه‌ریزی غیرخطی را برای مسائل چندماشین رباتیک تعمیم داد. افزون بر این می‌توان الگوریتم‌های فراابتکاری و مقایسه آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر را بررسی کرد.

جدول ۱۲. مقادیر تابع هدف برای مسائل با سایز بزرگ

مسئله	مثال	الگوریتم ژنتیک		
		بیشترین	متوسط	کمترین
40*30*15*6	1	5320	5300	5280
	2	3907	5/3862	3818
	3	4350	5/4267	4158
	4	8960	8960	8960
	5	6100	5/6042	5985
60*50*20*8	1	10150	10150	10150
	2	10009	5/9930	9852
	3	9857	9222	8587
	4	9503	5/9491	9480
	5	10859	5/10720	10582
80*60*20*8	1	7200	6891	6582
	2	11459	11459	11459
	3	10520	10189	9858
	4	6526	6189	5852
	5	7585	7585	7585

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، برنامه‌ریزی در سلول‌های تولیدی رباتیک دوماشینه با فرض وجود تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش روی ماشین دوم به عمر ابزارهای ماشین اول بررسی شد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر زمان تعویض ابزار و وابستگی زمان پردازش به عمر ابزارها در زمان تولید مجموعه قطعات مختلف در سلول‌های تولیدی رباتیک دوماشینه است. مسئله اصلی نیز تعیین توالی بهینه ورود قطعات به سلول تولیدی، نحوه تعویض ابزار در هر مرحله با در نظر گرفتن متغیری به عنوان زمان تعویض ابزار و نحوه

### منابع

1. Foumani, M., Smith Miles, K., and Gunawan, I., (2017). "Scheduling of Two-Machine Robotic Rework Cells: In-Process, Post-Process and In-Line Inspection Scenarios", *Robotics and Autonomous Systems*, No. 91, PP. 210-225.
2. Gultekin, H., Tula, A., and Akturk, M. S., (2016). "Automated Robotic Assembly Line Design with Unavailability Periods and Tool Changes", *European Journal of Industrial Engineering*, Vol. 10, No. 4, PP. 499-526.
3. Tang, C. S., and Denardo, E. V., (1988). "Models Arising From a Flexible Manufacturing Machine, Part I: Minimization of the Number of Tool Switches", *Operations Research*, Vol. 36, No. 5, PP. 767-777.
4. Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., and Kubiak, W., (1992). "Sequencing of Parts and Robot Moves in a Robotic Cell", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 3, PP. 331-358.
5. Shirazi, R., and Frizelle, G., (2001). "Minimizing the Number of Tool Switches on a Flexible Machine: An Empirical Study", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 15, PP. 3547-3560.
6. Crama, Y., Oerlemans, A. G., and Spieksma, F. C., (1996). *Minimizing the Number of Tool Switches on a Flexible Machine*: Springer.

7. Privault, C., and Finke, G., (1995). "Modelling a Tool Switching Problem on a Single NC-Machine", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 6, No. 2, PP. 87-94.
8. Hertz, A., Laporte, G., Mittaz, M., and Stecke, K. E., (1998). "Heuristics for Minimizing Tool Switches When Scheduling Part Types on a Flexible Machine", *IIE Transactions*, Vol. 30, No. 8, PP. 689-694.
9. Al-Fawzan, M., and Al-Sultan, K., (2003). "A Tabu Search Based Algorithm for Minimizing the Number of Tool Switches on a Flexible Machine", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 44, No. 1, PP. 35-47.
10. Akturk, M. S., Ghosh, J. B., and Gunes, E. D., (2003). "Scheduling with Tool Changes to Minimize Total Completion Time: A Study of Heuristics and Their Performance", *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol. 50, No. 1, PP. 15-30.
11. Laporte, G., Salazar-Gonzalez, J. J., and Semet, F., (2004). "Exact Algorithms for the Job Sequencing and Tool Switching Problem", *IIE Transactions*, Vol. 36, No. 1, PP. 37-45.
12. Zhou, B. H., Xi, L. F., and Cao, Y. S., (2005). "A Beam-Search-Based Algorithm for the Tool Switching Problem on a Flexible Machine", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 9 and 10, PP. 876-882.
13. Crama, Y., Moonen, L. S., Spieksma, F. C., and Talloen, E., (2007). "The Tool Switching Problem Revisited", *European Journal of Operational Research*, Vol. 182, No. 2, PP. 952-957.
14. Konak, A., Kulturel Konak, S., and Azizoglu, M., (2008). "Minimizing the Number of Tool Switching Instants in Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Production Economics*, Vol. 116, No. 2, PP. 298-307.
15. Yanasse, H. H., Rodrigues, R. D. C. M., and Senne, E. L. F., (2009). "An Enumeration Algorithm Based on Partial Ordering to Solve the Minimization of Tool Switches Problem", *Gestão and Produção*, Vol. 16, No. 3, PP. 370-381.
16. Amaya, J. E., Cotta, C., and Fernández Leiva, A. J., (2012). "Solving the Tool Switching Problem with Memetic Algorithms", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 26, No. 02, PP. 221-235.
17. Catanzaro, D., Gouveia, L., and Labbé, M., (2015). "Improved Integer Linear Programming Formulations for the Job Sequencing and Tool Switching Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 244, No. 3, PP. 766-777.
18. Chaves, A. A., Lorena, L. A. N., Senne, E. L. F., and Resende, M. G., (2016). "Hybrid Method with CS and BRKGA Applied to the Minimization of Tool Switches Problem", *Computers and Operations Research*, No. 67, PP.174-183.
19. Cheng, T. E., Ding, Q., and Lin, B. M., (2004). "A Concise Survey of Scheduling with Time-Dependent Processing Times", *European Journal of Operational Research*, Vol. 152 No. 1, PP. 1-13.
20. Alidaee, B., and Womer, N. K., (1999). "Scheduling with Time Dependent Processing Times: Review and Extensions", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, No. 7, PP. 711-720.
21. Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., and Kubiak, W., (1992). "Sequencing of Parts and Robot Moves in a Robotic Cell", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 3 and 4, PP. 331-358.
22. Zarandi, M. F., Mosadegh, H., and Fattahi, M., (2013). "Two-Machine Robotic Cell Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times", *Computers and Operations Research*, Vol. 40, No. 5, PP. 1420-1434.
23. Al-Ahmari, A., (2016). "Optimal Robotic Cell Scheduling with Controllers Using Mathematically Based Timed Petri Nets", *Information Sciences*, No. 329, PP. 638-648.
24. Gultekin, H., Akturk, M. S., and Karasan, O. E., (2006). "Cyclic Scheduling of a 2-Machine Robotic Cell with Tooling Constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, No. 2, PP. 777-796.
25. Abadi, I. K., and Gholami, S., (2009). *Robot Movements in a Cyclic Multiple Part Type Three-Machine Flexible Robotic Cell Problem*, *Transactions E: Industrial Engineering*, Vol. 16, PP. 36-54.
26. Fathian, M., Kamalabadi, I. N., Heydari, M., and Farughi, H., (2011). "A Petri Net Model for Part Sequencing and Robot Moves Sequence in a 2-Machine Robotic Cell", *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol. 4, No. 11, P. 603.
27. Crama, Y., Kats, V., Van De Klundert, J., and Levner, E., (2000). "Cyclic Scheduling in Robotic Flowshops", *Annals of Operations Research*, Vol. 96, No. 1 and 4, PP. 97-124.
28. Farughi, H., Dolatabadiazadeh, M., Moradi, V., Karbasi, V., and Mostafayi, S. (2017). "Minimizing the Number of Tool Switches in Flexible Manufacturing Cells Subject to Tools Reliability Using Genetic Algorithm", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 1, PP.
29. Holland, J. H., (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, MIT Press.

30. Roy, R., (1990). *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers, Ann Arbor, Mich, USA.

۳۱. اسمعیل نژاد ب. (۲۰۱۶). «مسئله تشکیل سلول احتمالی با رویکرد نظریه صف و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان»، نشریه مهندسی صنایع، دوره پنجاهم، سال دوم، صص ۲۷۹-۲۹۳.

۳۲. کهنی اردکانی، برزین پور ع و توکلی مقدم ر. (۲۰۱۲). «توسعه الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات جهت حل مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و سیستم تولید سلولی پویا»، نشریه مهندسی صنایع، دوره چهل و ششم، شماره ۱، صص ۷۷-۸۹.

#### واژه‌های انگلیسی استفاده شده در متن:

1. Keep tools needed
2. Makespan
3. Linear relaxation
4. Genetic Algorithm