



## A New Approach For Maximizing The Output Rate In Robotic Manufacturing Cells

M. Fathain\*, I. Nakhai Kamal Abadi, M. Heydari & H. Farughi

*Mohammad Fathain*, Associate Professor of Industrial Eng-Iran University of Science and Technology, [fathian@iust.ac.ir](mailto:fathian@iust.ac.ir)

*Isa Nakhaei Kamal Abadi*, Professor of Industrial Eng-Tarbiat Modares University, [nakhai@modares.ac.ir](mailto:nakhai@modares.ac.ir)

*Mehdi Heydari*, Associate Professor of Industrial Eng-Iran University of Science and Technology

*Hiva Farughi*, Phd student of Industrial Eng-Iran University of Science and Technology

### Keywords

Robotic Manufacturing Cell,  
Scheduling,  
Output Rate,  
Cycle Time,  
Robot Move Cycle

### ABSTRACT

*This paper deals with robot move sequencing and scheduling in two and three machine robotic cells. The machines in the cell are CNC and because of having flexibility feature, they can perform all necessary operations to manufacture parts. The manufactured parts is identical. In the most past researches in this field, flowshop layout has been considered. In this paper we ignore this layout, so a new cycle for robot move sequences is considered. Also the machine layout differs with past studies and the robot has rotational move. We determine the cycle time of proposed cycle, then it is proved that proposed cycle time for two and three machine robotic cell is smaller than existing feasible cycle time that leads to maximize output rate in that cells.*

© 2013 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 24, No. 3, All Rights Reserved

\* **Corresponding author.** Mohammad Fathain  
Email: , [fathian@iust.ac.ir](mailto:fathian@iust.ac.ir)

# ارائه رویکردی جدید برای افزایش نرخ خروجی در سلولهای تولیدی رباتیک

محمد فتحیان\*، عیسی نخعی کمال آبادی، مهدی حیدری و هیوا فاروقی

## چکیده:

## کلمات کلیدی

در این مقاله، تحلیل نرخ خروجی و توالی حرکات ربات در سلولهای تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه برای تولید قطعات یکسان مدنظر قرار گرفته است. ماشینهای موجود در این سلولها از نوع کنترل عددی (CNC) می باشند. برای جابجایی مواد و قطعات بین ماشینها و ناحیه ورودی و خروجی در سلول تولیدی از یک ربات تک نگهدارنده استفاده می شود. حرکت ربات نیز به صورت چرخشی در نظر گرفته می شود. در این تحقیق، ضمن معرفی یک طرح استقرار پیشنهادی برای جانمایی ماشینها در سلولهای تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه، سیاست حرکتی جدیدی برای توالی حرکات ربات در این سلولهای تولیدی با در نظر گرفتن ویژگی انعطاف پذیری عملیات برای ماشینهای موجود در سلول تولیدی پیشنهاد شده است. در ادامه، زمان سیکل در سیکلهای حرکتی پیشنهادی برای سلولهای تولیدی دو و سه ماشینه محاسبه شده و ثابت شده است که زمان این سیکلها در مقایسه با زمان سیکل سایر سیاستهای حرکتی شدنی موجود در سلولهای رباتیک دو و سه ماشینه کمتر بوده و افزایش نرخ خروجی در سلولهای تولیدی رباتیک را به دنبال خواهد داشت.

سلول تولیدی رباتیک،  
زمان بندی،  
نرخ خروجی،  
زمان سیکل،  
سیاست حرکتی ربات

## ۱. مقدمه

دنیای صنعتی امروز که به طور مستمر در حال پیشرفت است باعث شده است که تکنولوژی به صورت چشمگیری گسترش یافته و هر روز نوآوریها و خلاقیتهای جدیدی معرفی شوند. یکی از حوزههای جدید در زمینه توسعه تکنولوژی، ظهور سیستمهای تولیدی رباتیک است. از مهمترین خصوصیات سیستمهای تولیدی

سلولی، انعطاف پذیری بیشتر این سیستمهای تولید است. امروزه با گسترش استفاده از ماشینهای CNC و سیستمهای الکترونیکی در سیستمهای ساخت و تولید، ماشینها قابلیت انجام فعالیتهای مختلفی را دارند. یک سلول تولیدی رباتیک انعطاف پذیر دو یا سه ماشینه دارای یک ناحیه ورودی و خروجی، دو یا سه ماشینه برای پردازش فعالیتها و کارها و یک ربات برای جابجایی مواد و قطعات بین ماشینها و ناحیه ورودی و خروجی است. در این سلولهای تولیدی، بازده سلول تحت تأثیر تعامل بین ربات و ماشینها است.

زمان بندی در سلولهای تولیدی رباتیک از جنبه های متفاوتی در سلولهای رباتیک تک، دو و سه ماشینه در حالت های مختلف تولید قطعات یکسان و مختلف بررسی شده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه را می توان از چند جنبه مورد بررسی قرار داد. برخی از این مطالعات روی سیکل های حرکتی ربات در سلول های تولیدی رباتیک متمرکز شده و سیکل های حرکتی موجه در این سلولها را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق نیز توالی

تاریخ وصول: ۹۰/۶/۹

تاریخ تصویب: ۹۰/۱۲/۱

\* نویسنده مسئول مقاله: دکتر محمد فتحیان، دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، fathian@iust.ac.ir  
دکتر عیسی نخعی کمال آبادی، استاد دانشکده مهندسی، بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، nakhai@modares.ac.ir  
دکتر مهدی حیدری، دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، Mheydari@iust.ac.ir  
هیوا فاروقی، دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، h\_farughi@iust.ac.ir

ربات در سلول‌های انعطاف‌پذیری که قطعات یکسان تولید می‌کند را بررسی کرده‌اند. آنها فرض کرده‌اند که تولید به صورت سیکلی بوده و برای تقریب زمان سیکل در سیکل‌های چند واحد در شرایط زمان‌های ثابت، جمع‌پذیر و اقلیدسی، الگوریتم‌های چند جمله‌ای ارائه کرده‌اند.

اخیراً نیز آکتورک و همکاران [۱۱] فرض انعطاف‌پذیری در سلول‌های تولیدی رباتیک را مطرح کرده و تعیین توالی حرکات ربات و نحوه تخصیص عملیات لازم برای تولید قطعات یکسان به ماشین‌های موجود در سلول دو ماشین را بررسی کرده‌اند. آنها براساس تحلیل پارامترهای مدل به این نتیجه رسیده‌اند که در این سلول رباتیک ممکن است بسته به مقدار پارامترهای مدل، سیکل‌های یک یا دو واحد بهینه باشد. همچنین تعدادی از محققین، سیکل‌های حرکتی با لحاظ نمودن محدودیت مخزن ابزار در ماشین‌های CNC موجود در سلول‌های تولیدی رباتیک را مورد بررسی قرار داده‌اند.

از مهمترین تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات گلنکین و همکارانش [۱۲ و ۱۳] اشاره کرد که در یکی از این مقالات نحوه تخصیص عملیات به ماشین‌ها و تحلیل پارامتری زمان سیکل در سلول‌های دو ماشین با توجه به محدودیت مخزن ابزار ماشین‌ها مورد توجه بوده [۱۲] و در تحقیق دیگر [۱۳]، نحوه تخصیص فعالیت‌ها به ماشین‌های سه گانه در سلول رباتیک برای کمینه کردن زمان سیکل و با لحاظ نمودن فرض انعطاف‌پذیری ماشین‌ها مدنظر بوده است. از سایر تحقیقات انجام شده در زمینه موضوع این تحقیق می‌توان به مطالعات نخعی کمال آبادی و غلامی [۱۴]، گلنکین و همکاران [۱۵]، داوند و همکاران [۱۶] اشاره کرد که جابجایی‌های ربات، توالی حرکات ربات و تحلیل نرخ خروجی در تولید سیکلی سلول‌های تولیدی رباتیک در حالات تک هدفه و دو هدفه بررسی شده است.

در این مقاله علاوه بر فرضیات معمول در زمانبندی سلول‌های تولیدی رباتیک، فرضیات جدیدی در نظر گرفته شده و با پیشنهاد طرح استقرار جدیدی برای جانمایی ماشین‌ها در سلول رباتیک، سیکل حرکتی جدیدی برای توالی حرکات ربات در سلول‌های رباتیک دو و سه ماشین ارائه می‌شود در این سلول‌های تولیدی از یک ربات تک نگهدارنده برای جابجایی مواد و قطعات بین ماشین‌ها و ناحیه ورودی و خروجی استفاده می‌شود. هدف اصلی از معرفی این سیکل حرکتی، افزایش نرخ خروجی و به عبارتی کاهش زمان سیکل در سلول تولیدی رباتیک می‌باشد. در اینجا سلول تولیدی به عنوان بخشی از یک سیستم تولیدی در نظر گرفته شده است که به طور پیوسته قطعات را جهت پردازش و تکمیل به این سلول وارد می‌کند، لذا این سلول تولیدی در تولید انبوه و یا حتی می‌تواند در تولید دسته‌ای مورد استفاده واقع شود.

حرکات ربات و جانمایی استقرار ماشین‌ها در سلول تولیدی رباتیک دو و سه ماشین مورد توجه قرار می‌گیرد. از پایه‌ای‌ترین تحقیقات در مورد مسأله برنامه‌ریزی در سلول‌های انعطاف‌پذیر رباتیک می‌توان به مقاله ستی و همکاران [۱] اشاره کرد. آنها در این تحقیق سیکل‌های حرکتی شدنی در سلول‌های رباتیک دو و سه ماشین را تحلیل و بررسی کرده‌اند. همچنین کراما و ون [۲] مدل‌های بهینه سازی ترکیبی در سیستم‌های ساخت و تولید رباتیک را ارائه کرده‌اند. هال و همکاران نیز [۳ و ۴] مسائل مربوط به سلول‌های انعطاف‌پذیر دو و سه ماشین را طبقه‌بندی کرده و پیچیدگی محاسباتی این مسائل را تحلیل کرده‌اند.

مرور کاملی از مسائل، الگوریتم‌های حل و پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های حل این مسائل در مقالات کراما و همکاران [۵] و داوند و همکاران [۶] دیده می‌شود. آنها مسائل مربوط به سلول‌های تولیدی رباتیک را از سه جنبه محیط ماشین، محیط فرآیند و نوع تابع هدف مسأله دسته‌بندی کرده‌اند. مسائل مربوط به محیط ماشین از نظر تعداد و نوع ماشین‌ها، نوع و تعداد ربات در سلول تولیدی قابل بررسی است. بر این اساس مطالعات انجام شده در این زمینه‌ها قابل تفکیک است. در این تحقیق سلول رباتیک دو و سه ماشین با ماشین‌های یکسان و یک ربات تک نگهدارنده بررسی می‌شود.

همچنین در مسائل مربوط به محیط فرآیند، معیارهای برداشتن/ گذاشتن قطعه در سه حالت بلوکه، بدون وقفه و با وقفه بررسی می‌شود. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات هال و سریسکانداراجا [۷] و اگنتیس [۸] اشاره کرد. همچنین در مسائل محیط فرآیند، معیار زمان جابجایی به سه صورت ثابت- جمع‌پذیر و اقلیدسی در نظر گرفته می‌شود؛ که در تحقیقات انجام شده در زمینه سلول‌های تولیدی رباتیک در هر مقاله، فرضیات مربوط به زمان جابجایی در نظر گرفته می‌شود. در اکثر این تحقیقات و از جمله در این مقاله زمان‌های جابجایی به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود.

بعلاوه مسأله دیگری که در محیط فرآیند قابل بررسی است تعداد و نوع قطعات تولیدی در سلول است که به صورت یکسان یا متنوع در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله تولید قطعات یکسان مدنظر قرار خواهد گرفت. در مسائل مربوط به معیار بهینگی، تابع هدف مدنظر در هر تحقیق مورد توجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق کمینه کردن زمان سیکل و به عبارت دیگر افزایش نرخ خروجی در سلول تولیدی رباتیک به عنوان هدف اصلی مسأله مدنظر قرار گرفته است.

در مورد هر کدام از مسائل یاد شده، تحقیقات مختلفی با لحاظ نمودن فرضیات مربوطه در سال‌های اخیر انجام شده است. جیسمر و همکاران در دو مطالعه جداگانه [۹ و ۱۰] توالی حرکات

مکان  $i$  برداشته و در زمان  $\delta$   $(j-i)$  آنرا به سمت مکان  $j$  می برد. سپس در زمان  $\mathcal{E}$  قطعه را در مکان  $j$  تخلیه می نماید.

### تعریف ۲:

یک سیکل  $\Pi$  واحده به این صورت تعریف می شود که در هر سیکل ربات باید دقیقاً  $\Pi$  قطعه را وارد سلول رباتیک کرده و پردازش مورد نیاز آنها روی  $\Pi$  قطعه انجام شده و ربات کلیه فعالیت های لازم را دقیقاً  $\Pi$  بار تکرار کند و سپس در پایان سیکل  $\Pi$  قطعه را از سلول رباتیک خارج کند. حالت ابتدا و انتهای سیکل  $\Pi$  واحده باید یکسان باشد.

### تعریف ۳:

زمان سیکل  $\Pi$  واحده  $(C_r)$ : زمان لازم برای تولید  $\Pi$  قطعه در یک فرآیند سیکلی به طوریکه ربات از یک وضعیت اولیه شروع به کار کرده و در یک توالی مشخص عملیات لازم برای تولید  $\Pi$  قطعه انجام شده و سپس ربات به وضعیت اولیه بر می گردد.

پارامترهای مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر در نظر گرفته می شوند.

a: مجموع زمان های پردازش عملیات توسط ماشین اول روی هر قطعه

b: مجموع زمان های پردازش عملیات توسط ماشین دوم روی هر قطعه

c: مجموع زمان های پردازش عملیات توسط ماشین سوم روی هر قطعه

P: زمان پردازش کامل قطعه روی هر یک از ماشینها در حالتیکه تمام عملیات پردازشی قطعه روی یکی از ماشینها انجام شود. (در مساله دو ماشین  $P=a+b$  و در مساله سه ماشین  $P=a+b+c$ )

$\mathcal{E}$ : زمان بارگذاری/تخلیه توسط ربات

$\delta$ : زمان حرکت ربات بین دو مکان متوالی

$w_i$ : زمان انتظار ربات روبروی ماشین  $i$

$T_{SK}$ : زمان سیکل طبق سیاست حرکتی  $S_K$

## ۲-۱. بررسی سیکل های حرکتی موجود در سلولهای

### تولیدی رباتیک

در این سیکل ها فرض شده است که ربات روی یک ریل حرکت خطی دارد و ماشینها و ناحیه ورودی و خروجی روبروی ربات قرار دارند که نمونه ای از سلول رباتیک ۲ ماشین طبق مقاله کراما و ون [۲] به صورت شکل (۱) می باشد.

در ادامه مقاله در بخش دوم ابتدا سیاستهای حرکتی شدنی سنتی در سلولهای تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه مرور شده و سپس با در نظر گرفتن جانمایی پیشنهاد شده برای استقرار ماشینها و لحاظ نمودن حرکت چرخشی ربات، سیکل حرکتی جدید معرفی شده و زمان آن نیز محاسبه گردیده است.

در بخش سوم، زمان سیکل درسیاستهای حرکتی پیشنهادی منطبق با جانمایی جدید ماشینها در سلول، با زمان سیکل سیاستهای حرکتی شدنی سنتی در سلول تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه مقایسه شده و در بخش چهارم به تحلیل نتایج و پیشنهادات پرداخته شده است.

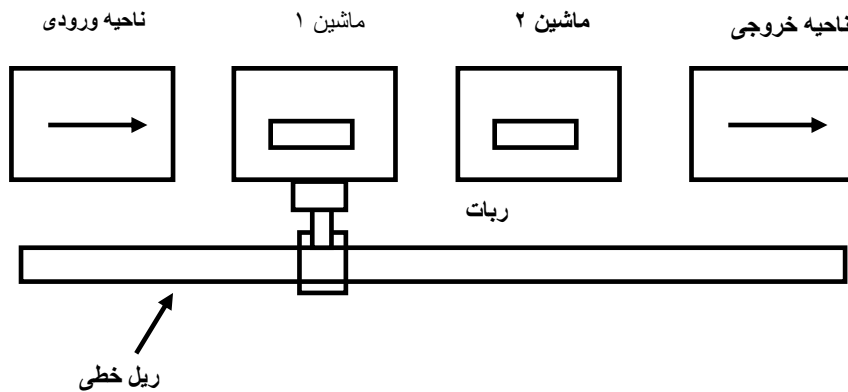
## ۲. تعریف مسأله

در این بخش سیکل های حرکتی شدنی موجود در یک سلول رباتیک انعطاف پذیر را بررسی نموده و در ادامه سیاست حرکتی جدیدی منطبق بر استقرار ماشینها در جانمایی پیشنهادی در سلولهای رباتیک دو و سه ماشینه را معرفی می کنیم. آکتورک و همکاران [۱۱] سیکل های موجود در سلول رباتیک دو ماشینه را بصورت سیکل های حرکتی  $S_1, S_2, S_{21}, S_{12}$  معرفی کرده اند. آنها همچنین با استناد به مقاله ستی و همکاران [۱] سیکل های حرکتی ساده شدنی در سلول رباتیک سه ماشینه را به صورت  $S_1$  و  $S_2$  و  $S_3$  و  $S_4$  و  $S_5$  و  $S_6$  معرفی کرده اند.

آنها استقرار ماشینها در سلول را به صورت خطی در نظر گرفته و فرض کرده اند که هر ماشین بخشی از عملیات مربوط به آن قطعه را پردازش می کند و مشابه اکثر تحقیقات انجام شده قبلی در این حوزه، آکتورک و همکاران [۱۱] نیز فرض کرده اند که جابه جایی مواد بین ماشینها توسط یک ربات تک نگهدارنده صورت می گیرد، به گونه ای که قطعه را از ناحیه ورودی گرفته و سپس جهت پردازش آنرا ابتدا به ماشین اول و سپس به ماشین دوم و در سلول سه ماشینه در انتها به ماشین سوم جابه جا می کند و در نهایت پس از اتمام عملیات به ناحیه خروجی می برد. در این مقاله، ما با در نظر گرفتن فرضیات دیگری، سیاست جدیدی برای حرکت ربات در سلول رباتیک دو و سه ماشینه را معرفی می کنیم که ناشی از جانمایی و استقرار ماشینها با رویکرد پیشنهادی است. این سیاست حرکتی جدید در بخش (۲-۲) معرفی و به طور کامل توضیح داده می شود.

### تعریف ۱:

فعالیت « $A_{ij}$ » به این صورت تعریف می شود که ربات قطعه را از مکان  $i$  به مکان  $j$  ببرد. به این منظور در زمان  $\mathcal{E}$  قطعه را از



شکل ۱. طرح استقرار در سلول رباتیک دو ماشینه

پس از انجام حرکات یاد شده به ناحیه ورودی باز می‌گردد. زمان این سیکل به صورت زیر محاسبه شده است. این سیکل نیز یک سیکل یک-واحد می‌باشد.

$$Ts_2 = 6\varepsilon + 8\delta + \text{Max}\{0, w_1, w_2\} \quad (2)$$

$$w_1 = a - (2\varepsilon + 4\delta) \quad (3)$$

$$w_2 = b - (2\varepsilon + 4\delta) \quad (4)$$

سیکل حرکتی  $S_{12}, S_{21}$  :

در این سیکل توالی حرکت‌های ربات به صورت  $A_{01} A_{12} A_{01} A_{23} A_{12} A_{23}$  می‌باشد. در ابتدای این سیکل، هر دو ماشین خالی بوده و ربات روبروی ناحیه ورودی می‌باشد و پس از انجام حرکات یاد شده فوق به ناحیه ورودی باز می‌گردد و این سیکل، یک سیکل دو واحد می‌باشد. و زمان این سیکل برای تولید یک قطعه به صورت زیر محاسبه شده است.

$$T_{S_{12}, S_{21}} = 6\varepsilon + 7\delta + \frac{(a+b)}{2} + \frac{1}{2} \text{Max}\{0, w_1, w_2\} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $w_1 = a - (2\varepsilon + 4\delta)$  و  $w_2 = b - (2\varepsilon + 4\delta)$  می‌باشد.

۲-۱-۲. سیکل‌های حرکتی موجود در سلولهای تولیدی رباتیک سه ماشینه

همانطور که قبلاً اشاره شد، سیکلهای حرکتی موجود در سلول رباتیک سه ماشینه نیز با استناد به مقاله ستی و همکاران [۱] به صورت  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  و  $S_6$  می‌باشد. توالی حرکات ربات و همچنین زمان سیکل در هر یک از این سیاستهای حرکتی،

۲-۱-۲. سیکل‌های حرکتی موجود در سلولهای تولیدی رباتیک دو ماشینه

آکتورک و همکاران [۱۱] با استناد به مقاله ستی و همکاران [۱]، سیکل‌های حرکتی موجود در سلول رباتیک دو ماشینه ( $S_{12}, S_{21}, S_2, S_1$ ) را به صورت زیر معرفی نموده و زمان هر یک از این سیکلها نیز مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته است. در این سلول تولیدی فرض شده است که زمان پردازش عملیات روی هر یک از ماشینها باهم برابر می‌باشد، به عبارت دیگر ماشینها یکسان فرض شده و زمان بارگذاری/تخلیه توسط ربات ( $\varepsilon$ ) و با هم برابر و زمان حرکت ربات بین دو مکان متوالی ( $\delta$ ) نیز برابر می‌باشد.

سیکل حرکتی  $S_1$  :

در این سیکل متناسب با تعاریف ارائه شده در بخش قبل، توالی حرکات‌های ربات به صورت  $A_{01} A_{12} A_{23}$  می‌باشد که در سلول رباتیک دو ماشینه مکان صفر مربوط به ناحیه ورودی و مکان یک مربوط به ماشین اول و مکان دو مربوط به ماشین دوم و مکان سه مربوط به ناحیه خروجی می‌باشد. طبق حرکات تعریف شده، سیکل  $S_1$  یک سیکل تک واحد می‌باشد و زمان سیکل مربوط به آن به صورت زیر محاسبه شده است. در ابتدای این سیکل هیچ قطعه‌ای روی ماشینها قرار ندارد و ربات روبروی ناحیه ورودی می‌باشد.

$$Ts_1 = 6\varepsilon + 6\delta + a + b \quad (1)$$

سیکل حرکتی  $S_2$  :

در این سیکل توالی حرکات‌های ربات به صورت  $A_{01} A_{23} A_{12}$  می‌باشد. در ابتدای این سیکل، یک قطعه روی ماشین دوم قرار دارد و ربات در ابتدای سیکل روبروی ناحیه ورودی می‌باشد و

مطابق تعریف (۱) و مشابه آنچه در سیکل‌های حرکتی سلول دو ماشینه اشاره شد، مطابق جدول (۱) محاسبه می‌شود.

جدول ۱. توالی حرکات ربات و زمان سیکل در سیاستهای حرکتی سلول سه ماشینه

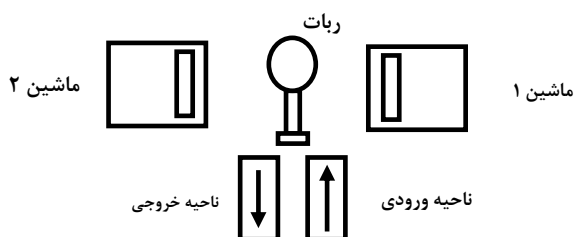
سیکل حرکتی	توالی حرکات ربات	زمان سیکل
$S_1$	$A_{01} A_{12} A_{23} A_{34}$	$TS_1 = 8\varepsilon + 8\delta + a + b + c$
$S_2$	$A_{01} A_{23} A_{12} A_{34}$	$TS_2 = 8\varepsilon + 12\delta + w_1 + w_2 + w_3$
$S_3$	$A_{01} A_{12} A_{34} A_{23}$	$TS_3 = 8\varepsilon + 10\delta + a + w_2 + w_3$
$S_4$	$A_{01} A_{34} A_{12} A_{23}$	$TS_4 = 8\varepsilon + 12\delta + w_1 + b + w_3$
$S_5$	$A_{01} A_{23} A_{34} A_{12}$	$TS_5 = 8\varepsilon + 10\delta + w_1 + w_2 + c$
$S_6$	$A_{01} A_{34} A_{23} A_{12}$	$TS_6 = 8\varepsilon + 11\varepsilon + w_1 + w_2 + w_3$

$$w_1 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\}$$

$$w_2 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon + w_1)\}$$

$$w_3 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon + w_1 + w_2)\}$$

حرکت خطی دارد که در شکل (۱) نمونه ای از طرح استقرار سلول رباتیک دو ماشینه مورد اشاره قرار گرفت. در سیاست حرکتی پیشنهادی برخلاف اکثر تحقیقات گذشته، فرض خطی بودن حرکت ربات برداشته شده و فرض می‌شود که ربات در وسط ماشینها قرار دارد و ناحیه خروجی و ورودی در یک سمت ربات نزدیک به هم قرار گرفته‌اند و ربات حرکت دورانی دارد. در شکل (۲) نمونه ای از طرح استقرار پیشنهادی برای سلول رباتیک دو ماشینه آورده شده است.



شکل ۲. سیکل پیشنهادی حرکات ربات در سلول دو ماشینه

در جانمایی پیشنهادی برای استقرار ماشینها در سلول رباتیک فرض بر این است که ناحیه خروجی و ورودی در کنار یکدیگر بوده و فاصله بین آنها نسبت به فاصله بین ماشینها و فاصله ماشینها تا ناحیه ورودی و خروجی بسیار ناچیز بوده و زمان حرکت ربات بین ناحیه ورودی و خروجی نیز ناچیز می‌باشد. به طوری که با صرف نظر از این زمان می‌توان ناحیه ورودی و

## ۲-۲. سیاست پیشنهادی توالی حرکات ربات در جانمایی جدید ماشینها در سلول رباتیک

در بخش قبلی، کلیه حرکات ربات تحت سیاستهای حرکتی شدنی موجود در سلولهای رباتیک دو وسه ماشینه بررسی شد و زمان سیکل‌های مربوطه محاسبه گردید. در این بخش، سیاست حرکتی جدیدی برای توالی حرکات ربات در سلول رباتیک دو وسه ماشینه معرفی می‌شود. در این سیکل پیشنهادی فرض شده است که زمان‌های حرکت ربات بین هر دو مکان متوالی ( $\delta$ ) و زمان بارگذاری و تخلیه توسط ربات ( $\varepsilon$ ) نیز با هم برابر می‌باشند. همچنین فرض شده است که هر ماشین به دلیل دارا بودن ویژگی انعطاف پذیری عملیات توانایی انجام کلیه عملیات مورد نیاز برای تولید قطعات را دارا می‌باشد و ماشینها نیز یکسان در نظر گرفته می‌شوند. یعنی زمان پردازش عملیات ز روی هر یک از ماشینها یکسان می‌باشد و کلیه ابزارهای لازم برای انجام عملیات مورد نیاز برای تولید قطعات بر روی ماشین موجود است. به عبارت دیگر هنگام پردازش قطعه روی ماشینها نیاز به تعویض ابزار نداریم.

جابه‌جایی قطعات بین ماشینها به وسیله یک ربات تک نگهدارنده صورت می‌گیرد و قطعات تولیدی در سلول نیز مشابه فرض شده‌اند. بعلاوه ربات در ناحیه ورودی و خروجی زمان انتظار ندارد. در سیکل‌های حرکتی شدنی موجود در اکثر مطالعات گذشته فرض شده است که هر قطعه مطابق استقرار تولید جریانی باید به ترتیب ابتدا روی ماشین اول و سپس روی ماشینهای دوم و سوم پردازش گردد و نیز فرض شده است که ربات روی یک ریل

$$T_{sp2-unit} = 8\delta + 8\varepsilon + w_1 + w_2 \quad (۶)$$

در این سیکل زمان انتظار مقابل یک ماشین زمانی است که ربات آن ماشین را بارگذاری کرده و پس از انجام یک سری عملیات به سمت ماشین باز می‌گردد تا قطعه را از ماشین یاد شده تخلیه کند. اگر زمان پردازش قطعه روی آن ماشین به اتمام نرسیده باشد، ربات باید تا اتمام پردازش قطعه توسط ماشین رو به روی ماشین منتظر بماند. در نتیجه زمان  $w_1$  طبق حرکات بیان شده به صورت زیر است:

$$w_1 = \text{Max}\{0, P - (\delta + \varepsilon + \delta + \varepsilon + 2\delta)\} = \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon)\} \quad (۷)$$

زمان  $w_2$  نیز برابر است با:

$$w_2 = \text{Max}\{0, P - (2\delta + w_1 + \varepsilon + \delta + \varepsilon + \delta)\} = \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon + w_1)\} \quad (۸)$$

زمان  $w_2 + w_1$  به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$w_1 + w_2 = \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon)\} + \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon + w_1)\} \quad (۹)$$

از آنجایی که مقدار زمان انتظار مقابل هر ماشین بزرگتر از صفر می‌باشد لذا همواره  $w_1 \geq 0$  می‌باشد. در نتیجه اگر  $w_1 = 0$  باشد و به عبارت دیگر  $P \leq 4\delta + 2\varepsilon$  باشد، زمان  $w_2$  برابر می‌شود با  $\text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon + 0)\}$  و از آنجایی که  $P \leq 4\delta + 2\varepsilon$  فرض شده است،  $w_2$  نیز برابر صفر خواهد شد. حال اگر  $P > 4\delta + 2\varepsilon$  باشد، در نتیجه  $w_1 = P - (4\delta + 2\varepsilon)$  و زمان  $w_2$  برابر می‌شود با:

$$w_2 = \text{Max}\{0, P - [4\delta + 2\varepsilon + (P - (4\delta + 2\varepsilon))]\} = \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon) - P + (4\delta + 2\varepsilon)\} = 0 \quad (۱۰)$$

طبق آنچه که گفته شد زمان  $w_2 + w_1$  برابر می‌شود با:

$$w_1 + w_2 = \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon)\} \quad (۱۱)$$

در نتیجه زمان سیکل پیشنهادی برای دو قطعه برابر می‌شود با:

$$T_{sp2-unit} = 8\delta + 8\varepsilon + \text{Max}\{0, P - (4\delta + 2\varepsilon)\} \quad (۱۲)$$

لذا زمان سیکل پیشنهادی برای تولید یک قطعه، نصف این زمان می‌باشد، پس زمان تولید هر قطعه در سیکل پیشنهادی برابر می‌شود با:

خروجی را به عنوان یک مکان در نظر گرفت. همچنین فرض بر این است که هر قطعه به یک ماشین تخصیص داده شده و کلیه عملیات لازم برای تولید آن قطعه فقط روی یک ماشین انجام می‌شود.

در این سیکل توالی جدیدی برای حرکات ربات در سلول رباتیک لحاظ می‌شود. این توالی در سلول رباتیک دو ماشین مطابق تعریف (۱) به صورت  $A_{01} A_{02} A_{13} A_{23}$  نشان داده می‌شود که توضیح آن به این صورت است که در ابتدای سیکل ماشین‌ها خالی می‌باشند و ربات روبروی ناحیه ورودی قرار دارد. ربات یک قطعه را از ناحیه ورودی بر می‌دارد ( $\varepsilon$ ) و با حرکت چرخشی قطعه را به طرف ماشین یک می‌برد ( $\delta$ ) و سپس آن را روی ماشین یک بارگذاری می‌کند ( $\varepsilon$ ) سپس ربات به سمت ناحیه ورودی می‌چرخد ( $\delta$ ) و یک قطعه را از ناحیه ورودی برداشته ( $\varepsilon$ ) و سپس به سمت ماشین دو حرکت می‌کند ( $\delta$ ) و قطعه را روی ماشین دوم قرار می‌دهد ( $\varepsilon$ ) سپس به سمت ماشین یک بر می‌گردد ( $2\delta$ ) و روبروی ماشین یک در صورت به اتمام نرسیدن زمان پردازش آن منتظر می‌ماند ( $w_1$ ) پس از اتمام کار ماشین یک، ربات قطعه را از روی ماشین یک برداشته ( $\varepsilon$ ) و آن را به طرف ناحیه خروجی می‌برد ( $\delta$ ) و در ناحیه خروجی قطعه را تخلیه می‌کند ( $\varepsilon$ ) در ادامه به سمت ماشین دوم بر می‌گردد ( $\delta$ ) و روبروی ماشین دوم در صورت به اتمام نرسیدن زمان پردازش آن منتظر می‌ماند ( $w_2$ ) پس از اتمام کار ماشین دو، ربات قطعه را از روی ماشین دوم برداشته ( $\varepsilon$ ) و به سمت ناحیه خروجی هدایت می‌کند ( $\delta$ ) و قطعه را در ناحیه خروجی تخلیه می‌کند ( $\varepsilon$ ) و سپس به سمت ناحیه ورودی حرکت می‌کند که در اینجا از این زمان صرف نظر کرده‌ایم. با انجام این حرکات سیکل به اتمام رسیده و دو قطعه در هر سیکل تولید می‌گردد.

لذا این سیکل، یک سیکل دو واحد می‌باشد. در سلول رباتیک سه ماشین نیز حرکات ربات مشابه حرکات آن در سلول دو ماشین است، با این تفاوت که پس از تخلیه قطعه تولید شده توسط ماشین دوم در ناحیه خروجی، این بار به سمت ماشین سوم که قبلاً توسط ربات بارگذاری شده است بر می‌گردد و قطعه تولیدی در ماشین سوم را نیز مشابه قطعات تولیدی در دو ماشین قبلی به ناحیه خروجی هدایت می‌کند و سپس به ناحیه ورودی باز می‌گردد.

در سلول سه ماشین با این توالی حرکات، سه قطعه در هر سیکل تولید می‌شود، پس سیکل سه واحد می‌باشد. این سیاستهای حرکتی برای سیکل پیشنهادی را با Sp نمایش می‌دهیم. زمان لازم برای تولید دو قطعه در سلول رباتیک دو ماشین، مطابق آنچه که گفته شد به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

دو مکان متوالی در سیکل پیشنهادی و سیکل حرکت خطی ربات و همچنین زمان بارگذاری و تخلیه توسط ربات در هر دو سیکل با هم برابر می‌باشند. طبق این فرض و نیز مشابه بودن ماشین‌ها در هر دو سیکل، می‌توان زمان این سیکل‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود.

لم ۱. زمان سیکل پیشنهادی در کلیه حالات از زمان سیکل  $S_1$  کمتر می‌باشد یعنی  $T_{sp} < T_{s1}$ .

اثبات:

ابتدا جزء اول در زمان دو سیکل یعنی  $6\delta + 6\varepsilon$  در سیکل  $S_1$  و  $4\delta + 4\varepsilon$  در سیکل  $S_p$  بررسی می‌شوند که واضح است  $4\delta + 4\varepsilon < 6\delta + 6\varepsilon$  می‌باشد، در نتیجه اگر ثابت کنیم  $\frac{1}{2} \text{Max}\{0, (a+b) - (4\delta + 2\varepsilon)\}$  از  $a + b$  کوچکتر است، لذا می‌توان گفت که زمان سیکل  $S_p$  کمتر از سیکل  $S_1$  می‌باشد.

فرض ۱. اگر  $a + b \leq 4\delta + 2\varepsilon$  باشد، بنابراین:  
 $\frac{1}{2} \text{Max}\{0, (a+b) - (4\delta + 2\varepsilon)\} = 0$   
 در نتیجه طبق رابطه (۱) و (۱۳) داریم:

$$T_{sp} = 4\delta + 4\varepsilon \quad (۲۲)$$

$$T_{s1} = 6\delta + 6\varepsilon + a + b \quad (۲۳)$$

طبق دو رابطه بالا، واضح است که  $T_{sp} < T_{s1}$  می‌باشد.  
 فرض ۲. در غیر این صورت اگر  $a + b > 4\delta + 2\varepsilon$  باشد.

$$\frac{1}{2} \text{Max}\{0, (a+b) - (4\delta + 2\varepsilon)\} = \frac{1}{2} [(a+b) - (4\delta + 2\varepsilon)] \quad (۲۴)$$

در نتیجه:

$$T_{sp} = 4\delta + 4\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \varepsilon = 2\delta + 3\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (۲۵)$$

$$T_{s1} = 6\delta + 6\varepsilon + a + b \quad (۲۶)$$

بنابراین طبق دو رابطه بالا، واضح است که  $T_{sp} < T_{s1}$  می‌باشد. لذا ثابت می‌شود که زمان سیکل  $S_p$  همیشه کمتر از زمان سیکل  $S_1$  می‌باشد.

لم ۲. زمان سیکل پیشنهادی در کلیه حالات از زمان سیکل  $S_2$  کمتر می‌باشد یعنی  $T_{sp} < T_{s2}$ .

اثبات:

فرض ۳. اگر  $a + b \leq 4\delta + 2\varepsilon, a \leq 4\delta + 2\varepsilon, b \leq 4\delta + 2\varepsilon$

در نتیجه:

$$\text{Max}\{0, a - (4\delta + 2\varepsilon), b - (4\delta + 2\varepsilon)\} = 0 \quad (۲۷)$$

$$T_{sp} = \frac{8\delta + 8\varepsilon}{2} + \frac{1}{2} \text{Max}\{0, p - (4\delta + 2\varepsilon)\} = 4\delta + 4\varepsilon + \frac{1}{2} \text{Max}\{0, p - (4\delta + 2\varepsilon)\} \quad (۱۳)$$

که در روابط (۷) تا (۱۳)  $p$  زمان پردازش کامل قطعه روی هر یک از ماشینها در سلول رباتیک دو ماشین است. ( $p = a + b$ )

همچنین توالی حرکات ربات در سلول رباتیک سه ماشین مطابق تعریف (۱) به صورت رابطه (۱۴) می‌باشد و مشابه توضیحات گفته شده در مورد سلول دو ماشین، زمان سیکل سه واحده به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد. لذا زمان سیکل پیشنهادی برای تولید یک قطعه در سلول رباتیک سه ماشین به صورت رابطه (۲۱) می‌باشد.

$$A_{01} \ A_{02} \ A_{03} \ A_{14} \ A_{24} \ A_{34} \quad (۱۴)$$

$$T_{sp3-unit} = 124 + 16\delta + w_1 + w_2 + w_3 \quad (۱۵)$$

$$w_1 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\} \quad (۱۶)$$

$$w_2 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon + w_1)\} \quad (۱۷)$$

$$w_3 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon + w_1 + w_2)\} \quad (۱۸)$$

$$w_1 + w_2 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\} + \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon + w_1)\} = \quad (۱۹)$$

$$\text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\}$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\} \quad (۲۰)$$

$$T_{sp} = \frac{T}{3} = 4\varepsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{1}{3} \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\} \quad (۲۱)$$

که در روابط (۱۶) تا (۲۱)،  $P$  زمان پردازش کامل قطعه روی هر یک از ماشینها در سلول رباتیک سه ماشین است. ( $P = a + b + c$ )

### ۳. مقایسه زمان سیکل پیشنهادی با سیکل‌های

#### موجود

در این بخش زمان سیکل‌های پیشنهادی که در بخش (۲-۲) معرفی و محاسبه شد را با سیکل‌های حرکتی موجود در سلول رباتیک دو و سه ماشین که زمان سیکل آنها نیز در بخش (۲-۱) اشاره شده است مقایسه می‌کنیم.

#### ۳-۱. مقایسه زمان سیکل در سیاست حرکتی پیشنهادی با

##### زمان سیکل‌های حرکتی موجود در سلول دو ماشین

طبق آنچه در بخش‌های (۲-۱) و (۲-۲) اشاره شد زمان سیکل برای تولید یک قطعه در سیکل‌های یاد شده به صورت روابط (۱)، (۲)، (۵) و (۱۳) می‌باشد. فرض می‌شود که زمان حرکت ربات بین



در نتیجه  $a+b$  نمی‌تواند برابر  $12\delta+6\epsilon$  شود، چون مطابق رابطه بالا،  $a+b$  همیشه باید کمتر از  $8\delta+4\epsilon$  باشد. همچنین طبق آنچه که اشاره شده می‌توان نتیجه گرفت که  $a+b$  هیچ وقت نمی‌تواند از  $12\delta+6\epsilon$  بزرگتر باشد، در نتیجه طبق فرض (۴) زمان سیکل پیشنهادی همیشه از زمان سیکل  $S_2$  کمتر می‌باشد ( $T_{sp} < Ts_2$ ).

#### فرض ۵.

حال اگر فرض کنیم  $a+b > 4\delta+2\epsilon, a > 4\delta+2\epsilon, b > 4\delta+2\epsilon$  باشد، چنانچه  $a=b$  باشد، در نتیجه طبق رابطه (۲) و (۶) داریم:

$$\text{Max}\{0, a-(4\delta+2\epsilon), b-(4\delta+2\epsilon)\} = a-(4\delta+2\epsilon) \text{ or } b-(4\delta+2\epsilon) \quad (۳۹)$$

$$\frac{1}{2}\text{Max}\{0, (a+b)-(4\delta+2\epsilon)\} = \frac{1}{2}[(a+b)-(4\delta+2\epsilon)] = \frac{a}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \epsilon \quad (۴۰)$$

در نتیجه به علت  $a=b$ :

$$Ts_2 = 8\delta + 6\epsilon + a - 4\delta - 2\epsilon = 4\delta + 4\epsilon + a \quad (۴۱)$$

$$T_{sp} = 4\delta + 4\epsilon + a - 2\delta - \epsilon = 2\delta + 3\epsilon + a \quad (۴۲)$$

در نتیجه  $T_{sp} < Ts_2$  می‌باشد.

در غیر این صورت اگر فرض کنیم  $a > b$  باشد، در آن صورت طبق رابطه (۲) و (۱۳) داریم:

$$\text{Max}\{0, a-(4\delta+2\epsilon), b-(4\delta+2\epsilon)\} = a-(4\delta+2\epsilon) \quad (۴۳)$$

$$\frac{1}{2}\text{Max}\{0, (a+b)-(4\delta+2\epsilon)\} = \frac{a}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \epsilon \quad (۴۴)$$

در نتیجه داریم:

$$Ts_2 = 8\delta + 6\epsilon + a - 4\delta - 2\epsilon = 4\delta + 4\epsilon + a \quad (۴۵)$$

$$T_{sp} = 4\delta + 4\epsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \epsilon = 2\delta + 3\epsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (۴۶)$$

فرض خلف: فرض می‌کنیم  $a < \frac{a+b}{2}$  می‌باشد:

$$a < \frac{a+b}{2} = a < \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \Rightarrow a - \frac{a}{2} < \frac{b}{2} \Rightarrow \frac{a}{2} < \frac{b}{2} \Rightarrow a < b \quad (۴۷)$$

که رابطه بالا با فرض  $a > b$  در تناقض است، در نتیجه همیشه

$a > \frac{a+b}{2}$  می‌باشد، لذا  $T_{sp} < Ts_2$  می‌باشد.

$$\frac{1}{2}\text{Max}\{0, (a+b)-(4\delta+2\epsilon)\} = 0 \quad (۲۸)$$

در نتیجه، طبق رابطه (۲) و (۱۳):

$$Ts_2 = 8\delta + 6\epsilon \quad (۲۹)$$

$$T_{sp} = 4\delta + 4\epsilon \quad (۳۰)$$

که نتیجه می‌گیریم  $T_{sp} < Ts_2$  می‌باشد.

#### فرض ۴.

حال اگر فرض کنیم  $a+b > 4\delta+2\epsilon, a \leq 4\delta+2\epsilon, b \leq 4\delta+2\epsilon$  باشد، در نتیجه:

$$\text{Max}\{0, a-(4\delta+2\epsilon), b-(4\delta+2\epsilon)\} = 0 \quad (۳۱)$$

$$\frac{1}{2}\text{Max}\{0, (a+b)-(4\delta+2\epsilon)\} = \frac{1}{2}[(a+b)-(4\delta+2\epsilon)] \quad (۳۲)$$

در نتیجه طبق رابطه (۲) و (۱۳):

$$Ts_2 = 8\delta + 6\epsilon \quad (۳۳)$$

$$T_{sp} = 4\delta + 4\epsilon + \frac{1}{2}[(a+b)-(4\delta+2\epsilon)] =$$

$$4\delta + 4\epsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \epsilon = \quad (۳۴)$$

$$2\delta + 3\epsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2}$$

حال اگر فرض کنیم  $a+b < 12\delta+6\epsilon$  باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$T_{sp} < 2\delta + 3\epsilon + \frac{1}{2}(12\delta + 6\epsilon) = 8\delta + 6\epsilon \quad (۳۵)$$

در نتیجه  $T_{sp} < Ts_2$  است.

حال اگر فرض کنیم  $a+b=12\delta+6\epsilon$  با توجه به اینکه در ابتدای فرض (۴)، فرض شده بود که:

$$a \leq 4\delta + 2\epsilon \quad (۳۶)$$

$$b \leq 4\delta + 2\epsilon \quad (۳۷)$$

لذا اگر طرفین این دو رابطه را با هم جمع کنیم:

$$a+b \leq 8\delta + 4\epsilon \quad (۳۸)$$

در نتیجه،  $T_{sp} < Ts_{12s_{21}}$ .

پس نتیجه می‌گیریم زمان سیکل پیشنهادی در کلیه حالات کمتر از زمان سیکل  $S_{12}S_{21}$  می‌باشد و لم (۳) نیز اثبات می‌شود. مطابق آنچه که در لم‌های (۱)، (۲) و (۳) ثابت شد، زمان سیکل پیشنهادی در حالتی که زمان  $\delta, \varepsilon$  در دو سیکل پیشنهادی و حرکت خطی ربات با هم برابر باشند، از سیکل‌های  $S_{12}, S_{21}, S_2, S_1$  کمتر است. در نتیجه جانمایی و استقرار ماشینها به روش پیشنهادی و تخصیص همه‌ی فعالیت‌ها به یک ماشین و در نظر گرفتن توالی حرکت‌های ربات طبق این سیکل پیشنهادی، زمان سیکل برای تولید یک قطعه راکاهش داده و به عبارت دیگر نرخ خروجی در سلول رباتیک دوماشینه افزایش می‌یابد.

### ۲-۳. مقایسه زمان سیکل سیاست حرکتی پیشنهادی با

#### سیاستهای حرکتی موجود در سلول سه ماشینه

مطابق آنچه که در بخشهای (۱-۲) و (۲-۲) اشاره شد، زمان سیکل برای تولید یک قطعه در سیکلهای موجود و پیشنهادی مطابق روابط مندرج در جدول (۱) و رابطه (۲۱) می‌باشد. برای اثبات بهینه بودن زمان سیکل در سیاست حرکتی پیشنهادی نسبت به سیاستهای حرکتی موجود در سلول سه ماشینه به نتیجه مطالعه گلتکین و همکاران [۱۳] استناد می‌کنیم. آنها در تحقیق خود سیاست حرکتی پیشنهادی خود را با سیکلهای حرکتی  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  مقایسه نموده و به این نتیجه رسیده‌اند که سیاست حرکتی پیشنهادی آنها دارای زمان سیکل کمتری نسبت به زمان سیکلهای یاد شده می‌باشد. لذا در این تحقیق می‌خواهیم ثابت کنیم که زمان سیکل در سیاست حرکتی پیشنهادی این مقاله از زمان سیکل سیاست حرکتی مقاله گلتکین و همکاران [۱۳] نیز کمتر است. زمان سیکل در سیاست حرکتی جدید ( $T_{SP}$ ) و زمان سیکل در سیاست حرکتی پیشنهادی ( $T_G$ ) گلتکین و همکاران [۱۳] به صورت روابط (۵۸) و (۵۹) می‌باشد.

$$T_{SP} = 4\varepsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{1}{3} \text{Max}\{0, P - (8\delta + 4\varepsilon)\} \quad (58)$$

$$T_G = 4\varepsilon + 8\delta + \frac{1}{3} \text{Max}\{0, P - (10\delta + 4\varepsilon)\} \quad (59)$$

لم ۴. زمان سیکل جدید از زمان سیکل پیشنهادی گلتکین و همکاران به ازای کلیه پارامترها کمتر می‌باشد، در نتیجه از کلیه زمان سیکل‌های  $S_1$  تا  $S_6$  نیز کمتر است.

اثبات: ابتدا فرض می‌کنیم  $P \leq 8\delta + 4\varepsilon$  در نتیجه زمان سیکل

$$T_{SP} = 4\varepsilon + \frac{16}{3}\delta + 0 \text{ می‌شود با:}$$

حال اگر فرض کنیم که  $b > a$  باشد، در این حالت نیز طبق آنچه که در مورد فرض  $a > b$  گفته شد می‌توان نوشت:

$$Ts_2 = 4\delta + 4\varepsilon + b \quad (48)$$

$$T_{sp} = 2\delta + 3\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (49)$$

و طبق فرض خلف مشابه آنچه که در مورد قبلی اشاره شد، نتیجه می‌شود که  $b > \frac{a+b}{2}$  می‌باشد لذا  $T_{sp} < Ts_2$  می‌باشد. بنابراین مطابق فرض‌های (۳)، (۴) و (۵)، لم (۲) ثابت می‌شود و نتیجه می‌گیریم زمان سیکل پیشنهادی همیشه کمتر از زمان سیکل  $S_2$  می‌باشد ( $T_{sp} < Ts_2$ ).

لم ۳. زمان سیکل پیشنهادی در کلیه حالات از سیکل  $S_{12}S_{21}$  کمتر می‌باشد.

اثبات: طبق فرض (۳) و روابط (۵) و (۱۳) داریم:

$$Ts_{12s_{21}} = 7\delta + 6\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} + 0 \quad (50)$$

$$T_{sp} = 4\delta + 4\varepsilon + 0 \quad (51)$$

در نتیجه  $T_{sp} < Ts_{12s_{21}}$  طبق فرض (۴) و روابط (۵) و (۱۳) داریم:

$$Ts_{12s_{21}} = 7\delta + 6\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} + 0 \quad (52)$$

$$T_{sp} = 2\delta + 3\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (53)$$

در نتیجه  $T_{sp} < Ts_{12s_{21}}$  طبق فرض (۵) و با فرض  $a = b$  و روابط (۵) و (۱۳) داریم:

$$Ts_{12s_{21}} = 7\delta + 6\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} + \frac{a}{2} - 2\delta - \varepsilon = 5\delta + 5\varepsilon + a + \frac{b}{2} \quad (54)$$

$$T_{sp} = 2\delta + 3\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (55)$$

در نتیجه،  $T_{sp} < Ts_{12s_{21}}$ .

طبق فرض (۵) و با فرض  $b > a$  و روابط (۵) و (۱۳) داریم:

$$Ts_{12s_{21}} = 7\delta + 6\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} + \frac{b}{2} - 2\delta - \varepsilon = 5\delta + 5\varepsilon + b + \frac{a}{2} \quad (56)$$

$$T_{sp} = 2\delta + 3\varepsilon + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} \quad (57)$$

درسول‌های تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه، رویکرد جدیدی برای افزایش نرخ خروجی تولید در سلولهای تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه ارائه شده است.

در این رویکرد جانمایی ماشین‌آلات در سلول رباتیک بر خلاف استقرار خطی ماشینها در اکثر تحقیقات گذشته، مطابق با طرح استقرار پیشنهادی بوده و با در نظر گرفتن درجات آزادی بیشتر برای ربات، حرکت دورانی نیز برای ربات تک نگهدارنده موجود در سلول تولیدی فرض شده است. ماشینهای موجود در این سلولهای تولیدی رباتیک به دلیل دارا بودن ویژگی انعطاف پذیری عملیات، قادر به انجام و پردازش کلیه عملیات لازم برای تولید قطعات یکسان در سلول تولیدی هستند. برای افزایش نرخ خروجی در سلول تولیدی، سیاست حرکتی جدیدی برای توالی حرکات ربات در سلولهای تولیدی رباتیک دو و سه ماشینه تعریف شده و زمان سیکل در این سیاست حرکتی جدید به تفکیک برای سلولهای دو و سه ماشینه محاسبه شده است. با استناد به آنها و اثبات‌های انجام شده در این مقاله، ثابت شده است که زمان سیکل پیشنهادی با در نظر گرفتن فرضیات مربوطه، از زمان سیکل تمام سیاست‌های شدنی سنتی موجود برای توالی حرکات ربات در سلول رباتیک دو و سه ماشینه کمتر بوده که این خود منجر به افزایش نرخ خروجی تولید و ارتقاء بهره‌وری در سلول تولیدی می‌گردد.

با توجه به این که زمان سیکل در کلیه سیاستهای حرکتی ربات در این سلولهای تولیدی، به پارامترهای زمان پردازش، زمان جابجایی ربات بین ماشینها و ناحیه ورودی و خروجی و زمان بارگذاری/تخلیه وابسته است، لازم است در تحقیقات آتی، ارائه مدل‌های ریاضی مناسب برای انتخاب سیاست حرکتی بهینه و نحوه استقرار مناسب ماشینها در حالت‌های قطعیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل، مورد توجه قرار گیرد.

### مراجع

- [1] Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., Kubiak, W., "Sequencing of Parts and Robot Moves in a Robotic Cell", *International Journal Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 4, 1992, pp. 331-358.
- [2] Crama, D.Y., Van de Klundert, J., "Cyclic Scheduling of Identical Parts in a Robotic Cell", *Operation Research*, Vol. 45, 1997, pp. 952-965.
- [3] Hall, N.G., Kamoun, H., Sriskandarajah, C., "Scheduling in Robotic Cells: Classification, Two and Three Machine Cells", *Operations Research*, Vol. 45, 1997, pp. 421-439.
- [4] Hall, N.G., Kamoun, H., Sriskandarajah, C., "Scheduling in Robotic Cells: Complexity and Steady State Analysis", *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, 1998, pp. 43-65.

اگر  $P \leq 8\delta + 4\epsilon$  باشد در نتیجه  $P \leq 10\delta + 4\epsilon$  می‌شود، در نتیجه،

$$T_G = 8\epsilon + 4\delta + 0,$$

پس به ازای  $P \leq 8\delta + 4\epsilon$  زمان سیکل سیاست حرکتی جدید از زمان سیکل پیشنهادی گلکتین و همکاران [۱۳] کمتر است. اگر

$$T_G = 4\epsilon + 8\delta, \quad 8\delta + 4\epsilon < P \leq 10\delta + 4\epsilon$$

اگر در این بازه P در حد بالای آن باشد، یعنی  $P = 10\delta + 4\epsilon$ :

$$T_{sp} = 4\epsilon + \frac{16}{3}\delta + P - (8\delta + 4\epsilon) = \quad (60)$$

$$4\epsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{10}{3}\delta + \frac{4}{3}\epsilon - \frac{8}{3}\delta - \frac{4}{3}\epsilon$$

$$T_G = 4\epsilon + 8\delta \quad (61)$$

$$T_{SP} = 4\epsilon + 6\delta \quad (62)$$

که در این حالت نیز  $T_{SP}$  کمتر از نیز  $T_G$  می‌شود، پس به ازای هر مقداری برای P در این بازه نیز  $T_{SP} < T_G$  می‌شود. حال اگر  $P > 10\delta + 4\epsilon$  باشد:

$$T_{SP} = 4\epsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{1}{3}(P - (8\delta + 4\epsilon)) \quad (63)$$

$$T_G = 4\epsilon + 8\delta + \frac{1}{3}(P - (10\delta + 4\epsilon)) \quad (64)$$

طبق روابط زیر ثابت می‌کنیم در این حالت نیز  $T_{SP} < T_G$  می‌باشد:

$$\begin{aligned} T_{SP} < T_G &\Rightarrow \\ 4\epsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{1}{3}(P - (8\delta + 4\epsilon)) &< 4\epsilon + 8\delta + \frac{1}{3}(P - (10\delta + 4\epsilon)) \\ &= 4\epsilon + \frac{16}{3}\delta + \frac{1}{3}P - \frac{8}{3}\delta - \frac{4}{3}\epsilon < 4\epsilon + 8\delta + \frac{1}{3}P - \frac{10}{3}\delta - \frac{4}{3}\epsilon \quad (65) \\ &\Rightarrow \frac{8}{3}\delta < \frac{14}{3}\delta \end{aligned}$$

که این رابطه همیشه برقرار است، در نتیجه در این بازه نیز همیشه  $T_{SP} < T_G$  می‌باشد، پس به ازای تمام مقادیر P همواره  $T_{SP} < T_G$  است. به عبارت دیگر زمان سیکل پیشنهادی در سیاست حرکتی جدید این مقاله از زمان سیکل پیشنهادی گلکتین و همکاران [۱۳] در سلول رباتیک سه ماشینه کمتر بوده و لذا از هر یک از زمانهای سیکلهای  $S_1$  تا  $S_6$  نیز کمتر خواهد بود.

### ۴. نتایج و پیشنهادات

در این مقاله ضمن بررسی و مرور سیاستهای حرکتی توالی حرکات ربات و زمان سیکل در سیکلهای حرکتی شدنی موجود

- [5] Crama, Y., Kats, V., Klundert, J.V.D., Levner, E., "Cyclic Scheduling in Robotic Flow Shops", *Annals of Operations Research*, Vol. 96, 2000, pp. 97-124.
- [6] Dawande, M., Geismar, H.N., Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., "Sequencing and Scheduling in Robotic Cells: Recent Developments", *Journal of Scheduling*, Vol. 8, 2005, pp. 387-426.
- [7] Hall, N. G., Sriskandarajah, C., "A Survey of Machine Scheduling Problems with Blocking and No-Wait in Process", *Operations Research*, Vol. 44, 1996, pp. 510-525.
- [8] Agnetis, A., "Scheduling No-Wait Robotic Cells with Two and Three Machines", *European Journal of Operational Research*, Vol. 123, 2002, pp. 303-314.
- [9] Geismar, H.N., Dawande, M., Sriskandarajah, C., "Approximation Algorithms for  $k$ -Unit Cyclic Solutions in Robotic Cells", *European Journal of Operational Research*, Vol. 162, 2005, pp. 291-309.
- [10] Geismar, H.N., Sethi, S.P., Sidney, J.B., Sriskandarajah, C., "A Note on Productivity Gains in Flexible Robotic Cells", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17, 2005, pp. 5-21.
- [11] Akturk, M.S., Gultekin, H., Karasan, O.E., "Robotic Cell Scheduling with Operational Flexibility", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 145, 2005, pp. 334-348.
- [12] Gultekin, H., Akturk, M.S., Karasan, O.E., "Cyclic Scheduling of a 2-Machine Robotic Cell with Tooling Constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, 2006, pp. 777-796.
- [13] Gultekin, H., Akturk, M.S., Karasan, O.E., "Scheduling in a Three-Machine Robotic Flexible Manufacturing Cell", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, 2007, pp. 2463 - 2477.
- [14] Kamal Abadi, I.N., Gholami, S., Mirzaei, A.H., "Robot Movements in a Cyclic Multiple-Part Type Three-Machine Flexible Robotic Cell Problem", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol.1, 2008, pp. 304-317.
- [15] Gultekin, H., M.S. Akturk, Karasan, O.E., "Bicriteria Robotic Operation Allocation in a Flexible Manufacturing Cell", *Computers & operations research*, Vol.48, No. 4, 2010, pp. 779-789.
- [16] Dawande, M., Sriskandarajah, C., Sethi, S.P., "Throughput Maximization in Constant Travel-time Robotic Cells", *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 4, 2002, pp. 296-312.