

DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2024.28988.2159>

## زمان‌بندی سلول رباتیک با رویکرد پیش‌بینانه-واکنشی با در نظر گرفتن خرابی ماشین

آرش جلالی<sup>۱</sup>، سعیده غلامی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدل‌سازی سیستم و تحلیل داده‌ها، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.  
۲. استادیار، گروه مدل‌سازی سیستم و تحلیل داده‌ها، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

### خلاصه

در این مقاله با به‌کارگیری یک رویکرد پیش‌بینانه-واکنشی سعی در ارائه برنامه زمان‌بندی برای سلول‌های رباتیک در شرایط بروز اختلال خرابی ماشین هستیم. در این مقاله ابتدا یک مدل پیش‌بینانه برای یک سلول رباتیک m ماشین را در شرایط عدم اختلال توسعه می‌دهیم. پس از وقوع خرابی ماشین، برنامه‌ریزی واکنشی را در دو بازه زمانی حین تعمیر و پس از تعمیر ماشین خراب ارائه می‌دهیم و در نهایت با بیان معیارهای ثابت و پایداری در یک سلول رباتیک کارایی مدل ارائه شده را با بیان مثال عددی مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۲/۱۲/۰۴

پذیرش ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی سلول رباتیک

زمان‌بندی پیش‌بینانه

واکنشی - اختلال غیرمنتظره

پایداری

ثبات

### ۱. مقدمه

امروزه، فرآیندهای تولیدی مستلزم راندمان بالاتر تولید، کیفیت بهتر محصول و رضایت بیشتر مشتری است که منجر به تغییرات در حوزه‌های مختلف از جمله تغییرات در حوزه صنعتی می‌شود. با تغییرات در حوزه صنعت نیاز به ارتقای فناوری در سطح اتوماسیون و افزایش بهره‌وری سیستم اجتناب‌ناپذیر است. این ترقی فناوری منجر به وجود ربات‌های تولیدی در حوزه صنعت شده است. به همین دلیل، ربات‌ها در تولید بسیار به کار برده می‌شوند و ممکن است برای عملیات صنعتی سودمند باشند. آن‌ها به تدریج در وظایف کاری ادغام می‌شوند تا جایگزین انسان‌ها خصوصاً برای انجام برخی وظایف پرتکرار شوند. ربات‌های صنعتی، بازوهای رباتیک صنعتی، ربات‌های متحرک چرخ‌دار، و دستگاه‌های چندرباتی تنها چند برنامه رباتیک هستند که تنظیمات محیط را مطابق با اهداف مشخص شده توسط کاربر اصلاح می‌کنند.

استفاده از ربات‌ها در صنعت با معرفی ربات‌های بسیار توسعه یافته با هزینه‌های کمتر بیشتر رواج خواهد یافت. ربات‌ها عمدتاً سه وظیفه خاص را در حوزه صنعت برای تسریع فرآیندها برعهده دارند: آن‌ها به عنوان ابزار جابه‌جایی و حمل مواد، به عنوان ربات همکار با انسان یا به صورت خودکفا عمل می‌کنند.

همان‌طور که اشاره شد یکی از کاربردهای ربات در صنعت جابه‌جایی و حمل قطعات بین ماشین‌ها است. به چنین سیستم‌های تولیدی سلول رباتیک گفته می‌شود. استفاده از ربات‌ها به عنوان ابزارهای خودکار جابه‌جایی و حمل قطعات، اتوماسیون را ارتقا می‌دهد و میزان بهره‌وری سیستم را بالا می‌برد. مسائل در حوزه سلول رباتیک به تعیین توالی پردازش قطعات و زمان‌بندی حرکت ربات‌ها توجه دارد. به همین دلیل، مطالعات در این حوزه از دو جنبه: مسأله زمان‌بندی و مسأله تعیین توالی بررسی می‌شوند.

\* نویسنده مسئول: سعیده غلامی

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۵۶ پست الکترونیکی: [s\\_gholami@kntu.ac.ir](mailto:s_gholami@kntu.ac.ir)

دسترسی به ماشین خراب امکان انتقال یک قطعه از ماشین‌های قبل از ماشین خراب به ماشین‌های بعد از ماشین خراب وجود ندارد. در این فاز و تا زمان تعمیر ماشین خراب به دنبال یافتن توالی از حرکات ربات و برنامه پردازش قطعات روی ماشین‌ها هستیم به گونه‌ای که بیشترین میزان پردازش در این مدت صورت گیرد.

در فاز پس از تعمیر و بازگشت ماشین خراب به سیستم، به دنبال یافتن یک برنامه واکنشی هستیم که علاوه بر کمینه کردن متوسط زمان پردازش یک قطعه، کمترین اختلال را به سیستم وارد کند. در این فاز با تعریف معیارهای ثبات و پایداری به دنبال یافتن چرخه‌ای از حرکات ربات هستیم که کمترین تغییر را نسبت به برنامه اولیه داشته باشد.

#### ۱-۱. ضرورت تحقیق

باتوجه به اهمیت روزافزون مسأله اتوماسیون و افزایش استفاده از ربات در کارخانه‌های تولیدی نیاز به زمان‌بندی سلول‌های رباتیک بیش از پیش مورد توجه قرار دارد. از طرفی زمان‌بندی و توالی عملیات باتوجه به کاهش هزینه و زمان تولید در دنیای رقابتی امروز در سیستم‌های تولیدی نقش حیاتی دارند. سیستم‌های تولیدی در دنیای امروز غالباً در شرایط پویا و تصادفی تصمیم‌گیری می‌کنند. وجود اختلالات تصادفی و غیرمنتظره معمولاً منجر به عدم اجرای دقیق برنامه زمان‌بندی می‌شود. بنابراین نیاز به زمان‌بندی سلول‌های رباتیک برای کاهش اثرات رویدادهای غیرمنتظره امری ضروری می‌باشد.

#### ۱-۲. اهداف پژوهش و کاربردهای آن

با تعریف مسأله و تبیین ضرورت انجام پژوهش می‌توان اهداف این پژوهش را به صورت زیر برشمرد:

هدف اصلی انجام پژوهش حاضر، توسعه مدل زمان‌بندی سلول رباتیک جریان کارگاهی در شرایط بروز اختلال خرابی ماشین است که به دنبال یافتن چرخه‌ای از حرکات ربات در زمان قبل از بروز خرابی و همچنین بعد از تعمیر ماشین خراب باهدف کمینه کردن متوسط زمان پردازش یک قطعه می‌باشد.

همچنین در این پژوهش با ارائه برنامه توالی حرکات ربات و پردازش قطعات در بازه زمانی تعمیر ماشین خراب با تعریف معیارهای ثبات و پایداری در یک سلول رباتیک به دنبال تحلیل ناسازگاری و تضاد بین معیارهای عملکردی ثبات و پایداری هستیم.

به طور خلاصه در این مقاله به دنبال توسعه مدل زمان‌بندی پیش‌بینانه/واکنشی یک سلول رباتیک جریان کارگاهی هستیم که براساس معیارهای تعیین شده بهترین واکنش را به اختلالات غیرمنتظره داشته باشد.

#### ۱-۳. ارزیابی شکاف تحقیقاتی

باتوجه به ارزیابی مطالعات انجام شده در حوزه زمان‌بندی سلول‌های رباتیک، می‌توان شکاف پژوهشی را به صورت ذیل عنوان نمود:

باتوجه به ارزیابی صورت گرفته در حوزه زمان‌بندی سلول‌های رباتیک، اکثر پژوهش‌ها بر زمان‌بندی قطعی و برون خط تأکید دارند. باتوجه به وجود پارامترهای غیرقطعی و وقوع رویدادهای غیرمنتظره این پژوهش با ارائه یک زمان‌بندی پیش‌بینانه-واکنشی در حوزه زمان‌بندی

یکی از چالش‌های پیش‌روی سیستم‌های تولیدی از جمله سلول‌های رباتیک، بروز اختلالات غیرمنتظره همچون خرابی ماشین و در دسترس نبودن آن‌ها است که منجر به عدم پیاده‌سازی برنامه اولیه خواهد شد. در این مواقع اعمال واکنش مناسب با کمترین هزینه به این اختلالات ضروری است. در مواجهه با این اختلالات برنامه‌ریزی مجدد رخ می‌دهد. در ادبیات این حوزه به برنامه اولیه پیش‌بینانه و به برنامه‌ریزی مجدد، برنامه‌ریزی واکنشی اطلاق می‌شود. برنامه واکنشی باید براساس برخی معیارها همچون ثبات و پایداری کمترین تغییر را نسبت به برنامه پیش‌بینانه داشته باشد تا کمترین اختلال در سیستم ایجاد شود. از این رو توسعه مدل‌های پیش‌بینانه/واکنشی در حوزه سلول‌های رباتیک حائز اهمیت است.

در این مقاله به توسعه مدل زمان‌بندی سلول رباتیک چرخه‌ای در محیط جریان کارگاهی در شرایط بروز اختلالات غیرمنتظره می‌پردازیم. یک سلول رباتیک با  $m$  ماشین و یک ربات مفروض است. قطعات یکسان هستند و ربات تک‌نگهدارنده می‌باشد که در هر لحظه توانایی جابه‌جایی یک قطعه را دارد. تولید به صورت چرخه‌ای انجام می‌شود و یک سلول رباتیک  $k$ -unit مفروض است.

یک برنامه چرخه‌ای را می‌توان به عنوان برنامه‌ای تعریف کرد که در فواصل زمانی مشخصی تکرار می‌شود. این فواصل ثابت را زمان چرخه می‌نامند. یک زمان‌بندی چرخه‌ای به این صورت تعریف می‌شود که در یک بازه زمانی ثابت که به آن چرخه گفته می‌شود، تعداد قطعاتی که وارد سلول می‌شوند برابر با تعداد قطعاتی است که از آن خارج می‌شوند. در پایان چرخه، سلول به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. این فرآیند بی‌نهایت بار تکرار می‌شود. اگر در هر چرخه دقیقاً  $k$  قطعه وارد شود و  $k$  قطعه از سلول خارج شود، برنامه چرخه‌ای  $k$ -unit نامیده می‌شود.

امکان خرابی ماشین‌ها در سلول رباتیک به صورت غیرمنتظره وجود دارد. باتوجه به غیرقابل پیش‌بینی بودن زمان خرابی ماشین، تابع توزیع احتمالی زمان خرابی در دسترس نمی‌باشد؛ اما مدت‌زمان تعمیر ماشین‌ها پارامتری قطعی و از قبل تعیین شده می‌باشد.

در این مقاله زمان‌بندی در سه فاز رخ می‌دهد که به قرار ذیل است:

- قبل از وقوع خرابی
  - در طول مدت تعمیر
  - پس از تعمیر و بازگشت ماشین خراب به سیستم
- زمان‌بندی قبل از وقوع خرابی به صورت پیش‌بینانه است. در این فاز به دنبال یافتن برنامه زمان‌بندی چرخه‌ای برای سلول رباتیک جریان کارگاهی هستیم. هدف این مرحله از زمان‌بندی یافتن چرخه‌ای از حرکات ربات و پردازش قطعات روی ماشین‌ها، است به طوری که متوسط زمان تکمیل پردازش هر قطعه کمینه گردد.

زمان‌بندی در فاز تعمیر، به صورت واکنشی و پس از وقوع خرابی یکی از ماشین‌ها انجام می‌شود. در این فاز باتوجه به خرابی یکی از ماشین‌ها و عدم دسترسی به این ماشین، سیستم به دو قسمت ماشین‌های قبل و بعد از ماشین خراب تقسیم می‌شود. باتوجه به عدم

سلول‌های رباتیک دارای نوآوری است.

## ۲. مرور بر ادبیات

در این قسمت به مرور مطالعات انجام شده در زمینه زمان‌بندی سلول‌های رباتیک می‌پردازیم. ساختار بخش مرور بر ادبیات به این صورت می‌باشد که ابتدا تحقیقات انجام شده در حوزه سلول‌های رباتیک k-unit بررسی می‌شود. سپس مطالعات در زمینه سلول رباتیک جریان کارگاهی را بیان می‌کنیم. در ادامه به مطالعات در زمینه سلول رباتیک در شرایط عدم قطعیت می‌پردازیم.

استفاده از ربات در صنعت شکل‌ها و اهداف گوناگونی دارد که منجر به افزایش کیفیت، ایمنی و بهره‌وری می‌شود. یکی از اشکال استفاده از ربات، به‌کارگیری آن‌ها جهت جابه‌جایی قطعات بین ماشین‌ها و بارگیری و بارگذاری آن‌ها بر روی ماشین‌ها است. به این سیستم‌های تولیدی، سلول رباتیک گفته می‌شود. در سلول‌های رباتیک به‌دنبال یافتن توالی عملیات قطعات و برنامه‌ریزی حرکتی ربات جهت بیشینه‌کردن نرخ تولید و یا کمینه‌کردن میانگین زمان تولید هر قطعه هستیم. در سالیان اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه زمان‌بندی سلول رباتیک صورت گرفته است. همچون مراجع [۶-۱] که مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند.

### ۲-۱. سلول رباتیک k-unit

مراجع [۷] اولین مطالعات را در این زمینه انجام داد. در این پژوهش سیاست‌های بهینه‌ای برای مسائل دو ماشین و سه ماشین ارائه شد. در مراجع [۷] چرخه k واحد را به‌عنوان دنباله‌ای از فعالیت‌های ربات تعریف کردند که در آن سیستم پس از تولید k قطعه به همان حالت ابتدایی بازمی‌گردد. در این چرخه‌ها، هر دستگاه دقیقاً k بار بارگیری و تخلیه می‌شود و k قطعه در پایان تولید می‌شود. در ادامه [۸] به برنامه‌ریزی مسئله سلول رباتیک در سیستم‌های تولیدی جریان کارگاهی پرداخت. در این مطالعه الگوریتمی با زمان حل چندجمله‌ای ارائه شد.

مراجع [۹-۱۱] مطالعات مشابهی در این زمینه انجام دادند. در این زمان بیشتر مطالعات در مورد مسائل یک واحد بود. مراجع [۱۲] نشان داد که چرخه‌های k واحد می‌توانند منجر به جواب‌هایی با میانگین زمان تولید کمتری نسبت به چرخه‌های یک واحد شوند. با توجه به نتایج [۱۲] توجه به چرخه‌های k واحد بیشتر شد. پس از آن [۱۳-۱۷] مطالعاتی در زمینه چرخه‌های k واحد ( $k \geq 1$ ) انجام دادند. این مطالعات به‌دنبال پیدا کردن بهترین توالی تولیدی (کوتاه‌ترین زمان چرخه) در بین چرخه‌های k واحد بودند.

### ۲-۲. سلول رباتیک جریان کارگاهی

برنامه‌ریزی زمان‌بندی سلول رباتیک جریان کارگاهی به‌دلیل کاربردهای گسترده آن در صنعت ساخت مکانیکی و الکترونیکی، مانند تولید سلولی برای مجموعه‌های دیفرانسیل کامیون، برش فلز و جوشکاری، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. مراجع [۱۹-۲۳] مطالعات مختلفی در زمینه زمان‌بندی سلول رباتیک جریان

کارگاهی انجام دادند. مراجع [۲۴] مسأله زمان‌بندی سلول رباتیک با ماشین‌های پردازش دسته‌ای را در نظر گرفتند و به تعیین توالی پردازش و توالی حرکت ربات به‌طور هم‌زمان پرداختند. در این مطالعه با در نظر گرفتن بافرهای قبل و بعد از هر ماشین در یک مسأله جریان کارگاهی یک مدل چندهدفه با اهداف کمینه‌کردن زمان ساخت و انرژی مصرف شده ارائه گردید. مراجع [۱۸] یک مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی سلول رباتیک با دو نوع قطعه پرداختند. در این مطالعه زمان‌های پردازش قطعات در ماشین‌ها در یک بازه زمانی مشخص تغییر می‌کند. در این مطالعه از رویکرد یادگیری تقویتی (RL) برای به‌دست آوردن توالی حرکت ربات کارآمد باهدف حداقل رساندن زمان ساخت استفاده کردند. در این مطالعه یک شبکه پتری که برای یک محیط RL استفاده می‌شود. مراجع [۲۵] مطالعه‌ای برای مدل‌سازی دو مسأله شامل زمان‌بندی-تخصیص (در صورت تولید قطعات یکسان) و توالی قطعات (در صورت تولید قطعات مختلف) انجام دادند. مدل اول برای به حداقل رساندن زمان چرخه و هزینه عملیاتی، و مدل دوم برای به حداقل رساندن میانگین و انحراف استاندارد هزینه کل تولید و همچنین زمان چرخه، در یک سلول رباتیک سه‌ماشینی غیرقابل اعتماد با عدم قطعیت ارائه گردید. مراجع [۲۶] یک سلول رباتیک جریان کارگاهی با دو نگهدارنده را در نظر گرفت. در این مطالعه همه ماشین‌ها دارای زمان‌های پردازش متغیر در یک بازه زمانی معین هستند. این مطالعه یک روش مبتنی بر رویکرد یادگیری تقویتی (RL) پیشنهاد می‌کند. این مطالعه با شبکه پتری، یک ابزار مدل‌سازی گرافیکی و ریاضی که به‌عنوان یک محیط در RL مدل‌سازی کرده است. در این مطالعه حالت‌ها، اقدامات و پاداش‌ها با استفاده از ویژگی‌های زمان‌بندی جریان کارگاهی، ویژگی‌های شبکه پتری و دانش حاصل از مطالعات قبلی در مورد زمان‌بندی ابزارهای رباتیک تعریف می‌شود.

باتوجه به این که پردازش در محیط چرخه‌ای به‌دلیل سهولت کار و نرخ توان بالاتر در یک محیط تولیدی حائز اهمیت است، مطالعات گسترده‌ای در زمینه زمان‌بندی چرخه‌ای سلول رباتیک صورت گرفته است. یک برنامه چرخه‌ای را می‌توان به‌عنوان برنامه‌ای تعریف کرد که در فواصل زمانی مشخصی تکرار می‌شود. این فواصل ثابت را زمان چرخه می‌نامند. یک زمان‌بندی چرخه‌ای به این صورت تعریف می‌شود که در یک بازه زمانی ثابت که به آن چرخه گفته می‌شود، تعداد قطعاتی که وارد سلول می‌شوند برابر با تعداد قطعاتی است که از آن خارج می‌شوند. در پایان چرخه، سلول به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. این فرآیند بی‌نهایت بار تکرار می‌شود. در سالیان اخیر مطالعات مختلفی در زمینه سلول رباتیک با تولید چرخه‌ای در فضای جریان کارگاهی انجام گرفته است که برخی از این مطالعات در مراجع [۲۷-۳۰] است. اکثر این مطالعات در شرایط ۲ و ۳ ماشین است. در این مقاله ما مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی با m ماشین را مدل‌سازی می‌کنیم.

### ۲-۳. سلول رباتیک در شرایط عدم قطعیت

باتوجه به بروز اختلالات غیرمنتظره در دنیای واقعی، برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن این اختلالات منجر به کاهش کارایی جواب‌های تولید

ما با توسعه مدل ارائه شده در مرجع [۴۰]، مسأله پیش‌بینانه مدل‌سازی یک سلول رباتیک با  $m$  ماشین را ارائه می‌کنیم. ما در برنامه‌ریزی پیش‌بینانه به دنبال یافتن چرخه‌هایی با کمترین زمان تولید یک قطعه هستیم. در این مطالعه برنامه‌ریزی واکنشی را در دو بازه زمانی هنگام تعمیر و پس از تعمیر ماشین خراب ارائه می‌کنیم. ما در این مقاله با بهره‌گیری از رویکرد ارائه شده در مرجع [۴۱] با ارائه معیارهای ثبات و پایداری برای ماشین‌ها و ربات، به دنبال بهترین واکنش به اختلال غیرمنتظره هستیم.

### ۳. تعریف مسأله

در این قسمت تعریف مسأله مدنظر را ارائه خواهیم کرد. یک مسأله زمان‌بندی پیش‌بینانه/واکنشی سلول رباتیک در فضای جریان کارگاهی ارائه می‌کنیم. مدل‌سازی قبل و بعد از وقوع اختلال غیرمنتظره با در نظر گرفتن خرابی ماشین در زمانی غیرقابل پیش‌بینی انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مسأله ارائه شده را از منظر زمانی در سه فاز مختلف بیان خواهیم کرد. فاز اول به صورت پیش‌بینانه و قبل از وقوع خرابی و دو فاز بعدی به صورت واکنشی و پس از وقوع خرابی ارائه می‌شود. فازهای مدل‌سازی به‌قرار ذیل است:

- فاز اول: مدل‌سازی پیش‌بینانه و قبل از وقوع خرابی
- فاز دوم: مدل‌سازی واکنشی و در بازه زمانی تعمیر ماشین خراب شده
- فاز سوم: مدل‌سازی واکنشی و پس از تعمیر ماشین خراب شده و بازگشت آن به سیستم

مدل‌سازی در فاز اول قبل از وقوع خرابی و به صورت پیش‌بینانه خواهد بود. در این فاز به دنبال یافتن چرخه‌ای از حرکات ربات و پردازش قطعات بر روی ماشین‌ها هستیم. هدف مدل‌سازی در این فاز حداکثر کردن توان عملیاتی سیستم است. در این فاز به دنبال یافتن چرخه‌ای  $k$ -unit با کوتاه‌ترین زمان چرخه خواهیم بود.

مدل‌سازی فاز دوم به صورت واکنشی و پس از وقوع خرابی غیرمنتظره یکی از ماشین‌ها است. مدل‌سازی این فاز در بازه زمانی تعمیر ماشین خراب شده انجام می‌گیرد. در این فاز به دنبال یافتن توالی حرکات ربات و زمان‌بندی پردازش قطعات بر روی ماشین‌ها به‌گونه‌ای هستیم که در مدت‌زمان تعمیر، سیستم کمترین زمان بیکاری را داشته باشد. هدف این فاز بیشترین پردازش قطعات در بازه زمانی تعمیر تعریف می‌گردد.

مدل‌سازی فاز سوم به صورت واکنشی و پس از تعمیر و بازگشت ماشین خراب به سیستم انجام می‌گیرد. در این فاز از مدل‌سازی، به دنبال چرخه‌ای از حرکات ربات خواهیم بود. معیارهای ثبات و پایداری را در این فاز تعریف خواهیم کرد و با ارائه یک تابع هدف ابتکاری به دنبال چرخه‌ای  $k$ -unit با کمترین زمان چرخه خواهیم بود. در این قسمت به مدل‌سازی یک مسأله جریان کارگاهی با قطعات یکسان می‌پردازیم. این مسأله به یک سلول رباتیک  $k$ -unit با تولید چرخه‌ای اشاره دارد. یک ربات وظیفه جابه‌جایی قطعات بین ماشین‌ها

شده می‌شود. یکی از رویکردهای پاسخ‌گویی به این اختلالات برنامه‌ریزی مجدد می‌باشد. در حوزه زمان‌بندی سلول‌های رباتیک در شرایط بروز اختلالات غیرمنتظره تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. با این وجود مرجع [۳۱] اولین مطالعات را در حوزه سلول رباتیک در شرایط عدم قطعیت انجام داد. مرجع [۳۲] مسأله سلول رباتیک را در فضای عدم قطعیت با در نظر گرفتن توزیع احتمالی نرمال برای زمان‌های پردازش در نظر گرفت. مرجع [۳۳] اولین تحقیقی بود که سلول رباتیک با محدودیت‌های برداشتن قطعات را با در نظر گرفتن یک بازه عدم قطعیت برای زمان‌های پردازش در نظر گرفت. [۳۴] مطالعه‌ای در زمینه زمان‌بندی آنی در سلول‌های رباتیک انجام داد. در مرجع [۳۵] مسأله زمان‌بندی در شرایط عدم قطعیت زمان پردازش کارها در نظر گرفته شد و زمان‌بندی آنی و برون‌خط برای مسأله ارائه گردید. مرجع [۳۶] به ارائه یک مسأله تصادفی رباتیک دوماشین در سیستم جریان کارگاهی پرداخت. مرجع [۳۷] با یک رویکرد فراابتکاری مطالعه‌ای برای برنامه‌ریزی یک سلول رباتیک دوماشینی و با اختلال‌های مختلف ارائه کرد. در این مطالعه، یک مدل تصادفی برای یک سلول رباتیک غیرقابل اطمینان تحت شرایط عملیاتی مختلف شامل خرابی‌ها و نگهداری پیش‌گیرانه ارائه شد. در این مطالعه در دسترس بودن سلول رباتیک به‌عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شد. مرجع [۳۸] مطالعه‌ای بر بهره‌گیری از رویکرد شبیه‌سازی کامپیوتری در مدل‌سازی در حضور عوامل مختلف عدم قطعیت و نیز استفاده از روش‌شناسی رویه پاسخ بر روی نتایج متنوع شبیه‌سازی در مسأله تعیین توالی بهینه ورود قطعات به سلول تولیدی رباتیک سه‌ماشینه براساس سیاست حرکتی  $S6$  با در نظر گرفتن تولید قطعات مختلف در هر سیکل تولیدی ارائه کرد. در این مطالعه تابع چگالی احتمال خرابی و زمان تعمیر ماشین‌ها دارای توزیع نمایی بوده و حداقل کردن زمان سیکل براساس سیاست حرکتی  $S6$  و حداکثر کردن خروجی در این سلول رباتیک همراه با کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی به‌عنوان اهداف اصلی بهینه‌سازی مسأله منظور کردند. در این مطالعه ماشین‌ها غیرقابل اطمینان هستند و در طول انجام عملیات پردازشی قطعات امکان خرابی دارند. مرجع [۳۹] مطالعه‌ای در مورد مسأله زمان‌بندی تصادفی را برای یک سلول رباتیک با دو ماشین با احتمال خرابی ماشین و تعمیر ماشین انجام دادند. با توجه به دوماشینه بودن سیستم، تمرکز آن‌ها بر چرخه  $S2$  به‌عنوان متداول‌ترین چرخه حرکت ربات بوده است. آن‌ها، یک برنامه ریاضی چندهدفه برای به حداقل رساندن زمان چرخه و هزینه‌های عملیاتی پیشنهاد کرده‌اند.

در این مقاله با توجه به اهمیت مسأله زمان‌بندی سلول رباتیک در شرایط اختلال، به منظور پاسخ به اختلال خرابی ماشین، به ارائه یک مدل جریان کارگاهی سلول رباتیک می‌پردازیم. ما با توسعه مدل ارائه شده در مرجع [۴۰] به مدل‌سازی پیش‌بینانه/واکنشی مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی می‌پردازیم. مرجع [۴۰] با ارائه یک مدل جریان کارگاهی  $k$ -unit به دنبال یافتن چرخه بهینه در شرایط عدم وجود اختلال می‌باشد.

و براساس این مفاهیم مدل‌سازی مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی انجام گرفت. در این تعریف  $t$  بیانگر شماره حرکت ربات است و  $A_{ti}$  یک متغیر باینری است و تنها زمانی مقدار می‌گیرد که حرکت شماره  $t$  از نوع  $A_i$  باشد [۴۰]. در مدل ارائه شده برای هر ماشین یک متغیر در نظر گرفته شده است ( $F_{ti}$ ). این متغیر بیانگر مدت‌زمان باقی ماندن یک قطعه روی ماشین  $i$  در پایان مرحله  $t$ ام است. در صورت انتقال قطعه از ماشین  $F_{ti}$  صفر می‌شود و در غیر این صورت در هر مرحله به اندازه مدت‌زمان آن مرحله ( $T_t$ ) بر میزان  $F_{ti}$  افزوده می‌شود. در زمان انتقال  $F_{ti}$  بزرگتر و یا مساوی  $(2\epsilon + \delta) + p_i$  است ( $p_i$  زمان پردازش ماشین  $i$  است). دقت کنید که در صورت مقدار گرفتن  $A_{ti+1}$ ،  $(2\epsilon + \delta) - F_{ti}$  برابر زمان برداشتن قطعه از ماشین  $i$  است [۴۰]. در این مقاله با استفاده از مدل ارائه شده در مرجع [۴۰] در مدل پیش‌بینانه و گسترش آن در مدل واکنشی به‌دنبال ارائه یک مدل پیش‌بینانه/واکنشی برای مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی هستیم. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل به‌قرار زیر است و اندیس‌ها و پارامترهای مسأله در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱). معرفی اندیس‌ها و پارامترها

$t$	شماره حرکت ربات ( $t \in \{0, 1, \dots, n\}$ )
$i$	شماره ماشین ( $i \in \{0, 1, \dots, m\}$ )
$n$	تعداد حرکات ربات در یک چرخه
$p_i$	زمان پردازش هر قطعه توسط ماشین شماره $i$
$\delta$	زمان حرکت ربات بین دو ماشین متوالی
$\epsilon$	زمان بارگذاری (یا برداشتن) یک قطعه روی یک ماشین

در ادامه به تعریف متغیرهای مسأله می‌پردازیم:

یک متغیر باینری است که موقعیت مکانی ربات را بعد از حرکت  $t$  مشخص می‌کند. اگر ربات بعد از حرکت  $t$  در موقعیت ماشین  $i$  باشد این متغیر یک است و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

یک متغیر باینری است که وضعیت یک ماشین را از منظر آزاد یا مشغول بودن بعد از حرکت  $t$  مشخص می‌کند. اگر ماشین  $i$  بعد از حرکت  $t$  در حال پردازش قطعه‌ای باشد، این متغیر یک و اگر آزاد باشد این متغیر صفر خواهد بود.

یک متغیر مثبت است که میزان زمان پردازش یک قطعه از زمان بارگذاری تا ابتدای حرکت شماره  $t$  را بر روی ماشین  $i$  مشخص می‌کند. اگر در ابتدای حرکت  $t$  ماشین  $i$  مشغول پردازش قطعه‌ای نباشد این میزان برابر صفر خواهد بود. برابر فاصله زمانی بین اتمام حرکت  $t - 1$  تا اتمام حرکت  $t$  است.

متغیر باینری برای تعریف حرکت شماره  $t$  روی ماشین شماره  $i$  است. اگر در حرکت  $t$  یک قطعه از ماشین  $i - 1$  به ماشین  $i$  منتقل شود یک در غیر این صورت صفر است.

را برعهده دارد. در این مسأله بروز اختلال غیرمنتظره خرابی ماشین در نظر گرفته می‌شود و مدل‌سازی به‌صورت پیش‌بینانه/واکنشی انجام می‌شود. مدل‌سازی این مسأله در ۳ فاز انجام می‌گیرد. برنامه‌ریزی فاز اول به‌صورت پیش‌بینانه قبل وقوع خرابی و برنامه‌ریزی دو فاز بعدی به‌صورت واکنشی بعد از وقوع خرابی است. فازهای برنامه‌ریزی به‌قرار ذیل است:

فاز اول: قبل از وقوع خرابی و بدون بروز اختلال در سیستم رخ می‌دهد. مدل‌سازی این فاز به‌صورت پیش‌بینانه انجام می‌شود.

فاز دوم: پس از وقوع خرابی و تا زمان اتمام تعمیر ماشین خراب شده است. در این فاز مدل‌سازی برای قطعات داخل سیستم و قطعاتی که می‌توانند به سیستم وارد شوند رخ می‌دهد. در این فاز ماشین‌های خط تولید به دو قسمت جدا از هم تبدیل می‌شوند (ماشین‌های قبل از ماشین خراب شده و ماشین‌های بعد از ماشین خراب شده). با توجه به خرابی ماشین امکان جابه‌جایی قطعات بین دو قسمت وجود ندارد. ولی همچنان جابه‌جایی قطعات بین ماشین‌ها توسط تنها یک ربات انجام می‌گیرد، از این رو برنامه‌ریزی دو قسمت مذکور به هم وابسته است. هدف این فاز از برنامه‌ریزی انجام بیشترین پردازش ممکن توسط ماشین‌ها در سیستم است. هرچه تعداد خروجی از سیستم (قطعاتی که پردازششان تکمیل شده) و همچنین تعداد قطعات ورودی به سیستم بیشتر باشد، نشانگر تعداد پردازش بیشتر توسط ماشین‌ها است.

فاز سوم: برنامه‌ریزی پس از تعمیر ماشین خراب و بازگشت این ماشین به سیستم است. در این قسمت برنامه‌ریزی واکنشی باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر معیار بیشترین قطعه تکمیل شده در واحد زمان (کوتاه‌ترین زمان چرخه)، معیارهای ثبات و پایداری نیز در نظر گرفته شود.

### ۳-۱. فاز اول: قبل از وقوع خرابی ماشین

در این قسمت مسأله پیش‌بینانه تعریف شده و مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله ارائه می‌شود. براساس تعریف سیستم جریان کارگاهی تمام قطعات توسط ماشین‌ها با یک توالی یکسان پردازش می‌شود.  $M_0, M_1, \dots, M_{m+1}$  بیانگر ترتیب ماشین‌ها در پردازش قطعات است.  $M_0$  قسمت ورودی قطعات و  $M_{m+1}$  قسمت خروجی قطعات از سیستم است. در هر چرخه  $k$ ،  $k$ -unit قطعه به سیستم وارد می‌شود و در نهایت  $k$  قطعه از سیستم خارج می‌شود. در سلول‌های رباتیک حمل قطعات بین ماشین‌ها توسط ربات انجام می‌شود. با توجه به ثابت بودن توالی پردازش ماشین‌ها در سیستم جریان کارگاهی در این مسأله به‌منظور حداقل کردن متوسط زمان پردازش کامل یک قطعه توسط ماشین‌ها، به‌دنبال یافتن توالی بهینه حرکات ربات هستیم. باید توجه داشت که ربات در هر لحظه تنها قادر به انجام یک حرکت است و همچنین بافری میان ماشین‌ها وجود ندارد.

مرجع [۴۰] به بیان مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی باهدف کمینه‌کردن زمان تولید یک قطعه در یک سلول  $k$ -unit پرداخته است. در مطالعه انجام گرفته در مرجع [۴۰] مفاهیم  $A_{ti}$  و  $F_{ti}$  تعریف گردید

قطعه‌ای که در مرحله قبل توسط ماشین قبلی پردازش شده است را انجام می‌دهد. عبارت (۷) بیان می‌کند که وضعیت پردازش یک ماشین در مرحله آخر با وضعیت پردازش آن ماشین در مرحله صفر برابر است. عبارت (۸) بیان می‌کند اگر یک ماشین در مرحله قبل و مرحله کنونی مشغول پردازش باشد بدین معنی است که روی یک قطعه مشغول کار بوده است و زمان پردازش آن قطعه تا آخر مرحله کنونی برابر زمان پردازش آن قطعه تا انتهای مرحله قبل به علاوه طول مرحله کنونی است. عبارت (۹) بیان می‌کند وضعیت پردازش در مرحله آخر با مرحله ۰ برابر است. عبارت (۱۰) بیان می‌کند که در صورت وجود قطعه در ماشین قبلی و در مرحله قبلی می‌توان آن را به ماشین بعدی در مرحله کنونی انتقال داد. عبارت (۱۱) بیان می‌کند که تنها در صورت خالی بودن ماشین می‌توان قطعه‌ای را به آن انتقال داد. عبارت (۱۲) بیان می‌کند که در هر مرحله دقیقاً یک حرکت انتقال قطعه صورت می‌گیرد. عبارت (۱۳) بیان می‌کند که حرکت مرحله ۰ با حرکت مرحله آخر برابر است. عبارت (۱۴) حالات مختلف مشغول بودن یک ماشین را بیان می‌کند. عبارت (۱۵) بیان می‌کند که قسمت ورودی همواره مشغول است. عبارت (۱۶) بیان می‌کند که زمان پردازش یک قطعه روی یک ماشین باید از  $p_i$  کمتر نباشد. زمان پردازش یک قطعه روی یک ماشین برابر می‌شود با مدت زمان مراحل متوالی که قطعه بر روی ماشین است ( $F_{ti}$ ) منهای زمانی که در مرحله آخر (مرحله‌ای که در آن قطعه از این ماشین به ماشین بعد می‌رود) صرف انتقال قطعه می‌شود ( $2\epsilon + \delta$ ). عبارت (۱۷) بیان می‌کند طول زمانی یک مرحله باید از زمان حرکت ربات بین دو ماشین به علاوه زمان بارگذاری و برداشتن قطعات از ماشین‌آلات بیشتر باشد. عبارت (۱۸) بیان می‌کند مدت زمان حرکت مرحله ۰ با مدت زمان حرکت مرحله آخر برابر است.

مرجع [۴۰] ثابت می‌کند که تعداد حرکات ربات برای تکرار یک چرخه  $k$ -unit برابر  $k \times (m + 1)$  است. بنابراین می‌توان به جای  $n, k(m + 1)$  را جایگذاری کرد و تابع هدف را به صورت زیر خطی کرد.

$$\min z = \frac{\sum_{t=1}^n T_t}{k} \quad (19)$$

و محدودیت زیر را به مسأله اضافه نمود.

$$\sum_{t=1}^n A_{tm+1} = k \quad (20)$$

سایر عبارات و محدودیت‌های غیرخطی در مرجع [۴۰] خطی گردیده است.

### ۳-۲. از زمان خرابی تا اتمام زمان تعمیر

در این فاز یک ماشین (ماشین  $i_1$ ) به صورت غیرمنتظره در یک لحظه غیرقابل پیش‌بینی دچار خرابی می‌شود و تا زمان تعمیر امکان پردازش قطعات را ندارد. مدت زمان تعمیر این ماشین پارامتری قطعی و برابر  $d_{i_1}$  است. بر اثر این اتفاق امکان انتقال قطعات از ماشین‌های قبل از ماشین خراب به ماشین‌های بعد از این ماشین وجود ندارد (به دلیل عدم پردازش روی ماشین  $i_1$ ). در این لحظه (لحظه خرابی) قطعات

$$\min w = \frac{\sum_{t=1}^k T_t}{\sum_{t=1}^n A_{tm+1}} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=0}^{m+1} x_{ti} = 1 \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$x_{0i} = x_{ni} \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, m + 1\} \quad (3)$$

$$x_{ti} = y_{ti}(1 - y_{t-1i}) \quad \forall i \in \{1, \dots, m + 1\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

$$x_{t0} = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

$$y_{ti} \leq y_{t-1i-1} + y_{t-1i} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$y_{0i} = y_{ni} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (7)$$

$$F_{ti} = y_{t-1i} \times (F_{t-1i} + T_{t-1}) \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (8)$$

$$F_{0i} = F_{ni} \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, m + 1\} \quad (9)$$

$$A_{ti} \leq y_{t-1i-1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m + 1\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (10)$$

$$A_{ti} \leq 1 - y_{t-1i} \quad \forall i \in \{1, \dots, m + 1\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{m+1} A_{ti} = 1 \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (12)$$

$$A_{0i} = A_{ni} \quad (13)$$

$$y_{ti} = (1 - A_{ti})(1 - A_{ti+1})y_{t-1i} + A_{ti} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (14)$$

$$y_{t0} = 1 \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (15)$$

$$(F_{ti} - (2\epsilon + \delta) - p_i) \times A_{ti+1} \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad t \in \{1, \dots, n\} \quad (16)$$

$$T_t \geq 2\epsilon + \delta + \left| \sum_{i=0}^{m+1} ix_{it-1} - \sum_{i=1}^{m+1} (i-1)A_{ti} \right| \delta \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (17)$$

$$T_0 = T_n \quad (18)$$

عبارت (۱) متوسط زمان تولید هر قطعه در سیکل را کمینه می‌کند. عبارت (۲) بیان می‌کند که در هر مرحله ربات دقیقاً یک موقعیت مکانی دارد. عبارت (۳) بیان می‌کند که موقعیت مکانی ربات در مرحله آخر با مرحله ۰ برابر است. عبارت (۴) بیان می‌کند که ربات بعد از حرکت  $t$  می‌تواند روی ماشینی قرار گیرد که در حرکت  $t-1$  خالی بوده و بعد از حرکت  $t$  قطعه‌ای روی آن بارگذاری شده است. عبارت (۵) بیان می‌کند که بعد از پایان هر مرحله ربات در قسمت ورودی قرار نمی‌گیرد. زیرا در پایان هر مرحله ربات در موقعیت ماشینی که قطعه را روی آن بارگذاری می‌کند قرار می‌گیرد. عبارت (۶) بیان می‌کند که یک ماشین در صورتی در یک مرحله در حال پردازش است که یا پردازش یک قطعه از مرحله قبل را ادامه می‌دهد یا پردازش

قطعه به این ماشین وجود ندارد. محدودیت (۲۳) بیانگر این موضوع است که در طول بازه تعمیر امکان انتقال یک قطعه از ماشین  $I_1$  به ماشین  $I_1 + 1$  و برداشتن قطعه از ماشین  $I_1$  وجود ندارد.

تفاوت اساسی که برنامه‌ریزی در این فاز و فاز قبل از خرابی ماشین (پیش‌بینانه) وجود دارد، در غیر چرخه‌ای بودن آن می‌باشد. در فاز قبل از خرابی ماشین (پیش‌بینانه) برنامه‌ریزی به صورت چرخه‌ای بود به این معنی که در فاز پیش‌بینانه به دنبال یک چرخه‌ای از حرکات ربات و پردازش قطعات روی ماشین‌ها بودیم که متوسط زمان تکمیل پردازش یک قطعه را کمینه می‌کرد. اما در این فاز از برنامه‌ریزی به دنبال یافتن یک چرخه نیستیم و در واقع در این فاز حرکات ربات و پردازش قطعات بعد از تعداد مشخصی از حرکات تکرار نخواهد شد. در این فاز به دنبال برنامه‌ریزی حرکات ربات و زمان پردازش قطعات در بازه زمانی تعمیر ماشین خراب هستیم. از این رو برخی از محدودیت‌ها که منجر به چرخه‌ای شدن مدل می‌شوند باید از مدل حذف گردند. این محدودیت‌ها عبارتند از محدودیت‌های (۳)، (۷)، (۹) و (۱۳) که این محدودیت‌ها بیان می‌کنند که وضعیت ربات، ماشین‌ها و قطعات در حال پردازش پس از طی چرخه مجدد به حالت اولیه برمی‌گردد.

دیگر تغییری که مدل‌سازی در این فاز نسبت به فاز پیش‌بینانه دارد، آگاهی از وضعیت اولیه است. به این معنی که در لحظه شروع موقعیت مکانی ربات  $(X_{0i})$ ، وضعیت ماشین‌ها  $(Y_{0i})$ ، مدت زمان پردازش شده هر قطعه روی ماشین در حال پردازش آن قطعه  $(F_{0i})$  مشخص و برابر با میزان این متغیرها در لحظه وقوع خرابی می‌باشد. مورد دیگری که در مدل‌سازی در این فاز باید به آن اشاره کرد، تعداد حرکات (اندیس  $t$ ) است. در برنامه‌ریزی پیش‌بینانه باتوجه به چرخه‌ای بودن همان‌طور که بیان شد تعداد حرکات در یک چرخه مشخص است. اما باتوجه به این که برنامه‌ریزی در این فاز به صورت غیرچرخه‌ای است تعداد حرکات از قبل مشخص نیست. از این رو این موضوع، برنامه‌ریزی در این فاز را با چالش روبه‌رو می‌کند. شماره حرکات در برنامه‌ریزی پیش‌بینانه به صورت زیر و با اندیس  $t$  مشخص شد:

$t$ : شماره حرکت ربات  $\{0, 1, \dots, n\}$  که در این تعریف  $n$  بیانگر تعداد حرکات در یک چرخه  $k$ -unit برابر  $k(m+1)$  است. برای مقید کردن  $n$  در برنامه‌ریزی این فاز کران بالایی برای  $n$  تعریف می‌کنیم. این کران بالا بیانگر بیشترین تعداد حرکاتی است که امکان دارد در این فاز انجام شود. در این وضعیت تمامی قطعاتی که در قسمت دوم (بعد از ماشین خراب شده) وجود دارند با تکمیل پردازش از سیستم خارج شده‌اند و تمامی ماشین‌هایی که در قسمت اول (قبل از ماشین خراب شده) قرار دارند با قطعه‌ای مشغول شده‌اند. در واقع در این وضعیت امکان انجام حرکت دیگری وجود ندارد. همان‌طور که در شکل (۱) و (۲) مشخص است، پس از خرابی ماشین با انجام حداکثر حرکات ممکن تمام ماشین‌های قسمت اول با یک قطعه مشغول و تمام ماشین‌های قسمت دوم خالی از قطعات می‌شوند.

برای به دست آوردن کران بالای تعداد حرکات در فاز تعمیر حداکثر

دیگری بر روی ماشین‌های دیگر در حال پردازش هستند. در این فاز به دنبال برنامه‌ای واکنشی جهت پردازش این قطعات و قطعاتی دیگری که در طول بازه تعمیر به سیستم وارد می‌شوند هستیم. با خرابی ماشین سیستم تولید به دو قسمت ماشین‌های قبل از ماشین خراب و ماشین‌های بعد از ماشین خراب تبدیل می‌شود که به ترتیب آن‌ها را قسمت اول و قسمت دوم می‌نامیم. در قسمت اول امکان تکمیل پردازش قطعات وجود ندارد و قطعه‌ای در این فاز از این قسمت خارج نمی‌شود اما امکان ورود قطعات جدید به این قسمت از ورودی وجود دارد. از طرفی در این فاز امکان تکمیل پردازش و خروج قطعاتی که در قسمت دوم هستند از سیستم وجود دارد اما تا زمان تعمیر ماشین خراب امکان ورود قطعه جدید به این قسمت وجود ندارد.

در برنامه‌ریزی واکنشی این قسمت هدف بهره‌گیری بیشینه از سیستم است که معیار ارزیابی آن را می‌توان انجام پردازش بیشتر قطعات بر روی ماشین‌ها تعریف کرد. هدف برنامه‌ریزی در این فاز خروج بیشتر قطعات از قسمت دوم و ورود بیشتر قطعات به قسمت اول است. باتوجه به بروز خرابی و تقسیم شدن سیستم به دو قسمت مجزا، در صورتی که جابه‌جایی قطعات بین ماشین‌ها توسط یک ربات انجام نمی‌گرفت، برنامه‌ریزی دو قسمت مستقل از هم و بدون وابستگی به هم انجام می‌گرفت. اما در یک سلول رباتیک و با وجود یک ربات جهت جابه‌جایی قطعات بین ماشین‌ها، و باتوجه به این که در هر لحظه ربات امکان جابه‌جایی تنها یک قطعه را دارد، در یک لحظه امکان جابه‌جایی هم‌زمان قطعات بین قسمت اول و قسمت دوم وجود ندارد از این رو برنامه‌ریزی دو قسمت به هم وابسته است. بنابراین برنامه‌ریزی پردازش قطعات و حرکات ربات در دو قسمت با هم انجام می‌گیرد.

تابع هدف فاز دوم را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\max \sum_t A_{t1} + A_{tm+1} \quad (21)$$

باتوجه به این که در این فاز به دنبال بیشترین قطعه ورودی به سیستم و بیشترین قطعه خروجی از سیستم هستیم (بیشترین حرکت ممکن) عبارت (۲۱) را به عنوان تابع هدف فاز تعمیر در نظر می‌گیریم. بر اثر ایجاد خرابی و بروز اختلال، برنامه‌ریزی در فاز تعمیر با تغییراتی نسبت به فاز قبل از خرابی ماشین (پیش‌بینانه) روبرو می‌شود. چالش‌هایی که در این فاز با آن روبه‌رو هستیم بر اثر مواردی همچون خارج شدن ماشین خراب از برنامه‌ریزی، غیرچرخه‌ای شدن برنامه‌ریزی در این فاز، نامشخص شدن تعداد مراحل برنامه‌ریزی (پارامتر  $t$ ) می‌باشند.

بر اثر خراب شدن ماشین  $I_1$  و خارج شدن این ماشین از برنامه‌ریزی در این فاز در مورد ماشین  $I_1$  در عمل امکان بارگیری و یا بارگذاری قطعات وجود ندارد. از این رو محدودیت‌های زیر به مدل اضافه خواهند شد.

$$A_{ti1} = 0 \quad \forall t \quad (22)$$

$$A_{ti1+1} = 0 \quad \forall t \quad (23)$$

محدودیت (۲۲) بیانگر این موضوع است که در طول بازه تعمیر، امکان انتقال یک قطعه از ماشین  $I_1 - 1$  به ماشین  $I_1$  و بارگذاری این

قسمت دوم سیستم وجود ندارد، بدون در نظر گرفتن محدودیت زمان، پس از تعداد متناهی حرکت و جابه‌جایی قطعات، سیستم به حالتی می‌رسد که تمام ماشین‌های قسمت اول با قطعه‌ای مشغول و تمام ماشین‌های قسمت دوم خالی از قطعه می‌شوند. در این وضعیت حتی در صورت باقیماندن زمان تعمیر امکان انجام حرکت جدید وجود نخواهد داشت.

شرط توقف در مورد محدودیت زمان را می‌توانیم به صورت زیر بیان کنیم:

$$\sum_t T_t > d_{i_1} \quad (27)$$

با انجام هر حرکت باید مجموع زمان حرکات انجام شده ( $\sum_t T_t$ ) مورد ارزیابی قرار گیرد تا از طول زمان تعمیر بیشتر نشود.

شرط توقف در مورد محدودیت سیستم را می‌توانیم به صورت زیر بیان کنیم:

$$\sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \quad (28)$$

این عبارت بیان می‌کند در صورتی که تمام ماشین‌های قسمت اول مشغول باشند ( $\sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1$ ) و تمام ماشین‌های قسمت دوم آزاد باشند ( $\sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0$ ) امکان انجام حرکت جدیدی وجود ندارد و پس از انجام هر حرکت باید این شرط را مورد ارزیابی قرار دهیم. به طور کلی شرط توقف برنامه‌ریزی در فاز تعمیر را به صورت ذیل می‌توان بیان کرد (عبارت (۲۹)):

$$\sum_t T_t > d_{i_1} \quad \text{OR} \quad \left[ \sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \right] \quad (29)$$

به منظور پیاده‌سازی شروط توقف بیان شده در مدل، از یک متغیر باینری استفاده می‌کنیم. در زمانی که شروط توقف به وقوع پیوست، با استفاده از این متغیر باینری محدودیت‌های تحت تأثیر شروط توقف را بی‌اثر می‌کنیم. به منظور این کار از متغیر باینری  $e_t$  استفاده می‌کنیم. زمانی که متغیر باینری برابر یک شود به معنی برقرار شدن شروط توقف می‌باشد. برای پیاده‌سازی شروط توقف عبارات (۳۰) را فرمول‌بندی می‌کنیم.

$$d_{i_1} + M \cdot e_{t+1} \geq \sum_t T_t \quad \forall t \quad (30)$$

در این عبارت،  $d_{i_1}$  معرف مدت‌زمان تعمیر ماشین  $i_1$  است. این عبارت بیان می‌کند که در صورتی مجموع زمان حرکات در فاز تعمیر ( $\sum_t T_t$ ) بیشتر از مدت‌زمان تعمیر ( $d_{i_1}$ ) شود متغیر باینری مقدار یک را می‌گیرد. (باتوجه به عبارت (۲۹) زمانی که  $\sum_t T_t > d_{i_1}$  روی دهد، شرط توقف رخ داده است).

باتوجه به عبارت (۲۹) دیگر عاملی که منجر به توقف می‌شود، شرط  $\left[ \sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \right]$  است. از این رو عبارت  $C_t$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

تعداد حرکات قسمت اول و دوم را به صورت جداگانه محاسبه می‌کنیم و مجموع آن‌ها را به عنوان کران بالا برای تعداد حرکات در این فاز در نظر می‌گیریم.

فرض می‌کنیم که در لحظه خرابی،  $c$  قطعه در قسمت اول در حال پردازش هستند. اگر این قطعات روی ماشین‌های  $j_1, j_2, \dots, j_c$  باشند به طوری که در بین این ماشین‌ها، ماشین  $j_1$  نزدیکترین ماشین به ماشین  $i_1$  و ماشین  $j_c$  دورترین ماشین به ماشین  $i_1$  باشد. قطعه روی ماشین  $j_1, j_2, \dots, j_c$  حرکت می‌تواند انجام دهد. قطعه روی ماشین  $i_1 - j_1 - 1$  حرکت و به همین ترتیب قطعه روی ماشین  $j_1 - c$  حرکت می‌تواند انجام دهد. از طرفی  $i_1 - c - 1$  نیز می‌تواند به سیستم وارد شود که اولین قطعه ورودی  $i_1 - c - 1$  حرکت، دومین قطعه ورودی  $i_1 - c - 2$  حرکت و به همین ترتیب آخرین قطعه ورودی، یک حرکت می‌تواند انجام دهد. با انجام این حرکات، حرکت دیگری را در قسمت اول نمی‌توان انجام داد. بنابراین حداکثر تعداد حرکات قسمت اول در فاز تعمیر برابر عبارت (۲۴) است.

که در عبارت (۲۴)،  $y_i^b$  بیانگر وضعیت ماشین  $i$  در لحظه خرابی است. در مورد قسمت دوم، اگر قطعه‌ای در لحظه خرابی روی ماشین  $i$  در حال پردازش باشد این قطعه به  $m + 1 - i$  حرکت دیگر جهت تکمیل پردازش نیاز دارد. باتوجه به این که در فاز تعمیر قطعه جدیدی به قسمت دوم وارد نمی‌شود، از این رو حداکثر تعداد حرکات در قسمت دوم که منتج به خالی شدن قسمت دوم از قطعات می‌شود برابر است با:

$$\sum_{i=i_1+1}^m y_i^b (m + 1 - i) \quad (25)$$

باتوجه به حداکثر حرکات ممکن در قسمت اول و دوم در فاز تعمیر، کران بالای تعداد حرکات ( $n$ ) در این فاز معادل است با:

$$\sum_{i=i_1+1}^m y_i^b (m + 1 - i) + \sum_{i=1}^{i_1-1} y_i^b (i_1 - i) - \frac{c(c+1)}{2} + \frac{(i_1 - c - 1)(i_1 - c)}{2} \quad (26)$$

نکته دیگری که در مورد تعداد حرکات باید به آن توجه کرد، برخی محدودیت‌ها است که منجر به توقف و عدم انجام حرکت دیگری در فاز تعمیر می‌شود. این محدودیت‌ها را می‌توانیم به صورت زیر دسته‌بندی کنیم:

- محدودیت زمان: مدت‌زمان تعمیر ماشین خراب به‌ازای هر ماشین پارامتری معین و از قبل تعیین شده ( $d_i$ ) است. مجموع زمان انجام حرکات در فاز تعمیر نباید از زمان تعمیر بیشتر شود.
- محدودیت سیستم: باتوجه به این که در طول بازه تعمیر امکان خروج قطعه جدید به قسمت اول سیستم و ورود قطعه جدید به



$$\sum_{i=0}^{m+1} x_{ti} + M \cdot e_{t+1} \geq 1 \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (38)$$

$$\sum_{i=0}^{m+1} x_{ti} \leq 1 + M \cdot e_{t+1} \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (39)$$

$$x_{ti} + M \cdot e_{t+1} \geq y_{ti}(1 - y_{t-1i}) \quad \forall i \in \{1, \dots, m+1\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (40)$$

$$x_{ti} \leq y_{ti}(1 - y_{t-1i}) + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m+1\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (41)$$

$$y_{ti} \leq y_{t-1i-1} + y_{t-1i} + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (42)$$

$$F_{ti} + M \cdot e_{t+1} \geq y_{t-1i} \times (F_{t-1i} + T_{t-1}) \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (43)$$

$$F_{ti} \leq y_{t-1i} \times (F_{t-1i} + T_{t-1}) + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (44)$$

$$A_{ti} \leq y_{t-1i-1} + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m+1\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (45)$$

$$A_{ti} \leq 1 - y_{t-1i} + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m+1\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^{m+1} A_{ti} + M \cdot e_{t+1} \geq 1 \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (47)$$

$$\sum_{i=1}^{m+1} A_{ti} \leq 1 + M \cdot e_{t+1} \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (48)$$

$$y_{ti} + M \cdot e_{t+1} \geq (1 - A_{ti})(1 - A_{ti+1})y_{t-1i} + A_{ti} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (49)$$

$$y_{ti} \leq (1 - A_{ti})(1 - A_{ti+1})y_{t-1i} + A_{ti} + M \cdot e_{t+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (50)$$

$$(F_{ti} - (2\epsilon + \delta) - p_i) \times A_{ti+1} + M \cdot e_{t+1} \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, n\} \quad (51)$$

$$T_t + M \cdot e_{t+1} \geq 2\epsilon + \delta + \left| \sum_{i=0}^{m+1} ix_{it-1} - \sum_{i=1}^{m+1} (i-1)A_{ti} \right| \delta \quad \forall t \in \{1, \dots, n\} \quad (52)$$

عبارات (۳۷) تا (۵۲) به‌علاوه عبارات (۳۰) و (۳۲) تا (۳۶) مدل‌سازی در فاز تعمیر را تشکیل می‌دهند.

### ۳-۳. فاز سوم: برنامه‌ریزی پس‌از تعمیر ماشین خراب

در این فاز ماشین خراب (ماشین  $i_1$ ) که به‌صورت غیرمنتظره دچار خرابی شده بود پس‌از گذشت زمان  $d_{i_1}$  (مدت زمان تعمیر) به سیستم برمی‌گردد. مدل‌سازی در این فاز به مانند فاز اول به‌صورت چرخه‌ای است. در این فاز به‌دنبال چرخه بهینه یک سلول رباتیک  $k$ -unit هستیم. شرایط این فاز تماماً مشابه فاز اول است با این تفاوت که در این فاز شرایط اولیه‌ای وجود دارد که در پایان فاز دوم به‌وجود آمده است. منظور از شرایط اولیه موقعیت مکانی ربات ( $x_{ti}$ ), مشغول و یا آزاد بودن ماشین‌ها ( $y_{ti}$ ) و میزان زمان صرف شده قطعات بر روی ماشین‌ها ( $F_{ti}$ ) می‌باشد.

در این فاز علاوه‌بر این‌که به‌دنبال چرخه‌ای هستیم که متوسط

$$C_t = \prod_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} \times \prod_{i=i_1+1}^m (1 - y_{ti}) \quad (31)$$

با این تعریف هرگاه شرط

$$\left[ \sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \right]$$

رخ دهد  $C_t$  برابر یک می‌شود و هرگاه این شرط رخ ندهد  $C_t$  مقدار صفر می‌گیرد.

به‌منظور خطی‌سازی عبارت (۳۱)، از عبارات (۳۲) تا (۳۴) استفاده می‌کنیم.

$$y_{ti} \geq C_t \quad \forall i_1 \in \{1, \dots, i_1 - 1\} \quad (32)$$

$$1 - y_{ti} \geq C_t \quad \forall i_1 \in \{i_1 + 1, \dots, m\} \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} + \sum_{i=i_1+1}^m (1 - y_{ti}) \leq m - 2 + C_t \quad (34)$$

حال برای پیاده‌سازی شرط:

$$\left[ \sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \right]$$

در مدل عبارت (۳۵) را فرموله می‌کنیم.

$$e_{t+1} \geq C_t \quad \forall t \quad (35)$$

عبارت (۳۵) بیان می‌کند که در صورتی که شرط:

$$\left[ \sum_{i=1}^{i_1-1} y_{ti} = i_1 - 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=i_1+1}^m y_{ti} = 0 \right]$$

رخ داد (معادل  $C_t = 1$ ), متغیر باینری تعریف شده مقدار یک را بگیرد. با اعمال محدودیت‌های مذکور، هرگاه شرط توقف رخ دهد متغیر باینری تعریف شده مقدار یک می‌گیرد. حال باید شرایطی ایجاد شود که این متغیر تنها در صورتی مقدار یک بگیرد که شروط توقف رخ دهد. به این معنی که در صورتی که شروط توقف رخ ندهد متغیر باینری ( $e_t$ ) حتما مقدار صفر بگیرد. به‌منظور این کار عبارت (۳۶) را فرمول‌بندی می‌کنیم.

$$\sum_t T_t - d_{i_1}(1 - C_t) + M(1 - e_{t+1}) \geq 0 \quad \forall t \quad (36)$$

این عبارت بیان می‌کند، اگر  $C_t = 0$  باشد و  $\sum_t T_t < d_{i_1}$  (برقرار نشده شروط توقف) در آن صورت  $e_{t+1}$  برابر صفر می‌شود و در غیر این صورت  $e_{t+1}$  می‌تواند مقدار یک بگیرد.

با در نظر گرفتن کران بالا برای تعداد حرکات و اعمال شروط توقف می‌توانیم مدل را از حالت چرخه‌ای خارج کنیم و برنامه‌ریزی را تا زمانی که امکان حرکت جدید در بازه زمانی تعمیر ماشین خراب انجام دهیم. از این‌رو مدل برنامه‌ریزی شده با اعمال شروط توقف به‌صورت زیر تغییر خواهد کرد.

$$\max \sum_t A_{t1} + A_{tm+1} \quad (37)$$

s. t.

برنامه‌ریزی پیش‌بینانه باشد عبارت  $\sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)$  برابر یک و در غیر این صورت این عبارت برابر صفر خواهد شد (باید توجه کنیم که  $\sum_{i=0}^{m+1} x_{ti} = 1$ )، در مخرج عبارت (۵۴) بیشترین میزان  $\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)$  را در تمامی حالات در نظر می‌گیرد. باتوجه به این که بیشترین مقدار  $\sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)$  برابر یک است،  $\max_s \sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)$  برابر تعداد حرکات در یک چرخه  $k$ -unit می‌شود که این میزان برابر  $k(m+1)$  است. از این رو عبارت (۵۴) میزانی بین صفر و یک دارد و به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)}{k(m+1)} \quad (۵۵)$$

معیار ثبات مرتبط با ماشین‌ها به صورت عبارت (۵۶) است.

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))}{\max_s \sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))} \quad (۵۶)$$

این معیار به دنبال حداکثر کردن تطابق وضعیت هر ماشین بعد از هر حرکت ربات در برنامه‌ریزی پیش‌بینانه و واکنشی است. اگر بعد از حرکت  $t$  ماشین  $i$  مشغول باشد میزان  $y_{ti}$  یک و اگر آزاد باشد، این میزان برابر صفر خواهد بود.

در توضیح عبارت  $y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*)$  به جدول زیر توجه کنید.

جدول (۲). حالات مختلف  $y_{ti}$  و  $y_{ti}^*$

$y_{ti}$	$y_{ti}^*$	$y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*)$
صفر	صفر	یک
صفر	یک	صفر
یک	صفر	صفر
یک	یک	یک

همان‌طور که در جدول بالا قابل مشاهده است در صورت برابری  $y_{ti}$  و  $y_{ti}^*$  (وضعیت ماشین در برنامه پیش‌بینانه و واکنشی) میزان عبارت  $y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*)$  یک و در صورت مغایرت این میزان برابر صفر می‌شود. از این رو عبارت  $\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))$  معیاری برای ثبات در وضعیت ماشین‌ها در برنامه‌ریزی واکنشی است. مخرج عبارت (۵۶) حداکثر این میزان را در تمامی حالات محاسبه می‌کند. باتوجه به وجود  $m$  ماشین و  $k(m+1)$  مرحله در یک چرخه، میزان مخرج برابر  $k(m+1)$  است. بنابراین عبارت (۵۶) مقداری بین صفر و یک دارد و به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))}{k(m+1)} \quad (۵۷)$$

باتوجه به مطالب بیان شده و با در نظر گرفتن عبارات (۵۳)، (۵۵) و (۵۷) تابع هدف برنامه‌ریزی واکنشی را می‌توان به صورت عبارت (۵۸) نوشت:

$$\min \frac{z}{z_1^*} - \frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)}{\max_s \sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)}$$

زمان پردازش کامل یک قطعه را حداقل کند با تعریف معیارهای ثبات و پایداری به دنبال کمترین تغییرات در برنامه‌ریزی اولیه هستیم. پایداری یک برنامه به توانایی آن برای عملکرد خوب در محیط‌های عملیاتی مختلف اشاره دارد. در واقع، پایداری مربوط به تفاوت در مقادیر تابع هدف قبل و بعد از یک اختلال است. این موضوع به عدم حساسیت عملکرد برنامه‌ریزی نسبت به اختلالات اشاره دارد. در این مقاله، این معیار به عنوان نزدیک بودن عملکرد زمان بندی تحقق یافته به زمان بندی اولیه تعریف شده است. منظور از معیار ثبات، تغییرات کمتر در برنامه‌ریزی واکنشی با برنامه‌ریزی پیش‌بینانه است. در ادبیات، این اندازه‌گیری معمولاً به عنوان تفاوت بین زمان‌های تکمیل مشاغل در برنامه اولیه و زمان‌های تحقق یافته تعریف شده است. هنگامی که یک اختلال رخ می‌دهد، توالی واقعی ممکن است پس از یک زمان بندی مجدد مورد نیاز تغییر کند. این امر ممکن است منجر به هزینه‌های اضافی از جمله هزینه‌های تخصیص مجدد ابزار و تجهیزات، سفارش مجدد مواد اولیه و غیره شود، اما زمانی که زمان بندی واقعی به زمان بندی اولیه نزدیک تر شود، این هزینه‌ها کاهش می‌یابد و ثبات افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، ثبات به تفاوت بین برنامه‌های اولیه و تحقق یافته مربوط می‌شود تا بین عملکرد آن‌ها.

در این مقاله برای معیار پایداری عبارت زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\frac{z}{z_1^*} = \frac{\sum_{t=1}^n T_t}{\frac{\sum_{t=1}^n T_t}{k}} = \frac{\sum_{t=1}^n T_t}{\sum_{t=1}^n T_t^*} \quad (۵۳)$$

این عبارت بیانگر نسبت میزان تابع هدف (متوسط تولید یک قطعه) در مسأله واکنشی به میزان تابع هدف بهینه مسأله پیش‌بینانه است. باتوجه به این که  $Z$  یک تابع هدف شدنی برای مسأله واکنشی می‌باشد،  $Z$  بزرگتر و یا مساوی  $Z_1^*$  است از این رو هر چه معیار تعریف شده کمتر باشد متوسط تولید یک قطعه در برنامه واکنشی به این میزان، در برنامه پیش‌بینانه نزدیک تر است.

در این مقاله معیار ثبات برای ربات و ماشین‌ها را به صورت جداگانه تعریف می‌کنیم. در بیان معیار ثبات برای ربات، به دنبال برنامه حرکتی ربات هستیم به طوری که کمترین تغییر در حرکات ربات و موقعیت مکانی ربات در برنامه واکنشی نسبت به برنامه پیش‌بینانه ایجاد شود و در مورد معیار ثبات مرتبط با ماشین‌ها به دنبال برنامه پردازشی هستیم که پس از هر حرکت ربات وضعیت ماشین‌ها از منظر اشتغال کمترین تغییر را نسبت به مسأله پیش‌بینانه داشته باشد.

معیار ثبات مرتبط با حرکت ربات به صورت زیر است.

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)}{\max_s \sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)} \quad (۵۴)$$

این معیار به دنبال حداکثر کردن تطابق موقعیت مکانی ربات در برنامه‌ریزی پیش‌بینانه و واکنشی است. هر چه میزان عبارت (۵۴) بیشتر باشد موقعیت مکانی ربات و برنامه حرکتی آن به برنامه پیش‌بینانه نزدیک تر خواهد بود. در صورت این عبارت مجموع میزان  $x_{ti} \times x_{ti}^*$  به ازای  $t$  و  $i$ های ممکن محاسبه می‌کنیم. در واقع برای بعد از هر حرکت، اگر موقعیت مکانی ربات معادل موقعیت ربات در

در مواجهه با اختلال خرابی ابتدا مسأله را با رویکرد ارائه شده در مقاله حل می‌کنیم. نتایج حاصل از حل در جدول (۵) آورده شده است. در این جدول متوسط تکمیل پردازش یک قطعه در حالت بروز خرابی (با رویکرد ارائه شده) و در شرایط عدم بروز خرابی آورده شده است.

جدول (۳). پارامترهای مثال‌های عددی

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$T^*$
مثال ۱	۱۸	۲۲	۲۵	۲۳	۵۹
مثال ۲	۱۶	۱۷	۱۷	۱۶	۵۱
مثال ۳	۱۶	۲۴	۲۳	۱۷	۵۸
مثال ۴	۱۷	۲۱	۲۳	۲۰	۵۶
مثال ۵	۱۸	۱۶	۱۸	۱۵	۵۲
مثال ۶	۲۴	۲۰	۱۸	۱۹	۴۳
مثال ۷	۲۵	۱۸	۲۵	۲۵	۶۱/۵
مثال ۸	۲۳	۲۴	۲۳	۱۸	۴۷
مثال ۹	۲۲	۲۴	۲۱	۲۳	۴۵/۵
مثال ۱۰	۲۲	۱۶	۲۲	۲۰	۵۶
مثال ۱۱	۲۲	۲۱	۱۸	۲۱	۴۲/۵
مثال ۱۲	۱۷	۱۹	۱۸	۱۶	۵۴
مثال ۱۳	۲۱	۲۳	۲۵	۱۵	۶۲
مثال ۱۴	۱۶	۲۱	۲۳	۱۷	۵۵
مثال ۱۵	۲۳	۲۰	۱۹	۲۴	۴۳
مثال ۱۶	۲۰	۱۹	۲۰	۱۹	۵۷
مثال ۱۷	۱۹	۲۴	۱۸	۲۲	۴۲/۵
مثال ۱۸	۲۴	۲۰	۲۴	۲۲	۴۶
مثال ۱۹	۱۸	۱۹	۱۷	۱۸	۳۹
مثال ۲۰	۲۳	۱۹	۲۵	۲۴	۶۰/۵

جدول (۴). متوسط زمان تولید یک قطعه بدون خرابی

	متوسط زمان تولید یک قطعه	متوسط زمان تولید یک قطعه	
مثال ۱	۵۹	مثال ۱۱	۴۲/۵
مثال ۲	۵۱	مثال ۱۲	۵۴
مثال ۳	۵۸	مثال ۱۳	۶۲
مثال ۴	۵۶	مثال ۱۴	۵۵
مثال ۵	۵۲	مثال ۱۵	۴۳
مثال ۶	۴۳	مثال ۱۶	۵۷
مثال ۷	۶۱/۵	مثال ۱۷	۴۲/۵
مثال ۸	۴۷	مثال ۱۸	۴۶
مثال ۹	۴۵/۵	مثال ۱۹	۳۹
مثال ۱۰	۵۶	مثال ۲۰	۶۰/۵

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))}{\max_s \sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))} \quad (58)$$

که این عبارت را می‌توانیم به صورت عبارت (۷۳) بازنویسی کنیم.

$$\min \frac{\sum_{t=1}^n T_t}{\sum_{t=1}^n T_t^*} - \frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (x_{ti} \times x_{ti}^*)}{k(m+1)} \quad (59)$$

$$\frac{\sum_t \sum_{i=0}^{m+1} (y_{ti} \times y_{ti}^* + (1 - y_{ti}) \times (1 - y_{ti}^*))}{km(m+1)}$$

این تابع هدف به همراه محدودیت‌هایی که برای برنامه پیش‌بینانه بیان شد (عبارت (۲) تا (۱۸)) به علاوه شرایط اولیه‌ای که در پایان فاز دوم به وجود آمده است (منظور از شرایط اولیه موقعیت مکانی ربات  $(X_{ti})$ ، مشغول و یا آزاد بودن ماشین‌ها  $(Y_{ti})$  و میزان زمان صرف‌شده قطعات بر روی ماشین‌ها  $(F_{ti})$ ) برنامه واکنشی فاز سوم یعنی فاز برنامه‌ریزی پس از تعمیر ماشین خراب را تشکیل می‌دهد.

#### ۴. مثال عددی

در این قسمت با بیان مثال‌های عددی متنوع و حل آن‌ها به ارزیابی کارایی مدل ارائه شده می‌پردازیم. در این قسمت هر مثال عددی را با رویکرد مدل ارائه شده و رویکرد حرکت به راست حل می‌کنیم و از طریق مقایسه جواب‌های حاصل از این دو رویکرد، کارایی مدل ارائه شده را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

یکی از واکنش‌هایی که معمولاً در ادبیات به دنبال وقوع یک اختلال اجرا می‌شود، حرکت به راست است. در این رویکرد، زمانی که خرابی رخ می‌دهد، پس از تعمیر ماشین خراب، کارها با همان ترتیب قبلی پردازش می‌شوند. در این حالت، زمان تکمیل کارها در مدت زمان تعمیر به سمت راست منتقل می‌شود.

در ادامه ابتدا به بیان پارامترهای ۲۰ مثال عددی مختلف می‌پردازیم. این مثال‌ها اشاره به یک مسأله سلول رباتیک جریان کارگاهی ۴ ماشین تک واحد دارد. ما برای به دست آوردن پارامتر زمان پردازش قطعات توسط ماشین‌ها شبیه‌سازی می‌کنیم. در هر مثال عددی فرض می‌کنیم که زمان پردازش هر ماشین به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت  $uniform=[15,25]$  تعیین می‌گردد. نتایج حاصل به قرار زیر است که در جدول (۳) نیز به آن‌ها اشاره کرده‌ایم.

سایر پارامترهای این مثال‌ها به قرار ذیل است. در این مثال‌ها  $\delta$  و  $\varepsilon$  به ترتیب ۱ و ۲ فرض شده است. همچنین فرض می‌شود که در این مثال‌ها ماشین ۳ در نیمه شیفت دچار خرابی می‌شود. مدت زمان تعمیر این ماشین قطعی و برابر ۷۰ واحد زمانی است.

نتایج حاصل از حل مدل پیش‌بینانه در شرایط بدون خرابی را در جدول (۴) آورده‌ایم.

#### ۴-۱. نتایج محاسباتی

در این قسمت به منظور ارزیابی مدل ارائه شده و اعتبارسنجی آن مثال‌های عددی ارائه شده را با دو رویکرد ارائه شده در مقاله و رویکرد حرکت به راست حل می‌کنیم. از طریق مقایسه این دو رویکرد، کارایی مدل ارائه شده را نشان می‌دهیم.

نتایج حاصل از دو رویکرد مذکور در مثال‌های عددی، این افزایش زمان پردازش در رویکرد ارائه شده در این مقاله نسبت به رویکرد حرکت به راست کمتر است. متوسط زمان تکمیل پردازش یک قطعه در رویکرد ارائه شده در این مقاله کمتر است. بنابراین واکنش مدل ارائه شده به اختلال خرابی ماشین نسبت به رویکرد حرکت به راست، واکنش بهتری می‌باشد.

با بروز خرابی یک ماشین متوسط زمان تکمیل پردازش یک قطعه افزایش می‌یابد. هرچه این میزان کمتر باشد بیانگر واکنش بهتری نسبت به اختلال رخ داده است. در جدول (۷) درصد افزایش زمان تولید یک قطعه در صورت بروز اختلال با رویکردهای حل مذکور ارائه شده است.

#### جدول (۶). حل مسأله در شرایط بروز خرابی و عدم بروز خرابی با

##### رویکرد حرکت به راست

متوسط زمان تولید یک قطعه		
بدون خرابی	رویکرد حرکت به راست	
مثال ۱	۵۹	۶۹/۱
مثال ۲	۵۱	۵۹/۷
مثال ۳	۵۸	۶۷/۹
مثال ۴	۵۶	۶۵/۶
مثال ۵	۵۲	۶۰/۹
مثال ۶	۴۳	۵۰/۳
مثال ۷	۶۱/۵	۷۲
مثال ۸	۴۷	۵۵
مثال ۹	۴۵/۵	۵۳/۳
مثال ۱۰	۵۶	۶۵/۶
مثال ۱۱	۴۲/۵	۴۹/۸
مثال ۱۲	۵۴	۶۳/۲
مثال ۱۳	۶۲	۷۲/۶
مثال ۱۴	۵۵	۶۴/۴
مثال ۱۵	۴۳	۵۰/۳
مثال ۱۶	۵۷	۶۶/۷
مثال ۱۷	۴۲/۵	۴۹/۸
مثال ۱۸	۴۶	۵۳/۹
مثال ۱۹	۳۹	۴۵/۷
مثال ۲۰	۶۰/۵	۷۰/۸

باتوجه به جدول (۷) و مقایسه درصد افزایش متوسط زمان پردازش یک قطعه، عملکرد بهتر مدل ارائه شده در مقایسه با رویکرد حرکت به راست قابل مشاهده است.

#### جدول (۵). حل مسأله در شرایط بروز خرابی و عدم بروز خرابی با رویکرد ارائه شده

متوسط زمان تولید یک قطعه		
مدل ارائه شده	بدون خرابی	مثال
۶۰/۴	۵۹	مثال ۱
۵۳/۱	۵۱	مثال ۲
۵۹/۵	۵۸	مثال ۳
۵۷/۷	۵۶	مثال ۴
۵۴	۵۲	مثال ۵
۴۵/۶	۴۳	مثال ۶
۶۲/۶	۶۱/۵	مثال ۷
۴۹/۴	۴۷	مثال ۸
۴۷/۹	۴۵/۵	مثال ۹
۵۷/۷	۵۶	مثال ۱۰
۴۵/۱	۴۲/۵	مثال ۱۱
۵۵/۹	۵۴	مثال ۱۲
۶۳/۱	۶۲	مثال ۱۳
۵۶/۸	۵۵	مثال ۱۴
۴۵/۶	۴۳	مثال ۱۵
۵۸/۶	۵۷	مثال ۱۶
۴۵/۱	۴۲/۵	مثال ۱۷
۴۸/۴	۴۶	مثال ۱۸
۴۱/۷	۳۹	مثال ۱۹
۶۱/۷	۶۰/۵	مثال ۲۰

در ادامه به بررسی رویکرد حرکت به راست در شرایط بروز خرابی می‌پردازیم. نتایج حاصل از نتایج حاصل از حل مسأله با رویکرد حرکت به سمت راست در جدول (۶) آورده شده است. در این جدول متوسط تکمیل پردازش یک قطعه در حالت بروز خرابی (با رویکرد حرکت به راست) و در شرایط عدم بروز خرابی آورده شده است.

#### ۴-۲. مقایسه رویکرد ارائه شده و رویکرد حرکت به راست

در ادامه به بررسی کارایی مدل ارائه شده از طریق نتایج حاصل از حل مثال‌های عددی با دو رویکرد حرکت به سمت راست و رویکرد ارائه شده در این مقاله می‌پردازیم.

شکل (۳) به بررسی نتایج حاصل از حل مسأله با دو رویکرد بیان شده می‌پردازد. در این شکل تابع هدف مسأله (متوسط زمان تکمیل پردازش یک قطعه) در این دو رویکرد در مواجهه با اختلال خرابی ماشین مقایسه می‌شود.

با بررسی نتایج حاصل از حل مثال‌های عددی با رویکرد ارائه شده در این مقاله و رویکرد حرکت به راست که نتایج آن شکل (۳) ارائه شده است، در صورت بروز اختلال در سیستم و خرابی یکی از ماشین‌ها، متوسط زمان تکمیل پردازش یک قطعه افزایش می‌یابد. اما با مقایسه

توسعه یافته یک مدل پیش‌بینانه/واکنشی است که قسمت پیش‌بینانه مسأله را بدون در نظر گرفتن اختلال مدل‌سازی می‌کند و قسمت واکنشی، واکنش مدل توسعه‌یافته به اختلال خرابی ماشین است. قسمت واکنشی در دو فاز حین تعمیر و پس از تعمیر مسأله را مدل‌سازی می‌کند. در مدل‌سازی حین خرابی ماشین به‌دنبال جلوگیری از توقف پردازش سایر ماشین‌ها هستیم و مدل‌سازی پس از تعمیر به‌دنبال یافتن واکنشی مناسب به اختلال رخ داده هستیم. در این فاز با ارائه معیارهای ثبات و پایداری به‌دنبال جوابی هستیم که علاوه بر یافتن کوتاه‌ترین زمان چرخه کمترین اختلال را نسبت به برنامه‌ریزی پیش‌بینانه به سیستم وارد کند.

در این مقاله با بیان مثال‌های عددی به مقایسه مدل ارائه شده و مدل مبتنی بر رویکرد حرکت به راست پرداختیم و با بررسی جواب‌های حاصل کارایی مدل ارائه شده را نسبت به رویکرد حرکت به راست مورد ارزیابی قرار دادیم که در مثال‌های حل شده این مدل نسبت به رویکرد حرکت به راست جواب‌هایی با متوسط زمان تولید کمتر ارائه می‌کند. با مقایسه نتایج حاصل از حل مسأله در شرایط بروز اختلال توسط دو رویکرد حرکت به سمت راست و رویکرد ارائه شده در مقاله مشاهده کردیم که میزان درصد افزایش زمان تکمیل پردازش یک قطعه نسبت به شرایط عدم بروز خرابی، در رویکرد پیشنهادی کمتر از رویکرد حرکت به سمت راست است که بیانگر عملکرد بهتر مدل پیشنهادی می‌باشد.

برای تحقیقات آتی می‌توان این مسأله را برای سایر مسائل زمان‌بندی در نظر گرفت و از اهداف کلاسیک دیگر برای ارزیابی این روش استفاده کرد. به‌عنوان نمونه می‌توان مسأله را برای یک سیستم جریان کارگاهی با قطعات مختلف توسعه داد. به‌عنوان یکی دیگر از موضوعات تحقیقاتی، توزیع‌های تصادفی را می‌توان برای زمان وقوع خرابی و مدت‌زمان تعمیر در نظر گرفت.

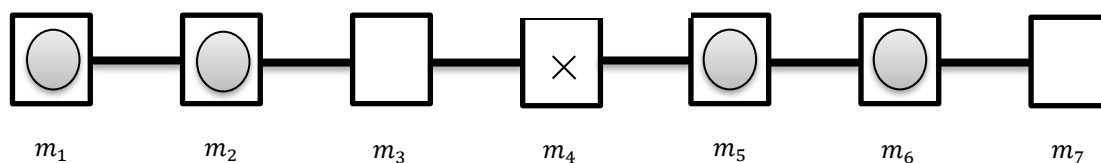
جدول (۷). درصد افزایش زمان پردازش در صورت بروز اختلال با دو رویکرد حرکت به راست و رویکرد ارائه شده در مقاله

متوسط زمان تولید یک قطعه	رویکرد حرکت به راست	
	رویکرد ارائه شده	رویکرد حرکت به راست
مثال ۱	۲/۴%	۱۷/۱%
مثال ۲	۴/۱%	۱۷/۱%
مثال ۳	۲/۶%	۱۷/۱%
مثال ۴	۳/۰%	۱۷/۱%
مثال ۵	۳/۸%	۱۷/۱%
مثال ۶	۶/۰%	۱۷/۰%
مثال ۷	۱/۸%	۱۷/۱%
مثال ۸	۵/۱%	۱۷/۰%
مثال ۹	۵/۳%	۱۷/۱%
مثال ۱۰	۳/۰%	۱۷/۱%
مثال ۱۱	۶/۱%	۱۷/۲%
مثال ۱۲	۳/۵%	۱۷/۰%
مثال ۱۳	۱/۸%	۱۷/۱%
مثال ۱۴	۳/۳%	۱۷/۱%
مثال ۱۵	۶/۰%	۱۷/۰%
مثال ۱۶	۲/۸%	۱۷/۰%
مثال ۱۷	۶/۱%	۱۷/۲%
مثال ۱۸	۵/۲%	۱۷/۲%
مثال ۱۹	۶/۹%	۱۷/۲%
مثال ۲۰	۲/۰%	۱۷/۰%

## ۵. نتیجه‌گیری

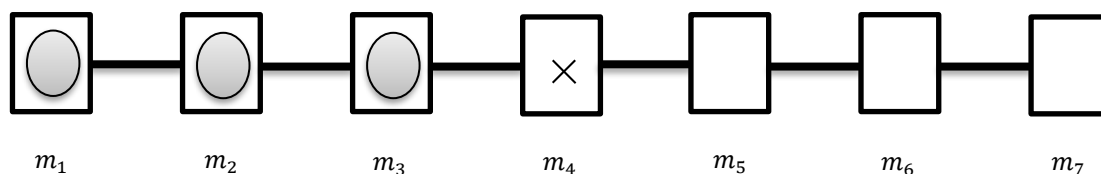
در این مقاله مسأله زمان‌بندی سلول رباتیک جریان کارگاهی را در شرایط بروز اختلال غیرمنتظره خرابی ماشین مدل‌سازی کردیم. مدل

ماشین خراب شده

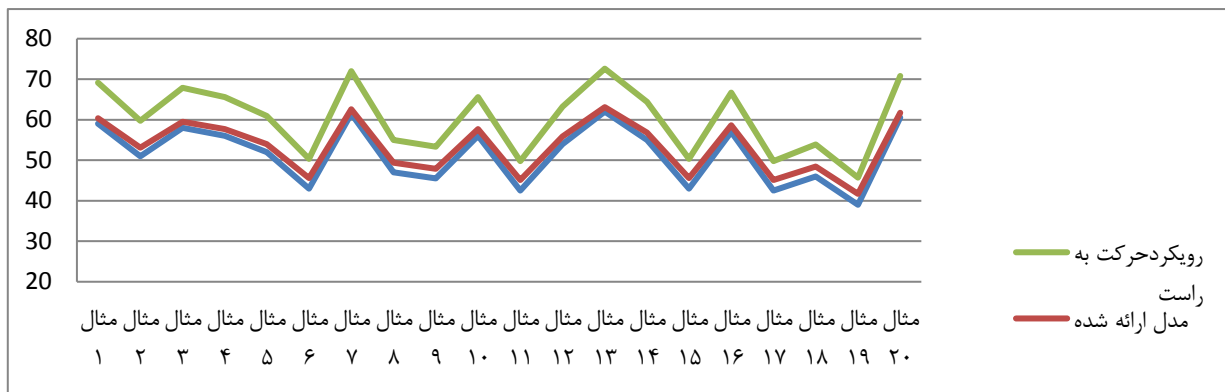


شکل (۱). مثالی از وضعیت سیستم در لحظه

ماشین خراب شده



شکل (۲). وضعیت سیستم بعد از انجام حداکثر حرکت ممکن در فاز تعمیر



جدول (۸). مروری بر مطالعات انجام شده در سالیان اخیر در حوزه زمان بندی سلول رباتیک

نام نویسنده	تعداد ماشین	نوع قطعه		تعداد واحد در هر چرخه	تعیین توالی حرکت ربات	تعیین توالی قطعات	نوع برنامه ریزی	برنامه ریزی پیش‌بینانه-واکنشی
		یک نوع	چند نوع					
Sethi et al. (1992)	2,3	✓	✓	1	-	✓	Offline	-
Hall et al. (1997)	2,3	✓	✓	1,2	✓	✓	Offline	-
Crama & van de Klundert (1997)	M	-	✓	1	✓	-	Offline	-
Brauner & Finke (2001)	2,3,4	-	✓	1,2,3	✓	-	Offline	-
Dawande et al (2005)	M	✓	-	K	✓	-	غیر قطعی	-
Wu et al (2020)	M	-	✓	-	✓	✓	Offline	-
Vaisi et al (2020)	3	✓	✓	-	✓	✓	Offline	-
Vaisi et al (2021)	3	✓	✓	1	✓	-	Offline	-
Kim & Lee (2021)	M	-	✓	1	✓	✓	Offline	-
Lee & Kim (2022)	M	✓	✓	k	✓	✓	Offline	-
Vaisi et al (2023)	2	-	✓	-	✓	✓	احتمالی	-
پژوهش حاضر	M	✓	-	K	✓	✓	Online/غیر قطعی	✓

## مراجع

- 10.22084/ier.2023.27096.210. (in Persian).
- [6] Moradi, V., Yousefi Nejad Attari, M., & Farughi, H. (2018). Modeling for Minimizing Cycle Time in a three-Machine Robotic Cell with Assumption of Tool Switching. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 6(12), 1-17. doi: 10.22084/ier.2017.12669.1578. (in Persian).
- [7] Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., Kubiak, W. (1992). Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell. *Int. J. Flexible Manuf. Syst.* 4 (3-4), 331-358. <https://doi.org/10.1007/BF01324886>
- [8] Kats, V., & Levner, E. (1997). A strongly polynomial algorithm for no-wait cyclic robotic flowshop scheduling. *Operations Research Letters*, 21(4), 171-179. [https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(97\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(97)00036-9)
- [9] Hall, N. G., Kamoun, H., & Sriskandarajah, C. (1997). Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells. *Operations Research*, 45(3), 421-439. <https://doi.org/10.1287/opre.45.3.421>
- [10] Crama, Y., & Van De Klundert, J. (1997). Cyclic scheduling of identical parts in a robotic cell. *Operations Research*, 45(6), 952-965. <https://doi.org/10.1287/opre.45.6.952>
- [11] Levner, E., Kats, V., & Levit, V. E. (1997). An improved
- [1] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2018). Two-machine robotic cell sequencing under different uncertainties. *Int. J. Simul. Model.* 17, 284-294. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(2\)434](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(2)434)
- [2] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2018). Bi-criteria robotic cell scheduling and operation allocation in the presence of break-downs. *International journal of industrial engineering & production research*, 29(3), 343-357. .
- [3] Gultekin, H., Coban, B., & Akhlaghi, V. E. (2018). Cyclic scheduling of parts and robot moves in m-machine robotic cells. *Computers & operations research*, 90, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.09.018>
- [4] Yildiz, S., Akturk, M. S., & Karasan, O. E. (2011). Bicriteria robotic cell scheduling with controllable processing times. *International Journal of Production Research*, 49(2), 569-583. <https://doi.org/10.1080/00207540903491799>
- [5] Saedi, F., & Kianfar, K. (2023). Scheduling Cellular Manufacturing Systems Based on Human Factors and Due Date of Orders. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 10(21), 51-69. doi:

- <https://doi.org/10.1155/2020/4597827>
- [26] Kim, H. J., & Lee, J. H. (2021). Scheduling of dual-gripper robotic cells with reinforcement learning. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 19(2), 1120-1136. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3047924>
- [27] Zahrouni, W., & Kamoun, H. (2021). Scheduling in robotic cells with time window constraints. *European journal of industrial engineering*, 15(2), 206-225. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2021.114001>
- [28] Ghadiri Nejad, M., Shavarani, S. M., Vizvári, B., & Barenji, R. V. (2018). Trade-off between process scheduling and production cost in cyclic flexible robotic cells. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 96, 1081-1091. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1577-x>
- [29] Wang, Z., Zhou, B., Trentesaux, D., & Bekrar, A. (2017). Approximate optimal method for cyclic solutions in multi-robotic cell with processing time window. *Robotics and autonomous systems*, 98, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.09.020>
- [30] Majumder, A., & Laha, D. (2016). A new cuckoo search algorithm for 2-machine robotic cell scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Swarm and evolutionary computation*, 28, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.02.001>
- [31] Dawande, M., Geismar, H. N., Sethi, S. P., & Sriskandarajah, C. (2005). Sequencing and scheduling in robotic cells: Recent developments. *Journal of Scheduling*, 8(5), 387-426. <https://doi.org/10.1007/s10951-005-2861-9>
- [32] Geismar, H. N., & Pinedo, M. (2010). Robotic cells with stochastic processing times. *IIE Transactions*, 42(12), 897-914. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.491505>
- [33] Kim, J. H., & Lee, T. E. (2008). Schedulability analysis of time-constrained cluster tools with bounded time variation by an extended Petri net. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 5(3), 490-503. <https://doi.org/10.1109/TASE.2007.912716>
- [34] Yoon, H. J., & Lee, D. Y. (2003, October). On-line scheduling of robotic cells with post-processing residency constraints. In *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483) (Vol. 3, pp. 2785-2790)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244307>
- [35] Tonke, D., Grunow, M., & Akkerman, R. (2019). Robotic-cell scheduling with pick-up constraints and uncertain processing times. *IIE Transactions*, 51(11), 1217-1235. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1555727>
- [36] 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. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101822>
- [37] Vaisi, B. A. H. A. R. E. H., Farughi, H., & Raissi, S. (2020). Multi-Objective Optimal Model for Task Scheduling and Allocation in a Two Machines Robotic Cell Considering Breakdowns. *WSEAS transactions on information science and applications*, 17, 1-8. <https://doi.org/10.37394/23209.2020.17.a025103-920>
- [38] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2021). Utilization of response surface methodology and goal programming based on simulation in a robotic cell to optimize sequencing. *Journal of quality engineering and management*, 10(4), 327-338.
- [39] Vaisi, B., Farughi, H., Raissi, S., & Sadeghi, H. (2023). A bi-objective optimal task scheduling model for two-machine robotic-cell subject to probable machine failures. algorithm for cyclic flowshop scheduling in a robotic cell. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 500-508. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00272-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00272-X)
- [12] Brauner, N., & Finke, G. (2001). Cycles and permutations in robotic cells. *Mathematical and Computer Modelling*, 34(5-6), 565-591. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(01\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(01)00084-X)
- [13] Kats, V., Levner, E., & Meyzin, L. (1999). Multiple-part cyclic hoist scheduling using a sieve method. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(4), 704-713. <https://doi.org/10.1109/70.781993>
- [14] Che, A., Zhou, Z., Chu, C., & Chen, H. (2011). Multi-degree cyclic hoist scheduling with time window constraints. *International journal of production research*, 49(19), 5679-5693. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.503200>
- [15] Zhou, Z., Che, A., & Yan, P. (2012). A mixed integer programming approach for multi-cyclic robotic flowshop scheduling with time window constraints. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3621-3629. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.032>
- [16] Li, X., & Fung, R. Y. (2014). A mixed integer linear programming solution for single hoist multi-degree cyclic scheduling with reentrance. *Engineering Optimization*, 46(5), 704-723. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2013.795560>
- [17] Elmi, A., & Topaloglu, S. (2016). Multi-degree cyclic flow shop robotic cell scheduling problem: Ant colony optimization. *Computers & Operations Research*, 73, 67-83. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.007>
- [18] Lee, J. H., & Kim, H. J. (2022). Reinforcement learning for robotic flow shop scheduling with processing time variations. *International Journal of Production Research*, 60(7), 2346-2368. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1887533>
- [19] Che, A., Kats, V., & Levner, E. (2017). An efficient bicriteria algorithm for stable robotic flow shop scheduling. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 964-971. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.033>
- [20] Kumar, S., Ramanan, N., & Sriskandarajah, C. (2005). Minimizing cycle time in large robotic cells. *IIE Transactions*, 37(2), 123-136. <https://doi.org/10.1080/07408170590885279>
- [21] Joo, Y. J. (2009). Operational optimization of an automated electrical die sorting line with single-wafer transfer. Master's thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- [22] Wu, N., & Zhou, M. (2011). Schedulability analysis and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(1), 203-209. <https://doi.org/10.1109/TASE.2011.2160452>
- [23] Kim, H. J., Lee, J. H., & Lee, T. E. (2013). Noncyclic scheduling of cluster tools with a branch and bound algorithm. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(2), 690-700. <https://doi.org/10.1109/TASE.2013.2293552>
- [24] Wu, X., Yuan, Q., & Wang, L. (2020). Multiobjective differential evolution algorithm for solving robotic cell scheduling problem with batch-processing machines. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 18(2), 757-775. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2969469>
- [25] Vaisi, B., Farughi, H., & Raissi, S. (2020). Schedule-allocate and robust sequencing in three-machine robotic cell under breakdowns. *Mathematical problems in engineering*, 2020, 1-24.

- [41] Rahmani, D. (2017). A new proactive-reactive approach to hedge against uncertain processing times and unexpected machine failures in the two-machine flow shop scheduling problems. *scientia Iranica*, 24(3), 1571-1584. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4136>
- [40] Jalali, A. & Gholami, S., (2018). Mathematical modeling of m-machine and k-unit robotic cell problem in workshop flow environment, 16th International Industrial Engineering Conference, Tehran.
- Journal of applied research on industrial engineering, 10(1), 141-154.





DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2024.28988.2159>

## Robotic Cell Scheduling with a Proactive–Reactive Approach, Considering Machine Breakdown

Arash Jalali<sup>1</sup>, Saiedeh Gholami<sup>2\*</sup>

1. PhD student, Department of System Modeling and Data Analysis, Faculty of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of System Modeling and Data Analysis, Faculty of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

#### **Article history:**

Received 23 February 2024

Accepted 12 June 2024

#### **Keywords:**

Robotic Cell Scheduling  
Proactive-Reactive Scheduling  
Unexpected Disturbance  
Stability  
Robustness

### ABSTRACT

In this paper, we try to provide a schedule for robotic cells in the event of a machine breakdown by using a proactive -reactive approach. We first develop a proactive model for a robotic m-machine cell under the condition of no disturbance. After the machine breakdown, we provide reactive programming in two time periods during the repair and after the repair of the broken machine. Finally, by stating the criteria of stability and Robustness in a robotic cell, we evaluate the efficiency of the presented model with a numerical example.

\* Corresponding author. S. Gholami  
Tel.: 021-84063246; E-mail address: [s\\_gholami@kntu.ac.ir](mailto:s_gholami@kntu.ac.ir)