

# بهینه‌سازی مقدار کالای در جریان ساخت با توجه به عدم ظرفیت یکسان ماشین‌آلات و تعمیرات اضطراری در سیستم‌های تولیدی پیوسته

الهه کاردان (کارشناس ارشد)

سید محمدحسین حاجتی\* (استادیار)

گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۵ (دوره ۱-۳۲، شماره ۲/۱، ص. ۱۱۹-۱۲۶، یادداشت فنی)

افزایش بهره‌وری یکی از عمده‌ترین اقدامات مورد توجه هر سازمان است. تعیین سطح بهینه‌ی موجودی در انبارها باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری می‌شود. در این مقاله یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی به منظور کاهش میزان موجودی کالای در جریان ساخت در سیستم‌های تولیدی پیوسته با توجه به عدم یکسان بودن ظرفیت ماشین‌آلات از یک طرف و توقفات ماشین‌آلات از طرف دیگر ارائه شده است. از آنجا که در این نوشتار از یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی استفاده شده، می‌توان مطمئن بود که میزان موجودی بین کارگاهی تعیین شده در این روش ایده‌آل بوده و با مثال عددی این مدل حل شده است. مدل پیشنهادی را می‌توان برای تعیین سطح بهینه‌ی موجودی بین کارگاهی در تمامی واحدهای برخوردار از سیستم تولیدی پیوسته به کار برد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم تولیدی پیوسته، موجودی کالای نیمه‌ساخته، انبار، توقفات اضطراری.

el.kardan89@gmail.com  
mhh@iaushiraz.net

## ۱. مقدمه

از موجودی بهینه است و آیا به خاطر حل این مسائل می‌توان حجم این موجودی را بسیار زیاد در نظر گرفت. در این رابطه باید کلیه هزینه‌های مترتب بر انبار از جمله فضای اختصاصی، تجهیزات انبار، احتمال ضایع شدن کالا، هزینه‌ی نگهداری و غیره را در نظر گرفت. موارد ذکر شده، به خصوص در رابطه با فضایی که آن را «انبار» می‌نامیم، ممکن است صادق باشد ولی برای سیستم‌های تولیدی پیوسته که اصولاً فضایی به نام انبار کالای نیمه‌ساخته یا انبار کالای در جریان ساخت ندارند زیاد صدق نمی‌کند. در این سیستم‌ها هر قدر میزان کالای در جریان ساخت کم تر باشد، به‌گونه‌ی که لطمه‌ی به تولید نخورد، بهتر و مطلوب‌تر است زیرا زمان تکمیل محصول و سرمایه‌ی راکد را کاهش داده، بر سرعت تولید می‌افزاید، و بهره‌وری و در نتیجه سود کارخانه را افزایش می‌دهد. در این تحقیق سعی شده با توجه به متغیرهای موجود در هر واحد تولیدی یک مدل ریاضی ارائه شود تا این مقدار به کم‌ترین مقدار ممکن در سیستم‌های تولیدی پیوسته برسد.

## ۱.۱. پیشینه‌ی تحقیق

تحقیقات گوناگونی در زمینه‌ی نقش کالای در جریان ساخت در فرایند تولید انجام شده که بخشی از آن در ادامه ارائه می‌شود.

در بررسی ارتباط علمی بین کالای در جریان ساخت<sup>۱</sup> (کالای نیمه‌ساخته) و بهره‌وری تولید<sup>۲</sup>، از پیشینه‌ی ۵۲ شرکت ژاپنی سازنده‌ی خودرو ژاپنی برای ارزیابی

اقلام مربوط به محصولات در کارخانه معمولاً به سه شکل وجود دارد:<sup>۱</sup> ۱. مواد اولیه‌ی کارخانه که ممکن است محصول کارخانه‌های دیگر باشد، یا به صورت خام در طبیعت وجود داشته باشد و خریداری شود؛ ۲. کالای در جریان ساخت که ماحصل انجام اندکی عملیات روی مواد اولیه‌ی کارخانه هستند ولی هنوز به محصول کامل تبدیل نشده و برای فروش آماده نشده‌اند؛ ۳. محصول تولیدی کامل. تمامی سیستم‌های تولیدی در کارخانه‌های ایران دارای انبار هستند و از سازوکار انبار به عنوان عاملی برای پوشش مشکلاتشان -- تولیدی، فنی، یا مسائل مربوط به کنترل کیفی و حتی مسائل مربوط به تورم در مورد اقلام خریدنی -- از آن استفاده می‌کنند.

اگر این مشکلات را به عنوان مشکلات روزمره‌ی واحدهای تولیدی در نظر بگیریم موجودی انبارها در بخش‌های گوناگون -- نظیر انبار مواد اولیه، انبار کالای در جریان ساخت، یا انبار محصول -- قادر به تعدیل این مشکلات یا مخفی نگه داشتن آنها هستند. به عنوان مثال اگر موجودی انبار مواد اولیه زیاد باشد از یک طرف گران شدن این مواد مشکلی را برای مدیریت به وجود نمی‌آورد (البته در کوتاه‌مدت)، و از طرف دیگر اگر واحد تدارکات در تهیه‌ی مواد اولیه دچار مشکل شد موجودی کافی، بخش تولید را دچار مشکل نخواهد کرد. در اینجا این سؤال مطرح می‌شود که چه سطحی

\* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۴.

این ارتباط استفاده شد و نشان داده شد که رتبه‌ی بهره‌وری در طول دوره افزایش قابل توجهی داشته است. این ارتباط در مطالعات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته اما هیچ‌گاه ارزیابی آماری آن مورد بررسی قرار نگرفته بود.

در مقاله‌ی با عنوان «تولید در سیستم‌های ساخت با موجودی کالای در جریان ساخت و کنترل تولید»<sup>[۴]</sup> مطرح شده که سیستم‌های ساخت بزرگ دو هدف عمده دارند: ۱. تولید مورد انتظار؛ ۲. کمینه‌سازی کالای در جریان ساخت. در این مقاله هر دو هدف از طریق تنظیم و کنترل نرخ تولید هر ماشین بررسی شده و میزان موجودی به عنوان متغیر وابسته، نرخ تولید ماشین‌ها به عنوان متغیر قابل کنترل، و هدف تولید (تقاضا) به عنوان متغیر خروجی مد نظر قرار گرفته است. تحقیق فوق نشان داد که مدل پیشنهادی کالای در جریان ساخت را نسبت به دیگر روش‌ها کاهش می‌دهد، و نیز نتیجه‌گیری شد که این روش می‌تواند راه‌حل خوبی برای سیستم‌های تولید بزرگ باشد.

در مطالعه‌ی دیگر<sup>[۴]</sup> یک سیستم تولیدی پیوسته ترکیبی و سه‌مرحله‌ی، با توجه به هزینه‌های راه‌اندازی و محدودیت‌های ماشین‌آلات و میزان تولید برای هر دسته تولیدی مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور محدودیت‌ها و معیارهای واقعی در یک کارخانه‌ی بستنی‌سازی مورد توجه قرار گرفت تا شکاف بین نظریه و عمل کاهش یابد. روش انتخابی در مطالعه‌ی فوق یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بود، و دو روش ابتکاری نیز توسعه داده شد که نهایتاً یکی از آن‌ها برای کارخانه‌ی بستنی‌سازی پیشنهاد شد. در تحقیق یادشده تابع هدف مسئله عدد صحیح مختلط، بیشینه‌سازی تابع اولویت تاریخ تحویل مد نظر قرار گرفت. در ۹ محدودیت تعریف شده عمدتاً محدودیت‌های مربوط به ماشین‌آلات و میزان تولید مد نظر قرار گرفت.

در مقاله‌ی دیگر<sup>[۵]</sup> با عنوان «کالای در جریان ساخت محدودشده» تفاوت بین کانبان و کانویپ<sup>۲</sup> بررسی شده و شبیه‌سازی در یک زنجیره‌ی تأمین کوچک - طوری که مقدار کالای در جریان ساخت محدود باشد - مطالعه شده است. زنجیره‌ی تأمین مورد نظر شامل ۵ ماشین است که به هم مربوط بوده و زمان‌های تولید احتمالی دارند. در حالت‌های در نظر گرفته شده در این مطالعه تعداد کارها و فضای انبار محدود است. محدودیت‌ها هم به روش کانبان و هم به روش کانویپ طراحی شدند و نتیجه این بود که کنترل به کمک کانویپ دارای تولید و خروجی نهایی بیشتری است ولی به علت توقف بیشتر کارها در سیستم، زمان تکمیل کارها بیشتر می‌شود. در عوض روش کانبان فضای کم‌تری نسبت به روش دیگر نیاز داشت. هر دو آن‌ها بیشترین کالای در جریان ساخت (و نه میانگین آن را) کنترل می‌کردند. اگر سیستم فشاری یا کششی باشد مقدار کالای در جریان ساخت محدود که زمان تأخیر را کاهش دهد مهم‌تر است. نهایتاً محققین اعلام کردند که روش کنترل کانویپ نسبت به کنترل کانبان در نظریه اولویت دارد ولی در عمل راهنمایی برای اجرای کانویپ وجود ندارد.

محققین کمینه‌سازی موجودی کالای در جریان ساخت را با استفاده از منطق فازی در برنامه‌ریزی تلفیقی جریان کارگاهی بررسی کردند.<sup>[۶]</sup> آنان در مدل پیشنهادی برای در نظر گرفتن شرایط تولید در محیط واقعی، عامل عدم اطمینان را از طریق میجث فازی به مسئله اضافه کرده و کمینه‌سازی کالای در جریان ساخت را دنبال کردند. محققین بر این باورند که دست‌یابی به کم‌ترین موجودی کالای در جریان ساخت در محیط تولیدی بسیار مهم است و جریان کارگاهی تلفیقی نیز از این موضوع مستثنی نیست. موجودی کالای در جریان ساخت منبع مهم ایجاد گلوگاه در یک خط تولید کارگاهی است. برای ایجاد یک جریان آرام مواد در سیستم تولید و کاهش نگه‌داری مواد در کارگاه، نگه‌داری کالای در جریان ساخت در سطح کمینه بسیار

ضروری است. هزینه‌ی بازرسی، ذخیره‌سازی، نگه‌داری مواد، جابه‌جایی موجودی و ریسک خرابی و ضایعات را نیز می‌توان به میزان قابل‌توجهی از طریق کاهش موجودی کالای در جریان ساخت کاهش داد. مدل پیشنهادی این مقاله باعث کاهش کالای در جریان ساخت می‌شود و می‌توان از آن در هر نوع جریان کارگاهی، خط مونتاژ، یا خطوط خودکارسازی تولید بهره‌مند شد.

محققین دیگری نیز کمینه‌سازی کالای در جریان ساخت (WIP) در سیستم‌های تولید پیوسته‌ی ترکیبی را با استفاده از منطق فازی به منظور مقابله با عدم اطمینان مورد بحث قرار دادند.<sup>[۷]</sup> آن‌ها در مقاله‌ی خود بر قابلیت اطمینان ماشین‌آلات برای برنامه‌ریزی بیشتر تأکید کردند و در حل مسئله از نرم‌افزار متلب، گزینه‌ی فازی به منظور زمان‌بندی، و تخصیص کارها به ماشین‌آلات در مراحل گوناگون استفاده شد. هدف آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های «کمینه‌سازی موجودی در جریان ساخت» بود؛ و بدین منظور بر مسائل با اندازه‌ی کوچک متمرکز شدند. به عنوان مثال در یکی از مثال‌های عددی فرضی ارائه‌شده سه کار و سه ماشین و پنج مرحله را مد نظر قرار دادند؛ در برنامه‌ریزی نیز نوبت‌کاری را هشت ساعت منظور کردند.

در مقاله‌ی «بهینه‌سازی کالای در جریان ساخت ثابت چندگانه مونتاژ نیمه‌هادی‌ها و کارخانه آزمون براساس ارزیابی عملکرد»<sup>[۸]</sup> مونتاژ نیمه‌هادی‌ها و آزمون آن‌ها در سیستمی با ماشین‌های روی هم افتاده<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گرفت. در این سیستم محققین سه نوع کارت برای رفع نیاز فیزیکی واحد تولید به چرخش درمی‌آوردند. مسئله‌ی بهینه‌سازی برای تعیین مقدار مناسب کالای در جریان ساخت و توزیع در سه حلقه از این نقطه نظر که مبادله‌ی بین خروجی و کالای در جریان ساخت به وجود می‌آید حل می‌شود. در مدل پیشنهادی سیستم اول به صورت یک شبکه‌ی صف حلقه‌بسته‌ی سه‌گانه مدل‌سازی می‌شود و یک روش تقریبی نیز برای اندازه‌گیری عملکرد ارائه می‌شود. در مرحله‌ی دوم یک الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به نتایج نسبتاً بهینه براساس ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مقاله‌ی دیگری با عنوان «تعیین اندازه‌ی بهینه‌ی فضای مورد نیاز برای نگه‌داری کالای در جریان ساخت»<sup>[۹]</sup> دو خط تولید با در نظر گرفتن تأخیرات و توقفات برای تعمیرات مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه یک مدل احتمالی ارائه شده که ثابت می‌کند نتایج نظری به ما اجازه می‌دهد الگوریتم دقیقی برای حل مسئله و تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی جواب‌های مسئله در شرایطی که داده‌های اولیه آشفته باشند، ارائه کنیم.

در بررسی یک روش تحلیلی برای به دست آوردن تعداد بهینه‌ی کارت کنترل مواد به منظور انتشار در سیستم پیوسته کالای در جریان ساخت (CONWIP).<sup>[۱۰]</sup> بر مسئله‌ی تنظیمات کارت‌ها برای سیستم کارگاهی که با توجه به حضور فرایند ماشین‌آلات دسته‌ی مشخص شده تمرکز شد. به منظور انجام این کنترل دو رویکرد ایستای مختلف ارائه شد: اولین رویکرد زمانی استفاده می‌شود که گلوگاه با پردازش دسته‌ی ماشین روبه‌رو باشد، و رویکرد دوم زمانی پیشنهاد می‌شود که گلوگاه یکی دیگر از ماشین‌های در حال کار باشد. در این سیستم هیچ‌کدام از کارها بدون داشتن کارت مجوز انجام نمی‌شود، بنابراین مقدار کلی کالای در جریان ساخت در خط تولید برابر تعداد کارت‌های موجود است. به بیان دیگر سیستم CONWIP را می‌توان به عنوان سیستم فرایند کلی از یک کانبان تک‌سلولی در نظر گرفت؛ یعنی به محض این که مصرف‌کننده‌ی نهایی موجودی محصول نهایی را جمع‌آوری کرد اولین ماشین این زنجیره مجاز به تولید بخش دیگر است. در هر دو حالت، مدل مناسب را می‌توان با بهینه‌کردن عملکرد جریان کاری از طریق بیشینه‌سازی خروجی یا کمینه نگه‌داشتن کالای در جریان ساخت به دست آورد. ویژگی اصلی این مدل عبارت است از: تعیین شماره کارت مورد نیاز که از مقایسه‌ی زمان پردازش ماشین برای دسته و زمان صرف

## ۲. روش تحقیق

در زمان طراحی یک واحد صنعتی انتخاب صحیح ماشین آلات از موارد مهمی است که طراح در نظر می‌گیرد. در این انتخاب، ظرفیت ماشین آلات و تعداد آن‌ها از مواردی است که مستقیماً به ظرفیت تولیدی مورد انتظار بستگی دارد. در سیستم‌های تولیدی کارگاهی یا گروهی، و به‌طور کلی متعادل کردن خط تولید غیر پیوسته‌ی بیشتر از طریق برنامه‌ریزی صحیح ماشین آلات و تعیین تعداد نوبت‌کاری و تغییر در برنامه تولیدی میسر می‌شود. در سیستم‌های تولیدی پیوسته اما، به دلیل خصوصیت پیوسته بودن فرایند کار و عدم وجود فضایی به نام انبار کالای در جریان ساخت، این توازن خطوط از طریق انتخاب صحیح ظرفیت ماشین آلات و تعداد دقیق آن‌ها میسر می‌شود. در هر حال ماشین آلات یک واحد تولیدی پیوسته، ظرفیت دقیق یکسان ندارند و تفاوت‌هایی دارند که این عدم هماهنگی باید از طریق تنظیم سرعت ماشین‌ها (در صورت امکان) یا نگاه‌داری مقدار موجودی بین کارگاهی تعادل و هماهنگی را به وجود آورد. این مشکل زمانی در این سیستم‌ها حاد می‌شود که یکی از ماشین‌ها متوقف شود؛ از یک طرف ماشین‌های ماقبل به‌خاطر پدیده‌ی توقف جریان مواد<sup>۷</sup> و از طرف دیگر ماشین‌های بعدی به‌خاطر پدیده‌ی کمبود مواد<sup>۸</sup> پس از مدت‌زمان کوتاهی (بسته به میزان موجودی بین کارگاهی) متوقف می‌شوند. از این لحاظ انتخاب دقیق و صحیح این میزان موجودی در جریان ساخت به‌منظور عدم توقف ماشین‌های قبلی و بعدی به‌خاطر توقف اضطراری یک ماشین از یک طرف و یکسان نبودن ظرفیت ماشین‌ها از طرف دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است. ارائه‌ی یک مدل ریاضی که تمامی این پارامترها را در نظر بگیرد و مقدار بهینه‌ی این موجودی را تعیین کند از مواردی است که در ادامه به آن بیشتر خواهیم پرداخت.

## ۱.۲. مفروضات<sup>۹</sup>

مفروضات لحاظ شده برای حل مدل مورد نظر عبارت‌اند از:

۱. از هر ماشین یک عدد در برنامه‌ریزی منظور شده است.
۲. میزان تولید مطلوب روزانه مشخص است MPS<sup>۱۰</sup>.
۳. تعداد ماشین‌آلات مشخص است.
۴. میزان تولید هر ماشین در ساعت مشخص است.
۵. کل زمان مفید روزانه مشخص و ۷٫۵ ساعت در نظر گرفته شده است.
۶. بیشترین زمان توقف ماشین‌ها در یک روز به‌خاطر توقفات اضطراری از سابقه‌ی تعمیر ماشین‌آلات مشخص است.
۷. محدودیت فضا برای نگاه‌داری قطعات نیمه‌ساخته منظور نشده است.

## ۲.۲. واژه‌نگاری

به‌منظور ارائه‌ی مدل مورد نظر از واژه‌های زیر استفاده شده است:

$m_i$ : نام ماشین  $i$ ام ( $i = ۱, ۲, ۳, \dots$ )؛

$S_{mi}$ : تعداد قطعه‌ی ذخیره‌شده روزانه برای ماشین  $i$ ام برای برنامه اولیه ( $D$ ) یا مجهولات اولیه؛

$m$ : تعداد ماشین‌آلات؛

$i$ : شماره ماشین؛

$P_{mi}$ : میزان تولید در ساعت ماشین  $i$ ام؛

شده توسط آخرین آیتیم آن دسته برای بستن حلقه‌ی پردازش مشخص می‌شود. در مطالعه‌ی دیگر<sup>[۱۱]</sup> توازن خطوط مونتاژ مأموریتی بسیار مهم برای صنایع تولیدی به‌منظور بهبود بهره‌وری توسط کمیته‌سازی چرخه‌ی زمانی و نیز تعداد ایستگاه‌های کاری در نظر گرفته شده است. مسائل بالانس کردن خطوط مونتاژ از طریق مدیریت خط به‌منظور دست‌یابی به زمان مساوی در هر ایستگاه کاری میسر است.

صنایع مکانیکی، به‌خصوص صنایع خودروه که دارای خطوط مونتاژند، به‌شدت وابسته به سرپرست خط تولید هستند و در غیاب سرپرست با مشکلات جدی روبرو می‌شوند. غیبت‌های زیاد منجر به ایجاد گلوگاه در خط تولید و منجر به تصمیم‌گیری غیرمؤثر می‌شود. نرم‌افزار «موتور ابزار بالانس خط» به‌عنوان راهی مؤثر برای متعادل‌سازی خط تولید به کار می‌رود، و به‌طور مؤثر به پیش‌بینی شرایط گوناگون در ایستگاه کاری می‌پردازد. این نرم‌افزار غیر از موازنه‌ی خط مرزایی نامحسوس دیگری برای اپراتور -- از قبیل پایگاه داده موجودی و سوابق تولید به‌موقع -- را نیز فراهم می‌کند.

محققین موضوع زمان‌بندی در سیستم‌های تولیدی پیوسته را با ۱۰ کار و ۱۰ ماشین به روش‌های ابتکاری پالمر و گوپا مورد بررسی قرار دادند.<sup>[۱۲]</sup> آن‌ها یک مسئله‌ی فرضی با اندازه‌ی ذکرشده در بالا را با هدف کمیته‌سازی دوره‌ی ساخت، به دو روش حل کردند و چون به روش پالمر به عدد ۹۳ و به روش گوپا به عدد ۱۰۳ رسیدند نتیجه‌گیری کردند که روش پالمر برای کمیته‌سازی دوره‌ی ساخت بهتر از روش گوپاست. آن‌ها در مقاله‌شان نقش و اهمیت زمان‌بندی را در سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر (FMS)<sup>۴</sup> نیز در محیط مجتمع ساخت کامپیوتری (CIM)<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند و در نهایت، با رسم نمودار گانت برای هر دو روش ترتیب‌بندی و زمان‌بندی را نشان دادند.

مطالعات بعدی<sup>[۱۳]</sup> نشان داد که برای تصمیم‌گیری بهتر در زمینه‌ی نگاه‌داری ماشین‌آلات باید ارتباطی مناسب بین موجودی کالای نیم‌ساخته با کالای تمام‌شده و تعداد نوبت‌های کاری که ماشین مشغول به کار است برقرار شود. چنانچه این ارتباط وجود داشته باشد هزینه‌های عملیاتی بلندمدت به‌میزان قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت. علاوه بر این بهینه‌سازی مدل با اجرای محدودیت‌ها روی پارامترها به دست می‌آید. در این مطالعه دیدگاه نگاه‌داری کالای در جریان ساخت یا از دست دادن سفارش نیز بررسی شد. در مدل یادشده هزینه‌های نگاه‌داری کالای در جریان ساخت، هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه (PM)<sup>۶</sup> و هزینه‌های آماده نبودن ماشین‌آلات نیز در آن لحاظ شد. مرزایی بهینه‌سازی به‌کمک مثال عددی توسط مدل برنامه‌ریزی خطی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

پژوهش‌گران در مطالعات خود به مدل‌سازی زمان چرخه و میزان بازده از طریق شبیه‌سازی گسترده پرداختند.<sup>[۱۴]</sup> زمان چرخه‌ی کوتاه‌تر و نرخ توان بالاتر از اهداف اولیه‌ی هر صنعت از جمله کارخانه‌های اتوماتیک است. یک روش معمول برای کاهش زمان چرخه، کاهش کالای در جریان ساخت است، اما این اقدام ممکن است میزان توان را نیز کاهش دهد. در نوشتار یادشده یک روش ابتکاری سالم عملی براساس مدل ابزار زمانی برای بالانس هر دو (زمان چرخه و میزان توان) ارائه می‌شود. این الگوریتم فاکتورهایی را در نظر می‌گیرد که در کالای در جریان ساخت موجود است، و نیز محدودیت‌های خود در کارخانه را در نظر می‌گیرد. یکی از بسترهای شبیه‌سازی کامپیوتر براساس یک کارخانه‌ی نیمه‌هادی ساخته شد تا این الگوریتم را بررسی کند. نتایج این شبیه‌سازی و آزمایش‌های کامپیوتری پیشنهاد می‌کند که سطح کالای در جریان ساخت محاسبه‌شده با این الگوریتم می‌تواند بالانس مناسبی بین زمان چرخه و میزان توان ایجاد کند.

$T$ : کل زمان مفید روزانه؛

$R_{mi}$ : بیشترین زمان توقف ماشین  $i$ ام در روز؛

$D$ : تقاضای روزانه‌ی اولیه که از مقداری نمی‌تواند بیشتر باشد (MS)<sup>۱۱</sup>؛

$D_{fi}$ : میزان تولید نهایی برنامه‌ریزی شده MPS؛

$S_{fmi}$ : ذخیره‌ی نهایی برای ماشین  $i$ ام یا مجهولات نهایی.

### ۳.۲. ارائه‌ی مدل پیشنهادی

با توجه به اصطلاحات تعریف شده روابط ۱ تا ۴ را می‌توان نوشت. مقدار تابع هدف و محدودیت‌های مسئله نیز به شرح زیر بیان می‌گردند:

$$\min .S = \sum_{i=1}^m S_{mi} \quad (1)$$

$$S.t.o : P_{mi}(T - R_{mi}) + S_{mi} \geq D \quad (2)$$

$$S_{fmi} = S_{mi} - \min_i(S_{mi}) \quad (3)$$

$$D_{fi} = D - \min_i(S_{mi}) \quad (4)$$

تابع هدف در رابطه‌ی ۱ باعث می‌شود مجموع ذخیره‌ی موجودی‌های نیمه‌ساخته در تمامی ایستگاه‌های کاری کمینه شود. در رابطه‌ی ۲ علامت بزرگ‌تر یا مساوی اجبار می‌کند که کم‌ترین میزان تولید به اندازه‌ی تقاضای روزانه باشد. رابطه‌ی شماره ۳ ما را ملزم می‌سازد که حداقل یکی از ذخیره‌های احتیاطی صفر شود. و رابطه‌ی ۴ میزان تولید نهایی برنامه‌ریزی شده را محاسبه می‌کند.

تقاضای روزانه‌ی اولیه همان میزان درخواستی است که واحد تولید با آن روبه‌روست، ولی به دلیل محدودیت‌های واحد تولیدی امکان تولید آن در شک و تردید است؛ ممکن است کاملاً قابل تولید نباشد، ولی میزان تولید نهایی میزان تولیدی است که با توجه به محدودیت‌ها محاسبه و تعیین می‌شود.

### ۳. مثال عددی اول

داده‌های مسئله‌ی مورد نظر عبارت است از:

-- تعداد ماشین‌آلات ۴ عدد است.

-- ظرفیت ماشین‌آلات در ساعت به ترتیب برابر است با ۲۰، ۳۰، ۱۵ و ۲۰ که نشان می‌دهد ماشین سوم که کم‌ترین میزان تولید در ساعت را دارد گلوگاه است و ماشین شماره ۲ با ۳۰ واحد تولید در ساعت بیشترین سرعت را دارد.

-- حداکثر توقفات اضطراری روزانه که برای این ماشین‌ها پیش آمده یا پیش‌بینی شده عبارت است از ۰/۵ ساعت برای ماشین اول، ۱ ساعت برای ماشین دوم، صفر ساعت برای ماشین سوم و ۲ ساعت برای ماشین چهارم. در این رابطه باید توضیح داد که اگر در سابقه تعمیرات ماشین، دستگاهی زمان طولانی مثلاً ۶ ساعت یا حتی ۲ روز دچار توقف شود (هرچند این زمان طولانی در سیستم تولید پیوسته باعث توقف کل خط تولید می‌شود)، می‌توان دوره (افق) برنامه‌ریزی را به جای ۸ ساعت (مطابق این مثال) هر عدد دیگری مثلاً ۴۴ ساعت در نظر گرفت. برنامه‌ریزی هشت‌ساعته معادل یک نوبت‌کاری، و ۴۴ ساعت معادل یک هفته‌ی کاری است.

-- زمان مفید کارکرد روزانه ۷/۵ ساعت منظور شده است.

-- حداکثر میزان تقاضای روزانه ۳۰۰ واحد در نظر گرفته شود.

حل: قبل از حل مسئله به کمک مدل پیشنهادی توضیحاتی در رابطه با مسئله داده می‌شود. میزان ساعت کارکرد مفید ماشین اول برابر است با:

$$8 - 1.5 = 7.5$$

که به همین ترتیب برای دیگر ماشین‌ها به ترتیب ۸، ۷ و ۶ خواهد بود. در وقت عادی ماشین اول ۱۵۰ عدد تولید می‌کند.

$$7.5 \times 20 = 150$$

و به همین ترتیب میزان تولید دیگر ماشین‌ها عبارت خواهد بود از:

$$7 \times 30 = 210 \quad \text{ماشین دوم}$$

$$8 \times 15 = 120 \quad \text{ماشین سوم}$$

$$6 \times 20 = 120 \quad \text{ماشین چهارم}$$

حداکثر میزان تولید روزانه ۲۱۰ عدد است که متعلق به ماشین شماره ۲ است. در این صورت میزان کمبود تولید دیگر ماشین‌ها عبارت خواهد بود از:

$$210 - 150 = 60 \quad \text{ماشین اول}$$

$$210 - 120 = 90 \quad \text{ماشین سوم}$$

$$210 - 120 = 90 \quad \text{ماشین چهارم}$$

میزان اضافه‌کاری این ماشین‌ها برای این که کل خط متعادل شود عبارت است از:

$$60 \div 20 = 3 \quad \text{ماشین اول} \quad \text{ساعت}$$

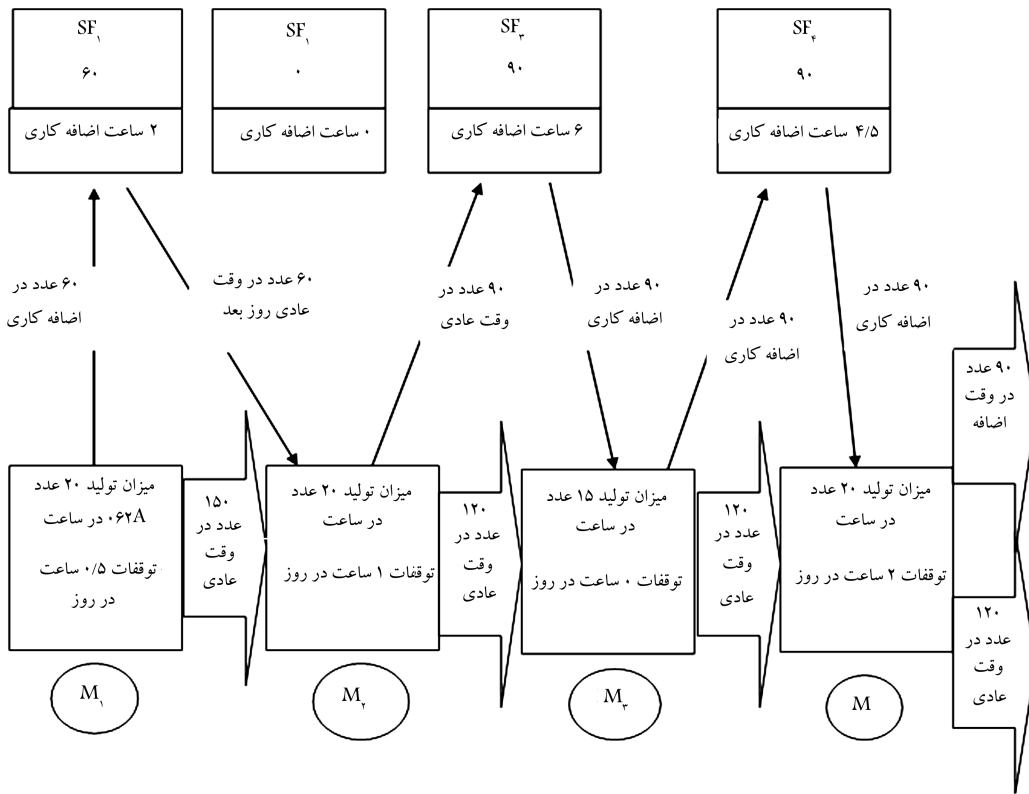
$$\text{ماشین دوم} \quad \text{صفر ساعت}$$

$$90 \div 15 = 6 \quad \text{ماشین سوم} \quad \text{ساعت}$$

$$90 \div 20 = 4.5 \quad \text{ماشین چهارم} \quad \text{ساعت}$$

در حقیقت با این میزان اضافه‌کاری تعیین شده کل تولید روزانه ۲۱۰ عدد خواهد بود. ماشین اول در وقت عادی ۱۵۰ عدد تولید کرده و با ۳ ساعت اضافه‌کاری ۶۰ عدد تولید می‌کند که کل تولید ۲۱۰ عدد خواهد بود. ماشین دوم در ۷ ساعت ۲۱۰ عدد تولید می‌کند که ۱۵۰ عدد میزان تولید ماشین شماره یک و ۶۰ عدد تولید آن را در وقت اضافه‌کاری که جمع شده است در مدت ۷ ساعت تولید می‌کند. ماشین سوم در ۸ ساعت وقت عادی ۱۲۰ عدد تولید کرده و ۹۰ عدد دیگر که در ۷ ساعت عادی در ذخیره‌ی ماشین دوم باقی‌مانده بود در ۶ ساعت وقت اضافه‌کاری تکمیل کرده و به ماشین چهارم منتقل می‌کند. ماشین شماره ۴ نیز در وقت عادی ۱۲۰ عدد تولید کرده که از ماشین شماره ۳ مستقیماً گرفته و در وقت ۴/۵ ساعت اضافه‌کاری ۹۰ عدد ذخیره‌شده را تکمیل می‌کند. این فرایند را می‌توان به صورت ترسیمی در شکل ۱ مشاهده کرد.

در شکل ۱ میزان تولید هر ماشین در وقت اضافه و میزان ذخیره‌سازی آن، و نیز میزان تولید در وقت عادی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود تعداد ۱۵۰ واحد در وقت عادی بین ماشین‌ها جریان یافته و هر دستگاه با توجه به ظرفیت تولید و میزان توقف اضطراری آن در روز میزان اضافه‌کاری‌اش مشخص شده است. نهایتاً میزان ۱۲۰ واحد تولید در وقت عادی و ۹۰ واحد در وقت اضافه از انتهای خط تولید خارج می‌شود.



شکل ۱. فرایند تولید مثال اول با نشان دادن مقادیر ذخیره‌ی بین کارگاهی و اضافه‌کاری روزانه.

$$S_2 \geq 180$$

$$S_2 \geq 180$$

$$\text{Minimum } S_i = S_r = 90$$

بنابراین:

$$S_1 = 150$$

$$S_2 = 90$$

$$S_3 = 180$$

$$S_4 = 180$$

$S_i$ های محاسبه‌شده را در رابطه‌ی ۳ قرار داده، مجهولات نهایی را حساب کرده و به‌کمک رابطه‌ی ۴ میزان تولید نهایی را محاسبه می‌کنیم.

$$S_{f_1} = 150 - 90 = 60$$

$$S_{f_2} = 90 - 90 = 0$$

$$S_{f_3} = 180 - 90 = 90$$

$$S_{f_4} = 180 - 90 = 90$$

$$D_{f_i} = 300 - 90 = 210$$

حل مسئله به‌کمک مدل پیشنهادی: در این مسئله معلومات و مجهولات ما

عبارت‌اند از:

داده‌ها:

$$P_1 = 20 \quad P_2 = 30 \quad P_3 = 15$$

$$P_4 = 20 \quad t_1 = 7,5 \quad t_2 = 7$$

$$t_3 = 8 \quad t_4 = 6$$

$t = T - R_i$  که زمان مفید کارکرد روزانه مساوی است با:

$$T = 8 \quad R_1 = 0,5 \quad R_2 = 1$$

$$R_3 = 0 \quad R_4 = 2$$

مجهولات اولیه:

$$S_i \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$\min S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

$$S.t.o : 20(8 - 7,5) + S_1 \geq 300$$

$$30(8 - 1) + S_2 \geq 300$$

$$15(8 - 8) + S_3 \geq 300$$

$$20(8 - 2) + S_4 \geq 300$$

$$S_1 \geq 150$$

$$S_2 \geq 90$$

#### ۴. مثال عددی دوم

$$M = 6$$

$$P_1 = 100$$

$$P_2 = 120$$

$$P_3 = 80$$

$$P_4 = 120$$

$$P_5 = 90$$

$$P_6 = 100$$

$$R_1 = 0,5$$

$$R_2 = 1$$

$$R_3 = 1$$

$$R_4 = 1,5$$

$$R_5 = 1$$

حل:

$$M_7 = 0 \quad \text{ساعت}$$

$$M_7 = 280 \div 80 = 3,5 \quad \text{ساعت}$$

$$M_7 = 60 \div 120 = 0,5 \quad \text{ساعت}$$

$$M_5 = 210 \div 90 = 2,3 \quad \text{ساعت}$$

$$M_6 = 240 \div 100 = 2,4 \quad \text{ساعت}$$

سیستم‌های تولیدی پیوسته (که در این مقاله مورد توجه است) معمولاً در واحدهای کوچک بین ۲ تا ۵ دستگاه، در واحدهای متوسط بین ۶ تا ۱۰ دستگاه، و در واحدهای بزرگ حداکثر حدود ۲۰ دستگاه است. به عنوان مثال کارخانجات کابل‌سازی با ۲۵۰ نفر نیروی انسانی که جزو صنایع متوسط است، برای تولید کابل برق از دستگاه‌های کشش، تاب، پرکننده<sup>۱۲</sup>، روکش، بسته‌بندی استفاده می‌کند، یا کارخانه‌ی تولیدکننده‌ی کاشی با ۱۲۰۰ نفر نیروی انسانی برای تولید کاشی‌های دیواری از دستگاه‌های باسکول سنگ‌شکن، آسیاب تر<sup>۱۳</sup>، مولد پودر خاک<sup>۱۴</sup>، پرس، کوره بیسکویت، لعاب‌زنی، کوره لعاب، درجه‌بندی و بسته‌بندی استفاده می‌کند که جزو صنایع بزرگ است.

با توجه به تعداد ماشین‌آلات قید شده در پاراگراف قبل، نتایج حل ۸ مسئله در اندازه‌های کوچک ( $m = 3-4-5$ ) و متوسط ( $m = 6-8-9-10-12$ ) توسط نرم‌افزار لینگو (نسخه ۱۱) در جدول ۱ ارائه شده است.

$$R_6 = 2 \quad D = 1000 \quad S_f = ? \quad D_f = ?$$

$$\text{Minimize } S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6$$

S.to :

$$100(8 - 0,5) + S_1 \geq 1000$$

$$120(8 - 1) + S_2 \geq 1000$$

$$80(8 - 1) + S_3 \geq 1000$$

$$120(8 - 1/5) + S_4 \geq 1000$$

$$90(8 - 1) + S_5 \geq 1000$$

$$100(8 - 2) + S_6 \geq 1000$$

بنابراین:

$$S_1 \geq 250$$

$$S_2 \geq 160$$

$$S_3 \geq 440$$

$$S_4 \geq 220$$

$$S_5 \geq 370$$

$$S_6 \geq 400$$

$$\text{Minimum } S = S_2 = 160$$

$$S_{f1} = 250 - 160 = 90 \quad \text{واحد}$$

$$S_{f2} = 0$$

$$S_{f3} = 440 - 160 = 280 \quad \text{واحد}$$

$$S_{f4} = 220 - 160 = 60 \quad \text{واحد}$$

$$S_{f5} = 370 - 160 = 210 \quad \text{واحد}$$

$$S_{f6} = 400 - 160 = 240 \quad \text{واحد}$$

$$D_{fi} = 1000 - 160 = 840 \quad \text{واحد}$$

میزان زمان اضافه‌کاری در روز چنین محاسبه می‌شود:

$$M_1 = 90 \div 100 = 0,9 \quad \text{ساعت}$$

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی برای تعیین اندازه‌ی مطلوب کالای در جریان ساخت در هر ایستگاه ذخیره بین ماشین‌آلات در سیستم‌های تولیدی پیوسته با توجه به توقفات اضطراری و عدم یکسان بودن ظرفیت تولیدی ماشین‌ها مورد بررسی قرار گرفت و با ۸ مثال عددی این مقادیر مجهول به دست آمد. چنانچه محققین محترم بخواهند در این زمینه تحقیق بیشتری انجام دهند می‌توان با توجه به فضایی که هر یک از کالاهای در جریان ساخت به خود اختصاص می‌دهند و فضای موجود بین هر ایستگاه کاری محدودیت‌های دیگری به مسئله اضافه کرد تا محدودیت فضای موجود نیز در نظر گرفته شده باشد. همین مسائل اگر در محیط فازی در نظر گرفته شود نیز می‌توان آن‌ها را در شرایط عدم قطعیت حل کرد.

## تقدیر و تشکر

محققین بر خود لازم می‌دانند که از واحد پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز تشکر و قدردانی به عمل آورند.

## پانویس‌ها

1. work in process (WIP)
2. constant work in process (CONWIP)
3. overlap
4. flexible manufacturing system

5. computer integrated manufacturing

6. preventive maintenance

۷. blocking: زمانی که یک ماشین به دلیل خرابی ماشین بعدی نمی‌تواند تولیدش را

تحویل بدهد و متوقف می‌شود.

۸. starving: زمانی که یک ماشین به دلیل خرابی ماشین قبلی تغذیه نشده و متوقف

می‌شود.

جدول ۱. نتیجه‌ی داده‌های ورودی و خروجی مسئله ۸

شماره مسئله	تعداد ماشین (m)	سرعت ماشین آلات (p) (عدد در ساعت)	توقفات R (دقیقه در ۸ ساعت)	برنامه ریزی تولید مادر D	WIP	WIP نهایی	اضافه کاری ot (ساعت)	برنامه ریزی تولید نهایی D <sub>f</sub>
۱	۳	۹۵	۱۰	۸۵۰	۱۰۶	۵۲	۰٫۵۴۸	۷۹۶
		۱۰۵	۲۵		۵۴	۰	۰٫۰۰۰	
		۱۰۰	۳۰		۱۰۰	۴۶	۰٫۴۶۳	
۲	۴	۱۴۰	۱۴	۱۴۰۰	۳۱۳	۶۳	۰٫۴۴۸	۱۱۵۰
		۱۵۰	۲۰		۲۵۰	۰	۰٫۰۰۰	
		۱۲۵	۱۱		۴۲۳	۱۷۳	۱٫۳۸۳	
		۱۳۰	۸		۳۷۷	۱۲۷	۰٫۹۷۹	
۳	۵	۱۱۰	۲۴	۱۲۰۰	۳۶۴	۰	۰٫۰۰۰	۸۳۶
		۹۵	۱۲		۴۵۹	۹۵	۱٫۰۰۰	
		۹۰	۳۰		۵۲۵	۱۶۱	۱٫۷۸۹	
		۱۰۰	۱۰		۴۱۷	۵۳	۰٫۵۲۷	
		۹۳	۲۵		۴۹۵	۱۳۱	۱٫۴۰۶	
۴	۶	۴۵	۱۰	۵۰۰	۱۴۸	۱۱۹	۲٫۶۴۴	۴۷۱
		۵۰	۲۰		۱۱۷	۸۸	۱٫۷۶۳	
		۶۰	۱۵		۳۵	۶	۰٫۱۰۸	
		۵۵	۲۹		۸۷	۵۸	۱٫۰۵۵	
		۶۴	۳۸		۲۹	۰	۰٫۰۰۰	
		۴۵	۱۲		۱۴۹	۱۲۰	۰٫۰۵۹	
۵	۸	۸۵	۲۵	۱۵۰۰	۸۵۵	۰	۰٫۰۰۰	۶۴۵
		۵۵	۲۰		۱۰۷۸	۲۲۳	۴٫۰۵۳	
		۶۲	۱۵		۱۰۲۰	۱۶۴	۲٫۶۴۷	
		۵۰	۱۲		۱۱۱۰	۲۵۵	۵٫۰۹۲	
		۷۳	۱۸		۹۳۸	۸۲	۱٫۱۳۰	
		۶۹	۱۲		۹۶۲	۱۰۶	۱٫۵۴۲	
		۸۰	۲۱		۸۸۸	۳۳	۰٫۴۰۷	
		۷۵	۱۶		۹۲۰	۶۵	۰٫۸۶۱	
۶	۹	۳۰	۷	۱۰۰۰	۷۶۴	۱۵۸	۵٫۲۵۶	۳۹۴
		۴۵	۱۱		۷۲۶	۱۲۱	۳٫۴۴۵	
		۴۰	۱۵		۶۹۰	۸۴	۲٫۱۰۴	
		۴۵	۲۰		۶۵۵	۴۹	۱٫۰۹۳	
		۲۸	۵		۷۷۸	۱۷۳	۶٫۱۶۱	
		۵۰	۷		۶۰۶	۰	۰٫۰۰۰	
		۴۷	۱۹		۶۳۹	۳۳	۰٫۷۰۳	
		۳۸	۱۶		۷۰۶	۱۰۰	۲٫۶۳۹	
		۴۲	۴		۶۶۷	۶۱	۱٫۴۵۲	
		۷	۱۰		۱۱۰	۱۰	۱۸۰۰	
۱۰۵	۲۰			۹۹۵	۲۲۴	۲٫۱۳۵		
۱۲۵	۱۳			۸۲۷	۵۶	۰٫۴۵۰		
۱۳۰	۵			۷۷۱	۰	۰٫۰۰۰		
۹۹	۱۴			۱۰۳۱	۲۶۰	۲٫۶۲۹		
۱۲۴	۸			۸۲۵	۵۴	۰٫۴۳۳		
۹۵	۲۵			۱۰۸۰	۳۰۹	۳٫۲۵۰		
۱۰۰	۱۲			۱۰۲۰	۲۴۹	۲٫۴۹۲		
۱۰۴	۱۵			۹۹۴	۲۲۳	۲٫۱۴۶		
۱۲۰	۱۰			۸۶۰	۸۹	۰٫۷۴۳		
۸	۱۲			۱۵۰	۲۱	۱۹۵۰		۸۰۳
		۱۵۵	۱۸	۷۵۷	۵۲		۰٫۳۳۶	
		۱۴۸	۳۰	۸۴۰	۱۳۶		۰٫۹۱۶	
		۱۴۰	۱۹	۸۷۴	۱۷۰		۱٫۲۱۴	
		۱۴۵	۱۰	۸۱۴	۱۱۰		۰٫۷۵۷	
		۱۵۶	۱۳	۷۳۶	۳۱		۰٫۲۰۱	
		۱۶۰	۲۵	۷۳۷	۳۲		۰٫۲۰۱	
		۱۵۸	۷	۷۰۴	۰		۰٫۰۰۰	
		۱۴۲	۱۵	۸۵۰	۱۴۵		۱٫۰۲۲	
		۱۳۹	۲۰	۸۸۴	۱۸۰		۱٫۲۹۴	
		۱۴۵	۸	۸۰۹	۱۰۵		۰٫۷۲۳	
۱۵۰	۳۲	۸۳۰	۱۲۶	۰٫۸۳۷				

9. assumptions
10. master production scheduling (MPS)
11. master scheduling
12. filler
13. ball mill
14. spray dryer

### منابع (References)

1. Hojjati, S.M.H., *Introduction to Production Planning and Inventory Control*, Avand Andisheh Publication, pp. 9-10 (2004).
2. Lieberman, M.B. and Demeester, L. "Inventory reduction and productivity growth: Linkages in the Japanese automotive industry", MIT Socio Technical Systems Research Center (2002).
3. Yuan, H.M. and Yaram K. "Operation of manufacturing systems with WIP inventory and production control", *CIRP Annals- Manufacturing technology*, **53**(1), pp. 361-365 (2004).
4. Ribas Vila, I. and Pascual, R.C. "A hybrid flow shop model for an ice cream production scheduling problem", *Journal of Industrial Engineering and Management*, **2**(11), pp. 60-89 (2009).
5. Pattersen, J.A. and Segerstedt, A. "Restricted WIP: A study of differences between kanban and conwip", *International Journal of Production Economics*, **118**(1), pp. 199-207 (2009).
6. Pual, S.K. and Azim, A. "Minimization of work-in-process inventory in hybrid flow shop scheduling using fuzzy logic", *International Journal of Industrial Engineering*, **17**(2), pp. 115-127 (2010).
7. Papadopoulos, H.T. and Vidalis, M.I. "Minimizing WIP inventory in reliable production lines", *International Journal of Production Economics*, **7**(2), pp.185-197, (in Persian) (2001).
8. Li, M., Shiqing, Y., George, L. and Cailhua, Z. "Optimization of a multi constant work-in-process semiconductor assembly and test factory based on performance evaluation", *Computer and Industrial Engineering*, **59**(2), pp. 314-322 (2010).
9. Bertazzi, L. "Determining the optimal dimension of a work in process storage area", *International Journal of Production Economy*, **13**(2), pp. 483-489 (2011).
10. Gabbriellib, R., Bragliaa, M., Frosolinia, M. and Zamboria, F. "CONWIP card setting in a flow-shop system with a batch production machine", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **2**, pp. 1-18 (2011).
11. Dwivedi Er., A. "An analysis and development of software for assembly line balancing problem of manufacturing industry", *International Journal of Mechanical, Automobile & Production Engineering*, **1**, pp. 1-21 (2012).
12. Agrawal, A.K. and Garg, R. "Flow shop scheduling problem for 10-jobs, 10-machines by heuristics models using makespan criterion", *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*, **2**(1), pp. 28-37 (2013).
13. Tabatabaei, A. and Borrero, J.S., "Time and inventory dependent optimal maintenance policies for single machine workstations: An MDP approach", *European Journal of Operational Research*, **228**, pp. 545-555 (2013).
14. Xiong, F. and Yao, J. "Cycle time and throughput rate modelling study through the simulation platform", *Sensors and Transducers*, **165**(2), pp. 213-220 (2014).