

تأثیر مکان گلوگاه بر معیارهای عملکردی خط تولید در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیرمشابه

نسیم نهاوندی* (دانشیار)

ابراهیم اسدی‌گنجر (دانشجوی دکتری)

محمدرضا امین‌ناصری (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۳
دوری (۳۰-۱)، شماره ۱/۱، ص. ۱۳-۲۴

گلوگاه‌ها معمولاً به عنوان منابع محدودی شناخته می‌شوند که عملکرد کل خط تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین زمان‌بندی برپایه‌ی گلوگاه را می‌توان رویکردی مفید برشمرد. از طرف دیگر یافتن بهترین مکان گلوگاه، برای معیارهای عملکردی مختلف سبب ارائه‌ی راهکارهای مناسب سرمایه‌گذاری برای افزایش ظرفیت می‌شود. در این تحقیق تأثیر مکان گلوگاه بر معیارهای C_{max} ، میانگین مدت زمان توقف کارها، متوسط زمان چرخه، متوسط زمان انجام کار و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیرمشابه مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این تأثیر یک روش ابتکاری مبتنی بر گلوگاه براساس ایده‌ی نظریه‌ی محدودیت‌ها توسعه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای حالات و مقادیر فرض شده، مکان گلوگاه بر معیارهای C_{max} و متوسط زمان چرخه تأثیرگذار نیست، در حالی که بر معیارهای میانگین مدت زمان توقف کارها، متوسط زمان انجام کار و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته مؤثر است.

واژگان کلیدی: محیط سری انعطاف‌پذیر، معیارهای عملکردی، گلوگاه‌ها،

زمان‌بندی بر پایه‌ی گلوگاه‌ها، روش ابتکاری.

n_nahavandi@modares.ac.ir
asadi_gangraj@modares.ac.ir
amin_nas@modares.ac.ir

۱. مقدمه

زمان‌بندی n کار در m مرحله به‌گونه‌ی که یک یا بیش از یک ماشین غیرمشابه در هر مرحله وجود داشته‌باشد، به عنوان مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی غیرمشابه شناخته می‌شود. در مسئله‌ی زمان‌بندی سری کلاسیک، مجموعه‌ی از کارها بر روی چند مرحله از ماشین‌ها پردازش می‌شود که در آن ترتیب ماشین‌ها یکسان است و در هر مرحله یک ماشین وجود دارد.^[۱] اما در بعضی از خطوط تولید افزایش ظرفیت یا ترازمندی خطوط تولید ضروری است. این ضرورت ایجاد می‌کند که یک یا چند ماشین به بعضی از مراحل اضافه شود؛ این مسئله‌ی جدید به نام مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر (FFS)^۱، خطوط سری انعطاف‌پذیر (FFL)^۲، خطوط سری ترکیبی (HFS)^۳ یا خطوط سری با پردازنده‌های چندگانه شناخته می‌شود. مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر در بسیاری از خطوط تولید واقعی -- نظیر خطوط مونتاژ^[۴] خطوط بسته‌بندی^[۵] خط تولید فولاد^[۶] صنایع الکترونیکی^[۷]، خطوط تولید سرامیک^[۸] و خطوط تولید شیشه^[۹] -- به‌کار می‌رود.

در مرحله وجود داشته‌باشد، به عنوان مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی غیرمشابه شناخته می‌شود. در مسئله‌ی زمان‌بندی سری کلاسیک، مجموعه‌ی از کارها بر روی چند مرحله از ماشین‌ها پردازش می‌شود که در آن ترتیب ماشین‌ها یکسان است و در هر مرحله یک ماشین وجود دارد.^[۱] اما در بعضی از خطوط تولید افزایش ظرفیت یا ترازمندی خطوط تولید ضروری است. این ضرورت ایجاد می‌کند که یک یا چند ماشین به بعضی از مراحل اضافه شود؛ این مسئله‌ی جدید به نام مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر (FFS)^۱، خطوط سری انعطاف‌پذیر (FFL)^۲، خطوط سری ترکیبی (HFS)^۳ یا خطوط سری با پردازنده‌های چندگانه شناخته می‌شود. مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر در بسیاری از خطوط تولید واقعی -- نظیر خطوط مونتاژ^[۴] خطوط بسته‌بندی^[۵] خط تولید فولاد^[۶] صنایع الکترونیکی^[۷]، خطوط تولید سرامیک^[۸] و خطوط تولید شیشه^[۹] -- به‌کار می‌رود.

در مسئله‌ی سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیرمشابه، مدت زمان فرایند کارها

پدیده‌ی گلوگاه در بسیاری از سیستم‌های تولیدی به‌طور متناوب رخ می‌دهد. در فلسفه‌ی تولید نظریه‌ی محدودیت‌ها (TOC)^۵، محققین این ایده را بیان کردند که منابع گلوگاهی عملکرد کلی خط را تحت تأثیر قرار می‌دهند.^[۱۰] روش تولید DBR^۶ که توسط پژوهش‌گران پیشنهاد شد^[۱۱] یک رویکرد زمان‌بندی متداول در محیط‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۷/۴، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۲۰، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۲۵

جدول ۱. تحقیقات مرتبط با زمان بندی بر پایه‌ی گلگاه‌ها.

مرجع	تابع هدف	محیط کاری	رویکرد حل
[۲۳]	C_{max}	سری انعطاف پذیر	روش ابتکاری
[۲۰]	C_{max}	سری انعطاف پذیر	ترکیب ابتکاری و فراابتکاری
[۲۴]	C_{max}	سری انعطاف پذیر با ماشین‌های مشابه	روش ابتکاری
[۲۵]	مجموع تأخیر کارها	سری انعطاف پذیر با ماشین‌های مشابه	روش ابتکاری
[۲۶]	C_{max}	سری انعطاف پذیر	روش ابتکاری

و CONWIP کنترل می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد این تحقیق برای بررسی این تأثیرات استفاده از روش شبیه‌سازی بوده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در سیستم MRP مکان گلگاه تأثیر معنی‌داری بر خروجی خط و موجودی حین کار ندارد اما با افزایش تعداد گلگاه در خط تولید، خروجی کاهش و موجودی حین خط افزایش می‌یابد، در حالی که با تغییر مکان گلگاه هیچ روند مشخصی روی زمان چرخه مشاهده نمی‌شود. در سیستم کانبان با تغییر مکان گلگاه تغییر معنی‌داری در خروجی خط مشاهده نمی‌شود اما هر قدر مکان گلگاه به سمت انتهای خط می‌رود موجودی حین کار و زمان چرخه افزایش می‌یابد. در سیستم مذکور با افزایش تعداد گلگاه، خروجی کاهش می‌یابد اما موجودی حین کار تأثیری نمی‌پذیرد. سرانجام در سیستم CONWIP با تغییر مکان گلگاه تأثیر معنی‌داری بر خروجی خط و زمان چرخه مشاهده نمی‌شود در حالی که با افزایش تعداد گلگاه مقدار خروجی کاهش و زمان چرخه افزایش می‌یابد. [۲۰]

چنان که در قسمت‌های قبل اشاره شد، در تمامی تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده از رویکرد شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر گلگاه استفاده شده، اما از روش ابتکاری برای حل اینگونه مسائل استفاده نشده است. از طرف دیگر، چنان که در پیشینه‌ی تحقیق بیان شد، در تمامی تحقیقات انجام شده، فقط تأثیر گلگاه بر خطوط تولید ساده که به صورت سری قرار دارند، مورد بررسی قرار گرفته، ولی تاکنون تحقیقی در محیط‌های نسبتاً پیچیده برای بررسی تأثیر مکان گلگاه، مانند محیط سری انعطاف پذیر با ماشین‌های غیرمشابه، انجام نشده است. انگیزه‌ی استفاده از این محیط کاری، علاوه بر پیچیدگی آن در محیط‌های واقعی، پرکاربرد بودن این محیط در دنیای واقعی است. در این نوشتار تأثیر مکان گلگاه‌ها بر معیارهای عملکردی خط تولید شامل C_{max} ، متوسط مدت زمان توقف کارها، متوسط زمان چرخه، متوسط زمان انجام کار، و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظریک روش ابتکاری مبتنی بر گلگاه برای بررسی این تأثیر توسعه داده شده است.

در ادامه‌ی مطالب ابتدا به تشریح روش ابتکاری بسط یافته می‌پردازیم و سپس معیارهای عملکردی توضیح داده می‌شوند. پس از آن، عوامل آزمایشی برای طراحی سناریوهای مختلف ارائه شده و در نهایت نتایج مربوط به تأثیر مکان گلگاه بر معیارهای عملکردی شرح داده می‌شود.

۲. روش ابتکاری بسط یافته

یکی از روش‌هایی که در ادبیات برای حل مسئله‌ی زمان بندی سری انعطاف پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های ابتکاری است. در این بخش یک الگوریتم ابتکاری

تولیدی دارای گلگاه است. این روش با تأکید بر زمان بندی منابع گلگاهی، منابع بالادستی و پایین دستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این روش با تعیین مرحله‌ی گلگاه در خط تولید، سرعت پردازش مرحله‌ی ابتدایی خط تولید و همچنین سایر مراحل تا مرحله‌ی گلگاه براساس سرعت مرحله‌ی گلگاه تنظیم می‌شود که با نمادهای طبل^۷ و طناب^۸ نشان داده می‌شود. از طرف دیگر برای جلوگیری از توقف کار گلگاه، مقداری بافر^۹ قبل از ماشین گلگاه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این واقعیت زمان بندی بر پایه‌ی گلگاه‌ها توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در جدول ۱ به تعدادی از این تحقیقات اشاره شده است.

چنان که اشاره شد پدیده‌ی گلگاه متناوباً در محیط‌های کاری مختلف رخ می‌دهد. بعضی از محققین در مورد تأثیر ظرفیت محدود منابع (یعنی گلگاه‌ها) بر عملکرد سیستم‌های تولید نکاتی را بیان کرده‌اند. این منابع محدود نرخ خروجی سیستم و در نتیجه قابلیت‌های شرکت را برای ایجاد درآمد محدود می‌سازند؛ در نتیجه برای بهبود خروجی این سیستم‌ها باید خروجی گلگاه‌ها بهبود یابد [۲۱] بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در محیط‌های کاری انجام شده بر این فرض پایه‌ی مبتنی‌اند که خطوط تولید واقعی کاملاً یا تا حدودی بالانس هستند. [۲۷]

علاوه بر روش ابتکاری مبتنی بر گلگاه‌ها، بعضی از محققین در خصوص تأثیر گلگاه‌ها بر معیارهای عملکردی تأکید کرده‌اند؛ مثلاً مطالعاتی در مورد تأثیر بافرها بر خطوط تولید بالانس نشده [۲۸] انجام گرفته است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد هر قدر بر شدت گلگاه اضافه شود باید ظرفیت بافر مورد نظر کم تر شود. همچنین هر قدر گلگاه شدیدتر می‌شود خروجی نیز کم تر می‌شود که برای محافظت از این خروجی مقدار موجودی کم‌تری نیاز است. [۲۸]

در مطالعات پیشین بر این نکته که شدت و مکان گلگاه بیشتر از طول خط تولید بر خروجی مؤثر است تأکید شده است. در نتیجه مکان و شدت گلگاه به عنوان دو عامل قابل کنترل برای طراحی بهترین تنظیم مورد بررسی قرار گرفت، به گونه‌ی که تأثیر منفی آنها کمینه شود. [۲۷]

محققین سعی کردند با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی و براساس عوامل قابل کنترل مختلف به مقایسه‌ی دو سیستم فشاری و کششی بپردازند. [۲۹] آنها از دو روش تاگوچی و سطح پاسخ برای یافتن ترکیب مناسبی از عوامل برای بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی استفاده کردند. از جمله عوامل قابل کنترل مد نظر «مکان گلگاه» است که برای گلگاه سه مکان (ماشین اول، ماشین سوم و ماشین پنجم) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که ماشین سوم «گلگاه» است برای هر دو سیستم فشاری و کششی بهترین تابع هدف‌ها قابل دستیابی است. [۲۹]

در سال ۱۹۹۹ تأثیر مکان گلگاه بر معیارهایی مانند خروجی خط^{۱۰}، تعداد قطعات نیمه‌ساخته^{۱۱} و زمان چرخه در سیستم‌هایی که با استفاده از MRP، کانبان

$$FR_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} P_{ijk}}{S_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

محاسبه می‌شود. صورت کسر مقدار بار کاری در هر مرحله، و مخرج کسر تعداد ماشین‌های موجود را نشان می‌دهد.

- مرحله‌یی که دارای بزرگ‌ترین مقدار FR_i است به عنوان مرحله‌ی گلوگاه انتخاب شده و با B نشان داده می‌شود. اگر چند مرحله دارای این شرایط باشد اولین مرحله‌یی که دارای FR_i بیشینه باشد به عنوان گلوگاه شناخته می‌شود.

گام ۲. زمان‌بندی برای مرحله‌ی گلوگاه B

- برای هر کار j ، مقدار R_j از رابطه‌ی:

$$R_j = \sum_{i=1}^{B-1} \min_k \{P_{ijk}\}, \quad k = 1, 2, \dots, S_i$$

محاسبه می‌شود. R_j تخمینی است از کم‌ترین زمانی که کار j برای رسیدن از ابتدای خط تولید به مرحله‌ی گلوگاه نیاز دارد.

- برای هر کار j مقدار D_j را از رابطه‌ی:

$$D_j = \sum_{i=1}^m FR_i - R_j$$

محاسبه کنید. D_j تخمینی است از کم‌ترین زمان لازم برای رسیدن کار j به انتهای خط تولید از مرحله‌ی گلوگاه.

- کارها را براساس ترتیب صعودی R_j مرتب کنید. اگر بیش از یک کار دارای مقدار مشابه R_j است، آنها را براساس ترتیب صعودی D_j مرتب کنید. اگر بیش از یک کار دارای D_j مشابه هستند از بین آنها، کاری را انتخاب کنید که بزرگ‌ترین زمان پردازش را در مرحله‌ی گلوگاه دارد؛ به عبارت دیگر کارها ابتدا براساس R_j سپس D_j و در انتها براساس بزرگ‌ترین زمان پردازش روی ماشین گلوگاه ترتیب‌بندی می‌شوند.

گام ۳. زمان‌بندی کارها در مراحل غیر گلوگاهی

مراحل غیر گلوگاهی براساس مراحل قبل و بعد گلوگاه تقسیم می‌شوند که برای زمان‌بندی، هر کدام از منطق خاصی پیروی می‌کند.

- مراحل قبل از گلوگاه

-- برای مرحله‌ی اول، مقدار \bar{P}_j از رابطه‌ی

$$\bar{P}_j = \min_k \{P_{1jk}\}, \quad k = 1, 2, \dots, S_1$$

محاسبه می‌شود. کارها را براساس ترتیب صعودی \bar{P}_j (متوسط زمان کارها در مرحله‌ی اول) مرتب کنید. اگر بیش از یک کار دارای \bar{P}_j مشابه باشد کاری انتخاب می‌شود که دارای بزرگ‌ترین زمان پردازش در مرحله‌ی گلوگاه باشد.

-- برای سایر مراحل قبل از گلوگاه، مقدار $C_{(i-1),j}$ (زمان تکمیل هر کار در مرحله‌ی قبل) و ST_{Bj} (زمان شروع هر کار در مرحله‌ی گلوگاه) محاسبه می‌شود. کارها را براساس ترتیب افزایشی $C_{(i-1),j}$ مرتب کنید؛ اگر بیش از یک کار دارای $C_{(i-1),j}$ مشابه هستند کارها را براساس ترتیب صعودی ST_{Bj} مرتب کنید. اگر بیش از یک کار دارای ST_{Bj} مشابه هستند کاری انتخاب می‌شود که دارای بزرگ‌ترین زمان پردازش در مرحله‌ی گلوگاه باشد.

برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه ارائه شده است. این الگوریتم، مبتنی بر مفهوم نظریه‌ی محدودیت‌هاست که یک روش جست‌وجوی محلی را برای بهبود الگوریتم به آن اضافه می‌کند. در ادامه با توجه به وجود ماشین‌های غیر مشابه در هر مرحله، الگوریتم انتخاب ماشین نیز شرح داده خواهد شد.

۳. الگوریتم ابتکاری

این الگوریتم مبتنی بر فلسفه‌ی تولید نظریه‌ی محدودیت‌هاست و بر این ایده استوار است که «منابع محدود (گلوگاه‌ها) عملکرد کل خط تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهند»^[۲۱] الگوریتم نظریه‌ی محدودیت‌ها با توجه به گلوگاه‌های موجود در خط تولید و زمان‌بندی براساس گلوگاه‌ها، سعی در بهبود عملکرد خط تولید دارند. بهبود عملکرد مرحله‌ی گلوگاه سبب بهبود عملکرد کل خط تولید می‌شود؛ به عبارت دیگر شناسایی مرحله‌ی گلوگاه و بهره‌برداری مناسب از آن می‌تواند عملکرد کل خط را بهینه کند. لازم به ذکر است که الگوریتم ارائه شده صرفاً برای زمان‌بندی مسئله و تعیین شاخص‌های مورد نظر با تغییر مکان گلوگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و در بهینه‌سازی مسئله به‌ازای شاخص‌های مورد نظر نقشی ندارد. براساس این ایده، الگوریتم دارای سه گام است: ۱. شناسایی مرحله‌ی گلوگاه؛ ۲. زمان‌بندی مرحله‌ی گلوگاه؛ ۳. زمان‌بندی مراحل غیر گلوگاهی. در این روش ابتدا با استفاده از شاخص معرفی شده، گلوگاه موجود در خط تولید تعیین می‌شود. سپس با استفاده از گلوگاه تعیین شده، یک زمان تخمینی برای رسیدن کارها به مرحله‌ی گلوگاه تعیین می‌شود تا با تعیین توالی کارها براساس این شاخص، گلوگاه کم‌ترین مقدار بیکاری را برای رسیدن کارها داشته باشد. از طرف دیگر در مراحل بعد از گلوگاه براساس زمان تکمیل کارها در مرحله‌ی قبلی و همچنین مدت زمان تخمینی برای خارج شدن از خط تولید کارها ترتیب‌بندی می‌شوند تا هم ماشین‌ها کم‌ترین مقدار بیکاری را داشته باشند و هم در کم‌ترین زمان ممکن کارها از خط تولید خارج شوند. قبل از ارائه‌ی جزئیات بیشتر الگوریتم، به تشریح نمادهای استفاده شده در این مقاله می‌پردازیم:

i : اندیس مرحله؛

j : اندیس کارها؛

K : اندیس ماشین‌ها در هر مرحله؛

m : تعداد مراحل؛

n : تعداد کارها؛

P_{ijk} : مدت زمان فرایند کار j در مرحله‌ی i بر روی ماشین k ؛

X_{ijk} : اگر کار j به ماشین k در مرحله‌ی i تخصیص یابد برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است؛

Y_{ilj} : اگر کار j بعد از کار l در مرحله‌ی i پردازش شود برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است؛

S_i : تعداد ماشین‌ها در مرحله‌ی i ؛

C_j : زمان تکمیل فرایند کار j در مرحله‌ی i ؛

ST_{ij} : زمان شروع فرایند کار j در مرحله‌ی i ؛

C_{max} : زمان تکمیل آخرین کار در آخرین مرحله.

گام ۱. یافتن مرحله‌ی گلوگاه

- برای هر مرحله‌ی i ، نرخ جریان λ^i برای تمامی مراحل به صورت:

- مراحل بعد از گلوگاه

۵. معیارهای عملکردی

چنان که در بخش قبل اشاره شد در این نوشتار تأثیر مکان گلوگاه بر ۶ معیار عملکردی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. C_{max} : این شاخص که در ادبیات با عنوان Makespan مطرح می‌شود برابر بیشینه زمان تکمیل کارها برای عبور از تمامی مراحل خط تولید است:

$$C_{max} = \max\{C_{mj}\}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

۲. متوسط مدت زمان توقف کارها (MJWT): این شاخص عملکرد برابر با متوسط مدت زمانی است که هر یک از کارها برای خالی شدن ماشین‌ها جهت پردازش منتظر می‌مانند:

$$MJWT = \frac{\sum_{j=1}^n (C_{mj} - \sum_{i=1}^m P_{ijk_i})}{n} \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۲، K_i ماشینی است که هر کار در مرحله‌ی i به آن تخصیص می‌یابد.

۳. متوسط زمان چرخه (MCT): زمان چرخه برابر است با متوسط فاصله‌ی زمانی بین خروج دو کار متوالی از خط تولید:

$$MCT = \frac{\sum_{d=1}^n (C_{m,[d]} - C_{m,[d-1]})}{n} \quad (3)$$

$C_{m,[d]}$ برابر مدت زمان تکمیل d امین کاری است که از خط تولید خارج می‌شود.

۴. متوسط زمان انجام کار (MLT): برابر است با متوسط زمان لازم برای رسیدن کار به آخرین مرحله و عبور از مرحله‌ی آخر:

$$MLT = \frac{\sum_{j=1}^n (C_{mj} - ST_{1j})}{n} \quad (4)$$

ST_{1j} زمان شروع فرایند کار j در اولین مرحله است.

۵. تعداد قطعات نیمه‌ساخته (WIP): برابر است با متوسط تعداد کاری که در هر لحظه از زمان به صورت نیمه‌ساخته در داخل خط تولید وجود دارد.

۶. صحت‌سنجی الگوریتم ابتکاری

برای صحت‌سنجی الگوریتم ارائه شده، جواب‌های روش ابتکاری با جواب‌های روش دقیق مقایسه شده‌اند. برای این منظور یک مدل ریاضی عدد صحیح برای مسئله‌ی زمان‌بندی در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی غیرمشابه ارائه شده، و نتایج آن با نتایج حاصل از روش ابتکاری مقایسه شده است. مدل ریاضی مذکور عبارت‌است از:

-- برای هر مرحله بعد از گلوگاه مانند h ، کارها براساس $C_{(h-1),j}$ (زمان تکمیل کار در مرحله‌ی قبل) و سپس $D_j = \sum_{i=1}^m FR_i - R_j$ (مدت زمان تخمینی تمام کار از مرحله‌ی گلوگاه تا انتهای خط) مرتب می‌شوند. اگر بیش از یک کار دارای $C_{(h-1),j}$ و D_j برابر هستند کاری را انتخاب کنید که بزرگ‌ترین زمان پردازش در مرحله‌ی گلوگاه را دارد.

گام ۴. الگوریتم جست‌وجوی محلی

الگوریتم BBMIP^{۱۳} را بر روی توالی ایجاد شده در مرحله‌ی قبل به کار برید. این الگوریتم چنین است:^[۲۴]

۱. اولین کار را در توالی اولیه ایجاد شده (تولید شده در مرحله‌ی قبل) انتخاب و آن را در توالی جزئی فعلی قرار دهید؛
۲. کار بعدی را از توالی اولیه انتخاب و آن را در قبل، میان و بعد از دو کار متوالی در توالی جزئی فعلی قرار دهید؛

۳. مقدار C_{max} را برای تمامی توالی‌های ایجاد شده محاسبه کنید؛

۴. توالی جزئی که دارای کم‌ترین مقدار C_{max} است را انتخاب و آن را توالی جزئی فعلی قرار دهید؛

۵. اگر توالی جزئی فعلی شامل همه کارها باشد توقف کنید؛ در غیر این صورت به مرحله‌ی ۲ بروید. توالی نهایی ایجاد شده با C_{max} کمینه به‌عنوان مرحله‌ی گلوگاه شناخته می‌شود.

۴. قاعده انتخاب ماشین

با توجه به وجود ماشین‌های غیرمشابه در هر مرحله، لازم است برای هر کار ماشین مناسب در هر مرحله انتخاب شود. در ادبیات مربوط برای انتخاب ماشین‌ها در هر مرحله سه روش وجود دارد:^[۲۴]

- EAAM^{۱۴}: در این روش کار به ماشینی تخصیص داده می‌شود که از بین ماشین‌های موجود زودترین زمان در دسترس را دارد.
- ECAM^{۱۵}: در این روش از بین ماشین‌های در دسترس، ماشینی انتخاب می‌شود که وقتی کار مورد نظر به آن تخصیص داده می‌شود کم‌ترین مقدار C_{max} حاصل شود.
- ECALLM^{۱۶}: در این روش از بین تمامی ماشین‌های موجود (اعم از این که در دسترس باشد یا نباشد) ماشینی انتخاب می‌شود که وقتی کار فعلی به آن تخصیص داده می‌شود کم‌ترین مقدار C_{max} را حاصل شود.

از بین قوانین موجود، قانون سوم در این تحقیق روی الگوریتم اعمال شده است. لازم به ذکر است که اگرچه این روش ممکن است بیکاری به ماشین‌ها اعمال کند (ممکن است ماشین‌های در دسترس، زمان‌بندی نشوند ولی کار مورد نظر برای خالی شدن یک ماشین منتظر بماند) ولی ممکن است ماشینی که مدت زمان فرایند کم‌تری دارد در هنگام تخصیص کار در دسترس نباشد.

جدول ۲. مقایسه نتایج روش ابتکاری و عدد صحیح.

شماره مسئله	روش دقیق					روش ابتکاری				
	WIP	Lead Time	زمان سیکل	توقف کارها	C_{max}	WIP	Lead Time	زمان سیکل	توقف کارها	C_{max}
۱	۵٫۸	۱۵٫۵	۳٫۱	۱۲٫۳	۲۲	۶٫۱	۱۶٫۷	۳٫۲	۱۳٫۷	۲۳
۲	۴٫۴	۱۳٫۱	۳٫۰	۱۷٫۸	۲۸	۴٫۹	۱۳٫۹	۳٫۲	۱۹٫۱	۲۸
۳	۵٫۸	۱۸٫۵	۳٫۶	۱۴٫۳	۳۲	۵٫۹	۱۹٫۱	۳٫۹	۱۵٫۱	۳۳
۴	۶٫۰	۲۳٫۴	۴٫۵	۲۰٫۱	۴۸	۶٫۷	۲۵٫۴	۵٫۵	۲۱٫۳	۵
۵	۵٫۸	۲۲٫۷	۴٫۵	۱۹٫۳	۴۱	۶٫۶	۲۳٫۴	۵٫۳	۲۰٫۷	۴۵

۷. عوامل آزمایشی

در این بخش عوامل آزمایشی مختلفی که برای بررسی تأثیر مکان گلوگاه روی معیارهای عملکردی خط تولید مورد استفاده قرار گرفته است معرفی می‌شود. این عوامل و مقادیر آنها در جدول ۳ خلاصه شده است.

چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود سه سطح برای تعداد کارها و سه سطح برای تعداد مراحل موجود در خط تولید طراحی شده است. برای تعداد ماشین‌ها در هر مرحله دو سطح پیش‌بینی شده: در سطح L (که تعداد ماشین‌ها دارای توزیع یکنواخت در بازه [۲ و ۴] است) تعداد ماشین‌ها برای مرحله‌ی گلوگاه برابر با ۱ است و در سطح H (یکنواخت در بازه [۴ و ۶]) تعداد ماشین‌ها برای مرحله‌ی گلوگاه برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. همچنین مدت زمان پردازش در تمامی مراحل از توزیع یکنواخت در بازه [۵ و ۱۰] پیروی می‌کند به غیر از مرحله‌ی گلوگاه که از توزیع یکنواخت در بازه [۱۱ و ۱۵] پیروی می‌کند. برای هر سناریو به دست آمده از فاکتورهای بالا مرحله‌ی گلوگاه به صورت تصادفی در یکی از سه بخش یک‌سوم اول خط تولید، یک‌سوم دوم خط تولید و یک‌سوم پایانی خط تولید قرار گرفته است. برای مقایسه‌ی تأثیر مکان گلوگاه در سناریوهای مختلف، ۱۰ اجرا برای هر سناریو

$$\text{Min } Z = \text{selected objective function} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{s_i} X_{ijk} = 1, \quad \forall j: 1 \leq j \leq n, \quad \forall i: 1 \leq i \leq m \quad (6)$$

$$C_{\setminus j} \geq \sum_{k=1}^{s_i} p_{\setminus jk} \cdot X_{\setminus jk}, \quad \forall j: 1 \leq j \leq n \quad (7)$$

$$C_{ij} \geq C_{i-1,j} + \sum_{k=1}^{s_i} p_{ijk} \cdot X_{ijk}, \quad \forall j: 1 \leq j \leq n, \quad (8)$$

$$\forall i: 2 \leq i \leq m$$

$$C_{ij} + M \times (3 - X_{ijk} - X_{ilk} - Y_{ilj}) \geq C_{il} + p_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (9)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \quad \forall i: 1 \leq i \leq m.$$

$$C_{il} + M \times (2 - X_{ilk} - X_{ijk} + Y_{ilj}) \geq C_{ij} + p_{ilk} \cdot X_{ilk} \quad (10)$$

$$\forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \quad \forall i: 1 \leq i \leq m.$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, l: 1 \leq j, l \leq n, \quad \forall k: 1 \leq k \leq s_i, \quad (11)$$

$$\forall i: 1 \leq i \leq m.$$

$$Y_{ilj} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, l: 1 \leq j, l \leq n \quad (12)$$

جدول ۳. فاکتورهای آزمایشی.

علامت	سطوح	فاکتورهای آزمایشی
L	۱۰	تعداد کارها
M	۲۰	
H	۵۰	
L	۳	تعداد مراحل
M	۶	
H	۱۲	
L	U[۲ و ۴]	تعداد ماشین‌ها در هر مرحله
H	U[۴ و ۶]	
	U[۵ و ۱۰]	مدت زمان فرایند مراحل غیرگلوگاه
	U[۱۱ و ۱۵]	مدت زمان فرایند مرحله گلوگاه

در قسمت تابع هدف هر یک از روابط ۱ تا ۵ قرار می‌گیرد. یادآور می‌شود برای تابع هدف، متوسط زمان چرخه و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته در نظر گرفته می‌شود. چون مستقیماً نمی‌توان این توابع را اعمال کرد ابتدا در تابع هدف مجموع زمان‌های تکمیل کمیته می‌شود و سپس با استفاده از این زمان‌ها مقدار زمان چرخه و تعداد قطعات نیمه‌ساخته محاسبه می‌شود. رابطه‌ی ۶ بیان می‌کند که هر کار باید به یک ماشین در هر مرحله تخصیص یابد؛ روابط ۷ و ۸ به ترتیب نشان‌گر زمان تکمیل کارها در مرحله‌ی اول و همچنین رابطه‌ی میان زمان تکمیل کارها در دو مرحله‌ی متوالی است. روابط ۹ و ۱۰ نیز روابطی انحصالی‌اند که بیان‌گر رابطه‌ی میان زمان تکمیل کارهای موجود در هر مرحله روی یک ماشین است. در هر لحظه و برای هر جفت کار مفروض، دست کم یکی از این محدودیت‌ها زائد است. روابط ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که متغیرهای تصمیم فقط مقادیر صفر یا ۱ را اختیار می‌کنند. با توجه به مدل ریاضی جواب‌های روش ابتکاری و دقیق در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

چنان که در جدول ۲ مشاهده می‌شود روش ابتکاری کیفیت نسبتاً خوبی در حل مسئله دارد. با این حال روش ابتکاری ارائه شده سعی در بهینه کردن مقادیر تابع هدف ندارد و صرفاً روشی برای تولید جواب‌های ممکن است.

انجام شده و یک فاصله‌ی اطمینان ۹۵٪ برابر اختلاف میانگین نتایج برای هر سناریو محاسبه شده است. نتایج این مقایسه‌ها در بخش بعدی ارائه شده است.

۸. نتایج

به منظور بررسی تأثیر مکان گلگاه، ۶ معیار عملکردی شامل: C_{max} ، متوسط مدت زمان توقف کارها، متوسط زمان چرخه، متوسط زمان انجام کار، و قطعات نیمه‌ساخته در نظر گرفته شده است. برای بررسی تأثیر حالت‌های مختلف، عواملی نظیر تعداد کارها، تعداد مراحل، تعداد ماشین در هر مرحله، مکان گلگاه و مدت زمان پردازش کارها (جدول ۲) که با استفاده از این عوامل و سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای هر عامل ۵۴ سناریو مختلف تولید می‌شود. برای کم‌تر کردن تأثیر وجود اعداد تصادفی، در هر سناریو ۱۰ بار اعداد تصادفی تولید شده است. برای مقایسه‌ی نتایج، و با توجه به وجود ۱۰ نتیجه برای هر سناریو، از فاصله‌ی اطمینان ۹۵٪ استفاده شده است. با توجه به این سطح اطمینان می‌توان به راحتی نتیجه گرفت که در یک سطح اطمینان مشخص کدام یک از مکان‌های گلگاه سبب بهتر و یا بدتر

شدن معیار عملکرد در هر سناریو می‌شود؛ چون در صورت وجود عدد صفر در فاصله‌ی اطمینان به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که دو سناریو در نظر گرفته شده، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. برای ایجاد این سطوح اطمینان از نرم‌افزار Minitab ۱۵٫۱ استفاده شده است. نتایج به دست آمده برای معیارهای مختلف به شرح زیر است:

۱۰٫۸. معیار عملکردی C_{max}

اولین معیاری که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد C_{max} است. C_{max} برابر حداکثر زمانی است که یکی از کارها از خط تولید خارج می‌شود. نتایج به دست آمده در جدول ۴ مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۴ نتایج زیر به دست می‌آید:

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله L باشد، تغییر مکان گلگاه هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر C_{max} در سناریوهای مختلف ندارد.
- در حالتی که تعداد مراحل M باشد، در ۲۴ مورد از ۲۷ مورد، تغییر مکان گلگاه هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر C_{max} ندارد.

جدول ۴. حدود بالا و پایین برای بررسی تأثیر مکان گلگاه بر روی معیار عملکردی C_{max} .

L									تعداد ماشین‌ها
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان کارها گلگاه
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۱,۸۴; ۳,۱۷			-۲,۴۰; ۱,۴۰			--	۱۰ ۱/۳ دوم
-	-۴,۱۷; ۱,۴۴	-۳,۲۸; ۱,۸۸	-	-۳,۱۲; ۱,۳۲	-۳,۵۱; ۰,۷۱	-	-۲,۷۲; ۱,۵۲	-۱,۶۹; ۲,۲۹	۱/۳ سوم
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۰,۴۹; ۴,۲۹			-۱,۶۱; ۳,۲۱			-۱,۹۰; ۱,۵۰	۲۰ ۱/۳ دوم
-	-۶,۰۳; ۰,۶۳	-۳,۸۵; ۲,۲۵	-	-۳,۸۵; ۲,۴۵	-۳,۱۶; ۳,۳۶	-	-۳,۶۴; ۰,۶۴	-۳,۹۲; ۰,۵۲	۱/۳ سوم
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۳,۹۸; ۵,۹۸			-۳,۳۸; ۴,۹۸			-۳,۵۴; ۳,۹۴	۵۰ ۱/۳ دوم
-	-۵,۴۲; ۴,۲۲	-۴,۲۸; ۵,۰۸	-	-۶,۷۱; ۳,۱۱	-۵,۹۷; ۳,۹۷	-	-۴,۴۸; ۳,۴۸	-۴,۳۰; ۳,۷۰	۱/۳ سوم
H									تعداد ماشین‌ها
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان کارها گلگاه
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۱,۷۵; ۲,۶۴			-۱,۹۷; ۰,۷۷			-۱,۸۷; ۰,۸۷	۱۰ ۱/۳ دوم
-	-۴,۱۹; -۰,۲۵	-۳,۹۴; ۰,۳۸	-	-۲,۵۲; ۱,۳۱	-۲,۹۹; ۰,۵۹	-	-۳,۰۱; ۰,۶۱	-۳,۳۰; -۰,۱۰	۱/۳ سوم
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۲,۶۷; ۱,۶۷			-۱,۹۹; ۰,۵۹			-۲,۱۸; ۰,۵۸	۲۰ ۱/۳ دوم
-	-۳,۵۴; ۰,۳۳	-۴,۱۸; -۰,۰۲	-	-۲,۶۳; ۱,۴۲	-۳,۳۰; ۰,۷۱	-	-۱,۴۱; ۱,۴۱	-۲,۲۵; ۰,۶۵	۱/۳ سوم
		--			--			--	۱/۳ اول
		-۳,۵۶; ۲,۳۶			-۲,۸۵; ۱,۶۵			-۲,۶۱; ۳,۷۰	۵۰ ۱/۳ دوم
-	-۴,۹۳; ۱,۱۳	-۵,۸۵; ۰,۸۵	-	-۱,۴۰; ۲,۵۷۸	-۱,۹۹; ۱,۹۷	-	-۲,۷۲; ۳,۶۳	-۲,۰۷; ۴,۰۷	۱/۳ سوم

یک‌سوم اول قرار دارد در مقایسه با سایر مکان‌ها سبب ایجاد توقف بیشتر کارها می‌شود. این در حالی است که برای مقایسه‌ی یک‌سوم دوم و یک‌سوم پایانی، در ۸ مورد از ۹ مورد، تفاوت معناداری میان تأثیرگذاری این دو مکان بر میزان توقف کارها وجود ندارد.

• در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله H باشد، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که گلوگاه در یک‌سوم اول قرار دارد، در مقایسه با سایر مکان‌ها، سبب توقف بیشتر کارها می‌شود. این در حالی است برای مقایسه‌ی یک‌سوم دوم و یک‌سوم پایانی، در ۶ مورد از ۹ مورد، تفاوت معناداری میان تأثیرگذاری این دو مکان بر روی میزان بیکاری کارها وجود ندارد.

• با در نظر گرفتن کران پایین و بالای حدود اطمینان، می‌توان نتیجه گرفت که در

• با در نظر گرفتن کران پایین و بالای حدود اطمینان، نمی‌توان روند خاصی در تأثیرگذاری مکان گلوگاه بر C_{max} مشاهده کرد.

۲.۸. متوسط مدت زمان توقف کارها (MJWT)

معیار متوسط مدت زمان توقف کارها برابر است با متوسط مدت زمانی که هر کار در خط تولید متوقف است تا ماشین مورد نظر برای سرویس‌دهی خالی شود. نتایج مربوط به این معیار عملکردی در جدول ۵ آمده است. با توجه به جدول ۵ نتیجه می‌گیریم که:

• در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله L باشد، در ۱۷ مورد (از ۱۸ مورد) حدود بالا و پایین مثبت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که گلوگاه در

جدول ۵. حدود بالا و پایین برای بررسی تأثیر مکان گلوگاه بر روی معیار عملکردی متوسط مدت زمان توقف کارها.

		L										
		۱۲			۶			۳			تعداد ماشین‌ها	
		۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
مکان	تعداد کارها	اول	دوم	سوم	اول	دوم	سوم	اول	دوم	سوم	مکان	تعداد کارها
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۱,۳۴; ۳,۸۹	-	۰,۸۲; ۲,۵۱	-	۰,۴۲; ۲,۱۲	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۱,۱۷; ۴,۵۳	-	۰,۰۲; ۲,۵۴	۱,۷۰; ۴,۱۴	-	۰,۴۲; ۱,۷۲	۰,۸۹; ۲,۹۵	-	-	۱/۳	سوم
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۰,۵۷; ۱,۸۱	-	۰,۳۵; ۱,۰۷	-	۰,۰۳; ۰,۶۷	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۰,۶۴; ۲,۱۸	-	۰,۱۷; ۰,۹۷	۰,۵۴; ۱,۶۸	-	۰,۲۳; ۰,۷۱	۰,۱۳; ۰,۹۹	-	-	۱/۳	سوم
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۰,۱۴; ۰,۶۴	-	۰,۰۴; ۰,۴۸	-	۰,۰۴; ۰,۳۸	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۰,۳۱; ۰,۷۵	-	۰,۰۷; ۰,۴۳	۰,۲۲; ۰,۶۶	-	۰,۰۷; ۰,۴۵	۰,۲۶; ۰,۵۹	-	-	۱/۳	سوم
		H										
		۱۲			۶			۳			تعداد ماشین‌ها	
		۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
مکان	تعداد کارها	اول	دوم	سوم	اول	دوم	سوم	اول	دوم	سوم	مکان	تعداد کارها
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۱,۱۶; ۳,۳۰	-	۰,۴۹; ۱,۸۷	-	۰,۳۵; ۱,۳۳	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۱,۹۸; ۳,۸۵	-	۰,۰۲; ۱,۸۶	۱,۱۵; ۳,۰۵	-	۰,۶۵; ۰,۶۵	۰,۲۶; ۱,۴۱	-	-	۱/۳	سوم
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۰,۲۸; ۱,۲۶	-	۰,۱۶; ۰,۸۲	-	۰,۰۴; ۰,۳۲	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۰,۴۲; ۱,۳۶	-	۰,۱۸; ۰,۶۶	۰,۳۸; ۱,۰۸	-	۰,۱۳; ۰,۷۳	۰,۲۶; ۰,۸۸	-	-	۱/۳	سوم
۱/۳	اول	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۳	اول
۱/۳	دوم	۰,۱۵; ۰,۴۱	-	۰,۰۶; ۰,۲۷	-	۰,۰۴; ۰,۲۰	-	-	-	-	۱/۳	دوم
۱/۳	سوم	۰,۲۶; ۰,۷۰	-	۰,۱۰; ۰,۳۵	۰,۳۱; ۰,۵۰	-	۰,۰۲; ۰,۱۸	۰,۱۴; ۰,۳۰	-	-	۱/۳	سوم

تغییر مکان گل‌گانه هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر متوسط زمان چرخه‌ندارد. با این حال هنگامی که تعداد کارها زیاد می‌شود میزان متوسط زمان چرخه در مواردی که گل‌گانه در ابتدای خط قرار دارد کم‌تر از زمانی است که گل‌گانه به سمت انتهای خط تولید حرکت می‌کند.

مسائل کوچک هر قدر گل‌گانه به انتهای خط تولید نزدیک می‌شود از مقدار توقف کارها کاسته می‌شود، ولی با افزایش حجم مسئله میزان تأثیرگذاری کاهش می‌یابد چون حدود بالا و پایین به سمت صفر میل می‌کنند.

- با در نظر گرفتن کران پایین و بالای حدود اطمینان، با افزایش حجم مسئله نمی‌توان روند خاصی در تأثیرگذاری مکان گل‌گانه بر متوسط زمان چرخه مشاهده کرد.

۳.۸. معیار متوسط زمان چرخه (MCT)

متوسط زمان چرخه برابر است با متوسط فاصله زمانی میان خروج دو کار متوالی از خط تولید. نتایج به دست آمده برای این معیار در جدول ۶ آمده است. با توجه به جدول ۶ نتیجه می‌گیریم:

- ۴.۸. معیار متوسط زمان انجام کار
این معیار برابر است با متوسط زمان لازم برای رسیدن کار به آخرین مرحله و عبور از مرحله‌ی آخر. نتایج مربوط به این معیار در جدول ۷ آمده است. با توجه به جدول ۷ نتیجه می‌گیریم که:

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله L باشد (در ۲۵ مورد از ۲۷ مورد) تغییر مکان گل‌گانه هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر متوسط زمان چرخه ندارد.
- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله H است، در ۲۱ مورد از ۲۷ مورد،

جدول ۶. حدود بالا و پایین برای بررسی تأثیر مکان گل‌گانه بر روی معیار عملکردی متوسط زمان سیکل.

L									تعداد ماشین‌ها
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان کارها گل‌گانه
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	۰٫۵۰؛ ۰٫۲۹		—	—	—	—	—	۱۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	—		—	—		—	—	۲۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	—		—	—		—	—	۵۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم
H									تعداد ماشین‌ها
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان کارها گل‌گانه
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	—		—	—		—	—	۱۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	—		—	—		—	—	۲۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم
		—			—			—	۱/۳ اول
	—	—		—	—		—	—	۵۰ ۱/۳ دوم
—	—	—	—	—	—	—	—	—	۱/۳ سوم

جدول ۷. حدود بالا و پایین برای بررسی تأثیر مکان گلوگاه بر روی معیار عملکردی متوسط زمان انجام کار.

L									تعداد ماشین‌ها	
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان	تعداد کارها
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	گلوگاه	کارها
		--			--			--	۱/۳ اول	
		-۲,۰۷; ۸,۳۱			-۱۸,۳; -۶,۱			-۲۱,۰; -۱۵,۹	۱۰ ۱/۳ دوم	
		-۴,۶۰; ۳,۸۶			-۱,۱۲; ۲,۹۶			-۲,۵۱; ۳,۱۱	۱/۳ سوم	
									۱/۳ اول	
		-۶,۴۱; ۱۵,۲			-۳۹,۱; -۱۴,۸			-۴۲,۹; -۳۴,۰	۲۰ ۱/۳ دوم	
		-۶,۰۴; ۱۴,۸			-۵,۱۵; ۵,۵۹			-۴۵,۹; -۲۷,۶	۱/۳ سوم	
									۱/۳ اول	
		-۲۰,۴; ۳۳,۳			-۹۸,۹; -۲۸,۰			-۱۱۲,۸; -۸۸,۰	۵۰ ۱/۳ دوم	
		-۱۹,۱; ۲۲,۵			-۲۴,۶; ۱۶,۶			-۱۴۳,۱; -۵۹,۷	۱/۳ سوم	
H									تعداد ماشین‌ها	
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	تعداد مکان	تعداد کارها
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	گلوگاه	کارها
		--			--			--	۱/۳ اول	
		-۵,۷۵; -۳,۲۶			-۱۱,۳; -۳,۳			-۱۲,۱; -۱۰,۴	۱۰ ۱/۳ دوم	
		-۱,۶۷; ۲,۲۹			-۱,۱۸; ۱,۹۴			-۱,۶۲; ۰,۷۰	۱/۳ سوم	
									۱/۳ اول	
		-۱۱,۶; ۴,۶۴			-۲۴,۳; -۶,۱			-۲۷,۵; -۲۴,۳	۲۰ ۱/۳ دوم	
		-۱,۶۱; -۱,۵۹			-۲,۵۸; ۲,۴۴			-۱,۶۵; ۲,۰۵	۱/۳ سوم	
									۱/۳ اول	
		-۱۸,۸; ۱۲,۹			-۶۶,۷; -۱۹,۷			-۷۰,۹; -۵۹,۲	۵۰ ۱/۳ دوم	
		-۴,۱۸; ۵,۴۴			-۵,۲۹; ۶,۴۷			-۸,۴۹; ۴,۲۵	۱/۳ سوم	

با افزایش حجم مسئله این تأثیرگذاری مشاهده نمی‌شود. همچنین با مقایسه‌ی حدود بالا و پایین برای مکان یک‌سوم دوم و یک‌سوم پایانی، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مکان گلوگاه تأثیرگذار نیست. نکته با توجه به نتایج بالا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش حجم مسئله از میزان تأثیرگذاری مکان گلوگاه بر متوسط زمان انجام کار کاسته است.

۵.۸. معیار متوسط قطعات نیمه‌ساخته

این معیار برابر است با متوسط تعداد کارهایی که در هر لحظه از زمان در داخل خط تولید به‌صورت نیمه‌ساخته در داخل خط تولید وجود دارد. نتایج این معیار در جدول ۸ آمده است. با توجه به جدول ۸ می‌توان گفت:

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله L باشد، در ۶ مورد از ۹ مورد حدود بالا

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله L است، در ۶ مورد از ۹ مورد حدود بالا و پایین منفی است در حالی که با افزایش حجم مسئله (تعداد کارها برابر ۵۰ عدد) حدود بالا و پایین منفی و مثبت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مواردی که تعداد کارها کم و متوسط است و گلوگاه در یک‌سوم اول قرار دارد در مقایسه با یک‌سوم دوم متوسط زمان انجام کار کم‌تر است. همچنین با مقایسه‌ی حدود بالا و پایین برای مکان یک‌سوم دوم و یک‌سوم پایانی، درمی‌یابیم که تغییر مکان گلوگاه تأثیرگذار نیست. بنابراین بهترین مکان برای قرار گرفتن گلوگاه در تابع هدف متوسط زمان انجام کار در مسائل کوچک و متوسط، یک‌سوم اول است در حالی که در مسائل بزرگ این تأثیرگذاری مشاهده نمی‌شود.

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله H باشد، در تعداد کارهای کم و متوسط، با قرار گرفتن گلوگاه در یک‌سوم اول متوسط زمان انجام کار کم‌تر می‌شود اما

جدول ۸. حدود بالا و پایین برای بررسی تأثیر مکان گلگاه بر روی معیار عملکردی متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته.

L									تعداد ماشین‌ها	
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	مکان	تعداد
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	گلگاه	کارها
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۰,۱۷; ۰,۵۹			-۱,۹; -۰,۶۹			-۲,۸۷; -۲,۱۷	دوم ۱/۳	۱۰
	-۰,۲۷; ۰,۳۵	-۰,۱۲; ۰,۶۲		-۰,۱۰; ۰,۴۴	-۱,۷۵; -۰,۵		-۰,۳۲; ۰,۶۱	-۲,۷۳; -۲,۰۱	سوم ۱/۳	
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۰,۸۲; ۱,۴۸			-۵,۳; -۱,۳۴			-۶,۳۳; -۴,۹۴	دوم ۱/۳	۲۰
	-۰,۷۲; ۱,۰۶	-۰,۶۰; ۱,۶۱		-۰,۶۴; ۰,۸۱	-۵,۲۴; -۱,۲		-۰,۹۶; ۱,۱۸	-۶,۴۳; -۴,۶۲	سوم ۱/۳	
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۲,۷۳; ۴,۴۷			-۱۵,۰; -۵,۳			-۱۷,۴; -۱۲,۷	دوم ۱/۳	۵۰
	-۲,۳۷; ۳,۰۱	-۲,۳۸; ۴,۷۶		-۱,۹۲; ۲,۴۶	-۱۵,۰; -۵,۳		-۳,۱۵; ۲,۱۷	-۱۷,۲; -۱۳,۹	سوم ۱/۳	
H									تعداد ماشین‌ها	
۱۲			۶			۳			تعداد مراحل	
۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	مکان	تعداد
سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	سوم	دوم	اول	گلگاه	کارها
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۰,۶۷; ۰,۲۰			-۱,۵۱; -۰,۳۴			-۲,۰۳; -۱,۷۸	دوم ۱/۳	۱۰
	-۰,۱۳; ۰,۲۹	-۰,۶۰; ۰,۲۹		-۰,۰۷; ۰,۲۹	-۱,۳۸; -۰,۲۴		-۰,۱۰; ۰,۲۱	-۱,۹۹; -۱,۷۳	سوم ۱/۳	
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۱,۵۵; ۴,۶۹			-۴,۲۴; -۱,۴۴			-۵,۵۴; -۴,۹۹	دوم ۱/۳	۲۰
	-۰,۱۰; -۱,۵۱	-۱,۳۴; ۰,۸۸		-۰,۳۷; ۰,۴۳	-۴,۲۲; -۱,۴۰		-۰,۳۵; ۰,۳۴	-۵,۵۴; -۴,۹۹	سوم ۱/۳	
		-			-			-	اول ۱/۳	
		-۰,۹۵; ۱,۴۱			-۱۴,۲; -۴,۰۶			-۱۵,۹; -۱۴,۵	دوم ۱/۳	۵۰
	-۰,۶۰; ۱,۲۱	-۰,۶۳; ۱,۶۹		-۱,۲۱; ۱,۳۹	-۱۴,۰۹; -۳,۹		-۱,۰۵; ۰,۷۹	-۱۶,۰; -۱۴,۶	سوم ۱/۳	

- در حالتی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله H است، در تعداد کارهای کم و متوسط، با قرار گرفتن گلگاه در یک سوم اول متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته کم‌تر می‌شود اما با افزایش حجم مسئله این تأثیرگذاری مشاهده نمی‌شود. همچنین با مقایسه‌ی حدود بالا و پایین برای مکان یک سوم دوم و یک سوم پایانی، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مکان گلگاه تأثیرگذار نیست.
 - با توجه به نتایج بالا، درمی‌یابیم که با افزایش حجم مسئله از میزان تأثیرگذاری مکان گلگاه کاسته می‌شود.
- و پایین منفی است در حالی که با افزایش حجم مسئله (تعداد کارها برابر ۵۰ عدد) حدود بالا و پایین منفی و مثبت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مواردی که تعداد کارها کم و متوسط است و گلگاه در یک سوم اول قرار دارد -- در مقایسه با یک سوم دوم -- متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته کم‌تر می‌شود. همچنین با مقایسه‌ی حدود بالا و پایین برای مکان یک سوم دوم و یک سوم پایانی، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مکان گلگاه تأثیرگذار نیست. بنابراین بهترین مکان برای قرار گرفتن گلگاه در تابع هدف متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته در مسائل کوچک و متوسط یک سوم اول است در حالی که در مسائل بزرگ این تأثیرگذاری مشاهده نمی‌شود.

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش ابتکاری مبتنی بر گلوگاه بسط داده شده که دارای سه مرحله است: پیدا کردن گلوگاه، زمان بندی منابع گلوگاهی و زمان بندی منابع غیر گلوگاهی است که از ایده‌ی نظریه‌ی محدودیت‌ها استفاده شده است. با توجه به وجود ماشین‌های غیرمشابه در هر مرحله، از روش ECALLM برای انتخاب ماشین‌ها در هر مرحله استفاده شده است. از این روش ابتکاری برای بررسی تأثیر مکان گلوگاه (یک‌سوم اول، یک‌سوم دوم و یک‌سوم پایانی) بر معیارهای عملکرد -- شامل C_{max} ، متوسط مدت زمان توقف کارها (MJWT)، متوسط زمان چرخه (MCT)، متوسط زمان

انجام کار (MLT) و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته (WIP) استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که برای حالات و مقادیر فرض شده، مکان گلوگاه بر معیارهای C_{max} و متوسط زمان چرخه تأثیرگذار نیست ولی بر معیارهای متوسط مدت زمان توقف کارها، متوسط زمان انجام کار و متوسط تعداد قطعات نیمه‌ساخته مؤثر است.

استفاده از سایر رویکردهای حل مانند روش‌های شبیه‌سازی یا فراابتکاری برای بررسی تأثیر مکان گلوگاه، بررسی این تأثیر در سایر محیط‌های کاری نظیر محیط کار کارگاهی یا سری انعطاف‌پذیر، یا در نظر گرفتن سایر عوامل آزمایشی را می‌توان برای تحقیقات آتی پیشنهاد داد.

پانویس‌ها

- flexible flow shop
- flexible flow line
- hybrid flow shop
- flow time
- theory of constraints
- drum buffer rope
- drum
- rope
- Buffer
- throughput
- WIP
- flow rate
- bottleneck-based multiple insertion procedure
- earliest available time among the available machines
- earliest completion time when the job is assigned to the available machines
- earliest completion time when the job is assigned to all the machines

منابع (References)

- Ribas, I., Leisten, R. and Framinan, J.M. "Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective", *Computers & Operation Research*, **37**, pp. 1439-1454 (2009).
- Quadt, D. and Kuhn, H., "Conceptual framework for lot-sizing and scheduling of flexible flow lines", *International Journal of Production Research*, **43**(11), pp. 2291-2308 (2005).
- Adler, L., Fraiman, N., Kobacker, E., Pinedo, M., Plotnicoff, J.C. and Wu, T.P. "BPSS: A scheduling support system for the packaging industry", *Operations Research*, **41**, pp. 641-648 (1993).
- Voss, S. and Witt, A. "Hybrid flow shop scheduling as a multi-mod multi-project scheduling problem with batching requirements: a real-world application", *International Journal of Production Economics*, **105**(2), pp. 445-458 (2007).
- Wittrock, R.J. "An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines", *Operations Research*, **36**, pp. 445-453 (1998).
- Ruiz, R. and Maroto, C. "A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility", *European Journal of Operation Research*, **169**, pp. 781-800 (2006).
- Kadipasaoglu, S.N., Xiang, W. and Khumawala, B.M. "A comparison of sequencing rules in static and dynamic hybrid flow systems", *International Journal of Production Research*, **35**(5), pp. 1359-1384 (1997).
- Leon, V.J. and Ramamoorthy, B. "An adaptable problem space-based search method for flexible flow line scheduling", *IIE Transactions*, **29**, pp. 115-125 (1997).
- Kadipasaoglu, S.N., Xiang, W. and Khumawala, B.M. "A note on scheduling hybrid flow systems", *International Journal of Production Research*, **35**(5), pp. 1491-1494 (1997).
- Suresh, V. "A note on scheduling of two-stage flow shop with multiple processors", *International Journal of Production Economics*, **49**(1), pp. 77-82 (1997).
- Hayrinen, T., Johnsson, M., Johtela, T., Smed, J. and Nevalainen, O. "Scheduling algorithms for computer-aided line balancing in printed circuit board assembly", *Production Planning Control*, **11**, pp. 497-510 (2000).
- Low, C. "Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines", *Computers & Operation Research*, **32**, pp. 2013-2025 (2005).
- Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse, P. and Werner, F. "An evaluation of sequencing heuristics for flexible flowshop scheduling problems with unrelated parallel machines and dual criteria", *Otto-von-Guericke-Universi-tat Magdeburg, Preprint*, pp. 1-23 (2005).
- Sawik, T. "Integer programming approach to production scheduling for make-to-order manufacturing", *Mathematical & Computers Model*, **41**(1), pp. 99-118 (2005).
- Jenabi, M., Ghomi, S.M.T.F., Torabi, S.A. and Karimi, B. "Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines", *Applied Mathematics and Computation*, **186**(1), pp. 230-245 (2007).
- Low, C.Y., Hsu, C.J. and Su, C.T. "A two-stage hybrid flowshop scheduling problem with a function constraint and unrelated alternative machines", *Computers & Operation Research*, **35**(3), pp. 845-853 (2008).

17. He, L.M., Sun, S.J. and Luo, R.Z. "A hybrid two-stage flowshop scheduling problem", *Asia Pacific Journal of Operation Research*, **24**(1), pp. 45-56 (2007).
18. Vignier, A., Billaut, J.C. and Proust, C. "Hybrid flowshop scheduling problems: State of the art", *Rairo-Recherche Operationnelle-Operations Research*, **33**(2), pp. 117-183 (1999).
19. Kis, T. and Pesch, E. "A review of exact solution methods for the non-preemptive multiprocessor flowshop problem", *European Journal of Operation Research*, **164**(3), pp. 592-608 (2005).
20. Quadt, D. and Kuhn, H. "A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures", *European Journal of Operation Research*, **178**(3), pp. 686-698 (2007).
21. Goldratt, E. and Cox, J., *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. New York, North River Press (1992).
22. Goldratt, E. and Fox, R., *The Race*, New York, North River Press (2004).
23. Acero-Dominguez, M. and Paternina-Arboleda, C. "Scheduling jobs on a k-stage flexible flow shop using a TOC-based (bottleneck) procedure", *Proceedings of the 2004 Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp. 295-298 (2004).
24. Chen, C.L. and Chen, C.L. "A bottleneck-based heuristic for minimizing makespan in a flexible flow line with unrelated parallel machines", *Computers & Operation Research*, **36**, pp. 3073-3081 (2009).
25. Chen, C.L. "Bottleneck-based heuristics to minimize total tardiness for the flexible flow line with unrelated parallel machines", *Computers & Operation Research*, **56**, pp. 1393-1401 (2009).
26. Paternina-Arboleda, C., Montoya-Torres, J., Acero-Dominguez, M. and Herrera-Hernandez, M. "Scheduling jobs on a k-stage flexible flow-shop", *Annals Operation Research*, **164**(1), pp. 29-40 (2007).
27. Powell, S.G. and Pyke, D.F. "Allocation of buffers to serial production lines with bottlenecks", *IIE Transactions*, **28**, pp. 18-29 (1996).
28. Lambrecht, M. and Segart, A. "Buffer stock allocation in serial and assembly type of production lines", *International Journal of Operations and Production Management*, **10**(2), pp. 47-61 (1990).
29. Chiadamrong, N. and Kohly, P. "A comparison of push and pull production systems at their optimal design under economic consideration", *AJSTD*, **22**(4), pp. 313-330 (2005).
30. Elftman, T.M. "Examination of the effects of bottlenecks and production control rules at assembly stations", University of Florida (1999).