نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

ISSN: 2345-2269

سال دوازدهم، شماره بیست و پنجم، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، صفحه ۱۵۵-۱۶۷

www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2025.30818.2201

# مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی در سیستم تولیدی با حمل‌ونقل قابل پیکربندی مجدد

سحر اخگر[۱]، پرویز فتاحی[۲*]، بهدین واحدی نوری[۳]، عبدالرضا روشنی[۴]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. استادیار گروه تحلیل تجاری، دانشکدهٔ کسب و کار، دانشگاه سوروی، گیلدفورد، انگلیس

**اطلاعات مقاله**

**تاریخچه مقاله:**

**دریافت** ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

**بازنگری** ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

**پذیرش** ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

**(مقاله پژوهشی)**

**کلمات کلیدی:**

**زمان‌بندی جریان کارگاهی**

**سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد**

**سیستم حمل‌ونقل قابل پیکربندی مجدد**

**برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط**

**خلاصه**

برای باقی‌ماندن در رقابت بازار جدید و پویا که دارای نوسانات زیادی در تقاضای محصول است، شرکت‌های تولیدی باید از سیستم‌هایی استفاده کنند که نه‌تنها کالاهای خود را با بهره‌وری بالا تولید کنند، بلکه امکان پاسخ سریع به تغییرات بازار را نیز فراهم کنند. سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد یک الگوی جدید تولیدی است که براساس پاسخ‌گویی و بهره‌وری عملکردی بالا شکل گرفته است. یکی از اجزای این نوع سیستم تولیدی، تجهیزات حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد مانند ربات است. باوجود اهمیت بالای سیستم حمل‌ونقل قابل پیکربندی مجدد و نقش آن در برنامه‌ریزی یک سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد، تا به‌حال مسأله زمان‌بندی در یک محیط تولیدی با قابلیت پیکربندی مجدد سیستم حمل‌ونقل مواد بررسی نشده است. در این پژوهش، با درنظر گرفتن ربات‌های قابل پیکربندی مجدد برای حمل‌ونقل مواد در یک سیستم تولیدی، به زمان‌بندی یک خط تولید جریان کارگاهی جایگشتی پرداخته می‌شود. بر این‌اساس، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در یک محیط چندمحصولی برای کمینه کردن دوره ساخت محصول پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS 33.2.0 با حل‌کننده سیپلکس حل شده است و عملکرد مدل پیشنهادی، بااستفاده از مسائل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که زمان حل به تعداد کارها نسبت‌به تعداد ماشین‌ها و ربات‌ها، وابستگی و حساسیت بیشتری دارد و با افزایش تعداد کارها، زمان حل به‌صورت نمایی رشد می‌کند به‌طوری‌که با افزایش تعداد کارها به ۲۰ عدد، زمان حل مدل به بیش‌از ۱۵۴۰۰۰ ثانیه خواهد رسید. درنتیجه برای حل مسائل در اندازه‌های بزرگ نیازبه استفاده از الگوریتم‌های حل ابتکاری می‌باشد.

## ۱. مقدمه

امروزه، شرکت‌های صنعتی با طیف وسیعی از چالش‌ها مواجه هستند، زیرا مشتریان طیف گسترده‌ای از محصولات با کیفیت بالا و سفارشی‌شده را در دسته‌های انعطاف‌پذیر درخواست می‌کنند [۱]. به‌عبارت دیگر موفقیت یک شرکت تنها به تولید محصولی با هزینه کم و کیفیت بالا محدود نمی‌شود و الزامات جدیدی مانند پاسخ‌گویی و

* نویسنده مسئول: پرویز فتاحی

تلفن: ۸۵۶۹۲۱۹۱-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: p.fattahi@alzahra.ac.ir

انعطاف‌پذیری سیستم تولید باید درنظر گرفته شود. سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد (RMS) یک الگوی جدید تولیدی است که سیستم‌های تولیدی را قادر می‌سازد تا به‌سرعت به تقاضای بازار پاسخ دهند و پاسخ‌گویی و انعطاف‌پذیری را افزایش دهند. پیکربندی مجدد این امکان را فراهم می‌کند که قابلیت‌های فرآیند، کنترل‌ها، نرم‌افزار یا ساختار ماشین‌آلات خاص اضافه، حذف یا اصلاح شوند تا ظرفیت تولید متناسب با تغییرات تقاضا یا فناوری‌های نوظهور در بازار تنظیم شود [۲,۳]. اجزای قابل پیکربندی یک سیستم تولیدی شامل ماشین‌های قابل پیکربندی مجدد، ماشین‌های CNC، ماشین‌ابزارها، ربات‌ها، سیستم‌های جابجایی مواد است که به‌روشی خاص به یکدیگر متصل می‌شوند تا یک خانواده محصول تولید شود [۴]. یک سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد نقش مهمی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از یک سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد (RMS) ایفا می‌کند. یکی از اجزای RMHS ربات‌های ماژولار است که به تولیدکننده اجازه می‌دهد تا پیکربندی بهینه را به‌صورت مقرون‌به‌صرفه تعیین کند [۵].

ازآنجایی‌که یکی از مهم‌ترین جنبه‌های فرآیند تولید مربوط به جابجایی مواد است، به‌طور قابل‌توجهی بر بهره‌وری، کیفیت محصول و موضوع ایمنی کارگران تأثیر می‌گذارد. بهبود جابجایی مواد به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که با حفظ مزیت رقابتی خود، به صرفه‌جویی در مقیاس، افزایش بهره‌وری، تحویل به‌موقع محصول و افزایش رضایت مشتری دست یابند. استفاده از روش‌های دستی برای حمل‌ونقل مواد باعث کاهش کارایی و ایجاد خطرات بهداشتی و ایمنی و خطرات زیست‌محیطی برای کارگران می‌شود. به‌همین دلیل، استفاده از ربات‌ها برای جابجایی مواد می‌تواند این مشکلات را بهبود بخشد [۶]. یکی از ماژول‌های قابل پیکربندی مجدد ربات، گیره‌های ربات است. گیره یک دستگاه گیرنده است که در انتهای بازوی ربات نصب می‌شود و به‌کمک آن ربات‌ها می‌توانند قسمت‌های مختلف را گرفته، حمل و جابجا کنند. با تنظیم نقاط تماس گیره با قطعه، تنظیم زوایای مختلف بازوهای گیره و افزودن یا حذف تعداد بازوهای گیره، می‌توان از یک گیره قابل پیکربندی مجدد برای حرکت دادن قطعات مختلف استفاده کرد [۷].

مسأله زمان‌بندی شامل مجموعه‌ای از تصمیم‌گیری‌ها در مورد توالی قطعاتی است که در سیستم‌ها تولید می‌شوند [۱]. در سیستم‌های صنعتی، زمان‌بندی نقش اساسی در کاهش هزینه‌های تولید و بهبود رضایت مشتری دارد و می‌تواند عملکرد سیستم را به‌میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد [۸]. در این پژوهش، مسأله زمان‌بندی در یک سیستم تولیدی با جابجایی مواد قابل پیکربندی مجدد بررسی شده است. علی‌رغم اهمیت بالای سیستم حمل‌ونقل قابل پیکربندی مجدد و نقش آن در برنامه‌ریزی یک RMS، مسأله زمان‌بندی در یک محیط تولید با سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد تاکنون بررسی نشده است. همچنین ازآنجایی‌که یکی از اجزای مهم یک سیستم حمل‌ونقل مواد، ربات‌های صنعتی هستند و باعث افزایش ایمنی و کارایی در محیط تولید می‌شوند، تاکنون ربات‌های قابل پیکربندی مجدد در مسائل زمان‌بندی درنظر گرفته نشده است. لذا در این پژوهش، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی در خطوط تولید با ربات‌های قابل پیکربندی مجدد مورد بحث قرار می‌گیرد که برای ربات‌ها، گیرهای قابل پیکربندی مجدد پیشنهاد شده و به مدل‌سازی و حل آن پرداخته می‌شود. ساختار مقاله به‌این‌صورت است که در بخش ۲، پیشینه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در رابطه با مسأله زمان‌بندی در RMS و سیستم حمل‌ونقل قابل پیکربندی مجدد بیان شده است. در بخش ۳، به تعریف مسأله مورد بررسی و ارائه مدل ریاضی پرداخته می‌شود. در بخش ۴، نتایج عددی حاصل از اجرای مدل ریاضی بیان می‌شود و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

## ۲. پیشینه تحقیق

### ۲-۱. مسأله زمان‌بندی در RMS

در سال‌های اخیر، سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد توجه روزافزونی را در جامعه علمی به‌خود جلب کرده است و یکی از مسائلی که دراین نوع سیستم تولیدی توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته، مسائل برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی است که مدل‌های بهینه‌سازی زیادی برای بررسی و حل این مسأله ارائه شده است [۹]. زمان‌بندی به‌معنای تعیین زمان قطعات ورودی است و ترتیب ورودی‌ها به‌معنای تعیین توالی قطعات وارد شده به سیستم است و پژوهش‌های زیادی دراین زمینه انجام شده است. یکی از عوامل مؤثر بر برنامه زمان‌بندی یک سیستم تولیدی، تجهیزات، ابزار و ماژول‌های محدود است. ازاین‌رو برخی از پژوهش‌ها این محدودیت را در مدل‌سازی مسأله زمان‌بندی درنظر گرفته‌اند. یو و همکاران (۲۰۱۳)، با درنظر گرفتن یک برنامه فرآیند چندگانه برای هر قطعه و فرض محدود بودن تجهیزات، به تعیین هم‌زمان توالی ورودی و زمان‌بندی می‌پردازند. این بدان معنی است که هر قطعه را می‌توان ازطریق عملیات و ماشین‌آلات جایگزین مختلف پردازش کرد. آن‌ها رویکردی مبتنی‌بر قوانین اولویت‌بندی بااستفاده از ترکیبی از قوانین ارسال سفارش پیشنهاد کردند [۱۰]. جی و یوآن (۲۰۲۱) یک برنامه‌ریزی گسسته/پیوسته ترکیبی را در یک کارخانه با یک سیستم تولید پیوسته قابل پیکربندی مجدد با یک سری خطوط تولید موازی برای صنعت داروسازی در شرایطی که تعداد ماژول‌ها محدود است، انجام داده‌اند [۱۱].

فرآیند طراحی و پیاده‌سازی یک RMS را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد: سطح سیستم، سطح ماشین و کاهش زمان تنظیم. مسائل در سطح سیستم که بر طراحی سیستم تولید، متمرکز است. یکی از موضوعات مهم در سطح سیستم، نحوه تشکیل خانواده‌های محصولات مختلف است که در مقالات مورد بحث قرار گرفته است. عذاب و نادری (۲۰۱۵)، در یک سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد، کارها را براساس مسیر پردازش دسته‌بندی کرده‌اند به‌طوری‌که در هر دسته، مسیر پردازش کارها یکسان است. در این پژوهش توالی هر دسته مشخص شده است که بسته‌به زمان تنظیم ماشین‌ها یک مسأله تک‌ماشینی است. سپس به تعیین توالی کارها در هر دسته می‌پردازد

که یک مسأله جریان کارگاهی است [۱۲]. بارگاو و همکاران (۲۰۱۷) مسأله زمان‌بندی عملیات‌های مختلف یک محصول در یک RMS را بررسی کرده‌اند و با دسته‌بندی عملیات‌های مشابه و زمان‌بندی به‌دنبال به‌حداقل رساندن زمان تکمیل محصول هستند [۱۳]. هوانگ و یان (۲۰۱۸)، در یک RMS، خانواده‌ها را براساس سه معیار زمان پردازش و تقاضای ظرفیت و مسیر پردازش خانواده‌بندی می‌کنند. پس‌از تعیین خانواده قطعات، ازآنجایی‌که در داخل هر خانواده تعدادی قطعه با مسیر پردازش یکسان وجود دارد، توالی تولید قطعات مشخص می‌شود [۱۴].

تولید پیکربندی و زمان‌بندی دو تصمیم تاکتیکی مرتبط به‌هم هستند. تخصیص کار به ماشین‌های مختلف و تعیین توالی کارها، بستگی به نحوه پیکربندی آن دارد. ازسوی دیگر، تصمیم‌گیری در مورد پیکربندی بدون دانستن این‌که چه کارهایی باید به کدام ماشین‌ها اختصاص داده شود و چه ترتیبی باید برای پردازش کارها رعایت شود، نادرست است. بدیهی است که تعامل این دو موضوع نیازمند یک روش حل یکپارچه است. دو و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای بهینه‌سازی هم‌زمان طراحی پیکربندی و زمان‌بندی در یک خط جریان قابل پیکربندی مجدد[1] باهدف به‌حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و پیکربندی مجدد و کاهش زمان تأخیر پیشنهاد کرده‌اند که بااستفاده از روش قطعی اپسیلون محدودیت برای دو دوره تقاضا حل شده است [۱۵]. در پژوهشی دیگر، دو و همکاران (۲۰۲۱) مسأله طراحی یکپارچه پیکربندی و زمان‌بندی را در سیستم تولید خط جریان قابل پیکربندی مجدد برای دو دوره تقاضا درحالتی‌که هزینه و زمان تحویل به پیکربندی، زمان‌بندی و تقاضا بستگی دارد، بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، زمان‌بندی دسته‌ای چرخه‌ای درنظر گرفته شده و از الگوریتم‌های ازدحام ذرات چندهدفه و ژنتیک چندهدفه استفاده شده است [۱۶].

پیکربندی مجدد در دو سطح سیستم و ماشین بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند، بنابراین هردو باید بهینه شوند. بهینه‌سازی چیدمان تاثیر به‌سزایی در کاهش زمان تکمیل دارد. ازآنجایی‌که بهینه‌سازی چیدمان و زمان‌بندی به‌شدت به یکدیگر وابسته هستند، بهتر است برای بهبود عملکرد آن‌ها، باهم درنظر گرفته شوند. قانعی و القداوی (۲۰۲۰)، برای مسأله برنامه‌ریزی چیدمان و زمان‌بندی یکپارچه و تولید دسته‌ای در RMS، مسأله پایداری انرژی را درنظر گرفته‌اند و تأثیر نوسانات قیمت انرژی و تقاضا در دوره‌های مختلف بر پیکربندی و زمان‌بندی سیستم را در هر دوره ارزیابی کرده‌اند [۱۷].

برخی از مقالات، مسأله زمان‌بندی را با موضوعات دیگر به‌صورت یکپارچه درنظر گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، واحدی نوری و همکاران (۲۰۲۲)، برای برآورده کردن تقاضا در زمان شیوع ویروس کرونا، به بررسی یک مسأله زمان‌بندی و برنامه‌ریزی نیروی کار یکپارچه در یک محیط RMS می‌پردازند. در این پژوهش، زمان‌بندی و تخصیص کارگران ناهمگن به ماشین‌های موازی با درنظر گرفتن خطر ابتلا به بیماری کرونا و ترجیحات کارگران برای ساعات کاری انعطاف‌پذیر در افق زمانی یک روزه انجام می‌شود [۱۸]. گائو (۲۰۲۳)، در پژوهشی، برنامه‌ریزی فرآیند، پیکربندی چیدمان و ماشین و زمان‌بندی تولید برای سفارشی‌سازی انبوه در RMS را انجام داده است و پیکربندی مجدد ماشین را به‌جای مرحله طراحی RMS، در برنامه‌ریزی تولید درنظر گرفته است. همچنین برای ایجاد راه‌حل هوشمند که با تغییر پارامترهای هیوریستیک، هیوریستیک تغییر نکند، از Q-Learning و یادگیری تقویتی استفاده کرده است [۱۹]. یانگ و همکاران (۲۰۲۳)، به بهینه‌سازی هم‌زمان زمان‌بندی و پیکربندی مجدد در یک سیستم تولید جریان کارگاهی قابل پیکربندی مجدد پویا با ورود کارهای جدید بااستفاده از یادگیری تقویتی عمیق می‌پردازد [۲۰]. روحانی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۴) مسأله زمان‌بندی و تعیین اندازه دسته‌های تولید را به روشی یکپارچه بااستفاده از ابزارهای تولید قابل پیکربندی مجدد با درنظر گرفتن محدودیت‌های نیروی کار بررسی می‌کنند [۲۱].

محمودجانلو و همکاران (۲۰۲۰)، در یک RMS، به توسعه مسأله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌پردازد که در آن سه تصمیم تخصیص عملیات به ماشین‌ها، تعیین توالی کارها بر روی ماشین و تعیین پیکربندی ماشین‌ها برای پردازش عملیات‌های تخصیص‌یافته به آن در شرایطی که زمان تنظیم ماشین به پیکربندی بستگی دارد، گرفته می‌شود [۲۲]. دیاز و همکاران (۲۰۲۱)، در یک سیستم قابل پیکربندی مجدد خط جریان در شرایطی که حجم تولید در نوسان است و ظرفیت آن مقیاس‌پذیر است، بافرها و کارها را به ایستگاه‌های کاری اختصاص می‌دهند. در این پژوهش هدف به‌حداکثر رساندن میزان خروجی‌ها و به‌حداقل رساندن ظرفیت کل بافر برای مقابله با نوسانات حجم تولید است و برای این منظور از شبیه‌سازی مبتنی‌بر بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است [۲۳]. رحمان و همکاران (۲۰۲۲)، یک برنامه زمان‌بندی کارگاهی شدنی برای سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد با الگوریتم ژنتیک و قوانین ارسال سفارشات و بااستفاده از استراتژی پیش‌بینی تعیین می‌کنند، سپس شبیه‌سازی مبتنی‌بر قانون، برای اصلاح زمان‌بندی به‌دست‌آمده از بهترین نتیجه استراتژی واکنشی انجام می‌شود [۲۴]. بهرنت و همکاران (۲۰۲۳)، از سه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و ژنتیک چندهدفه برای یافتن بهترین استراتژی پیکربندی مجدد تولید و مسأله زمان‌بندی کارگاهی در یک RMS استفاده کرده‌اند و از شبیه‌سازی رویداد گسسته برای ارزیابی این سه الگوریتم استفاده شده است [۲۵].

### ۲-۲. سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد

اجزای قابل پیکربندی مجدد یک RMS شامل ماشین‌ها، ربات‌ها ابزارها، ماژول‌ها و سیستم‌های جابجایی مواد است. مقالات کمی در مورد مدل‌سازی و زمان‌بندی RMHS منتشر شده است. تقاضا برای سیستم‌های مونتاژ و حمل‌ونقل چندمنظوره برای تسهیل ساخت سفارشی، به‌ویژه با افزایش فشار هزینه، گسترش دامنه محصولات و کوتاه شدن چرخه‌های نوآوری افزایش یافته است. مولر و همکاران

1. Reconfigurable Flow Line (RFL)

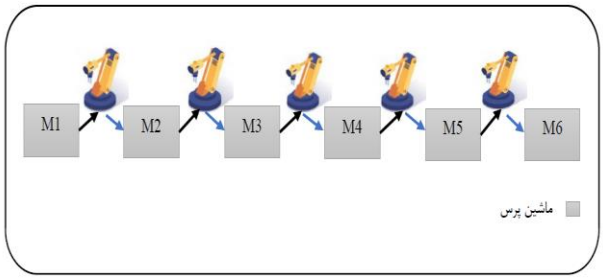
(۲۰۱۱) از یک سیستم حمل‌ونقل مواد خودکار جدید با چیدمان ماژولار و انطباق‌پذیر متشکل از چندین ربات متحرک برای حمل‌ونقل اشیاء در فضای دکارتی شش بعدی استفاده کرده‌اند [۴]. والنته و همکاران (۲۰۱۳) با هدف کاهش زمان تحویل و زمان حمل‌ونقل، الگوریتمی را برای ارسال آنلاین قطعات در یک سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد درحالی‌که قطعات در سیستم، درحال جریان هستند، پیشنهاد کرده‌اند [۲۶]. ترکاج و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی پیکربندی مجدد سخت‌افزار و توسعه نرم‌افزاری سیستم‌های کنترلی در یک سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد و ماژولار می‌پردازند [۲۷]. مرادی و همکاران (۲۰۱۸)، به زمان‌بندی در سلول‌های تولیدی رباتیک انعطاف‌پذیر با درنظر گرفتن امکان تعویض ابزار برای ماشین‌ها می‌پردازد [۲۸].

نوار نقاله یکی از اجزای قابل پیکربندی مجدد سیستم حمل‌ونقل مواد است و پژوهش‌های مختلفی دراین زمینه انجام شده است. آن و همکاران (۲۰۱۱)، عملکرد یک سیستم نوار نقاله قابل پیکربندی مجدد را در ترمینال‌های فرودگاه تجزیه‌وتحلیل کرد [۲۹]. رحمان و همکاران (۲۰۱۷) به‌صورت فیزیکی یک سیستم نوار نقاله قابل پیکربندی مجدد را بااستفاده از نرم‌افزار Solidworks طراحی و بااستفاده از اجزای ماژلار طراحی شده چیدمان‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند [۳۰]. محمد و همکاران (۲۰۱۸) یک ساختار سیستم یکپارچه برای یک سیستم نوار نقاله قابل پیکربندی مجدد برای پشتیبانی از تغییرات مکرر در تقاضای مشتری در یک سیستم تولید ارائه کرده‌اند [۳۱].

باتوجه‌به ارزیابی پژوهش‌های انجام شده در حوزه زمان‌بندی در سیستم‌های تولید قابل پیکربندی مجدد، اکثر پژوهش‌های انجام شده، مسأله زمان‌بندی را در سطح ماشین با ابزارهای قابل پیکربندی مجدد بررسی کرده‌اند. علی‌رغم اهمیت و تأثیر سیستم حمل‌ونقل بر هزینه و زمان تولید، بهره‌وری و ایمنی کارگران، و نقش مهمی که سیستم حمل‌ونقل مواد در یک RMS دارد، تاکنون مسأله زمان‌بندی در سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد مورد بررسی قرار نگرفته است. خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در حوزه زمان‌بندی در سیستم‌های تولید قابل پیکربندی مجدد و مقایسه آن با پژوهش حاضر در جدول (۱) نشان داده شده است. در این پژوهش، به مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی در سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد پرداخته می‌شود.

## ۳. مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی با سیستم حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد

خط تولید مورد بررسی دراین مقاله به‌صورت یک سیستم جریان کارگاهی است که در هر ایستگاه یک ماشین نصب شده است که وظیفه انجام عملیات خاصی بر روی قطعه برعهده دارد و بین هر دو ایستگاه متوالی یک ربات بازویی مجهزبه گیره مناسب وجود دارد که وظیفه انتقال قطعات از ماشین قبلی به ماشین بعدی را برعهده دارد. گیره‌ها به انتهای بازو متصل می‌شوند. مسیر پردازش هر قطعه از اولین ایستگاه شروع می‌شود و تا آخرین ایستگاه ادامه می‌یابد. در شکل (۱) خط تولید مورد بررسی نشان داده شده است.




**شکل (۱). خط تولید رباتیک مورد بررسی**

در این خط تولید، پس‌از اتمام تولید هر دسته از قطعات به‌میزان موردنیاز، خط برای تولید قطعه بعدی، باید ماشین‌ها و ربات‌ها، را تنظیم کند. بنابراین پس‌از تولید هر قطعه، یک زمان راه‌اندازی برای ماشین‌ها و یک زمان راه‌اندازی مجزا برای تنظیم محورهای حرکتی هر ربات و تعویض گیره‌های اختصاصی وجود دارد.

هر قطعه و هر ربات، گیره مخصوص به خود را دارد. باتوجه‌به تنوع بالای قطعات و تعداد زیاد ربات محیط‌های صنعتی، نیاز به نگهداری انبوهی از گیره‌های اختصاصی وجود دارد که پیامدهای زیر را دارد: ۱) افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری موجودی گیره‌ها ۲) افزایش زمان توقف تولید ناشی از تعویض مکرر گیره‌ها ۳) وابستگی به طراحی اختصاصی گیره‌ها برای قطعات جدید یا اصلاح شده. دراین پژوهش، به‌منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، استفاده از گیره‌های قابل پیکربندی مجدد برای ربات‌ها پیشنهاد شده است. یک گیره قابل پیکربندی مجدد را می‌توان برای حمل‌ونقل چندین نوع قطعه استفاده کرد که می‌تواند منجربه کاهش زمان تولید، هزینه‌های خرید گیره، هزینه‌های نگهداری موجودی و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم شود. به‌منظور بهینه‌سازی استفاده ازاین گیره‌ها، محصولات براساس مسیر پردازش، در گروه‌های مختلف خانواده‌بندی می‌شوند. این خانواده‌بندی دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: ۱) کاهش تعداد دفعات پیکربندی مجدد گیره‌ها و ربات ۲) کمینه‌سازی زمان تولید.

باتوجه‌به مطالب گفته شده، هدف این پژوهش، تعیین توالی تولید خانواده‌ها و تعیین توالی قطعات درون هر خانواده به‌منظور کاهش دوره ساخت است.

### ۳-۱. مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش ابتدا مفروضات مدل ذکر خواهد شد، سپس به‌معرفی اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم‌گیری و مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی با تجهیزات حمل‌ونقل مواد قابل پیکربندی مجدد پرداخته شده است.

**مفروضات مدل**

- تقاضا قطعی است و به‌صورت سالیانه تعیین می‌شود.
- قطعات به گروه‌های مختلف خانواده‌بندی می‌شوند.

**جدول (۱). خلاصه پژوهش‌های انجام شده در حوزه زمان‌بندی، برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی فرآیند در RMS**

| نویسندگان | سال انتشار | تعداد محصول یا قطعه/ خانواده محصول | نوع پیکربندی | | نوع مسأله | | | الگوی پردازش | | | | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | در سطح ماشین | تجهیزات حمل‌ونقل | scheduling | Production planning | Process planning | Flow shop | Job shop | RFL | | |
| یو و همکاران | ۲۰۱۳ | چند قطعه | * | | * | | * | | * | | | تعداد محدود فیکسچر، زمان‌بندی و توالی ورودی‌ها به‌صورت یکپارچه |
| عذاب و نادری | ۲۰۱۵ | یک خانواده محصول | * | | | * | | * | | | | |
| بارگاو و همکاران | ۲۰۱۷ | چند محصول فولادی | * | | * | | | * | | | | زمان‌بندی روزانه |
| هوآنگ و یان | ۲۰۱۸ | | * | | * | | | | | | | گروه‌بندی قطعات براساس مسیر پردازش |
| مرادی و همکاران | ۲۰۱۸ | | | | * | | | | | | | سلول تولیدی رباتیک انعطاف‌پذیر |
| محمودجانلو و همکاران | ۲۰۲۰ | یک خانواده محصول | * | | * | | | * | * | | | |
| دو و همکاران | ۲۰۲۰ | چند قطعه از یک خانواده | * | | * | | | | | * | | |
| قانعی و القداوی | ۲۰۲۰ | | | | * | | | | | | | نوسانات قیمت انرژی |
| محمودجانلو و همکاران | ۲۰۲۰ | | * | | | | | | * | | | |
| دو و همکاران | ۲۰۲۱ | چند قطعه از یک خانواده | | | | | | | | | | |
| جی و یوآن | ۲۰۲۱ | | * | | | | | | | | | زمان‌بندی گسسته/پیوسته ترکیبی |
| دیاز و همکاران | ۲۰۲۱ | چند قطعه | | | | | | | | * | | |
| رحمان و همکاران | ۲۰۲۲ | | | | | | | | * | | | |
| واحدی نوری و همکاران | ۲۰۲۲ | | | | * | | | | | | | |
| گائو و همکاران | ۲۰۲۳ | | | | | * | | | | | | سفارشی‌سازی انبوه |
| بهرنت و همکاران | ۲۰۲۳ | | | | | * | | | * | | | |
| یانگ و همکاران | ۲۰۲۳ | | * | | * | | | * | | | | |
| پژوهش فعلی | | چند خانواده محصول | | * | * | | * | | | | | ربات‌های قابل پیکربندی مجدد |

- زمان پردازش هر قطعه از هر خانواده بر روی ماشین‌ها و ربات‌ها معلوم و مشخص است.

تمامی قطعات درون یک خانواده، از مسیر پردازش یکسانی پیروی می‌کنند.

- زمان راه‌اندازی ماشین‌ها تنها به‌ترتیب تولید دو قطعه متوالی وابسته است و مستقل از نوع ماشین می‌باشد.
- زمان پیکربندی مجدد ربات‌ها وابسته به‌ترتیب توالی دو خانواده متوالی است.

**اندیس‌های به‌کار رفته در مدل**

$i$ ماشین‌ها $i = (1, \dots, I)$

$r$ ربات‌ها $r=\{1,\dots,R\}$

$f, g$ خانواده‌ها $f,g=\{1,\dots,F,G\}$

$j, k, k'$ کارهای موجود در هر خانواده $j,k=\{1,\dots n_f\}$

**پارامترهای مدل ریاضی**

$PM_{g,k,i}$ زمان پردازش کار k از خانواده g روی ماشین i

$PR_{g,k,r}$ زمان پردازش کار k از خانواده g روی ربات r

$SM_{j,k}$ زمان تنظیم ماشین از کار j به کار k

$SR_{f,g}$ زمان تنظیم ربات از خانواده f به خانواده g

**متغیرهای تصمیم‌گیری**

$x_{g,j,k}$ اگر کار k از خانواده g پس‌از کار j پردازش شود ۱ درغیر این‌صورت صفر

$y_{f,g}$ اگر خانواده g فوراً پس‌از خانواده f پردازش شود ۱ درغیر این‌صورت صفر

$w_{g,j}$ اگر کار j، کار اول از خانواده g باشد ۱ درغیر این‌صورت

صفر

$BR_{g,r}$ زمان شروع خانواده g روی ربات r

$BM_{g,k,i}$ زمان شروع کار k از خانواده g روی ماشین i

$F_{g,r}$ زمان تکمیل خانواده f روی ربات r

$CM_{g,k,i}$ زمان تکمیل کار k از خانواده g روی ماشین i

$CR_{g,k,r}$ زمان تکمیل کار k از خانواده g روی ربات r

**تابع هدف و محدودیت‌ها**

$$\text{Min Z}=C_{max} \quad (۱)$$

$$\sum_{f=0,f\neq g}^{F} y_{f,g} = 1 \qquad \forall g = 1,\dots G \quad (۲)$$

$$\sum_{g=1,f\neq g}^{G} y_{f,g} \leq 1 \qquad \forall f = 1,\dots F \quad (۳)$$

$$\sum_{g=1}^{G} y_{0,g} = 1 \quad (۴)$$

$$BR_{g,1} \geq F_{f,1} + SR_{f,g} - M(1-y_{f,g}) \qquad \forall g = 1,\dots G,\quad \forall f = 0,\dots,F, m,\ g \neq f \quad (۵)$$

$$BR_{g,r} \geq SR_{0,g} - M(1-y_{0,g}) \qquad \forall g = 1,\dots G,\ \forall r = 1,\dots,R \quad (۶)$$

$$BR_{g,r} \geq CM_{g,j,r-1} - M(2-y_{f,g}-w_{g,j}) \qquad \forall g = 1,\dots G, \forall f = 0,\dots,F, g \neq f,\ \forall j = 1,\dots,n_f, \forall r = 2,\dots R \quad (۷)$$

$$BR_{g,r} \geq CR_{f,k,r} + SR_{f,g} - M\left(1-y_{f,g}\right) \qquad \forall g = 1,\dots G, \forall f = 0,\dots,F,\ g \neq f,\ \forall k = 1,\dots,n_f,\ \forall r = 2,\dots R \quad (۸)$$

$$k-1-M\left(1-w_{g,j}\right) \leq \sum_{k'=1}^{n_f} x_{g,j,k} \leq k-1+M(1-w_{g,j}) \qquad \forall k = 2,\dots n_f,\ \forall g = 1,\dots G,\ \forall j = 1,\dots,n_f \quad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{n_f} w_{g,j} = 1, \qquad \forall g = 1,\dots G \quad (۱۰)$$

$$BM_{g,k,i} \geq CM_{g,j,i} + SM_{j,k} - M\left(1-x_{g,j,k}\right) \qquad \forall k = j+1,\dots n_f,\ \forall j = 0,\dots,n_f-1,\ \forall i = 1,\dots,I,\ \forall g = 1,\dots,G \quad (۱۱)$$

$$BM_{g,j,i} \geq CM_{g,k,i} + SM_{k,j} - M(x_{g,k,j}) \qquad \forall k = j+1,\dots n_f, \forall j = 0,\dots,n_f-1,\ i = 1,\dots,I,\ \forall g = 1,\dots G \quad (۱۲)$$

$$BM_{g,k,i} \geq CM_{f,j,i} + SM_{j,k} - M\left(1-y_{f,g}\right) \qquad \forall k = j+1,\dots n_f,\ \forall j = 0,\dots,n_f-1\ \forall i = 1,\dots,I,\ \forall g = 1,\dots G, \forall f = 0,\dots,F \quad (۱۳)$$

$$BM_{g,k,i} \geq CR_{g,k,i} \qquad \forall k = 1,\dots n_f,\ \forall g = 1,\dots G,\ \forall i = 1,\dots,I \quad (۱۴)$$

$$CR_{g,k,r} \geq BR_{g,r} + PR_{g,k,r} \qquad \forall g = 1,\dots G,\ \forall r = 1,\dots R,\ \forall k = 1,\dots n_f \quad (۱۵)$$

$$CR_{g,k,r} \geq CR_{g,j,r} + PR_{g,k,r} - M\left(1-x_{g,j,k}\right) \qquad \forall j = 0,\dots,n_f-1,\ k = j+1,\dots,n_f,\ \forall g = 1,\dots G,\ \forall r = 1,\dots R \quad (۱۶)$$

$$CR_{g,j,r} \geq CR_{g,k,r} + PR_{g,j,r} - M(x_{g,j,k}) \qquad \forall j = 0,\dots,n_f-1, \forall k = j+1,\dots,n_f,\ \forall g = 1,\dots G,\ \forall r = 1,\dots R \quad (۱۷)$$

$$CR_{g,k,r} \geq CM_{g,k,r-1} + PR_{g,k,r} \qquad \forall g = 1,\dots G,\ \forall k = 1,\dots,n_f,\ \forall r = 2,\dots,R \quad (۱۸)$$

$$CM_{g,k,i} = BM_{g,k,i} + PM_{g,k,i} \qquad \forall g = 1,\dots G,\ k = 1,\dots,n_f,\ \forall i = 1,\dots,I \quad (۱۹)$$

$$F_{g,r} \geq CR_{g,k,r} \qquad \forall g = 1,\dots G,\ \forall k = 1,\dots,n_f,\ \forall r = 2,\dots,R \quad (۲۰)$$

$$C_{max} \geq F_{g,R} \qquad \forall g = 1,\dots G \quad (۲۱)$$

$$CM_{g,k,i}, CR_{g,k,r}, BR_{g,r}, BM_{g.k,i}, F_{g,r} \geq 0 \quad (۲۲)$$

$$x_{g,k,j}, w_{g,j} \in (0,1) \quad (۲۳)$$

$$y_{f,g} \in (0,1),\ f \neq g \quad (۲۴)$$

تابع هدف (۱) دوره ساخت محصول را کمینه می‌کند. محدودیت‌های (۲) تا (۴)، به تعیین توالی خانواده‌ها می‌پردازند. محدودیت (۵)، بیان می‌کند که زمان شروع خانواده روی ربات اول باید بزرگتر مساوی زمان پایان خانواده قبلی روی ربات اول به‌علاوه زمان تعویض پیکربندی بین دو خانواده باشد. محدودیت (۶)، بیان می‌کند که زمانی پردازش خانواده اول روی ربات‌ها می‌تواند شروع شود که تنظیمات اولیه روی ربات متناسب با خانواده‌ای که قرار است پردازش کند، انجام شود. محدودیت (۷)، بیان می‌کند که زمان شروع خانواده روی ربات باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار اول از خانواده روی ماشین قبلی باشد. محدودیت (۸)، زمان شروع خانواده روی ربات باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار آخر از خانواده قبلی روی ربات به‌علاوه زمان تعویض پیکربندی بین دو خانواده باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰)، به تعیین کار اول از هر خانواده می‌پردازد. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲)، بیان می‌کند که زمان شروع یک کار از یک خانواده روی یک ماشین باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار قبلی از همان خانواده روی همان ماشین به‌علاوه زمان تنظیم ماشین بین دو کار باشد. همچنین تضمین می‌کنند که هر ماشین حداکثر یک کار را در یک زمان می‌تواند پردازش کند. محدودیت (۱۳)، بیان می‌کند که زمان شروع یک کار از یک خانواده روی ماشین باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار آخر از خانواده قبلی روی ماشین باشد. محدودیت (۱۴)، بیان می‌کند که زمان شروع یک کار از یک خانواده روی ماشین باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار از همان خانواده روی ربات قبلی باشد. محدودیت (۱۵)، بیان می‌کند که زمان تکمیل یک کار از یک خانواده روی ربات باید بزرگتر مساوی زمان شروع همان خانواده روی ربات به‌علاوه زمان پردازش کار از خانواده روی ربات باشد. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷)، بیان می‌کند که زمان تکمیل یک کار از یک خانواده روی ربات باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار قبلی از همان خانواده روی همان ربات به‌علاوه زمان پردازش کار روی ربات باشد. همچنین تضمین می‌کند که هر ربات حداکثر یک کار را در یک زمان می‌تواند پردازش کند. محدودیت (۱۸)، بیان می‌کند که زمان تکمیل یک کار از یک خانواده روی ربات باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل همان کار از همان خانواده روی ماشین قبلی باشد. محدودیت (۱۹)، بیان می‌کند که زمان تکمیل یک کار از یک خانواده روی ماشین، برابر است با زمان شروع همان کار از همان خانواده روی ماشین به‌علاوه زمان پردازش کار روی ماشین.

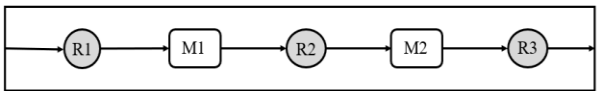
محدودیت (۲۰)، بیان می‌کند که زمان تکمیل یک خانواده روی ربات، باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل کار آخر از خانواده روی ربات باشد. محدودیت (۲۱)، بیان می‌کند که دوره ساخت یا Cmax باید بزرگتر مساوی زمان تکمیل خانواده آخر روی ربات آخر باشد. محدودیت‌های (۲۲) تا (۲۴)، متغیرهای تصمیم‌گیری را تعریف می‌کنند.

## ۴. نتایج و تحلیل حساسیت

### ۴-۱. نمونه مسأله ۱

باتوجه‌به مدل توسعه داده شده، عملکرد مدل پیشنهادی بااستفاده از یک مثال عددی تشریح می‌شود.

فرض کنید که خط تولید مورد بررسی شامل ۲ ماشین و ۳ ربات است که در شکل (۲) نشان داده شده است.




**شکل (۲). خط تولید مورد بررسی**

قطعاتی که باید تولید شوند در ابتدای خط تولید قرار می‌گیرند و توسط ربات اول برای پردازش به ماشین اول انتقال می‌یابد. پردازش از ماشین اول شروع می‌شود و توسط ماشین دوم به‌اتمام می‌رسد و توسط ربات سوم از خط خارج می‌شود. ماشین قبل از تولید هر کار (قطعه) باید تنظیم شود. زمان تنظیم ماشین بین دو کار متوالی در جدول (۲) نشان داده شده است. پیکربندی مجدد از یک خانواده به خانواده دیگر مستلزم تغییر گیره‌های ربات و تنظیم محورهای حرکتی هر ربات می‌باشد. به‌همین دلیل، زمان مشخصی برای تعویض پیکربندی گیره‌های هر ربات وجود دارد. زمان تعویض پیکربندی وابسته به توالی، مطابق با جدول (۳) است.

زمان پردازش کارهای هر خانواده بر روی هر ماشین و بر روی هر ربات به‌ترتیب مطابق جدول (۴) و جدول (۵) است.

پس‌از حل مدل MIP مسأله در نرم‌افزار GAMS، برنامه زمان‌بندی بهینه مطابق با گانت چارت نشان داده شده در شکل (۳) خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دوره ساخت برابر با ۶۴ واحد زمانی است و مدت‌زمان پردازش CPU، ۰/۰۵ ثانیه می‌باشد.

زمان تکمیل کارهای هر خانواده بر روی ربات‌ها و ماشین‌ها در جدول (۶) و جدول (۷) نشان داده شده است.

**جدول (۲). زمان تنظیم ماشین بین دو کار متوالی**

| | کارها | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کارها | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
| j1 | - | ۵ | ۸ | ۲ | ۶ | ۴ |
| j2 | ۴ | - | ۵ | ۶ | ۲ | ۴ |
| j3 | ۱ | ۳ | - | ۵ | ۳ | ۴ |
| j4 | ۹ | ۱۰ | ۸ | - | ۶ | ۳ |
| j5 | ۷ | ۵ | ۶ | ۴ | - | ۵ |
| j6 | ۸ | ۱۰ | ۵ | ۷ | ۶ | - |

**جدول (۳). زمان تعویض پیکربندی ربات**

| | خانواده‌ها | | |
|---|---|---|---|
| خانواده‌ها | g1 | g2 | g3 |
| f0 | ۲ | ۴ | ۳ |
| f1 | - | ۲ | ۳ |
| f2 | ۴ | - | ۲ |
| f3 | ۲ | ۱ | - |

**جدول (۴). زمان پردازش کارها بر روی ماشین**

| | ماشین‌ها | | |
|---|---|---|---|
| خانواده | کارها | i1 | i2 |
| F1 | j3 | ۵ | ۳ |
| | j4 | ۲ | ۴ |
| F2 | j1 | ۴ | ۶ |
| | j5 | ۵ | ۴ |
| F3 | j2 | ۳ | ۶ |
| | j6 | ۷ | ۵ |

**جدول (۵). زمان پردازش کارها بر روی ربات**

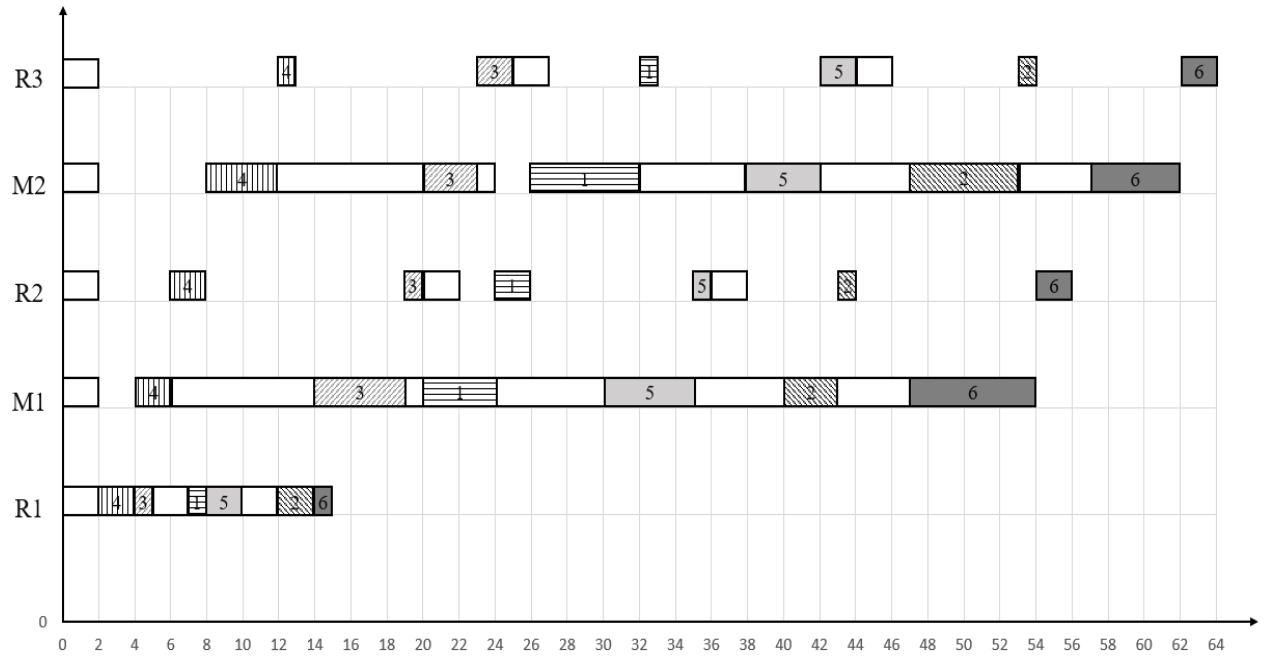
| | ربات‌ها | | | |
|---|---|---|---|---|
| خانواده | کارها | r1 | r2 | r3 |
| F1 | j3 | ۱ | ۱ | ۲ |
| | j4 | ۲ | ۲ | ۱ |
| F2 | j1 | ۱ | ۲ | ۱ |
| | j5 | ۲ | ۱ | ۲ |
| F3 | j2 | ۲ | ۱ | ۱ |
| | j6 | ۱ | ۲ | ۲ |

**جدول (۶). زمان تکمیل کارها بر روی ربات‌ها**

| | ربات‌ها | | | |
|---|---|---|---|---|
| خانواده | کارها | r1 | r2 | r3 |
| F1 | j3 | ۵ | ۲۰ | ۲۵ |
| | j4 | ۴ | ۸ | ۱۳ |
| F2 | j1 | ۸ | ۲۶ | ۳۳ |
| | j5 | ۱۰ | ۳۶ | ۴۴ |
| F3 | j2 | ۱۴ | ۴۴ | ۵۴ |
| | j6 | ۱۵ | ۵۶ | ۶۴ |

**جدول (۷). زمان تکمیل کارهای هر خانواده بر روی ماشین‌ها**

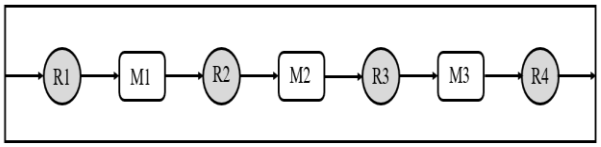
| | ماشین‌ها | | |
|---|---|---|---|
| خانواده | کارها | i1 | i2 |
| F1 | j3 | ۱۹ | ۲۳ |
| | j4 | ۶ | ۱۲ |
| F2 | j1 | ۲۴ | ۳۲ |
| | j5 | ۳۵ | ۴۲ |
| F3 | j2 | ۴۳ | ۵۳ |
| | j6 | ۵۴ | ۶۲ |




**شکل (۳). نمودار گانت چارت**

### ۴-۲. نمونه مسأله ۲

در این نمونه مسأله، ۳ خانواده محصول درنظر گرفته شده است که هر خانواده، شامل ۳ کار می‌باشد. خط تولید مورد بررسی شامل ۴ ربات و ۳ ماشین به‌صورت شکل (۴) است. دوره ساخت برابر با ۸۳ واحد زمانی و مدت‌زمان پردازش CPU، ۰/۳۱ ثانیه می‌باشد. در این نمونه مسأله، با اضافه کردن یک ربات و یک ماشین و ۳ کار در مقایسه با نمونه مسأله ۱، مدت‌زمان پردازش ۶ برابر می‌شود و به دوره ساخت ۱۹ واحد زمانی اضافه خواهد شد.



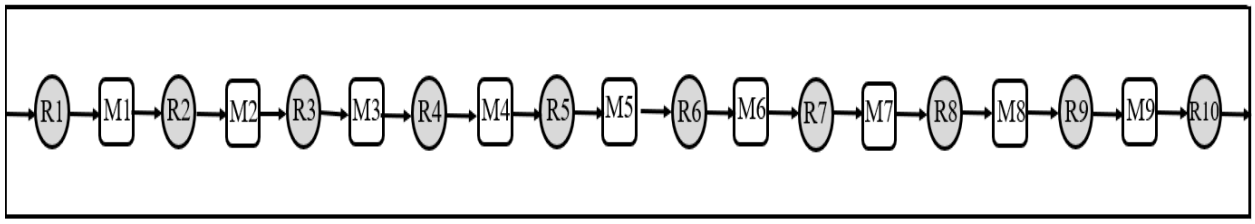

**شکل (۴). خط تولید مورد بررسی در نمونه مسأله ۲، شامل ۴ ربات و ۳ ماشین**

### ۴-۳. نمونه مسأله ۳

در این نمونه مسأله، ۵ خانواده محصول درنظر گرفته شده که هر خانواده، شامل ۲ کار است. خط تولید مورد بررسی شامل ۱۰ ربات و ۹ ماشین است که در شکل (۵) نشان داده شده است. دوره ساخت در این حالت برابر با ۱۷۵ واحد زمانی و مدت‌زمان پردازش CPU، ۳/۲۴ ثانیه است. درمقایسه با نمونه مسأله ۲، به تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها ۶ عدد اضافه شده و تعداد کارها هم ۱ عدد افزایش یافته است که موجب افزایش دوره ساخت به‌میزان ۹۲ واحد زمانی شده است. ازسوی دیگر، مدت‌زمان پردازش در مقایسه با نمونه مسأله ۲، ۱۰ برابر و در مقایسه با نمونه مسأله ۱، ۶۴ برابر خواهد شد.

### ۴-۴. تحلیل حساسیت

برای ارزیابی مدل ارائه شده، ۱۲ مسأله متنوع درنظر گرفته شده است. هر مسأله با مدل ریاضی ارائه شده، حل می‌شود و با مقایسه جواب‌های حاصل از حل مدل، کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول (۸) پارامترهای مسأله‌ها شامل خانواده کارها (f)، کارها (j)، ربات‌ها (r)، ماشین‌ها (i)، نشان داده شده است. در جدول (۹) نتایج حاصل از حل این ۱۲ مسأله شامل دوره ساخت و مدت‌زمان پردازش CPU برحسب ثانیه، ارائه شده است. مسأله‌ها در نرم‌افزار GAMS نسخه ۳۳.۲.۰ پیاده‌سازی شده‌اند و بااستفاده از حل‌کننده CPLEX بر روی رایانه‌ای با پردازنده Intel core i7، ۲/۶ گیگاهرتز و ۳۲ گیگابایت رم اجرا شده‌اند.




**شکل (۵). خط تولید مورد بررسی در نمونه مسأله ۳، شامل ۱۰ ربات و ۹ ماشین**

جدول (۸). پارامترهای مثال‌های عددی

| مسأله | f | j | r | i |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۶ | ۳ | ۲ |
| ۲ | ۳ | ۹ | ۴ | ۳ |
| ۳ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۹ |
| ۴ | ۲ | ۶ | ۴ | ۳ |
| ۵ | ۳ | ۶ | ۱۰ | ۹ |
| ۶ | ۳ | ۹ | ۱۰ | ۹ |
| ۷ | ۳ | ۱۲ | ۴ | ۳ |
| ۸ | ۳ | ۱۲ | ۱۰ | ۹ |
| ۹ | ۳ | ۱۲ | ۱۵ | ۱۴ |
| ۱۰ | ۵ | ۱۰ | ۱۵ | ۱۴ |
| ۱۱ | ۵ | ۱۵ | ۱۰ | ۹ |
| ۱۲ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۴ |

جدول (۹). دوره ساخت و مدت‌زمان پردازش CPU (ثانیه) برای حل مدل بااستفاده از حل‌کننده CPLEX

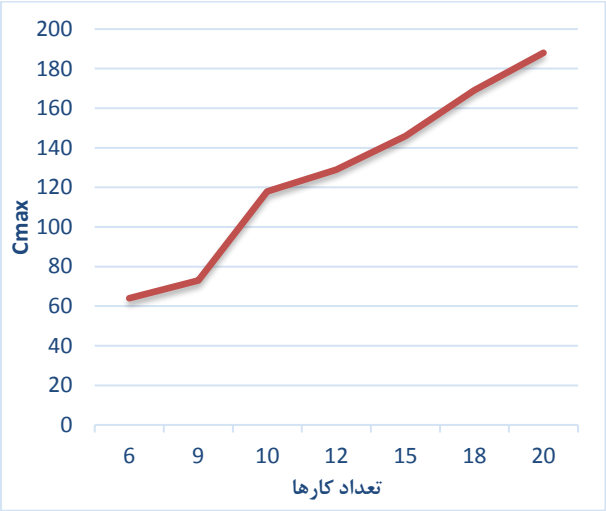
| مسأله | $C_{max}$ | Cplex time (sec) |
|---|---|---|
| ۱ | ۶۴ | ۰/۰۵ |
| ۲ | ۸۳ | ۰/۳۱ |
| ۳ | ۱۷۵ | ۳/۲۴ |
| ۴ | ۶۳ | ۰/۰۸ |
| ۵ | ۱۳۸ | ۰/۱۱ |
| ۶ | ۱۹۶ | ۱/۶۲ |
| ۷ | ۱۴۳ | ۴/۲۷ |
| ۸ | ۲۱۳ | ۱۷/۳۸ |
| ۹ | ۲۵۸ | ۳۸/۶۹ |
| ۱۰ | ۲۲۷ | ۶/۰۲ |
| ۱۱ | ۲۴۵ | ۲۹۳/۲۲ |
| ۱۲ | ۳۱۱ | ۳۰۱۲/۴۷ |

جدول (۹). دوره ساخت و مدت‌زمان پردازش CPU (ثانیه) برای حل مدل پس‌از تحلیل حساسیت

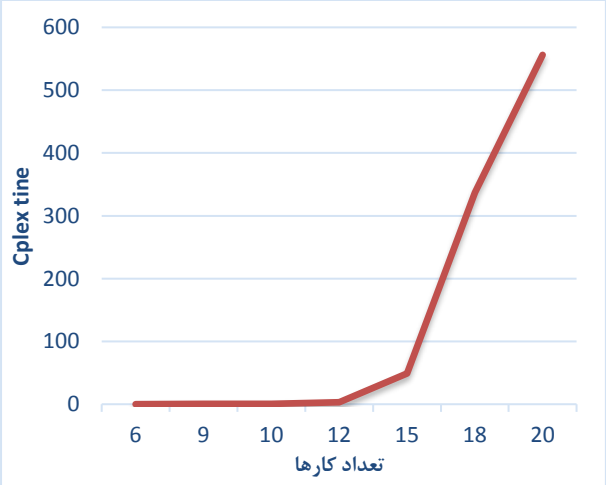
| | $C_{max}$ | Cplex time (sec) |
|---|---|---|
| Run 1 | ۷۷ | ۰/۰۶ |
| Run 2 | ۷۲ | ۰/۰۵ |
| Run 3 | ۸۱ | ۰/۰۵ |
| Run 4 | ۸۷ | ۰/۰۶ |
| Run 5 | ۷۶ | ۰/۱۱ |
| Run 6 | ۶۸ | ۰/۱۱ |
| Run 7 | ۷۹ | ۰/۰۹ |
| Run 8 | ۷۵ | ۰/۰۸ |
| Run 9 | ۸۲ | ۰/۱۱ |
| Run 10 | ۸۵ | ۰/۱۱ |
| Run 11 | ۷۳ | ۰/۱۱ |
| Run 12 | ۸۰ | ۰/۱۹ |
| Run 13 | ۶۶ | ۰/۰۹ |
| Run 14 | ۸۴ | ۰/۰۹ |
| Run 15 | ۹۸ | ۰/۱۷ |

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مسأله ۸ نسبت‌به مسأله ۵، تعداد کارها، ۲ برابر شده است، اما تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها، ثابت است. دراین حالت زمان حل، ۱۵۸ برابر شده است. ازسوی دیگر، در مسأله ۹، نسبت‌به مسأله ۷، تعداد کارها یکسان است و به‌تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها، ۱۱ عدد اضافه شده است. زمان حل دراین حالت، ۹ برابر خواهد شد.

شکل (۶) و شکل (۷) به‌ترتیب نمودار زمان تکمیل یا Cmax و زمان حل را در برابر افزایش تعداد کارها و ثابت بودن تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها در اندازه ۳ ربات و ۲ ماشین نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب نمودار شکل (۶) به صعودی می‌باشد و نشان‌دهنده افزایش زمان تکمیل درازای افزایش تعداد کارها است. مطابق شکل (۷) با افزایش تعداد کارها از ۱۵ به ۱۸، شیب نمودار به‌شدت افزایش می‌یابد و نشان از یک رشد نمایی در زمان حل به‌ازای افزایش تعداد کارها دارد. ازاین دو شکل می‌توان دریافت که زمان حل نسبت‌به افزایش تعداد کارها، حساسیت بیشتری در مقایسه با زمان تکمیل دارد.



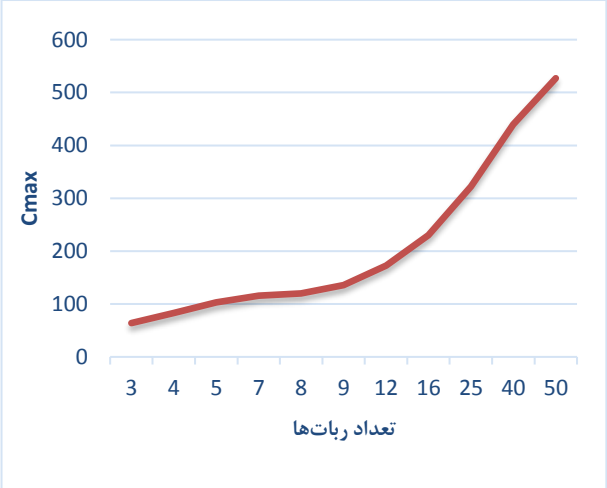

شکل (۶). نمودار تغییرات Cmax به‌ازای افزایش تعداد کارها و ثابت ماندن تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها




شکل (۷). نمودار تغییرات زمان حل به‌ازای افزایش تعداد کارها و ثابت ماندن تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها

شکل (۸) و شکل (۸)، به‌ترتیب نمودار زمان تکمیل و زمان حل را به‌ازای افزایش تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها و ثابت ماندن تعداد کارها در اندازه ۶ کار نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد ربات‌ها، زمان تکمیل افزایش می‌یابد و هرچه تعداد ربات‌ها از ۱۶ ربات بیشتر شود، شیب نمودار بیشتر خواهد شد. ازسوی دیگر اگر تعداد ربات‌ها بین ۳ تا ۱۶ ربات تغییر کند، زمان حل با شیب بسیار کم افزایش می‌یابد و زمانی‌که تعداد ربات‌ها به ۲۵ و بیشتر می‌رسد، زمان حل با شیب زیادی، افزایش می‌یابد. می‌توان دریافت که دراین حالت زمان تکمیل نسبت‌به افزایش تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها از حساسیت بیشتری نسبت‌به زمان حل برخوردار است.

درنهایت، با بررسی این نمودارها و جداول، می‌توان نتیجه گرفت که زمان حل به تعداد کارها نسبت‌به تعداد ماشین‌ها و ربات‌ها، وابستگی و حساسیت بیشتری دارد و با افزایش تعداد کارها، زمان حل به‌صورت نمایی رشد می‌کند. با افزایش تعداد کارها به ۲۰ عدد، و تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها به‌ترتیب به ۱۰ و ۹ عدد، زمان حل مدل به بیش‌از ۱۵۴۰۰۰ ثانیه (معادل ۴۲ ساعت) خواهد رسید. درنتیجه امکان حل مدل در اندازه مسأله‌های متوسط و بزرگ بااستفاده از نرم‌افزار گمز و حل‌کننده CPLEX وجود ندارد و برای حل مسائل در اندازه‌های بزرگ نیاز به استفاده از الگوریتم‌های حل ابتکاری می‌باشد.

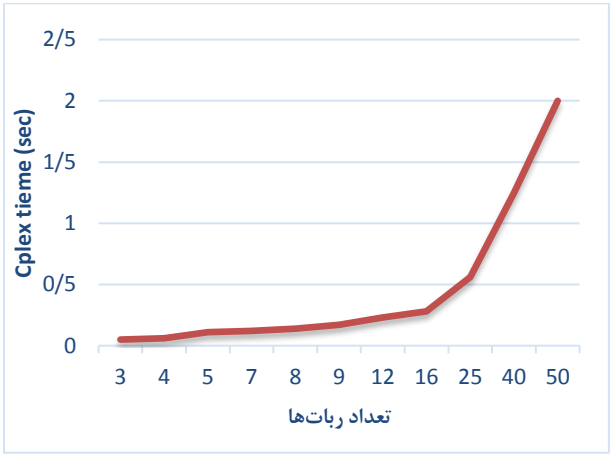



**شکل (۸). نمودار تغییرات Cmax در برابر افزایش تعداد ربات‌ها و ثابت ماندن تعداد کارها**

برای تحلیل حساسیت مدل، نمونه مسأله ۱ شامل ۳ خانواده، ۶ کار، ۳ ربات و ۲ ماشین درنظر گرفته می‌شود که در آن پارامترهای زیر به‌صورت توزیع یکنواخت گسسته تعریف شده است.

- زمان پردازش بر روی ماشین از توزیع یکنواخت گسسته DU[1,10]
- زمان پردازش بر روی ربات از توزیع یکنواخت گسسته DU[1,5]
- زمان تنظیم ماشین از توزیع یکنواخت گسسته DU[1,15]

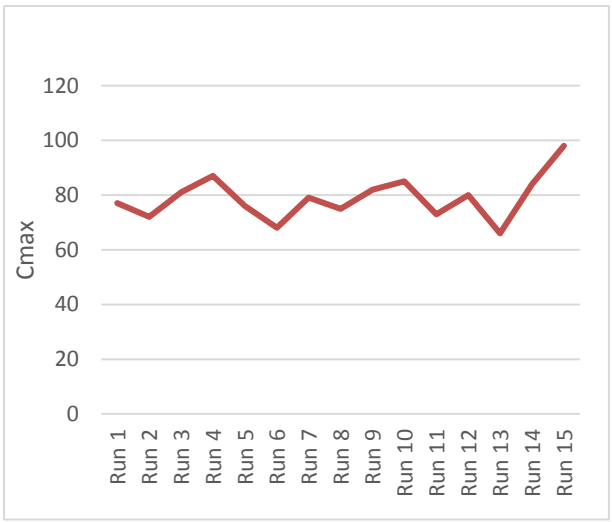
پس‌از ۱۵ بار اجرای مدل، نتایج در جدول (۹) نشان داده شده است.




**شکل (۹). نمودار تغییرات زمان حل در برابر افزایش تعداد ربات‌ها و ثابت ماندن تعداد کارها**

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دوره ساخت بین ۶۶ تا ۹۸ واحد زمانی توزیع شده است و مدت‌زمان پردازش نیز بین ۰.۰۵ تا ۰.۱۹ ثانیه می‌باشد. همچنین بیشترین زمان پردازش برابر با ۰.۱۹ است که مربوط به اجرای ۱۲ است و زمان تکمیل آن برابر با ۸۰ واحد زمانی است.

شکل (۱۰) و شکل (۱۱)، به‌ترتیب نمودار زمان تکمیل و زمان حل مدل در حالت درنظر گرفتن زمان پردازش ماشین و ربات و زمان تنظیم ماشین به‌صورت توزیع یکنواخت گسسته طی اجراهای مختلف است. همان‌طور که در این دو نمودار مشاهده می‌شود، زمان حل مدل نسبت‌به زمان تکمیل، از تغییرات و نوسان‌های بیشتری برخوردار است.

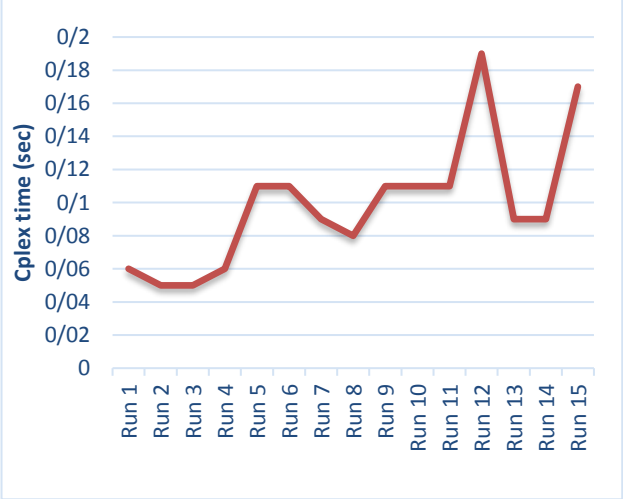



**شکل (۱۰). نمودار تغییرات Cmax طی اجرای مختلف در تحلیل حساسیت**

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی در خطوط تولید با ربات‌های قابل پیکربندی مجدد مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی عدد

صحیح مختلط ارائه شد و با ارائه سه مثال عددی در ابعاد کوچک و حل آن در نرم‌افزار GAMS 33.2.0 نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی مدل، در ابتدا ۱۲ مسأله با تعداد کارها، ربات‌ها و ماشین‌های مختلف، حل شد. نتایج نشان داد که زمان حل مدل به تعداد کارها نسبت‌به تعداد ماشین‌ها و ربات‌ها، وابستگی و حساسیت بیشتری دارد و با افزایش تعداد کارها، زمان حل به‌صورت نمایی رشد می‌کند به‌طوری‌که با افزایش تعداد کارها به ۲۰ عدد، و تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها به‌ترتیب به ۱۰ و ۹ عدد، زمان حل مدل به بیش‌از ۱۵۴۰۰۰ ثانیه خواهد رسید. سپس با ثابت ماندن تعداد ماشین‌ها و ربات‌ها، تعداد کارها افزایش یافت، نتایج نشان داد که زمان حل دراین حالت از حساسیت بیشتری نسبت‌به زمان تکمیل برخوردار است. درنهایت، تعداد کارها ثابت درنظر گرفته شد و تعداد ربات‌ها و ماشین‌ها، افزایش یافت که دراین حالت نتایج حاکی از حساسیت بیشتر زمان تکمیل نسبت‌به زمان حل است.




**شکل (۱۱). نمودار تغییرات زمان حل طی اجرای مختلف در تحلیل حساسیت**

برای تحلیل حساسیت، در یک مدل با ۶ کار، ۳ ربات و ۲ ماشین، سه پارامتر زمان تنظیم ماشین، زمان پردازش کارها بر روی ماشین و زمان پردازش کارها بر روی ربات به‌صورت توزیع یکنواخت گسسته درنظر گرفته شد و طی ۱۵ بار اجرای مدل، دوره ساخت و زمان پردازش محاسبه شد. نتایج حاصل از حل مدل، نشان‌دهنده عملکرد صحیح آن است.

در پژوهش‌های آتی می‌توان با وابسته کردن زمان تنظیم ماشین‌ها و ربات‌ها به نوع ماشین و ربات، درنظر گرفتن مدل جریان کارگاهی به‌صورت عمومی و درنظر گرفتن اهدافی مانند هزینه و انعطاف‌پذیری، مسأله را به واقعیت نزدیک‌تر کرد.

## مراجع


[1] Bortolini, M., F.G. Galizia, and C. Mora, (2018). *Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend.* Journal of Manufacturing Systems, 49: 93-106 https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005.

[2] Mehrabi, M. G., A.G. Ulsoy, and Y. Koren, (2000). *Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing.* Journal of Intelligent manufacturing, 11: 403-419. https://doi.org/10.1023/A:1008930403506

[3] Kumar, G., K.K. Goyal, and N. Batra. (2019). *Evolution, principles and recent trends in reconfigurable manufacturing system.* in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/17426596/1240/1/012161

[4] Müller, R., et al., (2011). *Reconfigurable handling system.* Production Engineering, 5: 453-461. https://doi.org/10.1007/s11740-011-0321-2

[5] Chen, Y., X. Dai, and Z. Meng. (2005) *Modeling of reconfigurable material handling system consisting of multiple mobile robots*. in *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, IEEE. https://doi.org/10.1109/ICMA.2005.1626820

[6] My, C.A., et al., (2019). *Novel robot arm design and implementation for hot forging press automation.* International Journal of Production Research, 2019. 57(14): p. 4579-4593. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1521026

[7] Müller, R., M. Esser, and M. Vette, (2013). *Reconfigurable handling systems as an enabler for large components in mass customized production.* Journal of Intelligent Manufacturing, 24: 977-990. https://doi.org/10.1007/s10845-012-0624-y

[8] Toptal, A. and I. Sabuncuoglu, (2010). *Distributed scheduling: a review of concepts and applications.* International Journal of Production Research, 48(18): p. 5235-5262. https://doi.org/10.1080/00207540903121065

[9] Brahimi, N., et al., (2019). *A literature review of optimization problems for reconfigurable manufacturing systems.* IFAC-PapersOnLine, 52(13): 433-438. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.097

[10] Yu, J.-M., et al., (2013). *Input sequencing and scheduling for a reconfigurable manufacturing system with a limited number of fixtures.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(1): 157-169. https://doi.org/10.1007/s00170-013-4761-z

[11] Ge, C. and Z. Yuan, (2021). *Production scheduling for the reconfigurable modular pharmaceutical manufacturing processes.* Computers & Chemical Engineering, 151: 107346. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107346

[12] Azab, A. and B. Naderi, (2015). *Modelling the Problem of Production Scheduling for Reconfigurable Manufacturing Systems.* Procedia CIRP, 33: 76-80. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.015

[13] Bhargav, A., C.N.V. Sridhar, and M.L.S. Deva Kumar, (2017). *Study of Production Scheduling Problem for Reconfigurable Manufacturing System (RMS).* Materials Today: Proceedings, 4(8): p. 7406-7412. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.071

[14] Huang, S. and Y. Yan, (2019). *Part family grouping method for reconfigurable manufacturing system considering process time and capacity demand.* Flexible

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3122239

[24] Rahmana, A.A., et al., (2022). *An Optimization Approach for Predictive-Reactive Job Shop Scheduling of Reconfigurable Manufacturing Systems.* EDITORIAL BOARD, 16(5): p. 793. https://pure.qub.ac.uk/en/publications/an-optimization-approach-for-predictive-reactive-job-shop-schedul

[25] Behrendt, S., et al., (2023). *Extended Production Planning of Reconfigurable Manufacturing Systems by Means of Simulation-based Optimization.* ESSN: 2701-6277: 210-220. https://doi.org/10.15488/13440

[26] Valente, A., A. Cataldo, and E. Carpanzano, (2017). *A dispatching algorithm and software tool for managing the part flow of Reconfigurable Transportation System.* Procedia CIRP, 3: 497-502. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.022

[27] Terkaj, W., M. Urgo, and D. Andolfatto. (2017). *Answer set programming for modeling and reasoning on modular and reconfigurable transportation systems*. in *2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*. IEEE. https://doi.org/10.15439/2017F154

[۲۸] مرادی، و.، م. یوسفی‌نژاد عطاری، ه. فاروقی، (۲۰۱۸). مدل برنامه‌ریزی کمینه‌سازی زمان سیکل در سلول‌های تولیدی رباتیک سه ماشین بافرض وجود تعویض ابزار. *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۶(۱۲): ۱۷-۱. https://doi.org/10.22084/ier.2017.12669.1578

[29] An, K., et al. (2011). *Model-driven performance analysis of reconfigurable conveyor systems used in material handling applications*. in *2011 IEEE/ACM Second International Conference on Cyber-Physical Systems*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCPS.2011.12

[30] Rahman, A.A., et al., (2017). *A concept of physical reconfigurable conveyor system.* Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 11(1): p. 29-36. https://pure.qub.ac.uk/en/publications/a-concept-of-physical-reconfigurable-conveyor-system

[31] Mohamad, N., et al., (2018). *Architecture of reconfigurable conveyor system in manufacturing system.* Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 12(1 (2)): p. 117-128. https://pure.qub.ac.uk/en/publications/architecture-of-reconfigurable-conveyor-system-in-manufacturing-s

Services and Manufacturing Journal, 31(2): p. 424-445. https://doi.org/10.1007/s10696-018-9322-1

[15] Dou, J., C. Su, and X. Zhao, (2020). *Mixed integer programming models for concurrent configuration design and scheduling in a reconfigurable manufacturing system.* Concurrent Engineering, 28(1): p. 32-46. https://doi.org/10.1177/1063293X19898727

[16] Dou, J., et al., (2021). *A multi-objective particle swarm optimisation for integrated configuration design and scheduling in reconfigurable manufacturing system.* International Journal of Production Research, 59(13): 3975-3995. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1756507

[17] Ghanei, S. and T. AlGeddawy, (2020). *An integrated multi-period layout planning and scheduling model for sustainable reconfigurable manufacturing systems.* Journal of Advanced Manufacturing Systems, 19(01): 31-64. https://doi.org/10.1142/S0219686720500031

[18] Vahedi-Nouri, B., et al., (2022). *Workforce planning and production scheduling in a reconfigurable manufacturing system facing the COVID-19 pandemic.* Journal of Manufacturing Systems, 63: 563-574. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.018

[19] Gao, S., (2023). *Production planning for mass customization in a reconfigurable manufacturing system*. Université de Technologie de Compiègne https://theses.hal.science/tel-04115995/

[20] Yang, S. et al., (2023). *Real-time and concurrent optimization of scheduling and reconfiguration for dynamic reconfigurable flow shop using deep reinforcement learning.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 40: 243-252. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.001

[21] Rohaninejad, M., et al., (2024). *An integrated lot-sizing and scheduling problem in a reconfigurable manufacturing system under workforce constraints.* International Journal of Production Research, 62(11): 3994-4013. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2253311

[22] Mahmoodjanloo, M., et al., (2020). *Flexible job shop scheduling problem with reconfigurable machine tools: An improved differential evolution algorithm.* Applied Soft Computing, 94: 106416. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106416

[23] Diaz, C.A.B., T. Aslam, and A.H. Ng, (2021). *Optimizing reconfigurable manufacturing systems for fluctuating production volumes: A simulation-based multi-objective approach.* IEEE Access, 9: 144195-144210.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2024, Volume 12., No. 25., pp. 155-167
www.ier.basu.ac.ir



DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2025.30818.2201

# Mathematical Modeling and Solving Flow Shop Scheduling Problem in a Reconfigurable Material Handling System

**Sahar Akhgar[1], Parviz Fattahi[2*], Behdin Vahedi-Nouri[3], Abdolreza Roshani[4]**

[1.] PhD Student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Alzahra University, Tehran, Iran
[2.] Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Alzahra University, Tehran, Iran
[3.] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[3.] Assistant Professor, Business Analytics and Operations, Centre of Digital Economy, Surrey Business School, University of Surrey, Guildford, England

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received: 16 - 12 - 2024
Revised: 1 - 2 - 2025
Accepted: 8 - 2 - 2025

***Keywords*:**

Flow Shop Scheduling
Reconfigurable Manufacturing System
Reconfigurable Material Handling System
Mixed Integer Linear Programming

ABSTRACT

In response to significant fluctuations in product demand, manufacturing companies must adopt efficient systems that enable rapid market responsiveness. The reconfigurable manufacturing system (RMS) emerges as a novel paradigm, emphasizing both responsiveness and operational effectiveness. A critical component of this manufacturing approach is the integration of reconfigurable material handling equipment, such as robots. This research presents a mixed-integer linear programming (MILP) model for scheduling a permutation flow shop production line, specifically addressing the use of reconfigurable robots for material handling in a multi-product environment to minimize makespan (Cmax). The model has been implemented in GAMS 33.2.0 with the CPLEX solver, and its performance has been evaluated through numerical experiments.

[*] Corresponding author. P. Fattahi
*Tel.:021-85692191; E-mail address: p.fattahi@alzahra.ac.ir*