

DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29466.2170>

برنامه‌ریزی سفارش و زمان‌بندی ماشین‌های موازی با در نظر گرفتن سیاست ترکیبی ساخت برای انبارش و ساخت براساس سفارش

سجاد امیری^۱، جواد رضائیان^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

خلاصه

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ارائه می‌شود که به بررسی مسأله برنامه‌ریزی سفارش در محیطی چندمحصولی، چنددوره‌ای و زمان‌بندی آن بر روی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با استفاده از سیاست تولیدی ترکیبی ساخت برای انبارش^۱ (MTS) و ساخت براساس سفارش^۲ (MTO)، در جهت رویکرد تحویل به‌موقع^۳ (JIT) می‌پردازد؛ تابع هدف مسأله، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های عملیاتی، خرید مواد اولیه، نگهداری مواد اولیه و محصولات نهایی، دیرکرد و رد سفارش‌ها می‌باشد. مدل پیشنهادی با یک مثال بدیهی به‌وسیله نرم‌افزار lingo 9.0، کدنویسی، حل و اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل می‌باشد که با داشتن کمترین سطح موجودی، بیشترین سفارش‌ها را در زمان مناسب پاسخ می‌دهد. همچنین نظریه چالش‌های تئوریک و کاربردهای صنعتی یک الگوریتم ژنتیک به‌منظور حل این مسأله پیشنهاد گردیده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با استفاده از تعدادی مسائل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، آنالیز نتایج محاسباتی نمایانگر عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۳/۲۲

پذیرش ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

الگوریتم ژنتیک

برنامه‌ریزی سفارش

ساخت برای انبارش

ساخت برای سفارش

زمان‌بندی ماشین‌های موازی

غیرمرتبط

تحویل به‌موقع

۱. مقدمه

زمان همواره یک محدودیت مهم و اساسی بوده است. انسان‌ها سعی می‌کنند فعالیت‌هایشان را به‌گونه‌ای زمان‌بندی کنند که بتوانند کارهایشان را در زمان در دسترس انجام دهند.

مسائل زمان‌بندی غالباً براساس پیکربندی ماشین‌ها و محدودیت‌های پردازش کارها و معیارهای بهینه‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند. این مسائل را می‌توان با استفاده از سیستم‌های سه نمادی

$\alpha\beta\gamma$ ارائه شده توسط گراهام و همکارانش توصیف نمود [۱]. در این

سیستم، α بیانگر شرایط ماشین‌ها در محیط‌های کارگاهی گوناگون می‌باشد و معمولاً دارای یک نماد است. β خصوصیات و جزئیات نحوه پردازش و محدودیت‌های موجود را بیان می‌کند و ممکن است شامل هیچ نمادی نباشد و یا چندین نماد باشد. γ بیانگر تابع هدف مسأله است و معمولاً شامل تنها یک نماد است.

ماشین‌های موازی، دسته مهمی از مسائل زمان‌بندی می‌باشند که

1. Make to stock
2. Make to order
3. Just in time

* نویسنده مسئول: جواد رضائیان

تلفن: ۰۱۱-۳۲۱۹۱۲۰۵؛ پست الکترونیکی: J_rezaeian@ustmb.ac.ir

بنابراین سیاست مورد استفاده در برنامه‌ریزی سفارش خروجی را تعیین می‌کند. سیستم‌های تولیدی از سیاست‌های مختلفی برای پاسخ به تقاضاهای مشتری‌ها استفاده می‌کنند. اکثر سیاست‌های تولیدی قابل اجرا سیاست‌های MTO، MTS، MTO^۳ و ETO^۴ می‌باشند که هر سیاست تولیدی به‌نوبه خود مزایا و معایبی دارند که در بین آن‌ها سیاست‌های تولیدی MTO و MTS به‌صورت گسترده‌تری در سیستم‌های تولیدی استفاده می‌شود.

در سیستم‌های تولیدی که از سیاست تولیدی MTS استفاده می‌کند تقاضاهای مشتری‌ها با موجودی‌های انبار شده از محصولات نهایی پاسخ داده می‌شود که مشخصه بارز این سیستم‌ها، زمان تحویل کوتاه ولی در عوض هزینه سنگین انبارداری و انعطاف‌پذیری کمتر در پاسخ دادن به نیازهای اختصاصی مشتری‌ها می‌باشد. به‌همین نسبت نیز زمان تحویل طولانی ولی در عوض انعطاف‌پذیری بالا و هزینه‌های پایین انبارداری، مشخصه سیستم‌هایی است که از سیاست تولیدی MTO محض استفاده می‌کنند [۳]. MTS برای کاهش دادن زمان تحویل و MTO مطابق با الزامات سفارش مناسب است. بنابراین ترکیب MTO و MTS برای مدیریت تولید پیشرفته به‌منظور کاهش دادن سطح موجودی، افزایش گردش مالی، کاهش زمان تحویل و بهبود بهره‌وری اساسی است. در نتیجه سیستم‌های تولیدی باید MTS و MTO را با هم به‌کار بگیرند.

در این تحقیق مسأله برنامه‌ریزی سفارش در محیطی چندمحصولی و چنددوره‌ای، به‌همراه زمان‌بندی آن بر روی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با استفاده از سیاست تولیدی ترکیبی ساخت برای انبارش و ساخت بر مبنای سفارش، مبنایی برای پژوهش قرار گرفته است؛ همچنین، محدودیت قابلیت ماشین‌ها برای انجام کارها برای هرچه کاربردی‌تر شدن مسأله نسبت به عالم واقعیت لحاظ شده است. تابع هدف مسأله، کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی، نگهداری مواد اولیه و محصولات نهایی، دیرکرد و رد سفارش‌ها را دربر می‌گیرد. در ادامه این مقاله، در بخش دوم مرور ادبیات، بخش سوم مدل ریاضی، در بخش چهارم نتایج عددی و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات

در این بخش به‌منظور مرور ادبیات تحقیق پیش‌رو یعنی مسأله برنامه‌ریزی سفارش و زمان‌بندی آن بر روی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با استفاده از سیاست تولیدی ترکیبی ساخت برای انبارش و ساخت بر مبنای سفارش، مسأله به دو فاز جداگانه زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولیدی تفکیک می‌شود و سپس به‌مرور ادبیات آن بر اساس عوامل، فاکتورها و پارامترهای تأثیرگذار موردنظر مسأله از جمله پیکربندی ماشین‌ها و محدودیت‌های پردازش کارها و معیارهای بهینه‌سازی با استفاده از سیستم‌های سه نمادی $\alpha\beta\gamma$ ارائه شده توسط

از نقطه‌نظر تئوری و تجربی دارای اهمیت فراوانی هستند و به سه دسته ماشین‌های موازی با سرعت‌های یکسان، ماشین‌های موازی با سرعت‌های متفاوت که سرعت ماشین‌ها مستقل از کارها می‌باشد و دسته سوم ماشین‌های موازی غیرمرتبط^۱ که در آن هیچ ارتباطی بین سرعت ماشین‌ها وجود ندارد و سرعت ماشین‌ها وابسته به کارها هستند. بسیاری از مسائل زمان‌بندی نظیر مسائل تولید کارگاهی و کارگاه جریانی تحت شرایط خاص به یکی از انواع سه‌گانه ماشین‌های موازی تبدیل می‌شوند. به‌علاوه مسائل ماشین‌های موازی، حالت عمومیت‌یافته مسائل تک‌ماشینه محسوب می‌شوند [۲] و تکنیک‌های به‌کار رفته در بهینه‌سازی این مسائل با اعمال رویه‌های ترکیبی در مسائل پیچیده‌تر استفاده می‌شوند.

در برخی از کاربردهای زمان‌بندی، ماشین‌های موازی غیرمرتبط دارای سطوح تکنولوژی متفاوتی هستند و لزوماً قادر به پردازش هر یک از کارهای موجود در مجموعه کارها نمی‌باشند. در نتیجه هر کدام از کارها تنها بر روی زیرمجموعه‌ای از ماشین‌ها می‌توانند پردازش شوند و اصطلاحاً پردازش کارها با دسترسی محدود به ماشین‌ها^۲ صورت می‌پذیرد.

در طول دهه‌های گذشته مسائل زمان‌بندی بیشترین توجه محققان را در بین مسائل بهینه‌سازی به‌خود جلب کرده است. زمان‌بندی در اکثر مسائل علمی، مهندسی و تولیدی قابل پیاده‌سازی است.

برنامه‌ریزی سفارش، زمان‌بندی کردن ماشین‌ها و فرآیندها در خط تولید بر اساس موعد تحویل، نوع محصول، الزامات کیفیت و ظرفیت ماشین‌ها می‌باشد. کیفیت برنامه‌ریزی سفارش می‌تواند به‌طور مستقیم بر عملکرد و هزینه‌های تولید یک سیستم تولیدی تأثیر بگذارد.

امروزه مدیران سیستم‌های بزرگ و معتبر تولیدی، بر این باورند که کاهش هزینه‌های تولید از طریق کاهش سطح موجودی به‌ویژه در شرایط رقابت، الزامی می‌باشد و برای دستیابی به این مقصود، ضروریست تا با برنامه‌ریزی دقیق سفارش‌ها بتوانند موجودی‌ها را در شرایط متعارف به حداقل ممکن و در شرایط ایده‌آل به حد صفر برسانند.

JIT سیستمی جامع برای کنترل موجودی‌های تولید است. در این سیستم هیچ موجودی مواد اولیه خریداری نمی‌شود مگر هنگامی که ضرورت ایجاد کند. این سیستم اساساً بر کاهش هزینه‌ها از طریق حذف موجودی‌های انبار تمرکز دارد. به‌عبارت دیگر نظام (سیستم) تولید به‌موقع، تفکر و نگرش نوین در اداره یک سیستم تولیدی است که با اصول تکنیک‌ها و روش‌های خاصی به‌دنبال حذف کامل اتلاف و افزایش بهره‌وری در تمامی بخش‌های آن سیستم می‌باشد. پیاده‌سازی JIT در سیستم‌های تولیدی نیازمند مجموعه‌ای از زیرساخت‌ها و اقدامات اصلاحی می‌باشد اما این امکان وجود دارد که با استفاده از سیاست‌های تولیدی موجود، رفته‌رفته در جهت آن گام برداشت.

3. Assemble to order
4. Engineer to order

1. Unrelated parallel machines
2. Machine Eligibility

یکسان را با محدودیت منابع با تابع هدف به حداقل رساندن تأخیر وزنی کل برای کارهایی با زمان‌های پردازش فازی و تاریخ‌های سررسید مورد مطالعه قرار دادند.

۳-۱. مرور ادبیات مسائل برنامه‌ریزی تولید

در یکی از اولین تحقیقات دانشگاهی در مورد سیستم‌های ترکیبی ساخت برای سفارش و ساخت برای انبارش توسط ویلیامز [۱۳] یک سیستم ساده تک‌مرحله با تقاضای احتمالی در نظر گرفته شده که از تئوری صف برای حل سیستم استفاده شده است. باقری‌نژاد و قهقایی [۱۴] رفتار یک سیستم تولیدی MTS/MTO شامل دو ایستگاه را از طریق مدل‌سازی با نظریه صف بررسی کردند که در ایستگاه اول کالاهای نیمه‌ساخته تولید شده و در انبار میانی (بافر) نگهداری می‌شود و در ایستگاه دوم پس از دریافت سفارش مشتری کالای نیمه‌ساخته به‌منظور تأمین سفارش مشتری تکمیل و سفارش‌سازی می‌شود. هدف این مسأله تعیین نقطه بهینه نفوذ سفارش^۳ (نقطه بهینه متمایزسازی) و ظرفیت بهینه بافر می‌باشد. ژانگ و همکاران [۱۵] یک معماری مدیریت برنامه‌ریزی تولید را برای کارخانه‌های تولید آهن فولاد براساس ایده‌های مدیریت MTS/MTO پیشنهاد کرد. این مدل به‌طور هم‌زمان برنامه‌ریزی تولید و میزان جور کردن موجودی را دربر می‌گیرد. در مسأله‌ای مشابه تاؤو ژانگ و همکاران [۱۶] به بررسی تطبیق موجودی چندسطحی و برنامه‌ریزی سفارش در محیط تولیدی ترکیبی MTS/MTO برای کارخانه‌های فولاد پرداختند. با این تفاوت که آن‌ها محصولات نیمه‌تمام را هم برای سیستم تولیدی در نظر گرفتند.

دانیلچوک و همکاران [۱۷] یک الگوریتم را برای زمان‌بندی کارهای تولیدی در یک سیستم تولید ترکیبی MTS/MTO ارائه دادند. عبدالله‌پور و رضاییان [۱۸] مسأله زمان‌بندی سیستم تولید جریانی بدون انتظار منعطف، با محدودیت زمان نصب وابسته به توالی کارها و ظرفیت محدود تولید ماشین‌آلات و در نظر گرفتن استراتژی ترکیبی MTS/MTO باهدف یافتن توالی بهینه کارها که منجر به حداقل کردن مجموع هزینه‌های ناشی از رد سفارشات، تحویل ناقص سفارشات و زودکرد و دیرکرد وزنی می‌شود را مورد بررسی قرار دادند. یانو و همکاران [۱۹] یک سیاست تعویض پویا با آستانه نه‌تنها سطح موجودی محصول MTS، بلکه همچنین برای سفارشات انتظار محصول MTO را ارائه دادند. همچنین آن‌ها یک مدل فرآیند مارکوف برای سیاست پیشنهادی توسعه دادند، و یک الگوریتم جستجوی اکتشافی برای به‌دست آوردن راه‌حل‌های پارتو پیشنهاد دادند. ساتو و همکارانش [۲۰] یک سیستم تولید ترکیبی MTS/MTO چندماشینه را با استفاده از مدل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف زمان گسسته با در نظر گرفتن زمان راه‌اندازی و بدون اولویت‌بندی MTS یا MTO ارائه کردند. همه ماشین‌ها، ماشین‌های ترکیبی در نظر گرفته شده بودند که می‌توانستند بین تولید MTS و MTO با طی یک دوره

گراهام و همکارانش و به‌کارگیری سیاست ترکیبی تولیدی MTS/MTO، در جهت رویکرد سیستم JIT در هریک از این فازها پرداخته می‌شود تا پس از شناخت و بررسی نزدیک‌ترین مسائل و تحقیقات انجام شده با این مسأله، جنبه‌های نوآوری آن نسبت به تحقیقات گذشته مشخص و مورد بررسی قرار گیرد.

۳. مرور ادبیات مسائل زمان‌بندی

از زمان انتشار اولین تحقیق توسط مک ناتن [۴] تاکنون، حجم عظیمی از تحقیقات زمان‌بندی برای کاربردی‌تر شدن هرچه بیشتر مسأله، به سمت مسائل ماشین‌های موازی معطوف شده است. همچنین با به‌کارگیری موفقیت‌آمیز مفهوم JIT در محیط‌های صنعتی، هزینه‌های مرتبط با زمان‌های زودکرد^۱ و دیرکرد^۲ کارها محققان را برمی‌انگیزاند که این هزینه‌ها را در قالب معیارهای بهینه‌سازی گوناگون در این نوع مسائل زمان‌بندی به‌کار گیرند.

در یکی از اولین تحقیقات، هال [۵] معیار زمان زودکرد و دیرکرد را در مسأله ماشین‌های موازی یکسان با موعد تحویل مشترک برای تمام کارها به‌کار برد. چانگ و همکاران [۶] مسأله ماشین‌های موازی غیرمرتبط را برای کارهایی با سررسید مشخص و ماشین‌های اختصاصی با تابع هدف حداقل کردن کل زمان‌های زودکرد و دیرکرد ارائه دادند. همچنین آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط و یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده برای به‌دست آوردن راه‌حل‌های نزدیک به جواب بهینه آن مدل ارائه کردند که نتایج نمایانگر عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم بوده است. عطایی و همکارانش [۷] مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان با در نظر گرفتن عملیات مشترک به‌منظور کمینه نمودن مجموع انرژی‌های مصرفی و مجموع زمان‌های دیرکرد به‌کار گرفتند. جی دی آلبا و همکاران [۸] مسأله ماشین‌های موازی غیرمرتبط را باهدف به حداقل رساندن تأخیر کل مورد بررسی قرار دادند. رولیم و همکاران [۹] مسأله ماشین‌های موازی غیرمرتبط را باهدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزنی با در نظر گرفتن پنجره زمانی محدودکننده مشترک برای کارها ارائه نمودند. انحراف از پنجره زمانی سررسید مشترک کارها به‌طور مستقیم بر هزینه‌های موجودی و سطح خدمات ارائه شده به مشتریان تأثیر می‌گذارد. در چنین شرایطی، تاریخ سررسید مجاز به یک فاصله تحملی است که در آن هیچ جریمه‌ای وجود ندارد.

میکر و همکاران [۱۰] مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط با زمان‌های تحویل وابسته به ماشین کار و محدودیت‌های واجد شرایط بودن در یک محیط تولیدی توزیع‌شده را ارائه دادند. هدف به حداقل رساندن تأخیر وزنی کل است. علیزاده و همکاران [۱۱] در مسأله‌ای زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط را باهدف به حداقل رساندن کل تأخیر و زودکرد وزنی و به حداکثر رساندن تعداد مشاغل به‌موقع، بررسی کردند. لی و همکاران [۱۲] مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی

3. Order Penetration Point

1. Earliness cost
2. Tardiness cost

موجودی، کنترل پذیرش و تخصیص ظرفیت تولید را برای به حداکثر رساندن سود سیستم هماهنگ می‌کند.

لی و همکاران [۲۷] یک مسأله OAS را در یک محیط ماشین‌های موازی یکسان بررسی کردند. هدف به حداکثر رساندن سود کل است که به‌عنوان تفاوت بین مجموع درآمد حاصل از سفارشات پذیرفته شده و هزینه‌های جریمه ناشی از تأخیر در تحویل تعریف می‌شود. همچنین آن‌ها یک الگوریتم ترکیبی (GA-RP-TS) برای مسأله طراحی کردند که ابتدا مجموعه‌ای از راه‌حل‌های اولیه را ایجاد می‌کند. در یک تکرار معین، یک راه‌حل اولیه به‌طور مداوم توسط یک فرآیند پالایش (RP) و یک الگوریتم ژنتیک (GA) بهبود می‌یابد، که در آن بهترین راه‌حل یافت‌شده برای انجام جستجوی تابو (TS) استفاده می‌شود که راه‌حل نهایی را بیشتر بهبود می‌بخشد.

باتوجه به مرور ادبیات و بررسی‌های انجام شده، مشاهده گردید که تحقیقات انجام شده براساس پارامترها و فاکتورهای مورد نظر این مسأله، یا به‌صورت مسائل زمان‌بندی محض و یا در جهت مسائل برنامه‌ریزی تولیدی بررسی شده‌اند و تحقیقاتی که نیز در ادامه هر دو جنبه را مورد بررسی قرار دادند و نزدیک به این تحقیق بودند افق برنامه‌ریزی این مسأله را که از خرید مواد اولیه تا تولید محصولات نهایی و پاسخ به تقاضاهای سفارشات را شامل می‌شود، دربر نمی‌گیرند، همچنین کاربرد متفاوت به‌کارگیری سیاست ترکیبی تولیدی که در این مسأله بررسی می‌شود را ندارند. بنابراین تحقیق حاضر از دو جنبه صورت مسأله و روش حل نسبت به تحقیق‌های پیشین دارای نوآوری می‌باشد.

در این تحقیق مسأله برنامه‌ریزی سفارش در محیطی چندمحصولی و چنددوره‌ای، به‌همراه زمان‌بندی آن بر روی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با استفاده از سیاست ترکیبی ساخت برای انبارش و ساخت برمبنای سفارش، مبنایی برای پژوهش قرار گرفته است؛ همچنین، محدودیت قابلیت ماشین‌ها برای انجام کارها برای هرچه کاربردی‌تر شدن مسأله نسبت به عالم واقعیت لحاظ شده است تا در نهایت باتوجه به افق برنامه‌ریزی مسأله در مورد این که مواد اولیه در چه دوره‌ای و به‌چه میزانی خریداری و با تخصیص یافتن به چه ماشینی تولید شوند، تصمیم‌گیری صورت گردد؛ این تصمیم‌گیری ضمن داشتن کمترین هزینه خرید، نگهداری مواد اولیه و محصولات نهایی و هزینه‌های عملیاتی بیشترین تقاضای سفارشات را در زمان مناسب پاسخ می‌دهد و در نتیجه منجر به کمترین هزینه دیرکرد و رد سفارش می‌شود. از طرفی به دلیل محدود بودن ظرفیت تولیدی ماشین‌ها و اهمیت هزینه‌ها باتوجه به ضرایب وزنی تعریف شده برای هر یک، در مواردی که هزینه تأخیر و رد سفارش آن بیشتر از هزینه‌های نگهداری باشد، این انعطاف‌پذیری برای سیستم وجود دارد که محصولات را زودتر از موعد تحویل تولید کند و انبار نماید تا در زمان رسیدن موعد تحویل سفارش، به‌موقع به آن پاسخ دهد و متحمل هزینه‌های

راه‌اندازی جابه‌جا شوند. تابع هدف حداقل کردن میانگین هزینه در هر دوره شامل هزینه‌های نگهداری موجودی MTS، هزینه‌های عقب‌افتاده کارهای MTO، هزینه‌های راه‌اندازی و هزینه‌های فروش از دست‌رفته می‌باشد. امامی و همکاران [۲۱] مسأله یکپارچه پذیرش سفارشات و زمان‌بندی (OAS) در یک سیستم MTO با ماشین‌های موازی غیرمرتبط و با در نظر گرفتن زمان‌های دسترسی کارها، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان‌های پردازش متفاوت مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران [۲۲] مسأله پذیرش سفارش و زمان‌بندی را در یک کارگاه تحت محیط ترکیبی MTS/MTO بررسی کردند. دو نوع سفارشات در این تحقیق بررسی می‌شود دسته اول که MTS می‌باشد مربوط به مشتریان بلندمدت است و تقاضای آن‌ها به‌صورت منظم وجود دارد بنابراین کارگاه برای پاسخ به آن‌ها برنامه‌ریزی، تولید و انبار می‌کند و تغییر دادن این برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مجاز نیست ولی باتوجه به محیط کارگاهی بودن آن اگر زمان بیکاری وجود داشته باشد و سفارشات دسته دوم (MTO) که موردی می‌باشند قابلیت پاسخ‌گویی در این زمان در دسترس به‌وجود آمده، داشته باشند؛ آن‌ها نیز پذیرفته و در جهت به حداکثر رسیدن سود کارگاه برنامه‌ریزی می‌شوند.

کاسوما [۲۳] مدل جدیدی در محیط ترکیبی MTS/MTO باهدف تکمیل بالای کارها با زمان تحویل کم و سطح موجودی پایین را ارائه نمودند از این‌رو به‌منظور حل مسأله پیشنهادی از سه مدل و الگوریتم جدید استفاده شده است. از وجه شباهت این سه مدل این است که وقتی سفارش اجرا نشده‌ای وجود داشته باشد مدل MTO پیاده‌سازی می‌شود و در صورت عدم وجود سفارشی اجرا نشده، سیستم پایه اولیه یا اصلاح شده MTS اجرا می‌شود.

چن و همکاران [۲۴] مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی سیستم تولید بتن پیش‌ساخته توزیع شده در محیط ترکیبی MTS/MTO بررسی کردند. آن‌ها تولید انبوه کالاهای پیش‌ساخته سفارشی در نظر گرفتند بدین‌صورت که کارهای مربوط به MTO پس از دریافت و تأیید سفارش باهدف حداقل زمان تکمیل برنامه‌ریزی می‌شود و کارهای MTS بدون اختلال در کارهای MTO و باهدف حداقل دیرکرد و زودکرد آن‌ها در بافرهای زمانی به‌وجود آمده وارد می‌شوند.

شیجین وانگ و همکاران [۲۵] مسأله پذیرش سفارش را بر روی ماشین موازی نامربوط مورد مطالعه قرار دادند، که در آن زمان پذیرش سفارش، ترتیب و زمان‌های راه‌اندازی وابسته به ماشین و حداکثر زمان‌های موجود ماشین‌ها نیز در نظر گرفته است. هدف، به حداکثر رساندن سود است، که تفاوت بین درآمد کل سفارشات پذیرفته شده و هزینه‌های مربوط به زمان ساخت آن‌ها است. در تحقیق ارائه شده توسط کیم [۲۶] یک سیستم تولیدی در نظر گرفته شده است که در آن محصولات در هر دو حالت MTS و MTO به‌صورت دسته‌ای تولید می‌شوند، هدف اصلی آن بررسی سیاستی است که سهمیه‌بندی

$CBRM_r$	هزینه خرید هر واحد مواد اولیه r
$CHRM_r$	هزینه نگهداری مواد اولیه r
$QCRM_{rp}$	میزان مصرف مواد اولیه r برای هر واحد محصول p
WR_i	هزینه عدم پذیرش سفارش i ام
WT_i	هزینه دیرکرد سفارش i ام
$[a_i, b_i]$	زمان تحویل به‌صورت بازه‌ای برای سفارش i ام
PT_{pm}	زمان پردازش محصول نهایی p ام روی ماشین m
AT_m	حداکثر زمان در دسترس بودن ماشین m
Eg_{pm}	اگر ماشین m قابلیت پردازش محصول نهایی p ام را داشته باشد ۱ در غیر این صورت صفر

انواع متغیرهای تصمیم‌گیری

Q_{ipt}	مقدار تولید محصول نهایی p ام از سفارش i ام در دوره t ام
I_{ipt}	مقدار موجودی از محصول نهایی p ام از سفارش i ام در دوره t ام
QRM_{rt}	میزان خرید مواد اولیه r ام در دوره t ام
IRM_{rt}	میزان موجودی مواد اولیه r ام در دوره t ام
$Tardi_i$	میزان تأخیر هر سفارش
C_i	زمان تکمیل پردازش سفارش i ام
Y_{it}	اگر سفارش i ام در دوره t ام تأمین شود ۱ در غیر این صورت صفر
YY_{ipt}	اگر محصول نهایی p ام از سفارش i ام در دوره t ام تأمین شود ۱ در غیر این صورت صفر
X_{ipmt}	اگر محصول p ام در سفارش i ام روی ماشین m ام در دوره t ام زمان‌بندی شود ۱ در غیر این صورت صفر
$Reject_i$	اگر سفارش i ام پذیرفته نشود ۱ در غیر این صورت صفر

تابع هدف و محدودیت‌ها

$$MIN Z = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T QRM_{rt} \cdot CBRM_r + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T IRM_{rt} \cdot CHRM_r + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T I_{ipt} \cdot CI_p + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Q_{ipt} \cdot CO_p + \sum_{i=1}^n Tardi_i \cdot WT_i + \sum_{i=1}^n Reject_i \cdot WR_i \quad (1)$$

$$\sum_{t=a(i)}^T Y_{it} + Reject_i = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$Tardi_i = \sum_{t=1}^T Y_{it} \cdot \max((C_i - a_i), 0) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$Reject_i = \min(\max((C_i - b_i), 0), 1) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$C_i \geq t \cdot Y_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$Y_{it} \cdot \left(\sum_{k=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{ipk} - P \right) = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

سنگین تری مانند هزینه دیرکرد و تأخیر در سفارش یا هزینه‌های رد سفارش نشود و این در حقیقت همان کاربرد متفاوت و استفاده از سیاست تولیدی ترکیبی MTS و MTO در این سیستم تولیدی می‌باشد تا با داشتن کمترین سطح موجودی، توانایی پاسخ به بیشترین سفارش‌ها را در زمان مناسب داشته باشد تا در جهت رویکرد JIT گام بردارد.

۴. مدل ریاضی پیشنهادی

در این قسمت ابتدا فرضیات مدل، مشخصه‌های به‌کار رفته در مدل ریاضی، پارامترهای مدل ریاضی، انواع متغیرهای تصمیم‌گیری مدل ریاضی و درنهایت توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد.

۴-۱. مفروضات مدل

- محیط مسأله محیطی پویا و چنددوره‌ای در نظر گرفته شده است.
- تقاضاها قطعی و مشخص می‌باشند.
- زمان‌های پردازش کارها، از قبل معلوم و مشخص است.
- در هر دوره زمان‌بندی هر ماشین فقط به یک محصول تخصیص داده می‌شود.
- قطع کار در طول دوره برنامه‌ریزی مجاز می‌باشد.
- پردازش هر محصول توسط هر ماشین نیاز به انتخاب یک ماشین از بین ماشین‌هایی که توانایی انجام آن کار را دارد، می‌باشد.
- زمان در دسترس بودن ماشین‌ها صفر در نظر گرفته شده است و همچنین نرخ شکست و خرابی برای ماشین‌ها متصور نشده است.
- سفارش‌ها به‌صورت یکجا به مشتری تحویل داده می‌شوند.
- زمان تحویل به‌صورت پنجره زمانی در نظر گرفته شده و کران پایین آن ایده‌آل‌ترین زمان برای پاسخ به سفارش می‌باشد و بعد از آن تا کران بالای آن به‌ازای هر روز تأخیر در سفارش، جریمه محاسبه می‌شود.

اندیس‌های به‌کار رفته در مدل

i	اندیس سفارش‌ها ($i = 1, \dots, N$)
p	اندیس محصولات ($p = 1, \dots, P$)
m	اندیس ماشین‌ها ($m = 1, \dots, M$)
k و t	اندیس پریود زمانی (t و $k = 1, \dots, T$)
r	اندیس مواد اولیه ($r = 1, \dots, R$)

پارامترهای مدل ریاضی

D_{ip}	تقاضا از محصول نهایی p ام در سفارش i ام
W	حداکثر انبار در دسترس برای محصولات نهایی
WRM	حداکثر انبار در دسترس برای مواد اولیه
CI_p	هزینه نگهداری موجودی به‌ازای هر واحد محصول نهایی p ام
CO_p	هزینه عملیاتی به‌ازای تولید هر واحد محصول نهایی p ام

می‌کند که یک سفارش یا در یکی از دوره‌های برنامه‌ریزی پاسخ داده می‌شود و یا رد خواهد شد، همچنین این سفارش نمی‌تواند زودتر از کران پایین پنجره زمانی خود پاسخ داده شود. معادله (۳) میزان تأخیر یک سفارشی که در یک دوره زمانی پاسخ داده شده را محاسبه می‌کند. معادله (۴) بیانگر این است که اگر سفارشی نتواند در پنجره زمانی خود تکمیل و پاسخ داده شود رد می‌شود. معادله (۵) زمان تکمیل یک سفارش را نشان می‌دهد. معادله (۶) مشخص می‌کند که یک سفارش زمانی تأمین می‌شود و در حقیقت پاسخ داده می‌شود که هر کدام از محصولات درخواستی آن سفارش تا آن دوره تأمین شده باشند چون فرض شد که سفارش به صورت یکجا به مشتری تحویل داده می‌شود. معادله (۷) بیانگر این است که زمان تکمیل یک نوع محصول از یک سفارش در یک دوره اتفاق می‌افتد. معادله (۸) قابلیت ماشین‌ها را نشان می‌دهد. معادلات (۹) و (۱۰) تضمین می‌کنند که در هر دوره یک ماشین فقط می‌تواند به یک محصول تخصیص داده شود ولی در طول دوره برنامه‌ریزی قطع کار مجاز می‌باشد. معادله (۱۱) بیان می‌دارد که یک محصول نمی‌تواند تولید شود مگر این که تخصیصی صورت گرفته باشد. معادله (۱۲) محدودیت ظرفیت تولید را نشان می‌دهد. معادلات (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب بالانس موجودی محصولات نهایی و مواد اولیه را نشان می‌دهند. معادلات (۱۷) و (۱۸) شرط تأمین شدن یک نوع محصول را نشان می‌دهد. معادلات (۱۹) و (۲۰) نیز به ترتیب محدودیت ظرفیت انبار را برای محصولات نهایی و مواد اولیه نشان می‌دهند.

۵. اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل در این بخش یک مثال بدیهی با نرم‌افزار LINGO 9.0 بر روی کامپیوتر با مشخصات Core i7 و Ram 12GB کدنویسی، اجرا و حل شده است که شرح مثال و نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

فرض گردید کارخانه‌ای دارای سه ماشین می‌باشد، این کارخانه دو نوع محصول تولید می‌کند که این محصولات برای تولید نیاز به دو نوع مواد اولیه با ضریب مصرف متفاوت دارند و دو سفارش با تقاضاهای مشخص برای هر نوع محصول وجود دارد. افق برنامه‌ریزی پنج دوره‌ای برای این مسأله در نظر گرفته شده است و همچنین حداکثر ظرفیت انبار برای محصولات نهایی و مواد اولیه هر کدام به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰۰ واحد می‌باشد و هزینه نگهداری برای محصولات نوع اول و دوم به ترتیب ۱ و ۲ می‌باشد همچنین هزینه تولید برای محصولات نوع اول و دوم به ترتیب ۲ و ۴ می‌باشد. سایر داده‌ها به صورت زیر است.

جدول (۱). تقاضا به همراه سایر داده‌های سفارش‌ها

	D_{ip}		a_i	b_i	WT_i	WR_i
	p_1	p_2				
i_1	۱۰	۵	۱	۳	۳۰۰	۳۰۰۰
i_2	۱۵	۱۰	۱	۴	۵۰۰	۵۰۰۰

$$t = a(i), \dots, T$$

$$\sum_{k=1}^T Y_{ipk} \leq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$X_{ipmt} \leq Eg_{pm} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P, m = 1, 2, \dots, M, t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{ipmt} \leq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P, t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P X_{ipmt} \leq 1 \quad \forall m = 1, 2, \dots, M, t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{ipmt} = \min(Q_{ipt}, 1) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P, t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P Q_{ipt} \cdot PT_{pm} \cdot X_{ipmt} \leq AT_m \quad \forall m = 1, 2, \dots, M, t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$I_{ipt} = I_{ip(t-1)} + \sum_{m=1}^M X_{ipmt} \cdot Q_{ipt} - Y_{it} \cdot D_{ip} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P, t = 2, 3, \dots \quad (13)$$

$$I_{ip1} = \sum_{m=1}^M X_{ipm1} \cdot Q_{ip1} - Y_{i1} \cdot D_{ip} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P \quad (14)$$

$$IRM_{rt} = IRM_{r(t-1)} + QRM_{rt} - \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n Q_{ipt} \cdot QCRM_{rp} \quad \forall r = 1, 2, \dots, R, t = 2, 3, \dots, T \quad (15)$$

$$IRM_{r1} = QRM_{r1} - \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n Q_{ipt} \cdot QCRM_{rp} \quad \forall r = 1, 2, \dots, R \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{ipmt} \cdot Q_{ipt} + I_{ip(t-1)} \geq Y_{ipt} \cdot D_{ip} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P, t = 2, 3, \dots, T \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{ipm1} \cdot Q_{ip1} \geq Y_{ip1} \cdot D_{ip} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, P \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P I_{ipt} \leq W \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (19)$$

$$\sum_{r=1}^R IRM_{rt} \leq WRM \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (20)$$

معادله (۱) بیانگر تابع هدف مسأله می‌باشد که به ترتیب شامل حداقل کردن مجموع هزینه‌های خرید و نگهداری مواد اولیه، هزینه‌های نگهداری محصولات نهایی، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های دیرکرد و در نهایت هزینه‌های رد سفارش می‌باشد. معادله (۲) بیان

۶. الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

دسته‌ای از مسائل وجود دارد که با روش‌های دقیق قابل حل نبوده و دارای تابع زمان غیرچندجمله‌ای هستند، چنین مسائلی را در علم پیچیدگی^۱ NP-Hard می‌نامند. مسائل ماشین‌های موازی با محدودیت مجموعه‌های پردازشی در کلاس NP-hard قرار دارند [۲۸]. همچنین در این تحقیق، مسأله زمان‌بندی آن بر روی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با معیار زمان‌های زودکرد و دیرکرد وزنی مورد بررسی قرار می‌گیرد، بیکر و اسکادر [۲۹] اولین بررسی از مسأله زمان‌بندی با تابع هدف زودکرد و دیرکرد را بررسی و NP-Hard بودن آن را به اثبات رساندند. ازطرفی آرکین و سیلوربرگ [۳۰] NP-hard بودن مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با رویکرد تحویل به‌موقع درحالتی که تعداد ماشین‌ها دلخواه باشد را به اثبات رساندند. به این ترتیب مسأله مورد بررسی این تحقیق را می‌توان اثبات کرد که در یک حالت کلی در کلاس مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. لذا حل این مسأله برای اندازه‌های بزرگ با استفاده از مدل ریاضی ارائه‌شده در زمان محاسباتی معقول امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو در ادامه یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسأله ارائه می‌گردد.

۶-۱. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

• گام اول: نمایش جواب اولیه

کروموزوم^۲ مناسب ارائه برای مسأله موردنظر، باید بیان‌کننده‌ی ویژگی و هدف اصلی مسأله یعنی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی سفارش‌ها باشد. از آنجایی که هر کروموزوم متناظر با یک جواب‌شدنی مسأله می‌باشد بنابراین باید تمامی محدودیت‌های مسأله را ارضا کند. بنابراین جواب اولیه این مسأله می‌تواند متناظر کروموزومی با ساختار آرایه‌ای دوبعدی که دارای M سطر و T ستون باشد که M تعداد ماشین‌ها T افق برنامه‌ریزی مسأله است و درایه‌های آن بیانگر تخصیص کارها به ماشین‌ها باشد به‌عبارتی تقاضای هر محصول از هر سفارش یک کار درنظر گرفته می‌شود و آن‌ها از I تا N شماره‌گذاری می‌شوند به‌گونه‌ای که کارهای اول مربوط به سفارش اول و کارهای بعدی مربوط به دیگر سفارش‌ها هستند. شکل زیر مثالی از کروموزوم پیشنهادی با ابعاد (P=2, i=2, M=3, T=3) می‌باشد.

		Period		
		1	2	3
Machine	1	1	0	4
	2	3	2	0
	3	0	4	0

شکل (۱). نمایش ماتریسی کروموزوم مسأله

مطابق با ساختار بالا سه دوره برنامه‌ریزی وجود دارد که در هر دوره سه ماشین در دسترس می‌باشد و در دوره اول کار اول یعنی محصول اول از سفارش اول به ماشین اول تخصیص داده شده و کار

جدول (۲). ضریب مصرف به همراه سایر داده‌های مواد اولیه

	QCRM _{rp}		CBRM _r	CHRM _r
	p ₁	p ₂		
r ₁	۱	۲	۲	۱
r ₂	۲	۲	۴	۲

جدول (۳). زمان پردازش و قابلیت پردازش و زمان در دسترس

	PT _{pm}		Eg _{pm}		AT _m
	p ₁	p ₂	p ₁	p ₂	
m ₁	۱	۵	۱	۱	۱۰
m ₂	۵	۱۰	۱	۰	۱۰
m ₃	۵	۱	۱	۱	۱۰

جدول (۴). مقادیر سایر متغیرها

variables	periods					Total cost
	۱	۲	۳	۴	۵	
QRM _{rt}	r ₁	۲۰	۵	۳۰	۰	۴۳۰
	r ₂	۳۰	۱۰	۴۰	۰	
IRM _{rt}	r ₁	۰	۰	۰	۰	۰
	r ₂	۰	۰	۰	۰	
I _{1pt}	p ₁	۰	۰	۰	۰	۰
	p ₂	۰	۰	۰	۰	
I _{2pt}	p ₁	۰	۵	۰	۰	۵
	p ₂	۰	۰	۰	۰	
Q _{1pt}	p ₁	۱۰	۰	۰	۰	۴۰
	p ₂	۵	۰	۰	۰	
Q _{2pt}	p ₁	۰	۵	۱۰	۰	۷۰
	p ₂	۰	۱۰	۰	۰	
Tardi ₂	۱۰۰۰					
Total costs	۱۵۴۵					

پس از حل مدل توسط نرم‌افزار مقادیر زیر محاسبه شده است:

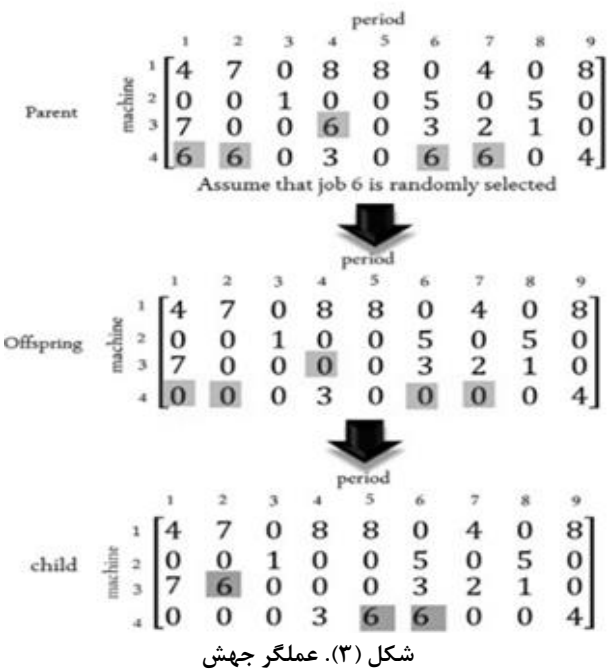
$$\begin{aligned}
 YY_{111} = 1, YY_{121} = 1 &\xrightarrow{a(1)=1} Y_{11} = 1 \\
 &\rightarrow C_1 = 1, \\
 Tardi_1 = 0, Q_{111} = 10, Q_{121} = 5 &\rightarrow X_{1111} = 1, \\
 &\quad X_{1231} = 1 \\
 YY_{213} = 1, YY_{223} = 1 &\xrightarrow{a(2)=1} Y_{23} = 1 \\
 &\rightarrow C_2 = 3, \\
 Tardi_2 = 2, Q_{212} = 5, Q_{213} = 10 \\
 Q_{223} = 10 &\rightarrow X_{2112} = 1, X_{2113} = 1, \\
 &\quad X_{2233} = 1
 \end{aligned}$$

که تفسیر دو عبارت بالا این است که اولاً هیچ سفارشی رد نشد و طبق فرض تحویل سفارش به‌صورت یکجا به مشتری، زمان تکمیل سفارش‌های اول و دوم به‌ترتیب در دوره‌های اول و سوم می‌باشد. ازطرفی باتوجه به محدودیت ظرفیت تولیدی، اضافه‌بر ظرفیت تولید از تقاضای درخواستی را یک دوره جلوتر تولید شد تا ضمن متحمل شدن کمترین هزینه موجودی و بهره‌وری از ماشین‌آلات، متحمل هزینه‌های سنگین‌تر رد سفارش نشود.

2. Chromosome

1. Non-deterministic Polynomial-time Hard (N P-Hard)

کروموزوم از جمعیت اولیه به تصادف انتخاب می‌شوند که به آن‌ها والدین^۴ می‌گویند، سپس عملگر تقاطع اعمال می‌شود. شبه‌کد عملگر تقاطع طراحی شده در این مسأله به شرح زیر می‌باشد:



انتخاب تصادفی دو کروموزوم از جمعیت اولیه ($p1$ و $p2$).
 انتخاب تصادفی کارها به تعداد $N/2$ (R).
 انتقال همه کارهای کروموزوم $P1$ به جز کارهای مجموعه R ، به کروموزوم $C1$.
 انتقال همه کارهای کروموزوم $P2$ به جز کارهای مجموعه R ، یک کروموزوم $C2$.
 انتقال کارهای انتخاب شده از $P2$ به $C1$ در صورت خالی بودن ماشین در آن دوره.
 انتقال کارهای انتخاب شده از $P1$ به $C2$ در صورت خالی بودن ماشین در آن دوره.

مراحل اجرای اصلاح برآورد تقاضا در کروموزوم $C1$ و $C2$ در قالب شبه‌برنامه زیر ارائه می‌شود:

$t=1$

تکرار مراحل زیر تا برآورد تقاضا و شرط $T > t$:
 ایجاد عدد تصادفی r در بازه $[0,1]$
 اگر $r \geq 0.5$:
 دوره تخصیص قبلی را مشخص و کار را به تصادف به یکی دیگر از ماشین‌های مجاز خالی در آن دوره تخصیص بده.
 در غیر این صورت:
 انتخاب تصادفی یک دوره غیر از دوره قبلی و تخصیص تصادفی کار به یکی از ماشین‌های مجاز خالی در آن دوره
 $t = t + 1$

سوم یعنی محصول اول از سفارش دوم به ماشین دوم تخصیص داده شده است و به همین ترتیب کارها در دوره‌های بعدی به ماشین‌ها تخصیص داده شده‌اند که نمایش مفهومی از کروموزوم ایجاد شده در بالا به شکل زیر می‌باشد.

دوره	۱			۲			۳		
ماشین	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
کار	۱	۳	۰	۰	۲	۴	۴	۰	۰

شکل (۲). نمایش مفهومی ماتریسی کروموزوم مسأله

- گام دوم: تولید جمعیت اولیه
 - گام سوم: ایجاد جواب همسایگی
- یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری ایجاد و بررسی جواب‌های همسایگی، جواب‌های موجود می‌باشد؛ به این صورت که با اعمال عملیات تصادفی بر روی جواب‌های جاری این کار انجام می‌شود. در الگوریتم ژنتیک از دو عملگر جهش^۱ و تقاطع^۲ برای این کار انجام می‌شود. در این مسأله عملگرهای الگوریتم به صورت زیر طراحی و تعریف می‌شود.

۷. عملگر جهش

شبه‌کد این عملگر به صورت زیر می‌باشد. این شبه‌کد، در حقیقت با حفظ ساختار اصلی کروموزوم و برقرار بودن محدودیت‌های تخصیص از لحاظ قابلیت پردازش کار توسط ماشین همچنین محدودیت‌های تخصیص، با بررسی و جستجو در اطراف جواب اولیه شانس امکان بهبود را به وجود می‌آورد.

انتخاب تصادفی یک کروموزوم از جامعه اولیه (P).
 انتخاب تصادفی یک کار از کروموزوم P و نام‌گذاری آن به نام z .
 $i = 1$
 تکرار مراحل زیر تا برآورد تقاضا کار z و شرط $(T > i)$
 ایجاد یک عدد تصادفی r در بازه $[0,1]$
 اگر $r \geq 0.5$:
 به تصادف از میان دوره‌های تخصیص قبلی کار z یکی را انتخاب و به یکی دیگر از ماشین خالی و مجاز تخصیص بده.
 $i = i + 1$
 در غیر این صورت:
 انتخاب تصادفی یک دوره غیر از دوره قبلی و تخصیص تصادفی کار z به یکی از ماشین‌های مجاز خالی.
 $i = i + 1$

۸. عملگر تقاطع

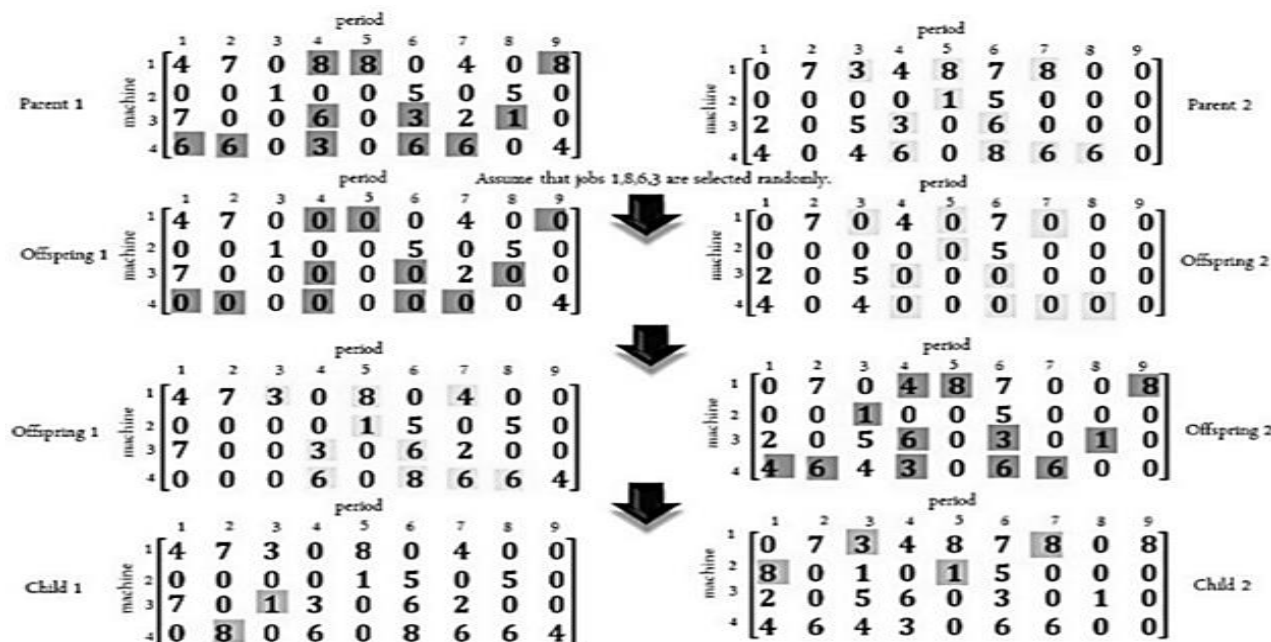
در این روش، ابتدا با یکی از روش‌های انتخاب کروموزوم، که در این مسأله از روش انتخاب براساس چرخ رولت^۳ استفاده شده است؛ دو

3. Roulette-Wheel
 4. Parents

1. Mutation
 2. Crossover

بهترین جواب تولیدشده به‌عنوان جواب بهینه در غیر این صورت رفتن به گام سوم.

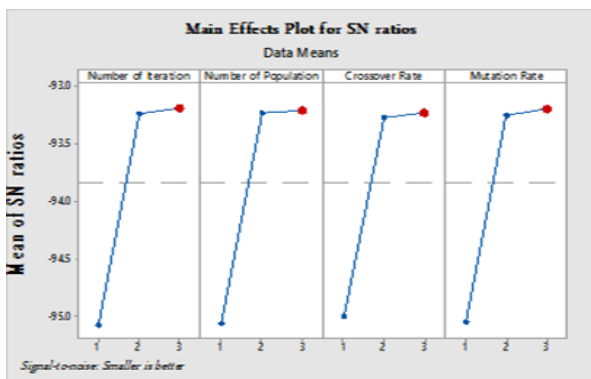
- گام چهارم: ادغام جمعیت اولیه و جمعیت ایجاد شده براساس گام سوم و محاسبه میزان برازش برای ایجاد جمعیت نسل جدید.
- گام پنجم: توقف الگوریتم در صورت مشاهده شرایط توقف و معرفی



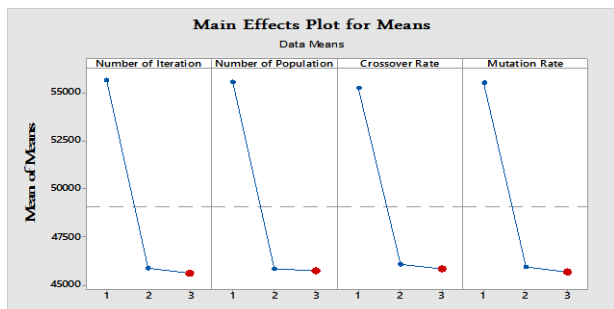
شکل (۴). عملگر

جدول (۵). فاکتورها و سطوح آن‌ها برای الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۸۰
جمعیت اولیه	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۲۰
نرخ تقاطع	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۸۵
نرخ جهش	۰/۴	۰/۴۵	۰/۶	۰/۶



شکل (۵). پاسخ نسبت‌های S/N برای الگوریتم ژنتیک



شکل (۶). پاسخ میانگین برای الگوریتم ژنتیک

۹. مسائل آزمایشی

برای بررسی کارایی الگوریتم در این تحقیق، مسائلی براساس فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در این مسئله یعنی تعداد سفارشات، محصولات، دوره‌های برنامه‌ریزی، ماشین‌ها و مواد اولیه طراحی شده‌اند که این مسائل از سطح‌های مختلف هرکدام از این فاکتور و به‌صورت کاملاً تصادفی تولید شده‌اند بدین‌صورت که هرکدام از این مسائل با استفاده از کامپیوتر شخصی و با پردازنده *core i7* ده بار اجرا و نتایج حاصل ثبت شده که به‌صورت جدول (۶) گزارش می‌شود.

۹-۱. تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده

در این تحقیق از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در آن استفاده شده است. روش تاگوچی در اینجا برای چهار فاکتور در سه سطح به کار رفته است، جدول (۵) مقدار این فاکتورها در سه سطح را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که انتخاب این محدوده‌ها برای این پارامترها و فاکتورها براساس حساسیت الگوریتم در اثر تغییر هرکدام از این پارامترها در این محدوده حاصل شده است. برای یافتن سطوح بهینه هر یک از فاکتورها از تحلیل اثرات متقابل آن‌ها استفاده می‌شود. این اثرات در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده‌اند که باتوجه به آن‌ها مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی الگوریتم مطابق جدول (۵) می‌باشد.

۹-۲. ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

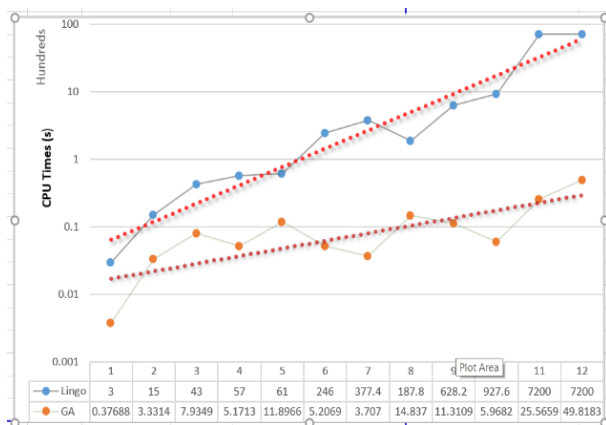
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و کاهش تأثیر ماهیت تصادفی مسأله، پس از تولید ده مسأله تصادفی در هر مرتبه، نتایج حاصل از این الگوریتم و نرم‌افزار لینگو، از نظر مقدار تابع هدف و زمان حل باهم مقایسه گردیده است که در جدول (۶) قابل مشاهده می‌باشد. در این جدول همان‌طور که مشخص است با افزایش ابعاد مسأله زمان محاسباتی الگوریتم و نرم‌افزار لینگو برای حل مسأله در حال افزایش می‌باشد تا جایی که نرم‌افزار لینگو در زمان محاسباتی معقول، قادر به یافتن پاسخ بهینه نمی‌باشد از طرفی رفتار الگوریتم نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش آن می‌باشد به این صورت که در

یافتن پاسخ بهینه در مسائل با ابعاد کوچک پاسخی بسیار نزدیک به پاسخ بهینه توسط حل به روش دقیق با استفاده از لینگو می‌دهد و حتی بعضاً خود پاسخ بهینه را به دست می‌آورد. از طرفی با بررسی این انحراف از جواب بهینه و ناچیز بودن این درصد می‌توان به پاسخ‌های بهینه الگوریتم در حل مسائل با ابعاد بزرگتر که لینگو در زمان معقول قادر به یافتن آن نمی‌باشد اعتماد کرد. در شکل شماره (۷) که با توجه به نتایج حاصل از جدول شماره (۶) به دست آمده این مقایسه نشان داده شده است که به راحتی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی به مراتب زمان محاسباتی کمتری را برای رسیدن به جواب نزدیک بهینه صرف می‌کند.

جدول (۶). نتایج محاسباتی

Lingo				GA				Problem Information	No
CPU Time (s)	Best Obj	AVG CPU Time (s)	AVG Obj	CPU Time (s)	Best Obj	Gap %	No. of Optimum instance	P*N*M*R*T	
3	2616	0.4	2616.0	0.4	2616	0%	10	2*2*3*2*5	1
15	16409	4.6	16427.4	3.3	16409	0%	10	2*2*3*2*5	2
43	9413	9.8	9445.8	7.9	9413	0%	7	4*4*5*3*7	3
57	4005	5.6	4005.0	5.2	4005	0%	10	2*6*5*4*10	4
61	8779	13.5	8821.1	11.9	8779	0%	7	5*2*5*3*8	5
246	3253	5.6	3253.0	5.2	3253	0%	10	4*2*3*2*5	6
377	4094	4.1	4094.0	3.7	4094	0%	10	3*2*3*2*5	7
188	10457	19.1	10514.2	14.8	10457	1%	5	4*6*6*3*10	8
628	10245	13.8	10891.3	113	10245	6%	2	3*6*6*3*10	9
928	16651	6.2	16651.0	6.0	16651	0%	10	3*4*5*3*7	10
7200	27.6	19442.5	25.6	19275	1%	2	5*4*8*4*10	11
7200	50.2	44556.7	49.8	43476	2%	1	5*8*12*5*12	12

با مجاز کردن قطع کار در هر دوره زمان‌بندی بحث توالی بر روی ماشین‌ها را به وجود آورد و نقش قسمت زمان‌بندی مسأله را با اضافه کردن محدودیت‌هایی از جمله؛ زمان آماده‌سازی، روابط پیش‌نیازی، نرخ زوال‌پذیری ماشین‌ها و غیره ... پررنگ‌تر کرد و مسأله را نسبت به آنچه که در عالم واقعیت اتفاق می‌افتد، نزدیک‌تر ساخت.

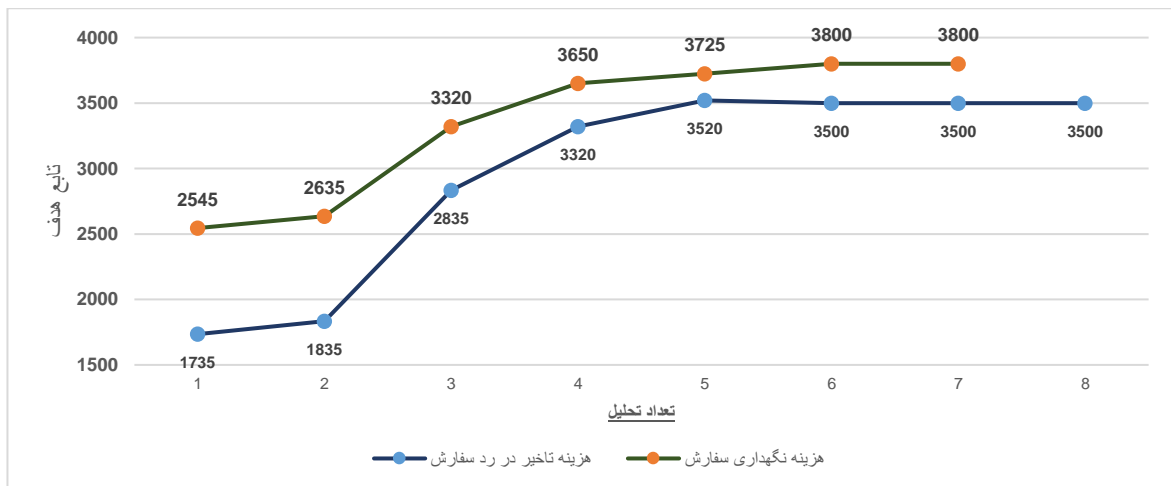


شکل (۷). مقایسه الگوریتم ژنتیک و lingo براساس زمان محاسبه

۱۰. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ارائه شد و با حل یک مثال عددی در ابعاد کوچک و حل آن به وسیله نرم‌افزار Lingo 9، اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آن، نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل می‌باشد که با داشتن کمترین سطح موجودی، بیشترین سفارش‌ها را در زمان مناسب پاسخ می‌دهد. همچنین در شکل شماره (۸) تحلیل حساسیت مدل با تغییر در پارامترهای هزینه، در مثال عددی ارائه شده بیانگر این موضوع می‌باشد که در صورت تغییر هزینه‌ها (هزینه رد سفارش، هزینه تأخیر در سفارش و هزینه نگهداری موجودی)، تصمیم‌گیری مدل را در جهت حداقل شدن هزینه‌های کل و پاسخ‌دهی به سفارش‌های اعلامی تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله پیشنهادی نیز ارائه گردید و به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، تعدادی مثال عددی تصادفی نیز ایجاد و پاسخ‌های به دست آمده توسط الگوریتم با نرم‌افزار Lingo 9 نیز مقایسه گردید. نتایج محاسباتی بیانگر عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم بوده است.

در تحقیقات آینده جهت هر چه کاربردی‌تر شدن مسأله، می‌تواند



شکل (۸). تحلیل حساسیت مدل با تغییر در پارامترهای هزینه

مراجع

- Computers & Operations Research, Volume 149, 105999
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105999>
- [11] Alizadeh Foroutan, R., Shafipour, M., Rezaeian, J., Khojasteh, Y., (2024). Just-in-time scheduling of unrelated parallel machines with family setups and soft time window constraints. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/21681015.2024.2361046>
- [12] Li, K., Xu, L., Zhang, H., Chen, J., (2024). A genetic algorithm for fuzzy identical parallel machine scheduling of minimizing total weighted tardiness under resource constraint. *International Journal of Production Research*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2323065>
- [13] Williams, T.M., (1984). "Special products and uncertainty in production/inventories". *EJOR*, Vol.15, PP.46-54. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90047-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90047-X)
- [۱۴] باقری‌نژاد، جعفر؛ قهقایی، آرزو (۱۳۹۵). تحلیل سیستم تولیدی MTS/MTO با مدل‌سازی صف مبتنی بر رویکرد گروهی پواسون و سرویس ارلنگ، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال چهارم، شماره هفتم، صفحه ۶۹-۷۹.
- [15] Zhang, T., Zhang, Y. J., Zheng, Q. P., & Pardalos, P. M. (2011). "A hybrid particle swarm optimization and tabu search algorithm for order planning problems of steel factory based on the make-to-stock and make-to-order management architecture". *Journal of Industrial and Management Optimization*, Vol.7(1), PP. 31–51. <https://doi.org/10.3934/jimo.2011.7.31>
- [16] Zhang, T., p. Zheng, Q., Fang, Y., Zhang, Y., (2015). "Multi-level inventory matching and order planning under the hybrid Make- To- Order/ Make- To- Stock production environment for steel plants via Particle Swarm Optimization". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 87., PP. 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.001>
- [17] Danilczuk, W., Gola, A., Grzmar, P. (2022). Job Scheduling Algorithm for a Hybrid MTO-MTS Production Process, *IFAC-PapersOnLine* Volume 55, Pages 451-456 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.235>
- [18] Abdollahpour, S. & Rezaeian, J., (2016). Switching decisions in a hybrid MTS/MTO production system comprising multiple machines considering setup, *Soft Comput.* <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2185-z>.
- [19] Yano, Sh., Nagasawa, K., Morikawa, K. Takahashi, K., (2019). A Dynamic Switching Policy with Thresholds of Inventory Level and Waiting Orders for MTS/MTO Hybrid Production Systems, *Procedia Manufacturing*
- [1] Graham, R.L., et al., (1979) Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5: p. 287-326. [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70356-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70356-X)
- [2] Pinedo, M. L., (2008) *Scheduling, Theory, Algorithms, and Systems*, in *Scheduling*, Springer-Verlag New York: New York ; London: Springer, p. XX, 676.
- [3] Kalantari, M., Rabbani, M. & Ebadian, M., (2011) A decision support system for order acceptance/rejection in hybrid MTS/MTO production systems, *Applied Mathematical Modelling* 35: 1363-1377. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.015>
- [4] McNaughton, R., (1959). Scheduling with Deadlines and Loss Functions. *Management Science*, 6(1): p. 1-12. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.1>
- [5] Hall, N., (1986). Single and multi-processor models for minimizing completion time variance, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 33, 49-54 <https://doi.org/10.1002/nav.3800330105>
- [6] Yang Cheng, Ch., Wei Huang, L. (2017) Minimizing total earliness and tardiness through unrelated parallel machine scheduling using distributed release time control. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 42., Pages 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.005>
- [۷] عطایی، حشمت‌الله؛ احمدی‌زر، فردین؛ ارکات، جمال (۱۴۰۰). زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان با در نظر گرفتن عملیات مشترک به منظور کمینه نمودن مجموع انرژی‌های مصرفی و مجموع زمان‌های دیرکرد، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال نهم، شماره ۱۹، صفحه ۱۰۷-۱۲۳.
- [8] G.-de-Alba, H. Nucamendi-Guillén, S. and Avalos-Rosales, O., (2022). A mixed integer formulation and an efficient metaheuristic for the unrelated parallel machine scheduling problem: Total tardiness minimization. *EURO Journal on Computational Optimization*, Volume 10, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.ejco.2022.100034>
- [9] Alencar Rolim, G., Seido Nagano, M., Prata, B., (2023). Formulations and an adaptive large neighborhood search for just-in-time scheduling of unrelated parallel machines with a common due window. *Computers & Operations Research*, Volume 153, 106159. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106159>
- [10] Maecker, S., Shen, L., Mönch, L., (2023). Unrelated parallel machine scheduling with eligibility constraints and delivery times to minimize total weighted tardiness.

- <https://doi.org/10.1016/j.elsecn.2023.100106>
- [25] Wang, Sh., Wu, R., Chu, F., Yu, J., (2023). An exact decomposition method for unrelated parallel machine scheduling with order acceptance and setup times, *Computers & Industrial Engineering*, Vol 175, 108899 <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108899>
- [26] Kim, E. (2024). Inventory rationing, admission control, and production capacity allocation in a make-to-stock/make-to-order manufacturing system. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/itor.13521>
- [27] Li, Y., Tang, L., Bai, D., C. Coelho, L., (2024). Profit maximization through integrated order acceptance and scheduling: A metaheuristic approach, *Applied Soft Computing*, Vol 159, 111570 <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111570>
- [28] Leung, J.Y.-T, (2008). Scheduling with processing set restrictions: a survey. *International Journal of Production Economics*, Vol.116, PP.251-262. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.003>
- [29] Baker, K.R. & Scudder, G.D., (1990). Sequencing with Earliness and Tardiness Penalties: A Review. *Operations Research*, Vol.38(1), PP. 22-36. <https://doi.org/10.1287/opre.38.1.22>
- [30] Arkin, EM, & Silverberg, EL., (1987). "Scheduling jobs with fixed start and finish times". *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 18., PP.1-8. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(87\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0166-218X(87)90037-0)
- Volume 39, Pages 1076-1081. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.367>
- [20] Sato, S., Maeda, H., (2023). Two new meta-heuristics for no-wait flexible flow shop scheduling problem with capacitated machines, mixed make-to-order and make-to-stock policy, *International Journal of Production Economics* Volume 263, 108877
- [۲۱] امامی، سعید؛ صباغ، محمد سعید؛ مصلحی، قاسم؛ حجازی، سیدرضا (۱۳۹۴). مسأله یکپارچه پذیرش سفارش و زمان‌بندی با ماشین‌های موازی متفاوت در سیستم ساخت براساس سفارش، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع درسیستم‌های تولید، شماره چهارم، جلد ۲۶، صفحه ۴۱۴-۴۳۱.
- [22] Wang, Zh., Qi, Y., Cui, H. & Zhang, J., (2019). A hybrid algorithm for order acceptance and scheduling problem in make-to-stock/make-to-order industries, *Computers & Industrial Engineering* Volume 127, Pages 841-852. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.021>
- [23] Kusuma, P. D. (2022). Hybrid make-to-stock and make-to-order (mts-mto) scheduling model in multi-product production system. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4), 188-200. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.04.014>
- [24] Chen, C., Han, J., Liu, Z., & Tiong, R. L. K. (2023). Flow shop scheduling of hybrid make-to-stock and make-to-order in a distributed precast concrete production system. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 7, 100106.



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29466.2170>

Order Planning and Parallel Machines Scheduling Considering Make to Order (MTO) and Make to Stock (MTS) Combinational Policies

Sajad Amiri¹, Javad Rezaeian^{2*}

¹ M.A. Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

² Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science And Technology , Babol, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 June 2024

Accepted 13 August 2024

Keywords:

Genetic Algorithm
Order Planning
unrelated parallel machines
scheduling
make-to-stock (MTS)
make-to-order (MTO)
just in time (JIT)

ABSTRACT

In this research, a proposed integer non-linear programming model investigates the order planning problem in a multi-product, multi-period environment. The model focuses on unrelated parallel machine scheduling using make-to-stock (MTS)¹ and make-to-order (MTO)² combinational policies towards the just-in-time (JIT)³ approach. The objective function is to minimize total operating costs, procurement of raw materials, storage of raw materials and final products, tardiness, and rejection of orders. The proposed model is coded, solved, and validated using an illustrative example with Lingo 9.0 software. The results show the model's correct performance, which responds to most orders at appropriate times with the lowest inventory level. Also, considering the theoretical challenges and industrial applications, a genetic algorithm is proposed to solve this problem. The performance of the proposed algorithm is evaluated using several numerical issues. Finally, the analysis of computational results indicates the satisfactory performance of the algorithm.

* Corresponding author. J. Rezaeian

Tel.:021-42525166; E-mail address: J_rezaeian@ustmb.ac.ir