

زمان بندی در یک سیستم تولید سلولی پویا با دوره های متصل و امکان جابه جایی ماشین ها در طول دوره

محمد کاظمی (استادیار)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

احمد صادقیه* (استاد)

محمد مهدی لطفی (دانشیار)

محمد علی وحدت (دانشیار)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۱۴۰۲)
دوره ۳۹، شماره ۱، صص. ۸۵-۹۸، (پژوهشی)

امروزه تغییرات تقاضا از سوی مشتریان، برای شرکت های تولیدی مسئله یی جدی و مهم است. برای مواجهه با این مسئله، سیستم های جدید تولیدی از جمله تولید سلولی پویا، تا حدودی توانسته است راهگشا باشد. از طرفی در مسئله یی زمان بندی در سیستم تولید سلولی معمولاً جابه جایی ماشین ها بین دو دوره انجام می شود، ولی زمانی برای این جابه جایی در نظر گرفته نمی شود. در صورتی که بدون لحاظ کردن این زمان، تعیین دقیق زمان تکمیل قطعات امکان پذیر نیست. برای رفع این مشکل در این نوشتار یک مدل ریاضی برای مسئله یی زمان بندی در یک سیستم تولید سلولی ارائه شده است که در آن دوره های زمانی پیوسته بوده و جابه جایی ماشین ها و تغییر در چیدمان می تواند در طول دوره، با در نظر گرفتن زمان و هزینه یی جابه جایی صورت پذیرد که باعث افزایش پویایی سیستم می شود. سپس مدل اعتبارسنجی و برای حل آن در اندازه های بزرگتر دو الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تیرید و ژنتیک طراحی شده است.

mkazemi@birjandut.ac.ir
sadeqheih@yazd.ac.ir
lotfi@yazd.ac.ir
mvahdat@yazd.ac.ir

واژگان کلیدی: زمان بندی، زمان تکمیل، الگوریتم شبیه سازی تیرید، مسیره های پردازش جابگزین، تولید سلولی، الگوریتم ژنتیک.

۱. مقدمه

در نظر گرفته نمی شود. لذا ممکن است باعث عدم دقت در محاسبه یی زمان تکمیل قطعات یا محاسبه یی زمان های دیرکرد یا زودکرد شود. از طرفی گاهی ممکن است یک ماشین در طول یک دوره در یک سلول بیکار شود و امکان جابه جایی ماشین در طول همان دوره وجود داشته باشد و این جابه جایی در طول دوره بتواند باعث کاهش وقفه برای شروع دوره بعدی و کاهش زمان تکمیل قطعات شود. از این رو در مدل زمان بندی ارائه شده، امکان جابه جایی ماشین آلات در طول دوره در نظر گرفته شده است. شکل دهی سلول ها (CF)^۲ هم زمان با زمان بندی صورت می گیرد و با در نظر گرفتن دوره های زمانی متصل، امکان محاسبه زمان جابه جایی ماشین ها نیز فراهم شده است. نوآوری های این تحقیق را می توان در سه ویژگی خلاصه کرد:

سیستم تولید سلولی پویا (DCMS)^۱ برای اولین بار توسط رهالت و همکاران^[۱] در سال ۱۹۹۵ معرفی شد. در این سیستم تغییر در ترکیب و مقدار محصول مورد تقاضا می تواند پیش بینی شود به طوری که یک برنامه ریزی چند دوره یی ممکن شود. به این ترتیب، یک افق برنامه ریزی را می توان به دوره های کوچک تر تقسیم کرد که هر دوره ترکیب محصول و تقاضای مربوط به خود را دارد. بنابراین در شرایط پویا ممکن است ساختار سلولی در یک دوره، برای دوره یی بعد بهینه نباشد. در بیشتر مدل های موجود فرض بر این است که تغییر در ساختار سلول ها برای رفتن از یک دوره به دوره یی بعد در بین دو دوره صورت می گیرد، ولی برای این تغییرات زمانی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۰۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱

DOI:10.24200/J65.2022.59048.2255

۱. وجود دوره های زمانی متصل؛

استاد به این مقاله:

کاظمی، محمد، صادقیه، احمد، لطفی، محمد مهدی، وحدت، محمد علی، ۱۴۰۲. زمان بندی در یک سیستم تولید سلولی پویا با دوره های متصل و امکان جابه جایی ماشین ها در طول دوره. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۱)، صص. ۸۵-۹۸.

۲. زمان‌بندی در یک سیستم تولید سلولی هم‌زمان با شکل‌دهی سلول‌ها و مسیر پردازش جایگزین و وجود دوره‌های زمانی؛

۳. امکان جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره‌ها و محاسبه‌ی زمان جابه‌جایی.

- در تمامی مدل‌های موجود جابه‌جایی ماشین‌آلات در بین دوره‌ها انجام می‌شود؛
- تاکنون زمان جابه‌جایی ماشین‌ها که گاهی ممکن است تا حدودی زمان‌بر هم باشند، در نظر گرفته نشده و فقط هزینه‌ی جابه‌جایی لحاظ شده است؛
- در صورت جابه‌جایی ماشین بیکار در حین تولید، وقفه‌ی کمتری برای شروع تولید در دوره‌ی بعدی خواهیم داشت.

این نوشتار از ۶ بخش اصلی تشکیل شده است. پس از این بخش، ابتدا یک مرور ادبیات روی زمان‌بندی در سیستم‌های تولید سلولی انجام می‌شود. در بخش سوم مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ارائه و خطی‌سازی می‌شود. در بخش چهارم الگوریتم SA و GA ارائه شده تشریح می‌شود. در بخش پنجم ابتدا اعتبارسنجی مدل در پنج مرحله صورت می‌گیرد و سپس کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی با حل مثال‌های مختلف و مقایسه‌ی نتایج با حل‌کننده CPLEX، نشان داده شده است و در بخش پایانی نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲. مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

در این بخش پیشینه تحقیق مقالاتی که به مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی می‌پردازند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توکلی‌مقدم و همکاران^[۱] یک مدل ریاضی غیرخطی تک‌هدفه برای مسئله‌ی زمان‌بندی گروهی (GS)^۳ در سیستم‌های تولید سلولی ارائه کردند که در آن قطعات می‌توانند جابه‌جایی بین سلول‌ها داشته باشند. آنها برای حل مدل پیشنهادی‌شان، یک الگوریتم فراابتکاری بر اساس جست‌وجوی پراکنده (SS)^۴ ارائه دادند. توکلی‌مقدم و همکاران^[۲] همچنین یک مدل ریاضی دوهدفه جدید برای مسئله‌ی زمان‌بندی در یک سیستم تولید سلولی انعطاف‌پذیر را با هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها و بیشترین زمان دیرکرد ارائه کردند. سارا کوگلو و همکاران^[۳] در نوشتار خود یک شرکت تولید سلولی را در نظر گرفتند که از سه مرحله‌ی تولید برخوردار است. آنها برای حل مسئله از یک رویکرد سه‌مرحله‌یی استفاده کردند. سلیمان‌پور و علمی^[۴] یک مدل با هدف کاهش زمان تکمیل برای مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی ارائه کردند. آنها برای حل مدل‌شان از رویکرد جست‌وجوی ممنوع تودرتو (NTS)^۵ بهره بردند. سوئز و همکاران^[۶] با ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به مسئله‌ی زمان‌بندی در محیط تولید سلولی با هدف کمینه‌سازی بیشترین دیرکرد کارها پرداختند. در مدل پیشنهادی‌شان فرض شده که تقاضای قطعات برای انجام هر عملیات می‌تواند در سلول‌های مختلف پخش شود و همچنین هر قطعه زمان تحویل جداگانه‌یی دارد. زندیه^[۷] در نوشتار خود به مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی مجازی با هدف کاهش مجموع وزنی زمان انجام کارها و کاهش مسافت کل طی شده توسط کارها پرداخت. او برای حل مدل خود یک الگوریتم ژنتیک (GA)، یک الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)^۶ و یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر GA و BBO ارائه کرد. کستا و همکاران^[۸] در نوشتار خود با هدف کاهش مجموع زمان تکمیل همه قطعات، مسئله‌ی زمان‌بندی گروهی وابسته به توالی تولید جریانی را با ارائه روش حل الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی نمونه‌گیری تصادفی مغرضانه (BRS)^۷، بررسی کردند. ایبراهیم و همکاران^[۹] با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک

و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۸ مسئله‌ی زمان‌بندی تولید جریانی سلولی با زمان راه‌اندازی وابسته به توالی خانواده‌ی قطعات را با هدف کاهش زمان کل جریان کار حل کردند. سادی کوتی و پساو،^[۱۰] یک الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی غیرمغلوب (NSGA)^۹ با هدف کمینه‌سازی زمان کار در جریان، زمان تکمیل، زمان بیکاری و مصرف انرژی در محیط تولید سلولی ارائه کردند. اکسوی و ازتورک^[۱۱] یک روش دو مرحله‌یی برای مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی مجازی ارائه کردند. در مرحله‌ی اول از SA برای به دست آوردن زمان‌بندی بهینه استفاده شده است و در مرحله‌ی دوم زمان سفر مواد کمینه شده است. ابراهیمی و همکاران^[۱۲] در تحقیق خود اثرات در نظر گرفتن هزینه‌ی انرژی وابسته به زمان را در یک مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی مورد بررسی قرار دادند.

قلی‌پورکنعانی و همکاران^[۱۳] یک مدل ریاضی غیرخطی برای مسئله‌ی زمان‌بندی گروهی چندمعیاره در سیستم تولید سلولی با هدف کمینه‌سازی زمان اتمام کار و زمان جابه‌جایی درون سلولی، دیرکرد و زمان راه‌اندازی وابسته به توالی به طور هم‌زمان ارائه دادند. آرکات و همکاران^[۱۴] یک مدل ریاضی غیرخطی دوهدفه برای بررسی هم‌زمان مسائل CF، چیدمان سلولی CL^{۱۰} و زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی با اهداف کمینه کردن هزینه‌ی جابه‌جایی کل قطعات و زمان اتمام کل ارائه دادند. آرکات و همکاران^[۱۵] همچنین دو مدل ریاضی برای طراحی یک پارچه سیستم تولید سلولی ارائه دادند. در مدل اول، به ادغام مسئله‌ی CL و CF می‌پردازند. در مدل دوم با استفاده از جواب‌های مدل اول، به مسئله‌ی زمان‌بندی سلولی با هدف کمینه‌سازی زمان اتمام کل قطعات می‌پردازند. حالت و بشیرزاده،^[۱۶] با در نظر گرفتن عواملی چون عناصر استثنایی، حرکات بین‌سلولی، زمان حمل و نقل بین‌سلولی، زمان آماده‌سازی خانواده قطعات وابسته به توالی، سعی در زمان‌بندی عملیات به منظور کاهش زمان انجام کار در سیستم تولید سلولی دارد. رفیعی و همکاران^[۱۷] به طور هم‌زمان به مسئله‌ی شکل‌دهی سلول‌ها و زمان‌بندی کارها می‌پردازند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای این منظور طراحی و برای حل آن یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی SA و GA را ارائه کردند. آریازاد و همکاران^[۱۸] یک مدل ریاضی غیرخطی برای مسئله‌ی زمان‌بندی هم‌زمان با تشکیل سلول تولیدی ارائه کردند. فرقانی و فاطمی قمی^[۱۹] سه مسئله‌ی زمان‌بندی، تشکیل سلول و چیدمان را در یک مدل ریاضی ادغام کردند. اِگوا و همکاران^[۲۰] یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی زمان‌بندی خانواده قطعات در سیستم تولید سلولی با قابلیت پیکربندی مجدد ارائه دادند. پوژتن و همکاران^[۲۱] یک مدل ریاضی غیرخطی جدید برای مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی با فرض وجود زمان حمل مواد و مسیر پردازش جایگزین ارائه دادند. تانگ و همکاران^[۲۲] با استفاده از روش تجزیه آزادسازی لاگرانژ مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح ارائه شده برای مسئله‌ی هم‌زمان زمان‌بندی و شکل‌دهی سلول را حل کردند. هدف مدل ارائه شده کمینه کردن هزینه‌ی مجموع دیرکرده است. الفیری و نیکوسیا^[۲۳] در نمونه‌ی مورد مطالعه‌ی خود فرض کردند که سلول تولیدی فقط دارای یک ماشین است. آنها مسئله‌ی زمان‌بندی عملیات قطعات در سلول‌های تولید انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند و برای حل مدل پیشنهادی‌شان یک رویه‌ی ابتکاری ارائه دادند. فنک و همکاران^[۲۴] موضوعات تخصیص ماشین‌های جایگزین، به اشتراک‌گذاری ماشین، جابه‌جایی بین سلولی و مسیرهای انعطاف‌پذیر را به صورت هم‌زمان با هم در یک مسئله‌ی سیستم تولید سلولی پویا مورد بررسی قرار داده‌اند. جواهر و سوپها،^[۲۵] یک مدل خطی و غیرخطی را برای طراحی سیستم‌های تولید سلولی که دارای متغیرهای تصمیم عملیاتی و ساختاری است، ارائه کردند. ابراهیمی و همکاران^[۲۶] یک مدل

۳. مدل ریاضی

در این بخش یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه و تابع هدف و محدودیت‌های آن تشریح می‌شود و سپس مدل ارائه شده خطی‌سازی می‌شود.

۱.۱.۳. شرح مسئله

مدل ارائه شده در این نوشتار در مورد دو زیر مسئله GS و CF به صورت هم‌زمان تصمیم‌گیری می‌کند. در این مسئله یک سیستم تولید سلولی داریم که در آن تعداد مشخصی سلول، ماشین و قطعه وجود دارد. برای تکمیل هر قطعه باید چندین عملیات روی آن انجام شود. برای انجام عملیات مسیرهای پردازش جایگزین وجود دارد. زمان انجام عملیات قطعات روی ماشین‌ها قطعی است. از هر نوع ماشین تعداد مشخصی نسخه یکسان وجود دارد که دارای ظرفیت زمانی مشخصی است. مسئله به صورت دوره‌بی در نظر گرفته شده است که در این تحقیق دوره‌ها به منظور تفکیک بهتر سفارشات هستند بدین صورت که در دوره جاری، سفارشات که بعد از یک زمان معین به کارخانه می‌رسند در دوره بعدی دسته‌بندی می‌شوند. دوره‌ها به صورت پیوسته‌اند و امکان جابه‌جایی ماشین‌های بیکار در طول دوره وجود دارد؛ زمان و هزینه‌ی جابه‌جایی نیز مد نظر قرار می‌گیرد. هر ماشین در هر لحظه از زمان حداکثر می‌تواند روی یک عملیات از یک قطعه پردازش انجام دهد و هر عملیات فقط بر روی یکی از ماشین‌هایی که توانایی انجام آن را دارند پردازش خواهد شد. هدف مدل ارائه شده کمینه‌سازی زمان تکمیل و تعداد جابه‌جایی‌های قطعات و ماشین‌آلات است.

۱.۱.۳. فرضیات مدل

- از لحظه شروع هر عملیات تا پایان آن، قطعه بر روی ماشین باقی می‌ماند. به عبارتی امکان شکست کار وجود ندارد؛
- تعداد قطعات و تعداد ماشین‌ها ثابت است؛
- خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته نشده است؛
- حد بالا و پایین سلول‌ها ثابت و مشخص است؛
- زمان در دسترس بودن سفارش ثابت و مشخص است؛
- زمان‌های تنظیم و آماده‌سازی در نظر گرفته نشده است.
- مجموعه
 - $O = \{1, 2, \dots, O\}$: اندیس مربوط به عملیات قطعات؛
 - $P = \{1, 2, \dots, P\}$: اندیس مربوط به قطعات؛
 - $T = \{1, 2, \dots, T\}$: اندیس مربوط به دوره‌های زمانی؛
 - $M = \{1, 2, \dots, M\}$: اندیس مربوط به ماشین‌ها؛
 - $B = \{1, 2, \dots, B_m\}$: اندیس مربوط به تعداد ماشین نوع m ؛
 - $C = \{1, 2, \dots, C\}$: اندیس شماره سلول‌ها؛
 - $J = \{1, 2, \dots, J\}$: اندیس شمارنده‌ی واحد زمان.
- پارامترها
 - TM_m : ظرفیت ماشین نوع m ؛
 - UB : حد بالای ظرفیت سلول؛
 - LB : حد پایین ظرفیت سلول؛
 - γ_p : هزینه‌ی جابه‌جایی بین سلولی برای قطعه‌ی p ؛

برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح یک پارچه برای مسئله‌ی چیدمان و زمان‌بندی قطعات در سیستم تولید سلولی به طور هم‌زمان ارائه کردند. علیمیان و همکاران، [۲۷] در یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی سیستم تولید سلولی پویا، شکل‌دهی سلول‌ها، زمان‌بندی گروهی، برنامه‌ریزی تولید و نگهداری پیشگیرانه را با هم ادغام کردند. ساها و همکاران [۲۸] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی با هدف کاهش هزینه‌های تولید و جابه‌جایی بین سلولی قطعات ارائه و برای حل مدل در اندازه‌های بزرگ از یک الگوریتم ترکیبی شبه‌سازی تیرید و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. در مدل ونگ و همکاران، [۲۹] تخصیص کارگران چندمهارته به ماشین‌ها صورت می‌گیرد و امکان جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌ها وجود دارد. هدف مدل ارائه شده کاهش زمان تکمیل است. آنها برای حل مدل پیشنهادی‌شان از یک الگوریتم ترکیبی شبه‌سازی تیرید استفاده کردند. صارم بافنده و همکاران [۳۰] یک مدل ریاضی سه‌هدفه به منظور کاهش هزینه‌های انرژی وابسته به زمان، کاهش زمان تکمیل و کاهش هزینه‌های مرتبط با بارکاری و جابه‌جایی مواد ارائه کردند. آرکات و همکاران [۳۱] دو مسئله‌ی تشکیل سلول و زمان‌بندی مجدد را در نظر گرفتند. آنها در این نوشتار واکنش سیستم را به ورود یک سفارش جدید مورد بررسی قرار دادند.

اکثر تحقیقات در زمینه‌ی مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید سلولی، در سال‌های اخیر انجام شده و مدل‌های ریاضی زیادی برای این مسئله ارائه شده است. در مدل ارائه شده در این نوشتار مسیرهای پردازش جایگزین، وجود نسخه‌های یکسان از یک ماشین، دوره‌های زمانی متصل و زمان جابه‌جایی ماشین‌آلات در نظر گرفته شده است و شکل‌دهی سلول‌ها نیز هم‌زمان با زمان‌بندی صورت می‌گیرد. در جدول ۱ مقایسه‌ی بین مقالات موجود و مدل موجود در این نوشتار انجام شده است.

جدول ۱. مقایسه‌ی مدل ارائه شده با مدل‌های زمان‌بندی موجود در سیستم تولید سلولی.

الگوریتم فراابتکاری	زمان جابه‌جایی ماشین	زمان جابه‌جایی مواد	پردازش جایگزین	شکل‌دهی سلول	چند دوره‌ی	مدل ریاضی	
✓	✓					✓	[۲]
✓			✓			✓	[۳]
✓						✓	[۷-۴]
✓						✓	[۱۰-۸]
✓					✓	✓	[۱۲، ۱۱]
✓					✓	✓	[۱۷-۱۳]
✓			✓	✓	✓	✓	[۱۹، ۱۸]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۹، ۲۸، ۲۰]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۱]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۲]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۳]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۶-۲۴]
✓			✓	✓	✓	✓	[۲۷]
						✓	[۳۰]
			✓	✓	✓	✓	[۳۱]
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	مدل ارائه شده

$$\forall o, p, t, m, b_m, c; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{optmb_m j} = e_{opm} \cdot d_{pt} \cdot \sum_{c=1}^C Z_{optmb_m c}$$

$$\forall o, p, t, m, b_m; \quad (4)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T \sum_{P=1}^P X_{optmb_m j} \leq 1 \quad \forall m, b_m, j \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^C W_{mb_m c j} \leq 1 \quad \forall m, b_m, j; \quad (6)$$

$$M (1 - W_{mb_m c j'}) \geq \sum_{j=j'}^{j'+RT_m} W_{mb_m c j}$$

$$\forall m, b_m, c, c' \neq c, j'; \quad (7)$$

$$X_{\setminus ptmb_m j} = 0 \quad \forall p, t, m, b_m, c, j \leq A_{pt}; \quad (8)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T \sum_{P=1}^P \sum_{j=1}^J X_{optmb_m j} \leq TMm \quad \forall m, b_m; \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{B_m} W_{mb_m c j} \leq UB \quad \forall c, j; \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{B_m} W_{mb_m c j} \geq LB \quad \forall c, j; \quad (11)$$

$$CO_{optmb_m} = \max_j (X_{optmb_m j} \cdot j) \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (12)$$

$$ST_{optmb_m} = \min_j [j + M (1 - X_{optmb_m j})] \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (13)$$

$$CO_{optmb_m} - ST_{optmb_m} = (e_{opm} - 1) \cdot \left(\sum_{c=1}^C Z_{optmb_m c} \right) \cdot d_{pt} \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (14)$$

$$ST_{optmb_m} \geq CO_{o-\setminus ptm'b_m'}$$

$$+ M \cdot \left[\left(\sum_{c'=\setminus \neq c'}^C Z_{optmb_m c'} \right) - 1 \right]$$

$$+ (IE_p + 1) \cdot Z_{optmb_m c} \cdot Z_{o-\setminus ptm'b_m'c'}$$

$$\forall o, p, t, m, b_m, m', b_m', c, c' \neq c; \quad (15)$$

$$ST_{optmb_m} \geq CO_{o-\setminus ptm'b_m'}$$

$$+ M \cdot \left[\left(\sum_{c=1}^C Z_{optmb_m c} \right) - 1 \right] \quad \forall o, p, t, m, m' \neq m, b_m, b_m', c; \quad (16)$$

$$+ (IA_p + 1)$$

$$ST_{optmb_m} \geq CO_{o-\setminus ptmb_m}$$

$$+ M \cdot \left[\left(\sum_{c=1}^C Z_{optmb_m c} \right) - 1 \right] + 1 \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (17)$$

$$C_{pt} = \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{B_m} CO_{optmb_m} \quad \forall p, t; \quad (18)$$

$$C_{max_t} \geq C_{pt} \quad \forall p, t; \quad (19)$$

$$X_{optmb_m j}, W_{mb_m c j}, Z_{optmb_m c} \in \{0, 1\}$$

λ_p : هزینه جابه‌جایی درون سلولی برای قطعه‌ی p ؛

IE_p : زمان جابه‌جایی بین سلولی برای قطعه‌ی p ؛

IA_p : زمان جابه‌جایی درون سلولی برای قطعه‌ی p ؛

RT_m : زمان جابه‌جایی ماشین نوع m بین سلول‌ها؛

α_t : جریمه در نظر گرفته شده برای زمان تکمیل در دوره t ؛

θ_m : هزینه جابه‌جایی ماشین نوع m ؛

d_{pt} : اگر تقاضا برای قطعه‌ی p در دوره‌ی t وجود داشته باشد؛ در غیر این صورت صفر؛

A_{pt} : موعد رسیدن سفارش p به کارخانه؛

e_{opm} : زمان انجام عملیات o قطعه‌ی p روی ماشین m ؛

q_{opm} : اگر عملیات o قطعه‌ی p روی ماشین m انجام شود. در غیر این صورت معادل صفر؛

M : یک عدد خیلی بزرگ.

• متغیرهای تصمیم

$X_{optmb_m j}$: اگر عملیات o قطعه‌ی p دوره t در زمان j روی ماشین m

نسخه b_m در حال پردازش باشد در غیر این صورت صفر؛

$Z_{optmb_m c}$: اگر عملیات o قطعه‌ی p دوره t روی ماشین m نسخه b_m و در

سلول c پردازش شود در غیر این صورت صفر؛

$W_{mb_m c j}$: اگر نسخه b_m ماشین m در زمان j در سلول c باشد، در غیر این

صورت صفر؛

ST_{optmb_m} : زمان شروع به کار عملیات o قطعه‌ی p دوره t روی نسخه b_m از

ماشین m ؛

CO_{optmb_m} : زمان تکمیل عملیات o قطعه‌ی p دوره t روی نسخه b_m از ماشین

m ؛

C_{pt} : زمان تکمیل قطعه‌ی p دوره‌ی t ؛

C_{max_t} : زمان اتمام کارها در دوره‌ی t .

• مدل ریاضی

$$\min Z = \alpha_t \cdot C_{max_t} \quad (1, 1)$$

$$+ \frac{1}{\gamma} \cdot \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{B_m} \theta_m \cdot |W_{mb_m c j} - W_{mb_m c j+1}| \quad (1, 2)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{m'=\setminus m}^M \sum_{b=1}^{B_m} \sum_{b'=\setminus b}^{B_{m'}} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=\setminus c}^C$$

$$\gamma_p \cdot Z_{kphmb_m c} \cdot Z_{k+\setminus, phm'b_m'c'} \quad (1, 3)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{b=1}^{B_m} \sum_{b'=\setminus b}^{B_{m'}} \sum_{c=1}^C$$

$$\lambda_p \cdot Z_{kphmb_m c} \cdot Z_{k+\setminus, phm'b_m'c'} \quad (1, 4)$$

Subject to :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{B_m} \sum_{c=1}^C q_{opm} \cdot Z_{optmb_m c} = d_{pt} \quad \forall o, p, t; \quad (2)$$

$$Z_{optmb_m c} \leq \sum_{j=1}^J X_{optmb_m j} \cdot W_{mb_m c j}$$

ماشینی در سلولی دیگر انجام شده و زمان جابه‌جایی بین سلولی بیشتر باشد. محدودیت ۱۶ ایجاب می‌کند در صورتی که عملیات o قطعه‌ی p روی ماشین m در سلول c و عملیات $o - 1$ روی ماشین دیگری در همان سلول انجام شود، در این صورت زمان شروع عملیات o قطعه‌ی p باید از مجموع زمان اتمام عملیات قبلی آن قطعه که روی ماشینی دیگر انجام شده و زمان جابه‌جایی درون سلولی بیشتر باشد. محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند در صورتی که دو عملیات متوالی یک قطعه بر روی یک ماشین صورت گیرد، زمان شروع عملیات بعدی، از زمان اتمام عملیات قبلی آن قطعه بیشتر باشد. وجود $+1$ در سه محدودیت ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به علت گسسته در نظر گرفتن زمان است. محدودیت ۱۸ زمان تکمیل قطعه‌ی p در دوره t را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۹ زمان تکمیل کل قطعات در هر دوره را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ محدودیت‌های تعیین نوع و حدود متغیرها هستند.

۲.۳. خطی‌سازی

در مدل ارائه شده برخی از معادلات به صورت غیرخطی هستند که برای خطی‌سازی آنها به صورت زیر عمل می‌کنیم.

با جایگذاری $|W_{mb_m c j} - W_{mb_m c j+1}|$ برای خطی‌سازی عبارت (۱، ۲)، محدودیت زیر به مجموعه محدودیت‌ها اضافه می‌شود:

$$W_{mb_m c j} - W_{mb_m c j+1} = WP_{mb_m c j} - WM_{mb_m c j} \quad \forall m, b_m, c, j; \quad (22)$$

در عبارت (۱، ۳) و محدودیت ۱۵ به جای حاصل ضرب دو متغیر باینری $Z_{optmb_m c} \cdot Z_{o+1ptm' b_m' c'}$ متغیر باینری $Y_{optmb_m m' b_m' c'}$ را قرار می‌دهیم و قید زیر را به مدل اضافه می‌کنیم:

$$Y_{optmb_m m' b_m' c'} \geq Z_{optmb_m c} + Z_{o+1ptm' b_m' c'} - 1/5 \quad \forall o, p, t, m, b_m, m', b_m, c \neq c'; \quad (23)$$

برای خطی کردن عبارت (۱، ۴) به جای عبارت $Z_{optm c} \cdot Z_{o+1ptm' c}$ متغیر $Y \setminus optmm' c$ را قرار می‌دهیم و قید زیر را به مدل اضافه می‌کنیم:

$$Y \setminus optmb_m m' b_m' c' \geq Z_{optmb_m c} \quad \forall k, p, h, m \neq m', b_m, b_m' c'; \quad (24)$$

در محدودیت ۳ به جای $X_{optmb_m j} \cdot W_{mb_m c j}$ متغیر $X \setminus optmb_m c j$ را قرار می‌دهیم و محدودیت‌های زیر به مدل اضافه می‌شود.

$$X \setminus optmb_m c j \leq X_{optmb_m j} \quad \forall o, p, t, m, b_m, c, j; \quad (3, 1)$$

$$X \setminus optmb_m c j \leq W_{mb_m c j} \quad \forall o, p, t, m, b_m, c, j; \quad (3, 2)$$

$$X \setminus optmb_m c j \geq X_{optmb_m j} + W_{mb_m c j} - 1/5 \quad \forall o, p, t, m, b_m, c, j; \quad (3, 3)$$

برای خطی‌سازی محدودیت ۱۲ از متغیر کمکی $F_{optmb_m j}$ استفاده می‌کنیم و

$$\forall o, p, t, m, b_m, c, j; \quad (20)$$

$$C_{max t}, C_{pt}, ST_{optmb_m}, CO_{optmb_m} \geq 0 \quad \forall o, p, t, m, b_m, c; \quad (21)$$

تابع هدف از نوع کمیته‌سازی مجموع چند عبارت است که قسمت اول آن زمان تکمیل کل قطعات در هر دوره را نشان می‌دهد. عبارت (۱، ۲) تعداد جابه‌جایی‌های ماشین‌ها را محاسبه می‌کند و عبارات (۱، ۳) و (۱، ۴) به ترتیب تعداد جابه‌جایی‌های بین سلولی و درون سلولی قطعات را محاسبه می‌کنند.

معادله‌ی ۲ بیان می‌کند که عملیات هر قطعه فقط روی یکی از ماشین‌هایی که توانایی انجام آن عملیات را دارند و در یکی از سلول‌ها انجام می‌شود. البته در صورتی که تقاضایی برای آن قطعه وجود داشته باشد. در این مدل امکان پردازش قطعات در مسیرهای مختلف وجود دارد. محدودیت ۳ بیان می‌کند که اگر عملیات o ام قطعه‌ی P در دوره‌ی t در سلول c روی نسخه‌ی b از ماشین نوع m انجام شود باید در زمان پردازش عملیات مربوط به آن قطعه، آن ماشین نیز در سلول مورد نظر وجود داشته باشد. معادله‌ی ۴ تضمین می‌کند که مقدار زمان‌هایی که قطعه‌ی p در دوره‌ی t برای عملیات o ام خود روی نسخه‌ی b از ماشین m است برابر با زمان انجام عملیات مذکور آن قطعه روی ماشین مورد نظر باشد. محدودیت ۵ نشان می‌دهد که در هر لحظه از زمان و روی هر ماشین حداکثر یک عملیات از یک قطعه و در یک دوره می‌تواند وجود داشته باشد. محدودیت ۶ بیان می‌کند که هر ماشین در هر لحظه از زمان حداکثر می‌تواند در یکی از سلول‌ها وجود داشته باشد. محدودیت ۷ رعایت مدت زمان جابه‌جایی ماشین نوع m را تضمین می‌کند؛ یعنی در زمانی که ماشین در حال جابه‌جایی است به هیچ‌کدام از سلول‌ها تعلق ندارد. به این ترتیب که اگر نسخه‌ی b از ماشین m در زمان t' در سلول c باشد سمت چپ نامعادله برابر صفر خواهد شد، پس سمت راست نامعادله نیز باید صفر شود و لذا این ماشین در بازه زمانی t' تا مدت زمانی که جابه‌جایی این ماشین به طول می‌انجامد نمی‌تواند به هیچ یک از سلول‌های دیگر منتقل شود. با استفاده از این محدودیت برای اولین بار در این نوشتار امکان جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره و با محاسبه‌ی زمان جابه‌جایی فراهم شده است. محدودیت ۸ تضمین می‌کند که شروع انجام عملیات اول هر قطعه بعد از زمان رسیدن سفارش به کارخانه باشد. محدودیت ۹ تضمین می‌کند مقدار زمانی که یک نوع ماشین مشغول به کار است از ظرفیت آن ماشین بیشتر نباشد. براساس محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، تعداد ماشین‌هایی که در هر یک از سلول‌ها جای می‌گیرد باید از حد بالای ظرفیت سلول کمتر و از حد پایین ظرفیت سلول بیشتر باشد. معادله‌ی ۱۲ زمان پایان عملیات o ام قطعه‌ی p در دوره t روی نسخه b از ماشین m را محاسبه می‌کند. معادله‌ی ۱۳ زمان شروع عملیات o ام قطعه‌ی p در دوره t روی نسخه b از ماشین m را محاسبه می‌کند. به این صورت که فرض کنید عملیات o قطعه‌ی p در زمان t شروع به پردازش شود؛ در این صورت در زمان‌های قبل از t با توجه به این که $X_{optmb_m j}$ برابر صفر خواهد بود لذا مقدار عبارت یک مقدار بسیار بزرگ M خواهد شد. اما در زمان t و با توجه به این که $X_{optmb_m j}$ برابر ۱ است مقدار عبارت برابر t خواهد شد. برای سایر زمان‌ها هم مقدار به دست آمده از t بزرگتر خواهد بود. لذا معادله‌ی مقدار t را که زمان شروع عملیات است را به ما خواهد داد. معادله‌ی ۱۴ تضمین می‌کند که عملیات یک قطعه با شروع روی یک ماشین تا پایان عملیات بر روی آن ماشین باقی بماند. بدین معنا که امکان وقفه در طول انجام یک عملیات وجود ندارد. محدودیت ۱۵ ایجاب می‌کند که در صورتی که عملیات o قطعه‌ی p در سلول c و عملیات $o - 1$ در سلول c' انجام شود. در این صورت زمان شروع عملیات o قطعه‌ی p باید از مجموع زمان اتمام عملیات $o - 1$ آن قطعه که روی

مجموعه محدودیت‌های زیر را خواهیم داشت:

$$F_{optmbmj} \leq j + M(1 - X_{optmbmj}) \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (12, 1)$$

$$F_{optmbmj} \geq j - M(1 - X_{optmbmj}) \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (12, 2)$$

$$F_{optmbmj} \leq M.X_{optmbmj} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (12, 3)$$

$$C_{optmbm} \geq F_{optmbmj} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (12, 4)$$

برای خطی‌سازی محدودیت ۱۳، متغیرهای کمکی $U_{optmbmj}, B_{optmbmj}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. و مجموعه محدودیت‌های زیر را خواهیم داشت:

$$ST_{optmbm} = J - \sum_j B_{optmbmj} \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (13, 1)$$

$$+ 1 - (J + 1) \cdot (1 - Z_{optmbm}) \quad (13, 2)$$

$$B_{optmbm \setminus} = X_{optmbm \setminus} \quad \forall o, p, t, m, b_m; \quad (13, 2)$$

$$B_{optmbmj} = B_{optmbmj-1} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (13, 3)$$

$$+ (1 - B_{optmbmj-1}) \cdot X_{optmbmj}$$

در معادله (۱۳، ۳) با جایگزینی $U_{optmbmj}, B_{optmbmj-1} \cdot X_{optmbmj} = U_{optmbmj}$ مجموعه قیدهای زیر را خواهیم داشت:

$$U_{optmbmj} \leq B_{optmbmj-1} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (13, 4)$$

$$+ M(1 - X_{optmbmj})$$

$$U_{optmbmj} \geq B_{optmbmj-1} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (13, 5)$$

$$- M(1 - X_{optmbmj})$$

$$U_{optmbmj} \leq M.X_{optmbmj} \quad \forall o, p, t, m, b_m, j; \quad (13, 6)$$

۱.۱.۴. انتخاب دمای اولیه

تعیین دمای اولیه باید به گونه‌ای باشد که در آن کاهش تابع انرژی محسوس بوده و همگرایی اتفاق بیفتد. دمای اولیه‌ی خیلی پایین سبب همگرایی زودرس (پاسخ نامطلوب) و دمای اولیه‌ی خیلی بالا سبب واگرایی یا زمان حل بسیار طولانی خواهد شد. تعیین این پارامتر اکثراً بر مبنای عدد مربوط به تابع هدف و شدت تغییر آن و با توجه به ماهیت مسئله‌ی مورد نظر تعیین می‌شود. تعیین دمای اولیه و دمای پایانی در این الگوریتم با توجه به مقادیر ورودی و مقادیر تابع هدف انجام شده است.

۲.۱.۴. سازوکار کاهش دما

برای به هنگام‌سازی دما یا اصطلاحاً زمان‌بندی سرمایه‌ش از قاعده کلاسیک شبیه‌سازی تبرید به صورت زیر استفاده شده است α مبین نرخ کاهش دماست و در بازه $[0.99, 0.85]$ تعیین می‌شود.

$$T_r = \alpha \times T_{r-1}$$

۳.۱.۴. سازوکار پذیرش جواب‌های نامزد شده

یکی دیگر از مؤلفه‌های تعیین‌کننده‌ی کیفیت و سرعت رسیدن به جواب تقریباً بهینه، نحوه‌ی پذیرش یا رد جواب‌های جدید است. الگوریتم SA با یک جواب شدنی اولیه آغاز شده و طی سازوکار معینی، یک حل همسایه از فضای جواب انتخاب کرده و هزینه‌ی این جواب همسایگی با هزینه‌ی جواب قبلی مقایسه می‌شود. هرگاه تابع هدف بهبود یافته باشد، حل جدید نگه داشته شده و به عنوان حل جاری منظور می‌شود، در غیر این صورت، این همسایگی علی‌رغم عدم بهبود هدف، با احتمال مشخصی پذیرفته می‌شود. این تابع احتمال، حالت خاصی از توزیع احتمالی بولتزمن در علم ترمودینامیک آماری است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$$

ΔE تفاضل توابع هدف در دو پاسخ مورد نظر و T دمای فعلی الگوریتم است.

۴.۱.۴. معیارهای توقف الگوریتم

دو معیار استفاده شده برای توقف الگوریتم SA عبارت‌اند از:

۱. کاهش دما به مقداری کمتر از دمای پایانی تعیین شده؛
۲. بیشینه‌ی تعداد تکرار الگوریتم.

تعیین دمای پایانی و بیشینه‌ی تعداد تکرار در این الگوریتم با توجه به مقدار تابع هدف و به صورت تجربی تعیین شده است.

۵.۱.۴. ساختار کروموزوم

در این مسئله‌ی کروموزوم از $M * b_m$ بخش (ماتریس) تشکیل می‌شود (M تعداد ماشین‌هاست). $M * b_m$ بخش، هرکدام مربوط به یک ماشین بوده و روش تشکیل همه آنها یکسان است. هر بخش یک ماتریس است که از شش سطر و تعداد متفاوتی ستون تشکیل شده است. سطرها هر کدام نمایانگر اطلاعات زیر هستند:

$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1y} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2y} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & \dots & x_{3y} \\ x_{41} & x_{42} & \dots & \dots & x_{4y} \\ x_{51} & x_{52} & \dots & \dots & x_{5y} \\ x_{61} & x_{62} & \dots & \dots & x_{6y} \end{pmatrix}$	(p) شماره قطعه
	(k) شماره عملیات
	(h) شماره دوره
	(st) زمان شروع
	(co) زمان پایان
	(c) شماره سلول

۴. روش حل پیشنهادی

از آنجایی که طراحی سیستم تولید سلولی و مسئله‌ی زمان‌بندی در دسته مسائل بسیار پیچیده قرار می‌گیرند، [۲۵] لذا برای حل مسئله‌ی در اندازه‌های بزرگتر یک الگوریتم SA و یک الگوریتم GA پیشنهاد شده است.

۱.۱.۴. الگوریتم SA

هدف رویکرد شبیه‌سازی تبرید اجتناب از بهینه‌های موضعی با استفاده از تغییرات دما و راهکار پذیرش جواب‌های غیربهبود دهنده (جست‌وجوی up/down-hill) در یک محیط گسسته است. رویکرد شبیه‌سازی تبرید دارای مزایای برجسته متعددی نسبت به سایر رویکردهای فرابابتکاری است که عبارت‌اند از:

۱. خیلی به نقطه‌ی اولیه وابسته نیست؛
۲. قابلیت فرار از بهینه‌های موضعی را دارد؛
۳. از لحاظ برنامه‌نویسی و اجرا ساده است؛
۴. ثابت شده است که زمان محاسباتی آن دارای حد بالایی از نوع چندجمله‌یی معین برحسب ابعاد مسئله‌ی است. [۲۳]

برای درک بهتر عملیات دوم قطعه‌ی ۹ در دوره ۱ را در نظر می‌گیریم. این عملیات روی ماشین $M6$ و از واحد زمانی پنجم آغاز می‌شود. فرض کنیم که می‌خواهیم آن را به سمت چپ حرکت دهیم. از آنجا که چهار واحد خالی قبل از آن روی ماشین $M6$ وجود دارد می‌توان این عملیات را روی این ماشین چهار واحد زمانی زودتر انجام داد. اما چون زمان تکمیل عملیات اول مربوط به این قطعه روی ماشین $M4$ برابر با ۳ است، پس عملیات دوم را صرفاً می‌توان از واحد زمانی چهارم شروع کرد. پس این عملیات را می‌توان حداکثر یک واحد به سمت چپ منتقل کرد. همین عملیات را می‌توان حداکثر دو واحد زمانی به راست انتقال داد یعنی دو واحد زمانی دیرتر انجام شود.

۲. انتقال یک عملیات مربوط به یک قطعه از روی یک ماشین به ماشین دیگر: در این نوع جهش تلاش ما بر این است که از میان چند عملیات (مربوط به قطعات گوناگون) که امکان پردازش بر روی ماشین‌های متفاوت را دارند یکی را انتخاب کرده و با توجه به عوامل زیر آن را روی ماشینی دیگر جانمایی کنیم:

- زمان پایان عملیات قبلی و آغاز عملیات بعدی همان قطعه؛
- پیدا کردن جای خالی روی ماشین مقصد برای قطعه‌ی مورد نظر (با توجه به زمان پردازش عملیات روی ماشین جدید).

از آنجا که احتمال تولید جواب نشدنی در این حالت زیاد است، این جهش روی همه عملیات‌های ممکن آزمایش می‌شود تا بتوان یک عملیات قابل قبول برای جابه‌جایی پیدا کرد. این جهش می‌تواند بر تمام بخش‌های تابع هدف اثرگذار باشد.
مثال:

پاسخ اولیه

$$M2 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 9 & 13 & 16 & 23 & 27 \\ 5 & 12 & 15 & 19 & 25 & 30 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

پاسخ جدید

$$M2 = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 13 & 16 & 23 & 27 \\ 5 & 15 & 19 & 25 & 30 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

$$M5 = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 2 \\ 1 & 1 \\ 5 & 16 \\ 7 & 20 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \Rightarrow M5 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 5 & 8 & 16 \\ 7 & 11 & 20 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

هر ستون نیز نشان‌دهنده‌ی زمان آغاز و پایان پردازش یک عملیات مربوط به یک قطعه در یک دوره‌ی خاص و سلولی است که این پردازش در آن انجام می‌شود. بنابراین در این M^*b_m بخش، تعداد سطرها یکسان است، اما تعداد ستون‌ها می‌تواند متفاوت باشد. هرچه تعداد ستون‌های پردازشی مربوط به یک ماشین بیشتر باشد، قطعات بیشتری روی آن پردازش می‌شود.

۶.۱.۴. انتخاب پاسخ اولیه

برای تولید پاسخ اولیه به صورت گام به گام عمل می‌کنیم، یعنی ابتدا عملیات اول مربوط به یک قطعه را در نظر گرفته و با مدنظر قرار دادن تمامی شرایط لازم، آن را به یکی از ماشین‌های موجود اختصاص می‌دهیم. حال عملیات اول قطعه‌ی دیگری را در نظر گرفته و تلاش می‌کنیم آن را طوری اختصاص دهیم که علاوه بر حفظ شرایط مطلوب در مسئله، با عملیات قبلی تداخل نداشته باشد. عملیات اول یک قطعه‌ی دیگر را نیز طوری اختصاص می‌دهیم که با دو عملیات قبلی تداخل نداشته باشد و همین روش را برای هر عملیات مربوط به یک قطعه ادامه می‌دهیم. اگر همه عملیات مربوط به همه قطعات با موفقیت اختصاص داده شوند یک جواب شدنی به دست آمده است. اما اگر در هر مرحله به یک عملیات برسیم که قابل پردازش نباشد یعنی هیچ ماشینی زمان کافی برای پردازش آن نداشته باشد یا اگر دارد محدودیت ظرفیت سلول‌ها اجازه استفاده از آن را ندهد، پاسخ به دست آمده شدنی نخواهد بود. در این صورت این پاسخ را به کلی کنار گذاشته و فرایند را از اول شروع می‌کنیم. این روش را ادامه می‌دهیم تا بالاخره یک پاسخ شدنی تولید شود.

۷.۱.۴. سازوکار ایجاد جواب همسایه

در این مسئله جهش‌های زیر به کار گرفته شده است:

۱. تغییر زمان شروع فرایند پردازش مربوط به یک عملیات از یک قطعه: این جهش می‌تواند به سمت چپ یا به سمت راست انجام گیرد (به سمت چپ یعنی عملیات زودتر انجام شود و به سمت راست یعنی عملیات دیرتر انجام شود). برای این کار یک عملیات مربوط به یک قطعه را انتخاب کرده و «بیشترین مقدار مجاز حرکت آن به سمت چپ یا راست» را بررسی می‌کنیم. پیدا کردن «بیشترین مقدار مجاز حرکت» برای یک عملیات باید با توجه به دو عامل زیر انجام شود:

- زمان پایان عملیات قبلی و آغاز عملیات بعدی همان قطعه؛
- زمان پایان عملیات قبلی و آغاز عملیات بعدی مربوط به سایر قطعات پردازش شده در همان ماشین.

بدیهی است که «حداکثر مقدار مجاز حرکت» برای یک عملیات به اندازه‌ی کمترین مقادیر به دست آمده در سمت چپ یا راست آن عملیات خواهد بود. در صورتی که ضریب «حداکثر مقدار مجاز حرکت» بزرگتر از صفر باشد یک پاسخ شدنی جدید خواهیم داشت. این جهش فقط بر بخش مربوط به هزینه‌های زمان تکمیل اثرگذار بوده و بر سایر بخش‌های تابع هدف تأثیری ندارد.
مثال:

$$M6 = \begin{pmatrix} 9 & 3 & 4 \\ 2 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 5 & 11 & 13 \\ 8 & 12 & 14 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad M4 = \begin{pmatrix} 9 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 5 & 8 \\ 3 & 7 & 11 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M2 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 10 & 13 & 16 & 23 & 27 \\ 5 & 12 & 15 & 19 & 25 & 30 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

۲.۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت است. در این تحقیق، پس از تولید پاسخ‌های اولیه، عملگر چرخ رولت برای انتخاب یک زیرگروه تصادفی از جمعیت اعمال می‌شود. سپس پاسخ‌هایی که دارای بالاترین کیفیت هستند در یک مجموعه‌ی مجزا قرار گرفته تا عملگرهای جهش و تقاطع روی آنها انجام شود. ساختار عملگر جهش دقیقاً مطابق با عملگر جهش مورد استفاده در الگوریتم SA توضیح داده شده در بخش ۳.۱.۴ است. اما به منظور اعمال عملگر تقاطع برای تولید فرزندان جدید، از یک برش دو نقطه‌ی استفاده می‌شود تا تنوع‌گرایی بیشتری در پاسخ‌ها ایجاد شود. پاسخ‌های ناموجه در هر مرحله اعمال عملگر تقاطع، با استفاده از یک سازوکار مانند آنچه در بخش ۳.۱.۴ توضیح داده شد، اصلاح می‌شوند تا موجه بودن جواب تضمین شود. به این ترتیب که بعد از جابه‌جا شدن دو قسمت زمان‌های شروع و پایان قسمت تعویض شده و قطعات بعد از قسمت تعویض شده باید اصلاح شوند. همچنین شماره سلولی که عملیات در آن انجام می‌شود نیز در صورتی که نسبت به شماره سلول قطعه‌ی قبل از قسمت جابه‌جا شده متفاوت باشد و زمان لازم برای جابه‌جایی ماشین وجود نداشته باشد باید تغییر کند (با رعایت حدود سلول). از طرفی اگر جابه‌جایی دو قسمت باعث به هم خوردن ترتیب عملیات یک قطعه شود جای دو عملیات عوض می‌شود و زمان‌های شروع و پایان اصلاح می‌شود. در شکل ۱ ساختار عملگر تقاطع نشان داده شده است.

۱.۲.۴. تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق به منظور پارامترهای تنظیم‌کننده الگوریتم ژنتیک از روش تاگوچی استفاده شده که در آن تابع برازندگی الگوریتم به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته

در مثال بالا عملیات دوم قطعه‌ی اول در دوره‌ی اول را در نظر می‌گیریم (ستون دوم در ماشین M2) و آن را به ماشین M5 منتقل می‌کنیم (با در نظر گرفتن شرایط شدنی بودن پاسخ جدید). پاسخ جدید در سمت راست نمایش داده شده است. چنان که می‌بینیم عملیات دوم قطعه‌ی ۱ در کنار عملیات اول این قطعه قرار گرفته و زمان شروع آن نیز ۱ واحد تغییر کرده است (از ۹ به ۸). از آنجا که در پاسخ به دست آمده هر دو عملیات قطعه‌ی اول روی یک ماشین انجام می‌شود، تابع هدف مربوط به این پاسخ جدید نیز بهتر خواهد بود (در صورت ثابت بودن سایر شرایط)؛

۳. انتقال بخشی از عملیات‌های پردازش شده روی یک ماشین از یک سلول به سلول دیگر: برای انجام این جهش، ابتدا یک ماشین و یک عملیات پردازش شده در آن به صورت تصادفی انتخاب شده و تلاش می‌کنیم که سلول پردازشی مربوط به آن را تغییر دهیم. از آنجا که انتقال یک ماشین بین سلول‌ها نیاز به زمان مشخصی دارد، تغییر سلول پردازشی یک عملیات می‌تواند سبب ایجاد یک پاسخ نشدنی شود. برای اصلاح پاسخ به دست آمده و حفظ شدنی بودن آن به روش زیر عمل می‌کنیم:

پس از تغییر سلول پردازشی عملیات مربوطه، در صورتی که قبل از آن (سمت چپ عملیات مورد نظر) جای کافی برای انتقال ماشین وجود نداشته باشد، عملیات قبلی را نیز به سلول جدید انتقال می‌دهیم. اگر پیش از این عملیات هم، زمان کافی (برای انتقال ماشین) وجود نداشته باشد، همین روند را تا رسیدن به یک عملیات مناسب ادامه می‌دهیم. بدیهی است اگر در این فرایند به عملیات اول برسیم، همه‌ی عملیات‌های سمت چپ به سلول جدید انتقال یافته‌اند. برای سمت راست عملیات مورد نظر هم همین کار را انجام می‌دهیم تا به یک فضای خالی برای انتقال ماشین یا به آخرین عملیات مورد نظر برسیم.

این جهش می‌تواند همه یا بخشی از عملیات موجود روی ماشین فعلی را به سلولی جدید منتقل کرده و پاسخ شدنی جدیدی تولید کند. شایان ذکر است که در هر کدام از این انتقال‌ها باید سقف و کف سلول مربوطه در هر واحد زمانی را نیز در نظر بگیریم. این جهش بر سه بخش هزینه‌ی جابه‌جایی ماشین‌ها، هزینه‌ی انتقال بین سلولی قطعات و هزینه‌ی انتقال درون سلولی قطعات مؤثر است.

مثال:

2	3	1	4	2
1	1	2	1	3
1	1	1	1	1
1	5	14	16	21
3	8	15	19	24
1	1	2	2	2

4	2	3	5	3
1	1	1	2	1
1	1	1	1	2
1	5	11	16	18
4	8	14	17	20
2	2	2	2	2

والد

$$M2 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 10 & 13 & 16 & 23 & 27 \\ 5 & 12 & 15 & 19 & 25 & 30 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

2	3	3	5	2
1	1	1	2	3
1	1	1	1	1
1	5	11	16	21
3	8	14	17	24
1	1	2	2	2

4	2	1	4	3
1	1	2	1	1
1	1	1	1	2
1	5	14	16	18
4	8	15	19	20
2	2	2	2	2

فرزند

شکل ۱. ساختار عملگر تقاطع.

فرض کنیم در مثال بالا زمان انتقال ماشین M2 برابر با ۳ واحد بوده و ما نیز قصد انتقال عملیات ۱ قطعه‌ی ۳ مربوط به دوره‌ی ۱ (ستون سوم) به سلول ۲ را داریم. پس از انتقال ستون سوم به سلول ۲، از آنجا که سمت راست و چپ آن زمان کافی برای انتقال ماشین وجود ندارد، ستون دوم و ستون چهارم را نیز به سلول ۲ انتقال می‌دهیم. از آنجا که بین ستون اول و دوم پنج واحد جای خالی وجود دارد و ستون پنجم نیز در سلول ۲ انجام می‌شود، پاسخ به دست آمده شدنی خواهد بود و جهش مورد نظر به شکل ماتریس زیر در خواهد آمد:

جدول ۲. مقادیر پارامترهای الگوریتم GA.

تعداد تکرار	نرخ جهش	اندازه جمعیت	نرخ همگدزی
۱۵۰	۰/۱۵	۱/۵ برابر اندازه کروموزوم	۰/۷

شده است. جدول ۲ به ارائه مقادیر پارامترهای مورد استفاده در GA پیشنهادی می‌پردازد.

۵. اعتبارسنجی مدل و نتایج محاسباتی

اعتبارسنجی مدل بررسی می‌کند که آیا مدل پیشنهادی آنچه را که قرار است انجام دهد انجام می‌دهد یا خیر؟ به عبارت دیگر، اعتبارسنجی بررسی می‌کند که آیا مدل توانایی ارائه یک پیش‌بینی معقول از رفتار سیستم مورد مطالعه را دارد یا خیر؟^[۳۴] اقدامات صورت گرفته برای تأیید و اعتبارسنجی مدل در این تحقیق عبارت است از:

۱. ابتدا یک مثال عددی از ادبیات با استفاده از مدل ارائه شده حل شده است. از آن جا که مدل ارائه شده در این تحقیق دارای ویژگی‌های بیشتری نسبت به مثال انتخاب شده است، در مورد آن ویژگی‌ها ساده‌سازی صورت گرفته است؛
۲. یک مثال عددی با داده‌های تصادفی حل و به صورت کامل تشریح شده است تا درستی مدل نشان داده شود؛

۳. تمامی ویژگی‌های متمایز مدل به صورت تک‌تک از مدل کنار گذاشته شده و مدل در نبود این ویژگی حل شده است و با حالتی که این ویژگی در مدل وجود دارد مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج تشریح شده است، تا ادعای محقق در مورد تأثیرگذار بودن ویژگی مورد نظر بررسی و تأیید شود؛

۴. در مورد سایر ویژگی‌های مدل که تاکنون در مقالات دیگر مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۱۰ به تفکیک به آنها استناد شده است؛

۵. یک تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل انجام شده و نتایج به دست آمده با نتایج مورد انتظار مقایسه شده است.

۱.۵. بررسی یک مسئله‌ی از ادبیات تحقیق

در این قسمت برای نشان دادن صحت مدل ارائه شده، مثالی از مطالعات پیشین^[۳۱] انتخاب و با استفاده از مدل پیشنهادی حل شده است. مسئله شامل ۷ قطعه و شش نوع ماشین است که فقط از ماشین ۵ دو نسخه وجود دارد. حد پایین و بالای سلول به ترتیب ۲ و ۴ است. جدول ۳ اطلاعات مربوط به ترتیب عملیات قطعات، زمان هر عملیات روی ماشین‌های مختلفی که می‌توانند آن عملیات را انجام دهند و زمان جابه‌جایی بین سلولی را نشان می‌دهد. برای حل این مثال با استفاده از مدل پیشنهادی دوره‌های زمانی در نظر گرفته نشده است. همچنین برای تکرار شرایط مثال، امکان جابه‌جایی ماشین در طول دوره لحاظ نشده است. نتایج به دست آمده کاملاً با نتایج به دست آمده قبلی^[۳۱] یکسان است. در ادامه، همین مثال با فرض این که امکان جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره وجود داشته باشد حل شده است. در اینجا برای جابه‌جایی زمان و هزینه در نظر نگرفته‌ایم نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج، بهبود ۱۷ درصدی زمان تکمیل را نشان می‌دهد.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به قطعات در مثال.^[۳۱]

شماره قطعه	ماشین نوع m (زمان پردازش)					زمان جابه‌جایی بین سلولی
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	
۱	(۸) ۱	(۱۲) ۴	(۳) ۵	(۷) ۳	(۵) ۲	۶
۲	(۴) ۵	(۱۰) ۶	(۵) ۵			۹
۳	(۸) ۳	(۴) ۲	(۷) ۶	(۵) ۳		۱۲
۴	(۲) ۲	(۴) ۳	(۱۴) ۶			۵
۵	(۲) ۲	(۳) ۲	(۵) ۴			۱۱
۶	(۳) ۱	(۳) ۵	(۵) ۳			۸
۷	(۳) ۴	(۵) ۵	(۷) ۱	(۶) ۵	(۴) ۴	۱۰

جدول ۴. زمان شروع و پایان هر عملیات در مثال^[۳۱] با امکان جابه‌جایی ماشین و بدون در نظر گرفتن زمان جابه‌جایی.

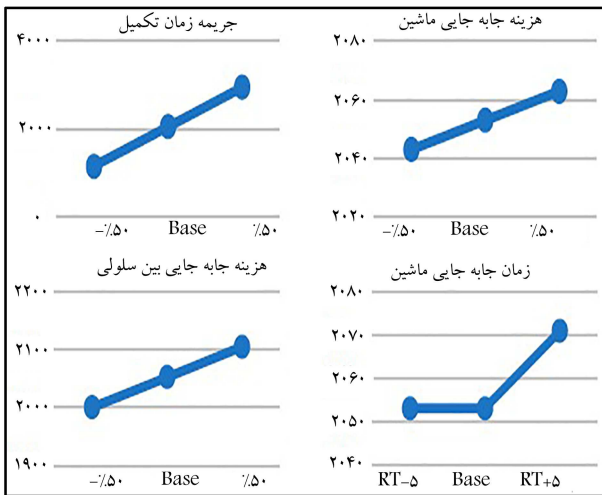
شماره قطعه	زمان شروع و زمان تکمیل هر قطعه				
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
۱	۱۱.۴	۲۳.۱۲	۲۶.۲۴	۳۳.۲۷	۳۸.۳۴
۲	۴.۱	۱۴.۵	۱۹.۱۵		
۳	۱۰.۳	۱۴.۱۱	۲۱.۱۵	۲۶.۲۲	
۴	۶.۵	۲۱.۱۸	۳۵.۲۲		
۵	۳.۱	۸.۴			
۶	۳.۱	۶.۴			
۷	۳.۱	۱۱.۷	۱۸.۱۲	۲۴.۱۹	۲۸.۲۵

۲.۵. مثال عددی

در این مرحله یک مثال عددی با داده‌های تصادفی با استفاده از نرم‌افزار گمز توسط یک سیستم رایانه‌ی با مشخصات Intel® Core i7 – CPU ۲٫۳۰ GHz و ۱۶ GB RAM در مدت زمان ۴۲۳۹ ثانیه حل شده است. تعداد متغیرها و محدودیت‌های این مسئله به ترتیب ۸۵۰۹۶ و ۱۸۵۶۸۶ است. در این مثال تعداد ۱۱ قطعه، ۳ عملیات، ۶ ماشین، ۲ سلول، ۲ دوره و ۳۱ موقعیت زمانی در نظر گرفته شده است. حد بالا و پایین سلول‌ها به ترتیب ۴ و ۲ است. جدول ۵ هزینه‌ها و زمان‌های مربوط به جابه‌جایی درون/بین سلولی و اطلاعات مربوط به تقاضا را نشان می‌دهد. همچنین اطلاعات مربوط به زمان انجام عملیات هر قطعه را به تفکیک ماشین‌ها در اختیار قرار می‌دهد. به عنوان مثال عملیات دوم قطعه ۴ بر روی ماشین‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب با زمان‌های ۶، ۴ و ۵ قابل انجام است. اطلاعات مربوط به ماشین‌ها نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. اطلاعات مربوط به زمان انجام عملیات هر قطعه، هزینه و زمان جابه‌جایی قطعات.

شماره قطعه	ماشین نوع m (زمان پردازش)			λ_p	γ_p	IA_p	IE_p	ک=۳			ک=۲			ک=۱			
	A_{ph}	d_{ph}	h_{ph}					h_1	h_2	h_3	h_1	h_2	h_3	h_1	h_2	h_3	
۱	۱۰	۱	۱	۱	۵	۱۳	۱	۳	(۴)۱	(۳)۲	(۲)۱						
۲	۱۰	۱	۱	۱	۶	۱۵	۱	۳	(۵)۲	(۳)۱	(۲)۵، (۸)۲						
۳	-	۱	۰	۱	۷	۱۵	۱	۳	(۲)۶، (۷)۳	(۲)۶	(۳)۴						
۴	۱۲	۱	۱	۱	۶	۱۴	۱	۳	(۲)۶، (۵)۵	(۶)۳، (۴)۴	(۲)۳						
۵	۱۰	-	۱	۰	۵	۱۶	۱	۳	(۱)۵، (۶)۴	(۴)۵	(۳)۳						
۶	-	۳	۰	۱	۷	۱۲	۱	۲	(۲)۲	(۳)۱	(۲)۵، (۵)۶						
۷	۹	۱	۱	۰	۸	۱۸	۱	۲	(۴)۱	(۴)۲	(۳)۶						
۸	۱۵	۳	۱	۱	۶	۱۶	۱	۳	(۲)۵، (۳)۲	(۲)۵، (۶)۱	(۲)۳، (۶)۱						
۹	-	۲	۰	۱	۷	۱۸	۱	۳	(۳)۶، (۲)۳	(۴)۶	(۲)۴، (۷)۲						
۱۰	۱۰	-	۱	۰	۱۲	۲۲	۲	۳	(۳)۱	(۳)۴	(۱)۵، (۸)۲						
۱۱	-	۱	۰	۱	۱۴	۲۵	۱	۳	(۲)۲	(۳)۳	(۳)۲						



شکل ۳. اثر تغییرات در پارامترهای مختلف روی تابع هدف.

• مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با ادعای محقق

وجود دوره‌های متصل بدین معناست که برای شروع برنامه‌ریزی و زمان‌بندی سفارش‌های یک دوره نیازی به اتمام و تکمیل تمامی سفارش‌های دوره قبل نیست و هر سفارش در هر لحظه از زمانی که وارد سیستم شود قابل برنامه‌ریزی و تولید است. در اینجا مسئله در حالتی که این ویژگی وجود ندارد، حل شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت و نتایج نشان می‌دهد، وجود این ویژگی باعث شده است که هزینه‌های سیستم دست‌کم ۷٪ نسبت به زمانی که این ویژگی وجود نداشته باشد کاهش یابد.

۲.۳.۵. ویژگی مورد آزمایش: عدم امکان جابه‌جایی ماشین در طول دوره

با فرض این که در این مسئله جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره ممکن نیست، نتایج در جدول ۹ آمده است.

• با عدم امکان جابه‌جایی ماشین‌آلات، علاوه بر این که موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود، زمان تکمیل نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند به کاهش رضایت مشتریان منجر شود.

• مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با ادعای محقق

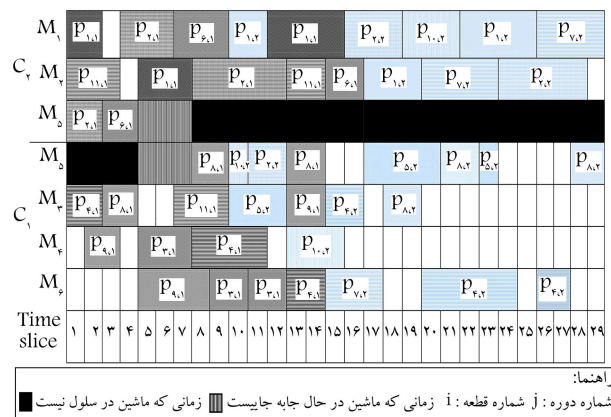
یکی دیگر از ویژگی‌های در نظر گرفته شده در مدل امکان جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره است. یعنی چنانچه ماشینی در یک سلول دیگر مورد نیاز باشد و در سلول جاری بیکار باشد، امکان جابه‌جایی ماشین در طول دوره وجود داشته باشد و نیازی به اتمام دوره برای جابه‌جایی نباشد. در اینجا مسئله در حالتی که این ویژگی وجود ندارد، حل شده است. مطابق انتظار، نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های سیستم دست‌کم ۱٪ نسبت به زمانی که این ویژگی وجود نداشته باشد کاهش می‌یابد.

۴.۵. تحلیل حساسیت

در این قسمت به عنوان یکی از اقدامات مربوط به فرایند راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، به تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل پرداخته‌ایم تا تأثیر و میزان اهمیت این پارامترها روی تابع هدف را بررسی کنیم. پارامترهای مورد بررسی جریمه زمان تکمیل، هزینه‌ی جابه‌جایی ماشین‌ها، هزینه‌ی جابه‌جایی بین سلول‌ها و زمان جابه‌جایی ماشین‌ها است. شکل ۳ نتایج حاصل از این تغییرات را بر تابع هدف نشان می‌دهد.

جدول ۶. داده‌های مرتبط با ماشین‌آلات.

M_6	M_5	M_4	M_3	M_2	M_1	
۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	TM_m
۳	۲	۴	۵	۴	۴	RT_m
۳۵	۲۰	۸۰	۷۵	۴۵	۶۰	θ_m



شکل ۴. نمایش پیکربندی سلول‌ها و توالی و زمان‌بندی قطعات.

نتایج حاصل از مقادیر قسمت‌های مختلف تابع هدف و همچنین زمان تکمیل هر دوره در جدول ۷ ارائه شده است. در شکل ۲ نیز ساختار سلول‌ها در زمان‌های مختلف و نیز زمان‌بندی قطعات روی ماشین‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ماشین ۵ در طول دوره از سلول ۲ به سلول ۱ انتقال یافته است.

۳.۵. تحلیل ویژگی‌های مدل

۱.۳.۵. ویژگی مورد آزمایش: عدم وجود دوره‌های متصل

در این حالت سیستم مجبور است سفارش‌های دوره‌ی دوم را بعد از اتمام تمامی سفارشات دوره اول شروع کند، حتی اگر برخی از این سفارش‌ها قبل از اتمام دوره اول در اختیار سیستم باشند. نتایج به دست آمده در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷. مقادیر قسمت‌های مختلف تابع هدف در مثال ۱.

تابع هدف	$C \max_4$	جابه‌جایی			$C \max_2$	$C \max_1$
		ماشین	بین سلولی	درون سلولی		
۲۰۵۳	۱۸۰۰	۲۰	۱۰۵	۱۲۸	۱۶	۲۹

جدول ۸. مقادیر قسمت‌های مختلف تابع هدف در مثال ۲.

تابع هدف	$C \max_4$	جابه‌جایی			$C \max_2$	$C \max_1$
		ماشین	بین سلولی	درون سلولی		
۲۲۰۷	۲۰۰۰	۰	۷۶	۱۳۱	۱۶	۳۴
مقایسه با مثال ۱	٪۱۱	٪۱۰۰	٪۲۸	٪۲	بدون تغییر	٪۱۷
افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش		افزایش

جدول ۹. مقادیر قسمت‌های مختلف تابع هدف در مثال ۳.

تابع هدف	$C \max_4$	جابه‌جایی			$C \max_2$	$C \max_1$
		ماشین	بین سلولی	درون سلولی		
۲۰۷۱	۱۸۴۰	۰	۹۴	۱۳۷	۱۶	۳۰
مقایسه با مثال ۱	٪۲	٪۱۰۰	٪۱۰	٪۷	بدون تغییر	٪۳
افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش		افزایش

جدول ۱۰. بررسی ویژگی‌های متمایز اعمال شده در مدل ریاضی.

ویژگی	بیشینه در ادبیات	استفاده در مدل	نتایج
CF	[۲۰-۱۳] [۲۹-۲۴]	در این مدل نیز مانند بسیاری از مدل‌های موجود در ادبیات شکل‌دهی ساول هم‌زمان با زمان‌بندی انجام می‌شود.	مانند سایر مدل‌های موجود در ادبیات
مسیرهای پردازش جایگزین	[۳۱، ۲۱، ۱۹، ۱۸، ۳] [۲۹، ۲۳]	مانند بسیاری از مدل‌های موجود در ادبیات مسیرهای پردازش جایگزین در نظر گرفته شده است.	مانند سایر مدل‌های موجود در ادبیات
دوره‌های زمانی متصل	-	در این مدل برای اولین بار دوره‌های زمانی به صورت متصل در نظر گرفته شده است. در مدل‌های موجود بین دوره‌ها تفکیک کاملی وجود دارد.	امکان در نظر گرفتن جابه‌جایی ماشین و کاهش هزینه
جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره	-	برای اولین بار امکان جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره در نظر گرفته شده است. در مدل‌های موجود جابه‌جایی بین دو دوره و بدون در نظر گرفتن زمان جابه‌جایی منظور می‌شود.	افزایش سرعت تطبیق سیستم و کاهش هزینه

۵.۵. ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی

جواب‌های حاصل از نرم افزار GAMS مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج مقایسه در جدول ۱۱ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در مثال‌های ۱ تا ۶ که توسط نرم‌افزار GAMS حل شده‌اند، جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی SA و GA با جواب‌های بهینه اختلاف کمی دارند و به لحاظ زمانی

در این بخش ۱۰ مثال در اندازه‌های مختلف با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی حل شده است و نتایج به دست آمده از لحاظ زمانی و کیفیت جواب با

در زمان بسیار کمتری به جواب می‌رسند که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی قابل قبول بودن الگوریتم‌های پیشنهادی باشد. در مثال‌های ۷ تا ۱۰ نیز نرم افزار GAMS بعد از ۱۰ ساعت نتوانست جواب قابل قبول ارائه دهد. نتایج مقایسه‌ی زمانی بین الگوریتم‌های پیشنهادی و نرم‌افزار GAMS در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است.

۶. نتیجه‌گیری

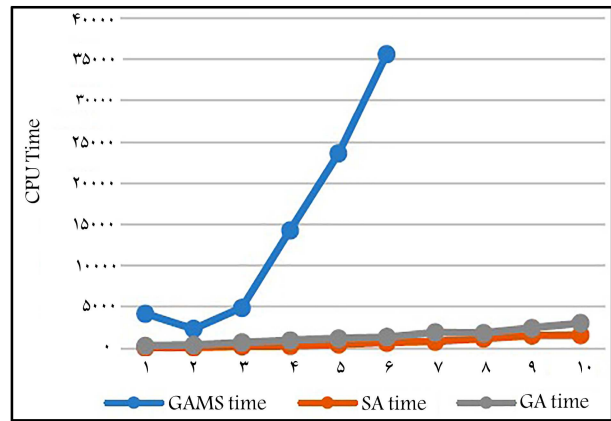
در این نوشتار مسائل شکل‌دهی سلول و زمان‌بندی خانواده‌ی قطعات به صورت یک پارچه در یک مدل ریاضی ارائه شده است. در مدل ارائه شده قابلیت جابه‌جایی ماشین‌ها در طول دوره با در نظر گرفتن زمان و هزینه‌ی جابه‌جایی، توالی عملیات، جابه‌جایی بین سلول‌ها، محدودیت اندازه سلول‌ها، ظرفیت ماشین، وجود نسخه‌های یکسان از یک ماشین و همچنین مسیرهای پردازش جایگزین لحاظ شده است. هدف مدل غیر خطی ارائه شده کاهش زمان تکمیل و کاهش هزینه‌های جابه‌جایی قطعات و ماشین‌آلات است. سپس مدل خطی‌سازی شده است. از آن‌جا که مدل ارائه شده NP-hard است یک الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و یک الگوریتم ژنتیک برای حل مدل در اندازه‌های بزرگتر پیشنهاد شده است. مدل ارائه شده در پنج مرحله اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های موجود در مدل ارائه شده در این نوشتار می‌تواند در کاهش هزینه‌های تولیدکنندگان و همچنین افزایش رضایت‌مندی مشتریان سودمند باشد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های SA و GA با جواب‌های به دست آمده از CPLEX، کارایی الگوریتم‌های ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم SA در زمان کمتری نسبت به GA به جواب بهینه همگرا می‌شود. برای گسترش تحقیق فعلی، می‌توان برخی از پارامترها نظیر زمان انجام عملیات و تقاضای قطعات را غیر قطعی در نظر گرفت. همچنین توصیه می‌شود از دیگر روش‌های فراابتکاری نیز استفاده شود.

پانویس‌ها

1. Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS)
2. Cell Formation
3. Group Scheduling
4. Scatter Search
5. Nested Tabu Search
6. Biogeography-Based Optimization
7. Biased Random Sampling
8. Particle Swarm Optimization
9. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
10. Cell Layout

منابع (References)

1. Rheault, M., Drolet, J. and Abdounour, G. "Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment", *Computers and Industrial Engineering*, **29**(1.4), pp. 221-225 (1995).



شکل ۴. مقایسه زمان محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار GAMS.

جدول ۱۱. مقایسه‌ی الگوریتم SA با GAMS.

GA	GAP %	SA		GAMS		دوره	تکرار	میانگین	میانگین	قطعه			
		زمان جواب (s)	حاصل	زمان جواب (s)	حاصل								
۱۹۱	۲۰.۸۲	-	۱۰۷	۲۰۵۳	۴۲۳۹	۲۰۵۳	۳۱	۲	۲	۶	۳	۱۱	۱
۲۴۴	۱۹۱۸	-	۱۲۵	۱۹۱۸	۲۳۹۷	۱۹۱۸	۳۱	۲	۲	۷	۳	۱۲	۲
۴۳۷	۲۵۳۴	۱/۵	۲۷۰	۲۴۱۴	۴۹۴۳	۲۳۸۰	۳۵	۳	۳	۸	۴	۱۴	۳
۶۰۲	۳۸۴۵	۲/۹	۳۳۴	۳۸۷۱	۱۴۳۲۴	۳۷۶۲	۴۰	۳	۳	۹	۴	۱۷	۴
۸۳۱	۳۸۴۴	۴/۷	۵۰۴	۳۸۶۵	۲۳۶۲۰	۳۶۹۲	۴۳	۴	۳	۱۰	۵	۱۸	۵
۱۰۰۸	۴۱۱۲	۲/۷	۷۳۳	۴۰۰۷	۳۵۵۲	۳۹۰۲	۴۸	۵	۴	۱۲	۵	۲۰	۶
۱۰۹۲	۵۱۳۷	-	۸۶۲	۴۹۷۹	-	-	۵۲	۵	۴	۱۴	۶	۲۲	۷
۱۸۹۰	۴۸۲۳	-	۱۲۱۹	۴۸۳۰	-	-	۵۵	۶	۵	۱۵	۷	۲۵	۸
۱۹۳۰	۵۷۹۲	-	۱۵۸۱	۵۶۲۷	-	-	۶۰	۷	۵	۱۷	۸	۳۰	۹
۳۱۰۰	۷۶۰۱	-	۱۶۲۸	۷۴۸۴	-	-	۷۰	۸	۶	۱۸	۹	۳۵	۱۰

2. Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Khorrani, A. and et al. "Design of a scatter search method for a novel multi-criteria group scheduling problem in a cellular manufacturing system", *Expert Systems with Applications*, **37**(3), pp. 2661-2669 (2010).
3. Tavakkoli-Moghaddam, R. "A hybrid genetic algorithm for a bi-objective scheduling problem in a flexible manufacturing cell", *International Journal of Engineering*, **23**(3), pp. 235-252 (2010).
4. Saraçoğlu, İ., Süer, G.A. and Gannon, P. "Minimizing makespan and flowtime in a parallel multi-stage cellular manufacturing company", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **72**, p. 102182 (2021).
5. Solimanpur, M. and Elmi, A. "A tabu search approach for cell scheduling problem with makespan criterion", *International Journal of Production Economics*, **141**(2), pp. 639-645 (2013).
6. Süer, G.A., Ates, O.K. and Mese, E.M. "Cell loading and family scheduling for jobs with individual due dates to

- minimise maximum tardiness”, *International Journal of Production Research*, **52**(19), pp. 5656-5674 (2014).
7. Zandieh, M. “Scheduling of virtual cellular manufacturing systems: A biogeography-based optimization algorithm”, *Applied Artificial Intelligence*, **33**(7), pp. 594-620 (2019).
 8. Costa, A., Cappadonna, F.A. and Fichera, S. “A hybrid metaheuristic approach for minimizing the total flow time in a flow shop sequence dependent group scheduling problem”, *Algorithms*, **7**(3), pp. 376-396 (2014).
 9. Ibrahim, A.M., Elmekawy, T. and Peng, Q. “Robust metaheuristics for scheduling cellular flowshop with family sequence-dependent setup times”, *Procedia Cirp*, **17**, pp. 428-433 (2014).
 10. Saddikuti, V. and Pesaru, V. “NSGA based algorithm for energy efficient scheduling in cellular manufacturing”, *Procedia Manufacturing*, **39**, pp. 1002-1009 (2019).
 11. Aksoy, A. and Ozturk, N. “Simulated annealing approach in scheduling of virtual cellular manufacturing in the automotive industry”, *International Journal of Vehicle Design*, **52**(1.4), pp. 82-95 (2010).
 12. Ebrahimi, H., Kianfar, K. and Bijari, M. “Scheduling a cellular manufacturing system based on price elasticity of demand and time-dependent energy prices”, *Computers & Industrial Engineering*, **159**, p. 107460 (2021).
 13. Gholipour-Kanani, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Khorrami, A. “Solving a multi-criteria group scheduling problem for a cellular manufacturing system by scatter search”, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, **28**(3), pp. 192-205 (2011).
 14. Arkat, J., Farahani, M.H. and Ahmadizar, F. “Multi-objective genetic algorithm for cell formation problem considering cellular layout and operations scheduling”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **25**(7), pp. 625-635 (2012).
 15. Arkat, J., Farahani, M.H. and Hosseini, L. “Integrating cell formation with cellular layout and operations scheduling”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **61**(5.8), pp. 637-647 (2012).
 16. Halat, K. and Bashirzadeh, R. “Concurrent scheduling of manufacturing cells considering sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **77**(9), pp. 1907-1915 (2015).
 17. Rafei, H., Rabbani, M., Gholizadeh, H. and et al. “A novel hybrid SA/GA algorithm for solving an integrated cell formation-job scheduling problem with sequence-dependent set-up times”, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, **11**(3), pp. 134-142 (2016).
 18. Aryanezhad, M., Aliabadi, J. and Tavakkoli-Moghaddam, R. “A new approach for cell formation and scheduling with assembly operations and product structure”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **2**(3), pp. 533-546 (2011).
 19. Forghani, K. and Ghomi, S.F. “Joint cell formation, cell scheduling, and group layout problem in virtual and classical cellular manufacturing systems”, *Applied Soft Computing*, **97**, p. 106719 (2020).
 20. Eguia, I., Racero, J., Guerrero, F. and et al. “Cell formation and scheduling of part families for reconfigurable cellular manufacturing systems using Tabu search”, *Simulation*, **89**(9), pp. 1056-1072 (2013).
 21. Pajoutan, M., Golmohammadi, A. and Seifbarghy, M. “CMS scheduling problem considering material handling and routing flexibility”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **72**(5.8), pp. 881-893 (2014).
 22. Tang, J., Yan, C., Wang, X. and et al. “Using lagrangian relaxation decomposition with heuristic to integrate the decisions of cell formation and parts scheduling considering intercell moves”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **11**(4), pp. 1110-1121 (2014).
 23. Alfieri, A. and Nicosia, G. “Sequencing a batching flexible cell to minimise set-up costs”, *International Journal of Production Research*, **52**(8), pp. 2461-2476 (2014).
 24. Feng, Y., Li, G. and Sethi, S.P. “A three-layer chromosome genetic algorithm for multi-cell scheduling with flexible routes and machine sharing”, *International Journal of Production Economics*, **196**, pp. 269-283 (2018).
 25. Jawahar, N. and Subhaa, R. “An adjustable grouping genetic algorithm for the design of cellular manufacturing system integrating structural and operational parameters”, *Journal of Manufacturing Systems*, **44**, pp. 115-142 (2017).
 26. Ebrahimi, A., Kia, R. and Komijan, A.R. “Solving a mathematical model integrating unequal-area facilities layout and part scheduling in a cellular manufacturing system by a genetic algorithm”, *SpringerPlus*, **5**(1), p. 1254 (2016).
 27. Alimian, M., Ghezavati, V. and Tavakkoli-Moghaddam, R. “New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems”, *Journal of Manufacturing Systems*, **56**, pp. 341-358 (2020).
 28. Subhaa, R., Jawahar, N. and Ponnambalam, S.G. “An improved design for cellular manufacturing system associating scheduling decisions”, *Sādhanā*, **44**(7), p. 155 (2019).
 29. Wang, J., Liu, C. and Li, K. “A hybrid simulated annealing for scheduling in dual-resource cellular manufacturing system considering worker movement”, *Automatika*, **60**(2), pp. 172-180 (2019).
 30. Sarembafandeh, M., Hosseini Nasab, H. and Tavakkoli-Moghaddam, R. “Mathematical modeling of the influence of demand-side management programs on electrical energy consumption in industries based on the scheduling of virtual manufacturing cells”, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, **8**(17), (In Persian) (1400/2021).

31. Arkat, J., Rahimi, V. and Farughi, H. "Reactive scheduling addressing unexpected disturbance in cellular manufacturing systems", *International Journal of Engineering*, **34**(1), pp. 162-170 (2021).
32. Shafiee-Gol, S., Kia, R., Kazemi, M. and et al. 2021. "A mathematical model to design dynamic cellular manufacturing systems in multiple plants with production planning and location-allocation decisions", *Soft Computing*, **25**(5), pp. 3931-3954 (2021).
33. Bofill, P., Guimera, R. and Torras, C. "Comparison of simulated annealing and mean field annealing as applied to the generation of block designs", *Neural Networks*, **16**, pp. 1421-1428 (2003).
34. Taha, H.A., *Operations Research: An Introduction (Vol. 790)*, Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson/Prentice Hall (2011).