پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صص ۸۹-۵۸
نوع مقاله: پژوهشی

طراحی مدل ریاضی غیرخطی تولید سلولی با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور در سناریوهای مختلف چیدمان

مهدی احمدی پناه[۱]، کامیار چالاکی [*۲]، رویا شاکری[۳]

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.
۳. استادیار گروه مدیریت، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

چکیده

در این مقاله به دنبال ارائه مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی هم‌زمان مسئله‌ی تولید سلولی، تخصیص اپراتورها و چیدمان تسهیلات در شرایط عدم قطعیت و هزینه استهلاک تسهیلات و با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و ماشین‌آلات چندکاره هستیم. در این راستا، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه در شرایط عدم قطعیت ارائه و توسط الگوریتم ژنتیک حل گردیده است. جهت بررسی اعتبار مدل در تحقیق حاضر، مسائل نمونه طراحی و حل گردید. پس از حل مسائل، مقادیر متغیرهای مدل با توجه به محدودیت‌های مدل بررسی شد که نتیجه این بررسی حاکی از اعتبار مدل هست. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و تأیید مدل توسط خبرگان شرکت، مسئله اصلی با داده‌های واقعی و مدنظر در این مسئله بایستی اجرا شود. برای حل مدل توسط الگوریتم ژنتیک، در هر بار انجام الگوریتم در حالات مختلف (٤،٦ و ۹ سلولی) این نکته که الگوریتم با استفاده از عملگرهای مختلف تست و بررسی شود مورد توجه قرار گرفت. پس از خروجی نتایج، مشخص گردید که حالت ۹ سلولی بهترین نتیجه هزینه‌ای در تابع هدف را دارا هست اما پس از تجمیع و تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص اپراتور و محاسبه هزینه نیروی کار و جمع‌بندی آن با هزینه‌های جابجایی ماشین‌آلات و قطعات، مشخص گردید که حالت ٦ سلولی دارای بهترین ویژگی‌ها برای انتخاب نهایی توسط شرکت است. همچنین تخصیص نیروی عملیاتی و اپراتور به دستگاه‌ها در صنایع تولیدی امری می‌تواند با تغییر چینش در ماشین‌آلات و ایجاد برنامه‌ریزی جابجایی ماشین‌آلات و دسته‌های قطعات بهینه شود.

کلیدواژه‌ها: تولید سلولی، تحلیل سناریو، مدل‌سازی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک.

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: K.chalaki@gmail.com

۱- مقدمه و بیان مسئله

امروزه سازمان‌های تولیدی در شرایط متفاوتی از گذشته قرار گرفته‌اند که ازجمله این شرایط می‌توان به افزایش فشارهای رقابتی، لزوم ایجاد تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات مشتریان و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد [۱]. در این شرایط رقابتی، صنعتگران و تولیدکننده‌ها در تلاش‌اند تا با انعطاف‌پذیری در عملیات‌ها و فعالیت‌های خود، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری خواسته بخش‌های مختلف بازار را برآورده کنند و موقعیت خود را در بازار حفظ نمایند. برای دستیابی به این اهداف در بسیاری از صنایع تولیدی باهدف افزایش بهره‌وری سیستم‌های تولیدی از سلول‌های تولیدی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [۲].

یک سیستم تولید سلولی[۱] (CMS) اغلب در کارخانه‌های صنعتی برای تهیه یک سیستم تولید کارآمد مورداستفاده قرار می‌گیرد. در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی در این سیستم تولید می‌تواند به‌شدت مشکل را افزایش دهد. در دنیای صنعتی امروزی، توجه به مسائل زیست‌محیطی توسط سازمان‌های نظارتی اعمال می‌شود، به‌گونه‌ای که یک سیستم تولیدی که بدون در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی خود طراحی‌شده باشد، نمی‌تواند توسط مدیران تصویب شود. علاوه بر این، برخی از عناصر (به‌عنوان مثال حمل‌ونقل و استراتژی‌های تولید) در یک زنجیره تأمین با محیط‌های زیست‌محیطی در ارتباط هستند و بنابراین کارایی سیستم بستگی به در نظر گرفتن این موضوع مهم دارد [۳].

برنامه‌ریزی تولید و توازن موجودی دو عنصر اساسی هستند که می‌توانند بر عملکرد یک سیستم تأثیرگذار باشد. در یک برنامه واقعی در یک سیستم تولید همیشه عدم قطعیت در برخی پارامترها، مانند تقاضا، زمان پردازش و تنوع تولید وجود دارد؛ بنابراین برای کنار آمدن با این موضوع باید یک روش مناسب جهت مقابله با عدم قطعیت در نظر گرفت [٤]. در دنیای امروز با توجه به پیشرفت تکنولوژی، سازمان‌ها در تلاش هستند که از رقبا پیشی بگیرند و این جز با برنامه‌ریزی دقیق و به‌کارگیری صحیح منابع و امکانات امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین مدیران با توجه به پیچیدگی سیستم‌ها، باید با استفاده از ابزارهای مناسب مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی اعداد صحیح، شبیه‌سازی، تئوری صف و ... که برای تحلیل سیستم‌های تولیدی وجود دارند، برنامه‌ریزی صحیحی انجام داده و از به هدر رفتن منابع جلوگیری کنند[٥].

همان‌طور که اشاره شد، ضرورت کاهش هزینه‌ها و زمان تولید بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در صورت کاهش هزینه‌های تولید، قیمت تمام‌شده کالا نیز کاهش می‌یابد و اگر زمان تولید کاهش یابد به سبب آن زمان پاسخگویی به سفارش مشتری نیز کاهش خواهد یافت.

اهمیت این موضوع را می‌توان این‌گونه مورد تأکید قرار داد که اساساً امروزه و در جهان پیشرفته و به‌شدت در حال رشد، عدم قطعیت جزء لاینفک تصمیمات مدیران سازمان‌ها هست. به‌عبارتی‌دیگر، پارامترها در دوره‌های زمانی کوتاهی تغییر پیدا می‌کنند؛ بنابراین تصمیم‌گیری برای یک بازه‌ی طولانی‌مدت امری غیرواقع‌بینانه و به‌عبارتی‌دیگر غیرمنطقی هست. عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مدل، خروجی‌های به‌دست‌آمده را بی‌کیفیت می‌کند و نتایج به‌دست‌آمده چندان قابل‌اطمینان نیستند؛ بنابراین، عدم قطعیتی که در پارامترهای مسئله وجود دارد باید تا حد زیادی در مدل دیده شود تا نتایج به‌دست‌آمده قابلیت اطمینان بیشتری پیدا کند. در این تحقیق، پارامترهایی نظیر تقاضا برای محصولات دارای عدم قطعیت می‌باشند که در این تحقیق، این عدم قطعیت با رویکرد احتمالی در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله به طراحی مدل ریاضی غیرخطی تولید سلولی با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور در سناریوهای مختلف چیدمان پرداخته شده و برای این مسئله یک مدل ریاضی تک‌هدفه ارائه شده است. در مدل ارائه شده، تقاضا غیرقطعی بوده و با رویکرد احتمالی مدل شده است. یکی از مسائل بسیار مهم در برنامه‌ریزی تولید، بحث احتمال اختلال در تسهیلات مورد استفاده می‌باشد. انتظار کارکرد صددرصدی از تسهیلات موجود در خط تولید در همه‌ی شرایط چندان منطقی نیست. در برخی شرایط، تسهیلات مورد استفاده در خط به دلایلی نظیر فرسودگی، استهلاک و یا خرابی‌های غیرمنتظره دچار اختلال در عملکرد شده و نمی‌توانند عملکرد ایده‌آل داشته باشند. در نظر نگرفتن این اختلالات احتمالی باعث دور شدن مدل از شرایط دنیای واقعی می‌شود و تصمیمات حاصل از مدل را تا حد زیادی غیرعملیاتی می‌سازد. ازاین‌روی، ضرورت در نظر گرفتن خرابی‌های بالقوه و اختلالات احتمالی در تسهیلات به‌منظور داشتن یک برنامه‌ریزی مناسب، قابل‌اطمینان و عملیاتی به‌خوبی احساس می‌شود که در این مقاله به‌صورت هزینه استهلاک در مدل لحاظ شده است. با این مقدمات اجمالی، در این مقاله به دنبال ارائه مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی هم‌زمان مسئله‌ی تولید سلولی، تخصیص اپراتورها و چیدمان تسهیلات در شرایط عدم قطعیت و هزینه استهلاک تسهیلات و با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و ماشین‌آلات چندکاره هستیم. در این راستا، یک مدل ریاضی تک‌هدفه در شرایط عدم قطعیت ارائه و توسط الگوریتم ژنتیک حل گردیده است.

۲- پیشینه پژوهش

در غالب تحقیقات صورت گرفته‌شده درزمینهٔ سیستم‌های تولید سلولی، تنها رو روی یک جنبه از مسائل برنامه‌ریزی تولید یعنی زمان‌بندی، تخصیص اپراتور یا چیدمان تحقیق شده است و برخی از تحقیقات

به حل دو یا هر سه فاکتور به‌صورت متوالی و پی‌درپی پرداخته‌اند. این رویکردها راه‌حل‌هایی را ایجاد می‌کنند که احتمالاً برای یکی از این سه مسئله کارایی دارند درحالی‌که برای سیستم کلی رضایت‌بخش نیستند. این رخداد به دلیل تأثیر این سه زیر مسئله بر روی یکدیگر در هنگام طراحی سیستم تولید سلولی هست[۶]. همچنین، در شرایط دنیای واقعی مسائل متعددی وجود دارند که بر روی تصمیمات مربوط به تولید سلولی تأثیرگذار می‌باشند. مسائل متعددی نظیر عدم قطعیت، احتمال اختلال در تسهیلات، کوتاه‌تر شدن بازه‌های زمانی تصمیم‌گیری، زمان‌های آماده‌سازی و ویژگی‌های ماشین‌های مورداستفاده برخی از مواردی هستند که در برنامه‌ریزی‌های مربوط به تولید سلولی تأثیرگذار بوده و غفلت از آن‌ها در مدل‌سازی و برنامه‌ریزی‌ها می‌تواند موجب کاسته شدن از دقت و اعتبار مدل و درنتیجه غیرکاربردی شدن یافته‌های عددی تحقیق شود. در ادامه برخی از مدل‌های ارائه‌شده در تحقیقات پیشین بررسی می‌گردد.

ارنی و همکاران[۲][۷] یک رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی را برای طراحی یک سیستم تولید سلولی لایه‌بندی شده در یک محیط تقاضای بسیار پر نوسان ارائه داد. مدل آن‌ها برای ایجاد سلول‌های اختصاصی، مشترک و باقیمانده باهدف به حداقل رساندن تعداد سلول‌ها ساخته‌شده است. برخلاف سیستم تولید سلولی کلاسیک، در یک سیستم سلولی لایه‌ای، برخی سلول‌ها می‌توانند به خانواده‌های چندقسمتی خدمت کنند. نیاکان و همکاران[۳][۸] یک مدل ریاضی جدید چندهدفه را در یک مسئله تشکیل سلول پویا در نظر گرفت که در آن معیارهای اجتماعی و شرایط عدم اطمینان تقاضا در نظر گرفته می‌شود. وانگ[۴] و همکاران [۹] در تحقیقی به ارائه یک الگوریتم شاخه و قیمت برای زمان‌بندی فعالیت‌ها برای یک ماشین در یک سیستم انعطاف‌پذیر ارائه کردند. هدف مدل ارائه‌شده کمینه کردن زمان اتمام فعالیت‌ها بود. سپس به‌منظور حل مدل، یک رویکرد شاخه و هزینه ارائه و مسائل عددی در ابعاد مختلف حل شدند. رئوف‌پناه و همکاران [۳] به بررسی مسئله بهینه‌سازی موجودی در یک سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی پرداخت و همچنین آن‌ها در تحقیق خود پارامتر زمان را عدم قطعیت در نظر گرفته بودند و از رویکرد بهینه‌سازی استوار مسئله را موردبررسی قراردادند. کومار و سینگ[۵][۲] به ارائه یک مدل دوهدفه استوار جهت طراحی چیدمان سلولی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا پرداخت و هدف آن حداقل کردن جابه‌جایی مواد و حداکثر سازی شباهت سلولی بود که با توجه به عدم قطعیت تقاضا توانست یک چیدمان استوار را ارائه دهد وی همچنین جهت حل مسئله در ابعاد بالا از روش باز پخت شبیه‌سازی‌شده استفاده کرد. نوآوری وی ارائه یک طرح چیدمان مناسب بود که از هزینه راه‌اندازی مجدد جلوگیری کند. فاروقی و همکاران [۱۰] یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای پیکربندی یک سیستم تولید سلولی پویا ارائه داده‌اند. در این مدل تغییرات دینامیکی و عدم قطعیت در

تقاضای قطعات و قابلیت اطمینان ماشین‌آلات در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول هزینه‌های کل را به حداقل می‌رساند و تابع هدف دوم قابلیت اطمینان ماشین‌ها را از طریق به حداقل رساندن خرابی ماشین‌ها به حداکثر می‌رساند.

سوتو[6] و همکاران [۱۱] الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام گربه‌های دودویی را برای حل مسئله طراحی سلول‌های تولیدی ارائه کردند. این مسئله یک کارخانه تولید صنعتی را به تعداد مشخصی سلول تقسیم می‌کند. هر سلول شامل ماشین‌هایی با انواع فرآیندها یا خانواده‌های مشابه است. هدف این است که یک سازمان سلولی را به‌گونه‌ای شناسایی کنند که حمل‌ونقل قسمت‌های مختلف بین سلول‌ها به حداقل برسد.

زندیه [۱۲] از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی جهت حل مسئله زمان‌بندی سیستم‌های تولید سلولی مجازی استفاده کرده است. در این مقاله مسئله زمان‌بندی سلول‌های مجازی مطالعه شده است که کارها دارای ترتیب‌های متفاوتی بر روی ماشین‌ها هستند و هدف این است که به‌طور هم‌زمان مجموع وزنی فاصله و مسافت سفر به حداقل برسد تا تعادلی بین معیارها ایجاد شود [۱۳].

اکبری [۱٤] در مطالعه‌ای درصدد است تا یک سیستم کنترل موجودی و تولید را برای شرایط بحران معرفی کند. مدل پیشنهادی برای تولید و کنترل موجودی در شرایط عدم اطمینان مدلسازی و فرض شده است که تقاضای مشتریان به‌خوبی از توزیع نرمال پیروی می‌کند. در این پژوهش، مدل ریاضی ارائه شده از نوع عدد صحیح، غیرخطی و NP-hard است. برای حل این مدل پیچیده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانایی مدلسازی و حل مسأله کنترل تولید و موجودی در شرایط بحران ناشی از کمبود موجودی و محدودیت‌های مرتبط را دارد. از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری برای حل مسائل چیدمان سلولی با ناحیه ثابت استفاده کردند. آن‌ها روش جدیدی را برای حل مسائل طرح‌بندی سلولی منطقه ثابت چندهدفه پیشنهاد دادند که اهداف مدل به حداقل رساندن کل مسافت سفر محصولات، به حداقل رساندن کل هزینه جابجایی مواد و همچنین به حداقل رساندن تعداد حرکات عقب‌گرد است. در این مقاله تکنیک‌های مناسبی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده، الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی مسئله بنچ مارک اعمال شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. مورتزیس و همکاران [۱٥] در تحقیقی به چارچوبی برای برنامه‌ریزی تطبیقی در سیستم‌های ساخت سلولی پرداختند. این مقاله تحقیقاتی با هدف ارائه یک الگوریتم که امکان همکاری نزدیک به زمان واقعی بین ماشین‌ها، نیروی کار و مدیر تولید را فراهم می‌کند، در زمینه برنامه‌ریزی تطبیقی تحقیقاتی را صورت داد. در نهایت، چارچوبی برای برنامه‌ریزی خود انطباقی در یک مورد تولیدی در دنیای واقعی ناشی از یک شرکت متوسط و متوسط که صفحات خورشیدی را تولید می‌کند ارائه شد.

رستمی و همکاران [۱۶] یک مدل ریاضی چندهدفه برای ادغام هم‌زمان سیستم تولید سلولی مجازی و زنجیره تأمین و توسعه محصول جدید کرده‌اند. آن‌ها برای حل مسئله تحقیق از برنامه‌ریزی هدف چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت کرده و از الگوریتم ژنتیک که با رویکرد جستجوی همسایگی متغیر (VNS) تلفیق شده است، جهت حل مدل استفاده نمودند. لاها و ماجومدر [٤] یک الگوریتم ابتکاری خوشه‌بندی بهبودیافته برای سیستم‌های تولید سلولی ارائه کرده‌اند. عیوق [۱۷] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (ILP) ارائه نمودند که مجموعه‌ای از متصدی را به سلول‌ها تخصیص می‌داد؛ به نحوی که عدم جابجایی‌های بین سلولی در دوره‌های متوالی کمینه می‌شد. برای حل مدل، از نرم‌افزار گمز بهره گرفتند و همچنین به منظور بهبود کارایی حل برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم ابتکاری بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری طراحی نمودند. حیاتی و عبداله‌زاده [۱۸] یک رویکرد یکپارچه برای سیستم سلولی مجازی و انتخاب خط‌مشی نگهداری ارائه کرده‌اند. ریس[۷] و همکاران [۱۹] به بهینه‌سازی فرآیند تولید برای نمونه کارها مدرسه از طریق اجرای طرح سلولی پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که چیدمان سلولی یک ابزار بهینه‌سازی کارآمد در فرآیند تولید میزهای مدرسه است، زیرا مزایای متعددی مانند افزایش بهره‌وری، سازمان‌دهی بیشتر و انعطاف‌پذیری در فرآیندها را برای کارخانه تحت مطالعه به همراه داشت. رضایی‌پناه و مجرد[۲۰] نیز یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای زمان‌بندی سلولی و قطعات درون هر سلول در یک سیستم سلولی تولیدی ارائه کردند. هدف از این مدل، به حداقل رساندن فاصله زمانی و حرکات بین سلولی به‌طور هم‌زمان است و سه مرحله اصلی را در نظر گرفتند که عبارت‌اند از: تشکیل سلول (خانواده قطعات و گروه‌بندی ماشین)، طرح‌بندی بین‌سلولی و درون‌سلولی و مسئله زمان‌بندی. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش فراابتکاری کارآمد برای حل مدل استفاده کرده و نشان دادند، کارایی GA پیشنهادی برای حل این مسئله بالا می‌باشد.

محتشمی و همکاران [۲۱] با هدف کم کردن زمان کل عملیات با در نظر گرفتن پارامترهای زمانی غیرقطعی و با رویکرد پنجره زمانی نرم در کل زنجیره تأمین و با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی امکانی مدل ریاضی را قطعی می‌کند. از آنجا که مدل مقاله از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح صفر و یک بوده و متعلق به مسائل NP-hard است؛ زمان حل آن‌ها با افزایش بعدهای مسئله به‌شدت افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای پیدا کردن جواب‌های نزدیک بهتر مسئله از الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. وو و همکاران[۲۲] در تحقیقی به کمینه رساندن میزان سفارش مشتری تصادفی در سیستم‌های تولید سلولی با ماشین‌های موازی را مدنظر قرار دادند. این مطالعه به یک مسئله تولید سفارش تصادفی مشتری در سیستم‌های تولید سلولی با ماشین‌های موازی پرداخت. هدف این بود که از طریق طراحی مناسب سیستم تولید سلولی تحت محدودیت بودجه، میزان انتظار

طولانی‌مدت سفارش‌های تصادفی مشتری به کمینه برسد. مطالعات نظری برای بررسی تأثیر عدم قطعیت تقاضا و نیاز تولید بر طراحی بهینه و هدف انجام شد. بر اساس تجزیه‌وتحلیل نظری، سه الگوریتم ابتکاری برای حل مسائل عددی ارائه شد. نتایج تجربی اثربخشی الگوریتم‌های پیشنهادی را تحت انواع سناریوهای تولید نشان داد. این مقاله ادبیات موجود در مورد سفارش‌های مشتری را با ورود و تقاضاهای تصادفی که پردازش چندمرحله‌ای آن‌ها در سلول‌های تولیدی انجام می‌شود، گسترش داد. علاوه بر این، مطالعات در مورد طراحی سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن سفارش‌های تصادفی مشتری که نیاز به ورود و عزیمت هم‌زمان محصولات در یک سفارش دارند، غنی شدند. ژانگ[۸] و همکاران [۲۳] یک چارچوب پیکربندی مجدد سلول مجازی پویا را تحت یک محیط پویا با تقاضاهای ناپایدار و چرخه‌های برنامه‌ریزی متعدد پیشنهاد کرده‌اند. در این چارچوب، آن‌ها یک مدل تشکیل سلول مجازی پویا دوفازی را با هدف به حداکثر رساندن شباهت پردازش و متعادل کردن حجم کار در سیستم ارائه کرده‌اند. در فاز دوم، هدف پایداری پیکربندی مجدد بر اساس مدل فاز اول را در نظر گرفته و از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II جهت حل مدل استفاده کرده‌اند. جعفرنژاد و همکاران [۲٤] مدل جدید برای مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه شده که هزینه‌های مربوط به موجودی کالا و ذخیره اطمینان را شامل می‌شود. در این مدل، هزینه حمل کالا از تأمین‌کننده به مراکز توزیع که بیان‌کننده مقیاس اقتصادی استفاده از اقلام ثابت هزینه می‌باشد نیز در مدل وارد شده و مسأله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح صفر و یک فرموله شده است. جارادات[۹] و همکاران [۲۵] از الگوریتم ژنتیک برای طراحی یک سیستم تولید سلولی یکپارچه با در نظر گرفتن طرح‌بندی دو ردیفه خطی استفاده کردند. آن‌ها یک مدل نظری برای طراحی یک سیستم تولید سلولی پیشنهاد کردند که با اتخاذ این سه تصمیم مرتبط به‌طور هم‌زمان، کل زمان تکمیل را بهینه می‌کند. در مدل نظری، طرح‌بندی سلولی تک ردیفی و دو ردیفی خطی اعمال شد و یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل با اندازه واقعی توسعه و آزمایش شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با طرح‌بندی خطی دو ردیفه نتایج مطمئن‌تری نسبت به چیدمان تک ردیفی ارائه می‌دهد و GA به راه‌حل‌های قابل‌قبول در بازه زمانی معقول‌تری نسبت به روش حل سنتی دست می‌یابد.

جدول ۱. تبیین شکاف تحقیقاتی

محقق - سال	انعطاف‌پذیری	پویایی	تولید دسته‌ای	هزینه استهلاک	هزینه عملیاتی	هزینه جابه‌جایی ماشین	هزینه انتقال بین سلولی	جریمه مجموع انحراف از میانگین	عدم قطعیت احتمالی	تحلیل سناریو	الگوریتم ژنتیک
ارنی و همکاران (۲۰۱۵)	*		*				*				
نیاکان و همکاران (۲۰۱۶)		*			*				*		*
وانگ و همکاران (۲۰۱۸)	*				*						
رئوف‌پناه و همکاران (۲۰۱۹)	*	*				*					
کومار و سینگ (۲۰۱۹)		*				*	*				
فاروقی و همکاران (۲۰۱۹)		*			*		*			*	
سوتو و همکاران (۲۰۱۹)		*	*				*				
زندیه و همکاران (۲۰۱۹)		*					*				
آرول کومار و همکاران (۲۰۲۰)	*					*	*				*
رستمی و همکاران (۲۰۲۰)	*	*					*				*
حیاتی (۲۰۲۱)		*			*	*					
ریس و همکاران (۲۰۲۱)	*	*			*	*					
وو و همکاران (۲۰۲۱)	*	*					*		*	*	

محقق – سال	انعطاف‌پذیری	پویایی	تولید دسته‌ای	هزینه استهلاک	هزینه عملیاتی	هزینه جابه‌جایی ماشین	هزینه انتقال بین سلولی	جریمه مجموع انحراف از میانگین	عدم قطعیت احتمالی	تحلیل سناریو	الگوریتم ژنتیک
رضایی پناه و مجرد (۲۰۲۱)							*				*
ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)		*	*		*		*				*
جارادات و همکاران (۲۰۲۲)	*						*				*
تحقیق حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، تاکنون افراد زیادی درزمینهٔ زمان‌بندی سلولی و مدل‌سازی ریاضی این سیستم تولیدی پرداخته‌اند. تمایز تحقیق حاضر با تحقیقات گذشته در این است که در این مقاله، علاوه بر مفروضات تحقیقات قبلی، موارد جدیدی مانند «هزینه استهلاک»، «جریمه مجموع انحراف از میانگین تقاضای قطعات» را در کنار هزینه عملیاتی، هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها، هزینه انتقال بین سلولی، تولید دسته‌ای، عدم قطعیت احتمالی و ... را در محیط سلولی انعطاف‌پذیر و پویا در نظر گرفته است؛ بنابراین می‌توان گفت تحقیق حاضر از این حیث نسبت به تحقیقات پیشین دارای نوآوری است.

با توجه به موارد ذکرشده، ضرورت تحقیقی که به مسئله برنامه‌ریزی تولید سلولی، تخصیص اپراتورها و چیدمان تسهیلات با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و شرایط دنیای واقعی بپردازد به‌خوبی احساس می‌شود. ازاین‌روی، تحقیق حاضر با مدنظر دادن شکاف‌های موجود در ادبیات موضوع، سعی در طراحی مدلی در انطباق هر چه بیشتر با شرایط دنیای واقعی دارد تا ابزاری قدرتمند را در اختیار مدیران و تصمیم‌گیرندگان در صنعت قرار دهد تا بتوانند تصمیمات مختلف را به‌صورت یکپارچه و در تطابق با واقعیات محیط اتخاذ نمایند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

تحقیق پیش رو یک تحقیق نظری و تحلیلی ریاضی است. در این تحقیق یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه ارائه شد و جهت حل مدل از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده گردید. از لحاظ هدف، این پژوهش در زمره تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد.

با توجه به ارائه مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید سلولی، تخصیص اُپراتورها و چیدمان تسهیلات در شرایط عدم قطعیت، لذا در پژوهش حاضر از متدلوژی پژوهشی ترکیبی بهره‌برداری خواهد شد. منطق عقلایی بهره‌برداری از رویکرد ترکیبی در ارائه روشی جهت اجرای پژوهش، با بهره‌برداری از مدل ریاضی، به این شرح است که متدلوژی‌های ترکیبی برای موفقیت در محیط‌هایی که در آن‌ها مشارکت کاربر امری ضروری است، بسیار مناسب هستند. به‌طوری‌که در حال حاضر برای شناسایی مسائل و مشکلات سامانه‌های اجتماعی-رفتاری، بهره‌برداری از روش‌های مبتنی بر ترکیب پارادایم‌های پژوهشی، از اهمیت برخوردار شده است؛ زیرا به‌رغم ماهیت پیچیده این سامانه‌ها و محیط‌ها، نمی‌توان فقط به بهره‌برداری از یک روش، اکتفا کرد و به شناخت کافی نسبت به موقعیت‌های معین، دست یافت. در اینجا می‌توان به پرسش‌های گسترده‌تری به‌طور کامل‌تر پاسخ داد زیرا پژوهشگر به یک روش یا رهیافت واحد محدود نیست. می‌توان از طریق مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از متدهای مختلف ارائه سامانه که در مورد یک موضوع به‌کاررفته‌اند، شواهد محکم‌تر و بیشتری برای نتیجه‌گیری کلی فراهم کرد. درواقع، جنبه‌های مختلف یک پدیده که در صورت کاربرد یک روش واحد مورد غفلت قرار می‌گرفت را نیز می‌توان بررسی نمود.

از جهتی دیگر، پژوهش حاضر از نوع مدل‌سازی ریاضی است زیرا اگر تمام عملگرها در یک مدل ریاضی به‌صورت خطی باشند آنگاه مدل ریاضی خطی است. در غیر این صورت مدل غیرخطی است. تعریف مدل‌های خطی و غیرخطی در محتوای آن‌ها است و یک مدل خطی ممکن است دارای عبارات غیرخطی باشد[۲۶]

۳-۱- مدل ریاضی غیرخطی سیستم‌های تولید سلولی

در این مقاله مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی سلولی در شرایط پویا مدنظر است که در آن تقاضای تولیدات در هر دوره معین نبوده و با استفاده از متغیرهای تصادفی با توزیع احتمال مدل‌سازی گردیده است. مقصود، تعیین میزان بهینه تقاضای هر محصول در یک سطح اطمینان مشخص است به‌گونه‌ای که وزن تقاضا افزون بر کمینه‌سازی برخی از هزینه‌های تولید با مقدار ارزش انتظاری خود کمینه تمایز را نیز داشته است[۲۷]. این امر بخصوص در وضع آرمانی سبب افت مخارج نگهداری کالاهای تکمیل شده و

هزینه کمبود موجودی خواهد شد. در این پژوهش با در نظر گرفتن یک فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای تقاضای قطعات جمع بزرگ مطلق انحراف از معدل تقاضای قطعات به‌عنوان هزینه و حد فراز و حد زیرین فاصله اطمینان به‌عنوان محدودیت به مدل اضافه می‌گردند.

از طرفی با دقت به پویا گشتن وضعیت تولید سلول‌های بهینه در زمان جاری لزوماً در دوره بعد بهینه نمی‌باشند؛ بدین مفهوم که احتمال تغییر گروه‌های ماشین از دورهای به دوره دیگر وجود خواهد داشت. این موضوع محتمل است منجر به جابه‌جایی تعدادی دستگاه‌ها از سلولی به یاخته دیگر در میان‌دوره‌ها گردد[۲۸]. ازاین‌رو، مدل پیشنهادی انتقالات بین سلولی ماشین‌ها را نیز بایستی مدنظر قرار دهد. درنهایت با فرض وجود توالی عملیات فراوانی ماشین، انعطاف‌پذیری جریان، انعطاف‌پذیری ماشین و قابلیت انتقال بین سلولی ماشین، لازم است مدل ارائه شده دستیابی به هدف‌های زیر را امکان‌پذیر نماید:

a. تشکیل هم‌زمان خانواده قطعات و گروه‌های ماشین.
b. انتخاب یک برنامه پردازشی برای هر قطعه به‌گونه‌ای که کمترین هزینه انتقالات بین سلولی را داشته باشد
c. برآورد تقاضای بهینه قطعات.
d. کاهش هزینه استهلاک ماشین‌ها و یا جابه‌جایی بین سلولی آن‌ها از دوره‌ای به دوره دیگر در صورت نیازها.

۳-۲- فرض‌های مدل

۱. زمان عملیات برای همه قطعات روی هر نوع ماشین معلوم هست و هر قطعه می‌تواند چند برنامه پردازشی مختلف داشته باشد که تنها از یکی از آن‌ها استفاده می‌کند (انعطاف‌پذیری جریان)؛
۲. نوع قطعات و تابع توزیع احتمالی هر قطعه در هر دوره معلوم است؛
۳. قابلیت و گنجایش هر نوع ماشین معین و ثابت است؛
۴. هزینه استهلاک هر نوع ماشین در ابتدای دوره اول معلوم است؛
۵. هزینه عملیاتی هر نوع ماشین در هر ساعت مشخص است؛
۶. قطعات به‌صورت دسته‌ای بین سلول‌ها حرکت می‌کنند و هزینه حرکت بین سلولی دسته‌ها معلوم و ثابت است؛
۷. تعداد سلول‌ها در خلال تمام دوره‌ها معین و ثابت است؛

۸. بیشینه و کمینه تعداد ماشین‌های موجود در سلول‌ها در دوره برنامه‌ریزی معین و ثابت است (حد بالا و پایین ظرفیت سلول)؛
۹. تغییر مکان ماشین‌ها از یک سلول به سلول دیگر بین دوره‌ها انجام می‌شود و زمان آن صفر است؛
۱۰. هزینه جابجایی هر نوع ماشین مستقل از مکان اولیه موجود آن بوده و مقدار آن معین است؛
۱۱. هر نوع ماشین یک یا چند عملیات را می‌تواند انجام دهد و هر عملیات می‌تواند با زمان‌های متفاوت روی ماشین‌های مختلف انجام گیرد (انعطاف‌پذیری ماشین)؛
۱۲. هزینه انتقال بین سلولی مواد ثابت و مستقل از فاصله هست؛
۱۳. موجودی اضافه بین دوره‌ها صفر است و سفارش به تأخیر افتاده مجاز نبوده و تقاضای هر دوره بایستی در همان دوره تأمین گردد؛
۱۴. زمان شکست برای ماشین‌ها در نظر گرفته نمی‌شود؛
۱۵. راندمان ماشین‌ها و تولید۱۰۰ ٪ هست؛
۱۶. اندازه دسته‌ها برای همه محصولات و در همه دوره‌ها ثابت است؛
۱۷. ماشین‌ها در شروع هر دوره زمانی برای استفاده در دسترس می‌باشند.

۳-۳- هدف مدل

همچنان که در بخش قبل شرح داده شد، در یک نگاه فراگیر، ضروری خواهد بود در هدف طراحی سیستم چندین هزینه مدنظر قرار گیرد. ولی به خاطر ابهام و مشکلات محاسباتی تمام هدف‌ها را نمی‌توان در هدف مدل اعمال کرد [۲۹].

در این مقاله، مقصود مطرح در طراحی CMS پویای معین و احتمالی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری شیوه‌هایی در تابع هدف وارد می‌شوند و این هدف‌ها عبارت‌اند از مجموع هزینه‌های زیر هزینه سرمایه‌گذاری ماشین بیانگر هزینه استهلاک ماشین‌ها در هر دوره مورد بررسی هست.

هزینه عملیاتی: هزینه عملیات برای ساخت قطعات است که بسته به نوع ماشین و زمان موردنیاز برای هر عملیات هست.

هزینه انتقال بین سلولی مواد: این هزینه هنگامی ایجاد می‌شود که همه عملیات یک قطعه در یک سلول به اتمام کامل نرسد و قطعه به سلول غیر انتقال پاید

هزینه جابجایی ماشین: هزینه تغییر محل هر ماشین از یک سلول به سلول غیر، چراکه در بین دوره‌ها محتمل است با جابجایی ماشین‌ها روبه‌رو شویم. در یک مدل تولید پویا بهترین شیوه تولید سلولی ممکن

است نتواند بهینه‌ترین شیوه در همه دوره‌ها باشد بر این اساس با تغییرات تقاضا ناچار به تغییر آرایش و ماشین‌های موجود در سلول‌های مختلف خواهیم بود این جابجایی باعث توقف تولید و ایجاد هزینه خواهد شد [۱۲].

جریمه مجموع انحراف از میانگین تقاضای قطعات: این هزینه هنگامی ایجاد می‌شود که در شرایط پویای نامطمئن مقدار تقاضای برآورد زده شده توسط مدل با مقدار ارزش انتظاری که برای آن پیش‌بینی‌شده تفاضل داشته باشد. هرچقدر تقاضای برآورد زده شده باارزش انتظاری خود اختلاف داشته باشد، محتمل است سایر هزینه‌ها کاهش یابند اما این جزء از هدف افزایش خواهد یافت. در مدل ارائه‌شده به ازاء هر واحد اختلاف یک واحد جریمه مدنظر گرفته شده است [۲۲].

۳-۴- ساختار مدل ریاضی

در این بخش جهت ارائه ساختار کامل مدل ریاضی تک‌هدفه، ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی شده و سپس مدل ریاضی مذکور ارائه و تشریح گردیده است.

الف) اندیس‌ها:

C: تعداد و نماد سلول‌های تولید (c = ۱, ۲, …, C)

M: تعداد و نماد انواع ماشین (m = ۱, ۲, …, M)

P: تعداد و نماد انواع قطعات (p = ۱, ۲, …, P)

H: تعداد و نماد انواع دوره (h = ۱, ۲, …, H)

J: تعداد و نماد عملیاتی قطعه (j = ۱, ۲, …, Jp)

ب) پارامترها:

t_{jpm}: زمان موردنیاز برای انجام عملیات j ام از قطعه p روی ماشین m ام.

ED_{ph}: ارزش انتظاری تابع توزیع تقاضای قطعه P در دوره h ام

SD_{ph}: انحراف معیار تابع توزیع تقاضای قطعه P در دوره H ام.

در این مقاله، ورودی مدل برای محاسبه پارامترهای فوق برحسب سه نوع توزیع احتمالی صورت می‌پذیرد:

A. وقتی تقاضای قطعات به‌صورت پیوسته فرض شده و از طبیعت توزیع نرمال پیروی می‌کنند. در این حالت پارامترهای ورودی مدل همان میانگین و واریانس توزیع نرمال می‌باشند

B. وقتی تقاضاها پیوسته بوده و از توزیع دو جمله‌ای پیروی کند. در این حالت پارامترهای ورودی مدل، احتمال تقاضا برای هر قطعه (p) و تعداد تقاضای هر قطعه با توجه به دوره‌های

پیشین (n) می‌باشند؛ بنابراین میانگین و انحراف استاندارد توزیع تقاضا توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$ED_{ph} = nP \quad (۱)$$

$$SD_{ph} = \sqrt{nP(۱-P)} \quad (۲)$$

C. وقتی تقاضاها پیوسته باشند و از توزیع بتا پیروی کنند. در این حالت پارامترهای ورودی مدل عبارت‌اند از خوش‌بینانه‌ترین مقدار تقاضا (H)، بدبینانه‌ترین مقدار تقاضا (L) و محتمل‌ترین مقدار تقاضا (M) بنابراین میانگین و انحراف استاندارد توزیع تقاضا توسط روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$ED_{ph} = \frac{L + ٤M + H}{٦} \quad (۳)$$

$$SD_{ph} = \frac{H - L}{٦} \quad (۴)$$

B: اندازه دسته برای نقل و انتقالات بین سلولی مواد

α_m: هزینه استهلاک ماشین نوع m ام.

β_m: هزینه عملیاتی هر ساعت ماشین نوع m ام.

γ: هزینه جابجایی بین سلولی یک دسته

δ_m: هزینه جابجایی ماشین نوع m ام

T_m: ظرفیت ماشین m ام.

LB: کمینه ظرفیت هر سلول

UB: بیشینه ظرفیت هر سلول

a_{jpm}: برابر با ۱ است اگر عمل j ام قطعه p ام بتواند توسط ماشین نوع m ام انجام شود و در غیر این صورت برابر با ۰ است.

ج) متغیرهای تصمیم مدل

N_{mch}: تعداد ماشین نوع m مورد استفاده در سلول c در خلال دوره h ام.

K^{+}_{mch}: تعداد ماشین نوع m اضافه شده به سلول c و درخلال دوره h ام.

K^{-}_{mch}: تعداد ماشین نوع m کم شده از سلول c درخلال دوره h ام.

XD_{ph}: مقدار تولید قطعه P در دوره h ام.

برای برآورد بهینه تولید قطعات یک فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای XD_{ph} (مقدار تولید قطعات در هر دوره) به‌صورت رابطه زیر تعریف شده و سپس حد بالا و حد پایین آن به‌عنوان محدودیت به مدل اضافه شده است.

$$ED_{ph} - 1.96SD_{ph} \leq XD_{ph} \leq ED_{ph} + 1.96SD_{ph} \quad (5)$$

R_{mh}: تعداد جابجایی‌های ماشین نوع m در دوره h می‌باشد. در نتیجه مقدار R_{mh} را به‌صورت رابطه (٦) می‌توان محاسبه نمود:

$$R_{mh} = min\left\{\sum_{c=1}^{C} K^{+}_{mch}, \sum_{c=1}^{C} K^{-}_{mch}\right\} \quad (6)$$

Z_{jpch}: اگر عملیات j از قطعه p در سلول c در دوره h تکمیل شود، برابر با ۱ است و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

X_{jpmch}: اگر عملیات j از قطعه p در سلول c توسط ماشین m در دوره h تکمیل شود، برابر با ۱ است و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

با توجه به نمادها، پارامترها و متغیرها و همچنین توضیحات مربوط به مسئله، ساختار اصلی مدل ریاضی شامل تابع هدف و محدودیتها در ادامه ارائه گردیده است.

$$\begin{aligned} Min\ Z = & \sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} \alpha_m N_{mch} \sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{j=1}^{Jp} \beta_m t_{jpm} XD_{ph} X_{jpmch} \\ & + \frac{1}{2}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}(\left\lceil\frac{XD_{ph}}{B}\right\rceil \times \sum_{j=1}^{Jp-1}\sum_{c=1}^{C} \gamma|Z_{(j+1)pch} - Z_{jpch}|) \\ & + \sum_{h=1}^{H}\sum_{m=1}^{M} \delta_m R_{mh} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P} |XD_{ph} - ED_{ph}| \end{aligned} \quad (7)$$

به‌طوری‌که:

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} a_{jpm} \boldsymbol{X_{jpmch}} = \qquad \forall j, p, h \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{j=1}^{Jp} \boldsymbol{t_{jpm}} XD_{ph} \boldsymbol{X_{jpmch}} \leq T_m N_{mch} \qquad \forall m, c, h \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{M} N_{mch} + \sum_{m=1}^{M} K_{mch}^{+} - \sum_{m=1}^{M} K_{mch}^{-} \geq LB \quad \forall m,c,h \tag{10}$$

$$\sum_{m=1}^{M} N_{mch} + \sum_{m=1}^{M} K_{mch}^{+} - \sum_{m=1}^{M} K_{mch}^{-} \leq UB \quad \forall m,c,h \tag{11}$$

$$N_{mc(h-1)} + K_{mch}^{+} - K_{mch}^{-} = N_{mch} \qquad \forall m,c,h \tag{12}$$

$$Z_{jpch} = \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{X_{jpmch}} \quad \forall j,p,c,h \tag{13}$$

$$R_{mh} \leq \sum_{c=1}^{C} K_{mch}^{+} \ \forall m,h \tag{14}$$

$$R_{mh} \leq \sum_{c=1}^{C} K_{mch}^{-} \ \forall m,h \tag{15}$$

$$XD_{ph} \geq ED_{ph} - 1.96 SD_{ph} \qquad \forall p,h \tag{16}$$

$$XD_{ph} \leq ED_{ph} + 1.96 SD_{ph} \qquad \forall p,h \tag{17}$$

$$Z_{jpch}, X_{jpmch} = \{0,1\} \qquad \forall j,p,m,c,h \tag{18}$$

$$R_{mh}, N_{mch}, K_{mch}^{+}, K_{mch}^{-}, XD_{ph} \geq 0 \ and\ integer \quad \forall m,c,h,p \tag{19}$$

مدل ریاضی مدل‌سازی ریاضی برای طراحی CMS به قسمی انجام می‌گیرد که خانواده قطعات و سلول ماشین‌ها به‌طور هم‌زمان ایجاد شود. گروه‌بندی هم‌زمان ماشین - قطعه به نتایج بهتری نسبت به استراتژی تناوب انتخاب گروه‌ها و سپس تخصیص ماشین‌ها منجر می‌شود؛ اما این نتایج در مسائل بزرگ افزون بر پیچیدگی به زمانی طولانی برای حل نیازمند است. با استفاده از نمادهای مطرح‌شده در قسمت‌های قبل، مدل ریاضی برای طراحی CMS در شرایط پویای احتمالی به‌صورت مدل زیر به دست می‌آید.

در مدل ریاضی ارائه‌شده، رابطه (۷) تابع هدف مدل بوده و عبارت است از کمینه‌سازی هزینه‌های کل.
در عبارت (۷):

- جمله اول هزینه استهلاک ماشین موردنیاز دوره‌ها است.
- جمله دوم هزینه عملیاتی ماشین‌ها است. این هزینه از جمع تقاضای محصولات در زمان عملیات با احتساب هزینه عملیاتی هر نوع ماشین به دست می‌آید.

- جمله سوم هزینه جابجایی بین سلولی مواد است. این هزینه از مجموع حاصل‌ضرب تعداد دسته قطعات جابه‌جاشده بین سلول‌ها در هزینه انتقال یک دسته از هر نوع قطعه به دست می‌آید.
- جمله چهارم هزینه جابجایی ماشین است. این هزینه برای هر ماشین در هر دوره به‌صورت حاصل‌ضرب هزینه جابه‌جایی آن ماشین در تعداد جابجایی‌های بین سلولی آن محاسبه می‌شود،
- جمله آخر هزینه اختلاف تقاضای برآورد زده شده توسط مدل از ارزش انتظاری آن هست به‌طوری‌که هر واحد اختلاف بین مقدار بهینه تقاضای هر محصول و ارزش انتظاری آن یک واحد هزینه را افزایش می‌دهد.

رابطه (۸) تضمین می‌کند که هر عملیات در یک سلول و به یک ماشین اختصاص یابد. رابطه (۹) رعایت ظرفیت ماشین موردنیاز برای انجام تقاضای موجود در هر دوره را تضمین می‌کند. رابطه (۱۰) و (۱۱) برای عدم تجاوز تعداد ماشین‌های مورد استفاده از بیشینه و کمینه گنجایش سلول‌ها هست. رابطه (۱۲) توازن ماشین‌های موجود در هر سلول با ماشین‌های اضافه‌شده و کم شده را برقرار می‌کند. رابطه (۱۳) تعیین می‌کند که آیا یک عملیات خاص در یک سلول خاص پردازش می‌شود یا خیر. این دسته محدودیت‌ها برای محاسبه هزینه انتقالات بین سلولی مواد در جزء سوم تابع هدف بکار می‌روند. رابطه (١٤) و (١٥) هزینه جابجایی بین سلولی ماشین‌ها را از دوره‌ای به دوره دیگر نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که رابطه محاسبه R_{mh} برقرار باشد. رابطه (١٦) و (١٧) نشان می‌دهند که تقاضای بهینه پیش‌بینی‌شده توسط مدل نباید از حدود بالا و پایین فاصله اطمینان ۹۵ درصدی که با توجه به تابع توزیع مربوطه تشکیل‌شده، تجاوز نماید. در نهایت روابط (۱۸) و (۱۹) مقادیر مجاز متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

۴- الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که مشاهده شد، در این تحقیق یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل برای مسئله زمان‌بندی سلولی ارائه شد. ازآنجایی‌که مسئله زمان‌بندی سلولی یک مسئله Np-Hard است [۲۰]، نمی-توان جهت حل مدل از روش‌های دقیق استفاده کرد. لذا در این مقاله از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک جهت حل مدل استفاده شده است. دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت حل مدل، شناخته شده بودن این الگوریتم و کارایی بالای آن جهت حل مسئله زمان‌بندی سلولی نسبت به سایر الگوریتم‌هاست [۲۰ و ۲۵]. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم محاسباتیِ بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. در

الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی را توسط رشته‌هایی با طول ثابت[10] یا متغیر[11] کدگذاری می‌کنند که در سیستم‌های بیولوژیکی آن‌ها را کروموزوم یا فرد[12] می‌نامند. هر رشته یا کروموزوم یک نقطهٔ پاسخ در فضای جستجو را نشان می‌دهد. به ساختمان رشته‌ها یعنی مجموعه‌ای از پارامترها که توسط یک کروموزوم خاص نمایش داده می‌شود ژنوتیپ[13] و به مقدار رمزگشایی آن فنوتیپ[14] می‌گویند. الگوریتم‌های وراثتی فرآیندهای تکراری هستند، که هر مرحلهٔ تکراری را نسل و مجموعه‌هایی از پاسخ‌ها در هر نسل را جمعیت نامیده‌اند.

شبه کد الگوریتم ژنتیک در تحقیق حاضر به‌صورت زیر است:

گام ۰: N جواب شدنی به‌عنوان جمعیت اولیه الگوریتم تولید شود.

گام ۱: پارامترهای الگوریتم مقداردهی اولیه گردد.

گام ۲: برقراری شرط توقف الگوریتم بررسی شود؛ اگر این شرط برقرار نیست به گام ۳ برو و در غیر این صورت به گام ۷ برو

گام ۳: عملگر جهش با توجه به نرخ جهش بر جواب‌های انتخاب‌شده اعمال شده و جواب‌های جدید تولید گردد.

گام ٤: با توجه به عملگر تقاطع، والدین انتخاب و این عملگر اعمال شده و فرزندان تولید شوند.

گام ٥: برازندگی جواب‌های فعلی و جواب‌های جدید تولیدشده محاسبه و از بین آن‌ها N جواب با بالاترین برازندگی به‌عنوان جمعیت جواب‌های تکرار بعد انتخاب شود.

گام ٦: به گام ۲ برو

گام ۷: جواب با بالاترین برازندگی یا بهترین مقدار تابع هدف، به‌عنوان جواب خروجی گزارش شود.

گام ۸: پایان

۵- نتایج محاسباتی

در این مرحله، الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و مدل با استفاده از آن حل گردیده است. جهت اجرای الگوریتم ژنتیک، مطابق تحقیق [۲۰]، اندازه جمعیت برابر با ۵۰، نرخ جهش برابر با ۰,۱۵، نرخ تقاطع برابر با ۰,۸۵ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شد.

همچنین جهت بررسی اعتبار مدل در تحقیق حاضر، مسائل نمونه طراحی و حل گردید. پس از حل مسائل، مقادیر متغیرهای مدل با توجه به محدودیت‌های مدل بررسی شد که نتیجه این بررسی حاکی از اعتبار مدل هست.

۵-۱- تنظیم پارامترهای مدل

شناسایی کردن هر یک از سیستم‌ها و مدل‌سازی‌های سیستم‌های غیرخطی با استفاده از الگوریتم ژنتیک اهمیت بسیار زیادی دارد و بازده خوبی از خود نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در حوزه‌های سیستم‌های خطی مهم است شناسایی سیستم هست. به‌طورکلی شما باید به‌خوبی بدانید که شناسایی سیستم‌های خطی بر اساس استانداردهای مشخص شده باید انجام شود. شناخت هر یک از سیستم‌ها مختص به رشته خاصی نیست؛ اما هر یک از کارشناسان می‌توانند با توسعه دادن الگوریتم‌ها شناسایی مشخص شده و همچنین دقیقی از آن به دست بیاورند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و تأیید مدل توسط خبرگان شرکت، مسئله اصلی با داده‌های واقعی و مدنظر در این مسئله بایستی اجرا شود. بر اساس آنچه گفته شد از خبرگان مسئله خواسته شد تا در این جمع‌آوری داده‌ها بیشینه همکاری را داشته باشند. بر همین اساس زمان‌بندی کار بر روی قطعات با کمک کارشناسان صورت گرفت و جداول مربوط به آن تکمیل گردید.

جدول ۲. داده‌های ورودی زمان‌سنجی شده مسئله اصلی

	گروه قطعات ١	گروه قطعات ٢	گروه قطعات ٣	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٦
ماشین ١	٠	١.٣	٠	٠	٠	٠
ماشین ٢	٤	٢.١	٠	٠	١	٠
ماشین ٣	٢.٤	٠	٠	٠	١.٥	٠
ماشین ٤	٠	٠	٠	٣.٥	٠	٤.٥
ماشین ٥	٠	٠	٢.٣	٠	٠	٥
ماشین ٦	٠	١.٩	٠	٠	٠	٠
ماشین ٧	٢.٣	٠	٠	٠	٢.٩	٠
ماشین ٨	١.٩	٠	٠	٠	٠	٠
ماشین ٩	٠	٠	١.٤	٠	٠	١
ماشین ١٠	٠	٠	٢.٥	٤	٢.٨	٠
ماشین ١١	٢.٥	٠	٠	٠	٠	٢.٣
ماشین ١٢	٠	٠	٠	١.٥	٠	٠
ماشین ١٣	٠	٣.١	٠	٠	٠	٠
ماشین ١٤	٢.١	٠	٠	٣	٠	٠
ماشین ١٥	٠	٠	٢	٠	٠	٠
ماشین ١٦	٠	٢	٠	٠	٢	٣

گروه قطعات ٦	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۱	
۲	۰	۰	۰	۰	۱.۵	ماشین ۱۷
۳	۰	۰	۳.۳	۲	۰	ماشین ۱۸
۰	۲	۲	۰	۰	۰	ماشین ۱۹
۲	۰	۳	۰	۰	۰	ماشین ۲۰
۳	۳	۰	۰	۲	۰	ماشین ۲۱
۰	۰	۰	۲.۳	۳.۲	۲.۵	ماشین ۲۲
۳	۰	۲	۰	۰	۳.۵	ماشین ۲۳
۱.۱	۳	۰	۰	۰	۰	ماشین ۲٤
۳.٦	۰	۰	۲	۰	٤	ماشین ۲٥

بر اساس مدل‌های تاریخی شرکت و بر اساس برازش توزیع نرمال داده‌های پیش‌بینی‌شده ارزش انتظاری به دست آمد و این مسئله دربردارنده شرایط عدم اطمینان و مبتنی بر تولید اعداد تصادفی است. همچنین انحراف معیار آن نیز مشخص شد.

جدول ۳. داده‌های تصادفی تولیدشده با استفاده از توزیع نرمال داده‌ها

گروه قطعات ٦	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۱	ارزش انتظاری
۰	۱۰۰۰	۷٥۰۰	٦۱۰۰	٤۳۰۰	۰	دوره ۱
۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	٥۰٤۳	٦٥۰۰	۲۲٤۰	دوره ۲
۱۱۲۰	۱٥۰۰	۰	٤۹۳۲	٥٦۰۰	٤۹۰۰	دوره ۳
۸۰٤۰	٤٥٦۰	٦٤۲۹	٥۱۲۳	٤۲۰۰	۲۷۹۰	دوره ٤
۸۰۱۰	۳٦٦٥	٤۸۳٤	٤۹۰۳	۲۳۳۰	۳۷۲۰	دوره ٥
۲۳٥۰	۲۲۳۰	۲۳۹۰	۲۹۰۰	۳۹۲۰	٤٦٥۰	دوره ٦

جدول ۴. انحراف معیار محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های تاریخی

گروه قطعات ٦	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۱	انحراف معیار
۰	۱۲٥	٥۹	۸۰	۷۳	۰	دوره ۱
۲۳۰	۱۱۰	۰	۷۲	٥۸	۹۱	دوره ۲
۱۹۰	۱۱۱	٤۹	٦٤	۱۲٥	۱۸۲	دوره ۳
۱۳٥	۲۱۰	۹۰	٥٦	۳۱۰	۱۲۰	دوره ٤

دوره ٥	٢٣٢	٢٣٠	٤٨	٨٤	١٢٠	١٨٠
دوره ٦	١٢٠	١٠٠	٤٠	٣٠	١٤٠	١٩٠

داده‌های مستقل از ابعاد مسئله نیز بدون تغییر در مسئله اصلی لحاظ شد. مسئله موردنظر دیگر برآورد میانگین گرفته شده از اندازه‌گیری‌های مختلف کارشناسان بود که در جداول ادامه مشخص شده و مطابق با مثال اولیه تست، میانگین بین ٤ جدول گرفته شده است.

جدول ٥. پارامترهای مستقل از زمان، سلول، ماشین و دوره

بیشینه گنجایش هر سلول	کمینه گنجایش هر سلول	هزینه جابجایی بین سلولی	اندازه دسته
٦٠	١٥	٣٤	٢٥

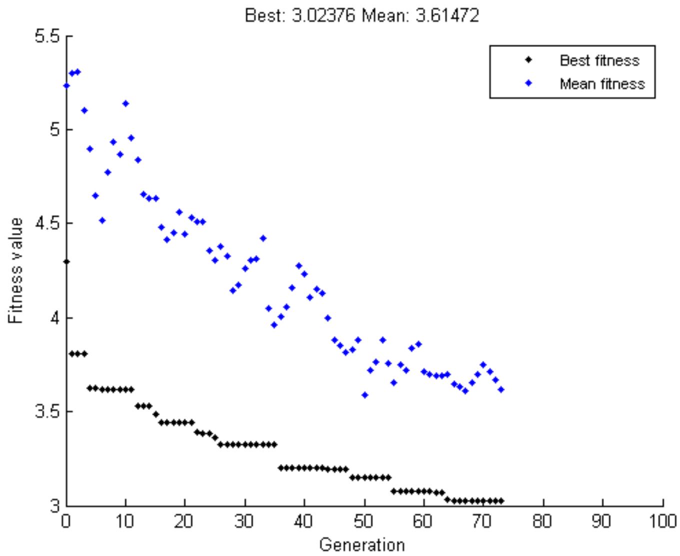
جدول ٦. پارامترهای برآورد شده به‌صورت میانگین ٤ کارشناس در مسئله اصلی

Tm	هزینه جابجایی	هزینه عملیات ماشین	هزینه استهلاک	میانگین
١٠٠٠	٨٢٠	٤٢.٢٥	١٤٤٢.٥	ماشین ١
١٠٠٠	٨١٠.٥	٤٤	١٧٦٧.٥	ماشین ٢
١٠٠٠	٨١٧.٥	٤٤.٢٥	١٩٤٢.٥	ماشین ٣
١٠٠٠	٥٦٤	٤٦.٢٥	١٧٦٢.٥	ماشین ٤
١٠٠٠	٨٢٧.٥	٥٣.٥	١٥٩٠	ماشین ٥
١٠٠٠	٣٦٢.٥	٦٧.٢٥	٢٩٤٠	ماشین ٦
١٠٠٠	١٨٥	٤٦	٣٣٥٢.٥	ماشین ٧
١٠٠٠	٨٧٢.٥	٣٥.٥	٢٢٣٥	ماشین ٨
١٠٠٠	٨٥٢.٥	٣٢.٢٥	٢٩٧٥	ماشین ٩
١٠٠٠	٢٦٥	٤٩.٥	١٦٠٥	ماشین ١٠
١٠٠٠	٥٠٠	٥١.٢٥	١٦٠٧.٥	ماشین ١١
١٠٠٠	٥٥٧.٥	١٩.٧٥	٢١٢٢.٥	ماشین ١٢
١٠٠٠	٢٨٥	٢٠.٥	١٨٧٧.٥	ماشین ١٣
١٠٠٠	٤٨٥	٤٨.٧٥	٢٢٦٢.٥	ماشین ١٤
١٠٠٠	٥٤٧.٥	٤٣.٥	٢٢٤٢.٥	ماشین ١٥
١٠٠٠	٢٤٢.٥	٢٩	١٦٧٧.٥	ماشین ١٦
١٠٠٠	٥٢٥	٣١.٢٥	١٩٩٠	ماشین ١٧
١٠٠٠	٢٧٠	٥١.٧٥	٢٦٥٧.٥	ماشین ١٨
١٠٠٠	٢١٥	٥٤	٢٩٩٧.٥	ماشین ١٩

Tm	هزینه جابجایی	هزینه عملیات ماشین	هزینه استهلاک	میانگین
۱۰۰۰	۵۸۰	٤۲	۱۵۵۲.۵	ماشین ۲۰
۱۰۰۰	٤۹۲.۵	٤۵	۱۳۰۵	ماشین ۲۱
۱۰۰۰	٤۰۲.۵	۵۳	۲٦٤۷.۵	ماشین ۲۲
۱۰۰۰	۸٦۰	۲۹	۲۹٤۷.۵	ماشین ۲۳
۱۰۰۰	۷۰۵	۲۹.۵	۱۸۹۲.۵	ماشین ۲٤
۱۰۰۰	۲٦۵	٤۹	۲۷۲۰	ماشین ۲۵

۵-۲- نتایج و یافته‌ها

جهت ارزیابی اعتبار الگوریتم، تغییرات مقدار تابع هدف و همگرایی الگوریتم در طی تکرارهای الگوریتم بررسی گردید. نتایج این بخش نیز حاکی از اعتبار و درستی عملکرد الگوریتم ژنتیک هست (نمودار ۲). در این مرحله نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و پلات‌های رسم شده توسط آن تشریح می‌گردد. اولین پلاتی که مربوط به برازش تابع هدف هست نشان می‌دهد که در ۷۰ مرحله تولید نسل جواب بهینه حاصل گشته است. البته تعداد زیادی اجرای الگوریتم اتفاق افتاد که هر یک نمودار متفاوتی داشتند ولی نتایج منتخب و منطقی‌تر با مقدار متغیرهای بهینه‌تر برای جمع‌بندی انتخاب گردید.



نمودار ۱. نکویی برازش و کاهش مقدار تابع هدف در طول ایجاد نسل‌های متوالی

نتایج تحلیل‌ها در حالت ٤ خوشه‌ای نشان می‌دهد که میزان تغییرات کم‌وزیاد شدن ماشین‌آلات در برخی از سلول‌ها حتی به ٤ می‌رسد که رقم بالایی هست.

جدول ۷. تعداد ماشین‌آلات و چیدمان در حالت ٤ سلولی در مسئله اصلی

سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	تعداد اولیه
۱۰	۷	۵	۳	دوره ۱
۱۰	۷	۵	۳	دوره ۲
۱۰	۷	۵	۳	دوره ۳
۱۰	۷	۵	۳	دوره ٤
۱۰	۷	۵	۳	دوره ٥
۱۰	۷	۵	۳	دوره ٦

جدول ۸. ماشین‌آلات اضافه‌شده در دوره‌ها به سلول‌ها در حالت ٤ سلولی مسئله اصلی

سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	اضافه‌شده
۲	۱	۲	۳	دوره ۱
۱	۳	۲	۳	دوره ۲
۳	۲	۰	۲	دوره ۳
۲	۲	۲	٤	دوره ٤
۱	۲	٤	۳	دوره ٥
۰	۲	۲	۳	دوره ٦

جدول ۹. ماشین‌آلات کم شده از سلول‌ها در دوره‌ها در حالت ٤ سلولی مسئله اصلی

سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	کم شده
۲	۲	۳	۱	دوره ۱
۲	۳	۲	۲	دوره ۲
۱	۰	۳	۲	دوره ۳
۲	۳	۲	۳	دوره ٤
۳	۳	۲	۲	دوره ٥
۱	۳	۱	۲	دوره ٦

جدول ۱۰. شاخص کمترین جابجایی ماشین‌آلات در حالت ٤ سلولی مسئله اصلی

Rmh	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳	سلول ٤
دوره ۱	۱	۲	۱	۲
دوره ۲	۲	۲	۳	۱
دوره ۳	۲	۰	۰	۱
دوره ٤	۳	۲	۲	۲
دوره ٥	۲	۲	۲	۱
دوره ٦	۲	۱	۲	۰

نتایج تحلیل‌ها در حالت ٦ خوشه‌ای نشان می‌دهد که میزان تغییرات کم‌وزیاد شدن ماشین‌آلات در برخی از سلول‌ها صفر و در برخی دیگر به ۲ می‌رسد که رقم متناسبی هست.

جدول ۱۱. تعداد ماشین‌آلات و چیدمان در حالت ٦ سلولی در مسئله اصلی

تعداد اولیه	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳	سلول ٤	سلول ٥	سلول ٦
دوره ۱	۳	۱	٥	٤	۸	٤
دوره ۲	۳	۱	٥	٤	۸	٤
دوره ۳	۳	۱	٥	٤	۸	٤
دوره ٤	۳	۱	٥	٤	۸	٤
دوره ٥	۳	۱	٥	٤	۸	٤
دوره ٦	۳	۱	٥	٤	۸	٤

جدول ۱۲. ماشین‌آلات اضافه‌شده در دوره‌ها به سلول‌ها در حالت ٦ سلولی مسئله اصلی

اضافه‌شده	سلول ۱	سلول ۲	سلول ۳	سلول ٤	سلول ٥	سلول ٦
دوره ۱	۱	۰	۱	۲	۱	۲
دوره ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲
دوره ۳	۰	۲	۱	۱	۲	۱
دوره ٤	۱	۱	۲	۱	۱	۱
دوره ٥	۱	۰	۲	۱	۲	۰
دوره ٦	۱	۱	۱	۲	۱	۱

جدول ۱۳. ماشین‌آلات کم شده از سلول‌ها در دوره‌ها در حالت ٦ سلولی مسئله اصلی

سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ٣	سلول ٢	سلول ١	کم شده
١	٢	٠	٢	١	١	دوره ١
١	١	١	١	١	٢	دوره ٢
٢	٠	١	٢	٠	٢	دوره ٣
١	٢	١	١	١	١	دوره ٤
١	٢	١	١	٠	١	دوره ٥
١	١	٠	٢	١	٢	دوره ٦

جدول ۱۴. شاخص کمترین جابجایی ماشین‌آلات در حالت ٦ سلولی مسئله اصلی

سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ٣	سلول ٢	سلول ١	Rmh
١	١	٠	١	٠	١	دوره ١
١	١	١	١	١	١	دوره ٢
١	٠	١	١	٠	٠	دوره ٣
١	١	١	١	١	١	دوره ٤
٠	٢	١	١	٠	١	دوره ٥
١	١	٠	١	١	١	دوره ٦

نتایج تحلیل‌ها در حالت ۹ خوشه‌ای نشان می‌دهد که میزان تغییرات کم‌وزیاد شدن ماشین‌آلات در کمترین حالت خود قرار دارد که این مسئله هرچند بسیار متناسب‌تر با شرایط شرکت است منتهی وجود ۹ سلول امر برنامه‌ریزی را سخت‌تر می‌کند.

جدول ۱۵. تعداد ماشین‌آلات و چیدمان در حالت ۹ سلولی در مسئله اصلی

سلول ٩	سلول ٨	سلول ٧	سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ٣	سلول ٢	سلول ١	تعداد اولیه
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ١
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ٢
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ٣
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ٤
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ٥
١	٢	٢	٣	٢	١	٨	٤	٢	دوره ٦

جدول ۱۶. ماشین‌آلات اضافه‌شده در دوره‌ها به سلول‌ها در حالت ۹ سلولی مسئله اصلی

سلول ۹	سلول ۸	سلول ۷	سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	اضافه‌شده
۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	دوره ۱
۱	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۲	۰	دوره ۲
۰	۰	۱	۰	۰	۲	۱	۱	۱	دوره ۳
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	دوره ٤
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	دوره ٥
۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	دوره ٦

جدول ۱۷. ماشین‌آلات کم شده از سلول‌ها در دوره‌ها در حالت ۹ سلولی مسئله اصلی

سلول ۹	سلول ۸	سلول ۷	سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	کم شده
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	دوره ۱
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۰	دوره ۲
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	دوره ۳
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	دوره ٤
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	دوره ٥
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	دوره ٦

جدول ۱۸. شاخص کمترین جابجایی ماشین‌آلات در حالت ۹ سلولی مسئله اصلی

سلول ۹	سلول ۸	سلول ۷	سلول ٦	سلول ٥	سلول ٤	سلول ۳	سلول ۲	سلول ۱	Rmh
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	دوره ۱
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	دوره ۲
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	دوره ۳
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	دوره ٤
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	دوره ٥
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	دوره ٦

جدول تعداد تولید قطعه نشان می‌دهد که در برخی مواردی که نرخ تقاضا حتی ۰ بوده است، مقادیری تولید اتفاق افتاده است. این مسئله به دلیل وجود برخی محدودیت‌ها در مسئله است که باعث می‌شود با تولید در دوره‌هایی که تقاضای مستقیم ندارد، هزینه‌ها در سایر بخش‌ها کاهش یابد.

جدول ۱۹. نتایج تعداد قطعات محاسبه‌شده در مدل ریاضی در مسئله اصلی

تولید قطعه	گروه قطعات ۱	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٦
دوره ۱	۱۲۹	٤١٦٥	٦۰۰۹	۷٥۱٥	۱۱٤۱	۱٥
دوره ۲	۲۳٤۰	٦۳۸۷	٤۸۹٥	۱٥٥	۱۲٦٥	۱۳۰۷
دوره ۳	٤۷۷۳	٥٥۰۳	٤۹٦٦	۹۸	۱٤۲۲	۱۰۳۳
دوره ٤	۲۸۰٤	٤۰۸٤	٥۲٥۸	٦۳٥۷	٤٤۱۹	۸۰۹۸
دوره ٥	۳٥۸۲	۲٤۳۰	٤۹۲۰	٤۸۷٤	۳۷٤۱	۷۸۷۲
دوره ٦	٤۷۰۹	٤۰۲۰	۳۰۱۸	۲٤۹۳	۲۲٥۱	۲٤۷٥

میزان قطعات پیش‌بینی‌شده در جدول زیر نشان‌دهنده اختلافات در برخی از موارد است. همچنین جدول اختلافات بین این دو حالت نشان می‌دهد که در برخی موارد بیش از نیاز و در برخی موارد کمتر از نیاز تولید برنامه‌ریزی صورت گرفته است.

جدول ۲۰. داده‌های ورودی ارزش انتظاری تولید قطعات

پیش‌بینی‌شده	گروه قطعات ۱	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٦
دوره ۱	۰	٤۳۰۰	٦۱۰۰	۷٥۰۰	۱۰۰۰	۰
دوره ۲	۲۲٤۰	٦٥۰۰	٥۰٤۳	۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
دوره ۳	٤۹۰۰	٥٦۰۰	٤۹۳۲	۰	۱٥۰۰	۱۱۲۰
دوره ٤	۲۷۹۰	٤۲۰۰	٥۱۲۳	٦٤۲۹	٤٥٦۰	۸۰٤۰
دوره ٥	۳۷۲۰	۲۳۳۰	٤۹۰۳	٤۸۳٤	۳٦٦٥	۸۰۱۰
دوره ٦	٤٦٥۰	۳۹۲۰	۲۹۰۰	۲۳۹۰	۲۲۳۰	۲۳٥۰

در راستای اختلاف مشخص‌شده این نکته حائز اهمیت است که در برخی مواقع الگوریتم ژنتیک با تولید عدد تصادفی از مقادیر پیش‌بینی‌شده تا حد کمی عبور می‌کند و اندکی با حالت بهینگی کامل مسئله فاصله دارد لکن این مسئله بسیار قابل‌چشم‌پوشی است چراکه سرعت عمل این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بسیار بالا و مطلوب مدل‌سازان است.

جدول ۲۱. اختلاف تعداد قطعات محاسبه‌شده تولید قطعات و ارزش انتظاری

اختلاف	گروه قطعات ۱	گروه قطعات ۲	گروه قطعات ۳	گروه قطعات ٤	گروه قطعات ٥	گروه قطعات ٦
دوره ۱	۱۲۹	-۱۳۵	-۹۱	۱٥	۱٤۱	۱٥
دوره ۲	۱۰۰	-۱۱۳	-۱٤۸	۱٥٥	٦٥	۱۰۷
دوره ۳	-۱۲۷	-۹۷	۳٤	۹۸	-۷۸	-۸۷
دوره ٤	۱٤	-۱۱٦	۱۳٥	-۷۲	-۱٤۱	٥۸
دوره ٥	-۱۳۸	۱۰۰	۱۷	٤۰	۷٦	-۱۳۸
دوره ٦	٥۹	۱۰۰	۱۱۸	۱۰۳	۲۱	۱۲٥

۵-۳- تحلیل سناریو

بر اساس آنچه تاکنون گفته‌شده است، همه مراحل کار صورت گرفته و فقط جمع‌بندی نهایی می‌بایست صورت پذیرد. در این راستا ابتدا جدول کلی متشکل از تمامی پارامترهای مهم آورده شده است که نشان‌دهنده هزینه‌ها و ویژگی‌های مهم الگوریتم در هر اجرا است. نهایتاً تیم خبرگان شرکت بر اساس هر سناریو و ماشین‌های مشخص‌شده هزینه اپراتورها را محاسبه و لحاظ کرد. شایان ذکر است که با توجه به اینکه نوع ماشین‌آلات استفاده‌شده به نحوی بود که ترکیب آن با یکدیگر در یک سلول منجر به تغییر محاسبات در تخصیص منابع انسانی به ماشین می‌شد، امکان طرح آن در مدل وجود نداشت. لذا در هر سناریو بر اساس چینش پیشنهادشده، نوع ماشین‌آلات قرار گرفته در سلول، تغییر در تخصص و نوع آموزش و تعداد آن‌ها، این هزینه محاسبه و در جدول لحاظ گردید.

جدول ۲۲. جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده از اجرای نرم‌افزار متلب بر اساس مدل اصلی و سناریوهای مختلف

	سناریوی ٤ سلولی		سناریوی ٦ سلولی		سناریوی ۹ سلولی	
تنظیمات عملگر تقاطع	Two-Point	Uniform	Two-Point	Uniform	Two-Point	Uniform
تنظیمات عملگر جهش	Ad-Fea	Gaussian	Ad-Fea	Gaussian	Ad-Fea	Gaussian
مقدار هزینه تابع هدف	٥۹۱۲٥	٥۸۹۲۳	٤۸٤۳۲	٤۸٤۹۰	٤۱۳۹۰	٤۱۸۳۰
تعداد اپراتور مورد نیاز	۱۱	۱۱	۱٤	۱٤	۱۹	۱۹
هزینه تخصیص اپراتور	۱۸۳۹۰	۱۸۳۹۰	۲۳٤۰٥	۲۳٤۰٥	۳۱۷٦۳	۳۱۷٦۳
جمع نتایج	**۷۷۵۱۵**	**۷۷۳۱۳**	**۷۱۸۳۷***	**۷۱۸۹۵**	**۷۳۱۵۳**	**۷۳۵۹۳**

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول نتیجه‌گیری مشخص می‌گردد که بهترین طرح از سناریوی ٦ به‌دست‌آمده است و کمترین هزینه و بیشترین مطلوبیت را ایجاد می‌کند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که کمترین مقدار در این تابع بهترین مقدار است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی مدل ریاضی غیرخطی تولید سلولی با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور در سناریوهای مختلف چیدمان پرداخته شد. در این راستا، یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها ارائه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. برای حل مدل توسط الگوریتم ژنتیک، در هر بار انجام الگوریتم در حالات مختلف (٤،٦ و ۹ سلولی) این نکته که الگوریتم با استفاده از عملگرهای مختلف تست و بررسی شود، مورد توجه قرار گرفت. پس از خروجی نتایج، مشخص گردید که حالت ۹ سلولی بهترین نتیجه هزینه‌ای در تابع هدف را دارا هست اما پس از تجمیع و تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص اپراتور و محاسبه هزینه نیروی کار و جمع‌بندی آن با هزینه‌های جابجایی ماشین‌آلات و قطعات، مشخص گردید که حالت ٦ سلولی دارای بهترین ویژگی‌ها برای انتخاب نهایی توسط شرکت است.

نتایج اولیه پژوهش نشان می‌دهد که تخصیص نیروی عملیاتی و اپراتور به دستگاه‌ها در صنایع تولیدی امری می‌تواند با تغییر چینش در ماشین‌آلات و ایجاد برنامه‌ریزی جابجایی ماشین‌آلات و دسته‌های قطعات بهینه شود. توصیه می‌شود تا حد امکان از جابجایی‌های زیاد و ایجاد شرایطی که تعداد سلول‌ها را بالا ببرد پرهیز شود چراکه این امر موجب پیچیدگی محاسبات و پیچیدگی‌های پویا در برنامه‌ریزی قطعات می‌گردد. توصیه می‌گردد در صورت انتخاب حالت ٦ سلولی و ۹ سلولی، سلول‌های بسیار نزدیک و در مجاورت، در صورت نزدیکی میانگین خوشه‌های (رنگ روشن بین خوشه‌ها در تحلیل) با یکدیگر تلفیق شده و برنامه‌ریزی بر اساس آن صورت گیرد. همچنین به دلیل فاصله زیادی که برخی خوشه‌ها با یکدیگر دارند، بهتر است از تلفیق این خوشه‌ها جلوگیری شود چراکه ممکن است در تحلیل‌ها موجب بالا رفتن هزینه‌های عملیاتی و جابجایی گردد. بهترین یافته‌ها در الگوریتم ژنتیک بعد از تست‌های متعدد در این مدل عملگرهای یکنواخت و دونقطه‌ای در عملگر تقاطع و همچنین عملگر گوسی و اداپتیو-فیزیبل در عملگرهای جهش بودند. این نوع از تنظیمات در رسیدن به جواب بهینه در زمان پایین‌تر، همچنین عدم عدول از محدودیت‌ها و نزدیکی پاسخ‌ها به نقاط بهینه عملکرد بهتری از خود نشان دادند. همچنین چنانچه تخصیص اپراتورها از طریق مدل ریاضی قابل حصول باشد، بهتر است در درون مدل لحاظ شود و در غیر این صورت با استفاده از محاسبات پس از برنامه‌ریزی چینش، تخصیص و جابجایی صورت گیرد.

۷- پیشنهادها

پژوهشگران آتی مبانی مربوط به ریسک را در این پژوهش مورد بررسی قرار دهند چراکه ابتدا بایستی شناسایی شود چه ریسک‌هایی در انجام این نوع برنامه‌ریزی وجود دارد، به‌عنوان‌مثال ریسک‌های مربوط به جابجایی در مدل می‌تواند لحاظ شود و آسیب‌هایی که در اثر جابجایی ماشین‌آلات می‌تواند وارد شود قابل لحاظ است. در این پژوهش شرایط عدم قطعیت را احتمالی در نظر گرفته‌ایم محققین آتی می‌توانند همین شرایط را با روش فازی پیش ببرند. توزیع احتمالی استفاده شده در این پژوهش می‌تواند نمونه‌های دیگری باشد. توصیه می‌گردد پژوهشگران آتی از مدل‌های مختلف توزیع آماری در تولید داده‌های تصادفی برای مدل استفاده نمایند و نتایج آن را بررسی نمایند. درزمینهٔ مدل‌سازی توصیه می‌گردد برنامه‌ریزی‌های چندهدفه و با توابع هدف پیچیده‌تری مورد استفاده قرار گیرد که این مسئله نیازمند لحاظ کردن مورادی غیرهزینه ای و مرتبط با معیارهای از جنس متفاوت است.

۸. پی‌نوشت‌ها

۱. Cellular Manufacturing System
۲. Erenay et al
۳. Niakan et al
۴. Wang
۵. Kumar and Singh
۶. Soto, Ricardo
۷. Reis, Gilmara
۸. Zhang, Zhengmin
۹. Jaradat, Raed
۱۰. Fixed Length
۱۱. variable
۱۲. Individual
۱۳. Genotype
۱۴. Phenotype

۹- منابع

[۱]. Khorasani, N., & Esmaelian, M. (2018). Integrating process planning and scheduling taking into account multiple objective using constraint planning. Industrial management journal, 10(4), 677-698.

[۲]. Kumar, R., & Singh, S. P. (2019). Modified SA Algorithm for Bi-objective Robust Stochastic Cellular Facility Layout in Cellular Manufacturing Systems. In Advanced Computing and Communication Technologies (pp. 19-33). Springer.

[۳]. Raoofpanah, H., Ghezavati, V., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Solving a new robust green cellular manufacturing problem with environmental issues under uncertainty using Benders decomposition. Engineering Optimization, 51(7), 1229-1250.

[٤]. Laha, Dipak & Majumder, Arindam. (2021). An Improved Clustering Heuristic in Cellular Manufacturing Systems. International Journal of Operational Research. 1. 1. ۱۰.۱۵۰٤/□□□□.۲۰۲۱.۱۰۰٤٤۷٦۲.

[٥]. Nahas, N., Nourelfath, M. and Gendreau, M., (2014), Selecting machines and buffers in unreliable assembly/disassembly manufacturing networks, Int. J. of Production Economics, ١٥٤:□.١١٣□١٢٦.

[٦]. Jabal-Ameli, M. S., & Moshref-Javadi, M. (2014). Concurrent cell formation and layout design using scatter search. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(1), 1-22.

[٧]. Erenay, B., Suer, G. A., Huang, J., & Maddisetty, S. (2015). Comparison of layered cellular manufacturing system design approaches. Computers & Industrial Engineering, 85, 346-358.

[٨]. Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016). A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria. Applied Mathematical Modelling, 40(4), 2674-2691.

[٩]. Wang, Y. M., Voisin, T., McKeown, J. T., Ye, J., Calta, N. P., Li, Z., ... & Zhu, T. (2018). Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. Nature materials, 17(1), 63-71.

[١٠]. Farughi, Hiwa & Mostafayi Darmian, Sobhan & Afrasiabi, Ahmadreza. (2019). Bi-objective robust optimization model for configuring cellular manufacturing system with variable machine reliability and parts demand: A real case study. 10.22116/JIEMS.2019.93028.

[١١]. Soto, Ricardo & Crawford, Broderick & Toledo, Angelo & de la Fuente-Mella, Hanns & Castro, Carlos & Paredes, Fernando & Olivares, Rodrigo. (2019). Solving the Manufacturing Cell Design Problem through Binary Cat Swarm Optimization with Dynamic Mixture Ratios. Computational Intelligence and Neuroscience. 2019. 1-16. 10.1155/2019/4787856.

[١٢]. Zandieh, Mostafa. (2019). Scheduling of Virtual Cellular Manufacturing Systems: A Biogeography-Based Optimization Algorithm. Applied Artificial Intelligence. 33. 1-27. ١٠.١٠٨٠/٠٨٨٣٩٥١٤.٢٠١٩.١٥٧٧٠٢١.

[١٣]. Arul Kumar, & Muneeswaran, R & Vivek, J & Nagarajan, J & Raj, J. (2020). Metaheuristic Optimization Algorithms for Solving Fixed Area Cellular Layout Problems. 45. 136-149.

[١٤]. Akbari, Mohammad. (2016). Mathematical modeling of human factors in the double-constrained system. New researches in decision making. 2(2), 23-49.

[١٥]. Mourtzis, Dimitris & Siatras, Vasilis & Synodinos, G. & Angelopoulos, John & Panopoulos, Nikos. (2020). A Framework for Adaptive Scheduling in Cellular Manufacturing Systems. Procedia CIRP. 93. 10.1016/j.procir.2020.04.040.

[١٦]. Rostami, Ahmadreza & Paydar, Mohammad Mahdi & Asadi-Gangraj, Ebrahim. (2020). A Hybrid Genetic Algorithm for Integrating Virtual Cellular Manufacturing with Supply Chain Management Considering New Product Development. Computers & Industrial Engineering. ١٤٥. ١٠٦٥٦٥. ١٠.١٠١٦/□.□□□.٢٠٢٠.١٠٦٥٦٥.

[١٧]. ayough, ashkan.(2017). scheduling job turnover in and out of lean cells with the approach of optimization algorithm based on training and learning. New Researches in Decision Making, ٣(٤), ١٥٣–١٧٥.

[١٨]. Hayati, Jamileh & Abdollahzadeh, Sohrab. (2021). An Integrated Simulation and Virtual Cellular Manufacturing System Concept Approach for Maintenance Policy Selection. Mathematical Problems in Engineering. 2021. 1-10. 10.1155/2021/1306742.

[۱۹]. Reis, Gilmara & Cunha, Edinaldo. (2021). Optimization Of the Manufacturing Process for School Portfolios Through the Implementation of The Cellular Layout. International Journal for Innovation Education and Research. 9. 515-527. 10.31686/ijier.vol9.iss11.3544.

[۲۰]. Rezaeipanah, Amin & Mojarad, Musa. (2021). Modeling the Scheduling Problem in Cellular Manufacturing Systems Using Genetic Algorithm as an Efficient Meta-Heuristic Approach. Journal of Artificial Intelligence and Technology. 10.37965/jait.2021.0018.

[۲۱]. Mohtashmi, Ali, Najafi, Ali, Amiri, Maqsood, Irajpour, Alireza. (2018). Scheduling of truck transports in multiple cross-docking systems with soft time window considering uncertainty in timing parameters. New Researches in Decision Making 4(4), 81-125.

[۲۲]. Wu, L., Li, L, Tan, L., Niu, B., Wang, R., & Feng, Y. (2020). Improved similarity coefficient and clustering algorithm for cell formation in cellular manufacturing systems. Engineering Optimization, 52(11), 1923-1939.

[۲۳]. Zhang, Zhengmin & Guan, Zailin & Fang, Weikang & Yue, Lei. (2022). Dynamic virtual cellular reconfiguration for capacity planning of market-oriented production systems. Journal of Industrial & Management Optimization. 10.3934/jimo.2022009.

[۲٤]. Jafar Nejad, Ahmad, Ismailian, Majid, Rizvani, Mehran. (2022). Locating distribution centers using integer nonlinear programming model. Management Research in Iran, 12(1), 105-125.

[۲٥]. Jaradat, Raed & Paydar, Mohammad Mahdi & Zeidi, Javad & Mahdavi, Iraj & Sharifi, Hamed & Nagahi, Morteza & Nagahisarchoghaei, Mohammad. (2022). A Genetic Algorithm for Designing an Integrated Cellular Manufacturing System Considering a Linear Double-Row Layout. International Journal of Manufacturing Research. 17. 1. ۱۰.۱٥۰٤/□□□□.۲۰۲۲.۱۰۰۳۷۰۰۳.

[۲٦]. Rafiei, Hamed and Aida Nazari Goran. (2022). A book about mathematical modeling and how to code problems in GAMS software. Publisher: Cuff.

[۲۷]. Techamaitrechit, V & Prichanont, S. (2018). Operator Allocation in Procurement Process Using Computer Simulation and Data Envelopment Analysis. Thai Industrial Engineering Network Journal, 4(2), 35-42.

[۲۸]. Bortolini, M, Galizia, F. G. Mora, C. & Pilati, F. (2019). Reconfigurability in cellular manufacturing systems: a design model and multi-scenario analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(9), 4387-4397.

[۲۹]. Sharma, V. Gidwani, B. D. Sharma, V. & Meena, M. L. (2019). Implementation model for cellular manufacturing system using AHP and ANP approach. Benchmarking: An International Journal.