

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شماره ۲۱ - بهار ۱۳۹۵

صص ۹۷ - ۱۲۷

ارائه مدل یکپارچه برای تحلیل و بهبود مسائل زمانبندی و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار در سیستم تولید انعطاف‌پذیر

سیده مهرخ سجادی*، اشکان عیوق**، میرمهدی سیداصفهانى***

چکیده

زمانبندی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مباحث در حوزه‌ی مسائل زمانبندی سیستم‌های تولیدی است که ویژگی‌ها و زیرمسائل زیادی در آن تأثیرگذار هستند. در نظر گرفتن این زیرمسائل به‌طور هم‌زمان و یکپارچه در مدل زمانبندی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر به یک برنامه زمانبندی موجه منجر خواهد شد، مدل به شرایط واقعی موجود در محیط سیستم تولید انعطاف‌پذیر نزدیک‌تر می‌شود و در نتیجه قابلیت استفاده از آن در محیط‌های تولیدی افزایش خواهد یافت. در این مقاله به‌طور هم‌زمان به مسائل زمانبندی وظایف تولید و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار پرداخته شده‌است که دو زیرمسئله: بارگیری ماشین و مسیریابی قطعات در سیستم تولید انعطاف‌پذیر را نیز به‌طور ضمنی در برمی‌گیرد. برای این مسئله یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح ارائه شده‌است. الگوریتم ژنتیک برای حل مدل به‌کار رفت که به جواب‌های نزدیک به بهینه منجر شد. با حل چند مثال عددی و تعریف حدود بالا و پایین و مقایسه آن‌ها، کیفیت راه‌حل‌های به‌دست آمده از الگوریتم نشان داده شده‌است.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر؛ وسایل نقلیه هدایت خودکار؛ زمانبندی؛
مدل ریاضی؛ الگوریتم ژنتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱۸.

* کارشناس ارشد، مؤسسه آموزش عالی کار قزوین.

** استادیار، مرکز مطالعات مدیریت ایران (نویسنده مسئول).

E-mail: ayough@ICMS.ac.ir

*** استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۱ مقدمه

زمانبندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر در طول سه ده گذشته به صورت گسترده‌ای مورد پژوهش قرار گرفته و ادامه یافته است و علاقه هر دو بخش دانشگاهی و صنعتی را به خود جذب کرده است [۲۱]؛ از سوی دیگر حمل‌ونقل مواد فعالیتی ضروری در هر فرآیند تولیدی است و کارایی آن اثرات زیادی بر هزینه‌های تولید دارد. سیستم حمل‌ونقل مواد از آغاز تولید انبوه و با استفاده از راه‌های به‌طور عمده دستی (برای بارهای سبک‌تر) یا مکانیکی (جرثقیل چنگک‌دار، نوار نقاله و غیره) به کار برده می‌شود؛ با این حال، در سال‌های اخیر و به دلیل نیاز به افزایش انعطاف‌پذیری در سیستم‌های تولید (مجموعه‌های کوچک تولید و سفارشی)، سیستم‌های کاملاً خودکار (سیستم‌های وسیله نقلیه هدایت خودکار - AGVS^۱ یا سیستم‌های ذخیره/بازیابی خودکار - AS/RS) به عنوان بهترین جایگزین در نظر گرفته شده است [۱۲].

وسایل نقلیه هدایت خودکار به دلیل انعطاف‌پذیری و سازگاری بالای آن‌ها به طور گسترده‌ای در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر استفاده می‌شوند و به جزء جدایی‌ناپذیر این سیستم‌ها تبدیل شده‌اند. وسیله نقلیه هدایت خودکار یک سیستم حمل‌ونقل بدون راننده است که برای جابه‌جایی مواد به صورت افقی استفاده می‌شود. وسایل نقلیه هدایت خودکار در سال ۱۹۵۵ معرفی شدند [۱۶]. از زمان معرفی AGVها استفاده از آن‌ها به شدت افزایش یافته است. AGVها می‌توانند داخل و خارج از محیط‌هایی مانند تولید، توزیع، انتقال به سایر وسایل نقلیه و مناطق حمل‌ونقل خارجی به کار گرفته شوند. در محیط‌های تولیدی AGVها برای حمل انواع مواد مرتبط با فرآیند تولید به کار می‌روند [۲۳]. زمانبندی سیستم حمل‌ونقل مواد در سیستم تولید انعطاف‌پذیر اهمیتی برابر با زمانبندی عملیات ماشین‌ها دارد و برای ارزیابی واقعی مدت زمان باید با یکدیگر در نظر گرفته شوند [۲۱].

طبق نظر نواس و هنینگ (۲۰۱۴)، سیستم تولید انعطاف‌پذیر چندین خصوصیت ویژه دارد. این خصوصیات به ۶ مسئله عمده منجر می‌شوند که این مسائل زمانبندی در سیستم تولید انعطاف‌پذیر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این ۶ مسئله عبارت از: ۱. بارگیری ماشین؛ ۲. مسیریابی قطعه؛ ۳. زمانبندی وظایف تولید؛ ۴. برنامه‌ریزی و تخصیص ابزار؛ ۵. ایجاد دستور استفاده از بافر؛ ۶. زمانبندی وسایل نقلیه هدایت خودکار هستند. مسئله بارگیری در FMS با تخصیص عملیات تولید به ماشین‌ها، در نظر گرفتن محدودیت‌های فن‌آورانه و منابع روبه‌رو است. مسیریابی قطعات، مسیره‌های تولید برای قطعات را با تعیین توالی ماشین‌هایی تعیین می‌کند که هر قطعه برای پردازش در سیستم باید از آن عبور کند. زمانبندی وظایف تولید، لحظه شروع، مدت زمان و لحظه پایان هر فعالیت ماشین‌کاری را تعریف می‌کند. برنامه‌ریزی ابزار، تعداد نمونه ابزار از هر

1. Automated Guided Vehicle Systems

نوع موجود که برای دستیابی به الزامات تولید مورد نیاز است را مشخص می‌کند و مسئله تخصیص ابزار با تخصیص ابزار به مخازن ماشین‌های مختلف روبه‌رو است؛ در نهایت بافرها و زمانبندی AGVها به ترتیب دستورالعمل بافرها و جابه‌جایی دستگاه‌ها را مشخص می‌کند [۱۷]. با نادیده گرفتن این مسائل و یا بدون در نظر گرفتن آنها به‌طور همزمان و یکپارچه در زمانبندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر، در پایان، برنامه زمانبندی حاصل خواهد شد که نه تنها ممکن است موجه نباشد؛ بلکه با فاصله گرفتن از شرایط واقعی موجود در محیط سیستم تولید انعطاف‌پذیر این روش قابلیت استفاده در محیط‌های صنعتی را ندارد؛ از این رو پژوهش حاضر در تلاش است که به‌طور همزمان به چهار مسئله: بارگیری ماشین، مسیریابی قطعه، زمانبندی وظایف تولید و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار در سیستم تولید انعطاف‌پذیر بپردازد. در ادامه، ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲، مبانی نظری زمانبندی در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر مرور می‌شود. در بخش ۳ به روش‌شناسی تحقیق و توصیف مدل پرداخته شده سپس اعتبار مدل و راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به‌صورت عددی در قالب چند مثال، تعیین می‌شود. به دنبال آن روش حل مدل و الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته، بیان شده و سپس به تنظیم پارامترها پرداخته شده‌است. در بخش ۴ داده‌ها و یافته‌های پژوهش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است. در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش ۶ ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر (FMSs)^۱، سیستم‌های تولید با سطوح اتوماسیون بالا هستند که از یک کنترل رایانه‌ای یکپارچه در پیکره ایستگاه‌های کاری چندهدفه، بافرهای ذخیره‌سازی و یک یا چند وسیله نقلیه هدایت خودکار تشکیل شده‌اند. این محیط‌های تولیدی ویژگی‌هایی که برای رقابتی باقی ماندن در بازارهای جدید مورد نیاز هستند. از جمله میزان قابل توجه بهره‌وری را با سطوح بالای انعطاف‌پذیری و استفاده مؤثر از منابع محدود ترکیب می‌کنند. برای افزایش کارایی در کل سیستم تولید انعطاف‌پذیر باید فعالیت‌های تولیدی، وظایف حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی به‌خوبی زمانبندی شوند [۱۷].

گرایکو و همکاران (۲۰۰۱) معتقدند که فعالیت زمانبندی FMS تحت تأثیر خصوصیات زیادی از جمله خصوصیات خاص FMS، کارخانه‌ای که در آن واقع شده‌است و سیاست‌های عملیاتی آن، سطح اتوماسیون و منابع متعلق به FMS قرار دارد. طبق گفته بلازویچ و همکاران (۱۹۹۱)، ایجاد زمانبندی‌ها و برنامه‌ریزی‌های با کیفیت خوب که تمام منابع محدود FMS مانند ماشین‌ها،

1. Flexible Manufacturing Systems

AGVها، ابزارها و بافرها را در نظر گرفته باشد، یکی از اصلی‌ترین مسائل عملیاتی در این نوع محیط‌ها است.

در دهه‌های گذشته مسائل زمانبندی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. به منظور کاهش پیچیدگی این مسائل، معمولاً پژوهشگران به روش‌های تجزیه متوسل شده‌اند و به طور هم‌زمان به تمامی منابع محدود نپرداخته‌اند و برخی از این محدودیت‌ها را نادیده گرفته‌اند. هدف این پژوهش، زمانبندی هم‌زمان وظایف تولید و وظایف حمل‌ونقل توسط AGVها در سیستم تولید انعطاف‌پذیر است. در مبانی نظری گسترده مرتبط با زمانبندی FMS مجموعه‌ای از مطالعات هستند که محدودیت‌های مربوط به ابزار را به عنوان مهم‌ترین منبع در نظر گرفته‌اند و وظایف حمل‌ونقل را کنار گذاشته‌اند. گروه دیگری از مطالعات، AGVها را اصلی‌ترین منابع محدود در نظر گرفته و جنبه‌های مرتبط با ابزار را نادیده گرفته‌اند. مبانی نظری ذکر شده در این پژوهش، مطالعات گذشته را در دو گروه اصلی قرار داده است: ۱. مواردی که مسائل زمانبندی کار و تخصیص ابزار را مورد توجه قرار داده‌اند؛ ۲. مواردی که به زمانبندی وسایل نقلیه و کارها در محیط FMS پرداخته‌اند [۴].

سارین و چن (۱۹۸۷) و اتان و پندیت (۱۹۹۶)، مدل‌های MILP را برای مسائل بارگیری ماشین و تخصیص ابزار در سیستم تولید انعطاف‌پذیر ارائه کرده‌اند. هدف از پژوهش اول، یافتن مسیریابی قطعات و تخصیص مناسب ابزارهای برش با حداقل هزینه ماشین‌کاری بوده است؛ با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش کنار گذاشته شدن مسائل توالی و زمانبندی است؛ بنابراین، فرض شده است که هر عمل می‌تواند تنها روی یک ماشین انجام شود. از آنجاکه مدل به دست آمده ابعاد بزرگی دارد، پژوهشگران یک فرآیند حل مبتنی بر روش آزادسازی لاگرانژی و ساب‌گرایان (۱۹۸۷) ارائه کرده‌اند. همانند سارین و چن (۱۹۸۷)، اتان و پندیت (۱۹۹۶) نیز مسائل توالی و زمانبندی را محاسبه نکرده‌اند. هدف فرمول‌بندی آن‌ها حداقل کردن تعداد کل ابزارها بوده است. روح و کیم (۱۹۹۷) بر مسائل بارگیری ماشین، تخصیص ابزار و توالی قطعات در یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر خاص متمرکز شده‌اند که هر قطعه برای تمامی عملیات پردازش خود تنها در یک ماشین باقی می‌ماند. پژوهش آن‌ها سه روش ابتکاری را شامل می‌شود که به دنبال حداقل کردن کل زمان دیرکرد است. اتمانی و لشکری (۱۹۹۸)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کردند که مسائل تخصیص ابزار و بارگیری در سیستم تولید انعطاف‌پذیر را مورد توجه قرار می‌دهد. این فرمول‌بندی به محدودیت‌های مخازن ابزار و طول عمر ابزار می‌پردازد؛ ولی تعداد نمونه ابزارهای موجود را در نظر نمی‌گیرد. جمیلا و متولی (۲۰۰۳)، رویکردی ارائه کردند که مسائل بارگیری ماشین در سیستم تولید انعطاف‌پذیر، تخصیص ابزار و زمانبندی قطعات را مورد توجه قرار می‌دهد که از دو مرحله تشکیل شده است. ابتدا، یک

فرمول MILP مسائل بارگیری ماشین و تخصیص ابزار را حل می‌کند؛ سپس یک روش ابتکاری ساده به جزئیات مسئله زمانبندی قطعه می‌پردازد. فرض شده‌است که فقط یکی از هر نوع ابزار موجود است؛ درحالی‌که در محیط‌های واقعی همیشه این‌طور نیست. چن و وارنکار (۲۰۰۶)، یک رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای حل مسائل بارگیری ماشین و تخصیص ابزار، به اضافه زمانبندی عملیات ارائه کردند که یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی کلنی مورچگان برای بهینه کردن مدل به کار گرفته شده‌است. این رویکرد فرض می‌کند که هر مخزن ابزار نمی‌تواند بیشتر از یک نسخه از هر نوع ابزار را در خود جا دهد که مانع استفاده از این رویکرد در محیط‌های واقعی می‌شود. زبالوس و همکاران (۲۰۱۰)، یک فرمول برنامه‌نویسی محدودیت ارائه دادند که به‌طور همزمان بارگیری ماشین، مسیریابی قطعه، تخصیص ابزار و زمانبندی عملیات در محیط‌های FMS را در نظر می‌گیرد. این پژوهش برای مدل کردن فعالیت‌های ماشین‌کاری دو متغیر متفاوت با دو شاخص را به جای چهار متغیر با یک شاخص به کار می‌گیرد. این خاصیت به میزان زیادی دامنه حل را کاهش می‌دهد و مدل‌سازی محدودیت‌های خاص ماشین و ابزار را آسان می‌کند. علی‌رغم این واقعیت که پژوهش زبالوس و همکاران (۲۰۱۰) با توجه به معلومات و داشته‌های موجود، یکی از کامل‌ترین مطالعات مرتبط با مسائل بارگیری و تخصیص ابزار است، این پژوهش چندین ضعف دارد: در این پژوهش فرض شده‌است که هر قطعه به تعداد یکسانی از عملیات نیاز دارد؛ همچنین تمام ذخیره‌سازی‌های میانی قطعات و خصوصیات حمل‌ونقل را نادیده گرفته است؛ همچنین زبالوس (۲۰۱۰) در پژوهشی دیگر به جنبه‌های دیگری از رویکردهای قبلی مبتنی بر برنامه‌نویسی محدودیت تأکید کرده است و استراتژی جست‌وجویی ارائه شده که برای کاهش زمان محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به گروه بعدی مطالعات این موضوع مهم است که هرچند مطالعات زیادی وجود دارد که روی مسائل زمانبندی AGV کار می‌کنند، تعداد کمی از پژوهش‌ها به زمانبندی همزمان AGVها و فعالیت‌های تولیدی پرداخته‌اند [۸، ۲۳]. یکی از اولین تلاش‌ها در این زمینه توسط بلازویچ و همکاران (۱۹۹۱) انجام شد که محیط واقعی FMS باعث ایجاد انگیزه در وی برای انجام این کار شده بود. در این پژوهش برای پرداختن به مسائل زمانبندی ماشین و مسیریابی وسایل نقلیه، دو حالت در نظر گرفته شده‌است. در حالت اول، فرض شده‌است که تخصیص کارها به ماشین‌ها مشخص است و هدف یافتن یک زمانبندی شدنی برای وسایل نقلیه است. هدف حالت دوم یافتن راه‌حلی است که به‌طور همزمان به مسئله تخصیص عملیات به ماشین‌ها و مسیریابی وسایل نقلیه بپردازد. ضعف اصلی آن در نظر گرفتن قطعات به صورت تک‌عملیاتی است که ماشین‌های موازی یکسان را شامل می‌شود. بیلگ و اولوسوی (۱۹۹۵) یک روش تکرارشونده برای رسیدگی به زمانبندی کارها و وسایل نقلیه ارائه داده‌اند. مسئله به دو زیرمسئله

تجزیه شده‌است که با استفاده از دو الگوریتم به صورت تکرارشونده حل می‌شوند. ابتدا، زمانبندی ماشین‌ها را با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین توزیع ایجاد می‌شود؛ سپس برای هر دستورالعمل ماشین، یک زمانبندی شدنی برای AGV با استفاده از روشی ابتکاری بر اساس پنجره زمانی پس و پیش شونده (کشویی) به دست می‌آید. در پژوهش بعدی، اولوسوی و همکاران (۱۹۹۷)، یک الگوریتم ژنتیک ارائه دادند که به طور همزمان به زمانبندی کارهای ماشین و وسایل نقلیه حمل خودکار می‌پردازد. لیو و مکاری (۱۹۹۷)، یک مدل مبتنی بر MILP با هدف در نظر گرفتن ذخیره‌سازی و جنبه‌های مرتبط با AGV ارائه داده‌اند. ضعف عمده مدل، اندازه و پیچیدگی آن، حتی برای مسائل کوچک است؛ با وجود این خصوصیات، تحلیل فرمول‌بندی آن پایه‌ای را برای ایجاد دو الگوریتم ابتکاری با نام‌های «بارگیری سپس توالی» و «روش ابتکاری سراسری» فراهم کرد که در مقاله ارائه شده‌است. در این پژوهش نشان داده شد که روش ابتکاری سراسری تکرارشونده مؤثرتر از روش «بارگیری سپس توالی» است. لو و وو (۲۰۰۱) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و یک برای زمانبندی عملیات با هدف حداقل کردن کل زمان دیرکرد در سیستم تولید انعطاف‌پذیر ارائه داده‌اند و با استفاده از دو فرآیند اصلاح توالی (SIP) و فرآیند تعویض مسیر (REP) که هر دو به وسیله‌ی روش ابتکاری شبیه‌سازی تبرید (SA) به دست آمده‌اند، به صورت بهینه حل شده‌است. جرال و همکاران (۲۰۰۶)، زمانبندی همزمان قطعات و AGV‌ها را با استفاده از یک روش انطباقی مبتنی بر GA ارائه کرده‌اند. در این پژوهش فرض شده‌است که ماشین‌ها در سلول‌هایی گروه‌بندی شده‌اند که با استفاده از دو وسیله نقلیه هدایت خودکار به یکدیگر مرتبط هستند. این روش، مسئله بارگیری ماشین را پاسخگو نیست؛ مگر اینکه مسیرهای قطعات ثابت باشند؛ بنابراین زمان‌های حمل و نقل نیز از پیش تعیین شده و به عنوان بخشی از زمان‌های پردازش در نظر گرفته شده‌اند. این مفروضات باعث شده‌اند که این پژوهش در عمل استفاده کمتری داشته باشد. کوموند و همکاران (۲۰۰۹)، یک فرمول MILP ارائه کرده‌اند که ضمن در نظر گرفتن یک وسیله نقلیه خودکار، یک قانون مدیریت بافر^۱ (FIFO) اتخاذ کرده‌است. این پژوهش بافرهای ورودی/خروجی ماشین را محدود در نظر گرفته است؛ اما از آنجاکه هر عمل تنها می‌تواند توسط یک ماشین که در حال حاضر تعریف شده‌است، انجام شود به مسئله مسیریابی قطعه نپرداخته است. رحیمی و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل ریاضی چندهدفه برای زمانبندی در سیستم تولید کارگاهی ارائه کرده‌اند، در این مقاله از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل استفاده شده است [۱۸]. زندیه و فتوت (۲۰۱۶)، به زمانبندی سیستم با جریان کارگاهی با محدودیت دسترسی ماشین و اثر یادگیری مبتنی بر یک مدل

1. First in First out

ترکیبی پرداخته‌اند، و برای حل آن از دو الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید و شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر نظریه ابر استفاده شده‌است [۲۵].

تلاش‌های بسیاری برای زمانبندی در سیستم تولید انعطاف‌پذیر صورت گرفته است و با توجه به اینکه مسائل زمانبندی در FMS تحت تأثیر ویژگی‌های خاص خود است، هر یک از این مطالعات با دیدی متفاوت به مدل‌سازی و حل مسائل در این حوزه پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها کاستی‌هایی دارند که در بخش اخیر مورد نقد و بررسی قرار گرفته شد. با مرور مبانی نظری با وجود اینکه مطالعات زیادی به منظور ارائه مدل و حل مسائل زمانبندی در FMS انجام شده‌است؛ اما بسیاری از آن‌ها به منظور کاهش پیچیدگی به روش‌های تجزیه متوسل شده‌اند و به‌طور هم‌زمان به منابع محدود نپرداخته‌اند. مجموعه‌ای از مطالعات محدودیت‌های مربوط به ابزار را مهم‌ترین عامل در نظر گرفته‌اند و وظایف حمل‌ونقل را کنار گذاشته‌اند؛ اما در این پژوهش، زمانبندی وظایف تولید و زمانبندی وسایل نقلیه هدایت خودکار به‌طور هم‌زمان انجام شده‌است؛ به‌طوری‌که ضمن مسیریابی قطعات و بارگیری ماشین به تعیین ماشین‌های تخصیص یافته به عملیات‌ها، AGV‌های تخصیص یافته به وظایف حمل‌ونقل، توالی انجام عملیات توسط ماشین‌ها و توالی انجام وظایف حمل‌ونقل توسط AGV‌ها می‌پردازد و از هر گونه فرض ساده‌سازی و روش‌های تجزیه اجتناب شده و به صورت یکپارچه به حل مدل پرداخته شده‌است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به منظور ارائه مدل از مدل‌سازی ریاضی قطعی با متغیرهای آمیخته از عدد صحیح و پیوسته استفاده می‌نماید و برای حل مدل با توجه به پیچیدگی الگوریتمی مساله به توسعه الگوریتم ژنتیک کارا می‌پردازد. از نظر نوع هدف توسعه‌ای بوده و از نظر روش تحقیقاتی، بدیهی‌گرایی تجویزی می‌باشد.

مدلسازی. یک مجموعه از ماشین‌ها $M^T = \{m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_m\}$ و یک مجموعه از کارها $J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ را در یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر وجود دارد که هر کار $J_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ متشکل از n_i عملیات متوالی است و هر کار زمان مقرر D_i مربوط به خود را دارد. هر عملیات O_{ij} که $i=1, 2, 3, \dots, n$ و $j=1, 2, 3, \dots, n_i$ می‌تواند روی یک ماشین دلخواه m_k از مجموعه ماشین‌های $M^S \subseteq M^T$ در سیستم و در زمان پردازش پیوسته‌ی P_{ijk} انجام شود. هر ماشین $m_k, k=1, 2, 3, \dots, m$ می‌تواند حداکثر یک عملیات را در هر زمان پردازش کند و در هر زمان حداکثر یک عملیات از هر کار J_i می‌تواند پردازش شود. C_i به‌عنوان زمان

تکمیل هر کار در نظر گرفته می‌شود. بازدارندگی مجاز نیست به این معنا که پردازش یک عملیات قبل از اتمام پردازش نمی‌تواند قطع و یا حذف شود [۱۵].

حال باید ماشین‌های هدایت خودکار برای حمل‌ونقل کارها از هر ماشین به ماشین بعدی برای انجام عملیات بعدی و از آخرین ماشین که آخرین عملیات هر کار را انجام می‌دهد به ایستگاه جمع‌آوری/تحويل (انبار) ارسال شوند. برای ارسال ماشین‌های هدایت خودکار، ماشین‌ها به وسیله‌ی ایستگاه جمع‌آوری/تحويل به شبکه مسیر راهنما متصل هستند که پالت‌ها از/به AGVها حمل‌ونقل می‌شوند. مسیر راهنما از راهروها تشکیل شده است و فرض بر این است که وسایل نقلیه با سرعت ثابت حرکت می‌کنند، تعداد این وسایل نقلیه هدایت خودکار برابر با n_{AGV} است و وسایل نقلیه هدایت خودکار یکسان هستند. در این سیستم وظیفه حمل‌ونقل برای عملیات O_{ij} با T_{ij} و مدت زمان این حمل‌ونقل از ماشین قبلی که عملیات $I-z$ را انجام داده است به ماشین بعدی که باید عملیات z از کار i را انجام دهد با t_{ij} نشان داده می‌شود [۹]. فرض‌های زیر برای ارائه مدل در نظر گرفته شده است:

- در هر زمان حداکثر یک عملیات از هر کار می‌تواند پردازش شود؛
- عملیات هر کار باید یکی پس از دیگری طبق ورودی مسئله پردازش شوند؛
- زمان راه‌اندازی برای عملیات مستقل از توالی است و در زمان پردازش به حساب آورده می‌شود؛
- توالی عملیات‌ها برای هر کار، زمان پردازش هر عملیات توسط هر ماشین و زمان جابه‌جایی بین ماشین‌ها از پیش تعیین شده است؛
- تمام کارها باید در زمان صفر در دسترس باشند و هیچ کار جدیدی پذیرفته نمی‌شود؛
- کارها پس از اتمام عملیات آن‌ها با وسیله نقلیه به ایستگاه نهایی (انبار) منتقل می‌شوند؛
- خرابی و ازکارافتادگی و مدت زمان لازم برای تعمیرات و نگهداری ماشین‌آلات و وسایل نقلیه هدایت خودکار در نظر گرفته نشده است؛
- هر ماشین در آن واحد می‌تواند تنها یک عمل را انجام دهد؛
- هر کار می‌تواند هر ماشین را حداکثر یک بار ملاقات کند؛
- هیچ اولویتی برای انجام دادن کارها وجود ندارد؛
- یک شبکه از مسیرهای راهنما از پیش تعریف شده است و مسیرهای راهنما باید از تمام نقاط جمع‌آوری/تحويل عبور کنند؛
- فرض بر این است که وسایل نقلیه با سرعت ثابت و فقط به سمت جلو حرکت می‌کنند و نه عقب؛

– پردازش عملیات می‌تواند هر زمان بعد از اینکه AGV کار را به ماشین تحویل داد شروع شود، همچنین AGV می‌تواند در هر زمان کار پردازش شده را از نقطه‌ی جمع‌آوری به نقطه‌ی تحویل بعدی حمل کند.

در ادامه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این مسئله ارائه شده است:

اندیس‌ها

i : شاخص کار است که n تعداد کارهای موجود در سیستم را نشان می‌دهد. $i=1,2,3,\dots,n$
 j : شاخص عملیات است که n_i تعداد عملیات کار i است. $j=1,2,3,\dots,n_i$
 k : شاخص ماشین است که m تعداد ماشین‌های موجود در سیستم را بیان می‌کند. $k=1,2,3,\dots,m$

پارامترها

n_{AGV} : تعداد AGV‌های موجود در سیستم را نشان می‌دهد.
 O_{ij} : این پارامتر عملیات j ام از کار i است.
 P_{ij} : مدت زمان پردازش عملیات O_{ij} است.
 P_{ijk} : این پارامتر مدت زمان پردازش عملیات O_{ij} توسط ماشین k را نشان می‌دهد.
 t_{ij} : مدت زمان حمل بعد از انجام عمل $j-1$ از ماشین k به ماشین بعدی برای انجام عمل j ام از کار i را نشان می‌دهد.
 t_i : مدت زمان آخرین جابه‌جایی (از محل جمع‌آوری ماشینی که آخرین عملیات کار i ام را انجام می‌دهد به انبار) را نشان می‌دهد.
 T_{ij} : این پارامتر وظیفه حمل و نقل کار i به منظور انجام عملیات O_{ij} را نشان می‌دهد.
 D_i : زمان مقرر شده برای تکمیل کار i است.
 E_k : نشان‌دهنده مجموعه عملیاتی که است که ممکن است توسط ماشین k انجام شوند.

متغیرهای تصمیم

C_{max} : ماکزیمم زمان اتمام کارها و رفتن تمام کارها به انبار (*Makespan*).
 F_i : مدت زمان جریان کار i (زمان اتمام کار i) است.
 Z_{ij} : شماره AGV تخصیص یافته برای انجام وظیفه حمل و نقل T_{ij} است.
 t_{ij}^s : زمان شروع وظیفه حمل و نقل برای انجام عملیات j از کار i را نشان می‌دهد.
 C_{ij}^s : زمان شروع پردازش عملیات j از کار i را نشان می‌دهد.

X_{ijk} : اگر عملیات O_{ij} روی ماشین k انجام شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است. $Y_{ijj'k}$: اگر O_{ij} قبل از $O_{ij'}$ روی ماشین k پردازش شود برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

$$d_i^+ = \max\{0, F_i - D_i\}$$

$d_i^- = \max\{D_i - F_i, 0\}$: میزان زودتر از موعد آماده شدن (زودکرد) کار i را نشان می‌دهد. در ادامه روابط مسئله یادشده ارائه می‌شود. رابطه ۱، تابع هدف را نشان می‌دهد که زمان تکمیل کل سیستم را کمینه می‌کند. رابطه ۲، زمان جریان هر کار را تعریف می‌کند که می‌تواند به‌عنوان زمان تکمیل آخرین عملیات هر کار تعریف شود. زمان جریان هر کار، زمان در دسترس برای شروع وظیفه‌ی پردازش به‌علاوه زمان پردازش روی هر یک از ماشین‌های جایگزین است که آخرین عملیات هر کار ممکن است توسط آن انجام شود. رابطه ۳، فاصله بین زمان جریان و زمان مقرر مربوط به هر کار را تعریف می‌کند که d_i^- برای نشان دادن زمان زودتر از موعد رسیدن و d_i^+ برای نشان دادن دیرکرد هر کار به‌کار گرفته می‌شود. رابطه ۴ که محدودیت سوم را نشان می‌دهد، نشان‌دهنده حمل‌ونقل هر کار برای انجام عملیات بعدی است؛ یعنی j تنها زمانی می‌تواند شروع شود که پردازش عملیات قبلی یعنی $j-1$ شروع شده و به اتمام رسیده باشد. رابطه ۵، رابطه بین وظیفه حمل‌ونقل و وظیفه پردازش را نشان می‌دهد؛ در واقع زمان شروع پردازش عملیاتی از کار j باید بزرگ‌تر یا مساوی شروع و اتمام وظیفه حمل‌ونقل آن کار بوده و آن کار در محل انجام عملیات واقع شده باشد. رابطه ۶، اگر دو عملیات O_{ij} و $O_{ij'}$ روی ماشین یکسان k پردازش شوند، جهت جفت عملیات (O_{ij} و $O_{ij'}$) را (به این معنا که کدام یک قبل از دیگری انجام می‌شود) نشان می‌دهد. این محدودیت نشان می‌دهد که اگر O_{ij} مقدم بر $O_{ij'}$ باشد شروع پردازش عملیات $O_{ij'}$ بعد از اتمام پردازش عملیات O_{ij} است. این محدودیت حالت عکس این وضعیت یعنی هنگامی که $O_{ij'}$ بر O_{ij} مقدم باشد را نیز شامل می‌شود؛ در غیر این صورت اگر توسط یک ماشین پردازش نشوند، این محدودیت اضافی خواهد بود؛ همچنین این محدودیت تضمین می‌کند که هر ماشین می‌تواند در آن واحد فقط یک کار را پردازش کند. رابطه ۷ نشان می‌دهد که اگر عملیات O_{ij} مقدم بر عملیات $O_{ij'}$ باشد و حمل‌ونقل هر دو توسط یک وسیله نقلیه هدایت خودکار یکسان انجام شود، حمل‌ونقل برای انجام عملیات $O_{ij'}$ زمانی می‌تواند شروع شود که حمل‌ونقل برای انجام عملیات O_{ij} شروع شده و به اتمام رسیده باشد. این محدودیت نشان می‌دهد که عکس این حالت نیز برقرار است (عملیات $O_{ij'}$ مقدم بر عملیات O_{ij} باشد)؛ درضمن اگر حمل‌ونقل این دو عملیات توسط دو وسیله نقلیه متفاوت انجام شود، این محدودیت اضافی خواهد بود. در رابطه ۸، اگر عملیات $O_{ij'}$ از کار i' بر آخرین عملیات کار i (O_{ini}) اولویت داشته باشد و حمل‌ونقل هر دو توسط یک AGV یکسان انجام شود، حمل‌ونقل

O_{ini} باید هنگامی شروع شود که حمل و نقل $O_{ij'}$ شروع شده و به اتمام رسیده باشد. در این محدودیت وضعیت عکس این حالت نیز بیان شده است (زمانی که حمل و نقل عملیات O_{ini} بر حمل و نقل برای انجام عملیات $O_{ij'}$ اولویت داشته باشد). حال اگر هر دو حمل و نقل توسط دو AGV متفاوت انجام شود این محدودیت یک محدودیت اضافی خواهد بود. رابطه ۹ مشخص می کند که اگر دو عملیات روی ماشین یکسان k پردازش شوند؛ بنابراین $X_{ijk} \cdot X_{i'j'k} = 1$ و یکی از دو متغیر صفر و یک $Y_{ij'j'k}$ و $Y_{i'j'ijk}$ باید برابر با یک باشد (باید یکی از دو عملیات O_{ij} و $O_{ij'}$ بر دیگری اولویت داشته باشد)؛ ولی اگر این دو عملیات توسط دو ماشین متفاوت انجام شوند و یا حداقل یکی از آنها توسط ماشین k انجام نشود؛ آنگاه $X_{ijk} \cdot X_{i'j'k} = 0$ خواهد شد؛ به این معنا که هیچ رابطه‌ای بین عملیات O_{ij} و $O_{ij'}$ وجود ندارد؛ بنابراین دو متغیر $Y_{ij'j'k}$ و $Y_{i'j'ijk}$ برابر صفر هستند. رابطه ۱۰، تضمین می کند که هر عملیات دلخواه فقط و فقط توسط یک ماشین انجام شود. رابطه ۱۱، نشان می دهد که زمان اتمام هر کار نباید از زمان اتمام کل سیستم یا C_{max} تجاوز کند. در نهایت روابط ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشان دهنده غیرمنفی بودن متغیرها هستند.

$$\text{Minimize } C_{max} \quad (1)$$

Subject to:

$$C_{in_i}^s + \sum_{k=1}^m [x_{in_i}(P_{in_k})] = F_i \quad , \forall i \quad (2)$$

$$F_i + d_i^- - d_i^+ = D_i \quad , \forall i \quad (3)$$

$$C_{i,j-1}^s + P_{i,j-1} \leq t_{ij}^s \quad , \forall i, j = 2, \dots, n_i \quad (4)$$

$$t_{ij}^s + t_{ij} \leq C_{ij}^s \quad , \forall i, j \quad (5)$$

$$C_{ij}^s + P_{ij} - H |X_{ijk} - X_{i'j'k}| \leq C_{i'j'}^s \quad \cup \quad (6)$$

$$C_{i'j'}^s + P_{i'j'} - H |X_{ijk} - X_{i'j'k}| \leq C_{ij}^s \quad , \forall (i, j), (i', j')$$

$$t_{ij}^s + t_{ij} - H |Z_{ij} - Z_{i'j'}| \leq t_{i'j'}^s \quad \cup \quad (7)$$

$$t_{i'j'}^s + t_{i'j'} - H |Z_{ij} - Z_{i'j'}| \leq t_{ij}^s \quad , \forall i, j$$

$$t_{i'j'}^S + t_{i'j'} - H|Z_{ij} - Z_{i'j'}| \leq t_{in_i}^S \quad \cup \quad (8)$$

$$t_{in_i}^S + t_i - H|Z_{ij} - Z_{i'j'}| \leq t_{i'j'}^S, \quad \forall i, j$$

$$Y_{ijj'k} + Y_{i'j'ijk} = X_{ijk} \cdot X_{i'j'k}, \quad \forall O_{ij}, O_{i'j'} \in E_k, O_{ij} \neq O_{i'j'} \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1, \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$F_i \leq C_{max}, \quad \forall i \quad (11)$$

$$C_{max} \geq 0 \quad (12)$$

$$F_i \geq 0, \quad \forall i \quad (13)$$

$$d_i^+ \geq 0, \quad \forall i \quad (14)$$

$$d_i^- \geq 0, \quad \forall i \quad (15)$$

$$Z_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$C_{ij}^S \geq 0, \quad \forall i, j \quad (17)$$

$$t_{ij}^S \geq 0, \quad \forall i, j \quad (18)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, k \quad (19)$$

$$Y_{ijj'k} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, i', j', k \quad (20)$$

اعتبارسنجی. برای تعیین اعتبار، ابتدا یک مسئله معتبر حل شده در پژوهش‌های گذشته حل و تحلیل می‌شود. این مسئله، یک مسئله زمانبندی است که در پژوهشی توسط یانگ (۲۰۰۱) در محیط FMS استفاده شده‌است. در این مسئله فرض شده است کارها در هر لحظه در ایستگاه کاری بعدی حاضر می‌شوند و از وسایل نقلیه برای جابه‌جایی کارها استفاده نشده است. در این مسئله، ۳ کار وجود دارد و هر کار حداکثر ۴ عملیات دارد که با ۳ ماشین پردازش می‌شوند.

اطلاعات مربوط به زمان پردازش عملیات‌ها توسط ماشین‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲، عملیات موردنیاز برای هر کار و توالی آن‌ها، میانگین زمان پردازش و همچنین زمان مقرر برای هر یک نشان داده شده است. مدت زمان حمل‌ونقل بین ماشین‌ها و انبار به صورت تصادفی ایجاد می‌شود.

جدول ۱. زمان پردازش عملیات

زمان پردازش				
عملیات	۱	۲	۳	۴
ماشین ۱	۲۰	۲۰	-	۳۹
ماشین ۲	۲۶	-	۵۲	۴۱
ماشین ۳	-	۳۰	۳۸	-
میانگین	۲۳	۲۵	۴۵	۴۰

جدول ۲. اطلاعات هر کار

کار	عملیات موردنیاز هر کار	میانگین کل زمان پردازش	موعد مقرر	هزینه دیرکرد
۱	۱ و ۳	۶۸	۹۴	۱
۲	۲ و ۳	۷۰	۱۰۰	۱
۳	۳ و ۴	۸۵	۱۰۱	۱

راه حل موجه ارائه شده در پژوهش مذکور به این صورت است:

$$S < (J_1, J_2) / (WS_1: 0, 26), (J_1, O_3) / (WS_2: 26, 78),$$

$$(J_2, O_2) / (WS_3: 0, 30), (J_2, O_3) / (WS_3: 30, 68),$$

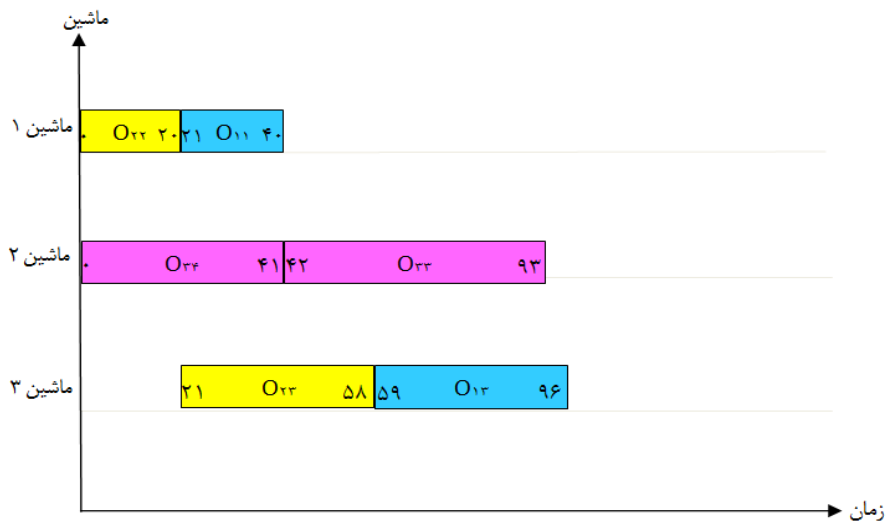
$$(J_3, O_4) / (WS_1: 0, 39), (J_3, O_3) / (WS_3: 68, 106) >$$

عبارت $(J_i, O_j) / (WS_k: t_l, t_h)$ نشان می‌دهد که عملیات j از کار i روی ایستگاه کاری k از لحظه t_l تا لحظه t_h زمانبندی می‌شود که در این حل:

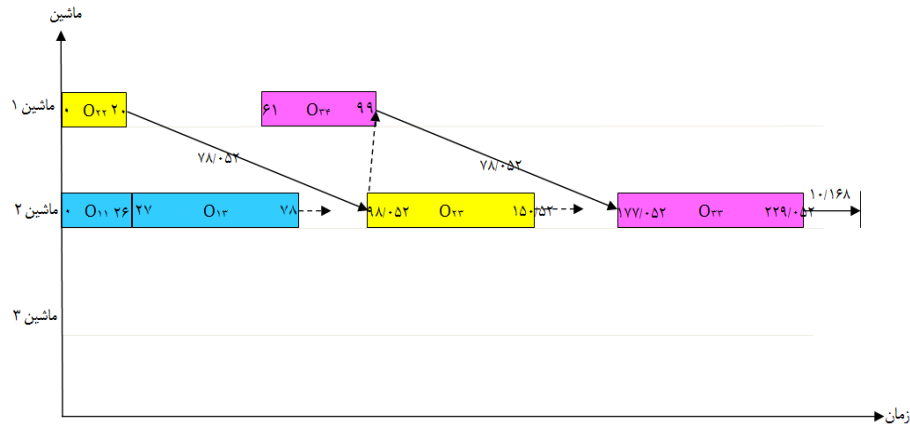
$$C_{max} = TMS = 106$$

TMS کل زمان تکمیل سیستم را نشان می‌دهد. حال به حل مسئله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن زمان حمل‌ونقل صفر پرداخته شده است. شکل ۱، نمودار گانت برنامه

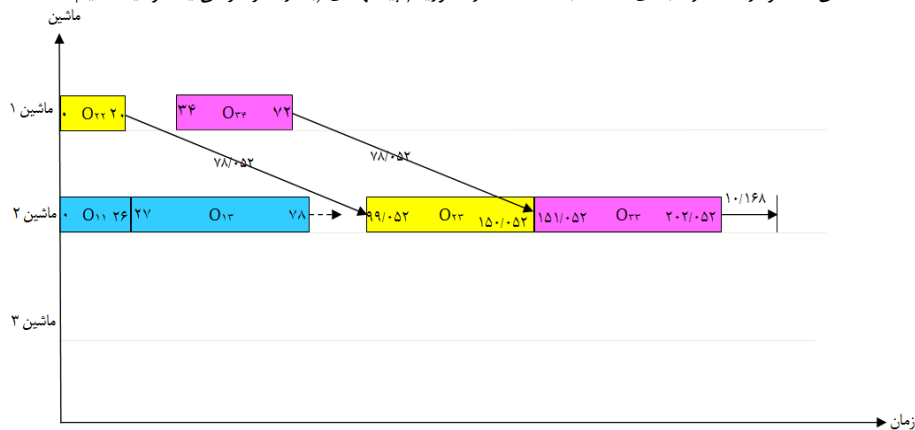
زمانبندی آن را نشان می‌دهد. در این راه حل ابتدا کار ۳ سپس کار ۲ و در انتها کار ۱ به اتمام می‌رسد و $C_{max} = 96$ است که این مقدار از مقدار قبلی کمتر و بهتر است؛ بنابراین الگوریتم نتیجه بهتری را ارائه داده است. مجدداً مسئله با در نظر گرفتن یک وسیله نقلیه و زمان‌های حمل و نقل بین ماشین‌ها و بین ماشین‌ها و انبار با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل می‌شود. شکل ۲، نمودار گانت برنامه زمانبندی مربوط به آن را نشان می‌دهد. با اضافه شدن زمان‌های جابه‌جایی به سیستم، زمان تکمیل کل سیستم افزایش خواهد یافت. زمان اتمام کل سیستم در صورت وجود یک وسیله نقلیه برابر با $239/212$ است. با فرض وجود ۲ وسیله نقلیه در سیستم نتیجه‌ای حاصل می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار گانت زمانبندی مسئله به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (زمان حمل و نقل صفر)



شکل ۲. نمودار گانت زمانبندی مسئله، به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی (با در نظر گرفتن یک وسیله نقلیه)



شکل ۳. نمودار گانت زمانبندی مسئله، به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (با در نظر گرفتن دو وسیله نقلیه)

انتظار می رود با استفاده از دو وسیله نقلیه، زمان تکمیل سیستم کاهش پیدا کند. با توجه به راه حل اخیر زمان اتمام کل سیستم در مقایسه با وجود ۱ وسیله نقلیه کاهش یافته است.

$$C_{\max} = 212/22$$

با تعریف حد بالا^۱ و حد پایین^۲ برای مسائل زمانبندی از این قبیل، حدود بالا و پایین در این مسئله محاسبه می شود. مقایسه پاسخ های به دست آمده با این حدود می تواند دید خوبی نسبت به اعتبار و کارایی پاسخ های مدل و الگوریتم پیشنهادی ارائه کند.

1. Upper Bound
2. Lower Bou

حد پایین: برای به‌دست‌آوردن حد پایین صرف‌نظر از موجه‌بودن آن، فرض می‌شود که تمام عملیات توسط واحدی که نیاز به زمان کمتری برای انجام عملیات دارد، پردازش می‌شوند؛ همچنین وظیفه حمل‌ونقل با فرض اینکه تمام عملیات‌های هر کار پشت سر هم و بدون معطلی انجام می‌شود، در کوتاه‌ترین زمان ممکن اتفاق می‌افتد به این صورت که کوتاه‌ترین زمان حمل‌ونقل که در سیستم امکان‌پذیر است در تعداد دفعات جابه‌جایی هر قطعه ضرب می‌شود؛ سپس بیش‌ترین زمان تکمیل آخرین عملیات هر کار به‌عنوان زمان اتمام کل سیستم در نظر گرفته می‌شود.

حد بالا: به‌منظور محاسبه حد بالا مجدداً با صرف‌نظر از موجه‌بودن آن فرض می‌شود هر عملیات توسط ماشینی انجام شود که در مدت زمان بیشتری عملیات را پردازش می‌کند و به این ترتیب حمل‌ونقل کارها در طولانی‌ترین زمان ممکن انجام شود. برای محاسبه بیش‌ترین زمان جابه‌جایی، بیشینه زمان جابه‌جایی موجود در سیستم، در تعداد دفعات حمل موردنیاز برای هر کار ضرب می‌شود و در نهایت زمان اتمام کل سیستم محاسبه می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده حد بالا خواهد بود. برای محاسبه حدود بالا و پایین زبان ریاضی نیاز است:

$$TP_i = \sum_{j=1}^{n_i} \min_{k=1, \dots, m} \{P_{ijk}\} \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$Tt_i = N * \min\{t_{ij}\} \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$C_i = TP_i + Tt_i \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$LB = C_{max} = \max\{C_i\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

$$TP_i = \sum_{j=1}^{n_i} \max_{k=1, \dots, m} \{P_{ijk}\} \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

$$Tt_i = N * \max\{t_{ij}\} \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$C_i = TP_i + Tt_i \quad , \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$UB = C_{max} = \max\{C_i\}, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

$TP_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$: نشان دهنده کل زمان پردازش هر کار است.

$Tt_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$: کل زمان جابه‌جایی هر کار را نشان می‌دهد.

$C_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$: زمان تکمیل هر کار را نشان می‌دهد.

N: تعداد حمل‌ونقل موردنیاز برای هر کار را نشان می‌دهد.

LB: حد پایین زمان اتمام کل سیستم را نشان می‌دهد.

UB: حد بالای زمان اتمام کل سیستم را نشان می‌دهد.

در این مسئله، اینکه هر کار کدام عملیات را شامل می‌شود در جدول ۳ و اینکه هر ماشین توانایی انجام کدام عملیات را دارد در جدول ۴ آورده شده است. جدول ۵ کل عملیات در سیستم و ترتیب انجام آن‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۶ زمان‌های پردازش عملیات توسط ماشین‌های مختلف و جدول ۷ زمان‌های حمل‌ونقل کارها بین ماشین‌ها و انبار را نشان می‌دهد که بر اساس این دو جدول مقادیر TP_i و $Tt_i, i=1,2,3$ به دست می‌آید

جدول ۳. عملیات-کار

عملیات	۱	۲	۳	۴
کار				
۱	✓	-	✓	-
۲	-	✓	✓	-
۳	-	-	✓	✓

جدول ۴. عملیات-ماشین

نوع عملیات	۱	۲	۳	۴
شماره ماشین				
۱	✓	✓	-	✓
۲	✓	-	✓	✓
۳	-	✓	✓	-

جدول ۵. تمامی عملیات ها در سیستم

عملیات	اندیس	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کار		۱	۱	۲	۲	۳	۳
نوع عملیات		۱	۳	۲	۳	۴	۳

جدول ۶. زمان های پردازش

زمان پردازش							
ماشین	عملیات	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱		۲۰	-	۲۰	-	۳۹	-
۲		۲۶	۵۲	-	۵۲	۴۱	۵۲
۳		-	۳۸	۳۰	۳۸	-	۳۸
مینیم		۲۰	۳۸	۲۰	۳۸	۳۹	۳۸

جدول ۷. زمان های حمل و نقل

زمان حمل و نقل				
ماشین	۱	۲	۳	انبار
۱	-	۷۸/۰۵۲۰	۱۷/۵۶۵	۵/۰۵۱۷
۲	۸۷/۰۵۲۰	-	۵۹/۴۸۰۱	۱۰/۱۶۸۰
۳	۳۷/۵۶۵	۵۹/۸۴۰۱	-	۶۲/۷۵۱۰
انبار	۵/۰۵۱۷	۱۰/۱۶۸۰	۶۲/۷۵۱۰	-
مینیم				۵/۰۵۱۷

$$\begin{aligned}
 TP_1 &= 20 + 38 = 58 & Tt_1 &= 2 * 5 / 0.517 = 10 / 1.034 \\
 TP_2 &= 20 + 38 = 58 & Tt_2 &= 2 * 5 / 0.517 = 10 / 1.034 \\
 TP_3 &= 39 + 38 = 77 & Tt_3 &= 2 * 5 / 0.517 = 10 / 1.034
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_1 &= TP_1 + Tt_1 = 58 + 10 / 1.034 = 68 / 1.034 \\
 C_2 &= TP_2 + Tt_2 = 58 + 10 / 1.034 = 68 / 1.034 \\
 C_3 &= TP_3 + Tt_3 = 77 + 10 / 1.034 = 87 / 1.034
 \end{aligned}$$

$C_{max} = \max\{C_1, C_2, C_3\} = 87 / 1.034$

برای محاسبه حد بالا نیز به همین ترتیب عمل می شود.

جدول ۸. زمان‌های پردازش

زمان پردازش						
عملیات	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ماشین ۱	۲۰	-	۲۰	-	۳۹	-
۲	۲۶	۵۲	-	۵۲	۴۱	۵۲
۳	-	۳۸	۳۰	۳۸	-	۳۸
ماکزیمم	۲۶	۵۲	۳۰	۵۲	۴۱	۵۲

جدول ۹. زمان‌های حمل و نقل

زمان حمل و نقل				
ماشین	۱	۲	۳	انبار
۱	-	۷۸/۰.۵۲۰	۳۷/۵۶۵	۵/۰.۵۱۷
۲	۷۸/۰.۵۲۰	-	۵۹/۸۴۰.۱	۱۰/۶۸۰
۳	۳۷/۵۶۵	۵۹/۸۴۰.۱	-	۶۲/۷۵۱.۰
انبار	۵/۰.۵۱۷	۱۰/۱۶۸۰	۶۲/۷۵۱.۰	-
ماکزیمم	۷۸/۰.۵۲۰			

$$TP_1 = 26 + 52 = 78$$

$$TP_2 = 30 + 52 = 82$$

$$TP_3 = 41 + 52 = 93$$

$$Tt_1 = 2 * 78 / 0.520 = 156 / 1.034$$

$$Tt_2 = 2 * 78 / 0.520 = 156 / 1.034$$

$$Tt_3 = 2 * 78 / 0.520 = 156 / 1.034$$

$$C_1 = TP_1 + Tt_1 = 78 + 156 / 1.034 = 234 / 1.034$$

$$C_2 = TP_2 + Tt_2 = 82 + 156 / 1.034 = 238 / 1.034$$

$$C_3 = TP_3 + Tt_3 = 93 + 156 / 1.034 = 249 / 1.034$$

$$\Rightarrow UB = C_{max} = \max\{C_1, C_2, C_3\} = 249 / 1.034$$

تمامی نتایج با در نظر گرفتن یک وسیله نقلیه، دو وسیله نقلیه و بدون در نظر گرفتن زمان حمل و نقل برای زمان اتمام در این مسئله بین حدود بالا و پایین قرار می‌گیرند و این امر نشان‌دهنده کارایی و عملکرد مناسب مدل زمانبندی و الگوریتم پیشنهادی برای حل آن است. برای اینکه از کیفیت رویکرد ارائه شده برای حل مدل اطمینان حاصل شود، ۸ مسئله در ابعاد مختلف به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. برای هر یک از این مسائل حدود بالا و پایین محاسبه شده است. با توجه به جدول ۱۰، حل به دست آمده از الگوریتم فرا ابتکاری برای هر مسئله فاصله

زیادی با حد بالای آن دارد و فاصله با حد بالا بسیار بیشتر از فاصله با حد پایین آن است. این موضوع نشان‌دهنده کیفیت راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی است.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج محاسبه حدود بالا و پایین و الگوریتم توسعه‌داده‌شده برای مسائل در ابعاد مختلف

مسئله	ابعاد مسئله				حد بالا	حد پایین	تعداد ماشین‌ها	تعداد ماشین‌ها	تعداد ماشین‌ها	تعداد ماشین‌ها	تعداد ماشین‌ها
	j^a	O^b	M^c	AGV^d							
۱	۳	۴	۵	۳	۱۰	۱	۲۵۲۷/۷۴۳	۳۱۴/۲۲۴۸	۳۷۱/۴۴۷	۲۸۹۹/۱۹	۵۸/۲۲۳
۲	۵	۴	۸	۳	۱۳	۲	۲۵۰۷/۲۸۸	۵۲۵/۲۱۴۹	۵۶۱/۳۴۰	۳۰۶۸/۶۲۸	۳۶/۱۲۵
۳	۶	۶	۹	۵	۲۰	۳	۴۰۱۶/۶۸۶	۷۰۵/۱۵۹۰	۷۸۷/۶۶۷	۴۸۰۴/۳۵۳	۸۲/۵۰۸
۴	۵	۵	۱۰	۵	۲۴	۴	۴۲۸۷/۵۴۶	۴۶۳/۷۰۴۸	۵۲۵/۲۹۹	۴۸۱۲/۸۴۶	۶۱/۵۹۵
۵	۸	۸	۱۵	۷	۴۸	۵	۵۴۰۵/۹۱۵	۱۸۷۶/۲۰۷	۱۹۱۷/۷	۷۳۲۲/۶۱۵۱	۴۱/۴۹۳
۶	۸	۸	۱۵	۶	۵۵	۶	۵۲۷۸/۲۱۲	۹۱۸۹۷/۷۴	۱۹۴۶/۹	۷۲۲۵/۱۱۲	۴۹/۱۵۱
۷	۱۰	۱۰	۲۵	۱۰	۷۳	۷	۵۹۸۸/۸۵۷	۲۷۱۴/۸۶۰	۳۷۷۴/۶	۸۷۶۳/۴۵۷	۵۹/۷۴۰
۸	۱۰	۱۰	۲۵	۱۵	۱۰۲	۸	۵۷۴۹/۱۹	۲۲۳۰/۲۳۹	۲۲۸۴/۵	۸۰۳۳/۶۹	۶۴/۲۶۱

a: تعداد کارها، b: بیش‌ترین تعداد عملیات در هر کار، c: تعداد ماشین‌ها، d: تعداد AGVها، e: تعداد کل عملیات‌ها در سیستم.

حل مدل

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مسئله و NP-Hard بودن آن و از سوی دیگر نتایجی که سایر پژوهشگران از توسعه این الگوریتم برای حل مسئله زمان‌بندی در سیستم تولید انعطاف‌پذیر گزارش کرده‌اند (ژن و همکاران ۲۰۰۸، آسوکان و همکاران ۲۰۰۶ و اولوسوی و همکاران ۱۹۹۷)، این الگوریتم به‌عنوان روش حل مدل پژوهش در نظر گرفته شده است. نحوه عملکرد الگوریتم توسعه‌داده‌شده برای حل مسئله پژوهش در شبه کد شکل ۴ آورده شده است. در این شکل $P(t)$ نشان‌دهنده والدین و $C(t)$ نشان‌دهنده فرزندان است.

هر یک از اعضای فضای جواب در الگوریتم ژنتیک باید در ساختار یک کروموزوم تعریف شود. این کار در شبه کد الگوریتم با عنوان «زیررویه کدهی» ذکر شده است که به وسیله آن هر فضای جواب به یک کروموزوم تبدیل می‌شود. ساختار کروموزوم در این مسئله به‌صورت یک ماتریس است که سطرهای آن به تعداد تمام عملیات در FMS و تعداد ستون‌های آن برابر با ۴ است. هر سطر این ماتریس نشان‌دهنده یک عملیات است و هر ستون آن یک مفهوم متفاوت را دربرمی‌گیرد که نشان‌دهنده متغیرهای اصلی مدل ریاضی ذکر شده است. در ستون اول، تخصیص ماشین به عملیات‌ها انجام می‌شود، در ستون دوم، توالی انجام عملیات‌ها توسط ماشین‌ها مشخص می‌شود، در ستون سوم، توالی انجام وظایف حمل‌ونقل توسط وسایل نقلیه مشخص شده و در ستون آخر، تخصیص وسایل نقلیه به وظایف حمل‌ونقل انجام می‌شود.

زیررویه کددهی در شکل ۵، موجه بودن جواب در قالب یک کروموزوم تصادفی را تضمین می‌کند. هر یک از این چهار ستون جنبه‌ای از این مسئله زمانبندی را نشان می‌دهد.

ورودی: داده‌های مسئله و پامترهای الگوریتم ژنتیک (اندازه جمعیت، درصد نگهداری، درصد تقاطع، درصد جهش و همچنین نقطه شکست در عملگر تقاطع و ضریب تغییرات در عملگر جهش).
 خروجی: بهترین برنامه زمانبندی عملیات در سیستم تولید انعطاف‌پذیر همراه با ارسال وسایل نقلیه در متغیر t قرار دهید صفر
 ایجاد $P(t)$ با استفاده از زیررویه کددهی مبتنی بر کروموزوم تصادفی
 ارزیابی $P(t)$ با استفاده از زیررویه کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی
 تا زمانی که شرط توقف برقرار نشده ادامه دهید:
 ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ با نگهداری نخبه
 ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ توسط عملگر تقاطع
 ایجاد $C(t)$ از $P(t)$ توسط عملگر جهش تعویض
 ارزیابی $C(t)$ با استفاده از زیررویه کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی
 ایجاد $P(t+1)$ از $C(t)$ به گونه‌ای که $C(t)$ عیناً $P(t+1)$ را تشکیل می‌دهد.
 در متغیر t قرار دهید $t+1$

شکل ۴. شبه کد الگوریتم ژنتیک برای مسئله زمانبندی و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار در سیستم تولید انعطاف‌پذیر

ورودی: داده‌های مسئله (تعداد کارها، تعداد کل عملیات‌ها در سیستم، تعداد ماشین‌ها، تعداد AGVها)
 خروجی: برنامه موجه زمانبندی کارها بر روی ماشین‌ها و AGVها و تخصیص ماشین‌ها و AGVها به کارها
 یک ماتریس (A) در ابعاد $(4 * \text{تعداد کل عملیات‌ها در سیستم})$ ایجاد شود و در آن صفر قرار گیرد.
 - یک ماتریس (B) در ابعاد (تعداد ماشین‌ها * تعداد کل عملیات‌ها در سیستم) ایجاد شود و در آن صفر قرار گیرد.
 - هر سطر ماتریس B با جایگشتی تصادفی از شماره ماشین‌ها (۱ تا m تعداد ماشین‌ها) پر شود.
 - در این ماتریس سطر به سطر پیش رفته و در هر سطر ماتریس اولین ماشینی که قادر به انجام آن عملیات است به آن عملیات تخصیص داده شود و مقدار آن در خانه متناظر با آن در ستون اول ماتریس A قرار گیرد.
 - با رسیدن به آخرین عملیات در کل سیستم توقف شود.
 ستون دوم ماتریس A با جایگشتی تصادفی از تعداد کل عملیات‌ها در سیستم پر شود.
 ستون سوم ماتریس نیز با جایگشتی تصادفی از تعداد کل عملیات‌ها در سیستم پر شود
 به تعداد عملیات‌ها در سیستم از اعداد ۱ تا تعداد AGVها، عدد تصادفی ایجاد و در ستون چهارم ماتریس A قرار گیرد.
 پاسخ (یا ماتریس) به دست آمده ارزیابی شود.
 الگوریتم اصلاحی برای موجه کردن ماتریس (در ستون دوم و سوم) اجرا شود
 شکل ۵. زیررویه کددهی (ایجاد جواب موجه)

برای مثال فرض می‌شود ۳ کار وجود دارد (تولید ۳ محصول). کار اول از ۲ عملیات، کار دوم از ۴ عملیات و کار سوم از ۲ عملیات تشکیل شده‌اند که عملیات‌ها در هر کار باید یکی پس از دیگری انجام شوند. علاوه بر این ۵ ماشین وجود دارد که همه این ماشین‌ها قادر به انجام هر ۴

نوع عملیات نیستند؛ اما مجموعه‌هایی از این ماشین‌ها توانایی انجام هر یک از کارها را دارند. یک کروموزوم تصادفی برای مثال ذکر شده در جدول ۱۱ آمده است.

جدول ۱۱. کروموزوم تصادفی برای مسئله‌ای با ۳ کار ۵ ماشین و ۳ AGV

موقعیت	۱	۲	۳	۴
۱	۴	۳	۱	۳
۲	۳	۷	۳	۳
۳	۵	۱	۷	۲
۴	۲	۴	۴	۲
۵	۱	۸	۸	۳
۶	۱	۵	۵	۱
۷	۵	۶	۲	۱
۸	۲	۲	۶	۲

عملگرهای ژنتیک. در الگوریتم ژنتیک طراحی شده برای حل این مسئله زمانبندی طبق شکل ۴، برای تولید نسل‌های بعدی کروموزوم‌ها از نخبه‌های نسل قبل، عملگر تقاطع و عملگر جهش تعویض استفاده شده است.

عملگر نخبه‌گرا. بر اساس درصد نگهداری که از قبل مشخص شده است، درصدی از بهترین‌های هر نسل بر اساس میزان برازندگی به نسل بعد منتقل می‌شوند.

عملگر تقاطع. این عملگر در هر نسل دو کروموزوم را انتخاب و سپس ستون‌های دو کروموزوم را نظیر به نظیر با توجه به درصد شکست تعیین شده با یکدیگر ترکیب می‌کند. روند انتخاب کروموزوم‌های والد در این عملگر به این صورت است که ابتدا یک عدد تصادفی تولید و آن را با مقداری که از قبل توسط اپراتور تعیین شده مقایسه می‌کند. اگر عدد ایجاد شده از مقدار موجود بیشتر باشد، یک والد از کروموزوم‌های نخبه و دیگری از کروموزوم‌های معمولی انتخاب می‌شود؛ در غیر این صورت دو والد به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. ممکن است فرزند تولید شده دارای ژن‌های تکراری (شماره عملیات تکراری) باشد؛ در این صورت باید ژن‌های تکراری را پیدا و آن‌ها را با ژن‌های دیگر جابه‌جا کند. حال احتمال اینکه فرزند تولید شده موجه نباشد و ترتیب انجام عملیات‌ها در کارها رعایت نشده باشد (در دو ستون دوم و سوم که مربوط به توالی است) وجود دارد؛ بنابراین بعد از هر بار تقاطع از الگوریتم اصلاحی استفاده می‌شود تا در صورت رعایت نشدن توالی عملیات‌ها در هر کار این توالی برقرار شود. شکل ۶ قدم‌های رویه تقاطع را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد

ورودی: دو کروموزوم والد، درصد شکست عملگر تقاطع و یک مقدار از پیش تعیین شده

خروجی: کروموزوم فرزند

تولید یک عدد تصادفی

اگر این عدد از مقدار از پیش تعیین شده بیشتر باشد:

- انتخاب تصادفی یک والد از کروموزوم‌های نخبه و یک والد از کروموزوم‌های عادی

اگر عدد تولیدشده از مقدار از پیش تعیین شده کمتر باشد:

- انتخاب دو والد به صورت تصادفی

ترکیب والدین با توجه به درصد شکست با یکدیگر؛ به این صورت که قسمت اول فرزند از والد اول و قسمت دوم آن از والد دوم باشد.

اجرای الگوریتم اصلاحی جهت اصلاح کروموزوم تولیدشده (در ستون دوم و سوم)

شکل ۶. قدم‌های رویه عملگر تقاطع

عملگر جهش تعویض. این عملگر نیز مانند عملگر تقاطع ستون‌های دو کروموزوم را نظیر به نظیر با توجه به ضریب تغییرات عملگر جهش با یکدیگر ترکیب می‌کند. چگونگی انتخاب کروموزوم والد به این ترتیب است که ابتدا یک عدد تصادفی ایجاد و سپس با میزان احتمال نخبه‌گرایی که از قبل تعیین شده است، مقایسه می‌شود. اگر عدد تولیدشده از احتمال نخبه‌گرایی کمتر باشد، کروموزوم نمونه از میان کروموزوم‌های نخبه انتخاب می‌شود؛ در غیر این صورت کروموزوم نمونه از کروموزوم‌های عادی خواهد بود. روال کار این عملگر به این صورت است که در هر ستون X دفعه (ضریب تغییرات عملگر جهش * اندازه ستون کروموزوم = X) دو ژن را به تصادف انتخاب و آن‌ها را با یکدیگر تعویض می‌کند. این کار در ستون اول، دوم و سوم عیناً تکرار می‌شود؛ اما در ستون چهارم این عملگر کمی متفاوت عمل می‌کند؛ به این صورت که ابتدا مقدار X را محاسبه و سپس جایگشتی تصادفی به اندازه طول ستون (تعداد کل عملیات‌ها در سیستم) ایجاد می‌کند. ژن‌های متناظر با X عدد اول این جایگشت را مجدداً تولید (تولید اعداد تصادفی بین ۱ تا تعداد AGV ها) و با ژن‌های قبلی جایگزین می‌کند. شکل ۷، قدم‌های رویه عملگر جهش تعویض را نشان می‌دهد.

ورودی: کروموزوم والد، ضریب تغییرات عملگر جهش و احتمال نخبه‌گرایی

خروجی: کروموزوم فرزند

تولید یک عدد تصادفی

اگر عدد تولیدشده از احتمال نخبه‌گرایی کمتر باشد:

- انتخاب تصادفی کروموزوم نمونه از کروموزوم‌های نخبه

در غیر این صورت:

- انتخاب تصادفی کروموزوم نمونه از کروموزوم‌های عادی

محاسبه تعداد دفعات تعویض ژن‌ها: ضریب تغییرات عملگر جهش * اندازه ستون کروموزوم = X

در ستون اول، دوم و سوم هر کروموزوم نمونه:

- انتخاب دو ژن به تصادف در هر ستون و تعویض آن‌ها به تعداد X بار

در ستون چهارم هر کروموزوم نمونه:

- ایجاد جایگشتی تصادفی به اندازه طول ستون ماتریس کروموزوم

- تولید مجدد ژن‌های متناظر با X عدد اول جایگشت ایجادشده (تولید عدد تصادفی بین ۱ تا تعداد AGVها)

اجرای الگوریتم اصلاحی برای اصلاح کروموزوم تولیدشده (در ستون دوم و سوم)

شکل ۷. قدم‌های روبه عملگر جهش تعویض

الگوریتم اصلاحی. هنگام ایجاد، تقاطع و جهش کروموزوم‌ها ممکن است در ترتیب انجام عملیات‌ها توسط ماشین‌ها و توالی انجام عملیات‌ها در هر کار و همچنین ترتیب جابه‌جایی عملیات توسط AGVها و توالی عملیات‌ها در هر کار تناقض به‌وجود آید. برای مثال: ماشین k می‌خواهد عملیات j مربوط به کار i را مورد پردازش قرار دهد؛ در صورتی که هنوز عملیات i-1 از کار i پردازش نشده‌است؛ در این صورت به یک اقدام اصلاحی نیاز خواهد بود. هر زمان که ایجاد، تقاطع و جهش در ستون دوم و سوم کروموزوم صورت گیرد، بلافاصله الگوریتم اصلاحی به‌کار گرفته می‌شود که اگر محدودیت توالی عملیات در هر کار نقض شده باشد، این توالی برقرار شود.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این پژوهش در هر نسل ۲۰ درصد از کروموزوم‌های نخبه مستقیماً به نسل بعد منتقل می‌شوند، ۶۰ درصد از آن‌ها برای اعمال عملگر تقاطع انتخاب می‌شوند و ۲۰ درصد نیز برای اعمال جهش انتخاب خواهند شد. پس از اعمال عملگرها، فرزندان جایگزین والدین می‌شوند. برای نمایش نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده، مسئله‌ای در ابعاد متوسط با اطلاعاتی که در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌است برای زمانبندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار به‌صورت همزمان ایجاد می‌شود. شکل ۸ نمودار همگرایی این مسئله را نشان می‌دهد؛ همچنین در ادامه یک نمودار همگرایی (شکل ۹) برای یک مسئله با ابعاد بزرگ‌تر

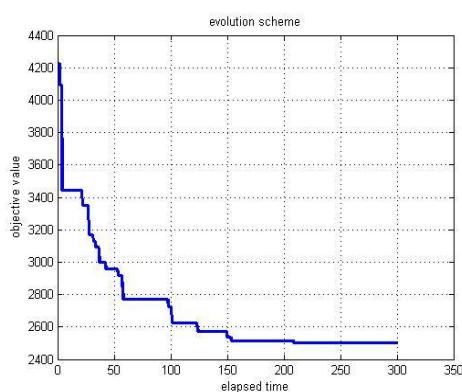
ارائه شده که مشخصات و پارامترهای مربوط به آن به ترتیب در جداول ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک ارائه شده در نرم افزار متلب نسخه R2013a کدنویسی شده است.

جدول ۱۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
جمعیت	۱۰۰
احتمال عملگر تقاطع	۰/۲
احتمال عملگر جهش	۰/۶
تعداد نسل	۱۰۰۰
مدت زمان اجرا	۳۰۰

جدول ۱۲. مشخصات مسئله ۱

مسئله ۱	مقدار
تعداد کار	۱۵
تعداد انواع عملیات	۱۰
تعداد ماشین	۲۵
تعداد AGV	۱۰
تعداد کل عملیات در سیستم	۷۳



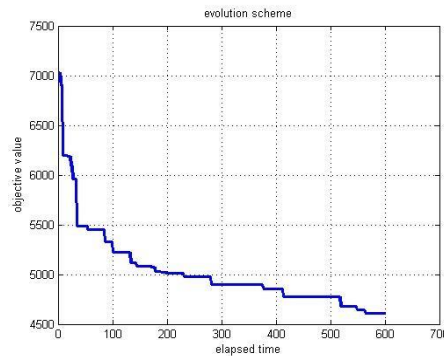
شکل ۸. نمودار همگرایی مسئله با ابعاد متوسط

جدول ۱۵. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
جمعیت	۱۰۰
احتمال عملگر تقاطع	۰/۲
احتمال عملگر جهش	۰/۶
تعداد نسل	۶۰۰۰
مدت زمان اجرا	۶۰۰

جدول ۱۴. مشخصات مسئله ۲

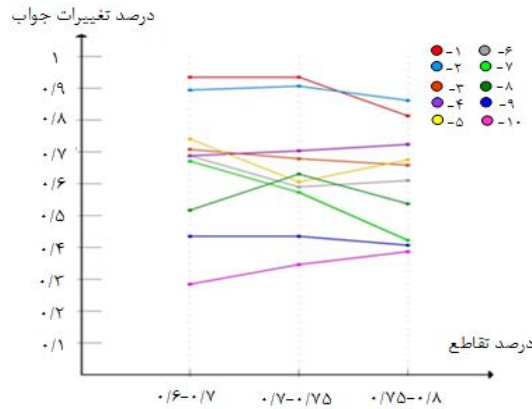
مسئله ۲	مقدار
تعداد کار	۲۵
تعداد انواع عملیات	۱۵
تعداد ماشین	۳۰
تعداد AGV	۲۵
تعداد کل عملیات در سیستم	۱۷۰



شکل ۹: نمودار همگرایی مسئله با ابعاد نسبتاً بزرگ

تنظیم پارامتر. در این پژوهش تنظیم پارامترهای الگوریتم به صورت تجربی انجام شده است؛ به این صورت که پارامترهایی از الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده که تغییرات آن‌ها تأثیرات بیشتری در تابع هدف دارند؛ انتخاب و با تغییر این پارامترها در بازه‌های متفاوت بر روی ۱۰ مسئله تصادفی در ابعاد مختلف به آزمون آن‌ها پرداخته و با تحلیل و بررسی مقدار مناسب برای این پارامترها تعیین می‌شود. سایر پارامترهای الگوریتم از جمله میزان جمعیت در هر نسل، نقطه شکست در عملگر تقاطع و ضریب تغییرات در عملگر جهش در مناسب‌ترین مقدار آن‌ها که در نتیجه اجرای زیاد الگوریتم و تحلیل و بررسی‌هایی که به صورت تجربی انجام شده به دست آمده است، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر در تحلیل‌های انجام شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد، به صورت: میزان جمعیت در هر نسل = ۱۰۰، عامل نقطه شکست در عملگر تقاطع = ۰/۷ و ضریب تغییرات در عملگر جهش = ۰/۵ است. نکته دیگری اینکه این مسائل ابعاد مختلفی دارند پس مسائل قابل قیاس با یکدیگر نیستند و باید عملکرد الگوریتم را در هر مسئله و هر مسئله را در سه سطح با خودش مقایسه و بررسی کرد. برای محاسبه معیار مقایسه در این قسمت از نسبت (بدترین جواب برای تابع هدف) / (بهترین جواب برای تابع هدف - بدترین جواب برای تابع هدف) استفاده شده است که در سه نمودار با عنوان «درصد تغییرات جواب» نام برده می‌شود. هرچه مقدار بهترین جواب برای تابع هدف کوچک‌تر باشد، این نسبت به عدد ۱ نزدیک‌تر می‌شود و نتیجه بهتری ارائه خواهد داد.

از پارامترهای مؤثر در جواب، درصد تقاطع الگوریتم است که با در نظر گرفتن آن در سه سطح ۰/۶-۰/۷، ۰/۷-۰/۷۵ و ۰/۷۵-۰/۸ آزمایش و نتایج آن در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است.



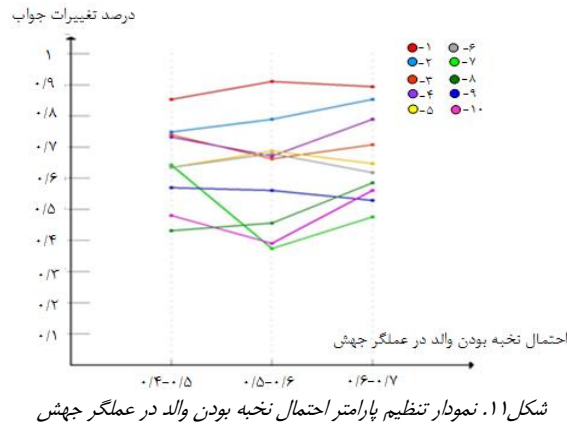
شکل ۱۰. نمودار تنظیم پارامتر درصد تقاطع

طبق نمودار ۱۰ در مقایسه سطح دوم نسبت به سطح اول، ۶ مسئله ۱، ۲، ۴، ۸، ۹ و ۱۰ روند صعودی داشته و مسئله ۳ تغییرات زیادی نداشته است. تنها ۳ مسئله: ۵، ۶ و ۷ روند نزولی از خود نشان داده‌اند. حال آنکه در مقایسه سطح دوم نسبت به سطح سوم مسائل ۱، ۲، ۳، ۷، ۸ در سطح سوم روند کاهشی داشته‌اند و تنها ۴ مسئله ۴، ۵، ۶ و ۱۰ روند افزایشی دارند. این موضوع نشان می‌دهد که به‌طور کلی در میان این سه سطح، عملگر تقاطع در سطح دوم یعنی بازه ۰/۷-۰/۷۵ مقدار مناسب‌تری دارد.

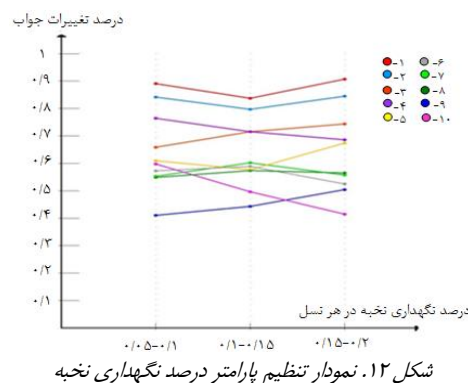
یکی دیگر از پارامترهای الگوریتم که در نتیجه به‌دست‌آمده تأثیرگذار است پارامتر احتمال نخبه‌بودن والد مربوط به عملگر جهش است که در ادامه مقدار مناسب برای آن تعیین می‌شود؛ به این صورت که برای آن سه سطح ۰/۴-۰/۵، ۰/۵-۰/۶ و ۰/۶-۰/۷ در نظر گرفته شده‌است. در شکل ۱۱، نحوه تغییرات مسائل در ابعاد مختلف در سه سطح گفته‌شده نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که سطح سوم نتایج بهتری را برای مسائل فراهم آورده است؛ زیرا درصد تغییرات محاسبه‌شده برای مسائل در سطح سوم نتایج بهتری را نسبت به دو سطح اول و دوم فراهم آورده است.

در مقایسه سطح دوم نسبت به سطح اول به جز مسائل ۳، ۴، ۷ و ۱۰ که روند کاهشی داشته‌اند، سایر مسائل در سطح دوم نتایج بهتری داشته و روند افزایشی داشته‌اند. در مقایسه با سطح اول و سطح سوم نسبت به یکدیگر مسائل ۱، ۲، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ در سطح سوم نتایج بهتری نسبت به نتایج سطح اول ارائه داده‌اند.

نتایج در سطح سوم نسبت به سطح دوم جز سه مسئله ۵، ۶ و ۹ که در سطح سوم روند کاهشی را در پیش گرفته‌اند، ۷ مسئله دیگر روند صعودی داشته‌اند و نتایج بهتری فراهم کرده‌اند.



واضح است که در نظر گرفتن پارامتر، احتمال نخبه بودن والد در عملگر جهش در سطح سوم با مقدار $0/7-0/6$ قطعاً نتایج مناسب‌تری را برای مسائل به‌دنبال خواهد داشت. در نهایت مقدار مناسب برای پارامتر درصد نگهداری از نخبه‌های هر نسل تعیین می‌شود که این عامل نیز در سه سطح $0/1-0/05$ ، $0/15-0/1$ و $0/2-0/15$ بررسی شده است. شکل ۱۲ نشان‌دهنده چگونگی تغییرات در سه سطح مختلف این پارامتر است.



طبق شکل ۱۲، سطح اول و سوم در مقایسه با سطح دوم نتایج بهتری ارائه داده‌اند. برای مثال: با توجه به محورهای ۶ مسئله ۱، ۲، ۴، ۵، ۶ و ۱۰ این مسائل در سطح دوم با روند کاهشی روبه‌رو شده‌اند و مسائل ۴، ۶ و ۱۰ این روند کاهشی را در سطح سوم نیز ادامه داده‌اند. با نگاهی کلی به این نمودار مشخص است که محور هر مسئله در مقایسه با خود، در سطح سوم از مقدار نسبت بهتری نسبت به دو سطح اول و دوم برخوردار است. به جز مسائل ۴، ۶، ۷ و ۱۰ که در این سطح به صورت نزولی ظاهر شده‌اند؛ سایر مسائل روند صعودی در پیش گرفته‌اند. با این تفاسیر می‌توان

نتیجه گرفت که مقدار پارامتر درصد نگهداری نخبه از هر نسل در سطح سوم با مقدار $0/2-0/15$ نتیجه بهتری را برای مسائل در پی خواهد داشت.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

موضوع مورد بررسی در این پژوهش مسئله زمانبندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار همراه با در نظر گرفتن زمان‌های حمل و نقل کارها بین ماشین‌ها و ایستگاه‌های کاری است. در این پژوهش نشان داده شد که بی‌توجهی به زمان‌های حمل و نقل در سیستم و یا در نظر گرفتن دو مسئله زمانبندی وظایف تولید و وظایف حمل و نقل به صورت هم‌زمان و یکپارچه به برنامه‌ای منجر خواهد شد که از نظر منطقی توجیه‌پذیر نیست؛ بنابراین به منظور ارائه یک برنامه زمانبندی با کمترین زمان اتمام کل کارها در سیستم، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح مدل‌سازی شده است. از مهم‌ترین خروجی‌های این مدل ماشین‌های تخصیص‌یافته به عملیات‌ها، های تخصیص‌یافته به وظایف حمل و نقل، توالی انجام عملیات توسط ماشین‌ها و توالی انجام وظایف حمل و نقل توسط AGVها است. مدل به دست آمده با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده حل شده که کیفیت راه‌حل‌های به دست آمده از آن به دو طریق نشان داده شده است. ابتدا یک مثال عددی معتبر در ابعاد کوچک برای این مدل حل و تجزیه و تحلیل شده است. حساسیت مدل به افزایش تعداد وسایل نقلیه و به دنبال آن کاهش زمان اتمام کل کارها در سیستم نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل است. در ادامه به محاسبه حدود بالا و پایین در این مثال و چند مسئله نمونه پرداخته شده که نتایج و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نشان می‌دهد که بهترین جواب الگوریتم بین حدود محاسبه شده قرار گرفته است. با توجه به دو ستون آخر جدول ۱۰ که فواصل بهترین جواب الگوریتم از حدود بالا و پایین را نشان می‌دهد واضح است که در تمامی مسائل ارائه شده فاصله بهترین جواب الگوریتم ژنتیک از حد پایین کمتر از فاصله بهترین جواب الگوریتم ژنتیک از حد بالای آن است این امر نشان می‌دهد که پاسخ‌های به دست آمده از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه یافته کیفیت بالایی دارند. به کارگیری این مدل در سیستم‌های تولیدی به کاهش زمان اتمام کل کارها در سیستم منجر خواهد شد که کاهش هزینه را نیز در پی خواهد داشت؛ از سوی دیگر با استفاده از مدل می‌توان تعداد بهینه وسایل نقلیه هدایت خودکار در سیستم را نیز برآورد کرد؛ از این رو توصیه می‌شود مدیران واحدهای تولیدی با استفاده از این مدل از مزایای آن بهره‌مند شده و بازده سیستم خود را افزایش دهند. برای پژوهش‌های آتی می‌توان به در نظر گرفتن تعداد AGVها به عنوان یکی از متغیرهای مسئله، در نظر گرفتن زمان راه‌اندازی وابسته به توالی و همچنین مجزا در نظر گرفتن آن از مدت زمان پردازش، در نظر گرفتن خرابی و از کار افتادگی ماشین‌آلات و غیره اشاره کرد.

منابع

1. Atan, T. S., Pandit, R., (1996). Auxiliary tool allocation in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 89(3), 642-659.
2. Atmani, A., & Lashkari, R. S. A. (1998). Model of machine tool selection and operation allocation in FMS. *International Journal of Production Research*, 36, 1339-1349.
3. Bilge, Ü., & Ulusoy, G. (1995). A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS. *Operations Research*, 43, 1058-1070.
4. Blazewicz, J., Eiselt, H. A., Finke, G., Laporte, G., & Weglarz, J. (1991). Scheduling tasks and vehicles in flexible manufacturing system. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 4, 5-16.
5. Caummond, A., Lacomme, P., Moukrim, A., & Tchernev, N. (2009). An MILP for scheduling problems in an FMS with one vehicle. *European Journal of Operational Research*, 199, 706-722.
6. Chan, F. T. S., & Swarnkar, R. (2006). Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22, 353-362.
7. Gamila, M. A., & Motavalli, S. A. (2003). Modeling technique for loading and scheduling problems in FMS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19, 45-54.
8. Ganesharajah, T., Hall, N. G., & Sriskandrajah, C. (1998). Design and operational issues in AGV-served manufacturing systems. *Annals of operations research*, 76, 109-154.
9. Gen, M., Cheng, R., Lin, L. (2008). Advanced Network Models: AGV Dispatching Model. *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach-(Decision Engineering)*. 651-666. London. Springer.
10. Grieco, A., Semeraro, Q., & Tolio, T. (2001). A review of different approaches to the FMS Loading Problem. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 13, 361-384.
11. Jerald, J., Asokan, P., Saravanan, R., & Rani, A. D. C. (2006). Simultaneous scheduling of parts and automated guided vehicles in an FMS environment using adaptive genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, 584-589.
12. Kelen C. T. Vivaldini, Luís F. Rocha, Marcelo Beker, António Paulo Moreira. (2015). Comprehensive Review of the Dispatching, Scheduling and Routing of AGVs. *CONTROLO'2014 – Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control Lecture Notes in Electrical Engineering*, 321, 505-514.
13. Liu, J., & MacCarthy, B. L. (1997). A global MILP model for FMS scheduling. *European Journal of Operational Research*, 100, 441-453.

14. Low, CH, Wu, T. (2001). Mathematical modeling and heuristic approaches to operation scheduling problems in an FMS environment. *International Journal of Production Research*, 39, 689-708.
15. Low, CH, Yip, Y, Wu, T. (2006). Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives. *Computers & Operations Research*, 33, 674-694.
16. Müller, T., 1983. Automated Guided Vehicles. IFS (Publications) Ltd./Springer-Verlag, UK/Berlin.
17. Novas, J.M., & Henning, G. P. (2014). Integrated scheduling of resource-constrained flexible manufacturing systems using constraint programming. *Expert Systems with Applications*, 41, 2286-2299.
18. Rahimi, H., Azar, A., Rezaee Pandari, A. (2015). Multi-objective Mathematical model for jobshop production system and solving by using simulated annealing algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5, 19.(In Persian)
19. Roh, H.K., Kim, Y.D., (1997). Due date based loading and scheduling methods for a flexible manufacturing system with an automatic tool transporter. *International Journal of Production Research* 35, 2989-3003.
20. Sarin, S. C., Chen, C.S. (1987). The machine loading and tool allocation problem in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 25(7), 1081-1094.
21. UdhayaKumar, P. & Kumanan, S. (2010).Task Scheduling of AGV in FMS Using Non-Traditional Optimization Techniques. *International Journal Simulation Models*, 1, 28-39.
22. Ulusoy, G., Sivrikaya-Serfioglu, F., & Bilge, Ü. (1997). A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles. *Computers & Operations Research*, 24, 335-351.
23. Vis, I. F. A. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 170, 677-709.
24. Yang, J. (2001). GA-Based Discrete Dynamic Programming Approach for Scheduling in FMS Environments. *Ieee transactions on systems, man, and cybernetics-part b: cybernetics*. 3, 824-835.
25. Zandieh, M., Fotovvat, A. (2016). Jobshop Flow System Scheduling with Machine Access Constraint and Learning Effects based on a Hybrid Model. *Journal of Industrial Management Perspective*, 20, 41-58. (In Persian)
26. Zeballos, L. J. (2010). A constraint programming approach to tool allocation and production scheduling in flexible manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26, 725-743.
27. Zeballos, L. J., Quiroga, O. D., & Henning, G. P. (2010). A constraint programming model for the scheduling of flexible manufacturing systems with machine and tool limitations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 229-248.