

یکپارچگی زمانبندی حمل و نقل در زنجیره تأمین با وسائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت

سید حسام‌الدین ذگردی*، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمد علی بهشتی‌نیا، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail: zegordi@modares.ac.ir
تاریخ دریافت: ۸۶/۱۲/۱۲ - تاریخ پذیرش: ۸۸/۴/۳۰

چکیده

این مقاله به بررسی مسأله زمانبندی در یک زنجیره تأمین ۳ مرحله‌ای می‌پردازد. مرحله اول شامل تأمین‌کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل یک شرکت سازنده محصولات نهایی است. ناوگان حمل و نقل شامل چندین وسیله نقلیه می‌شود که دارای سرعتها و ظرفیتهای متفاوت برای حمل کالا هستند. هدف، تخصیص کارها به تأمین‌کنندگان و وسائط نقلیه به نحوی است که کارها زودتر تحویل شرکت سازنده شوند. نشان داده می‌شود که پیچیدگی این مسأله از نوع *NP-hard* است و در نتیجه استفاده از روشهای دقیق برای حل مسأله در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. برای حل این مسأله یک الگوریتم ژنتیک که در اینجا الگوریتم ژنتیک پویا نامیده شده است و دارای کروموزومهایی با ساختار متغیر است ارایه می‌شود. از آنجا که این مسأله تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است، مبنای مناسبی جهت ارزیابی الگوریتم ژنتیک ارایه شده وجود ندارد. بنابراین الگوریتم ژنتیک ارایه شده با روش جستجوی تصادفی (*Random Search*) مقایسه شده است. همچنین الگوریتم ژنتیک ارایه شده در یک حالت خاص با روش مربوط به نزدیک‌ترین مسأله در ادبیات موضوع مقایسه شده است. نتایج، نشان از برتری الگوریتم ژنتیک پویا در هر دو مقایسه انجام شده دارد.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی، زنجیره تأمین، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی حمل و نقل

۱. مقدمه

مورد توجه بخش صنعت و هم مورد توجه پژوهشگران دانشگاهی قرار گرفته است. به‌علاوه با معروف شدن مفاهیم JIT، کارخانه‌ها به سمت کاهش سطوح موجودیشان متمایل شده‌اند. این پدیده علاوه بر تأکید روی روابط متقابل دقیق‌تر در بین مراحل زنجیره تأمین، افزایش استفاده عملی از مدل‌های یکپارچه را موجب شده است. در بین سیستم‌های یکپارچه شده، ارتباط بین زمانبندی سفارشها در مرحله تولید و تخصیص و زمانبندی آنها به تأمین‌کنندگان یکی از مهم‌ترین زمینه‌ها است که تحقیقات زیادی روی آن صورت پذیرفته است. روشهای سنتی زمانبندی کارها در مرحله تولید و مرحله

مدیریت زنجیره تأمین یکی از موضوع‌های مهمی است که تاکنون در حوزه تولید تحقیقات زیادی درباره آن صورت پذیرفته است. یک زنجیره تأمین شامل تمام مراحل که روی یک محصول ایجاد ارزش افزوده می‌کنند می‌شود. مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان به صورت وظیفه یکپارچه‌سازی واحدهای سازمانی در طول زنجیره تأمین و هماهنگ‌سازی جریانهای مواد، اطلاعات و مالی، به منظور برآوردن تقاضای مشتری (نهایی) و با هدف بهبود رقابت‌پذیری یک زنجیره تأمین تعریف کرد. با ظهور پدیده جهانی‌سازی^۱، هماهنگی^۲ در میان مراحل مختلف زنجیره تأمین، به منظور دستیابی به یک سیستم با اثربخشی ایده‌آل، یکی از موضوع‌هایی است که هم

تأمین کنندگان را به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن تأثیر متقابل بین آنها در نظر می گیرند. اتخاذ تصمیم های جداگانه بدون در نظر گرفتن این رابطه متقابل، رسیدن به جواب بهینه عمومی^۳ را تضمین نمی کند. در این مقاله مسأله زمانبندی در یک زنجیره تأمین سه مرحله ای با تمرکز روی یکپارچگی مراحل آن، مورد بررسی قرار می گیرد. مرحله اول شامل تأمین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل یک شرکت سازنده محصولات نهایی است.

در ادامه در بخش ۲ مرور ادبیات زمانبندی در زنجیره تأمین ارائه می شود. در بخش ۳ به تشریح مسأله پرداخته می شود و مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله ارائه می شود. در بخش چهارم یک الگوریتم ژنتیک که الگوریتم ژنتیک پویا نامیده می شود، برای حل مسأله ارائه می شود. در بخش پنجم به بررسی نتایج محاسباتی به دست آمده از حل مسائل مختلف توسط الگوریتم ژنتیک پویا پرداخته می شود. در بخش آخر نیز به بیان نتیجه گیری و زمینه های تحقیقات آتی پرداخته می شود.

۲. مرور ادبیات

هال و پاتز[۱] انواع گوناگونی از مسائل زمانبندی تحویل کالاها در زنجیره تأمین را به صورت دسته ای و با هدف کمینه کردن مجموع هزینه های تولید و توزیع مورد بررسی قرار داده اند. لی و همکاران[۲] به بررسی برنامه ریزی پیشرفته و زمانبندی در زنجیره تأمین پرداخته اند. در مسأله آنها فرض می شود که هر سفارش دارای یک تاریخ تحویل است. محصولاتی که در هر سفارش باید تکمیل شوند، باید به ترتیب در مراحل اتصال^۴ و مونتاژ مورد پردازش قرار گیرند. ممکن است بین عملیات لازم برای تکمیل هر قلم محدودیتهای تقدمی وجود داشته باشد.

گنونی و همکاران[۳] به بررسی برنامه ریزی تولید در سیستم های تولید چند مکانی^۵ پرداخته اند. در تحقیق آنها فرض می شود که برای برخی از قطعات نیمه ساخته تقاضای خارجی وجود دارد که تقاضای آنها نیز به صورت احتمالی است. آنها برای حل مسأله از ترکیب مدل های برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط^۶ و شبیه سازی^۷ استفاده کرده و از مزایای هر دو این مدلها در برخورد با این مسأله استفاده کرده اند.

ریو و سایرین[۴] به بررسی برنامه ریزی در یک زنجیره تأمین متشکل از دو مرحله تولید و توزیع پرداخته اند. هدف تعیین

سطح تولید در کارخانه ها و سطح موجودی در توزیع کنندگان است به طوری که هزینه های تولید، و حمل به توزیع کنندگان برای شرکتهای سازنده، و هزینه های انبارداری و حمل به بازار برای توزیع کنندگان کمینه شود. برای حل این مسأله از برنامه ریزی دو سطحی^۸ استفاده شده است. بردستوم و همکاران[۵] به بررسی زمانبندی تولید و توزیع در زنجیره تأمین مربوط به کارخانه های تولید خمیر کاغذ^۹ در کشور سوئد پرداخته اند. آنها برای حل مسأله دو مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه کرده اند که یکی از آنها از تکنیک تولید ستون^{۱۰} و از الگوریتم حل مسأله کوتاه ترین مسیر^{۱۱} برای حل مسأله استفاده می کند. در این تحقیق به برنامه ریزی تولید پرداخته شده و به زمانبندی ماشین آلات توجهی نشده است.

چانگ و لی[۶] به بررسی زمانبندی ماشین آلات در زنجیره تأمین پرداخته اند. زنجیره تأمین مسأله آنها شامل دو مرحله می شود. مرحله اول، مرحله تولید و مرحله دوم، مرحله حمل و نقل و تحویل کارها به مشتریان است. تابع هدف مسأله کمینه کردن حداکثر زمانهای تکمیل کارها (C_{max}) است. در این مسأله مرحله تولید می تواند شامل یک یا چند ماشین باشد. همچنین مشتریان ممکن است در یک ناحیه^{۱۲} یا در ناحیه های متفاوتی قرار داشته باشند. هر وسیله نقلیه دارای یک محدودیت ظرفیت است که مربوط به فضای می شود که کارها می توانند به وسیله آن در یک سفر حمل شوند. هر کار ممکن است فضای متفاوتی را نسبت به کار دیگر اشغال کند. به ازای هر تحویل کالا یک زمان حمل و نقل نیز در نظر گرفته می شود. تابع هدف کمینه کردن جمع زمانهای تکمیل برای تمام کارها است. آنها صورت های ساده ای از مسأله را که تنها یک وسیله نقلیه ناوگان حمل و نقل را تشکیل دهد را مورد بررسی قرار داده و برای هر یک از آنها یک الگوریتم ابتکاری ارائه داده اند.

برنینگ و همکاران[۷] به بررسی بهینه سازی زنجیره تأمین در صنایع شیمیایی توسط برنامه ریزی تولید پرداخته اند. هدف تعیین یک برنامه زمانبندی است که با توجه به محدودیتهای منابع، هزینه های تولید و دیر کرد را کمینه کند. لجین[۸] به بررسی برنامه ریزی تولید و توزیع در زنجیره تأمین پرداخته است. آنها پس از مدل سازی مسأله به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط^{۱۳} یک الگوریتم بر مبنای تجزیه جستجوی همسایگی^{۱۴} ارائه داده اند که به صورت جستجوی مرحله ای عمل می کند. این تحقیق به صورت کلان به برنامه ریزی تولید

۳) تحقیقاتی که به بررسی رابطه چند شرکت سازنده با یکدیگر پرداخته‌اند (برونسپاری^{۱۹})؛ ۴) تحقیقاتی که ترکیبی از حالات بالا را در نظر گرفته‌اند.

از نظر سطح بررسی زنجیره تامین، تحقیقات انجام شده را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱) تحقیقاتی که به صورت کلان، اقدام به برنامه‌ریزی تولید و هماهنگی در زنجیره تکمیل کرده‌اند. ۲) تحقیقاتی که به صورت عملیاتی اقدام به زمانبندی و هماهنگی در زنجیره تامین کرده‌اند. هر چند که تحقیقات متعددی انجام شده‌اند که به بررسی زمانبندی در زنجیره تامین پرداخته‌اند، اما بسیاری از آنها مسأله را به صورت کلان مورد بررسی قرار داده‌اند. از بین تحقیقاتی که مسأله زمانبندی در زنجیره تامین را مورد بررسی قرار داده‌اند نیز تنها تحقیق چانگ و لی [۵] است که وجود وسائط نقلیه با ظرفیت‌های حمل متفاوت را مورد بررسی قرار داده است. آنها حالات انتزاعی وجود یک وسیله نقلیه در زنجیره تامین را مورد بررسی قرار داده‌اند. این در صورتی است که ناوگان حمل و نقلی به راحتی می‌تواند با خرید وسائط نقلیه افزایش یابد. از سوی دیگر آنها در تحقیق خود به رابطه شرکت سازنده و تامین کنندگان توجهی نداشته‌اند. در این مقاله به بررسی زنجیره تامین در زنجیره تامین با در نظر گرفتن ناوگان حمل و نقلی متشکل از چندین وسیله نقلیه از دیدگاه عملیاتی با ظرفیت حمل و نقل متفاوت پرداخته می‌شود. برای حل مسأله مذکور یک الگوریتم ژنتیک جدید ارائه می‌شود که الگوریتم ژنتیک پویا نامیده شده است و دارای کروموزومهایی با ساختار متغیر است.

۳. تعریف مسأله

این مقاله به بررسی زمانبندی در یک زنجیره تامین ۳ مرحله‌ای می‌پردازد. مرحله اول شامل تامین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل یک شرکت سازنده محصولات نهایی می‌شود. فرض می‌شود که یک شرکت سازنده وجود دارد که باید n سفارش را مورد پردازش قرار دهد. کارخانه سازنده دارای m تامین کننده است که قطعات مورد نیاز برای هر سفارش را برای این کارخانه تهیه می‌کنند. برای تبدیل مسأله مورد بررسی به یک مسأله زمانبندی، هر یک از تامین کنندگان، وسائط نقلیه و شرکت سازنده به عنوان یک ماشین در نظر گرفته می‌شوند. (شکل ۱)

می‌پردازد و به زمانبندی ماشین آلات توجهی ندارد. سالوارجا و استینر [۹] به بررسی زمانبندی دسته‌ای در زنجیره تامین از دیدگاه تامین کنندگان پرداخته‌اند. هدف تعیین اندازه دسته‌های محصولات برای مشتریان و زمان تکمیل هر دسته از محصولات برای مشتری مورد نظر است، به طوری که مجموع هزینه‌های نگهداری و تحویل دادن سفارشات کمینه شود. آنها برای حالتی که تنها یک تامین کننده و چند مشتری وجود دارد، یک الگوریتم بایچیدگی چند جمله‌ای که جواب بهینه را می‌دهد، ارائه کرده‌اند. در این تحقیق به تامین کنندگان داخل زنجیره توجهی نشده است و تنها به رابطه بین شرکت سازنده و مشتریان پرداخته شده است. چان و همکاران [۱۰] به بررسی مسأله زمانبندی توزیع شده^{۱۰} در محیط چند محصولی و چند کارخانه‌ای پرداخته‌اند. هدف تخصیص کارها به کارخانه‌های متفاوت و تعیین زمانبندی تولید تمام کارخانه‌ها است. یک الگوریتم ژنتیک تطبیقی با یک عملگر تلفیق جدید با نام ژن قالب^{۱۶} برای حل مسأله ارائه شده است. چایهان و همکاران [۱۱] به بررسی مسأله زمانبندی در زنجیره تامین با تابع هدف کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها پرداخته‌اند. آنها مسأله را برای دو حالت وجود یک عملیات مونتاژ و چند عملیات مونتاژ بررسی کرده و برای هر حالت یک الگوریتم ابتکاری ارائه داده‌اند. ژو و همکاران [۱۲] به بهینه‌سازی زنجیره تامین در فرآیندهای تولیدی پیوسته با در نظر گرفتن تحمل پذیری^{۱۷} پرداخته‌اند. تحمل پذیری شامل هدفهای چند گانه‌ای از قبیل تحمل پذیریهای اجتماعی، اقتصادی، منبعی و محیطی می‌شود که برخی از آنها با برخی دیگر در تضاد هستند. آنها یک مطالعه موردی را با استفاده از محدودیتهای بالا مدل‌سازی کرده‌اند. جتلوند و کریمی [۱۳] به بهبود لجستیک مواد به وسیله برنامه ریزی تانکرهای چند قسمتی^{۱۸} حمل مواد شیمیایی پرداخته‌اند. برای حالات وجود یک کشتی و چند کشتی مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. به علت زیاد بودن پیچیدگی مسأله برای حالتی که چند کشتی وجود دارد، دو الگوریتم ابتکاری برای حل مسأله ارائه شده است.

از دیدگاه در نظر گرفتن شرکت‌های مورد بررسی در زنجیره تامین، تحقیقات انجام شده را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد. ۱) تحقیقاتی که به بررسی رابطه شرکت‌های سازنده با تامین کنندگانشان پرداخته‌اند؛ ۲) تحقیقاتی که به بررسی رابطه شرکت سازنده با توزیع کنندگان یا مشتریانشان پرداخته‌اند؛

تحقیق به منظور ساده‌سازی فرض شده است که تأمین‌کنندگانی که در نواحی جغرافیایی مختلفی قرار دارند، دارای ناوگان حمل‌ونقل مستقلی هستند و بنابراین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مستقلی برای آنها باید صورت پذیرد. در نتیجه می‌توان مسأله زمانبندی در زنجیره تأمین با تأمین‌کنندگانی در نواحی جغرافیایی مختلف را به چند زیر مسأله که تأمین‌کنندگان در یک ناحیه جغرافیایی قرار دارند، تقسیم کرد.

هدف تعیین چگونگی ترتیب سفارشها و تخصیص آنها به تأمین‌کنندگان، تخصیص و ترتیب محموله‌ها در وسائط نقلیه و ترتیب انجام سفارشها در شرکت سازنده است، به طوری که حداکثر زمان تکمیل کلیه سفارشها کمینه شود.

فرموله کردن مسأله: در این بخش مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله مورد بررسی بیان می‌شود. قبل از ارایه مدل ریاضی مسأله ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی می‌شوند.

پارامترهای مسأله عبارتند از:

n تعداد کارها

m تعداد تأمین‌کنندگان

l تعداد وسائط نقلیه

i شاخص کار، $i=1, 2, \dots, n$

s شاخص تأمین‌کنندگان، $s=1, 2, \dots, m$

b شاخص محموله، $b=1, 2, \dots, n$

k شاخص وسیله نقلیه، $k=1, 2, \dots, l$

v_k : سرعت تولید تأمین‌کننده s ام

v'_s : سرعت تولید تأمین‌کننده s ام

Cap_k : ظرفیت حمل وسیله نقلیه k ام جهت حمل سفارشات به شرکت سازنده

شرکت سازنده

P_i : زمان پردازش کار i در مرحله تأمین‌کنندگان

dis : فاصله بین تأمین‌کنندگان تا شرکت سازنده

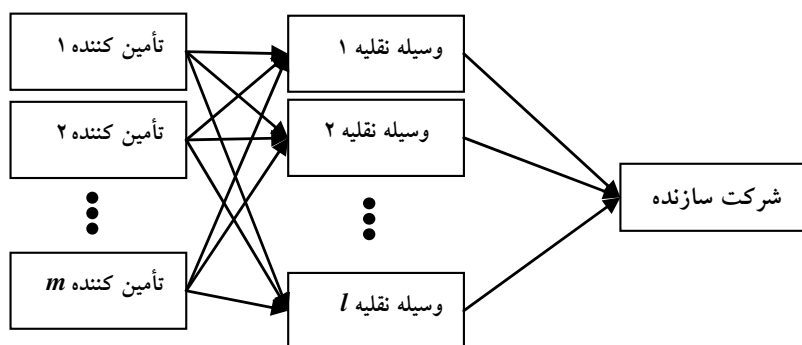
M : یک عدد حقیقی بسیار بزرگ

تأمین‌کنندگان دارای ظرفیتهای تولید متفاوتی هستند و برخی از آنها ممکن است به علت دارا بودن تجهیزات و ماشین آلات بیشتر، سرعت تولید بیشتری را نسبت به سایر تأمین‌کنندگان داشته و مواد و اقلام مورد نیاز کارخانه سازنده را سریع‌تر تولید کنند.

مواد و قطعاتی که از تأمین‌کنندگان به شرکت سازنده ارسال می‌گردند، توسط وسائط نقلیه مختلفی حمل می‌شوند. فرض می‌شود که تعداد l وسیله نقلیه که دارای ظرفیت متفاوتی برای حمل کالاها هستند، ناوگان حمل‌ونقل زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهند. میزان ظرفیت اشغال شده توسط هر کالا یکسان فرض می‌شود که این ظرفیت می‌تواند بر اساس حجم یا وزن تعیین شود. همچنین وسائط نقلیه مختلف ممکن است سرعتهای متفاوتی در حمل مواد داشته باشند که این سرعت در کل مسیر ثابت فرض می‌شود.

هر وسیله نقلیه پس از حمل کالا از شرکتهای تأمین‌کننده به شرکتهای سازنده از مسأله حذف نمی‌شود، بلکه می‌تواند دوباره مورد استفاده قرار بگیرد. در این حالت وسیله نقلیه باید به ناحیه جغرافیایی که تأمین‌کنندگان در آن قرار دارند بازگردد و سپس مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه زمان برگشت نیز باید در زمانبندی مورد توجه قرار گیرد. هر وسیله نقلیه می‌تواند قطعات تولید شده توسط چندین تأمین‌کننده مختلف را در یک محموله حمل کند. این امر سبب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و استفاده موثر از آنها می‌شود. همچنین هر وسیله نقلیه می‌تواند قطعات یا مواد مورد نیاز برای تکمیل چند سفارش را در یک محموله به شرکت سازنده حمل کند.

فرض می‌شود که تأمین‌کنندگان تقریباً در یک ناحیه جغرافیایی قرار دارند و در نتیجه مسافت آنها تا شرکت سازنده یکسان در نظر گرفته می‌شود. هر چند در عمل ممکن است تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی متفاوتی پراکنده شده باشند، اما در این



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین

هر کار در مرحله اول و زمان بارگذاری آن در مرحله حمل و نقل را بیان می‌کند. مجموعه محدودیت (۶) رابطه بین زمان آماده بودن وسیله نقلیه برای حرکت به سمت ناحیه تأمین کنندگان و زمان بارگذاری هر کار را در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت (۷) زمان آماده بودن هر وسیله نقلیه برای حمل محموله اول خود را برابر صفر تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت (۸) رابطه بین زمان بارگذاری هر کار با زمان تکمیل آن در مرحله دوم را با توجه به مسافت بین تأمین کنندگان تا شرکت سازنده در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۹) اختصاص کار i به یک وسیله نقلیه و به یک محموله از آن وسیله تضمین می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) کوچک تر بودن مجموع ظرفیت‌های اشغالی توسط کارهای هر محموله از ظرفیت وسیله نقلیه‌ای که محموله روی آن حمل می‌شود را در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۱۱) رابطه تساوی بین زمان تکمیل کارهای تخصیص داده شده به یک وسیله نقلیه و زمان آماده بودن آن وسیله نقلیه برای جمع‌آوری کارهای تخصیص داده شده به محموله بعدی را بیان می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۲) عدم اختصاص کارها به محموله $b+1$ از وسیله نقلیه k در صورتی که به محموله b آن کاری تخصیص داده نشده باشد را در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۱۳) C_{\max} را با توجه به زمان تکمیل کارها تعیین می‌کند.

گری و همکاران [۱۵] نشان دادند که پیچیدگی مسأله $C_{\max} | F3 |$ از نوع NP-hard است و از آنجا که مسأله مورد بررسی در این تحقیق تعمیم یافته مسأله $C_{\max} | F3 |$ است (وقتی تعداد وسائط نقلیه و تعداد تأمین کنندگان برابر ۱ باشد) و همچنین سرعت تولید تأمین کننده و سرعت حمل و ظرفیت وسیله نقلیه برابر ۱ باشد، بنابراین حداقل از نوع NP-hard خواهد بود. در نتیجه پیدا کردن جواب بهینه در زمان معقول برای مسأله غیر ممکن است و باید از راه‌حلهای ابتکاری یا فرا ابتکاری برای حل مسأله استفاده کرد. به علت اینکه مسأله مورد بررسی در این تحقیق به نوعی تعمیم مسأله زمانبندی ماشینهای موازی^{۲۰} نیز است، همین نتیجه را می‌توان از NP-hard بودن پیچیدگی مسأله P / C_{\max} نیز به دست آورد [۱۶]. در این مقاله از یک الگوریتم ژنتیک که دارای کروموزومهایی با ساختار متغیر است، برای حل مسأله استفاده می‌شود.

همچنین متغیرهای تصمیم مدل ریاضی ارایه شده عبارتند از:
 $C_{1i}(C_{2i})$: زمان تکمیل کار i در مرحله اول (مرحله دوم)
 C'_i : زمان بارگذاری کار i ام روی وسائط نقلیه
 C_{\max} : حداکثر زمان تکمیل کارها در مرحله آخر (makespan)
 av_{kb} : زمانی که وسیله نقلیه k ام آماده حرکت از شرکت سازنده به سمت ناحیه تأمین کنندگان، جهت بارگیری کارهای متعلق به محموله b ام خود است.
 X_{si} : اگر کار i ام به تأمین کننده k ام تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.
 y_{iv} : اگر در مرحله تأمین کنندگان، کار i نسبت به کار l اولویت داشته باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است
 Z_{kib} : اگر کار i به b امین محموله از وسیله نقلیه k تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.
 اگر p_{ij} بیانگر زمان پردازش کار i در مرحله j باشد زمان واقعی پردازش کار i در مرحله j از رابطه $\frac{P_{ij}}{v}$ به دست می‌آید.
 اگر $j=1$ آنگاه v سرعت تولید تأمین کننده‌ای است که قطعات مورد نیاز برای تولید محصول i به آن سفارش داده شده است.
 اگر $j=2$ آنگاه v سرعت حمل وسیله نقلیه‌ای است که محموله مورد نیاز برای تولید محصول i ام به آن تخصیص داده شده است.
 اگر $j=3$ آنگاه v نشان‌دهنده سرعت تولید در شرکت سازنده است. استفاده از این تعریف برای سرعت ماشین آلات توسط کیپرسز و کولاماس [۱۴] پیشنهاد شده است. همچنین حداکثر تعداد محموله‌های مربوط به یک وسیله نقلیه برابر تعداد کارها (n) است. این حالت وقتی رخ می‌دهد که تمام کارها به یک وسیله نقلیه تخصیص داده شوند و ظرفیت آن وسیله نقلیه برابر ۱ باشد.
 مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله مورد بررسی، در زیر آورده شده است.
 مجموعه محدودیت‌های (۱) تضمین می‌کند که هر کار تنها به یک تأمین‌کننده تخصیص یابد. مجموعه محدودیت‌های (۲) ارتباط بین تاریخ تکمیل هرکار در مرحله تأمین کنندگان را با سرعت تولید تأمین کنندگان و مدت زمان مورد نیاز برای هرکار، در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۳) فرض عدم انجام همزمان چند کار توسط یک تأمین کننده را بیان می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۴) مقداری از متغیرهای زائد مسأله را حذف می‌کند. مجموعه محدودیت (۵) رابطه بین زمان تکمیل

Min C_{max}

St:

$$\sum_{s=1}^m x_{si} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$c_{1i} \geq \frac{p_i}{v'_s} + M(1 - x_{si}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ s = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (2)$$

$$c_{1i} + M(2 + y_{iw} - x_{si} - x_{sw}) \geq c_{1w} + \frac{p_i}{v'_s} \quad \begin{matrix} i, w = 1, 2, \dots, n \\ i < w \end{matrix} \quad (3)$$

$$c_{1w} + M(3 - y_{iw} - x_{si} - x_{sw}) \geq c_{1i} + \frac{p_w}{v'_s} \quad s = 1, 2, \dots, m$$

$$y_{iw} = 0 \quad \begin{matrix} i, w = 1, 2, \dots, n \\ i \geq w \end{matrix} \quad (4)$$

$$c'_i \geq c_{1i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$c'_i \geq av_{kb} + dis/v_k - M(1 - z_{kib}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, l \\ b = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (6)$$

$$av_{k1} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (7)$$

$$c_{2i} \geq c'_i + dis/v_k - M(1 - \sum_{b=1}^n z_{kib}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, l \\ b = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^l \sum_{b=1}^n z_{kib} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{kib} \leq Cap_k \quad \begin{matrix} k = 1, 2, \dots, l \\ b = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (10)$$

$$av_{k(b+1)} \leq c_{2i} + M(1 - z_{kib}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, l \end{matrix} \quad (11)$$

$$av_{k(b+1)} \geq c_{2i} - M(1 - z_{kib}) \quad \begin{matrix} b = 1, 2, \dots, (n-1) \end{matrix}$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ki(b+1)} \leq M \times \sum_{i=1}^n z_{kib} \quad \begin{matrix} k = 1, 2, \dots, l \\ b = 1, 2, \dots, (n-1) \end{matrix} \quad (12)$$

$$C_{max} \geq c_{2i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\begin{matrix} \in \{0,1\} X_{si} \\ \in \{0,1\} y_{iw} \\ \in \{0,1\} Z_{kib} \end{matrix} \quad \begin{matrix} i, w, b = 1, 2, \dots, n \\ s = 1, 2, \dots, m \\ k = 1, 2, \dots, l \end{matrix} \quad (14)$$

۴. الگوریتم ژنتیک پویا

همان گونه که ذکر شد به علت NP-hard بودن مسأله، استفاده از روشهای دقیق برای حل مسأله در زمان معقول ممکن نیست و باید از روشهای ابتکاری یا فراابتکاری برای حل مسأله استفاده کرد. به علت اینکه در ادبیات موضوع استفاده از الگوریتم ژنتیک از اقبال بیشتری نسبت به سایر روشهای فراابتکاری برخوردار بوده است، بنابراین در این مقاله سعی شد از الگوریتم ژنتیک به منظور حل مسأله استفاده شود. در این قسمت به منظور حل مسأله یک الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود که الگوریتم ژنتیک پویا نامیده شده است و دارای کروموزومهایی با ساختار متغیر است. ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک ارائه شده دو بعدی است. بعد عمودی نشان دهنده تأمین کنندگان و وسائط نقلیه و بعد افقی نشان دهنده سفارشهای تخصیص یافته و ترتیب آنها به هر یک از تأمین کنندگان و وسائط نقلیه است. برای هر یک از تأمین کنندگان و وسائط نقلیه یک رشته آرایه وجود دارد که طول و ترتیب عناصر آن نشاندهنده تعداد و ترتیب کارهای تخصیص یافته به آن تأمین کننده یا وسیله نقلیه است. اگر تعداد کارهای تخصیص یافته به تأمین کنندگان یا وسیله نقلیه کم یا زیاد شود، طول رشته متناظر نیز کم یا زیاد خواهد شد. وجه تمایز الگوریتم ژنتیک پویا نسبت به الگوریتمهای ژنتیک کلاسیک به این صورت است که در الگوریتمهای ژنتیک کلاسیک طول کروموزومها ثابت است، در صورتی که در الگوریتم ژنتیک ارائه شده کروموزوم از چند رشته تشکیل شده است که طول آنها متغیر است.

جدول ۱. کارهای تخصیص یافته و ترتیب آنها

تأمین کنندگان ۱	۱
تأمین کنندگان ۲	۲→۳→۵
تأمین کنندگان ۳	۴
وسيله نقلیه ۱	۵→۳→۱→۴
وسيله نقلیه ۲	۲

به منظور توضیح بیشتر، فرض کنید ۵ کار، ۳ تأمین کننده و ۲ وسیله نقلیه داریم. وسیله نقلیه اول قادر به حمل دو محموله و وسیله نقلیه دوم قادر به حمل سه محموله است. فرض کنید تخصیص کارها به تأمین کنندگان و وسائط نقلیه و همچنین اولویت پردازش و حمل آنها به صورت جدول ۱ باشد. آنگاه

ساختار کروموزومی که بیان کننده تخصیص جدول ۱ باشد، به صورت نشان داده شده در شکل ۲ خواهد بود. در ادامه، سایر پارامترها و عملگرهای این الگوریتم ژنتیک شرح داده می‌شوند.

تأمین کنندگان ۱	۱			
تأمین کنندگان ۲	۲	۳	۵	
تأمین کنندگان ۳	۴			
وسيله نقلیه ۱	۵	۳	۱	۴
وسيله نقلیه ۲	۲			

شکل ۲. ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک پویا

جمعیت اولیه: اندازه جمعیت اولیه توسط پارامتر *popsiz* مشخص می‌شود.

تابع شایستگی: تابع شایستگی برای هر کروموزوم برابر $(Max C_{max} - C_{max}) / Max C_{max}$ است، که C_{max} از زمانبندی کروموزوم مربوط به دست می‌آید و $Max C_{max}$ بیانگر حداکثر مقدار C_{max} در بین کروموزومهای جمعیت فعلی است.

عمل تلفیق: در الگوریتم ژنتیک ارائه شده از عملگر تلفیق یکنواخت پارامتری شده^{۲۱} استفاده شده است. تعداد عملیات تلفیق در هر تکرار ثابت و توسط ضریبی از *popsiz* به نام *percross* که از پارامترهای الگوریتم ژنتیک است، مشخص می‌شود.

عمل جهش: در الگوریتم ژنتیک ارائه شده ابتدا یک کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و عملگرهای جهش معکوس^{۲۲} و تعویض^{۲۳} روی آن اجرا می‌شوند. بعد از هر عمل جهش به زمانبندی کروموزوم حاصل پرداخته می‌شود و مقدار تابع شایستگی آن محاسبه می‌شود. تعداد تکرار عملگر جهش در هر تکرار ثابت و توسط ضریبی از *popsiz* بنام *permut* مشخص می‌گردد که از پارامترهای الگوریتم است.

انتخاب نسل بعدی: در هر تکرار جمعیت نهایی پس از اعمال عملگرهای تلفیق و جهش به اندازه $popsiz \times (1 + permut + percross)$ است. برای انتخاب جمعیت بعدی ابتدا این کروموزومها بر اساس تابع شایستگی شان به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند. پس از آن تعداد *popsiz* × *best* کروموزوم، که *best* از پارامترهای این الگوریتم است، از کروموزومهایی که دارای بهترین مقدار تابع شایستگی هستند، برای نسل بعد انتخاب می‌شوند. سایر

می‌شود، در حالی که مسافت از توزیع $U [20,40]$ تبعیت می‌کند. در این حالت بار کاری مرحله دوم از مرحله اول بیشتر است. این در حالی است که در حالت سوم زمان پردازش کارها از توزیع $U [20,40]$ تبعیت می‌کند، اما مسافت از توزیع $U [1,20]$ انتخاب می‌شود. برای پارامتر ظرفیت وسائط نقلیه دو سطح در نظر گرفته شده است. در سطح اول ظرفیت وسائط نقلیه از توزیع یکنواخت $U [5,10]$ انتخاب می‌شود در حالی که در سطح دوم ظرفیت وسائط نقلیه از توزیع یکنواخت $U [10,20]$ تبعیت می‌کند. سرعت تولید تأمین کنندگان و سرعت حمل وسائط نقلیه از توزیع یکنواخت $U [1,4]$ تبعیت می‌کند. از ترکیب سطوح مختلف برای پارامترهای مسئله ۵۴ ($3 \times 3 \times 3 \times 2 \times 1$) نوع مسئله به وجود می‌آید که به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. این ۵۴ مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک پویا حل شده‌اند و نتایج زیر به دست آمده است. کلیه برنامه‌های کامپیوتری این تحقیق به وسیله زبان برنامه نویسی *Visual Basic6* نوشته و توسط یک رایانه *Intel Core2, 1.8 GHz* اجرا شده‌اند.

۵-۲ ارزیابی الگوریتم ژنتیک پویا

الگوریتم ژنتیک پویا دارای ۶ پارامتر *popsize*، *termination*، *permut percross* و *best* است. کیفیت جوابها و زمان حل در الگوریتم ژنتیک پویا وابسته به مقادیر مربوط به این پارامترها است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و به صورت تجربی، برای پارامتر *popsize* مقدار ۱۰۰ مناسب تشخیص داده شده است. همچنین مقدار ۱۰ برای پارامتر *termination* مقدار ۰/۷ برای پارامتر *r*، مقدار ۰/۶ برای پارامتر *percross* مقدار ۰/۸ برای پارامتر *permut* و مقدار ۰/۷ برای پارامتر *best* مناسب تشخیص داده شده است.

به ازای مقادیر فوق برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک، هر یک از ۵۴ مثال تصادفی ایجاد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک پویا حل شد که نتایج به دست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. به علت اینکه این مسئله تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است، معیار مناسبی جهت ارزیابی جوابهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پویا وجود ندارد. بنابراین این الگوریتم با روش جستجوی تصادفی^{۲۵} مقایسه شده است. برای ارزیابی جوابهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پویا، برای هر مسئله ۱۰۰۰۰ جواب تصادفی ایجاد شد و بهترین

*(popsize-best*popsize)* کروموزوم باقیمانده نیز به صورت تصادفی از بین جمعیت قبلی انتخاب می‌شوند. معیار توقف: معیار توقف برای الگوریتم به این صورت است که اگر بهترین مقدار تابع شایستگی کروموزومها در چند نسل متوالی بهبودی نیابد، الگوریتم به پایان می‌رسد. تعداد این تکرارهای متوالی توسط پارامتری به نام *termination* مشخص می‌شود.

۵. نتایج محاسباتی

در این بخش ابتدا مسائل مختلف، با اندازه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته و سپس به مقایسه و ارزیابی الگوریتمهای ارائه شده با یکدیگر پرداخته می‌شود.

۵-۱ تولید داده‌های تصادفی برای مسئله

مسئله مورد بررسی دارای پارامترهای مختلفی است که برای برخی از آنها سطوحی چون بالا، پایین و متوسط در نظر گرفته شده و به پنج دسته تقسیم شده‌اند. این پنج دسته عبارتند از: (۱) تعداد کارها، (۲) تعداد تأمین کنندگان و وسائط نقلیه، (۳) زمان پردازش و مسافت حمل، (۴) ظرفیت وسائط نقلیه، (۵) سرعت تولید تأمین کنندگان و سرعت حمل وسائط نقلیه برای پارامتر تعداد کار سه مقدار ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. برای تعداد تأمین کنندگان و وسائط نقلیه سه حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول متعادل و حالات دوم و سوم غیر متعادل نامیده می‌شوند. در حالت اول تعداد تأمین کنندگان و وسائط نقلیه از توزیع یکنواخت $U [4,12]$ انتخاب می‌شود. در حالات دوم تعداد تأمین کنندگان از توزیع $U [1,8]$ پیروی می‌کند در حالی که تعداد وسائط نقلیه از توزیع $U [8,16]$ انتخاب می‌شود. در این حالت در مرحله اول گلوگاه^{۲۴} وجود دارد. این در حالی است که در حالت سوم تعداد تأمین کنندگان از توزیع $U [8,16]$ انتخاب می‌شود، ولی تعداد وسائط نقلیه از توزیع $U [1,8]$ تبعیت می‌کند. برای پارامتر زمان پردازش و مسافت نیز سه حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول متعادل و حالات دوم و سوم غیر متعادل نامیده می‌شوند. در حالت اول زمان پردازش کارها و همچنین مسافت از توزیع یکنواخت $U [10,30]$ تبعیت می‌کنند. در حالت دوم زمان پردازش کارها از توزیع $U [1,20]$ انتخاب

یکپارچگی زمانبندی حمل و نقل در زنجیره تأمین با وسائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت

نسبت به روش جستجوی تصادفی می‌دهد (PBR)^{۲۶} و (۵) همچنین درصد دفعاتی که الگوریتم ژنتیک پویا جوابهایی یکسان با روش جستجوی تصادفی می‌دهد (PER)^{۲۷} می‌شود. نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم ژنتیک پویا نسبت به روش جستجوی تصادفی در تمام حالات است. با بررسی نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد کارها، میانگین جوابهای به دست آمده از هر دو روش افزایش پیدا می‌کند.

جواب به دست آمده از این ۱۰۰۰۰ جواب تصادفی به عنوان معیاری برای ارزیابی جوابهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۲ شامل چهار معیار (۱) میانگین جوابهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پویا، (۲) میانگین جوابهای به دست آمده از روش جستجوی تصادفی، (۳) تفاوت این دو مقدار (Gap) (۴) درصد دفعاتی که الگوریتم ژنتیک پویا جوابهای بهتری را

جدول ۲. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک پویا با روش جستجوی تصادفی

تعداد کارها		
۱۰۰	۵۰	۱۰
۲۰۴/۹۷	۸۸/۹۶	۲۵/۱۳
۲۲۱/۴۳	۹۹/۲۱	۲۵/۶۰
۱۶/۴۶	۱۰/۲۵	۰/۴۷
۸۳/۳۳	۹۴/۴۴	۵۵/۵۶
۵/۵۶	۵/۵۶	۲۲/۲۲
تعداد تأمین کنندگان و وسائط نقلیه		
حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱
۷۴/۵۹	۱۴۴/۹۷	۹۹/۵۲
۸۷/۲۹	۱۵۱/۳۶	۱۰۷/۵۹
۱۲/۷	۶/۳۹	۸/۰۷
۸۸/۸۹	۶۱/۱۱	۸۳/۳۳
۰	۳۳/۳۳	۰
زمان پردازش		
حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱
۱۳۸/۶۵	۸۰/۱۳	۱۰۰/۳۰
۱۴۳/۸۴	۹۰/۱۹	۱۱۲/۲۱
۵/۱۹	۱۰/۰۶	۱۱/۹۱
۶۶/۶۷	۸۳/۳۳	۸۳/۳۳
۱۱/۱۱	۱۱/۱۱	۱۱/۱۱
ظرفیت وسائط نقلیه		
U[10,20]		U[5,10]
۸۹/۴۹		۱۲۳/۲۳
۹۵/۴۵		۱۳۵/۳۸
۵/۹۶		۱۲/۱۵
۷۷/۷۸		۷۷/۷۸
۷/۴۱		۱۴/۸۱
نتایج مربوط به کل مسائل تصادفی		
	۱۰۶/۳۶	
	۱۱۵/۴۱	
	۹/۰۵	
	۷۷/۷۸	
	۱۱/۱۱	

شده است. (تمام کارهای متعلق به یک بسته باید به یک ماشین تخصیص داده شوند). توالی کارهای درون هر دسته مهم نیست. گام ۴: هنگامی که یک وسیله نقلیه آماده بارگیری شد، هر دسته تکمیل شده اما تحویل داده نشده را توسط یک وسیله نقلیه که زودتر از سایر وسائط نقلیه آزاد می‌شود، ارسال کنید. اگر چند دسته آماده ارسال هستند، اولویت ارسال با دسته‌ای است که دارای کوچکترین اندیس است.

در این حالت نیز ۵۴ مثال تصادفی با ساختار قبلی ذکر شده ایجاد شده و توسط الگوریتم ژنتیک پویا و الگوریتم HI حل شده‌اند. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول میانگین جوابها، میانگین زمانهای حل مسئله، درصد دفعاتی که یک الگوریتم جوابهای بهتری را نسبت به الگوریتم دیگر می‌دهد (PBR) و همچنین درصد دفعاتی که یک الگوریتم جوابهایی یکسان با الگوریتم دیگر می‌دهد (PER) برای هر دو الگوریتم ذکر شده است. نتایج نشان داده شده در جدول ۳ نشان دهنده برتری الگوریتم ژنتیک پویا نسبت به الگوریتم HI از نظر کیفیت جواب است. هر چند زمان حل مسئله در این الگوریتم از HI بیشتر است اما در تمامی موارد این اختلاف زمانی کمتر از ۲ دقیقه است و در مقایسه با کیفیت بهتر جواب می‌توان آنرا قابل قبول دانست و در موارد کاربردی از آن استفاده کرد.

جدول ۳. مقایسه الگوریتم ژنتیک پویا با الگوریتم HI

معیار	الگوریتم HI	الگوریتم ژنتیک پویا	Gap
میانگین جوابها	۲۱۲/۱۲	۱۴۸/۲۳	۶۳/۸۹
میانگین زمان حل در الگوریتم ژنتیک پویا (بر حسب ثانیه)	۰	۱۱۷	۱۱۷
PBR	۱/۸۵	۹۶/۳۰	
PER	۱/۸۵	۱/۸۵	

۶. خلاصه، نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آتی

در این مقاله مسئله زمانبندی در یک زنجیره تأمین سه مرحله‌ای با تأکید روی یکپارچگی مراحل آن، مورد بررسی قرار گرفت. مرحله اول شامل تأمین‌کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل‌ونقل کالاها و مرحله سوم شامل یک شرکت سازنده محصولات نهایی می‌شود. تابع هدف کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها است.

همچنین هنگامی که تعداد تأمین‌کنندگان زیاد باشد میانگین جوابها کاهش می‌یابد، اما در صورتی که در این مرحله گلوگاه وجود داشته باشد میانگین جوابها افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که زمان پردازش کارها در مرحله تأمین‌کنندگان کم باشد، میانگین جوابها نیز کاهش می‌یابد. با افزایش ظرفیت حمل هر یک از وسائط نقلیه نیز میانگین جوابها کاهش می‌یابد. به منظور ارزیابی بیشتر الگوریتم ژنتیک پویا با تعمیم روش ارایه شده توسط چانگ و لی [۵] نیز مقایسه شده است. مسأله مورد بررسی توسط چانگ و لی [۵] نزدیک‌ترین مسأله در ادبیات موضوع با مسأله مورد بررسی در این تحقیق است. آنها حالت وجود تنها یک وسیله نقلیه و دو تأمین‌کننده را مورد بررسی قرار داده‌اند. به این منظور روش ارایه شده توسط آنها برای حالت خاص وجود چند وسیله نقلیه با سرعتها و ظرفیتهای یکسان و همچنین چند تأمین‌کننده با سرعتهای یکسان تعمیم داده شده است. الگوریتم تعمیم داده شده HI نامگذاری شده است و در دو فاز مسأله را حل می‌کند.

در فاز اول توسط یک الگوریتم به نام FDD، کارها دسته بندی می‌گردند. این الگوریتم به صورت زیر است:

یک توالی تصادفی از کارها را در نظر بگیرید.

کاراول را براساس توالی به اولین دسته (B_1) اختصاص دهید. به همین ترتیب λ مین کار را در نظر گرفته و آنرا به دسته دارای کوچک‌ترین اندیس اختصاص دهید، به طوری که تعداد کارهای تخصیص داده شده به هر دسته از ظرفیت دسته بیشتر نشود.

در فاز دوم کارها براساس دسته‌بندی انجام شده در فاز اول به صورت زیر زمانبندی می‌شوند:

گام ۱: کارها را به بسته‌ها به وسیله الگوریتم FFD اختصاص دهید. فرض کنید تعداد کل دسته‌هایی نتیجه شده برابر U_{HI} باشد.

گام ۲: به ازای $U_{HI}; \dots; 2; 1=b$ مجموع زمانهای پردازش کارهای متعلق به دسته B_k را محاسبه کنید و آنرا با P_k نشان دهید. بسته‌ها را مجدداً طوری اندیس گذاری کنید که

$$P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_{H_2}$$

گام ۳: از B_1 شروع کرده و به ازای $U_{HI}; \dots; 2; 1=b$ به ترتیب کارهای درون دسته B_k را به یکی از m تأمین‌کننده موجود تخصیص دهید که کمتر از ماشینهای دیگر بارگذاری

- 9- Pulp mill
- 10- Column generation
- 11- Shortest path problem
- 12- Area
- 13- Mixed integer programming
- 14- Variable neighborhood search meta heuristic
- 15- Distributed scheduling problem
- 16- Dominated gene
- 17- Sustainability
- 18- Multi compartment
- 19- Outsourcing
- 20- Parallel machines
- 21- Parameterized uniform operator
- 22- Reverse operator
- 23- Swap operator
- 24- Bottleneck
- 25- Random search
- 26- Percentage of better results
- 27- Percentage of equivalent results

۸. مراجع

1. Hall, N.G. and Potts, C.N. (2000) "Supply chain scheduling: Batching and delivery", Working Paper, Department of Management Sciences, The Ohio State University, Columbus, OH.
2. Lee, Y.H., Jeong, C.J. and Moon, C. (2002) "Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain", Computer and Industrial Engineering, Vol. 43, pp. 351-374.
3. Gnani, M.G., Iavagnilio, R., Mossa, G., Mummolo, G. and DiLeva, A. (2003) "Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modeling: A case study from the automotive industry", International Journal Production Economics, Vol. 85, pp. 251-262.
4. Ryu, J.H., Dua, V. and Pistikopoulos, E.N. (2004) "A bi-level programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty", Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 1121-1129.
5. Bredstrom, D., Lundgren, J.T., Ronnqvist, M., Carlsson, D. and Mason, A. (2004) "Supply chain optimization in the pulp mill industry-IP models, column generation and novel constraint branches", European Journal of Operational Research, Vol. 156, pp. 2-22.
6. Chang, Y.C., Lee, C.Y. (2004) "Machine scheduling with job delivery coordination", European Journal of Operational Research, Vol. 158, pp. 470-487.
7. Berning, G., Brandenburg, M., Gürsoy, K., Kussi, J.S., Mehta, V. and Tölle, F.J. (2004) "Integrating collaborative planning and supply

ابتدا مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله نام برده ارائه شد و یک الگوریتم ژنتیک بنام الگوریتم ژنتیک پویا ارائه شد که دارای کروموزومهایی با ساختار متغیر است. به منظور بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پویا مسأله‌های زیادی توسط آن حل گردید. به علت اینکه این مسأله تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است و معیار مناسبی برای ارزیابی الگوریتم ژنتیک ارائه شده وجود ندارد، برای ارزیابی جوابهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پویا، نتایج به دست آمده با نتایج روش جستجوی تصادفی مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده برتری الگوریتم ژنتیک پویا است.

نزدیک‌ترین مسأله موجود در ادبیات موضوع به مسأله مورد بررسی در این تحقیق، مسأله چانگ و لی [۶] است. به منظور ارزیابی بیشتر الگوریتم ژنتیک پویا، روش ارائه شده توسط چانگ و لی برای حالت خاص وجود چند وسیله نقلیه با سرعتها و ظرفیتهای یکسان و همچنین چند تأمین‌کننده با سرعتهای یکسان تعمیم داده شده است. مسأله مورد بررسی در این تحقیق تعمیم داده شد و با الگوریتم ژنتیک پویا مقایسه شد. در این حالت نیز نتایج مقایسه، نشان دهنده برتری الگوریتم ژنتیک پویا است.

اضافه کردن این محدودیت که هر دسته از تأمین‌کنندگان توانایی ساخت قطعات برای برخی از سفارشها را داشته باشند می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آتی باشد. همچنین اضافه کردن حالت مونتاژ در رابطه شرکت سازنده و تأمین‌کنندگان می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد. در نظر گرفتن تأمین‌کنندگانی که در نواحی جغرافیایی مختلفی قرار دارند را نیز می‌توان حوزه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی در نظر گرفت. ارائه روشهای فراابتکاری دیگر نظیر روش جستجو ممنوع، شبیه‌سازی تبرید و ... برای حل این دسته از مسائل می‌تواند به عنوان زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات بیشتر در نظر گرفته شود.

۷. پانویس‌ها

- 1- Globalization
- 2- Coordination
- 3- Global optimum
- 4- Fabrication
- 5- Multi site manufacturing systems
- 6- Mixed integer programming
- 7- Simulation
- 8- Two level programming

12. Zhou, Z., Cheng, S., Hua, B. (2000) "Supply chain optimization of continuous process industries with sustainability considerations", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 24, pp. 1151-1158.
13. Jetlund, A.S., Karimi, I.A. (2004) "Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 1267-1283.
14. Kyparisis, G.J. and C. Koulamas. (2006) "Flexible flow shop scheduling with uniform parallel machines", *European journal of operational research*, Vol. 168, pp. 985-997.
15. Garey, M.R., Johnson, D.S. and Sethi, R. (1976) "The complexity of flow shop and job shop scheduling", *Mathematics of Operation Research*, Vol. 1, pp. 117-129.
16. Garey, M.R., Johnson, D.S. (1978) "Strongly NP-completeness results: motivation examples and implication", *Journal of Association for Computing Machinery*, Vol. 25, pp. 499-508.
- chain optimization for the chemical process industry (I)-methodology", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 913-927.
8. Lejeune, M.A. (2006) "A variable neighborhood decomposition search method for supply chain management planning problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, 959-976.
9. Selvarajah, E., Steiner, G. (2006) "Batch scheduling in a two-level supply chain-a focus on the supplier", *European Journal of Operational Research*, Vol. 173, 226-240.
10. Chan, F.T.S., Chung, S.H., Chan, P.L.Y. (2005) "An adaptive genetic algorithm with dominated genes for distributed scheduling problems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 29, pp. 364-371
11. Chauhan, S.S., Valery, G., Jean-Marie, P. (2007) "Scheduling in supply chain environment", *European Journal of Operational Research*, 183, 961-970.