

# ارائه یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله یکپارچگی مسیریابی وسایل نقلیه و زمان بندی تولید در زنجیره تأمین (مطالعه موردی: زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی)

محمدعلی بهشتی نیا<sup>۱\*</sup>، آتنا اعرابی<sup>۲</sup>

۱. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

۲. کارشناس ارشد مدیریت اجرایی (MBA)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۰۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۰۱/۰۹، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۳/۰۴)

## چکیده

این پژوهش، به بررسی مدلی برای یکپارچگی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در یک زنجیره تأمین با مسئله تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و تعیین توالی تولید در آن‌ها می‌پردازد. زنجیره تأمین مورد بررسی شامل تعدادی تأمین‌کننده، چند وسیله نقلیه و یک سازنده محصولات نهایی است. فرض بر آن است که شرکت سازنده، مواد اولیه مورد نیاز تأمین‌کنندگان را به صورت یک‌جا خریداری کند. این امر موجب استفاده از فرصت تخفیف و در نتیجه، کاهش قیمت تمام‌شده محصولات می‌شود. به علاوه، شرکت سازنده از کیفیت مواد اولیه اطمینان می‌یابد و قدرت مدیریت بیشتری بر زنجیره تأمین خواهد داشت. یک ناوگان حمل‌ونقل متشکل از وسایل نقلیه با ظرفیت‌ها و سرعت‌های متفاوت، حمل مواد اولیه خریداری شده به تأمین‌کنندگان و جمع‌آوری قطعات تکمیل شده از آن‌ها را با هدف کاهش میزان دیرکرد در تحویل سفارش‌ها برعهده دارد. پس از ارائه مدل ریاضی، برای حل این مسئله، الگوریتم ژنتیک پویا پیشنهاد شده است. این الگوریتم، بر زنجیره تأمین یک شرکت تولیدکننده تجهیزات پزشکی پیاده شد و مقایسه نتایج الگوریتم با نتایج واقعی صورت گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم ژنتیک پویا، به کاهش میانگین دیرکرد، از ۹/۴۴ روز به ۲/۱۱ روز منجر می‌شود. مقایسه عملکرد الگوریتم ژنتیک پویا با جواب بهینه در مسائل با مقیاس کوچک و الگوریتم پیشنهادی برای نزدیک‌ترین مسئله در ادبیات موضوع، نشانگر کارایی بالای الگوریتم ژنتیک پویاست.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، تجهیزات پزشکی، زمان بندی، زنجیره تأمین، مسیریاب.

## مقدمه

تأمین‌کننده مواد اولیه باشد [۲]. جهانی شدن و افزایش رقابت در بازار، شرکت‌ها را به سوی زنجیره تأمین سوق داد که به نیازهای مشتری پاسخ دهد؛ بنابراین، شرکت‌ها برای اینکه از دایره رقابت خارج نشوند، باید در کنار بهبود مستمر خدمت‌رسانی به مشتری‌ها، به صورت یکپارچه و هماهنگ عمل کنند. این مقاله، با هدف کمینه‌سازی مجموع تأخیر<sup>۴</sup> در تحویل سفارش‌ها، به بررسی یکپارچه‌سازی زمان بندی تولید و حمل‌ونقل بین یک شرکت تولیدکننده تجهیزات پزشکی و تأمین‌کنندگان می‌پردازد. ناوگان حمل‌ونقل در نظر گرفته شده در مسئله، وظیفه جمع‌آوری قطعات اولیه از تأمین‌کنندگان<sup>۵</sup> و تحویل آن‌ها به شرکت سازنده را برعهده دارند. علاوه بر این، فرض می‌شود که برخی مواد اولیه، به وسیله خود شرکت سازنده تهیه و در اختیار

محیط پویا و در حال تغییر حاکم بر تجارت امروز، فضایی به شدت رقابتی پدید آورده است؛ به گونه‌ای که سازمان‌ها برای بقا و موفقیت نیازمند ارائه روش‌های نوین و کارا در همه ابعاد کاری خود هستند. از این رو، مدیریت زنجیره تأمین، به منزله یکی از عوامل مؤثر در کیفیت عملکرد سازمان، توجهی ویژه را به خود معطوف داشته است [۱]. مدیریت زنجیره تأمین<sup>۱</sup>، مدیریت جریان مواد، اطلاعات و نقدینگی از تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان، عمده‌فروشان، خرده‌فروشان و مشتریان است. همچنین مدیریت زنجیره تأمین شامل هماهنگی<sup>۲</sup> و یکپارچه‌سازی<sup>۳</sup> این جریان‌ها در داخل یک شرکت یا میان چندین شرکت است. زنجیره تأمین ممکن است شامل لایه‌های متفاوتی مانند مشتری، خرده‌فروش، توزیع‌کننده (عمده‌فروش)، تولیدکننده و

عمومی بررسی کردند و مدلی ریاضی برای حل مسئله ارائه دادند. ییمر و دمیرلی [۱۲] یک الگوریتم ژنتیک به منظور زمان بندی در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای ارائه کردند. آن‌ها برای بهینه‌سازی تأمین و مونتاژ قطعات و نیز زمان بندی توزیع، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط نیز معرفی کردند. فهیم‌نیا و همکاران [۱۳] برای برنامه یکپارچه تولید-توزیع در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای با متغیرها و محدودیت‌های واقعی، از برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح استفاده کردند. اولریچ [۱۴] با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی<sup>۱</sup>، یکپارچگی زمان بندی ماشین‌آلات و مسیریابی وسایل نقلیه را مطالعه کرد. در این پژوهش، یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای بررسی شد. مرحله اول این زنجیره شامل یک محیط ماشین‌های موازی با زمان‌های آمادگی وابسته به ماشین و مرحله دوم شامل یک ناوگان وسایل نقلیه با ظرفیت‌های حمل متفاوت است. سلواراجاه و ژنگ [۱۵] زمان بندی زنجیره تأمین را بررسی کردند که در آن، یک تولیدکننده، مواد نیمه‌ساخته را از تأمین‌کنندگان در زمان‌های متفاوت دریافت می‌کند و کالاهای تکمیل شده را به صورت دسته‌ای به مشتریان تحویل می‌دهد. لو و همکاران [۱۶] به بررسی مسائل هماهنگی زمان بندی تولید و تحویل با ناوگان حمل و نقل نامتجانس پرداختند. چنگ و همکاران [۱۷] چند دسته از مسائل زمان بندی زنجیره تأمین را بررسی کردند. چانگ و همکاران [۱۸] به بررسی مسئله یکپارچگی زمان بندی تولید و توزیع پرداختند که تابع هدف مسئله، کمینه‌سازی هزینه کل شامل هزینه سطح خدمت و هزینه توزیع است. پژوهش‌های انجام شده را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی دسته بندی کرد. از نظر چگونگی در نظر گرفتن زمان، این تحقیقات را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱. تحقیقاتی که به حل مسئله در یک دوره زمانی پرداختند؛
۲. مطالعاتی که زمان را به صورت بسته‌های زمانی هفتگی، ماهانه و سالانه در نظر گرفتند؛
۳. پژوهش‌هایی که زمان را به صورت پیوسته در نظر داشتند. در این پژوهش‌ها، زمان تکمیل دقیق هر کار مشخص می‌شود.

از نظر در نظر گرفتن حمل و نقل، تحقیقات انجام شده را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱. آن‌ها که سیستم

تأمین‌کنندگان قرار داده می‌شود. وظیفه تحویل این مواد اولیه به تأمین‌کنندگان نیز برعهده همین ناوگان حمل و نقل است.

نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- بررسی مسئله زمان بندی یکپارچه حمل و نقل مواد اولیه از سازنده به تأمین‌کنندگان، تولید قطعات به وسیله تأمین‌کنندگان و حمل و نقل قطعات نیمه-ساخته به سازنده (سفرهای نوع تحویل و برداشت)؛
- ارائه مدل ریاضی برای مسئله مذکور؛
- ارائه یک الگوریتم ژنتیک<sup>۶</sup> با ساختار کروموزوم متغیر برای مسئله مذکور.

در ادامه این مقاله، ادبیات موضوع زمان بندی در زنجیره تأمین، تشریح مسئله و حل مسئله به وسیله الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی اعتبارسنجی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ادبیات موضوع

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه زمان بندی در زنجیره تأمین انجام گرفته است.

آورباخ و خو [۶] به بررسی مسائل زنجیره تأمین در محیط برخط<sup>۷</sup> پرداختند. آن‌ها در این تحقیق، مجاز بودند عملیات را به منظور کمینه‌سازی مجموع زمان‌های در جریان بودن کارها<sup>۸</sup> و هزینه‌های تحویل قطع کنند.

ذگردی و بهشتی‌نیا [۷] به یکپارچه‌سازی زمان بندی تولید و حمل و نقل در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای در زمان تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان پرداختند. پس از مدل سازی مسئله به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۹</sup>، از یک الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده شد. ساویک [۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله زمان بندی مونتاژ در یک زنجیره تأمین با افق برنامه‌ریزی بلندمدت ارائه کرد. سو و همکاران [۹] مسئله زمان بندی ماشین‌آلات را با هم‌زمانی تحویل سفارش‌ها بررسی کردند. آورباخ [۱۰] به بررسی زمان بندی برخط در زنجیره تأمین متشکل از یک کارخانه و چند مشتری با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی جریان کاری سفارش‌ها پرداخت. اسکولز ریتزر و همکاران [۱۱] یکپارچگی تولید و حمل و نقل را در یک زنجیره تأمین

- حمل‌ونقل را در نظر گرفته‌اند؛ ۲. آن‌ها که سیستم حمل‌ونقل را در نظر نگرفته‌اند (البته در نام و متن برخی از پژوهش‌ها از عنوان حمل‌ونقل استفاده شده است، اما آن را به‌صورت زمان یا هزینه‌ای ثابت در نظر گرفته‌اند و در عمل از محدودیت‌های حمل‌ونقل چشم‌پوشی کرده‌اند، اما در این پژوهش، این محدودیت‌ها در این دسته در نظر گرفته شده است). در ادامه به تشریح مسئله مورد بررسی پرداخته می‌شود.

## تعریف مسئله

### • مفروضات مسئله

- همان‌گونه که اشاره شد، این مقاله به بررسی مسئله زمان‌بندی یکپارچه در یک زنجیره تأمین شامل تعدادی تأمین‌کننده و یک شرکت سازنده می‌پردازد. تأمین‌کنندگان قطعات، محصولات نیم‌ساخته و شرکت سازنده، محصول نهایی را تولید می‌کنند. همچنین بخشی از مواد اولیه مورد نیاز تأمین‌کنندگان را شرکت سازنده تهیه و توزیع می‌کند. این امر موجب تجمیع تقاضای تأمین‌کنندگان می‌شود و شرکت سازنده می‌تواند از تخفیف‌های مقداری برای تهیه مواد اولیه استفاده کند. کاهش قیمت تمام‌شده مواد اولیه، سبب کاهش قیمت تمام‌شده محصول نهایی خواهد بود. در این حالت، توزیع مواد اولیه بین تأمین‌کنندگان و جمع‌آوری محصولات نیم‌ساخته به یک برنامه‌ریزی دقیق حمل‌ونقل نیاز دارد. از سوی دیگر، تخصیص سفارش‌ها به هر تأمین‌کننده و تعیین توالی تولید در آن‌ها نیز به پیچیدگی‌های مسئله می‌افزاید. سایر مفروضات مسئله به‌صورت زیرند:

- تعداد *No* سفارش وجود دارد. سفارش‌ها از دو نوع تحویل و برداشت هستند. سفارش‌های نوع تحویل شامل مواد اولیه است که باید از شرکت سازنده به تأمین‌کنندگان حمل شوند و سفارش‌های نوع برداشت شامل محصولات نیم‌ساخته‌ای هستند که باید از تأمین‌کنندگان به شرکت سازنده انتقال یابند. سفارش‌های نوع برداشت، به پردازش نزد تأمین‌کنندگان نیاز دارند. زمان مورد نیاز برای پردازش سفارش‌های نوع برداشت متفاوت است. اندازه هر سفارش (میزان ظرفیت اشغال شده به‌وسیله آن سفارش) نیز ممکن است با سفارش‌های دیگر متفاوت باشد.
- تعداد *Ns* تأمین‌کننده وجود دارد که وظیفه پردازش سفارش‌های نوع برداشت را برعهده دارند. سرعت پردازش هریک از تأمین‌کنندگان متفاوت است. تأمین‌کنندگان در نواحی مختلفی مستقرند و فاصله آن‌ها از یکدیگر و از شرکت سازنده مشخص و ثابت است.
- مقصد سفارش‌های نوع تحویل مشخص است و مقصد سفارش‌های نوع برداشت، شرکت سازنده است. همچنین مبدأ سفارش‌های نوع تحویل، شرکت سازنده است و مبدأ سفارش‌های نوع برداشت، جزء متغیرهای تصمیم مدل به‌شمار می‌آید. هر سفارش، یک موعد مقرر برای تحویل به مقصد دارد.
- تعداد *Nv* وسیله نقلیه وجود دارد که وظیفه انتقال سفارش‌های نوع برداشت از تأمین‌کنندگان به شرکت سازنده و سفارش‌های نوع تحویل را از شرکت سازنده به تأمین‌کنندگان برعهده دارند. موقعیت اولیه همه وسایل نقلیه در لحظه صفر، شرکت سازنده فرض می‌شود. سرعت و ظرفیت (براساس حجم یا وزن کالاها) وسایل نقلیه با یکدیگر متفاوت است، اما سرعت هر وسیله نقلیه در همه طول مسیر، ثابت در نظر گرفته می‌شود. هر وسیله نقلیه، با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، قادر است چند سفارش مختلف را حمل کند و به تأمین‌کنندگان مختلفی تحویل دهد یا جمع‌آوری کند. همچنین هر وسیله نقلیه ممکن است چند بار به کار گرفته شود و در هر محموله، سفارش‌های مختلفی برای انتقال داشته باشد. اولویت سرویس‌دهی وسیله نقلیه در هر محموله، سفارش‌های نوع تحویل است.
- هدف مسئله، تعیین موارد زیر به‌گونه‌ای است که مجموع زمان تأخیر تمامی سفارش‌ها حداقل شود:
- نحوه تخصیص سفارش‌های نوع برداشت به تأمین‌کنندگان؛
  - تعیین ترتیب پردازش سفارش‌های تخصیص یافته به هر تأمین‌کننده؛
  - نحوه تخصیص سفارش‌های نوع برداشت و تحویل به وسایل نقلیه؛
  - تعیین ترتیب حمل سفارش‌های تخصیص یافته به هر وسیله نقلیه.

## • مدل ریاضی مسئله

نمادهای مورد استفاده معرفی می‌شوند. پارامترهای مسئله

عبارت‌اند از:

در این بخش، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسئله مورد

نظر بیان می‌شود. پیش از ارائه مدل ریاضی مسئله، ابتدا

|                   |                                   |                                       |  |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|
| No                | تعداد سفارش‌ها:                   | Pt <sub>i</sub>                       | زمان پردازش سفارش i ام:  |
| Ns                | تعداد تأمین‌کنندگان:              | Due <sub>i</sub>                      | موعد تحویل سفارش i ام:   |
| Nv                | تعداد وسایل نقلیه:                | ttT <sub>s</sub>                      | فاصله بین تأمین‌کننده s و کارخانه:   |
| q <sub>i</sub>    | شاخص سفارش:                       | ttS <sub>ss'</sub>                    | فاصله بین تأمین‌کننده s و s' :   |
| P                 | شاخص اولویت حمل:                  | Pick <sub>i</sub>                     | اگر سفارش i از نوع برداشت است، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر:                                    |
| s, s'             | شاخص تأمین‌کنندگان:               | del <sub>i=1</sub> -Pick <sub>i</sub> | اگر سفارش i از نوع تحویل است، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر:                                     |
| m                 | شاخص وسایل نقلیه:                 | Des <sub>si</sub>                     | در مورد سفارش‌های نوع تحویل، اگر مقصد سفارش i، تأمین‌کننده s است، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر: |
| b                 | شاخص محموله:                      | T <sub>i</sub>                        | میزان دیرکرد در تحویل سفارش i ام:  |
| Size <sub>i</sub> | ظرفیت اشغالی به وسیله سفارش i ام: | SP <sub>s</sub>                       | سرعت پردازش به وسیله تأمین‌کننده s:  |
| Cap <sub>m</sub>  | ظرفیت حمل وسیله نقلیه m ام:       | ST <sub>m</sub>                       | سرعت حمل با وسیله نقلیه m  |

علامت M نیز بیانگر یک عدد متناهی بسیار بزرگ مثبت است. متغیرهای تصمیم مدل نیز شامل موارد زیر است:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| RL <sub>i</sub>       | زمان آمادگی سفارش i برای بارگذاری در وسیله نقلیه که اگر سفارش از نوع تحویل است، برابر صفر و اگر از نوع برداشت است، برابر زمان تکمیل پردازش سفارش است. |
| Delivery <sub>i</sub> | زمان تحویل سفارش i  |
| LUL <sub>i</sub>      | زمان بارگذاری (تخلیه) سفارش i ام اگر از نوع برداشت (تحویل) باشد.  |
| AV <sub>m</sub>       | زمانی که وسیله نقلیه m ام، آماده حمل سفارش i از محموله b ام است.  |
| x <sub>si</sub>       | اگر سفارش i ام به تأمین‌کننده s ام تخصیص یابد، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.  |
| y <sub>iq</sub>       | اگر در مرحله تأمین‌کنندگان، سفارش i پیش از سفارش q قرار گیرد، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.   |
| V <sub>m</sub>        | اگر اولویت حمل سفارش i ام در محموله b ام وسیله نقلیه m بالاتر از سفارش p ام باشد، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.                           |
| Arrive <sub>mb</sub>  | زمان رسیدن وسیله نقلیه m در انتهای حمل محموله b ام خود به شرکت سازنده.  |

مدل ریاضی مسئله به صورت زیر است:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{N_o} T_i \quad (1)$$

S.t.:

$$\sum_{s=1}^{M_s} x_{si} = 1 \quad \forall i \mid \text{Pick}_i = 1 \quad (2)$$

$$x_{si} = \text{des}_{si} \quad \forall i \mid \text{Del}_i = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{N_V} \sum_{b=1}^{N_o} \sum_{p=1}^{N_o} V_{mbip} = 1 \quad \forall i \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{N_o} V_{mbip} \leq 1 \quad \forall m, b, p \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{N_o} V_{m(b+1)i1} \leq \sum_{i=1}^{N_o} V_{mbi1} \quad \forall m, b | b \leq N_o - 1 \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N_o} V_{mbi(p+1)} \leq \sum_{i=1}^{N_o} V_{mbip} \quad \forall m, b, p | p < N_o \quad (۷)$$

$$V_{mbip} \leq 1 - \sum_{p'=p+1}^{N_o} V_{mbqp'} \quad \forall i, q, m, b, p | p \leq N_o - 1 \& pick_i = 1 \quad (۸)$$

$$\& del_q = 1$$

$$\sum_{i=1}^{N_o} \sum_{p=1}^{N_o} Pick_i \times size_i \times V_{mbip} \leq Cap_m \quad \forall m, b \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^{N_o} \sum_{p=1}^{N_o} Del_i \times size_i \times V_{mbip} \leq Cap_m \quad \forall m, b$$

$$RL_i + M * (2 + y_{iq} - x_{si} - x_{sq}) \geq RL_q + Pt_i / SP_s \quad \forall i, q, s | i < q \& Pick_i = 1 \quad (۱۰)$$

$$RL_q + M * (3 - y_{iq} - x_{si} - x_{sq}) \geq RL_i + Pt_q / SP_s$$

$$y_{iq} = 0 \quad \forall i, q | i \geq q \quad (۱۱)$$

$$RL_i \geq Pt_i / SP_s - M(1 - x_{si}) \quad \forall i, s | Pick_i = 1 \quad (۱۲-۱)$$

$$RL_i = 0 \quad \forall i | del_i = 1 \quad (۱۲-۲)$$

$$LUL_i \geq av_{mbi} - M * (1 - \sum_{p=1}^{N_o} V_{mbip}) \quad \forall m, b, i \quad (۱۳)$$

$$LUL_i \geq RL_i \quad \forall i \quad (۱۴)$$

$$av_{mli} \geq ttT_s / ST_m - M * (2 - V_{mli1} - x_{is}) \quad \forall m, i, s \quad (۱۵)$$

$$av_{mbi} \geq Arrive_{m(b-1)} + ttT_s / ST_m - M * (2 - V_{mbi1} - x_{is}) \quad \forall m, i, s, b | b \geq 2 \quad (۱۶)$$

$$av_{mbi} \geq LUL_q + ttS_{s's} / ST_m - M * (4 - V_{mbqp} - V_{mbi(p+1)} - x_{qs'} - x_{is}) \quad \forall m, i, q, s, s', b, p | p < N_o \quad (۱۷)$$

$$Arrive_{mb} \geq LUL_i + ttT_s / ST_m - M * (2 - \sum_{p=1}^{N_o} V_{mbip} - x_{is}) \quad \forall m, i, s, b \quad (۱۸)$$

$$Delivery_i \geq LUL_i \quad \forall i | Del_i = 1 \quad (۱۹-۱)$$

$$Delivery_i \geq Arrive_{mb} - M * (1 - \sum_{p=1}^{N_o} V_{mbip}) \quad \forall m, b, i | Pick_i = 1 \quad (۱۹-۲)$$

$$T_i \geq Delivery_i - Due_i \quad \forall i \quad (۲۰)$$

یافته است، با توجه به زمان بارگذاری سفارش اولویت حمل قبلی و زمان حمل بین تأمین‌کنندگان مربوط تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۸، زمان رسیدن وسیله نقلیه در هر محموله را با توجه به زمان بارگذاری (تخلیه) آخرین سفارش تخصیص یافته به آن و زمان حمل آن تا شرکت سازنده مشخص می‌سازد. مجموعه محدودیت ۱۹، زمان تحویل هر سفارش را تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۰ میزان دیرکرد در تحویل هر سفارش را معین می‌سازد. حالت خاصی از مسئله که در آن، همه سفارش‌ها از نوع تحویل باشند، به یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل<sup>۱۱</sup> تبدیل می‌شود که از نوع NP-hard است [۱۹]؛ بنابراین، مسئله ما نیز که حالت کلی‌تر از این مسئله است، از نوع NP-hard است و برای حل آن باید از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده شود. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک پویا برای حل مسئله استفاده شده است که در آن، ساختار کروموزومها متغیر است. در بخش بعدی مقاله، به بررسی الگوریتم ژنتیک به‌کاررفته برای حل مسئله می‌پردازیم.

### الگوریتم ژنتیک پویا

الگوریتم ژنتیک، روش یادگیری بر پایه تکامل بیولوژیک است. این الگوریتم، برای حل مسئله، مجموعه بسیار بزرگی از راه‌حل‌های ممکن را تولید می‌کند. ارزیابی هر یک از این راه‌حل‌ها، با استفاده از یک تابع شایستگی صورت می‌گیرد. آن‌گاه تعدادی از راه‌حل‌ها موجب تولید راه‌حل‌های جدید می‌شوند و این کار به تکامل راه‌حل‌ها می‌انجامد. بدین ترتیب، فضای جست‌وجو در جهتی تکامل می‌یابد که به راه‌حل مطلوب برسد. در صورت انتخاب صحیح پارامترها، این روش بسیار مؤثر عمل می‌کند. الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد برای حل مسائل مختلف NP-hard است.

در این مقاله، برای حل مسئله مورد بررسی، از یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک پویا استفاده شده است که ساختار کروموزومها در آن، متغیر و دوبعدی است. به همین دلیل، این الگوریتم، ژنتیک پویا نام‌گذاری شده است. ساختار یک کروموزوم نمونه، مربوط به مسئله‌ای با سه تأمین‌کننده، دو وسیله نقلیه و هشت سفارش - که در آن سفارش‌های ۱، ۴ و ۶ از نوع برداشت و سایر سفارش‌ها از نوع تحویل هستند- در شکل ۱ نشان داده شده است.

مجموعه محدودیت ۲ بیانگر آن است که هر سفارش نوع برداشت، تنها باید به یک تأمین‌کننده تخصیص یابد. مجموعه محدودیت ۳ مقصد سفارش‌های نوع تحویل را مشخص می‌کند. مجموعه محدودیت ۴ نشان می‌دهد هر سفارش باید فقط به یک اولویت حمل از یک محموله از یک وسیله نقلیه تخصیص یابد. مجموعه محدودیت ۵ بیانگر آن است که هر اولویت حمل از یک محموله هر وسیله نقلیه را نمی‌توان به بیش از یک سفارش تخصیص داد. براساس مجموعه محدودیت ۶، اگر به محموله  $b$  ام از وسیله نقلیه  $m$  ام سفارشی تخصیص نیابد، نمی‌توان به محموله  $b+1$  ام آن سفارشی تخصیص داد. مجموعه محدودیت ۷ بیان می‌کند که اگر به اولویت  $p$  ام محموله  $b$  ام از وسیله نقلیه  $m$  ام سفارشی تخصیص نیابد، نمی‌توان به اولویت  $p+1$  ام آن محموله سفارشی تخصیص داد. مجموعه محدودیت ۸ بیانگر آن است که در هر محموله از هر وسیله نقلیه، اولویت حمل با سفارش‌های نوع تحویل است. مجموعه محدودیت ۹ تضمین می‌کند در هر محموله، مجموع فضای اشغال‌شده به وسیله سفارش‌های نوع تحویل یا برداشت تخصیص یافته به یک وسیله نقلیه، نباید از ظرفیت آن وسیله نقلیه بیشتر شود. مجموعه محدودیت ۱۰ بیان می‌کند که هر تأمین‌کننده نمی‌تواند در هر لحظه بیش از یک سفارش را پردازش کند. مجموعه محدودیت ۱۱، مقداری از متغیرهای زاید را حذف می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۲، زمان آمادگی برای حمل برای هر سفارش را معین می‌سازد. مجموعه محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب بیان‌کننده آن‌اند که زمان بارگذاری هر سفارش، برابر بیشینه زمان آمادگی سفارش برای حمل و زمان آماده‌بودن وسیله نقلیه مربوط برای حمل آن است. مجموعه محدودیت ۱۵ زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه را برای حمل سفارشی که به اولویت نخست اولین محموله آن اختصاص یافته است، تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۶، زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه را برای حمل سفارشی که به اولویت نخست یک محموله اختصاص یافته است، با توجه به زمان تحویل سفارش‌های محموله قبلی، مقصد سفارش و زمان حمل تا تأمین‌کننده مربوط تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۷ زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه را برای حمل سفارشی که به یک محموله اختصاص

این وسیله نقلیه در مسیر برگشت خود به سمت تأمین‌کننده مربوط به سفارش ۶ می‌رود و پس از بارگذاری آن، به سمت شرکت سازنده حرکت می‌کند.

|                     |   |   |   |
|---------------------|---|---|---|
| تأمین‌کننده ۱       |   |   |   |
| تأمین‌کننده ۲       | ۱ | ۴ |   |
| تأمین‌کننده ۳       | ۶ |   |   |
| وسیله نقلیه ۱-رفت   | ۲ | ۵ | ۸ |
| وسیله نقلیه ۲-رفت   | ۳ | ۷ |   |
| وسیله نقلیه ۱-برگشت | ۱ | ۴ |   |
| وسیله نقلیه ۲-برگشت | ۶ |   |   |

شکل ۱. ساختار یک کروموزوم نمونه در الگوریتم ژنتیک پویا

در ابتدای کار، با توجه به اندازه جمعیت، تعدادی کروموزوم به صورت تصادفی، تولید و مقدار شایستگی هر کروموزوم محاسبه می‌شود.

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به منظور انجام دادن عمل تلفیق، از روش یکنواخت استفاده شده است. همچنین عملگر جهش، به این صورت است که ابتدا یک کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس یک سفارش به صورت تصادفی، انتخاب و جای این سفارش در رشته‌های مربوط به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه با یکدیگر تعویض می‌شود.

تعداد کروموزوم‌های موجود، پس از اعمال تلفیق و جهش، برابر با اندازه جمعیت  $\times (1 + \text{نرخ تلفیق} + \text{نرخ جهش})$  است. برای عملگر انتخاب نیز از رویکرد نخبه‌گرایی استفاده شده است که براساس اندازه جمعیت، کروموزوم‌هایی که بهترین مقدار شایستگی را دارند، برای رفتن به نسل بعد انتخاب می‌شوند. معیار خاتمه نیز به این صورت در نظر گرفته شده است که اگر در تعداد مشخصی از نسل‌های متوالی، بهترین جواب بهبود نیابد، الگوریتم به پایان می‌رسد.

با توجه به اجزای متعدد به صورت تجربی، مشخص شد مقدار ۱۰۰ برای پارامتر اندازه جمعیت، ۰/۶ برای نرخ تلفیق، ۰/۴ برای نرخ جهش و ۱۰ برای پارامتر خاتمه، به جواب‌های نسبتاً خوب در زمان حل معقول منجر می‌شود.

### اعتبارسنجی الگوریتم

در این بخش، به اعتبارسنجی مسئله مورد بررسی پرداخته

فرض کنید ظرفیت حمل هردو وسیله نقلیه برابر ۳ و سایز هر سفارش ۱ باشد. هر کروموزوم نشان‌دهنده یک جواب موجه برای مسئله است. ساختار کروموزوم در نظر گرفته شده دوبعدی و متشکل از چند رشته است که به ازای هر یک از تأمین‌کنندگان، یک رشته و به ازای هر وسیله نقلیه دو رشته در نظر گرفته می‌شود. مقدار درون هر یک از رشته‌های مربوط به تأمین‌کنندگان شامل شماره سفارش‌های نوع برداشت است (سفارش‌های نوع تحویل، نیازی به پردازش به وسیله تأمین‌کنندگان ندارند) که به هر تأمین‌کننده تخصیص یافته است. همان‌طور که ذکر شد، برای هر وسیله نقلیه، دو رشته در ساختار کروموزوم در نظر گرفته شده است که مقدار درون رشته‌های اول شامل شماره سفارش‌های نوع تحویل و مقدار درون رشته‌های دوم شامل شماره سفارش‌های نوع برداشت است که با هر وسیله نقلیه حمل می‌شود. ترتیب سفارش‌های اختصاص یافته به رشته هر تأمین‌کننده (وسیله نقلیه) نشانگر اولویت تولید (حمل) سفارش‌های مذکور است. کروموزوم نشان‌دهنده در شکل ۱، معادل جوابی است که در آن، به تأمین‌کننده ۱ سفارشی تخصیص نیافته و سفارش‌های ۱ و ۴ به تأمین‌کننده ۲ و سفارش ۶ به تأمین‌کننده ۳ تخصیص یافته است. از میان سفارش‌هایی که به تأمین‌کننده ۲ تخصیص یافته‌اند، اولویت ساخت به ترتیب با سفارش ۱ و سپس سفارش ۴ است. همان‌گونه که مشخص است، سفارش‌های نوع تحویل در رشته‌های مربوط به تأمین‌کنندگان وجود ندارند. به علاوه، سفارش‌های نوع تحویل ۲، ۵، ۸ و سفارش‌های نوع برداشت ۱ و ۴ باید با وسیله نقلیه ۱ و سفارش‌های نوع تحویل ۳ و ۷ و سفارش نوع برداشت ۶ باید با وسیله نقلیه ۲ حمل شوند. وسیله نقلیه ۱ ابتدا سفارش‌های نوع تحویل خود را در شرکت سازنده بارگذاری می‌کند و در مسیر رفت، ابتدا سفارش ۲، سپس سفارش ۵ و در انتها سفارش ۸ را به تأمین‌کنندگان مربوط تحویل می‌دهد. این وسیله نقلیه در مسیر برگشت، به ترتیب به سمت تأمین‌کنندگان مربوط به سفارش‌های ۱ و ۴ می‌رود و آن‌ها را بارگذاری و به سمت شرکت سازنده حمل می‌کند. وسیله نقلیه ۲ نیز ابتدا سفارش‌های نوع تحویل خود را در شرکت سازنده بارگذاری می‌کند و در مسیر رفت، ابتدا سفارش ۳ و سپس سفارش ۷ را به تأمین‌کنندگان تحویل می‌دهد. در ادامه،

می‌شود. ابتدا نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی با نتایج موجود در سیستم، بدون استفاده از این الگوریتم مقایسه شده است. سپس با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی در این تحقیق، تاکنون در ادبیات موضوع به‌کار نرفته است، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ارائه‌شده برای یکی از نزدیک‌ترین مسائل موجود در ادبیات موضوع مقایسه می‌شود. در انتها نیز به مقایسه الگوریتم پیشنهادی با جواب بهینه برای مسائل با ابعاد کوچک پرداخته می‌شود.

#### • مطالعه موردی

الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله، در زنجیره تأمین یک شرکت سازنده تجهیزات و ملزومات مصرفی پزشکی برای بیماران خاص پیاده‌سازی شده است. این شرکت، تولیدکننده ملزومات مصرفی پزشکی دیالیز شامل صافی دیالیز، لوله رابط دیالیز، ست سوزن فیستولا، پودر کارتریج و کیسه‌ای بیکربنات سدیم و محلول اسیدی دیالیز است. این شرکت، ترکیبات شیمیایی و قطعات مورد نیاز خود را از تعدادی تأمین‌کننده تهیه می‌کند و محصولات خود را نیز به تعدادی از مشتریان عمده‌فروش تحویل می‌دهد. شرکت سازنده، براساس قراردادهایی که با تأمین‌کنندگان منعقد

می‌کند، تهیه برخی از مواد اولیه مورد نیاز تأمین‌کنندگان را برعهده می‌گیرد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، علت این امر، کاهش قیمت تمام‌شده محصولات نهایی و اطمینان از کیفیت مواد اولیه مورد استفاده به‌وسیله تأمین‌کنندگان است. از سوی دیگر، برخی از این تأمین‌کنندگان با شرکت‌های غیرپزشکی کار می‌کنند و هیچ سابقه‌ای در تهیه مواد اولیه به درجه پزشکی ندارند و این موضوع برای شرکت تولیدکننده به‌دلیل اخذ گواهینامه‌های کیفی بسیار اهمیت دارد. علاوه بر لزوم مرغوبیت بالای مواد اولیه، زمان تأمین آن‌ها جزء پارامترهای اساسی در مدیریت زنجیره تأمین است. تأمین‌نشدن به‌هنگام مواد اولیه، موجب ایجاد تأخیر در بقیه مراحل و درنهایت، تأمین‌نشدن به‌موقع محصول نهایی می‌شود. یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین یادشده، علاوه بر میزان اهمیت و تأثیری که در زنجیره تأمین‌های معمول دارد، با توجه به اینکه محصولات نهایی این زنجیره برای بیماران خاص به‌کار گرفته می‌شود، حساسیت و توجه بیشتری می‌طلبد، زیرا در صورتی که محصولات به‌موقع تولید نشوند و به دست مشتریان نرسند، آسیب‌هایی جدی به بیماران وارد می‌شود.

جدول ۱. پراکندگی تأمین‌کنندگان

| شهر            | تعداد | شهر         | تعداد |
|----------------|-------|-------------|-------|
| تهران          | ۷     | اردبیل      | ۱     |
| البرز          | ۸     | خراسان رضوی | ۴     |
| اصفهان         | ۶     | خوزستان     | ۳     |
| آذربایجان شرقی | ۳     | فارس        | ۲     |
| آذربایجان غربی | ۱     | قزوین       | ۸     |
| مجموع          | ۴۳    |             |       |

جدول ۲. نوع و تعداد سفارش‌ها

| نوع سفارش                   | تعداد سفارش نوع تحویل | تعداد نوع برداشت |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|
| بیکربنات سدیم               | -                     | ۳                |
| نیدل                        | -                     | ۲                |
| پلی‌اتیلن                   | ۲۹                    | -                |
| رنولیت                      | ۱۳                    | -                |
| گرانول پی‌وی‌سی مدیکال گرید | ۱۲                    | -                |
| کلمپ                        | -                     | ۱                |
| کانکتور                     | -                     | ۲                |
| ایزولاتور                   | -                     | ۳                |
| مجموع                       | ۵۴                    | ۱۱               |



زاید، به کاهش زمان‌های تحویل و در نتیجه دیرکرد‌ها می‌انجامد.

#### • اعتبارسنجی داده‌های تصادفی

در این بخش، ابتدا مسائل مختلف با اندازه‌های گوناگون بررسی می‌شوند. سپس به مقایسه و ارزیابی نتایج الگوریتم پیشنهادی ما با الگوریتم پیشنهاد شده به وسیله الریچ [۱۴] پرداخته می‌شود.

#### • تولید داده‌های تصادفی برای مسئله

مسئله مورد بررسی، پارامترهای مختلفی دارد که برای برخی از آن‌ها، سطوحی مانند بالا، پایین و متوسط در نظر گرفته شده و به چهار دسته تقسیم شده‌اند. این چهار دسته عبارت‌اند از: ۱. تعداد سفارش‌ها، ۲. تعداد تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه، ۳. زمان پردازش و مسافت حمل و ۴. ظرفیت وسایل نقلیه.

برای سایر پارامترها، تنها یک سطح در نظر گرفته شده است (جدول ۳). موعد تحویل سفارش‌ها، از توزیع یکنواخت  $U[(1-T - R/2)P, (1-T + R/2)P]$  پیروی می‌کند که تعمیمی از توزیع پیشنهادی به وسیله پاتس و ون [۳۲] است. در توزیع یکنواخت ارائه شده،  $T$  بزرگی تاریخ‌های تحویل و  $R$  پراکندگی آن‌ها را کنترل می‌کند.  $P$  تخمینی از زمان تحویل مجموعه‌ای از  $n$  سفارش است که از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود. در رابطه ۲۱،  $\overline{dis}$  میانگین فاصله تأمین‌کنندگان تا شرکت سازنده محصول نهایی است. به صورت تجربی مشخص شد که مقدار  $0/3$  برای  $T$  و مقدار  $0/4$  برای  $R$ ، مقادیر و پراکندگی معقولی برای مواعدهای تحویل فراهم می‌آورد.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{s=1}^m v'_s} + \frac{\overline{dis}}{\sum_{k=1}^l v_k} \quad (21)$$

از ترکیب سطوح مختلف برای پارامترهای مسئله ۵۴ (۱\*۱\*۱\*۲\*۳\*۳\*۳\*۳) نوع مسئله به وجود می‌آید که به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. این ۵۴ مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی حل شده‌اند و نتایج زیر به دست آمده است. تمامی برنامه‌های کامپیوتری این تحقیق در برنامه متلب کدنویسی شده است و روی یک کامپیوتر با مشخصات CPU 2.2 GHz Intel Core i7 اجرا شده است.

به منظور پیاده‌سازی این الگوریتم در زنجیره تأمین مورد بررسی، تراکنش‌های انبار این کارخانه در یک بازه زمانی ۷۲ روزه، بررسی و نتایج این الگوریتم، با تصمیم‌های اتخاذ شده در دنیای واقعی مقایسه شد. در بازه زمانی مورد بررسی، این شرکت با تأمین‌کنندگان و مشتریان مختلفی تبادل قطعه داشت. به منظور در نظر گرفتن حمل‌ونقل‌های مربوط به مشتریان در زمان‌بندی حمل‌ونقل، هریک از این مشتریان به عنوان یک تأمین‌کننده مجازی که سفارش‌های مربوط به آن، تنها از نوع تحویل است، در نظر گرفته شده‌اند.

در مجموع، ۴۳ تأمین‌کننده برای مسئله در نظر گرفته شد که پراکندگی جغرافیایی آن‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود (شایان ذکر است که این شرکت، تأمین‌کنندگانی خارجی نیز دارد که به علت امکان پذیر نبودن برنامه‌ریزی حمل‌ونقل برای آن‌ها، در این مطالعه منظور نشدند). در مجموع، ۶۵ سفارش در نظر گرفته شد که ۱۱ عدد از آن‌ها از نوع برداشت و ۵۴ عدد از نوع تحویل بودند. جدول ۲ نوع و تعداد سفارش‌ها را نشان می‌دهد. حمل‌ونقل‌ها با ۹ وسیله نقلیه با ظرفیت‌ها و سرعت‌های متفاوت انجام شدند. مطابق داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از شرکت سازنده، مجموع تأخیرهای همه سفارش‌ها ۶۱۴ ساعت است. با توجه به اینکه تعداد سفارش‌ها ۶۵ است، میانگین تأخیر سفارش‌ها ۹/۴۴ ساعت به دست می‌آید.

حل مسئله به وسیله الگوریتم ژنتیک پویا، به مجموع دیرکرد ۱۳۷ ساعت و میانگین دیرکرد ۲/۱۱ ساعت منجر می‌شود. علت بهبود تابع هدف را می‌توان وجود عناصر یکپارچگی در مدیریت و تصمیم‌گیری‌هایی مانند تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان، مسیریابی وسایل نقلیه در دریافت سفارش‌ها از تأمین‌کنندگان و نیز تحویل سفارش‌ها به مشتریان به وسیله الگوریتم پیشنهادی دانست. این یکپارچگی در سیستم فعلی مشاهده نمی‌شود و تصمیم‌ها به صورت جداگانه و سلسله‌مراتبی اتخاذ می‌شوند.

استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مستقل در سیستم فعلی، موجب افزایش تعداد رفت‌وآمدهای وسایل نقلیه و به تبع آن افزایش زمان‌های حمل شده و نیز موجب تأخیر در تحویل سفارش‌ها می‌شود، اما مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن حمل‌ونقل مشترک بین تأمین‌کنندگان و مشتریان، سبب استفاده مؤثرتر از آن‌ها می‌شود و با حذف رفت‌وآمدهای

## • نتایج محاسباتی

گام دوم: سه عملگر جهش، ترکیب و انتخاب را تعریف کنید. گام سوم: به صورت تصادفی و با احتمال یکسان، یکی از عملگرهای جهش، ترکیب یا انتخاب را به طور تصادفی انتخاب کنید. با انتخاب یک کروموزوم به روش چرخه رولت (در صورت انتخاب عمل تلفیق، دو کروموزوم)، عملگر انتخابی روی کروموزوم/ کروموزوم‌های انتخابی اعمال می‌شود و نتیجه به نسل بعدی منتقل می‌شود. این عمل را تا جایی انجام دهید که تعداد اعضای جمعیت جدید برابر با جمعیت قبلی شود.

گام چهارم: اگر شرط خاتمه محقق شده است، الگوریتم را خاتمه دهید. در غیر این صورت به گام ۳ بروید.

در جدول ۴ میانگین جواب‌های به دست آمده از حل مسائل تصادفی به وسیله هر یک از الگوریتم‌ها و در حالات مختلف نمایش داده شده است.

الگوریتمی که برای مقایسه از آن استفاده شد، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی ال ریچ [۱۴] است. مسئله‌ای که وی در نظر می‌گیرد، تا حدودی مشابه مسئله مورد بررسی در این تحقیق است. وی برای وسایل نقلیه، زمان آمادگی و برای سفارش‌های تاریخ‌های تحویل، پنجره زمانی در نظر گرفت. البته ال ریچ مسئله را در حالت توزیع مطالعه کرد و حالت تحویل و توزیع هم‌زمان را بررسی نکرد. وی همچنین از یک الگوریتم ژنتیک با ساختاری جدید برای حل مسئله استفاده کرد. در این قسمت، الگوریتم ال ریچ برای مسئله ما تعمیم داده می‌شود و مقایسه آن با الگوریتم پیشنهادی ما صورت می‌گیرد. در ادامه، به تشریح عملکرد الگوریتم او پرداخته می‌شود. گام‌های این الگوریتم به صورت زیر است: گام اول: جمعیت اولیه را به صورت تصادفی ایجاد کنید.

جدول ۳. پارامترهای در نظر گرفته شده برای مسئله

| پارامتر                           | حالت ۱                | حالت ۲               | حالت ۳               |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| تعداد سفارش‌ها                    | ۱۰                    | ۵۰                   | ۱۰۰                  |
| تعداد تأمین‌کنندگان - وسایل نقلیه | $U[۵,۱۰]$ $U[۵,۱۰]$   | $U[۱,۵]$ $U[۱۰,۱۵]$  | $U[۱۰,۱۵]$ $U[۱,۵]$  |
| زمان‌های پردازش - مسافت‌ها        | $U[۱۰,۳۰]$ $U[۱۰,۳۰]$ | $U[۱,۲۰]$ $U[۲۰,۴۰]$ | $U[۲۰,۴۰]$ $U[۱,۲۰]$ |
| ظرفیت وسایل نقلیه                 | $U[۸,۱۳]$             |                      | $U[۱۳,۲۳]$           |
| سرعت تولید و سرعت حمل             |                       | $U[۱,۴]$             |                      |
| اندازه سفارش‌ها                   |                       | $U[۱,۵]$             |                      |

جدول ۴. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک پویا با تعمیم الگوریتم اول ریچ

| پارامتر                           | سطح    | مقدار پارامتر | میانگین جواب‌ها     |                 | میانگین زمان‌ها (ثانیه) |                 |
|-----------------------------------|--------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|                                   |        |               | الگوریتم ژنتیک پویا | الگوریتم ال ریچ | الگوریتم ژنتیک پویا     | الگوریتم ال ریچ |
| تعداد سفارش‌ها                    | کم     | ۱۰            | ۲۵۴/۲۲              | ۲۵۲/۵۱          | ۲۷۶/۳۲                  | ۲۷۲/۳۲          |
|                                   | متوسط  | ۵۰            | ۲۱۵۹/۱۷             | ۲۶۷۴/۳          | ۴۶۹۷/۵۲                 | ۴۷۵۹/۶۹         |
|                                   | بالا   | ۱۰۰           | ۷۹۸۶/۶              | ۹۸۶۵/۱۸         | ۱۱۳۸۵/۹۹                | ۱۱۳۵۲/۴۶        |
| تعداد تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه | حالت ۱ | متعادل        | ۱۸۹۸/۳۵             | ۲۳۶۸/۶۴         | ۵۴۹۷/۳۷                 | ۵۴۸۲/۳۷         |
|                                   | حالت ۲ | نامتعادل      | ۴۲۹۶/۱۷             | ۵۷۷۸/۳۶         | ۵۲۹۷/۱۴                 | ۵۳۴۹/۳          |
|                                   | حالت ۳ | نامتعادل      | ۴۲۰۵/۴۷             | ۴۶۴۴/۹۸         | ۵۵۶۵/۳۱                 | ۵۵۵۳/۷۹         |
| زمان پردازش و مسافت‌ها            | حالت ۱ | متعادل        | ۳۰۶۹/۱۴             | ۴۳۴۷/۴۷         | ۵۳۰۷/۵۳                 | ۵۲۹۴/۵۳         |
|                                   | حالت ۲ | نامتعادل      | ۲۲۳۴/۷۶             | ۲۷۷۶/۵۵         | ۵۴۹۳/۹۹                 | ۵۵۰۸/۹۹         |
|                                   | حالت ۳ | نامتعادل      | ۵۰۹۶/۰۸             | ۵۶۶۷/۹۷         | ۵۵۵۸/۳                  | ۵۵۸۱/۹۴         |
| ظرفیت وسایل نقلیه                 | سطح ۱  | $U[8,13]$     | ۳۴۹۴/۱              | ۴۸۶۵/۴۴         | ۵۸۰۲/۰۹                 | ۵۸۵۳/۴۸         |
|                                   | سطح ۲  | $U[13,23]$    | ۳۴۳۹/۲۳             | ۳۶۶۲/۵۵         | ۵۱۰۴/۴۶                 | ۵۰۷۰/۱۶         |
| همه مسائل                         |        |               | ۳۴۶۶/۶۶             | ۴۲۶۴            | ۵۴۵۳/۲۷                 | ۵۴۶۱/۸۲         |

جدول ۵. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک پویا با جواب بهینه

| شماره مسئله | مشخصات مسئله              | الگوریتم ژنتیک پویا |                       | جواب بهینه |                       |
|-------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------------------|
|             |                           | جواب                | زمان حل (برحسب ثانیه) | جواب       | زمان حل (برحسب ثانیه) |
| ۱           | $(3+3) \times 2 \times 2$ | ۱۰/۴۰۵۸۵            | ۲۵                    | ۱۰/۴۰۵۸۵   | ۵۰                    |
| ۲           | $(3+3) \times 4 \times 4$ | ۱۲/۷۲۳۸۲            | ۳۱                    | ۱۲/۷۲۳۸۲   | ۴۶                    |
| ۳           | $(3+3) \times 4 \times 3$ | ۱۴/۶۵۱۶۵            | ۳۸                    | ۱۴/۵۵۳۹۳   | ۶۵                    |
| ۴           | $(4+3) \times 3 \times 2$ | ۱۵/۷۰۴۸۲            | ۱۳                    | ۱۵/۷۰۴۸۲   | ۲۳۷۵                  |
| ۵           | $(3+4) \times 3 \times 2$ | ۲۴/۶۱۸۴۲            | ۴۴                    | ۲۴/۶۱۸۴۲   | ۶۲۸                   |
| ۶           | $(4+3) \times 4 \times 3$ | ۱۹/۲۰۶۱۹            | ۶۳                    | ۱۹/۲۰۶۱۹   | ۸۲۶                   |
| ۷           | $(3+4) \times 4 \times 3$ | ۲۲/۸۸۱۷۶            | ۳۵                    | ۲۱/۴۰۲۶۹   | ۶۳۹                   |
| ۸           | $(4+3) \times 3 \times ۵$ | ۱۵/۳۱۴۴۳            | ۱۴                    | ۱۵/۳۱۴۴۳   | ۳۵۵۰                  |
| ۹           | $(3+4) \times 3 \times ۵$ | ۱۸/۱۹۹۹۷            | ۴۸                    | ۱۸/۱۹۹۹۷   | ۴۵۹                   |
| ۱۰          | $(4+4) \times 3 \times 3$ | ۲۰/۳۳۵۲             | ۲۹                    | ۱۹/۱۸۴۹۸   | ۴۸۸                   |

سفارش‌های نوع تحویل را نشان می‌دهد. عدد سوم تعداد تأمین‌کنندگان و عدد چهارم تعداد وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. سایر پارامترهای مسئله، بر مبنای توزیع‌های مشخص در مقایسه قبلی ایجاد شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در بیشتر مواقع نتایجی برابر با جواب بهینه داده است و در مواردی که اختلاف وجود دارد، این اختلاف اندک است. همچنین زمان حل الگوریتم پیشنهادی، بسیار کمتر از زمان حل بهینه است.

در ادامه، یک تحلیل حساسیت نیز روی پارامترهای مهم مسئله انجام می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته شده برای تحلیل حساسیت، شامل تعداد سفارش‌ها، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه است. برای هر یک از این سه پارامتر، پنج سطح در نظر گرفته شده است و تأثیر افزایش این پارامترها بر تابع هدف در نظر گرفته شده است. از ترکیب این حالات، ۱۲۵ ( $5 \times 5 \times 5$ ) حالت شکل می‌گیرد. سایر پارامترها نیز از توزیع‌های زیر تبعیت می‌کنند: زمان‌های پردازش و مسافت‌ها از توزیع  $U[10,15]$ ، ظرفیت وسایل نقلیه از توزیع  $U[10,30]$ ، سرعت تولیدکنندگان و سرعت وسایل نقلیه از توزیع  $U[1,4]$ ، اندازه سفارش‌ها از توزیع  $U[1,5]$  و تاریخ‌های تحویل از توزیع  $U[0.5P,0.9P]$ .

نتایج، نشانگر برتری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی بر تعمیم الگوریتم اولریچ است، اما از نظر زمانی برتری قابل ملاحظه‌ای در مورد هر یک از الگوریتم‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین بر اساس نتایج، با افزایش تعداد سفارش‌ها، میانگین دیرکردها و زمان‌های حل افزایش می‌یابد. هنگامی که تعداد تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه متعادل باشد (حالت ۱)، میانگین جواب‌ها کاهش می‌یابد. به علاوه، در صورتی که در مرحله تأمین‌کنندگان گلوگاه وجود داشته باشد (حالت ۲)، میانگین جواب‌ها بدتر از حالتی است که در مرحله حمل و نقل گلوگاه داشته باشیم. همچنین هنگامی که زمان پردازش سفارش‌ها در مرحله تأمین‌کنندگان کم باشد (حالت ۲)، میانگین جواب‌ها کمتر از سایر حالت‌هاست.

با افزایش ظرفیت حمل هر یک از وسایل نقلیه، میانگین زمان دیرکرد همه سفارش‌ها در هر دو الگوریتم کاهش یافت. جدول ۵ نتایج مقایسه الگوریتم پیشنهادی را با جواب بهینه برای چند مسئله تصادفی با ابعاد کوچک نشان می‌دهد. جواب بهینه، با استفاده از اجرای مدل به وسیله نرم افزار GAMS به دست آمد. در این جدول، هر مسئله با چهار عدد نشان داده شده است. دو عدد اول که داخل پرانتز قرار گرفته‌اند، نشانگر تعداد سفارش‌ها هستند. عدد اول، تعداد سفارش‌های نوع برداشت و عدد دوم تعداد

جدول ۶. تغییرات تابع هدف با توجه به تغییر پارامترهای مسئله

| میانگین تابع هدف | تعداد وسایل نقلیه | میانگین تابع هدف | تعداد تأمین کننده | میانگین تابع هدف | تعداد سفارش |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------|
| ۵۴۱۸/۲۴          | ۱                 | ۵۲۴۷/۱۳          | ۱                 | ۲۰۴/۲۲           | ۱۰          |
| ۳۲۴۷/۱۶          | ۵                 | ۳۲۴۰/۲۹          | ۵                 | ۹۹۶/۷            | ۳۰          |
| ۲۳۵۶/۵۸          | ۱۰                | ۲۶۶۰/۸۴          | ۱۰                | ۲۳۵۹/۱۷          | ۵۰          |
| ۲۰۷۷/۵۶          | ۱۵                | ۲۰۸۱/۴           | ۱۵                | ۴۳۹۰/۱۴          | ۷۰          |
| ۱۹۲۱/۷۹          | ۲۰                | ۱۷۹۱/۶۷          | ۲۰                | ۷۰۷۱/۱۱          | ۹۰          |

جدول ۶ حالات و نتایج در نظر گرفته شده برای پارامترهای تعداد سفارش‌ها، تعداد تأمین کنندگان و تعداد وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. در این جدول، در هر یک از حالت‌های مربوط به پارامتر تعداد سفارش‌ها، نیمی از سفارش‌ها از نوع برداشت و نیم دیگر از نوع تحویل در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد سفارش‌ها، تابع هدف افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش تعداد تأمین کنندگان و وسایل نقلیه، مقدار دیرکردها کاهش پیدا می‌کند. نحوه کاهش دیرکردها به این صورت است که در ابتدا با زیاد شدن تأمین کنندگان و وسایل نقلیه، تابع هدف با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند و در ادامه، تابع هدف با شدت کمتری کاهش می‌یابد.

### نتیجه گیری

در بازار پررقابت امروزی، هر شرکتی که زنجیره تأمین خود را به گونه‌ای طراحی و پیاده کند که نیازهای مشتریان را با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت و در زمان مناسب پاسخ دهد، برنده رقابت خواهد بود. در این مقاله، به بررسی زمان بندی یکپارچه در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای، شامل تعدادی تأمین کننده و یک شرکت سازنده پرداخته شد که به وسیله یک ناوگان حمل و نقل ناهمگن با یکدیگر در ارتباطند. شرکت سازنده محصولات نهایی، به منظور اطمینان از کیفیت مواد اولیه مورد استفاده به وسیله تأمین کنندگان و نیز استفاده از تخفیف‌های مقداری، برخی از مواد اولیه را خود تأمین

می‌کند و در اختیار تأمین کنندگان قرار می‌دهد؛ بنابراین، سفارش‌های این زنجیره تأمین، شامل دو نوع تحویل (از شرکت سازنده به تأمین کنندگان) و برداشت (از تأمین کنندگان به شرکت سازنده) است. هدف، تعیین نحوه تخصیص و توالی تولید سفارش‌های نوع برداشت به وسیله تأمین کنندگان و نیز نحوه تخصیص و اولویت حمل تمامی سفارش‌ها با وسایل نقلیه به منظور کمینه کردن مجموع دیرکرد سفارش‌هاست.

برای حل این مسئله، از یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک پویا استفاده شد. این الگوریتم، روی داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از زنجیره تأمین یک شرکت سازنده تجهیزات پزشکی در یک بازه زمانی ۷۲ روزه پیاده شد. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک پویا با تصمیم‌های اتخاذ شده در دنیای واقعی، نشانگر بهبود زمان دیرکرد از ۶۱۴ به ۱۳۷ است. همچنین مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با جواب بهینه در مقیاس کوچک و الگوریتم پیشنهادی برای نزدیک‌ترین مسئله در ادبیات موضوع به مسئله مورد بررسی در این تحقیق، نشانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی است.

توسعه زنجیره تأمین مورد بررسی و در نظر گرفتن تأمین کنندگان رده دوم، اضافه کردن شرایطی مانند عدم قطعیت در زمان‌های پردازش یا زمان‌های حمل و نیز استفاده از سایر روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله مورد بررسی را می‌توان زمینه‌ای برای پژوهش‌های آتی در نظر گرفت.

## مراجع

1. Nasiri, M. and PourmohamadZia, N. (2015). "A Hybrid model for supplier selection and order allocation in supply chain", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 49, No. 1, PP. 117–128.
2. Omrani, H. and Adabi, F. (2016). "A multi objective planning for supply chain network design with efficient manufacturers and distributors", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 50, No. 2, PP. 261–278.
3. Lee, Y. H., Jeong, C. S. and Moon, C. (2002). "Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1–2, PP. 351–374.
4. Berning, G., et al. (2004). "Integrating collaborative planning and supply chain optimization for the chemical process industry (I)—methodology", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 6–7, PP. 913–927.
5. Naso, D. et al. (2007). "Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 3, PP. 2069–2099.
6. Averbakh, I. and Xue, Z. (2007). "On-line supply chain scheduling problems with preemption." *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No. 1, PP. 500–504.
7. Zegordi, S. and Beheshti Nia, M. (2009). "Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 9–10, PP. 928–939.
8. Sawik, T. (2009). "Coordinated supply chain scheduling." *International Journal of Production Economics*, Vol. 120, No. 2, PP. 437–451.
9. Su, C.-S., Pan, J.C.-H. and Hsu, T.-S. (2009). "A new heuristic algorithm for the machine scheduling problem with job delivery coordination", *Theoretical Computer Science*, Vol. 410, No. 27–29, PP. 2581–2591.
10. Averbakh, I. (2010). "On-line integrated production–distribution scheduling problems with capacitated deliveries", *European Journal of Operational Research*, Vol. 200, No. 2, PP. 377–384.
11. Scholz-Reiter, B., Frazzon, E.M. and Makuschewitz, T. (2010). "Integrating manufacturing and logistic systems along global supply chains", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, PP. 216–223.
12. Yimer, A.D. and Demirli, K. (2010). "A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, PP. 411–422.
13. Fahimnia, B., Luong, L. and Marian, R. (2012). "Genetic algorithm optimisation of an integrated aggregate production–distribution plan in supply chains", *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 1, PP. 81–96.
14. Ullrich, C.A. (2013). "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", *European Journal of Operational Research*, Vol. 227, No. 1, PP. 152–165.
15. Selvarajah, E. and Zhang, R. (2014). "Supply chain scheduling at the manufacturer to minimize inventory holding and delivery costs", *International Journal of Production Economics*, Vol. 147, Part A, No. 0, PP. 117–124.
16. Low, C., et al. (2014). "Coordination of production scheduling and delivery problems with heterogeneous fleet", *International Journal of Production Economics*, Vol. 153, No. 1, PP. 139–148.
17. Cheng, B., Yang, Y. and Hu, X. (2015). "Supply chain scheduling with batching, production and distribution", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol., No. ahead-of-print, PP. 1–12.
18. Chang, Y.-C., Chang, K.-H. and Kang, T.-C. (2015). "Applied Variable Neighborhood Search-Based Approach to Solve Two-Stage Supply Chain Scheduling Problems", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 3, PP. 1337-1349.

19. Tasan, A. S. and Gen, M. (2012). "A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 3, PP. 755–761.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Supply Chain Management
  2. Synchronization
  3. Integration
  4. Tardiness
  5. Supplier
  6. Genetic Algorithm
  7. On-line Supply Chain Scheduling
  8. Total Flow Time
  9. Mixed Integer Programming
  10. Time Windows
  11. Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD)
-