

زمان بندی تولید و حمل و نقل و تخصیص سفارش ها در زنجیره تأمین

محمدعلی بهشتی نیا^{۱*}، امیر قاسمی^۲، معین فرخ نیا^۳

۱. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

(تاریخ دریافت ۹۳/۱۲/۱۶ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۴/۱۰/۲۴ - تاریخ تصویب ۹۵/۱/۲۸)

چکیده

این پژوهش مسئله زمان بندی در زنجیره تأمین دو مرحله ای را بررسی می کند. مرحله اول شامل تأمین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها به یک شرکت تولیدکننده محصولات نهایی است. هدف تخصیص سفارش ها به تأمین کنندگان، تعیین توالی تولید در تأمین کنندگان، تخصیص سفارش ها به وسایل نقلیه و تعیین اولویت حمل سفارش ها از طریق وسایل نقلیه به منظور کمینه کردن مجموع زمان های پردازش و حمل است. این مسئله تاکنون در ادبیات موضوع بررسی نشده است. ابتدا مدل ریاضی به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه می شود. به منظور حل مسئله، یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی ارائه می شود که تلفیق جدیدی از الگوریتم های ژنتیک و شبیه سازی تبرید را در نظر می گیرد. الگوریتم به منظور ارزیابی کیفیت با یکی از الگوریتم های مطرح شده در ادبیات موضوع، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه سازی تبرید به صورت مجزا مقایسه می شود. مقایسه نتایج نهایی محاسبات الگوریتم ها بیانگر برتری الگوریتم تلفیقی در مقایسه با الگوریتم های مورد مقایسه است.

واژه های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه سازی تبرید، برنامه ریزی حمل و نقل، زمان بندی، زنجیره تأمین.

مقدمه

تأمین کنندگانی است که در نواحی مختلف جغرافیایی پراکنده اند، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها به یک شرکت تولیدکننده محصولات نهایی است. هدف تخصیص سفارش ها به تأمین کنندگان، تعیین توالی تولید در تأمین کنندگان، تخصیص سفارش ها به وسایل نقلیه و تعیین اولویت حمل سفارش ها از طریق وسایل نقلیه به منظور کمینه کردن مجموع زمان تکمیل سفارش ها است. فرض می شود تأمین کنندگان از یک ناوگان حمل و نقل مشترک که مشابه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)^۱ است برای انتقال سفارش ها به شرکت تولیدکننده استفاده می کنند. مسئله VRP نسخه های متعددی دارد. در این تحقیق، حالتی از مسئله VRP در نظر گرفته می شود که در آن تعدادی از تأمین کنندگان قرار گرفته در نقاط جغرافیایی متفاوت، متقاضی انتقال مقادیر مشخصی از کالاها به یک کارخانه (انبار مرکزی) هستند. سرویس دهی به این تأمین کنندگان از طریق چند وسیله نقلیه با ظرفیت های

زنجیره تأمین از جمله مهم ترین موضوعات مورد پژوهش در حوزه تولید و توزیع در بیست سال اخیر بوده است. یک زنجیره تأمین شامل تمام مراحل است که در یک محصول ارزش افزوده ایجاد می کند. اهمیت یکپارچه سازی و همگام سازی جریان مواد و اطلاعات در یک سیستم زنجیره تأمین سبب ایجاد تمایل بسیار بالای صاحبان صنعت و پژوهشگران آکادمیک شده است. در کل، مباحث زنجیره تأمین شامل تمام روابط بین تأمین کنندگان، تولید کنندگان، توزیع کنندگان و مصرف کنندگان می شود. زمان بندی جریان مواد در بین بخش های مختلف یک زنجیره تأمین از جمله مهم ترین مباحث کنترل موجودی و مدیریت زنجیره تأمین است که تا به حال توجه چندانی به آن نشده است و پژوهش های کمی در این زمینه صورت گرفته است [۱].

در این پژوهش، مسئله زمان بندی در زنجیره تأمین با دو مرحله بررسی می شود. مرحله اول شامل

جغرافیایی از پیش تعیین شده‌ای قرار دارند و فاصله بین تأمین کنندگانی که در یک ناحیه جغرافیایی قرار دارند، قابل چشم‌پوشی است. همچنین، وسایل نقلیه‌ای که به یک ناحیه جغرافیایی تعلق دارند، فقط می‌توانند سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین کنندگان همان ناحیه را حمل کنند. آورباخ [۵] زمان‌بندی بر خط در زنجیره تأمین متشکل از یک کارخانه و چند مشتری با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی جریان کاری سفارش‌ها را بررسی کرده است. اسکولز ریتز و همکاران [۶] یکپارچگی تولید و حمل‌ونقل در یک زنجیره تأمین عمومی را بررسی کرده‌اند و یک مدل ریاضی به منظور حل مسئله ارائه داده‌اند. باتنگر و همکاران [۷] به بررسی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و زمان‌بندی در حالت وجود دو نوع حمل‌ونقل هوایی و دریایی پرداخته‌اند. یونگ و همکاران [۸] زمان‌بندی در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای را با در نظر گرفتن چندین پنجره زمانی تحویل مشترک با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی بررسی کرده‌اند. مهرآوران و لجندران [۹] زمان‌بندی در محیط جریان کاری را با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی با دو تابع هدف کمینه‌کردن سفارش‌های نیمه‌ساخته^۴ و بیشینه‌کردن سطح سرویس بررسی کرده‌اند. آن‌ها یک مدل ریاضی خطی و یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای حل مسئله ارائه داده‌اند. عثمان و دمیرلی [۱۰] زمان‌بندی تحویل و اندازه انباشته اقتصادی در یک زنجیره تأمین سه مرحله‌ای و چندمحصولی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها یک مدل جدید بر پایه مسئله تخصیص مضاعف برای مسئله ارائه داده‌اند که یک سیکل مشترک هماهنگی پر و تخلیه‌شدن انبارها را تعیین می‌کند. آورباخ و بایسان [۱۱] مسئله زمان‌بندی بر خط^۵ در یک زنجیره تأمین دوسطحی با چند مشتری را بررسی کرده‌اند و یک الگوریتم تخمینی برای آن ارائه داده‌اند. در مسئله آن‌ها، قطع عملیات مجاز است و تحویل سفارش‌ها به صورت دسته‌ای در نظر گرفته شده است. کابرا و همکاران [۱۲] زمان‌بندی در زنجیره تأمین داروسازی را برای یک محیط چندمرحله‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای بررسی کرده‌اند. آن‌ها زمان‌بندی را به صورت پیوسته در نظر گرفته‌اند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۶ برای آن ارائه داده‌اند. پژوهش آن‌ها توسعه تحقیق شیاک و فلویدز [۱۳] است که محدودیت‌های اضافی نظیر

حمل متفاوت صورت می‌پذیرد. هر وسیله نقلیه در یک‌بار حمل به چند تأمین‌کننده سرویس می‌دهد که این امر موجب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل در زنجیره تأمین می‌شود.

با توجه به جدید بودن مسئله و بررسی‌نشده شدن آن در ادبیات موضوع، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده شده است و یک الگوریتم فرا ابتکاری به نام GA-SA که تلفیق جدیدی از الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) را در نظر می‌گیرد، به منظور حل مسئله ارائه شده است. نوآوری‌های این تحقیق به شرح زیر است:

- ترکیب مسئله زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در حالتی که تأمین‌کنندگان از یک ناوگان حمل‌ونقل مشترک مانند مسئله VRP استفاده می‌کنند؛
- توسعه مدل ریاضی برای مسئله مذکور؛
- ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری با تلفیق جدیدی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید.

در ادامه، مرور ادبیات زمان‌بندی در زنجیره تأمین ارائه می‌شود. سپس مسئله تشریح می‌شود و مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسئله ارائه می‌شود. بعد از آن، چهار الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله ارائه می‌شود و نتایج محاسباتی حاصل از حل مسائل مختلف از طریق الگوریتم‌های فرا ابتکاری بررسی می‌شود. در نهایت نیز نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آتی بیان می‌شود.

ادبیات موضوع

تاکنون تحقیقات مختلفی در مورد مسئله زمان‌بندی تولید در زنجیره تأمین صورت گرفته است. در این بخش، مرور ادبیات زمان‌بندی تولید در زنجیره تأمین ارائه می‌شود. لی و ومر [۲] مسئله ترکیب‌بندی زنجیره تأمین را با در نظر گرفتن محدودیت منابع بررسی کرده‌اند. ساویک [۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای یک مسئله زمان‌بندی مونتاژ در یک زنجیره تأمین با افق برنامه‌ریزی بلندمدت ارائه داده است. ذگردی و بهشتی‌نیا [۴] یکپارچگی زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در یک زنجیره دومرحله‌ای را بررسی کرده‌اند که تأمین‌کنندگان در نواحی

مسئله زمان‌بندی در زنجیره تأمین، پژوهش دگرودی و بهشتی‌نیا [۴] نزدیک‌ترین مسئله به موضوع مورد بررسی در این پژوهش است. در تحقیق آن‌ها فرض شده است تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی از پیش تعیین‌شده‌ای قرار دارند و فاصله بین تأمین‌کنندگان قرارگرفته در یک ناحیه جغرافیایی قابل‌چشم‌پوشی است. همچنین، وسایل نقلیه‌ای که به یک ناحیه جغرافیایی تعلق دارند، فقط می‌توانند سفارش‌های تخصیص‌یافته به تأمین‌کنندگان همان ناحیه را حمل کنند؛ به‌عبارت دیگر، محاسبات حمل‌ونقل بین هیچ‌یک از تأمین‌کنندگان صورت نمی‌پذیرد، اما در این تحقیق فرض می‌شود فاصله بین تأمین‌کنندگان قابل‌چشم‌پوشی نیست. تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی مختلف قرار دارند و همچنین وسایل نقلیه مجاز به حمل سفارش‌ها از تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی مختلف در یک محموله هستند. در جدول ۱، تحقیقات موجود در ادبیات موضوع دسته‌بندی و مقایسه شده است.

تغییرات وابسته به توالی^۷، زمان‌های تحویل چندگانه میانی^۸، تاریخ انقضا^۹ و محصولات معیوب، وجود هزینه‌های مربوط به دیرکرد در تحویل سفارش‌ها را به مدل آن‌ها اضافه کرده‌اند. آلریچ [۱۴] یکپارچگی زمان‌بندی ماشین‌آلات و مسیریابی وسایل نقلیه را با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی بررسی کرده است. توماس و همکاران [۱۵] زمان‌بندی در زنجیره تأمین زغال‌سنگ را با چند فعالیت مستقل که از طریق محدودیت‌های منابع با هم در ارتباط‌اند، بررسی کرده‌اند. سلوارجاه و ژانگ [۱۶] در مورد زمان‌بندی زنجیره تأمینی پژوهش انجام داده‌اند که در آن یک تولیدکننده مواد نیمه‌ساخته را از تأمین‌کنندگان در زمان‌های متفاوت دریافت می‌کند و کالاهای تکمیل‌شده را به‌صورت دسته‌ای به مشتریان تحویل می‌دهد.

هرچند در تحقیقات متعددی، زمان‌بندی در زنجیره تأمین بررسی شده است، بسیاری از محققان مسئله را به‌صورت کلان بررسی کرده‌اند. از بین تحقیقات درمورد

جدول ۱. مقایسه تحقیق حاضر با تحقیقات صورت‌گرفته

مقاله	سطح یکپارچگی			در نظر گرفتن ناوگان حمل‌ونقل		زمان
	تأمین‌کننده توزیع‌کننده تمرکز روی ساخت	سازنده	ترکیبی	بله	خیر	تک‌پریودی زمان گسسته پیوسته
Chang and Lee, 2004	*			*		*
Li and Womer, 2008			*		*	*
Sawik, 2009			*	*		*
Averbakh, 2010	*			*		*
Scholz-Reiter et al., 2010	*			*		*
Zegordi and Beheshti Nia, 2009		*		*		*
Archetti et al., 2011	*			*		*
Yeung et al., 2011			*		*	*
Mehravaran and Logendran, 2012	*			*		*
and Osman, 2012 Demirli		*		*		*
Averbakh and Baysan, 2013	*			*		*
Kabra et al., 2013			*		*	*
Shaik and Floudas, 2007	*			*		*
Ullrich, 2013	*			*		*
Thomas et al., 2014	*			*		*
Selvarajah and Zhang, 2014	*			*		*
تحقیق حاضر	*			*		*

ممکن است متفاوت باشد. ظرفیت حمل یک وسیله نقلیه میزان حجم یا وزنی از کالاها تعریف می‌شود که وسیله نقلیه هر بار حمل می‌کند.

- تأمین کنندگان در مختصات مختلف جغرافیایی قرار دارند.
- فاصله بین تأمین کنندگان قابل چشم‌پوشی نیست و هر یک از آن‌ها در فواصل متفاوتی از شرکت سازنده قرار دارند.
- هر یک از سفارش‌ها ظرفیت متفاوتی از وسایل نقلیه را اشغال می‌کند.
- به مجموعه سفارش‌هایی که یک وسیله نقلیه در یک بار حمل به شرکت سازنده انتقال می‌دهد یک محموله گفته می‌شود. در این حالت، وسیله نقلیه باید برای حمل محموله بعدی به سمت تأمین کننده موردنظر برود و استفاده شود؛ بنابراین، در زمان بندی باید به زمان برگشت نیز توجه شود.
- هر وسیله نقلیه در یک محموله خود می‌تواند سفارش‌های تأمین کنندگان مختلفی را حمل کند.
- زمان تکمیل هر سفارش زمانی است که سفارش مربوطه به شرکت سازنده تحویل داده می‌شود.

هدف تخصیص سفارش‌ها به تأمین کنندگان، تعیین توالی تولید در تأمین کنندگان، تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین اولویت حمل سفارش‌ها از طریق وسایل نقلیه به منظور کمینه کردن مجموع زمان‌های پردازش و حمل است.

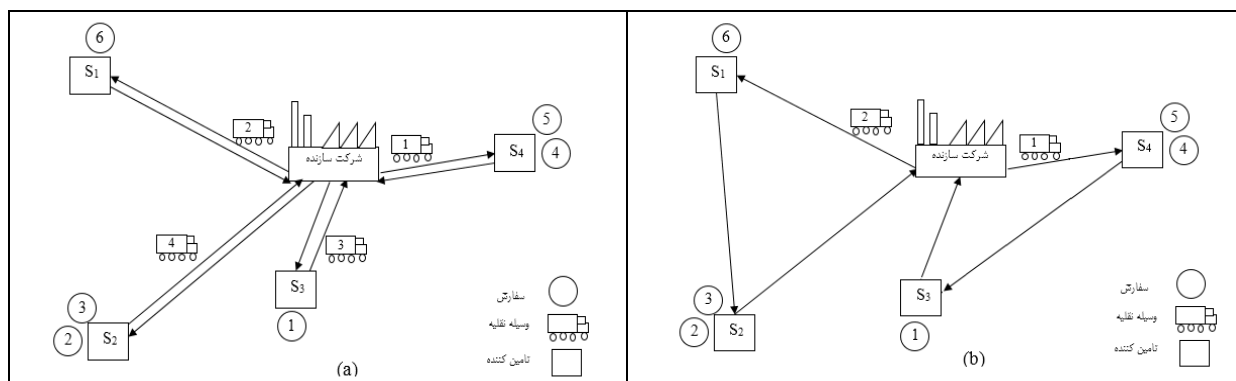
تعریف مسئله

در این بخش، مسئله تعریف و فرضیات آن بیان می‌شود. همچنین، در ادامه مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود.

فرضیات مسئله

همان‌طور که بیان شد، این پژوهش زمان بندی تولید و حمل و نقل در یک زنجیره تأمین دو مرحله‌ای را بررسی می‌کند. مرحله اول شامل تأمین کنندگان و مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها به یک شرکت سازنده محصولات نهایی است. سایر فرضیات مسئله به صورت زیر است:

- تعداد n سفارش وجود دارد که پس از پردازش از طریق m تأمین کننده مختلف در نواحی جغرافیایی جداگانه قرار دارند، باید از طریق یک ناوگان حمل و نقل متشکل از تعداد l وسیله نقلیه به سمت شرکت سازنده محصولات نهایی انتقال داده شوند.
- ممکن است برخی از تأمین کنندگان به علت داشتن تجهیزات و ماشین‌آلات بیشتر، سرعت تولید بالاتری نسبت به سایر تأمین کنندگان داشته باشند و مواد اقلام مورد نیاز کارخانه سازنده را سریع تر تولید کنند که این سرعت برحسب ماشین-ساعت بر زمان بیان می‌شود.
- وسایل نقلیه تشکیل دهنده ناوگان حمل و نقل نیز ممکن است سرعت حمل متفاوتی داشته باشند که این سرعت در کل مسیر ثابت فرض می‌شود.
- سرعت حمل و ظرفیت حمل برای هر وسیله نقلیه



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین

شکل ۱ نمایی از مسئله مورد بررسی در این تحقیق را با ۶ سفارش و ۴ تأمین‌کننده نشان می‌دهد که سفارش ۶ به تأمین‌کننده ۱، سفارش‌های ۲ و ۳ به تأمین‌کننده ۲، سفارش ۱ به تأمین‌کننده ۳ و سفارش‌های ۴ و ۵ به تأمین‌کننده ۴ اختصاص یافته‌اند. در شکل ۱-a تأمین‌کنندگان به‌طور مستقل سفارش‌های خود را به شرکت سازنده منتقل می‌کنند. شکل 1-b حالتی را نشان می‌دهد که تأمین‌کنندگان از ناوگان حمل‌ونقل مشترکی برای رساندن سفارش‌های خود به شرکت سازنده استفاده می‌کنند. نوع همکاری تأمین‌کنندگان در استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک، VRP است.

مدل ریاضی مسئله

در این بخش مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسئله مورد نظر بیان می‌شود. قبل از ارائه مدل ریاضی مسئله، ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی می‌شوند. پارامترهای مسئله عبارت‌اند از:

n : تعداد سفارش‌ها

m : تعداد تأمین‌کنندگان

l : تعداد وسایل نقلیه

w_i : شاخص سفارش $(w_i=1, \dots, n)$

s : شاخص تأمین‌کنندگان $(s=1, \dots, m)$

k : شاخص وسیله نقلیه $(k=1, \dots, l)$

b : شاخص محموله $(b=1, \dots, n)$

vol_i : ظرفیت اشغالی توسط سفارش i ام

cap_k : ظرفیت حمل وسیله نقلیه k ام برحسب تعداد سفارش‌ها

P_{is} : زمان پردازش سفارش i ام در تأمین‌کننده s ام

tt_{ks}^0 : زمان حمل‌ونقل از تأمین‌کننده s تا شرکت سازنده توسط وسیله نقلیه k ام

tt_k^0 : زمان حمل‌ونقل از شرکت سازنده تا تأمین‌کننده s توسط وسیله نقلیه k ام

tt_{kss}' : زمان حمل‌ونقل از تأمین‌کننده s به تأمین‌کننده s' توسط وسیله نقلیه k ام

Q : یک عدد بسیار بزرگ

متغیرهای مدل نیز شامل موارد زیر است:

c_{ji} : زمان تکمیل سفارش i در مرحله j که $j=1, 2$

C_i' : زمان بارگذاری سفارش i ام روی یکی از وسایل نقلیه به‌منظور حمل

av_{kbi} : زمانی که وسیله نقلیه k ام، آماده حمل سفارش i در b امین مأموریت خود است.

Fin_{kb} : زمانی که وسیله نقلیه k ام تمام سفارش‌ها تخصیص یافته به محموله b ام خود را تحویل می‌دهد.

$Ready_{kb}$: زمانی که وسیله نقلیه k ام، آماده انجام دادن مأموریت b ام خود است.

X_{si} : اگر سفارش i ام به تأمین‌کننده s ام داده شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

Y_{iw} : اگر در مرحله اول سفارش i قبل از سفارش w قرار گیرد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

Z_{kib} : اگر سفارش i در b امین حمل به وسیله نقلیه k تخصیص یابد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Visit_{kibs}$: یک متغیر کمکی است. اگر وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود، سفارش i ام را از تأمین‌کننده s بارگذاری کند برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

r_{OS}^{kb} : اگر وسیله نقلیه k ام در مأموریت b ام خود از کارخانه به سمت تأمین‌کننده s برود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$r_{s't}^{kb}$: اگر وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود برای بار t ام از تأمین‌کننده s' به سمت تأمین‌کننده s برود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

r_{s0}^{kb} : اگر وسیله نقلیه k ام در مأموریت b ام خود از تأمین‌کننده s به سمت کارخانه برود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

پس از تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

این صورت برابر صفر است.

پس از تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

این صورت برابر صفر است.

پس از تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

این صورت برابر صفر است.

پس از تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

این صورت برابر صفر است.

$$MinZ = \sum_{i=1}^n C_i$$

St:

$$\sum_{s=1}^m x_{si} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^m r_{0s}^{kb} \geq 1 \setminus Q \sum_{i=1}^n z_{kib} \quad \forall k \quad (15)$$

$$\sum_{s=1}^m r_{s0}^{kb} \geq 1 \setminus Q \sum_{i=1}^n z_{kib} \quad \forall b \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ki(b+1)} \leq Q^* \sum_{i=1}^n z_{kib} \quad \forall k, \forall b < n-1 \quad (17)$$

$$c_i' \geq av_{kbi} - Q^*(1 - z_{kib}) \quad \forall k, \forall s \quad (18)$$

$$c_i' \geq c_{1i} \quad \forall i \quad (19)$$

$$av_{kbi} \geq c_w' + tt_{ks's} - Q^*(5 + y_{iw}' - z_{kib} - z_{kwb} - x_{ws'} - x_{is} - r_{s',s}^{kb}) \quad \forall w, i > w, \forall k \quad (20)$$

$$av_{kbw} \geq c_i' + tt_{kss'} - Q^*(6 - y_{iw}' - z_{kib} - z_{kwb} - x_{ws'} - x_{is} - r_{s,s'}^{kb}) \quad \forall s, s', \forall b \quad (21)$$

$$y_{iw}' = 1 - y_{wi}' \quad \forall w, i, w > i \quad (22)$$

$$fin_{kb} \geq left_{kbs} + tt_{ks0} - Q^*(1 - r_{s0}^{kb}) \quad \forall k, \forall b \quad (23)$$

$$ready_{k(b+1)} \geq fin_{kb} \quad \forall b < n-1, \forall i \quad (24)$$

$$left_{kbs} \geq c_i' - Q^*(2 - z_{kib} - x_{is}) \quad \forall k, \forall s \quad (25)$$

$$left_{kbs} \geq left_{kbs'} + tt_{ks's} - Q^*(1 - \sum_{t=1}^n r_{s',s}^{kt}) \quad \forall k, \forall s, s' \quad (26)$$

$$r_{s,s'}^{kb} \geq z_{kib} + z_{kwb} + x_{is} + x_{ws'} + y_{iw} - 4 \quad \forall k, \forall s, s' | s \neq s' \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^l \sum_{b=1}^n z_{kib} = 1 \quad \forall i \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n vol_i \times z_{kib} \leq Cap_k \quad \forall k, \forall b \quad (29)$$

$$C_{1i} \geq p_{is} - Q(1 - x_{si}) \quad \forall i, \forall s \quad (30)$$

$$c_{1i} + Q^*(2 + y_{iw} - x_{si} - x_{sw}) \geq c_{1w} + p_{is} \quad \forall i, w, i < w \quad (31)$$

$$c_{1w} + Q^*(3 - y_{iw} - x_{si} - x_{sw}) \geq c_{1i} + p_{ws} \quad \forall s \quad (32)$$

$$y_{iw} = 0 \quad \forall i, w, i \geq w \quad (33)$$

$$r_{0s}^{kb} + \sum_{s'=1}^m r_{s',s}^{kb} = r_{s0}^{kb} + \sum_{s'=1}^m r_{s,s'}^{kb} \quad \forall k, \forall b, \forall s \quad (34)$$

$$r_{s0}^{kb} + \sum_{s'=1}^m r_{s,s'}^{kb} \leq 1 \quad \forall k, \forall b \quad (35)$$

$$r_{0s}^{kb} + \sum_{s'=1}^m r_{s',s}^{kb} \leq 1 \quad \forall s \quad (36)$$

$$r_{s,s}^{kb} = 0 \quad \forall k, \forall b, \forall s \quad (37)$$

$$\sum_{s=1}^m r_{0s}^{kb} \leq 1 \quad \forall k, \forall b \quad (38)$$

$$\sum_{s=1}^m r_{0s}^{kb} \leq \sum_{i=1}^n z_{kib} \quad \forall k, \forall b \quad (39)$$

$$Visit_{kibs} \leq 0.5(z_{kib} + x_{si}) \quad \forall k, \forall b, i \quad (40)$$

$$Visit_{kibs} \leq z_{kib} + x_{si} - 1 \quad \forall s \quad (41)$$

$$r_{0s}^{kb} \leq \sum_{i=1}^n Visit_{kibs} \quad \forall k, \forall b \quad (42)$$

$$r_{s0}^{kb} \leq Visit_{kibs} \quad \forall s \quad (43)$$

$$r_{0s}^{kb} + \sum_{s'=1}^m r_{s',s}^{kb} \geq 1 \setminus Q^* \sum_{i=1}^n Visit_{kibs} \quad \forall i, \forall k, \forall b \quad (44)$$

طریق یکی از مسیرهای ممکن بازدید شوند. مجموعه محدودیت ۱۵ بیان می‌کند اگر به محموله b ام وسیله نقلیه k ام سفارشی تخصیص داده شود، این وسیله نقلیه در مأموریت b ام خود، حتماً باید از کارخانه خارج شود و حتماً باید از یک تأمین‌کننده به کارخانه وارد شود. مجموعه محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند اگر به محموله b ام از وسیله نقلیه k ام سفارشی تخصیص نیابد، نمی‌توان به محموله $b+1$ ام آن سفارشی تخصیص داد. مجموعه محدودیت ۱۷ بین زمان بارگیری هر سفارش با زمان آماده‌بودن وسیله نقلیه‌ای که باید آن را از تأمین‌کننده مربوطه حمل کند، رابطه برقرار می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۸ بین زمان بارگذاری هر سفارش با زمان تکمیلش در مرحله اول رابطه برقرار می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۹ زمان آماده‌بودن وسیله نقلیه k ام در محموله b ام برای بارگذاری هر سفارش، خود را با زمان بارگیری سفارش‌ها دیگر مرتبط می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۰ ارتباط اولویت حمل سفارش‌ها با یکدیگر را تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۱ بین زمان اتمام مأموریت b ام وسیله نقلیه k ام و زمانی که این وسیله نقلیه در مأموریت b ام خود از تأمین‌کننده s خارج می‌شود رابطه برقرار می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۲ بین زمان اتمام مأموریت b ام وسیله نقلیه k ام و زمان آغاز مأموریت $b+1$ ام آن رابطه برقرار می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۳ زمانی را که وسیله نقلیه k ام در مأموریت b ام از تأمین‌کننده s خارج می‌شود با زمان بارگذاری سفارش‌های متعلق به آن محموله مرتبط می‌سازد. مجموعه محدودیت ۲۴ زمان‌های خروج وسیله نقلیه k ام از تأمین‌کنندگان مختلف مرتبط با محموله b ام خود را نسبت به یکدیگر در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های ۲۵ لزوم پیمایش مسیر بین دو تأمین‌کننده را توسط وسیله نقلیه k ام در مأموریت b ام آن تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت ۲۶ رابطه بین زمان تحویل سفارش i به شرکت سازنده و زمان اتمام مأموریت وسیله نقلیه‌ای که آن را حمل می‌کند، در نظر می‌گیرد.

ارائه روش حل

همان‌طور که ذکر شد، به‌دلیل ساختار NP-hard مسئله، استفاده از روش‌های دقیق به‌منظور حل مسئله در زمان

$$\begin{aligned} & \forall b \\ & \forall k \\ c_{2i} & \geq fin_{kb} - Q(1 - z_{kib}) \\ & \forall i \quad (26) \\ & \forall b \end{aligned}$$

مجموعه محدودیت ۱ بیانگر این مطلب است که هر سفارش فقط باید به یک تأمین‌کننده تخصیص داده شود. مجموعه محدودیت ۲ بیان می‌کند هر سفارش فقط به یک وسیله نقلیه و به یک محموله از آن باید تخصیص یابد. مجموعه محدودیت ۳ تضمین می‌کند در هر محموله مجموع فضای اشغالی توسط سفارش‌های تخصیص‌یافته به یک وسیله نقلیه نباید از ظرفیت آن وسیله نقلیه بیشتر شود. مجموعه محدودیت ۴ زمان تکمیل هر سفارش در مرحله تأمین‌کنندگان را با توجه به زمان آمادگی سفارش‌ها در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت ۵ بیان می‌کند هر تأمین‌کننده نمی‌تواند در هر لحظه بیش از یک سفارش را پردازش کند. مجموعه محدودیت ۶ مقداری از متغیرهای زائد را حذف می‌کند. مجموعه محدودیت ۷ تضمین می‌کند تعداد دفعات ورود به تأمین‌کننده s باید برابر تعداد دفعات خروج از آن باشد. مجموعه محدودیت ۸ تضمین می‌کند ماشین k ام برای محموله b ام خود بیش از یک‌بار از هر تأمین‌کننده عبور نکند. مجموعه محدودیت ۹ برخی از متغیرهای زائد مسئله را حذف می‌کند. مجموعه محدودیت ۱۰ بیان می‌کند وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود نمی‌تواند به‌طور مستقیم از کارخانه به دو یا چند تأمین‌کننده برود. مجموعه محدودیت ۱۱ بیان می‌کند ماشین k ام برای حمل محموله b ام فقط زمانی می‌تواند از مبدأ خارج شود که قرار باشد سفارشی را حمل کند. مجموعه محدودیت ۱۲ تعیین می‌کند که وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود سفارش i را از تأمین‌کننده s بارگذاری کند یا خیر. این امر به کمک تعریف یک متغیر کمکی به نام $Visit_{kibs}$ صورت می‌پذیرد. همچنین، مجموعه محدودیت ۱۳ بیان می‌کند وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود فقط زمانی می‌تواند به‌طور مستقیم از کارخانه به یک تأمین‌کننده وارد شود یا از یک تأمین‌کننده به کارخانه وارد شود که قرار باشد سفارشی از آن تأمین‌کننده را بارگذاری کند. مجموعه محدودیت ۱۴ تضمین می‌کند تأمین‌کنندگانی که براساس متغیر $Visit_{kibs}$ باید توسط وسیله نقلیه k ام در محموله b ام خود بازدید شوند، از

تبرید از فرایند سردشدن تدریجی فلزات الهام گرفته شده است. فرایند سردسازی تدریجی را آنیل^{۱۰} کردن می‌گویند. تبرید یک فرایند برای بهبود خواص کیفی کریستال جامد است. سردسازی بسیار کند و تدریجی موجب آزادسازی انرژی و قرارگیری ذرات در یک جهت با بیشترین پایداری می‌شود. در سال ۱۹۸۳، کریک پاتریک و همکاران شبیه‌سازی فرایند آنیل کردن را برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهاد کردند [۱۸]. گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسعه داده شده برای مسئله به صورت زیر است:

۱. یک دمای اولیه برای مسئله در نظر بگیرید. همچنین، یک جواب اولیه به صورت تصادفی تولید کنید و مقدار تابع هدف آن را محاسبه کنید.

۲. گام‌های زیر را u بار در دمای فعلی تکرار کنید.

۱-۲. تعداد k تا همسایگی برای جواب تولید کنید و در بین همسایگی‌ها بهترین را انتخاب کنید.

۲-۲. بهترین همسایگی را با جواب اولیه مقایسه کنید. در صورت برتری بهترین همسایگی نسبت به جواب اولیه، آن را با جواب اولیه جایگزین کنید و در غیر این صورت یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید کنید. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده از مقدار تابع احتمال پذیرش جواب‌های بد کمتر بود، بهترین همسایگی را جایگزین کنید. در غیر این صورت، تغییری در جواب فعلی ندهید.

۳. با استفاده از تابع کاهش دما، دمای فعلی را کاهش دهید و جایگزین دمای فعلی کنید.

۴. معیار خاتمه را بررسی کنید و در صورت به اتمام نرسیدن به گام ۲ بروید در غیر این صورت الگوریتم را خاتمه دهید.

الگوریتم GA-SA

همان‌طور که اشاره شد، الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله یک الگوریتم فرا ابتکاری است که ترکیبی از الگوریتم‌های SA و GA است. نحوه عملکرد الگوریتم تلفیقی بدین صورت است که ابتدا الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود و در صورت بهبود نیافتن بهترین جواب طی $n1$ تکرار متوالی، الگوریتم SA فعال می‌شود. در این حالت،

قابل قبول معقول نیست و باید از روش‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری برای یافتن جواب در زمان معقول استفاده کرد. در این پژوهش، یک الگوریتم فرا ابتکاری که تلفیق جدیدی از الگوریتم‌های SA و GA را در نظر می‌گیرد به منظور حل مسئله ارائه می‌شود که الگوریتم GA-SA نامیده می‌شود. به منظور بررسی کارایی آن، الگوریتم پیشنهادی ذگردی و بهشتی‌نیا [۴] به نام DGA به همراه الگوریتم‌های GA و SA برای حل مسئله توسعه داده می‌شود و عملکرد الگوریتم پیشنهادی با آن‌ها مقایسه می‌شود. به منظور تبیین الگوریتم پیشنهادی، ابتدا هر یک از الگوریتم‌های SA و GA به طور مختصر شرح داده می‌شود و در ادامه الگوریتم پیشنهادی تشریح می‌شود.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های جست‌وجو است که بر اساس تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش عمل می‌کند. جان هالند این الگوریتم را در سال ۱۹۷۰ ارائه داده است [۱۷]. در ادامه، گام‌های الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این مسئله - پس از ایجاد جمعیت اولیه که به صورت تصادفی ایجاد می‌شود - بیان می‌شود:

- از جمعیت فعلی دو کروموزوم به تصادف انتخاب کنید و از طریق عمل تلفیق کروموزوم یا کروموزوم‌های فرزند را تولید کنید.
- از جمعیت فعلی یک کروموزوم تصادفی انتخاب کنید و از طریق عمل جهش، کروموزوم جدید را تولید کنید.
- با استفاده از عملگر انتخاب تعدادی از اعضای جمعیت را انتخاب کنید و به نسل بعدی انتقال دهید.
- اگر شرط خاتمه محقق نشده است، به گام ۱ بازگردید، در غیر این صورت به گام ۵ بروید.
- بهترین عضو جمعیت فعلی را برای جواب الگوریتم معرفی کنید.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

شبیه‌سازی تبرید یک روش جست‌وجوی تصادفی است که برای مسائل بهینه‌سازی به کار می‌رود. الگوریتم شبیه‌سازی

جواب، بهبودی حاصل نمی‌شود، الگوریتم را خاتمه دهید، در غیر این صورت خروجی الگوریتم SA را جایگزین بهترین جواب حاصل از GA کنید و به گام ۲ بازگردید.

به‌منظور تبیین رابطه بین گام‌های ۴ و ۵ باید گفت در صورتی که n_2 کوچک‌تر از n_1 باشد عملگر SA الگوریتم پیشنهادی هیچ‌گاه فعال نمی‌شود، زیرا تا قبل از فعال‌سازی این عملگر دستور خاتمه الگوریتم صادر می‌شود.

در ادامه، بخش‌های مختلف این الگوریتم تبیین می‌شود. در این پژوهش، هر کروموزوم از دو رشته از اعداد حقیقی تشکیل شده است که به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند. رشته اول مربوط به تأمین‌کنندگان و رشته دوم مربوط به وسایل نقلیه است (شکل ۲). شماره ستون نشان‌دهنده شماره سفارش است. قسمت صحیح هر عدد در سطر اول (دوم) نشان‌دهنده شماره تأمین‌کننده‌ای (وسیله نقلیه‌ای) است که سفارش متناظر با آن ژن به آن تخصیص یافته است. اعداد اعشار نیز اولویت تولید (حمل) هر سفارش را تعیین می‌کند.

بهترین جواب نسل فعلی GA به‌عنوان جواب اولیه الگوریتم SA در نظر گرفته می‌شود و الگوریتم SA مطابق با گام‌های ذکر شده روی آن اجرا می‌شود. در صورت بهبود جواب توسط SA، جواب بهبودیافته به نسل فعلی GA منتقل می‌شود و فرایند حل الگوریتم GA ادامه می‌یابد. در صورت بهبود نیافتن جواب توسط SA، الگوریتم GA با همان جمعیت قبلی ادامه می‌یابد. به‌منظور تبیین بیشتر، گام‌های الگوریتم پیشنهادی در زیر بیان شده است:

۱. جمعیت اولیه‌ای از کروموزوم‌ها را به‌صورت تصادفی ایجاد کنید.
۲. الگوریتم ژنتیک با گام‌های گفته‌شده را اجرا کنید.
۳. اگر در n_1 تکرار متوالی در بهترین جواب، بهبودی حاصل نشد، الگوریتم SA را اجرا کنید و بهترین جواب حاصل از GA را جواب اولیه الگوریتم SA در نظر بگیرید.
۴. الگوریتم SA را طبق گام‌های بیان‌شده اجرا کنید.
۵. اگر $n_2 > n_1$ تکرار متوالی است که در بهترین

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$	$\lfloor \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \rfloor$
تأمین‌کنندگان	۰/۵۶	۱/۴۸	۰/۲۳	۰/۹۸	۱/۶۹	۲/۰۴
وسایل نقلیه	۱/۷۵	۰/۵۰	۰/۶۸	۰/۹۹	۱/۶۳	۱/۱۵

شکل ۲. ساختار کروموزومی مسئله

SA دمای اولیه برابر ۲۰۰۰، دمای خاتمه برابر ۰، تابع کاهش دما به‌صورت $T_{new} = 2000 - 40 * T_{old}$ ، تعداد همسایگی برابر ۱۵ و تعداد تکرار در هر نسل برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، تابع احتمال پذیرش جواب‌های بد به‌صورت $e^{-\frac{\Delta f}{t}}$ محسوب شده است که Δf اختلاف جواب فعلی با بهترین همسایگی و t درجه حرارت فعلی است.

نتایج محاسباتی

به‌منظور بررسی کیفیت الگوریتم GA-SA برای حل مسئله

در این تحقیق از عملگر تلفیق تک نقطه برش و از عملگر جهش جابه‌جایی استفاده شده است. عملگر انتخاب نیز از نوع چرخ رولت است. به‌منظور ایجاد همسایگی در الگوریتم SA نیز عملگر جابه‌جایی به‌کار گرفته شده است. پس از اجراهای متعدد روی مسائل مختلف به‌صورت تجربی مشخص شد مقادیر زیر برای الگوریتم GA-SA به جواب‌های مناسبی در زمان حل معقول منجر می‌شود. در الگوریتم ژنتیک اندازه جمعیت اولیه برابر ۱۰۰، نرخ تلفیق برابر با ۰/۹، نرخ جهش برابر با ۰/۱، n_1 برابر ۱۰ و n_2 برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، در قسمت الگوریتم

با توجه به جدول ۱ برای هر یک از پارامترهای بیان شده، سطوح مختلفی نظیر کم، متوسط و بالا در نظر گرفته شده است. تمامی پارامترها به جز تعداد سفارش‌ها از توزیع یکنواخت پیروی می‌کنند. در کل $1 * 1 * 2 * 2 * 3 * 3 * 3 * 3$ که برابر با ۱۰۸ مسئله تصادفی است، تولید می‌شود. به منظور انجام دادن مقایسه‌ها، تعداد زیادی مسئله تصادفی ایجاد شد که از طریق هر سه الگوریتم اجرا شده‌اند. در ادامه، نتایج محاسباتی الگوریتم‌ها بررسی می‌شود. تمام برنامه‌های کامپیوتری این پژوهش از طریق زبان برنامه‌نویسی Matlab نوشته شده و از طریق لپ‌تاپ با پردازنده core i3 اجرا شده است.

مورد بررسی الگوریتم پیشنهادی ذگردی [۴] به نام DGA، یک الگوریتم ژنتیک و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به صورت جداگانه توسعه داده شد و نتایج الگوریتم GA-SA با نتایج آن‌ها مقایسه شد.

تولید داده‌های تصادفی

مسئله مورد بررسی پارامترهای متعددی دارد که در اینجا هفت پارامتر برای ایجاد مسائل تصادفی بررسی شده است. این پارامترها عبارت‌اند از:

۱. تعداد سفارش‌ها، ۲. تعداد تأمین‌کنندگان، ۳. تعداد وسایل نقلیه، ۴. زمان پردازش سفارش‌ها، ۵. مسافت‌ها، ۶. حجم سفارش‌ها، ۷. ظرفیت ماشین.

جدول ۲. پارامترها و سطوح مورد بررسی

پارامتر	سطح کم	سطح متوسط	سطح بالا
تعداد سفارش‌ها	۱۰	۵۰	۱۰۰
تعداد تأمین‌کنندگان	U[1,5]	U[5,10]	U[10,15]
تعداد وسایل نقلیه	U[1,5]	U[5,10]	U[10,15]
زمان پردازش سفارش‌ها	U[1,20]		U[20,30]
مسافت‌ها	U[1,20]		U[20,30]
حجم سفارش‌ها		U[1,5]	
ظرفیت وسایل نقلیه		U[5,20]	

چهار الگوریتم افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد میانگین جواب‌های الگوریتم GA-SA در تمام حالات از میانگین جواب الگوریتم‌های GA، DGA و SA بهتر است و با افزایش تعداد سفارش‌ها این اختلاف بیشتر می‌شود. به منظور بررسی زمان حل بیشتر الگوریتم پیشنهادی شاخصی با عنوان بهبود نسبی نسبت به زمان مطرح می‌شود که این معیار از رابطه $\Delta obj = \Delta obj / \Delta t$ به دست می‌آید. در این رابطه Δobj بیانگر اختلاف جواب به دست آمده از دو الگوریتم مختلف و Δt بیانگر اختلاف زمان حل دو الگوریتم است. مقدار پارامتر Delta بین دو الگوریتم GA-SA و DGA در مورد کل مسائل (سطر آخر) برابر با ۰/۳۵، بین دو الگوریتم GA-SA و GA برابر با ۰/۳۵ و بین دو الگوریتم GA-SA و SA برابر با ۰/۴۷ است. با توجه به معیار Delta مشخص می‌شود الگوریتم پیشنهادی به ازای هر یک ثانیه زمان بیشتر اجرا، مقدار قابل قبولی

بررسی نتایج محاسباتی

به منظور بررسی کیفیت الگوریتم GA-SA، جواب آن با سه الگوریتم DGA و GA و SA که به صورت جداگانه توسعه داده شده‌اند، مقایسه شد. نتایج در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، عملگرهای دو الگوریتم GA و SA مانند عملگرهای الگوریتم تلفیقی GA-SA است. در ادامه، الگوریتم GA-SA ارزیابی می‌شود.

بر اساس نتایج، با افزایش تعداد سفارش‌ها، میانگین جواب‌ها و زمان‌های به دست آمده برای هر چهار الگوریتم افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد تأمین‌کنندگان، میانگین جواب‌ها کاهش می‌یابد، با افزایش تعداد وسایل نقلیه، میانگین جواب‌ها و زمان‌های چهار الگوریتم کاهش می‌یابد. به علاوه، با افزایش زمان پردازش سفارش‌ها در تأمین‌کنندگان، میانگین جواب‌های هر چهار الگوریتم افزایش می‌یابد. با افزایش مسافت‌ها نیز میانگین جواب‌های

سالمور CPLEX بررسی شده است. در این مسائل، تعداد سفارش‌ها با n تعداد تأمین‌کنندگان با s و تعداد وسایل نقلیه از طریق m مشخص شده‌اند. در نهایت، $n*s*m$ بیانگر سبب مسئله است. نتایج نشان می‌دهد در برخی مسائل، الگوریتم ما توانسته است جواب بهینه را پیدا کند. در برخی موارد که این امر محقق نشده است، این اختلاف ناچیز است. همچنین، زمان حل الگوریتم پیشنهادی از جواب بهینه کمتر است.

بهبود در تابع هدف ایجاد کرده است. همچنین، تمام الگوریتم‌ها روی یک لپ‌تاپ با پردازنده با قدرت ۱/۴ گیگاهرتز انجام گرفته است. بدیهی است با استفاده از پردازنده‌های به‌روزتر، اختلاف در زمان حل الگوریتم‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد و این اختلاف را قابل‌اغماض می‌کند یا حداقل معیار Delta را بهبود می‌دهد. در جدول ۴، به‌منظور تحلیل صحت مدل ریاضی ارائه شده است و همچنین کیفیت الگوریتم پیشنهادی تعدادی مسئله به‌صورت حل دقیق با استفاده از نرم‌افزار GAMS و

جدول ۳. نتایج اجرا و مقایسات الگوریتم‌ها

پارامتر	سطح	مقدار پارامتر	میانگین جواب‌های الگوریتم‌ها				میانگین زمان‌های الگوریتم‌ها				
			GA	SA	DGA	GA-SA	GA	SA	DGA	GA-SA	
	کم	۱۰	۵۳۲/۲۴۴۱۷	۶۴/۰۴۶۱۱	۵۱/۶۴	۵۰/۷۳۹۶	۸/۵۲۲۷۸	۱/۳۴۹۱۷	۲۹/۸۹	۱۷۹/۲۶۴	
تعداد سفارش‌ها	متوسط	۵۰	۹۹۰/۶۱۸	۱۰۶۵/۷۴	۹۶۰/۸۹	۸۵۲/۱۵۴	۵۱/۸۳۴۲	۵/۸۴۳۶۱	۱۷۹/۹۶	۷۹۳/۳۵۴	
	بالا	۱۰۰	۴۱۴۸/۶۱	۴۴۱۴/۵۸۶	۴۰۲۴/۱۵	۳۴۵۴/۳۷۳	۱۱۱/۸۴۱	۱۴/۳۲۵	۳۸۸/۳۱	۱۵۵۴/۳۲	
	کم	U[1,5]	۲۱۴۵/۲	۲۳۱۰/۲	۲۰۸۰/۸	۱۷۹۹/۶	۵۴/۳۵۳	۷/۶۴۴۷	۱۸۸/۷۱	۷۵۲/۶۱	
تعداد تأمین‌کنندگان	متوسط	U[5,10]	۱۵۹۷/۳۶	۱۷۰۹/۷۶	۱۵۴۹/۴	۱۳۲۶/۹	۵۱/۱۳۱۴	۶/۳۴۵	۱۷۷/۵۲	۸۳۲/۶۷	
	بالا	U[10,15]	۱۴۴۹/۹۲	۱۵۲۴/۴۱	۱۴۰۶/۴	۱۲۳۰/۷۴	۶۶/۷۱۴۴	۷/۵۲۸۰۶	۲۳۱/۶۳	۹۴۰/۶۶۷	
	کم	U[1,5]	۲۹۵۳	۳۱۲۵/۳	۲۸۶۴/۴	۲۴۷۹/۳	۶۳/۴۴۳	۸/۷۳۵	۲۲۰/۲۷	۷۸۴/۵۲	
تعداد وسایل نقلیه	متوسط	U[5,10]	۱۱۵۴/۱۸	۱۲۶۹/۶۳	۱۱۱۹/۵	۹۱۵/۰۳۶	۶۲/۰۱۶۷	۵/۹۲۵۸۳	۲۱۵/۳۲	۷۹۳/۲۴۷	
	بالا	U[10,15]	۱۰۸۵/۳۴	۱۱۴۹/۴۷	۱۰۵۲/۷	۹۱۵/۰۳۶	۴۶/۷۴۸۹	۶/۸۵۶۹۴	۱۶۲/۳۱	۹۴۹/۱۷۳	
زمان پردازش سفارش‌ها	کم	U[1,20]	۱۳۶۹/۴۸	۱۴۵۸/۶۲	۱۳۲۸/۳	۱۱۷۰/۷۹	۵۴/۸۱۷۸	۷/۲۰۱۴۸	۱۹۰/۳۲	۷۸۸/۱۴۹	
	بالا	U[20,30]	۲۰۹۲/۱۸	۲۲۳۷/۶۳	۲۰۲۹/۴	۱۷۳۴/۰۶	۵۹/۹۸۱۱	۷/۱۴۳۷	۲۰۸/۲۵	۸۹۶/۴۷۹	
مسافت بین تأمین‌کنندگان	کم	U[1,20]	۱۱۳۲/۷۴	۱۲۴۱	۱۰۹۸/۷	۹۳۰/۱۸۱	۶۲/۵۳۶۷	۶/۳۶۷۵۹	۲۱۷/۱۲	۸۴۷/۳۰۲	
	بالا	U[20,30]	۲۳۲۸/۹۲	۲۴۵۵/۲۵	۲۲۵۹	۱۹۷۴/۶۶	۵۲/۲۶۲۲	۷/۹۷۷۵۹	۱۸۱/۴۵	۸۳۷/۳۲۶	
تمام مسائل			۱۷۳۰/۸۳	۱۸۴۸/۱۲	۱۶۷۸/۹	۱۴۵۲/۴۲	۵۷/۳۹۹۴	۷/۱۷۲۵۹	۱۹۹/۲۹	۸۴۲/۳۱۴	

جدول ۴. مقایسه الگوریتم و جواب بهینه

شماره	مسئله	CPLEX		GA-SA	
		جواب	زمان اجرا	جواب	زمان اجرا
۱	۳×۲×۲	۱۲۲	۴۴	۱۲۲	۳۸
۲	۳×۳×۳	۱۰۴	۴۳	۱۰۴	۲۷
۳	۴×۲×۲	۲۲۲	۲۰۹	۲۲۲	۳۰
۴	۴×۳×۳	۱۵۷	۵۶۱	۱۵۷	۳۹
۵	۴×۳×۲	۲۲۲	۷۶۳	۲۲۲	۴۱
۶	۴×۴×۴	۱۵۲	۵۷۷	۱۵۲	۶۵
۷	۵×۱×۱	۴۰۸	۳۲۳۰	۴۰۸	۳۴
۸	۵×۲×۲	۲۷۳	۴۲۵	۲۷۵	۴۴
۹	۵×۲×۳	۲۹۲	۴۴۶	۲۹۲	۴۷
۱۰	۵×۳×۲	۲۸۹	۴۷۱	۲۹۱	۲۷

نتیجه گیری

در این پژوهش، مسئله زمان بندی در یک زنجیره تأمین دو مرحله ای با تأکید بر یکپارچگی مراحل آن بررسی شده است که مرحله اول شامل تأمین کنندگان و مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها به یک شرکت سازنده محصولات نهایی می شود. تابع هدف کمینه کردن مجموع زمان های تکمیل سفارش هاست. ابتدا یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده شد. سپس یک الگوریتم فرا ابتکاری به نام GA-SA ارائه شد که تلفیقی جدید از الگوریتم های ژنتیک و شبیه سازی تبرید است. برای ارزیابی الگوریتم GA-SA سه الگوریتم ژنتیک،

شبیه سازی تبرید و DGA به صورت جداگانه برای مسئله توسعه داده شد و نتایج آنها با نتایج الگوریتم GA-SA مقایسه شد. نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی است.

در پژوهش های آتی می توان به ارائه الگوریتم های فرا ابتکاری دیگر مانند روش جست و جوی ممنوع، زنبور عسل و تلفیق عملگر SA در قسمت های دیگر الگوریتم GA مانند بخش جهش، توجه داشت. همچنین، اضافه کردن توابع هدف دیگر مانند کمینه کردن مجموع مسافت طی شده و تبدیل مسئله به یک مسئله بهینه سازی چندهدفه زمینه دیگری برای تحقیقات آتی است.

مراجع

1. Chang, Y. and Lee, C. (2004). "Machine scheduling with job delivery coordination", *European Journal of Operational Research*, Vol. 158, No. 2, PP. 470–487.
2. Li, H. and Womer K. (2008). "Modeling the supply chain configuration problem with resource constraints", *International Journal of Project Management*, Vol. 26, No. 6, PP. 646–654.
3. Sawik, T. (2009). "Coordinated supply chain scheduling", *Int. J. Production Economics*, Vol. 120, No. 2, PP. 437–451.
4. Zegordi, S. H. and Beheshti Nia, M. (2009). "Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 9-10, PP. 928-939.
5. 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.
6. 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.
7. Bhatnagar, R., Mehta, P. and Teo, C. C. (2011). "Coordination of planning and scheduling decisions in global supply chains with dual supply modes", *Int. J. Production Economics*, Vol. 131, No. 2, PP. 473–482.
8. Yeung, W., Choi, T. and Cheng, T. C. E. (2011). "Supply chain scheduling and coordination with dual delivery modes and inventory storage cost", *Int. J. Production Economics*, Vol. 132, No. 2, PP. 223–229.
9. Mehravaran, Y. and Logendran, R. (2012). "Non-permutation flow shop scheduling in a supply chain with sequence-dependent setup times", *Int. J. Production Economics*, Vol. 135, No. 2, PP. 953–963.
10. Osman, H. and Demirli, K. (2012). "Economic lot and delivery scheduling problem for multi-stage supply chains", *Int. J. Production Economics*, Vol. 136, No. 2, PP. 275–286.
11. Averbakh, I. and Baysan, M. (2013). "Approximation algorithm for the on-line multi-customer two-level supply chain scheduling problem", *Operations Research Letters*, Vol. 41, No. 6, PP. 710–714.
12. Kabra, S., Shaik, M. A. and Rathore, A. S. (2013). "Multi-period scheduling of a multi-stage multi-product bio-pharmaceutical process", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 57, No. 1, PP. 95–103.

13. Shaik, M. A. and Floudas, C. A. (2007). "Improved unit-specific event-based continuous-time model for short-term scheduling of continuous processes: Rigorous treatment of storage requirements", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, No. 6, PP. 1764– 1779.
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. Thomas, A., Venkateswaran, J., Singh, G. and Krishnamoorthy, M. (2013). "Resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example", *European Journal of Operational Research*, Vol. 236, No. 3, PP. 946– 957.
16. Selvarajah, E. and Zhang, R. (2014). "Supply chain scheduling at the manufacturer to minimize inventory holding and delivery costs", *Int. J. Production Economics*, Vol. 147, No. 1, PP. 117– 124.
17. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor.
18. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, PP. 671– 680.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Vehicle Routing Problem
 2. Genetic Algorithm
 3. Simulated Annealing
 4. Work in Process
 5. On Line
 6. Mixed Integer Programming
 7. Sequence Dependent Changeover
 8. Multiple Intermediate Due Dates
 9. Shelf-life Date
 10. Annealing
-