

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای زمان‌بندی و مسیریابی سیستم‌های حمل و نقل

مقاله علمی-پژوهشی

*شهریار افندی‌زاده (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اشکان صفری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

حمید بیگلری‌راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

صفحه ۳۴-۱۵

چکیده

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، جزء مهم‌ترین مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است. مسائل مربوط به مسیریابی، به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌شود که در آن تعدادی خودرو متمرکز در یک یا چندانبار مستقر بوده و باید به مجموعه‌ای از مشتریان که هر یک دارای تقاضای معینی هستند، مراجعه کرده و خدماتی را ارائه نمایند. هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی سیستم حمل و نقل برای مسیرهای طولانی است. بدین منظور پس از مطالعه منابع و مراجع مرتبط با طراحی سیستم‌های توزیع یکپارچه، مسئله‌ی مورد بررسی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و مفروضات تعیین شده به صورت برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح آمیخته مدل‌سازی گردید. پس از حل دقیق مدل، و به دلیل NP-Hard بودن مساله از دو الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مساله در ابعاد بزرگ استفاده گردید. لازم به ذکر است که چهار معیار هزینه، میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن، زمان راه‌اندازی و سطح ارزیابی شده، که نتایج حاکی از عملکرد بالای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نسبت به جستجوی هارمونی بوده است. بطور خاص، برای حل مدل در ابعاد بزرگ مشخص شد که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با بهبودی دو درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی سبب کاهش هزینه‌های بیشتر زنجیره شده است. از طرف دیگر در زمان انتقال محموله، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز با متوسط زمان نود دقیقه نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی به میزان دو درصد با زمان کمتری محصولات بین کارخانه و مشتری را منتقل داده است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین، مساله مسیریابی وسایل نقلیه، انتشار آلاینده، الگوریتم جستجوی هارمونی

۱- مقدمه

مهم‌ترین مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است. مسائل مربوط به مسیریابی، به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌شود که در آن تعدادی خودرو متمرکز در یک یا چندانبار مستقر بوده و باید به مجموعه‌ای از مشتریان که هر یک دارای تقاضای معینی هستند، مراجعه کرده و خدماتی را ارائه نمایند (Abdi et al., 2020). در مسائل مسیریابی، از مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود تا مسافت طی شده، زمان کل سفر، تعداد وسایل حمل و نقل، جریمه‌های دیرکرد و هزینه‌ها، به حداقل برسد. در مسیریابی، محدودیت‌های مختلف اعمال می‌شود که این

از آنجا که توزیع کالا به طور متوسط حدود ۱۰ درصد از هزینه کل تولید را تشکیل می‌دهد، بهبود کارایی در حمل و نقل کالاها باعث صرفه جویی زیادی در قیمت تمام شده آنها و رقابت در اقتصاد منطقه‌ای می‌شود. بیشتر مسائل حوزه توزیع کالا می‌توانند به صورت مساله مسیریابی وسیله نقلیه در نظر گرفته شوند که تعمیم مساله فروشنده دوره گرد است و یکی از مسائل مهم در محدوده مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است که روش‌های مکاشفه‌ای زیادی برای حل آن ایجاد شده است (Afandizadeh and Bigdeli Rad, 2021). مساله مسیریابی وسیله نقلیه، جزء

مختلط برای مسأله‌ی TDVRPTW ارائه می‌شود که هدف آن کمینه سازی هزینه‌های ثابت و متغیر است. در این مسأله محدودیت پنجره زمانی سخت و محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه در نظر گرفته خواهد شد.

یکی از کارهای اساسی که در زمینه مسیریابی وسایل نقلیه انجام شده، توسط گروئر و همکاران در سال ۲۰۰۹ می‌باشد که مسأله مسیریابی سودآور ثابت را معرفی نمود (Groër et al., 2009). در مقاله کوچ و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مرور ادبیات دقیق در رابطه با مسأله مسیریابی وسایل نقلیه که در آن پایداری مهم است، انجام شده است. پایداری مشتری یا به عبارتی مشتریان وفادار، برای کارمندان و حتی خود مشتریان مطلوب است، به دلیل اینکه مزایای متعددی را به همراه می‌آورد. مثلاً کارمندان می‌توانند با مکان جغرافیایی مشتریان خود آشنا شده و در صورتی که اتفاقات غیرمنتظره مثل مسدود شدن مسیر رخ داد؛ آمادگی بیشتری داشته باشند. علاوه بر این آن‌ها با نیازهای مشتریان آشنا می‌شوند و قادر به ارائه یک سرویس سفارشی بهتر خواهند بود. و همچنین ایجاد سهام با مشتریان را نیز می‌توانند داشته باشند (Kovacs et al., 2014). در مدل ارائه شده توسط اسپلیت و دیگر هم‌هانگی زمان نیز دارای اهمیت می‌باشد. به دلیل اینکه برنامه ریزی و سازمان دهی بازدید مشتریان را تسهیل می‌کند. هم‌هانگی در تعداد تحویل نیز مهم است، به خصوص در زمینه سیستم‌های موجودی که توسط فروشنده مدیریت می‌شود. به منظور کاهش تغییرات در تعداد تحویل و تسهیل مدیریت انبار مشتریان می‌تواند سودمند باشد (Spliet and Dekker, 2016). در مقاله کوئلهو و همکاران در سال ۲۰۱۲، انواع مختلفی از ConVRP وجود دارد که انواع متفاوتی از محدودیت‌ها را می‌پذیرد. محدودیت‌های ثابت سخت‌تر در برخی از مواقع برای راننده زمان ورود را مشخص می‌کنند. در حالی که محدودیت‌های نرم‌تر از انعطاف پذیری بیش‌تر برخوردار هستند (Coelho et al., 2012). همچنین در مقاله فیلیت و همکاران (۲۰۱۴) با هدف محدود کردن یک راننده پرسنل که به یک مشتری خدمت می‌دهند یک مدل ریاضی بهینه ارائه شده است. علاوه بر این، در تعدادی از مقالات هم‌هانگی در قالب محدودیت‌ها مورد توجه قرار نگرفته؛ اما در تابع هدف یا به عنوان تابع هدف چندگانه معرفی شده است یا به صورت جمع به کار رفته است (Feillet et al., 2014). نیو و همکاران در سال ۲۰۱۸، با هدف حداقل رساندن هزینه مسیریابی به

محدودیت‌ها باعث شده که تا کنون انواع مختلفی از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه، ارائه گردد. یکی از این محدودیت‌ها، وجود پنجره‌های زمانی در سرویس به مشتریان می‌باشد (Ticha et al., 2019).

مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با پنجره زمانی مسئله تعمیم یافته‌ای از مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با محدودیت ظرفیت است که اخیراً توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه حمل و نقل به خود اختصاص داده است (Afandizadeh et al., 2023). در مدل‌های مبتنی بر پنجره زمانی، هدف کمینه کردن زمان انجام سرویس‌ها و افزایش رضایت مشتری است. مدل‌های پنجره زمانی معمولاً در دو حالت مدل‌های سخت و مدل‌های نرم ارائه می‌شوند. در مدل‌های سخت، وسیله نقلیه ملزم به ارائه خدمات به یک مشتری در بازه زمانی معین می‌باشد و سرویس نمی‌تواند خارج از این بازه، انجام شود. در حالت پنجره زمانی نرم، سرویس دهی در خارج از این بازه زمانی نیز می‌تواند انجام گیرد و به سرویس‌هایی که خارج از بازه زمانی تعیین شده انجام گردند، جریمه تعلق خواهد گرفت (Hajisoleimani et al., 2021).

مسأله مسیریابی وسیله نقلیه در شرایط ترافیکی یکی از انواع مسائل مسیریابی وسیله نقلیه پویا است. هدف اصلی در این مسأله کمینه‌سازی کل زمان سفر و هزینه‌های ناشی از آن است، با این فرض که زمان سفر بین دو گره وابسته به شرایط ترافیکی و به صورت تابعی از زمان اعزام وسایل نقلیه است (Afandi Zargari et al., 2019). پژوهش‌ها تاکنون بر این اساس ارائه شده‌اند که شبکه‌های حمل و نقل ساختاری همچون گراف دارند. در واقع، آن چه که در ادبیات موضوعی مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با پنجره زمانی مورد استفاده قرار گرفته است، وجود تنها یک یال بین دو نقطه مشخص است. در این حالت، تنها عامل مؤثر بر انتخاب یا عدم انتخاب مشتری بعدی برای خدمت رسانی، مقایسه زمان سفر مسیر دستیابی به مشتریان مختلف از طریق این مسیرهای واحد می‌باشد (Sadykov et al., 2021). پیچیدگی‌های محیط‌های شهری سبب شده‌اند که امکان دسترسی به نقاط مختلف از طریق بیش از یک یال وجود داشته باشد. در چنین شرایطی مقررات ترافیکی برای مسیرها، از جمله تعیین حداکثر سرعت مجاز، در انتخاب مسیر برای ادامه سفر و وسایل نقلیه تأثیرگذار است (Afandizadeh et al., 2023). در پژوهش حاضر، یک مدل غیرخطی عدد صحیح

واقعی می‌تواند نتیجه‌گیری واقعی‌تر و مطمئن‌تری را فراهم سازد (Chen et al., 2018).

در مقاله هو و همکاران در سال ۲۰۱۸، به بررسی مسایلی و وسایل نقلیه سنگین با پنجره‌ی سخت زمانی در شرایط عدم قطعیت تقاضا و زمان سفر پرداخته شده است. برای پاسخگویی دقیق به نیازهای مشتری استراتژی‌های مشتری‌مداری پیچیده و جدیدی طراحی شده است، و همچنین اهمیت برنامه ریزی برای یک پنجره زمانی بسیار مهم شده است. (Hu et al., 2018).

فو و همکاران در سال ۲۰۱۷، به حل مساله مسیریابی وسایل نقلیه به کمک تقسیم کار و همچنین در نظر گیری پنجره‌های زمانی تحویل کالا پرداختند. شرکت مورد بررسی در این مقاله در صنعت بسته بندی فلز فعالیت می‌کند. مدل‌های ریاضی پیشنهادی برای برنامه ریزی غیرمتمرکز، یعنی یک برنامه تولید و یک برنامه توزیع متوالی ساخته شود ارائه گردید. ایشان در این مقاله با توسعه یک روش فراابتکاری دو فاز به حل مسئله برنامه ریزی یکپارچه نائل آمدند (Fu et al., 2017). براندو در سال ۲۰۲۰، الگوریتم جستجوی محلی تکرار شونده با زنجیره‌های ورودی برای حل مشکل مسیریابی وسایل نقلیه باز با پنجره‌های زمانی را مورد بررسی قرار داد. نتایج خوب الگوریتم تکرار شونده محلی عمدتاً به دلیل نوع آشفتگی‌های اعمال شده آن است،

به ویژه زنجیره‌های ورودی و استفاده از راه حل‌های ابتکاری. عملکرد این الگوریتم با استفاده از مجموعه بزرگی از ۴۱۸ معیار برای مشکل، تست شده است. راه حل‌های به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم حاضر قابل رقابت با بهترین الگوریتم‌های موجود می‌باشد (Brandão, 2020). تاس و همکاران (در سال ۲۰۱۴)، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی انعطاف پذیر را مطرح کردند. در مطالعه آن‌ها، امکان سرویس دهی در خارج از پنجره زمانی سخت وجود دارد، در این صورت برای هر واحد سرویس دهی خارج از بازه زمانی میزانی جریمه در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود (Taş et al., 2014).

عیدی و عبدالرحیمی در سال ۲۰۲۲، مدل جدیدی از مسئله مسیریابی چند قرارگاهی و برای چند دوره متوالی به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح فرموله کرده اند که قرارگاه ابتدایی و انتهایی برای هر مسیر در هر دوره با توجه به مشتریان سایر دوره‌ها مشخص می‌گردد و در آن الزامی به بازگشت وسایل نقلیه به قرارگاه اولیه نیست. آن‌ها از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای

صورت کاهش مصرف سوخت و کاهش تولید آلاینده‌گی و همچنین صرفه جویی در هزینه‌ها، مدل مسیریابی وسایل نقلیه باز که در آن وسایل نقلیه نیاز به بازگشت به انبار پیدا نمی‌کنند را ارائه داد. در این مقاله، با بررسی یک ناوگان همگن و استفاده از مدل ریاضی WTPRVOG در شهر پکن توانستند مدلی ارائه بدهند که ۲۰ درصد هزینه کل را کاهش می‌دهد، ۳۰ درصد تولید کربن دی اکسید را کاهش می‌دهد و حتی ۱۳ درصد درآمد راننده‌ها نیز افزایش پیدا کرده است. آن‌ها به دلیل اهمیت انتخاب وسیله نقلیه بررسی ناوگان ناهمگن را پیشنهاد دادند (Niu et al., 2018). در مقاله براتن و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک نسخه ریاست از مساله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی سخت در نظر گرفته شده است که در آن زمان سفر نامشخص است. روش‌های دقیق موجود قادر هستند برخی از مشکلات را حل نمایند. این مقاله بر توسعه یک روش مؤثر مبتنی بر جستجوی تطبیقی محله‌های بزرگ، متمرکز شده است. آزمایشات نشان می‌دهد که پیش پردازش می‌تواند برای حداقل ۴۰ مشتری به مواردی کمک کند، در حالی که اهمیت آن برای موارد کوچکتر ناچیز است. از طرف دیگر، هر دو جستجوی محلی و قانون پذیرش جدید کاملاً مؤثر بوده و بدون نیاز به زمان محاسبات اضافی بالاتری، پیشرفتهای چشمگیری را ارائه می‌دهند (Braaten et al., 2017).

در مقاله اسپلیت و همکاران در سال ۲۰۱۸، به مسیریابی وسیله نقلیه با اختصاص پنجره زمانی وابسته به زمان انتقال پرداخته شده است. هدف به حداقل رساندن هزینه حمل نقل می‌باشد و به کمک الگوریتم قیمت و در نظر گیری محدودیت‌ها آن‌ها برای حل مشکل قیمت آن‌ها الگوریتم برچسب گذاری را توسعه داده و یک نابرابری معتبر مخصوص وابسته به زمان انتقال ارائه نمودند. و در انتها نتایج آزمایش عددی با روش ابتکاری خودشان را که راندمان مناسبی داشت را ارائه نمودند (Spliet et al., 2018). در مقاله چن و همکاران در سال ۲۰۱۸، مساله مسیریابی وسایل نقلیه باز (بدون بازگشت به انبار) چند انباره با پنجره زمانی مبتنی بر میزان تولید کربن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر این موضوع بوده است که الگوریتم پیشنهادی در این مقاله برای مقیاس‌های کوچک‌تر مناسب‌تر است. هر چند نتایج و پیشنهاد‌های آن‌ها بسیار برای دولت‌ها و محیط زیست مفید و کارگشا بوده است اما استفاده از داده‌های

تعداد سناریوهایی که یک مسیر به خود می‌بیند، به دست می‌آید. چون سرعت در سناریوهای مختلف متفاوت است، باید برآورد اولیه از زمان طی مسیر در شرایط ترافیکی لحظه‌ی شروع حرکت، بهنگام سازی شود. در این پژوهش، حالتی در نظر گرفته می‌شود که به دلیل طولانی بودن مسافت بین برخی از گره‌ها، زمان سفر ممکن است بیش از یک روز کاری طول بکشد و با شروع هر روز جدید سناریو از اول اجرا می‌شود. پنجره زمانی سخت و محدودیت بیشترین ظرفیت برای وسایل نقلیه در نظر گرفته می‌شوند. برای اعتبار سنجی مدل، پس از خطی سازی، چند نمونه مسائل برنامه ریزی عدد صحیح خطی مختلط مورد نظر توسط الگوریتم فراابتکاری در نرم افزار متلب انجام شده و نتایج حل دقیق مسائل ارائه می‌گردد.

۲-۱- مدلسازی ریاضی

در این بخش به ارائه مدل ریاضی مساله حاضر که شامل مجموعه‌ها و اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌ها می‌باشد پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که مدل ارائه شده با هدف کاهش هزینه، زمان و انتشار آلاینده که اهداف مساله مورد نظر در این پژوهش است می‌باشند.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه‌ها و اندیس‌ها	مجموعه‌ها و اندیس‌ها	مجموعه‌ها و اندیس‌ها
مجموعه مشتری	N	N
مشتری	$i \in N$	i
مشتری	$l \in N$	l
مشتری	$j \in V$	j
(اندیس مشتریان میباشد که A_j را مجموعه M و N تعریف می‌کند)	$V = M \cup N$	
مجموعه توزیع کننده (انبار)	$m \in M$	m
مجموعه تأمین کننده	$p \in P$	p
مجموعه وسایل نقلیه ناهمگن	$k \in K$	k
ظرفیت وسایل نقلیه	$q \in Q$	q_k
بازه زمانی مورد بررسی بین a_i و b_i هست	$[a_i, b_i]$	Time window
که a_i کران پایین زمانی و b_i کران بالای زمانی است و بین این دو تاسست		
در طول ساعات کاری، انبار در دسترس خواهد بود (در دسترس بودن m)	$[0, b_m]$	
مجموعه تکنولوژی استفاده شده برای تولید محصول	$T \in Te$	T

حل مدل استفاده کرده‌اند (Eydi and Abdorahimi, 2022). گولزینسکی و همکاران در سال ۲۰۲۱، مساله مسیریابی وسایل نقلیه با تحویل‌های انشعابی را مطرح کردند و برای اولین بار برای حل این مساله یک برنامه ریزی عدد صحیح مبتنی بر روشهای ابتکاری ارائه کردند. آن‌ها مدل خود را روی ۳۰ مورد بررسی کردند تا کاهش مسافت سفر به دست آمده با تحویل‌های انشعابی مبتنی بر یک انبار و انبارهای چندگانه را بررسی کنند (Gulczynski et al., 2021).

۲- روش‌شناسی تحقیق

در این پژوهش، یک مدل جدید برای مساله مسیریابی وسیله نقلیه وابسته به زمان با پنجره زمانی با در نظر گرفتن شرایط ترافیکی ارائه می‌شود. هدف، کمینه سازی هزینه‌های ثابت و متغیر است، با این فرض که زمان سفر بین دو گره وابسته به شرایط ترافیکی و به صورت تابعی از زمان اعزام وسایل نقلیه باشد. مدل مسیریابی در این مطالعه، مبتنی بر یک مدل ریاضی برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد. سپس مدل توسعه داده شده پیشنهادی، در نرم افزار گمز به صورت قطعی حل می‌شود. پس از حل مدل به صورت قطعی؛ مدل ریاضی شبکه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تبرید در نرم افزار متلب حل می‌شود. در مرحله آخر نیز جواب‌های به دست آمده از حل قطعی و حل با الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تبرید مقایسه شده و راهکارهایی برای بهینه سازی عملکرد شبکه پیشنهادی طراحی شده ارائه می‌شود.

در این مدل، یک گراف چند گانه کامل بدون جهت فرض شده، که مجموعه‌ای از رئوس و یال‌های گراف قرار دارد و تعداد مشتریان و انبار مشخص می‌باشد. وسایل نقلیه همگون با حداکثر ظرفیت در انبار مستقر هستند. هر مشتری دارای مقدار تقاضای نامنفی، پنجره زمانی $[a_i, b_i]$ و زمان سرویس‌دهی مشخص است. برای هر مسیر نیز مسافت و مقدار زمان بین دو گره مشخص می‌گردد.

بین هر دو گره می‌تواند بیش از یک مسیر موجود باشد و هر مسیر با توجه به ساعات کاری شرایط ترافیکی یگانه‌ای دارد. برای اعمال شرایط ترافیکی، هر روز کاری به بازه‌های زمانی با طول یکسان تقسیم می‌شود که سناریو نام دارد. در هر سناریو، با توجه به تراکم ترافیکی، میانگین سرعت تعیین می‌شود. با توجه به زمان حرکت از مبدأ و برآورد اولیه از زمان بین دو گره،

پارامترها	$Ma \in MA$	مجموعه مواد استفاده شده برای تولید محصول	Ma
H_m		هزینه راه اندازی مکان توزیع کننده m	برابر با ۱ در صورتی که خودور k از محل تأمین p به سمت محل توزیع m حرکت کند و در غیراینصورت صفره (ارتباط بین تأمین کننده و توزیع کنندگان را نشان می دهد)
C_{ij}		هزینه ارسال هر واحد محصول از i به j (هزینه رفت و برگشت بین i و j) یعنی بین مشتریان	برابر با ۱ در صورتی که خودور k از محل مشتری i به سمت محل مشتری j حرکت کند و در غیراینصورت صفره (ارتباط بین مشتریان را نشان می دهد)
C_{pm}		هزینه ارسال هر واحد محصول از تأمین کننده p به توزیع کننده m	برابر با ۱ در صورتی که خودور k از محل توزیع m به سمت محل حرکت کند و در غیراینصورت صفره (ارتباط بین مشتری و توزیع کننده را نشان می دهد) (ارسال مستقیم را نشان می دهد)
h		هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه	
Z_{pm}		تعداد محصول ارسالی از تأمین کننده p به توزیع کننده m	برابر با ۱ در صورتی که خودور k از محل مشتری i به سمت محل مشتری l حرکت کند و در غیراینصورت صفره (ارتباط بین مشتریان را نشان می دهد)
Z_{mi}		تعداد محصول ارسالی از توزیع کننده m به مشتری i	برابر با ۱ در صورتی که خودور k از محل مشتری l به سمت محل مشتری j حرکت کند و در غیراینصورت صفره (ارتباط بین مشتریان را نشان می دهد)
dis_{il}		فاصله بین مشتری i و مشتری l	
dis_{pm}		فاصله بین تأمین کننده p و توزیع کننده m	
dis_{mi}		فاصله بین توزیع کننده m و مشتری i	
$Poll$		مقدار انتشار دی اکسید کربن توسط وسایل نقلیه در طول حرکت (مقدار انتشار تولید شده توسط وسایل نقلیه در هنگام حمل و نقل) بر حسب ppm	
Q_m		ظرفیت توزیع کننده (انبار) m	برابر با ۱ در صورتی که تأمین کننده p با تکنولوژی T راه اندازی شده باشد در غیراینصورت صفره
d_i		میزان تقاضای مشتری i	برابر با ۱ در صورتی که تأمین کننده p با مواد Ma برای تولید محصول راه اندازی شده باشد در غیراینصورت صفره
B_{ij}		برابر با بیشترین مقدار بازه $\text{Max}\{b_i + t_{ij} - a_j, 0\}$ (در مورد زمان رسیدن کالا صحبت کرده)	مدت زمان ارسال وسیله نقلیه k به مکان i (زمان رسیدن وسیله k به مکان i)
B_{mi}		برابر با بیشترین مقدار بازه $\text{Max}\{b_i + t_{mi} - a_m, 0\}$ (در مورد زمان رسیدن کالا صحبت کرده)	مدت زمان ارسال وسیله نقلیه k به مکان j (زمان رسیدن وسیله k به مکان j)
t_{mi}		مدت زمان ارسال کالا بین مشتری i و توزیع کننده m (زمان رسیدن کالا بین i و m)	زمان کل خدمت رسانی و جابه جای وسیله نقلیه k هنگام بازگشت به مکان m (زمان برگشت وسیله k به m)
t_{ij}		مدت زمان ارسال کالا بین مشتری i و مشتری j (زمان رسیدن کالا بین i و j)	
θ_{i0}		فاکتور وزنی تعداد کل فرصت های شغلی ایجاد شده	
θ_{id}		فاکتور وزنی تعداد روزهای از دست رفته ناشی از آسیب های کاری	
O_p^T		تعداد فرصت های شغلی مهیا شده به ازای راه اندازی تأمین کننده p با تکنولوژی T	
O_m^T		تعداد فرصت های شغلی مهیا شده به ازای راه اندازی توزیع کننده m با تکنولوژی T	
l^T		میانگین روزهای از دست رفته ناشی از مسائل سلامتی کارگران در زمانی که از تکنولوژی Te استفاده می شود	
l^{Ma}		میانگین روزهای از دست رفته ناشی از مسائل سلامتی کارگران در زمانی که از مواد Ma استفاده می شود	
متغیرهای تصمیم			
y_m		برابر با ۱ در صورتی که مرکز توزیع راه اندازی شود و در غیراینصورت صفره	

توابع هدف

- Z_1 تابع هدف اول: تابع هدف هزینه کل شبکه
 - Z_2 تابع هدف دوم: تابع هدف زمان رسیدن وسیله نقلیه به مشتری
 - Z_3 تابع هدف سوم: تابع زیست محیطی ناشی از انتشار آلاینده توسط وسایل نقلیه در طول مسیر
 - Z_4 تابع هدف چهارم: تابع اجتماعی
- تابع هدف Z_1 :**

به میلی گرم بر لیتر تبدیل کنیم. 1 ppm یعنی در هر یک میلیون لیتر از هوا، یک لیتر از این گاز وجود دارد.

^۱ برای گازها می توان کمیت ppm را توسط یک ضریب معین، به کمیت میلی گرم بر لیتر تبدیل نمود. فرض می کنیم 1 ppm از یک گاز معین در هوا وجود دارد و می خواهیم غلظت این گاز را از ppm

محدودیت (۵) اطمینان می‌دهد که مراجعه به هر مشتری دقیقاً یکبار بوده است در صورتی که وسیله نقلیه k از محل مشتری i به سمت محل مشتری j حرکت کند برابر ۱ می‌باشد و در غیراینصورت صفر است.

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in N} x_{mi}^k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

محدودیت (۶) اطمینان می‌دهد که هر وسیله نقلیه حداکثر یکبار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که خودور k از محل توزیع m به سمت i حرکت کند برابر ۱ می‌باشد و در غیراینصورت صفر است (ارتباط بین مشتری و توزیع کننده را نشان می‌دهد).

$$\sum_{i \in V} X_{il}^k - \sum_{j \in V} X_{ij}^k = 0 \quad \forall k \in K, l \in N \quad (7)$$

محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تعادل گردش در هر مکان حفظ می‌شود.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in V} d_i X_{ij}^k \leq q \quad \forall k \in K \quad (8)$$

محدودیت (۸) ظرفیت وسایل نقلیه را کنترل می‌کند.

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \cup \{m\}} d_i x_{ij}^k \leq Q_m y_m \quad \forall m \in M \quad (9)$$

محدودیت (۹) ظرفیت انبارها را کنترل می‌کند.

$$t_{mi} - s_i^k \leq B_{mi}(1 - X_{mi}^k) \quad \forall k \in K, m \in M, i \in N \quad (10)$$

$$S_i^k + t_{ij} - S_j^k \leq B_{ij}(1 - X_{ij}^k) \quad \forall k \in K, i \in N, j \in V \quad (11)$$

محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) باعث می‌شوند وسیله نقلیه‌ای که روی قوس سفر می‌کند، قبل از j به i برسد.

$$a_i \leq s_i^k \leq b_i \quad \forall k \in K, i \in V \quad (12)$$

محدودیت (۱۲) زمان رسیدن به هر مکان را به پنجره زمانی‌اش را محدود می‌کند.

$$y_m \in \{0,1\} \quad \forall m \in M \quad (13)$$

$$X_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (14)$$

$$Z_1 = \text{minimize} \sum_{m \in M} H_m^T y_m^T + h \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} X_{mi}^k + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} C_{ij} X_{ij}^k + \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} Z_{pm} C_{pm} \quad (1)$$

معادله (۱) هزینه‌ی کل بازگشایی انبار، هزینه‌ی ثابت وسیله نقلیه، و هزینه‌ی جابجایی وسایل نقلیه را به حداقل می‌رساند.

تابع هدف Z_2

$$Z_2 = \min \left[\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} t_{pm} X_{pm}^k + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} t_{ij} X_{ij}^k \right] \quad (2)$$

معادله (۲) زمان انتقال محصول از تأمین کننده به توزیع کنندگان، از توزیع کنندگان به مشتری و بین مشتریان را به حداقل می‌رساند.

تابع هدف Z_3

$$Z_3 = \text{Poll} \left[\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \text{dis}_{pm} X_{pm} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \text{dis}_{ij} X_{ij}^k \right] \quad (3)$$

معادله (۳) کاهش آلاینده‌گی در طول مسیر انتقال محصولات توسط وسایل نقلیه را کاهش می‌دهد.

تابع هدف Z_4

$$Z_4 = \max(\theta_{l0} \left(\sum_{p \in P} \sum_{T \in Te} O_p^T X_p^T + \sum_{m \in M} \sum_{T \in Te} O_m^T y_m \right) - \theta_{ld} \left(\sum_{p \in P} \sum_{T \in Te} l^T X_p^T + \sum_{m \in M} \sum_{Ma \in MA} l^{Ma} Z_p^{Ma} \right)) \quad (4)$$

معادله ۴ به حداکثر رساندن تعداد منافع اجتماعی حاصل از ایجاد فرصت‌های شغلی در زنجیره را بیان می‌کند.

محدودیت‌ها:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} X_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in N \quad (5)$$

به عبارت دیگر مسائل نمونه باید به گونه‌ای تولید شوند که قابل حل نشدنی باشند. در این تحقیق برای حل مسائل نمونه، ویژگی‌های ذیل مدنظر قرار می‌گیرند.

تقاضای دوره‌های نیاز مشتریان باید به گونه‌ای تعیین شود که از ظرفیت وسایل نقلیه کمتر باشد. به عبارت دیگر هر مشتری باید بتواند کل تقاضای دوره‌ی نیاز خود را از یک وسیله‌ی حمل یکجا دریافت نماید. لازم به ذکر است که تقاضای دوره‌های نیاز هر مشتری ثابت می‌باشد. پنجره‌ی زمانی مرتبط با هر مشتری باید در بازه‌ی زمانی دوره‌های نیاز تعیین گردد. مکان مشتریان و مراکز توزیع باید به گونه‌ای تعیین شوند که فاصله‌ی زمانی مسیر رفت و برگشت هر مشتری با حداقل یکی از مراکز توزیع در بازه‌ی زمانی دوره‌های نیاز قرار گیرد. ظرفیت وسایل نقلیه در مساله مسیریابی وسیله‌ی نقلیه برابر با ۱۰۰ واحد و سرعت آنها ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. هزینه‌ی سفر بین هر دو نقطه متناسب با فاصله‌ی مستقیم میان آن دو نقطه می‌باشد. هزینه‌ی خرید و انتقال محصولات از تأمین‌کننده‌ی اصلی به مراکز توزیع برابر با ۵/۰ واحد می‌باشد. ظرفیت هر مرکز توزیع ۲۰۰۰ واحد در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ی ثابت سالیانه‌ی هر مرکز توزیع ۱۰۰۰۰ واحد و هزینه‌ی ثابت هر بار استفاده از وسیله‌ی نقلیه ۱ واحد می‌باشد. برای تعیین تقاضای هر مشتری، عددی به تصادف از توزیع یکنواخت تولید می‌شود.

در این بخش به نحوه کدنویسی و مدل‌سازی نرم افزاری الگوریتم‌های معرفی شده در این راستا پرداخته می‌شود. ابتدا لازم به ذکر است که ما در کنار این برنامه داده‌های متفاوت جهت بررسی در نظر گرفته شونند. به عنوان مثال تعداد کالا و تقاضا را در ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است. در ابعاد کوچک تعداد تقاضا را بین ۱ تا ۳۰، در ابعاد متوسط بین ۳۰ الی ۸۰ و در ابعاد گسترده بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. با انجام روند تعداد تکرارها و بررسی پاسخ‌های تابع هدف در همسایگی‌های متفاوت بهترین جواب در هر یک از حالات بدست آمده که نتایج در بخش‌های بعد ارائه می‌شوند. بر اساس آنچه که در مفاهیم پیاده سازی مدل در نرم افزار متلب مشخص شده است، ابتدا باید داده‌های مورد بررسی که در واقع تولید داده می‌باشد را ارائه دهیم تا بر اساس آن‌ها، نتایج حاصل بدست آیند. برای دستیابی به نتایج، ابتدا از نرم افزار گمز و سپس در نرم افزار متلب استفاده شده است.

به منظور صحت‌گذاری و کالیبراسیون مدل پیشنهادی، با بکارگیری حلگر Cplex برای حل دقیق در نرم افزار گمز، نتایج بدست آمده برای هزینه، انتشار گاز دی اکسید کربن و مدت زمان انتقال

محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) شرایط متغیرهای تصمیم‌گیری را تعیین می‌کند.

(۱۵)

$$\sum_{p \in P} Z_{pm} \geq \sum_{i \in N} X_{pm}^k d_i \quad \forall m, k$$

محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند که تعداد محصول ارسالی از طرف تأمین‌کننده p به توزیع‌کننده m نباید از میزان تقاضای مشتری i کمتر باشد.

(۱۶)

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} Z_{pm} = \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} Z_{mi}$$

محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که مجموعه ارسال کالا برای هر توزیع‌کننده توسط p برابر با مجموعه Z_{pm} باشد.

(۱۷)

$$\sum_{Ma \in MA} X_p^{Ma} \leq 1 \quad \forall p$$

(۱۸)

$$\sum_{T \in Ta} X_p^T \leq 1 \quad \forall p$$

معادلات (۱۷) و (۱۸) تضمین می‌کنند که در یک مکان مشخص بیش از یک تکنولوژی و یک ماده به هر تأمین‌کننده اختصاص نیافته است.

(۱۹)

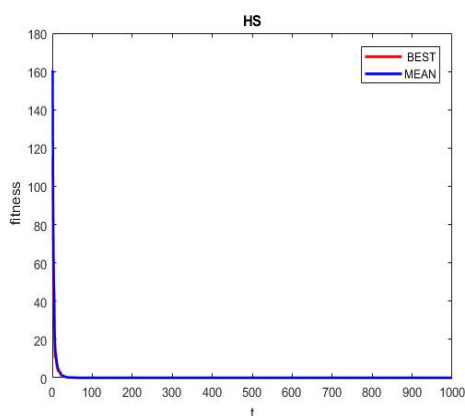
$$X_p^T, Z_p^{Ma}, y_m \in (0, 1) \\ \forall p, Ma, T, m$$

محدودیت (۱۹) باینری و غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم‌گیری را تضمین می‌کند.

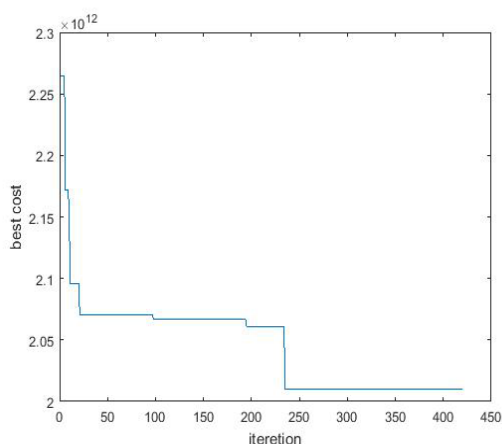
۲-۲- مدل سازی

در این بخش از تحقیق به ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های حل ارائه شده پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا کارایی این الگوریتم‌ها در حل مسائل نمونه با ابعاد کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در حل مسائل نمونه با ابعاد متوسط و بزرگ پرداخته می‌شود. به علت عدم وجود داده‌های استاندارد، به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌های ارائه شده چندین مسأله‌ی نمونه با بهره‌گیری از برخی داده‌های ارائه شده در مقاله پانبون و همکاران (Ponboon et al., 2016) تولید می‌شوند. ابعاد هر مسأله‌ی نمونه به وسیله‌ی تعداد مراکز توزیع بالقوه و تعداد مشتریان مشخص می‌شود. در تولید مسائل نمونه باید ویژگی‌های مسأله مدنظر قرار گیرد.

که در این روند برای بررسی برابر با ۴۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. همانطور که در برنامه متلب و در محیط command window مشاهده می‌شود با تکرار روند پردازش هزینه روند کاهش را طی می‌کند تا اینکه در تکرار ۴۰۰ام کمترین مقدار را در خروجی قرار می‌دهد. در این برنامه تعداد متفاوتی از سرویس دهنده و سرویس گیرنده بررسی شده‌اند تا اطلاعات دقیق را در خروجی مشاهده و مقایسه شود. برای بررسی دقیق‌تر کار، مختصات بخشی از نقاط با اختلاف بسیار زیاد نسبت به نقاط منتخب پیش‌تر افزایش داده که این عمل موجب افزایش در زمان سرویس رسانی به مشتری‌ها و همچنین افزایش هزینه شد. برای بهبود این حالت افزایش تعداد سرویس دهنده پیشنهاد می‌شود که این عمل موجب کاهش یافتن هزینه و زمان سرویس می‌شود. در جداول ۲ و ۳ به بررسی ۱۰ مدل در حالت ابعاد کوچک با استفاده از هر دو الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم شبیه سازی تبرید پرداخته شده است.



شکل ۱. نتیجه همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی



شکل ۲. نتیجه حاصل از الگوریتم شبیه سازی تبرید

محصولات به دست مشتری با محدودیت پنجره زمانی سخت در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج حل مدل در گمز

پارامتر	هزینه نهایی (میلیون دلار)	زمان اجرا (دقیقه)	میزان انتشار دی اکسید کربن (ppm)
مقدار	۱۷۹۹۵	۳۳	۱۵۶۲۱

الگوریتم استفاده شده ابتدا از یک جواب اولیه شروع به کار می‌کند و پس از آن در یک حلقه تکرار به جواب‌های موجود در همسایگی حرکت می‌کند. با استفاده از دستورات شرطی اگر پاسخ همسایگی بهتر از حالت قبل بود آن مقدار را در خود ذخیره می‌کند و در غیر این صورت همان مقدار قبلی خود را حفظ کرده و به گام بعدی و بررسی شرط بعدی خواهد رفت.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی

پارامترهای ورودی مساله شامل پارامترهای عمومی و پارامترهای کنترلی الگوریتم‌های SA و FA است. پارامترهای عمومی، در خصوص مشخصات مشتریان، تسهیلات (مکان‌های توزیع کننده و تولید کننده)، میزان تقاضا و وسایل نقلیه است پارامترهای مربوط به مشتریان شامل؛ تعداد مشتریان مقدار تقاضای مشتریان زمان و هزینه سفر بین مشتریان و احتمال در دسترس بودن یال بین مشتریان است. پارامترهای مربوط به تسهیلات نیز شامل تعداد تسهیلات، زمان و هزینه سفر بین هر مکان توزیع و مشتریان و احتمال در دسترس بودن یال بین هر توزیع کننده و مشتریان است. پارامترهای مربوط به وسایل نقلیه شامل تعداد وسایل نقلیه مدت زمان خدمت‌دهی وسیله نقلیه به هر مشتری، ظرفیت هر وسیله نقلیه و مدت زمان جابجایی هر وسیله نقلیه است. در این بخش به نتایج حاصل از خروجی پرداخته می‌شود. شکل ۱ نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد. همچنین نتیجه حاصل از الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به کد نویسی انجام شده و الگوریتم استفاده شده بهترین زمان و بهترین هزینه مابین سرویس‌دهنده و مشتری‌ها شناخته می‌شود

جدول ۲. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد کوچک با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم شبیه سازی تبرید)

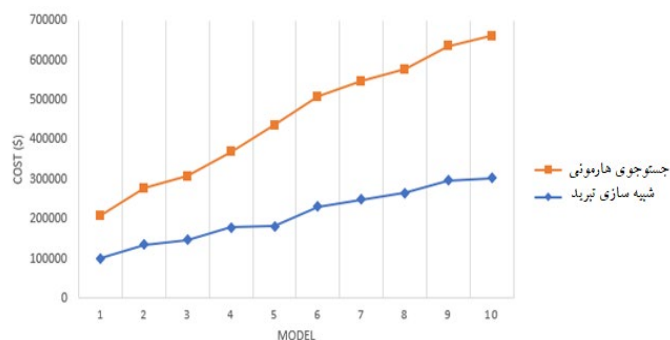
نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO_2 (ppm)
۱	۲	۱	۲,۳۵	۱۰۰,۲۵۴	۳۵۰
۲	۲	۵	۴,۶۵	۱۳۵,۶۶۲	۳۸۴
۳	۲	۷	۶,۹۹۸	۱۴۶,۸۸۲	۳۹۹
۴	۳	۱۰	۷,۸۸۵	۱۷۹,۳۰۲	۴۵۰
۵	۳	۱۲	۹,۵۵۱	۱۸۱,۳۳۲	۴۵۹
۶	۴	۱۷	۱۳,۷۴	۲۳۱,۰۲۱	۶۳۲
۷	۴	۲۰	۱۶,۴۷۵	۲۴۹,۷۰۴	۸۸۵
۸	۴	۲۳	۱۹,۷۷۰	۲۶۵,۹۹۵	۹۳۵
۹	۵	۲۷	۲۳,۵۴۲	۲۹۷,۳۰۲	۱۰۰۲
۱۰	۵	۳۰	۲۸,۱۰۲	۳۰۲,۶۶۵	۱۰۲۷

جدول ۳. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد کوچک با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم جستجوی هارمونی)

نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO_2 (ppm)
۱	۲	۱	۳,۴۰	۱۰۸,۶۲۳	۳۶۲
۲	۲	۵	۵,۳۲	۱۴۲,۳۸۷	۳۹۷
۳	۲	۷	۷,۱۰۵	۱۵۹,۹۰۲	۴۲۱
۴	۳	۱۰	۸,۹۹۸	۱۹۰,۰۲۱	۴۶۹
۵	۳	۱۲	۱۰,۴۲۱	۲۵۵,۵۷۰	۴۷۹
۶	۴	۱۷	۱۵,۶۳۶	۲۷۶,۳۵۲	۷۰۴
۷	۴	۲۰	۱۸,۴۶۲	۲۹۶,۶۵۳	۹۱۰
۸	۴	۲۳	۲۱,۳۳۲	۳۱۰,۲۲۴	۹۳۶
۹	۵	۲۷	۲۵,۹۴۸	۳۳۷,۴۷۰	۱۰۷۴
۱۰	۵	۳۰	۳۰,۲۲۹	۳۵۸,۷۲۱	۱۱۰۲

این موضوع در هر دو قالب زمان و هزینه کل زنجیره می‌باشد. به منظور مقایسه دقیق‌تر، نمودار مقایسه‌ای هزینه و زمان هر دو الگوریتم برای مدل در ابعاد کوچک در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

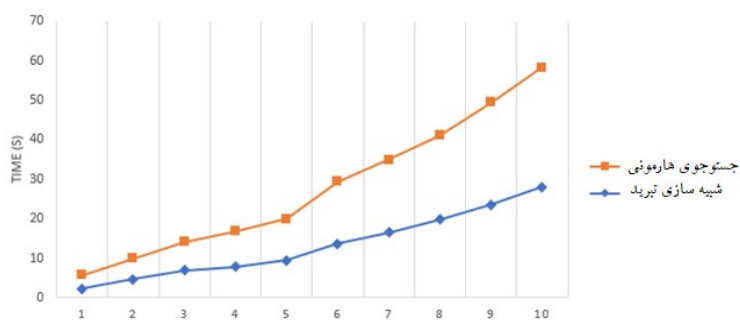
در جداول ۳ و ۴ به بررسی و حل مسئله در ابعاد کوچک پرداخته شده است. همانطور که در جدول ذکر شده، نشان داده شده است، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی عملکرد بهتر و قابل توجه‌تری داشته است.



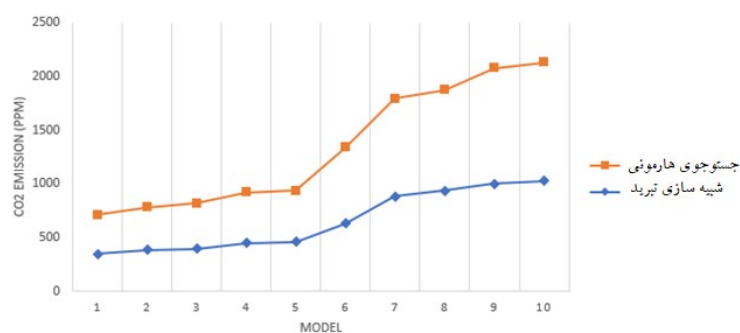
شکل ۳. مقایسه هزینه کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

بر اساس شکل ۴ مشخص می‌شود که الگوریتم جستجوی هارمونی به میزان ۹ درصد سریعتر از الگوریتم شبیه سازی تبرید است. در شکل ۵ نیز، مقایسه‌ای بین انتشار گاز دی اکسید کربن بین هر دو الگوریتم رخ داده است.

همانطور که از شکل ۳ که مربوط به مقایسه هر دو الگوریتم از نظر هزینه کل زنجیره برای مدل در ابعاد کوچک مشخص است، الگوریتم جستجوی هارمونی به میزان ۸،۷ درصد در کل هزینه‌های موجود در سیستم بهبودی ایجاد کرده و توانسته عملکرد بهتری را داشته باشد.



شکل ۴. مقایسه زمان اجرای کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم



شکل ۵. مقایسه میزان انتشار دی اکسید کربن با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

در مرحله بعد در جداول ۴ و ۵ به بررسی ۱۰ مدل در حالت ابعاد متوسط با استفاده از هر دو الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم شبیه سازی تبرید پرداخته شده است.

جدول ۴. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد متوسط با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم شبیه سازی تبرید)

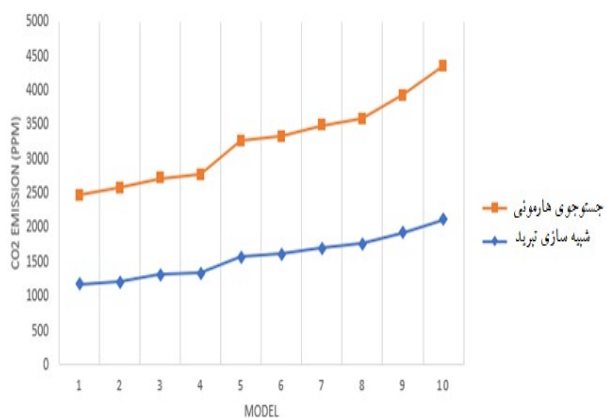
نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO_2 (ppm)
۱	۶	۳۱	۸,۶۶۵	۳۷۵۹۹۵	۱۱۷۸
۲	۶	۳۵	۱۱,۴۷۲	۳۷۹۵۵۱	۱۲۰۸
۳	۷	۴۰	۱۵,۹۸۵	۴۰۴۱۲۴	۱۳۲۱
۴	۷	۴۵	۱۸,۶۶۳	۴۲۳۵۵۴	۱۳۴۲
۵	۸	۵۷	۲۹,۸۷۴	۴۶۸۵۹۶	۱۵۷۴
۶	۸	۶۱	۳۲,۴۱۲	۴۹۶۵۵۴	۱۶۲۲
۷	۹	۶۵	۳۹,۹۹۴	۵۲۱۴۴۷	۱۷۰۰
۸	۱۲	۷۰	۴۲,۴۱۲	۵۴۷۷۵۸	۱۷۶۵
۹	۱۴	۷۵	۴۸,۹۹۰	۵۹۸۶۶۴	۱۹۳۲
۱۰	۱۶	۸۰	۵۱,۰۶۲	۶۳۵۹۷۵	۲۱۲۰

جدول ۵. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد متوسط با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم جستجوی هارمونی)

نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO_2 (ppm)
۱	۶	۳۱	۱۰,۲۲۱	۳۷۹۸۸۷	۱۲۹۹
۲	۶	۳۵	۱۲,۰۳۲	۳۸۸۶۵۴	۱۳۶۸
۳	۷	۴۰	۱۷,۰۸۷	۴۱۰۲۱۴	۱۴۰۱
۴	۷	۴۵	۱۹,۲۲۱	۴۳۳۶۲۵	۱۴۳۳
۵	۸	۵۷	۲۰,۱۴۵	۴۷۸۸۵۰	۱۶۸۷
۶	۸	۶۱	۳۴,۷۷۵	۵۰۲۳۲۷	۱۷۱۰
۷	۹	۶۵	۴۲,۷۴۵	۵۳۶۲۷۰	۱۷۸۸
۸	۱۲	۷۰	۴۴,۲۴۷	۵۶۹۹۸۵	۱۸۲۲
۹	۱۴	۷۵	۵۰,۶۶۴	۶۱۲۳۵۲	۱۹۹۷
۱۰	۱۶	۸۰	۵۳,۲۱۲	۶۴۷۸۰۵	۲۲۴۱

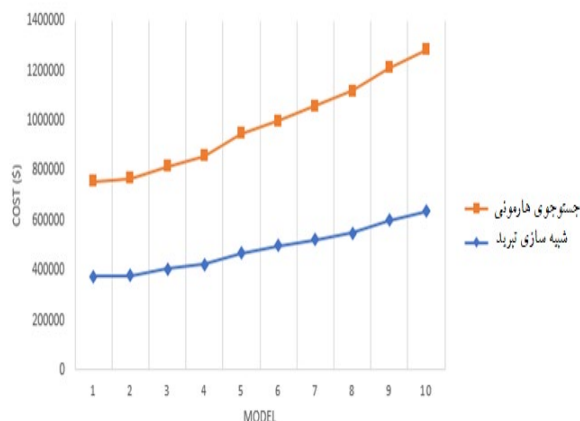
مقایسه نموداری نتایج حاصل از هر دو الگوریتم را در ابعاد متوسط نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج بدست آمده برای ابعاد متوسط، مشخص شد که الگوریتم شبیه سازی تبرید عملکرد بهتری نسبت به جستجوی هارمونی عملکرد بهتری داشته است. شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸

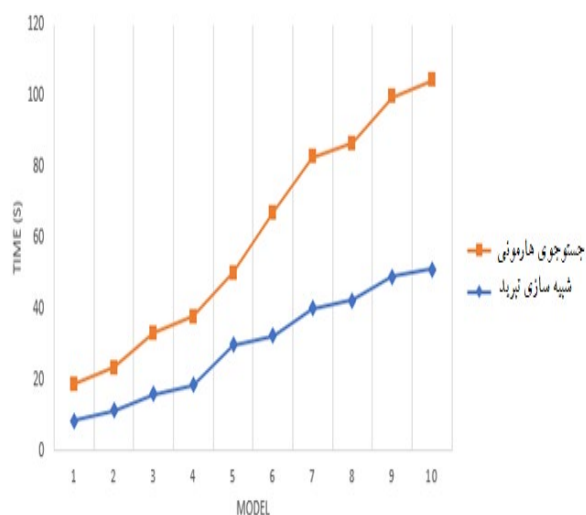


شکل ۸. مقایسه میزان انتشار دی اکسید کربن با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

با توجه به حل مدل در ابعاد متوسط، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به میزان ۶ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی در راستای تعیین هزینه کل زنجیره تأمین بهبودی ایجاد نموده است. در زمان انتقال محموله نیز الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به میزان ۱,۵ درصد سریع‌تر از الگوریتم جستجوی هارمونی بوده است. در نهایت میزان انتشار گاز دی اکسید کربن نیز با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به میزان ۴,۵ درصد نسبت به جستجوی هارمونی، بهبودی به همراه داشته است. در نهایت به حل مدل در ابعاد بزرگ پرداخته شده است. جایی که تعداد سفارشات انتقال محصولات بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مورد بوده است. نتایج حاصل از اجرای هر الگوریتم بصورت جداگانه در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای حل در ابعاد بزرگ نیز ۱۰ مدل تعیین شده است.



شکل ۶. مقایسه هزینه کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم



شکل ۷. مقایسه زمان اجرای کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

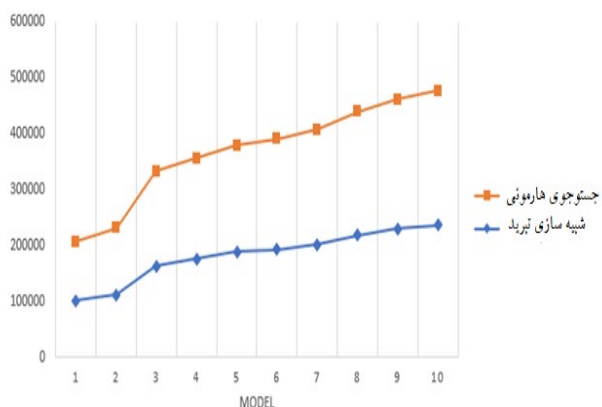
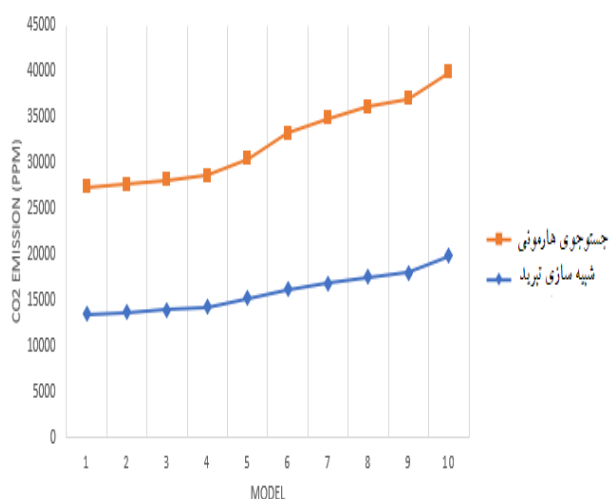
جدول ۶. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد بزرگ با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم شبیه سازی تبرید)

نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO ₂ (ppm)
۱	۲۰	۲۵۰	۶۸,۵۴۲	۱۰۱۲۵۴	۱۳۵۲۶
۲	۲۰	۳۰۰	۷۲,۳۳۲	۱۱۲۳۵۲	۱۳۶۵۸
۳	۲۵	۴۰۰	۸۱,۴۰۲	۱۶۳۲۵۱	۱۴۰۰۲
۴	۳۰	۵۱۰	۸۸,۴۸۴	۱۷۵۸۹۵	۱۴۲۳۰
۵	۳۲	۶۰۰	۹۰,۴۴۱	۱۸۸۵۴۷	۱۵۲۰۰
۶	۳۸	۶۵۰	۹۳,۲۲۱	۱۹۲۳۳۲	۱۶۲۱۰
۷	۴۱	۷۳۰	۹۵,۳۳۲۵	۲۰۲۱۱۴	۱۶۸۹۰
۸	۴۵	۸۰۰	۹۹,۷۱۸	۲۱۸۷۷۴	۱۷۵۳۲
۹	۵۰	۹۰۰	۱۰۲,۳۳۲	۲۲۹۶۶۳	۱۸۰۵۰
۱۰	۶۰	۱۰۰۰	۱۱۰,۴۷۵	۲۳۶۵۶۲	۱۹۸۵۰

جدول ۷. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد بزرگ با محدودیت پنجره زمانی سخت (الگوریتم جستجوی هارمونی)

نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (دقیقه)	هزینه کلی زنجیره (دلار)	انتشار گاز CO_2 (ppm)
۱	۲۰	۲۵۰	۷۰,۲۲۱	۱۰۵۳۹۶	۱۳۸۷۵
۲	۲۰	۳۰۰	۷۴,۵۴۷	۱۱۸۶۳۶	۱۴۰۰۱
۳	۲۵	۴۰۰	۸۲,۰۰۲	۱۶۸۹۵۶	۱۴۱۲۴
۴	۳۰	۵۱۰	۸۹,۶۶۳۲	۱۷۹۶۶۵	۱۴۳۶۶
۵	۳۲	۶۰۰	۹۱,۵۵۴	۱۹۰۳۰۵	۱۵۲۳۰
۶	۳۸	۶۵۰	۹۴,۲۰۱	۱۹۸۳۳۲	۱۶۹۹۵
۷	۴۱	۷۳۰	۹۶,۳۸۷	۲۰۵۶۵۸	۱۷۹۸۵
۸	۴۵	۸۰۰	۱۰۰,۳۰۲	۲۲۰۳۳۲	۱۸۵۵۱
۹	۵۰	۹۰۰	۱۰۶,۵۵۴	۲۳۲۰۸۲	۱۸۹۶۵
۱۰	۶۰	۱۰۰۰	۱۱۸,۸۶۹	۲۴۰۳۲۵	۲۰۰۴۱

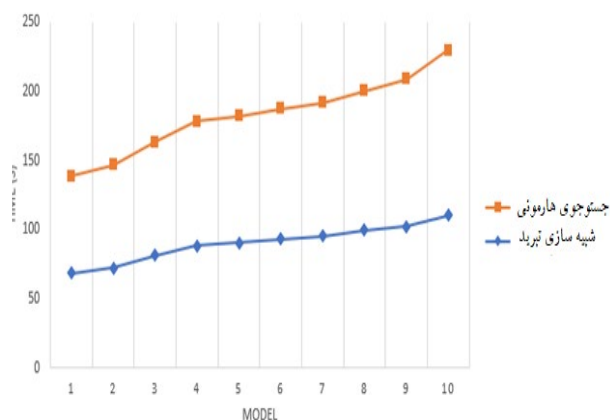
شکل های ۹ تا ۱۱ مقایسه نموداری نتایج حاصل از هر دو الگوریتم را در ابعاد بزرگ نشان می دهد.



شکل ۹. مقایسه هزینه کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

شکل ۱۱. مقایسه میزان انتشار دی اکسید کربن با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

بر اساس مقایسه صورت گرفته شده هر دو الگوریتم برای مدل در ابعاد بزرگ مشخص شد که الگوریتم شبیه سازی تبرید با بهبودی ۲ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی سبب کاهش هزینه های بیشتر زنجیره شده است. از طرف دیگر در زمان انتقال محموله، الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز با متوسط زمان ۹۰,۲۲۷ دقیقه نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی به میزان دو درصد با زمان کمتری محصولات بین کارخانه و مشتری را منتقل داده است. با توجه به شکل ۱۱ که بیان کننده میزان انتشار دی اکسید کربن بدست آمده از دو الگوریتم



شکل ۱۰. مقایسه زمان اجرای کلی زنجیره با محدودیت پنجره زمانی سخت با استفاده از دو الگوریتم

الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم شبیه سازی تبرید را برای حالت‌های مختلف زمان، انتشار کربن دی اکسید و هزینه در جدول ۸ بررسی شده است.

حال به منظور مقایسه می‌توان نتایج را بصورت نمودار میله‌ای در شکل‌های ۱۲ تا ۲۰ برای هر سه بعد کوچک، متوسط و بزرگ ارائه داد.

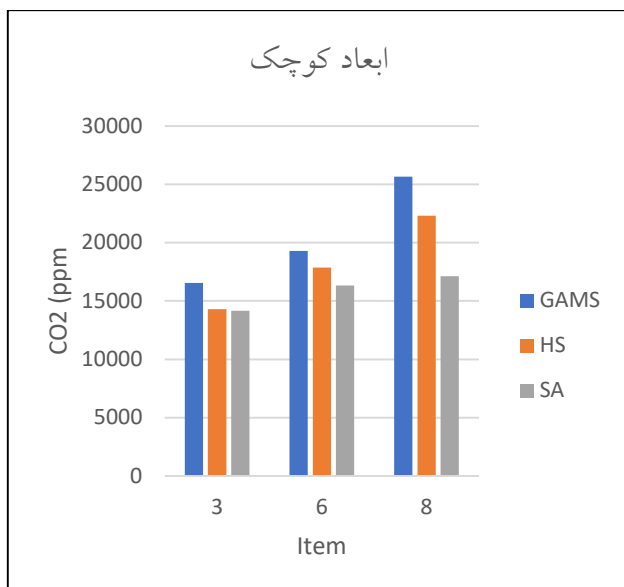
می‌باشد، نمایان می‌گردد که الگوریتم شبیه سازی تبرید به میزان ۲،۲ درصد در کاهش میزان انتشار متمر ثمر بوده است.

۴-۴ تحلیل حساسیت

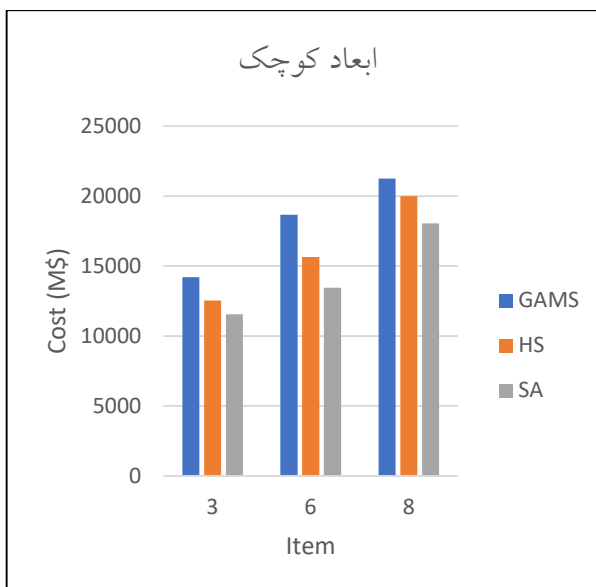
بمنظور تحلیل حساسیت، مدل را برای ابعاد مختلف، کوچک، متوسط، و بزرگ بررسی می‌گردد. نتایج بدست آمده از گمز،

جدول ۸. نتایج زمان، هزینه و انتشار CO_2

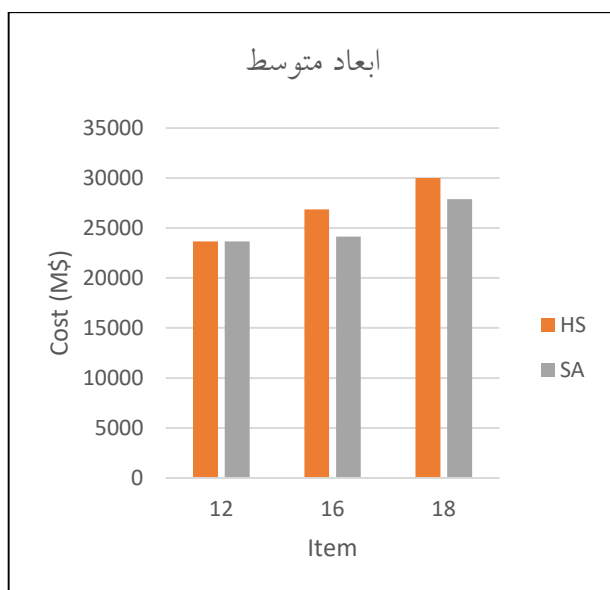
SA			HS			GAMS			آیتم	ابعاد
هزینه	انتشار	زمان	هزینه	انتشار	زمان	هزینه	انتشار	زمان		
۱۱۵۰	۱۴۱۵۲	۳,۸۵۴	۱۲۵۲۴	۱۴۳۰۰	۴,۳۶	۱۴۲۱۲	۱۶۵۵۲	۵,۲۴	۳	کوچک
۱۳۴۵۴	۱۶۳۳۲	۵,۱۰۲	۱۵۶۳۶	۱۷۸۷۸	۶,۳۲۳	۱۸۶۶۳	۱۹۳۰۳	۷,۸۵۴	۶	
۱۸۰۴۷	۱۷۱۲۰	۷,۹۶۸	۱۹۹۸۵	۲۲۳۰۷	۸,۶۶۲	۲۱۲۴۵	۲۵۶۶۳	۹,۲۳۲	۸	
۲۳۶۶۵	۲۰۳۵۲	۱۱,۰۲۱	۲۳۶۵۶	۲۵۵۸۸	۱۲,۳۲۸	-	-	-	۱۲	متوسط
۲۴۱۴۱	۲۴۶۶۵	۱۵,۰۰۱	۲۶۸۵۹	۲۸۵۹۷۰	۱۶,۸۷۴	-	-	-	۱۶	
۲۷۸۹۸	۲۶۶۸۱	۱۷,۲۳۲	۲۹۹۸۷	۳۰۲۱۱۴	۱۹,۸۸۵	-	-	-	۱۸	
۳۰۶۵۲	۲۸۹۶۸	۲۰,۳۸۴	۳۳۶۶۳	۳۲۱۲۲۵	۲۳,۳۳۲	-	-	-	۲۰	بزرگ
۳۴۸۷۵	۳۲۰۷۸	۲۶,۳۶۳	۳۶۸۷۴	۳۶۵۲۴۷	۲۸,۹۶۸	-	-	-	۲۴	
۳۷۷۴۵	۳۴۵۸۵	۲۹,۸۸۵	۴۰۹۸۵	۳۸۱۱۲۴	۳۱,۲۰۴	-	-	-	۲۸	



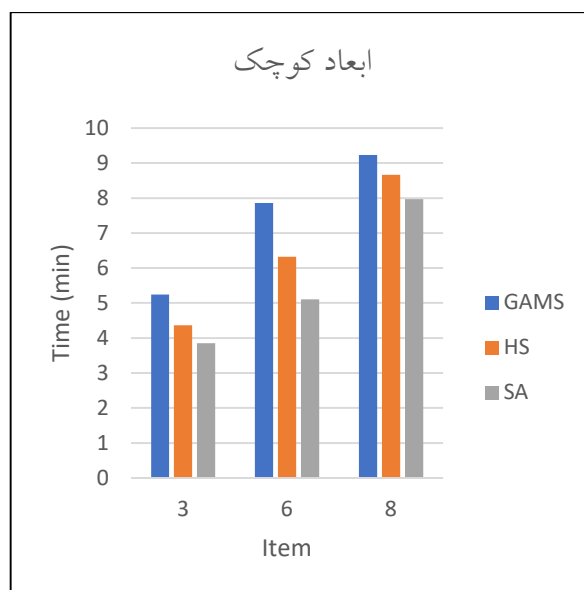
شکل ۱۴. مقایسه نتایج انتشار گاز دی اکسید کربن (ابعاد کوچک)



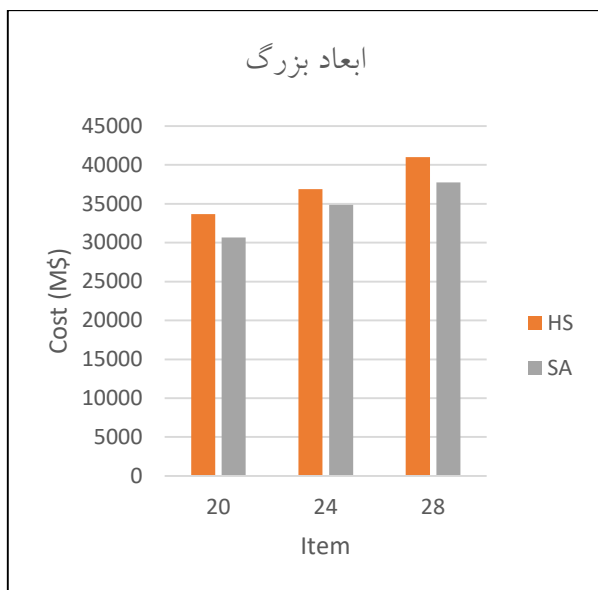
شکل ۱۲. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد کوچک)



شکل ۱۵. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد متوسط)



شکل ۱۳. مقایسه نتایج زمان انتقال محموله (ابعاد کوچک)



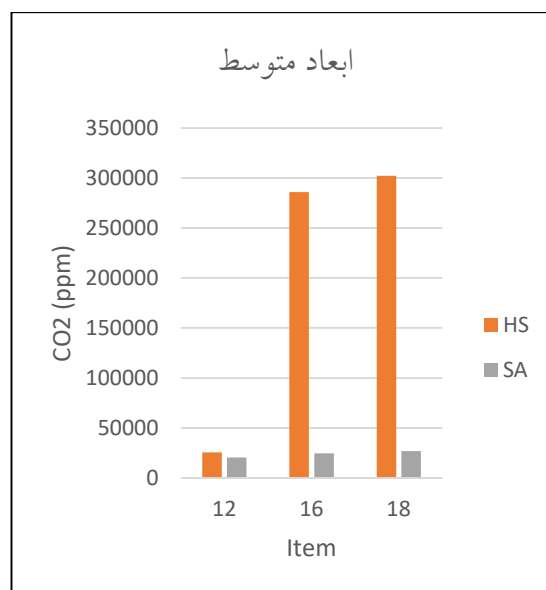
شکل ۱۷. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد بزرگ)



شکل ۱۶. مقایسه نتایج زمان انتقال محصولات (ابعاد متوسط)



شکل ۱۹. مقایسه نتایج زمان انتقال محموله (ابعاد بزرگ)

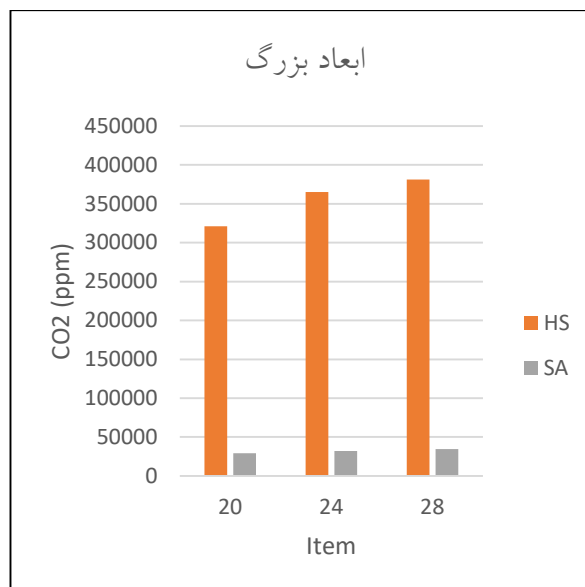


شکل ۱۸. مقایسه نتایج انتشار گاز دی اکسید کربن (ابعاد متوسط)

در بهبود کیفیت جواب و کاهش زمان رسیدن به جواب اثبات شده است. به منظور نشان دادن عملکرد SA، مقادیر توابع هدف و زمان اجرای آن با نتایج به دست آمده از الگوریتم دقیق در مسائل با ابعاد کوچک مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که میزان خطای توابع هدف الگوریتم SA نسبت به الگوریتم دقیق، کمتر از دو درصد است و این موضوع، به معنی قابلیت رسیدن به جواب بهینه در الگوریتم SA تلفیقی است. همچنین با افزایش ابعاد مسأله زمان رسیدن به جواب در الگوریتم دقیق به طور نمایی افزایش می‌یابد؛ ولی این زمان در الگوریتم SA تلفیقی، روند خطی دارد. از طرف دیگر نتایج حاکی از عملکرد بالای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نسبت به جستجوی هارمونی بوده است. همچنین در بررسی تمام نتایج ارائه شده مشخص می‌شود که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهتر از جستجوی هارمونی است زیرا که سبب می‌شود هزینه و زمان مورد بررسی در این پژوهش به راحتی و تحت شرایط بهتر و سریع‌تر بهینه شود.

۶- مراجع

- Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H. (2020). Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis. *Journal of Transportation Research*, 17(3), 33-44.
- Afandizadeh Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker, H. (2019). Using optimization and metaheuristic method to reduce the bus headway (Case study: Qazvin Bus Routes). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 833-849.
- Afandizadeh, S., & Bigdeli Rad, H. (2021). Developing a model to determine the number of vehicles lane changing on freeways by Brownian motion method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.
- Afandizadeh, S., Aziz Jalali, D., & Bigdeli Rad, H. (2023). Optimal routing for shared autonomous vehicles feeder services in urban networks. *Journal of Transportation Research*.
- Afandizadeh, S., Ourmazdi Khoramshahi, S., & Bigdeli Rad, H. (2023). Evaluation of road diet strategy as one of the methods of demand management for non-motorized vehicles and pedestrians in the cities center. *Road*.
- Braaten, S., Gjønnnes, O., Hvattum, L. M., & Tirado, G. (2017). Heuristics for the robust vehicle routing



شکل ۲۰. مقایسه نتایج انتشار گاز دی اکسید کربن (ابعاد بزرگ)

نتایج بدست آمده حاکی از کارایی بالای الگوریتم شبیه سازی تبرید در هر سه حوزه زمان، انتشار و هزینه بوده است. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که به دلیل پیچیده بودن مسأله، نرم افزار گمز قادر به انجام حل مسأله در مقادیر بزرگ و متوسط نخواهد بود. همچنین نتایج نشان داد که مسأله در تمام شرایط حساسیت پایدار بوده و الگوریتم شبیه سازی تبرید نتایج بهینه‌تری را ارائه نموده که این نشان از قابلیت بالا و حافظه زیاد این الگوریتم در حل مسائل پیچیده می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش حل یک مسأله‌ی مسیریابی وسیله نقلیه در حالت چند سطحی، چندهدفی و احتمالی، بررسی شده است جنبه احتمالی این مسأله که از مسائل دنیای واقعی یک سازمان لجستیک توزیع محصول شناسائی شده است احتمالی بودن دسترسی به یال (متصل کننده دو گره یا سطح) تقاضا است. بهینه سازی مسأله، به گونه‌ای عمل می‌کند که ضمن کمینه سازی هزینه‌ی حمل و نقل تحویل اقلام در مسیرهایی صورت گیرد که با احتمال بیشتری در دسترس باشند. از آن جا که حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ توسط روش‌های دقیق با استفاده از امکانات پردازشی موجود در زمان قابل قبول امکان پذیر نبود، از رویکرد فرا ابتکاری SA استفاده شد. در این تحقیق کارایی این عملگرها

- Mode Choice; Case Study: Qazvin City. *Space Ontology International Journal*, 10(3), 31-46.
- Hu, C., Lu, J., Liu, X., & Zhang, G. (2018). Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty. *Computers & Operations Research*, 94, 139-153.
- Kovacs, A. A., Golden, B. L., Hartl, R. F., & Parragh, S. N. (2014). Vehicle routing problems in which consistency considerations are important: A survey. *Networks*, 64(3), 192-213.
- Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., & Xiao, J. (2018). Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. *Journal of cleaner production*, 171, 962-971.
- Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016). Evaluation of cost structure and impact of parameters in location-routing problem with time windows. *Transportation Research Procedia*, 12, 213-226.
- Sadykov, R., Uchoa, E., & Pessoa, A. (2021). A Bucket Graph-Based Labeling Algorithm with Application to Vehicle Routing. *Transportation Science*, 55(1), 4-28.
- Spliet, R., & Dekker, R. (2016). The driver assignment vehicle routing problem. *Networks*, 68(3), 212-223.
- Spliet, R., Dabia, S., & Van Woensel, T. (2018). The time window assignment vehicle routing problem with time-dependent travel times. *Transportation Science*, 52(2), 261-276.
- Taş, D., Jabali, O., & Van Woensel, T. (2014). A vehicle routing problem with flexible time windows. *Computers & Operations Research*, 52, 39-54.
- Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., & Quilliot, A. (2019). Multigraph modeling and adaptive large neighborhood search for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 104, 113-126.
- problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, 77, 136-147.
- Brandão, J. (2020). A memory-based iterated local search algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 284(2), 559-571.
- Chen, X., Zhou, M., Shen, W., Zhu, G., & Ge, X. (2018). Mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer compound-modified by polyacrylic emulsion and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 190, 680-690.
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2012). Consistency in multi-vehicle inventory-routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 270-287.
- Eydi, A. R., & Abdorahimi, H. (2022). Model and Solution Approach for Multi-Period and Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Flexibility in Specifying the Last Depot of Each Route. *International Journal of Industrial Engineering*, 23(3), 333-349.
- Feillet, D., Garaix, T., Lehuédé, F., Péton, O., & Quadri, D. (2014). A new consistent vehicle routing problem for the transportation of people with disabilities. *Networks*, 63(3), 211-224.
- Fu, L. L., Aloulou, M. A., & Triki, C. (2017). Integrated production scheduling and vehicle routing problem with job splitting and delivery time windows. *International Journal of Production Research*, 55(20), 5942-5957.
- Groër, C., Golden, B., & Wasil, E. (2009). The consistent vehicle routing problem. *Manufacturing & Service Operations Management*, 11(4), 630-643.
- Gulczynski, D., Golden, B., & Wasil, E. (2021). The multi-depot split delivery vehicle routing problem: An integer programming-based heuristic, new test problems, and computational results. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 794-804.
- Hajisoleimani, M. M., Abdi, A., & Bigdeli Rad, H. (2021). Intermodal Non-Motorized Transportation

Developing A Nonlinear Programming Model for Scheduling and Routing of Transportation Systems

Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Ashkan Safari, M.Sc., Student, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

Hamid Bigdeli Rad, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

The vehicle routing problem is one of the most important optimization problems. Routing issues refer to a set of issues in which a number of concentrated vehicles are stationed at one or more bars and must visit a set of customers, each of whom has a certain demand, and provide services. The purpose of this study is to provide a routing and scheduling model of the transportation system for long routes. For this purpose, after studying the sources and references related to the design of integrated distribution systems, the investigated problem was modeled in the form of mixed integer nonlinear programming considering the limitations and assumptions. After the exact solution of the model, and due to the problem being NP-hard, two meta-heuristic algorithms of harmony search and refrigeration simulation algorithm were used to solve the problem in large dimensions. It should be noted that the four criteria of cost, carbon dioxide gas emission, start-up time and level were evaluated, and the results indicated the high performance of the refrigeration simulation algorithm compared to the search for harmony. Specifically, to solve the model in large dimensions, it was found that the refrigeration simulation algorithm with a two percent improvement compared to the harmony search algorithm has reduced the costs of the chain. On the other hand, in the cargo transfer time, the refrigeration simulation algorithm has transferred the products between the factory and the customer with an average time of 90minutes compared to the Harmony search algorithm by two percent.

Keywords: Supply Chain, Vehicle Routing Problem, Forward Propagation, Harmony Search Algorithm