

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره

زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای ارزشمند

(مطالعه موردی: خزانه بانک)

عاطفه کهنی، دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

سیدمحمد سیدحسینی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

رضا توکلی‌مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

چکیده

مسئله مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور یک مسئله کاربردی در حوزه مسائل مسیریابی است که تعداد محدودی مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای آن ارائه شده است. در این تحقیق برای اولین بار مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مختلط دوهدفه برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چنددوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای ارزشمند ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی هر وسیله نقلیه در یک سفر می‌تواند تقاضای تحویل کالا از یک مشتری یا تقاضای جمع‌آوری کالا از مشتری دیگر را برآورده کند. از روش‌های E-محدودیت، الگوریتم‌های چندهدفه بهینه‌سازی انبوه ذرات، خفاش، سنجاقک و NSGA-II برای حل مسائل استاندارد استفاده شده است. الگوریتم سنجاقک از نظر شاخص‌های ارزیابی روش‌های چندهدفه کارایی بهتری نسبت به سایر روش‌ها برای حل ۲۲ مسئله استاندارد داشته است. همچنین میزان انحراف جواب‌های جواب‌های الگوریتم سنجاقک با روش E-محدودیت به طور متوسط ۴۶٪ و حداکثر برابر ۱/۳۲٪ است. مدل ارائه شده برای حل یک مسئله واقعی جابجایی وجوه نقد بین خزانه‌های بانک استفاده شده است. مسائل مطالعه موردی از نوع گره‌محور با گره‌های نزدیک به هم است که به مسئله کمان‌محور تبدیل شده است. بنابراین مطابق قواعد مورد نظر خبرگان بانک از بین مرزهای پارتو ارائه شده توسط الگوریتم سنجاقک برای ۱۰ مسئله مطالعه موردی ۱۳ خزانه از بین ۱۸ کاندید برای ارتباط با خزانه مرکزی در تهران، شعب تحت پوشش و خزانه‌های غیرکاندید انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور دوهدفه، روش E-محدودیت، ریسک جابجایی کالای ارزشمند، الگوریتم سنجاقک

۱. مقدمه

مسائل مسیریابی به دو دسته (۱) مسائل مسیریابی گره‌محور^۱ مانند مسئله فروشنده دوره‌گرد^۲ و مسئله مسیریابی وسیله نقلیه^۳ و (۲) مسائل مسیریابی کمان‌محور (ARP^۴) مانند مسئله پستچی چینی (CPP^۵) و مسئله پستچی روستایی (RPP^۶) تقسیم می‌شود. مسئله CARP^۷ توسعه‌ای از مسئله RPP است [Golden and Wong, 1981]. این مسئله روی گراف متصل و بدون جهت تعریف و هر یک از یال‌های آن دارای تقاضای غیرمنفی هستند. هدف این مسئله تعیین مسیرهای بهینه‌ای است که تقاضای هر مسیر از ظرفیت وسیله تجاوز نکند. مسئله مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور (LARP^۸) می‌تواند توسعه‌یافته یکی از مسائل معروف CPP, RPP و CARP باشد [Ghani and Laporte, 2001]. این مسئله به صورت یک گراف تعریف شده است که می‌تواند جهت‌دار، بدون جهت یا ترکیبی از این حالت‌ها باشد. در صورتی که گراف جهت‌دار باشد اتصال دو گره "یال"^۹ و در غیراین صورتی "کمان" نامیده می‌شود. هدف مسئله LARP یافتن هم‌زمان الف) مسیر بهینه وسایل نقلیه برای سرویس‌دهی به کمان‌ها/یال‌های دارای تقاضا با استفاده از حداقل تعداد کمان بدون تقاضا^{۱۰} و ب) مکان بهینه انبارها از بین گره‌های کاندید است.

مسئله LARP را می‌توان برای مسائلی که به صورت ذاتی کمان‌محور هستند یا مسائلی که به صورت ذاتی گره‌محور بوده اما به دلیل نزدیکی گره‌های دریافت‌کننده سرویس قابل تبدیل به مسئله کمان‌محور هستند، به کار برد [Albareda-Sambola, 2015]. مسئله برف‌روبی جاده‌ها از نوع اول و مسئله جمع-آوری زباله از نوع دوم است. با وجود کاربردی بودن این مسئله، مطالعات محدودی در این حوزه انجام شده است که در اکثر موارد نیز برای حل مسائلی که به صورت ذاتی کمان‌محور هستند به کار گرفته شده است [Kahfi, Seyyedhosseni, and Tavakkoli-Moghaddam, 2017]. در این مطالعات

محدود، مدل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های پایه ارائه و هیچ‌کدام با یک روش دقیق حل و اعتبارسنجی نشده است. به عنوان مثال، محدودیت‌های تعریف شده در مدل [Lopes et al., 2014] منجر به اختصاص یک وسیله نقلیه به هر مشتری می‌شود که در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست. همچنین، مدل پیشنهادی [Huber, 2016] تنها شامل دو تابع با مدل‌سازی ریاضی است و محدودیت‌ها مدل نشده است.

۱-۱ نوآوری

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مختلط برای مسئله LARP دوهدفه چنددوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای ارزشمند ارائه شده است. اهداف مدل پیشنهادی از نوع حداقل‌سازی هزینه، حداقل‌سازی بیشینه ریسک تعریف شده است. برای کاهش ریسک تردد اضافی یک وسیله نقلیه مجاز به تحویل یا جمع‌آوری تقاضای مشتریان در هر سفر است. مدل پیشنهادی برای مدل‌سازی جابجایی وجوه نقد بین خزانه‌های یک بانک با رویکرد تبدیل مسئله گره‌محور با گره‌های نزدیک به مسئله کمان‌محور استفاده شده است.

در مسائل مرتبط با حمل و نقل وجوه نقد شاخص‌های مختلفی مانند امنیت جاده، حجم ترافیک و پیشینه تصادفات در جاده لحاظ شده است [Kahfi, Seyyedhosseni, and Tavakkoli-Moghaddam, 2017]. اما این موضوع در مطالعه موردی موردنظر قبل از حل مسئله توسط خبرگان بررسی و تحلیل شده است و جاده‌های موردتأیید به عنوان ورودی مسئله معرفی شده است. بنابراین مدل پیشنهادی برای کاهش ریسک به دنبال کاهش سرقت روی کمان‌ها است. احتمال سرقت به صورت مستقیم با مقدار کالای حمل شده و زمان حمل در ارتباط است [Talarico, Sörensen, and Springael, 2013]. بنابراین با حداقل‌سازی مقدار کالای حمل شده در زمان حمل، ریسک دزدی نیز کاهش می‌یابد.

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

در این بخش تاریخچه تحقیقات مرتبط با LARP، پنجره زمانی و ریسک جابجایی کالاهای ارزشمند بررسی شده است.

۱-۲ مرور ادبیات LARP

LARP نوعی مسئله LRP است که در آن به جای این‌که گره‌ها دارای تقاضا باشند، کمان‌ها دارای تقاضا هستند. این مسئله - ترکیبی از دو مسئله مکان‌یابی-تخصیص^{۱۴} و CARP است (Liu et al., 2008). اگرچه مطالعات کمی در ادبیات وجود دارند که روی حل مسئله LARP تمرکز کرده‌اند با این حال به دلیل کاربردی بودن موضوع در سه تحقیق مروری [Ghiani, Improta, and Laporte, 2001]، [Liu et al., 2008] و [Albareda-Sambola, 2015] این مسئله و کاربردهای آن بررسی شده است.

اولین تحقیق کاربردی برای مسئله LARP در اداره پست آمریکا انجام شده و از روش مکان‌یابی-تخصیص-مسیریابی برای حل مدل استفاده شده است [Levy and Bodin, 1989]. در این روش مکان انبارها تعیین، کمان‌های موردنیاز به برخی از خوشه‌ها تخصیص داده شده و در نهایت درون هر خوشه یک مسئله مسیریابی حل می‌شود. روش دیگری نیز به نام تخصیص-مسیریابی-مکانیابی برای حل این مسئله وجود دارد که در آن ابتدا خوشه‌بندی و مسیریابی انجام شده و سپس، مکان انبارهای مرکزی بر مبنای مسیرهای ساخته شده تعیین می‌شود [Ghiani and Laporte, 2001]. تنها در ۷ تحقیق اشاره شده در جدول ۱ برای مسئله LARP مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهاد شده است.

تعریف محدودیت پنجره زمانی در مطالعه موردی به دلیل درخواست مشتریان برای جمع‌آوری یا تحویل وجوه نقد در یک بازه زمانی مشخص است. مدل‌سازی محدودیت پنجره زمانی در مسائل کمان‌محور ساختار متفاوتی نسبت به مسائل گره‌محور دارد زیرا یک کمان دارای تقاضا با پنجره زمانی، بعد از دریافت سرویس می‌تواند به عنوان یک کمان بدون تقاضا و بدون پنجره زمانی در مسیر وسایل نقلیه انتخاب شود.

محدودیت‌های ریسک با توجه به اینکه تابع هدف ریسک به دنبال حداقل‌سازی احتمال سرقت است، مقدار کالای جابجا شده روی کمان را محاسبه می‌کند. تابع هدف و محدودیت‌های ریسک متناسب با مطالعه موردی تعریف شده و برای هر مسئله - ای که با حمل کالاهای ارزشمند مرتبط باشد کاربرد دارد.

جهت اعتبارسنجی الگوریتم بهینه‌سازی سنجاچک (MODA^{۱۱})، میزان انحراف تابع هدف محاسبه شده الگوریتم MODA با نتایج روش ۴-محدودیت برای ۲۲ مسئله استاندارد مقایسه شده است. همچنین در این تحقیق برای اولین بار مدل ریاضی ارائه شده برای حل ۱۰ مسئله مطالعه موردی با استفاده از الگوریتم MODA، خفاش (MOBA^{۱۲})، بهینه‌سازی انبوه ذرات (MOPSO^{۱۳}) و NSGA-II حل شده است.

۲-۱ ساختار تحقیق

ادامه مقاله به این صورت سازمان یافته است که در بخش ۲ تاریخچه مهم‌ترین کارهای مرتبط با مسائل LARP، مدل‌سازی پنجره زمانی و ریسک در مسائل کمان‌محور ارائه شده است. جزئیات مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی و خطی‌سازی آن در بخش ۳ ارائه شده است. در بخش ۴ مسائل مطالعه موردی تشریح شده است. در بخش ۵ روش‌های حل، نحوه نمایش و تولید جواب بیان شده است. تنظیم پارامتر، تحلیل نتایج اعتبارسنجی روش‌ها و حل مسائل مطالعه موردی تعریف مسائل مطالعه موردی در بخش ۶ آورده شده است. در بخش ۷ نتیجه-گیری نهایی و پیشنهادات تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. ادبیات پژوهش

جدول ۱. مشخصات مسائل LARP و این تحقیق

مرجع	انبار		مشتري	وسيله نقلیه	ماده حمل- شونده	ویژگی‌های مدل																
	چند انباره	محدودیت ظرفیت				برنامه‌ریزی موجودی	جمع‌آوری و تحویل هم‌زمان	محدودیت ظرفیت	بازدید در چند نوبت	برش در تقاضا	پنجره زمانی	محدودیت ظرفیت	تعداد نامعین	ناهمگن	چند محصولی	ریسک	چند هدفه	چند دورهای	غیر قطعی	دقیق	ایستکاری	فرایه‌ایستکاری
[Doulabi and Seifi, 2013]	×	×																	×	SA		
[Lopes et al., 2014]		×																		×	TS, VNS, RASP	
[Essink and Wagelmans, 2015]		×																		×	TS	
[Riquelme-Rodríguez, Gamache, and Langevin, 2016]	×	×	×																	×	VNS	
[Huber, 2016]																	×				VNS	
[Amini, Tavakkoli-Moghaddam, and Ebrahimnejad, 2017]	×	×															×		×	×	ایستکاری	
[Tavakkoli-Moghaddam, Amini, and Ebrahimnejad, 2018]	×	×																	×		ایستکاری	
این تحقیق	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	E-محدودیت MODA,MOPSO, MOBA, NSGAI

[Çetinkaya, Gökçen, and Karaoglan, 2018] یک مدل برای مسئله LRP با تعریف پنجره زمانی برای کمان‌ها با کاربرد در مناطق تروریستی پیشنهاد دارد. در واقع با اینکه در مدل پیشنهادی برای کمان‌ها پنجره زمانی تعریف شده است اما مشتریان روی گره‌ها قرار دارند و ماهیت مدل پیشنهادی گره-محور است.

مرور مطالعات مرتبط با پنجره زمانی در حوزه مسائل کمان-محور نشان می‌دهد که تعداد اندکی از مطالعات بر روی ارائه مدل ریاضی تمرکز داشته و به جز مدل [Lystlund and Wøhlk, 2012] تمامی مدل‌ها غیرخطی هستند. در این کار از مدل ارائه شده در [Lystlund and Wøhlk, 2012] که پنجره زمانی را در مسئله CARP مدل‌سازی کرده است، برای مدل‌سازی LARP با پنجره زمانی استفاده شده است.

۳-۲ ریسک جابجایی کالای ارزشمند

بررسی مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه ریسک جابجایی مواد خطرناک در تحقیقات متعددی بررسی شده است (Jalili, Tavakkoli-Moghaddam and Javanshir, 2017) اما موضوع ریسک جابجایی وجوه نقد در تحقیقات داخلی تنها در (Kahfi and Tavakkoli-Moghaddam, 2015) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق فوق برای محاسبه ریسک جابجایی پول بین شعب و خزانه‌ها در یک مسأله مسیریابی، از شاخص‌هایی مانند نوع خیابان، نوع تردد مجاز و متوسط ترافیک خیابان استفاده شده است.

شاخص‌های ارائه شده برای حمل و نقل مواد خطرناک [DoT, 1996] و سایر شاخص‌های مهم در مسئله حمل کالای ارزشمند که از ادبیات موضوع استخراج شده است در جدول ۲ مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که در صورت اهمیت کالای حمل‌شونده، مقدار ماده حمل شده، مسائل امنیتی و کیفیت جاده مهم است.

در تمام تحقیقاتی بررسی شده در جدول ۱ از روش ابتکاری یا فراابتکاری برای حل مدل‌ها استفاده شده است بنابراین هیچکدام از مدل‌ها اعتبارسنجی نشده است. همچنین در [Riquelme-Rodríguez, Gamache, and Langevin, 2016] که تنها مدل دو هدفی ارائه شده است، فقط توابع هدف به صورت ریاضی مدل‌سازی شده است و به نحوه مدل‌سازی محدودیت‌ها اشاره نشده است.

۲-۲ پنجره زمانی

تعریف محدودیت پنجره زمانی در مطالعه موردی به دلیل درخواست مشتریان برای جمع‌آوری یا تحویل وجوه نقد در یک بازه زمانی مشخص لازم است. اما بررسی تاریخچه حوزه مسائل کمان‌محور نشان می‌دهد که تاکنون موضوع پنجره زمانی فقط در مسائل CARP مورد توجه قرار گرفته است. [Vansteenkoven, Souffriau, and Sörensen, 2010] از یک روش فراابتکاری برای حل مسئله ARP با پنجره زمانی نرم برای یک مطالعه موردی نقشه‌برداری دیجیتال با ون^{۱۵} استفاده کردند. آن‌ها مدل خود را به صورت برنامه‌ریزی ریاضی ارائه نکردند.

[Lystlund and Wøhlk, 2012] دو مدل خطی برای مسئله CARP با پنجره زمانی سخت و نرم ارائه کردند و با یک روش ابتکاری آن را حل کردند. [Black, Egglese, and Wøhlk, 2013] یک مدل غیرخطی برای مسئله CARP با جایزه جمع-آوری^{۱۶} تعریف کرده است. با توجه به اینکه مدل ارائه شده دارای توابع غیرخطی است و امکان خطی‌سازی آن وجود نبود از روش ابتکاری برای حل مدل استفاده شده است.

[Çetinkaya, Karaoglan, and Gökçen, 2013] یک مدل ترکیبی عددصالح غیرخطی برای مسئله ARP دو مرحله‌ای با پنجره زمانی ارائه داده است. [Vincent and Lin, 2015] نیز بدون ارائه مدل برای مسئله ARP پنجره زمانی همراه با جایزه جمع‌آوری، از یک روش فراابتکاری برای حل آن استفاده کرده است.

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های حمل کالای خطرناک و ارزشمند

نوع کالا	مقدار ماده حمل شونده	تاخیر در حمل و نقل	حجم ترافیک	پیشینه تصادفات	شرایط اقلیمی	درجه امنیت منطقه	ایجاد امنیت در زمان حادثه	مسیرهای جایگزین	آزادراه	شیب طولی	طول مسیر	عرض مناسب	ملاحظات اقتصادی	ریسک جمعیتی	ریسک زیست محیطی	قابلیت امداد رسانی	شرایط توپوگرافی	آسیب پذیری مراکز حساس
کالای خطرناک	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
کالای ارزشمند	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						

مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه‌یافته LARP و خطی‌سازی مدل در این بخش توضیح داده شده است.

۳-۱ مفروضات

- هر کمان دارای تقاضا توسط یک وسیله نقلیه ملاقات شود.
- وسیله نقلیه به همان انباری که سفر را از آن شروع کرده است برمی‌گردد.
- کل تقاضای کمان‌های دارای تقاضا در یک تور از ظرفیت وسیله نقلیه سرویس‌دهنده آن تور کم‌تر باشد.
- تعداد کمان‌های بدون تقاضا در یک تور حداقل باشد.
- انبارها از قبل احداث شده و در صورت انتخاب آن‌ها هزینه افزایش امنیت آن‌ها مورد نظر است.
- زمان انتظار فقط در زمان شروع سرویس‌دهی برای هر کمان مجاز است.
- نحوه توزیع کالا بین مشتریان از نوع تحویل و جمع‌آوری کالا است. به نحوی که بسته‌های تحویلی به هر مشتری قبل از شروع سفر مشخص و بسته‌های جمع‌آوری شده از مشتریان در طول سفر دست‌نخورده به انبار ارسال می‌شود.

۳-۲ اندیس‌ها

I : مجموعه کلیه رئوس $I = \{1, \dots, i\}$ که شامل مشتریان و انبارها است.

[Talarico, Sørensen, and Springael, 2013] یک

نمونه از مسئله VRP با پنجره زمانی و محدودیت مرتبط با ریسک حمل و نقل پول را مدل و با دو الگوریتم فراابتکاری حل کرده‌اند. محدودیت مرتبط با ریسک تضمین می‌کند که ریسک کلی از آستانه ریسک تجاوز نکند.

[Talarico et al., 2015] یک مدل CVRP با محدودیت ریسک ارائه داده‌اند که ریسک وابسته به مقدار پول جابه‌جاشده، زمان و فاصله پیموده شده است. مدل با استفاده از CPLEX برای مثال کوچک حل شده و برای مثال‌های بزرگ‌تر از دو روش فراابتکاری استفاده شده است. [Talarico et al., 2017] یک مدل VRP دوهدفه با اهداف حداقل‌سازی هزینه و حداقل‌سازی پیشینه ریسک با محدودیت مشابه با (Talarico, Sørensen, and Springael, 2013) را توسعه داده‌اند. برای حل مدل از ترکیب یک روش فراابتکاری با یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است.

مرور ادبیات ریسک نشان می‌دهد که تا کنون مسئله ریسک در مدل‌های کمان‌محور لحاظ نشده است. بنابراین در اینجا با الهام از [Talarico et al., 2015] و [Lystlund and Wøhlk, 2012] محدودیت ریسک وابسته به مقدار کالای جابه‌جاشده و زمان سفر با رویکرد کمان‌محور طراحی شده است.

۳. مدل‌سازی ریاضی

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

$J = \{1, \dots, j'\}$ که j' تعداد انبارها است
و شمارنده انبارها از رأس ۱ تا j' است.
 $K = \{1, \dots, k\}$ مجموعه وسایل نقلیه
 $P = \{1, \dots, p\}$ تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی
 $S = \{1, \dots, s\}$ گام‌هایی که هر وسیله نقلیه طی می‌کند
 A : مجموعه کمان‌هایی که باید سرویس‌دهی شود.
 V_A : مجموعه رئوسی تشکیل‌دهنده کمان‌های مجموعه A
 V : اجتماع مجموعه J و V_A ($V = J \cup V_A$) یا به عبارتی
مجموعه تمام رئوس گراف
 $\hat{A}$: مجموعه کمان‌ها که یک گراف کامل را با رئوس مجموعه V
تشکیل می‌دهد.
 $(J^+)(J^-)$: مجموعه کمان‌هایی که یکی از رئوس آن
انبار J را ترک (به انبار J وارد) می‌کند.

۳-۳ پارامترها

F_k : هزینه‌های ثابت استفاده از یک وسیله نقلیه
 $f_{j'p}$: هزینه‌های تأمین امنیت انبار j' در دوره p (انبارها موجود و
به جای هزینه احداث، هزینه برقراری امنیت آن‌ها مطرح است).
 c_{ijp} : هزینه‌های حرکت بر روی کمان (i, j) در دوره p ، اگر کمان
 (i, j) دارای تقاضا و توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود
هزینه سفر بر روی آن برابر $\hat{c}_{ijp}$ و اگر یک کمان بدون تقاضا
باشد هزینه برابر $\hat{c}_{ijp}$ خواهد بود.

$\hat{d}_{ijp}$: تقاضای کمان (i, j) در دوره p در صورتی که تقاضا
مرتبط با جمع‌آوری کالا باشد این پارامتر مقدار مثبت و در
صورتی که مرتبط با تحویل کالا باشد، مقدار منفی دارد.

Q_{kp} : ظرفیت ثابت وسیله نقلیه k در دوره p

$b_{j'p}$: ظرفیت انبار j' در دوره p

$\hat{t}_{ij}$: زمان سفر روی کمان (i, j) دارای تقاضا

t_{ij} : زمان سفر روی کمان (i, j) بدون تقاضا

N : تعداد مشتری

M : یک عدد خیلی بزرگ

۳-۴ متغیرهای تصمیم

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{(i,j) \in \hat{A}} \sum_{j' \in J} \sum_{p \in P} f_{j'p} w_{ijj'p} + \sum_{(i,j) \in \hat{A}} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_{ijp} x_{ijksp} \quad (1)$$

$$+ \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(J)} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} F_k x_{ijksp}$$

$$\text{Min } Z_2 = \max_{(i,j) \in \hat{A}, k \in K, p \in P} \sum_{s \in S} (\hat{d}_{ijp} + \beta_{ijksp}) t_{ij} \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} y_{ijksp} = 1 \quad \forall (i, j) \in A, p \in P \quad (3)$$

$$x_{ijksp} \geq y_{ijksp} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (4)$$

$$\beta_{ijksp} - v_{iksp} \leq M(1 - x_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in \hat{A}, k \in K, s \in S, p \in P \quad (19)$$

$$\beta_{ijksp} + \hat{d}_{ijp} - v_{jks+1p} \leq M(1 - y_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (20)$$

$$v_{jks+1p} - (\beta_{ijksp} + \hat{d}_{ijp}) \leq M(1 - y_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (21)$$

$$v_{0k1p} = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} d_{ijp} y_{ijksp} \quad \forall k \in K, p \in P \quad (22)$$

$$\varphi_{0k1p} = 0 \quad \forall k \in K, p \in P \quad (23)$$

$$x_{ijksp}, y_{ijksp}, w_{ijj'p}, u_{ikp} \in \{0, 1\} \quad (24)$$

$$\varphi_{iksp}, \rho_{ijksp}, \omega_{ijp}, v_{iksp}, \beta_{ijksp} \geq 0 \quad (25)$$

تابع هدف (۱) هزینه‌های کل را حداقل می‌کند. هزینه‌های کل شامل هزینه برقراری امنیت انبار، سرویس‌دهی به کمان دارای تقاضا و استفاده از وسایل نقلیه است. تابع هدف دوم (۲) ماکزیمم مقدار ریسک را حداقل می‌کند. با توجه به اهمیت کالای حمل‌شونده در مطالعه موردی، در مدل پیشنهادی مقدار ریسک وابسته به ارزش مقدار کالای حمل‌شده و زمان تردد و وسیله نقلیه است. زیرا هرچه تردد و وسیله نقلیه با کالای ارزشمند بیشتر طول بکشد احتمال سرقت افزایش می‌یابد. بنابراین با حداقل‌سازی ماکزیمم ریسک هر وسیله نقلیه که بر اساس مجموع کالای حمل‌شده ضرب در زمان محاسبه می‌شود، احتمال بروز سرقت کمتر می‌شود.

محدودیت (۳) این اطمینان را می‌دهد که تقاضای همه‌ی کمان-هایی که باید سرویس‌دهی شوند، تأمین می‌شود. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که اگر کمان دارای تقاضا توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود، حتماً توسط آن وسیله پیموده شده است. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه بیشتر از یک وظیفه را انجام می‌دهد. محدودیت (۶) حفظ جریان را تضمین می‌کند، اگر وسیله نقلیه به یک گره وارد شد باید از آن نیز خارج شود. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تعداد وسایل نقلیه‌ای که انبار را در گام اول ترک می‌کنند برابر تعداد وسایل نقلیه‌ای است که در گام‌های متوالی وارد انبار می‌شوند.

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ijksp} \leq 1 \quad \forall k \in K, s \in S, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} x_{ijksp} - \sum_{(i,j) \in \delta^-(i)} x_{ijksp} = 0 \quad \forall i \in V_A \setminus \{0\}, k \in K, s \in S, p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in \delta^+(0)} x_{j0ksp} - \sum_{j \in \delta^-(0)} x_{0jk1p} = 0 \quad \forall k \in K, p \in P \quad (7)$$

$$u_{ikp} - u_{jkp} + Nx_{ijksp} \leq N - 1 \quad \forall (i, j) \in V_A, i \neq j, k \in K, s \in S, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} d_{ijp} y_{ijksp} \leq Q_{kp} \quad \forall k \in K, p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{m \in V_A} \sum_{s \in S} x_{j'mksp} y_{ijksp} \leq Mw_{ijj'p} \quad \forall j' \in J, (i, j) \in A, k \in K, p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{(i,j) \in R} d_{ijp} w_{ijj'p} \leq b_{j'p} \quad \forall j' \in J, k \in K, p \in P \quad (11)$$

$$\varphi_{iksp} - \rho_{ijksp} \leq M(1 - x_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in \hat{A}, k \in K, s \in S, p \in P \quad (12)$$

$$\rho_{ijksp} + \hat{t}_{ij} - \varphi_{jks+1p} \leq M(1 - y_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (13)$$

$$\varphi_{jks+1p} - (\rho_{ijksp} + \hat{t}_{ij}) \leq M(1 - y_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (14)$$

$$\rho_{ijksp} + t_{ij} - \varphi_{jks+1p} \leq M(1 - (x_{ijksp} - y_{ijksp})) \quad \forall (i, j) \in \hat{A} \setminus A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (15)$$

$$\varphi_{jks+1p} - (\rho_{ijksp} + t_{ij}) \leq M(1 - (x_{ijksp} - y_{ijksp})) \quad \forall (i, j) \in \hat{A} \setminus A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (16)$$

$$\rho_{ijksp} - \omega_{ijp} \leq M(1 - y_{ijksp}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (17)$$

$$\omega_{ijp} + \hat{t}_{ij} - \rho_{ijksp} \leq M(1 - (x_{ijksp} - y_{ijksp})) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (18)$$

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

وسیله نقلیه وجود دارد کوچک‌تر یا برابر کالایی است که قبل از زمان رسیدن وسیله به گره i در گام S در وسیله وجود داشته است. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) تضمین می‌کنند که اگر وسیله نقلیه به کمان (i,j) در گام S سرویس‌دهی کند پس مقدار کالای موجود در وسیله نقلیه در زمان رسیدن به گره j برابر مقدار کالایی است که زمان شروع سرویس در ماشین بوده، به‌اضافه مقدار تقاضای کمان (i,j) در گام S است. با توجه مثبت یا منفی بودن مقدار تقاضا، مقدار کالایی که در وسیله نقلیه وجود دارد اضافه و یا از آن کم می‌شود. این دو محدودیت اگر وسیله‌ای به این کمان سرویس ندهد، کارکردی نیست.

تعریف گام‌هایی که یک وسیله نقلیه طی می‌کند و با اندیس S نمایش داده شده است تا محدودیت (۱۲) در مدل تأثیری نداشته است. بنابراین در صورتی که مدل بدون محدودیت‌های مرتبط با ریسک و پنجره زمانی استفاده شود به تعریف این اندیس نیازی نیست. اما تعریف این اندیس در محدودیت (۱۳) تا (۲۱) به دلیل نیاز به محاسبه زمان رسیدن به گره j یا محاسبه مقدار کالای موجود در گره j به اطلاعات گره i که در گام قبلی وسیله نقلیه رخ داده است، ضروری است.

محدودیت (۲۲) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه در گام اول با مقدار مجموع تقاضایی که وسیله در آن سفر حمل می‌کند سفر خود را شروع می‌کند. محدودیت (۲۳) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه در گام اول در زمان صفر، سفر خود را از انبار شروع می‌کنند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) متغیرهای باینری و غیرمنفی را تعیین می‌کنند.

۳-۶ خطی‌سازی مدل

مدل ارائه شده در بخش ۳-۵ به دلیل محدودیت (۱۰) که مرتبط با تخصیص کمان‌های دارای تقاضا به انبار می‌باشد، یک مدل غیرخطی است. برای حل دقیق مدل در نرم‌افزار GAMS، با وجود اینکه این نرم‌افزار دارای حل‌کننده‌های خطی و غیرخطی است، اما در صورتی که امکان خطی‌سازی مدل وجود داشته

محدودیت (۸) برای حذف زیرتور است، در واقع هر تور از یک انبار شروع و به همان ختم می‌شود. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که از ظرفیت وسایل نقلیه تجاوز نشود. محدودیت (۱۰) این اطمینان را به وجود می‌آورد که کمان‌های دارای تقاضا به درستی به انبار اختصاص یابد. بنابراین هر مسیری که وسیله نقلیه انتخاب می‌کند از انبار j' شروع و به همان انبار ختم می‌شود و به این معنی است که تمام کمان‌های دارای تقاضا در این مسیر به انبار j' تخصیص یافته است. این محدودیت مدل را قادر می‌سازد تا محدودیت ظرفیت انبار را در نظر بگیرد.

محدودیت (۱۱) اطمینان می‌دهد که میزان کالای جابجاشده با وسیله در یک سفر از ظرفیت انبار تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که اگر یک وسیله k کمان (i,j) را در گام S طی کند زمان شروع سفر نمی‌تواند قبل از زمان رسیدن وسیله به گره i در گام S باشد. محدودیت (۱۳) و (۱۴) با هم تضمین می‌کنند که اگر وسیله نقلیه به کمان (i,j) در گام S سرویس‌دهی کند پس زمان رسیدن به گره j برابر زمان شروع سرویس به اضافه زمان سرویس است. این دو محدودیت اگر وسیله‌ای این کمان را سرویس‌دهی نکند، کارکردی نیستند.

محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) تضمین می‌کنند که اگر یک وسیله کمان غیرتقاضا‌دار را در گام S طی کند، پس زمان رسیدن به گره j برابر زمان شروع سفر به‌اضافه زمان سفر است. این محدودیت‌ها نیز اگر وسیله نقلیه این کمان را برای مسافرت انتخاب نکنند کارکردی نیست. در محدودیت (۱۷) متغیر زمان سرویس (i,j) برابر با زمانی که وسیله سرویس کمان (i,j) را شروع می‌کند، قرار داده شده است. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که هر سفر بر روی کمان دارای تقاضا (که جهت تردد انتخاب شده است نه سرویس‌دهی) زودتر از زمان اتمام سرویس این کمان شروع نشود. این محدودیت برای زمانی که کمان سرویس‌دهی می‌شود محدود کننده نیست.

محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که اگر یک وسیله k کمان (i,j) را در گام S طی کند مقدار کالایی که در زمان شروع سفر در

برای شعب یک بانک در سطح کل کشور با توجه به پراکندگی بالای شعب در ایران به دلیل مسائل امنیتی یک مسئله کلیدی است.

بانک مورد بررسی در این تحقیق دارای ۱۲۰۰ شعبه و ۳۱ مرکز پول رسان (خزانه) اصلی است (شکل ۱). بانک مورد نظر در تمامی استان های ایران دارای یک خزانه اصلی و تعدادی شعبه است. روند تبادل وجوه نقد، در استان ها به این صورت است خزانه اصلی استان ها مسئولیت تأمین/جمع آوری وجوه نقد شعب موجود در محدوده خود را به عهده دارند و برای تأمین وجوه نقد یا ارسال مازاد نقدینگی خود به صورت مستقیم با خزانه مرکزی بانک در ارتباط هستند. این روند تبادل به دلیل بعد مسافتی و ریسک جابجایی پول بهینه نیست.

باشد، زمان حل به شدت کاهش می یابد. بنابراین برای خطی سازی محدودیت (۱۰)، متغیر تصمیم باینری $h_j' mijksp$ به همراه محدودیت های (۲۶-۲۸) به مدل اضافه شده است.

$$h_j' mijksp \leq Mw_{ijj'p} \quad (26)$$

$$\forall j' \in J, m \in V_A, (i, j) \in A, k \in K, s \in S, p \in P \quad (27)$$

$$x_j' mksp + y_{ijksp} \leq 1 + h_j' mijksp \quad (27)$$

$$x_j' mksp + y_{ijksp} \geq 2 * h_j' mijksp \quad (28)$$

۴. مطالعه موردی

از زمان پیدایش مسکوکات فلزی، پول نقد یکی از ابزارهای اصلی مورد استفاده به منظور مبادله کالاها و خدمات به شمار می رود. حتی در سال های اخیر با وجود گسترش خدمات بانکداری الکترونیکی، استفاده از پول نقد همچنان در سطح جامعه در حال افزایش^{۱۷} است. بنابراین فرآیند تأمین وجوه نقد^{۱۸}



شکل ۱. ابعاد مسائل مطالعه موردی (تعداد شعب در هر استان بر روی نقشه مشخص شده است)

تعیین خزانه های منتخبی است که از یک سو با شعب و خزانه های اصلی تحت پوشش خود و از سوی دیگر با خزانه مرکزی بانک در ارتباط باشد. در حالی که خزانه های اصلی سایر استان ها

خبرگان این بانک برای حل این مشکل بر اساس معیارهایی مانند پول ساز یا پول گیر بودن یک خزانه و وجود جاده های امن، استان های ایران را به ده خوشه تقسیم بندی کرده اند. مسأله آن ها

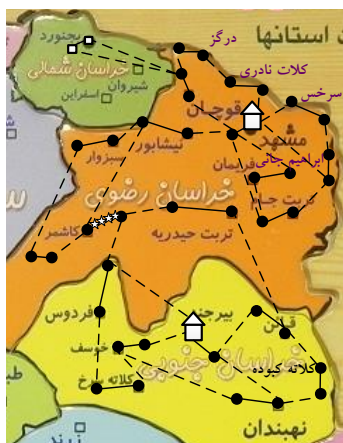
ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

پس از حل مدل تأیید نشود مسئولیت سرویس‌دهی به کلیه شعب تحت پوشش آن به عهده خزانه‌های منتخب دیگر است. گزینه-های بالقوه برای خزانه منتخب توسط خبرگان از بین تمام خزانه-های موجود در خوشه مشخص شده است. مجموع تقاضای کمان‌های دارای تقاضا برابر مجموع تقاضای شعب آن شهر است. اما تقاضای کمان مرتبط با خزانه غیر کاندید برای خزانه منتخب برابر تقاضای همان خزانه است (به طور مثال کمان خراسان شمالی در شکل ۲). زیرا سرویس‌دهی به شعب تحت پوشش این خزانه‌ها به عهده خزانه منتخب نیست. تعیین کمان‌های بدون تقاضایی که به عنوان مسیر از آن‌ها استفاده می‌شود، یکی از مسائل مهمی است که قبل از حل مطالعه موردی باید انجام شود. با توجه به نوع مطالعه موردی این مسیرها باید از امنیت کافی و قابل قبول برخوردار باشند. بنابراین کلیه جاده-های موجود از نظر شاخص‌های امنیتی جاده، حجم ترافیک، پیشینه تصادفات و نوع جاده (بزرگراه یا فرعی) توسط خبرگان با روش AHP ارزیابی و اولویت‌بندی شده و جاده‌های منتخب به عنوان کمان بدون تقاضا معرفی شده است.

نیز با شعب خود در ارتباط هستند و خزانه منتخب در قبال سرویس‌دهی به آن‌ها مسئولیتی ندارد. برای حل مسئله این بانک با توجه به بعد فاصله و تعداد زیاد شعب در ۱۰ خوشه، در این تحقیق از ایده تبدیل مسائل گره-محور به مسئله کمان‌محور به دلیل گره‌های نزدیک به هم استفاده شده است. بنابراین شعب هر شهر با چشم‌پوشی از فاصله و نحوه پراکندگی این شعب در سطح شهر با یک کمان دارای تقاضا جایگزین شده است. به طور مثال کمان شهر کاشمر در شکل ۲ جایگزین ۴ شعبه این شهر شده است. مسئله خوشه ۱ در شکل ۲، به دلیل ابعاد بالای مسئله و ایجاد امکان نمایش گرافیکی آن، در ابعاد کوچک‌تر از مسئله واقعی نمایش داده شده است. این خوشه در حالت ساده شده دارای ۲۱ کمان دارای تقاضا (۲۰ شهر و ۱ خزانه اصلی استان خراسان شمالی)، ۲۸ کمان بدون تقاضا (جاده‌های بین شهری) و دو نقطه بالقوه برای خزانه منتخب است.

نقاط بالقوه برای خزانه منتخب مجاز به سرویس‌دهی به کلیه کمان‌های دارای تقاضا هستند و در صورتی که نقطه بالقوه خزانه



کمان تقاضا دار ———
گزینه بالقوه برای خزانه منتخب □
شعب شروع و پایان شهر ●
کمان بدون تقاضا - - -
خزانه اصلی استان □
شعب هر شهر ☆

شکل ۲. مسئله ساده‌شده خوشه ۱

در نیم‌سال اول و دوم سال، این مطالعه موردی یک مسئله دو دوره‌ای در افق زمانی یک ساله است. ابعاد ۱۰ مسئله واقعی در بانک مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

زمان سفر بر روی کمان دارای تقاضا و بدون تقاضا نیز با متوسط-گیری از زمان‌های تردد در شرایط مختلف به دست آمده است. با توجه به تغییرات درخواست تحویل و جمع‌آوری وجوه نقد

۳- تقسیم‌بندی بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد از قبل تعیین شده و تشکیل یک جدول مقادیر برای $E_2, \dots, E_n$.

۴- حل مکرر مسئله با تابع هدف اصلی به ازای هر یک از مقادیر $E_2, \dots, E_n$.

۵- گزارش جواب‌های پارتویی یافته شده.

۲-۵ روش‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی برای حل مسائل Np-hard معرفی و به کار گرفته شده است. در این تحقیق از سه الگوریتم جمعیت‌محور PSO، BA و DA برای حل مدل LARP استفاده شده است. الگوریتم BA و DA توسعه‌یافته الگوریتم PSO هستند و در این کار عملکرد الگوریتم DA نسبت به PSO و BA بررسی شده است. با توجه به دودهنه بودن مدل پیشنهادی، نسخه چنددهنه این الگوریتم‌ها استفاده شده است.

۱-۲-۵ الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی بر مبنای جمعیت است [Kennedy, 1995]. در این روش هر جواب، که موقعیت یک پرند در فضای جستجو است، ذره نامیده می‌شود. هر ذره دارای یک مقدار شایستگی^{۱۹} و یک مؤلفه سرعت^{۲۰}، که مسیر حرکت و مکان آن را تعیین می‌کند، است.

الگوریتم PSO استاندارد با یک گروه از جواب‌های تصادفی شروع و با به روز کردن سرعت و مکان هر ذره به جستجو در فضای مسئله می‌پردازد. برای به روز کردن سرعت در هر مرحله از بهترین جواب برای هر ذره به دست آمده^{۲۱} و بهترین جواب سراسری که تا کنون توسط تمام ذرات به دست آمده^{۲۲} استفاده می‌شود. نسخه‌های بهبود یافته زیادی برای این الگوریتم ارائه شده است [Raquel and Naval Jr, 2005] و الگوریتم‌های جدیدی مانند الگوریتم BA و DA مشابه آن طراحی شده است. الگوریتم PSO به طور کامل در [Kahfi, Barzinpour, and Tavakkoli-Moghaddam, 2012] معرفی شده است.

۲-۲-۵ الگوریتم BA

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

جدول ۳. ابعاد مسائل مطالعه موردی

شماره مسئله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تعداد گره	۸	۱۲	۱۴	۱۸	۲۳	۲۵	۲۷	۲۷	۳۲	۳۶
تعداد انبار	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
تعداد دوره	۵	۶	۶	۶	۷	۷	۷	۸	۱۰	۱۲
وسیله	اول	اول	اول	اول	اول	اول	اول	اول	اول	اول
تعداد	۸	۱۰	۱۴	۱۵	۲۰	۲۲	۲۸	۳۰	۳۴	۳۶
کمان‌های تقاضادار	۸	۱۰	۱۴	۱۵	۲۰	۲۲	۲۸	۳۰	۳۴	۳۶
تعداد گره	۸	۱۲	۱۴	۱۸	۲۳	۲۵	۲۷	۲۷	۳۲	۳۶
تعداد انبار	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
تعداد دوره	۲	۳	۴	۴	۵	۵	۶	۶	۷	۸
وسیله	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم	دوم
تعداد	۱۰	۱۴	۱۲	۱۷	۱۸	۲۴	۲۴	۲۸	۳۳	۳۸
کمان‌های تقاضادار	۱۰	۱۴	۱۲	۱۷	۱۸	۲۴	۲۴	۲۸	۳۳	۳۸

۵. روش‌های حل

با توجه به Np-hard مسئله LRP [Albareda-Sambola, 2015] مسئله LARP نیز Np-hard است. در تمام مطالعات در حوزه LARP، اشاره شده است که به دلیل NP-hard بودن و تعداد زیاد متغیرهای باینری، امکان حل مدل با روش دقیق بررسی نشده است [Kahfi, Seyyedhosseni, and Tavakkoli-Moghaddam, 2017]. در این تحقیق از روش E-محدودیت برای حل مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS و چهار روش فراابتکاری برای حل مدل استفاده شده است.

۱-۵ روش E-محدودیت

گام‌های روش E-محدودیت به صورت زیر است [Chankong and Haimes, 2008]:

۱- انتخاب یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی.

۲- حل مکرر مسئله هر بار با توجه به یکی از توابع هدف و محاسبه مقادیر بهینه هر تابع هدف

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{1/\beta} \quad (32)$$

$$\Gamma(x) = (x-1)! \quad (33)$$

که در آن $S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j$ برای اجتناب از برخورد

یک فرد با سایر همسایه‌ها (تفکیک^{۲۳})، $A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N}$ برای

تنظیم سرعت فرد با همسایه‌ها (ترازبندی^{۲۴})، $C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} -$

X نشان‌دهنده تمایل فرد به سمت مرکز ثقل همسایه‌ها

(انسجام^{۲۵})، $F_i = X^+ - X$ نشان‌دهنده شدت جذب فرد به

سمت منابع غذایی (جاذبه^{۲۶}) و $E_i = X^- + X$ نشان‌دهنده

دوری از دشمن (گیج کردن^{۲۷}) است. در حالی که V_j, X_j, X

X^+, X^- و N به ترتیب برابر موقعیت فرد جاری، موقعیت j -

امین فرد در همسایگی، سرعت j -امین فرد در همسایگی،

موقعیت منبع غذا، موقعیت دشمن و تعداد افراد موجود در

همسایگی است. همچنین s, a, c, f, e به ترتیب برابر ضریب

تفکیک، ترازبندی، انسجام، تغذیه و گیج کردن دشمن است. w

وزن اینرسی و t شمارنده تکرار الگوریتم است. r_1 و r_2

بعدهای بردار موقعیت، دو عدد تصادفی در بازه $[0-1]$ و β

یک مقدار ثابت و برابر $1/5$ فرض شده است. مراحل اجرای

الگوریتم سنجاک چندهدفه MODA به صورت زیر است:

- مقداردهی به پارامترهای الگوریتم
- ساخت جمعیت اولیه سنجاک‌ها به صورت تصادفی (X_i)
- مقداردهی طول گام سنجاک‌ها بصورت تصادفی (ΔX_i)
- تعریف تعداد ماکزیمم بخش‌ها (حد بالای کره^{۲۸})
- تعیین اندازه آرشیو
- تا زمان برقراری شرط توقف تکرار شود:

○ ارزیابی موقعیت هر سنجاک و محاسبه شایستگی آن

○ یافتن راه حل‌های غیرغالب

○ به روز رسانی آرشیو با توجه به راه حل‌های غیرغالب

○ اگر آرشیو کامل است پس:

الگوریتم نیز یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است

[Yang, 2010]. به هنگام‌سازی مکان و سرعت ذره در

خفاش‌ها دارای شباهت‌هایی با الگوریتم PSO است. در واقع

BA را می‌توان توسعه‌ای از الگوریتم PSO بدون بهره‌مندی از

بهترین جواب محلی ذره i -ام دانست که از یک جستجوی محلی

مبتنی بر بلندی صوت و نرخ انتشار پالس استفاده می‌کند

[Sanieabadi and Jabalamelian, 2015]. الگوریتم BA

به طور کامل در (Kahfi and Tavakkoli-

Moghaddam, 2015) معرفی شده است.

۳-۲-۵ الگوریتم DA

الگوریتم سنجاک یا DA توسط [Mirjalili, 2016] معرفی

شده است. سنجاک عضو یکی از قدیمی‌ترین گروه حشرات

بال‌دار است. سنجاک‌ها با توجه به نحوه زندگی در مراحل

نوزادی (دوره طولانی) و بلوغ (دوره کوتاه) و همچنین

خصوصیت شکارگری، دارای شرایط اختصاصی هستند که

سرعت بالایی در شکار دارند. واقعیت جالب در مورد

سنجاک‌ها رفتار ازدحامی منحصر به فرد این حشره است. توده

سنجاک‌ها تنها برای دو هدف شکل می‌گیرد: شکار و مهاجرت.

که شکار را توده استاتیک یا تغذیه می‌نامند و مهاجرت را توده

دینامیک یا مهاجر می‌نامند. این دو رفتار ازدحامی خیلی شبیه به

دو مرحله اصلی اکتشاف و بهره‌برداری در الگوریتم‌های

فراابتکاری است. سنجاک‌ها گروه‌های کوچک‌تری تشکیل می-

دهند و در نواحی مختلف به صورت یک گروه ایستا پرواز می-

کنند (اکتشاف). در گروه دینامیک، سنجاک‌ها در گروه‌های

بزرگ‌تر و در امتداد یک جهت پرواز می‌کنند (بهره‌برداری).

بنابراین به منظور به روزرسانی موقعیت سنجاک‌های مصنوعی

بردار طول گام و بردار موقعیت برابر:

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (29)$$

$$X_{t+1} = X_t + \text{Lévy}(d) \times X_t \quad (30)$$

$$\text{Lévy}(x) = 0.01 \times \frac{r_1 \times \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (31)$$

[Babaei, 2015] جواب به صورت یک رشته ابتکاری با طول متغیر تعریف شده که در آن به ازای هر یک از سفرهای وسیله نقلیه یک بردار در نظر گرفته شده است. این رشته تنها شامل سفرهای موجهی است که تمامی کمان‌های موردنیاز را پوشش می‌دهد.

نحوه نمایش جواب در این تحقیق به صورت ماتریس با ابعاد نامشخص است (شکل ۳). تعداد ردیف و طول هر ردیف متغیر است. تعداد ردیف بستگی به تعداد مسیر ایجاد شده در هر جواب شدنی دارد. طول هر ردیف نیز بستگی به تعداد گام‌های طی شده توسط هر وسیله نقلیه دارد.

شماره گره	شماره انبار	شماره ماشین				
			۱	۲		
مسیر ۱						
مسیر ۲						
...						

شکل ۳. نحوه نمایش کلی

به طور مثال اگر مجموعه کمان‌های دارای تقاضا در یک مسئله با ۲ انبار و ۴ ماشین برابر $\{۱-۲, ۲-۳, ۳-۴, ۴-۵, ۵-۱, ۲-۵, ۳-۴\}$ باشد، نحوه نمایش یک جواب به صورت شکل ۴ است. ردیف اول بیان می‌کند که ماشین ۲ به انبار ۱ اختصاص یافته و به وسیله کمان‌های بدون تقاضای ۱-۳ و ۲-۴، کمان‌های تقاضادار ۳-۴، ۲-۵ و ۵-۱ را سرویس‌دهی می‌کند و به انبار ۱ برمی‌گردد. در مسیر دوم کمان تقاضادار ۳-۴ به دلیل سرویس‌دهی در مسیر قبلی به عنوان مسیر است.

شماره گره	شماره انبار	شماره ماشین					
			۱	۲	۳	۴	۵
مسیر ۱	۱	۲	۳	۴	۲	۵	۱
مسیر ۲	۲	۴	۳	۴	۵	۲	-

شکل ۴. یک نمونه از جواب

۵-۳-۱ نحوه تولید جواب اولیه

تا زمان برقراری شرط خاتمه مراحل زیر انجام شود و به شماره ردیف ماتریس اضافه شود:

- اجرای مکانیسم نگهداری آرشیو برای حذف یکی از اعضای آرشیو فعلی
- اضافه کردن راه حل جدید به بایگانی
- اگر هر یک از راه حل های جدید اضافه شده به آرشیو خارج از حد بالای کره است
- به روزرسانی و تعریف مجدد موقعیت بخش‌ها برای پوشش جواب(های) جدید
- انتخاب یک منبع غذایی از آرشیو: X^+ برابر غذای انتخاب شده (آرشیو)
- انتخاب یک دشمن از آرشیو: X^- برابر دشمن انتخاب شده (آرشیو)

○ به‌روزرسانی بردار طول با فرمول (۱۴)

○ به‌روزرسانی بردار موقعیت با فرمول (۱۵)

○ بررسی و اصلاح مکان‌های جدید بر اساس مرز متغیرها

۵-۳ نحوه نمایش جواب

نحوه نمایش جواب در مسائل مسیریابی به دلیل الزام در استفاده از یک توالی از اعداد مشخص، پیچیده است. این پیچیدگی در مسائل کمان‌محور به دلیل الزام سرویس‌دهی به کمان‌های تقاضادار بیشتر است. در تحقیقات متعدد موجود در این حوزه نحوه نمایش‌های مختلفی وجود دارد.

در تحقیق [Lacomme, Prins, and Ramdane-Cherif, 2004]

جواب به صورت یک بردار نمایش داده شده است.

مقدار اولیه این بردار به صورت تصادفی تولید می‌شود. با تولید

چند عدد تصادفی بردار به چند بخش تقسیم شده و هر بخش به

یک وسیله نقلیه اختصاص می‌یابد. این بردار ممکن است نشدنی

باشد که در این صورت حذف می‌شود. در [Kirlık and Sipahioglu, 2012]

جواب به صورت یک ماتریس با تعداد

ردیف و ستون متغیر تعریف شده است که به دلیل همگون بودن

وسایل نقلیه شماره هر ردیف، شماره وسیله نقلیه را نشان می‌دهد.

در این نوع نحوه نمایش همیشه وسایل نقلیه به ترتیب

انتخاب می‌شود. در [Alinaghian, Sabagh, and ...]

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

۷. اگر تمام کمان‌های تقاضادار سرویس‌دهی شده، به الگوریتم تصحیح برو و اگر نه در صورتی که وسیله نقلیه و انبار هنوز شرایط را دارا هستند به گام ۴ برو و اگر نه به گام ۱ برگرد و شماره ماشین به لیست ممنوعه اضافه شود.

۵-۳-۲ الگوریتم تصحیح

به دلیل موجه نبودن جواب‌های تولید شده گام‌های اصلاحی زیر موردنیاز است:

۱. در صورتی که نقطه پایان تمام وسایل نقلیه گره انبار نیست، آن را از جواب‌ها حذف شود.

۲. اگر در سفر یک وسیله نقلیه هیچ کمان تقاضادار انتخاب نشده باشد، آن سفر یا به عبارتی آن ردیف حذف شود.

۳. اگر در یک سفر دو یا چند کمان متوالی بدون تقاضا وجود دارد، در صورتی که مسیر کوتاه‌تری بین گره آغازی و پایانی این کمان‌ها باشد آن کمان جایگزین شود.

۶. نتایج محاسباتی

مدل پیشنهادی برای ۲۲ مسئله استاندارد در حوزه LARP استفاده و برای حل آن‌ها از روش E-محدودیت و چند الگوریتم فراابتکاری چندهدفه استفاده شده است. همچنین مدل پیشنهادی برای مدل‌سازی ۱۰ مسئله مطالعه موردی استفاده شده است. ابعاد مسائل مطالعه موردی در بخش ۴، جدول ۳ ارائه شده است. برای حل مدل با استفاده از روش E-محدودیت از نرم‌افزار GAMS 24.7.3 استفاده شده است. به دلیل خطی‌سازی مدل پیشنهادی در بخش ۳-۶، از حل‌کننده خطی CPLEX استفاده شده است.

الگوریتم‌های فراابتکاری نیز در نرم‌افزار MATLAB R2017b پیاده‌سازی شده است. رایانه مورد استفاده دارای پردازنده Intel Pentium 4، هسته i5، 2.4 گیگاهرتز با حافظه ۸ گیگا بوده است. کد الگوریتم DA تک‌هدفه در <http://www.alimirjalili.com/> و الگوریتم‌های BA و PSO در www.mathworks.com/matlabcentral

۱. از بین وسایل نقلیه دارای ظرفیت حجمی و زمانی، یک وسیله نقلیه را به تصادف انتخاب نمایید.

۲. از بین انبارهای دارای ظرفیت بالای صفر در لیست مجاز، یک انبار را به تصادف انتخاب نمایید.

۳. از بین کمان‌های تقاضادار که نقطه شروع آن‌ها انبار انتخابی است تحت شرایط زیر یک کمان به تصادف انتخاب شود:

۴-۱- در صورتی که تقاضای آن از ظرفیت انبار کوچک‌تر باشد به گام ۴-۲ برو و اگر نه به گام ۳ برگرد و شماره این انبار در لیست ممنوعه وارد شود.

۴-۲- تقاضا و محدوده زمانی حرکت بر روی کمان به ترتیب از ظرفیت ماشین و پنجره زمانی مجاز کمان کوچک‌تر باشد آن را انتخاب، از لیست کمان‌های تقاضادار حذف و به لیست کمان‌های بدون تقاضا اضافه شود. اطلاعات ظرفیت انبار، ظرفیت ماشین و زمان مجاز حرکت ماشین نیز به روز شود. در غیر این صورت به گام ۱ بازگشته و شماره ماشین به لیست ممنوعه اضافه شود.

۴. اگر رأس انتهایی کمان انتخابی، ابتدای یک کمان تقاضادار دیگر است به گام ۶ برو و اگر نه به گام ۷ برو.

۵. از میان کمان‌های دارای تقاضا که شروع آن رأس انتهایی کمان منتخب در گام ۵ است، یک کمان تحت شرایط زیر انتخاب نمایید و اگر نه به گام ۱ برگشته و شماره ماشین به لیست ممنوعه اضافه شود:

۶-۱- تقاضای کمان از ظرفیت ماشین کوچک‌تر باشد.

۶-۲- تقاضای آن از ظرفیت انبار کوچک‌تر باشد.

۶-۳- محدودیت پنجره زمانی کمان رعایت شود.

اطلاعات ظرفیت انبار، ظرفیت ماشین و زمان حرکت ماشین به روز شده، این کمان از لیست کمان‌های تقاضادار حذف و به لیست کمان‌های بدون تقاضا اضافه شود.

۶. از بین کمان‌های بدون تقاضا که شروع آن رأس انتهایی گام ۵ باشد، کمان با کمترین زمان موردنیاز برای حرکت انتخاب کنید و به گام ۵ برگردد.

الگوریتم	MOPSO	MOBA	MODA	NSGA-II
ضریب				
بهترین	حداکثر	۱/۵	گیج کردن	۱
جواب	فرکانس	دشمن		
سراسری				

۲-۶ تحلیل نتایج محاسباتی

تحلیل نتایج محاسباتی در اینجا شامل اعتبارسنجی روش‌های حل پیشنهادی و اعتبارسنجی مدل، تعیین روش بهتر برای حل و ارائه نتایج مدیریتی است.

۲-۶-۱ تحلیل نتایج اعتبارسنجی الگوریتم MODA

جهت اعتبارسنجی الگوریتم فراابتکاری مورد استفاده نیاز به مقایسه نتایج با مسائل استاندارد وجود دارد. مسائل استاندارد برای CVRP در [http://www.uv.es] طراحی شده است و در [Huber, 2016] متناسب با مسائل LARP تغییر پیدا کرده است. اما به دلیل عدم ارائه محدودیت‌های مدل ریاضی در [Huber, 2016] و نوآوری‌های ارائه شده در مدل تحقیق حاضر امکان مقایسه نتایج جهت اعتبارسنجی الگوریتم MODA وجود ندارد.

بنابراین جهت ارزیابی کارایی الگوریتم MODA، نتایج حل ۲۲ مسئله استاندارد در [Huber, 2016] با روش E-محدودیت و الگوریتم‌های فراابتکاری MOPSO و MOBA مقایسه شده است. ابعاد مسائل استاندارد در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. ابعاد ۲۲ مسئله استاندارد [Huber, 2016]

ردیف	نمونه	V	E	R	m	$\bar{f}$	Q	F
۱	gdb-20	۱۱	۲۲	۲۲	۳	۱۰	۲۷	۱
۲	gdb-21	۱۱	۳۳	۳۳	۳	۸	۲۷	۱
۳	gdb-22	۱۱	۴۴	۴۴	۳	۵	۲۷	۵
۴	gdb-23	۱۱	۵۵	۵۵	۳	۱۰	۲۷	۱
۵	gdb-1	۱۲	۲۲	۲۲	۳	۲۰	۵	۵
۶	gdb-2	۱۲	۲۶	۲۶	۳	۲۵	۵	۵
۷	gdb-12	۱۳	۲۳	۲۳	۳	۵۰	۳۵	۵
۸	gdb-5	۱۳	۲۶	۲۶	۳	۲۰	۵	۲

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

قابل دسترس است. همچنین پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-II بر اساس [Deb et al., 2002] انجام شده است.

۱-۶ تنظیم پارامتر

برای یک الگوریتم طراحی شده مشخصاتی تعریف می‌شود که با تنظیم آن‌ها به وسیله طراحی آزمایشات می‌توان عملکرد الگوریتم را بهبود داد. طراحی آزمایشات روش‌های مختلفی مانند روش‌های آزمایشات سستی^{۲۹}، آزمایشات کسری^{۳۰}، روش سطح پاسخ^{۳۱} دارد.

در روش آزمایشات سستی سطوح پارامترهای موثر بر مسأله تعیین می‌شود. این سطوح به صورت سعی و خطا و با بررسی^{۳۲} حالت مشخص می‌شوند (n برابر تعداد پارامترهای مورد بررسی است). این روش برای مسائل با تعداد پارامتر زیاد کارا نیست. روش تاگوچی که حالت خاصی از روش آزمایشات کسری است بخشی از سناریوها را که "سناریوهای متعامد" نامیده می‌شوند، بررسی می‌کند. دو روش اول بر اساس سناریوهای گسسته کار می‌کنند اما در روش سطح پاسخ برای هر پارامتر بازه پیوسته تعریف و با مدل ریاضی سطح بهینه در کران مشخص شده تعیین می‌شود.

در این تحقیق، از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای^۴ الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. روش تاگوچی در [Kahfi and Tavakkoli, 2015] به صورت کامل بیان شده است.

جدول ۴. مقادیر محاسبه شده پارامترهای ۴ الگوریتم با تاگوچی

الگوریتم	MOPSO	MOBA	MODA	NSGA-II
اندازه	۴۵۰	اندازه	اندازه	اندازه
جمعیت	جمعیت	جمعیت	جمعیت	جمعیت
۳۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۵۰
ضریب	نرخ	تفکیک	۰/۱	احتمال
بهترین	۱/۵	انتشار	۰/۳۲	ترازبندی
جواب ذره	پالس	انسجام	۰/۷	تقاطع
بلندی	۰/۴۲	تغذیه	۱	احتمال
۱	صوت	جهش	۰/۷۲	۰/۷۲

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

ردیف	نمونه	$ V $	$ E $	$ R $	m	$\bar{f}$	Q	F
۹	bccm-2A	۲۴	۳۴	۳۴	۵	۲۰	۱۸۰	۵
۱۰	bccm-2C	۲۴	۳۴	۳۴	۵	۵۰	۴۰	۲
۱۱	bccm-3A	۲۴	۳۵	۳۵	۵	۱۵	۸۰	۲
۱۲	bccm-3A	۲۴	۳۵	۳۵	۵	۲۵	۲۰	۵
۱۳	bccm-1B	۲۴	۳۹	۳۹	۵	۱۵	۱۲۰	۲
۱۴	bccm-1C	۲۴	۳۹	۳۹	۵	۲۵	۴۵	۸
۱۵	bccm-8A	۳۰	۶۳	۶۳	۵	۱۰	۲۰۰	۵
۱۶	bccm-6B	۳۱	۵۰	۵۰	۵	۴۰	۱۲۰	۵
۱۷	bccm-5A	۳۴	۶۵	۶۵	۵	۲۰	۲۲۰	۵
۱۸	bccm-5C	۳۴	۶۵	۶۵	۵	۳۰	۱۳۰	۲
۱۹	bccm-7A	۴۰	۶۶	۶۶	۵	۵	۲۰۰	۲
۲۰	bccm-4C	۴۱	۶۹	۶۹	۵	۲۵	۱۳۰	۲
۲۱	bccm-9B	۵۰	۹۲	۹۲	۵	۳۰	۱۷۵	۵
۲۲	bccm-10D	۵۰	۹۷	۹۷	۵	۲۰	۷۵	۵

V : تعداد گره‌ها، E : کمان، R : کمان‌های تقاضادار، m : تعداد مکان‌های بالقوه انبار، $\bar{f}$: متوسط هزینه ثابت انبار، Q : ظرفیت وسیله نقلیه و هزینه ثابت.

در روش ϵ -محدودیت تعداد ۳ شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شده و در مجموع حداکثر ۹ نقطه پارتویی برای هر مسئله تولید شده است. همچنین هر یک از روش‌های فراابتکاری برای هر مسئله ۱۰ بار اجرا شده و زمان و مقادیر توابع هدف این ۱۰ اجرا میانگین‌گیری شده است.

با توجه به Np -hard بودن مسئله و عدم توانایی روش ϵ -محدودیت برای حل مسئله ۹ تا ۲۲ در ۴۸ ساعت، جواب بهینه برای ۸ مسئله اول ارائه شده و برای سایر مسائل جواب محلی بعد از ۴۸ ساعت اجرا گزارش شده است که الزاما بهترین جواب محاسبه شده نیست. بنابراین جهت اعتبارسنجی الگوریتم MODA، مقدار انحراف توابع هدف محاسبه شده توسط این روش نسبت به روش ϵ -محدودیت محاسبه شده است.

نتایج مقدار توابع هدف، زمان محاسبه و میزان انحراف توابع هدف روش MODA نسبت به روش ϵ -محدودیت در جدول ۶ گزارش شده است.

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

عاطفه کهنی، سیدمحمد سیدحسینی، رضا توکلی مقدم

جدول ۶. مقایسه نتایج حل مسایل با روش E-محدودیت و روش های فراابتکاری

NAGA-II						MODA					MOBA					MOPSO					محدودیت			ردیف
Gap		T _A	O _{A2}	O _{A1}	Gap		T _A	O _{A2}	O _{A1}	Gap		T _A	O _{A2}	O _{A1}	Gap		T _A	O _{A2}	O _{A1}	T	O ₂	O ₁		
O ₂	O ₁				O ₂	O ₁				O ₂	O ₁				O ₂	O ₁								
۰/۱۹	۰/۲۳	۷۸	۱۰/۸۲۱	۶۵/۱۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۱۲۱	۱۰/۸۰۱	۶۵/۲	۰/۰۹	۰/۲۶	۱۱۳	۱۰/۸۱	۶۵/۴۷	۰/۱۴	۰/۳۱	۱۱۲	۱۰/۸۱۵	۶۵/۱	۱۸۴	۱۰/۸	۶۵/۳	۱	
۰/۴۲	۰/۵۵	۹۲	۱۲	۶۷/۴۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۱۴۴	۱۱/۹۷	۶۷/۶۶	۰/۲۵	۰/۴	۱۱۶	۱۱/۹۸	۶۷/۵۳	۰/۳۳	۰/۲۹	۱۱۹	۱۱/۹۹	۶۸	۸۷۳	۱۱/۹۵	۶۷/۸	۲	
۰/۵۶	۰/۵۸	۱۰۳	۱۲/۵۸	۶۸/۶	۰/۲۴	۱۹۰	۱۵۵	۱۲/۵۴	۶۸/۸۷	۰/۴	۰/۳۹	۱۱۸	۱۲/۵۶	۶۸/۷۳	۰/۴۸	۰/۳۳	۱۲۷	۱۲/۵۷	۶۹/۲۳	۶۵۰۰	۱۲/۵۱	۶۹	۳	
۰/۶۶	۰/۷۷	۱۱۵	۱۵/۲	۷۱/۰۵	۰/۳۳	۰/۳۵	۱۷۴	۱۵/۱۵	۷۱/۳۵	۰/۴۶	۰/۵۶	۱۴۱	۱۵/۱۷	۷۱/۲	۰/۶	۰/۶۳	۱۴۰	۱۵/۱۹	۷۱/۱۵	۱۱۰۷۵	۱۵/۱	۷۱/۶	۴	
۰/۷۷	۰/۹۳	۱۲۱	۱۷	۷۴/۴	۰/۳۶	۰/۳۹	۱۹۱	۱۶/۹۳	۷۵/۳۹	۰/۴۱	۰/۸	۱۵۳	۱۶/۹۴	۷۴/۵	۰/۵۹	۰/۶۷	۱۶۷	۱۶/۹۷	۷۴/۶	۲۰۱۹۰	۱۶/۸۷	۷۵/۱	۵	
۰/۷۵	۱/۱۲	۱۸۹	۲۶/۸	۱۴۸/۵۵	۰/۳۸	۰/۷۵	۲۶۶	۲۶/۷	۱۴۸	۰/۴۵	۱/۰۷	۲۵۶	۲۶/۷۲	۱۴۸/۴۷	۰/۵۶	۰/۸۲	۲۳۵	۲۶/۷۵	۱۴۸/۲	۶۴۷۳۰	۲۶/۶	۱۴۶/۹	۶	
۰/۶۸	۱/۵۴	۲۵۳	۲۷/۹۴	۱۵۱/۴	۰/۳۲	۰/۹۴	۳۴۱	۲۷/۸۴	۱۵۰/۵	۰/۳۶	۱/۱۴	۳۲۶	۲۷/۸۵	۱۵۰/۸	۰/۴۷	۱/۳۴	۳۱۷	۲۷/۸۸	۱۵۱/۱	۹۲۷۵۰	۲۷/۷۵	۱۴۹/۱	۷	
۱/۰۲	۱/۴۶	۳۲۴	۲۸/۶	۱۹۴/۹	۰/۳۹	۰/۹۲	۳۷۸	۲۸/۴۲	۱۹۳/۸۷	۰/۸۵	۱/۱۵	۳۴۱	۲۸/۵۵	۱۹۴/۳	۰/۸۱	۱/۱۱	۳۵۰	۲۸/۵۴	۱۹۴/۲۳	۱۱۱۹۳۵	۲۸/۳۱	۱۹۲/۱	۸	
۱/۰۹	۱/۵۶	۳۷۰	۳۱/۴۴	۲۱۹/۴۴	۰/۶۴	۱/۲۹	۴۴۷	۳۱/۳	۲۱۸/۸۵	۰/۹	۱/۳۵	۴۰۴	۳۱/۳۸	۲۱۸/۹۷	۰/۹۶	۱/۳۶	۴۱۳	۳۱/۴	۲۱۹	۱۷۲۸۰۰	۳۱/۱	۲۱۶/۰۶	۹	
۱/۲۳	۱/۶۸	۴۱۳	۳۶/۹	۲۵۴/۲	۰/۶۹	۱/۳۲	۵۴۵	۳۶/۷	۲۵۳/۳	۱/۰۲	۱/۵۶	۵۰۷	۳۶/۸۲	۲۵۳/۹	۱/۱	۱/۵۲	۴۸۶	۳۶/۸۵	۲۵۳/۷۹	۱۷۲۸۰۰	۳۶/۴۵	۲۵۰	۱۰	
۱/۲۷	۱/۷۵	۴۵۴	۵۴/۳	۲۹۴/۱۵	۷۱۰	۱	۶۲۱	۵۴	۲۹۲	۱/۱۴	۱/۵۱	۵۶۲	۵۴/۲۳	۲۹۳/۴۷	۱/۲۳	۱/۳۸	۵۷۱	۵۴/۲۸	۲۹۳/۱	۱۷۲۸۰۰	۵۳/۶۲	۲۸۹/۱	۱۱	
۱/۳۲	۱/۹۵	۵۲۶	۵۵/۳۹	۳۳۹/۵	۰/۸۲	۰/۷۸	۷۱۷	۵۵/۱۲	۳۳۵/۶	۱/۱۹	۱/۵۴	۵۹۹	۵۵/۳۲	۳۳۸/۱۳	۱/۲۸	۱/۵۹	۵۹۶	۵۵/۳۷	۳۳۸/۳	۱۷۲۸۰۰	۵۴/۶۷	۳۳۳	۱۲	
۱/۵	۱/۹۳	۵۸۷	۵۶/۰۴	۳۸۸/۶	۰/۹۸	۰/۶۹	۷۹۵	۵۵/۷۵	۳۸۳/۸۷	۱/۳۸	۱/۵۷	۶۳۸	۵۵/۹۷	۳۸۷/۲	۱/۴۷	۱/۶	۶۴۷	۵۶/۰۲	۳۸۷/۳۳	۱۷۲۸۰۰	۵۵/۲۱	۳۸۱/۲۳	۱۳	
۱/۸۳	۱/۶۲	۶۳۲	۶۱/۲	۴۳۰	۱/۰۳	۰/۶	۸۶۴	۶۰/۷۲	۴۲۵/۷	۱/۶۱	۱/۱۹	۷۳۱	۶۱/۰۷	۴۲۸/۲	۱/۶۶	۱/۵۶	۷۳۰	۶۱/۱	۴۲۹/۷۵	۱۷۲۸۰۰	۶۰/۱	۴۲۳/۱۵	۱۴	
۱/۶	۱/۳۵	۶۷۴	۶۶/۵	۵۰۳/۳	۰/۹۹	۰/۵۸	۹۲۰	۶۶/۱	۴۹۹/۵	۱/۳	۰/۹۹	۷۸۲	۶۶/۳	۵۰۱/۵	۱/۴۵	۱/۰۹	۷۷۷	۶۶/۴	۵۰۲	۱۷۲۸۰۰	۶۵/۴۵	۴۹۶/۶	۱۵	
۱/۴۸	۱/۳۲	۷۰۲	۷۳/۷	۵۴۱/۱۵	۰/۷۹	۰/۴۳	۱۰۵۸	۷۳/۲	۵۳۶/۴	۱/۲	۰/۹۲	۸۳۰	۷۳/۵	۵۳۹	۱/۳۴	۰/۹۴	۸۴۹	۷۳/۶	۵۳۹/۱	۱۷۲۸۰۰	۷۲/۶۲۵	۵۳۴/۱	۱۶	
۱/۳۵	۱/۲۴	۷۶۴	۷۷/۲	۶۰۸/۴۳	۰/۵۹	۰/۴	۱۱۴۰	۷۶/۶۲	۶۰۳/۴	۱/۰۵	۰/۷۵	۹۲۳	۷۶/۹۷	۶۰۵/۵۳	۱/۰۹	۰/۸۳	۹۱۲	۷۷	۶۰۶	۱۷۲۸۰۰	۷۶/۱۷	۶۰۱	۱۷	
۱/۲۹	۱/۱۱	۸۷۵	۸۲/۷۶	۶۷۶/۶	۰/۳۵	۰/۲۵	۱۲۲۳	۸۲	۶۷۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۶۸	۹۹۳	۸۲/۳۲	۶۷۳/۷	۰/۹۷	۰/۷۵	۹۷۸	۸۲/۵	۶۷۴/۲۳	۱۷۲۸۰۰	۸۱/۷۱	۶۶۹/۲	۱۸	

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

ردیف	ع-محدودیت			MOPSO			MOBA			MODA			NAGA-II		
	O ₁	O ₂	T	O _{A1}	O _{A2}	T _A	O _{A1}	O _{A2}	T _A	O _{A1}	O _{A2}	T _A	O _{A1}	O _{A2}	T _A
Gap	O ₂	O ₁		Gap	O ₂	O ₁	Gap	O ₂	O ₁	Gap	O ₂	O ₁	Gap	O ₂	O ₁
۱۹	۷۱۹/۱۵	۸۷/۶	۱۷۲۸۰۰	۷۲۳/۵	۸۸/۲	۱۰۳۲	۰/۶	۰/۶۸	۷۲۱/۲	۰/۲۹	۱۰۸۳	۸۸	۰/۴۶	۷۱۸/۳۵	۸۷/۸۴
۲۰	۷۹۴/۶	۹۰/۹۵	۱۷۲۸۰۰	۷۹۸/۶	۹۱/۳۴	۱۲۹۴	۰/۵	۰/۴۳	۷۹۵/۵	۰/۱۱	۱۲۹۹	۹۱/۲۲	۰/۳	۷۹۳/۳۹	۹۱/۱
۲۱	۸۵۷/۱	۹۴/۱۲۵	۱۷۲۸۰۰	۸۵۸/۱	۹۴/۴	۱۵۵۴	۰/۱۲	۰/۲۹	۸۵۷/۴۷	۰/۰۴	۱۴۷۵	۹۴/۳	۰/۱۹	۸۵۳/۲	۹۴/۰۸
۲۲	۹۴۳	۱۰۱/۶۷	۱۷۲۸۰۰	۹۴۲/۲	۱۰۱/۶۸	۱۶۲۰	۰/۰۸	۰/۰۱	۹۴۱/۵۳	۰/۱۶	۱۶۵۲	۱۰۱/۴۹	۰/۱۸	۹۳۸	۱۰۱/۳
متوسط	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

O_i: مقدار تابع هدف i-ام، O_{Ai}: متوسط مقدار تابع هدف i-ام در ۱۰ بار اجرا (سه رقم سمت راست ارقام حذف شده است)

T: زمان محاسبه جواب بر حسب ثانیه، T_A: متوسط زمان اجرای الگوریتم در ۱۰ بار اجرا بر حسب ثانیه

Gap: انحراف مقدار توابع هدف محاسبه شده از روش‌های فراابتکاری نسبت به بهترین جواب بر حسب درصد

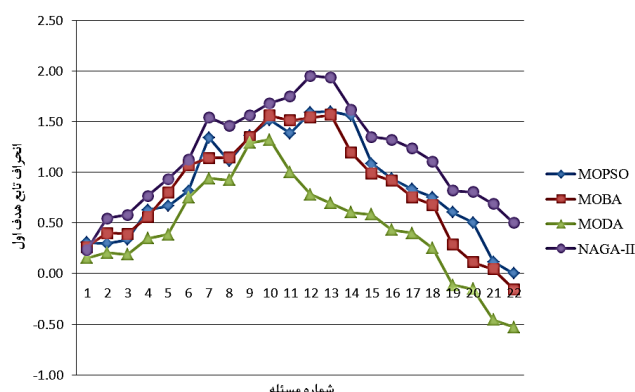
محدودیت روش MODA عملکرد بهتر آن در محاسبه جواب بهینه است.

در تابع هدف دوم روند نزولی بودن انحراف متفاوت بوده و از مسئله ۱۴ به بعد رخ داده است. اما در کل درصد انحراف نسبت به تابع درصد انحراف تابع هدف اول کم تر است. همچنین مشابه تابع هدف اول کمینه بودن درصد انحراف روش MODA نسبت به روش E-محدودیت در مقایسه با سایر روش ها از مسئله ۷ به بعد مشهود است.

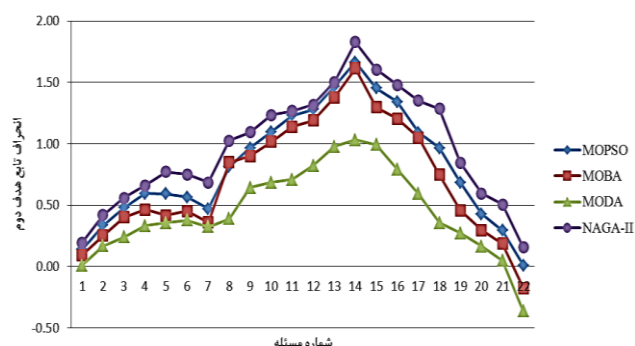
در نتیجه درصد انحراف مقدار توابع هدف محاسبه شده از روش MODA نسبت به روش E-محدودیت در مقایسه با سایر روش ها کم تر است. این انحراف در روش MODA برای تابع هدف اول حداکثر برابر ۱/۳۲٪ و به طور متوسط برابر ۰/۴۶٪ و برای تابع هدف دوم حداکثر برابر ۱/۰۳٪ و به طور متوسط برابر ۰/۴۵٪ است.

بر اساس نتایج جدول ۶، مقایسه درصد انحراف مقدار توابع هدف تمامی روش های فراابتکاری مورد استفاده نسبت به روش E-محدودیت در شکل ۵ نشان داده شده است.

این مقایسه نشان می دهد که انحراف در مسائل با سایز کوچک تر برای هر دو تابع هدف ناچیز است. در تابع هدف اول با افزایش سایز مسئله تا مسئله ۱۰ جواب های MODA به جواب های روش E-محدودیت نزدیک تر و جواب های روش NSGA-II از آن دور تر است. در حالی که عملکرد روش های MOPSO و MOBA به هم دیگر نزدیک بوده، از روند خاصی پیروی نکرده و حد واسط دو روش فوق است. از مسئله ۱۰ به بعد، انحراف جواب های روش MODA نسبت به روش E-محدودیت روند نزولی داشته و تمایزی مشخصی نسبت به سایر روش ها دارد. علت در مسائل با سایز بزرگ است و علت تمایز مشخص نزولی بودن این روند ارائه جواب های بهینه محلی برای روش E-



الف- انحراف تابع هدف اول



ب- انحراف تابع هدف دوم

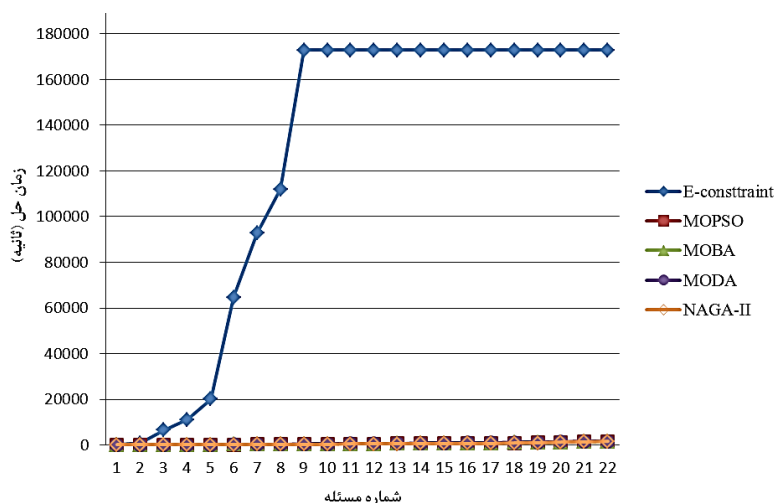
شکل ۵. مقایسه انحراف مقدار توابع هدف محاسبه شده از روش های فراابتکاری نسبت به روش E-محدودیت

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

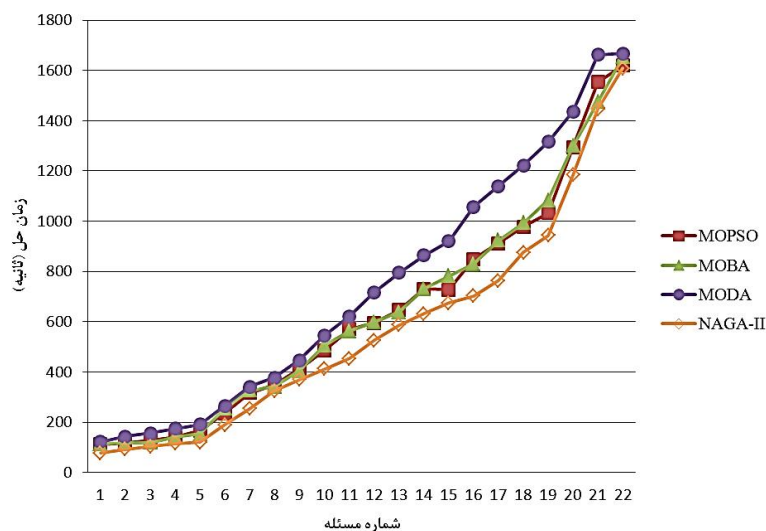
ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

از سایر روش‌ها و حداکثر برابر ۱/۳۲٪ است. بنابراین با توجه به اختلاف بسیار بالا در زمان حل MODA با روش E-محدودیت در مقابل انحراف ناچیز در تابع هدف محاسبه شده اعتبار این روش برای حل مدل پیشنهادی مورد تأیید است.

تحلیل نتایج از نظر زمان حل (شکل ۶)، تفاوت واضح بین زمان حل روش E-محدودیت و سایر روش‌های فراابتکاری را نشان می‌دهد در حالی که میزان انحراف مقادیر توابع هدف محاسبه شده توسط کلیه روش‌های فراابتکاری با روش E-محدودیت حداکثر ۱/۹۵٪ است. این انحراف برای روش MODA کمتر



الف- مقایسه زمان حل الگوریتم‌های فراابتکاری با E-محدودیت



ب- مقایسه زمان حل الگوریتم‌های فراابتکاری

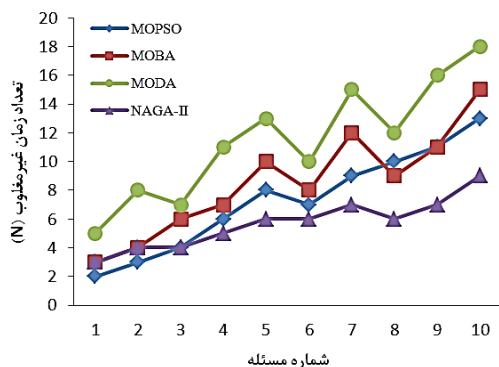
شکل ۶. مقایسه زمان حل مسائل استاندارد

باشد. بنابراین برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم-های فراابتکاری چندهدفه از سه شاخص: (۱) تعداد جواب‌های غیرمغلوب^{۳۳} (N)، (۲) کیفیت جواب‌ها (Q) و (۳) فاصله جواب-های غیرمغلوب از میانگین جواب‌ها (S) (Kahfi and

۲-۲-۶ تحلیل نتایج مطالعه موردی

بررسی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه از عملکرد الگوریتم‌های تک‌هدفه بسیار پیچیده‌تر است و یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارائه شده کافی

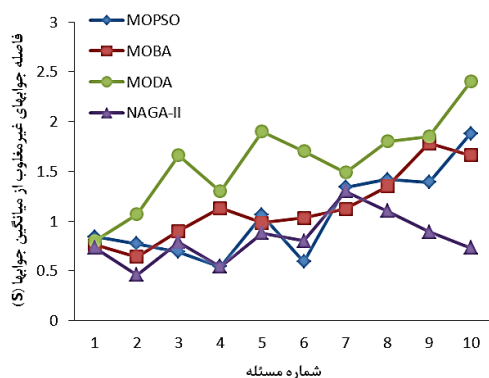
صورت MODA, MOBA, MOPSO و NSGA-II است. البته در مسائل سایز کوچکتر سه الگوریتم MOBA, MOPSO و NSGA-II از این روند پیروی نمی کنند.



شکل ۸. تعداد جواب غیر مغلوب الگوریتم‌ها برای مطالعه

موردی

نتایج جدول ۶ و شکل ۹ نشان می دهد از نظر شاخص فاصله جواب های غیر مغلوب از میانگین جواب ها (S)، الگوریتم MODA با اینکه در مسائل با سایزهای مختلفی روند ثابتی را دنبال نمی کند در کل عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها دارد. اما این رابطه در بین سایر الگوریتم ها در مسائل مختلف روند ثابتی ندارد.



شکل ۹. فاصله جواب های غیر مغلوب از میانگین جواب ها

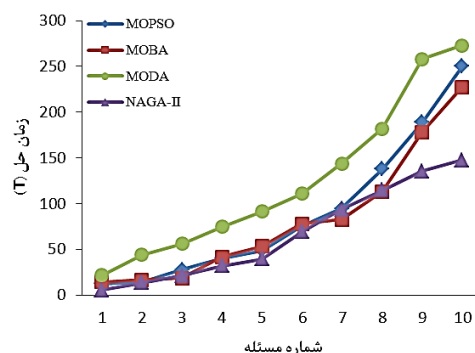
جهت نمایش جواب های غیر مغلوب در مقایسه با جواب های مغلوب، به عنوان نمونه نتایج حاصل از حل مسئله ۱۰ در ۵۰۰۰ تکرار برای ۴ الگوریتم در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می دهد که الگوریتم NSGA-II نسبت به سایر الگوریتم ها با جستجو در فضای محدودتر و متراکم تر، مرز پارتو ضعیف تری را محاسبه کرده است در مقابل الگوریتم MODA با فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

(Tavakkoli-Moghaddam, 2015) استفاده می شود. نتایج حل مسائل مطالعه با روش های فرا ابتکاری بعد از ۵۰۰۰ تکرار در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج حل ۱۰ مسئله با ۴ الگوریتم برای ۵۰۰۰ تکرار

شماره مسئله	MOPSO				MOBA				MODA				NAGA-II			
	S	N	T		S	N	T		S	N	T		S	N	T	
۱	۰/۷۳۳	۵/۵	۰/۸	۵	۲۱/۷	۰/۷۶	۳	۱۴/۳	۰/۸۴	۲	۱۲/۳	۱	۰/۷۳۳	۵/۵	۰/۸	۵
۲	۰/۴۶۴	۱۳/۲	۱/۰۷	۸	۴۴	۰/۶۴	۴	۱۶/۷۳	۰/۷۷	۳	۱۳/۶	۲	۰/۴۶۴	۱۳/۲	۱/۰۷	۸
۳	۰/۷۹۴	۲۱	۱/۶۵	۷	۵۵/۹	۰/۹	۶	۱۸/۳	۰/۶۹	۴	۲۷/۵	۳	۰/۷۹۴	۲۱	۱/۶۵	۷
۴	۰/۵۴۵	۳۲	۱/۳	۱۱	۷۴/۷	۱/۱۳	۷	۴۱/۶	۰/۵۴	۶	۴۰	۴	۰/۵۴۵	۳۲	۱/۳	۱۱
۵	۰/۸۸۶	۳۹/۸	۱/۹	۱۳	۹۱/۵	۰/۹۸	۱۰	۵۳/۳	۱/۰۶	۸	۴۸/۳	۵	۰/۸۸۶	۳۹/۸	۱/۹	۱۳
۶	۰/۸	۶	۶۹	۱/۷	۱۰	۱۱۱	۱/۰۳	۸	۷۷/۹	۰/۵۹	۷	۷۵/۲	۰/۸	۶	۶۹	۱/۷
۷	۱/۳	۷	۹۳/۸	۱/۴۹	۱۵	۱۴۴	۱/۱۲	۱۲	۸۲/۶	۱/۳۴	۹	۹۴/۶	۱/۳	۷	۹۳/۸	۱/۴۹
۸	۱/۱	۶	۱۱۴/۴	۱/۸	۱۰	۱۸۲	۱/۳۵	۹	۱۱۳	۱/۴۲	۱۰	۱۳۸	۱/۱	۶	۱۱۴/۴	۱/۸
۹	۰/۸۹۷	۱۳۵/۳	۱/۸۵	۱۶	۲۵۸	۱/۷۸	۱۱	۱۷۸/۴	۱/۳۹	۱۱	۱۸۹	۹	۰/۸۹۷	۱۳۵/۳	۱/۸۵	۱۶
۱۰	۰/۷۳۹	۱۴۷/۶	۲/۴	۱۸	۲۷۳	۱/۶۶	۱۵	۲۲۷/۵	۱/۸۸	۱۳	۲۵۰	۱۰	۰/۷۳۹	۱۴۷/۶	۲/۴	۱۸
متوسط	۰/۹۹۶	۶۷/۵	۱/۵۶	۱۱	۱۲۸	۱/۲	۸/۵	۸۲/۴	۱/۰۵	۷	۸۹/۳	متوسط	۰/۹۹۶	۶۷/۵	۱/۵۶	۱۱

نتایج جدول ۶ و شکل ۷ نشان می دهد که در کل میانگین زمان حل الگوریتم NSGA-II برای حل ۱۰ مسئله از سه الگوریتم دیگر کمتر است. همچنین میانگین زمان حل الگوریتم های MOPSO و MOBA برای حل این مسائل نزدیک به هم و از زمان حل MODA کمتر است.

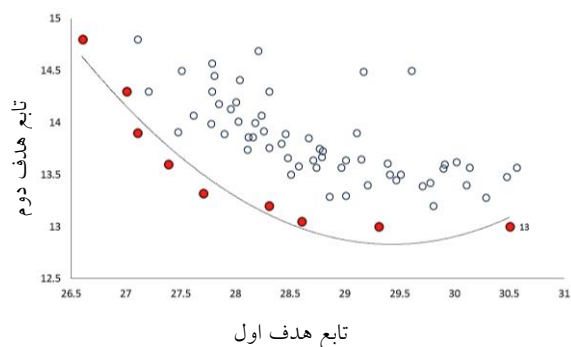


شکل ۷. زمان حل ۱۰ مسئله مطالع موردی با استفاده از الگوریتم ها

نتایج جدول ۶ و شکل ۸ نشان می دهد که ترتیب نزولی تعداد جواب های غیر مغلوب (N) به دست آمده از الگوریتم ها به

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

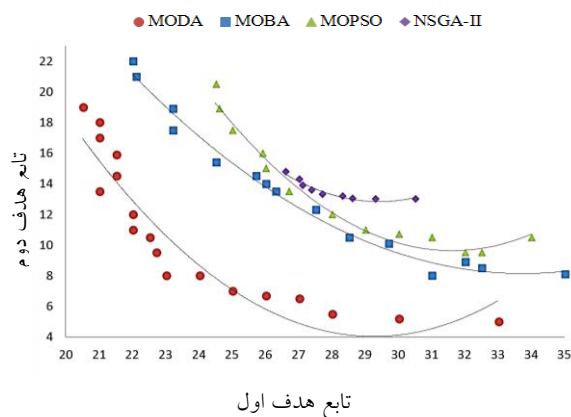


د- نتایج NSGA-II

● مجموعه جوابهای مغلوب (مرز پارتو) ○ مجموعه جوابهای غیرمغلوب

شکل ۱۰. مجموعه جواب الگوریتم‌ها برای مسئله ۱۰

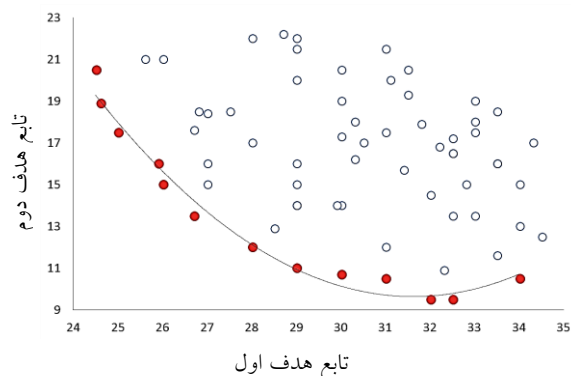
از نظر شاخص کیفیت (Q) مرز پارتوی محاسبه شده توسط الگوریتم MODA در تمام مسائل نمونه بهتر از سه الگوریتم دیگر است. به طور نمونه در شکل ۱۱ مرز پارتوی محاسبه شده توسط ۴ الگوریتم برای مسئله ۹ با یکدیگر مقایسه شده است. مرز محاسبه شده توسط الگوریتم MODA هم از نظر تعداد و هم از نظر کیفیت تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ۳ الگوریتم دیگر دارد.



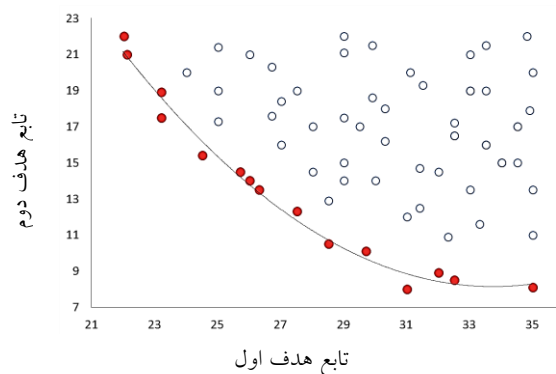
شکل ۱۱. مقایسه مرز پارتو محاسبه شده با الگوریتم‌ها برای مسئله ۱۰

با تحلیل‌های انجام شده عملکرد بهتر الگوریتم MODA از نظر شاخص‌های تعداد جواب‌های غیرمغلوب روی مرز پارتو، فاصله جواب‌های غیرمغلوب از میانگین جواب‌ها و کیفیت جواب‌ها برای حل مدل LARP پیشنهادی تأیید شد. اما با توجه به اینکه مدل پیشنهادی برای مطالعه موردی تعیین خزانه‌های یک بانک استفاده شده است، ارائه مرز پارتو برای مدیریت ارشد بانک مطلوبیت ندارد.

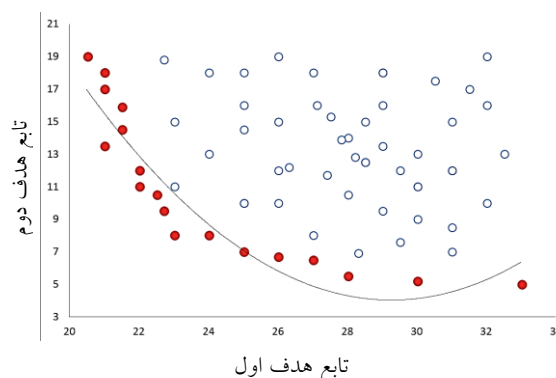
جستجوی فضای گسترده‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها، مرز پارتوی بهتری را محاسبه کرده است.



الف- نتایج MOPSO

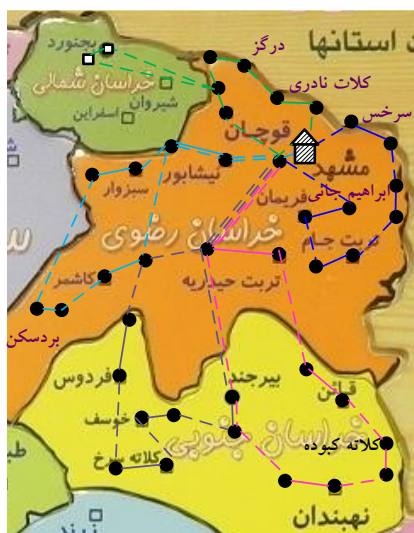


ب- نتایج MOBA

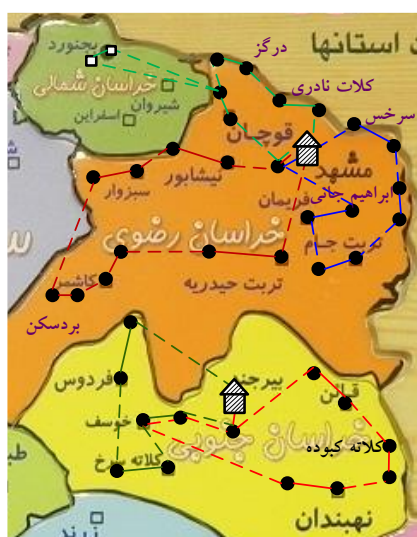


ج- نتایج MODA

و بالاترین ریسک را دارد و مقدار ریسک آن در مقابل هزینه از نظر خبرگان مطلوب نیست. جواب ۲ (شکل ۱۳-ب) نسبت به جواب ۳ (شکل ۱۳-ج) با اینکه ریسک بالاتری دارد به دلیل اینکه مسیرهای درون استانی را انتخاب کرده است، مطلوب تر است.



الف- جواب ۱ مرز پارتو



ب- جواب ۲ مرز پارتو

انتخاب بهترین و کارآمدترین جواب نهایی به اولویت‌های تصمیم‌گیرنده بستگی دارد. بنابراین مرزهای پارتو محاسبه شده برای هر یک از ۱۰ مسئله به خبرگان بانک ارائه شده است و آن‌ها بر اساس مجموعه‌ای از قواعد یک جواب را از بین جواب‌های پارتو انتخاب کرده‌اند. برخی از این قواعد عبارتند از:

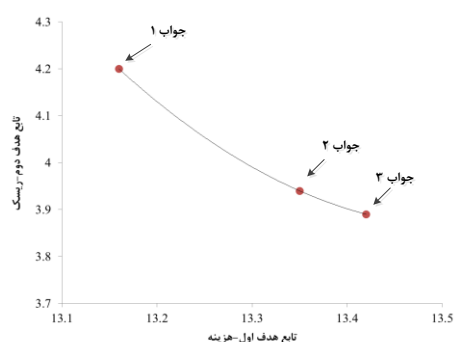
➤ بهینه بودن مقدار تابع هدف ریسک نسبت به تابع هدف هزینه مطلوب تر است.

➤ در بین جواب‌های پارتو جوابی که در منجر به انتخاب مسیرهای درون استانی شود از مطلوبیت بیشتری برخوردار است.

➤ خزانه‌های انتخاب شده از نظر امکانات امنیتی از خزانه‌های انتخاب نشده ارجحیت داشته باشد.

بنابراین ۱۳ استان خراسان رضوی، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، کرمان، فارس، اصفهان، یزد، خوزستان، همدان، آذربایجان شرقی، سمنان، قزوین و زنجان از بین ۱۸ کاندید برای ارتباط با خزانه مرکزی در تهران، شعب تحت پوشش و خزانه‌های غیرکандید انتخاب شده‌اند.

به منظور تشریح روند انتخاب یک جواب از بین جواب‌های مرز پارتو، در شکل ۱۲ مرز پارتوی مسئله ساده‌شده خوشه ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. مرز پارتوی مسئله ساده‌شده خوشه ۱

از بین ۳ جواب پارتویی که جزئیات آن در شکل ۱۳ بر روی نقشه نمایش داده شده است، جواب ۲ با توجه به قواعد مطرح شده از نظر خبرگان مطلوبیت بیشتری دارد. زیرا جواب ۱ (شکل ۱۳-الف) با یک خزانه منتخب در استان خراسان رضوی کم‌ترین هزینه

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

بر اساس قواعد موردنظر خبرگان ۱۳ خزانه منتخب از بین ۱۸ کاندید انتخاب شد.

مدل پیشنهادی برای حمل کالاهای ارزشمند طراحی شده است بنابراین با تغییر تابع هدف و محدودیت‌های ریسک می‌توان آن را برای حوزه‌های دیگر نیز به کار برد. همچنین بررسی مدل در شرایط عدم قطعیت، به کارگیری روش‌های حل دقیق مانند روش شاخه و کران مسائلی است که در تحقیقات آتی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

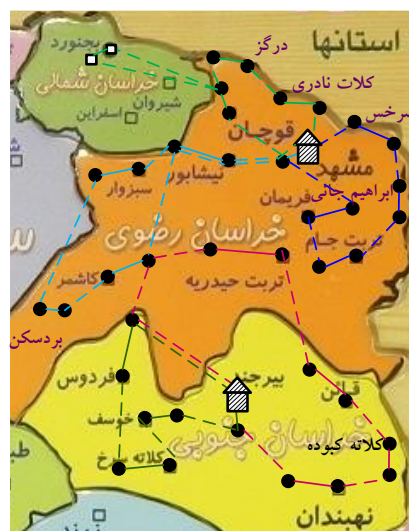
۸. پی‌نوشت‌ها

1. Node Routing Problem
2. Traveling Salesman Problem (TSP)
3. Vehicle Routing Problem (VRP)
4. Arc Routing Problem (ARP)
5. Chinese Postman Problem (CPP)
6. Rural Postman Problem (RPP)
7. Capacitated ARP (CARP)
8. Location ARP (LARP)
9. Edge
10. Deadheading Arc
11. Dragonfly Algorithm
12. Bath Algorithm
13. Particle Swarm Optimization
14. Location-Allocation Problem (LAP)
15. Mobile mapping van problem
16. Prize-collecting

۱۷. بر اساس گزارش‌های بانک مرکزی، میزان اسکناس و مسکوک در دست اشخاص در سال گذشته رشد ۵/۸ درصدی داشته است.

۱۸. تبادلات علاوه بر اینکه شامل وجوه نقد (پول و ایران چک) است، می‌تواند شامل اوراق مشارکت، اوراق بهادار و دسته چک نیز باشد.

19. Fitness Function
20. Velocity
21. Personal Best
22. Global Best
23. Separation
24. Alignment
25. Cohesion



ج- جواب ۳ مرز پارتو

کمان دارای تقاضا ——— کمان بدون تقاضا
 انبار استقرار یافته □ خزانه اصلی ● شعب شروع و پایان هر شهر استان

شکل ۱۳. جواب‌های مرز پارتو برای مسئله ساده‌شده خوشه ۱

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

فرآیند تأمین وجوه نقد برای شعب یک بانک در سطح کل کشور به دلیل مسائل امنیتی حمل و نقل پول، مسائل مرتبط با مدیریت بهینه نقدینگی، پراکندگی بالای شعب در کشور یک مسئله کلیدی است. در این مقاله مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مختلط دوهدفه چنددوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالاهای ارزشمند برای مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی-مسیریابی کمان‌محور خزانه‌های یک بانک مورد استفاده شده است. اعتبار مدل و روش‌های فراابتکاری ارائه شده برای ۵ مسئله از مطالعه موردی با روش E-محدودیت، بررسی و تأیید شده است.

برای حل مدل مسائل مطالعه موردی از الگوریتم‌های MOPSO، MODA، و NSGA-II استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم MODA از نظر شاخص‌های تعداد جواب‌های غیرمغلوب روی مرز پارتو، فاصله جواب‌های غیرمغلوب از میانگین جواب‌ها و کیفیت جواب‌ها بهتر از سایر الگوریتم‌ها و جهت حل مدل LARP پیشنهاد می‌شود. در نهایت

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

های حل، کاربردها و شکاف های تحقیقاتی"، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، شماره ۵۱، ص. ۲۲۳-۲۵۰.

– Albareda-Sambola, M. (2015). "Location-routing and location-arc routing." in, Location science (Springer).

– Amini, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., and Ebrahimnejad, S. (2017). "Scenario-Based Location Arc Routing Problems: Introducing Mathematical Models." In International Conference on Management Science and Engineering Management, 511-521. Springer.

– Black, D., Eglese, R., and Wøhlk, S., (2013), "The time-dependent prize-collecting arc routing problem", Computers & Operations Research, Vol. 40, No. 2, pp. 526-535.

– Çetinkaya, C., Gökçen, H., and Karaoglan, İ., (2018), "The location routing problem with arc time windows for terror regions: a mixed integer formulation", Journal of Industrial and Production Engineering, No., pp. 1-10.

– Çetinkaya, C., Karaoglan, I., and Gökçen, H., (2013), "Two-stage vehicle routing problem with arc time windows: A mixed integer programming formulation and a heuristic approach", European Journal of Operational Research, Vol. 230, No. 3, pp. 539-550.

– Chankong, V., and Haimes, Y.Y. (2008). Multiobjective decision making: theory and methodology (Courier Dover Publications).

– Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T., (2002), "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197.

– DoT, U., (1996), "Highway routing of hazardous materials guidelines for applying

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) بهار ۱۴۰۵

26. Attraction
27. Distraction
28. Hyper-sphere
29. Full Factorial DOE
30. Fractional
31. Response Surface Method (RSM)
32. Non-dominated

۹. مراجع

– جلیلی بال، ا.، توکلی مقدم، ر. و جوانشیر، ح.، (۱۳۹۶)، "توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی"، مهندسی حمل و نقل، سال ۸، شماره ۳، ص. ۳۴۳-۳۵۴.

– علینقیان، م.، صباغ، م. و بابایی، ع.، (۱۳۹۵)، "مسأله مسیریابی کمان ظرفیتدار با تقاضای فازی به همراه مطالعه موردی"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال ۷، شماره ۲، ص. ۲۷۷-۲۹۶.

– صنیع آبادی، م. و جبل عاملیان، ز.، (۱۳۹۴)، "الگوریتم های تکاملی و محاسبات زیستی"، انتشارات نیاز دانش، چاپ اول.

– کهنی، ع.، برزین پور، ف.، توکلی مقدم، ر.، (۱۳۹۱)، "توسعه الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات جهت حل مدل یکپارچه برنامه ریزی تولید و سیستم تولید سلولی پویا"، نشریه مهندسی صنایع، شماره ۴۶، ص. ۷۷-۸۹.

– کهنی، ع. و توکلی مقدم، ر.، (۱۳۹۳)، "حل مدل مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره مبتنی بر کاهش ریسک با استفاده از یک الگوریتم خفاش چندهدفه"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، شماره ۶، ص. ۵۰۷-۵۲۲.

– کهنی، ع.، سید حسینی، س.م. و توکلی مقدم، ر.، (۱۳۹۶)، "مسائل مکان یابی-مسیریابی: مروری بر مفاهیم، مدل ها، روش

- Operations Research, Vol. 39, No. 10, pp. 2380-2394.
- Lacomme, P., Prins, C., and Ramdane-Cherif, W., (2004), "Competitive memetic algorithms for arc routing problems", *Annals of Operations Research*, Vol. 131, No. 1-4, pp. 159-185.
- Levy, L., and Bodin, L., (1989), "The arc oriented location routing problem", *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 74-94.
- Liu, T., Jiang, Z., Chen, F., Liu, R., and Liu, S. (2008). "Combined location-arc routing problems: a survey and suggestions for future research." In *Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2008. IEEE/SOLI 2008. IEEE International Conference on, 2336-2341. IEEE.
- Lopes, R.B., Plastria, F., Ferreira, C., and Santos, B.S., (2014), "Location-arc routing problem: Heuristic approaches and test instances", *Computers & Operations Research*, Vol. 43, No., pp. 309-317.
- Lystlund, L., and Wøhlk, S. (2012). "The service-time restricted capacitated arc routing problem." In.
- Mirjalili, S., (2016), "Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems", *Neural Computing and Applications*, Vol. 27, No. 4, pp. 1053-1073.
- Raquel, C.R., and Naval Jr, P.C. (2005). "An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization." In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 257-264. ACM.
- Riquelme-Rodríguez, J.-P., Gamache, M., and Langevin, A., (2016), "Location arc routing criteria", Washington DC: National Highway Institute, No.
- Doulabi, S.H.H., and Seifi, A., (2013), "Lower and upper bounds for location-arc routing problems with vehicle capacity constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 224, No. 1, pp. 189-208.
- Essink, E., and Wagelmans, A., (2015), "A comparison of 3 metaheuristics for the location-arc routing problem", No.
- Ghiani, G., Improta, G., and Laporte, G., (2001), "The capacitated arc routing problem with intermediate facilities", *Networks*, Vol. 37, No. 3, pp. 134-143.
- Ghiani, G., and Laporte, G., (2001), "Location-arc routing problems", *Opsearch*, Vol. 38, No. 2, pp. 151-159.
- Golden, B.L., and Wong, R.T., (1981), "Capacitated arc routing problems", *Networks*, Vol. 11, No. 3, pp. 305-315.
- <http://www.alimirjalili.com>
- <http://www.uv.es/belengue/mcarp/index.html>
- Huber, S. (2016). "Strategic decision support for the bi-objective location-arc routing problem." In *Proceedings of the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 1407-1416. IEEE Computer Society.
- Kennedy, J. (1995). "Particle swarm optimization." In *Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks*, (Perth, Australia), Nov. 27-Dec., 1942-1948.
- Kirlik, G., and Sipahioglu, A., (2012), "Capacitated arc routing problem with deadheading demands", *Computers &*

- Yang, X.-S. (2010). "A new metaheuristic bat-inspired algorithm." in, Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010) (Springer).
- Talarico, Luca, Sörensen, Kenneth, Springael, and Johan. (2015), "Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem", European Journal of Operational Research, Vol. 244, No. 2, pp. 457-470.
- Talarico, Luca, Sörensen, Kenneth, Springael, and Johan. (2017), "A biobjective decision model to increase security and reduce travel costs in the cash-in-transit sector", International Transactions in Operational Research, Vol. 24, No. 1-2, pp. 59-76.
- Talarico, L., Sörensen, K., and Springael, J. (2013). "The risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem with time window constraints." In 14th Workshop of the EURO Working Group "EU/ME: the Metaheuristics Community," Hamburg, Germany, 104-109.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Amini, A., and Ebrahimnejad, S. (2018). "A new mathematical model for a multi-product location-arc routing problem." In Optimization and Applications (ICOA), 2018 4th International Conference on, 1-5. IEEE.
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., and Sörensen, K., (2010), "Solving the mobile mapping van problem: A hybrid metaheuristic for capacitated arc routing with soft time windows", Computers & operations research, Vol. 37, No. 11, pp. 1870-1876.
- Vincent, F.Y., and Lin, S.-W., (2015), "Iterated greedy heuristic for the time-dependent prize-collecting arc routing problem", Computers & Industrial Engineering, Vol. 90, No., pp. 54-66.
- www.mathworks.com/matlabcentral

ارائه و حل مدل دوهدفه مکان‌یابی- مسیریابی کمان‌محور چند دوره‌ای با پنجره زمانی مبتنی بر کاهش ریسک سرقت کالای

ارزشمند (مطالعه موردی: خزانه بانک)

عاطفه کهنی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۸۹ را از دانشگاه پیام نور اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی حمل و نقل بوده و در حال حاضر دانشجوی دکترای مهندسی صنایع در دانشگاه پیام نور است.



سیدمحمد سیدحسینی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۵۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۵۸ را از دانشگاه اوکلاه‌های آمریکا اخذ نمود. در سال ۱۳۶۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع - برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه اوکلاه‌های آمریکا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل و نقل، الگوریتم‌های فراابتکاری، و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



رضا توکلی‌مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۷۲ را از دانشگاه ملبورن اخذ نمود. در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوئین برن گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی حمل و نقل، روش‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیباتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.

