حل مدل مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره مبتنی بر کاهش ریسک با استفاده از یک الگوریتم خفاش چندهدفه

عاطفه کهفی، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

E-mail:tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۲۵

چکیده:

یکی از فرآیندهای محوری در سیستم بانکداری، انتقال پول از انبار (خزانه) به مشتریان (شعب) و برگشت آن به خزانه،در بازه‌های زمانی مشخص و محدود است. عوامل متعددی مانند تعداد و محل خزانه‌ها، نحوه تخصیص شعب به خزانه‌ها، مسایل امنیتی، ناوگان حمل، مسیرهای انتقال و پراکندگی جغرافیایی شعب در انجام بهینه فرآیند انتقال پول مؤثر است. اما کلیدی‌ترین پارامتر در انجام موفق این فرآیند انتخاب مسیر مناسب به نحوی است که بتوان فرآیند پول‌رسانی را در کم‌ترین زمان با کم‌ترین ریسک به شرط اتمام فرآیند پول‌رسانی در بازه زمانی مشخص انجام داد.در این مقاله جهت حل این مسأله، یک مدل مسیریابی چندانباره دوهدفه با در نظر گرفتن نوع کالای حمل شده، طراحی شده است.برای محاسبه ریسک مسیر از شاخصهایی مانند نوع خیابان، نوع تردد مجاز، عرض خیابان و متوسط ترافیک خیابان که قبل از حل مسأله قابل سنجش است، استفاده می‌شود و شاخص‌هایی همچون ترافیک لحظه‌ای یا حوادث پیش‌بینی نشده، نادیده گرفته می‌شود. با توجه به NP-hard بودن مسایل مسیریابی جهت حل مدل، از یک الگوریتم خفاش چند هدفه برای مسایل واقعی یک بانک استفاده شده است. به دلیل ماهیت پیوسته الگوریتم، نحوه تولید و رمزگشایی، جواب جدیدی طراحی شده است که منجر به کاهش زمان حل نیز می‌شود. نتایج حل نیز با الگوریتم NSGA-II مقایسه شده است. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با شاخص‌های چند هدفه،کارآیی الگوریتم خفاش را برای مسأله موردنظر نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره، الگوریتم خفاش چندهدفه، الگوریتم NSGA-II

۱.مقدمه

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه[۱] (VRP) قلب سازمان‌دهی توزیع است. هزاران شرکت که در امور تحویل، جمع‌آوری و حمل‌ونقل اشیاء و انسانها فعالیت دارند، هر روزه با این مسأله روبرو می‌شوند. از آنجا که سازمانها دارای شرایط متفاوتی هستند، اهداف و قیود این مسأله بسیار متنوع است. در بانک‌ها یکی از فرآیندهای محوری انجام مؤثر فرآیند پول‌رسانی از انبار (خزانه) به مشتریان (شعب) است. فرآیند پول‌رسانی به دلایل زیر دارای پیچیدگی زیادی است:

– شعب بانک‌های بزرگ در کلان شهرها دارای پراکندگی بسیاری هستند.

با توجه به آنکه پول، کالایی ارزشمند است، در نظر گرفتن مسایل امنیتی دارای اهمیت زیادی است.

– ضرورت اتمام عملیات پول‌رسانی در بازه زمانی معین جهت انجام بموقع عملیات بانکی پیچیدگی مسأله را افزایش می‌دهد.

ساده‌ترین حالت از مسأله مسیریابی مسأله فروشنده دوره‌گرد[۲] (TSP) است. (شکل ۱–الف). در حالی که مسأله VRP به دنبال یافتن مسیرهای بسته‌ای برای هرکدام از وسایل نقلیه است که از یک انبار شروع و به آن ختم شود (شکل –۱ب). در دنیای واقعی در مسایل VRP، قیدهایی ظاهر می‌شوند که رعایت آنها به شدت در انتخاب جواب تأثیرگذار است. بعضی از انواع VRP با توجه به نوع قید مسأله عبارتند از [Qasiri &Ghanadpour, 2007]:

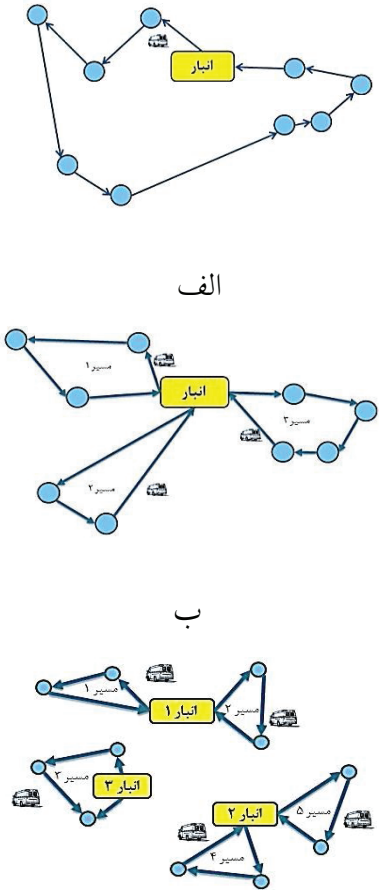
– CVRP[۳]: دارای محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه و تقاضای تک محصولی[۴] برای مشتریان است.

– SDVRP[۵]: هر مشتری می‌تواند توسط وسایل نقلیه متفاوت سرویس‌دهی شود.

– SVRP[۶]: یک یا چند جزء از مسأله (حضور مشتریان، تقاضای آنها، زمان سرویس‌دهی) احتمالی است.

– VRPTW[۷]: یعنی مشتری باید در محدوده زمانی مشخصی سرویس‌دهی شود که این مسأله VRP همراه با پنجره زمانی نرم یا سخت، [Tavakkoli-Moghaddam et al. 2006] بسته به شرایط مسأله است.

– MDVRP[۸]: در این مسأله چندین انبار برای سرویس به مشتریان استفاده می‌شود به نحوی که اگر مشتریان در اطراف انبارها دسته‌بندی شده باشند آنگاه مسأله را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از VRPهای مستقل حل کرد. ولی اگر مشتریان و انبارها به صورت درهم پراکنده شده باشند، باید از مسأله MD-VRP برای حل استفاده کرد به این صورت که ابتدا مشتریان را به انبارها اختصاص داد و سپس با توجه به تعداد محدودی وسیله نقلیه که در انبارها مستقر هستند، مسأله حل می‌شود.



شکل ۱. الف) مسأله TSP **ب) مسأله** VRP **ج) مسأله** MDVRP

اما در بانک‌های بزرگ به دلیل گستردگی شعب در کلان شهرها، پول‌رسانی از چند خزانه به تعدادی شعبه انجام می‌شود در حالی که:

– هر کدام از خزانه‌ها تعدادی ماشین و امکانات مستقل در اختیار

دارند.

– خزانه‌ها و ماشین‌ها با توجه به کم حجم بودن پول از نظر ظرفیت محدودیتی ندارند و محدودیت اصلی در تحویل و جمع‌آوری پول در بازه زمانی معین (به طور معمول تحویل پول باید قبل از ساعت ۱۰:۳۰ و جمع‌آوری آن از ۱۲:۳۰ تا ۳ به اتمام برسد) است.

– هر روز تعدادی از شعب تقاضای درخواست پول و تعدادی (نه لزوماً همان شعب) تقاضای تحویل مازاد پول دارند. بنابراین حل مسأله VRP برای بانک‌ها به صورت روزانه و در دو نوبت صبح و عصر لازم است.

– در زمان انتخاب مسیر بهینه شاخص کمینه بودن ریسک مسیر از کوتاه‌تر بودن آن بسیار مهم‌تر است.

بنابراین در این مقاله یک مدل مسیریابی چندانباره با دو هدف کمینه‌سازی زمان حمل و نقل و ریسک به شرط اتمام پول‌رسانی به شعب در زمان معین طراحی شده است. لازم به ذکر است که در این کار جهت محاسبه ریسک مسیر بر طبق نظر خبرگان در این زمینه، از شاخص‌های قابل سنجش مانند نوع خیابان، نوع تردد مجاز، عرض خیابان، متوسط ترافیک خیابان استفاده می‌شود و شاخص‌هایی مانند ترافیک لحظه‌ای یا حوادث پیش‌بینی نشده نادیده گرفته می‌شود. با توجه به NP-hard بودن مسایل مسیریابی جهت حل مدل پیشنهادی از یک الگوریتم خفاش چندهدفه[9] (MOBA) استفاده و نتایج آن با الگوریتم ژنتیک مرتب شده غیرمغلوب (NSGA-II)[10] مقایسه شده است. به دلیل ماهیت پیوسته الگوریتم، نحوه تولید و رمزگشایی جواب جدیدی طراحی شده که منجر به کاهش زمان حل نیز می‌شود.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ تاریخچه مهم‌ترین کارهای مرتبط و در بخش ۳ جزئیات مدل ریاضی پیشنهادی، ارایه می‌شود. در بخش ۴ الگوریتم خفاش، نحوه نمایش و رمزگشایی جواب در این کار معرفی می‌شود. مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای مسایل واقعی با الگوریتم NSGA-II در بخش ۵ ارایه می‌شود. نتیجه‌گیری نهایی در بخش ۶ مطرح می‌شود.

۲. مرور ادبیات

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه که یک مسأله بهینه‌سازی ترکیبی است، ابتدا در مقاله‌ای توسط دنتزیگ و رامسر [Dantzig& Ram-ser,1959] معرفی شد که تاکنون به صورت وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات متعددی بر روی انواع مدل‌های VRP انجام گرفته است. با توجه به ماهیت چندانباره بودن این تحقیق، در اینجا به بررسی مسایل حوزه مسیریابی پرداخته شده است. رفیعی [Rafiee, 2010] نیز یک مسأله مسیریابی تک انباره را با برخی از محدودیت‌های کاربردی که کمتر به آن پرداخته شده بود ارائه کرده و با استفاده یک الگوریتم انبوه ذرات (PSO)[11] آن را حل کرد. سلهی و همکاران [Salhi et. al. 2013] بخشی از تحقیقات ارایه شده در زمینه مسیریابی چندانباره را از سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۲ بررسی و همچنین مدل مسیریابی ناهمگن را ارایه و با استفاده از روش جستجوی همسایگی متغیر (VNS)[12] حل کردند. جعفری و همکاران [Jafari et al.2011] یک مسأله مسیریابی چندانباره را با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به ظرفیت انبار، ظرفیت وسایل نقلیه و طول مسیر هم زمان و با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید[13] (SA) به حل آن پرداختند.

در سال‌های اخیر توجه به مسأله مسیریابی چندهدفه افزایش یافته است. از جمله اهدافی که در این مقالات مورد توجه بوده است، می‌توان به موارد میزان کالای جابجا شده در هر مسیر، تعداد مشتریان موجود در هر مسیر، طول مسیرها و یا زمان عبور از مسیرها اشاره کرد [Alinaqian & Naderipour, 2013]. بریوب و همکاران [Bérubé et. al. 2009] مسأله فروشنده دوره‌گرد را با ارایه روش‌های ابتکاری بهبود یافته در حالت چندهدفه حل کردند. قصیری و قنادپور [Ghoseiri &Ghanadpour, 2008]یک مسأله مسیریابی تک انباره با پنجره زمانی برای لوکوموتیوها با هدف کمینه کردن کل هزینه تخصیص لوکوموتیوها با توجه به هزینه مسافت، زمان، هزینه تأخیرها و انتظارات ارایه و با استفاده از یک GA بهبود یافته و نرم‌افزار Lingo آن را حل کردند.

با توجه به ماهیت چندانباره بودن بسیاری از مسایل، برخی از تحقیق‌های مسایل چندانباره و چندهدفه را مدل‌سازی و حل

کردند.حسن‌پور و همکاران [Hasanpour et al. 2009] یک مدل مسیریابی چندانباره و چندهدفه با در نظر گرفتن احتمال در دسترس بودن مسیر پیشنهاد و با استفاده از روش SA حل کردند. توکلی مقدم و همکاران [Tavakkoli-Moghaddam et al. 2010] یک مدل مسیریابی چندانباره با اهداف کمینه‌سازی هزینه (هزینه ثابت و متغیر انبار، هزینه تحویل) و بیشینه‌سازی تقاضاهایی که به آنها پاسخ داده می‌شود، ارایه کردند.آنها مدل پیشنهادی را با استفاده از الگوریتم جستجوی پراکنده چندهدفه[۱۴] (MOSS) حل کرده و نتایج را با الگوریتم جستجوی ممنوع نخبه[۱۵] (ETS) مقایسه کردند. عیدی و همکاران [Eidi et al.2013] نیز بخشی از تحقیقات مرتبط به حوزه مسیریابی را بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ بررسی نمودند. آنها با تلفیق مفاهیم پنجره‌های زمانی و چند تقاضایی و در نظرگرفتن دو هدف متضاد حداقل کردن هزینه سفر و حداکثرسازی پوشش تقاضا، مدل جدیدی از مسیریابی ارایه کردند. همچنین دو رویکرد مبتنی بر الگوریتم NSGA-II باتنوع بخشی به عملگرجهش، برای حل مدل پیشنهادی طراحی نمودند.ستاک و همکاران [Setak et al. 2013] مسأله مسیریابی چندانباره با امکان بارگیری مجدد وسایل نقلیه از انبارهای میانی را پیشنهاد کرده و به دنبال کمینه‌سازی هزینه کل سفر و هزینه بارگیری‌های مجدد در انبارهای میانی است. مسأله موردنظر با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)[۱۶] و TS حل شده است. باتیستا و همکاران [Batista et al. 2014] یک مدل خطی دوهدفه با اهداف کمینه‌سازی مسافت کل و برقراری بالانس کاری وسایل نقلیه برای یک شرکت حمل و نقل در اسپانیا را ارایه دادند. مقایسه نتایج حل مدل با یک الگوریتم فراابتکاری MOSS و NSGA-II، کارآیی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مروری بر ادبیات موضوع (جدول ۱) نشان می‌دهد که تحقیقات گسترده‌ای بر روی مسأله VRP صورت گرفته است. اما بررسی هم‌زمان حالت چندانباره و چندهدفه بودن مسأله مسیریابی نقلیه با توجه به نوع کالای مبادله‌ای و ریسک حمل در ادبیات تحقیق وجود ندارد.

جدول۱.مهم‌ترین ویژگی‌های تحقیقات شاخص در حوزه مسیریابی

مرجع	تعداد انبار	تابع هدف	محدودیت‌های اصلی	روش حل
[Rafee, 2010]	تک انباره	تک هدفه	ناوگان ناهمگن، سفارشات همراه با تجدید، تحویل، تقسیم تحویل	PSO
[Salhi et. al. 2013]	چندانباره	تک هدفه	ناوگان ناهمگن	VNS
[Jafari et al. 2011]	چندانباره	تک هدفه	ظرفیت انبار، ظرفیت وسیله و طول مسیر	SA
[Bérubé et. al. 2009]	تک انباره	دو هدفه	محدودیتهای مسأله فروشنده دوره گرد	روشهای ابتکاری
[Qasiri & Ghanadpour, 2008]	تک انباره	دو هدفه	پنجره زمانی	Lingo،GA
[Hasanpour et al. 2009]	چندانباره	دو هدفه	ظرفیت وسیله، پنجره زمانی	SA
[Tavakkoli et. al. 2010]	چندانباره	دو هدفه	ظرفیت وسیله، پنجره زمانی، طول مسیر	MOSS, ETS
[Eidi et al.2013]	چندانباره	دو هدفه	چند تقاضایی، پنجره زمانی	NSGA-II
[Setak el al. 2013]	چندانباره	دو هدفه	امکان بارگیری مجدد وسایل نقلیه	GA,TS
[Batista et. al. 2014]	چندانباره	دو هدفه	طول مسیر	MOSS,NSGA-II

۳. مدل‌سازی ریاضی

در این بخش مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل پیشنهادی برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره دو هدفه ارایه می‌شود.

۳-۱ مفروضات

۱) مسأله به صورت یک شبکه گسسته طراحی شده است که شعب و خزانه‌ها به عنوان گره‌های آن هستند.

۲) تقاضای هر شعبه در ابتدای روز مشخص و ثابت است.

۳) هر وسیله نقلیه از یک خزانه حرکت و پس از طی مسیر به خزانه باز می‌گردد.

۴) هر شعبه به وسیله دقیقاً یک وسیله نقلیه سرویس می‌بیند.

۵) هر وسیله دقیقاً از یک خزانه عبور می‌کند.

۶) همه وسایل نقلیه همگن هستند و از نظر زمان محدودیت دارند.

۷) چند خزانه برای تحویل تقاضا به شعب وجود دارد. در واقع یک شعبه خاص الزاماً از یک خزانه مشخص سرویس دریافت نمی‌کند.

۸) تعداد ماشین در هر خزانه حد معینی دارد. اما حتماً نباید از تمام آنها استفاده کرد.

۹) ماشین‌ها قابل انتقال به خزانه‌های دیگر نیستند.

۳-۲ پارامترها

I: مجموعه تعداد خزانه به طوری‌که $\{i|i=1,\ldots,M\}$

J: مجموعه تعداد مشتریان برابر مجموع تعداد خزانه‌ها و شعب $\{j|j=1,\ldots,N+M\}$

k: مجموعه وسایل نقلیه $\{k|k=1,\ldots,K\}$ یا همان مجموعه مسیرها (ماشین k–ام معرف مسیر شماره k–ام است)

t_{ijk}: زمان حرکت از نقطه i به j توسط وسیله k $(i,j\epsilon I\cup J, k\epsilon K)$ که بر اساس طول خیابان واصل بین دو نقطه و متوسط سرعت تخمینی برای یک ماشین پول‌رسان توسط خبرگان که برابر ۲۰ است، با استفاده از فرمول طول خیابان به سرعت تعیین می‌شود.

τ_{kj}: حداکثر زمان تحویل تقاضا برای شعبه j توسط وسیله k $(j\epsilon J, k\epsilon K)$

T_K: حداکثر مدت زمان مجاز برای حرکت وسیله k

Y_i: حداکثر تعداد وسیله در هر خزانه

β_{ijk}: ریسک حرکت از نقطه i به j، که نحوه محاسبه ریسک به این صورت است که:

۱) تعیین شاخص‌های اثرگذار بر ریسک خیابان که عبارتند از: نوع خیابان (فرعی یا اصلی بودن)، نوع تردد مجاز در خیابان (یک‌طرفه یا دو طرفه بودن خیابان)، عرض خیابان، ترافیک خیابان و وزن‌دهی به آنها (وزن‌ها بین ۰ و ۱) بر طبق نظر خبرگان.

۲) تعیین وزن هرشاخص با استفاده از میانگین گرفتن ساده از نظر تمامی خبرگان.

۳) تعیین میزان ریسک هر خیابان با جمع زدن وزن‌هایی که آن خیابان بر اساس شاخص‌های ریسک دارد.

۴) تشکیل ماتریس ریسک برای حرکت از نقطه i به j به این صورت که از بین تمامی خیابانهای موجود بین این دو نقطه، هر کدام که دارای کمترین ریسک است، انتخاب می‌شود. با این فرض که اگر در جواب مسأله حرکت از نقطه i به j انتخاب شود همیشه خیابان دارای کمترین ریسک انتخاب می‌شود.

۵) نرمال‌سازی ماتریس ریسک.

به طور مثال اگر برای حرکت از شعبه i به j دو خیابان وجود دارد و خیابان اول اصلی، دوطرفه، عریض و کم‌ترافیک باشد و وزن هر کدام از شاخص‌ها ۰/۵ باشد، ریسک خیابان اول برابر ۲ است و اگر ریسک خیابان دوم نیز برابر ۲/۲ باشد، خیابان اول انتخاب می‌شود.

۳-۳ متغیرهای تصمیم

X_{ijk}: اگر نقطه i بلافاصله قبل از j توسط وسیله k قرار دارد $(i,j\epsilon I\cup J, k\epsilon K)$ یک، در غیر اینصورت صفر است.

Z_{ij}: اگر شعبه j به خزانه i اختصاص یابد $(i\epsilon I, j\epsilon J)$ یک، در غیر این صورت صفر است.

U_{ik}: متغیر کمکی در محدودیت حذف زیر تور.

۳-۴ مدل ریاضی پیشنهادی

مدل ریاضی مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره دوهدفه برای طرح پیشنهادی در زیر نشان داده شده است:

$$\mathrm{Min}Z_1 = \sum_{i\epsilon I\cup J}\sum_{j\epsilon J}\sum_{k\epsilon K} t_{ijk}X_{ijk} \quad (۱)$$

$$\mathrm{Min} \quad Z_2 = \sum_{i\epsilon I\cup J}\sum_{j\epsilon J}\sum_{k\epsilon K} \beta_{ijk}X_{ijk} \quad (۲)$$

s. t.

$$\sum_{k\epsilon K}\sum_{i\epsilon I\cup J} X_{ijk} = 1, \quad \forall j\epsilon J \quad (۳)$$

$$\sum_{j\epsilon J}\tau_{kj} + \sum_{i\epsilon I\cup J}\sum_{j\epsilon J} t_{ijk}X_{ijk} \le T_k, \quad \forall k\epsilon K \quad (۴)$$

$$U_{lj} - U_{jk} + KX_{ljk} \le K-1, \quad \forall l,j\epsilon J, k\epsilon K \quad (۵)$$

$$\sum_{i\epsilon I\cup J}\sum_{j\epsilon J} X_{ijk} \le 1, \quad \forall k\epsilon K \quad (۶)$$

$$\sum_{j\epsilon I\cup J} X_{ijk} - \sum_{j\epsilon I\cup J} X_{jik} = 0, \quad \forall i\epsilon I\cup J, k\epsilon K \quad (۷)$$

$$-Z_{ij} + \sum_{u\epsilon I\cup J}(X_{iuk} + X_{ujk}) \le 1, \quad \forall i\epsilon I, j\epsilon J, k\epsilon K \quad (۸)$$

$$\sum_{j\epsilon J} X_{ijk} \le Y_i, \quad \forall i\epsilon I\cup J, k\epsilon K \quad (۹)$$

$$X_{ijk}\epsilon\{0,1\} \quad \forall i,j\epsilon I\cup J, k\epsilon K \quad (۱۰)$$

$$Z_{ij}\epsilon\{0,1\} \quad \forall i\epsilon I, j\epsilon J \quad (۱۱)$$

$$U_{ik} \ge 0 \text{ and integer} \quad \forall i\epsilon I, k\epsilon K \quad (۱۲)$$

علت عدم استفاده مستقیم از تابع کمینه‌سازی هزینه ماشین در مسأله این است که تعداد ماشین در هر خزانه مشخص و هزینه ثابت آن قبلاً پرداخت شده است، بنابراین سرویس‌دهی بموقع به شعب و کاهش زمان کل حمل مهم‌تر از کاهش هزینه متغیر ماشین است. تابع هدف دوم کمینه‌سازی ریسک کل حمل و نقل است. به دلیل تضاد این هدف با هدف اول یعنی امکان بالاتر بودن ریسک مسیر انتخابی در حالی‌که زمان کمتر، این مدل به صورت دوهدفه تعریف شده است.

عبارت (۳) نشان می‌دهد هر شعبه تنها توسط یک وسیله و یک خزانه سرویس داده می‌شود. عبارت (۴) نشان می‌دهد که مدت زمان حرکت یک وسیله باید از بیشینه زمان مجاز کمتر باشد. عبارت (۵) حذف هر زیر تور را تضمین می‌کند.عبارت (۶) نشان می‌دهد که هر وسیله دقیقاً به یک مسیر تخصیص می‌یابد. عبارت (۷) نشان می‌دهد هر وسیله به هر شعبه‌ای که وارد می‌شود، حتماً آن را ترک می‌کند. عبارت (۸) نشان می‌دهد یک شعبه ممکن است به یک خزانه اختصاص یابد تنها اگر یک وسیله اختصاص یافته به خزانه وجود دارد که آن شعبه را سرویس می‌دهد. عبارت (۹) نشان می‌دهد که محدودیت تعداد ماشین در هر خزانه برابر تعداد مشخصی است اما لزوماً از همه ماشین‌ها استفاده نمی‌شود. عبارات (۱۰) تا (۱۲) نوع متغیرهای تصمیم ومتغیر کمکی را تعیین می‌کند.

۴. الگوریتم خفاش

۴-۱ الگوریتم خفاش تک‌هدفه

الگوریتم خفاش[۱۷] (BA) یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که ایده اولیه آن توسط یانگ [Yang, 2008] در سال ۲۰۰۸ بیان شد و سپس در سال ۲۰۱۰ گسترش یافت. یانگ [Yang, 2010] یک بازنگری بر روی تحقیقات مرتبط با این الگوریتم و کاربردهای آن انجام داده است که نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم برای مسایل بهینه‌سازی مناسب است [Tsai et al. 2012].

ویژگی مکان‌یابی صوتی، خفاش‌ها را قادر می‌سازد تا بتوانند شکار خود را بیابند. خفاش‌ها پالس صوتی بسیار بلندی تولید می‌کنند و به بازگشت آن از اشیاء اطراف گوش می‌کنند. پالس‌ها، ویژگی‌های مختلفی دارند که وابسته به استراتژی شکار خفاش‌ها و نوع موجودی که قصد شکار آنرا دارند، است. خفاش‌ها از تأخیر انعکاس و تشخیص بازتاب، اختلاف زمانی بین دو گوش و تغییر بلندی صوت بازتابی، می‌توانند یک فضای سه بعدی اطراف خود بسازند. آنها می‌توانند فاصله و جهت هدف و حتی سرعت شکار خود را تشخیص دهند. منطق این الگوریتم به این صورت

است که هر خفاش مجازی با یک سرعت برابر v_i به طور تصادفی پرواز می‌کند.مکان آن یا x_i جواب نهایی این الگوریتم است. یک خفاش در حین جستجویش برای یافتن شکار طول موج صدا (A_i) و نرخ انتشار پالس(r_i) را تغییر می‌دهد. همچنین جستجو توسط گام تصادفی تقویت می‌شود. انتخاب بهترین، تا زمانی که یکی از شرایط توقف برقرار گردد، ادامه دارد.

برای سادگی تنها از برخی از ویژگی‌های خفاش‌ها برای ایجاد الگوریتم خفاش استفاده می‌شود که عبارتند از:

– همه خفاش‌ها از توانایی مکان‌یابی صوتی برای تشخیص فاصله استفاده کرده و می‌توانند تفاوت بین غذا و موانع را تشخیص دهند.

– اگر چه که بلندی صوت را می‌توان به روش‌های مختلف تغییر داد، در اینجا فرض شده است که بلندی صوت از یک مقدار بزرگ ثابت مثبت A_0 به مقدار کوچک‌تر A_{min} تغییر می‌کند.

– خفاش‌ها به صورت تصادفی با سرعت v_i در موقعیت x_i با فرکانس ثابت f_{min}و طول موج متغیر λ به بلندی A_0 پرواز می‌کنند تا شکار خود را بیابند.

علاوه بر این فرض‌های ساده‌سازی، تقریب‌های دیگری نیز در طراحی BA در نظر گرفته شده است. مانند اینکه عموماً فرکانس fدر دامنه $[fmin,fmax]$ قرار دارد. دامنه طول موج باید به گونه‌ای انتخاب شود که مطابق با اندازه مسأله مورد حل باشد و سپس آن را باید به اندازه کوچک‌تر تغییر داد. در این الگوریتم مکان (یک جواب) و سرعت هر خفاش در گام t+۱ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (۱۳)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + (x_i(t+1) - x_{best})f_i \quad (۱۴)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad (۱۵)$$

که $[\beta \epsilon ۰،۱]$ بردار تصادفی یکنواخت و x_{best} بهترین مکان سراسری از بین همه خفاش‌ها است که تاکنون به دست آمده است. بهنگام‌سازی مکان و سرعت ذره در خفاش‌ها دارای شباهت‌هایی با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات[۱۹] (PSO) است، که در آن f_iسرعت و ازدحام ذارت را کنترل می‌کند. در واقع BA را می‌توان ترکیبی از الگوریتم PSO بدون بهره‌مندی از بهترین جواب محلی ذره i–ام به همراه یک جستجوی محلی مبتنی بر بلندی صوت و نرخ انتشار پالس دانست [SanieAbade &Jeb-elamelian, 2013].

برای بخش جستجوی محلی، یک جواب در میان بهترین جواب‌های موجود انتخاب و یک جواب جدید برای هر خفاش به صورت محلی با استفاده ازگام تصادفی یعنی $x_{new}=x_{old}+\varepsilon A^t$ ایجاد می‌شود.که $[\varepsilon \epsilon ۰،۱]$ یک مقدار تصادفی و A^t مقدار میانگین بلندی صدا همه خفاش‌هادرزمان t است.

همان‌طور که خفاش در زمان یافتن شکار بلندی صدای (A_i) خود را کاهش و نرخ انتشار پالس (r_i) را افزایش می‌دهد، r_i و A_i نیز باید در طی فرآیند تکرارها با استفاده از روابط زیر بهنگام شود.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (۱۶)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0[1 - \exp(\gamma^t)] \quad (۱۷)$$

که α و γ مقادیر ثابتی هستند و برای سادگی $\alpha = \gamma = ۰/۹$ در نظر گرفته می‌شود [Yang, 2010].

مراحل الگوریتم خفاش تک‌هدفه عبارت است از:

۱– مقداردهی مکان اولیه (x_i)، سرعت اولیه ذرات (v_i)، مقداردهی اولیه به نرخ انتشار پالس (r_i) و بلندی صدا (A_i)

۲– تا زمان رسیدن به شرط خاتمه مراحل زیر را تکرار کن:

۲–۱– تولید جواب جدید با تنظیم فرکانس و به هنگام‌سازی سرعت و مکان با معادلات (۱۳) تا (۱۵)

۲–۲– اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ بزرگ‌تر از r_i آنگاه:

۲–۲–۱– انتخاب یک جواب در میان بهترین جواب

۲–۲–۲– ایجاد یک جواب در همسایگی بهترین جواب انتخاب شده (گام تصادفی)

۲–۳– اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ کوچک‌تر از A_i و تابع هدف ذره i از بهترین ذره کوچک‌تر باشد، آنگاه:

۲–۳–۱ پذیرش جواب جدید و افزایش r_i و کاهش A_i

۲–۴– رتبه‌بندی خفاش‌ها و یافتن بهترین جواب

۲–۴ الگوریتم خفاش چندهدفه

مسایل چند هدفه بر خلاف مدل‌های تک‌هدفه که تنها یک جواب بهینه را می‌پذیرند، مجموعه‌ای از جواب‌ها را تحت

عنوان مرز پارتو که مجموعه‌ای از جواب‌های غیرمغلوب است، جهت تصمیم‌گیری نهایی ارایه می کنند [Coello Coello et. al. 2002]. بنابراین هدف مسایل بهینه‌سازی چند هدفه، هدایت مسیر جستجو به سمت مرز پارتو صحیح است. الگوریتم BA توسط یانگ [Yang, 2011] با استفاده از مجموع روش وزنی ساده با وزن‌های تصادفی، به MOBA توسعه داده شده است. از آنجا که وزن‌ها به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت تولید می‌شود، بنابراین گوناگونی وزن‌ها با تنوع کافی منجر به شناسایی درست جبهه پارتو می‌شود. نتایج [Yang & Gandomi, 2012] نشان می‌دهند که الگوریتم MOBA جبهه پارتوی مناسبی برای بسیاری از مسایل بهینه‌سازی تولید می‌کند.

مراحل الگوریتم خفاش چندهدفه عبارت است از:

۱- مقداردهی مکان اولیه (x_i) و سرعت اولیه (v_i) ذرات

۲- برای ۱=j تا J (تعداد نقاط روی جبهه پارتو)

۲-۱- تولید وزن $w_k \geq 0$ به نحوی که $\sum_{k=1}^{K} w_k = 1$ و ایجاد یک تابع هدف به صورت $f = \sum_{k=1}^{K} f_k w_k$

۲-۲- تا زمان رسیدن به شرط خاتمه مراحل زیر را تکرار کن:

۲-۲-۱- تولید جواب جدید و بهنگام‌سازی سرعت و مکان با استفاده از معادلات (۱۳) و (۱۵)

۲-۲-۲- اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ بزرگ‌تر از r_i آنگاه:

۲-۲-۲-۱- ایجاد یک جواب در همسایگی بهترین جواب انتخاب شده (گام تصادفی)

۲-۲-۳- اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ کوچک‌تر از A_i و تابع هدف ذره i از بهترین ذره کوچک-تر باشد، آنگاه:

۲-۲-۳-۱- پذیرش جواب جدید و افزایش r_i و کاهش A_i

۲-۲-۴- رتبه‌بندی خفاش‌ها و یافتن بهترین جواب

۲-۳- ثبت بهترین جواب یافت شده در هر تکرار به عنوان یک جواب پارتو

۳-۴ مراحل الگوریتم برای مدل پیشنهادی

۴-۳-۱ نحوه نمایش جواب

نحوه نمایش جواب در مسایل مسیریابی به دلیل الزام در استفاده از یک توالی از اعداد مشخص پیچیده است. در تحقیقات متعدد موجود در این حوزه نحوه نمایش‌های متعددی وجود دارد. به‌طور مثال در [Jafari et al. 2011] نمایش جواب به صورت یک بردار با طول متغیر است. در [Rafee, 2010] به صورت یک ماتریس با ابعاد ثابت است. اما در [Setak et al. 2013] از یک بردار با طول ثابت برای نمایش جواب استفاده شده است. در این تحقیق به دلیل ماهیت مدل و همچنین نوع الگوریتم (الگوریتم پیوسته) انتخابی، از نحوه نمایش ارایه شده در [Setak et al. 2013] الهام گرفته شده و به صورت یک بردار با طول ثابت قابل نمایش است. در این کار،روش تولید جواب اولیه، رمزگشایی جواب و تولید جواب جدید ساده ولی کارآیی طراحی شده که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴-۳-۲ مراحل اصلی الگوریتم

۱) تولید جواب اولیه: تولید جواب اولیه به صورت تصادفی است. این جواب اولیه با توجه به نحوه نمایش در نظر گرفته شده در اینجا معنادار نیست. نحوه نمایش جواب به شرح زیر است:

الف) یک بردار از اعداد تصادفی بین [۰،۱] با طول ثابت برابر تعداد شعب (N) تولید شود.

ب) رشته اعداد بردار تولید شده در گام الف به صورت نزولی مرتب شود.

ج) با استفاده از قاعده موقعیت بزرگ‌ترین مقدار[۲۰] (LPV) بردار تولید شده در گام ب به جایگشتی ازشماره شعب تبدیل می‌شود که شماره شعب در محدوده [M+1, N+M] تغییر و M برابر تعداد خزانه و N تعداد شعب است. این نحوه نمایش یک جواب معنادار برای مسأله مسیریابی نیست. در مرحله ارزیابی جواب، نحوه رمزگشایی جواب و تبدیل آن به مسیرهای موجه بیان خواهد شد.

مثال ۱: مراحل شماتیک تولید یک جواب برای یک مسأله با ۸ شعبه و ۲ خزانه که یک بردار با طول ۸ است، در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که اعداد موجود در جایگشت تولید شده نهایی در شکل ۱ در محدوده [۱+۸، ۲+۲] قرار دارد.

برای نمونه عدد ۵ در ابتدای بردار ج به این صورت ایجاد شده که مکان عدد ۰/۹ در بردار الف که برابر ۳ است به اضافه ۲ شده (که برابر تعداد خزانه‌ها است) و به دلیل واقع شدن عدد ۰/۹ در مکان ۱ بردار ب این عدد (۵=۲+۳) به مکان ۱ بردار ج منتقل می‌شود.

۰/۳۴	۰/۶۷	۰/۹	۰/۲۲	۰/۶۹	۰/۱۲	۰/۷	۰/۴۶

الف) یک بردار تصادفی بین [۰،۱]

۰/۹	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۷	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۱۲

ب) مرتب کردن رشته اعداد بردار الف به صورت نزولی

۵	۷	۴	۹	۱۰	۳	۶	۸

ج) یک جایگشت از اعداد مرتب شده تصادفی با قاعده LPV

شکل ۱. نحوه نمایش جواب

۲) ارزیابی جواب‌ها: با توجه به معنی‌دار نبودن جواب اولیه تولید شده، ابتدا باید توالی مذکور به یک جواب امکان‌پذیر تبدیل و سپس مقدار توابع هدف را برای آن ارزیابی کرد. نحوه رمزگشایی جواب به شرح زیر است:

الف) ابتدا نزدیک‌ترین خزانه به شعبه اول در توالی تعیین و به ابتدای توالی اضافه می‌شود و زمان حرکت در مسیر ایجاد شده (که مجموع زمان حمل و نقل از نقطه i به jو زمان تحویل پول به نقطه j است) به عنوان زمان وسیله نقلیه k–ام $(k=1,2,...,K)$ که k از ۱ شروع می‌شود، منظور می‌گردد.

ب) تا زمانی‌که جمع زمانها از حداکثر زمان مجاز وسیله نقلیه k–ام (برابر حداکثر زمان مجاز پول‌رسانی به شعب) تجاوز نکند، شعب بعدی موجود در توالی اولیه به جواب رمزگشایی شده اضافه می‌شود.

ج) به محض این‌که جمع زمانها از حداکثر زمان وسیله نقلیه بیشتر شد، مجموع زمان محاسبه شده به عنوان زمان وسیله نقلیه k–ام منظور و به k یکی اضافه و دوباره به گام اول بر می‌گردیم. یعنی نزدیک‌ترین خزانه به شعبه‌ای که در مرحله قبل اجازه سرویس‌دهی با ماشین k–ام را نیافت، انتخاب و زمان حرکت در مسیر ایجاد شده به عنوان زمان وسیله نقلیه k+۱–ام منظور می‌شود.

ادامه مثال ۱: نحوه رمزگشایی جواب تولید شده در مثال ۱ که به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است، به این صورت قابل تفسیر است که از خزانه ۱ تنها یک ماشین از مسیر 1→3→10→9→1 حرکت می‌کند. در حالی که از خزانه ۲، دو ماشین در مسیرهای 2→4→7→5→2 و 2→8→6→2 حرکت می‌کنند. بنابراین جواب رمزگشایی شده به صورت یک بردار با طول متغیر است.

۵	۷	۴	۹	۱۰	۳	۶	۸

۲	۵	۷	۴	۱	۹	۱۰	۳	۲	۶	۸

شکل ۲.نحوه رمزگشایی جواب

۳) تولید جواب جدید: با توجه به ماهیت گسسته BA در اینجا نحوه نمایش جواب یک بردار از اعداد تصادفی بین [۰،۱] است. در مرحله بهنگام‌سازی سرعت و مکان خفاش‌ها، معادلات (۱۳) تا (۱۵) بر روی این بردار اعمال شده و در ادامه مطابق با منطق بیان شده در گام تولید جواب اولیه بر اساس قاعده LPV بردار تولید شده در گام‌های قبلی به جایگشتی از شماره شعب تبدیل می‌شود و در مرحله رمزگشایی به یک جواب جدید موجه تبدیل می‌شود. به عنوان مثال نحوه تولید جواب جدید از جواب اولیه در شکل ۱–الف در شکل ۳ نمایش داده شده است. در نهایت نحوه نمایش جواب و رمزگشایی پیشنهاد شده در هر مرحله حل الگوریتم منجر به تولید جواب‌های امکان‌پذیر می‌شود، بنابراین نیازی به بررسی صدق کردن جواب در محدودیت‌ها وجود ندارد که این مسأله زمان حل الگوریتم را کاهش می‌دهد.

۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷	۰/۹

۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۹۴	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۶۴

شکل ۳. نحوه تولید جواب جدید

۵. نتایج محاسباتی

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، از ۷ مسأله با ابعاد مختلف بر اساس مسایل واقعی یک بانک[۲۱] (جدول ۲)، منطبق با داده‌های واقعی آن بانک استفاده شده است که ۴ مسأله اول مربوط به پول‌رسانی به شعب ارزی (تعداد محدودی از شعب ارزی هستند) و ۳ مسأله دوم مربوط به پول‌رسانی به شعب ریالی است. در کلیه مسایل از نقشه شهر تهران که کلیه اطلاعات موردنیاز مانند مکان شعب بانک موردنظر، نوع خیابان‌ها، نوع تردد مجاز، عرض خیابان و طول خیابان (جهت محاسبه ریسک و زمان حرکت) با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10 توسط تیم GIS بانک بر روی آن تعبیه شده، استفاده شده است.در شکل ۴ بخش کوچکی از نقشه مذکور پس از تعیین خیابان‌های کم‌ریسک‌تر (باخطوط توپر سبز رنگ) و مسیرهای انتخابی نهایی (باخطوط آبی رنگ) نشان داده شده است.

جهت حل این مسایل، الگوریتم‌ها را در نرم‌افزار MATLAB 7.8 پیاده‌سازی و نتایج حاصل از اجرای آنها، با یکدیگر مقایسه شده است. رایانه مورد استفاده در این کار پنتیوم IV با پردازنده GHz 2.6 و ۲ GB حافظه است. منبع کدینگ الگوریتم BA برای یک مسأله ساده در [www.mathworks.com/matlabcentral] قابل دسترس است. همچنین در این کار پیاده سازی الگوریتم NSGA-II بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط دب و همکاران [Deb et. al., 2002] انجام شده است.

شکل٤.بخشی کوچکی از نقشه تهران با جزییات موردنیاز

جدول۲. ابعاد مسایل نمونه

شماره مسأله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تعداد خزانه	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳
تعداد شعب	۱۰	۲۰	۳۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

۵-۱ تنظیم پارامتر

به منظور تنظیم پارامتر الگوریتم، چندین روش آماری برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارد که در این مقاله، از روش تاگوچی استفاده شده است. با توجه به اینکه همه توابع هدف مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه از نوع کمینه سازی است بنابراین، نرخ S/N مربوط به آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [Taguchi et al. 2005]:

$$S/N_s = -10\log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2) \qquad (۱۸)$$

که در اینجا n تعداد تکرار آزمایش و y_i پاسخ مساله است. در این آزمایش، هدف، یافتن مقدار پارامترهای الگوریتم MOBA و NSGA-II به عنوان متغیر ورودی برای به دست آوردن پاسخ بهینه است که با استفاده از روش وزن‌دهی برای مجموعه جواب پارتو در انتها، یک پاسخ در نظر گرفته شده است. همچنین برای تنظیم پارامتر با استفاده از روش DOE از مسئله شماره ۷ استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم MOBA که عبارتند از اندازه جمعیت (n_pop)، نرخ انتشار پالس (r_i)، بلندی صوت (A_i)، حداکثر فرکانس(f_{max}) درجدول۳ نشان داده شده است. با توجه به این‌که برای هر یک پارامترها ۳ حالت در نظر گرفته شده در کل باید 3^4=81 حالت بررسی شود. اما با استفاده از روش تاگوچی تنها ۹ حالت از ۸۱ حالت بررسی می‌شود. مسأله نمونه برای هر یک از حالات ۱۰ بارحل شده است. لازم به ذکر است که سایر پارامترها بنابر پیشنهاد طراح الگوریتم به صورت γ=α=0/9 و f_{min}=0 در نظر گرفته شده است.با توجه به نتایج شکل ۵، میانگین نرخ S/N برای ۱۰ اجرای مسأله برای ۹ حالت آزمایش تاگوچی

را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه ۱۹ هر چقدر نسبت S/N بیشتر باشد، جواب‌های بهتری از الگوریتم کسب می‌شود. از این رو، پارامترهای ورودی الگوریتم MOBA عبارتند از n_pop برابر ۵۰، r_i برابر ۰/۲۵، A_i برابر ۰/۷۵، f_{max} برابر ۲ به دست آمده است. همچنین پارامترهای ورودی الگوریتم NSGA-II برای حل مدل پیشنهادی نیز با همین روش محاسبه و عبارتند از اندازه جمعیت برابر ۱۰۰، احتمال تقاطع برابر ۰/۱۲ و احتمال جهش برابر ۰/۸ به دست آمده است.

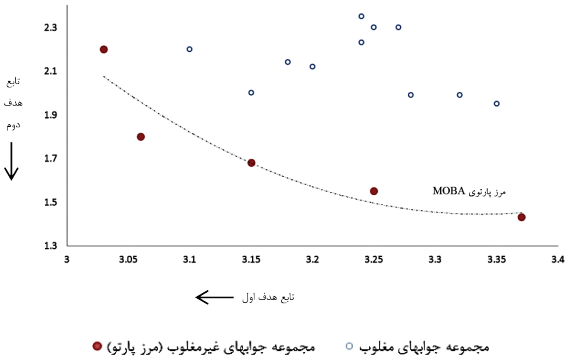
جدول ۳. سطوح پارامترهای ورودی الگوریتم MOBA

حالت	n_pop	r_i	A_i	f_{max}
۱	۲۰	۰/۲۵	۰/۲۵	۱
۲	۵۰	۰/۵	۰/۵	۱/۵
۳	۱۰۰	۰/۷۵	۰/۷۵	۲

۵-۲ تحلیل نتایج محاسباتی

۵-۲-۱ حل یک مثال

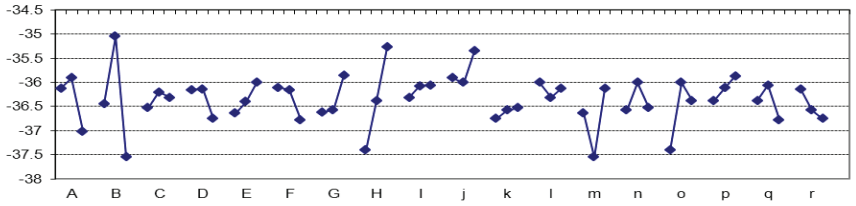
در این بخش جهت تحلیل اولیه نتایج مسأله ۱ که ساده‌ترین مسأله بانک مورد مطالعه است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حل مسأله با استفاده از الگوریتم MOBA (شکل ۶)، ۵ جواب غیرمغلوب بر روی مرز پارتو را نشان می‌دهد. این مرز پارتو و مقادیر توابع هدف در هر نقطه (جدول ۴) نشان می‌دهد که تعریف توابع هدف به صورت متضاد در مدل پیشنهادی صحیح بوده است زیرا کاهش یکی از توابع هدف بر روی مرز پارتو تابع هدف دیگر را افزایش می‌دهد. همچنین از مسیرهای ایجاد شده در هر جواب پارتو (جدول ۴) که یکی از جواب‌ها نیز به صورت شماتیک در شکل ۷ نیز نشان داده شده است، این‌گونه استنباط می‌شود که کاهش مسیر اگر چه منجر به افزایش مجموع زمان حرکت می‌شود، الزاماً منجر به افزایش تعداد مسیرها نخواهد شد.



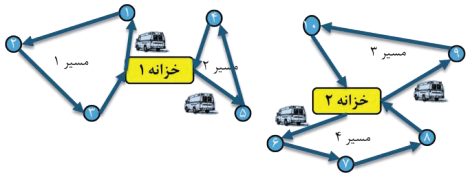
شکل ٦. مجموعه جواب‌های مسأله ۱با الگوریتم‌ها MOBA در ۵۰۰ تکرار

جدول ٤. تغییر توابع هدف و مسیرهای ایجاد شده در جوابهای پارتوی مسأله ۱ باالگوریتم‌ها MOBA در ۵۰۰ تکرار

شماره جواب پارتو	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳	مسیر ٤
۱	۲/۹۹	۱/۹۳	۱،۲،۳	٤،۵	٦،۷،۸	۹،۱۰
۲	۳/۰٦	۱/۸۰	۱،٤	۲،۳	۵،٦،۷،۸	۹،۱۰
۳	۳/۱۵	۱/٦۸	۱،۲،۳	٤،۵	٦،۱۰	۷،۸،۹
٤	۳/۳۱	۱/۵۵	۱،٤،۵	۲،۳	٦،۱۰	۷،۸،۹
۵	۳/٤۱	۱/٤۳	۱،٤	۲،۳	۵،٦،۷	۹،۱۰



شکل۵. میانگین نرخ S/N برای هر سطح از عوامل در الگوریتم MOBA



شکل ۷. نمایش شماتیک جواب پارتوی اول برای مسأله ۱

لازم به ذکر است که از بین جواب‌های پارتوی ایجاد شده برای هر مسأله انتخاب بر عهده حراست بخش پول‌رسانی است، زیرا آنها از طریق تجربه با در نظر گرفتن شاخص‌های دیگری که قابل کمی شدن نیستند، می‌توانند یکی از جواب‌های پارتو را انتخاب کنند. از سوی دیگر در صورت رخداد حادثه پیش‌بینی نشده در یکی از مسیرها در صورت امکان یکی دیگر از جواب‌های پارتو را انتخاب می‌کنند.

۵-۲-۲ بررسی عملکرد الگوریتم‌ها

بررسی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه از عملکرد الگوریتم‌های یک هدفه بسیار پیچیده‌تر است و یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارایه شده کافی باشد. از این رو در این مقاله، برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم MOBA و NSGA-II از سه شاخص: ۱)تعداد جواب‌های غیرمغلوب[۲۳] (N) [Schaffer, 1985]، ۲) کیفیت[۲۴] (Q) [Collette & Siarry, 2003] و۳) فاصله[۲۵] (S) [Srinivas and Deb, 1994] زیر استفاده می‌شود.

نتایج حل ۷ مسأله با دو الگوریتم با استفاده از داده‌های واقعی یک بانک برای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تکرار در جدول ۵ آورده شده است. همچنین مجموعه جواب‌های پارتوی و مرز پارتوی حاصل از حل مسئله ۷ در ۵۰۰ تکرار برای دو الگوریتم در شکل ۸ نمایش داده شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده:

- تعداد حل‌های غیرمغلوب الگوریتم MOBA در ۵۰۰ و ۱۰۰۰تکرار به طور کلی بهتر از NSGA-II بوده است.
- از نظرشاخص فاصله، الگوریتم NSGA-II در ۵۰۰ تکرار تا حدودی بهتر از الگوریتم MOBA بوده، اما دو الگوریتم در ۱۰۰۰ تکرار نتایج مشابهی دارند.
- با افزایش تکرارها، زمان حل افزایش می‌یابد و در کل میانگین زمان حل الگوریتم NSGA-II از MOBA کمتر است.
- نکته مهم درباره این مسأله این است که مرز پارتوی الگوریتم MOBA در تمام مسایل نمونه بهتر از NSGA-II است که نشان‌دهنده کیفیت بهتر جواب‌های الگوریتم MOBA است.

به‌طور نمونه مقایسه مرز پارتوی محاسبه شده در شکل ۹ توسط دو الگوریتم برای مسأله ۷ این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. بنابراین بهتر بودن کیفیت جواب‌های الگوریتم MOBA در مقابل زمان حل آن نسبت به الگوریتم NSGA-II، استفاده از این الگوریتم را جهت حل مسأله مسیریابی مورد نظر پیشنهاد می‌دهد.

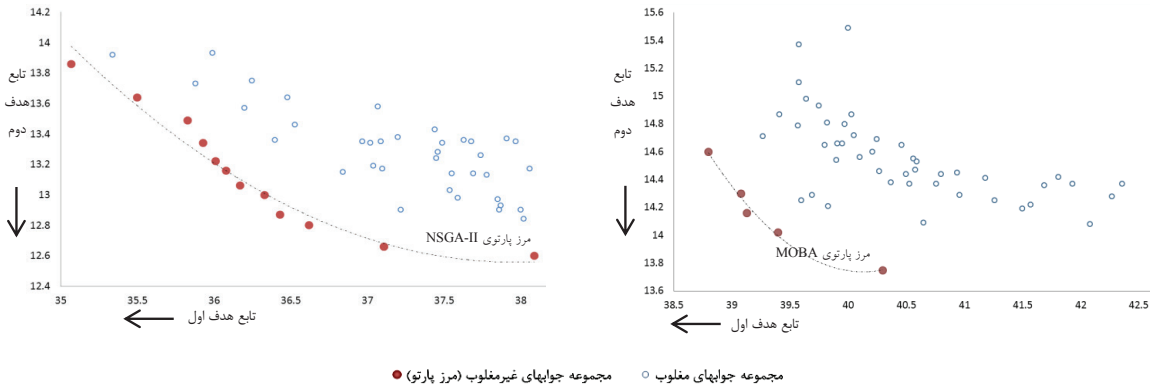
۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از فرآیندهای محوری در سیستم بانکداری، انتقال پول از خزانه به مراکز توزیع پول (شعب) و بالعکس در بازه‌های زمانی محدود است. مهم‌ترین پارامتر در این فرآیند انتخاب مسیر مناسب به نحوی است که بتوان فرآیند پول‌رسانی را در کم‌ترین زمان ممکن با کم‌ترین ریسک به شرط سرویس‌دهی به شعب در بازه زمانی مشخص انجام داد. در این مسأله خاص، به دلیل اهمیت نوع کالای در حال حمل یعنی پول، مسأله امنیت حمل و نقل نیز در کنار موضوع مدت زمان سرویس‌دهی مهم است. بنابراین در این مقاله جهت حل این مسأله یک مدل مسیریابی چندانباره و دوهدفه با پنجره زمانی، طراحی شده است. برای محاسبه ریسک مسیر از شاخص‌هایی مانند نوع خیابان، نوع تردد مجاز، عرض خیابان، متوسط ترافیک خیابان که قبل از حل مسأله قابل سنجش است، استفاده می‌شود.

با توجه به NP-hard بودن مسایل مسیریابی،برای حل مدل پیشنهادی از یک الگوریتم خفاش چندهدفه (MOBA) استفاده و نتایج آن با الگوریتم فراابتکاری چندهدفه معروف بنام NS-GA-II مقایسه شده است. با توجه به ماهیت پیوسته الگوریتم خفاش و پیچیدگی مدل پیشنهادی، یک نحوه نمایش ساده اما کارآ جهت نمایش جواب انتخاب شده است که در هر مرحله از حل الگوریتم منجر به تولید جواب‌های امکان‌پذیرمی‌شود و نیازی به بررسی جواب‌ها در محدودیت‌ها ندارد. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی MOBA و NSGA-II با استفاده

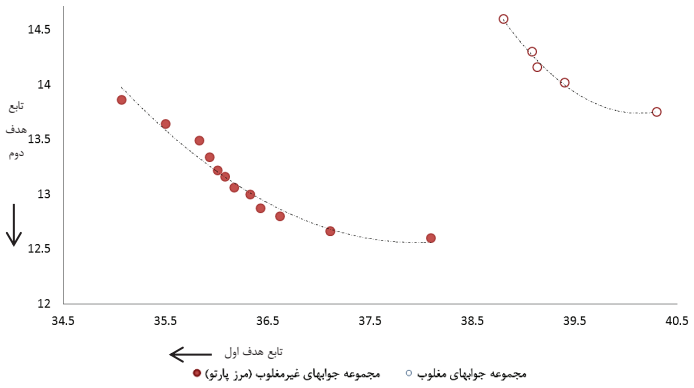
جدول۵. نتایج محاسباتی الگوریتم MOBA و NSGA-II برای مسایل نمونه در ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تکرار

شماره مسأله	نتایج در ۵۰۰ تکرار						نتایج در ۱۰۰۰ تکرار					
	MOBA			NAGA-II			MOBA			NAGA-II		
	زمان حل	N	S	زمان حل	N	S	زمان حل	N	S	زمان حل	N	S
۱	۱۰/٦	۳	۰/۹۲	۲/٤		۰/۷٦	۱۸/۲	۵	۰/۸۵	۵/۳	۳	۰/۸۹
۲	۱۸/٤	۵	۰/۸٤	۷/۵	۳	۰/٦٤	٤۲/٦	۸	۱/۳	۱٤/۷	۵	۰/۵۷
۳	۲۵/۸	٤	۱	۱۲/۹	۲	۰/۹۰	٦۷/٦	٦	۰/۸٦	۲۰/۲	٤	۱/۲
٤	۳۸/۳	۸	۲/۱۲	۲۵/٦	٤	۱	۸۰/۳	۱۱	۱/٦	۵۲/۵	۵	۰/۸۷
۵	٤٤/۷	۱۰	۱/۳۵	۲۳/۳	۳	۰/۹۸	۸۷/۷	۱۳	۱/٦	٦۱/۱	٦	۱/٤۱
٦	٦۸/۲	۸	۰/۹۹	۳۷/۹	٤	۰/۷٦	۱۲۱/۲	۱۰	۰/٦۷	۷۰/۳	٦	۰/۸۷
۷	۸۳/٦	۱۲	۱/۷۸	٤۲/٦	۵	۱/۱۲	۱٤٤۵/٦	۱۵	۰/۹۹	۹۳/۸	۷	۱/٤
میانگین	٤۱/٤	۷	۱/۳	۲۳/۰۳	۳	۰/۹	۸۲/۱	۱۰	۱/۱	۵٤/٤	۵	۱/۱



الف- نتایج الگوریتم MOBA ب- نتایج الگوریتم NSGA-II

شکل۸. مجموعه جواب‌های مسأله ۷ با الگوریتم‌های پیشنهادی در ۵۰۰ تکرار



شکل۹. مقایسه مرز پارتو مسأله ۷ با الگوریتم‌های پیشنهادی در ۵۰۰ تکرار

از سه شاخص تعداد جوابهای غیرمغلوب، کیفیت و فاصله نشان می‌دهد که اگر چه زمان حل الگوریتم پیشنهادی MOBA بیشتر از الگوریتم NSGA-II است، اما بهتر بودن کیفیت جواب‌های الگوریتم پیشنهادی در مقابل NSGA-II، استفاده از این الگوریتم را جهت حل مدل مسیریابی موردنظر پیشنهاد می‌دهد. در ضمن پیشنهاد می‌شود که موازنه‌ای بین توابع هدف در جواب‌های پارتوی مختلف در قالب تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به افزایش شعب بانکها ونیاز به خزانه‌های جدید، در کارهای آینده می‌توان به حل مسایل مکان‌یابی–مسیریابی چندانباره (MDLRP)برای مکان‌یابی خزانه‌های جدید با در نظرگرفتن مسیرهای حمل و نقل پرداخت.

۶. پی نوشتها

1- Vehicle Routing Problem
2- Traveling Salesman Problem
3- Capacitated VRP
4- Single commodity
5- Split Delivery VRP
6- Stochastic VRP
7- VRP with Time Window
8- Multi-Depot VRP
9- Multi-Objective Bat Algorithm
10- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
11- Particle Swarm optimization
12- Variable Neighborhood Search
13- Simulated Annealing
14- Multi-Objective Scatter Search
15- Elite Tabu Search
16- Genetic Algorithm
17- Bat Algorithm
18- Random Walk
19- Particle Swarm Optimization
20- Largest Position Value

۲۱– با توجه به مسایل امنیتی حمل پول بانک مورد بررسی اجازه انتشار جزیئات داده‌ها را به نویسندگان مقاله نداده‌اند.

۲۲– این اطلاعات از شهرداری تهران خریداری شده است.

23- Number of Non-dominated Solutions II
24- Quality Metric
25- Spacing Metric
26- Multi-Depot Location Routing Problem

۷. مراجع

– توکلی مقدم، رضا، ربانی، رضا، شریعت، محمدعلی وصفایی، نیما (۱۳۸۵) "حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی نرم با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۴، ص. ۴۶۹–۴۷۶.

– جعفری، عزیزاله، چینی فروشان، پیام و صادقی سروستانی، آیلین (۱۳۹۰) "ارایه‌ی الگوریتم شبیه سازی تبرید ترکیبی برای حل مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره"، اولین کنفرانس ملی دانش پژوهان کامپیوتر و فنآوری اطلاعات، دانشگاه تبریز، گروه علوم کامپیوتر.

– حسن‌پور،حسینعلی، مصدق‌خواه، مسعود و توکلی مقدم، رضا (۱۳۸۸) "حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه در حالت چندهدفی، چندقرارگاهی و احتمالی با استفاده از آنیلینگ شبیه‌سازی شده"، نشریه مهندسی صنایع، دوره ۴۳، شماره ۱ ، ص. ۳۷–۲۵.

– رفیعی درمیان، کوشا (۱۳۸۹) "طراحی و حل یک مدل فراگیر مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری کارآمد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده‌های فنی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، ص. ۷۱–۶۶.

– ستاک، مصطفی، جلیلی بوالحسنی، سهیل، کریمی، حسین و قربانی، بهارک (۱۳۹۲) "مسأله مسیریابی وسیله نقلیه چندانباری ظرفیت‌دار با در نظر گرفتن مسیر بین انبارها"، دهمین کنفرانس بین المللی صنایع، دانشگاه تهران.

– علینقیان، مهدی و نادری‌پور، منصوره (۱۳۹۲) "ارایه یک مدل ریاضی جدید در مسیریابی واسئط نقلیه وابسته به زمان به منظور کمینه کردن انرژی مصرفی"، اولین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران، تهران.

– عیدی، علیرضا، سیدعلی، قاسمی نژاد، و محققی، حنیف(۱۳۹۲) "مسیریابی وسایل نقلیه چندهدفه با کالاهای مناسبتی"، نشریه

تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۷ ،شماره ۲ ،ص. ۲۱۵ تا ۲۲۸.

– قصیری، کیوان و قنادپور، سید فرید (۱۳۸۶) "مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی، مبانی، روش‌ها و پیشرفت‌ها همراه با مطالعه موردی در صنعت حمل و نقل"، مرکز انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، چاپ اول ص. ۷۲–۵۵.

– قصیری، کیوان و قنادپور، سید فرید (۱۳۸۷) "مسیریابی لوکوموتیوها در شبکه با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره ۳،(۱۶)، ص. ۲۷۳–۲۵۹.

– صنیعی‌آباده، محمد و جبل عاملیان، زهره (۱۳۹۲) "الگوریتم‌های تکاملی و محاسبات زیستی"، انتشارات نیاز دانش، چاپ اول.

- Batistaa, B.M., Santiagoa, A.D., AngelBellob, F. and Alvarezca, A.(2014) "A bi-objective vehicle routing problem with time windows:A real case in Tenerife", Applied Soft Computing, Vol. 17, pp. 140–152.

- Bérubé, J.-F., Gendreau, M. and Potvin, J.-Y. (2009) "An exact ε-constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the traveling salesman problem with profits", European Journal of Operational Research, Vol. 194, pp. 39-50.

- Coello Coello, C.A., Lamont, G.B. and Van Veldhuizen, D.A. (2002) "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems", Kluwer Academic Publishers, New York, 2nd.Edition, pp. 88-91.

- Collette, Y. and Siarry, P. (2003) "Multi-objective optimization: principles and case studies", New York: Springer.

- Dantzig, G.B. and Ramser, J.H. (1959) "The truck dispatching problem", Management Science, Vol. 6, pp. 80–91.

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

- Salhi, S., Imran, A. and Wassan, N.A. (2013) "The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation", Computers & Operations Research, No. 52, pp.315-325

- Schaffer, J.D. (1985) "Multiple objective optimizations with vector evaluated genetic algorithms", In: J.D.Schaffer, Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum, pp. 93–100.

- Srinivas, N. and Deb, K. (1994)"Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms", Evolutionary Computation, Vol. 2, No. 2, pp. 221–248.

- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y. (2005) "Taguchi's quality engineering handbook", Wiley Publishing.

- Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A. and Mazloomi, Z. (2010) "A new integrated mathematical model for a bi-objective multi-depot location-routing problem solved by a multi-objective scatter search algorithm", Journal of Manufacturing Systems Vol. 29, pp. 111–119

- Tsai, P.W., Pan, J.S., Liao, B.Y., Tsai, M.J. and Istanda, V.(2012) "Bat algorithm inspired algorithm for solving numerical optimization problems", Applied Mechanics and Materials, Vols. 148–149, pp.134-137.

- Yang, X.S. and Gandomi, A.H. (2012) "Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization", Engineering Computations, Vol. 29, Issue 5, pp. 464-483.

- Yang, X.S. (2010) "A new metaheuristic bat-inspired algorithm, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization", NISCO 2010, Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, Vol. 284, pp. 65–74.

- Yang, X.S. (2011) "Bat algorithm for multi-objective optimization", International Journal Bio-Inspired Computation, Vol. 3, pp. 267-274.

- Yang, X.S. (2008) "Nature-inspired metaheuristic algorithms", 1stEdition, Luniver Press.

- www.mathworks.com/matlabcentral.