حل مسئله مکانیابی – مسیریابی هاب برای شبکه مرسولات پستی برون‌شهری با رویکرد ترکیبی

مقاله علمی – پژوهشی

شهریار افندی زاده *، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود احمدی نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سعیده عبدلی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمید بیگدلی‌راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۱۸-۱

چکیده

یکی از مسائل مهم در صنعت حمل‌ونقل، طراحی شبکه تحویل بسته‌های پستی (شبکه پستی) می‌باشد. شبکه پستی شبکه‌ای است که در آن، جریان مرسولات توسط حامل‌های بار از چندین مبدأ جمع‌آوری‌شده و به هاب‌ها انتقال داده می‌شوند؛ در مرحله آخر، بسته‌های پستی توسط حامل‌های بار به مقصد نهایی ارسال می‌شوند. به‌منظور ارائه این خدمت، هاب‌ها جهت پردازش مرسولات مکان‌یابی شده و مسیرهای محلی جهت برداشت و توزیع بسته‌ها در هاب‌ها برنامه‌ریزی می‌شوند. این مسئله با عنوان مسئله مکانیابی-مسیریابی شناخته می‌شود. پژوهش حاضر به دنبال مکان‌یابی هاب و مسیریابی حامل‌های بار در مقیاس بین‌شهری و در سطح کشور ایران می‌باشد. برای این منظور، ابتدا مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی هاب‌ها و مسیریابی حامل‌های بار ارائه‌شده و ازآنجاکه مسئله مکانیابی-مسیریابی در دسته‌بندی مسائل پیچیده با ابعاد بزرگ قرار می‌گیرد، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل آن استفاده گردیده است. در پژوهش حاضر، با ادغام دو الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به حل مسئله مکانیابی-مسیریابی پرداخته‌شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام دو الگوریتم PSO و GA نسبت به حالتی که تنها از یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله استفاده شود پاسخ بهتری ارائه می‌دهد. شایان‌ذکر است که از داده‌های شرکت تیپاکس جهت مکان‌یابی هاب‌ها و مسیریابی مسیرهای محلی استفاده گردیده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی شبکه پستی، مسئله مکان‌یابی_مسیریابی هاب

۱-مقدمه

حمل‌ونقل کالا در اقتصاد هر کشور نقشی اساسی دارد و یک فعالیت مهم است که با حمل و تحویل به‌موقع مواد اولیه و کالاهای نهایی به صنایع و مشاغل تجاری کمک می‌کند؛ بنابراین تأثیر زیادی بر عملکرد کلی شرکت‌های تولیدی و همچنین هزینه‌های نهایی محصولات دارد. با توسعه سریع علوم رایانه، روش سنتی مدیریت تدارکات دیگر مطابق با نیازهای فناوری در جامعه مدرن و معاصر نیست؛ بنابراین، یک سیستم بهینه‌سازی لجستیک مبتنی بر فناوری شبکه رایانه‌ای برای توسعه صنعت لجستیک موردنیاز است. ازاین‌رو ارائه‌دهندگان خدمات حمل کالا باید مرتباً با ایجاد تغییراتی در برنامه‌های موجود در سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی، فرایند حمل‌ونقل را مجدداً طراحی کرده و بهبود بخشند. از طرفی، شبکه حمل‌ونقل پست به دلیل استفاده از تنوع وسایل نقلیه، تعدد مسیرهای ارتباطی، وصول و ایصال مرسولات مختلف دارای پیچیدگی خاص خود می‌باشد که ساختار مناسب خود را طلب می‌کند. ازاین‌رو، تأمین بیشترین تقاضا و

یا جابه‌جایی بیشترین تعداد بسته پستی با کمترین هزینه، به هدف اصلی بهینه‌سازی تبدیل‌شده و تحقیق در مورد مسئلهٔ مکان‌یابی–مسیریابی در سیستم پستی حائز اهمیت می‌باشد. در طراحی شبکه‌های پستی با دو مسئله مواجه هستیم، اول بهینه‌سازی ترکیبی برای مکان‌یابی هاب‌ها و دوم تعیین مسیرهای وسایل نقلیه حمل بسته‌ها میان هاب‌ها. مدت‌زمان طولانی است که به این دو نوع تصمیم به‌صورت جداگانه پرداخته‌شده است، اما پیشرفت مداوم در تکنیک‌های بهینه‌سازی باعث شده است که رویکردهای یکپارچه‌ای به نام مسائل مسیریابی مکان‌یابی (LRP) شناخته شوند (Afandizadeh Zargari et al., 2019).

هم‌زمان با توسعه مدل‌های LRP، اغلب روش‌های حل به رویکردهای ابتکاری سلسله مراتبی متوسل می‌شوند که در هر تکرار یک مسئله مکان‌یابی و یک مسئله مسیریابی حل می‌شود(Abdi et al., 2020). در سال‌های اخیر، مطالعات و پژوهش‌های زیادی به بررسی مسئله مکان‌یابی–مسیریابی پرداخته‌اند. ترکیبی از ویژگی‌های مختلف، مانند ظرفیت وسایل نقلیه، طول مسیرها و پنجره‌های زمانی، منجر به ایجاد مسائل مکان‌یابی_مسیریابی مختلف شده است که تصمیم‌گیری درباره آن‌ها بستگی به نوع مسئله و محدودیت‌های آن دارد (Afandizadeh and Rad, 2021). تابه‌حال سه مقاله مسائل مکان‌یابی_مسیریابی را مرور و دسته‌بندی کرده‌اند (Drexl and Schneider ، Prodhon and Prins 2014 ،2015 Cao, Wang et al. 2020). در ادامه به ارزیابی تعدادی از مطالعات صورت گرفته در حوزه موضوع مقاله حاضر پرداخته می‌شود. هوالی و همکارانش، یک مدل برنامه‌نویسی دوسطحی را برای یک مسئله مکان‌یابی– مسیریابی چند سطحی چند هدفه برای در سیستم اضطراری شهری ارائه داد. مسئله به دو سطح تجزیه می‌شود: هدف اول به حداکثر رساندن میزان کل زمان خدمت‌رسانی و هدف دوم به حداقل رساندن هزینه کلی شامل هزینه ثابت و متغیر تسهیلات و هزینه متغیر تحویل کالا است. هوالی برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته استفاده کرده است (Hua-li et al., 2011). در خدمات پستی، پیشرفت‌های عملیاتی منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌ها می‌شود. تلفیق شبکه یکی از مهم‌ترین برنامه‌های اقدام برای دستیابی به این هدف است که موجب افزایش کارایی شبکه می‌شود. در سال ۲۰۱۳ خدمات پستی ایالات‌متحده برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها، تسهیلات مربوط به پردازش نامه‌ها را تلفیق کرد که منجر به بسته شدن حدود ۲۳٪ از این تسهیلات شد(Gattuso, 2013). تی ارنست و کریشنامورثی ویرایشی از مسئله‌ی میانه‌ی چند هابه را با هدف کاهش تعداد متغیرها در مسئله ارائه داد که به‌صورت فرمولاسیونی با متغیرهای سه زیرنویسه بوده و آن را مناسب حل مسائل با ابعاد بزرگ می‌کرد. بروز شبکه پست استرالیا با ۲۰۰ گره و ۱۰ هاب را با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل کرد، درحالی‌که مطالعات پیش از آن، حداکثر روی مکان‌یابی ۲۵ گره انجام‌شده بود (Ernst and Krishnamoorthy, 1996). برونز و همکاران، مسئله شبکه‌های خدمات پستی را بررسی کرد. اگرچه مشکل اصلی LRP چندمرحله‌ای است، اما با تعیین مکان مراکز پردازش بسته و اختصاص پایگاه تحویل به مراکز پردازش بسته، مسئله موردنظر به LRP تبدیل می‌شود. مشتریان به مناطق مختلفی تقسیم می‌شوند و هزینه‌های مسیریابی برای هر منطقه تقریبی است. به‌این‌ترتیب، LRP به یک مشکل مکان‌یابی تقلیل می‌یابد، درحالی‌که که هدف، تصمیم‌گیری در مورد محل پایگاه‌های تحویل و اختصاص مناطق مشتری به پایگاه‌های تحویل است (Bruns et al., 2000).

ستینر و همکارانش، مسئله مکان‌یابی هاب و مسیریابی ترکیبی را در سیستم‌های تحویل پستی در نظر گرفت و یک روش حل دومرحله‌ای تکراری برای مسئله ایجاد نمود.

در مرحله اول، مکان هاب‌ها تعیین می‌شود و دفاتر پستی به هاب‌ها تخصیص می‌یابند. مرحله دوم مسیرهایی را در مناطق هابی ارائه می‌دهد که فاصله بین نقاط مورداستفاده در مسئله مکان‌یابی را تغییر می‌دهد. سپس این روش با به‌روزرسانی فواصل مورداستفاده در مکان‌یابی هاب بین دو مرحله تکرار می‌شود تا پیکربندی هابی سازگار با مسیر ایجاد شود(Çetiner et al., 2010). کامارگو و همکارانش، فرمول جدیدی برای مسئله MMLRP ارائه کرد که توسط الگوریتم تجزیه تقاطعی ویژه طراحی‌شده است.

روش پیشنهادی به‌اندازه کافی قوی است تا نمونه‌هایی از ۱۰۰ گره را که دارای ٤ میلیون متغیر عدد صحیح هستند حل کند (Camargo et al., 2013).

در جدول ۱ و ۲ مقاله‌های مطالعه شده به‌صورت خلاصه گزارش‌شده است.

جدول ۱. خلاصه مقالات مکان‌یابی_مسیریابی با تمرکز بر نوع مسئله و تابع هدف

شماره	نویسنده	سال	نوع مسئله			تابع هدف								
			مکان‌یابی	مسیریابی	مکان‌یابی – مسیریابی	تعداد توابع هدف		کمینه‌سازی						بیشینه‌سازی
						یک هدفه	چندهدفه	مسافت پیموده شده	تعداد وسایل نقلیه	هزینه ثابت، حمل‌ونقل و مسیریابی	مصرف سوخت و انتشار آلاینده	زمان سفر		میزان عرضه به مشتریان
۱	Ocampo, et al.	۲۰۲۱			*									
۲	Zarandi, et al.	۲۰۱۳			*	*		*		*				
۳	Ghatreh Samani, et al.	۲۰۱۷			*	*				*				
٤	Jarboui, et al.	۲۰۱۳			*	*				*				
٥	Bostel, et al.	۲۰۱٥			*	*				*				
٦	Ponboon, et al	۲۰۱٦			*	*				*				
۷	Guastaroba, et al.	۲۰۲۲			*	*				*				
۸	Toro Ocampoa, et al.	۲۰۱۷			*	*				*				
۹	M. Toroa, et al.	۲۰۱۷			*		*			*		*		
۱۰۰	Karimi, et al.	۲۰۱۸	*				*			*			*	
۱۱	Karimi, et al.	۲۰۱۸			*	*				*				
۱۲	Dukkanci, et al.	۲۰۱۹			*	*						*		
۱۳	Li, et al.	۲۰۱۹			*		*			*			*	
۱٤	Aslantaş, et al.	۲۰۲۲			*	*				*				

۲-روش پژوهش

در این پژوهش بر روی سیستم خدمات پستی تمرکز شده است و قصد دارد با حل یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دومرحله‌ای استاتیک در سطح ملی، مجموع هزینه‌های اعمال‌شده به سیستم پستی را بهینه‌سازی نماید. یک مسئله مهم در صنعت حمل‌ونقل، طراحی شبکه تحویل بسته (شبکه پستی) است، جایی که تسهیلات، وظیفه جمع‌آوری جریان از چندین مبدأ را دارند و آن‌ها را مجدداً به سایر تسهیلات محل تجزیه جریان انتقال داده و در مرحله آخر، بسته‌های آماده‌شده را به مقصد نهایی منتقل می‌کنند. به‌منظور ارائه این سرویس، تورهای محلی برای وسایل‌نقلیه تخصیص داده‌شده به هر یک از تأسیسات ایجاد می‌شود که پس از آن وظایف جمع‌آوری و تحویل را بر عهده دارند. در این مطالعه تلاش می‌شود از طریق حل مسئله مکان‌یابی- مسیریابی، یک شبکه‌ی پستی به‌گونه‌ای طراحی شود که:

۱) هزینه کل حمل بسته‌ها کمینه شود؛

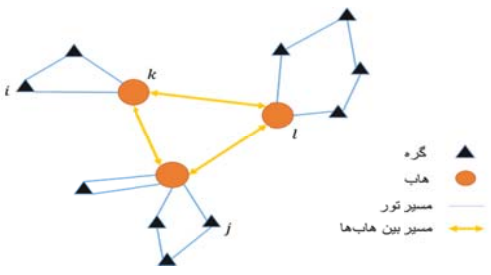
۲) حداقل تعداد ناوگان ممکن به‌کاربرده شود.

در این مسئله، هر گره نشان‌دهنده یک منطقه پستی است که هم جریان جمع‌آوری و هم تحویل در آن نیاز به مدیریت دارد. این جریان‌ها مربوط به حجم بسته‌ها یا نامه‌ها می‌باشند و می‌توانند بین هر دو گره در شبکه مبادله شوند. در شبکه موردمطالعه، به‌جای اتصال مستقیم بین دو گره، بسته‌ها در هاب‌ها ادغام‌شده، مرتب‌سازی و گروه‌بندی شده و سپس به مقاصد مختلف ارسال می‌شوند. به‌منظور کاهش تعداد وسایل نقلیه مورداستفاده در سیستم و افزایش کارایی، مسیرهای محلی

بین گره‌های غیر هاب برای جمع‌آوری و تحویل بسته‌ها یا نامه‌ها به‌جای ارتباط مستقیم بین گره‌های غیر هاب و هاب، ایجاد می‌شود. در سیستم‌های خدمات پستی، بسته‌های جمع‌آوری‌شده در منطقه مربوط به یک گره غیرهابی، ممکن است در همان منطقه یا مکانی دیگر توزیع شود. این موضوع نشان می‌دهد که جریان ممکن است به یک هاب ارسال شده، مرتب‌سازی شود و سپس به همان منطقه پستی (همان گره) برگردانده شود. بر اساس توضیحات فوق، شبکه HLRP در سیستم‌های خدمات پستی را می‌توان به‌صورت شکل ۱ نشان داد.

جدول ۲. خلاصه مقاله‌های مکان‌یابی_مسیریابی با تمرکز بر روش حل مسئله و نوع داده‌های مورداستفاده

شماره	نویسنده	سال	روش حل مسئله									داده‌های مسئله		
			دقیق	ابتکاری	فرا ابتکاری									
					الگوریتم ژنتیک	الگوریتم کلونی مورچگان	الگوریتم ازدحام ذرات	ممنوعه	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید		همسایگی	واقعی	تولیدشده	برگرفته از ادبیات
۱	Ocampo, et al.	۲۰۲۱	*										*	
۲	Zarandi, et al.	۲۰۱۳							*				*	
۳	Ghatreh Samani, et al.	۲۰۱۷		*	*				*				*	
٤	Jarboui, et al.	۲۰۱۳		*							*			
٥	Bostel, et al.	۲۰۱٥			*							*		
٦	Ponboon, et al	۲۰۱٦		*									*	
۷	Bahrami, et al.	۲۰۱۷			*				*			*		
۸	Toro Ocampoa, et al.	۲۰۱۷	*											*
۹	M. Toroa, et al.	۲۰۱۷	*										*	
۱۰	Karimi, et al.	۲۰۱۸	*									*	*	
۱۱	Karimi, et al.	۲۰۱۸	*									*		
۱۲	Dukkanci, et al.	۲۰۱۹	*	*								*		
۱۳	Li, et al.	۲۰۱۹	*										*	
۱٤	Aslantaş, et al.	۲۰۲۱		*								*	*	



شکل ۱. نمایش یک شبکه HLRP

با توجه به توضیحات فوق، هدف این پژوهش ارائه و بحث در مورد HLRP و ارائه یک مدل ریاضی برای آن با در نظرگیری مفروضات خاص و یک روش فرا ابتکاری کارآمد به‌منظور حل یک نمونه واقعی است که در آن برای تحقق اهداف اقتصادی باید متغیرهای زیر به‌صورت بهینه تعیین شوند:

– چه تعداد وسیله نقلیه باید به کار گرفته شود؟

– کدام‌یک از مراکز پستی به‌عنوان هاب در نظر گرفته شوند؟
– هر وسیله نقلیه به کدام شهرها خدمت‌رسانی کند؟
– مسیر بهینه دریافت و توزیع مرسولات برای هر وسیله نقلیه به چه صورت باشد؟

۲-۱- فرض‌های مسئله

این مقاله، مدل‌سازی مسئله HLRP را بر اساس فرض‌های زیر انجام می‌دهد.
–انبارهای بالقوه برای هاب‌ها مشخص می‌باشد.
– مبدأ و مقصد مرسولات مشخص می‌باشد.
– تقاضای هر شهر به‌صورت تعداد و وزن حجمی مرسولات مشخص است.
– نوع و ظرفیت وسایل نقلیه مورداستفاده مشخص است.
– فاصله جاده‌ای میان مبدأ–مقصدها با واحد کیلومتر مشخص می‌باشد.
– مرسولات بین هر جفت مبدأ–مقصد فقط توسط یک وسیله نقلیه و به‌صورت کامل (نه چندبخشی) ارسال می‌شود.
–هزینه تجهیز هاب‌ها و هزینه اجاره وسایل نقلیه به‌صورت یک هزینه ثابت در نظر گرفته‌شده است.

۲-۲- تعریف پارامترها

نمادها و علائمی که در این بخش استفاده می‌شوند در جداول ۳ و ٤ تعریف شده است.

جدول ۳. نمادهای معرف اطلاعات شبکه

G	مجموعه (N', A) = G نشان‌دهنده‌ی شبکه پستی می‌باشد.
N'	مجموع تمام گره‌ها
H	تعداد کل هاب‌ها
N	گره‌های غیرهابی
ω_{ij}	یک ماتریس جریان از حجم مرسولات جمع‌آوری‌شده از مرکز پستی i و ارسال آن به مقصد مرکز پستی j
$d_{i,j}$	فاصله اقلیدسی یا کوتاه‌ترین مسیر در شبکه جاده‌ای بین گره i و j
F_K	هزینه ثابت تجهیز هاب
V	وسایل نقلیه
α	هزینه حمل‌ونقل بین هاب‌ها به فاصله کمان و حجم بسته منتقل‌شده بستگی دارد که برای در نظر گرفتن آن، با نرخ تنزیل α کاهش می‌یابد تا مقیاس اقتصادی مسئله را منعکس کند.
λ	افزایش وزن نسبی مؤلفه هزینه مسیریابی محلی

جدول ٤. نمادهای معرف متغیر تصمیم در مدل HLRP

c_{ik}	هزینه مدیریت حجم ورودی و خروجی گره i∈N توسط هاب k∈H
Y_{ijkl}	متغیری است که عبور جریان از گره i به گره j از طریق هاب K و L را نشان می‌دهد. $(i \to k \to l \to j)$
z_{ik}	متغیر تخصیص گره i به هاب k می‌باشد. اگر گره i به هاب k تخصیص داده شود، مقدار آن برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.
x_{ij}^{v}	یک متغیر باینری با سه شاخص برای جریان وسیله نقلیه می‌باشد. اگر کمان (i , j) توسط وسیله نقلیه v طی شود، مقدار متغیر برابر با ۱ بوده و در غیر این صورت ۰ است.
U_{iv}	متغیر کمکی برای حذف تورهای فرعی

۲-۳-مدل ریاضی HLRP

مدل مسئله HLRP که از مقاله باستل و همکارانش (Bostel et al. 2015) اقتباس شده دارای یک تابع هدف و ۱۵ محدودیت می‌باشد. تابع هدف مدل پیشنهادی این مقاله، کمینه‌کردن هزینه‌هایی است که شبکه پستی محتمل می‌شود. این هزینه‌ها مجموع پنج عبارت زیر هستند:

- هزینه‌های ثابت عملیاتی هاب
- هزینه مدیریت گره‌ها (هزینه تخصیص گره‌ها به هاب‌ها)
- هزینه حمل‌ونقل بین هاب‌ها
- هزینه حمل‌ونقل تورهای محلی
- هزینه ثابت وسایل نقلیه.

روابط شماره ۱ تا ۱٤، مدل ریاضی HLRP را نشان می‌دهند. محدودیت‌های مدل HLRP را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد؛ محدودیت‌های مرتبط با مسئله HLP و محدودیت‌های مرتبط با مسئله VRP.

دسته اول) محدودیت‌های مرتبط با مسئله HLP (محدودیت (۲) تا (۵))

محدودیت‌های (۲) و (۳) اطمینان حاصل می‌کند که هر گره حتماً به یک هاب تخصیص داده شود. همچنین معین می‌سازند که یک گره غیر هابی در صورتی می‌تواند به یک هاب تخصیص یابد که آن هاب، تأسیس شده باشد. به‌عبارتی‌دیگر، اگر یک گره از مکان‌های بالقوه به‌عنوان هاب انتخاب شود، در آن صورت یک گره غیرهابی می‌تواند به آن تخصیص یابد.

محدودیت‌های (٤) و (۵) همبستگی بین متغیرهای تخصیص و متغیرهای جریان را نشان می‌دهند. یعنی اگر یک گره غیر هابی به یک هاب تخصیص داده شود، تمام جریانات از / به این گره غیرهابی باید از همان هاب عبور کنند. برای مثال اگر گره $i \in N$ به هاب $k \in H$ تخصیص داده شود، تبادل جریان بین هر جفت مبدأ_مقصد i و j تنها در صورتی امکان‌پذیر می‌باشد که از هاب k عبور نماید.

دسته دوم) محدودیت‌های (٦) تا (١٦) مرتبط با مسئله VRP می‌باشند.

محدودیت (٦) تعداد کل گره‌هایی که توسط هر تور خدمت‌رسانی خواهد شد را محدود می‌کند. این محدودیت از طولانی شدن مسیر یک تور بیش‌ازحد مجاز جلوگیری می‌کند.

محدودیت (۷)، محدودیت حفظ جریان است که تضمین می‌کند هر گره به‌طور مداوم توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌رسانی شود. قید (۸) ارتباط بین متغیرهای مکان‌یابی و متغیرهای مسیریابی محلی است. این قید مشخص می‌کند که یک گره تنها در صورتی به یک هاب تخصیص داده می‌شود که یک وسیله نقلیه از آن هاب خارج شده و از آن گره عبور کند.

محدودیت (۹) نشان‌دهنده این است که هر گره فقط با یک وسیله نقلیه می‌تواند خدمت‌رسانی شود.

محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که هر وسیله نقلیه می‌تواند حداکثر یک‌بار در یک هاب استفاده شود.

محدودیت (۱۱) محدودیت حذف زیر تور (sub-tour) می‌باشد که از مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP) الهام گرفته شده است. در واقع سابقه بحث مسیریابی وسیله نقلیه به مسئله فروشنده دوره‌گرد باز می‌گردد که ابتدا در سده ۱۸ مسائل مربوط به آن توسط ویلیام همیلتون و چوریو مطرح شد و سپس در دهه ۱۹۳۰ شکل عمومی آن به‌وسیله ریاضیدانانی مثل کارل منگر از دانشگاه هاروارد و هاسلر ویتنی از دانشگاه پرینستون فرموله گردید. طرح مسئله به این صورت می‌باشد که فروشنده دوره‌گرد از یک نقطه به‌قصد بازدید از مشتری حرکت کرده و به نقطه شروع بازخواهد گشت. از هر مشتری فقط یک‌بار باید بازدید شود و هزینه‌ی سفر از مشتری i به j به مبلغ c_{ij} می‌باشد. کوتاه‌ترین (کم‌هزینه‌ترین) مسیر برای آنکه از تمام مشتریان بازدید شود کدام است؟

معادله (۱۲) بیان می‌کند که تورهای محلی نمی‌توانند بین دو گره هابی رخ دهند. لزوماً مسیرهایی که به‌عنوان بخشی از یک تور شناخته می‌شوند باید بین یک گره و یک هاب و یا بین دو گره ایجاد شوند. محدودیت‌های (۱۳) – (١٦) مقادیر متغیرهای z_{ik} ، x_{ij}^{v} و U_{iv} را تعریف می‌کنند.

$$\sum_{k\in H} F_k z_{kk} + \sum_{i\in N}\sum_{k\in H} c_{ik}\, z_{ik} + \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in H}\sum_{l\in H} \alpha\, d_{kl}\omega_{ij} Y_{ijkl} + \lambda \sum_{v\in V}\sum_{i\in N'}\sum_{j\in N'.i\neq j} d_{ij} x_{ij}^{v} + \sum_{v\in V}\sum_{k\in H}\sum_{i\in N} f\, x_{ki}^{v} \quad (۱)$$

$$z_{ik} \le z_{kk} \forall i \in N\,.\forall k \in H \quad (۲)$$

$$\sum_{k\in H} z_{ik} = 1.\forall i \in N \quad (۳)$$

$$\sum_{l\in H} Y_{ijkl} = z_{ik} \forall i \in N\,.\forall j \in N\,.\forall k \in H \quad (۴)$$

$$\sum_{k\in H} Y_{ijkl} = z_{jl} \forall i \in N\,.\forall j \in N\,.\forall l \in H \quad (۵)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in N'.\ i\neq j} x_{ij}^{v} \le q\,.\forall v \in V \quad (۶)$$

$$\sum_{i\in N'} x_{ij}^{v} - \sum_{j\in N'} x_{ji}^{v} = 0.\forall v \in V\,.\forall \in N' \quad (۷)$$

$$\sum_{u\in N'} (x_{ku}^{v} + x_{ui}^{v}) \le 1 + z_{ik}\,.\forall i \in N\,.\forall k \in H\,.\forall v \in V \quad (۸)$$

$$\sum_{u\in V}\sum_{j\in N'} x_{ij}^{v} = 1\,.\forall i \in N \quad (۹)$$

$$\sum_{i\in H}\sum_{j\in N} x_{ij}^{v} \le 1\,.\forall v \in V \quad (۱۰)$$

$$U_{iv} - U_{jv} + |N| x_{ij}^{v} \le |N| - 1\,.\forall v \in V.\forall i \in N\,.\forall j \in N \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\in H}\sum_{j\in H} x_{ij}^{v} = 0\,.\forall v \in V \quad (۱۲)$$

$$0 \le Y_{ijkl} \le 1\,.\forall i \in N.\forall j \in N.\forall k \in H.\forall l \in H \quad (۱۳)$$

$$z_{ik} \in \{0\,.1\}\,.\forall i \in N'.\forall k \in H \quad (۱۴)$$

$$x_{ij}^{v} \in \{0\,.1\}\,.\forall i \in N'.\forall j \in N'.\forall v \in V \quad (۱۵)$$

$$U_{iv} \ge 0.\forall i \in N.\forall v \in V \quad (۱۶)$$

۲-٤- حل مسئله

در بخش قبل مسئله مکان‌یابی هاب-مسیریابی شبکه پستی، در قالب یک مدل ریاضی مدل‌سازی شد. با توجه به اینکه مسائل LRP در دسته‌بندی مسائل پیچیده (Hard-NP) قرار می‌گیرند، برای حل آن‌ها در مقیاس بزرگ، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهاد می‌شود. این مقاله برای حل مدل ریاضی از دو الگوریتم فرا ابتکاری کمک می‌گیرد؛ الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO).

۲-٤-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، با الهام از فرآیند تکامل به حل مسائل بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم که روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی مقیّد و بدون قید می‌باشد، با هدف یافتن بهترین جواب ممکن برای یک مسئله، به جستجو در فضای جواب‌های کاندید می‌پردازد. پاسخ‌ها در الگوریتم ژنتیک، معمولاً با رشته‌هایی از اعداد نمایش داده می‌شوند که به آن‌ها کروموزوم گفته می‌شود.

یک کروموزوم به تعدادی ژن تقسیم‌بندی می‌شود و هر ژن بازنمایی الگوریتم ژنتیک از یک عامل کنترلی است. در مسئله HLRP طول کروموزوم، برابر با تعداد گره‌هایی که باید به آن‌ها خدمات‌رسانی شود، در نظر گرفته شده است.

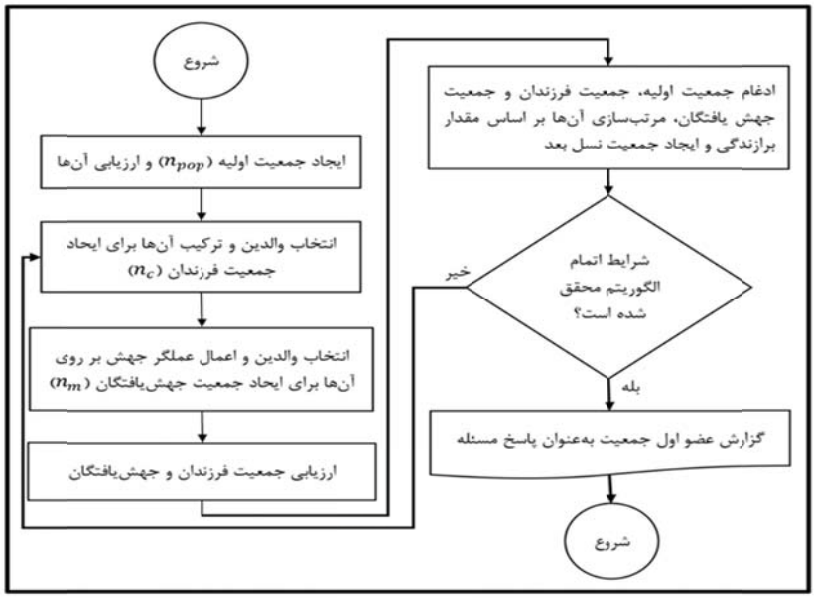
فرایند جست‌وجو و رسیدن به پاسخ بهینه در الگوریتم ژنتیک در شکل زیر نمایش داده‌شده است. در این فرایند ابتدا به صورت تصادفی مجموعه‌ای از پاسخ‌های ابتدایی که جمعیت اولیه نامیده می‌شود تولید شده و آن را با n_{pop} نمایش می‌دهند. پس از ارزیابی جمعیت اولیه، با استفاده از عملگر انتخاب، والدین انتخاب‌شده و با استفاده از عملگر زادوولد باهم ترکیب می‌شوند تا فرزندان آن‌ها که اصطلاحاً به نام جمعیت فرزندان یا n_c شناخته می‌شوند تولید شوند. در محله سوم با استفاده از عملگر انتخاب والدین جدید انتخاب شده و با استفاده از عملگر جهش، برخی از ژن‌های آن‌ها تغییر داده می‌شوند تا فرزند جدید ایجاد شوند. تعداد فرزندان به وجود آمده را اصطلاحاً جمعیت جهش‌یافتگان نامیده و با n_m نشان می‌دهند. در ادامه، تمام جمعیت‌های ایجادشده (جمعیت اولیه، فرزندان و جهش‌یافتگان) با یکدیگر ادغام‌شده یک جمعیت جدید ایجاد می‌شود. در مرحله پایانی شرط خاتمه الگوریتم بررسی می‌شود. اگر این شرایط محقق شده باشند، از الگوریتم خارج‌شده و عضو اول جمعیت به‌عنوان پاسخ بهینه مسئله معرفی می‌شود؛ در غیر این صورت، به مرحله ۲ (مرحله انتخاب والد و زادوولد) بازگردانده می‌شود. در شکل ۲ عملکرد کلی الگوریتم ژنتیک نمایش داده‌شده است.

۲-٤-۲- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

برای اجرای هر الگوریتم فرا ابتکاری تعدادی پارامتر باید در نظر گرفته شوند. تعیین پارامترها که باید با دقت بالایی صورت گیرد، می‌تواند باعث انعطاف‌پذیری و قدرتمندی بیشتر این الگوریتم‌ها شود. در الگوریتم ژنتیک باید سه پارامتر نرخ جهش، نرخ زادوولد و تعداد جمعیت اولیه تنظیم شوند. مقادیر تنظیم پارامترها بر اساس پژوهش صورت گرفته در مقاله (Rybičková, et al. 2016) برای حل مسئله LRP مطابق با مقادیر جدول ۵ در نظر گرفته‌شده است. همچنین در این تحقیق شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک، عدم‌تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم پس از چند تکرار متوالی می‌باشد.

جدول ۵. مقدار پارامترهای الگوریتم ژنتیک

مسئله	جمعیت اولیه	نرخ جهش	نرخ زاد و ولد
مکان‌یابی	۱۰۰	۰/۱	۰/۸
مسیریابی	۱۰۰	۰/۱۵	۰/۹



شکل ۲. عملکرد الگوریتم ژنتیک

۲-٤-۳-الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی قوی است که بر پایه هوش گروه‌ها استوار می‌باشد و از رفتار دسته‌جمعی پرندگان یا ماهی‌ها الهام گرفته‌شده است. شکل ۳، روند اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. در PSO هر راه‌حل واحد، معادل با یک پرنده در فضای جست‌وجو می‌باشد که ذره نامیده می‌شود. ابتدا گروهی از ذرات به‌صورت تصادفی پدید می‌آیند و با به‌روز کردن نسل‌ها به جست‌وجوی راه‌حل بهینه می‌پردازند. در هر مرحله، هر ذره با استفاده از دو مقدار بهینه به‌روز می‌شود. اولین مقدار، بهترین راه‌حل یا بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره به آن دست‌یافته باشد. موقعیت مذکور شناخته و ذخیره می‌شود که به آن بهترینِ شخص نیز گفته می‌شود و با $P_i.best$ نمایش داده می‌شود. مقدار بهینه دیگری که توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط همه ذرات جمعیت به‌دست‌آمده است و آن را بهینه سراسری نامیده و با $P_g.best$ نمایش می‌دهند (هوش جمعی). پس از یافتن این دو مقدار بهینه، سرعت و موقعیت ذرات با توجه به این مقادیر به‌روزرسانی می‌شود. برای به‌روزرسانی موقعیت هر ذره از رابطه استفاده می‌شود:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (۱۷)$$

در این رابطه، پارامتر $x_i(t+1)$، نشان‌دهنده موقعیت ذره iاُم را در تکرار $t+1$ و پارامتر $v_i(t+1)$ نشان‌دهنده سرعت ذره iاُم در تکرار $t+1$ می‌باشد.

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + r_1 c_1 \left(P_i.best - x_i(t)\right) + r_2 c_2 \left(P_g.best - x_i(t)\right) \quad (۱۸)$$

رابطه ۱۸برای محاسبه سرعت ذره مورداستفاده قرار می‌گیرد که در آن پارامتر w ضریب اینرسی می‌باشد. ضریب اینرسی، تمایل ذره برای ادامه دادن مسیر در همان سرعت پیشین را نشان می‌دهد. مقدار w باید کمتر از ۱ باشد و اصولا مقدار مناسب آن بین ۰/٤ الی ۰/۹ است. ضریب اینرسی هرچقدر کمتر باشد الگوریتم سریع‌تر همگرا شده و بیشتر شدن آن باعث بالا رفتن تعداد حرکت‌های ناگهانی ذرات خواهد شد. دو پارامتر $r_1.r_2$ بردارهایی به طول موقعیت هستند که به‌صورت اعدادی تصادفی بین ۰ و ۱ و با استفاده از توزیع یکنواخت احتمالی به وجود می‌آیند ($r_1.r_2 = U(0.1)$). پارامتر c_1 ضریب یادگیری شخصی و پارامتر c_2 ضریب یادگیری جمعی نامیده می‌شوند.

۲-٤-٤-پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی ازدحام ذرات، سه پارامتر باید تنظیم شوند؛ ضرایب اینرسی (w)، یادگیری شخصی (c_1) و یادگیری جمعی (c_1). برای تنظیم پارامترهای این الگوریتم از روش ضریب انقباض استفاده می‌شود. درروش ضریب انقباض، ابتدا دو پارامتر ϕ_1 و ϕ_2 مقداردهی می‌شوند. مقدار بهینه این دو پارامتر برابر با ۲/۰۵ است و در ادامه مطابق با رابطه ۲۱ پارامتر χ محاسبه می‌شود. درنهایت با استفاده از پارامتر χ و روابط ۲۲ تا ۲٤، مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم محاسبه می‌شود.

$$\phi_1 = \phi_2 = 2.05 \quad (۱۹)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = 4.1 \quad (۲۰)$$

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (۲۱)$$

$$w = \chi \quad (۲۲)$$

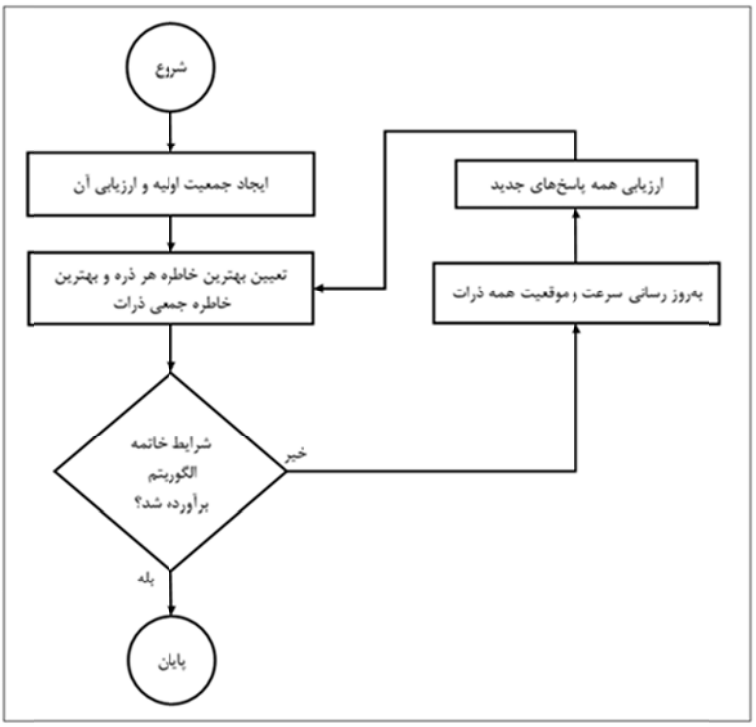
$$c_1 = \chi \times \phi_1 \quad (۲۳)$$

$$c_2 = \chi \times \phi_2 \quad (۲٤)$$

با توجه به روابط ۱۷ تا ۲۲، مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم PSO، در جدول ٦ گزارش می‌شود.

جدول ٦. مقدار پارامترهای الگوریتم PSO

	w	c_1	c_2
مقدار بهینه	۰/۷۲۹۸	۱/٤۹٦۲	۱/٤۹٦۲



شکل۳. عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

۲-۵- ادغام الگوریتم‌ها

در این پژوهش، دو الگوریتم ژنتیک و PSO جهت حل مسئله موردبررسی قرار گرفته‌اند. حل مدل بدین‌صورت خواهد بود که بخش مکان‌یابی با استفاده از یک الگوریتم و بخش مسیریابی با استفاده از الگوریتم دوم حل خواهد شد. درواقع هدف این پژوهش بررسی تأثیر روش ادغامی برای حل مسئله HLRP و مقایسه آن با رویکرد کلاسیک می‌باشد که این رویکردها در جدول ۷ نمایش داده شده است.

۲-۵-۱- رویکرد GA_GA

در رویکرد ژنتیک-ژنتیک پس از ایجاد جمعیت اولیه، عملگر بازترکیب بر روی پاسخ‌های اولیه مکان‌یابی هاب اعمال‌شده و فرزندان را تولید می‌کند. سپس عملگر جهش بر روی این فرزندان اجراشده و به‌صورت تصادفی تغییراتی را در آن‌ها ایجاد می‌نماید تا اعضای نسل جدید را تشکیل دهند. در مرحله بعدی، همین عملگرها بر روی پاسخ‌های بخش مسیریابی وسایل نقلیه نیز اعمال خواهد شد.

جدول ۷. رویکردهای حل مدل

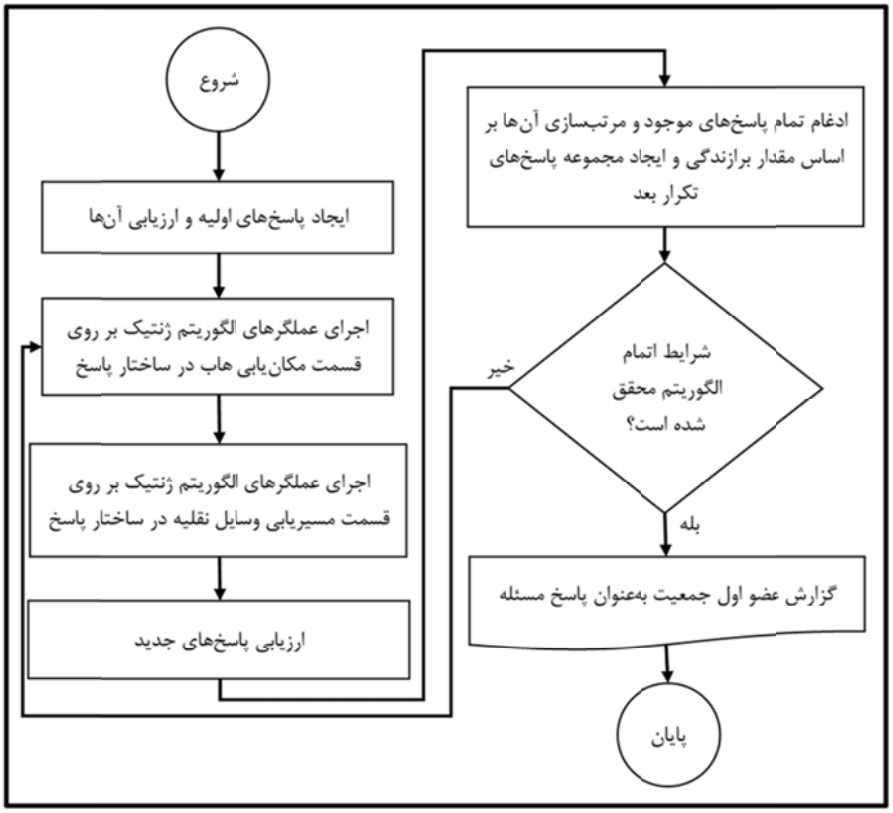
	نوع مسئله	
	مسیریابی	**مکان‌یابی**
رویکرد ۱	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ژنتیک
رویکرد ۲	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
رویکرد ۳	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
رویکرد ٤	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک

مطابق شکل ٤ پس از ارزیابی و ادغام پاسخ‌های جدید، برای نشان دادن توانایی‌های هر یک از پاسخ‌ها در مقایسه با دیگر پاسخ‌ها، به هریک از آن‌ها یک امتیاز برازندگی اختصاص داده می‌شود. والدین بر اساس مقدار برازندگی‌شان برای جفت‌گیری انتخاب‌شده و با استفاده از برنامه‌ای مشخص، فرزندان را تولید می‌کنند. بنابراین، جواب‌هایی که برازندگی بالاتری داشته باشند، فرصت بیشتری برای بازپروری و ایجاد فرزند دارند. بدین ترتیب، فرزندان ویژگی‌هایی از هریک از والدین را به ارث خواهند برد. ازآنجایی‌که اندازه جمعیت باید همواره ثابت بماند، هم‌زمان با جفت‌گیری والدین و تولید فرزندان، باید برای آن‌ها جای خالی ایجاد شود. درنتیجه، اعضای جمعیت می‌میرند و بهترین جواب‌های جدید جایگزین آن‌ها خواهند شد. به‌تدریج و پس از این‌که همه موقعیت‌های جفت‌گیری در جمعیت اولیه مورداستفاده قرار گرفت، نسل جدید جایگزین نسل قبلی می‌شود. با این روش می‌توان امیدوار بود که در طی نسل‌های متوالی، جواب‌های بهتر پیشرفت کنند درحالی‌که جواب‌های با عملکرد ضعیف‌تر به‌تدریج حذف می‌شوند.

در مرحله پایانی، درصورتی‌که شرط یا شروط اتمام الگوریتم محقق شده باشد، روند جست‌وجوی پاسخ بهینه متوقف‌شده و عضو اول جمعیت به‌عنوان پاسخ نهایی مسئله گزارش می‌شود؛ در غیر این صورت، مجدداً عملگرهای ژنتیک بر روی پاسخ‌ها اعمال‌شده و روند اجرا تا رسیدن به شرایط توقف تکرار می‌شود.

۲-۵-۲- رویکرد PSO_PSO

در شکل ۵ که نشان‌دهنده نحوه عملکرد رویکرد PSO-PSO می‌باشد، مشاهده می‌شود که ابتدا گروهی از ذرات به‌صورت تصادفی پدید می‌آیند و با به‌روز کردن نسل‌ها به جست‌وجوی راه‌حل بهینه می‌پردازند. در ادامه، هر ذره (پاسخ) با استفاده از دو مقدار بهینه به‌روز می‌شود؛ بهترینِ شخص ($P_i.best$) و مقدار بهینه سراسری ($P_i.best$).

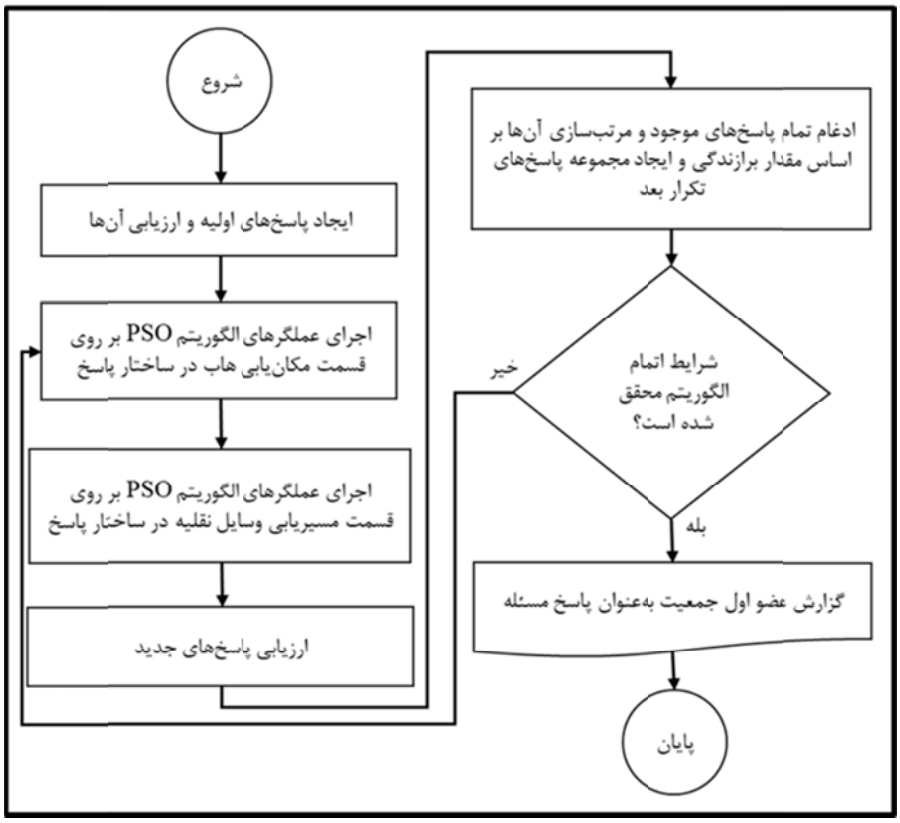


شکل٤. عملکرد رویکرد GA_GA

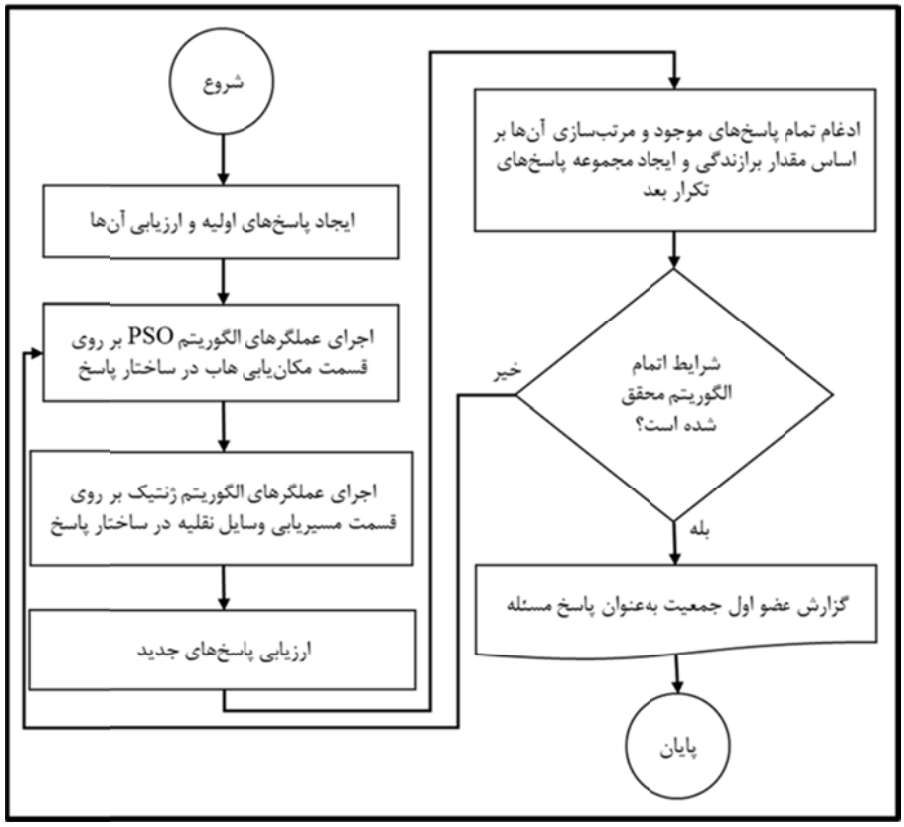
عمل به‌روزرسانی ابتدا بر روی بخش مکان‌یابی هاب و سپس بر روی بخش مسیریابی وسایل نقلیه اعمال می‌شود. در مرحله بعدی پاسخ‌های جدید ارزیابی‌شده و ادغام می‌شوند. به هریک از این پاسخ‌ها بر اساس فاصله آن‌ها تا جواب بهینه، یک مقدار برازندگی اختصاص داده‌شده و بر اساس مقدار برازندگی‌شان، مرتب‌سازی خواهند شد. درنتیجه مجموعه‌ای از پاسخ‌های جدید تولید می‌شود. در این مرحله، شرایط پایان الگوریتم بررسی‌شده و در صورت احقاق شرایط، عملکرد الگوریتم متوقف خواهد شد؛ در غیر این صورت، عملگرهای مذکور مجدداً بر روی پاسخ‌ها اعمال‌شده و پاسخ‌های جدید ایجاد می‌شوند.

۲-۵-۳- رویکرد PSO_GA

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق، رویکرد جدیدی جهت حل مسئله HLRP با استفاده از ادغام الگوریتم‌های فرا ابتکاری موردبررسی قرارگرفته است. نحوه اجرای رویکرد اول که در شکل ٦ نمایش داده‌شده است، بدین‌صورت می‌باشد که ابتدا گروهی از پاسخ‌ها به‌صورت تصادفی پدید می‌آیند. سپس عملگرهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی پاسخ‌های مسئله مکان‌یابی هاب و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک بر روی پاسخ‌های مسئله مسیریابی وسایل نقلیه اعمال خواهد شد. مرحله بعدی اقدام به ارزیابی پاسخ‌های تولیدشده می‌پردازد. در ادامه پاسخ‌های جدید با یکدیگر ادغام‌شده، به هریک از آن‌ها یک مقدار برازندگی داده‌شده و بر اساس این مقدار مرتب‌سازی می‌شوند. درنتیجه، مجموعه پاسخ جدیدی ایجاد خواهد شد. درصورتی‌که شرایط توقف الگوریتم محقق شده باشد، عضو اول جمعیت به‌عنوان پاسخ نهایی مسئله گزارش می‌شود و در غیر این صورت، مطابق روند ذکرشده، عملگرهای الگوریتم بر روی پاسخ‌های جدید اجرا خواهند شد. سپس مراحل قبلی تا جایی تکرار می‌شود که الگوریتم به شرایط توقف برسد.



شکل۵. عملکرد رویکرد PSO_PSO



شکل ٦. عملکرد رویکرد PSO_GA

٤-٥-٢- رویکرد GA-PSO

عملکرد الگوریتم GA-PSO که در شکل ٦ نمایش داده‌شده است مشابه عملکرد رویکرد PSO-GA می‌باشد؛ با این تفاوت که در این رویکرد، برخلاف GA-PSO عملگرهای الگوریتم ژنتیک بر روی پاسخ‌های مسئله مکان‌یابی هاب و عملگرهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی پاسخ‌های مسئله مسیریابی وسایل نقلیه اعمال خواهد شد. روند اجرای الگوریتم نیز تا احقاق شرایط توقف ادامه خواهد داشت.

٢-٦- شرط توقف الگوریتم‌ها

شرط خاتمه الگوریتم، عدم‌تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم پس از ۲۰ تکرار متوالی بعد از ۳۰۰ تکرار است. یعنی چنانچه بعد از ۲۰ تکرار متوالی پاسخ نهایی ثابت بماند، الگوریتم متوقف خواهد شد؛ در غیر این صورت الگوریتم تا ۳۰۰ تکرار اجرا شده و سپس متوقف خواهد شد.

۳- مطالعه موردی

این مقاله برای بهینه‌سازی شبکه پستی از داده‌های واقعی مرسولات پستی برون‌شهری شرکت تیپاکس، بزرگ‌ترین شرکت پست خصوصی ایران استفاده می‌کند. شرکت تیپاکس داده‌های مربوط به تعداد بسته‌ها، وزن حجمی و وزن جرمی مرسولات پستی بین هر جفت مبدا-مقصد را در مدت‌زمان یک سال (از مهرماه ۱۳۹۹ تا شهریورماه ۱٤۰۰) و به تفکیک ماه، در اختیار نویسندگان این پژوهش قرار داده است. همچنین این شرکت، نوع ناوگان برون‌شهری را کامیونت‌های با ظرفیتی معادل ۵۰۰ بسته به ازای هر ناوگان معرفی نموده است. به علت عدم دسترسی به برخی از داده‌ها، مقدار آن‌ها مطابق با دیگر مقالات فرض شدند. این داده‌ها در جدول ۸ گزارش شدند. همچنین ماتریس فواصل زمینی میان ٤۱۸ شهر ایران تهیه‌شده است و به هر شهر یک کد اختصاص داده‌شده که با کد شهرهای موجود در داده‌های مبدا-مقصد، یکسان‌سازی شده

است. این شهرها به‌عنوان مشتریان (گره‌ها) در نظر گرفته‌شده‌اند. ۳۱ شهر نیز به‌عنوان مکان‌های بالقوه برای تأسیس هاب در نظر گرفته‌شده‌اند (لازم به توضیح است که گرچه تعیین مکان‌های بالقوه برای تأسیس هاب‌ها، خود نیازمند حل یک مسئله بهینه‌سازی و مدیریتی می‌باشد، ولی در اینجا مراکز استان‌ها برای هاب‌ها در نظر گرفته‌شده است). با توجه به عدم‌کفایت داده‌های دریافت شده از شرکت تیپاکس، مقادیر برخی از پارامترهای مدل، مطابق با پژوهش صورت گرفته توسط باستل و دجاکس به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است (Bostel et al. 2015). فرض شده است که هزینه تخصیص گره i به هاب k (c_{ik}) به فاصله میان آن‌ها (d_{ik}) و حجم مرسولات ورودی و خروجی به گره i بستگی دارد و از طریق رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود.

$$c_{ik} = d_{ik}(aO_i + bD_i) \quad (۲۵)$$

$$O_i = \sum_{j \in N} \omega_{ij} \quad (۲۶)$$

$$D_i = \sum_{i \in N} \omega_{ij} \quad (۲۷)$$

در روابط ۲۶ و ۲۷، O_i و D_i به ترتیب بیانگر حجم مرسولات خروجی و ورودی به گره i می‌باشند.

جدول ۸) مقادیر پارامترهای مدل

نام پارامتر	مقدار
نرخ تنزیل	$\alpha = 0/75$
هزینه عملیاتی	a = 3 b = 2
درصد وزن دهی مسیریابی	l = 100
هزینه ثابت تجهیز هاب	$F_K = 2800$
هزینه ثابت وسایل نقلیه	1000
هزینه حمل (تن-کیلومتر)	c = 1

٤- نتایج و تفسیر آن‌ها

بهینه‌سازی شبکه موردمطالعه ابتدا به‌صورت ماهیانه برای ۱۲ ماه و سپس به‌صورت یک برنامه‌ریزی سالیانه انجام‌شده است.

جدول ۹. پاسخ نهایی الگوریتم‌ها

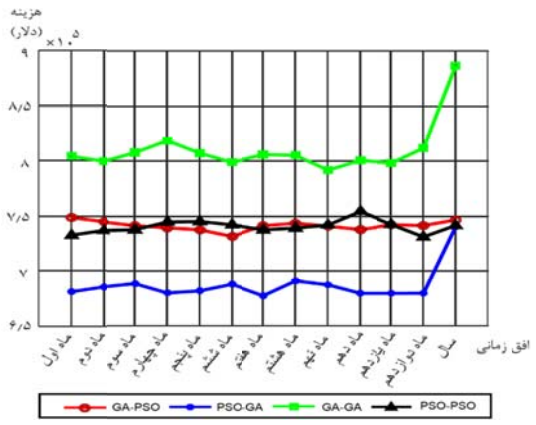
هزینه				
افق زمانی	GA_PSO_Result	PSO_GA_Result	GA_GA_Result	PSO_PSO_Result
ماه اول	۷٤۸/۸۰۱	٦۸۱/٤۰۹	۸۰٤/۳٤۸	۷۳۲/٦۱۷
ماه دوم	۷٤٤/۹۹٥	٦۸٥/۷۹۸	۷۹۹/۸٦۷	۷۳۷/۰۲٥
ماه سوم	۷٤۱/٥٤۹	٦۸۸/۷۲۹	۸۰۸/۰۹۲	۷۳۷/۸۱۱
ماه چهارم	۷۳۹/٦۷۳	٦۸۰/۲۸٦	۸۱۹/۱٦۲	۷٤٤/۹۱۲
ماه پنجم	۷۳۷/۸۳۲	٦۸۲/۱۸۱	۸۰۷/٦۳۱	۷٤٥/۳۱٦
ماه ششم	۷۳۱/۹۱۹	٦۸۸/۱۸٤	۷۹۹/۲٦٦	۷٤۲/۳۸۲
ماه هفتم	۷٤۱/٥٥۳	٦۷۲/٦٦۳	۸۰٦/۳٥۱	۷۳۷/۷۹۲
ماه هشتم	۷٤۳/۷۳۸	٦۹۱/۲٦۰	۸۰٥/٦۲۸	۷۳۹/۳۰٤
ماه نهم	۷٤۱/۱۷٤	٦۸۷/٦۲۷	۷۹۲/۰٤٥	۷٤۲/۲۰٦
ماه دهم	۷۳۸/۰۱۹	٦۷۹/۹۰۳	۸۰۱/۱۸۱	۷٥٤/٥۲٥
ماه یازدهم	۷٤۲/٤۳۹	٦۷۹/۸۸٦	۷۹۸/٤۷۹	۷٤۲/٥۸
ماه دوازدهم	۷٤۱/٦٥۷	٦۷۹/۹٦۳	۸۱۲/۳۷۰	۷۳۱/۲۳۱
سال	۷٤٦/۷۸٤	۷٤۰/٦۲۷	۸۸۷/۱۰٦	۷٤۱/۸۱۳

در شکل ۷ پاسخ نهایی چهار رویکرد حل مسئله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این شکل اعداد جدول ۹ را در قالب نمودار گزارش می‌دهد. هریک از نقاط روی نمودار نمایش‌دهنده‌ی هزینه نهایی شبکه پستی در افق زمانی مشخص می‌باشد.

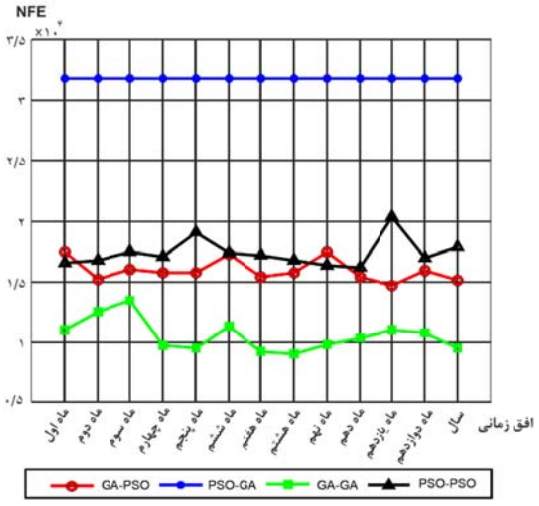
همان‌طور که قابل مشاهده است، حل مسئله HLRP از طریق رویکردهای ادغام الگوریتم‌ها، پاسخ نزدیک‌تری به مقدار بهینه را ارائه می‌کند. همچنین رویکرد PSO_GA نسبت به رویکرد GA_PSO عملکرد بهتری را گزارش داده است. درواقع می‌توان گفت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله مکان‌یابی هاب و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مسیریابی پاسخ بهتری را ارائه می‌دهند.

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، معیار NFE می‌باشد که درواقع مقدار میانگین تعداد ارزیابی‌های تابع تا رسیدن به معیار توقف در هر اجرا است. مقدار NFE برای اجرای هر رویکرد در شکل ۸ نمایش داده‌شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که رویکرد PSO_GA که در برآورد هزینه نهایی، اختلاف قابل‌توجهی نسبت به رویکردهای دیگر ارائه داده بود، به تعداد دفعات بیشتری برای ارزیابی الگوریتم و رسیدن به پاسخ بهینه نیازمند می‌باشد. ازاین‌رو می‌توان گفت اگر معیار انتخاب NFE باشد، روش کلاسیک ژنتیک_ژنتیک عملکرد بهتری خواهد داشت. اختلاف هزینه‌ی نهایی به‌قدری چشمگیر می‌باشد که می‌توان گفت درمجموع روش ادغامی عملکرد بهتری نسبت به روش کلاسیک داشته و پاسخ نزدیک‌تری به پاسخ بهینه را برای مسئله HLRP ارائه می‌دهد.

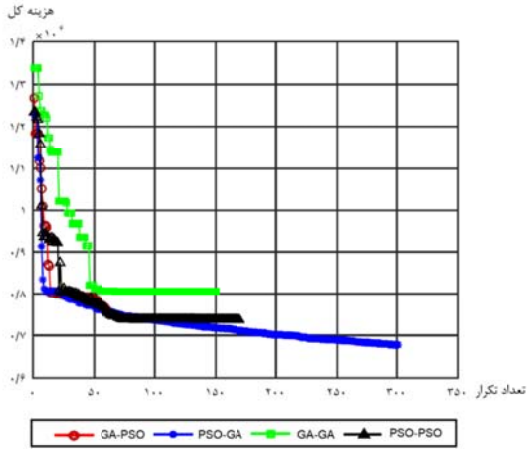
در شکل ۹ روند همگرایی پاسخ الگوریتم‌ها در یک ماه نمایش داده شده است. در رویکردهای GA_GA، PSO_PSO و GA_PSO پس از حدود ۱۵۰ تکرار، شرط توقف الگوریتم حاصل شده و روند بهینه‌سازی متوقف شده است. این در حالی است که در رویکرد PSO_GA ، روند بهینه‌سازی تا تکرار ۳۰۰ که شرط توقف الگوریتم می‌باشد، ادامه دارد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که جست‌وجوی پاسخ بهینه در رویکرد PSO-GA بهتر انجام شده و پاسخ این الگوریتم به پاسخ نهایی نزدیک‌تر می‌باشد.



شکل ۷. پاسخ نهایی الگوریتم‌ها



شکل ۸. مقدار NFE الگوریتم‌ها



شکل ۹. همگرایی الگوریتم‌ها

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بهینه‌سازی مسئله مکان‌یابی-مسیریابی هاب که یکی از مسائل مطرح در دهه‌های اخیر درزمینهٔ زنجیره تأمین می‌باشد، پرداخته است. مسئله HLRP به‌طور خاص برای شبکه پستی و با در نظرگیری محدودیت‌های مختص آن حل گردیده است. از آن‌جا که پاسخ دو مسئله مکان‌یابی هاب و مسیریابی بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند، به‌صورت یک مدل ادغامی مدل‌سازی و سپس با دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل شدند. همچنین مدل ریاضی به روش کلاسیک، یعنی استفاده از تنها یک الگوریتم برای حل دو مسئله نیز حل گردیده و سپس پاسخ نهایی رویکردها با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج نشان دادند که روش ادغامی عملکرد بهتری نسبت به روش کلاسیک یا تک الگوریتمی دارد. با مقایسه دو رویکرد ادغامی و برتری رویکرد PSO_GA نسبت به رویکرد GA_PSO مشاهده شد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات عملکرد بهتری در حل مسئله مکان‌یابی هاب و الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری در حل مسئله مسیریابی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پاسخ نهایی بهینه‌سازی شبکه با حل مسئله HLRP به الگوریتم فرا ابتکاری وابسته است. بنابراین در مطالعات آینده می‌توان این مسئله را با استفاده از دیگر الگوریتم‌ها بررسی نموده و عملکرد روش‌های ادغامی را با یکدیگر مقایسه نمود.

٦- پی‌نوشت‌ها

1. 1. Location Routing Problem (LRP)
2. Various Neighborhood Search (VNS)
3. 3 Echelon Location Routing Problem (3E_LRP)
4. Capacitated Locatin Routing Problem (CLRP)
5. Location - Routing Problem with Simultaneous
6. Pickup and Delivery (LRPSPD)
7. Travelling Salesman Problem (TSP)
8. Genetic Algorithm (GA)
9. Particle Swarm Optimization (PSO)
10. Hub Location Problem (HLP)
11. Number of Function Evaluation (NFE)

۷- مراجع

-Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H. (2020). Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis. Journal Of Transportation Research, 17(3), 33-44.

-Afandizadeh Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker,H. (2019). Using Optimization and Metaheuristic Method to Reduce the Bus Headway (Case Study: Qazvin Bus Routes). Quarterly Journal of Transportation Engineering, 10(4), 833-849.

-Afandizadeh, S., & Rad, H. B. (2021). Developing A Model to Determine the Number of Vehicles Lane Changing on Freeways by Brownian Motion Method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.

-Aslantaş, E., & Yavuz, Y. (2022). İki Kademeli Lokasyon-Rotalama Problemi İçin Bütünleşik Matematiksel Model Ve Kamuda Bir Uygulama. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 20(45), 523-556.

-Bostel, N., Dejax, P., & Zhang, M. (2015, October). A Model and A Metaheuristic Method for The Hub Location Routing Problem and Application to Postal Services. In 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), *IEEE*, 1383-1389.

-Bostel, N., Dejax, P., And Zhang, M. (2015). A Model and A Metaheuristic Method for The Hub Location Routing Problem and Application to Postal Services. 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 1383-1389.

-Bruns, A., Klose, A., & Stähly, P. (2000). Restructuring Of Swiss Parcel Delivery Services: Restrukturierung Der Schweizer Paketpost. *OR-Spektrum*, 22, 285-302.

-Cao, J., Wang, X., Li, B., And Gao, J. (2020). The Location-Routing Problem: A Review". CICTP 2020, 4500-4511.

-Jarboui, B., Derbel, H., Hanafi, S., & Mladenović, N. (2013). Variable Neighborhood Search for Location Routing. Computers & Operations Research, 40(1), 47-57.

-Karimi, H., & Setak, M. (2018). Flow Shipment Scheduling in An Incomplete Hub Location-Routing Network Design Problem. *Computational and Applied Mathematics,* Vol. 37, 819-851.

-Li, P., Lan, H., & Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A Bi-Objective Capacitated Location-Routing Problem for Multiple Perishable Commodities. *IEEE Access,* 7, 136729-136742.

-Prodhon, C. And Prins, C. (2014). Survey of Recent Research on Location-Routing Problems. European Journal of Operational Research, Vol. 238, No. 1, 1-17.

-Rybičková, A., Burketová, A., & Mocková, D. (2016). Solution to the Location-Routing Problem Using a Genetic Algorithm. 2016 Smart Cities Symposium Prague (SCSP), 1-6.

-S. Ponboon, A. G. Qureshi, and E. Taniguchi, (2016). Branch-And-Price Algorithm for The Location-Routing Problem with Time Windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol. 86, 1-19.

-Toro, E. M., Franco, J. F., Echeverri, M. G., & Guimarães, F. G. (2017). A Multi-Objective Model for The Green Capacitated Location-Routing Problem Considering Environmental Impact. *Computers & Industrial Engineering,* 110, 114-125.

-Zarandi, M. H. F., Hemmati, A., Davari, S., & Turksen, I. B. (2013). Capacitated Location-Routing Problem with Time Windows Under Uncertainty. *Knowledge-Based Systems*, 37, 480-489.

-Çetiner, S., Sepil, C., & Süral, H. (2010). Hubbing and Routing in Postal Delivery Systems. Annals of Operations Research, 181, 109-124.

-De Camargo, R. S., De Miranda, G., & Løkketangen, A. (2013). A New Formulation and an Exact Approach for The Many-To-Many Hub Location-Routing Problem. *Applied Mathematical Modelling,* 37(12-13), 7465-7480.

-Drexl, M. And Schneider, M., (2015). A Survey of Variants and Extensions of the Location Routing Problem. *European Journal of Operational Research,* Vol. 241, No. 2, 283-308.

-Dukkanci, O., Kara, B. Y., & Bektaş, T. (2019). The Green Location-Routing Problem. *Computers & OperationsResearch,* 105, 187-202.

-Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient Algorithms for The Uncapacitated Single Allocation P-Hub Median Problem. Location Science, 4(3), 139-154.

-Gattuso, J. L. (2013). Can The Postal Service Have a Future? Retrieved From.

-Ghatreh Samani, M., & Hosseini-Motlagh, S. M. (2017). A Hybrid Algorithm for A Two-Echelon Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Under Fuzzy Demand. *International Journal of Transportation Engineering,* 5(1), 59-85.

-Guastaroba, G., Mor, A., & Speranza, M. G. (2022). Integrated Vehicle Routing Problems: A Survey. In The Palgrave Handbook of Operations Research, 73-103. Cham: Springer International Publishing.

-Hua-Li, S., Xun-Qing, W., & Yao-Feng, X. (2011). A Bi-Level Programming Model for A Multi-Facility Location-Routing Problem in Urban Emergency System. In Engineering Education and Management: Vol. 1, Results of the 2011 International Conference on Engineering Education and Management (ICEEM2011), 75-80. Springer Berlin Heidelberg.

Solving the Hub Location-Routing Problem for National Postal Network with an Integrative Approach

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

Mahmoud Ahmadinejad, Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Saeideh Abdoli, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology Tehran, Iran.

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

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

The postal network is a network in which the flow of shipments is collected by vehicles from several sources and transferred to hubs; in the last step, the parcels are sent to the final destination by the vehicles. In order to provide this service, the hubs are located to process the parcels and the local routes are planned to pick up and delivery the packages in the hubs. This problem is known as location-routing problem. The current research seeks to locate the hub and the routing of freight carriers on an intercity scale and at the level of Iran. For this purpose, first, the mathematical model of the problem of locating the hubs and routing the cargo carriers is presented, and since the problem of locating-routing is in the category of complex problems with large dimensions, meta-heuristic algorithms have been used to solve it. In previous studies, meta-heuristic algorithms or a combination of them have been used to solve the location-routing problem, but in the study, the location-routing problem has been solved by integrating two genetic algorithms (GA) and the particle swarm optimization algorithm (PSO). The results of this research show that the integration of two algorithms, PSO and GA, provides a better answer than if only one meta-heuristic algorithm is used to solve the problem. It is worth mentioning that in the current research, the data of Tipax Company was used to locate the hubs and local tours routing.

Keywords: Hub Location Routing Problem, Postal Network Optimization, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization Algorithm