بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل عمومی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با بردار ارزیابی – مطالعه موردی در سازمان اتوبوس‌رانی

اسفندیار عطائی، مربی، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

زینب عزیزی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۰۹/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲٤

چکیده

گسترش شهرها باعث افزایش تقاضای سفر می‌شود. پاسخگویی به نیاز سفر جمعیت شهرهای بزرگ توسط وسایل نقلیه غیرجمعی امکان‌پذیر نیست. لذا روی آوردن به سمت استفاده از انواع سیستم‌های حمل و نقل عمومی، جهت جابجایی مردم در شهرها، امری بدیهی و اجتناب‌ناپذیر است. پارامترهای مختلفی در توسعه سیستم حمل و نقل عمومی دخیل است که از جمله آن‌ها می‌توان به زمان سفر، زمان پیاده‌روی تا ایستگاه، راحتی سفر، هزینه استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی و حداکثر پوشش مسیرها و عبور از مراکز اصلی شهر و غیره نام برد، ولی مهم‌ترین پارامتری که باعث افزایش استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی می‌شود، زمان سفر و هزینه سفر برای متقاضیان است. بنابراین در این مقاله، یک مدل ریاضی چندهدفه با حداقل کردن هزینه و زمان سفر در حالی که مسیرها با حداقل اتوبوس پوشش داده می‌شود، ارایه می‌شود. با توجه به پیچیده‌گی و سخت بودن مسایل مسیریابی، برای حل این مسأله از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با بردار ارزیابی (VEPSO) برای مسیرهای موجود در سیستم اتوبوس‌رانی شهر اردبیل استفاده و نتایج آن با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه (MOPSO) مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با شاخص‌های چندهدفه، کارایی الگوریتم VEPSO را نسبت به MOPSO، برای مطالعه موردی موردنظر نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی انبوه ذرات با بردار ارزیابی ،حمل و نقل عمومی، سیسنم اتوبوس‌رانی، مسیریابی وسایط نقلیه

۱. مقدمه

طراحی شبکه اتوبوس‌رانی به عنوان یک مسأله اساسی در سیستم‌های حمل و نقل همگانی است. پیچیدگی مسأله مربوط به طراحی خطوط اتوبوس‌های شبکه، با توجه به بعضی از محدودیت‌ها از جمله ظرفیت و هزینه ناوگان‌ها است که ارزیابی شبکه های مسیر انتخابی می‌تواند هر دو، وقت گیر و چالش برانگیز باشد [Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014] به طور معمول مسافران با مشکلات زیادی در سیستم حمل و نقل اتوبوس‌رانی روبرو هستند. از جمله این مشکلات مدت زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها، زمان نامشخص رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه، ناسازگاری بین مسیر اتوبوس‌ها و ناکافی بودن ظرفیت اتوبوس‌هاست. بنابراین طراحی بهینه شبکه اتوبوس‌رانی باید با توجه به انتخاب بهترین خطوط اتوبوس و بیشترین پوشش کل شبکه با توجه به محدودیت‌هایی مثل اندازه و هزینه ناوگان صورت گیرد.

در طراحی شبکه عامل‌های زیادی از جمله هزینه، سطح پوشش خطوط اتوبوس، مدت زمان سفر، تعداد اتوبوس‌ها، اندازه ناوگان باید در نظر گرفته شوند. برای مثال، افزایش سطح پوشش خطوط اتوبوس‌ها باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. همچنین، کاهش مدت زمان سفر باعث افزایش تعداد اتوبوس‌ها می‌شود. بنابراین طراحی شبکه اتوبوس‌رانی یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه است. بهینه‌سازی چندهدفه، شاخه‌ای از بهینه‌سازی است که به مسائلی با اهداف مختلف به صورت هم‌زمان می‌پردازد. در این گونه مسائل، دو یا چند هدف که با هم رقابت می‌کنند، هم‌زمان بهینه می‌شوند.

تاکنون روش‌های زیادی برای حل این گونه مسائل به کار گرفته شده است. از جمله این روش‌ها وزن‌دهی هر تابع هدف و در نهایت بهینه‌سازی مجموع کل توابع است که در این روش نیاز به انتخاب دقیق و مناسب برای وزن‌دهی برای هر کدام از توابع نیاز می‌باشد که در صورت برآورده نساختن این نیاز، کارآیی این الگوریتم کاهش می‌یابد. در این مقاله به منظور فائق آمدن بر مشکلات فوق، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با بردار ارزیابی[1] (VEPSO) برای طراحی سیستم پیشنهاد شده است. پایه و اساس این الگوریتم مبتنی بر استراتژی مهاجرت بین ذرات جهت تسهیم اطلاعات گروه ذرات بین یکدیگر برای افزایش کارایی روش بهینه‌سازی است. با توجه به NP-hard[2] بودن مسایل مسیریابی جهت حل مدل پیشنهادی از یک الگوریتم بهبودیافته چندهدفه (VEPSO) استفاده و نتایج آن با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه[3] (MOPSO) مقایسه شده است. مدل ریاضی و بهینه سازی سیستم حمل و نقل عمومی با استفاده از الگوریتم VEPSO برای اولین بار در این مقاله ارائه شده است.

برای افزایش سهم حمل و نقل همگانی از سفرهای درون شهری، لازم است اقداماتی جهت بهبود و توسعه سیستم همگانی در دو زمینه کمی و کیفی انجام شود. بهبود سیستم اتوبوس‌رانی، در دو سطح انجام می‌شود. یکی بهبود سیستم از طریق تغییر در شبکه اتوبوس‌رانی از نظر مسیر، تعداد خطوط و طراحی یک شبکه جدید و دیگری بهبود عملکرد خطوط از طریق تخصیص مناسب ناوگان و غیره است [Mehr Avaran et al. 2012]. در این تحقیق، هدف ارایه یک مدل ریاضی است که قادر به تعیین مسیر بهینه از بین مسیرهای موجود باشد به طوری‌که مسیر پیشنهاد شده، بتواند مسیرهای بیشتری را پوشش دهد و هزینه‌های سیستم اتوبوس‌رانی را به حداقل برساند.

در حال حاضر این مسیرها به صورت غیرعلمی و بر اساس تجربه و یا توافق چند سازمان و گروه یا دسته‌هایی از مردم و نمایندگان تعیین می‌گردد، در حالی که رضایت همگان را جلب نمی‌کند. شاید بارها این مسیرها تغییر می‌کند و این در حالی است که با استفاده از یک روش علمی برای مسیریابی علاوه بر اینکه تمام خواسته‌های گروه‌های مختلف در نظر گرفته خواهد شد، پاسخ نهایی کاملاً علمی و بهینه بوده و حداکثر ممکن رضایت گروه‌های مختلف را برآورده خواهد ساخت [Aghajan Zadeh, 2010].در ادامه، مقاله به این صورت سازماندهی می‌شود که در بخش بعدی به مرور ادبیات و در بخش ۳ به ارایه یک مدل ریاضی پرداخته می‌شود و در ادامه در بخش‌های ٤ و ٥ الگوریتم‌های PSO، MOPSO و VEPSO معرفی می‌شود و در بخش ٦ مطالعه موردی شرح داده می‌شود، در بخش ۷ مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای مطالعه موردی با الگوریتم VEPSO ارایه می‌شود. نتیجه‌گیری نهایی در بخش ۸ مطرح می‌شود.

۲. مرور ادبیات

موضـوع مسـیریابی وسـیله نقلیه[۴] (VRP)، به مجموعه‌ای از موضـوع‌ها اطلاق می‌شـود که در آن ناوگانی متشکل از چندین وسـیله نقلیه از یک یا چند قرارگاه به ارایه خدمت به مشـتریان پراکنده در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند و این موضوع را بـه نحوی انجام می‌دهند که هزینه‌های انجام این کار به حداقل برسد. مسأله VRP و انواع مختلف آن یک حوزه مطالعاتی مهم در صنعت لجستیک، حمل و نقل و زنجیره تأمین است. صنعت لجسـتیک و بخصـوص توزیع کالا به دلیل ارتباط با تصمیمات موجودی، تولید و همچنین هزینه های تحویل کالا به مشتری به عنوان نقطه عطفی در فعالیتهای تجاری محسـوب می شود. این مسـایل از جمله مسـایل بهینه سازی ترکیبی هستند که با شاخه های ریاضـی، اقتصـاد، علوم رایانه و تحقیق در عملیات مرتبط اند [Banos et al. .2013] کریتیکوس و یووانو [Kritikos and Ioannou, 2013] مدل جدیدی برای مسـأله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) با در نظرگرفتن وسائط نقلیه متفاوت ارائه و از طریق روش ابتکاری اقدام به حل آن کردند. بیشتر مسایلی که در این زمینه مطرح شـده اند، مربوط به مسایل تک هدفه با هـدف کمینه کردن هزینه هسـتند، اما پیچیدگی های مسـایل واقعی عموما کاربرد مسایل تک هدفه را به چالش می‌کشد. این موضـوعها، در واقع توسـعه‌یافته موضـوع معروف فروشـنده دوره‌گرد[۵] (TSP) است [Tarokh et al. 2011]. در مسأله TSP، هدف یافتن کوتاه‌ترین مسـیری اسـت که از یک شـهر شروع و به همه شهرها دقیقاً یک بار وارد می‌شود و در انتها به شـهر اول باز می‌گردد [Hahsler and Hornik, 2009]. یـافتن کوتاه‌ترین مسـیر برای شـهرهای ایران با اسـتفاده از الگوریتم‌های جسـتجوی ممنوعه[۶] و ممتیک[۷] توسـط یقینی و همکاران [Yaghiny et al. 2011] انجام شـد و مشـخص گردید که الگوریتم پیشـنهادی ممتیک در حل مسـائل استاندارد در یافتن کوتاه‌ترین مسیر همیلتونی برای ۴۲۳ شهر ایران برتری نسـبی داشـته و از لحاظ زمان حل نیز برتری محسـوسی دارد. بعضـی از انواع VRP با توجه به نوع قید مسـأله عبارتند از CVRP[۸]، SDVRP[۹]، SVRP[۱۰]، VRPTW[۱۱]، MDVRP[۱۲] که در مقاله کهفی و توکلی مقدم [Kahfi and Tavakkoli-Moghaddam, 2015] بـه تفضـیل معرفی شده‌اند.

تـاکنون مطـالعـات گونـاگونی در خصـوص طراحی شـبکه اتوبوس‌رانی صـورت گرفته اسـت. به طور کلی می‌توان این مطالعات را از نظر روش حل یا هدف دسـته‌بندی نمود. از نظر روش حل، روش‌های تجربی، ریاضـی، ابتکاری و فراابتکاری برای حـل بـه کـار می‌رونـد. از نظر هدف، اهداف گردانندگان (سـیسـتم اتوبوس‌رانی)، استفاده‌کنندگان از سامانه (مسافران) و ترکیـب اهـداف هر دو گروه می‌تواننـد ملاک قرار گیرنـد [Cheginy et al. 2013]. یـک روش ابتکـاری برای حل مسـأله بهینه‌سـازی مسـیر در شبکه حمل و نقل همگانی توسط مندل ارایه شده که از دو مرحله تشکیل گردیده است. در مرحله اول، یک شـبکه امکان‌پذیر اولیه ایجاد می‌شـود و در مرحله بعدی، تابع هدفی به صـورت کل زمان سـفر اسـتفاده‌کنندگان، شـامل زمان سفر داخل وسیله و زمان انتظار کمینه می‌شود. این الگوریتم تقاضـا را در مرحله سـاخت شـبکه امکان‌پذیر در نظر نمی‌گیرد. در الگوریتم مندل، تأکید بر روی پوشش‌دهی شبکه و مستقیم بودن مسیر است [Mandl, 1979].

در مطـالعات ژائو و همکاران [Zhao, 2006, Zhao and Zheng, 2008]، هدف کمینه‌سـازی زمان سفر و تعداد تغییر وسـیله در شـبکه بوده اسـت. در این راسـتا از الگوریتم تبرید شـبیه‌سازی شده[۱۳] (SA) به منظور بهینه‌سازی مسیر و از روش سـریع‌ترین کاهش برای تعیین بهترین سـرفاصله زمانی استفاده شـده است. الگوریتم‌های دیگری نیز با کارآیی‌های متفاوت در مطالعات این پژوهش‌گران دیده می‌شـود . در رویکردهای حل مسـأله بهینه‌سـازی مسـیر، معمولاً ناوگان حمل و نقل همگانی یکسـان است و زمان سفر اتوبوس‌ها برای هر کمان شبکه ثابت فرض شـده است. با استفاده از پژوهش‌های انجام شده می‌توان بهینه‌سـازی مسـیر را انجام داد، اما امکان بهینه‌سـازی شـبکه اتوبوس و اتوبوس تنـدرو بـه طور هم‌زمـان وجود نـدارد. حسـنی‌نسـب و همکاران [Hasany Nasab et al. 2011] پژوهشـی را انجام داده‌اند که هدف آن بررسـی شـبکه اتوبوس معمولی و اتوبوس تندرو به طور هم‌زمان اسـت. در این مسأله، ویژگی‌هایی مانند کاهش تداخل حرکت با سـایر وسـایل نقلیه برای اتوبوس تندرو، افزایش سرعت متوسط اتوبوس تندرو در

طول مسیر و در نتیجه کاهش زمان داخل وسیله برای استفاده‌کنندگان از اتوبوس تندرو، در نظر گرفته شده است. چاکروبورتی و ویودی [Chakroborty and Wivedi, 2002] الگوریتم ژنتیک را برای حل مسأله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی به کار گرفتند. در این مطالعه تعداد خط اتوبوس از پیش تعیین شده بود. این پژوهش‌گران طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را در سه گام انجام دادند: در گام نخست همه مسیرهای امکان‌پذیر در شبکه تولید می‌شود. در گام دوم مجموعه مسیرهای تولید شده با کاهش تعداد انتقال‌ها ارزیابی شده و در سومین گام، شبکه به کمک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده و بهبود می‌یابد. برگ‌گل و همکاران [Barg Ghol et al. 2014] الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی شبکه اتوبوس‌رانی درون شهری شهر رشت بکار بردند و شبکه موجود شهر را با شبکه خروجی از مدل مقایسه نمودند که با استفاده از توابع و پارامترهای در نظر گرفته شده، تا حد زیادی به نتیجه بهینه دست یافتند. چاکروبورتی [Chakroborty, 2003] مسأله مسیریابی حمل و نقل همگانی را در دو گام حل کرد. در گام نخست مجموعه مسیرهای بهینه شبکه را با هدف کاهش زمان سفر و کاهش تعداد مسافرانی که ناچار به انتقال می‌باشند، طراحی نمود. او در گام دوم به زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها با هدف کمینه‌سازی کل زمان انتظار و انتقال مسافران پرداخت.

بیلی و همکاران [Bielli et al. 2002] بر آن بودند که بر اساس شبکه موجود، شبکه جدیدی با هدف بهبود وضعیت شبکه و کاهش تعداد ناوگان طراحی کنند و برای دستیابی به این هدف از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی به طور هم‌زمان بهره بردند. در این مطالعه برای محاسبه تابع هدف دو معیار (هزینه و کل زمان سفر) درنظر گرفته شد.

ژائو [Zhao, 2006] مدل طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را با هدف کمینه‌سازی تعداد انتقال‌ها، بیشینه‌سازی مسیرهای مستقیم، بیشینه‌سازی پوشش سرویس ارایه و مدل پیشنهادی را با SA حل کرد. ژائو و ژنگ [Zhao and Zeng, 2006] همچنین در مطالعه‌ای دیگر الگوریتم تلفیقی SA-GA[۱۴] را به کار بستند و مدعی شدند روش پیشنهادی برای شبکه‌های با مقیاس بزرگ مناسب‌تر است. هو و همکاران [Hwe et al. 2006] در یک مدل پیشنهادی به طراحی شبکه اتوبوس‌رانی با هدف تمرکز زدایی از محدوده مرکزی شهر پرداختند. این مدل بر روی محدوده مرکزی شهر هنگ کنگ پیاده شد و نتایج آن نشان داد که ادغام کردن خطوط اتوبوس در محدوده مرکزی شهر، سبب افزایش سود سامانه و بالا رفتن کارایی آن می‌شود. سزتو و یانگ ژانگ [Szeto and Yongzhong, 2010] به بهینه‌سازی یک شبکه اتوبوس‌رانی، برای منطقه‌ای اقامتی در حومه شهر هنگ کنگ پرداختند. آن‌ها سعی نمودند با طراحی جدید خود با کمک گرفته از الگوریتم ژنتیک، مدلی را پیشنهاد کنند که بتوانند با کاهش تعداد عبور و مرور و مجموع زمان سفر مسافران، تعداد اتوبوس‌ها را کاهش دهند تا شرکت‌های خصوصی بتوانند در آن مشارکت داشته باشند. نتایج طراحی جدید و مقایسه آن با شبکه موجود نشان داد که مدل پیشنهادی تعداد عبور و مرور و مجموع زمان سفر را به ترتیب، به اندازه ۲۰/۹ و ۲۲/۷ درصد کاهش داده است.

عیدی و همکاران [Eidi et al. 2013] نیز بخشی از تحقیقات مرتبط به حوزه مسیریابی را بین سا لهای ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ بررسی نمودند. آنها با تلفیق مفاهیم پنجره های زمانی و چند تقاضایی و در نظرگرفتن دو هدف متضاد حداقل کردن هزینه سفر و حداکثرسازی پوشش تقاضا، مدل جدیدی از مسیریابی ارایه کردند. نوروزی و همکاران [Norouzi et al. 2015] یک مدل ریاضی جدید برای اندازه گیری و ارزیابی بهره وری مسأله مسیریابی وسیله نقلیه دوره ای (PVRP)[۱۵] در یک محیط رقابتی ارائه نمودند. برای اندازه گیری بهره وری مسأله از الگوریتم بهینه سازی ازدحام انبوه ذرات بهبود یافته (IPSO)[۱۶] استفاده کرده و آن را با الگوریتم بهینه سازی ازدحام انبوه ذرات (PSO) مقایسه نمودند. و نتیجه محاسباتی نشان داد که الگوریتم (IPSO) بهتر از الگوریتم (PSO) می باشد. توکلی مقدم و همکاران [Tavakkoli-Moghaddam et al. 2014]، حالت جدیدی از ترکیب مسأله مسیریابی دوره ای با در نظر گرفتن پنجره زمانی در حالت رقابتی را مورد بررسی قرار دادند. و با توجه به NP-hard بودن مسأله، مدلی را با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید بهبود یافته (ISA)[۱۷]، برای توزیع کنندگان ارائه نمودند که با کوتاه ترین مسیر و کمترین هزینه، در کوتاه ترین زمان ممکن و زودتر از رقبا به مشتریان سرویس دهی کنند تا حداکثر سود را کسب نمایند. قنادپور و همکاران [Ghannadpour et al. 2014] یک مسأله مسیریابی زما

نبندی وسیله نقلیه چند هدفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در درخواست و اولویت مشتریها را مطرح کردند. آنها برای ارائه مدل خود، از مدل مسیریابی با هدف جلب رضایت مشتریان با توجه به پنجره زمانی که از پیش تعریف شده بود به عنوان یک مدل چند هدفی استفاده کردند که در آن به دنبال کمینه کردن تعداد وسائط نقلیه، مسافت پیموده شده، زمان انتظار تحمیل شده به وسائط نقلیه و همچنین بیشینه کردن سطح رضایت مشتریان بودند. ایشان برای حل مدل ارائه شده از جستجوی تکاملی و مفاهیم بهینگی پارتو استفاده کردند.

۳. مدل‌سازی ریاضی

۳-۱ مفروضات مسأله

در متدولوژی پیشنهادی این تحقیق، با توجه به اینکه شرایط موجود سیستم حمل و نقل پذیرفته شده و با فرض ثابت بودن تقاضا، سعی گردیده تا هر چه بیشتر به واقعیات شبکه وخصوصیات رفتار انتخاب مسیر مسافرین و محدودیت‌های عملی توجه نموده و با اعمال آنها در قالب روش VEPSO و روش MOPSO جواب بهینه و در زمان قابل قبول ارایه گردد.

- یک شبکه اتوبوس‌رانی با نقاط ابتدایی و انتهایی مشخص و مسیرهای تعریف شده موجود است.
- تقاطع‌ها را به عنوان گره‌ها و خیابان‌های بین تقاطع‌ها به عنوان کمان در نظر گرفته شده است.
- ظرفیت تقاطع‌ها و کمان‌ها محدود است.
- سرعت تمام اتوبوس‌ها مشخص و ثابت است.
- تعداد اتوبوس‌های هر مسیر مشخص است.
- نوع اتوبوس‌های و ظرفیت اتوبوس‌های مسیرهای مختلف، یکسان در نظر گرفته شده است.
- سرفاصله زمانی هر مسیر مشخص است.

۳-۲ پارامترها

N: مجموعه گره‌های موجود در کل مسیر است، $i, j \in \{1 \dots N\}$

K: مجموعه مسیرهای موجود، $k \in \{1 \dots K\}$

t_{ijk}: زمان یال i, j در مسیر k ام

t_{ik}: زمان حرکت اتوبوس مسیر k-ام از گره i

T_{ij}: حد بالای بازه زمانی در یال i, j

h_k: سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌های مسیر k ام

h: متوسط سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها

m: تعداد سرفاصله‌های زمانی حرکت اتوبوس‌ها که به تعداد مسیرهای موجود است.

b: ظرفیت وسیله نقلیه

P_{ijk}: تعداد متقاضیان یال i, j در مسیر k ام در یک چرخه

S_i: زمان انتظار در گره i

P_{ijk}: متقاضیان یال i, j ام در مسیر k ام

A: تعداد اتوبوس‌های فعال در سیستم اتوبوس‌رانی

C: ظرفیت اتوبوس (مجموع تعداد مسافران نشسته و ایستاده)

B: عددی بزرگ است.

۳-۳ متغیرهای تصمیم

x_k: تعداد اتوبوس‌های مسیر k ام

x_{ijk}: اتوبوس مسیر k ام که از یال i, j عبور می‌کند، اگر اتوبوس مسیر k ام از یال i, j عبور کند x_{ijk} برابر یک و اگر اتوبوس مسیر k ام از یال i, j عبور نکند، صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳-٤ مدل ریاضی پیشنهادی

$$\text{Min} \quad z_1 = \sum_k x_k \qquad (۱)$$

$$\text{Min} \quad z_2 = \sum_i \sum_j \sum_k t_{ijk} \times x_{ijk} \qquad (۲)$$

s.t.

$$h_k = \frac{\sum_i \sum_j t_{ijk}}{x_k} \quad \forall\ k \in K \qquad (۳)$$

$$h = \frac{\sum_k h_k}{m} \qquad (٤)$$

$$x_k \le \left[\sum_i \sum_j \frac{t_{ijk}}{h}\right]^+ \quad \forall\ k \in K \qquad (۵)$$

$$x_k \le \left[\sum_i \sum_j \frac{p_{ijk}}{b}\right]^+ \quad \forall\ k \in K \qquad (٦)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} \times p_{ijk} \le C \qquad (۷)$$

$$x_k \geq 1 \qquad (۸)$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_k \leq A \qquad (۹)$$

$$\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k} x_{ijk} - \sum_{j}\sum_{l}\sum_{k} x_{jlk} = 0 \quad \forall\ i,j,l \in N,\ \ \forall\ \ k \in K \qquad (۱۰)$$

$$t_{ik} + Bx_{ijk} \leq T_{ij} + B \qquad \forall\ \ i,j \in N,\ \ \forall\ \ \ k \in K \qquad (۱۱)$$

$$B(1\text{-}x_{ijk}) + t_{jk} \geq t_{ik} + s_i + t_{ijk} \times x_{ijk} \qquad \forall\ i,j \in N,\ \forall\ k \in K \qquad (۱۲)$$

$$x_{ijk} \in (0,1), \qquad x_k \text{ as integer} \qquad (۱۳)$$

بـه دلیـل اینکـه هـدف این تحقیق تعیین مسـیر بهینـه از میان مسـیرهایی اسـت که حداکثر پوشـش خیابان‌های موجود را با حـداقـل تعداد دسـتگاه اتوبوس‌ها انجام دهد، که دو هدف با یکدیگر در تناقض هسـتند، از مدل ریاضـی دو هدفه اسـتفاده شده است. تابع هدف اول نشان‌دهنده کمینه‌سازی تعداد دستگاه اتوبوس فعال در شبکه حمل و نقل است. علت استفاده مستقیم از تابع کمینه‌سـازی تعداد دسـتگاه‌های اتوبوس در مسـأله، این اسـت که تعداد بهینه‌ی اتوبوس‌های فعال در هر مسیر مشخص نیسـت. تابع هدف دوم نشان‌دهنده حداقل کردن کل زمان سفر اسـت. معادله (۳) نشـان می‌دهد که سـرفاصـله زمانی حرکت اتوبوس‌هـای هر مسـیر از طریق تقسـیم مدت زمان رفت و برگشت هر مسیر به تعداد اتوبوس‌های فعال در هر مسیر تعیین می‌گردد. از آنجایی که سـرفاصـله زمانی مسیرها متفاوت است، معادله (٤) معرف میانگین سـرفاصـله‌های زمانی است. نامعادله (٥) نشان‌دهنده حداکثر تعداد اتوبوس مورد نیاز برای هر مسیر بعد از اعمال میانگین سـرفاصـله زمانی اسـت. علامت مثبت اسـتفاده شـده بر روی جزء صـحیح علامت گرد کردن حاصل سـمتراسـت معادله به سمت بالا است. نامعادله (٦) نشان‌دهنده حداکثر تعداد اتوبوس مورد نیاز برای هر مسیر با توجه به تعداد متقاضـیان هر مسـیر و ظرفیت دستگاه اتوبوس است. هر چقدر ظرفیت دسـتگاه اتوبوس بیشـتر باشـد به تعداد اتوبوس‌های کمتری نیاز اسـت. نامعادله (۷) نشـان‌دهنده حداکثر ظرفیت هر دستگاه اتوبوس است (مجموع تعداد مسافران نشسته و ایستاده که اینجا برابر ٦٤ عدد تخمین زده شـده اسـت). نامعادله (۸) نشـان می‌دهد که از هر مسیر موجود حداقل یک اتوبوس عبور می‌کنـد. نـامعـادلـه (۹) نشـان‌دهنده عدم تجاوز از تعداد کل اتوبوس‌های موجود اسـت. معادله (۱۰) تضـمین می‌کند که هر اتوبوسـی که وارد گره i می‌شود، از آن خارج می‌گردد. نامعادله (۱۱) نشان می‌دهد که زمان حرکت هر اتوبوس از گره i باید از حد بالای دوره زمانی در آن یال کمتر باشد. نامعادله (۱۲) نشان می‌دهـد که زمان حرکت هر اتوبوس از گره i باید از حد پایین دوره زمانی آن یال بیشتر باشد. محدودیت (۱۰) نشان‌دهنده نوع متغیر تصمیم است که مقادیر یک و صفر می‌گیرد. مدل فوق به طور همزمان دو تابع هدف را که در رقابت با هم هسـتند، بهینه می کند. یعنی کاهش زمان سـفر و کاهش تعداد اتوبوس های مورد نیاز، که برآوردن تابع هدف اول مسـتلزم برآورده نشـدن تابع هدف دوم می باشـد. و برعکس، برآورده شدن تابع هدف دوم مسـتلزم برآورده نشـدن تابع هدف اول است. که کارآمدی مدل ریاضی ارایه شده را نشان می‌دهد.

٤. معرفی الگوریتم

٤-۱ الگوریتم PSO

الگوریتم PSO، یک روش بهینه‌سـازی مبتنی بر قوانین احتمال اسـت که ایده اولیه آن در سـال ۱۹۹۵ توسـط ابرهارت و جیمزکندی [Kennedy and Eberhart, 1995] معرفی شد. از رفتـار اجتمـاعی دسـتـه پرنـدگـان یـا گروه ماهی‌ها در حین جسـتجوی غـذا، برای هدایت جمعیت به منطقه امیدبخش در فضـای جستجو الهام گرفته شده است. قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار موجودات حکم‌فرمانی می‌کند. پرندگان تنها با تنظیم حرکت فیزیکی خود با اجتناب از تصادم به دنبال غذا می‌گردند و بـه طور تئوری هر پرنـده به عنوان یکی از اعضـاء گروه از

تجربه قبلی و یافته‌های سایر اعضاء برای یافتن غذا بهره می‌برد. این مشارکت یک مزیت قطعی بر جستجوی رقابتی برای یافتن غذا است. پایه اصلی PSO همین تسهیم اطلاعات بین اعضاء گروه است.

PSO با یک گروه از جواب‌های تصادفی شروع به کار می‌کند سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسأله با به روز کردن موقعیت و سرعت هر ذره به جستجو می‌پردازد. هر ذره به صورت چند بعدی (بسته به طبیعت مسأله) با دو مقدار X_{id} و V_{id} که به ترتیب معرف مکان و سرعت مربوط به بعد d–ام از i–امین ذره هستند، تعریف می‌شود. در هر مرحله از حرکت جمعیت، هر ذره با توجه به دو مقدار بهترین به روز می‌شود. اولین مقدار بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر ذره به طور جداگانه به دست آمده است. این مقدار بهترین فردی[18] است و ***pbest*** نامیده می‌شود. مقدار بهترین دیگری که توسط PSO به دست می‌آید، بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذره‌ها در میان جمعیت به دست آمده است. این مقدار بهترین کلی[19] است و ***gbest*** نام دارد. پس از یافتن دو مقدار ***pbest*** , ***gbest*** هر ذره سرعت و مکان جدید خود را با دو رابطه زیر به روز می‌کند [Kennedy et al. 1995]:

$$X_i\,(t+1) = X_i\,(t) + V_i\,(t+1) \qquad (۱۴)$$

$$V_{ij}(t+1) = w(V_{i,j}(t)+c_1 r_{1,j}(t)[pbest_{i,j} - X_{i,j}(t)]+c_2 r_{2,j}(t)[gbest_i(t)-X_{i,j}(t)]) \qquad (۱۵)$$

به طوری که w وزن اینرسی[20]، c_1 , c_2 ضرایب شتاب[21] و r_1 , r_2 اعداد تصادفی در بازه (۱و۰) می‌باشند. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، مقدار نهایی سرعت هر ذره در بازه $[-V_{MAX}\,,V_{MAX}]$ محدود می‌شود. c_2, c_1, w از پارامترهای PSO هستند و همگرایی الگوریتم وابسته به مقدار این پارامترها است [Raman and Talbot,1993, Yang and Simon, 2005]. همگرایی شدیداً به مقدار w وابسته است و بهتر است به صورت دینامیک تعریف شود. به طور معمول این ضریب به صورت خطی در بازه (۰/۹-۰/۲) طی روند تکامل جمعیت کاهش می‌یابد. در ابتدا باید بزرگ باشد تا امکان یافتن جواب‌های خوب در همان مراحل اولیه فراهم شود و در مراحل پایانی کوچک بودن w، همگرایی بهتری را سبب می‌شود [Kennedy and Eberhar, 1997]. PSO که با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) جمعیت خود را به روز کند، PSO پایه یا استاندارد نامیده می‌شود.

۴-۲ الگوریتم MOPSO

در مسائل چند هدفه به جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید به طور هم‌زمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسأله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آنها جواب‌های بهینه پارتو گفته می‌شود. مفهوم بهینه پارتو به این صورت قابل تشریح است که $\overline{x_*} = (x_1, x_2, \dots x_n)$ یک بهینه پارتو است اگر برای هر $\overline{x}$ دیگر عضو دامنه مجاز و $i=\{1,2,,\dots,k\}$ داشته باشیم (برای یک مسئله کمینه‌سازی):

$$\left(f_i(\overline{x_*}) \le f_i(\overline{x_i})\right)\ ;\ \forall i \in I \qquad (۱۶)$$

که در آن n تعداد متغیرهای فضای تصمیم و k تعداد توابع هدف است [Yu, 1985]. به عبارت دیگر $\overline{x_*}$ یک بهینه پارتو است اگر هیچ بردار $\overline{x}$ دیگری وجود نداشته باشد که به ازای بهبود بخشیدن برخی از توابع هدف حداقل یک تابع هدف را بدتر نکند [Coello, 1999].

برای به کاربردن PSO در بهینه‌سازی مسائل چند هدفه، بردار p به ازای همه جواب‌های غیر مسلط اصلاح می‌شود (با توجه به اولویت پارتو). که در نتیجه جستجوی فضای جواب توسط هر ذره، لیستی از جواب‌ها یا راه حل‌ها به عنوان بردار p به دست می‌آید. PSO برای بهینه‌سازی چند هدفه به طور تصادفی و با مقادیر اولیه بردار موقعیت و سرعت آغاز می‌شود و هر بار که بردار موقیت هر ذره به روز می‌شود نتیجه آن با مجموعه جواب‌های بردار p (لیست p) مقایسه می‌شود. اگر جواب تحت تسلط نشد به لیست p اضافه می‌شود. لیست p به طور مداوم به روز می‌شود تا اینکه لیست p فقط شامل جواب‌های غیر مسلط باشد [Moore and Chapman, 1999].

۴-۳ الگوریتم چندهدفه انبوه ذرات با ارزیابی برداری

همان طور که بیان شد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، شاخه‌ای از بهینه‌سازی است که به مسایلی با اهداف مختلف به صورت

هم‌زمان می‌پردازد. در این‌گونه مسایل، دو یا چند هدف که با هم رقابت می‌کنند یک‌جا بهینه می‌شوند. طبیعت ویژه مسائل چندهدفه، بر اساس مفهوم بهینه پارتو است که هر تابع هدف یک مصالحه با اهداف دیگر را در نظر می‌گیرد. این‌گونه مسائل بهینه‌سازی نیز توسط الگوریتم اجتماع ذرات، قابل بررسی و حل هستند.

یکی از این روش‌ها، ارزیابی برداری PSO (VEPSO) است که توسط پارسوپولز و وراهاتی [Parsopoulos and Vrahatis, 2010]، به عنوان یک تغییر چند دسته‌ای متغیرهای PSO برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته شد. در بهینه‌سازی چندهدفه باید K تابع $f_1(x), ..., f_k(x)$ به طور هم‌زمان کمینه شوند. هدف اصلی در مسائل چندهدفه ردیابی نقاط بهینه پارتو می‌باشد.

VEPSO یک مجموعه K گروهی، $S_1, S_2, ..., S_k$ را برای توابع هدف استفاده می‌کند. i-امین ذره از K امین گروه به صورت $x_i^{[k]}$ نشان داده می‌شود. بهترین موقعیت مربوط به ذره به صورت $p_i^{[k]}$ و سرعت هر ذره نیز به صورت $v_i^{[k]}$ مشخص می‌شوند. گروه S_k تنها با تابع هدف مربوط به خودش ارزیابی می‌شود. این گروه‌ها اطلاعات‌شان طی زمان تغییر می‌کند، سپس هر کدام از مجموعه‌ی K گروهی، نقاطی را که به سمت بهینه پارتو حرکت می‌کنند را به اشتراک می‌گذارند. بنابراین معادلات حرکت به صورت زیر هستند:

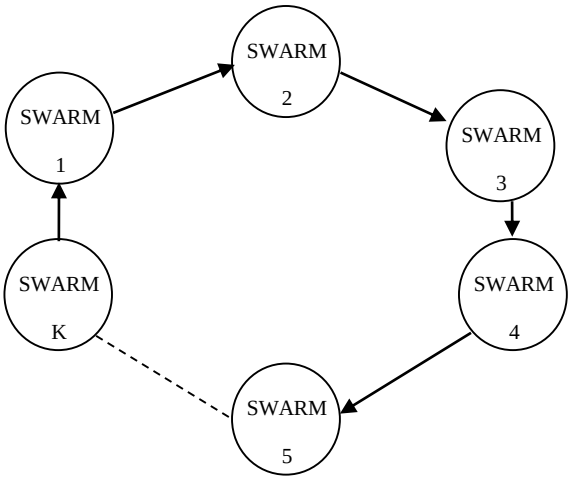
$$v_{ij}^{[k]}(t+1) = \chi^{[k]}[v_{ij}^{[k]}(t) + c_1^{[k]} r_1 (p_{ij}^{[k]}(t) - x_{ij}^{[k]}(t)) + c_2^{[k]} r_2 (p_{g,j}^{[s]}(t) - x_{ij}^{[k]}(t))] \quad (۱۷)$$

$$x_{ij}^{[k]}(t+1) = x_{ij}^{[k]}(t) + v_{ij}^{[k]}(t+1) \quad (۱۸)$$

$k=1,2,...,K$; $i=1,2,...,NK$; $j=1,2,...,n$

که در آن $\chi^{[k]}$ ضریب انقباض K امین گروه است. اطلاعات در بین گروه‌هایی که موقعیت برجسته‌ای دارند تغییر می‌کنند و یک طرح و شمای مهاجرت بین گروه‌ها رخ می‌دهد که از یک گروه به گروه دیگر حرکت می‌کنند که این موضوع بستگی به نوع توپولوژی اتصال بین گروه‌ها می‌باشد. چنانچه توپولوژی مهاجرت حلقوی مانند شکل ۱ باشد S در معادله (۱۹) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$s = \begin{cases} k, i = 1 \\ i-1, i = 2, ..., k \end{cases} \quad (۱۹)$$



شکل ۱. توپولوژی مهاجرت حلقوی

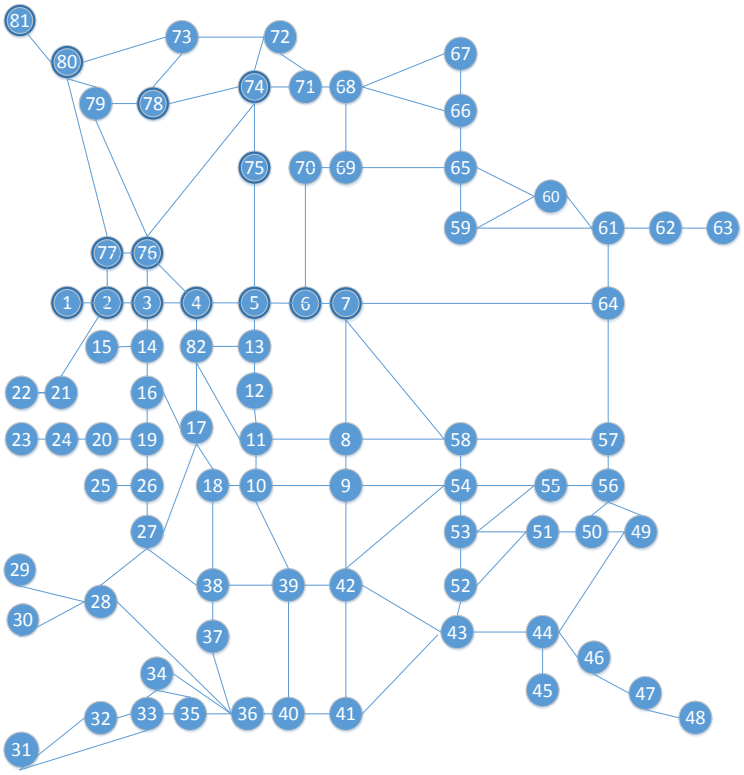
➢ **مراحل روش VEPSO برای مدل پیشنهاد شده**

مراحل بهینه‌سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم VEPSO شامل موارد زیر است:

- **گام اول:** اطلاعات مورد نیاز برنامه که شامل تعداد اتوبوس‌ها، سر فاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها، ظرفیت وسیله نقلیه و غیره است را وارد می‌کنیم.
- **گام دوم:** انتخاب پارامترهای الگوریتم VEPSO.
- **گام سوم:** جواب‌های اولیه بر اساس اعمال محدودیت ایجاد شده توسط تابع هدف مورد مطالعه به صورت کاملاً تصادفی تولید شده که در اینجا با توجه به هدف بهینه‌سازی مسیر اتوبوس‌رانی جواب‌های اولیه شامل ماتریس x متغیر انتخاب اتوبوس که از مسیر k رد شده که به صورت تصادفی صفر یا یک است، تعلق می‌گیرد. جمعیت اولیه شامل ۸۱ عضو در نظر گرفته شده است.
- **گام چهارم:** تابع هدف با استفاده از روابط (۱۶) الی (۱۷) محاسبه می‌شود.
- **گام پنجم:** تولید نسل جدید بر اساس تابع تولید.
- **گام ششم:** استفاده از ارتقاء نسل‌ها با استفاده از فرمول‌های بیان شده.
- **گام هفتم:** تکرار تا زمانی که کل تکرار انجام شود.

۵. مطالعه موردی: شرکت حمل و نقل عمومی شهر اردبیل

سیستم اتوبوس‌رانی شهر اردبیل و حومه از ۲۳ مسیر تشکیل شده است که ۱۷ مسیر آن مربوط به درون شهری و ٦ مسیر آن مربوط به حومه شهر است. از آنجایی که پایانه‌ای در این شهر وجود ندارد، سازمان اتوبوس‌رانی شهر اردبیل برای مرتفع کردن مشکلات ناشی از عدم وجود پایانه، خطوط اتوبوس را به صورت قطری در نظر گرفته است که این باعث روان‌سازی ترافیک و افزایش سرعت جابه‌جایی مسافر و غیره می‌شود. همچنین دارای ۱۷۷ دستگاه اتوبوس است که فعلاً (شهریور ۱۳۹۳) تعداد ١٦٤ دستگاه آن فعال است، ۱۳۹ دستگاه آن در درون شهر فعال و ۲۵ دستگاه اتوبوس در حومه شهر به ارایه خدمات می‌پردازند. سیستم اتوبوس‌رانی شهر اردبیل بیشتر بر اساس سیستم سنتی و صنعتی بنا شده است. اصولاً در طراحی سیستم اتوبوس‌رانی شهر، اصول شهرسازی رعایت نشده است و برای هر جا که جمعیت بیشتری ساکن شده، ایستگاه اتوبوس تعیین شده است. شاخص‌هایی که در یک شبکه اتوبوس‌رانی مد نظر است، عبارتند از: حمل و نقل سریع، ارزان و مطمئن، که متأسفانه در حمل و نقل عمومی شهر اردبیل شاخص اول یعنی حمل و نقل سریع به هیچ عنوان رعایت نشده است به گونه‌ای که به گفته مسئولین سازمان اتوبوس‌رانی، در دهه ۷۰ سرعت جابه‌جایی مسافر ۲۵ کیلومتر بر ساعت بوده است که اکنون این سرعت جابه‌جایی به ۹ کیلومتر بر ساعت کاهش یافته است و این شرایط باعث کاهش شدید محبوبیت حمل و نقل عمومی در شهر شده است. دو گزینه دیگر یعنی مطمئن و ارزان بودن نیز تا حدودی رعایت شده است. متأسفانه با وجود اینکه شهر اردبیل بسیار گسترش یافته و به کلان شهر تبدیل شده است ولی طراحی مسیرهای اتوبوس‌رانی شهر اردبیل از دهه ۷۰ تاکنون تغییر چندانی نکرده است و اتوبوس‌ها در مسیرهای قبلی خود به فعالیت ادامه می‌دهند. هر چند که شهرک‌های بسیاری در حاشیه شهر ایجاد شده است و تقاضاهای جدید و بیشتری از سازمان حمل و نقل عمومی در خواست می‌شود ولی به دلیل اینکه به گفته مسئولین سازمان اتوبوس‌رانی شهر اردبیل در طراحی خیابان‌ها و معابر شهرک‌های جدید، مکانی برای ارایه خدمت سیستم حمل و نقل عمومی در نظر گرفته نمی‌شود، بسیاری از همشهریان محترم از خدمات حمل و نقل عمومی بی‌بهره‌اند و مجبور به استفاده از وسایل نقلیه شخصی می‌شوند که این نیز باعث ایجاد ترافیک شدید در مراکز مختلف می‌شود. از دیگر مشکلات سازمان اتوبوس‌رانی شهر اردبیل این است که، مسیر اتوبوس‌رانی شهر بر اساس سه الگو برنامه‌ریزی می‌شود: اماکن تجاری، اماکن مذهبی، اماکن پزشکی؛ که هر سه این اماکن در مراکز اصلی شهر یعنی "تازه میدان"، "سرچشمه" و "شریعتی" قرار گرفته‌اند که نقاط پر ترافیک شهر را تشکیل می‌دهند. به گونه‌ای که ارایه خدمات حمل و نقل عمومی در این مراکز با مشکلات ترافیکی زیادی روبرو است. شکل (۲) گراف خطوط اتوبوس‌رانی درون شهری شهر اردبیل را نشان می‌دهد که از ۸۲ تقاطع اصلی تشکیل شده است.



شکل ۲. گراف مسیرهای اتوبوس‌رانی **شهر اردبیل**

طول خطوط تحت پوشش سیستم اتوبوس‌رانی اردبیل حدود ۳۳۰ کیلومتر است و اکثر خطوط از مراکز اصلی شهر عبور می‌کنند. متأسفانه در شهر اردبیل پایانه‌ای وجود ندارد و به دلیل اینکه خیابان‌های موجود کم‌عرض هستند و همچنین در اکثر خیابان‌ها پهلوگاه وجود ندارد و از طرفی ایجاد پایانه در درون شهر بسیار پرهزینه است؛ به جای پایانه، ایستگاه‌های مرکزی در نظر گرفته شده است. شهر اردبیل دارای پنج ایستگاه مرکزی به نام‌های میدان مبارزان، میدان امام حسین، بازار، میدان سرچشمه و میدان شریعتی است که در مراکز اصلی شهر قرار دارند و بیشتر مسیرهای درون شهری از این پنج ایستگاه مرکزی عبور می‌کنند. اطلاعات به دست آمده از سازمان اتوبوس‌رانی شهر اردبیل که در این تحقیق مورد نیاز بوده است در جدول (الف) موجود در پیوست ارایه شده است.

٦. نتایج محاسباتی

جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، از اطلاعات به دست آمده از مطالعه موردی (سیستم اتوبوس‌رانی شهر اردبیل) استفاده شده است (جدول الف در پیوست). جهت حل این مسایل، الگوریتم‌ها را در نرم‌افزار MATLAB 7.8 پیاده‌سازی و نتایج حاصل از اجرای آن‌ها، که در شکل‌های (۳) و (٤) آمده است باهم مقایسه شده است. در شکل شماره (۳) نتایج حاصل از مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم VEPSO در ۱۰۰ تکرار آمده است که نشان می‌دهد در هر دو شکل با افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم، هم تابع هدف اول یعنی حداقل کردن تعداد اتوبوس‌ها و هم تابع هدف دوم یعنی حداقل کردن هزینه سفر؛ کاهش می‌یابد به طوری که از تکرار ۵۰ام به بعد مقدار بهینه اتوبوس مورد نیاز ۸۱ دستگاه و حداقل هزینه سفر ٥٦٥٠ ثانیه می باشد. در شکل شماره (٤) نیز نتایج حاصل از مدل ارائه شده توسط الگوریتم MOPSO آمده است که آن نیز نشان می‌دهد با افزایش تعداد تکرار های الگوریتم MOPSOتعداد بهینه اتوبوس های مورد نیاز و نیز حدقل هزینه سفر کاهش می یابد، ولی تقریبا از تکرار۵۰ام به بعد حداقل اتوبوس مورد نیاز حدود ۹٦ دستگاه و نیز هزینه سفر حدود ٦٤٥٠ ثانیه است.

٦-١ تنظیم پارامتر

بـه منظور تنظیم پـارامتر الگوریتم، چنـدین روش آمـاری برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارد که در این مقاله، از روش تاگوچی اسـتفاده شده است. با توجه به اینکه همه توابع هدف مربوط به مسـیریابی وسـایل نقلیه از نوع کمینه‌سـازی است بنابراین، نرخ *S/N* مربوط به آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [Taguchi and Chowdhury, 2005]:

$$\frac{S}{N_s} = -10\, log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2) \qquad (٢٠)$$

که در اینجا n تعداد تکرار آزمایش و y_i پاسـخ مسأله است. در این آزمایش، هدف یافتنِ مقدار پارامترهای الگوریتم VEPSO به عنوان متغیر ورودی برای به دسـت آوردن پاسخ بهینه است. پارامترهای الگوریتم VEPSO عبارتند از: c_1^k (ضـریبی که به بهترین مکان هر عنصـر می‌دهیم)، c_2^k (ضـریبی که به بهترین مکان گروه داده می‌شـود)، و تعداد تکرار برنامه اسـت که در جدول (١) نشـان داده شـده است. لازم به ذکر است که پارامتر x^k (ضریبی که به مکان کنونی عنصر نسبت می‌دهیم) ثابت در نظر گرفته شـده اسـت. یعنی $x^k = 1$ در نظر گرفته شـده است. با توجه به اینکه برای هر پارامتر دو حالت در نظر گرفته شـده اسـت، در کل باید ٨=2^3 حالت بررسـی شـود ولی طبق روش تاگوچی ٤ حالت بررسـی می‌گردد. همچنین هر کدام از حالات، ١٠ بار تکرار شده است.

نتایج جدول (٢)، میـانگین نرخ *S/N* برای ١٠ اجرای مسأله بـرای ٤ حالت آزمایش تاگوچی را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی (١٩)، هـر چقـدر نسـبت *S/N* بیشـتر باشد، جـواب‌هـای بهتـری از الگـوریتم کسـب مـی‌شـود. بنابراین آزمایش‌های دوم و سـوم، جواب بهتری را بدسـت می‌دهند. میانگین عملکرد هر کدام از عوامل به طور مجزا محاسبه شده و در جدول (٣)، ثبت شده است. از این رو، پارامترهـای ورودی الگـوریتم VEPSO برای حل مدل پیشـنهادی عبارتند از ضریبی که به بهترین مکان هر عنصر نسبت می‌دهیم، برابر ٠/٥٥ و ضـریبی که به بهترین مکان گروه نسبت می‌دهیم، برابر ٠/٧٥ و تعداد تکرار برنامه، ١٠٠ به دست آمده است.

٦-٢ تحلیل نتایج محاسباتی

بررسی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه از عملکرد الگوریتم‌های یـک هدفه بسـیار پیچیده‌تر اسـت و یک شـاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارایه شـده کافی باشـد. از این رو در این مقاله، برای بررسی نتایج با اسـتفاده از نتایج شـکل (٣) و (٤) از شاخص‌های زیر استفاده می‌شود:

جدول ١. پارامترهای الگوریتم VEPSO در دو سطح

متغیرها	سطح ١	سطح٢
c_1^k	A_1=٠/٥٥	A_2=٠/٧٥
c_2^k	B_1=٠/٥٥	B_2=٠/٧٥
تعداد تکرار برنامه	C_1=٥٠	C_2=١٠٠

جدول ٢. میانگین نرخ *S/N* برای چهار حالت آزمایش تاگوچی

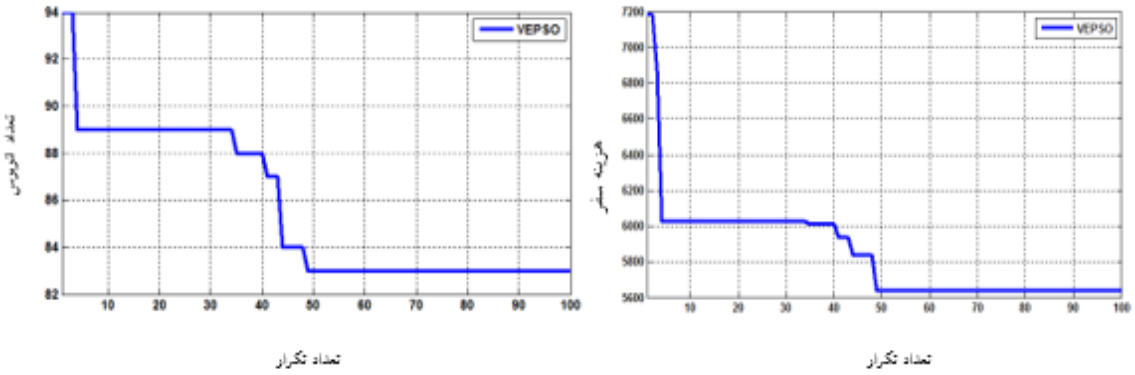
آزمایش	A	B	C	S/N
١	١	١	١	-٢/٤
٢	١	٢	٢	-٢/٥
٣	٢	١	٢	-٢/٥
٤	٢	٢	١	-٢/٤

جدول ۳. میانگین عملکرد هر کدام از سه عامل در دو سطح

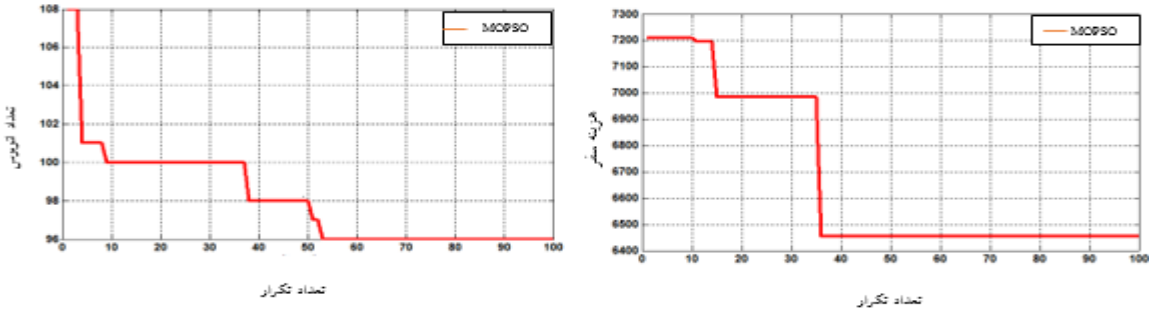
فاکتور	میانگین عملکرد
A1	-۲/۵
A2	-۲/٤
B1	-۲/٤
B2	-۲/۵
C1	-۲/٤
C2	-۲/۵

- **کیفیت**: کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم MOPSO و VEPSO، دو شاخص تعداد حداقل اتوبوس‌های مورد نیاز هر مسیر و حداقل هزینه‌ی هر مسیر، در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از حل دو الگوریتم بر اساس داده‌های واقعی به دست آمده از مطالعه موردی در ۱۰۰ تکرار در شکل‌های زیر نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده تعداد حداقل اتوبوس‌های الگوریتم VEPSO در هر ۱۰۰ تکرار بهتر از الگوریتم MOPSO است و از نظر هزینه نیز در هر ۱۰۰ تکرار الگوریتم VEPSO جواب بهتری نسبت به الگوریتم MOPSO دارد.
- **زمان حل**: با افزایش تعداد تکرارها، زمان حل هم افزایش می‌یابد و در کل میانگین زمان حل الگوریتم MOPSO (۰/۳۱ ثانیه) از VEPSO (۰/٥٤ ثانیه) کمتر است. البته زمان حل مسأله، به نوع برنامه‌نویسی نیز وابسته است، اما برای برنامه نوشته شده در این مقاله این قاعده برقرار است.
- **نرخ همگرایی**: همچنین نتایج الگوریتم VEPSO نشان می‌دهد که بعد از ۵۰ تکرار تابع هدف اول و تابع هدف دوم به طور هم‌زمان به مقدار بهینه‌ای همگرا می‌شوند که این نشان‌دهنده قابلیت همگرایی الگوریتم پیشنهادی است.

در تجزیه و تحلیل حساسیت با هدف کسب راه کارهایی برای مدیریت شبکه، با انجام ۱۰۰ تکرار اولیه بر روی مدل، می‌توان نتیجه گرفت که متغیر تعداد اتوبوسهای شبکه حمل و نقل از حساسیت بیشتری برخوردار است و اگر تعداد اتوبوسها کمتر از ٦۰ دستگاه بشود، زمان سفر به طور فزاینده ای افزایش یافته و در نتیجه کارایی سیستم حمل و نقل عمومی به شدت کاهش می‌یابد. واضح است که تامین تعداد بهینه دستگاه های اتوبوس منجر به مدیریت بهتر شبکه حمل و نقل عمومی می‌شود.



شکل ۳. نتایج حاصل از روش VEPSO برای مدل پیشنهادی



شکل ۴. نتایج حاصل ازروش MOPSO برای مدل پیشنهادی

۷. نتیجه‌گیری

گسترش شهرها، باعث افزایش تقاضای سفر در ساعات اوج کار و تحصیل شده است. پاسخگویی به نیاز سفر جمعیت شهرهای بزرگ، از عهده وسایل نقلیه غیرجمعی ساخته نیست. بنابراین، روی آوردن به سمت استفاده از انواع سیستم‌های حمل و نقل عمومی، جهت جابجایی مردم در شهرها، امری بدیهی و اجتناب‌ناپذیر است. همچنین با توجه به افزایش بسیار زیاد هزینه‌های توسعه شبکه خیابانی برای استفاده وسایل نقلیه شخصی و پیامدهای منفی وسیع آن، توسعه سیستم‌های حمل و نقل همگانی به عنوان یک راه حل اصولی برای شهرهای بزرگ محسوب می‌شود. این سیستم‌ها برای نیل به اهداف متفاوتی از جمله افزایش راحتی و امنیت سفر، کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط زیست، کاهش زمان سفر و حل مشکلات ترافیکی ناشی از تردد وسایل نقلیه شخصی ایجاد می‌شوند. با توجه به NP-hard بودن مسایل مسیریابی جهت حل مدل پیشنهادی از یک الگوریتم VEPSO استفاده و نتایج آن با الگوریتم MOPSO مقایسه شده است. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم VEPSO و MOPSO با استفاده از دو شاخص تعداد حداقل اتوبوس‌های هر مسیر، حداقل زمان هر مسیر نشان می‌دهد اگر چه زمان حل الگوریتم VEPSO بیشتر از الگوریتم MOPSO است اما بهتر بودن کیفیت جواب‌های الگوریتم پیشنهادی در مقابل MOPSO، استفاده از این الگوریتم را جهت حل مدل مسیریابی موردنظر پیشنهاد می‌دهد.

در بهینه‌سازی مسیرهای اتوبوس‌رانی با استفاده از الگوریتم VEPSO، می‌توان یک سری بهبودها به مسأله داد و مبحث مبدأ ثابت را به مبدأ متغیر تبدیل کرد. همچنین تعیین ضرایب وزنی در تابع هدف بسیار اهمیت دارد که می‌تواند به عنوان یک مسأله به آن توجه ویژه داشت. البته در تعیین مسیر بهینه می‌توان راحتی سفر و نیز یک مسیره بودن مسیر و خط عوض نکردن مسافران را نیز مد نظر قرار داد. ایجاد یکسری امکانات روی دستگاه‌های اتوبوس مثل دستگاه‌های GIS روی اتوبوس‌ها و ایجاد مانیتورهایی در هر ایستگاه به گونه‌ای که با اندازه‌گیری محل اتوبوس و اطلاعاتی مثل حجم ترافیکی محل در آن بازه زمانی و طول خیابان، زمان رسیدن اتوبوس را تخمین بزنیم. اگرچه اجرای این گونه پروژه‌ها هزینه‌بر است ولی رضایت بیشتر مسافران را به دنبال خواهد داشت.

۸. پی‌نوشتها

1. Vector-Evaluated Particle Swarm Optimization
2. Non-deterministic Polynomial Hard
3. Multi-Objective PSO
4. Vehicle Routing Problem
5. Traveling Salesman Problem
6. Tabu Search
7. Memetic Algorithm
8. Capacitated VRP
9. Split Delivery VRP
10. Stochastic VRP
11. VRP with Time Windows
12. Multi-depot VRP
13. Simulated Annealing
14. Genetic Algorithm
15. Periodic Vehicle Routing Problem
16. Improved Particle Swarm Optimization
17. Improved Simulated Annealing
18. Personal Best
19. Global Best
20. Inertia Wight
21. Acceleration Coefficient

۹. مراجع

- آقاجان‌زاده، ح. و آقاجان‌زاده، ن. (۱۳۸۸) "یافتن مسیر بهینه حرکت برای اتوبوس‌های درون شهری و بهترین محل برای احداث ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری بوسیله الگوریتم ژنتیک"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس شهر الکترونیکی.
- برگ‌گل، الف.، کیامهر، ر.، احمدی چالسرا، ع.، احمدی چالسرا، م. (۱۳۹۲) "بهینه‌سازی شبکه اتوبوس‌رانی درون‌شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: شهر رشت)"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری.
- تارخ، ج.، دبیری، م.، یدالله نژاد، ن.الف. و کرمی، و. (۱۳۹۰) "مدلسازی و حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه با تابع هزینه پله‌ای وابسته به مقدار بارگیری (مطالعه موردی: شرکت فرگاز مازندران)"، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ٤٥، شماره ۲، ص. ۱۳۱-۱٤٤.
- توکلی‌مقدم، ر.، علینقیان، م.و سلامت بخش، ع. (۱۳۹۳) " مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره ای با پنجره زمانی در حالت رقابتی با روش شبیه سازی تبرید بهبود یافته"، فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، دوره ٥، شماره ٤، ص. ٤٤٩-٤٧٠.
- چگینی، ف.، صفارزاده، م.، زرین مهر، الف.ع. و فغانی، ع. (۱۳۹۱) "طراحی شبکه اتوبوسرانی با هدف بیشینه‌سازی رضایت استفاده کنندگان"، دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک.
- حسنی‌نسب، س.ش.، صفارزاده، م و ممدوحی، الف.ر. (۱۳۹۰) "روشی برای مسیریابی بهینه در حمل و نقل همگانی یکپارچه شبکه اتوبوس و اتوبوس تندرو"، فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، سال ۲، شماره ٤، ص. ۳۰۳-۳۱٦.
- عیدی، ع.، قاسمی نژاد، س.ع. و محققی، ح. (۱۳۹۲) "مسیریابی وسایل نقلیه چندهدفه با کالاهای مناسبتی"، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ٤٧، شماره ۲، ص. ۲۱۵ تا ۲۲۸.
- کهفی، ع. و توکلی‌مقدم، ر. (۱۳۹٤) "حل مدل مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره مبتنی بر کاهش ریسک با استفاده از یک الگوریتم خفاش چندهدفه"، فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، دوره ٦، شماره ۳، ص. ۳۸۳-٥٤٧.
- مهرآوران، م.، فرقانی، و. و باقری، ع. (۱۳۹۱) "مسیریابی بهینه سیستم‌های اتوبوس‌رانی داخل شهری با استفاده از الگوریتم **ژنتیک**"، دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک.
- یقینی، م.، مومنی، م. و سرمدی، م.ر. (۱۳۸۹) "یافتن کوتاهترین مسیر همیلتونی برای شهرهای ایران با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی ممنوعه و ممتیک"، فصل نامه مهندسی حمل و نقل، سال ۲، شماره ۲، **ص. ۱۸۱-۱۹**
-
- Baños, R., Ortega, J., Gil, C., Márquez, A. L. and deToro, F. (2013) "A hybrid meta-heuristic for multi objective vehicle routing problems with time windows", Computers and Industrial, Engineering, Vol. 65, No. 2, pp. 286-296.
- Bielli, M., Caramia, M. and Carotenuto, P. (2002) "Genetic algorithms in bus network optimization", Transpiration Research, Part C 10, pp. 19-34.
- Chakroborty, P. (2003) "Genetic algorithms for optimal urban transit network design", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, pp. 184-200.
- Chakroborty, P. and Wivedi, T. (2002) "Optimal route network design for transit system using genetic algorithms", Journal of Engineering Optimization, Vol. 34, No 1, pp. 83-100.
- Coello, C. C. (1999) "A comprehensive survey of evolutionary-based multi-objective optimization techniques", Knowledge and Information Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 269-308.
- Ghannadpour, S. F., Noori, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014) "A multi-objective vehicle routing and scheduling problem with uncertainty in customers' request and priority", Journal of Combinatorial Optimization, Accepted for publication, Vol. 28, No. 2, pp. 414-466.
- Hahsler, M and Hornik, H. (2009) "Introduction to TSP-infrastructure for the

traveling salesperson problem ", Journal of Statistical Software, Vol. 23, pp.1-21.

- Hwe, S. K., Cheung, R., Wan, Y. (2006) "Merging bus routes in Hong Kong's Central Business District: Analysis and models", Transportation Research, Part A, 40, pp.918-935.
- Kechagiopoulos, P. and Beligiannis, G. (2014) "Solving the Urban Transit Routing Problem using a particle swarm optimization based algorithm", Applied Soft Computing Vol. 21, pp. 654–676.
- Kennedy, J., Eberhart, R. C. and Australia, P. (1995) "Particle swarm optimization", Proc. IEEE International Conferences Neural Networks 1995 (ICNN'95), Vol. 5, pp.1942-1948.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1997) "A discrete binary version of the particle swarm algorithm", IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Vol.5, pp. 4104-4108.
- Kritikos, M. N. and Ioannou, G. (2013) "The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows", Int. J. Production Economics, Vol. 144, No. 1, pp. 68-75.
- Moore, J. and Chapman R. (1999) "Application of particle swarm to multi-objective optimization", Department of Computer Science and Software Engineering, Auburn University.
- Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M. and Alinaghiyan, M. (2015) "Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem", Journal of Measurement, Vol. 62, pp.162–169.
- Parsopoulos, K. E. and Vrahatis, M. N. (2010) "Particle swarm optimization and intelligence advances and applications", Yurchak Printing Inc., United Sates of America, ISBN 978-1-61520-666-7.
- Szeto, W. and Yongzhong, W. (2010) "A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong", European Journal of Operational Research, Vol. 209, pp. 141-155.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y. (2005) "Taguchi's quality engineering handbook", Wiley Publishing.
- Yang, C. and Simon, D. (2005) "A new particle swarm optimization technique", 18th International Conferences System Engineering, 2 .ICS Eng. 2005, pp.164-169.
- Zhao, F. (2006) "Larg-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers", Journal of Public Transportation, Vol. 9, No. 2, pp. 107-129.
- Zhao, F. and Zeng, X. (2006) "Simulated annealing-genetic algorithm for transit network optimization", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 57-68.

پیوست:

جدول الف. اطلاعات مسیرهای اتوبوس‌رانی شهر اردبیل

ردیف	نام مسیرها	طول مسیر رفت و برگشت (کیلومتر)	زمان رفت و برگشت (دقیقه)	تعداد اتوبوس فعال در هر مسیر	تعداد مسافر جابه جا شده هر دستگاه در هر مسیر (روزانه)	متوسط مسافر جابه جا شده در هر مسیر (روزانه)
۱	کارشناسان – جام جم	۲۸	۱۲۰	۱۲	۸۹۰	۹۶۰۰
۲	شهرک سبلان – سرچشمه	۱۶	۶۰	۸	۶۷۵	۶۴۰۰
۳	باکری – بازار	۱۸	۶۰	۸	۷۵۰	۶۴۰۰
۴	شهرک کوثر – شریعتی	۱۸	۷۰	۸	۷۰۰	۶۴۰۰
۵	کشتارگاه – قیام	۱۸	۶۰	۹	۷۶۰	۶۴۰۰
۶	شهرک سینا – بازار	۲۰	۶۰	۱۰	۶۷۵	۸۰۰۰
۷	بهشت زهرا – بازار	۱۵	۶۰	۴	۷۸۰	۳۲۰۰
۸	گلمغان – عالی قاپو	۱۶	۴۵	۶	۸۵۰	۴۸۰۰
۹	هنرستان رازی – پیرعبدالملک	۱۰	۶۰	۶	۶۳۰	۴۸۰۰
۱۰	ملاباشی – بازار	۱۱	۳۰	۴	۷۱۰	۳۲۰۰
۱۱	شهریار – بازار	۱۰	۳۰	۴	۷۸۰	۳۲۰۰
۱۲	رسالت – خاتم النبین	۳۰	۱۲۰	۱۵	۷۸۰	۱۲۰۰
۱۳	نیار – نیستان	۲۱	۸۰	۸	۵۵۰	۶۴۰۰
۱۴	حافظ – توحید	۲۱	۸۰	۱۰	۷۹۰	۶۴۰۰
۱۵	آزادی – زرناس	۲۲	۸۰	۷	۷۹۰	۵۶۰۰
۱۶	میدان وحدت – مصلی	۱۵	۶۰	۶	۶۸۰	۴۸۰۰
۱۷	کلخوران – حکیم نظامی	۲۰	۱۲۰	۱۴	۸۴۰	۱۱۲۰۰

اسفندیار عطایی، رضا توکلی مقدم، زینب عزیزی بالابیگلو

اسفندیار عطائی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه پیام نور تهران شمال اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تئوری بازی، شبکه های زنجیره تامین، الگوریتم های فراابتکاری، تصمیم گیری، طرحریزی واحدهای صنعتی و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه مربی در دانشگاه پیام نور است.

رضـا توکلی مقدم، عضـو هیات علمی دانشـگاه تهران، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشـگاه ملبورن – استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین‌برن – استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان در طراحی سیستم‌های صنعتی، مسـیریابی وسـایط حمل و نقل، لجسـتیک و طراحی شـبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی است.

زینب عزیزی بالابیگلو، درجه کارشناسی در رشته ریاضی محض را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشـناسـی ارشـد در رشـته مهندسـی صنایع – گرایش سیستم های اقتصادی اجتماعی را در سال ۱۳۹۲ از دانشـگاه پیام نور تهران شـمال (شـمیرانات) اخذ نمود. زمینه های پژوهشـی مورد علاقه ایشـان مسـیریابی وسایل نقلیه، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ، بهینه سازی مسائل حمل ونقل، زمان بندی وسایل حمل و نقل است.