نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۲، شماره ۴، صفحه ۱۰۷ تا ۱۲۰، خرداد ماه ۱۴۰۲ - مقاله ترویجی

بهینه‌سازی دریافت و ارسال مرسولات پستی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمدرضا جنیدی*[۱]، جواد صابریان[۲]

[۱] دانشجوی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
Mr.Joneidi55@gmail.com

[۲] استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
J_Saberian@azad.ac.ir

(تاریخ دریافت: فروردین ماه ۱۴۰۰، تاریخ تصویب: آذر ماه ۱۴۰۰)

چکیده

افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی در دهه‌های اخیر مدیریت شهری را به چالش کشیده‌است و مسئله حمل‌ونقل شهری یکی از موضوعات مهم در این زمینه است. بنابر اهمیت این موضوع و نقش مهم حمل و نقل کالا در اقتصاد، مسئله حمل‌ونقل مرسوله‌های پستی، موضوع این پژوهش است. بکارگیری روش‌های قدیمی و تجربی منجر به افزایش طول مسیر دریافت و تحویل مرسوله‌ها می‌شود که در نهایت منجر به افزایش هزینه‌های مربوطه می‌شود. بنابراین، نیاز است که این مسئله با روش‌های علمی انجام شود و با بهینه‌سازی بتوان هزینه‌ها (و ترافیک شهری) را کاهش داد. در این پژوهش، به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری مسئله دریافت و تحویل مرسولات پستی بهینه‌سازی شده‌است. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی دریافت و تحویل مرسولات استفاده شده‌است و در آن ماتریس هزینه سفر بین نقاط دریافت و تحویل مبنای محاسبات است. در مدل پیشنهادی، چینش دریافت و تحویل مرسولات در هر کامیون پستی، در یک سطر قرار گرفته و پنج سطر که معرف پنج کامیون (مرکز پستی) هستند در یک ماتریس ایجاد شد. الگوریتم ژنتیک با ایجاد تصادفی این ماتریس‌ها (کروموزوم‌ها یا همان جواب‌های مسئله) و اندازه‌گیری تابع بهینگی (هزینه سفر) هر ماتریس، جواب نهایی را بهینه می‌کند. برای پیاده‌سازی شهر تهران به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد و داده‌های شبکه معابر منطقه مطالعاتی به ابزار تحلیل‌گر شبکه وارد شد. سپس، ماتریس‌های هزینه سفر بین نقاط دریافت و تحویل و مراکز استقرار کامیون‌ها از داده‌ی نقاط ۵۰ مرسوله استخراج و وارد مدل شد. پس از تولید خروجی که بهینه‌ترین ترتیب نقاط تحویل و دریافت مرسولات است با اولین جواب تصادفی ساخته‌شده (به عنوان روش سنتی و برنامه‌ریزی نشده) مقایسه شد. مجموع طول طی‌شده کلی برابر با ۵۵۱۶۸۹ متر است که از ۷۲۰۲۸۷ متر طول کلیِ جواب تصادفی اولیه ۱۶۸۵۹۸ متر کمتر است که نشان از صرفه‌جویی ۲۳/۴ درصدی دارد.

واژگان کلیدی: دریافت و تحویل مرسوله پستی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، حمل‌ونقل شهری.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

سیستم‌های حمل و نقل کارا، نقش بسزایی در پویایی اقتصاد یک جامعه دارند. امروزه تقریبا در تمام بخش‌های زنجیره تامین در صنعت و همچنین زندگی روزمره مردم، نیاز به برنامه‌ریزی در مسئله‌ی ارسال و تحویل بسته‌های پستی، احساس می‌شود. در تجارت مدرن امروزی درصد قابل توجهی از کل هزینه محصول بابت حمل و نقل آن است و برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی در همین بخش می‌تواند تاثیر زیادی بر رشد اقتصادی جامعه بگذارد.

با رشد تکنولوژی، ظهور روش‌های جدید برای فروش کالا و ایجاد کسب‌وکارهای جدید، بخش قابل توجهی از کالاها از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود. افزایش وسایل نقلیه باعث افزایش هزینه، آلودگی‌های صوتی و هوا و نیز حوادث می‌شود. برنامه‌ریزی مسیر و مدیریت حمل و نقل، کلید کاهش اثرات منفی این مقوله است، که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌ها و آلودگی هوا می‌شود. پیشرفت‌های حوزه هوش مصنوعی این امکان را برای دانشمندان فرآهم کرده‌است که با بکارگیری تکنیک‌ها و الگوریتم‌های نوین، نوآوری‌هایی را در زمینه‌ی برنامه‌ریزی خودکار حمل و نقل و پست ارائه نمایند.

مسئله مسیریابی خودرو Vehicle Routing Problem (VRP) بخش مهم پژوهش‌های حوزه حمل‌ونقل کالا است. می‌توان فرض کرد که در یک شبکه معابر باید مجموعه‌ای از مسیرها با حداقل هزینه برای وسایل نقلیه، با در نظر گرفتن یک نقطه مبدا به عنوان مرکز سرویس‌دهی، برای خدمت‌رسانی به مشتریان پیدا کرد. البته در این روش هر خودرو باید به همان نقطه‌ای (انبار مرکزی) برگردد که از آن خارج شده‌است و دقت شود که از هر نقطه متقاضی باید یک بار بازدید شود [۱].

Dantzig و Fulkerson این مسئله را بررسی و معرفی نمودند و سپس مدل اولیه حل مسیریابی خودرو جهت فرآهم شدن نیازهای واقعیِ پیچده و پویا، دچار تغییر و تحول شد. همزمانی دریافت و ارسال مرسولات پستی و اهمیت زمان تحویل آن‌ها موضوع Pickup and Delivery Problem را که زیرمجموعه VRP است مطرح می‌کند. اما برخلاف VRP، در PDP فرض می‌شود که خدمات گوناگونی (وجود یک دریافت و یا تحویل در هر محل) به مشتریان ارائه شود [۲].

البته با توجه به شرایط گوناگون در دنیای واقعی، انواع مختلفی از مسئله PDP معرفی شده‌اند. بعنوان مثال، در نظر گرفتن نقطه مرکزی سرویس‌دهی(انبار) یا محل موردنیاز مشتری به عنوان مبدا و مقصد مرسوله، میزان بار جابجایی، ... . همچنین، می‌توان محدودیت زمانی و ظرفیت خودرو را به عنوان محدودیت(قید)های حل مسیریابی در مسئله PDP اعمال نمود. بنابراین یکی از کاربردهای گوناگون مسئله‌ی PDP در حمل و نقل مرسوله‌های پستی است [۳].

بنابراین با افزایش جمعیت و نیاز به خدمات گوناگون پستی، اهمیت بالای مسائل زیست محیطی، کاهش اتلاف زمان و مصرف منابع در کسب‌کارها و همزمان با بیشینه کردن خدمات، نیاز به بهینه‌سازی مسئله تحویل و ارسال محموله‌های پستی به شدت احساس می‌شود. در این پژوهش تعدادی مرسوله از یک سری مراکز پستی با توجه به بهینه‌سازی فاصله، جابجا می‌شود. همچنین، الگوریتم ژنتیک به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و توانایی جست‌وجو در فضای مجموعه جواب بزرگ بکارگرفته می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

در مسئله دریافت و تحویل مرسولات پستی سه زیر مجموعه از جمله مسئله چند به چند، یک به چند-چند به یک و یک به یک وجود دارد. [۴]. در حالت یک به یک، هر درخواست دارای یک مبدا و یک مقصد خاص است. Naccache و همکاران مسئله دریافت و تحویل با پنجره‌های زمانی را با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی وسیع همسایگی حل کرده‌اند. هر درخواست دریافت شامل یک سری درخواست‌های متعدد است که محل تحویل آن یک نقطه است. نتایج نشان می‌دهد که روش توسعه داده شده از روش‌های ریاضی قطعی کارایی بهتری دارد [۵].

Wang و همکاران مسئله Pickup and delivery vehicle routing problem (PDPVRP) را در حالت چند انبار مرکزی بررسی نمودند. در این تحقیق بجای الگوریتم‌های فراابتکاری از مدل mixed-integer programming استفاده شده‌است. همچنین برای تخصیص مرسولات به خودروهای حمل بار از روش خوشه‌بندی k-means سه بعدی استفاده شده‌است. نتایج نشان داد که تقسیم کردن تقاضاها با کمک روش خوشه‌بندی تاثیر بسزایی در بهینه‌سازی جواب نهایی مسئله دارد [۶].

Park و همکاران از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل مسئله دریافت و تحویل همزمان مرسولات پستی استفاده کردند و استراتژی انتظار را برای تصمیم‌گیری تخصیص خودرو به محل تقاضا مدل‌سازی کردند تا از آنجا که مدل مدنظر بصورت پویا بوده، با عدم تخصیص فوری و انتظار برای دریافت تقاضاهای بیشتر و سپس برنامه‌ریزی مسیر خودرو، بازدهی مدل را بالا ببرند [۷].

Azizi و Hu اثر نوع محصولات پستی را در برنامه‌ریزی سفر خودروهای حمل مرسولات با کمک مدل integrated mixed integer linear programming بررسی کردند. در یک سناریو خودروها فقط یک نوع محصول را به مقصد رسانده و در سناریو دوم چندین نوع مرسوله بارگذاری شد که نتایج نشان داد که روش دوم بهینه‌تر عمل می‌کند [۸].

Grimault و همکاران یک الگوریتم جست‌وجوی وسیع همسایگی تطبیقی برای مسئله دریافت و تحویل در حالتی که کامیون‌های حمل مرسوله‌ها با هماهنگ‌سازی منابع کاملا پر شوند، توسعه دادند. در این پژوهش یک الگوریتم Adaptive Large Neighborhood Search برای جستجوی فضای جواب استفاده شد. نتایج مدل روی یک سری داده‌ی واقعی نشان از بهبود برنامه‌ریزی زمانی برای کامیون‌های حمل کالا در نقاط تخلیه و بارگیری داشته‌است [۹].

Benavent و همکاران مسئله دریافت و تحویل چندگانه را با استفاده از تکنیک LIFO[1] بهینه‌سازی کرده‌اند. در این روش آخرین بسته دریافتی در ابتدای صف تحویل قرار می‌گیرد. بدین شکل روند تحویل مرسوله‌ها تا ۷۵ عدد در ساعت ارتقا پیدا کرده‌است. البته در این پژوهش از الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه نیز کمک گرفته شده‌است [۱۰].

Tajik و همکاران مسئله دریافت و ارسال مرسولات را با در نظر گرفتن کاهش دی‌اکسیدکربن تولیدیِ خودروها بررسی کردند. در این پژوهش مدل Time Window Pickup-Delivery Pollution Routing Problem برای داده‌های ورودی غیرقطعی توسعه داده شده‌است. هدف این مدل نه تنها کمینه‌سازی فاصله زمانی و تعداد خودروهای درگیر، بلکه کاهش مصرف سوخت خودروها نیز بوده‌است. نتایج آزمایش نشان‌دهنده‌ی توانایی این مدل در کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌ها است [۱۱].

Goksal و همکاران مسئله دریافت و ارسال را در حالت دریافت و تحویل همزمان در یک نقطه را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات[2] انجام داده‌اند. در این تحقیق از آنجا که در نقاط تقاضا هم دریافت و هم تحویل وجود داشته‌است نام آن به Vehicle Routing Problem With Simultaneous Pickup And Delivery تغییر کرد. مبنای الگوریتم PSO بکار گرفته شده در این پژوهش استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی نزولی متغیر است که در آن تنها در حالتی ذرات(جواب‌ها) در الگوریتم PSO به حلقه بعدی محاسبات راه پیدا می‌کنند که نقطه‌ی بعدی بهینه‌تر از نقطه فعلی جواب باشد [۱۲].

Masson و همکاران مسئله دریافت و ارسال مرسولات را با استفاده از الگوریتم Adaptive Large Neighborhood Search در حالت پویا حل کردند که درخواست‌ها در طی زمان سفر خودرو تغییر می‌کرد. نقل و انتقالات و درخواست‌ها در محل‌های خاصی به نام «transfer point» صورت می‌پذیرد. تمرکز این پژوهش روی درخواست‌های قشرهای خاص دارای ناتوانی جسمی که فقط در مکان‌های خاصی می‌توانند درخواست‌ها را قرار دهند، است [۱۳].

Fan مسئله دریافت و ارسال را با در نظر گرفتن معیار میزان رضایت مشتری (دارای رابطه معکوس با زمان رسیدن خودرو حمل کالا) بررسی کرده‌است. هدف تحقیق کمینه‌سازی مجموع مسیر خودرو برای کاهش هزینه و بیشینه کردن رضایت مشتریان جهت ارتقا کیفیت سرویس‌دهی است و از الگوریتم Tabu Search استفاده شده‌است [۱۴].

Davoodi و همکاران از یک روش ترکیبی (الگوریتم زنبور عسل و ژنتیک) برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه استفاده کرده‌اند. در این تحقیق یک نقطه به عنوان انبار مرکزی (نقطه شروع و پایان) و پنج خودرو با ظرفیت چهار واحد در نظر گرفته شده‌است. همچنین دو تکنیک همسایگی دور و نزدیک برای انتخاب تصادفی نقاط درخواست در آرایه‌ی جواب استفاده شد. پس از تولید هر جواب تصادفی، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آن استفاده شده‌است. نتایج نشان داد که نحوه ساخت جواب (زنبور پیشرو) تاثیر زیادی در جواب بهینه دارد و الگوریتم ژنتیک کمک شایانی در این مسیر می‌کند [۱۵].

۱ Last In First Out

۲ Particle Swarm Optimization (PSO)

حسینی و حسنی به مدل‌سازی مسیریابی وسایل نقلیه در بخش توزیع زنجیره‌ی تأمین با درنظرگرفتن محدودیت تردد پرداخته‌اند. باتوجه به NP-hard بودن مسئله بخاطر بزرگ بودن فضای مجموعه جواب، ابتدا جواب بهینه در ابعاد کوچک مشخص می‌شود. سپس برای حل مسئله در ابعاد بزرگتر، یک مدل بر پایه‌ی الگوریتم کلونی مورچه توسعه داده شد و عملکرد آن با نتایج حاصل از الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوع (TS) و ژنتیک (GA) مقایسه شد [۱۶].

رحیمی و رجبی‌توارات برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه همراه با دریافت و تحویل همزمان کالا، سه الگوریتم ابتکاری نزدیکترین همسایگی، ارزانترین الحاقی و ژنتیک را ترکیب کردند که دو الگوریتم نخست و یک روش تصادفی، جواب ابتدایی (جمعیت اولیه) را برای الگوریتم ژنتیک فراهم می‌کنند. در روش‌های نزدیک‌ترین همسایگی و ارزان‌ترین الحاقی، یک تابع احتمالی برای تولید جواب‌های بهتر توسعه داده شد. با مقایسه نتایج بدست‌آمده از پیاده‌سازی بر روی چهل مثال استاندارد و گوناگون و بهترین جواب‌های موجود از سایر الگوریتم‌ها، بهینه‌سازی مناسبی نیز مشاهده شده‌است [۱۷].

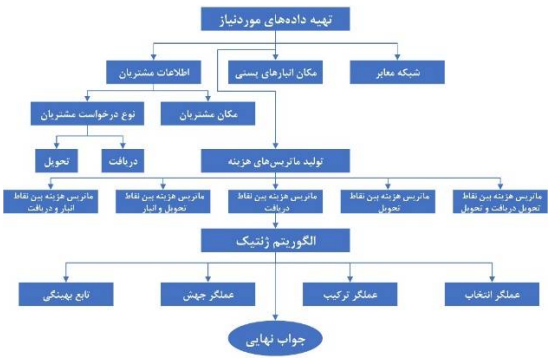
گرائیلی‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ مسئله VRP را در یک مطالعه موردی شرکت غزال شیمی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (به دلیل NP-Hard بودن مسئله) حل و آن را با روش بهینه‌سازی ریاضی مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حل مسئله VRP در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی قطعی با زمان بسیار کمتر نتیجه دلخواه بدست می‌آید. همچنین هر خودرو مسیر خاص خود را با هزینه منحصر بخود ساخته و هزینه نهایی حدود ۴۰۹ واحد شده‌است که هزینه مناسبی برای عملیاتی کردن مسئله است [۱۸].

همانطور که مشاهده شد، الگوریتم‌های فراابتکاری در پژوهش‌های پیشین استفاده شده‌است که به علت انعطاف بالای آن‌ها در تطابق با ساختار مسائل مختلف است. در این تحقیق نیز الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته‌است اما نوع حل مسئله و طراحی جواب آن، یعنی چینش نوبت تحویل و دریافت مرسولات در کروموزوم‌ها و استفاده از آنالیزهای مکانی شبکه در اجزای ژن‌ها که باعث انطباق بالای مسئله با ساختار الگوریتم ژنتیک و اعتمادپذیری بهینگی جواب نهایی شده است، نقطه تفاوت پژوهش حاضر با کارهای پیشین است که تاکنون پیاده‌سازی نشده‌است.

۳- روش پیشنهادی

در این پژوهش مسئله تحویل و دریافت مرسوله‌های پستی از نوع یک به یک (یک رأس دریافت و یک رأس تحویل) موضوع مطالعه است. این مسایل همواره مسایل مربوط به n کالا هستند چون یک تناظر یک به یک بین رأس دریافت و تحویل وجود دارد. بنابراین موضوع مورد نظر، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با دریافت و تحویل می‌باشد. در این پژوهش چندین مرکز و یا انبار در نقاطی از شهر در نظر گرفته می‌شوند و تمام تقاضاها برای دریافت و تحویل کالا را انجام می‌دهند [۱۹].

بنابراین، داده‌های مورد نظر در این پژوهش عبارتند از یک سری نقاط به عنوان محل تقاضا (محل دریافت) که متعاقبا یک نقطه به عنوان محل تحویل آن وجود دارد. یک سری نقاط به عنوان مرکز سرویس‌دهی که خودروها در آن در حالت آماده‌باش هستند و نیز اطلاعات خودروهای حمل کالا که ظرفیت آن‌ها مورد نظر می‌باشد [۲۰]. با توجه به مطالعات پیشین برای انتخاب الگوریتم مناسب جهت حل مسئله، الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد. چرا که این الگوریتم از انعطاف‌پذیری بالایی در حل مسائلی از این دست دارد که فضای جواب بسیار گسترده است و الگوریتم‌های ریاضی و قطعی به زمان زیادی برای حل آن نیاز دارند. اما این الگوریتم با توجه به ذات آن که بر مبنای جست‌وجوی تصادفی میان فضای جواب است می‌تواند به سرعت بین جواب‌ها حرکت کرده و به سمت جواب بهینه همگرا شود. در ادامه روش پیشنهادی و الگوریتم توسعه داده شده به همراه داده‌های مورد نیاز معرفی می‌شوند. فلوچارت روش کلی پژوهش در شکل ۱ نمایش داده می‌شود.



شکل ۱- فلوچارت کلی روش پژوهش

۳-۱- داده‌های مورد نیاز

در این قسمت داده‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی معرفی می‌شوند. این داده‌ها شامل شبکه خیابان‌ها، مکان انبارهای پستی و داده‌های مربوط به مشتریان می‌باشد که در ادامه هر کدام با ارائه جزئیات مرتبط تشریح می‌گردند.

شبکه‌ی خیابان‌ها اولین و مهم‌ترین داده‌ی مورد استفاده در پژوهش‌های مرتبط با موضوع حمل‌ونقل شهری است. شبکه خیابان‌ها دارای ویژگی‌های مختلفی مانند طول و لاین‌ها، شیب، سرعت مجاز رانندگی، جهت حرکت و زمان سفر هستند. در این پژوهش، طول خیابان خصوصیت مهم مورد نظر است زیرا معیار سنجش و ارزیابی نتایج همان مجموع طول خیابان‌های یک سفر است. مکان انبارهای پستی محل حضور کامیون‌های حمل مرسولات است که برنامه‌ریزی سفر و نحوه‌ی چینش نقاط دریافت و تحویل کالاهای مشتریان انجام می‌شود. خودروهای حمل کالاها از این نقاط شروع به حرکت کرده و طبق برنامه‌ریزی شروع به دریافت و تحویل مرسوله‌های مشتریان می‌کنند و پس از اتمام سرویس خود دوباره به این نقاط برمی‌گردند.

۳-۲- اطلاعات مشتریان

این اطلاعات شامل مکان مشتریان و در واقع نقطه‌ی تقاضای آن‌ها و نیز نوع درخواست آنان می‌باشد. مکان مشتریان در واقع هسته‌ی اصلی متغیر تحقیق است؛ چرا که این داده باعث می‌شود تا در مسیر خودروهای حمل کالاها تغییر ایجاد شود و کوتاهی و بلندی آن به مکان مشتری ارتباط مستقیم دارد. خودروهای حمل کالا با توجه مکان درخواست مشتری مسیر حرکت خود را شناخته و به سمت مشتری حرکت می‌کنند تا کالای او را دریافت کرده یا تحویل دهند. نوع درخواست مشتریان دیگر اطلاعاتی است که پس از مشخص شدن مکان درخواست مشتریان، برای شکل دادن به جواب و ساختار مسئله مورد نیاز است. نوع درخواست مشتریان بر دو نوع است: ۱) دریافت (Pickup) : نقطه‌ای که خودروی حمل بار، کالای مشتری را از او دریافت می‌کند. ۲) تحویل (Delivery) : نقطه‌ای که خودروی حمل بار مرسوله‌ی مشتری را به نقطه مورد نظر تحویل می‌دهد.

۳-۳- مدل توسعه یافته

در این قسمت ساختار مدل پیشنهادی برای مسئله بهینه‌سازی دریافت و تحویل مرسولات پستی با توجه به داده‌ها، تشریح می‌شود. ابتدا الگوریتم ژنتیک و پس از آن قسمت‌های مختلف مدل با توجه به عملگرهای مختلف الگوریتم ژنتیک تشریح می‌شود.

۳-۳-۱- الگوریتم ژنتیک

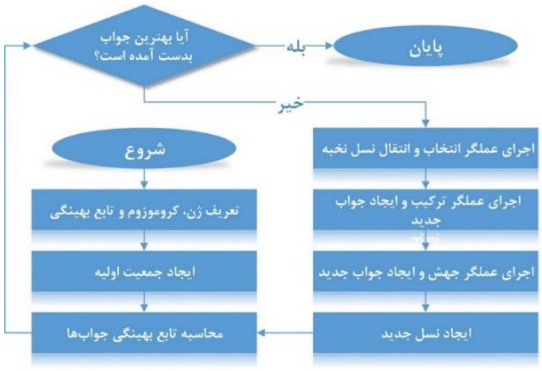
ساختار الگوریتم ژنتیک از طبیعت الهام گرفته شده‌است و در حل موضوعات گوناگون بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. در طبیعت هنگام تغییر نسل‌ها، از ترکیب کروموزوم‌های با کیفیت، نسل‌های بهتری بوجود می‌آیند. همچنین ممکن است جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها رخ داده که منجر به بهتر شدن نسل بعدی شوند [۲۱].

ژن[۱] کوچکترین واحد الگوریتم ژنتیک است. هر یک از پارامترهای تصمیم (در اینجا مکان تحویل یا دریافت مرسوله‌های پستی) در این الگوریتم ژن نامیده می‌شوند. کروموزوم[۲] آرایه‌ای از ژن‌هاست که مقداردهی می‌شوند. یک کروموزوم یک جواب ممکن از فضای جواب‌های مسئله است. پس از ایجاد هر کروموزوم تابع بهینگی[۳] آن (به عنوان مثال مقدار هزینه) محاسبه می‌شود که در واقع همان احتمال ترکیب آن برای ایجاد نسل‌های بعدی است.

این الگوریتم از سه عملگر انتخاب [۴]، ترکیب [۵] و جهش[۶] برای تولید جواب استفاده می‌کند. عملگر انتخاب کروموزوم‌هایی را از میان جواب‌های موجود برای ترکیب شدن انتخاب می‌کند. بدیهی است کروموزوم‌های با تابع بهینگی بهتر، موقعیت بیشتری برای انتخاب شدن دارند. عملگر ترکیب کروموزوم‌های انتخابی (والد) را با یکدیگر ترکیب می‌کند تا شاید کروموزوم‌های فرزند حاصل از ترکیب، بهتر باشد. این عملگر روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و بدین ترتیب یک یا دو فرزند جدید تولید می‌شود. جهت ایجاد تنوع در جواب‌ها و جلوگیری از به دام افتادن الگوریتم در بهینه‌ی محلی با استفاده از عملگر جهش، یک یا چند ژن از تعدادی از کروموزوم‌های حاصل از ترکیب، تغییر

۱ Gene
۲ Chromosome
۳ Fitness Function
۴ Selection
۵ Cross over
۶ Mutation

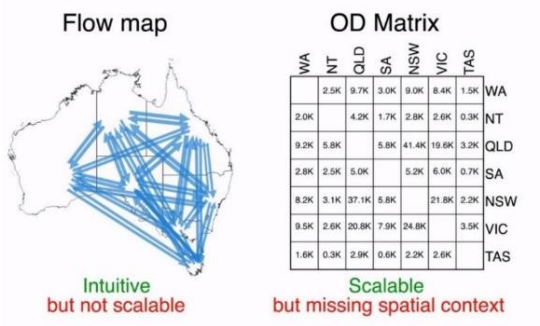
داده می‌شوند و جواب‌های جدیدی ایجاد می‌شوند. در شکل ۲ مراحل الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود.



شکل ۲- فلوچارت کلی الگوریتم ژنتیک [۲۱]

۳-۳-۲- ماتریس هزینه مبدا/مقصد

اولین گام در مدل، ورود داده‌ها است. ابتدا شبکه خیابان‌های منطقه موردنظر شامل گره‌ها و یال‌ها، و سپس اطلاعات مشتریان شامل مکان دریافت و تحویل مرسولات وارد مدل می‌شود. سپس باید ماتریس هزینه مبدا-مقصد[۱] بین تمامی نقاط شبکه تولید شود. این ماتریس هزینه سفر در شبکه را تعیین می‌کند [۲۲] (شکل ۳). زمانی که خودرو در یک شبکه حرکت می‌کند، هزینه‌ای (مسافت یا زمان) را متحمل می‌شود که همان هزینه شبکه می‌باشد.



شکل ۳- یک نمونه ماتریس هزینه مبدا/مقصد بین شهرها

در این پژوهش پنج ماتریس هزینه مبدا مقصد مورد نیاز است: ۱) ماتریس هزینه بین مکان نقاط دریافت تمامی مرسولات (Pickup- Pickup)، ۲) ماتریس هزینه بین نقاط تحویل تمامی مرسولات (Delivery- Delivery)، ۳) ماتریس هزینه بین نقاط دریافت و تحویل مرسولات (Pickup - Delivery)، ۴) ماتریس هزینه بین انبار مرکزی و نقاط دریافت (Depot-Pickup)، و ۵) ماتریس هزینه بین نقاط تحویل و انبار مرکزی (Delivery-Depot)

ماتریس هزینه بین نقاط دریافت مرسولات بیانگر هزینه سفر بین نقاط دریافت مرسولات (نقطه شروع هم) است. چرا که پس از دریافت مرسوله اول احتمالا به دنبال مرسولات دیگر حرکت می‌کنیم. بنابراین، باید هزینه سفر از نقطه دریافت یک مشتری به نقطه دریافت دیگر مشخص شود. زیرا در تصمیم‌گیری اینکه از مبدا یک مرسوله به سمت کدام مرسوله حرکت کنیم باید از این ماتریس اطلاعات هزینه استخراج شود. شکل ۴ ساختار این ماتریس را نشان می‌دهد که در آن P بیانگر واژه دریافت است.

ماتریس هزینه بین نقاط تحویل مرسولات بیانگر هزینه سفر بین نقاط تحویل مرسولات (نقطه شروع همگی) است. چرا که پس از تحویل یکی از مرسولات ممکن است به دنبال نقطه تحویل مرسولات بعدی حرکت کنیم. بنابراین باید هزینه سفر از نقطه تحویل یک مرسوله به نقطه تحویل یک مرسوله دیگر مشخص باشد. زیرا در تصمیم‌گیری اینکه ابتدا کدام مرسوله تحویل و سپس مرسوله بعدی تحویل داده شود، باید از این ماتریس اطلاعات هزینه استخراج شود. در شکل ۵ D بیانگر واژه تحویل است.

	P_1	P_2	…	P_n
P_1				
P_2				
…				
P_n				

شکل ۴- ساختار ماتریس هزینه بین نقاط دریافت

	D_1	D_2	…	D_n
D_1				
D_2				
…				
D_n				

شکل ۵- ساختار ماتریس هزینه بین نقاط تحویل

ماتریس هزینه بین نقطه دریافت و نقطه تحویل مرسولات بیانگر هزینه سفر بین نقطه دریافت و تحویل هر یک از مرسولات نسبت به بقیه است. زیرا پس از دریافت یک یا چند مرسوله ممکن است قبل از دریافت مرسوله دیگر، یکی از مرسوله‌های فعلی را تحویل دهیم. بنابراین باید هزینه سفر از نقطه دریافت مرسولات به نقطه تحویل دیگر مرسولات مشخص باشد. چرا که در تصمیم‌گیری اینکه از یک مرسوله خاص به سمت کدام مرسوله دیگر حرکت کنیم

۷ Origin-Destination Cost Matrix (OD Matrix)

باید از این ماتریس اطلاعات هزینه را استخراج کنیم. در شکل ۶ ساختار این ماتریس مشاهده می‌شود که در آن P بیانگر دریافت و D بیانگر واژه تحویل می‌باشد.

	D_1	D_2	...	D_n
P_1				
P_2				
...				
P_n				

شکل ۶- ساختار ماتریس هزینه بین نقاط دریافت و تحویل

ساختار ماتریس هزینه‌ی سفر از انبار مرکزی به سمت نقاط دریافت (اولین نقطه دریافت در سفر) در شکل ۷ و ماتریس هزینه‌ی سفر از نقاط تحویل (آخرین مرسوله‌ی تحویلی) تا انبار مرکزی در شکل ۸ مشاهده می‌شوند. چرا که در برنامه‌ریزی سفر خودروهای حمل مرسولات باید مسافتی طی شود تا به اولین نقطه دریافت مرسوله برسند. همچنین پس از تحویل آخرین مرسوله (پایان سفر) حمل مرسولات به سمت به انبار مرکزی حرکت می‌کند.

	P_1	P_2	...	P_n
$Depot_1$				
$Depot_2$				
...				
$Depot_n$				

شکل ۷- ساختار ماتریس هزینه بین انبار و نقاط دریافت

	$Depot_1$	$Depot_2$	...	$Depot_n$
D_1				
D_2				
...				
D_n				

شکل ۸- ساختار ماتریس هزینه بین نقاط تحویل و انبار

۳-۳-۳- الگوریتم چینش مرسولات

در مسئله حاضر هر از چینش‌های مکان‌های دریافت و تحویل محموله‌های پستی در یک کامیون حمل مرسولات به عنوان یک ژن در نظر گرفته می‌شوند [۲۳]. سپس از کنار هم قرار دادن این ژن‌ها یک کروموزوم تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر هر آرایه‌ای از چینش چند مکان دریافت و تحویل مرسولات به عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود. با فرض وجود یک مرکز سرویس‌دهی و چندین کامیون برای حمل کالاها، می‌توان هر چند تقاضا را برای یک کامیون در نظر گرفت و برای هر کدام یک ژن ایجاد کرد. سپس از کنار هم قرار گرفتن این کروموزوم‌ها یک جواب ایجاد می‌شود. در واقع این جواب، چینش تمامی کامیون‌هایی که قرار است کل تقاضاها را پوشش دهند نمایش می‌دهد. ساختار هر ژن در شکل ۹ نمایش داده می‌شود. نماد P به عنوان نقطه دریافت و نماد D به عنوان نقطه تحویل کالا در نظر گرفته شده‌است. البته لزومی ندارد که ابتدا تمامی کالاها دریافت و سپس اقدام به تحویل آنها کرد. می‌توان به طور تصادفی نقاط تحویل و دریافت را تعیین کرد (شکل ۱۰).

Depot	P_1	P_2	P_3	D_1	D_2	D_3	...	Depot

شکل ۹- ساختار ژن در مسئله

Depot	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	...	Depot

شکل ۱۰- نمونه‌ای دیگر از ساختار ژن در مسئله

از کنار هم قرار گرفتن این ژن‌ها، یک کروموزوم یا همان جواب مسئله ایجاد می‌شود که چینش تمامی کامیون‌ها و کالاها را نشان می‌دهد. یک نمونه جواب کامل در شکل ۱۱ نمایش داده می‌شود.

$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}		$Depot_{2_{Truck_4}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$Depot_{n_{Truck_m}}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}		$Depot_{n_{Truck_m}}$

شکل ۱۱- ساختار یک کروموزوم (نمونه جواب مسئله)

۳-۳-۴- تابع بهینگی

در هر تحقیقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بر طبق ساختار مسئله، تابع بهینگی تعریف می‌شود که ارزش تابع بهینگی، احتمال عمل ترکیب جهت ساخت نسل‌های آینده است. بنابراین کروموزوم‌های بهینه‌تر، از شانس بالاتری برای ترکیب برخوردارند. در مسائل مسیریابی، تابع بهینگی طبق کاهش طول مسیر یا زمان سفر تعریف می‌شود [۲۴]. پس از ساخت کروموزوم‌ها (ایجاد جواب)، تابع بهینگی حساب می‌شود. در این مسئله میزان فواصل بین نقاط دریافت و

تحویل مرسولات برای هر کامیون با استفاده از آنالیزهای شبکه، جمع و یک مقدار برای هر کامیون (هر سطر) در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر هزینه سفر کامیون‌ها با یکدیگر جمع و تابع بهینگی هر جواب بدست می‌آید. مثالی از تابع بهینگی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

تابع بهینگی	شماره کامیون/شماره انبار	نقاط دریافت و تحویل مرسولات							شماره کامیون/شماره انبار
۱۲۶۳۵ متر	$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
۹۸۶۲۰ متر	$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۱۲۴۵۹ متر	$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}	...	$Depot_{2_{Truck_4}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۱۱۲۳۶ متر	$Depot_{n_{Truck_m}}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}	...	$Depot_{n_{Truck_m}}$

شکل ۱۲- ساختار نهایی یک نمونه جواب مسئله

در هر اجرای الگوریتم تعدادی جواب به این روش تولید و تعداد دیگری نیز از روی بهترین جواب‌های نسل قبل به کمک عملگر ترکیب ساخته می‌شود. پس از محاسبه تابع بهینگی و مرتب کردن جواب‌ها، تعدادی از این جواب‌ها به عنوان نسل نخبه مستقیما به نسل بعد منتقل می‌شوند. تعدادی از جواب‌ها با ترکیب جواب‌های نسل نخبه تشکیل می‌شوند. به این صورت که نصف سطرهای یک جواب با نصف سطرهای جواب دیگر ترکیب شده و یک ماتریس جدید ایجاد می‌کنند [۲۵].

به این ترتیب در هر اجرای الگوریتم تعدادی از جواب‌های نخبه نسل قبل با استفاده از عملگر انتخاب به نسل بعد منتقل می‌شوند. تعدادی جواب با استفاده از عملگر ترکیب ایجاد می‌شوند و تعدادی نیز با استفاده از عملگر جهش تولید می‌شوند. همچنین تعدادی جواب نیز به صورت تصادفی و جدید ایجاد می‌شوند. سپس تابع بهینگی همه جواب‌ها محاسبه و به ترتیب مرتب می‌شوند. این حلقه تکرار تا جایی ادامه پیدا می‌کند به جواب بهینه مسئله برسیم و الگوریتم همگرا بشود. در پایان جواب بهینه که بهترین چینش کامیون‌های حمل مرسولات پستی و تعیین نوبت دریافت و تحویل کالاها می‌باشد مشخص می‌شود.

۳-۳-۵- عملگر انتخاب

عملگر انتخاب، کروموزوم‌های برتر برای عمل ترکیب از کروموزوم‌های نسل کنونی را انتخاب می‌کند. کروموزوم‌های دارای تابع بهینگی بهتر، از شانس بیشتری برای انتخاب شدن برخوردار هستند. بعد از پردازش مقدار تابع بهینگی هر نسل و برای همه کروموزوم‌های آن، کروموزوم‌ها بر پایه‌ی میزان تابع بهینگی مرتب می‌شوند و برخی بعنوان نسل نخبه انتخاب می‌گردند. این دسته بهینه‌ترین جواب در بین کل نسل حاضر را دارند. تعداد ۱۰ درصد بهترین جواب‌ها توسط این عملگر مستقیما برای شرکت در مرحله بعد انتخاب می‌شوند. اما از روی کروموزوم‌های نخبه بر اساس میزان تابع بهینگی، والدها انتخاب شده تا ترکیب شوند.

۳-۳-۶- عملگر ترکیب

این عملگر کروموزوم‌های والد را با یکدیگر ترکیب می‌کند، تا شاید کروموزوم‌های تولید شده، بهینه‌تر باشند. عموما یک جفت کروموزوم از بین والدها انتخاب و هر کروموزوم از یک نقطه مشخص (از یکی از سطرهای ماتریس جواب) به دو بخش تقسیم می‌گردند و هر قسمت از یک کروموزوم بجای قسمت دیگر در کروموزوم دیگر قرار گرفته و دو کروموزوم جدید تولید می‌گردند که احتمالا مثل والدین خود از تابع بهینگی مناسبی برخوردار باشند. مفهوم این عملگر در شکل ۱۳ تشریح شده‌است.

کروموزوم اول	$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
	$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
	$Depot_{2_{Truck_3}}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}	...	$Depot_{2_{Truck_3}}$
	$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}	...	$Depot_{2_{Truck_4}}$
کروموزوم دوم	$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_5	D_5	P_6	P_{22}	D_{22}	D_6	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
	$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{15}	P_{28}	D_{28}	P_{49}	D_{15}	D_{49}	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
	$Depot_{2_{Truck_3}}$	P_{18}	D_{18}	P_{26}	P_{21}	D_{21}	D_{26}	...	$Depot_{2_{Truck_3}}$
	$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_{57}	P_{60}	D_{60}	P_{39}	D_{57}	D_{39}	...	$Depot_{2_{Truck_4}}$

اعمال عملگر ترکیب و عوض شدن نیمه‌های بالایی و پایین در دو ماتریس

کروموزوم فرزند اول	$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
	$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
	$Depot_{2_{Truck_3}}$	P_5	D_5	P_6	P_{22}	D_{22}	D_6	...	$Depot_{2_{Truck_3}}$
	$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_{15}	P_{28}	D_{28}	P_{49}	D_{15}	D_{49}	...	$Depot_{2_{Truck_4}}$
کروموزوم فرزند دوم	$Depot_{1_{Truck_1}}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}	...	$Depot_{1_{Truck_1}}$
	$Depot_{1_{Truck_2}}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}	...	$Depot_{1_{Truck_2}}$
	$Depot_{2_{Truck_3}}$	P_{18}	D_{18}	P_{26}	P_{21}	D_{21}	D_{26}	...	$Depot_{2_{Truck_3}}$
	$Depot_{2_{Truck_4}}$	P_{57}	P_{60}	D_{60}	P_{39}	D_{57}	D_{39}	...	$Depot_{2_{Truck_4}}$

شکل ۱۳- مفهوم عملگر ترکیب

البته جایگاه خودروها در ماتریس‌ها ثابت است و شماره‌ی نقاط دریافت و تحویل عوض می‌شوند.

۳-۳-۷- عملگر جهش

برای جلوگیری از گیر کردن جواب‌های مسئله در یک بخش از فضای مجموعه جواب (همگرایی به بهینه‌ی محلی)، با بکارگیری عملگر جهش، تعدادی از کروموزوم‌های تولید شده از مرحله قبل دچار تغییر می‌شوند. نکته‌ی مطرح شده در این قسمت پارامتر نرخ جهش است که تعیین می‌کند چند درصد از کروموزوم‌های تولید شده از عملگر ترکیب، جهش می‌کنند. مثلا ۱۰ یا ۲۰ درصد از کروموزوم‌های ساخته شده از عملگر ترکیب به روش تصادفی انتخاب و عمل جهش روی آنان اجرا می‌شود. برای این منظور در هر کروموزوم منتخب، یک (یا چند) ژن انتخاب و با یک (یا چند) ژن دیگر عوض می‌شوند. در اینجا ژن فقط یک سطر از ماتریس جواب است. بنابراین جواب‌های تازه‌ای تولید می‌شوند که در واقع به بخشی دیگر از فضای مجموعه جواب جهش کرده‌اند. مفهوم این عملگر در شکل ۱۴ نمایش داده می‌شود. در اینجا نیز با ثابت ماندن شماره خودرو/انبارها و عوض شدن یک سطر در هر جواب، یک جواب جدید تولید می‌شود که دارای تابع بهینگی متفاوتی خواهد بود.

کروموزوم جاری

$Depot_{1Truck_1}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	…	$Depot_{1Truck_1}$
$Depot_{1Truck_2}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	…	$Depot_{1Truck_2}$
$Depot_{2Truck_3}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}	…	$Depot_{2Truck_3}$
$Depot_{2Truck_4}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}	…	$Depot_{2Truck_4}$

اعمال عملگر جهش و تغییر ساختار یک کروموزوم

کروموزوم جهش یافته

$Depot_{1Truck_1}$	P_1	D_1	P_2	P_3	D_2	D_3	…	$Depot_{1Truck_1}$
$Depot_{1Truck_2}$	P_{41}	P_{13}	D_{13}	P_{19}	D_{41}	D_{19}	…	$Depot_{1Truck_2}$
$Depot_{2Truck_3}$	P_8	D_8	P_{20}	P_{11}	D_{11}	D_{20}	…	$Depot_{2Truck_3}$
$Depot_{2Truck_4}$	P_{14}	P_{31}	D_{31}	P_9	D_{14}	D_9	…	$Depot_{2Truck_4}$

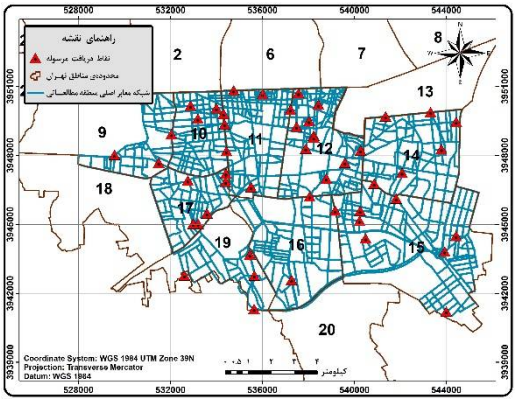
شکل ۱۴- مفهوم عملگر جهش

به طور کلی و بر اساس توضیحات گفته شده درباره عملگرهای الگوریتم ژنتیک، بنابراین در هر اجرای الگوریتم (حلقه) تعدادی از کروموزوم‌ها بعنوان نسل نخبه که در واقع بهترین مقدار تابع بهینگی را دارند به صورت مستقیم وارد نسل بعد می‌شوند، تعدادی کروموزوم جدید به کمک عملگر ترکیب از روی نسل نخبه تولید شده و به نسل بعدی منتقل می‌شوند، و در نهایت تعدادی نیز با استفاده از عملگر جهش ساخته می‌شوند و به نسل بعد منتقل می‌شوند. بنابراین در هر حلقه الگوریتم علاوه بر تولید جواب‌های کاملا جدید و تصادفی، جواب‌های جدیدی تولید می‌شوند.

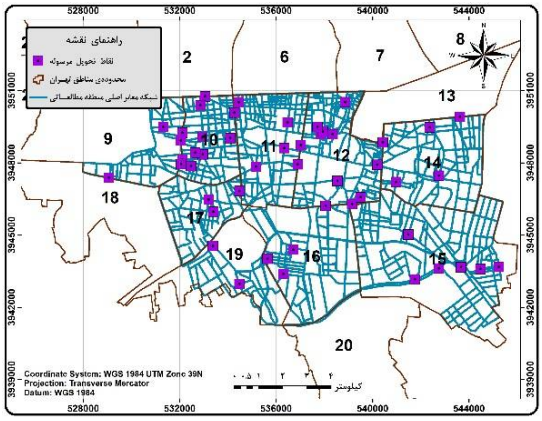
در الگوریتم ژنتیک بعد از چند اجرا، جواب‌های بهینه مشخص می‌شوند و سپس الگوریتم متوقف می‌گردد. در این تحقیق پس از ۱۰۰۰ اجرا، پردازش الگوریتم متوقف و بهینه‌ترین جواب بعنوان جواب نهایی مسئله معرفی می‌گردد. در پایان باید اشاره شود که برای ساخت هر نسل جدید ۲۵ درصد از جوابای نخبه‌ی نسل قبل استفاده می‌گردد. ۲۵ درصد جمعیت کاملا جدید و تصادفی (به مانند جواب‌های اولیه) تولید می‌شود، و ۵۰ درصد باقیمانده نیز از عملگرهای جهش و ترکیب ایجاد می‌شود. نرخ جهش در اینجا ۲۰ درصد است، بنابراین ۲۰ درصد از کروموزوم‌های حاصل از عملگر ترکیب، جهش می‌یابند.

۴- پیاده‌سازی

جهت پیاده‌سازی مدل، شبکه خیابان‌های اصلی مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۹ شهر تهران (بزرگ‌راه‌ها و شریانی درجه ۱) انتخاب شد. شبکه مورد نظر ۲۳۰۷ یال و ۱۴۵۸ گره دارد. برای تولید اطلاعات نقاط دریافت و تحویل و مکان کامیون‌ها، شناسه گره‌ها وارد برنامه Matlab شد و توسط تابع تولید عدد تصادفی، ۵۰ نقطه دریافت و تحویل از بین ۱۴۵۸ گره شبکه بصورت تصادفی انتخاب شد. ۵ نقطه نیز برای مکان استقرار کامیون‌ها انتخاب شد. نقاط دریافت و تحویل مرسولات در شکل ۱۵ و شکل ۱۶، و مکان کامیون‌های حمل در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

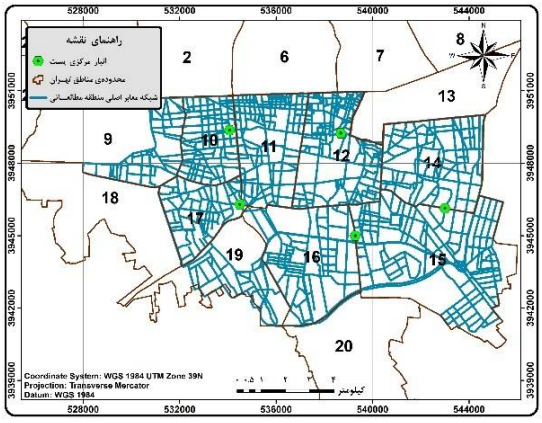


شکل ۱۵- مکان نقاط دریافت مرسولات روی شبکه معابر منطقه مطالعاتی پژوهش



شکل ۱۶- مکان نقاط تحویل مرسولات روی شبکه معابر منطقه مطالعاتی پژوهش

نقاط دریافت و تحویل تصادفی بوده و مثلا امکان دارد نقطه دریافت ۹ام در جنوب منطقه و نقطه تحویل آن در شمال باشد.



شکل ۱۷- مکان استقرار انبارها (کامیون‌های حمل مرسولات)

۴-۱- تولید ماتریس‌های هزینه

برای محاسبه ماتریس‌های گفته شده، از ابزار Network Analyst در برنامه ArcGIS کمک گرفته شد. برای این قسمت از پیاده‌سازی ابتدا از فایل شبکه معابر Network Dataset ایجاد می‌شود برای اینکه یال‌ها (Edges) و گره‌های (Nodes) شبکه برای تحلیل شبکه‌ی مورد نظر آماده گردند. در ادامه جهت ساخت ماتریس‌های هزینه از قسمت OD Cost Matrix استفاده می‌گردد. در این ابزار، بایستی لایه اول را در قسمت Origin و لایه دوم را در قسمت Destination وارد نمود.

۴-۲- نتایج پیاده‌سازی

بعد از تولید داده‌های مورد نیاز، مدل توسعه داده شده بر روی این داده‌ها پیاده‌سازی می‌شود. برای پیاده‌سازی و برنامه-نویسی روش پیشنهادی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. پس از ۱۰۰۰ اجرای حلقه الگوریتم (زمان اجرا: ۳۷ ثانیه) که شامل ساخت جمعیت اولیه در اجرای اول و سپس انتخاب نسل نخبه، تولید فرزندان توسط تابع CrossOver، جهش فرزندان بوسیله تابع Mutation و ایجاد جمعیت جدید در هر اجرا است جواب نهایی مسئله که بهینه‌ترین ترتیب دریافت و تحویل مرسولات است بدست آمد که در شکل ۱۸ به نمایش درمی‌آید. لازم به یادآوری است که در الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی جواب‌ها و انتخاب جواب برتر از بین کروموزوم‌ها از روش چرخ رولت استفاده می‌شوند. در متد چرخ رولت انتخاب هر کروموزوم (جواب) با توجه به وزنی که براساس رابطه $W_i = \sum_{j=1}^{i} \frac{f_i}{f}$ نسبت داده می‌شود [۲۵] انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است دلیل وجود اعداد ۱ تا ۱۰۰ در جدول خروجی این است که در کدنویسی مسئله هر بسته از ۱ تا ۵۰ شماره‌گذاری شدند اما نقطه تحویل آنها از ۵۱ تا ۱۰۰ شماره‌گذاری شدند. به عبارت دیگر شماره‌ی نقطه‌ی تحویل هر بسته برابر است با شماره‌ی دریافت هر بسته + ۵۰.

کامیون ۱	۲۲	۴۰	۲۰	۴۳	۱۴	۷۰	۷۲	۹۰	۹۳	۲۴	۱	۳۴	۳۳	۷۴	۶۴	۸۳	۸۴	۴۷	۵۱	۹۷
کامیون ۲	۱۰	۳۲	۴۶	۴	۱۷	۴۴	۱۹	۳۱	۱۸	۶۰	۸۱	۲۹	۵۴	۶۹	۶۷	۹۶	۹۴	۷۹	۸۲	۶۸
کامیون ۳	۲۱	۳۹	۱۳	۱۲	۶۲	۲۳	۷۳	۶	۵۶	۷۱	۶۳	۷	۵۷	۹	۴۲	۹۲	۵۹	۵	۸۹	۵۵
کامیون ۴	۳	۱۵	۳۵	۵۳	۲۵	۲۶	۳۷	۷۵	۲	۸۵	۳۰	۴۹	۹۹	۷۶	۳۶	۸۷	۸۶	۵۲	۶۵	۸۰
کامیون ۵	۴۵	۳۸	۸۸	۱۶	۱۱	۸	۴۸	۲۸	۲۷	۴۱	۷۷	۶۱	۵۰	۱۰۰	۹۵	۹۸	۵۸	۹۱	۶۶	۷۸

شکل ۱۸ – ساختار خروجی نهایی مسئله، چینش نهایی نقاط تحویل و دریافت مرسولات

همانطور که گفته شد تابع بهینگی این مسئله، مجموع طول طی شده بین نقطه استقرار هر کامیون تا اولین نقطه دریافت، طول طی شده در حرکت بین نقاط دریافت و تحویل و در نهایت هزینه سفر از آخرین نقطه تحویل و بازگشت به محل استقرار کامیون حمل مرسولات (مرکز/انبار پستی) است که در رابطه زیر نشان داده شده‌است:

$$\begin{aligned} L_1 = {} & depot_1P_1 + P_1P_2 + \cdots + D_nD_m \\ & + D_m depot_1 \\ & \cdots \\ L_5 = {} & depot_1P_k + P_kP_l + \cdots + D_iD_j \\ & + D_j depot_5 \end{aligned} \qquad (۱)$$

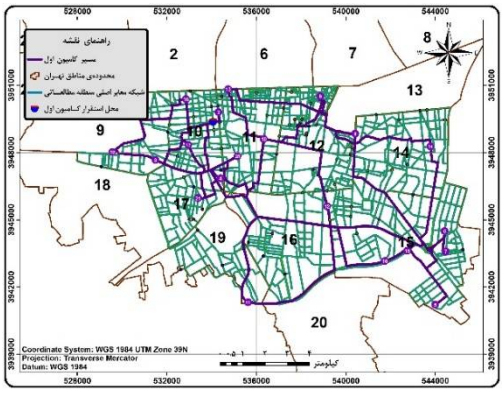
$$L_{total} = \sum_{i=1}^{5} L_i \qquad (۲)$$

مجموع طول طی شده توسط ۵ خودرو حمل مرسولات بر اساس تابع بهینگی برابر با ۵۵۱۶۸۹ متر است. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، و نشان دادن میزان صرفه‌جویی و کاهش طول سفر، اولین ماتریس تصادفی ساخته شده در الگوریتم (جدول ۲) به عنوان روش سنتی و تجربی برنامه‌ریزی سفر کامیون‌های حمل مرسولات، استخراج شد و تابع بهینگی آن در یک متغیر ذخیره شد که برابر با ۷۲۰۲۸۷ متر بود. با مقایسه این عدد و تابع بهینگیِ روش پیشنهادی به این نتیجه می‌رسیم که الگوریتم توانسته‌است ۱۶۸۵۹۸ متر از مجموع طول سفر کامیون‌های حمل مرسولات (ماتریس تصادفی که نماینده‌ی روش سنتی و تجربیِ برنامه‌ریزی سفر است) بکاهد که معادل ۲۴ درصد صرفه‌جویی است.

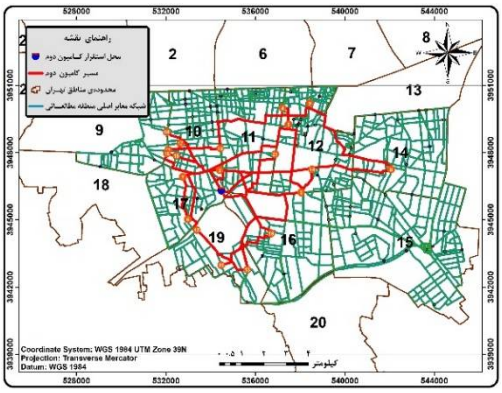
برای درک جواب نهایی این نقاط بر روی نقشه منطقه نمایش داده می‌شوند (شکل ۲۰ - ۲۴). البته برای نمایش بهتر مسیر هر کامیون بر روی یک نقشه جداگانه به نمایش درمی‌آید. شماره نقاط ۱ تا ۲۲ شامل ۲۰ حرکت نقاط مبدا و مقصد است که در واقع نمایانگر درایه‌های هر سطر جواب نهایی است. لازم به ذکر است که شماره نقطه ۱ و ۲۲ همان نقطه انبار مرکزی است که هر کامیون در آنجا مستقر بوده، سفر را آغاز می‌کند (حرکت ۱) و پس از رساندن تمام مرسولات به مقصد دوباره به انبار برمی‌گردد (نقطه ۲۲).

کامیون ۱	۱۴	۶	۳۳	۳۲	۲۸	۲۷	۶۴	۱۱	۶۱	۸۳	۸۲	۲۳	۳۹	۸۹	۷۸	۷۳	۵	۵۵	۵۶	۷۷
کامیون ۲	۲۵	۳۴	۱۸	۳	۱۳	۳۵	۳۶	۷۵	۶۳	۲۲	۲۰	۶۸	۱۷	۸۵	۸۴	۵۳	۸۶	۷۲	۷۰	۶۷
کامیون ۳	۲۶	۳۰	۱۰	۸۰	۳۸	۴۰	۹۰	۷	۶۰	۸	۴۷	۵۸	۱	۵۷	۲۹	۷۹	۸۸	۷۶	۵۱	۹۷
کامیون ۴	۴۴	۴۳	۲	۱۹	۹۳	۶۹	۲۱	۹	۳۷	۹۴	۴	۵۹	۵۲	۵۰	۸۷	۱۰۰	۱۶	۵۴	۷۱	۶۶
کامیون ۵	۱۵	۲۴	۴۱	۹۱	۴۶	۴۵	۴۲	۳۱	۶۵	۴۸	۸۱	۱۲	۹۸	۹۶	۹۲	۷۴	۴۹	۹۵	۹۹	۶۲

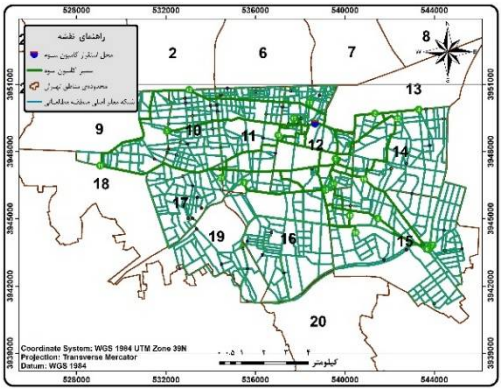
شکل ۱۹ – چینش اولیه نقاط تحویل و دریافت مرسولات (کاملا تصادفی، شبیه‌سازی روش‌های سنتی و تجربی)



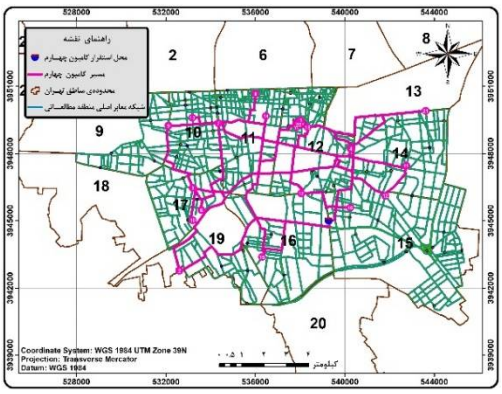
شکل ۲۰– مسیر کامیون اول



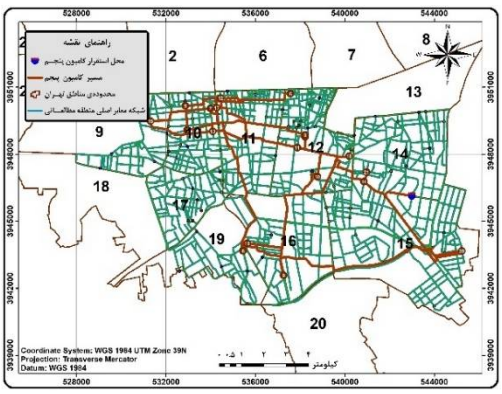
شکل ۲۱– مسیر کامیون دوم



شکل ۲۲– مسیر کامیون سوم



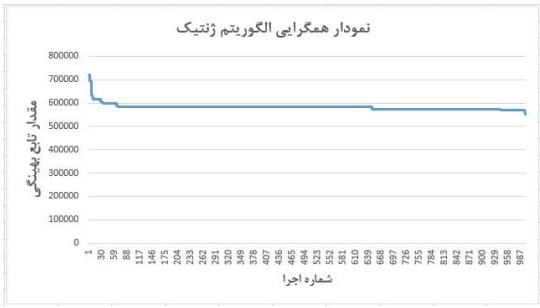
شکل ۲۳– مسیر کامیون چهارم



شکل ۲۴– مسیر کامیون پنجم

۵- نتیجه‌گیری

کد حلقه اصلی الگوریتم ژنتیک دارای ۱۰۰۰ بار تکرار است که پس از آن متوقف و جواب نهایی تولید می‌شود. این عدد با آزمایش و خطا به دست آمده‌است و با مقایسه تفاضل تابع بهینگی جواب بهینه‌ی نهایی در تکرارهای مختلف بدست آمد. در واقع با اجرای الگوریتم با ۲ یا ۳ هزار تکرار تفاوت محسوسی مشاهده نشد. در شکل ۲۵ نمودار همگرایی الگوریتم مشاهده می‌شود.



شکل ۲۵- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک

برای تحلیل عملکرد مدل توسعه یافته می‌توان به عنوان مثال مسیر کامیون دوم را بررسی نمود که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم توانسته‌است به خوبی نقاط دریافت و تحویل را کنار هم بچیند که از حرکت بیجای کامیون در سراسر منطقه جلوگیری کند. همچنین با دقت بیشتر بر روی شماره نقاط که شماره حرکت کامیون است (با شماره مرسولات در شکل ۱۸ اشتباه گرفته نشود) مشاهده می‌شود که در اغلب موارد شماره‌های موجود در نزدیکی یکدیگر قرار دارند و به این معنی است که ترتیب نقاط دریافت و تحویل طوری چیده شده که نقاط به دنبال هم هستند و کامیون حمل مرسولات از طی کردن مسافت‌های طولانی (از شرق به غرب و از غرب به شرق و ...) اجتناب می‌کند. در نتیجه طول کلی مسیر کامیون و طول کلی مسیر همه کامیون‌ها کم می‌شود.

بررسی مسیر کامیون چهارم نیز همین اثر مثبت را نشان می‌دهد (شکل ۲۳). مسیر کامیون چهارم نیز تقریبا متمرکز بوده و مسیرهای اضافی به خودرو حمل مرسولات تحمیل نشده‌است که در نهایت باعث کاهش طول سفر آن و طول کلی سفر کامیون‌ها شده‌است که نشانگر موفق بودن عملکرد الگوریتم پیشنهادی است. البته ممکن است هر پنج مسیر به این اندازه از نظر بصری بهینه به نظر نرسند. بعنوان مثال در مسیر کامیون اول (محل استقرار: شمال غربی منطقه) مشاهده می‌شود که به چند نقطه در جنوب و بخصوص جنوب شرقی نیز سفر کرده‌است (شکل ۲۰).

هرچند که تعداد زیادی از نقاط دریافت و تحویل در نزدیکی‌های محل استقرار کامیون اول است و نقاط نیز تقریبا به ترتیب و پشت سر هم در مسیر کامیون هستند اما مشاهده می‌شود که خودرو حمل مرسولات مجبور شده‌است به چند نقطه دور نیز سفر کند. اما دقت شود که اولا مقدار تابع بهینگی جواب نهایی کمترین مقدار ممکن را دارد که نشان از بهینگی جواب دارد. و نکته دوم این است که الگوریتم نتوانسته‌است بیش این مسیرها را بهینه کند و با وجود دو مسیر بهینه خوب مانند مسیر دوم و چهارم، مجبورا چند نقطه‌ی دور در مسیر یکی از کامیون‌ها نیز قرار دهد. در واقع تمام تلاش انجام شده‌است که بهینه‌ترین مسیرها یافت شود که در مجموع کامیون‌ها مسیر کمتری را طی کنند. همانطور که اشاره شد بواسطه بهینه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق مجموع طول سفر کامیون‌های حمل مرسولات از ۷۲۰ کیلومتر به ۵۵۱ کیلومتر کاهش یافته‌است که صرفه-جویی ۲۴ درصدی را در پی داشته‌است. که نشان از موفقیت مدل پیشنهادی دارد.

۵-۱- جمع‌بندی و پیشنهادها پژوهش‌های آینده

در این پژوهش برنامه‌ریزی تحویل و دریافت مرسولات پستی (Pickup and delivery) با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک که انعطاف‌پذیری بالایی در منطبق شدن با ساختار مسائل گوناگون دارد، بررسی شد و در حل مسئله از آنالیز مکانی شبکه و ماتریس هزینه سفر مبدا/مقصد استفاده شد. جواب مسئله که همان چینشِ ترتیب تحویل و دریافت مرسولات پستی است توسط عملگرهای مختلف الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد و در نهایت بهینه‌ترین جواب مسئله بدست آمد که در مقایسه با سناریو برنامه‌ریزی سفر بصورت سنتی و تجربی، ۲۴ درصد بهبود مشاهده شد که نشان می‌دهد روش پیشنهادی در کاهش طول سفر خودروهای حمل مرسولات موفق بوده‌است.

استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بستگی به نظر پژوهشگر در حل مسئله دارد که چگونه ساختار مسئله را درک کرده و آن را در قالب الگوریتم مورد نظر طراحی نماید. بنابراین، روش‌های گوناگونی برای حل مسائل مختلف توسط الگوریتم‌های فراابتکاری قابل اجراست و نتایج آن‌ها ممکن

است متفاوت باشد، همچنین، مسائل مختلف از جمله مسئله حاضر-بهینه‌سازی تحویل و دریافت مرسولات پستی- توسط الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف قابل پیاده‌سازی است. بنابراین، طراحی و پیاده‌سازی این مسئله توسط الگوریتم‌هایی مانند کلونی مورچگان، کلونی زنبور عسل، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، ... و مقایسه نتایج آنان با یکدیگر به عنوان یکی از پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده مطرح می‌شود.

از دیگر پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده می‌توان به متفاوت در نظر گرفتن ظرفیت ناوگان برای تعداد و حجم مرسولات اشاره کرد. در این تحقیق، ظرفیت خودروهای حمل مرسولات با یکدیگر مساوی در نظر گرفته شد اما می‌توان مدل توسعه داده‌شده را به صورتی بازطراحی کرد که بتوان نتایج مختلف ناشی از یکسان نبودن ظرفیت خودروهای حمل مرسولات را با یکدیگر مقایسه کرد تا بررسی شود که آیا جواب بهینه‌تری نیز برای کاهش طول سفر خودروهای حمل مرسولات وجود دارد یا خیر. همچنین، وارد کردن اطلاعات ترافیک شبکه‌ی معابر نیز می‌تواند پیشنهاد دیگری برای پژوهش‌های آینده باشد مشروط بر اینکه این داده‌ی بسیار حساس توسط ارگان‌های نظامی و انتظامی در اختیار پژوهشگران قرار بگیرد.

مراجع

[۱] Dantzig, G., Fulkerson, R., and Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. Journal of the operations research society of America, 2(4), 393-410.

[۲] Dantzig, G. B., and Fulkerson, D. R. (1954). “Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule.” Naval Research Logistics Quarterly, 1(3), PP. 217-222.

[۳] Mao-xiang, L. A. N. G. (2005). “Study on simulated annealing algorithm for vehicle routing problem with backhauls]J[.” Journal of systems engineering, PP. 5.

[۴] Eksioglu, B., Vural, A. V., and Reisman, A. (2009). “The vehicle routing problem: A taxonomic review.” Computers & Industrial Engineering, 57(4), PP. 1472-1483.

[۵] Naccache, S., Côté, J. F., and Coelho, L. C. (2018). “The multi-pickup and delivery problem with time windows.” European Journal of Operational Research, 269(1), PP. 353-362.

[۶] Wang, Y., Li, Q., Guan, X., Fan, J., Xu, M., and Wang, H. (2021). “Collaborative multi-depot pickup and delivery vehicle routing problem with split loads and time windows.” Knowledge-Based Systems, 231, 107412, PP. 1-24.

[۷] Park, H., Son, D., Koo, B., and Jeong, B. (2021). “Waiting strategy for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery using genetic algorithm.” Expert Systems with Applications, 165, 113959, PP. 1-15.

[۸] Azizi, V., and Hu, G. (2020). “Multi-product pickup and delivery supply chain design with location-routing and direct shipment.” International Journal of Production Economics, 226, 107648, PP. 1-10.

[۹] Grimault, A., Bostel, N., and Lehuédé, F. (2017). “An adaptive large neighborhood search for the full truckload pickup and delivery problem with resource synchronization.” Computers & Operations Research, 88, PP. 1-14.

[۱۰] Benavent, E., Landete, M., Mota, E., and Tirado, G. (2015). “The multiple vehicle pickup and delivery problem with LIFO constraints.” European Journal of Operational Research, 243(3), PP. 752-762.

[۱۱] Tajik, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahdani, B., and Mousavi, S. M. (2014). “A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty.” Journal of Manufacturing Systems, 33(2), PP. 277-286.

[۱۲] Goksal, F. P., Karaoglan, I., and Altiparmak, F. (2013). “A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery.” Computers & Industrial Engineering, 65(1), PP. 39-53.

[13 Masson, R., Lehuédé, F., and Péton, O. (2013). “An adaptive large neighborhood search for the pickup and delivery problem with transfers.” Transportation Science, 47(3), PP. 344-355.

[۱۴] Fan, J. (2011). “The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery based on customer satisfaction.” Procedia Engineering, 15, PP. 5284-5289.

[۱۵] Davoodi, M., Golsefidi, M. M., and Mesgari, M. S. (2019). a Hybrid Optimization Method for Vehicle Routing Problem Using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, PP. 293-297.

[۱۶] Hosseini S.M.H., and Hassani A.A. (2018). "Modelling & Solving the Vehicle Routing Problem in Distribution of a Supply Chain Considering Restriction on The Movement of The Vehicles." INDUSTRIAL ENGINEERING & MANAGEMENT SHARIF (SHARIF: ENGINEERING). 34 (1), pp. 147-155, (in Persian).

[۱۷] Rahimi, A. and Rajabi, V. (2017). "A Hybrid Meta-Heuristic Algorithm for The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up." AMIRKABIR JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (AMIRKABIR). Vol. 48, No. 4, pp. 375-385, (in Persian).

[۱۸] Geraeili Nejad, Masoud., Nazari Adli, N. and Korani, M. (2014). "Solving VRP Problem Using Genetic Algorithm and Comparing It with Mathematical Optimization Method Ghazal Shimi Co. Case Study". International Conference on Industrial Management and Engineering, Tehran, pp. 87-96, (In Persian)

[۱۹] Toth, P., and Vigo, D. (Eds.). (2014). "Vehicle routing: problems, methods, and applications." Society for Industrial and Applied Mathematics. PP. 1-33.

[۲۰] D'Souza, C., Omkar, S. N., and Senthilnath, J. (2012). "Pickup and delivery problem using metaheuristics techniques." Expert Systems with Applications, 39(1), PP. 328-334.

[۲۱] Sivanandam, S. N., and Deepa, S. N. (2007). "Introduction to Genetic Algorithms." Springer, Berlin Heidelberg. PP. 15-37.

[۲۲] Van Zuylen, H. J., and Willumsen, L. G. (1980). "The most likely trip matrix estimated from traffic counts." Transportation Research Part B: Methodological, 14(3), PP. 281-293.

[۲۳] Wang, H. F., and Chen, Y. Y. (2012). "A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window." Computers & Industrial Engineering, 62(1), PP. 84-95.

[۲۴] Beasley, D., Bull, D. R., and Martin, R. R. (1993). "An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals." University computing, 15(2), PP. 56-69.

[۲۵] Goldberg, D. E., and Holland, J. H. (1988). "Genetic algorithms and machine learning."