Archive of SID.ir

Iranian Journal of Supply Chain Management

Vol. 25, No. 81, Winter, 2024

Multi-Objective Modeling of Green Vehicle Routing Problem Using a Hybrid Extreme Learning Machine (ELM) and Genetic Programming (GP)

Mohammad Mehdi Ershadi, Mahsa Momeni Sharifabad, Mohammad Javad Ershadi*, Amir Azizi, Samaneh Behzadipour

*Associate Professor, Iranian Research Institute for Information Science & Technology (IRANDOC), Tehran, Iran

(Received: 29/04/2023; Accepted: 25/10/2023)

Abstract

Transportation plays a significant role in the gross domestic product and oil consumption of every nation. In our country, a combination of recent sanctions and underdeveloped rail, air, and sea transportation systems has led to an increased reliance on road transport. Unfortunately, road transport contributes significantly to the emission of greenhouse gases, particularly carbon dioxide. Nevertheless, transportation is a vital aspect of logistics, and addressing pollution in vehicle routing stands as a paramount concern within this realm.This paper introduces a model aimed at optimizing fuel consumption costs, considering various factors such as vehicle load, speed, pollution, as well as parameters like fuel and engine efficiency, incline, traffic density, wind speed and direction, air temperature, asphalt quality, and driver remuneration. Additionally, this mathematical linear mixed-integer model incorporates probabilistic demand and a distribution system involving both delivery and pickup processes, all geared towards cost minimization.By employing this model, organizations can achieve more precise cost estimates, enhanced analysis, and improved planning. Given the NP-hard nature of the problem, its resolution involves the amalgamation of two meta-heuristic algorithms: Extreme Learning Machine (ELM) and Genetic Programming (GP). Experimental results indicate that the developed hybrid algorithm offers highly accurate estimations in a remarkably short time span when compared with similar algorithms.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Multi-Objective Model, Delivery and Pickup, Probabilistic Demand, Extreme Learning Machine, Genetic Programming

*Corresponding Author E-mail: n.motaharimjershadi@gmail.com

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و پنجم، شماره ۸۱، زمستان ۱۴۰۲؛ ص ۴۱-۱۷

علمی – پژوهشی

مدل‌سازی چندهدفه مسیریابی سبز با استفاده از الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک

محمدمهدی ارشادی[۱]، مهسا مومنی شریف آباد[۲]، محمدجواد ارشادی[۳*]، امیر عزیزی[۴]، سمانه بهزادی‌پور[۵]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک)، تهران، ایران ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران ۳- دانشیار پژوهشکده فناوری اطلاعات، گروه پژوهشی مدیریت فناوری اطلاعات، پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک)، تهران، ایران ۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران ۵- کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه هنر و معماری پارس، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳)

چکیده

حمل‌ونقل بخش قابل توجهی از تولید ناخالص ملی و مصرف محصولات نفتی هر کشوری را به خود اختصاص می‌دهد. در کشور ما با توجه به تحریم‌های سال‌های اخیر و عدم توسعه‌ی سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی، هوایی و دریایی، استفاده از حمل‌ونقل جاده‌ای بیشتر شده است. حمل‌ونقل جاده‌ای بیشترین نقش را در تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر کربن‌دی‌اکسید دارد. بااین‌حال حمل‌ونقل یکی از عناصر اصلی لجستیک بوده و مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با درنظر گرفتن آلودگی از جمله مهم‌ترین مسائل در این حوزه است. بنابراین در این مقاله با درنظر گرفتن عواملی چون بار وسیله نقلیه، سرعت وسیله نقلیه، پارامترهای آلایندگی وسیله نقلیه نظیر ضریب بهره وری سوخت و موتور، شیب مسیر، تراکم رفت‌وآمد، سرعت و جهت باد، دمای هوا و جنس آسفالت به بهینه‌سازی هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت و دستمزد راننده پرداخته شده است. همچنین با درنظر گرفتن تقاضا به صورت احتمالی و سامانه توزیع با جمع آوری و تحویل کالا، یک مدل ریاضی احتمالی عددصحیح آمیخته خطی به منظور کمینه سازی مجموع هزینه های ذکر شده ارائه گردیده است. استفاده از این مدل موجب تخمین دقیق‌تر هزینه‌های سامانه شده و منجر به تحلیل و برنامه‌ریزی بهتر برای سازمان‌ها می‌شود. باتوجه به اینکه مسئله‌ی مطرح شده از نوع مسائل با درجه سختی بالا می باشد، مسئله در ابعاد بزرگ با ترکیب دو الگوریتم فرابتکاری یادگیری ماشین حداکثری و برنامه ریزی ژنتیک حل شده است. با توجه به نتایج حاصل شده از محاسبات، الگوریتم ترکیبی توسعه یافته قابلیت تخمین جواب با دقت مناسبی را دارد و از سرعت عمل بالایی نسبت به الگوریتم‌های مشابه برخوردار است.

کلید واژه‌ها: مسیریابی وسایل نقلیه، مدل چند هدفه، جمع‌آوری و تحویل، تقاضای احتمالی، یادگیری ماشین حداکثری

۱- مقدمه

بدیهی است که راه رسیدن به فرایند توسعه‌ی اقتصادی تنها با ایجاد حمل‌ونقل و ارتباطاتی مناسب امکان‌پذیر است و این موضوعات از اصلی‌ترین ارکان زیربنایی کشورهای پیشرفته و درحال توسعه به شمار می‌آید. حمل‌ونقل چون شریانی است که سایر اجزای خدماتی، بازرگانی، صنعتی و کشاورزی را در دو سطح ملی و بین‌المللی به هم پیوند می‌دهد و تاثیرات عمیقی بر رشد و توسعه کشورها می‌گذارد. همچنین استفاده از حمل‌ونقل در بیشتر کشورها با توجه به توسعه‌ی شهرها در حال افزایش می‌باشد.

این افزایش باعث ایجاد برخی اثرات منفی همچون تصادفات، تراکم رفت‌وآمد، مصرف انرژی، ایجاد آلودگی هوا و آلودگی صوتی شده است. افزایش سریع استفاده از وسایل نقلیه موجب شده که حمل‌ونقل جاده‌ای[۱] امروزه یکی از مهم‌ترین منابع تولید آلودگی در شهرها باشد [۱]. در گذشته برنامه‌ریزی فعالیت‌های حمل‌ونقل بیشتر معطوف به کاهش فاصله‌ها و افزایش سودآوری با توجه به هزینه‌های سوخت و دستمزد رانندگان بوده است [۲، ۳]. درحالی‌که امروزه با توجه به مشکلات زیست محیطی،

[1] Road transportation

*رایانامه نویسنده مسئول: n.motaharimjershadi@gmail.com

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) © نویسندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اهداف مسائل مسیریابی به سمت کاهش اثرات مخرب زیست محیطی سوق پیدا کرده است.

مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با درنظر گرفتن آلودگی[1] برای اولین بار در سال ۲۰۲۲ مطرح شد [۳]. تفاوت این مدل با مدل‌های قبلی مسیریابی در نحوه‌ی مدل‌سازی به فرم مسیریابی وسایل نقلیه سبز[2] و مسیریابی وسایل نقلیه با توجه به مصرف سوخت[3] می‌باشد. این مدل‌ها بر اساس روابط و اثرات مصرف سوخت سازمان‌دهی شده‌اند. همچنین اهداف آن‌ها به گونه‌ای بهینه‌سازی شده که تقاضای تمامی مشتریان پاسخ داده شود. این مسائل به دلیل پاسخ‌گویی همزمان به چندین مشتری و مسیریابی‌های چندگانه، در زمره‌ی مسائل با درجه سختی بالا[4] جای می‌گیرد [۳].

آمار بین‌المللی خسارت‌های ناشی از آلودگی هوا نشان می‌دهد که بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوا چهارمین رتبه مرگ‌ومیر در جهان را به خود اختصاص داده‌اند. برای مثال مشکلات تنفسی و ریوی، سکته قلبی و انواع بیماری‌های مرتبط از چالش‌های سلامت عمومی در مواجهه با آلودگی‌های هوا می‌باشد. بر اساس آخرین گزارش سازمان جهانی بهداشت، سالانه هفت میلیون نفر در سراسر جهان (بیشتر در کشورهای در حال توسعه) به دلیل آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند. به طور کلی از هر ۱۰ نفر در جهان ۹ نفر در معرض هوای بسیار آلوده حتی خطرناک زندگی می‌کنند [۴]. درهوای تهران نیز روزانه ۱۲۰۰ تن آلاینده پخش می‌شود در حالی که رشد سالانه انتشار کربن‌دی‌اکسید در کشور ٪۲۵ است [۵]. همچنین نقش حمل‌ونقل با تولید ٪۲۵ کربن‌دی‌اکسید در جهان که حدود ٪۸۵ آن توسط حمل‌ونقل جاده‌ای تولید می‌شود، قابل توجه است [۶]. مجموعه عوامل فوق نشان می‌دهد که کیفیت هوا در وضعیت نامطلوبی قرار دارد و همواره تهدید جدی محسوب می‌شود؛ ازاین‌رو در سال‌های اخیر توجه به اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از تردد وسایل نقلیه از سوی دولت‌ها و جوامع در سطح بین‌المللی افزایش یافته است. بنابراین در این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی هوا و نقش تراکم رفت‌وآمد در آلاینده‌های هوایی پرداخته می‌شود.

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی هوا، با اندازه‌گیری تاثیرات زیست‌محیطی حاصل از راهبردهای مختلف توزیع و مصرف سوخت مرتبط است. تولید آلاینده‌ها به مسائل محیطی مانند شیب جاده و مسائل غیرمحیطی مانند سرعت و بار وسیله نقلیه وابسته است. همچنین انتخاب درست سرعت بهینه موجب کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها می‌شود؛ البته ممکن است مسیر جدید منجر به طی مسافت و زمان طولانی‌تر شود. لذا بایستی تجزیه‌وتحلیلی بین مسافت طی شده و اثرات زیست محیطی صورت گیرد. در این راستا محققان در پی یافتن راه‌حلی برای کاهش اثرات مخرب حمل‌ونقل بر محیط زیست هستند. از طرفی کنترل اینگونه مسائل با هدف اصلی سازمان‌ها که سودآوری می‌باشد در تضاد است. در نتیجه یافتن رابطه‌ای بین اثرات زیست محیطی و اهداف اقتصادی، اهمیت پیدا می‌کند. در پژوهش های اخیرا انجام شده [۷, ۸] تاثیر پارامترهایی از قبیل سرعت و جهت باد، دما و نوع آسفالت در مصرف سوخت و تولید آلودگی در نظر گرفته نشده است که در این مقاله قصد داریم تاثیر این پارامترها را در مدل سازی دخیل کنیم. همچنین رویکرد مدلسازی، حداقل‌سازی مصرف سوخت و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای باتوجه به ویژگی‌های مختلف مسیر و وسیله نقلیه می‌باشد که در تحقیقات پیشین در نظر گرفته نشده است. باتوجه به سختی بالای مدل معرفی‌شده، یک الگوریتم یادگیری ترکیبی به منظور حل آن ارائه شده است. باتوجه به نکات گفته شده، مسئله تحقیق حاضر به شرح زیر است:

بررسی و مدل‌سازی مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی هوا و تاثیرات زیست محیطی، به منظور حداقل سازی مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در سامانه حمل‌ونقل، با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند سرعت، جهت باد، دما، نوع آسفالت، ویژگی‌های مسیر و وسیله نقلیه، و ارائه یک الگوریتم یادگیری ترکیبی برای حل آن؛ هدف اصلی این تحقیق، بهبود کیفیت هوا و کاهش تاثیرات منفی حمل‌ونقل بر محیط زیست با همزمانی تحقیق اقتصادی و بهینه‌سازی مصرف سوخت است.

۲- مرور ادبیات

زنجیره تامین سبز مرتبط با تولید و توزیع کالاها در یک مسیر پایدار است بطوریکه به عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی توجه شود. اهداف اینگونه مسائل نه تنها بر اساس ملاحظات اقتصادی هستند، بلکه به حداقل رساندن اثرات زیان‌بار مانند آلودگی‌های محیط‌زیستی، مصرف منابع، استفاده از زمین، اسیدی شدن، اثرات سمی بر کلان سامانه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز در نظر گرفته می‌شوند [۹].

[1] Pollution routing problem (PRP)
[2] Green vehicle routing problem (GVRP)
[3] Vehicle fuel consumption
[4] NP-Hard

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

محتشمی و همکاران [۱۰]، مقاله‌ای با هدف کاهش مصرف سوخت که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های ارائه خدمات به مشتریان و در نتیجه رضایت مشتریان و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی را به دنبال دارد، ارائه کردند. در این مدل تمرکز بر بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی حرکت کامیون‌های ورودی- خروجی و زنجیره تامین سبز با وجود چند بارانداز متقاطع و تابعی دوهدفه بود. هدف اول این مدل کمینه کردن توالی حمل‌ونقل کامیون‌ها (حداقل نمودن تعداد جابجایی کامیون‌ها) به منظور توزیع کالا با تأمین انواع تقاضای مشتریان برای کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن و هدف دوم کمینه کردن انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از کامیون‌های موجود در کل سامانه است. حل این مسئله با رویکرد مدل ریاضی بسیار مشکل است زیرا با افزایش متغیرها ابعاد و زمان حل به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند؛ پس مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و کلونی مورچگان حل شد که در هر دو الگوریتم با افزایش تعداد حمل‌ونقل، انتشار گاز دی اکسیدکربن کاهش می‌یابد.

رضا اشتهادی و همکاران [۱۱] مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با درنظر گرفتن آلودگی در شرایط عدم‌قطعیت در تقاضا را توسعه داده‌اند. آن‌ها این مسئله را با سه رویکرد بهینه‌سازی استوار[1] برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه و با درنظر گرفتن آلودگی در شرایط تقاضای احتمالی، زمان‌بندی کردند. نتایج مقاله آن‌ها نشان داد که با تقاضای احتمالی ممکن است تا ۳۰ لیتر سوخت برای یک نمونه با ۱۰ گره، تا ۵۰ لیتر سوخت برای نمونه با ۱۵ گره و حداکثر ۶۰ لیتر سوخت برای نمونه با ۲۰ گره‌ای بیشتر مصرف شود. همچنین با سطح‌بندی تقاضا نتیجه‌گیری شد که میانگین افزایش مصرف سوخت در سطح سخت‌گیرانه برابر با ۳۴/۵۵ لیتر است. افزایش متوسط مصرف سوخت در حالت‌های سطح ایمنی کم و سطح ایمنی زیاد به ترتیب ۳۰/۲۲ و ۳۴/۳۱ لیتر است. پونتالیر و همکاران [۱۲] مسئله‌ی تک هدفه‌ی مصرف کارآمد انرژی در مسیریابی وسایل نقلیه سبز[2] را بررسی کردند. آن‌ها این مسئله را به منظور کمینه کردن دو هدف هزینه‌ی مسیر و مصرف سوخت، با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی مدل‌سازی کردند. همچنین مدل پیشنهادی آن‌ها با استفاده از بهینه‌سازی ذرات[3] با عملگر جهش حریصانه[4] و ضریب شتاب متغیر با زمان[5] حل شد. نتایج آن‌ها نشان داد که برنامه‌ریزی بهتر با مصرف حداقل سوخت در سرعت‌های مختلف قابل دستیابی است. ژانگ و همکاران [۱۳] بر اساس تجزیه‌وتحلیل اثر تراکم رفت‌وآمد و تغییر در سرعت جریان وسایل نقلیه در بازه‌های مختلف زمانی و ساعات اوج بار رفت‌وآمد در شهرهای متوسط و بزرگ، یک تابع چندبخشی برای اعمال حالت‌های مختلف بر مصرف سوخت و تولید کربن‌دی‌اکسید توسعه دادند. آن‌ها مسئله‌ی بهینه‌سازی هم‌زمان برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه سبز با سرعت و زمان متغیر را بررسی کردند. همچنین الگوریتمی ابتکاری بر مبنای الگوریتم جستجوی تطبیقی همسایگی بزرگ[6] ارائه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که لزوما کوتاهترین مسیر، انرژی کمتری مصرف نمی‌کند؛ زمان خروج بر مصرف سوخت خودرو و انتشار کربن‌دی‌اکسید اثر می‌گذارد و زمان خروج بهینه موجب صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌شود و انتشار کربن‌دی‌اکسید را تا ۵/۴٪ کاهش می‌دهد؛ دستمزد رانندگان در تصمیم‌گیری برای مسیریابی و زمان خروج اثر می‌گذارد. آفیی و همکاران [۱۴] مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه سبز را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای این مسئله ایستگاه‌های سوخت‌گیری و ظرفیت مخزن سوخت در طول مسیر درنظر گرفتند. همچنین برای حل کردن مدل، جستجوی همسایگی متغیر[7] را پیشنهاد می‌کنند. در نهایت نتایج به دست آورده را با نتایج سایر الگوریتم‌های موجود در ادبیات مقایسه کردند. نیوو و همکاران [۱۵] مدل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه باز با محدودیت مصرف سوخت برای برون‌سپاری عملیات تدارکات را توسعه دادند. علاوه بر این یک الگوریتم ترکیبی جستجوی ممنوع[8] برای مقابله با این مسئله ارائه کردند. همچنین آزمایشاتی بر اساس داده‌های جاده‌ای شهر پکن انجام دادند.

اسفند آباد و همکاران [۱۶] مدل تک هدفه مسیریابی وسایل نقلیه با درنظر گرفتن آلودگی با جمع‌آوری و تحویل، یکپارچه‌سازی[9] و مرتب‌سازی[10] محموله‌ها در سامانه بارانداز[11] را توسعه دادند. آن‌ها یک مدل یکپارچه برای هماهنگی میان تصمیمات مربوط به جمع‌آوری بار مشتریان، مسیریابی وسایل نقلیه از تامین‌کنندگان به بارانداز، تخصیص وسایل نقلیه‌ی

[1] Robust Optimization
[2] Fuel efficient green vehicle routing problem
[3] Particle swarm optimization
[4] Greedy mutation operator

[5] Time varying acceleration coefficient
[6] Adaptive large neighborhood search
[7] Variable neighborhood search
[8] Hybrid tabu search
[9] Integration
[10] Consolidation
[11] Cross-Docking system

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ورودی به بارانداز‌ها، یکپارچه‌سازی و مرتب‌سازی محموله‌ها در بارانداز، تخصیص محموله‌های یکپارچه به وسایل نقلیه خروجی و مسیریابی وسایل نقلیه از بارانداز به مشتریان ارائه کردند. مدل ارائه شده توسط آن‌ها دو هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های سامانه و کاهش مصرف سوخت که منجر به کاهش انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید می‌شود را دنبال می‌کند. علاوه بر این، برای حل مدل پیشنهادی، سه الگوریتم فراابتکاری شامل، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی غیرغالب[1]، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب[2] و بهینه‌سازی ذرات چندهدفه[3] را استفاده کردند. فریرا و همکاران [۱۷] یک مدل چندهدفه مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط عدم قطعیت را ارائه کردند. هدف این مدل حداقل‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل، آلودگی‌ها، نارضایتی مشتریان و حداکثرسازی قابلیت اطمینان وسایل نقلیه می‌باشد. همچنین برای حل مدل، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[4] را توسعه دادند. در نهایت نتایج به دست آمده را با نتایج نرم‌افزار گمز[5] مقایسه کرده‌اند.

همچنین در جدول (۱) خلاصه‌ای از ادبیات مسائل مسیریابی وسایل‌نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی ارائه شده است.

اگرچه برخی از مقالات در جدول (۱) دسته‌بندی شده‌اند؛ اما مقالات دیگری نیز در این حوزه هستند که بخاطر مدل‌های متفاوتی که با مقالات قبلی دارند، در ادامه بررسی می‌شوند. فاطمی قمی و همکاران [۲۸] با حل کننده CPLEX به ارائه و حل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته جدید برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با توجه به شرایط متفاوت ترافیکی (بدون ترافیک، روان، نیمه سنگین، سنگین) و کاهش سوخت مصرفی پرداخته‌اند. همچنین آن‌ها برای اثبات کاربردی بودن مدل پیشنهادیشان، به حل و تشریح یک مطالعه موردی با توجه به آنالیز حساسیت پرداخته‌اند.

در مقاله معنوی‌زاده و همکاران [۲۹] مدل‌سازی مسیریابی سبز انجام شده و به منظور اعتبارسنجی مدل، ابتدا مدل برای یک مثال حل شده است. سپس برای هر جزء تابع هدف، تابع هزینه جداگانه در نظر گرفته شده و با حل‌کننده CPLEX نمونه‌های مختلف بررسی شده است. تجزیه‌وتحلیل نتایج محاسباتی آن‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی آن‌ها توانسته است هزینه‌های انتشار کربن، هزینه‌های راننده و هزینه‌های حمل‌ونقل را به ترتیب ۴۴٪، ۶٪ و ۵٪ کاهش دهد.

خوشبخت و همکاران [۳۰] نیز با یک الگوریتم ترکیبی اصلاحی مورچگان به حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز ظرفیت‌دار پرداختند. حسینی مطلق و همکاران [۳۱] نیز با استفاده از یک مدل ریاضی و روش حل ابتکاری به حل یک مسئله مکانیابی-مسیریابی دوسطحی با در نظر گرفتن شرایط گذاشت و برداشت در حالت عدم قطعیت پرداختند. بابایی تیرکلایی و همکاران [۳۲] نیز با در نظر گرفتن سفرهای چندگانه و پنجره های زمانی در مدیریت پسماند شهری، به حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری پرداختند. عبدی و حاج آقایی [۳۳] نیز به بررسی مدل احتمالی چندهدفه برای مسئله زنجیرهٔ تأمین حلقه بستهٔ پایدار با در نظرگرفتن مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم نوین ترکیبی بهینه‌سازی نهنگ پرداختند.

از مرور ادبیات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی هوا و مصرف سوخت یک موضوع پیچیده و مهم در حوزه مدیریت حمل‌ونقل و حفاظت از محیط زیست می باشد. این مسئله در دسته بندی مسائل بهینه‌سازی قرار دارد که تلاش دارد بهینه‌سازی هم‌زمان مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه‌های حمل‌ونقل، زمان بندی تردد، و تأمین نیازهای مشتریان را در نظر بگیرد. ضرورت بررسی این مسئله مشخص است؛ زیرا حمل ونقل وسایل نقلیه یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جوامع شهری است. با افزایش تعداد وسایل نقلیه و تراکم رفت‌وآمد، آلودگی هوا و مصرف سوخت افزایش می‌یابند که می تواند منجر به مشکلات بهداشتی، زیست‌محیطی و اقتصادی شود. همچنین این مسئله به تدریج در مرتبه ی برتر مسائل سیاسی و اجتماعی قرار گرفته و توجه های جامعه و دولت ها را به خود جلب می‌کند. در این حوزه مقالات مختلفی به تلاش برای پیدا کردن راه‌حل‌هایی مناسب جهت بهینه‌سازی استفاده از وسایل نقلیه به نحوی که هم تأمین نیازهای مشتریان انجام شود و هم آثار زیست‌محیطی و اقتصادی منفی کاهش یابد، پرداخته‌اند. این تحقیقات از روش‌های متنوعی از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی، شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم‌های فراابتکاری و ... برای حل این مسائل استفاده کرده‌اند. پس تعداد وسیعی از پژوهش ها در این حوزه انجام شده و هر کدام با رویکردها و روش‌های مختلفی سعی در حل این مسئله دارند. از این رو نیاز به بهینه‌سازی حمل‌ونقل وسایل نقلیه با توجه به آلودگی هوا و مصرف سوخت، در حوزه ی پژوهش و عملیاتی به شدت محسوس بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است.

[1] Non-dominated ranking genetic algorithm (NRGA)
[2] Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)
[3] Multi-objective particle swarm optimization (MOPSO)
[4] Simulated annealing
[5] GAMS

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱). خلاصه‌ای از ادبیات مسیریابی وسایل نقلیه با درنظر گرفتن آلودگی

نویسندگان	ویژگی‌های مسئله											
	توزیع					پنجره زمانی	آلودگی				عدم قطعیت در تقاضا	رویکرد حل
	ناوگان	تعداد وسایل‌نقلیه	ظرفیت	وابستگی به رفت‌وآمد	جمع‌آوری و تحویل		ساختار	اثر باد	اثر دما	اثر آسفالت		
هی (۲۰۲۲) [۱۸]	همگن	چند	✓			✓	PRP[1]					دقیق
یوتاما (۲۰۲۲) [۱۹]	همگن	یک	✓	✓			GVRP[2]					ابتکاری
لیو (۲۰۲۲) [۲۰]	همگن	چند	✓	✓			PRP					دقیق
کوک (۲۰۱۴) [۲۱]	ناهمگن	چند	✓	✓		✓	PRP					فراابتکاری
شی (۲۰۲۳) [۲۲]	همگن	چند	✓			✓	PRP					ابتکاری
کرامر (۲۰۱۵) [۲۳]	همگن	چند	✓				PRP					فراابتکاری
کومار (۲۰۱۶) [۲۴]	همگن	چند	✓				PRP					ابتکاری
بریو (۲۰۲۳) [۲۵]	همگن	چند	✓				PRP					دقیق
چن (۲۰۲۳) [۲۶]	ناهمگن	چند	✓	✓			GVRP					فراابتکاری
یو (۲۰۲۳) [۸]	همگن	چند	✓	✓			PRP					دقیق
ما (۲۰۲۳) [۲۷]	همگن	چند			✓	✓	PRP					فراابتکاری
ژانگ (۲۰۱۸) [۱۳]	همگن	چند	✓	✓		✓	GVRS[3]					ابتکاری
پونتالیر (۲۰۱۸) [۱۲]	همگن	چند	✓	✓			GVRP					ابتکاری
اسفندآباد (۲۰۱۸) [۱۶]	همگن	چند	✓		✓		PRP					فراابتکاری
آفیی (۲۰۱۸) [۱۴]	همگن	چند	✓				GVRP					ابتکاری
نیوو (۲۰۱۸) [۱۵]	همگن	چند	✓				GVRP					فراابتکاری
فریرا (۲۰۲۰) [۱۷]	ناهمگن	چند	✓	✓		✓	GVRS				✓	فراابتکاری
مقاله حاضر	ناهمگن	چند	✓	✓	✓	✓	PRP	✓	✓	✓	✓	فراابتکاری

[1] Pollution Routing Problem
[2] Green Vehicle Routing Problem
[3] Green Vehicle Routing Scheme

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

بنابراین حمل ونقل یکی از مسائل مهم و عمده در لجستیک و زنجیره تأمین می‌باشدکه با توجه بیشتر به این حیطه و مسائل مربوط به آن (مانند مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه) می‌توان علاوه بر جلب رضایت مشتری، به مسائل دیگر از جمله مسائل زیست‌محیطی توجه کرد. از جمله بسطهای مسئله‌ی مسیریابی وسایل‌نقلیه، مسئله‌ی مسیریابی وسایل‌نقلیه وابسته به زمان با درنظرگرفتن آلودگی است که نقش مهمی در اتخاذ تصمیمات سازگار با محیط‌زیست دارد.

به همین دلیل مدل پیشنهادی مقاله حاضر در راستای کمینه کردن هزینه‌های انتشار آلاینده‌ها و دستمزد راننده مطرح شده است. هدف مدل پیشنهادی ارائه‌ی مسیرهایی به‌منظور خدمت‌رسانی به مشتریان در پنجره‌های زمانی مشخص با کمترین میزان مصرف سوخت و آلاینده‌های منتشر شده می‌باشد. میزان مصرف سوخت با توجه به پارامترهایی از قبیل بار، شیب جاده، رفت‌وآمد، دما، سرعت و جهت باد، نحوه‌ی رانندگی و جنس آسفالت تعیین می‌شود. همچنین سرعت جریان آزاد بر روی هر یال با توجه به کمینه کردن میزان مصرف سوخت و تجاوز نکردن از پنجره‌ی زمانی بهینه می‌شود.

۳- تعریف مدل پیشنهادی

همانطور که در بخش قبل بیان شد، مدل‌های بسیاری برای محاسبه‌ی میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرفی وجود دارد که در روش مدل کردن، ساختار و داده‌های مورد نیاز با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از این دسته مدل‌ها، مدل‌های میکروسکوپیک است که تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف سوخت را به صورت لحظه به لحظه برآورد می‌کند. یکی از مدل‌های پرکاربرد میکروسکوپیک، مدل انتشار کیفی جامع است که می‌توان از آن برای محاسبه‌ی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرفی استفاده کرد. در این مدل سرعت و بار وسیله‌نقلیه و شیب جاده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نحوه‌ی مدل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس مدل ارائه شده توسط بارت و بوریبونسومسین می‌باشد [۱۸]. از آنجایی که انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور مستقیم با مقدار مصرف سوخت متناسب است، در مدل پیشنهادی از میزان مصرف سوخت به عنوان یک معیار برای تخمین مقدار کل انتشار استفاده می‌کنیم. با توجه به سرعت ثابت $v(\mathrm{m/s})$ و بار $f(\mathrm{kg})$، نرخ مصرف سوخت لحظه‌ای با نماد $Fr(\mathrm{l/s})$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$Fr = \frac{\xi}{\sigma * \psi} * \left(k * Ne * Ve + \frac{F_{Total}}{1000 * \varepsilon * \varpi}\right) \quad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، ξ نرخ جرمی سوخت وارد شده به هوا، k اصطکاک موتور وسیله‌ی نقلیه، Ne سرعت موتور و Ve تغییر مکان موتور می‌باشند. ψ و σ مقادیر ثابت هستند و به ترتیب پارامترهای تبدیل سوخت از گرم بر ثانیه به لیتر بر ثانیه و ارزش گرمایی سوخت دیزل هستند. همچنین ε و ω به ترتیب کارایی محورهای حرکتی وسیله‌نقلیه و ضریب بهره‌وری موتور بنزینی می‌باشند. F_{Total} قدرت خروجی موتور به صورت لحظه‌ای است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$F_{Total} = \frac{1}{2}\rho * Ak * Cd * v^3 + (\mu + f) * v * (g * \sin\gamma + Cr * g * \cos\gamma) \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، μ وزن وسیله‌نقلیه (وزن وسیله‌ی نقلیه به صورت خالی بدون بار) بر حسب کیلوگرم است. v ، γ و g به ترتیب سرعت وسیله‌نقلیه، شیب جاده و ثابت گرانش هستند. Cr و Cd ضرایب مربوط به مقاومت هوا و مقاومت غلطشی می‌باشند. ρ و Ak نیز به ترتیب چگالی هوا و سطح مقطع وسیله‌نقلیه است. برای کمان (i,j) به طول d ، v سرعت وسیله‌نقلیه‌ای است که این کمان را طی می‌کند.

در ادامه با استفاده از مدل ارائه شده توسط مهرسا احسانی و همکاران، نحوه تاثیر نوع آسفالت، دمای هوا و سرعت و جهت باد را در مصرف سوخت در نظر می‌گیریم [۳۴]. لازم به ذکر است که به منظور دخیل کردن تاثیر سرعت باد، در محاسبه ی نیروی آیرودینامیک، به جای سرعت خودرو از سرعت نسبی خودرو نسبت به باد استفاده می‌کنیم. همچنین برای خنثی کردن خطای احتمالی از یک ضریب تصحیح استفاده می‌کنیم [۳۴].

$$F_{Total} = \frac{1}{2}\rho\, Ak\, Cd\, vr^3 + \left(\mu_k + f_{ij}^k\right) vr(g\, \sin\gamma + Cr\, g\, \cos\gamma\, \lambda_o\, \phi_t) \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، vr سرعت نسبی وسیله‌نقلیه نسبت به باد می‌باشد. λ و $\emptyset$ به ترتیب ضریب تاثیر جنس آسفالت و ضریب تاثیر دما می‌باشند. اگر همه متغیرهای موجود در رابطه (۳) به جز سرعت در طول کمان ثابت فرض شوند، نرخ سوخت مصرفی (لیتر) در کمان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$Fr = \frac{\xi}{\kappa\psi}\left[+\left[\frac{\frac{1}{2}\rho\, Ak\, Cd\, vr^3 + (\mu_k + f_{ij}^k) vr(g\, \sin\gamma + Cr\, g\, \cos\gamma\, \lambda_o\, \phi_t)}{1000\varepsilon\varpi}\right]\right] \quad (۴)$$

پس مقدار کل سوخت مصرفی، برای پیمودن مسیری به طول d و با محدودیت سرعت v و بار f برابر است با نرخ مصرف سوخت در زمان سفر d/v از رابطه زیر حساب می‌شود [۱۸]:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$Fe = \frac{\xi}{k\psi}\left[\frac{k\,Ne\,Ve\,\frac{d}{vr}}{+\left[\frac{\frac{1}{2}\rho\,Ak\,Cd\,vr^2 + (\mu_k + f_{ij}^k)(g\,\sin\gamma + Cr\,g\,\cos\gamma\,\lambda_o\,\phi_t)d}{1000\varepsilon\omega}\right]}\right] \quad (۵)$$

رابطه‌ی (۵) به طور کلی شامل سه جزء می‌باشد. اجزاء این رابطه شامل، ماژول موتور، ماژول سرعت و ماژول وزن می‌باشد. ماژول موتور به شکل $k\,Ne\,Ve\,d/vr$، ماژول سرعت به شکل $5/0\,\beta\,\rho\,Ak\,Cd\,vr^2$ و ماژول وزن به شکل $(\mu_k + f_{ij}^k)(g\,\sin\gamma + Cr\,g\,\cos\gamma\,\lambda_o\,\phi_t)d$ تعریف می‌شوند [۳۵]. در نهایت، برای مدل‌سازی وابسته به زمان تابع مصرف سوخت را به صورت تابعی از زمان خروج و سرعت جریان آزاد در مسیر طی شده را به صورت رابطه‌ی (۶) بازنویسی می‌کنیم.

$$Fe(w, v_f) = \frac{\xi\, e_v}{\sigma\psi}\left[\frac{k\,Ne\,Ve\,T(w,v_f)}{+\left[\frac{1}{1000}\frac{1}{\varepsilon\omega}\frac{1}{2}\rho\,Ak\,Cd[(a-w)vr_c^3 + (w + T(w,v_f) - a)vr_f^3]\right]}{+(\mu_k + f_{ij}^k)(g\,\sin\gamma + Cr\,g\,\cos\gamma\,\lambda_o\,\phi_t)d}\right] \quad (۶)$$

در رابطه‌ی بالا، $a - w$ زمان سپری شده در رفت‌وآمد و $w + T(w, v_f) - a$ زمان سپری شده در رانندگی با سرعت جریان آزاد می‌باشد. به طور کلی، $T^c(w) = \min\{(a-w)^+, d/v_c\}$ را برابر با مقدار زمان سپری شده توسط وسیله‌نقلیه در رفت‌وآمد و $T^f(w, v_f) = [d - (a-w)^+ v_c]^+ / v_f$ را برابر با زمان سپری شده در رانندگی با سرعت جریان آزاد قرار دهید. ما رابطه‌ی $T(w, v_f) = T^c(w) + T^f(w, v_f)$ را تعریف می‌کنیم و رابطه‌ی (۶) را بازنویسی می‌کنیم [۳۵].

$$Fe(w, v_f) = \frac{\xi\, e_v}{\sigma\psi}\left[\frac{k\,Ne\,Ve\,T(w,v_f)}{+\left[\frac{1}{1000}\frac{1}{\varepsilon\omega}\frac{1}{2}\rho\,Ak\,Cd[T^c(w)vr_c^3 + T^f(w,v_f)vr_f^3]\right]}{+(\mu_k + f_{ij}^k)(g\,\sin\gamma + Cr\,g\,\cos\gamma\,\lambda_o\,\phi_t)d}\right] \quad (۷)$$

در ادامه پارامترهای خاص هر وسیله‌نقلیه در جدول (۲) ارائه شده‌اند [۲۱]، همچنین پارامترهای مشترک در همه وسایل نقلیه در جدول (۳) آمده‌اند [۳۵].

جدول (۲). پارامترهای خاص هر وسیله‌نقلیه

پارامتر	واحد	تعریف	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
Ak	m^2	سطح جلوی وسیله‌نقلیه	۳/۹۱۲	۴/۱۳	۴/۱۷
μ	Kg	وزن وسیله‌نقلیه (بدون بار)	۶۳۰۰	۸۱۰۰	۸۲۵۰
ω	-	ضریب بهره‌وری موتور بنزینی	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۱
Cd	-	ضریب مقاومت غلطشی	۰/۶	۰/۶	۰/۷
Ne	rev / s	سرعت موتور	۳۹	۳۳	۳۰
Ve	Liter	تغییر مکان موتور	۲/۷	۵	۶/۶
k	KJ/rev/liter	اصطکاک موتور وسیله‌ی نقلیه	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵

جدول (۳). پارامترهای مشترک وسایل‌نقلیه

پارامتر	واحد	تعریف	مقدار
ξ	-	نرخ جرمی سوخت وارد شده به هوا	۱
ψ	$g/s \rightarrow g/l$	تبدیل سوخت از گرم بر ثانیه به لیتر بر ثانیه	۷۳۷
σ	KJ / g	ارزش گرمایی سوخت دیزل	۴۴
g	m/s^2	ثابت گرانش	۹/۸۱
ρ	Kg/m^3	چگالی هوا	۱/۲۰۴۱
Cr	-	ضریب مقاومت هوا	۰/۰۱
ε	-	کارایی محورهای حرکتی وسیله‌نقلیه	۰/۴
fc	$	قیمت واحد سوخت	۱/۴

قابل ذکر است که تقاضا در مدل پیشنهادی این مقاله تصادفی در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می‌کنیم در لحظه‌ی ورود وسیله نقلیه به گره مشتری، تقاضای مشتری شناسایی می‌شود. در واقع با هر بازدید اطلاعات جدیدی به دست می‌آید و درنتیجه باید تصمیمات را به‌روزرسانی کنیم. مدل پیشنهادی شامل مفروضات زیر می‌باشد:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

- هر وسیله‌نقلیه مسیر خود را از انبار شروع کرده و در انبار به پایان می‌رساند.
- در ابتدا نوع تقاضای هر یک از مشتریان (تحویل یا جمع‌آوری) مشخص است و ابتدا محصول به مشتریان دسته اول تحویل شده و سپس محصولات مشتریان دسته دوم تحویل گرفته می‌شود. در صورت نیاز باقیمانده‌ی تقاضا از انبار تامین می‌گردد.
- همه‌ی وسایل نقلیه دارای ظرفیت یکسان می‌باشند.
- تقاضای مشتریان کاملا تصادفی می‌باشد.
- در اولین بازدید از هر یک از مشتریان، تقاضای آن مشتری بروزرسانی می‌شود.
- در صورتی که در آخرین بازدید از یک مشتری نتوان تقاضای آن مشتری را به طور کامل ارضاء کرد، این بازدید کامل نشده و وسیله نقلیه به انبار بازگشته و سفر دوباره تکرار می‌شود.
- تقاضای مشتریان نوع اول منفی و تقاضای مشتریان نوع دوم مثبت در نظر گرفته می‌شود.
- سرعت در این مسئله، سرعت نسبی وسیله‌نقلیه نسبت به سرعت باد در نظر گرفته شده است.
- سرعت خودرو و سرعت باد بر روی هر یال ثابت می‌باشد.
- ممکن است تقاضای یک مشتری در چند مرحله ارضاء شود، که مجموع کسرهای ارضاء شده در تمام مراحل برابر یک می‌باشد. بنابراین جریمه‌ی پنجره‌ی زمانی نسبت به واحد محصول و کسر تقاضا در هر مرحله محاسبه می‌شود.
- تمامی وسایل‌نقلیه در حالت استاندارد خود قرار دارند و سامانه سوخت آنها تنظیم می‌باشد.
- تقاضای هر یک از مشتریان کوچکتر یا مساوی ظرفیت وسایل نقلیه است.
- پارامترهای نوع آسفالت، دما و سرعت و جهت باد در طول هر یال ثابت می‌باشند.
- تقاضای تمامی مشتریان باید به طور کامل ارضاء شود.
- یک نوع محصول بین مشتریان توزیع و جمع‌آوری می‌شود.
- در ابتدای مسیر نوع هر یک از مشتریان (تحویل یا جمع‌آوری) مشخص می‌باشد.
- زمان سرویس‌دهی به هر یک از مشتریان با توجه به حجم تقاضای آن‌ها مشخص می‌شود.
- پنجره‌ی زمانی استفاده شده، پنجره‌ی زمانی نرم می‌باشد. در صورتی که مشتری در پنجره‌ی زمانی خود بازدید نشود، جریمه‌ای به سامانه تحمیل می‌شود.
- سرعتی نسبی وسیله‌ی نقلیه نسبت به باد را برابر سرعت وسیله‌ی نقلیه درنظر می‌گیریم و تاثیر پارامتر باد را با اعمال پارامتر ضریب تاثیر باد درنظر می‌گیریم.

علاوه بر پارامترهای ذکر شده در جدول‌های (۲) و (۳)، سایر پارامترها در جدول (۴) آمده است. همچنین اندیس‌ها در جدول (۵) معرفی شده‌اند. پارامترهای پیشنهادی جدول زیر به صورت تقریبی با توجه به مقادیر واقعی تعیین شده است.

جدول (۴). پارامترهای مدل پیشنهادی

پارامتر	واحد	تعریف	مقدار
n	-	تعداد مشتریان نوع ۱	-
n'	-	تعداد مشتریان نوع ۲	-
K	-	تعداد وسایل نقلیه	-
Pc	$ per min	دستمزد واحد راننده	۰/۰۲۵
q	kg	تقاضای مشتریان	-
t	kg / s	زمان واحد باراندازی (بارگیری)	۴
d	Meter	مسافت بین مشتریان	-
γ	degree	شیب جاده	-
Ei	Seconds	حد پایین پنجره‌ی زمانی	-
Li	Seconds	حد بالای پنجره‌ی زمانی	-
CE	$	جریمه‌ی یک واحد زودکرد	۰/۰۰۶
CT	$	جریمه‌ی یک واحد دیرکرد	۰/۰۰۵
M	-	عددی بزرگ	-
F	$	تابع هزینه‌ی کل	-

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۵). اندیس‌های مدل پیشنهادی

تعریف	مقادیر	اندیس
مجموعه مشتریان	i, j	π
مجموعه وسایل نقلیه	$1,\ldots,k$	k
مناطق رفت‌وآمد	$1,2,3$	m
سطوح سرعت	$1,\ldots,r$	r

همچنین پارامتر ضریب تاثیر باد به ازای سطوح مختلف سرعت باد مقادیر مختلفی اخذ می‌کند. این مقادیر با توجه به نتایج ارائه شده توسط احسانی و همکاران [۳۴] گردآوری شده و در جدول (۶) ارائه شده‌اند. در ادامه به بررسی متغیرهای مسئله پرداخته می‌شود:

جدول (۶). مقادیر مختلف پارامتر ضریب تاثیر باد

باد موافق	باد مخالف	سرعت باد
۰/۹۷	۱/۰۵	$۳ \leq v_{wind} \leq ۵$
۰/۹۱	۱/۱۲	$۵ < v_{wind} \leq ۱۰$
۰/۸۸	۱/۱۵	$۱۰ < v_{wind}$

x_{ij}^k	اگر وسیله نقلیه k ام از گره i به سمت گره j سفر کند و گره j را بازدید کند برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر
z_{ij}^{mrk}	اگر وسیله نقلیه k ام در بازه‌ی رفت‌وآمد m ام و با سطح سرعت جریان آزاد r از گره i به سمت گره j سفر کند و گره j را بازدید کند برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر
f_{ij}^k	مقدار بار وسیله نقلیه k ام در مسیر بین مشتری i و j
w_{ij}^k	زمان خروج وسیله نقلیه k از گره i برای سفر به گره j
S_{ij}^k	زمان سفر از گره i به گره j توسط وسیله نقلیه k ام
ET_i^k	مقدار زمان زودکرد در پنجره‌ی زمانی گره i توسط وسیله نقلیه k ام
TT_i^k	مقدار زمان دیرکرد در پنجره‌ی زمانی گره i توسط وسیله نقلیه k ام
y_i^k	زودترین زمان شروع سرویس گره i توسط وسیله نقلیه k ام

در این قسمت مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح آمیخته مسئله مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان با در نظر گرفتن آلودگی و تقاضای احتمالی را ارائه می‌کنیم. در این مدل پارامترهای ضریب تاثیر دما، سرعت و جهت باد و نوع آسفالت درنظر گرفته شده است. همچنین ماهیت تقاضا به دو شکل تحویل و جمع‌آوری و مقدار آن به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. ازاین‌رو محدودیت‌های مرتبط با نحوه‌ی سرویس‌دهی و پنجره‌ی زمانی نرم به مسئله اضافه شده‌اند. در این بخش به منظور ساده‌سازی فرمول‌بندی مدل، پارامترهای مدل را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$h_{1i} = \min\left[F_{ni} + \sum_{i<n}^{n-1} F_{i(i+1)}\right]$$

$$h_{2i} = \begin{cases} -q_i & -q_i < 0 \\ 0 & 0 < -q_i \end{cases}$$

$$h_{3i} = \begin{cases} Q & Q < Q - q_i \\ Q - q_i & Q - q_i < Q \end{cases}$$

$$h_{4i} = \begin{cases} y_i^k - Li_i & y_i^k - Li_i > 0 \\ 0 & 0 > y_i^k - Li_i \end{cases}$$

$$h_{5i} = \begin{cases} Ei_i - y_i^k & Ei_i - y_i^k > 0 \\ 0 & 0 > Ei_i - y_i^k \end{cases}$$

$$h_{6i} = \left\{x_{li}^k \middle| x_{li}^k > x_{lj}^k; j, l \in V\right\}$$

تابع هزینه‌ی F در مدل ارائه شده شامل حاصل جمع شش بخش می‌باشد. بخش اول شامل هزینه‌های انتشار آلاینده‌ی ماژول موتور می‌باشد. بخش دوم، شامل هزینه‌های انتشار آلاینده‌ی ماژول سرعت در تمامی مناطق رفت‌وآمد و جریان آزاد می‌باشد.

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R} \frac{f_c\, \xi\, k^k\, Ne^k\, Ve^k\, e_v}{\sigma\psi} \left(\theta_{ij}^{mrk} w_{ij}^{mrk} + \eta_{ij}^{mrk} z_{ij}^{mrk}\right) \quad (۲۳)$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R}\frac{f_c\,\xi\,e_v}{1000\,\varepsilon\omega_k\,\sigma\psi} * \left[\frac{1}{2}\,\rho\,Ak^k\,Cd^k(vr^{mrk})^3\right] / \left[\left(\theta_{ij}^{mrk}w_{ij}^{mrk} + \eta_{ij}^{mrk}z_{ij}^{mrk}\right)\right] \quad (۲۴)$$

بخش سوم تابع هزینه شامل محاسبه‌ی هزینه‌های انتشار آلاینده‌ی ماژول سرعت در مناطق انتقال از شلوغی به جریان آزاد می‌باشد.

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R}\frac{f_c\,\xi\,e_v}{1000\,\varepsilon\omega^k\,\sigma\psi} * \left(\frac{\left[\frac{1}{2}\rho\,Ak^k\,Cd^k\left(vr^{2rk}\right)^3\right]}{\left(a_{ij}\,z_{ij}^{2rk} - w_{ij}^{2rk}\right)} + \frac{\left[\frac{1}{2}\rho\,Ak^k\,Cd^k\left(vr^{3rk}\right)^3\right]}{\left(w_{ij}^{2rk} + \theta_{ij}^{2rk}w_{ij} + \eta_{ij}^{2rk}z_{ij}^{2rk} - a_{ij}\,z_{ij}^{2rk}\right)}\right) \quad (۲۵)$$

بخش چهارم هزینه‌های تحمیل شده توسط ماژول وزن می‌باشد که شامل حاصل جمع وزن وسیله‌نقلیه و وزن بار است.

$$\sum_{k=1}^{K}\frac{f_c\,\xi\,e_v}{1000\,\varepsilon\omega^k\,\sigma\psi}\left[\left(\,g\,\sin\gamma + Cr\,g\,\cos\gamma\,\lambda_{o_{ij}}\,\phi_{t_{ij}}\right)\left(\mu_k\,x_{ij}^k + f_{ij}^k\right)d_{ij}\right] \quad (۲۶)$$

قسمت‌های بعدی به ترتیب شامل هزینه‌های جریمه‌ی دیرکرد و زودکرد در پنجره‌ی زمانی و هزینه‌های دستمزد رانندگان می‌باشد.

$$\left(\sum_{k=1}^{K}\sum_{(j)=\pi^p}^{[(k+1)(n-1)]} CE_j ET_j^k\tau_j + \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=p}^{[(k+1)(n-1)]} CT_j TT_j^k\tau_j\right) \quad (۲۷)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in C} PS_{ij}^k \quad (۲۸)$$

در نهایت، تابع هدف طبق رابطه (۲۹) شامل دو بخش کلی، هزینه‌های تصمیم مرحله‌ی اول به علاوه‌ی ارزش انتظاری حاصل جمع هزینه‌های مسیر بهینه، شکست‌ها و بازگشت به انبار می‌باشد. مدل ارائه شده بر اساس مدل پایه‌ی مسئله‌ی مسیریابی به منظور کاهش آلودگی ارائه شده توسط بکتاش و لاپورته می‌باشد [۳۵]. همچنین در محدودیت‌های ارائه شده با توجه به مدل پایه نیازی به محدودیت عدم تشکیل زیرتورها نیست. در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی مسئله را مشاهده می‌کنید.

$$\text{MIN}\left[F_{0\pi^1} + E_{d^1}\left(h_{11} + E_{d^2}(h_{12} + \ \dots\ + E_{d^n}\{h_{1n}\}\dots)\right)\right] \quad (۲۹)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1,j\neq 0}^{(n+n')^2-1} x_{0j}^k = K \quad (۳۰)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k = 1 \qquad \forall\, i\in V_0 \quad (۳۱)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k = 1 \qquad \forall\, j\in V_0 \quad (۳۲)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k - \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1,i\neq j}^{(n+n')^2} x_{ji}^k = 0 \qquad \forall\, j\in V_0 \quad (۳۳)$$

$$z_{ij}^{mrk}b_{ij}^{m-1} \le w_{ij}^{mrk} \le z_{ij}^{mrk}b_{ij}^{m} \qquad \forall\, i\in C, j\in C, k\in K, m\in\{1,2,3\}, r\in R \quad (۳۴)$$

$$\sum_{i=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1}\sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R}\left(w_{ij}^{mrk} + \theta_{ij}^{mrk}w_{ij}^{mrk} + \eta_{ij}^{mrk}\,z_{ij}^{mrk}\right) \le y_j^k \qquad \forall k\in K, j\in V \quad (۳۵)$$

$$\sum_{i=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1}\sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R} w_{ij}^{mrk} \ge y_i^k + \sum_{j=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1}\left(\frac{q_j\tau_j}{t^k}\right) \qquad \forall\,(k,i), i\in V \quad (۳۶)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1,i\neq j}^{(n+n')^2-1}\sum_{i=p}^{[(k+1)(n-1)]} f_{ji}^k - \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1,i\neq j}^{(n+n')^2-1}\sum_{i=p}^{[(k+1)(n-1)]} f_{ij}^k = -q_p \qquad \forall\, p=1,\dots,n \quad (۳۷)$$

$$h_{2i} \le f_{ij}^k \le h_{3i} \qquad \forall\, i\in V_0, j\in V_0, k\in K \quad (۳۸)$$

$$y_i^k - y_j^k \le M\left(2 - \left(\sum_{l=0,l\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{lj}^k - \sum_{l=0,l\neq i}^{(n+n')^2-1} x_{li}^k\right)\right) \qquad \forall\, i\in A, j\in B, k\in K \quad (۳۹)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=0}^{n(n+n'-1)}\sum_{i=n(n+n'-1)}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k = 0 \quad (۴۰)$$

$$Ei_i\sum_{j=n,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k \le y_i^k \le Li_i\sum_{j=n,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ij}^k \qquad \forall\, k\in K, i\in V_0 \quad (۴۱)$$

$$h_{4i} \le TT_i^k + M\left(1 - \sum_{j=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ji}^k\right) \qquad \forall\, i\in A, k\in K \quad (۴۲)$$

$$h_{5i} \le ET_i^k + M\left(1 - \sum_{j=0,i\neq j}^{(n+n')^2-1} x_{ji}^k\right) \qquad \forall\, i\in V_0, k\in K \quad (۴۳)$$

$$\sum_{l=1}^{n+n'-2} f_{li}^k + \sum_{j=1}^{(n+n')^2}\sum_{l=0}^{(n+n')^2-1} q_j x_{lj}^k \ge -M(1-h_{6i}) \qquad \forall\, i\in V_0 \quad (۴۴)$$

$$S_{ij}^k \ge \sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R}\left(w_{ij}^{mrk} + \theta_{ij}^{mrk}w_{ij}^{mrk} + \eta_{ij}^{mrk}z_{ij}^{mrk}\right) \qquad \forall\,(i,j)\in C, k\in K \quad (۴۵)$$

$$\sum_{m=1}^{3}\sum_{r=1}^{R} z_{ij}^{mrk} = x_{ij}^k \qquad \forall\,(i,j)\in C, k\in K \quad (۴۶)$$

$$\sum_{i=p}^{[(k+1)(n-1)]}\tau_i = 1 \qquad \forall\, p=1,2,\dots,n \quad (۴۷)$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\forall (i,j) \in C, k \in K \quad (۴۸)$$

$$\forall (i,j) \in C, k \in K, m \in \{1,2,3\}, r \in R \quad (۴۹)$$

$$\forall i \in V_0 \quad (۵۰)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}^k &\in \{0,1\} \\ z_{ij}^{mrk} &\in \{0,1\} \\ 0 < \tau_i &\leq 1 \\ y_i^k &\geq 0 \\ f_{ij}^k &\geq 0 \\ S_{ij}^k &\geq 0 \\ w_{ij}^k &\geq 0 \\ ET_i^k &\geq 0 \\ TT_i^k &\geq 0 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} &\forall i \in V, k \in K \\ &\forall i \in V, j \in V, k \in K \\ &\forall i \in V, j \in V, k \in K \\ &\forall i \in V, j \in V, k \in K \\ &\forall i \in V, k \in K \\ &\forall i \in V, k \in K \end{aligned} \quad (۵۱)$$

محدودیت (۳۰) تضمین می‌کند که دقیقا k وسیله نقلیه انبار را ترک کنند. محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) تضمین می‌کنند که هر گره یک‌بار بازدید شود. محدودیت (۳۳) تضمین می‌کند که جریان ورودی به هر گره با جریان خروجی از آن برابر است. محدودیت (۳۴) شرایط مرزی زمان خروج از گره را اجرا می‌کند. محدودیت‌های (۳۵) و (۳۶) رابطه زمانی بین زمان ورود و زمان سرویس، و رابطه بین زمان سرویس و زمان خروج از گره را بیان می‌کنند. محدودیت (۳۷) جریان محصولات و محدودیت (۳۸) عدم تخلف از ظرفیت وسیله نقلیه را بررسی می‌کنند. همچنین محدودیت‌های (۳۹) و (۴۰) نحوه خدمت‌رسانی را کنترل می‌کنند، به نحوی که ابتدا محصولات مشتریان دسته اول تحویل داده شود. محدودیت‌های (۴۱) تا (۴۳) مربوط به پنجره زمانی و تخلف از آن است. محدودیت (۴۴) مقدار باری که از انبار باید خارج شود را محاسبه می‌کند. محدودیت (۴۵) کل زمان سفر را به‌دست می‌آورد. محدودیت (۴۶) ارتباط متغیر سرعت و متغیر گذر از یال را نشان می‌دهد. محدودیت (۴۷) نشان می‌دهد که مجموع کسرهای ارضاء شده از تقاضا برابر یک می‌باشد. در نهایت، محدودیت‌های (۴۸) تا (۵۱) متغیرهای مسئله را معرفی می‌کنند.

برای خطی‌سازی مدل، با توجه به مقاله ارائه شده توسط بکتاش و لاپورته در سال ۲۰۱۱ فرض می‌کنیم که محدودیت های سرعت روی هر یال به صورت $L_{ij} = L$ و $U_{ij} = U$ برای هر $(i,j) \in A$ یکسان می باشند [۳۵]. این فرض محدودیت نیست و فقط برای ساده‌سازی نشانه‌گذاری معرفی شده است. بعد از این یک مجموعه از سطوح سرعت $R = \{1,2,\dots,r\}$ را معرفی می‌کنیم که هر $r \in R$ برای یک یال معین (i,j) مطابق است با یک بازه‌ی سرعت $[L^r, U^r]$ که $L^1 = L$ و $U^{|R|} = U$ می‌باشند [۳۵]. در نتیجه میانگین سرعت به صورت $\left(V^r = \frac{L^r + U^r}{2}\right)$ برای هر $r \in R$ محاسبه می‌شود. همچنین متغیر صفر و یک Z را معرفی می‌کنیم، به صورتی که $Z_{ij}^r = 1$ اگر وسیله نقلیه بر روی یال (i,j) با سطح سرعت $r \in R$ سفر کند و در غیر اینصورت صفر خواهد بود. ارتباط متغیرهای x_{ij} و z_{ij} نیز به صورت زیر می‌باشد [۲۹]؛ در نتیجه خواهیم داشت:

$$\sum_m \sum_r z_{ij}^{mrk} = x_{ij}^k \qquad \forall i,j,k \quad (۵۲)$$

۴- الگوریتم حل پیشنهادی

همان‌طور که در بخش‌های قبل عنوان شد، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی از دسته مسائل با درجه سختی بالا می‌باشد و از پیچیدگی زیادی برخوردار است. به همین دلیل اغلب رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسئله استفاده می‌شود. در مدل‌سازی مطرح شده در این مقاله علاوه بر فرضیات پایه، مبحث پنجره زمانی، تاثیر چند پارامتر جدید در مصرف سوخت و جمع‌آوری و توزیع هم‌زمان نیز در نظر گرفته شده است؛ لذا مسئله مطرح شده حداقل به سختی مسئله‌ی پایه مقاله احسانی و همکاران می‌باشد [۳۴]. الگوریتم حل پیشنهادی از ترکیب دو الگوریتم ژنتیک و یادگیری ماشین حداکثری می‌باشد که در ادامه بررسی می‌شوند.

یادگیری ماشین حداکثری یک شبکه عصبی می‌باشد که در دسته‌ی الگوریتم‌های فراابتکاری جای می‌گیرد. این شبکه برای اولین بار توسط گوانگ‌بین هوانگ معرفی شد [۳۶].

یادگیری ماشین حداکثری توسعه یافته‌ی شبکه عصبی پیشرو با تک لایه پنهان[1] می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت شبکه‌های عصبی پیشرو پایین‌تر از حد انتظار بوده، محققان اقدام به توسعه‌ی توسعه‌ی آن‌ها تحت عنوان یادگیری ماشین حداکثری کرده‌اند، که علاوه بر کمینه‌کردن خطا، به تعیین بهترین ترکیب از وزن‌ها نیز تمرکز دارد. سرعت پایین شبکه‌های عصبی پیشرو ناشی از دو عامل: (۱) تکرارهای بسیار زیاد آن‌ها به‌منظور یادگیری برای دستیابی به عملکرد بهتر و (۲) یادگیری

[1] Single Hidden Layer Feedforwaed Neural Networks (SLFNs)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

بر پایه گرادیان است که برای یادگیری وزن‌ها در این شبکه‌ها استفاده می‌شود. لایه‌ها در شبکه عصبی پیشرو به صورت تک بعدی (یک خط از نرون‌ها) می‌باشد، در حالی که در یادگیری ماشین حداکثری به منظور بالا بردن سرعت، از لایه‌های دو بعدی (یک سطح از نرون‌ها) استفاده می‌شود. استفاده از لایه‌های دو بعدی موجب می‌شود که تعداد حالات بیشتری در واحد زمان بررسی شود و درنتیجه سرعت یادگیری به شدت افزایش یابد. این در حالی است که به دلیل بالا رفتن حجم محاسبات در واحد زمان، حافظه‌ی بیشتری مورد نیاز می‌باشد. همچنین به دلیل بررسی تعداد حالات بیشتر در واحد زمان، دقت آن نیز بهبود می‌یابد. با توجه به مطالب ذکر شده، زمان آموزش و خطا در یادگیری ماشین حداکثری نسبت به شبکه عصبی پیشرو به شدت کاهش پیدا می‌کند [۳۷]. در این روش مبنای یادگیری الگوریتم، نرخ آموزش[1] یا η می‌باشد. الگوریتم یادگیری محبوب مورد استفاده در شبکه‌های عصبی پیشرو الگوریتم انتشار به عقب است که در آن گرادیان‌ها می‌توانند به طور موثر با انتشار از خروجی به ورودی محاسبه شوند. در الگوریتم‌های یادگیری انتشار به عقب چندین مسئله وجود دارد [۳۶]:

(۱) وقتی که η مقدار بیش از حد کوچکی بگیرد، الگوریتم یادگیری آهسته‌تر هم‌گرا[2] می‌شود. در حالی که وقتی که η مقدار بیش از حد بزرگی بگیرد، الگوریتم ناپایدار و واگرا[3] می‌شود.

(۲) یکی دیگر از ویژگی‌های سطح خطا که بر عملکرد الگوریتم یادگیری انتشار به عقب تاثیر می‌گذارد، نقاط بهینه‌ی محلی هستند. ترجیحا نباید الگوریتم یادگیری در یک بهینه‌ی محلی متوقف شود، به‌خصوص اگر مقدار آن بسیار بالاتر از حداقل بهینه واقع شده باشد.

(۳) شبکه‌ی عصبی ممکن است با استفاده از الگوریتم انتشار به عقب، بیش از حد آموزش داده شود و منجر به افت عملکرد شود. بنابراین اعتبارسنجی و روش‌های توقف مناسب، در روش‌های کمینه‌سازی تابع هزینه مورد نیاز است.

(۴) یادگیری مبتنی بر گرادیان در اکثر کاربردها بسیار وقت‌گیر است.

در این مقاله به جای استفاده از الگوریتم آموزش مبتنی بر گرادیان یا الگوریتم انتشار به عقب از برنامه‌ریزی ژنتیک به منظور آموزش استفاده می‌شود.

[1] Training rates
[2] Convergent
[3] Divergent

برنامه‌ریزی ژنتیک که برای اولین بار توسط کوزا ارائه شد و جزء روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود. مبنای تمامی این روش‌ها بر اساس نظریه تکاملی داروین[4] است. این الگوریتم‌ها اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع هدف را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل کرده و در یک فرایند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار گرفته می‌شود. در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می‌نمایند. برنامه‌ریزی ژنتیک از روش‌های جدید بین روش های الگوریتم گردشی می باشد، که به دلیل دارا بودن دقت کافی، به عنوان یک روش کاربردی مطرح می‌شود [۳۸].

برنامه‌ریزی ژنتیک را می‌توان نسخه تکمیل‌یافته الگوریتم ژنتیک دانست با این تفاوت که در برنامه‌ریزی ژنتیک در هر ژن علاوه بر اعداد (مقادیر متغیرهای تصمیم)، می‌توان عملگرهای ریاضی نظیر عملگر جمع، تفریق، تقسیم و ضرب، توابع مختلف نظیر توابع لگاریتمی و مثلثاتی و همچنین نام متغیرهای ورودی را نیز در نظر گرفت. همچنین در برنامه‌ریزی ژنتیک به‌جای ساختار مرسوم کروموزم در الگوریتم ژنتیک با ساختاری درختی از کروموزوم‌ها مواجه هستیم، که برخلاف کروموزم در الگوریتم ژنتیک، طول درخت در برنامه‌ریزی ژنتیک متغیر می‌باشند. با توجه به این توضیحات، می‌توان استنباط نمود برنامه‌ریزی ژنتیک به مراتب از پیچیدگی بیشتری نسبت به رقبای خود نظیر شبکه‌های عصبی و ماشین‌های بردار پشتیبان برخوردار است. به همین دلیل تحقیقات کمتری در ارتباط با توسعه‌ی این ابزار صورت گرفته است [۳۸].

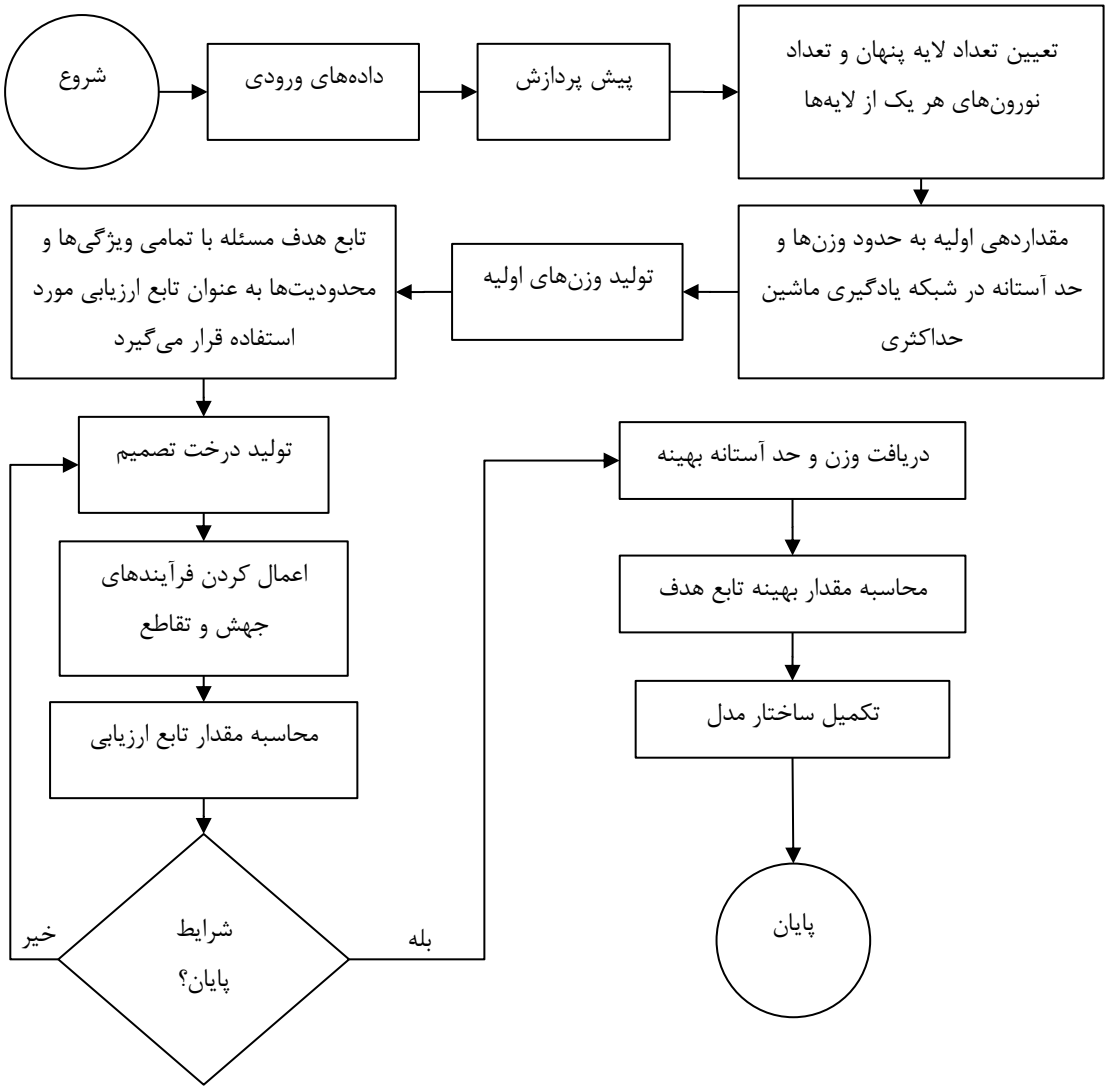
روند اجرای شبکه ترکیبی پیشنهادی مشابه روند اجرای شبکه عصبی سنتی می‌باشد، با این تفاوت که به جای استفاده از الگوریتم مبتنی بر گرادیان در قسمت آموزش وزن‌های شبکه از برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده می‌شود. در این شبکه برنامه‌ریزی ژنتیک که از جمله الگوریتم‌های تکرار شونده است، چندین بار تکرار شده تا یکی از شرط‌های اتمام این الگوریتم ارضاء شود. این در حالی است که یادگیری ماشین حداکثری فقط یکبار با استفاده از وزن‌های خروجی برنامه‌ریزی ژنتیک اجرا می‌شود.

قدم‌ها و فرآیند تصمیم‌گیری در شبکه ترکیبی پیشنهادی در شکل (۱) قابل مشاهده است.

[4] Charles Darwin

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۱). مراحل اجرای شبکه ترکیبی پیشنهادی

از آنجاکه که تعیین درست مقدار پارامترها در عملکرد الگوریتم تاثیرگذار است و بررسی کلیه حالات منطقی نیست؛ از طراحی آزمایش‌ها و روش تاگوچی استفاده می‌کنیم.

یکی از اولین روش‌هایی که در این زمینه طراحی آزمایش‌ها ارائه شد، روش فاکتوریل بود. اشکال عمده این روش تعداد آزمایش‌های خیلی زیاد در صورت وجود متغیرهای زیاد است؛ این حالت از نظر زمان و هزینه به صرفه نیست [۳۹]. یکی از این اصلاحات ایجاد شده در طراحی آزمایش‌ها روش تاگوچی بود، که در ادامه بررسی می‌شود. این روش که یک راهبرد جهت بهبود کیفیت فرآیند و رسیدن به محصول تقویت شده با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها است که اولین بار توسط مهندس ژاپنی به نام جنیچی تاگوچی[1] در سال ۱۹۸۶ معرفی گردید. این روش از طراحی کسری از فاکتورها بر اساس حداقل منابع، زمان و تعداد آزمایش ممکن سازماندهی می‌شود [۳۹].

تاگوچی یک خانواده از طرح‌های عاملی کسری را توسعه داد، که در کاربردهای مختلف بکار گرفته می‌شود. مراحل اجرای روش طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی با در نظر گرفتن جزئیات و به ترتیب اهمیت به این قرار است [۳۹]:

- معرفی عوامل مؤثر در واکنش
- تعداد آزمایش‌های مورد نیاز
- تحلیل جواب‌ها
- ارزیابی شرایط بهینه

انتخاب طرح آزمایش شامل در نظر گرفتن حجم نمونه و انتخاب ترتیب مناسب اجرا برای انجام آزمایش است. آرایه‌های متعامد، شیوه‌ای ساده برای جمع‌بندی و مطالعه یک آزمایش است. بوسیله این روش ترتیب مناسب اجرا برای انجام آزمایش مشخص

[1] Genichi Taguchi

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

می‌شود. طراحی یک آزمایش شامل انتخاب مناسب‌ترین آرایه‌ی متعامد، تعیین فاکتورها با ستون مناسب و نهایتا موقعیت آزمایش‌ها می‌باشد. برای تعیین آرایه متعامد مناسب، رویه‌ی زیر را دنبال می‌کنیم:

۱) تعریف تعداد عوامل و سطوح آن‌ها

۲) تعیین درجات آزادی

۳) انتخاب یک آرایه‌ی متعامد

۴) شمارش همه‌ی تعامل‌ها

تعداد درجات آزادی حداقل تعداد حالات رفتاری را تعیین می‌کند. این عدد برابر جمع اعداد زیر است:

(۱-تعداد سطوح) = برای هر عامل

(۱-تعداد سطوح)*(۱-تعداد سطوح) = برای هر تعامل

مرحله‌ی نخست برای گزینش یک آرایه متعامد، شمارش تعداد کل درجه‌های آزادی که حداقل تعداد آزمایشات لازم را نشان می‌دهد. طبق نظر تاگوچی آرایه‌هایی برای انتخاب مناسب است که تعداد سطرهای آن حداقل برابر یا بزرگتر از درجه‌های آزادی لازم باشد. در این حالت تعداد ستون‌های آرایه مشخص‌کننده حداکثر تعداد فاکتوری است که به وسیله آن آرایه مطالعه می‌شود.

پس از معین کردن تعداد آزمایش‌ها یک ماتریس تشکیل می‌دهیم، که سطرهای این ماتریس مشخص‌کننده شرایط آزمایش می‌باشد. برای ایجاد این ماتریس‌ها راه‌های پیچیده‌ای وجود دارد، ولی می‌توان از نرم‌افزارهای آماری مختلف مثل مینی تب[1] یا دیزاین اکسپرت[2] استفاده کرد. برای تحلیل آزمایش دو روش وجود دارد [۴۰] که در این مقاله از هر دو روش استفاده شده است:

- روش استاندارد تحلیل واریانس[3]
- استفاده از نسبت سیگنال به نویز[4]

بنابراین شبکه ترکیبی پیشنهادی شامل دو قسمت، یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشد. یادگیری ماشین حداکثری دارای چهار پارامتر شامل تعداد لایه پنهان، تعداد نورون هر لایه پنهان، تابع انتقال بین لایه ورودی و لایه پنهان و تابع انتقال بین لایه پنهان و لایه خروجی می‌باشد که باید تنظیم شوند. همچنین برنامه‌ریزی ژنتیک دارای یک پارامتر حداکثر طول درخت تصمیم می‌باشد که باید تنظیم شود. بنابراین، پنج پارامتر شبکه ترکیبی پیشنهادی می‌بایست به بهترین شکل تنظیم و تعیین شوند. برای هر یک از پارامترهایی که در بالا ذکر شده‌اند، سه سطح مختلف از بین سایر حالت ها انتخاب می‌شود. سطوح مختلف هر یک از پارامترها در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷). سطوح انتخاب شده پارامترهای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

تابع انتقال بین لایه پنهان و خروجی	حداکثر طول درخت تصمیم	تعداد نورون‌های هر لایه پنهان	تعداد لایه‌های پنهان	تابع انتقال بین لایه ورودی و پنهان
Tansig	۹	۵۰	۲۰	Tansig
Purelin	۱۲	۱۰۰	۳۰	Purelin
Logsig	۱۵	۱۵۰	۴۰	Logsig

۵- تولید مسئله

طبق مرور ادبیات، پارامترهای مشترک مسائل مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان با درنظر گرفتن آلودگی عبارت‌اند از: تعداد مشتریان، تعداد وسایل نقلیه، ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه، مقدار تقاضای مشتریان، مختصات مشتریان، حداقل و حداکثر سرعت هر مسیر، طول زمانی بازه‌ی شلوغی و سرعت جریان رفت‌وآمد هر مسیر. همچنین پارامترهای اضافه شده به مسئله‌ی پیشنهادی عبارت‌اند از:

پنجره‌ی زمانی مربوط به هر مشتری، نوع آسفالت هر مسیر، دمای هوای هر مسیر، سرعت و جهت باد در هر مسیر.

در این قسمت از مجموعه داده‌های دانشگاه ساوتهمپتن[5] در زمینه‌ی آلودگی‌های ناشی از حمل‌ونقل استفاده می‌کنیم [۴۰]. در واقع برای انتخاب هر نمونه با هر تعداد مشتری به صورت تصادفی از مجموعه داده‌های ارائه شده توسط آن‌ها استفاده می‌کنیم. همچنین حداکثر تعداد وسایل نقلیه در دسترس برابر با تعداد مشتریان می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده و استفاده از روش تاگوچی، به منظور تعیین بهترین ترکیب ۲۷ آزمایش پیشنهاد شد. نتایج آزمایش‌های پیشنهادی روش تاگوچی به‌منظور تعیین بهترین ترکیب پارامترهای شبکه ترکیبی پیشنهادی در جدول (۸) ارائه شده است.

[1] Minitab
[2] Design expert
[3] Analysis of variance (ANOVA)
[4] S/N ratio
[5] Southampton University

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۸). مقادیر ورودی به منظور تنظیم پارامتر در روش تاگوچی

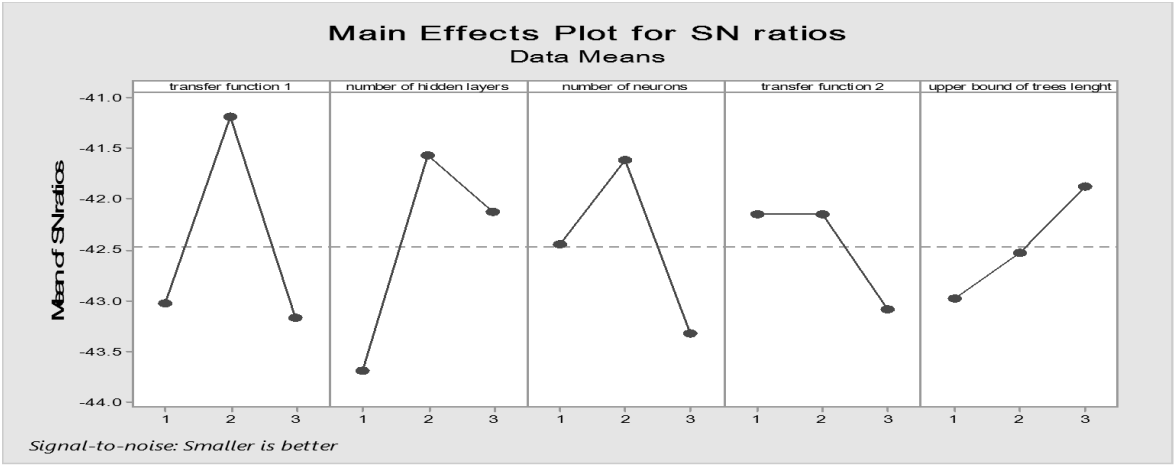
MSE	حداکثر طول درخت تصمیم	تعداد نورون لایه های پنهان	تعداد لایه پنهان	تابع انتقال	
				ورودی به میانی	میانی به خروجی
۱۶۳	۹	۵۰	۲۰	Tansig	Tansig
۱۵۸	۱۲	۵۰	۲۰	Tansig	Purelin
۱۵۱	۱۵	۵۰	۲۰	Tansig	Logsig
۱۲۱	۹	۱۰۰	۳۰	Tansig	Tansig
۱۱۸	۱۲	۱۰۰	۳۰	Tansig	Purelin
۹۸	۱۵	۱۰۰	۳۰	Tansig	Logsig
۱۷۱	۹	۱۵۰	۴۰	Tansig	Tansig
۱۶۸	۱۲	۱۵۰	۴۰	Tansig	Purelin
۱۴۸	۱۵	۱۵۰	۴۰	Tansig	Logsig
۱۳۴	۹	۵۰	۲۰	Purelin	Tansig
۱۲۹	۱۲	۵۰	۲۰	Purelin	Purelin
۱۲۴	۱۵	۵۰	۲۰	Purelin	Logsig
۱۱۹	۹	۱۰۰	۳۰	Purelin	Tansig
۱۱۱	۱۲	۱۰۰	۳۰	Purelin	Purelin
۱۰۱	۱۵	۱۰۰	۳۰	Purelin	Logsig
۱۱۹	۹	۱۵۰	۴۰	Purelin	Tansig
۱۰۲	۱۲	۱۵۰	۴۰	Purelin	Purelin
۹۹	۱۵	۱۵۰	۴۰	Purelin	Logsig
۱۸۱	۹	۵۰	۲۰	Logsig	Tansig
۱۷۸	۱۲	۵۰	۲۰	Logsig	Purelin
۱۷۲	۱۵	۵۰	۲۰	Logsig	Logsig
۱۴۱	۹	۱۰۰	۳۰	Logsig	Tansig
۱۳۹	۱۲	۱۰۰	۳۰	Logsig	Purelin
۱۳۸	۱۵	۱۰۰	۳۰	Logsig	Logsig
۱۳۵	۹	۱۵۰	۴۰	Logsig	Tansig
۱۲۱	۱۲	۱۵۰	۴۰	Logsig	Purelin
۱۰۹	۱۵	۱۵۰	۴۰	Logsig	Logsig

نتایج روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی برای نسبت سیگنال به نویز در شکل (۲) و همچنین نتایج حاصل برای میانگین مربعات خطا در شکل (۳) ارائه شده است.

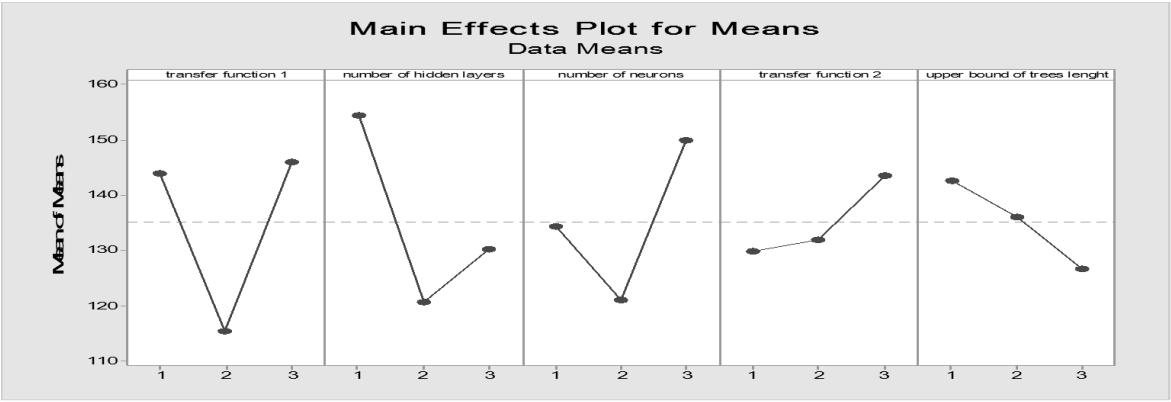
مقدار مطلوب برای پارامتر اول، کمترین مقدار می‌باشد، همچنین مقدار مطلوب برای پارامتر دوم نیز کمترین مقدار است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۲). مقدار پارامتر نرخ سیگنال به نویز خروجی روش تاگوچی



شکل (۳). مقدار پارامتر میانگین مربعات خطا خروجی روش تاگوچی

با توجه به مقادیر نسبت سیگنال به نویز به دست آمده برای سطوح مختلف پارامترها که در شکل (۲) ارائه شده‌اند، می‌توان بهترین ترکیب سطوح مختلف پارامترهای شبکه ترکیبی پیشنهادی را انتخاب کرد. این ترکیب شامل استفاده از تابع Purelin در بین لایه ورودی و لایه پنهان و همچنین تابع Tansig بین لایه پنهان و لایه خروجی می‌باشد، همچنین دارای ۳۰ لایه پنهان با ۱۵۰ نورون می‌باشد، و در نهایت حداکثر طول درخت تصمیم را برابر ۱۵ قرار می‌دهیم. این تعداد لایه در نگاه اول زیاد به نظر می‌رسد، ولی با توجه به تحقیقات صورت گرفته در گذشته و چارچوب کلی یادگیری ماشین حداکثری منطقی و قابل قبول است [۴۱، ۴۲].

۶- نتایج محاسباتی

مدل طراحی‌شده و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از رایانه‌ای با ۴ گیگابایت حافظه‌ی داخلی[1]، CPU چهار هسته‌ای ۲/۷ گیگاهرتز و Windows7 در نرم‌افزار MATLAB 2015(b) اجرا شدند. در نمایش خروجی برنامه‌ها، مقدار حداقل خطا در حالت پایدار و زمان حل مسئله در مسائل ابعاد کوچک و متوسط مشخص شد. همچنین در نمایش خروجی برنامه برای مسائل ابعاد بزرگ، مقدار هزینه کل، زمان کل و زمان حل مسئله ارائه گردید.

به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد شبکه ترکیبی پیشنهادی و با توجه به اینکه بدست آوردن حل دقیق برای مسائل مقیاس بزرگ امکانپذیر نیست، در مقایسات از شبکه پرسپترون چند لایه ارائه شده توسط رویی [۴۳] در سال ۲۰۱۰ استفاده می‌شود. شبکه پرسپترون چند لایه پیشنهادی دارای دو لایه پنهان به ترتیب با ۵۰ و ۱۰۰ نورون می‌باشد، که از تابع انتقال Tansig برای انتقال از لایه ورودی به لایه پنهان و همچنین از لایه پنهان به لایه خروجی استفاده می‌کند. به منظور بررسی اعتبار شبکه ترکیبی پیشنهاد شده، درصد خطا از جواب گمز برای شبکه ترکیبی پیشنهادی و پرسپترون چند لایه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در جدول‌های مقایسات درصد خطا از رابطه‌ی $\left[\frac{\text{جواب حل دقیق} - \text{جواب شبکه پیشنهادی}}{\text{جواب حل دقیق}}\right] * 100$ بدست آمده است.

در جدول (۹) نتایج به دست آمده برای مقیاس کوچک ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر، برای هر دسته مسئله پنج نمونه موردبررسی قرار گرفته است.

[1] RAM

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۹). نتایج به دست آمده برای مقیاس کوچک

درصد خطای شبکه ترکیبی	درصد خطای پرسپترون چند لایه	جواب گمز	تعداد مشتریان
۱/۳۵	۶/۲۰	۱۳۱/۴۸۲۶	۳
۱/۰۲	۶/۳۱	۱۵۷/۳۲۰۹	۳
۰/۹۷	۵/۳۵	۱۴۶/۶۸۸۰	۳
۱/۱۲	۶/۱۱	۱۷۱/۵۳۱۹	۳
۰/۹۸	۶/۲۲	۱۳۹/۷۸۶۰	۳
۱/۸۳	۶/۲۹	۱۸۹/۳۷۱۰	۵
۱/۵۹	۶/۱۳	۲۵۸/۴۸۲۱	۵
۱/۳۳	۶/۴۸	۲۳۷/۶۶۱۸	۵
۱/۲۶	۶/۱۱	۲۱۳/۴۵۹۰	۵
۱/۳۴	۵/۹۹	۱۷۵/۲۱۱۴	۵
۱/۳۵	۶/۳۶	۳۰۱/۱۶۳۰	۸
۱/۰۱	۶/۰۱	۲۸۸/۵۶۷۳	۸
۱/۲۶	۶/۴۹	۳۴۱/۳۸۴۱	۸
۱/۴۳	۶/۵۲	۳۹۶/۹۹۲۵	۸
۱/۴۰	۶/۴۶	۳۷۰/۹۴۸۰	۸
۱/۳۹	۶/۸۵	۴۱۸/۶۱۶۱	۱۰
۱/۴۶	۶/۱۲	۶۰۱/۴۸۶۲	۱۰
۱/۴۹	۶/۶۳	۴۸۹/۷۰۱۲	۱۰
۱/۵۷	۶/۳۲	۵۸۳/۴۳۱۰	۱۰
۱/۴۲	۶/۹۸	۶۶۴/۲۱۰۸	۱۰
۱/۵۱	۶/۷۲	۸۱۱/۴۰۱۹	۱۳
۱/۶۶	۶/۰۲	۷۴۹/۲۴۸۰	۱۳
۱/۴۶	۶/۷۲	۶۹۹/۳۴۶۰	۱۳
۱/۵۲	۶/۹۷	۷۷۹/۶۷۵۲	۱۳
۱/۵۳	۶/۸۶	۷۲۱/۳۵۲۰	۱۳

جدول (۱۰). نتایج به دست آمده برای مقیاس متوسط

درصد خطای شبکه ترکیبی	درصد خطای پرسپترون چند لایه	جواب گمز	تعداد مشتریان
۱/۹۵	۶/۳۱	۷۹۴/۲۱۹۰	۱۵
۱/۳۵	۶/۷۱	۸۱۰/۰۵۱۸	۱۵
۱/۴۴	۶/۵۲	۸۹۴/۵۷۳۰	۱۵
۱/۶۳	۶/۹۹	۸۴۴/۲۰۱۱	۱۵
۱/۴۶	۷/۴۶	۹۸۶/۲۱۵۵	۱۵
۱/۷۲	۷/۲۱	۱۲۶۹/۲۱۷	۱۷
۱/۴۱	۷/۸۴	۱۳۹۰/۶۶۵	۱۷
۱/۹۲	۶/۶۹	۱۴۸۰/۳۰۱	۱۷

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱۰). نتایج به دست آمده برای مقیاس متوسط

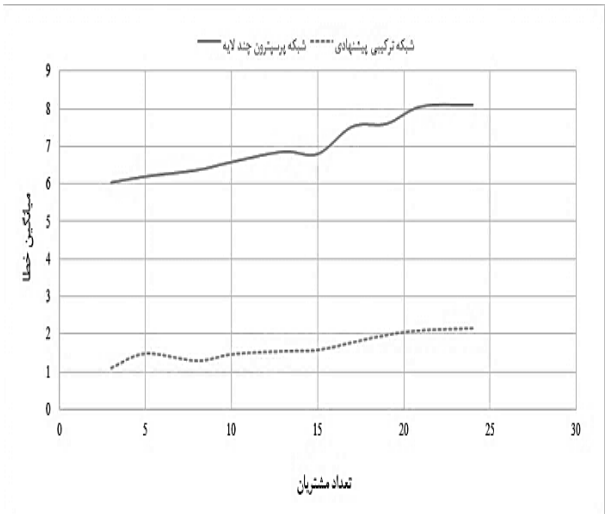
درصد خطای شبکه ترکیبی	درصد خطای پرسپترون چند لایه	جواب گمز	تعداد مشتریان
۱/۸۴	۸/۱۱	۱۲۹۴/۹۰۱	۱۷
۱/۹۴	۷/۷۱	۱۱۸۳/۳۲۴	۱۷
۱/۹۵	۷/۳۵	۱۶۸۰/۴۲۱	۱۹
۲/۰۵	۷/۸۸	۱۶۳۳/۸۸۱	۱۹
۱/۷۵	۷/۵۷	۱۷۷۳/۰۴۳	۱۹
۲/۰۶	۶/۷۵	۱۷۱۲/۴۰۳	۱۹
۲/۰۱	۸/۴۵	۱۸۲۹/۸۱۷	۱۹
۲/۰۰	۸/۷۴	۱۶۳۹/۵۱۲	۲۱
۲/۰۹	۷/۶۵	۱۹۸۴/۵۶۳	۲۱
۲/۱۴	۸/۸۱	۱۹۴۳/۴۴۳	۲۱
۲/۱۶	۸/۰۹	۲۱۶۴/۴۰۰	۲۱
۲/۰۴	۷/۰۱	۱۸۸۹/۲۱۷	۲۱
۲/۱۶	۸/۸۹	۱۹۴۱/۱۱۵	۲۴
۲/۲۱	۸/۲۰	۲۱۱۱/۵۹۱	۲۴
۲/۱۰	۷/۱۸	۱۹۷۰/۵۲۱	۲۴
۲/۱۷	۹/۰۲	۲۳۴۴/۵۱۶	۲۴
۲/۰۵	۷/۲۴	۲۵۱۸/۵۱۰	۲۴

همانطور که در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی خروجی مسائل ابعاد متوسط را بین ۲ تا ۲/۵ درصد خطا ارائه می‌کند. در صورتی که شبکه عصبی کلاسیک خروجی‌های این دسته مسائل را بین ۷ تا ۸ درصد خطا ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای مسائل ابعاد متوسط بهبود قابل توجهی در نتایج ایجاد می‌کند.

با توجه به مقایسه‌ای که در شکل (۴) صورت گرفته است، اختلاف دو شبکه ترکیبی و پرسپترون چند لایه در درصد خطا کاملا مشهود است. علاوه بر این نرخ رشد درصد خطا در شبکه ترکیبی پیشنهادی کمتر از پرسپترون چند لایه می‌باشد.

با توجه به اینکه زمان حل دقیق مسائل توسط نرم‌افزار گمز برای مسائل ابعاد بزرگ به صورت نمایی[1] افزایش می‌یابد، استفاده از این روش برای مقیاس بزرگ غیرممکن می‌باشد. به منظور انجام مقایسات و ارزیابی عملکرد شبکه ترکیبی پیشنهادی برای مسائل مقیاس بزرگ، نتایج این شبکه با نتایج پرسپترون چند لایه مقایسه می‌شود.

در این بخش هزینه‌های مربوط به مصرف سوخت و دستمزد راننده به صورت جداگانه در دو جدول جداگانه بررسی می‌شوند. در جدول (۱۱) هزینه‌های مصرف سوخت دو شبکه ترکیبی پیشنهادی و پرسپترون چند لایه را مقایسه می‌کنیم. همچنین در جدول (۱۲) هزینه‌های مربوط به راننده دو شبکه ترکیبی پیشنهادی و پرسپترون چند لایه را مقایسه می‌کنیم. در ادامه، زمان حل این دو شبکه را نیز در جدول (۱۳) مقایسه خواهیم کرد.



شکل (۴). مقایسه نتایج مقیاس کوچک و متوسط

[1] Exponential (exp)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱۱). نتایج هزینه سوخت برای مقیاس بزرگ

حد بالای گمز	درصد کاهش هزینه شبکه ترکیبی نسبت به پرسپترون چند لایه	هزینه شبکه ترکیبی	هزینه پرسپترون چند لایه	مشخصات مسئله
۱۷۸۲/۹۸	۷/۰۸	۱۴۷۲/۳۱۸۰	۱۵۸۴/۵۲۳۶	۳۰
۱۸۳۹/۳۱	۰/۴۷	۱۶۳۷/۹۷۷۲	۱۶۴۵/۷۹۳۸	۳۰
۲۰۸۱/۸۲	۳/۰۴	۱۹۰۳/۵۵۳۲	۱۹۶۳/۱۳۵۰	۳۰
۱۹۷۲/۸۳	۶/۶۵	۱۷۴۲/۰۴۳۰	۱۸۶۶/۰۴۴۴	۳۰
۱۷۲۵/۹۳	۱۳/۲۳	۱۴۶۵/۴۲۵۹	۱۶۸۸/۷۵۱۰	۳۰
۶۸۰۳/۸۸	۰/۹۰	۶۴۶۵/۴۷۸۹	۶۵۲۴/۰۲۷۳	۵۰
۵۴۹۲/۱۲	۲۲/۶۰	۴۴۰۹/۹۱۷۳	۵۶۹۷/۵۴۶۹	۵۰
۶۹۲۱/۹۲	۱/۴۴	۶۶۰۴/۱۲۵۴	۶۷۰۰/۸۲۷۲	۵۰
۱۲۱۰۳/۳۶	۹/۱۹	۱۰۳۸۸/۳۳۸	۱۱۴۴۰/۳۸۷	۵۰
۷۹۳۸/۹۳	۲/۰۳	۷۶۳۹/۶۲۷۲	۷۷۹۸/۲۴۸۵	۵۰
۱۵۹۳۶/۵۳	۱۹/۸۱	۱۲۵۵۵/۶۳۴	۱۵۶۵۶/۴۳۷	۱۰۰
۱۰۲۳۷/۳۸	۹/۸۱	۸۹۳۲/۱۷۸۲	۹۹۰۴/۵۱۲۵	۱۰۰
۱۷۲۶۳/۷۳	۰/۱۷	۱۶۵۸۰/۰۰۳	۱۶۶۰۸/۸۲۹	۱۰۰
۱۳۸۳۶/۱۸	۱۴/۹۰	۲۰۰۶۷/۷۳۲	۲۳۵۸۰/۶۴۴	۱۰۰
۱۹۸۲۶/۰۲	۸/۳۲	۱۷۳۴۱/۸۳۹	۱۸۹۱۵/۵۶۰	۱۰۰
۲۶۷۳۸/۱۳	۵/۶۸	۲۲۲۰۳/۲۶۰	۲۳۵۴۰/۲۹۴	۱۵۰
۲۸۹۴۶/۷۴	۷/۴۶	۲۲۳۷۰/۰۴۹	۲۴۱۷۳/۵۴۰	۱۵۰
۲۲۸۳۵/۶۴	۳/۴۶	۱۸۸۰۹/۳۹۶	۱۹۴۸۳/۰۶۴	۱۵۰
۳۶۱۹۲/۸۳	۱/۸۰	۳۴۲۷۲/۴۸۵	۳۴۹۰۰/۸۵۷	۱۵۰
۳۳۷۲۸/۷۷	۷/۲۸	۲۹۹۷۱/۲۹۹	۳۲۳۲۴/۳۱۰	۱۵۰
۳۷۱۹۳/۶۶	۸/۲۰	۳۳۹۸۷/۶۴۸	۳۷۰۲۱/۷۷۰	۲۰۰
۴۰۱۶۲/۴۳	۲/۰۷	۳۸۷۵۸/۶۳۱	۳۹۵۷۵/۸۷۶	۲۰۰
۳۹۸۱۶/۷۶	۰/۳۰	۳۷۴۰۵/۶۹۴	۳۷۵۱۷/۶۸۰	۲۰۰
۳۸۷۳۶/۸۳	۱/۲۱	۳۶۰۵۶/۰۴۳	۳۶۴۹۶/۲۱۳	۲۰۰
۴۲۵۱۶/۴۷	۰/۲۶	۴۱۱۹۱/۶۶۰	۴۱۲۹۷/۱۷۲	۲۰۰

جدول (۱۲). نتایج هزینه راننده برای مقیاس بزرگ

حد بالای گمز	درصد کاهش هزینه شبکه ترکیبی نسبت به پرسپترون چند لایه	هزینه شبکه ترکیبی	هزینه پرسپترون چند لایه	مشخصات مسئله
۲۱۳۴/۸۶	۱۰/۷۳	۱۷۳۰/۷۱۸۰	۱۹۳۸/۷۷۶۴	۳۰
۲۵۳۶/۹۸	۶/۶۰	۲۱۲۳/۶۶۸۸	۲۲۷۳/۸۱۶۱	۳۰
۲۳۰۱/۸۱	۶/۰۸	۲۲۴۳/۱۸۴۷	۲۳۸۸/۳۷۸۹	۳۰
۲۲۵۴/۹۳	۲/۵۵	۱۹۰۹/۴۱۶	۱۸۵۶/۶۸۵۶	۳۰
۱۹۳۸/۶۴	۸/۶۸	۱۵۷۷/۴۵۸۰	۱۷۲۷/۳۵۲۰	۳۰
۵۴۷۳/۸۳	۱۲/۲۳	۴۹۰۳/۷۰۱۲	۵۵۸۶/۸۴۷۲	۵۰
۵۸۹۰/۱۱	۱۵/۲۵	۴۶۴۲/۶۲۷۱	۵۴۷۸/۳۰۳۶	۵۰
۶۷۳۸/۳۲	۵/۵۶	۶۲۱۵/۷۱۱۰	۶۵۸۱/۸۵۲۶	۵۰

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱۲). نتایج هزینه راننده برای مقیاس بزرگ

حد بالای گمز	درصد کاهش هزینه شبکه ترکیبی نسبت به پرسپترون چند لایه	هزینه شبکه ترکیبی	هزینه پرسپترون چند لایه	مشخصات مسئله
۵۳۶۲/۳۸	۷/۷۷	۴۷۲۷/۵۸۲۶	۵۱۲۵/۹۱۹۰	۵۰
۷۱۸۲/۰۳	۲/۰۷	۷۰۷۴/۴۸۴۵	۷۲۲۴/۲۵۱۷	۵۰
۱۴۷۳۲/۹۲	۱۰/۷۷	۱۲۲۹۰/۵۷۲	۱۳۷۷۴/۳۰۵	۱۰۰
۱۳۲۴۵/۵۵	۱۳/۹۵	۱۰۳۷۸/۶۸۴	۱۲۰۶۱/۴۶۱	۱۰۰
۱۸۳۷۲/۸۳	۳/۶۷	۱۵۰۰۷/۹۸۸	۱۵۵۷۹/۶۸۵	۱۰۰
۱۴۲۵۲/۷۱	۹/۰۲	۱۲۵۲۴/۷۱۱	۱۳۷۶۶/۶۸۰	۱۰۰
۱۸۳۵۲/۰۳	۳/۹۰	۱۵۷۳۵/۶۰۶	۱۶۳۷۴/۶۹۷	۱۰۰
۲۴۸۹۳/۹۲	۱۰/۱۹	۲۱۷۵۴/۳۰۷	۲۴۲۲۲/۵۹۹	۱۵۰
۲۱۰۳۸/۵۶	۴/۵۶	۱۹۵۸۶/۹۷۰	۲۰۵۲۲/۵۴۲	۱۵۰
۲۵۱۹۳/۴۴	۹/۹۲	۲۲۵۳۹/۳۶۹	۲۵۰۲۲/۶۸۵	۱۵۰
۲۹۸۳۶/۸۴	۵/۸۱	۲۶۸۴۱/۷۵۲	۲۸۴۹۸/۰۷۰	۱۵۰
۲۲۸۳۹/۳۳	۱۰/۲۰	۲۱۰۰۲/۳۳۵	۲۳۳۸۸/۱۶۵	۱۵۰
۳۸۹۴۰/۰۱	۱۱/۹۰	۳۲۶۴۲/۷۷۸	۳۷۰۵۲/۰۱۷	۲۰۰
۳۲۸۳۹/۸۴	۴/۹۸	۲۹۹۴۷/۲۶۲	۳۱۵۱۷/۷۴۵	۲۰۰
۳۸۶۲۱/۱۹	۶/۳۴	۳۵۴۶۹/۲۶۹	۳۷۸۶۹/۵۵۹	۲۰۰
۴۲۸۷۳/۹۱	۶/۳۷	۳۹۴۶۲/۷۸۸	۴۲۱۴۹/۶۸۵	۲۰۰
۴۱۵۶۲/۲۲	۶/۱۱	۳۸۱۰۵/۹۷۹	۴۰۵۸۳/۷۵۹	۲۰۰

جدول (۱۳). مقایسه میانگین زمان حل

پرسپترون چند لایه (ثانیه)	شبکه ترکیبی (ثانیه)	گمز (ثانیه)	مشخصات مسئله
۱۹۵/۶	۳	۲۱	۳
۲۸۷	۳/۶	۸۳	۵
۴۰۹	۴/۲	۷۹۰	۸
۴۶۲/۸	۵/۲	۱۶۰۸	۱۰
۴۹۹/۸	۵/۴	۳۵۱۲	۱۳
۵۱۴/۲	۵/۶	۴۹۸۱	۱۵
۵۲۰/۸	۶/۸	۶۱۹۲	۱۷
۵۵۷	۷	۸۴۱۸	۱۹
۶۱۰/۶	۷/۲	۱۱۲۰۷	۲۱
۶۵۰	۷/۴	۱۴۴۸۶	۲۴
۷۹۵	۹	-	۳۰
۱۰۶۹	۱۰	-	۵۰
۱۳۷۸	۱۶/۸	-	۱۰۰
۳۹۱۵	۴۵/۹	-	۵۰۰
۵۱۸۴	۵۸	-	۱۰۰۰
۲۱۰۷۱	۷۳	-	۵۰۰۰
-	۹۲/۱	-	۱۵۰۰۰
-	۱۲۷/۹	-	۲۰۰۰۰

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۷- تحلیل حساسیت

در این قسمت به تجزیه‌وتحلیل تغییرات ایجاد شده در مدل و پارامترهای اضافه‌شده به مدل می‌پردازیم. به منظور بررسی تاثیر بکارگیری پارامترهای جدید مدل، مقدار هزینه‌ی کل و تغییرات مسیر بهینه تحلیل خواهند شد. در این قسمت نتایج مربوط به ۱۰۰ نمونه‌ی متفاوت بررسی می‌شوند. دو پارامتری که به منظور تحلیل اثر پارامترهای اضافه شده به مدل مورد بحث قرار می‌گیرند، درصد تغییرات هزینه کل (f) و احتمال تغییر مسیر بهینه (p) می‌باشند. به منظور محاسبه‌ی پارامتر درصد تغییرات هزینه کل، ابتدا تفاضل مقدار هزینه کل در مدل جدید با پارامترهای اضافه شده (f_n) و مقدار هزینه کل مدل جدید بدون پارامترهای اضافه شده (f_m) را محاسبه کرده و سپس تقسیم بر مقدار (f_m) می‌کنیم (رابطه ۵۳). همچنین مفهوم پارامتر احتمال تغییر مسیر بهینه، تعداد نمونه‌هایی که با اضافه شدن پارامترهای جدید به مدل موجب تغییر مسیر بهینه شدند (n_n)، تقسیم بر کل تعداد نمونه‌های (n_m) بررسی‌شده می‌باشد (رابطه ۵۴).

$$f = {(f_n - f_m)}/{f_m} \quad (۵۳) \qquad \text{و} \qquad p = {n_n}/{n_m} \quad (۵۴)$$

در ادامه به منظور تحلیل و بررسی دقیق‌تر، این نتایج به صورت خلاصه و طبقه‌بندی شده ارائه شده است. همچنین نتایج طبقه‌بندی شده‌ی حاصل از نمونه‌های بررسی شده به منظور تحلیل اثر پارامترهای اضافه شده به مدل در جدول (۱۴) ارائه شده است. این تحلیل‌ها بر اساس دو پارامتر درصد تغییر هزینه‌ها و احتمال تغییر مسیر بهینه انجام می‌گیرد.

جدول (۱۴). تحلیل حساسیت اثر پارامترهای جدید بر تغییر مسیر بهینه

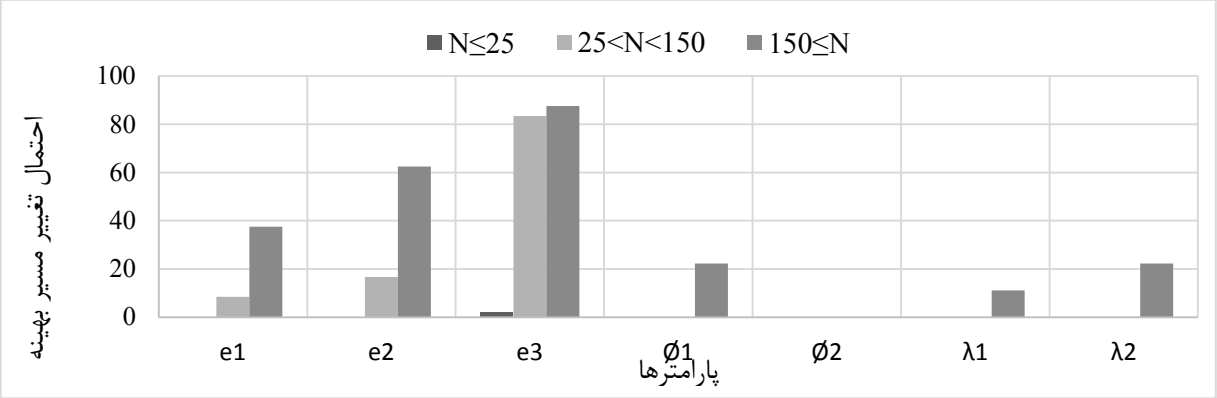
پارامتر	مقدار پارامتر	احتمال تغییر مسیر بهینه (کوچکتر یا مساوی ۲۵)	احتمال تغییر مسیر بهینه (بین ۲۵ و ۱۵۰)	احتمال تغییر مسیر بهینه (بزرگتر یا مساوی ۱۵۰)
e	۰/۹۷ یا ۱/۰۵	۰	۸/۴	۳۷/۵
	۰/۹۱ یا ۱/۱۲	۰	۱۶/۷	۶۲/۵
	۰/۸۸ یا ۱/۱۵	۲	۸۳/۴	۸۷/۵
Ø	۱/۲۳۶۶	۰	۰	۲۲/۲
	۱/۰۶۲۴	۰	۰	۰
λ	۰/۷۱	۰	۰	۱۱/۱
	۰/۲۹	۰	۰	۲۲/۲

طبق نتایج جدول (۱۴)، پارامترهای دما (Ø) و نوع آسفالت (λ) تاثیر بسیار کمی بر تغییر مسیر بهینه دارند اما پارامتر باد (e) تاثیر قابل‌توجهی بر مسیر بهینه دارد. همچنین با افزایش تعداد مشتریان و رشد مقیاس مسئله این تاثیر بیشتر نیز خواهد شد.

در حالتی که سرعت باد بیشتر از ۱۰ متر بر ثانیه باشد، در حدود ۸۰٪ مواقع موجب تغییر مسیر بهینه می‌شود. پارامتر دما نیز در حالت گرم در ۲۰٪ مواقع مسیر بهینه را تغییر می‌دهد. همچنین نوع آسفالت نیز در حالت نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب در ۱۰٪ و ۲۰٪ مواقع موجب تغییر مسیر بهینه می‌شود.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



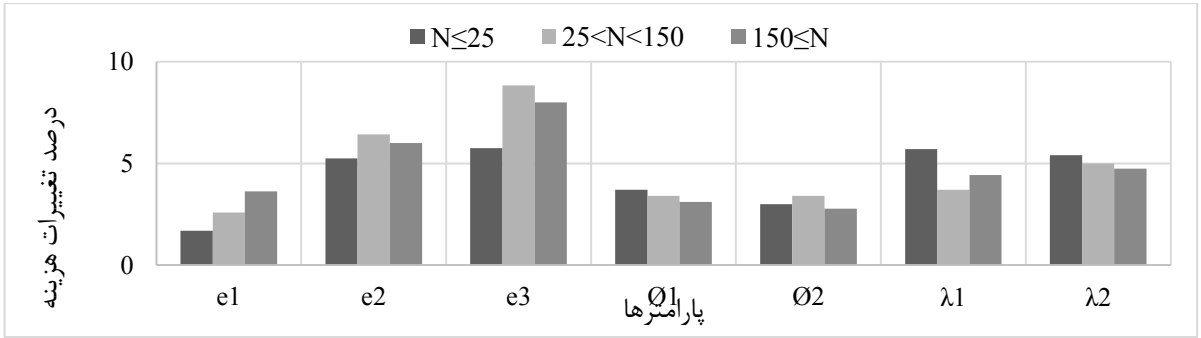
شکل (۵). تحلیل حساسیت اثر پارامترهای جدید بر تغییر مسیر بهینه

بنابراین نتایج به دست آمده نشان از تاثیر بسزای پارامترهای اضافه شده به مدل در فرآیند تصمیم‌گیری دارد. در ادامه نتایج بررسی اثر پارامترهای اضافه شده به مدل بر تغییرات هزینه‌ها در جدول (۱۵) آمده است.

جدول (۱۵). تحلیل حساسیت اثر پارامترهای جدید بر تغییرات هزینه‌ها

پارامتر	مقدار پارامتر	درصد تغییرات هزینه (کوچکتر یا مساوی ۲۵)	درصد تغییرات هزینه (بین ۲۵ و ۱۵۰)	درصد تغییرات هزینه (بزرگتر یا مساوی ۱۵۰)
e	۰/۹۷ یا ۱/۰۵	۱/۶۹	۲/۵۸	۳/۶۳
	۰/۹۱ یا ۱/۱۲	۵/۲۵	۶/۴۲	۶/۰۰
	۰/۸۸ یا ۱/۱۵	۵/۷۵	۸/۸۳	۸/۰۰
Ø	۱/۲۳۶۶	۳/۷۰	۳/۴۰	۳/۱۱
	۱/۰۶۲۴	۳/۰۰	۳/۴۰	۲/۷۸
λ	۰/۷۱	۵/۷۰	۳/۷۰	۴/۴۲
	۰/۲۹	۵/۴۰	۵/۰۰	۴/۷۵

با توجه به جدول (۱۵) و شکل (۶) در هر یک از بازه‌های سرعت باد (e) با افزایش تعداد مشتریان یا افزایش مقیاس مسئله، هزینه‌ها نیز به نسبت افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش هم‌زمان مقیاس مسئله و سرعت باد مقدار افزایش در هزینه‌ها افزایش پیدا می‌کنند. در واقع پارامتر باد به طور میانگین در حدود ۵٪ هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. پارامتر دما (Ø) نیز بر افزایش هزینه‌ها تاثیرگذار است، به طوری که در حالت گرم به طور میانگین به میزان ۴/۵٪ موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود. افزایش در هزینه‌ها در اثر پارامتر دما، با افزایش مقیاس مسئله کاهش پیدا می‌کند. همچنین پارامتر نوع آسفالت (λ) نیز بر افزایش هزینه‌ها تاثیر دارد که این تاثیر نسبت به پارامتر دما بیشتر می‌باشد. پارامتر نوع آسفالت به طور میانگین در حدود ۵٪ هزینه‌ها را افزایش می‌دهد، که با توجه به نوع آسفالت و مقیاس مسئله تغییر می‌کند.



شکل (۶). تحلیل حساسیت اثر پارامترهای جدید بر تغییرات هزینه‌ها

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان تاثیر بسزای پارامترهای اضافه شده بر شناسایی دقیق‌تر هزینه‌ها را شناسایی کرد و برنامه‌ریزی بهتری برای ارائه‌ی مسیر بهینه و کاهش هزینه‌ها ارائه کرد.

۸- نتیجه‌گیری

فرآیند توزیع در صنعت پیوسته در حال گسترس است و نیاز به حمل‌ونقل مناسب و مسیریابی بهینه از مباحث مهم در این زمینه است. بنابراین شناسایی راه‌حل‌های موثر در این‌گونه مسائل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرف دیگر یکی از مشکلاتی که در حال حاضر انسان‌ها با آن مواجه هستند، مسئله‌ی آلودگی هوا است. حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین عوامل تولید آلودگی است. بنابراین می‌بایست به نحوی موثر و کارآمد توازنی بین نیاز به استفاده از حمل‌ونقل و تولید آلودگی برقرار کرد. تولید یا انتشار آلودگی به طور مستقیم با میزان مصرف سوخت ارتباط دارد. مصرف سوخت وسیله‌ی نقلیه علاوه بر پارامترهای بهره‌وری موتور وسیله‌ی نقلیه به پارامترهای محیطی نظیر شیب مسیر، سرعت و جهت باد، دما و نوع آسفالت بستگی دارد.

یکی دیگر از مسائلی که در مسیریابی وسایل نقلیه با آن روبرو هستیم وابسته بودن زمان سفر به زمان شروع سفر می‌باشد، که به مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان معروف است. پرداختن به این مسئله با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی می‌تواند نقش موثری در کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد. بنابراین با توجه به نقشی که رفت‌وآمد شهری بر زمان سفر و تولید آلودگی وسایل نقلیه دارد و عوامل مختلف تاثیرگذار بر تولید آلودگی همچون بار و سرعت وسیله‌ی نقلیه، شیب جاده، پارامترهای بهره‌وری سوخت و موتور خودرو، سرعت و جهت باد، دما و نوع آسفالت ، مدلی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های مصرف سوخت و دستمزد راننده پیشنهاد داده شده است. در این مدل تقاضای مشتریان به دو صورت تقاضای تحویل و تقاضای جمع‌آوری می‌باشد. همچنین تقاضای هر یک از مشتریان احتمالی می‌باشد. زمان سرویس‌دهی به هر یک از مشتریان نیز متغیر با حجم تقاضا می‌باشد. در نهایت، روش‌هایی برای حل مدل مذکور ارائه شده است. روش‌های حل شامل حل قطعی با نرم‌افزار گمز و همچنین حل با شبکه پرسپترون چند لایه و شبکه پیشنهادی ترکیبی است. سپس عملکرد روش توسعه داده شده مورد ارزیابی قرار گرفت. از مقایسه‌ی نتایج آزمایشات، موارد زیر آشکار شد:

(۱) جواب حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز فقط برای مسائل مقیاس کوچک و متوسط قابل دستیابی می‌باشد، زیرا زمان حل به صورت نمایی رشد پیدا می‌کند.

(۲) خطای شبکه ترکیبی پیشنهادی در تخمین جواب برای مسائل مقیاس کوچک و متوسط حداکثر در حدود ۲٪ است، که به میزان ۷٪ از خطای تخمین جواب شبکه پرسپترون چندلایه کمتر است. بنابراین شبکه ترکیبی پیشنهادی بهبود قابل توجهی در دستیابی به جواب ایجاد کرده است.

(۳) زمان حل شبکه ترکیبی پیشنهادی برای دستیابی به جواب، به طور میانگین در حدود ۵۰ ثانیه می‌باشد. این زمان در حالت مشابه برای شبکه پرسپترون چندلایه به طور میانگین در حدود ۳۲۰۰۰ ثانیه است. نتایج به دست آمده نشان از کاهش چشم‌گیر زمان حل در شبکه ترکیبی پیشنهادی نسبت به پرسپترون چندلایه دارد.

(۴) نرخ رشد خطا و زمان حل در شبکه ترکیبی پیشنهادی نسبت به پرسپترون چندلایه کمتر است. در واقع با بالا رفتن مقیاس مسئله، خطا و زمان حل در شبکه ترکیبی پیشنهادی رشد کمتری نسبت به پرسپترون چند لایه دارد. در نتیجه شبکه ترکیبی پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ عملکرد بهتری خواهد داشت.

(۵) نتایج مرتبط با مسائل مقیاس بزرگ نشان می‌دهد که به طور میانگین در حدود ۱۲٪ کاهش توسط شبکه ترکیبی پیشنهادی در هزینه‌های سوخت نسبت به پرسپترون چندلایه ایجاد شده است.

(۶) نتایج مرتبط با مسائل مقیاس بزرگ نشان می‌دهد که به طور میانگین در حدود ۱۰٪ کاهش در هزینه‌های راننده در شبکه ترکیبی پیشنهادی نسبت به پرسپترون چندلایه ایجاد شده است.

(۷) زمان حل شبکه ترکیبی پیشنهادی در مقیاس بزرگ، نهایتا در حدود ۲ دقیقه است که در مقایسه با زمان حل پرسپترون چندلایه که با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند، توجیه‌پذیر است.

(۸) در مجموع توسعه‌ی ایجاد شده در الگوریتم حل، موجب بهبود عملکرد این الگوریتم نسبت به سایر روش‌های مشابه شده است.

نتایج مرتبط با تحلیل حساسیت نیز در ادامه جمع‌بندی شده است:

- پارامتر ضریب تاثیر باد تاثیر بسیار قابل توجهی بر هزینه‌ها دارد به طوری که برای مسائل با مقیاس بزرگتر از ۱۵۰ مشتری در حدود ۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین پارامترهای دما و نوع آسفالت نیز در مسائل با مقیاس بزرگتر از ۱۵۰ مشتری به ترتیب در حدود ۳٪ و ۴/۵٪ تغییر در هزینه‌ها ایجاد می‌کنند که این نشان از اهمیت پارامترهای اضافه شده به مدل دارد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

❖ پارامترهای اضافه شده به مدل همچنین تاثیر زیادی بر انتخاب مسیر بهینه دارند، که این تاثیر در پارامترهای باد بیشتر است. به طوری که پارامترهای سرعت و جهت باد در بیش از ۸۰٪ اوقات برای مسائل با مقیاس بیش از ۱۰۰ مشتری موجب تغییر مسیر بهینه می‌شود.

قابل ذکر است که نتایج این تحقیق باتوجه به در نظرگیری فرضیات مختلف، داده‌های تصادفی تولید شده، مدل جدید ارائه شده و روش حل منحصربه‌فردی که ارائه گردید قابل مقایسه با نتایج سایر تحقیقات نیست. اما این مدل و روش حل از نظر پیچیدگی فرضیات، مطلوبیت جواب و سرعت پاسخ‌دهی در ابعاد بزرگ از سایر مقالات ارائه شده در مرور ادبیات عملکرد بهتری داشته است.

۹- پیشنهادات تحقیق

نگرانی در مورد لجستیک سبز به طور پیوسته در زمینه‌ی صنعت و جنبه‌های علمی مرتبط با آن در حال افزایش است. در بسیاری از مدل‌ها فرض‌های خاصی در نظر گرفته شده که نشان از فضای خالی بین عملکرد تئوری و موارد عملی وجود دارد. در ادامه پیشنهادهایی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد:

- چندهدفه در نظر گرفتن مدل مورد نظر با توجه به مسافت طی شده، میزان مصرف سوخت و رضایت مشتریان؛
- در نظر گرفتن زمان سرویس غیرقطعی؛
- اضافه کردن تصمیمات موجودی و تولید به مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن آلودگی؛
- مقایسه نتایج شبکه ترکیبی پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های ابتکاری مانند الگوریتم مهاجرتی خود سازمانده، الگوریتم ازدحام ذرات و سایر الگوریتم‌های فراابتکاری.

۱۰- مراجع

[1] Z. Rahimi Rise, et al. "Scenario-based analysis about COVID-19 outbreak in Iran using systematic dynamics modeling-with a focus on the transportation system". Journal of Transportation Research, vol. 17(2), pp. 33-48, 2020. https://doi.org/10.1080/17477778.2021.2015260

[2] M. M. Ershadi, and H. S. Shemirani, "A multi-objective optimization model for logistic planning in the crisis response phase". Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, vol. 12(1), pp. 30-53, 2022. https://doi.org/10.1108/JHLSCM-11-2020-0108

[3] Duan, Gang, and Kaibin Zhang, "Optimization on hybrid energy vessel routing and energy management for floating marine debris cleanup." Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol 138, pp. 103649, 2022. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103649

[4] A. Martin, et al. "Utilizing waste heat gasoline engine in the design and fabrication of a fin and tube evaporator for the Organic Rankine Cycle (ORC)". SINERGI, vlo. 27(2), pp. 171-178, 2023. https://doi.org/10.22441/sinergi.2023.2.004

[5] A. Derikvand, , et al. "Indoor Air Quality in the Most Crowded Public Places of Tehran: An Inhalation Health Risk Assessment". Atmosphere, vol. 14(7), pp. 1080, 2023. https://doi.org/10.3390/atmos14071080

[6] D. Scott, et al. "A review of the IPCC Sixth Assessment and implications for tourism development and sectoral climate action". Journal of Sustainable Tourism, vol. 32, pp. 1-18, 2023. https://doi.org/10.1080/09669582.2023.2195597

[7] Z. Zhang, et al. "Review on the impacts of cooperative automated driving on transportation and environment". Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 115, pp. 103607, 2023. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103607

[8] Y. Wu, et al. "Integrating operations research into green logistics: A review". Frontiers of Engineering Management, vol. 36, pp.1-17, 2023. https://doi.org/10.1007/s42524-023-0265-1

[9] S. Bashar, et al. "Adoption of green supply chain management in developing countries: role of consumer cooperation, eco-design, and green marketing". Environmental Science and Pollution Research, vol. 40(30), pp.92594-92610, 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28881-3

[10] A. Mohtashmi, et al. "Designing a mathematical model of green routing in multiple cross docking systems with the approach of reducing carbon dioxide gas," Journal of industrial engineering research in production systems, vol. 7(14), pp. 59-77, 2018. https://doi.org/10.22084/ier.2019.17125.1787 (in Persian)

[11] R. Eshtehadi, et al. "Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty". Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 51, pp. 351-363, 2017. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.003

[12] G. Poonthalir and R. Nadarajan, "A fuel-efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP)". Expert Systems with Applications, vol. 100, pp. 131-144, 2018. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.052

[13] D. Zhang, et al. "Joint optimization of green vehicle scheduling and routing problem with time-varying speeds". PloS one, vol. 13(2), pp. 192000, 2018. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192000

[14] M. Affi, et al. "Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem". International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 9(2), pp. 195-204, 2018. http://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.6.004

[15] Y. Niu, et al. "A hybrid tabu search algorithm for a real-world open vehicle routing problem involving fuel consumption constraints". Complexity, vol. 19(6), pp. 1-12, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/5754908

[16] H. Abad, et al. "A bi-objective model for pickup and delivery pollution-routing problem with integration and consolidation shipments in cross-docking system". Journal of Cleaner Production, vol. 193, pp. 784-801, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.046

[17] J. C. Ferreira, et al. "Multi-objective optimization for the green vehicle routing problem: A systematic literature review and future directions". Cogent Engineering, vol. 7(1), pp. 1807082, 2020. https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1807082

[18] L. He, et al. "The impacts from cold start and road grade on real-world emissions and fuel consumption of gasoline, diesel and hybrid-electric light-duty passenger vehicles". Science of The Total Environment, vol. 851, pp. 158045, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158045

[19] D. M. Utama, et al. "A novel hybrid jellyfish algorithm for minimizing fuel consumption capacitated vehicle routing problem". Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 11(3), pp. 1272-1279, 2022. https://doi.org/10.11591/eei.v11i3.3263

[20] Z. Liu, et al. "The pollution-routing problem with one general period of congestion". Journal of Modelling in Management, vol. 18(5), pp. 1529-1560, 2022. https://doi.org/10.1108/JM2-12-2021-0290

[21] Koç, Ç., et al. "The fleet size and mix pollution-routing problem". Transportation Research Part B: Methodological, vol. 70, pp. 239-254, 2014. https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.008

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Engineering, vol. 16(53), pp. 339-361, 2017. https://doi.org/22075/10/jme.5869/2017 (in Persian)
[32] E. Babaei Tirklai, et al. "Solving the vehicle routing problem considering multiple trips and time windows in urban waste management using the gray wolf optimization algorithm". Modeling in Engineering, vol. 17(57), pp. 93-110, 2018. https://doi.org/22075/10/jme.16445/2019.1633 (in Persian)
[33] A. Abdi, et al. "Examining the probabilistic multi-objective model for the sustainable closed-loop supply chain problem considering vehicle routing using new and meta-heuristic hybrid algorithms". Modeling in Engineering, vol. 17(59), pp. 67-85, 2018. https://doi.org/22075/10/jme.14151/2019.1389 (in Persian)
[34] M. Ehsani, et al. "Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport". Renewable and sustainable energy reviews, vol. 53, pp. 1638-1648, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.062
[35] T. Bektaş and G. Laporte, "The pollution-routing problem". Transportation Research Part B: Methodological, vol. 45(8), pp. 1232-1250, 2011. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004
[36] G. B. Huang, et al. "Extreme learning machine: theory and applications". Neurocomputing, vol. 70(1-3), pp. 489-501, 2006. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126
[37] X. D. Zhang, "A Matrix Algebra Approach to Artificial Intelligence". Springer Singapore, eBook ISBN 978-981-15-2770-8, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2770-8
[38] J. R. Koza, "Genetic programming as a means for programming computers by natural selection". Statistics and computing, vol. 4(2), pp. 87-112, 1994. https://doi.org/10.1007/BF00175355
[39] S. I. Tamura and M. Tateishi, "Capabilities of a four-layered feedforward neural network: four layers versus three". IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 8(2), pp. 251-255, 1997. https://doi.org/10.1109/72.557662
[40] T. R. P. Ramos, et al. "Minimizing CO2 emissions in a recyclable waste collection system with multiple depots". In EUROMA/POMS joint conference, pp. 1-5, 2012. https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.12.002
[41] K. Gurney, "An introduction to neural networks". CRC press, eBook-ISBN 9781315273570, 2018. https://doi.org/10.1201/9781315273570.
[42] X. Wang and M. Han, "Multivariate time series prediction based on multiple kernel extreme learning machine". In 2014 International joint conference on neural networks (IJCNN), pp. 198-201, 2014. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2014.6889479
[43] R. K. Roy, "Taguchi method. Society of Manufacturing Engineers", Society of Manufacturing Engineers, 2010. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1355-4_30
[22] W. Shi, et al. "A Bi-Objective Pollution Routing Optimisation Problem with Decentralised Cooperation and Split Delivery". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 24(11), pp. 12357-12371, 2023. https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3293507
[23] R. Kramer, et al. "A matheuristic approach for the pollution-routing problem". European Journal of Operational Research, vol. 243(2), pp. 523-539, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.009
[24] R. S. Kumar, et al. "Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization approach". Computers & Industrial Engineering, vol. 99, pp. 29-40, 2016. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.003
[25] A. Boru İpek, "Multi-Objective Simulation Optimization Integrated with Analytic Hierarchy Process and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution for Pollution Routing Problem". Transportation Research Record, vol. 2677(1), pp. 1658-1674, 2023. https://doi.org/10.1177/03611981221105503
[26] C. M. Chen, et al. "A Genetic Algorithm for the Waitable Time-Varying Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem". Symmetry, vol. 15(1), pp. 124, 2023. https://doi.org/10.3390/sym15010124
[27] Ma, B., et al. "Time-dependent vehicle routing problem with departure time and speed optimization for shared autonomous electric vehicle service". Applied Mathematical Modelling, vol. 113, pp. 333-357, 2023. https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.09.020
[27] Fatemi Qomi, et al. "Solving a location-routing transportation problem considering green transportation routes using a meta-heuristic algorithm". Scientific Journal of Supply Chain Management, vol. 24(75), pp. 1-12, 2023. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089198.1401.24.75.1.0 (in Persian)
[29] N. Manavizadeh, et al. "A New Mathematical Model for the Green Vehicle Routing Problem by Considering a Bi-Fuel Mixed Vehicle Fleet". Journal of Optimization in Industrial Engineering, vol. 13(2), pp. 165-183, 2020. https://doi.org/10.22094/JOIE.2020.1871922.1667
[30] M .Yousefi Khoshpat, et al. "An ant-optimized hybrid algorithm for solving the open-capacity vehicle routing problem". Modeling in Engineering, vol. 15(50), pp. 179-191, 2016. https://doi.org/22075/10/jme.2560/2017
[31] S. M. Hosseini Motlaq, et al. "Presenting a mathematical model and an innovative solution method for the two-level positioning-routing problem considering the conditions of placing and picking up in the state of uncertainty". Modeling in

Archive of SID.ir