# بهینه‌سازی چندهدفه پلاتونینگ کامیون‌ها با در نظر گرفتن پنجره زمانی و سرعت‌های مختلف

**مقاله علمی – پژوهشی**

حسین فیروزی، دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران
جواد رضائیان*، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
علیرضا رشیدی کمیجان، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران
محمدمهدی موحدی، دانشیار، گروه مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲
صفحه ۳۱۴-۲۸۹

**چکیده**

***پلاتونینگ به معنای حرکت کامیونها در یک دنباله در جاده است. در این روش یک ردیف گروهی از وسایل نقلیه با خیال راحت و با سرعت زیاد می‌توانند با هم بصورت یک ریسمان حرکت کنند که می تواند باعث صرفه جویی در مصرف سوخت، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و استفاده کارآمدتر از ظرفیت جاده شود. این به این دلیل است که کامیونی که جلوتر از کامیون(های) دیگر حرکت می‌کند، باعث کاهش نیروی کشش هوا می شود و نیروی مقاومتی کمتری به وسایل نقلیه عقب وارد می شود. از آنجایی که در یک پلاتون، فاصله بین خودروها کوتاه است و وسایل نقلیه با سرعت بالا حرکت می‌کنند، برای جلوگیری از برخورد و اطمینان از ایمنی، یک سیستم کروز کنترل تطبیقی و برنامه‌ریزی مناسب مورد نیاز است. استقرار و توسعه پلاتونینگ در سیستم‌های حمل و نقل با وسایل نقلیه سنگین سودآور و مفید است زیرا هزینه سوخت و همچنین میزان انتشار کربن توسط این وسایل نقلیه را کاهش می‌دهد. در این تحقیق به دنبال ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای مسئله پلاتونینگ کامیون با در نظر گرفتن چندین هدف هستیم. همچنین در نظر داریم که از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر آرشیو پارتو برای حل مدل استفاده نمائیم. در مقاله حاضر، ابتدا یک مدل ریاضی دو هدفه برای مسئله مورد مطالعه ارائه شده و سپس از الگوریتمهای انبوه ذرات چندهدفه، NSGA-II و رویکرد محدودیت اپسیلون برای حل مدل استفاده شد. مدل برای مسائل نمونه مختلف حل گردید و نتایج نشان داد، الگوریتم انبوه ذرات پیشنهادی در همه موارد توانایی بالاتری برای تولید جوابهای باکیفیت‌تر و پراکندگی بالاتر نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. همچنین، الگوریتم NSGA-II جواب‌هایی با یکنواختی بالاتری را در زمان کمتری نسبت به الگوریتم PSO تولید می‌کند.***

**واژه‌های کلیدی:** استراحت رانندگان، بهینه‌سازی چندهدفه، پلاتونینگ کامیون‌ها، کاهش سوخت

## ۱-مقدمه

خودروهای سنگین حدود ۵ درصد از کل انتشار کربن در جهان را منتشر می‌کنند. بنابراین، تقاضای فزاینده‌ای برای افزایش بهره‌وری سوخت آنهاها وجود دارد. علاوه بر اثرات زیست محیطی، یک سوم هزینه عملیاتی کلی خودروهای سنگین، مصرف سوخت است. بنابراین، توسعه سیستم‌هایی برای افزایش راندمان سوخت در عملیات این خودروها هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی سودمند است. پلاتونینگ کامیون یکی از این سیستم‌ها است که به دلیل مزایای امیدوارکننده و مدل تجاری آن مورد توجه قرار گرفته است (لارسون و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲). پلاتونینگ کامیون

رویکردی مفید و موثر برای افزایش کارایی حمل و نقل بار است. پیشرفت‌های پلاتونینگ کامیون‌ها به اوایل دهه ۱۹۹۰ برمی‌گردد و با پروژه‌هایی برای نشان دادن امکان‌سنجی فنی و سپس پروژه‌های بررسی پتانسیل صرفه‌جویی در سوخت تا مدل‌های تجاری امکان‌پذیر و رویکردهای پلاتونینگ چند برند و چند ناوگان شروع شد. با این حال، استقرار و پذیرش فن‌آوری‌های پلاتونینگ کامیون‌ها نیاز به جزئیات، هماهنگی و در نهایت برآورده کردن الزامات مختلف دارد (نئوباور و اسچیدوفر، ۲۰۲۲). از آنجایی که پلاتونینگ کامیون‌ها به بهبود بهره‌وری سوخت کمک می‌کند، به عنوان یکی از بهترین فناوری‌ها معرفی شده است. مزایای پلاتونینگ کامیون‌ها در کاهش مصرف سوخت و هزینه نیروی کار و افزایش تجربه رانندگی نهفته است. با این حال، این مزایا بدون برنامه مسیریابی، زمان‌بندی و دسته‌بندی مناسب کامیون‌ها با توجه به محدودیت‌های عملی قابل تحقق نیستند (ژو مین و همکاران، ۲۰۲۲). پلاتونینگ کامیون به کنترل گروهی از کامیونها در فاصله نزدیک بین خودروها اشاره دارد (وارایا، ۱۹۹۳). در یک پلاتون، فشار کلی هوا کاهش می‌یابد، بنابراین میانگین راندمان سوخت بهبود می‌یابد. چندین رویکرد برای تشکیل پلاتون وجود دارد (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲).

مزایای بالقوه پلاتونینگ کامیونها به شرح زیر هستند:

-جوخه سازی کامیون‌ها کارایی آیرودینامیکی را بهبود می‌بخشد، ظرفیت جاده‌ها را افزایش داده و جریان ترافیک پایدارتری را فراهم می‌کند.

-ازآنجاکه وسایل نقلیه یکدیگر را دنبال می‌کنند، باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود.

-در ابتدا هر وسیله نقلیه در ردیف‌هایی معین قرار خواهد داشت اما در نهایت وسیله نقله بدون راننده و کاملاً هوشمند قادر خواهند بود به طور خودکار به خودروهای دیگر بپیوندند و مانند قطارهای طولانی از وسایل نقلیه در بزرگراه را حرکت کنند.

-پلاتونینگ می‌تواند آمار تصادفات را کاهش دهد.

هدف از مسئله هماهنگی پلاتونینگ کامیون‌ها، به حداکثر رساندن مزایای آن با تنظیم برنامه‌های سفر کامیون‌ها است. هماهنگی عموماً با بهینه‌سازی برنامه، سرعت و مسیرها برای افزایش شانس پلاتونینگ به دست می‌آید. در این مقاله به بهینه‌سازی چندهدفه تشکیل پلاتونینگ کامیونها با در نظر گرفتن اهداف چندگانه و سرعت‌های چندگانه پرداخته می‌شود. در راستای دستیابی به هدف تحقیق، ابتدا محدوده مسئله تعیین و سپس برای آن، یک مدل ریاضی دو هدفه ارائه می‌گردد. همچنین جهت حل مسئله از الگوریتمهای فراابتکاری چندهدفه بر پایه آرشیو پارتو استفاده شده و نتایج الگوریتمها با هم مقایسه خواهند شد.

## ۲- پیشینه تحقیق

### پلاتونینگ کامیون‌ها

بهبود بهره‌وری سوخت وسایل نقلیه برای افزایش استقلال انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ضروری است. برای کمک به کاهش مصرف سوخت، دولت ایالات متحده استانداردهای بهره وری سوخت بالاتری را برای خودروهای سواری و وسایل نقلیه سنگین تعیین می کند(هارینگتون و کراپنیک، ۲۰۱۲). در پاسخ به این مقررات، خودروسازان از فن‌آوری‌های مختلف موتور، از جمله تزریق مستقیم سوخت، توربوشارژ، و کاهش سرعت خاموش کردن سوخت استفاده می‌کنند. آنها همچنین وسایل نقلیه هیبریدی، پیل سوختی و برقی خالص را توسعه داده‌اند (لو و همکاران، ۲۰۱۸). جوخه‌سازی خودرو یکی دیگر از فناوری‌های کارآمد سوخت است که شامل هماهنگی چندین وسیله نقلیه برای تشکیل یک گروه قطار مانند از وسایل نقلیه در بزرگراه است. وسایل نقلیه در جوخه با فواصل کوچک بین خودروهای با سرعت یکسان حرکت می کنند (لو و همکاران، ۲۰۱۸). جوخه های کامیون اخیراً به دلیل مزایای متفاوتی که برای اپراتورهای کامیون و جامعه فراهم می کند، مورد توجه قرار گرفته است. رانندگی نزدیک به هم مصرف سوخت را کاهش می‌دهد، زیرا آیرودینامیک تمام کامیون ها را در جوخه بهبود می بخشد (پتن و همکاران، ۲۰۱۲، زابات و همکاران، ۱۹۹۵). تحقیقات نشان می‌دهد که در یک جوخه، مصرف سوخت برای کامیون پیشرو تا شش درصد برای کامیون‌های دیگر تا ده درصد صرفه‌جویی می‌شود (بوپالام و همکاران، ۲۰۱۸).

علاوه بر اینکه مصرف سوخت کمتر منجر به صرفه جویی در هزینه‌ها برای اپراتورهای کامیون می شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می دهد و این نتیجه بسیار مهم است، زیرا حمل و نقل جاده‌ای سنگین مسئول بخش بزرگی از انتشارات ترافیکی است (کمیسیون اروپا، ۲۰۱۶). علاوه بر این، جوخه‌زنی می‌تواند ایمنی ترافیک را با ایجاد زمان واکنش کمتر و فضای کمتر برای خطای انسانی در جوخه افزایش دهد.

همچنین، کامیون‌ها در یک جوخه فضای کمتری از جاده را نسبت به هنگام رانندگی جداگانه اشغال می‌کنند، که ممکن است ازدحام ترافیک را کاهش دهد و باعث افزایش توان ترافیکی می‌شود (اکهاردت و همکاران، ۲۰۱۶). همه سازندگان بزرگ کامیون، فن آوری‌هایی را توسعه داده‌اند که امکان جوخه گذاری را فراهم می‌کند و چندین آزمایش میدانی در اروپا برنامه ریزی شده یا در حال انجام است و به زودی انتظار می‌رود اولین کامیون‌های جاده‌ای قانونی مجهز به فناوری جوخه‌سازی عرضه شوند (بوپالام و همکاران، ۲۰۱۸).

### ۲-۱-ویژگی‌های برنامه‌ریزی پلاتونینگ کامیون

این بخش چندین ویژگی مهم برنامه ریزی جوخه را مورد بحث قرار می دهد. ابتدا، فرآیند برنامه ریزی و پویایی برنامه ریزی را مورد بحث قرار می‌دهیم. سپس، اهداف و محدودیت‌های احتمالی برنامه ریزی را ارائه می‌کنیم.

### ۲-۲- فرآیند و پویایی برنامه ریزی جوخه

برای توضیح فرآیندهای برنامه ریزی، ما یک ارائه دهنده خدمات جوخه را در نظر می‌گیریم که برنامه‌های جوخه را بر اساس اطلاعات سفر از کامیون‌های مختلف ایجاد می‌کند. هر اعلامیه سفر، مکان مبدأ، مکان مقصد، زودترین زمان حرکت و آخرین زمان رسیدن به مقصد را مشخص می‌کند. معمولاً در زمان حرکت مقداری انعطاف وجود دارد، یعنی لازم نیست در اولین زمان حرکت، کامیون سفر خود را شروع کند یا تا قبل از آخرین زمان رسیدن به مقصد برسد یا ممکن است مفروضات متفاوت باشند (بوپالام و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، ممکن است مسیرهای ممکن متفاوتی بین مبدا و مقصد وجود داشته باشد. اعلان سفر همچنین ویژگی‌های کامیون و بار آن را مشخص می‌کند و می‌تواند دارای اولویت‌هایی برای موقعیت در جوخه باشد (بوپالام و همکاران، ۲۰۱۸). طرح جوخه مشخص می‌کند (۱) چه کامیون‌هایی با هم ترکیب می‌شوند، (۲) کجا و چه زمانی کامیون‌ها یک جوخه را تشکیل می‌دهند، (۳) مسیری که جوخه طی خواهد کرد و (٤) کامیون‌ها در چه ترتیبی در داخل جوخه حرکت می‌کنند. بر اساس این طرح‌ها، کامیون‌های مختلف معمولاً جوخه‌هایی را در مسیر تشکیل می‌دهند. برای اطلاعات بیشتر در مورد تشکیل یک جوخه در مسیر در حین تعامل با ترافیک اطراف، به مقالات سگتا و همکاران (۲۰۱٤)؛ برنگهم و همکاران (۲۰۱۲) مراجعه شود. کامیون‌ها می‌توانند منتظر بمانند تا با یکدیگر یک جوخه تشکیل دهند یا می‌توانند با تنظیم سرعت رانندگی خود به یک جوخه برسند. برای رسیدن به یک جوخه، کامیونی که عقب است می‌تواند سرعت خود را افزایش دهد یا کامیونی که جلو است می‌تواند سرعت خود را کاهش دهد. با این حال، به دلیل محدودیت سرعت، تشکیل جوخه‌ها به این روش احتمالاً در بیشتر تنظیمات عملی به زمان زیادی نیاز دارد. بسته به زمانی که اعلامیه‌های سفر در دسترس قرار می گیرند، می‌توانیم سه وضعیت زیر را تشخیص دهیم (بوپالام و همکاران، ۲۰۱۸).

-زمانبندی جوخه برنامه ریزی شده، کلیه سفرها قبل از شروع عملیات اعلام می‌شود. بنابراین، می‌توان تمام نقشه‌های جوخه را از قبل ایجاد کرد. این اغلب به عنوان برنامه‌ریزی آفلاین یا استاتیک شناخته می‌شود.

-جوخه در زمان واقعی، اپراتورهای کامیون سفرهای خود را قبل از حرکت یا حتی زمانی که کامیون‌ها در مسیر هستند اعلام می‌کنند. بنابراین اطلاعیه‌های سفر در حین اجرای سفرها می‌رسد. این اغلب به عنوان برنامه‌ریزی آنلاین یا پویا شناخته می‌شود.

-جوخه سازی فرصت طلب، در این مورد، کامیون‌هایی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند به صورت پویا و بدون برنامه‌ریزی قبلی، جوخه‌هایی را در جاده تشکیل می‌دهند. این نوع جوخه‌زنی به‌عنوان جوخه‌زنی خود به خود، موقت یا در حال پرواز نیز نامیده می‌شود (جانسن و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۱٤). هنگامی که استقرار فناوری جوخه‌ها گسترده نباشد، جوخه‌های فرصت طلب در ایجاد جوخه‌ها چندان موفق نخواهد بود و بنابراین به نوعی برنامه ریزی نیاز است. یک مطالعه شبیه سازی توسط لیانگ و همکاران (۲۰۱٤) نشان می دهد که مزایای قابل توجهی در ارتباط با برنامه‌ریزی دقیق جوخه‌ها وجود دارد.

#### اهداف مسئله پلاتونینگ کامیون‌ها

برای ایجاد جوخه‌ها، یک ارائه دهنده خدمات جوخه می‌تواند اهداف مختلفی را در نظر بگیرد. در اینجا به دو مورد مهم می‌پردازیم.

#### کمینه سازی هزینه سوخت

این هدف شامل به حداقل رساندن کل هزینه سوخت تمام کامیون‌های موجود در سیستم است. برای تعیین هزینه‌های

خالص یک جوخه، نه تنها باید صرفه جویی در مصرف سوخت را در نظر گرفت، بلکه باید سوخت اضافی مصرف شده برای ایجاد جوخه به دلیل انحرافات یا تغییرات سرعت کامیون را نیز در نظر گرفت. لیانگ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل مصرف سوخت نتیجه گرفتند که یک جوخه تنها در صورتی مفید است که فاصله جوخه بسیار بزرگتر از فاصله جبران باشد. به حداقل رساندن هزینه‌های سوخت در ابتدا یکی از اصلی ترین مزایای عملیاتی جوخه برای اپراتورهای کامیون خواهد بود. با به حداقل رساندن هزینه‌های سوخت، ما همچنین به طور ضمنی برخی از مزایای اجتماعی جوخه ها را افزایش می‌دهیم. به حداقل رساندن مصرف سوخت معادل به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه ای است (اسکورا و بارث، ۲۰۰۶). همچنین، وقتی هزینه‌های سوخت را به حداقل می‌رسانیم، کامیون‌ها برای تشکیل جوخه‌های طولانی‌تر تشویق می‌شوند، زیرا کل صرفه‌جویی با کامیون‌های بیشتر در سیستم بیشتر می‌شود. چنین جوخه‌های طولانی‌تری با استفاده کارآمدتر از جاده مرتبط هستند، زیرا کامیون‌های درون یک جوخه به هم نزدیک‌تر می‌شوند. توجه داشته باشید که به حداقل رساندن هزینه های سوخت لزوماً ازدحام ترافیک را کاهش نمی‌دهد زیرا ممکن است تعداد کامیون‌ها را در یک جاده خاص افزایش دهد. از یک طرف، کاهش استفاده از فضا در نتیجه جوخه‌بندی ممکن است به بهبود ظرفیت ترافیک کمک کند. از سوی دیگر، زمانی که کامیون‌های زیادی در تلاش برای تشکیل جوخه‌ها، مسیر یکسانی را طی می‌کنند، سطح ازدحام ممکن است افزایش یابد.

**بیشینه سازی تعداد کامیون‌ها در پلاتون**

به جای به حداقل رساندن هزینه سوخت در سراسر سیستم، یک ارائه دهنده خدمات جوخه می تواند تعداد کامیون های همسان در سیستم را نیز به حداکثر برساند. احتمال افزایش یافتن یک جوخه ممکن است یک معیار مهم برای درگیر نگه داشتن تعداد بیشتری کامیون از شرکتهای مختلف باشد. علاوه بر این، مشارکت شرکت‌های بیشتر با ایجاد موارد مشابه در مراحل اولیه استقرار فناوری می‌تواند به گسترش اعتماد در سیستم کمک کند. در نتیجه، نرخ تطابق بالاتر می‌تواند با جذب شرکت‌های تولید کامیون بیشتر در آینده، شرکت‌کنندگان بزرگ‌تری را تحریک کند. علاوه بر این، تعداد احتمالاً بیشتر جوخه‌های ایجاد شده در نتیجه این هدف ممکن است به کسب تجربه بیشتر در رانندگی خودکار و جوخه‌زنی کمک کند که می‌تواند برای موفقیت آینده سیستم بسیار ارزشمند باشد. توجه داشته باشید که این هدف به طور بالقوه می تواند با هدف توصیف شده قبلی در به حداقل رساندن هزینه‌های سوخت در تضاد باشد.

**محدودیت‌های مسئله پلاتونینگ کامیون‌ها**

پیش نیازهای مختلف تعیین می‌کند که آیا امکان تشکیل یک جوخه بین مجموعه‌ای از کامیون‌ها وجود دارد یا خیر. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها زمان بندی سفرها است. از آنجایی که حمل و نقل بار معمولاً در بازه‌های زمانی محدودی انجام می‌شود که توسط مشتریان مشخص شده است، ممکن است انعطاف پذیری کمی برای انتظار کامیون دیگری برای تشکیل یک جوخه وجود داشته باشد. به جای محدودیت‌های سخت در پنجره‌های زمانی، برخی از مطالعات محدودیت‌های زمانی نرم را با جریمه کردن تاخیرها در نظر می‌گیرند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر پنجره‌های زمانی تحمیل شده توسط مشتری، جوخه‌ها نیز باید مقررات زمان رانندگی را رعایت کنند (گوئل، ۲۰۱۴؛ گوئل و همکاران، ۲۰۱۲؛ گوئل و روسو، ۲۰۱۲؛ گوئل، ۲۰۱۰). این مقررات دوره‌های زمانی خاصی را تعیین می‌کند که کامیون‌ها باید در آن استراحت کنند. زمان‌های استراحت ناسازگار ممکن است دسته‌های خاصی را غیرممکن کند. علاوه بر این، ممکن است امکان تشکیل جوخه بین انواع خاصی از کامیون‌ها وجود نداشته باشد. فن‌آوری‌های جوخه‌سازی تولیدکنندگان مختلف کامیون در حال حاضر ناسازگار هستند، بنابراین فقط می‌توان با کامیون‌هایی با همان برند، جوخه‌ها را تشکیل داد (بریزولارا و ته، ۲۰۱۶؛ برگر، ۲۰۱۶). همچنین، ماهیت بار (به عنوان مثال، کالاهای خطرناک) ممکن است مانع از حضور یک کامیون در یک جوخه شود (میسن و همکاران، ۲۰۰۸).

این احتمال وجود دارد که محدودیت‌های قانونی در طول جوخه وجود داشته باشد (اکهاردت و همکاران، ۲۰۱۶). این کار برای جلوگیری از مزاحمت جوخه‌های طولانی در جریان ترافیک و ایجاد مشکل برای سایر وسایل نقلیه در بزرگراه‌ها است. علاوه بر این، جوخه‌های طولانی می‌تواند منجر به افزایش فرسودگی جاده‌ها و پل‌ها شود، زیرا چنین زیرساختی برای جوخه‌های کامیون متراکم طراحی نشده است. همچنین فناوری ارتباطی مورد نیاز برای جوخه زنی ممکن است در تونل‌ها چندان قابل اعتماد نباشد. در نتیجه، ممکن است ایجاد زیرساخت اختصاصی برای تردد جوخه‌ها ضروری باشد. این نوع محدودیت‌های

مسیریابی در حوزه برنامه‌ریزی کاروان در نظر گرفته می‌شوند (بوپالان و همکاران، ۲۰۱۸). جدای از این محدودیت‌های فنی و عملیاتی، ملاحظات شخصی و بین سازمانی نیز ممکن است نقش مهمی در تشکیل جوخه داشته باشد. یعنی، همه شرکت‌ها به دلیل نگرانی‌های مربوط به اعتماد یا رقابت، مایل به همکاری با یکدیگر نیستند. با توجه به این مسائل، برخی از شرکت‌ها ممکن است فقط بخواهند جوخه هایی را در ناوگان خود یا در داخل یک ائتلاف محدود از ناوگان تشکیل دهند.

در کنار محدودیت‌هایی که کامیون‌ها می‌توانند با هم جوخه تشکیل دهند، ممکن است محدودیت‌هایی در توالی جوخه وجود داشته باشد. یعنی وزن‌های بارگذاری، درجه‌بندی گشتاور و ظرفیت ترمز، توالی‌های احتمالی کامیون را در یک جوخه تعیین می‌کنند (TNO، ۲۰۱۶). به عنوان مثال، کامیون‌ها باید به ترتیب صعودی نسبت قدرت موتور به جرم آنها چیده شوند. این برای اطمینان از اینکه کامیون‌های پیشرو در مسیرهای سربالایی دور نمی‌شوند انجام می‌شود (نواکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۵). ایمنی یکی دیگر از نکات مهم است. برای جلوگیری از برخورد، به عنوان مثال، کامیون با بدترین عملکرد ترمز، باید از جلو حرکت کند.

## مسیریابی برای پلاتونینگ کامیون‌ها

مسئله مسیریابی برای پلاتونینگ کامیونها، بهینه سازی مسیرهای وسیله نقلیه برای تسهیل تشکیل پلاتونینگ‌های کامیون است. لارسون و همکاران (۲۰۱۵) با نادیده گرفتن محدودیت‌های مهلت تحویل، مسئله مسیریابی برای پلاتونینگ کامیون‌ها را مطالعه کرد. آنها ثابت کردند که این مسئله NP-hard است و با روش‌های دقیق حل نمی‌گردد. به همین دلیل جهت حل مسئله دو روش ابتکاری و یک الگوریتم جستجوی محلی را پیشنهاد کرده‌اند. نورمحمدزاده و هارتمن (۲۰۱۶) به مسئله پلاتونینگ وسایل نقلیه سنگین توسط برنامه ریزی ریاضی و الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. در این مسئله آنها فرض کرده‌اند که کامیونها یکسان بوده و سرعت ثابت است. یک مدل ریاضی تک هدفه با هدف کمینه‌سازی سوخت در کل سفر بصورت برنامه‌ریزی چند دوره‌ای ارائه کرده و از نرم افزار لینگو و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل مدل استفاده نموده‌اند. نورمحمدزاده و هارتمن در سال ۲۰۱۸ مسئله را توسعه داده و سرعت‌های متفاوتی برای کامیون‌ها فرض کردند و با هدف کمینه سازی سوخت در کل سفر، مدل را دوباره طراحی و با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات حل کرده‌اند. وان دی هوف (۲۰۱۶) مسئله پلاتونینگ مسیر یکسان را مطالعه کرده فرض می‌کند که کامیون‌ها می‌توانند با سرعت‌های مختلف حرکت کنند. او ابتدا تعدادی جفت کامیون می‌سازد و سپس پلاتونینگ‌های چند کامیون را بر اساس این جفت‌ها می‌سازد. او ثابت می کند که مسئله NP-hard است و یک روش ابتکاری مبتنی بر بهبود محلی را برای نمونه‌های بزرگ پیشنهاد می‌کند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) پلاتونینگ را با زمان سفر نامشخص، با هزینه عینی متشکل از هزینه زمان سفر، جریمه‌های انحراف برنامه و هزینه سوخت در نظر می‌گیرند. نتایج آنها نشان می‌دهد که پلاتونینگ تنها زمانی مفید است که تفاوت در زمان‌های ورود برنامه‌ریزی‌شده کمتر از یک آستانه مشخص باشد و عدم قطعیت آستانه را کاهش می‌دهد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) به مسئله هماهنگی پلاتونینگ با پنجره‌های زمانی با چشم انداز عملیاتی پرداخته‌اند. آنها یک مسئله هماهنگی پلاتونینگ با پنجره‌های زمانی نرم را به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرموله نموده و آن را با روش‌های حل دقیق، حل کرده است. در مدل آنها، تابع هدف شامل هزینه‌های عملیاتی، جریمه‌های از دست دادن برنامه و هزینه‌های سوخت است. در مثال عددی، یک مدل شبکه بزرگراه سوئدی استفاده شده است و نتیجه محاسباتی نشان می‌دهد که برای ۲۱ وسیله نقلیه، با انتخاب زمان‌های رسیدن ترجیحی بهینه، هزینه کل را می‌توان تا ۳,۵ درصد کاهش داد. سپس یک اختلال تصادفی به پنجره‌های زمانی بهینه اضافه می‌شود و نتیجه بهینه حساسیت زیادی را نسبت به اختلال نشان می‌دهد. وقتی میانگین اختلال از ۱۰ دقیقه بیشتر شود، بیش از نیمی از مزایای پلاتونینگ از بین می‌رود. این مطالعه همچنین تغییر ترکیب هزینه‌های مختلف را با افزایش اختلال تجزیه و تحلیل می‌کند. بویسن و همکاران (۲۰۱۸) مسئله پلاتونینگ مسیر یکسان را مطالعه کرد که در آن همه کامیون‌ها مسیر یکسانی دارند اما پنجره‌های زمان تحویل متفاوتی دارند. آنها سه تابع مختلف را برای هزینه‌های پلاتونینگ (خطی، مقعر و عمومی) پیشنهاد می‌کنند و پیچیدگی محاسباتی را تحت تنظیمات مختلف تحلیل می‌کنند. علاوه بر این، آنها تأثیر عوامل مختلف را بررسی کردند و دریافتند که تعداد کم شرکای پلاتون، محدودیت اندازه پلاتونینگ و پنجره‌های زمان تحویل می‌تواند مزایای بالقوه پلاتونینگ را کاهش دهد. لو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی مسئله پلاتونینگ

هماهنگ شده با سرعت‌های متفاوت پرداخته‌اند که برنامه ریزی، مسیریابی، انتخاب سرعت، و تشکیل/انحلال پلاتون را در یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط ادغام می‌کند. این مدل، کل سوخت مصرف شده توسط مجموعه‌ای از وسایل نقلیه را در حین سفر بین مبداهای مربوطه به حداقل می‌رساند. نتایج حل مدل نشان داد که ضریب صرفه جویی در سوخت یک سیستم چند وسیله نقلیه به طور قابل توجهی به مدت زمانی که هر وسیله نقلیه مجاز است در شبکه بماند بستگی دارد. این زمان بر انتخاب های سرعت در دسترس وسایل نقلیه، مسیرهای احتمالی و مدت زمان هماهنگی تشکیل پلاتون تأثیر می‌گذارد.

لارسن و همکاران (۲۰۱۹) مسئله پلاتونینگ کامیون مبتنی بر هاب را مطالعه کرده‌اند. فرض کردند که راننده‌ها پس از یک دوره رانندگی (مخصوصاً ٤٥ دقیقه استراحت پس از ٤,٥ ساعت رانندگی) استراحت لازم را داشته باشند. برای حل مسئله، یک الگوریتم ابتکاری مبتنی جستجوی محلی پویا در این مطالعه پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که مزایای پلاتون نسبتاً محدود است، مگر اینکه راننده‌ها بتوانند در طول سفر به عنوان پیرو استراحت کنند. آلبینسکی و همکاران (۲۰۲۰) مسئله برنامه ریزی پلاتونینگ کامیون و ارزش رانندگی خودمختار را مطالعه کرده و زمان های استراحت نظارتی را در نظر گرفته‌اند. آنها یک مدل MIP را بر اساس یک شبکه زمان–فضا فرموله می‌کنند و یک روش پیش پردازش را برای کاهش اندازه مسئله پیشنهاد می‌کنند. آنها همچنین نشان می‌دهند که مزایای پلاتونینگ مراحل مختلف اتوماسیون متفاوت است. مرحله دوم، جایی که رانندگان می‌توانند در طول سفر استراحت کنند، می‌تواند بیشترین سود را به همراه داشته باشد. بوپالام و همکاران (۲۰۲۰) عمدتاً روی محیطی تمرکز می کند که حداکثر اندازه پلاتون دو است. آنها یک الگوریتم چند جمله‌ای برای این مورد ارائه می‌دهند و بر این اساس، دو الگوریتم ابتکاری سریع برای مسئله پلاتونینگ چند کامیون طراحی می‌کنند. آنها همچنین آزمایش‌های عددی را روی شبکه بزرگراه هلندی متشکل از ۲۰ شهر و ٤٥ بخش جاده انجام می‌دهند. عبدالملکی و همکاران (۲۰۲۱) سعی کرد مجموعه معینی از کامیون‌های چند کلاسه با مسیرهای انعطاف‌پذیر و چند سرعت را برنامه‌ریزی کند. آنها مسئله را به عنوان یک مسئله شبکه مقعر–هزینه مدل می کنند و چندین روش راه حل، از جمله یک الگوریتم تقریب بیرونی (به عنوان یک الگوریتم دقیق)، یک ابتکاری مبتنی بر برنامه نویسی پویا، و یک الگوریتم تقریب پیشنهاد می‌کنند. نتایج عددی کارایی این الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد.

اکسو و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی مسئله مسیریابی و پلاتونینگ کامیون با توجه به استراحت‌های اجباری رانندگان و همچنین ویژگی‌های دیگری مانند نرخ‌های صرفه‌جویی سوخت وابسته به وضعیت و موقعیت و محدودیت اندازه پلاتون پرداخته‌اند. مسئله این است که کامیون‌ها را با استفاده از کمترین میزان سوخت به‌موقع به مقصد خود هدایت کرده و با به حداکثر رساندن تشکیلات پلاتون، صرفه‌جویی در مصرف سوخت در کل سفرها و در عین حال، نیاز زمان استراحت رانندگان برآورده گردد. آنها یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله پیشنهادی توسعه داده و یک الگوریتم ترکیبی که رویکرد MILP جزئی و جستجوی تکراری محلی را با اپراتورهای جستجوی مناسب ادغام می‌کند برای حل مسئله پیشنهاد کرده‌اند. لو (۲۰۲۲) به مسئله پلاتونینگ هماهنگ وسایل نقلیه با مسیرهای ثابت پرداخت. آنها مسئله را در یک شبکه جاده با محدودیت زمانی در نظر گرفته و مسیرهای وسایل نقلیه را تعیین کرده‌اند. مسئله هماهنگ کردن زمان حرکت هر وسیله نقلیه برای فعال کردن تشکیل پلاتون است که در نتیجه صرفه جویی در مصرف سوخت را به حداکثر می‌رساند. ابتدا روی این مورد تمرکز می‌کنند که مسیرها یک درخت را تشکیل می‌دهند. در این مورد، پنجره زمانی انعطاف‌پذیری هر وسیله نقلیه یک نمایش یکپارچه را می‌پذیرد، که تحت آن هماهنگ‌سازی زمان حرکت معادل مدیریت همپوشانی پنجره‌های زمانی است. آنها برای مسئله تشریح شده، یک مدل برنامه ریزی خطی اعداد صحیح مختلط با همپوشانی پنجره زمانی ارائه داده و از سه الگوریتم تقریبی برای حل آن استفاده کرده‌اند.

لو و لارسون (۲۰۲۲) به ارائه یک رویکرد تکرار شونده برای مسئله مسیریابی–سپس–زمانبندی پلاتونینگ هماهنگ کامیون‌ها پرداختند. تحقیق آنها یک چارچوب الگوریتمی مکرر مسیر و سپس برنامه را برای حل مؤثر مسئله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه که در سیستم حمل و نقل هوشمند ایجاد می‌شود، پیشنهاد می‌کند. هدف، به حداکثر رساندن صرفه جویی جمعی مجموعه‌ای از وسایل نقلیه (به ویژه وسایل نقلیه سنگین) با استفاده از این واقعیت است که وسایل نقلیه پلاتونی به دلیل کاهش پسای آیرودینامیکی در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کنند. در این الگوریتم، رویکرد مسیر و برنامه به مرحله

مسیریابی و مرحله برنامه‌ریزی تجزیه می‌شود. این منجر به تغییر مکرر تابع هدف در مسئله مسیریابی می‌شود و در نتیجه زمان بندی را نیز تغییر می‌دهد. این رویکرد به شناسایی راه حل با کیفیت بالا کمک می‌کند. چارچوب الگوریتمی منجر به فرمول بندی بسیار دقیقی از مسائل فرعی می شود که می توانند به موقع حل شوند. ژائو و لئوس (۲۰۲۲) یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر تجزیه بهبود یافته برای پلاتونینگ کامیون‌ها ارائه کرده‌اند. آنها یک سیستم پلاتونینگ کامیون را در نظر گرفتند که به طور مشترک مسیرها و برنامه‌های کامیون را از منظر یک سکوی مرکزی بهینه می‌سازد. آنها یک الگوریتم اکتشافی مبتنی بر تجزیه موجود توسط لو و لارسون (۲۰۲۲) را بهبود دادند که به طور مکرر یک مسیریابی و یک مسئله زمان‌بندی را با یک مرحله اصلاح هزینه پس از هر اجرای برنامه‌ریزی حل می‌کند. ژانگ (۲۰۲۳) به مدل بهینه‌سازی مسیریابی پلاتونینگ کامیون‌ها بر اساس نظریه جریان شبکه چند کالایی پرداخته است. ژانگ (۲۰۲۳) مسئله بهینه‌سازی مسیریابی پلاتونینگ کامیون‌ها را به عنوان یک مسئله جریان شبکه چند کالایی از دیدگاه بهینه‌سازی و زمان‌بندی حمل‌ونقل فرض کرده و با در نظر گرفتن مصرف سوخت و هزینه‌های انحرافی، یک مدل بهینه سازی مسیریابی پلاتونینگ کامیون با حداقل مصرف سوخت کلی سیستم به عنوان هدف بهینه سازی طراحی کرده است. خروجی مدل بهینه‌سازی مسیریابی می‌تواند هم ترکیب پلاتونینگ هر کامیون را در هر پیوند منعکس کند و هم مستقیماً مسیریابی هر کامیون را نشان دهد. برای بررسی تأثیر محدودیت‌های تعداد کامیون‌ها در پلاتونینگ کامیون‌ها بر صرفه‌جویی در مصرف سوخت کلی، مدل بهینه‌سازی مسیریابی پلاتونینگ کامیون‌ها توسط حل‌کننده تجاری CPLEX حل می‌شود. نتایج حل نشان داد که در دو حالتی که تعداد کامیون‌ها در پلاتون محدود شده و محدود نشده است، در مقایسه با کامیون‌های انفرادی، ۸ و ۱۲ درصد به ترتیب در مصرف سوخت صرفه جویی می‌شود.

## مدلسازی ریاضی

### تعریف مسئله

در یک پلاتون، وسایل نقلیه یکی پس از دیگری با فواصل کوچک بین وسایل نقلیه حرکت می‌کنند. وسایل نقلیه عقبی در یک پلاتون در مصرف سوخت صرفه جویی می‌کنند زیرا کشش آیرودینامیکی کمتری را تجربه می‌کنند. در این مقاله یک مدل پلاتونینگ هماهنگ با گزینه‌های سرعت چندگانه ارائه شده است که برنامه ریزی، مسیریابی، انتخاب سرعت، و تشکیل/انحلال پلاتون را در یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط ادغام می‌کند. همچنین این مدل دو هدفه بوده که هدف اول آن عبارتست از کمینه‌سازی کل سوخت مصرف شده توسط مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در حین سفر بین مبداهای مربوطه و هدف دوم عبارتست از کمینه‌سازی زمان سفر. در تحقیق حاضر، از آنجایی که مصرف سوخت طی یک واحد مسافت در سرعت‌های مختلف متفاوت است، سرعت‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است و این اصلاح فرصت‌های بیشتری را برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت و انعطاف‌پذیری بیشتری در برآوردن نیازهای زمان رسیدن به خودروها فراهم می‌کند. در این تحقیق فرض می‌شود که کامیون‌ها دارای مبدا و مقصدهای مختلف هستند که در زمان معینی باید به مقصد برسند. کامیون‌ها می‌توانند در یال‌های مختلف سرعت‌های مختلف داشته باشند و با توجه به اینکه سرعت ممکن است. در صورتی که کامیون‌ها در برخی یالها، تشکیل پلاتون دهند، میزان سوخت کامیونهایی که در پلاتون هستند با توجه به پارامتر فاکتور کاهش سوخت، کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر، نرخ‌های صرفه‌جویی در مصرف سوخت محافظه‌کارانه‌تر فرض می‌شود و خودروها اجازه ندارند در گره‌های میانی منتظر بمانند. در تمام آزمایش‌های عددی، هزینه‌های سوخت اضافی وسایل نقلیه تنظیم سرعت را نادیده گرفته می‌شود. همچنین فرض شده است که همه وسایل نقلیه می‌توانند از هر جاده‌ای با هر سرعت مجاز عبور کنند.

مدل تحقیق حاضر به طور یکسان برای هر مجموعه ای از وسایل نقلیه، کامیون‌ها یا اتومبیل‌ها یا ترکیبی از انواع وسایل نقلیه اعمال می‌شود، مشروط بر اینکه هر وسیله نقلیه‌ای بتواند با دیگری تشکیل پلاتون دهد.

مسئله تحقیق حاضر در راستای توسعه مدل مقاله لو و همکاران (۲۰۱۸) شکل گرفته است که شامل توسعه‌های زیر می‌باشد.

-در نظر گرفتن دو تابع هدف برای مدل.

-کامیون ها از نظر اندازه و مشخصات یکسان نیستند یا به عبارتی وسایل نقلیه ناهمگن هستند.

-کامیون‌ها می‌توانند سرعت‌های مختلفی را در هر یال اتخاذ کنند و سرعت بصورت چندگانه در نظر گرفته شده است.

– اگرچه کاهش کشش هوا برای همه وسایل نقلیه یک جوخه وجود دارد، برای ساده سازی، مانند بسیاری از کارهای قبلی، کاهش مصرف سوخت برای اولین کامیون نادیده گرفته می‌شود.
– به دلیل تفاوت‌های جزئی در کشش‌های هوا که کامیون‌های زیر تجربه می‌کنند، فرض می‌کنیم که همه آن‌ها از نرخ صرفه‌جویی سوخت یکسانی در جوخه سود می‌برند.
–در اینجا زمان اولین حرکت و آخرین زمان رسیدن (مهلت) برای هر کامیونی در نظر گرفته می‌شود که به مدل کمک می‌کند تا واقعی تر باشد.
–هزینه سوخت واحد و زمان لازم برای پیمودن یک واحد مسافت به سرعت بستگی دارد.
–هزینه‌های سوخت اضافی وسایل نقلیه نادیده گرفته شده‌اند.

**مجموعه‌ها و پارامترها**

در تحقیق حاضر جهت مدلسازی، شبکه حمل و نقل بصورت یک گراف پیوسته $G(E,I)$ که در آن $I$ ندها و $E \subseteq I \times I$ یالهای شبکه می‌باشند. همچنین، V مجموعه وسایل نقلیه در نظر گرفته شده که مبدا یعنی $O_v$و مقصد یعنی $D_v$ هر وسیله نقلیه مشخص و جزو مجموعه ندهای گراف شبکه حمل و نقل می‌باشند. زمان مبدا وسیله نقلیه v با $T_v^O$ نشان داده شده است که به معنای زودترین زمان ترک $O_v$توسط وسیله نقلیه می‌باشد (ممکن است وسیله نقلیه در $O_v$ تا زمان ترک آ منتظر بماند).
به همین ترتیب، دیرترین زمان رسیدن یک وسیله نقلیه به $D_v$با $T_v^D$ نشان داده شده است. در واقع وسیله نقلیه قبل از $T_v^D$ باید به $D_v$ برسد. کوتاه ترین مسیر و سریع‌ترین زمان سفر بین گره‌ها $i,j \in I$ با $H_{i,j}$ نشان داده شده است. جهت اینکه مسئله شدنی باشد، رابطه باید زیر برای کلیه وسایل نقلیه برقرار باشد.

## مدل ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی پلاتونینگ کامیون‌ها با ارائه گزینه‌های سرعت خودرو برای هر یال در شبکه ارائه شده است. در نظر گرفتن سرعت‌های چندگانه، به دو دلیل می‌تواند مصرف سوخت کل را کاهش دهد. اول، از آنجایی که مصرف سوخت یک وسیله نقلیه در واحد مسافت با توجه به سرعت آن متفاوت است، وسایل نقلیه می‌توانند با سرعت کم مصرف‌تری رانندگی کنند. دوم، گزینه‌های چندگانه سرعت می‌تواند تعداد فرصت‌های پلاتونینگ را افزایش دهد.

$$T_v^D \geq T_v^O + H_{O_v,D_v} \quad \forall v \in V \qquad (۱)$$

در مدل تحقیق حاضر، هر وسیله نقلیه مجاز است با هر سرعتی $S_{i,j}$ در هر یال (i,j) ∈ E حرکت کند، در جدول (۱) توضیح داده شد که جایی که $S_{i,j}$ مجموعه امکان‌پذیری از سرعت‌هایی است که یک وسیله نقلیه می‌تواند در یال (i,j) حرکت کند (فرض می‌شود که وسایل نقلیه می‌توانند از وسایل نقلیه دیگر سبقت بگیرند). هر گونه شرایط ترافیکی که ممکن است بر سرعت وسیله نقلیه تأثیر بگذارد، در این تحقیق نادیده گرفته شده است. همچنین فرض شده است که هیچ هزینه‌ای برای وسایل نقلیه در انتظار گره‌های میانی وجود ندارد. در جدول ۱، لیست مجموعه‌ها و پارامترهای مورد استفاده در مدل ریاضی تحقیق حاضر تعریف و لیست شده‌اند.

**جدول ۱. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل**

| مجموعه‌ها | |
|---|---|
| **مجموعه وسایل نقلیه** | V |
| **مجموعه ندهای شبکه** | I |
| **مجموعه یال‌های شبکه** | $E \subseteq I \times I$ |
| پارامترها | |
| **ند مبدا وسیله نقلیه v، $v \in V$** | $O_v$ |
| **ند مقصد وسیله نقلیه v، $v \in V$** | $D_v$ |

| | |
|---|---|
| **زمان مبدا وسیله نقلیه v ، $v \in V$** | $T_v^O$ |
| **زمان مقصد وسیله نقلیه v ، $v \in V$** | $T_v^D$ |
| **نشان می‌دهد که ند i، مبدا یا مقصد وسیله نقلیه v است یا نه** | $B_{v,i} = \begin{cases} 1 \ if \ i = O_v \\ -1 \ if \ i = D_v \end{cases}$ |
| **مجموعه گزینه‌های سرعت بر روی یال (i,j)** | $S_{i,j}$ |
| **مدت زمان سفر بر یال (i,j) با سرعت s** | $T_{i,j,s}$ |
| **هزینه سوخت سفر بر یال (i,j) با سرعت s** | $C_{i,j,s}$ |
| **زمان سفر از i به j با حداکثر سرعت** | $H_{i,j}$ |
| **حداکثر تعداد وسایل نقلیه در پلاتون** | $Q$ |
| **نرخ ذخیره سوخت درهر واحد زمان در سرعت s** | $\eta_s$ |

در مدل تحقیق حاضر، ما با انتخاب مسیرهای وسایل نقلیه، سرعت، و زمان سفر و با انتخاب اینکه آیا وسایل نقلیه در یک یال مشخص هستند یا نه، بهینه سازی می کنیم. متغیرهای تصمیم در جدول ۲ فهرست شده‌اند. متغیرهای f و q متغیرهای باینری هستند، در حالی که e و w از نوع اعداد حقیقی و مثبت هستند.

**جدول ۲. متغیرهای مدل مدل**

| نام متغیر | نوع متغیر | تعریف |
|---|---|---|
| $f_{v,i,j,s}$ | binary | برابر با ۱ است اگر وسیله نقلیه v با سرعت s روی یال (i,j) سفر کند و در غیراینصورت برابر با ۰ است. |
| $q_{v,w,i,j,s}$ | binary | برابر با ۱ است اگر وسیله نقلیه v وسیله نقلیه w را بر روی یال (i,j) با سرعت s دنبال کند. |
| $e_{v,i,j}$ | non-negative | زمان ورود وسیله نقلیه v در ند i |
| $w_{v,i}$ | non-negative | زمان انتظار وسیله نقلیه v روی یال (i,j) |
| $T_v$ | non-negative | زمان رسیدن وسیله نقلیه v به ند مقصد |

از تکنیک‌های مدل‌سازی برای محدود کردن اعلام برخی مجموعه‌ها، متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها به منظور کاهش اندازه مدل استفاده شده است. به عنوان مثال، حتی با وجود فرصت‌های جوخه‌زنی، وسایل نقلیه هرگز به یال‌هایی که از کوتاه‌ترین مسیرشان دور است نخواهند رسید (لارسون و همکاران، ۲۰۱۶). این مدل می‌تواند به راحتی مجموعه یالها را محدود کند تا وابستگی به وسیله نقلیه vداشته باشد و فقط یال‌هایی را شامل شود که هر وسیله نقلیه v به طور بالقوه می‌تواند روی آنها حرکت کند. یعنی یک یال برای وسیله نقلیه v فقط در صورتی قابل دسترسی است که وسیله نقلیه به یال برسد و از آن عبور کند و همچنان در محدوده زمانی v به مقصد برسد.

**ساختار مدل ریاضی**

با توجه به تعریف مسئله، مفروضات مدلسازی، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل، در این بخش ساختار مدل ریاضی که شامل توابع هدف و محدودیت‌های مدل می‌باشد، ارائه گردیده است.

تابع هدف اول:

(۲)

$$Min\ z1 = \sum_{v,i,j} \sum_{s \in S_{i,j}} C_{i,j,s}(f_{v,i,j,s} - \eta_s \sum_{w} q_{v,w,i,j,s})$$

تابع هدف اول عبارتست از کمینه‌سازی سوخت که $C_{i,j,s}$ میزان سوخت وسیله نقلیه بر روی یال $(i,j)$ در سرعت $s$ است. می‌توان $C_{i,j,s}$را یک مقدار وابسته به وسیله نقلیه بدون افزایش تعداد متغیرهای تصمیم گیری در نظر گرفت، اما در اینجا این کار را انجام نمی‌دهیم. اولین عبارت در (۲) مصرف سوخت وسایل نقلیه‌ای است که در ابتدای پلاتون رانندگی می‌کند. عبارت دوم میزان سوخت صرفه جویی شده در اثر جوخه سازی است.

تابع هدف دوم:

(۳)

$$Min\ z2 = \sum_{v} T_v$$

تابع هدف دوم عبارتست از کمینه‌سازی مجموع زمان رسیدن وسایل نقلیه به ند مقصد آنها.

محدودیت‌های مدل ریاضی:

(٤)

$$\sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} \leq 1 \qquad \forall v, (i,j) \in E$$

محدودیت (٤) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه بر روی یک یال حداکثر یک سرعت را انتخاب کند. بعنوان مثال اگر گزینه‌های سرعت ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰ هستند، یک وسیله نقلیه یک هر یال را فقط با یکی از این سرعت‌ها طی می‌کند، در حالیکه می‌تواند برای یال‌های مختلف، سرعت‌های مختلف داشته باشد.

(۵)

$$\sum_{j:(i,j)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} = \sum_{j:(j,i)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,j,i,s} + B_{v,i} \quad \forall v \in V, i \in I$$

محدودیت (۵) نشان دهنده تعادل جریان در یالها است و تضمین می‌کند که تعداد وسایل نقلیه‌ای که به یک یال وارد می‌شوند، برابر است با تعداد وسایل نقلیه‌ای که از آن یال خارج شوند.

(٦)

$$-M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \leq e_{v,i,j} - e_{w,i,j} \leq M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \quad \forall v, w \in V, v > w \quad and \quad (i,j) \in E \tag{6}$$

رابطه (٦) نشان می‌دهد که هنگام جوخه زدن، زمان ورود وسایل نقلیه به یک یال باید برابر باشد.

(۷)

$$\sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s} \leq 1 \quad \forall v \in V, (i,j) \in E\ , s \in S_{i,j}$$

رابطه (۷) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه حداکثر یک وسیله نقلیه دیگر را در جوخه دنبال کند.

(۸)

$$\sum_{u:u>v} q_{u,v,i,j,s} \leq (Q-1)\left(1-\sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s}\right) \qquad \forall v \in V, (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تمام وسایل نقلیه عقبی در یک جوخه باید وسیله نقلیه پیشرو را دنبال کنند و تعداد وسایل نقلیه در یک جوخه نباید از $Q$ بیشتر شود.

(۹)

$$2q_{v,w,i,j,s} \leq f_{v,i,j,s} + f_{w,i,j,s} \;\; \forall v,w \in V, v > w \;\; and \;\; (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

رابطه (۹)، نشان می‌دهد که جوخه سازی هم به رهبر و هم پیرو نیاز دارد که از یال عبور کنند.

(۱۰)

$$-M2\left(1-\sum_{s\in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \leq e_{v,O_v,j} - T_v^O - w_{v,O_v} \leq M2\left(1-\sum_{s\in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \;\; \forall v \in V, j \in \{j' \in I: (O_v, j') \in E\} \qquad (10)$$

رابطه (۱۰)، زمان ورود وسیله نقلیه به اولین یال را محاسبه میکند که عبارتست از مجموع زودترین زمانی که وسیله نقلیه میتواند به اولین یال وارد شود و زمان انتظار آن وسیله در ند شروع.

(۱۱)

$$-M3\left(1-\sum_{s\in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \leq T_v^D - e_{v,i,D_v} - w_{v,D_v} - \sum_{s\in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \leq M3\left(1-\sum_{s\in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \;\; \forall v \in V, i \in \{i' \in I: (i', D_v) \in E\}$$

رابطه (۱۱)، زمان ورود هر وسیله نقلیه به آخرین یال را محاسبه می‌کند.

(۱۲)

$$T_v = e_{v,i,D_v} + w_{v,D_v} + \sum_{s\in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \;\; \forall v \in V, i \in \{i' \in I: (i', D_v) \in E\}$$

رابطه (۱۲)، زمان رسیدن وسیله نقلیه را به ند مقصد محاسبه می‌کند.

(۱۳)

$$-M4\left(2-\sum_{s\in S_{i,j}} f_{v,i,j,s}-\sum_{s\in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right)\le e_{v,j,k}-e_{v,i,j}-w_{v,j}-\sum_{s\in S_{i,D_v}} T_{i,j,s}f_{v,i,j,s}$$
$$\le M4\left(2-\sum_{s\in S_{i,j}} f_{v,i,j,s}-\sum_{s\in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right)\quad \forall v\in V,(i,j),(j,k)\in E,j\neq O_v,D_v$$

محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که زمانی که **v** وارد هر یال باقی مانده می شود باید با افزایش زمان به دلیل سفر و زمان انتظار مطابقت داشته باشد.

(۱٤)

$$e_{v,i,j}\le M5\sum_{s\in S_{i,j}} f_{v,i,j,s}\qquad \forall v\in V,(i,j)\in E$$

رابطه (۱٤) تضمین می‌کند که اگر جریانی در یال وجود نداشته باشد، زمان ورود **v** به آن یال باید صفر باشد.

(۱۵)

$$w_{v,j}\le M6(\sum_{i,j}\sum_{s\in S_{i,j}}\sum_{s'\in S_{i,j}}\left(f_{v,i,j,s}+f_{v,i,j,s'}\right)\ \forall v\in V,i\in I$$

رابطه (۱۵) تضمین می‌کند که اگر جریانی از یک گره وجود نداشته باشد، زمان انتظار در آن گره باید صفر باشد.

(۱٦)

$$w_{v,j}=0\ \ \forall v\in V,i\neq O_v,D_v$$

رابطه (۱٦) نشان می‌دهد که انتظار در گره‌هایی که مبدا یا مقصد نیستند ممنوع است.
همچنین در مدل بالا، مقادیر ***M1*** تا ***M6*** برابر است با ماکسیمم مقدار $T_v^D$.

**روش حل**

در این مقاله برای مسئله پلاتونینگ کامیونها با سرعتهای چندگانه یک مدل ریاضی دو هدفه با اهداف کمینه‌سازی سوخت و زمان ارائه شد که جهت حل این مدل از رویکرد محدودیت اپسیلون و الگوریتم انبوه ذرات استفاده گردیده که در ادامه، ساختار این دو الگوریتم تشریح شده است.

**محدودیت اپسیلون**

همانطور که می‌دانیم روش‌های زیادی برای حل مسائل چند هدفه وجود دارد که میتوان از روش حل مسائل چند هدفه نحوه عملکرد روش e-constraint در ادامه شرح داده شده است.

بر پایه آرشیو پارتو، روش وزن‌دهی اهداف و روش e-constraint نام برد. جهت بررسی اعتبار مدل از حل مدل در محیط نرم افزار گمز استفاده شد. از آنجایی که نرم افزار گمز تنها قادر به حل مسائل تک هدفه است، در راستای اثبات اعتبار مدل و همچنین الگوریتم حل، مدل دو هدفه ارائه شده با استفاده از روش e-constraint یک مدل تک هدفه تبدیل شده و سپس توسط الگوریتم حل و نرم‌افزار دقیق گمز حل می‌گردد. در نهایت نتایج حاصل از حل مدل تک هدفه توسط الگوریتم حل و نرم افزار گمز برای تک تک توابع هدف با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

فرض کنید مسئله چند هدفه بصورت زیر باشد:

$$(f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))$$

$$st$$

$$x \in S$$

که در آن S فضای شدنی جواب و x نیز مجموعه متغیرهای مدل می‌باشد. در روش e-constraint یکی از توابع هدف بعنوان هدف در نظر گرفته شده و بهینه می‌شود و سایر توابع هدف بعنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. مدل چند هدفه بالا با استفاده از روش e-constraint بصورت مدل تک هدفه زیر در می‌آید.

$$f_1(x)$$

$$st$$

$$f_2(x) \geq e_2$$

$$f_3(x) \geq e_3$$

$$f_p(x) \geq e_p$$

$$x \in S$$

با توجه به آنچه که شرح داده شد، مدل دو هدفه ارائه شده در این تحقیق بصورت مدل تک هدفه زیر در میآید.

مدل بهینه سازی تابع هدف اول: (۱۷)

$$Min\ z1 = \sum_{v,i,j} \sum_{s \in S_{i,j}} C_{i,j,s}(f_{v,i,j,s} - \eta_s \sum_{w} q_{v,w,i,j,s})$$

محدودیت‌ها:

(۱۸-۲۵)

$$\sum_{v} T_v \leq \varepsilon_2$$

$$\sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} \leq 1 \qquad \forall v, (i,j) \in E \qquad (19)$$

$$\sum_{j:(i,j)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} = \sum_{j:(j,i)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,j,i,s} + B_{v,i} \quad \forall v \in V, i \in I \qquad (20)$$

$$-M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \leq e_{v,i,j} - e_{w,i,j} \leq M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \quad \forall v, w \in V, v > w \ \ and \ \ (i,j) \in E$$

$$\sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s} \leq 1 \quad \forall v \in V, (i,j) \in E\ , s \in S_{i,j}$$

$$\sum_{u:u>v} q_{u,v,i,j,s} \leq (Q-1)\left(1 - \sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s}\right) \qquad \forall v \in V, (i,j) \in E\ , s \in S_{i,j}$$

$$2q_{v,w,i,j,s} \le f_{v,i,j,s} + f_{w,i,j,s} \;\; \forall v,w \in V, v > w \;\; and \;\; (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

$$-M2\left(1 - \sum_{s \in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \le e_{v,O_v,j} - T_v^O - w_{v,O_v} \le M2\left(1 - \sum_{s \in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \;\; \forall v \in V, j \in \{j' \in I : (O_v, j') \in E\}$$

$$-M3\left(1 - \sum_{s \in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \le T_v^D - e_{v,i,D_v} - w_{v,D_v} - \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \le M3\left(1 - \sum_{s \in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \;\; \forall v \in V, i \in \{i' \in I : (i', D_v) \in E\}$$

$$T_v = e_{v,i,D_v} + w_{v,D_v} + \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \;\; \forall v \in V, i \in \{i' \in I : (i', D_v) \in E\}$$

$$-M4\left(2 - \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} - \sum_{s \in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right) \le e_{v,j,k} - e_{v,i,j} - w_{v,j} - \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,j,s} \le M4\left(2 - \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} - \sum_{s \in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right) \;\; \forall v \in V, (i,j), (j,k) \in E, j \neq O_v, D_v$$

$$e_{v,i,j} \le M5 \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} \qquad \forall v \in V, (i,j) \in E$$

$$w_{v,j} \le M6 \left(\sum_{i,j} \sum_{s \in S_{i,j}} \sum_{s' \in S_{i,j}} \left(f_{v,i,j,s} + f_{v,i,j,s'}\right)\right) \forall v \in V, i \in I$$

$$w_{v,j} = 0 \;\; \forall v \in V, i \neq O_v, D_v$$

مدل بهینه‌سازی تابع هدف دوم:

(۳۲)

$$Min\ z2 = \sum_{v} T_v$$

محدودیت‌ها:

(۳۳)

$$\sum_{v,i,j} \sum_{s \in S_{i,j}} C_{i,j,s} \left(f_{v,i,j,s} - \eta_s \sum_{w} q_{v,w,i,j,s}\right) \le \varepsilon_1$$

$$\sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} \le 1 \qquad \forall v, (i,j) \in E$$

$$\sum_{j:(i,j)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} = \sum_{j:(j,i)} \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,j,i,s} + B_{v,i} \quad \forall v \in V, i \in I$$

$$-M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \leq e_{v,i,j} - e_{w,i,j} \leq M1\left(1 - \sum_{s \in S_{i,j}} q_{v,w,i,j,s}\right) \quad \forall v, w \in V, v > w \quad and \quad (i,j) \in$$

$$\sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s} \leq 1 \quad \forall v \in V, (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

$$\sum_{u:u>v} q_{u,v,i,j,s} \leq (Q-1)\left(1 - \sum_{w:w<v} q_{v,w,i,j,s}\right) \quad \forall v \in V, (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

$$2q_{v,w,i,j,s} \leq f_{v,i,j,s} + f_{w,i,j,s} \quad \forall v, w \in V, v > w \quad and \quad (i,j) \in E, s \in S_{i,j}$$

$$-M2\left(1 - \sum_{s \in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \leq e_{v,O_v,j} - T_v^O - w_{v,O_v} \leq M2\left(1 - \sum_{s \in S_{O_v,j}} f_{v,O_v,j,s}\right) \quad \forall v \in V, j \in \{j' \in I: (O_v, j') \in E\}$$

$$-M3\left(1 - \sum_{s \in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \leq T_v^D - e_{v,i,D_v} - w_{v,D_v} - \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \leq M3\left(1 - \sum_{s \in S_{i,D_v}} f_{v,i,D_v,s}\right) \quad \forall v \in V, i \in \{i' \in I: (i', D_v) \in E\}$$

$$T_v = e_{v,i,D_v} + w_{v,D_v} + \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,D_v,s} \quad \forall v \in V, i \in \{i' \in I: (i', D_v) \in E\}$$

$$-M4\left(2 - \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} - \sum_{s \in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right) \leq e_{v,j,k} - e_{v,i,j} - w_{v,j} - \sum_{s \in S_{i,D_v}} T_{i,j,s} f_{v,i,j,s} \leq M4\left(2 - \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} - \sum_{s \in S_{j,k}} f_{v,j,k,s'}\right) \quad \forall v \in V, (i,j), (j,k) \in E, j \neq O_v, D_v$$

$$e_{v,i,j} \leq M5 \sum_{s \in S_{i,j}} f_{v,i,j,s} \quad \forall v \in V, (i,j) \in E$$

$$w_{v,j} \leq M6\left(\sum_{i,j} \sum_{s \in S_{i,j}} \sum_{s' \in S_{i,j}} \left(f_{v,i,j,s} + f_{v,i,j,s'}\right)\right) \forall v \in V, i \in I$$

$$w_{v,j} = 0 \ \ \forall v \in V, i \neq O_v, D_v$$

جهت محاسبه $\varepsilon_1$ و $\varepsilon_2$ باید مدل، بدون در نظر گرفتن تابع هدف مذکور و برای هدف دیگر، توسط گمز حل گردیده و تابع هدف مربوطه را با استفاده از جواب بهینه حاصل، محاسبه کرده و مقدار آن را بعنوان $\varepsilon_1$ یا $\varepsilon_2$ در نظر گرفت و مدل مربوطه را حل نمود.

**الگوریتم انبوه ذرات**

بهینه‌سازی چندهدفه مانند بهینه‌سازی تک هدفه، بطور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و الگوریتم‌های زیادی برای حل آن ارائه شده است. PSO یک تکنیک موفق در هوش مصنوعی می‌باشد. گروهی از حشرات یا دسته‌ای از ماهیان را در نظر بگیرید، اگر یکی از اعضای گروه، مسیر خوبی را برای پیشروی بیابد (به عنوان مثال برای رسیدن به غذا، مکان امن وغیره) دیگر اعضای گروه نیز قادر خواهند بود که به دنبال این عضو، آن مسیر را دنبال کنند. این پدیده با استفاده از عضوهایی که دارای یک مکان و سرعت مربوط به خود هستند مدل می‌گردد.

ساختار کلی طراحی شده برای روش pso تلفیقی چند هدفه در ادامه آمده است.

{

Generate N feasible solutions as initial population.

Initialize $p_g$ and $p_i$.

Initialize the adaptive Pareto archive set so that it is empty

**While** a given maximal number of iterations is not achieved

Update particle by eq. (47)

Apply feasibility check procedure.

Evaluate the updated particles to get the new $p_i$ and $p_g$

Update Pareto archive.

Select *N* solutions whit higher quality and higher diversity as population for next generation.

**End while**

}

**نحوه نمایش جواب**

در تمام الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بدلیل نیاز به حل شدنی در شروع کار، لازم است حل شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم که به این ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. در این پایان‌نامه برای نمایش هر جواب از ماتریس استفاده می‌شود. هر جواب شامل چندین ماتریس است که این ماتریس‌ها مطابق با خروجی‌های مدل طراحی می‌شوند. بعنوان مثال برای متغیر $f_{v,i,j,s}$یک ماتریس چهار بعدی با ابعاد $V \times I \times I \times S$ تعریف می‌شود که مقدار خانه (v,l,j,s) در آن ۱ است اگر وسیله نقلیه v با سرعت s روی یال (l,j) سفر کند و در غیراینصورت برابر با ۰ است. همچنین جهت نمایش متغیر $q_{v,w,i,j,s}$ نیز از یک ماتریس پنج بعدی با ابعاد $V \times I \times I \times S$ استفاده می‌شود که مقدار خانه (v,w,l,j,s) در آن برابر با ۱ است اگر وسیله نقلیه v وسیله نقلیه w را بر روی یال (l,j) با سرعت s دنبال کند.

به همین ترتیب برای نمایش متغیر $e_{v,i,j}$ از ماتریس سه بعدی با ابعاد $V \times I \times I$ استفاده شده است و مقدار خانه (v,l,j) در این ماتریس برابر است با زمان ورود وسیله نقلیه v در ند i وقتی که میخواهد یال (l,j) را طی کند. برای نمایش متغیر $w_{v,i}$ از ماتریس دوبعدی با ابعاد $V \times I$ استفاده شد و خانه‌های آن حاوی مقادیر زمانی انتظار وسیله نقلیه بر روی ند مربوطه هستند. در نهایت جهت نمایش متغیر $T_v$ از یک ماتریس سطری با $V$

خانه استفاده شد که مقادیر هر خانه نشان دهنده زمان رسیدن وسیله نقلیه v به ند مقصد است.

**نحوه تولید جواب‌های اولیه**

از آنجایی که الگوریتم انبوه ذرات یک الگوریتم بر پایه جمعیت است، در شروع نیاز به جمعیتی از جواب‌ها که شامل N جواب است، می‌باشد. در این مقاله جهت تولید جواب‌های اولیه از رویکرد تصادفی استفاده شده است.

**به روز رسانی ذرات**

در اینجا برای به روز رسانی ذرات از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است (آذرکیش و آقایی‌پور، ۲۰۲۲؛ توکلی مقدم و همکاران، ۲۰۱۰). نحوه به روز رسانی ذرات مطابق رابطه زیر است.

$$x_i^{t+1} = \left(x_i^t - p_i^t\right) + \left(x_i^t - p_g^t\right) + \overline{x_i^t}$$

در رابطه بالا

$x_i^{t+1}$: ذره i ام در تکرار (نسل) t+1 ام

$x_i^t$: ذره i ام در تکرار t ام.

$p_i^t$ : بهترین جوابی که ذره iام تا به حال (تا این نسل) به آن رسیده.

$p_g^t$ : بهترین جوابی که تا به حال پیدا شده.

$\overline{x_i^t}$: یک همسایگی از $x_i^t$ که با عملگر جهش (mutation) تولید شده.

'-' : این علامت نشانه عملگر تقاطع (crossover) است.

'+' : نشانه انتخاب است.

در واقع برای بدست آوردن جواب i ام در تکرار t+1 ام 5 جواب تولید می‌شود: دو تا حاصل عملگر تقاطع بین $x_i^t$ و $p_i^t$ ، دو تا حاصل عملگر تقاطع بر روی $x_i^t$ و $p_g^t$ و یکی حاصل اعمال عملگر جهش بر روی $x_i^t$ است. در نهایت از بین این ۵ جواب آنکه کیفیت و پراکندگی بلاتری دارد، بعنوان $x_i^{t+1}$ انتخاب می‌شود. در واقع در این فرمول $p_g^t$ و $p_i^t$ بعنوان راهنما برای رسیدن به جوابهای تکرار بعدی استفاده می‌شود.

**عملگر تقاطع**

عملگر تقاطع طراحی شده در این الگوریتم، یک عملگر تقاطع تک نقطه‌ای می‌باشد. عملگر جهش: عملگر جهش استفاده شده در فرمول بالا جهت به روز رسانی ذرات، بصورت یک ساختار جستجوی همسایگی طراحی شده است که به شرح زیر عمل می‌کند. اندیس دو وسیله نقلیه v و w به تصادف در یک جوخه تولید شده و سپس جای دو وسیله نقلیه در جوخه مربوطه با هم تعویض می‌شود.

**به روز رسانی $p_i^t$ و $p_g^t$**

برای هر ذره i ام ، از بین همسایگی های پیدا شده برای این جواب اگر همسایگی بهتر از $p_i$ موجود باشد، $p_i$ با آن جایگزین شده ودر غیر اینصورت بدون تغییر باقی می‌ماند. از بین تمام جواب‌هایی که تا به حال پیدا شده اند، اگر بهترین جواب از $p_g$ بهتر باشد،$p_g$ با آن جایگزین شده و در غیر اینصورت بدون تغییر باقی می‌ماند.

**به روز رسانی آرشیو پارتو**

در الگوریتم پیشنهادی یک مجموعه به نام آرشیو پارتو در نظر گرفته شده است که جوابهای غیر مغلوب (non-dominated) را که توسط الگوریتم تولید می‌شوند را در خود نگه می‌دارد. این مجموعه در هر تکرار الگوریتم به روز رسانی خواهد شد. نحوه به روز رسانی به این صورت است که جواب‌های تولید شده در آن تکرار و جواب‌های موجود در آرشیو پارتو در یک استخر جواب ریخته شده و با هم سطح بندی می‌شوند، سپس از بین این جوابها، جوابهای موجود در سطح اول یا همان جوابهای غیر مغلوب انتخاب شده و بعنوان آرشیو پارتو جدید در نظر گرفته می‌شوند.

در این تحقیق جهت انتخاب جواب، از روابط NON-DOMINATED استفاده شده است که به شرح زیر می‌باشند.

جهت مرتب سازی و سطح بندی جواب‌ها از روابط زیر استفاده می‌گردد، بدین صورت که ابتدا کلیه جواب‌ها با استفاده از روابط مذکور یکدیگر مقایسه شده و جواب‌هایی که هیچ جوابی بر آنها غلبه نکند بعنوان جوابهای سطح اول در نظر گرفته شده و سپس همین رویه برای مجموعه جوابهای تعیین تکلیف نشده تکرار شده و سطوح بعدی نیز مشخص می‌شوند.

**تعریف ۱- ارتباط غالب**

در مسائل بهینه سازی چند معیاره که q تابع هدف از نوع کمینه سازی دارد، گوییم بردار $x_1$ بر بردار $x_2$ غلبه می‌نماید، هر گاه دو شرط زیر برقرار باشد (دب، ۲۰۰۲)

**(۴۸-۴۹)**

**مرتب سازی جواب‌ها**

$$f_i(x_1) \le f_i(x_2) \quad \forall\, i = 1, \dots, q$$
$$f_i(x_1) < f_i(x_2) \quad \exists\, i = 1, \dots, q$$

بنابراین هدف اصلی در اینگونه مسائل، پیدا کردن مجموعه‌ای از نقاط است که بر نقاط دیگر غالب باشند. برای درک بیشتر موضوع دو تعریف زیر بیان می‌گردند. با توجه به اینکه هر چه شماره سطح یک جواب کمتر باشد، آن جواب با کیفیت تر است، جهت انتخاب جوابها ابتدا از سطوح با شماره کمتر استفاده می‌گردد. در صورتی که بین دو جواب که در یک سطح قرار دارند، امکان انتخاب وجود داشته باشد، از معیار فاصله ازدحام استفاده می‌گردد، هر چه مقدار این معیار برای جواب‌های موجود در یک سطح بیشتر باشد، اولویت آن جواب جهت انتخاب بالاتر است.

## نتایج حل مدل

جهت حل مدل ارائه شده، مسائل نمونه مختلف طراحی و حل شده است. مشخصات مسائل نمونه با تعداد گره و تعداد کامیون نشان داده شده است. ابتدا، مسائل نمونه با اندازه کوچک با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات و رویکرد محدودیت اپسیلون حل گردید و سپس کلیه مسائل (اندازه کوچک و بزرگ) توسط دو الگوریتم انبوه ذرات و ***NSGA-II*** حل و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

**شاخص‌های مقایسه‌ای**

ایده‌آل یک ماتریس با دو خانه است که مقدار خانه اول برابر است با کمترین مقدار بین مقادیر تابع هدف اول جوابها و مقدار خانه دوم برابر است با کمترین مقدار بین مقادیر تابع هدف دوم جواب‌ها.

شاخص کیفیت- این شاخص به مقایسه کیفیت جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط هر روش می‌پردازد. در واقع همه جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط هر ۲ روش را با هم سطح بندی کرده و مشخص می‌کند که چند درصد جواب‌های سطح یک متعلق به هر روش می‌باشد. هر چه این درصد بالاتر باشد، الگوریتم، از کیفیت بالاتری برخوردار است (فیروزی و همکاران، ۲۰۲۴).

**فاصله از جواب ایده‌آل**- این شاخص برابر است با مجموع فاصله اقلیدسی جوابها از جواب ایده‌آل. در این تحقیق جواب

**شاخص Spacing** – این معیار، یکنواختی توزیع جواب‌های پارتوی بدست آمده را در مرز جواب‌ها مورد آزمایش قرارمی‌دهد. این شاخص بصورت زیر تعریف می‌شود (فیروزی و همکاران، ۲۰۲٤)

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |d_{mean} - d_i|}{(N-1) \times d_{mean}}$$

در رابطه فوق، $d_i$ نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب غیر مغلوب یافت شده مجاور بوده و $d_{mean}$ معرف میانگین مقادیر $d_i$ می‌باشد.

**شاخص پراکندگی**– این شاخص برای تعیین میزان جواب‌های غیرمغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه استفاده می‌گردد. تعریف شاخص پراکندگی بصورت زیر است (فیروزی و همکاران، ۲۰۲٤)
(۵۰)

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \max(\|x_t^i - y_t^i\|)}$$

در رابطه فوق، $\|x_t^i - y_t^i\|$ نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب مجاور $x_t^i$ و $y_t^i$ بر روی مرز بهینه است.

## تنظیم پارامترهای مدل و الگوریتم

جهت حل مسائل نمونه توسط روش‌های حل، پارامترهای زیر در نظر گرفته شده است.

### پارامترهای مدل

–شبکه ندهای مقصد و مبدا برای کامیونها، بصورت تصادفی تولید می‌شود.
–زمان ترک مبدا و رسیدن به مقصد بصورت تصادفی تولید می‌شود. لازم به ذکر است برای هر وسیله نقلیه، زمان رسیدن به مقصد، براساس زمان ترک مبدا، سرعت وسیله نقلیه و مسافت، مشخص می‌گردد.
–هزینه سوخت به ازای هر لیتر برابر با ۳۰۰۰ تومان در نظر گرفته شده است.
–سرعتهای ممکن بر روی یال‌ها، ۵۵، ۷۵ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت هستند و نرخ ذخیره سوخت برای این سرعتها به ترتیب برابر با ۰,۱، ۰,۱۵ و ۰,۱۸ در نظر گرفته شده است.
–حداکثر تعداد وسایل نقلیه در پلاتون برای مسائل مختلف، برابر با نصف تعداد وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است.

### پارامترهای الگوریتم

– اندازه جمعیت و تعداد تکرار الگوریتم برای PSO و NSGA-II به ترتیب برابر با ۳۰۰ و ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.
– نرخ جهش و تقاطع در اجرای الگوریتم NSGA-II به ترتیب ۰,۱ و ۰,۹ تنظیم گردیده است.

### مقایسه نتایج PSO و محدودیت اپسیلون

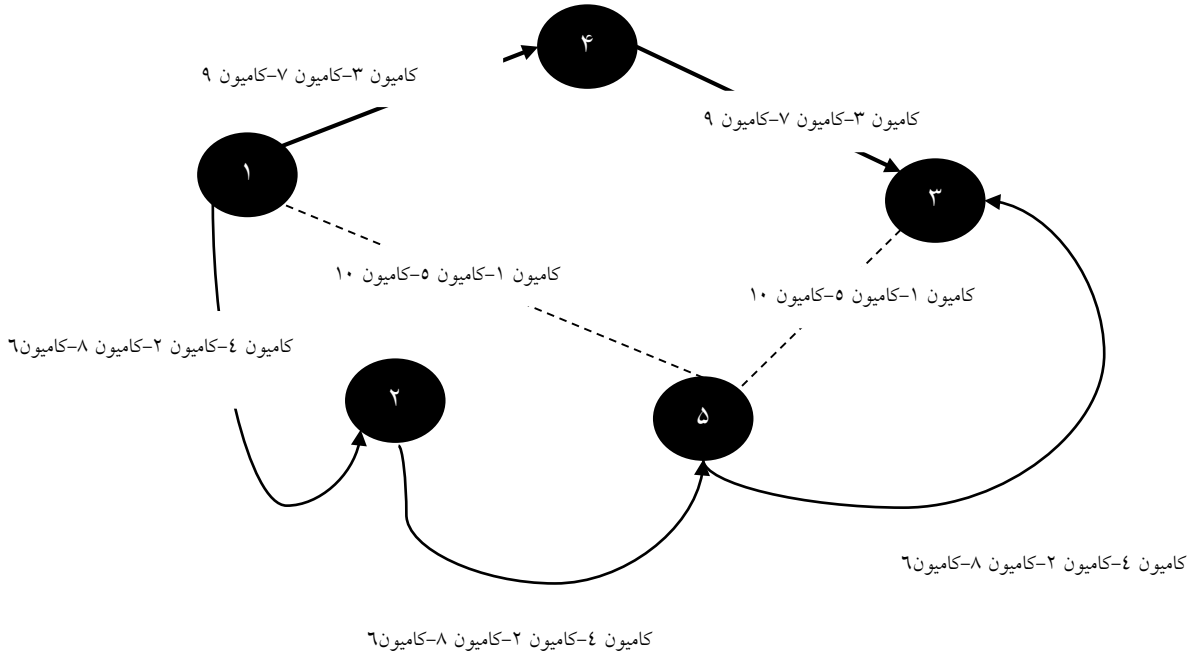
تعدادی مسئله نمونه با اندازه‌های مختلف توسط الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه و رویکرد محدودیت اپسیلون حل گردید.

**جدول ۳. مقایسه الگوریتم انبوه ذرات و رویکرد محدودیت اپسیلون**

| ردیف | ۵ کامیون | | ۱۰ کامیون | | ۲۰ کامیون | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف اول | تابع هدف دوم |
| ۱ | 1053.633 | 699.848 | 2106.936 | 1157.570 | 4917.518 | 2643.883 |
| ۲ | 1014.417 | 702.875 | 2003.838 | 1158.582 | 4674.158 | 2647.721 |
| ۳ | 975.201 | 702.875 | 1900.740 | 1161.458 | 4430.799 | 2647.759 |
| ۴ | 935.984 | 705.881 | 1797.642 | 1161.458 | 4187.439 | 2651.608 |
| ۵ | 893.887 | 714.439 | 1694.544 | 1162.963 | 3944.079 | 2651.608 |
| ۶ | 700.686 | 1116.0266 | 1179.054 | 1699.231 | 2727.279 | 3720.031 |

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، برای هر مسئله، جوابها بصورت غیرمغلوب هستند و در یک سطح می‌باشند. از آنجایی که نرم افزار گمز قادر به یافتن مرز بهینه برای مدل دو هدفه ارائه شده است، می‌توان گفت که مدل شدنی بوده و معتبر می‌باشد. در جدول (٤) مشاهده می‌شود که شاخص کیفیت و پراکندگی الگوریتم انبوه ذرات در همه موارد از رویکرد محدودیت اپسیلون بیشتر است که این به دلیل تعداد بیشتر جوابهای خروجی این الگوریتم است. از طرفی شاخص یکنواختی برای رویکرد محدودیت اپسیلون بهتر از الگوریتم انبوه ذرات است. از طرفی همانطور که مشاهده می‌شود، درصدی از جواب‌های باکیفیت در استخر جواب ترکیبی دو رویکرد، متعلق به رویکرد محدودیت اپسیلون هستند که این نشان دهنده همگرایی الگوریتم انبوه ذرات به سمت جواب بهینه است.

لذا می‌توان ادعا کرد که الگوریتم انبوه ذرات پیشنهادی قادر به حل مدل بوده و معتبر است. همچنین در ادامه، یک نمونه از پلاتونیگ کامیونها پس از حل مسئله ۵ ند و ۱۰ کامیون ارائه شده است. در حل این مسئله، سه جوخه ۳، ٤ و سه تایی تشکیل شده است (شکل ۱).




**شکل۱. تشکیل پلاتون‌ها (۵ ند و ۱۰ کامیون)**

| prob | | الگوریتم انبوه ذرات | | | | | محدودیت اپسیلون | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Quality metric | Spacing metric | Diversity metric | MID | تعداد جواب‌های آرشیو پارتو | Quality metric | Spacing metric | Diversity metric | MID | تعداد جواب‌های آرشیو پارتو |
| 5 * 5 | 5 | 95.19 | 9.480 | 147.9 | 147.016 | 100 | 4.81 | 0. 815 | 55 | 297.755 | 6 |
| | 10 | 95.15 | 0.93 | 133.05 | 467.49 | 100 | 4.85 | 0.127 | 74.82 | 691.69 | 6 |
| | 20 | 95.24 | 0.49 | 157.62 | 1083 | 100 | 4.76 | 0.91 | 112.003 | 1599 | 6 |

**جدول ٤. مقادیر توابع هدف حاصل از رویکرد محدودیت اپسیلون (شبکه با ۵ ند)**

## مقایسه نتایج PSO و NSGA-II

در ادامه جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم انبوه ذرات، نتایج این الگوریتم با نتایج الگوریتم شناخته شده NSGA-II مقایسه شده است. در این راستا، تعدادی مسائل نمونه دیگر نیز انتخاب شده و توسط دو الگوریتم PSO و NSGA-II حل شده و نتایج دو الگوریتم براساس شاخص‌های مقایسه‌ای مطرح شده، مقایسه گردیده است.

**جدول ۵. مقایسه عملکرد الگوریتم انبوه ذرات و NSGA-II**

| prob | | PSO | | | | | NSGA-II | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Quality metric | Spacing metric | Diversity metric | MID | تعداد جواب‌های آرشیو پارتو | Quality metric | Spacing metric | Diversity metric | MID | تعداد جواب‌های آرشیو پارتو |
| 5x5 | 5 | 94.44 | 0.87 | 1356.99 | 176.29 | 85 | 5.56 | 0.85 | 1207.93 | 179.37 | 58 |
| | 10 | 97.17 | 1.01 | 1487.83 | 125.44 | 70 | 2.83 | 0.52 | 1223.94 | 134.39 | 55 |
| | 20 | 73.81 | 1.26 | 1671.43 | 184.11 | 75 | 26.19 | 0.64 | 1365.28 | 190.75 | 103 |
| 10x10 | 50 | 97.40 | 1.19 | 1828.07 | 189.38 | 112 | 2.60 | 0.52 | 1381.42 | 195.78 | 128 |
| | 100 | 88.97 | 1.28 | 2021.15 | 198.22 | 97 | 11.03 | 0.55 | 1382.64 | 201.38 | 143 |
| | 200 | 72.93 | 1.13 | 2336.75 | 153.58 | 85 | 27.07 | 0.91 | 1386.26 | 162.40 | 63 |
| 20x20 | 100 | 78.35 | 0.82 | 2469.29 | 98.57 | 133 | 21.65 | 0.80 | 1758.93 | 105.54 | 107 |
| | 200 | 86.41 | 1.22 | 2495.09 | 120.34 | 109 | 13.59 | 0.66 | 1820.82 | 125.15 | 97 |
| | 500 | 98.73 | 1.27 | 2755.80 | 223.50 | 105 | 1.27 | 0.98 | 2048.61 | 229.61 | 51 |

نتایج مقایسه‌ای در جدول (۵) نشان می‌دهند که الگوریتم انبوه ذرات در همه موارد توانایی بالاتری برای تولید بیشتر جواب‌های باکیفیت‌تر نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. همچنین شاخص فاصله با جواب ایده‌آل نشان می‌دهد که در کلیه موارد، جوابهای تولید شده توسط الگوریتم انبوه ذرات فاصله کمتری با جواب ایده‌آل نسبت به الگوریتم NSGA-II دارند. سایر نتایج حاکی از آن است که الگوریتم PSO قادر به تولید جوابهای با پراکنده‌گی بالاتری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد یا به عبارتی الگوریتم نهنگ توانایی بیشتری برای اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. همانطور که از جداول فوق مشاهده می‌شود، الگوریتم NSGA-II جوابهایی با یکنواختی بالاتری نسبت به الگوریتم انبوه ذرات تولید می‌کند.

## ۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل دو هدفه بهینه سازی جوخه کامیون‌ها در حمل و نقل جاده‌ای با در نظر گرفتن هزینه سوخت، سرعتهای چندگانه و پنجره زمانی مورد بررسی قرار گرفت و مدل ریاضی دو هدفه برای آن ارائه شد.

از آنجایی که مسأله مورد بحث NP-Hard می‌باشد، روش‌های کارایی بر مبنای الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و الگوریتم انبوه ذرات برای حل آن ارائه شد. مدل مورد بررسی در این تحقیق بصورت دو هدفه طراحی شده است که تابع هدف اول کمینه سازی هزینه و تابع هدف دوم کمینه سازی زمان است. جهت بررسی اعتبار مدل، مدل مورد نظر برای سه مسئله نمونه با اندازه کوچک توسط الگوریتم انبوه ذرات در محیط نرم افزار متلب و رویکرد محدودیت اپسیلون در محیط نرم افزار گمز حل گردیده است. همانطور که گفته شد، برای مسئله مورد بررسی یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن همزمان دو هدف ارائه شده است. جهت حل مدل، الگوریتم فراابتکاری انبوه ذرات و الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی انبوه ذرات جهت به روزرسانی ذرات با عملگرهای الگوریتم ژنتیک ترکیب شد است. از آنجایی که مدل دارای دو هدف متضاد است، الگوریتم PSO بر پایه آرشیو پارتو طراحی گردیده‌اند، بعبارتی الگوریتم پیشنهادی در هر مرحله از روابط غیر مغلوب برای انتخاب جوابهای نزدیک مرز بهینه استفاده می‌کند. همچنین این الگوریتم از معیار پراکندگی نیز جهت تضمین جستجوی همه نقاط فضای جواب و جلوگیری از گیر کردن در یک بهینه محلی استفاده می‌کند. ویژگیهای الگوریتم طراحی شده تضمین می‌کند که الگوریتم در دستیابی به نقاط نزدیک بهینه سراسری موفق بوده و همگرا می‌باشد. مسائل نمونه آزمایشی طراحی گردیده و نتایج رویکرد محدودیت اپسیلون با نتایج PSO و همچنین نتایج دو الگوریتم بهینه‌سازی PSO و NSGA-II نیز با توجه به شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت، پراکندگی، یکنواختی و فاصله از جواب ایده ال حل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان دادند که اولا، مدل ریاضی ارائه شده شدنی و معتبر است و همچنین الگوریتم پیشنهادی انبوه ذرات به سمت جواب‌های بهینه همگرا است. از طرفی مقایسه نتایج الگوریتم‌های حل نشان داد، در همه موارد، الگوریتم انبوه ذرات دارای توانایی بالاتر جهت اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب و دستیابی به جوابهای نزدیک بهینه می‌باشد.

از منظر شاخص یکنواختی، الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم PSO بهتر عمل کرده است.

## ٦-مراجع


-Abdolmaleki, M., Shahabi, M., Yin, Y., & Masoud, N. (2021). Itinerary planning for cooperative truck platooning. *Transportation Research Part B: Methodological, 91-110.*
**doi:10.1016/j.trb.2021.08.016**

-Albin´ski, S., Crainic, T. G., & Minner, S. (2020). The Day-before Truck Platooning Planning Problem and the Value of Autonomous Driving.

-Azarkish, M., & Aghaeipour, Y. (2022). A fuzzy bi-objective mathematical model for multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows and simultaneous delivery and pick-up. *Asian J Basic Sci Res*, *4*(2), 01-3.

-Bhoopalam, A. K., Agatz, N. A., & Zuidwijk, R. A. (2020). Spatial and Temporal Synchronization of Truck Platoons. *SSRN Electronic Journal*, 1–42. **doi:10. 2139/ssrn.3741234**

-Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2020). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, *6*(2), 182-197.

-Larsen, R., Rich, J., & Rasmussen, T. K. (2019). Hub-based truck platooning: Potentials and profitability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 127, 249–264. **doi:10.1016/j.tre.2019.05.005**

-Harrington, Winston and Krupnick, Alan, Improving Fuel Economy in Heavy-Duty Vehicles (2012). Resources for the Future DP 12-02.

-Firouzi, O., Rezaian, J., Movhadi, M. M., Rashidi Komijan, A. (2024). Multi-Objective Modeling of the Supply Chain of the Hospital Waste Management Considering the Dimensions of Sustainability Accompanied by Fuzzy Set Theory, *Industrial Management Studies,* 21(71), 177-223.

-Patten, J., McAucliffe, B., Mayda, W., Tanguay, B., (2012). Review of aerodynamic drag reduction devices for heavy trucks and buses. Tech. rep., National Research Council Canada.

-Zabat, M., Stabile, N., Frascaroli, S., Browand, F., (1995). The aerodynamic performance of platoons: Final report. Tech. rep., California PATH project, *University of California Berkeley.*

-Bhoopalam, Anirudh Kishore & Agatz, Niels & Zuidwijk, Rob, (2018).Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research. Transportation Research Part B: Methodological, *Elsevier*, Vol. 107(C), 212-228.

-Boysen, N., Briskorn, D., & Schwerdfeger, S. (2018). The identical-path truck platooning problem. Transportation Research Part B: Methodological, 109, 26–39.
**doi:10.1016/j.trb.2018.01.006**

-European Commission, (2016).

-Eckhardt, J., Aarts, L., van Vliet, A., Alkim, T., (2016). European truck platooning challenge 2016, lessons learnt.

-Larsson, E., Sennton, G., & Larson, J. (2015). The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 60*, 258- 277.
-Zhang, W., Jenelius, E., Ma, X., (2017). Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty. *Transportation Research Part E 98,* 1–12.
-Zhang, Wei & Sundberg, Marcus & Karlström, Anders. (2018). Platoon coordination with time windows: an operational perspective. Transportation Research Procedia. 27. 357-364.
**doi:10.1016/j.trpro.2017.12.129**
-Larson, J., Kammer, C., Liang, K. -Y., & Johansson, K. H. (2013). Coordinated route optimization for heavy-duty vehicle platoons.*16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation.*
-Luo, Fengqiao & Larson, Jeffrey & Munson, Todd. (2018). Coordinated platooning with multiple speeds. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 90.* 213-225.
**doi:10.1016/j.trc.2018.02.011**
-Nourmohammadzadeh, Abtin & Hartmann, Sven. (2016). The Fuel-Efficient Platooning of Heavy Duty Vehicles by Mathematical Programming and Genetic Algorithm. 46-57.
**doi:10.1007/978-3-319-49001-4_4**
-Nourmohammadzadeh, Abtin & Hartmann, Sven. (2018). Fuel Efficient Truck Platooning with Time Restrictions and Multiple Speeds Solved by a Particle Swarm Optimisation: *7th International Conference,* TPNC 2018, Dublin, Ireland, December 12–14, 2018, Proceedings.
**doi:10.1007/978-3-030-04070-3_15**
-Tavakkoli-Moghaddam, R., Azarkish, M., & Sadeghnejad, A. (2010). A New Hybrid Multi-objective Pareto Archive PSO Algorithm for a Classic Job Shop Scheduling Problem with Ready Times. In Advanced Intelligent Computing. Theories and Applications: 6th International Conference on Intelligent Computing, Changsha, China, August 18-21, Proceedings, *Springer Science & Business Media.* Vol. 93, 60-61.
-VandeHoef, S. (2016). Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning. Licentiate thesis. *KTH Royal Institute of Technology.*
-Neubauer, Matthias & Schildorfer, Wolfgang. (2022). Towards Truck Platooning Deployment Requirements.
**doi:10.1007/978-3-030-88682-0_3**
-Varaiya, P. (1993). Smart cars on smart roads: Problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 38(2), 195–207.
-Xu, Min & Yan, Xiaoyuan & Yin, Yafeng. (2022). Truck routing and platooning optimization considering drivers' mandatory breaks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 143. 103809.*
**doi:10.1016/j.trc.2022.103809**
-Segata, M., Bloessl, B., Joerer, S., Dressler, F., Cigno, R. L., (2014). Supporting platooning maneuvers through ivc: An initial protocol analysis for the JOIN maneuver. In: 2014 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). *IEEE,* 130–137.
-Berenghem, C., Schladover, S., Coelingh, E., 2012. Overview of platooning systems. *In: Proceedings of the 19th ITS World Congress,* Oct 22-26, Vienna, Austria (2012).
-Janssen, R., Zwijnenberg, H., Blankers, I., de Kruijff, J., 2015. Truck platooning: Driving the future of transportation. *Tech. rep., TNO.*
-Liang, K.-Y., M˚artensson, J., Johansson, K. H., (2014). Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data. *In: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) June 8-11*, Dearborn, Michigan, USA. 1061–1068.
-Liang, K. Y., M˚artensson, J., Johansson, K. H., (2013). When is it fuel efficient for a heavy duty vehicle to catch up with a platoon In: 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control *The International Federation of Automatic Control September 4-7,* Tokyo, Japan, 738–743.
-Scora, G., Barth, M., (2006). Comprehensive modal emissions model (CMEM), version 3.01. User guide. Centre for Environmental Research and Technology. University of California, Riverside.
-Goel, A., (2014). Hours of service regulation in the United States and the 2013 rule change. *Transport Policy 33,* 48–55.
-Goel, A., Archetti, C., Savelsbergh, M., 2012. Truck driver scheduling in Australia. *Computers & Operations Research 39,* 1122–1132.
-Goel, A., Rousseau, L.-M., 2012. Truck driver scheduling in Canada. *Journal of Scheduling 15 (6),* 783–789.
-Goel, A., (2010). Truck driver scheduling in the European Union. *Transportation Science 44 (4),* 429–441.
-Brizzolara, D., Toth, A., 2016. The emergence of truck platooning. *In: Baltic Transport Journal, 3rd Edition.*
-Berger, A., (2016). Sharing gains and pains - service needs for safe and efficient platooning. *Tech. rep., Volvo Group Trucks Technology.*
-Meisen, P., Seidl, T., Henning, K., (2008). A data mining technique for the planning and organization of truck platoons. International Conference on Heavy Vehicles (HVParis 2008), Heavy Vehicle Transport Technology. *ISTE I& Wiley.*
-TNO, (2016). Truck platooning vision 2025.
-Nowakowski, C., Schladover, S. E., Lun, X.-Y., Thompson, D., Kailas, A., (2015). Cooperative adaptive cruise control (cacc) for truck platooning: Operational concept alternatives. *Tech. rep., California Partners for Advanced Transportation Technology UC Berkeley.*

-Zeng, Yikai & Wang, Meng. (2022). Decentralized coordination for truck platooning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 37*. **doi:10.1111/mice.12899**

-Luo, Fengqiao. (2022). Coordinated Vehicle Platooning with Fixed Routes: Adaptive Time Discretization, *Strengthened Formulations and Approximation Algorithms.* **doi:10.48550/arXiv.2205.11043**

-Luo, F., & Larson, J. (2022). A Repeated Route-then-Schedule Approach to Coordinated Vehicle Platooning: Algorithms, Valid Inequalities and Computation. *Operations Research, 70,* 2477–2495. **doi:10.1287/opre.2021.2126**

-Zhang, Zexi. (2023). The Truck Platooning Routing Optimization Model Based on Multicommodity Network Flow Theory. *Journal of Advanced Transportation.* 1-12. **doi:10.1155/2023/6906655.**

-Zhao, Boshuai & Leus, Roel. (2022). An improved decomposition-based heuristic for truck platooning. **doi:10.48550/arXiv.2210.05562**

# Multi-Objective Optimization of Truck Platooning Considering Time Window and Different Speeds

*Hossein Firoozi, Ph.D., Candidate, Faculty of Management, Islamic Azad University, Firouzkouh Branch, Iran.*

*Javad Rezaeian, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Management and Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Babol, Iran.*

*Alireza Rashidi Komijan, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Firouzkouh Branch, Iran.*

*Mohammad Mehdi Movahedi, Associate Professor, Department of Management, Islamic Azad University, Firouzkouh Branch, Iran.*

*E-mail: j.rezaeian@ustmb.ac.ir*

Received: April 2025- Accepted: November 2025

**ABSTRACT**

Platooning means moving trucks in a sequence on the road. In this method, a group of vehicles can safely and at high speed move together as a string, which can save fuel consumption, reduce greenhouse gas emissions, and use road capacity more efficiently. This is because a truck that is ahead of the other truck(s) has less air drag and less drag on the vehicles behind. Since in a platoon, the distance between vehicles is short and the vehicles move at high speed, an adaptive cruise control system and proper planning are needed to avoid collisions and ensure safety. The establishment and development of platooning in transportation systems with heavy vehicles is profitable and useful because it reduces the cost of fuel as well as the amount of carbon emissions by these vehicles.In this research, we seek to present a multi-objective optimization model for the truck platooning problem by considering several objectives. We also intend to use meta-heuristic algorithms based on Pareto archive to solve the model. In this article, first, a two-objective mathematical model is presented for the studied problem, and then multi-objective particle swarm algorithms, NSGA-II, and the epsilon constraint approach were used to solve the model. The model was solved for different sample problems and the results showed that the proposed particle mass algorithm has a higher ability to produce higher quality solutions and higher dispersion than the NSGA-II algorithm in all cases. Also, the NSGA-II algorithm produces solutions with higher uniformity in less time than the PSO algorithm.

**Keywords:** Rest of Drivers, Multi-Objective Optimization, Platooning of Trucks, Fuel Reduction