

استفاده از جستجوی همسایگی انطباقی برای حل مساله مسیریابی وسیله نقلیه سبز با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی سخت

ستاره مجیدی^۱، سیدمهدی حسینی مطلق^{۲*}، سعید یعقوبی^۳، عباس جوکار^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۴. دانشجوی دکتری صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

خلاصه

در اکثر مسایل کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه، هدف اصلی، کمینه کردن کل زمان سفر یا مسافت طی شده است. درحالی‌که مساله مسیریابی سبز علاوه بر اهداف ذکر شده، به مینیمم کردن هزینه‌های سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله دی اکسید کربن نیز می‌پردازد. در این مقاله نوعی از مساله مسیریابی سبز با هدف کاهش هزینه‌های سوخت و انتشار با استفاده از یکی از مدل‌های تخمین مصرف سوخت تحت عنوان مدل یکپارچه انتشار همراه با در نظر گرفتن محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی سخت توسعه داده شده است. در این مدل زمان سفر ثابت نبوده و سرعت وسایل نقلیه در حرکت بین مشتریان متغیر بوده و با توجه به پنجره زمانی مشتریان تعیین می‌شود. برای حل مدل، روشی ابتکاری مبتنی بر روش جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی ارائه شده است. که در این روش، یک الگوریتم ساخت جواب اولیه با معیار انتخاب مشتریان متناسب با محدودیت‌های گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی و با فرض متغیر بودن سرعت وسایل نقلیه ارائه شده است. نتایج آزمایشات عددی کارآمدی رویکرد ارائه شده را در حل این مساله تأیید می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۴/۰۳/۱۷

پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۱۹

کلمات کلیدی:

انتشار گازهای گلخانه‌ای

مسیریابی سبز

گذاشت و برداشت همزمان

روش حل ابتکاری جستجوی

همسایگی انطباقی

۱- مقدمه

محیطی نیز تأثیر بسزایی بر روی تصمیمات استراتژیک و حتی عملیاتی شرکت‌ها داشته است.

سیستم حمل و نقل یکی از بخش‌های صنعت بوده که سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات خطرناکی در محیط زیست به شکل مصرف انرژی و اسیدی سازی و ... دارد. بخش حمل و نقل تقریباً ۱۴٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود. در این بین حمل و نقل جاده‌ای سهم ۸۰ درصدی از انتشار این بخش را به خود اختصاص داده است. هدف اکثر شرکت‌های توزیع و حمل و نقل تا به امروز مینیمم کردن هزینه توزیع، زمان و افزایش قابلیت اطمینان شبکه بوده که بایستی با توجه به مشکلات زیست محیطی موجود بازنگری شده و اهداف سبز نیز در این حوزه وارد شود [۱].

تغییر الگوی آب و هوا یکی از تهدیدات عمده در زمین به‌شمار رفته و عامل گازهای گلخانه‌ای از قبیل دی‌اکسید کربن، مونو اکسید کربن و متان سهم عمده در این تهدیدات را شامل می‌شوند. اخیراً بسیاری از فعالان محیط زیست با نشان دادن تأثیر انتشارات این گازهای سمی در سلامت انسان و محیط زیست، توجه کافی دولت و افراد کسب و کار را به این موضوع خواستار شدند و بسیاری از شرکت‌ها درصدد کاهش انتشار آلودگی از عملیات خود برآمدند. مسائل و قوانین زیست

* نویسنده مسئول. سیدمهدی حسینی مطلق

تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۵۰۷۰؛ پست الکترونیکی: motlagh@iust.ac.ir

توسعه‌ای از مسأله کلاسیک مسیریابی با پنجره زمانی را معرفی کردند، که شامل مسیریابی تعدادی وسایل نقلیه برای خدمت به مجموعه‌ای از مشتریان و تعیین سرعت آن‌ها روی هر بخش از مسیر با هدف مینیمم کردن یک تابع مقایسه‌ای سوخت، انتشار و هزینه‌های راننده می‌باشد. در تخمین آلودگی، نویسندگان عواملی از قبیل سرعت، بار و پنجره‌های زمانی را با استفاده از تابع توان رانشی در نظر گرفتند. آن‌ها فرض کردند که در یک سفر وسیله نقلیه تمام پارامترها روی کمان داده شده ثابت می‌ماند، اما بار و سرعت از کمانی به کمان دیگر تغییر می‌کند. مدل آن‌ها مقدار کل انرژی صرف شده روی کمان، که مستقیماً به مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل می‌شود را تخمین می‌زند. نتایج محاسباتی گزارش می‌دهد که با استفاده از رویکرد ارائه شده، صرفه‌جویی انرژی بالای ۱۰٪ نسبت به زمانی که پنجره‌های زمانی در کار باشد و ۴٪ در زمانی که واریانس تقاضا بالا است. فولین و همکاران [۸] یک مسأله CVRP با معیار محیط زیستی ارائه کرده و اثرات پیچیده تری مانند سر و صدا، تراکم را در نظر گرفته است.

زایو و همکاران [۹] نرخ مصرف سوخت را در VRP ظرفیت‌دار مطالعه کرده و مسأله را تحت عنوان مسأله FCVRP معرفی کردند. برای تخمین مصرف سوخت، نویسندگان از یک مدل رگرسیون بر پایه داده‌های آماری ارائه شده توسط وزارت، حمل‌ونقل و توریست ژاپن استفاده کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی ارائه کرده و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسأله ارائه کردند. اردوغان و میلر هوکس [۱۰] نیز یک مسأله مسیریابی سبز را فرموله کردند. دمیر و همکاران [۱۱] با ارائه روش جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی مدل PRP ارائه شده در مقاله بکتارش و لاپورت [۷] را حل نمودند. با توجه به نتایج آن‌ها، کاهش انتشار CO₂ در حدود ۱۰٪ است. رامس و همکاران [۱۲] نواحی و مسیرهای خدمتی را بررسی کردند، که انتشار CO₂ از سیستم حمل و نقل با محصولات و دپوهای چندگانه را مینیمم می‌کند. با توجه به نتایج آن‌ها، با مقایسه انتشار CO₂ از سیستم جاری با ارائه شده، اگر شرکت نواحی خدمت و مسیرهایش را دوباره ساماندهی کند، یک کاهش ۲۳٪ به دست می‌آید. با همین نواحی خدمت، کل صرفه‌جویی می‌تواند تا ۲۰٪ باشد.

طاهها [۱۳] یک روش حل دقیق برای دسته‌ای از مسائل مسیریابی سبز ارائه کردند. کوپفر و همکاران [۱۴] مسأله مینیمم کردن انتشار مسیریابی وسیله نقلیه با کلاس‌های وسایل نقلیه معرفی کردند. مدل به‌جای مسافت طی شده، مصرف سوخت را همراه با امکان استفاده از چندین نوع وسیله نقلیه مینیمم می‌کند. آن‌ها تابع هدف مینیمم کردن مسافت را با تابع مصرف سوخت خطی با در نظر گرفتن بار جایگزین کردند. دمیر و همکاران [۱۵] مسأله مسیریابی آلودگی دو هدفه را با کاهش میزان انتشار و مسافت طی شده بررسی کرده‌اند. نویسندگان با معرفی مدل PRP، چند هدفه موازنه‌ای بین مصرف سوخت و زمان رانندگی را با استفاده از مدل یکپارچه انتشار بررسی کردند.

از آنجایی که حمل‌ونقل یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت بوده و سهم کثیری در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، لزوم توجه به راه‌های کاهش آلودگی از این بخش حائز اهمیت است. بدین ترتیب در مسأله مسیریابی وسیله نقلیه که یکی از مهم‌ترین مسائل برنامه‌ریزی عملیاتی در حوزه حمل و نقل شناخته می‌شود، توجه به مسائل سبز در این حوزه حائز اهمیت بوده و می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش میزان انتشار داشته باشد. در بخش ۲، به بررسی و مرور مسائل مسیریابی سبز با هدف کاهش مصرف سوخت پرداخته شده است. در بخش ۳ به معرفی یکی از پرکاربردترین مدل‌های تخمین مصرف سوخت مورد استفاده در مسیریابی پرداخته شده است. در بخش ۴، مدل ریاضی مسأله مسیریابی آلودگی توسعه داده شده است. در بخش ۵ رویکرد ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی انطباقی برای مسأله توسعه داده شده و در بخش ۶ با انجام آزمایشات بر روی الگوریتم ارائه شده، کیفیت الگوریتم مورد ارزیابی و نتایج عددی آن ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

در این بخش مروری بر دو دسته از مسائل مسیریابی سبز و مسیریابی با گذاشت و برداشت انجام شده است. در حوزه مسائل مسیریابی سبز، پالمیر [۲] یک مدل یکپارچه مسیریابی و انتشار کربن دی‌اکسید برای وسایل نقلیه حمل کالا توسعه داده و نقش سرعت را در کاهش انتشار تحت سناریوهای تراکم و پنجره زمانی بررسی کرده و صرفه‌جویی در حدود ۵٪ گزارش شده است. در مدل پالمیر تأثیر بار در نظر نگرفته شده است. کارا و همکاران [۳] مسأله مینیمم کردن انرژی در مسیریابی را معرفی کرده که در آن تابع هدف مینیمم کردن بار وزنی (بار ضرب در مسافت) به جای مسافت است. ولی به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر سایر فاکتورهای مؤثر بر مصرف انرژی از قبیل سرعت، مقاومت هوا، تخمین درستی از انرژی به حساب نمی‌آید. میدن و همکاران [۴] یک مدل مسیریابی و زمانبندی وسیله نقلیه با پنجره زمانی که در آن سرعت رابطه غیرخطی با زمان سفر دارد. اوبدا و همکاران [۵] یک مطالعه موردی را بررسی کردند که هدف، مینیمم کردن مسافت و انتشار آلودگی است. نتایج نشان داد که مسیرهای برگشت در کنترل انتشار مؤثرترند. به همین دلیل به شرکت‌ها پیشنهاد می‌شود که برای افزایش بهره‌وری مصرف سوخت و کاهش اثرات محیط زیست به مسیرهای برگشت توجه کنند. اولین مقاله‌ای است که مینیمم کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مدل مسیریابی وسیله نقلیه با مسیر برگشت وارد کرده است. سوزوکی [۶] مدلی ارائه کرده است که نشان می‌دهد صرفه‌جویی مشخص در مصرف سوخت و انتشار CO₂ با تحویل کالاهای سنگین در بخش‌های اولیه دور و تحویل کالاهای سبک در بخش‌های بعدی تر امکان‌پذیر است. بدین صورت که مسافتی که بار سنگین طی می‌شود، مینیمم شود. بکتاش و لاپورت [۷] یک مسأله مسیریابی آلودگی (PRP)

۳- توسعه مدل مسیریابی سبز با محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی

در این مقاله از دو مقاله پایه دمیر و همکاران [۱۱] و فن برای توسعه مدل استفاده شده است. در این مقاله، مساله مسیریابی و زمانبندی سبز با فرض هر دو نوع تقاضای گذاشت و برداشت برای مشتریان و خدمت دهی آن به صورت همزمان و هم چنین در نظر گرفتن پنجره زمانی برای خدمت به مشتریان مطرح شده است. هدف مساله کاهش هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت و انتشار گاز CO₂ بوده که با استفاده از یکی از دقیق‌ترین مدل‌های تخمین مصرف سوخت وسایل نقلیه به دست می‌آید. عوامل بسیاری در میزان مصرف سوخت مؤثر بوده که میزان بار حمل شده توسط وسایل نقلیه و میزان سرعت مهم‌ترین آن‌ها به شمار می‌آیند. بدین ترتیب این عوامل در مدل به صورت متغیرهای تصمیم فرض شده‌اند.

۳-۱ - تخمین مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای

مقدار انتشار آلودگی از وسیله نقلیه به فاکتورهایی از قبیل سرعت، شتاب، میزان بار، نوع جاده بستگی دارد. مدل‌های بسیاری بر پایه شبیه‌سازی و تحلیل پارامتریک و .. برای پیش‌بینی مقدار مصرف سوخت و نرخ‌های انتشار ارائه شده است.

برای نیل به هدف کاهش انتشار CO₂ در محیط و کاهش مصرف سوخت ابتدا نیاز به روشی برای محاسبه میزان مصرف سوخت وسایل نقلیه به طرز دقیق می‌باشد. یک از روش‌های دقیق و کارآمد برای تخمین مصرف سوخت، مدل میکروسکوپیکی تحت عنوان مدل یکپارچه انتشار است. مدل یکپارچه انتشار (CMEM) برای وسایل نقلیه سنگین توسط بارث و همکاران [۲۳] توسعه یافت. مدل شامل سه ماژول توان موتور، دور موتور و نرخ مصرف سوخت است.

توان موتور: ماژول توان موتور به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$P_{tract} = ((Ma + Mg \sin \theta + 0.5C_d \rho Av^2 + MgC_r \cos \theta) v) / 1000 \quad (1)$$

P_{tract} توان رانشی (کیلوژول بر ثانیه) مورد نیاز برای حرکت وسیله نقلیه بوده که از مجموع ۴ نوع توان حرکتی (حرکت رو به جلو، مقابله با شیب جاده، مقابله با نیروی مقاومت هوا و مقابله با نیروی مقاومت غلتشی) تشکیل می‌شود. در معادله بالا v سرعت وسیله نقلیه (متر بر ثانیه)، a شتاب وسیله نقلیه (متر بر مجذور ثانیه)، M وزن وسیله نقلیه (کیلوگرم)، g ثابت گرانشی زمین (متر بر مجذور ثانیه)، θ شیب جاده (رادیان)، ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب) و A ناحیه سطح رو به روی وسیله نقلیه (متر مکعب) می‌باشد. C_d ثابت مقاومت آیرودینامیک بوده که به نوع طراحی بدنه وسیله نقلیه بستگی دارد و C_r ثابت مقاومت غلتشی چرخ‌ها است. در نهایت توان خروجی موتور با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

در حوزه مسائل مسیریابی با گذاشت و برداشت، کاتای [۱۶]، یک تقسیم‌بندی از انواع مسائل مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با گذاشت و برداشت ارائه داد که شامل ۳ نوع از مسائل می‌باشند که عبارتند از: اول تحویل، سپس برداشت، گذاشت و برداشت مختلط و گذاشت و برداشت همزمان.

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان از جمله مسائلی است که در عمل کاربرد فراوانی دارد. بسیاری از موقعیت‌های عملی وجود دارد که مشتریان نیازمند خدمت‌دهی همزمان گذاشت و برداشت می‌باشند. به بیان دیگر تحویل و برداشت باید به طور همزمان در یک توقف صورت پذیرد.

فن [۱۷]، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان مبتنی بر رضایت مشتری را مدنظر قرارداد. این مسئله بر پایه پنجره‌های زمانی در مکان هر مشتری می‌باشد که رضایت مشتری با میزان انتظار مشتری برای وسیله نقلیه از زمان شروع بازه زمانی ارتباط عکس دارد. هدف این مساله کاهش مسیر وسایل نقلیه به منظور کاهش هزینه و افزایش رضایت مشتریان به منظور بهبود کیفیت سرویس‌دهی می‌باشد.

پترسون و روپکه [۱۸]، مسئله گذاشت و برداشت با تخلیه و بارگیری همزمان را ارائه نمودند. این مسئله شامل تقاضاهای برداشت، تحویل و برداشت و تحویل است. آن‌ها الگوریتم جستجوی همسایگی گسترده را برای حل این مسئله پیشنهاد دادند.

کوهیلو [۱۹] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت را در حالتی که برداشت‌ها انتخابی است، در نظر گرفتند. در مساله مسیریابی وسایل نقلیه با تحویل و برداشت انتخابی تحویل‌ها باید به مجموعه‌ای از مشتریان صورت گیرد و کالاهای برداشتنی باید جمع‌آوری شود. اگرچه برداشت‌ها اجباری نیست، سودآور می‌باشد.

ونگ و کو [۲۰] مساله مسیریابی وسایل نقلیه با تقاضا احتمالی و گذاشت و برداشت همزمان را مورد بررسی قرار داده و یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل ارائه دادند.

ونگ و چن [۲۱] به بررسی و حل مساله مسیریابی وسیله نقلیه با تقاضای گذاشت و برداشت همزمان به همراه در نظر گرفتن پنجره زمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند.

ستاک و همکاران [۲۲] یک مساله مکان‌یابی و مسیریابی چند دپویی ظرفیت‌دار با برداشت و تحویل همزمان ارائه داد که در آن دو روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک گسسته و پیوسته برای حل مدل ارائه کرده‌اند.

همان‌طور که از مرور مقالات مشاهده می‌شود، در اکثر مقالات موجود در ادبیات مسیریابی سبز، از محدودیت‌های مساله مسیریابی از قبیل وسیله نقلیه ظرفیت‌دار و پنجره زمانی استفاده شده است. مساله مسیریابی سبز در حالت در نظر گرفتن دو نوع تقاضای گذاشت و برداشت برای مشتریان که در بسیاری از مسائل توزیع در دنیای واقعی مورد نیاز است همراه با فرض پنجره زمانی در نظر گرفته نشده است.

$$F_{ij} = FR(t) * t_{ij} = FR(t) * \frac{d_{ij}}{v_{ij}}$$

$$= \omega * \gamma * \mu(a_{ij} + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij})$$

$$* M_{ij} * d_{ij} + 0.5 C_d \rho A v_{ij}^2 * d_{ij} + \omega * \gamma$$

$$* kNV * d_{ij} / v_{ij} \quad (6)$$

که در آن میزان مسافت و v_{ij} مقدار سرعت بین گره i و j است. مقدار M_{ij} جرم وسیله نقلیه در طی کمان (i, j) بوده که برابر با جرم خالص وسیله نقلیه به علاوه بار حمل شده در طی کمان (i, j) به صورت $(Mv + Q_{ij})$ است. در معادله بالا $\mu = 1/1000 \eta_{tf} \eta$ می‌باشد.

قسمت اول معادله ارتباط انرژی مصرفی با میزان بار حمل شده توسط وسیله نقلیه بیان می‌کند و به این نکته تأکید دارد که گره‌هایی که تقاضای تحویل زیادتری دارند ابتدای مسیر برآورد شده و وسیله نقلیه مسافت کمتری را با بار سنگین طی کند. قسمت دوم و سوم معادله نقش سرعت را در میزان مصرف سوخت نشان می‌دهد که به ترتیب استفاده از سرعت خیلی زیاد و سرعت خیلی کم را مینیمم می‌کند.

سایر پارامترهای مفروض در مدل:

U_{ij} تقاضای برداشت شده تا گره i و حمل شده در کمان (i, j)

W_{ij} تقاضای تحویل داده شده تا گره i و حمل شده در کمان (i, j)

C_f هزینه هر لیتر سوخت مصرفی

C_e هزینه انتشار هر لیتر گاز CO_2 منتشر شده به معنی هزینه اجتماعی ناشی از انتشارات در محیط

v_l کمترین مقدار مجاز برای سرعت وسیله نقلیه

v_m بیشترین مقدار مجاز برای سرعت وسیله نقلیه

متغیرهای تصمیم:

X_{ij} اگر وسیله نقلیه از i به j سفر کند برابر با یک در غیر این صورت برابر صفر

Q_{ij} میزان بار وسیله نقلیه قبل از رسیدن به j بعد از i

y_i زمان شروع خدمت در گره i

v_{ij} مقدار سرعت در کمان (i, j)

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح GVRPSPDTW به صورت زیر است:

$$\min Z = \sum_j \sum_i (C_f + C_e) (a_{ij} + g \sin \theta_{ij} + C_r \cos \theta_{ij}) (Mv + Q_{ij}) \omega \gamma \mu d_{ij} X_{ij} \quad (7)$$

$$P = P_{tract} / \eta_{tf} + P_{acc} \quad (2)$$

P خروجی توان موتور (کیلووات)، η_{tf} بازده زنجیره انتقال قدرت (نوعا ۰.۸)، و P_{acc} مقدار توان اضافی برای عملکرد تجهیزات جانبی وسیله نقلیه مانند استفاده از تهویه هوا (نوعا ۰) است.

دور موتور: ماژول دیگر در محاسبه میزان سوخت مصرفی دور موتور بوده که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{n_d n_g v}{R} \quad (3)$$

N دور موتور (در واحد دور بر ثانیه، نوعا بین ۱۶ و ۴۸)، n_g نسبت دنده g ($g=1,2,3,4,5$)، n_d نسبت دیفرانسیل و R شعاع چرخ می‌باشد.

نرخ مصرف سوخت: با استفاده از روابط (۲) و (۳) نرخ مصرف سوخت به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$FR(t) = \left(kNV + \frac{p}{\eta} \right) * \gamma * \omega \quad (4)$$

که در آن k عامل اصطکاک موتور (کیلوژول بر دور بر ثانیه)، V میزان جابه‌جایی موتور (لیتر، نوعا بین ۲ و ۸) و η پارامتر بازده برای موتورهای دیزل (نوعا ۰.۴) است. γ (گرم بر کیلوژول) مصرف سوخت ویژه بوده که به مقدار دور موتور وابسته است و ω ضریب تبدیل گرم بر ثانیه به لیتر بر ثانیه می‌باشد.

در نهایت کل مصرف سوخت (لیتر) برابر با رابطه (۵) است:

$$F = \int_0^T FR(t) dt \quad (5)$$

۳-۲- دو مدل ریاضی برای مسئله مسیریابی سبز

در این مساله یک گراف کامل و مستقیم $G = (V, A)$ فرض شده است که در آن $V = \{0, 1, \dots, N\}$ مجموعه گره‌ها، 0 گره دپو، $V_c = V / \{0\}$ مجموعه مشتریان و $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$ مجموعه کمان‌ها است. یک ناوگان همگون از m وسیله نقلیه با ظرفیت C به مشتریان خدمت کرده و تقاضای مشتریان شامل هر دو نوع گذاشت و برداشت بوده و به ترتیب برابر با dd_i و pd_i می‌باشد که به صورت همزمان روی هر گره اعمال می‌شود. هر مشتری دارای پنجره زمانی مشخص $[a_i, b_i]$ برای خدمت بوده که هر وسیله نقلیه باید در این بازه شروع به خدمت کند. زود رسیدن وسیله نقلیه مجاز بوده ولی برای شروع خدمت باید منتظر بماند. زمان خدمت هر وسیله نقلیه روی هر گره برابر با S_i می‌باشد.

در تابع هدف از مدل ریاضی تخمین مصرف سوخت مطرح شده در بخش ۳-۱ استفاده شده است که تابعی از بار، سرعت، شتاب و مشخصات وسیله نقلیه و شیب جاده می‌باشد. میزان مصرف سوخت در کمان (i, j) برابر با معادله (۶) است:

پایین مجاز برای سرعت وسایل نقلیه در هر کمان را نشان می‌دهد. در جدول (۱) مقادیر فرض شده برای پارامترهای مورد استفاده در تابع هدف (مدل مصرف سوخت) از مقاله دمیر و همکاران [۱۱] آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای مدل مساله

پارامترها	مقادیر
Mv (kilogram)	۶۳۵۰
k (kiloJoule/rev/second)	۰٫۲
N (rev/second)	۳۳
V (liters)	۵
γ (gram/kiloJoule)	۰٫۰۲۲۷
η_{tf}	۰٫۴
η	۰٫۹
ρ (kilogram/meter ³)	۱٫۲۰۴۱
g (meter/second ²)	۹٫۸۱
A (meter ²)	۳٫۹۱۲
C_d	۰٫۷
C_r	۰٫۰۱
C_f (\$)	۱
C_e (\$)	۰٫۴
ω	۰٫۰۰۱۳۵
v_l (meter/second)	۵
v_m (meter/second)	۲۵

۴- الگوریتم پیشنهادی بر مبنای جستجوی بزرگ همسایگی انطباقی برای مساله مسیریابی سبز

جستجوی بزرگ همسایگی انطباقی (ALNS) توسعه‌ای از الگوریتم جستجوی بزرگ همسایگی (LNS) است که توسط شاو [۲۴] ارائه شده و بر پایه ایده بهبود تدریجی جواب اولیه با استفاده از عملگرهای تخریب و ایجاد است. به عبارت دیگر LNS شامل یک سری از حرکات برداشت و گذاشت بوده و جستجوی همسایگی با استفاده از برداشتن چند مشتری از جواب و دوباره قرار دادن آن‌ها در مسیر به دست می‌آید. ابتکاری LNS برای مسائل مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی نتایج خوبی را ارائه کرده است. هم چنین این ابتکاری برای مسائلی با دو نوع تقاضای گذاشت و برداشت نیز به خوبی عمل کرده است [۲۵].

برخلاف مساله جستجوی بزرگ همسایگی، الگوریتم ALNS از چندین عملگر برداشت و گذاشت مشتریان در حین جستجو همسایگی استفاده می‌کند. ابتدا الگوریتم با یک جواب اولیه شدنی شروع کرده و این جواب توسط عملگرهای برداشت و گذاشت تغییر کرده و جواب جدید تولید شده در صورت بهبود در تکرار بعد به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. از موارد مهم در ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری، ساخت جواب اولیه مناسب و استفاده از

$$+ \sum_j \sum_i (C_f + C_e)(0.5AC_d\rho) v_{ij}^2 \omega \gamma \mu_{ij} X_{ij} + \sum_j \sum_i (C_f + C_e) \omega \gamma k N V d_{ij} X_{ij} / v_{ij}$$

s.t.

$$\sum X_{ij} = 1 \quad \forall j \in v_c \quad (8)$$

$$\sum_{i \in v} X_{0j} = m \quad (9)$$

$$\sum_{i \in v_c} X_{ij} - \sum_{i \in v_c} X_{ji} = 0 \quad \forall j \in v, i \neq j \quad (10)$$

$$\sum_{i \in v} U_{ij} - \sum_{i \in v} U_{ji} = pd_i \quad \forall i \in v_c \quad (11)$$

$$\sum_{j \in v} W_{ji} - \sum_{j \in v} W_{ij} = dd_i \quad \forall i \in v_c \quad (12)$$

$$U_{ij} + W_{ij} \leq C * X_{ij} \quad \forall i, j \in v, i \neq j \quad (13)$$

$$Q_{ij} = U_{ij} + W_{ij} \quad \forall i, j \in v \quad (14)$$

$$y_i + \frac{d_{ij}}{v_{ij}} + S_i - y_j \leq M(1 - X_{ij}) \quad \forall i \in v \quad (15)$$

$$\sum U_{0j} = 0, \quad (16)$$

$$\sum_i W_{i0} = 0, \quad (17)$$

$$U_{ij} \leq (C - pd_j) X_{ij} \quad \forall i \in v, j \in v_c \quad (18)$$

$$W_{ij} \leq (C - dd_i) X_{ij} \quad \forall i \in v_c, j \in v \quad (19)$$

$$U_{ij} \geq pd_i X_{ij} \quad \forall i \in v_c, j \in v \quad (20)$$

$$W_{ij} \geq dd_j X_{ij} \quad \forall i \in v, j \in v_c \quad (21)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in v_c \quad (22)$$

$$v_l \leq v_{ij} \leq v_m \quad \forall i, j \in v \quad (23)$$

رابطه (۷) تابع هدف مساله و هزینه‌های سوخت و انتشار را شامل می‌شود. محدودیت (۸) بیان می‌کند که به هر گره فقط یک کمان وارد شود و محدودیت (۹) تعداد وسایل نقلیه خروجی از دپو را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۰) تعادل جریان را در گره‌ها نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) و (۱۲) مربوط به تقاضای گذاشت و برداشت همزمان بوده و در محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند این مجموع تقاضا از ظرفیت تجاوز نکند. محدودیت (۱۴) مربوط به میزان بار حمل شده در هر کمان است. محدودیت (۱۵) محدودیت ساب تور بوده و مربوط به پنجره زمانی است. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که مجموع بارهای برداشت شده وسیله نقلیه که از دپو شروع به حرکت می‌کنند، برابر صفر باشد. محدودیت (۱۷) مانند محدودیت (۱۶) بوده و تضمین می‌کند مجموع بارهای تحویلی موجود در وسیله نقلیه در بازگشت به دپو برابر صفر شود. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۱) حدود متغیرهای U و W را مشخص می‌کند. محدودیت (۲۲) مربوط به رعایت پنجره زمانی مشتریان است. محدودیت (۲۳) حد بالا و

مشتری با معیار ظرفیت باقی مانده مشتری قبل از آن مقایسه می‌شود. RD ظرفیت باقی مانده وسیله نقلیه برای تقاضای گذاشت و RP ظرفیت باقی مانده وسیله نقلیه برای تقاضای برداشت می‌باشد.

$$RD(0) = C - \sum_{s \in T} pd_s \quad (26)$$

$$RD(q) = \min\{RD(PRI(q)), C - l_q\} \quad (q \in T) \quad (27)$$

$$RP(0) = C - \sum_{s \in T} dd_s \quad (28)$$

$$RP(q) = \min\{RP(SUI(q)), C - l_q\} \quad (q \in T) \quad (29)$$

در روابط بالا T مسیر مورد نظر، $PRI(q)$ گره قرار گرفته دقیقاً قبل از گره q و $SUI(q)$ گره قرار گرفته دقیقاً بعد از گره q می‌باشد. میزان بار حمل شده هنگام خروج از گره q است.

برای رعایت پنجره زمانی مشتریان، با توجه به فرض ثابت نبودن سرعت وسایل نقلیه، از رابطه ۳۰ استفاده می‌شود که در آن v_i زودترین زمان ممکن برای رسیدن به گره i و $(v_i + s_i)$ زودترین زمان عزیمت وسیله نقلیه از گره i به u می‌باشد. اختلاف حد بالای پنجره زمانی مشتری u با زودترین زمان عزیمت از مشتری i حداکثر زمان در دسترس برای رسیدن به مشتری u است. در این حالت یک مسیر شدنی با رعایت پنجره زمانی مشتریان، با حرکت وسیله نقلیه در ماکزیمم سرعت خود به دست می‌آید.

$$v < v_m \rightarrow \frac{d_{iu}}{b_u - (v_i + s_i)} < v_m \quad (30)$$

برخلاف رویکرد حل مقاله دمیر و همکاران که در دو گام انجام می‌گیرد، در گام اول زمان سفر را ثابت گرفته و مساله را در حالت سرعت ثابت حل نموده و سپس در گام دوم با مسیر به دست آمده از گام اول، سرعت را بین مشتریان بهبود می‌دهد. در این الگوریتم عملاً بسیاری از مسیرهایی که با افزایش سرعت وسیله نقلیه امکان طی کردن آن با رعایت محدودیت پنجره‌های زمانی مشتریان وجود دارد در نظر گرفته نمی‌شود. ولی در الگوریتم پیشنهادی هر دو گام با هم یکپارچه در نظر گرفته شده است بدین ترتیب که در ساخت مسیر علاوه بر معیار ساخت ذکر شده، میزان سرعت در کمان (i, j) به صورت رابطه مسافت کمان تقسیم بر حداکثر زمان در دسترس برای سفر در طول کمان هنگام عزیمت از گره i محاسبه می‌شود.

۴-۲- عملگرهای برداشت

پس از ساخت جواب اولیه، از الگوریتم‌های بهبود دهنده برای جستجوی فضای همسایگی و تولید جواب‌های همسایه استفاده می‌شود. همانطور که اشاره شد در الگوریتم ALNS از دو نوع عملگر برداشت و گذاشت استفاده می‌شود. در هر تکرار تعدادی از مشتریان با استراتژی مشخصی انتخاب شده و از جواب برداشته می‌شود. خروجی این عملگرها یک جواب کاهش یافته و لیستی از مشتریان برداشته شده از جواب می‌باشد. شبه کد اپراتور برداشت در حالت

الگوریتم‌های بهبود دهنده متناسب با نوع مساله می‌باشد. در این مقاله برای ساخت جواب اولیه مناسب یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای کاهش میزان بار طی شده در مسافت با فرض متغیر بودن زمان سفر ارائه شده است که همزمان علاوه بر تحویل تقاضاهای برداشت (گذاشت) بیشتر در ابتدا (انتها) مسیر، وسیله نقلیه بتواند با تغییر سرعت محدودیت پنجره زمانی مشتریان را رعایت کند. الگوریتم ساخت جواب اولیه بطور کامل در بخش ۵-۱-۱ توضیح داده شده است. در ادامه عملگرهای برداشت در بخش ۵-۱-۲ و عملگر گذاشت در بخش ۵-۱-۳ توضیح داده شده است. انتخاب عملگرهای برداشت و گذاشت با توجه به عملکرد گذشته آن‌ها با استفاده از مکانیسم چرخ رولت بوده که در بخش ۵-۱-۴ تشریح شده است.

۴-۱- الگوریتم ساخت جواب اولیه

با توجه به هدف کاهش انرژی در مدل مسیریابی سبز ارایه شده، در الگوریتم ساخت جواب اولیه شدنی، معیار انتخاب مشتریان برای ساخت مسیر به طریقی بوده که بار وزنی (حاصلضرب بار در مسافت) طی شده توسط وسیله نقلیه در آن مسیر مینیمم شود. در واقع هدف از این معیار وارد کردن مشتریان با تقاضای گذاشت بیشتر (کمتر) و تقاضای برداشت کمتر (بیشتر) در ابتدای (انتهای) مسیر است. اگر فرض شود گره‌های $(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m)$ در یک مسیر وارد شده باشند. برای وارد کردن گره u در مسیر بین جفت گره (i_p, i_{p+1}) ، $C(u)$ هزینه وارد کردن گره u در مسیر به صورت رابطه ۲۴ محاسبه می‌گردد.

$$C(u) = \min \sum_{p=1}^{m-1} Q_{i_p i_{p+1}} * d_{i_p i_{p+1}} + \sum_u Q_{i_p i_u} * d_{i_p i_u} + \sum_u Q_{i_u i_{p+1}} * d_{i_u i_{p+1}} \quad (24)$$

$$\forall p = 2, \dots, m$$

$C(u)$ در حالت‌های قرار گیری بین تمام جفت مشتریان مسیره‌ای موجود محاسبه شده و مینیمم هزینه قرارگیری برای گره u به دست می‌آید. این هزینه برای سایر گره‌هایی هنوز وارد مسیر نشده‌اند نیز محاسبه شده و در نهایت گره‌ای که مینیمم هزینه را به خود اختصاص دهد وارد مسیر می‌شود (رابطه ۲۵).

$$u^* = \min C(u) \quad \forall u \text{ unrouted} \quad (25)$$

هم چنین برای به دست آوردن جواب اولیه شدنی، دو محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه و پنجره زمانی مشتریان باید رعایت شود. به منظور رعایت محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه با توجه به فرض گذاشت و برداشت همزمان، ابتدا معیاری تحت عنوان میزان ظرفیت باقی مانده برای دو نوع تقاضا با استفاده از روابط ۲۶ تا ۲۹ محاسبه می‌شود [۲۶]. سپس در هر تکرار برای انتخاب مشتری با توجه به محل قرار گیری آن در مسیر، میزان تقاضای گذاشت و برداشت

۳-۴- عملگر گذاشت

الگوریتم گذاشت با استفاده از لیست مشتریان برداشت شده توسط عملگرهای برداشت و جواب کاهش یافته، با استراتژی مشخصی گره‌ها را در جایگاه‌های جدید قرار داده و به ساخت دوباره مسیر می‌پردازد.

شبه کد اپراتور گذاشت در حالت کلی به صورت الگوریتم ۲ خواهد بود:

الگوریتم ۲: شبه کد کلی عملگر گذاشت

ورودی: یک جواب کاهش یافته Xp ، ماکزیمم تکرار φ ، لیست برداشت L

خروجی: جواب جدید X

به ازای هر عضو مجموعه لیست برداشت $i \in L$

اجرای عملگر گذاشت برای یافتن بهترین مکان برای گره

برداشت شده

$$L \leftarrow L - S$$

وارد کردن گره i در Xp

پایان

• انتخاب حریصانه (GI) Greedy Insertion

این عملگر در هر تکرار یک گره را در بهترین جای ممکن خود وارد می‌کند. هزینه قرار گرفتن گره در مسیر برای هر کدام از مشتریان برداشت شده توسط عملگرهای برداشت به صورت رابطه ۳۳ محاسبه می‌شود.

$$C(i) = d_{ji} + d_{ik} - d_{jk} \quad i \in S \quad (33)$$

$$i^* = \operatorname{argmin}\{C(i)\}$$

کلی به صورت الگوریتم ۱ خواهد بود که عملکرد کلی آن در شکل ۱ قابل مشاهده است:

الگوریتم ۱: شبه کد کلی عملگر برداشت

ورودی: یک جواب شدنی X ، ماکزیمم تکرار الگوریتم

φ

خروجی: یک جواب کاهش یافته Xp

ساخت یک لیست برداشت $(L \leftarrow \emptyset)$

به ازای هر φ :

اجرای عملگر برداشت برای یافتن مجموعه

گره S

$$L \leftarrow L \cup S$$

برداشت زیر مجموعه S از X

پایان

• برداشت تصادفی (RR) Random Removal

این عملگر با یک لیست خالی شروع می‌کند و به طور تصادفی S گره را از حل بر می‌دارد و برای $\varphi = S$ تکرار اجرا می‌کند. ایده انتخاب تصادفی به تنوع مکانیسم جستجو کمک می‌کند.

• برداشت بدترین مسافت (WDR) Worst-distance Removal

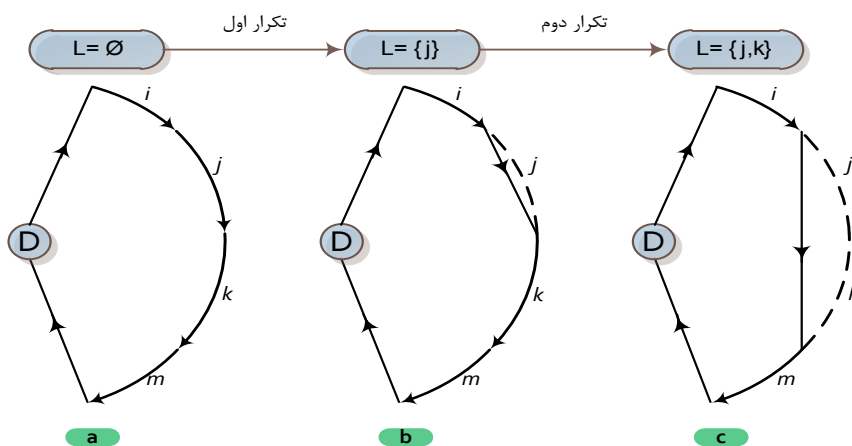
این عملگر در هر تکرار مشتری با بیشترین هزینه را انتخاب می‌کند که در آن هزینه به صورت مجموع مسافت هر گره از گره قبل و بعد آن محاسبه می‌شود (رابطه ۳۱).

$$j^* = \operatorname{argmax}\{d_{ij} + d_{jk}\} \quad (31)$$

• برداشت بدترین زمان (WTR) Worst-time Removal

این عملگر در هر تکرار مشتری با بیشترین میزان انحراف در زمان رسیدن و زودترین زمان شروع خدمت را انتخاب می‌کند (رابطه ۳۲).

$$j^* = \operatorname{argmax}\{|y_j - a_j|\} \quad (32)$$



شکل (۱): توصیف عملکرد کلی عملگر برداشت

۴-۴ - برآزندگی عملگرها

همان طور که اشاره شد انتخاب عملگرها وابسته به عملکرد گذشته آن‌ها در بهبود جواب می‌باشد. انتخاب این عملگرها با استفاده از مکانیسم چرخ رولت صورت می‌گیرد. در ابتدا تمام عملگرها مشابه بوده و احتمال انتخاب آن‌ها یکسان می‌باشد. در هر N_{ω} تکرار از الگوریتم ALNS امتیاز عملگرها با توجه به عملکردشان در نحوه جستجوی جواب محاسبه شده و احتمال استفاده از آن‌ها بروزرسانی می‌شود. امتیاز بالای یک عملگر نشان‌دهنده موفقیت آن عملگر در جستجوی جواب است. بروزرسانی احتمال انتخاب عملگرها در الگوریتم با استفاده از رابطه $p_a^{t+1} = p_a^t(1 - r_p) + r_p \pi_i / \omega_i$ محاسبه شده که در آن پارامتر مربوط به مکانیسم چرخ رولت و π_i امتیاز عملگر i و ω_i تعداد دفعات استفاده از عملگر i در N_{ω} تکرار است. امتیازها در ابتدای هر تکرار مکانیسم چرخ رولت صفر شده و با شرایط و مقادیر موجود در جدول ۲ محاسبه می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای وزدن دهی به عملگرها

پارامتر	شرایط
σ_1	عملکرد اپراتور منجر به بهترین جواب جدید شود
σ_2	منجر به جواب بهتری از جواب جاری شود
σ_3	منجر به جواب بدتر ولی قابل قبول شود

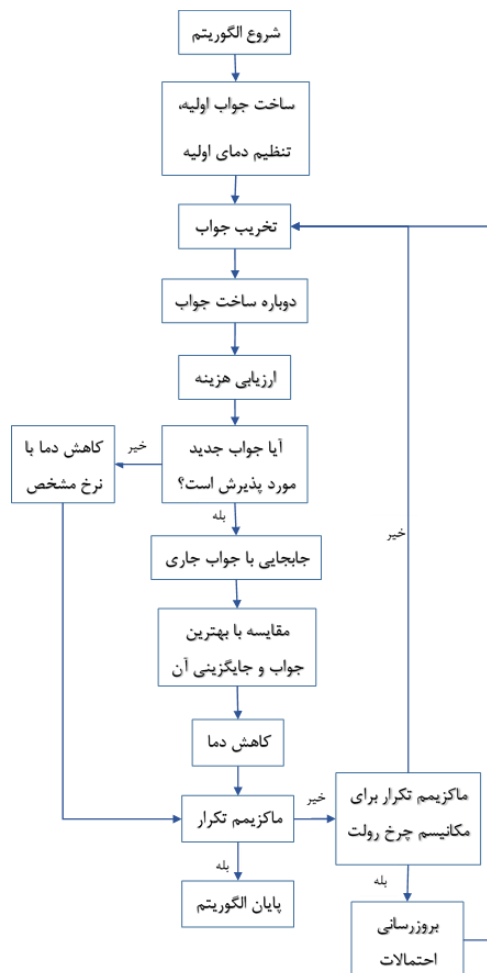
۵- چارچوب کلی الگوریتم ابتکاری

برای چارچوب دادن و محدود کردن فضای جستجوی جواب در الگوریتم ALNS باید از الگوریتم‌هایی مانند شبیه سازی تبرید یا جستجوی ممنوعه استفاده کرد که در اینجا از الگوریتم SA استفاده شده است. ساختار کلی الگوریتم ارائه شده بدین صورت است که با ایجاد یک جواب اولیه توسط الگوریتم سازنده ($X_{initial}$)، دما را در حالت دمای اولیه ($T = T_0$) قرار داده و با استفاده از عملگرهای بهبود دهنده که (در اینجا منظور توالی از عملگرهای برداشت و گذاشت است) به جستجوی فضای جواب پرداخته می‌شود. در هر تکرار جواب جدید به دست آمده (X_{new}) ارزیابی شده و در صورت خوب بودن جواب به دست آمده، جواب جدید پذیرفته شده و به عنوان جواب جاری ($X_{current}$) در تکرار بعد وارد می‌شود. در صورت بد بودن جواب با احتمالی جواب پذیرفته می‌شود. دما در هر تکرار به تدریج با نرخ تبرید δ کاهش می‌یابد تا فضای جستجوی جواب را کاهش دهد این کار تا ماکزیمم تکرار الگوریتم ALNS ادامه می‌یابد. در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم ALNS با چارچوب الگوریتم SA نشان داده شده است.

۶- آزمایشات عددی

در این بخش آزمایشات عددی بمنظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ابتکاری پیشنهادی انجام گردیده است. بدین جهت از دو نوع

مجموعه داده موجود در ادبیات استفاده است. مجموعه داده اول توسط دمیر و همکاران [11] برای مساله مسیریابی آلودگی (PRP) ارائه شده است. این مجموعه داده شامل ۹ دسته مثال عددی بوده که در تعداد مشتریان متفاوت می‌باشند. اندازه مثال‌ها از ۱۰ تا ۲۰۰ مشتری می‌باشد. در تولید مثال‌ها از داده‌های واقعی جغرافیایی برای مقادیر مسافت بین گره‌ها استفاده شده است. مقادیر پنجره‌های زمانی و زمان‌های خدمت به صورت تصادفی تولید شده‌اند. مجموعه داده دوم توسط ونگ و همکاران [21] ارائه شده است. این مجموعه داده برای مساله مسیریابی با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی (VRPSPDTW) تولید شده است. این مجموعه داده شامل دو نوع مثال‌های با ابعاد کوچک تحت عنوان Rcdp شامل ۱۰، ۲۵ و ۵۰ مشتری و مثال‌های با ابعاد بزرگ تحت عنوان Cdp و Rdp شامل ۱۰۰ مشتری می‌باشد. در این بخش ابتدا به تنظیم پارامترهای مورد نیاز الگوریتم حل پیشنهادی پرداخته شده است. سپس مقایسه‌ای روی نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی با نتایج موجود در ادبیات و بررسی کیفیت جواب‌های تولید شده انجام شده است. در ادامه داده‌هایی متناسب با نوع مساله پیشنهادی، مساله مسیریابی سبز با محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی تولید شده و در نهایت تحلیلی روی کیفیت عملکرد عملگرهای برداشت انجام شده است.



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم ALNS

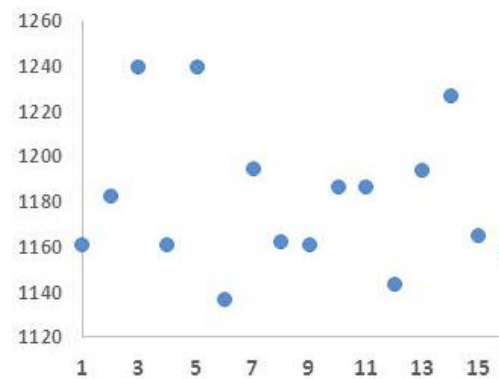
۱-۶ - تنظیم پارامترها

در این بخش با استفاده از انجام آزمایش روی یکی از مثال‌های عددی، بر روی انتخاب بهترین مقادیر برای پارامترهای مکانیسم چرخ رولت و امتیازهای σ_1 ، σ_2 و σ_3 برای عملکرد اپراتورها تصمیم‌گیری شده است.

در جدول ۳ مقادیر متفاوت فرض شده برای پارامترهای اشاره شده آورده شده است. به منظور تعیین بهترین مقدار این پارامترها، ۱۶ حالت آزمایش ممکن وجود دارد که هزینه‌های آن‌ها بررسی و مینیمم آن انتخاب شده است. از بهترین حالت ممکن برای پارامترها در ادامه برای تحلیل داده‌های عددی استفاده خواهد شد.

جدول (۳): تنظیم پارامترهای الگوریتم ALNS

پارامتر	مقادیر عددی مفروض
تعداد تکرارها برای مکانیسم چرخ رولت	۲۰۰
امتیاز σ_3	۵
امتیاز σ_2	۳
امتیاز σ_1	۴



شکل ۳: بررسی مقادیر هزینه برای پارامترهای جدول ۳

با توجه به نمودار بالا مینیمم هزینه در حالت ۶ اتفاق می‌افتد که در آن مقادیر پارامترها به صورت زیر است:

جدول (۴): بهترین حالت انتخاب پارامترهای مکانیسم چرخ رولت

تعداد تکرارها برای مکانیسم چرخ رولت	امتیاز σ_1	امتیاز σ_2	امتیاز σ_3
۲۰۰	۴	۳	۵

جدول (۵): سایر پارامترهای الگوریتم ALNS

پارامتر	مقادیر
ماکزیمم تکرار الگوریتم ALNS	۱۰۰۰
T_p پارامتر مربوط به مکانیسم چرخ رولت	۰,۱
دمای اولیه T_0	۱۰۰۰
نرخ تبرید δ	۰,۹
تعداد گره‌های برداشت S	۱۰٪ تعداد مشتریان

۲-۶ - نتایج محاسباتی

آزمایشات بر روی الگوریتم ارائه شده در نرم افزار متلب بر روی سرور با سرعت ۲,۴ گیگاهرتز و ۶ گیگابایت حافظه RAM اجرا شده است. برای آزمایشات انجام شده بر روی مجموعه داده اول، ارائه شده توسط دمیر، نتایج محاسباتی در جدول ۶ و جدول ۷ در دو دسته مثال UK10 و UK100 با ابعاد ۱۰ و ۱۰۰ مشتری گزارش شده است. نتایج عددی تولید شده با نتایج حاصل از روش پیشنهادی دمیر و همکاران مقایسه شده است. در مقاله دمیر و همکاران، نتایج مدل با استفاده از روش CPLEX نیز گزارش شده است. ولی با توجه به غیر خطی بودن مدل مساله، روش حل CPLEX قادر به یافتن مقادیر بهینه نبوده و برای مثال‌های با ابعاد بزرگ (مثلاً ۱۰۰ مشتری) برنامه در طی یک مدت زمان مشخص (۳ ساعت) اجرا و متوقف شده است و جوابی که تا آن زمان یافته است گزارش شده است. در این مقایسه دو معیار، مسافت کل طی شده توسط وسیله نقلیه و هزینه کل (شامل هزینه سوخت و هزینه راننده) بررسی شده است. برای نشان دادن میزان بهبود جواب‌ها مقادیر $DEV(D)\%$ و $DEV(F)\%$ محاسبه شده است.

$DEV(D)\%$ درصد اختلاف میزان مسافت به دست آمده از رویکرد حل توسعه داده شده (D_E) با مسافت به دست آمده در مقاله دمیر و همکاران (D_P) می‌باشد که از رابطه زیر به دست آمده است:

$$DEV(D) = 100 * (D_P - D_E) / D_P$$

هم چنین $DEV(F)\%$ درصد اختلاف هزینه کل به دست آمده از رویکرد ابتکاری جدید با مقاله دمیر و همکاران است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DEV(F) = 100 * (F_P - F_E) / F_P$$

مقایسه نتایج حاصل از جدول ۶ و جدول ۷ نشان می‌دهد در مثال‌های با ابعاد کوچک مقادیر حاصل از الگوریتم پیشنهادی از لحاظ هر دو معیار میزان مسافت طی شده و هزینه‌های سوخت بهبود داشته که به طور میانگین در حدود ۴ درصد می‌باشد. در نمودارهای شکل ۴ و ۵ کیفیت جواب‌های تولید شده در مثال‌های با ۱۰ مشتری در دو معیار مسافت و هزینه سوخت نشان داده شده است.

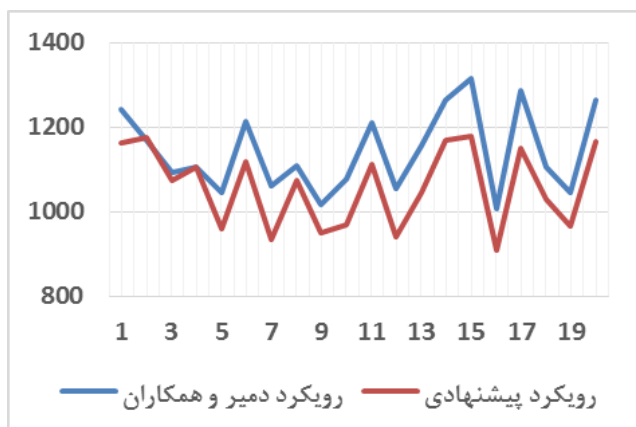
هم چنین در ابعاد بزرگ با ۱۰۰ مشتری، شاهد بهبود در میزان هزینه‌های سوخت (مقدار تابع هدف) بوده که به طور میانگین در حدود ۱۰ درصد می‌باشد. همانطور که در جدول ۶ و در نمودارهای شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده است با وجود بیشتر شدن میزان مسافت طی شده در رویکرد پیشنهادی، میزان هزینه‌های سوخت مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. این موضوع نشان دهنده آن است که برخلاف مسائل مسیریابی سنتی که هدف آن صرفاً مینیمم کردن مسافت طی شده است، در مساله مسیریابی سبز ممکن است با طی مسافت بیشتر، میزان مصرف سوخت و در نتیجه آن هزینه‌های سوخت و انتشار آلودگی کاهش یابد که هدف اصلی نیز در این مقاله

جدول (۶): نتایج به دست آمده از مقایسه رویکرد پیشنهادی با نتایج ارائه شده در مقاله دمیر و همکاران بر روی مثال‌های UK10

DEV (F) %	DEV (D) %	رویکرد پیشنهادی			روش حل دمیر و همکاران			CPLEX		۱۰ مشتری		
		زمان حل	اندازه ناوگان	هزینه	مسافت (کیلومتر)	زمان حل	اندازه ناوگان	هزینه	مسافت (کیلومتر)		زمان حل	هزینه
۰.۹۴	۰.۰۰۴	۱۰	۲	۱۶۹,۰۴۴	۴۰۸,۹۸	۲,۱	۲	۱۷۰,۶۴	۴۰۹	۱۶۳,۴	۱۷۰,۶۶	UK10-01
۰.۰۳	۰.۵۱	۱۲	۲	۲۰۴,۸۰۹	۵۲۷,۱۱	۲,۳	۲	۲۰۴,۸۸	۵۲۹,۸	۱۱۳,۹	۲۰۴,۸۷	UK10-02
۰.۴۵	۲,۷۹	۱۱	۲	۱۹۹,۵۰۹	۴۹۳,۱۳	۲	۲	۲۰۰,۴۲	۵۰۷,۳	۹۲۶	۲۰۰,۳۳	UK10-03
۲,۶۶	۰.۰۰۲	۹,۷	۲	۱۸۴,۹۴	۴۸۰,۰۹	۲,۲	۲	۱۸۹,۹۹	۴۸۰,۱	۳۹۶,۵	۱۸۹,۹۴	UK10-04
۱,۳۴	۱,۱	۱۱	۲	۱۷۳,۳۴	۴۴۲,۰۷	۲,۳	۲	۱۷۵,۵۹	۴۴۷	۱۲۵۳,۷	۱۷۵,۶۱	UK10-05
۴,۳۷	۰	۱۲	۲	۲۰۵,۱۱	۵۴۸	۲,۲	۲	۲۱۴,۴۸	۵۴۸	۳۴۷,۵	۲۱۴,۵۶	UK10-06
۴,۴۴	۰.۰۰۲	۱۴	۲	۱۸۱,۷۰۴	۴۹۴,۶۹	۲,۹	۲	۱۹۰,۱۴	۴۹۴,۷	۱۹۱	۱۹۰,۱۴	UK10-07
۰.۵۸	۰,۴۹	۱۳,۱	۲	۲۲۰,۸۸	۵۶۵	۲,۱	۲	۲۲۲,۱۷	۵۶۷,۸	۱۳۹,۸	۲۲۲,۱۶	UK10-08
۱,۳۶	۰,۸۶	۱۰,۷	۲	۱۷۲,۱۷	۴۵۳,۰۹	۲,۲	۲	۱۷۴,۵۴	۴۵۷	۵۴	۱۷۴,۵۳	UK10-09
۱,۶۱	۰,۳۲	۱۲	۲	۱۸۶,۹۸	۴۸۵,۱۶	۲,۶	۲	۱۹۰,۰۴	۴۸۶,۷	۷۶,۹	۱۸۹,۸۳	UK10-10
۲,۶۴	۰.۰۰۵	۱۰,۹	۲	۲۵۵,۱۶	۶۹۷,۱۶	۲,۲	۲	۲۶۲,۰۸	۶۹۷,۲	۵۰,۵	۲۶۲,۰۷	UK10-11
۲,۶۵	۰.۰۰۸	۱۱	۲	۱۷۸,۳۴	۴۶۰,۲۶	۲,۲	۲	۱۸۳,۱۹	۴۶۰,۳	۱۹۷۸,۷	۱۸۳,۱۸	UK10-12
۲,۰۸	۰.۰۰۱	۱۰	۲	۱۹۱,۸۹	۵۱۰,۴۹	۲,۲	۲	۱۹۵,۹۷	۵۱۰,۵	۱۲۳۵,۱	۱۹۵,۹۷	UK10-13
۱,۹۷	۰,۰۱	۱۰	۲	۱۶۰,۰۵۹	۳۹۷,۷۵	۲,۴	۲	۱۶۳,۲۸	۳۹۷,۸	۸۴,۱	۱۶۳,۱۷	UK10-14
۱,۷۸	۰,۰۱	۱۱,۱	۲	۱۲۴,۹۸	۲۹۱,۳۷	۲,۴	۲	۱۲۷,۲۴	۲۹۱,۴	۴۳۳,۳	۱۲۷,۱۵	UK10-15
۱	۱,۴۷	۱۰	۲	۱۸۴,۸۷	۴۴۴,۴۸	۱,۹	۲	۱۸۶,۷۲	۴۵۱,۱	۶۸۰,۸	۱۸۶,۶۳	UK10-16
۱,۵۳	۰	۹,۵	۲	۱۵۶,۵۹	۳۸۷,۵	۲,۳	۲	۱۵۹,۰۳	۳۸۷,۵	۲۷	۱۵۹,۰۷	UK10-17
۱,۹۵	۰,۲۶	۹	۲	۱۴۹,۱۲	۴۰۰,۴۴	۲,۲	۲	۱۵۲,۰۹	۴۰۱,۵	۵۲۲,۱	۱۶۲,۰۹	UK10-18
۷,۸۳	۰.۰۰۹	۸,۳	۲	۱۵۶,۳۱	۴۱۴,۴۶	۴,۱	۲	۱۶۹,۵۹	۴۱۴,۵	۱۳۰,۵	۱۶۹,۴۶	UK10-19
۸,۱	۰.۰۰۴	۸	۲	۱۵۵,۱۳	۴۱۲,۷۸	۲	۲	۱۶۸,۸	۴۱۲,۸	۱۳۶,۵	۱۶۸,۸	UK10-20

جدول (۷): نتایج به دست آمده از مقایسه رویکرد حل ارائه شده با نتایج ارائه شده در مقاله دمیر و همکاران بر روی مثال‌های UK100

DEV(F) %	DEV(D) %	رویکرد پیشنهادی			روش حل دمیر و همکاران			CPLEX		۱۰۰ مشتری		
		زمان حل	اندازه ناوگان	هزینه	مسافت	زمان حل	اندازه ناوگان	هزینه	مسافت		زمان حل	هزینه
۶,۴	-۶	۱۱۰	۱۴	۱۱۶۱	۳۰۹۴	۹۲,۱	۱۴	۱۲۴۰,۷۹	۲۹۱۴,۴	۱۰۸۰۰	۱۳۸۹,۰۵	UK100-01
-۰,۶	-۵	۱۲۰	۱۳	۱۱۷۶,۱	۲۸۳۸,۷۹	۹۸,۲	۱۳	۱۱۶۸,۱۷	۲۶۹۰,۷	۱۰۸۰۰	۱۳۰۲,۱۶	UK100-02
۱,۹	-۱,۶	۲۱۰,۴	۱۳	۱۰۷۱,۷	۲۵۷۲,۸	۲۰۷,۹	۱۳	۱۰۹۲,۷۳	۲۵۳۱,۸	۱۰۸۰۰	۱۲۳۱,۴۴	UK100-03
۰,۰۸	-۳,۵	۱۵۷,۸	۱۴	۱۱۰۵,۵	۲۵۲۴,۲۹	۱۴۹,۷	۱۴	۱۱۰۶,۴۸	۲۴۳۸,۵	۱۰۸۰۰	۱۱۷۴,۷۵	UK100-04
۸	-۸,۶	۱۹۰	۱۴	۹۵۹,۹۱	۲۵۳۱	۱۵۹,۰	۱۴	۱۰۴۳,۴۱	۲۳۲۸,۵	۱۰۸۰۰	۱۱۲۱,۷۱	UK100-05
۷,۹	-۸,۴	۲۰۰	۱۴	۱۱۱۷,۵	۳۰۱۶,۸	۱۳۳,۸	۱۴	۱۲۱۳,۶۱	۲۷۸۲,۴	۱۰۸۰۰	۱۳۲۰,۴	UK100-06
۱۱,۹	-۴	۱۹۰	۱۲	۹۳۳,۳۹	۲۵۶۲,۹۹	۱۰۲,۶	۱۲	۱۰۶۰,۰۸	۲۴۶۳,۹	۱۰۸۰۰	۱۱۷۷,۸	UK100-07
۳,۱۲	-۱۴	۲۴۱	۱۳	۱۰۷۲,۲	۲۹۸۵,۴	۲۰۹,۵	۱۳	۱۱۰۶,۷۸	۲۵۹۷,۴	۱۰۸۰۰	۱۲۳۰,۹۲	UK100-08
۶,۵۷	-۱۴	۱۵۷	۱۳	۹۴۸,۷۲	۲۵۳۴,۴۱	۱۵۴	۱۳	۱۰۱۵,۴۶	۲۲۱۹,۲	۱۰۸۰۰	۱۰۹۲,۲	UK100-09
۱۰,۱۹	-۸	۲۱۰	۱۲	۹۶۶,۸۴	۲۷۲۳,۴	۱۹۹	۱۲	۱۰۷۶,۵۶	۲۵۱۰,۱	۱۰۸۰۰	۱۱۶۳,۹۵	UK100-10
۸,۱۶	-۶	۱۰۸	۱۵	۱۱۱۱,۴	۲۹۵۹,۷	۱۰۷,۱	۱۵	۱۲۱۰,۲۵	۲۷۹۲,۱	۱۰۸۰۰	۱۳۴۳,۱۸	UK100-11
۱۰,۶۶	-۲,۸۳	۲۰۹	۱۲	۹۴۰,۷۳	۲۴۹۶	۲۰۶,۴	۱۲	۱۰۵۳,۰۲	۲۴۲۷,۳	۱۰۸۰۰	۱۲۲۷,۰۱	UK100-12
۹,۴۲	-۶,۳۴	۹۹	۱۳	۱۰۴۶	۲۸۶۴	۸۷,۹	۱۳	۱۱۵۴,۸۳	۲۶۹۳,۱	۱۰۸۰۰	۱۳۳۳,۱	UK100-13
۷,۶۹	-۹,۷	۱۷۵	۱۴	۱۱۶۷,۲	۳۲۶۴	۹۱,۸	۱۴	۱۲۶۴,۵	۲۹۷۵,۳	۱۰۸۰۰	۱۴۱۰,۱۸	UK100-14
۱۰,۵	-۳,۶۸	۱۸۷,۳	۱۵	۱۱۷۷,۱	۳۱۸۵,۳	۱۱۰,۹	۱۵	۱۳۱۵,۵	۳۰۷۲,۱	۱۰۸۰۰	۱۴۵۳,۸۱	UK100-15
۷,۰۳	-۸,۵	۲۹۰,۸	۱۲	۹۰۹,۰۳	۲۴۰۹,۷	۲۵۴,۷	۱۲	۱۰۰۵,۰۳	۲۲۱۹,۷	۱۰۸۰۰	۱۱۰۵,۵۸	UK100-16
۷,۶	-۵,۶	۱۶۶	۱۵	۱۱۵۰,۴	۳۱۲۶,۶	۱۵۲,۸	۱۵	۱۲۸۴,۸۱	۲۹۶۰,۴	۱۰۸۰۰	۱۳۸۹,۹۹	UK100-17
۷,۳	-۱۰,۳	۱۰۰	۱۳	۱۰۲۸,۲	۲۷۸۷,۷	۹۲,۶	۱۳	۱۱۰۶	۲۵۲۵,۲	۱۰۸۰۰	۱۲۱۹,۴۵	UK100-18
۷,۶	-۶,۶	۱۲۰	۱۳	۹۶۵,۱۷	۲۴۸۶,۸	۹۱	۱۳	۱۰۴۴,۷۱	۲۳۳۲,۶	۱۰۸۰۰	۱۱۱۵,۸۲	UK100-19
۷,۸۴	-۷,۹۳	۲۷۸	۱۴	۱۱۶۴	۳۱۹۲,۵	۲۰۴,۴	۱۴	۱۲۶۳,۰۶	۲۹۵۷,۸	۱۰۸۰۰	۱۳۹۶,۹۷	UK100-20



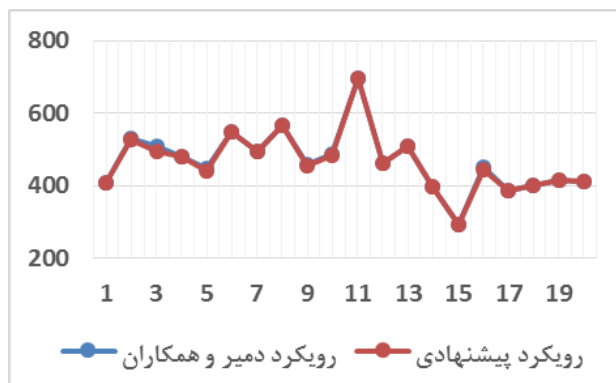
شکل (۷): مقایسه جواب‌های تولید شده از لحاظ معیار هزینه با فرض ۱۰۰ مشتری

در آزمایشات عددی صورت گرفته بر مجموعه داده دوم، ارائه شده توسط ونگ، نتایج محاسباتی در جدول ۸ و جدول ۹ گزارش شده است. همانطور که اشاره شده بود این مجموعه داده برای مدل VRPSPDTW تولید شده‌اند. در این مدل هدف اصلی مینیمم کردن مسافت طی شده می‌باشد، در نتیجه تابع هدف مدل مساله ریلکس شده و هدف زیست محیطی مدل تبدیل به هدف مینیمم کردن مسافت می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و سیلکس گزارش شده توسط ونگ مقایسه شده است. با توجه به نتایج گزارش شده بیشترین بهبود در مثال‌های با ابعاد کوچک در حدود ۱۳ درصد و در مثال‌های با ابعاد بزرگ در حدود ۲ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج و مشاهده کیفیت خوب جواب‌های تولیدی، حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی دارد.

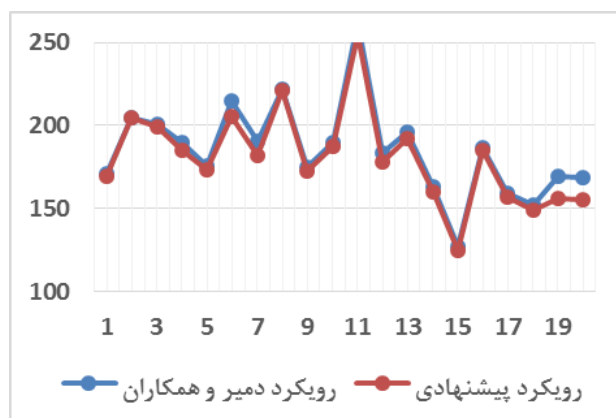
۳-۶- نتایج الگوریتم پیشنهادی

در بخش قبل، کیفیت جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش با توجه به نوع مساله مسیریابی سبز که دارای محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی می‌باشد، داده‌هایی متناسب با نوع مساله تولید شده و الگوریتم پیشنهادی بر روی آن آزمایش شده است. داده‌های تولید شده در ابعاد ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ مشتری می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد عملگرهای برداشت استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی روی کیفیت تولید جواب‌ها، در جدول ۱۰ و ۱۱ تحلیل حساسیت بر روی عملگرهای برداشت تصادفی، بدترین زمان سفر و بدترین مسافت انجام شده است. در این آزمایش ماکزیمم تکرار الگوریتم ۱۰۰۰ نظر گرفته شده است. نتایج جداول نشان می‌دهد بهترین عملکرد را عملگر برداشت تصادفی و پس از آن برداشت بدترین مسافت در تولید جواب‌ها داشته و استفاده ترکیبی از این عملگرها منجر به نتیجه بهتری شده است. در شکل ۸ و ۹ نتایج عملکرد عملگرهای برداشت در مثال‌های تولید در ابعاد متوسط و بزرگ در قالب نمودار نشان داده شده است که در آن استفاده ترکیبی از عملگرها پایین‌ترین هزینه را منجر می‌شود.

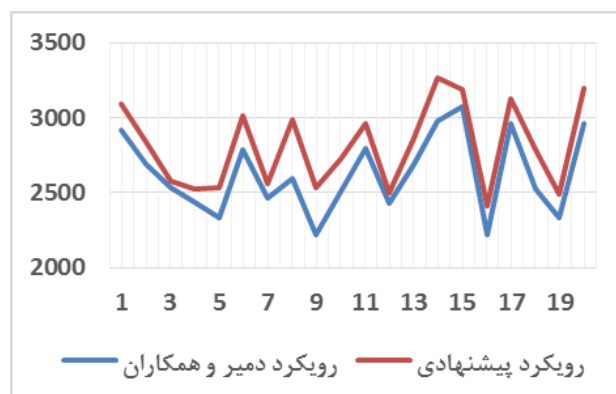
سوخت و انتشار آلودگی کاهش یابد که هدف اصلی نیز در این مقاله مینیمم کردن میزان مصرف سوخت و انتشار آلودگی می‌باشد. این امر بدین علت است که زمان سفر متغیر بوده و امکان تغییر سرعت وسایل نقلیه در طول مسیر با رعایت پنجره زمانی مشتریان وجود دارد در نتیجه مسیریابی با طول بیشتر ولی صرف سوخت کمتر به دست می‌آید.



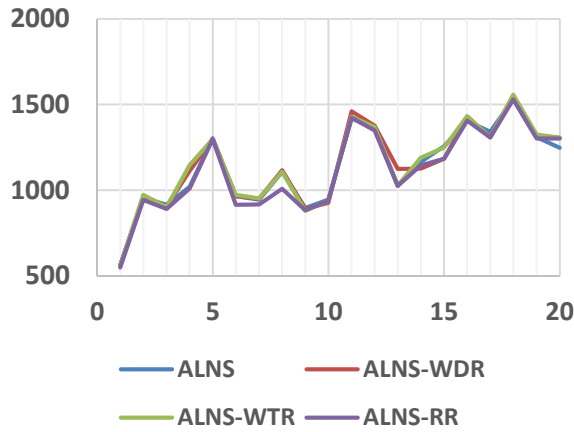
شکل (۴): مقایسه جواب‌های تولید شده از لحاظ معیار مسافت با فرض ۱۰ مشتری



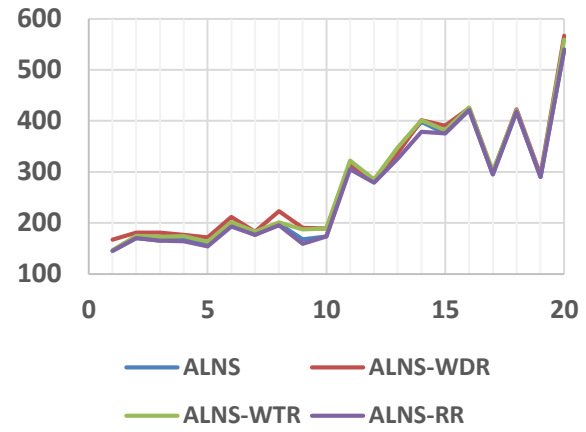
شکل (۵): مقایسه جواب‌های تولید شده از لحاظ معیار هزینه با فرض ۱۰ مشتری



شکل (۶): مقایسه جواب‌های تولید شده از لحاظ معیار مسافت با فرض ۱۰۰ مشتری



شکل (۹): مقایسه عملکرد عملگرهای برداشت در مثال با ابعاد بزرگ



شکل (۸) مقایسه عملکرد عملگرهای برداشت در مثال با ابعاد متوسط

جدول (۸): مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج ونگ در مثال های با ابعاد کوچک

DEV (%)	ALNS		ژنتیک		CPLEX		مثال
	اندازه ناوگان	مسافت	اندازه ناوگان	مسافت	اندازه ناوگان	مسافت	
۰	۳	۳۴۸.۹۸	۳	۳۴۸.۹۸	۳	۳۴۸.۹۸	RCdp۱۰۰۱
۰	۲	۲۱۶.۶۹	۲	۲۱۶.۶۹	۲	۲۱۶.۶۹	RCdp۱۰۰۴
۰	۲	۳۱۰.۸۱	۲	۳۱۰.۸۱	۲	۳۱۰.۸۱	RCdp۱۰۰۷
۰	۵	۵۵۱.۰۵	۵	۵۵۱.۰۵	۵	۵۵۱.۰۵	RCdp۲۵۰۱
۰	۴	۴۷۳.۴۶	۴	۴۷۳.۴۶	۷	۷۳۸.۳۲	RCdp۲۵۰۴
۰	۵	۵۴۰.۸۷	۵	۵۴۰.۸۷	۷	۶۳۴.۲	RCdp۲۵۰۷
۰.۶	۹	۹۸۷.۶	۹	۹۹۴.۱۸	۹	۹۹۴.۱۸	RCdp۵۰۰۱
۵	۶	۶۹۰.۴۳	۶	۷۲۵.۵۹	۱۴	۱۹۶۱.۵۳	RCdp۵۰۰۴
۱۳	۷	۷۹۸.۶	۷	۸۰۹.۷۲	۱۳	۱۸۱۴.۳۳	RCdp۵۰۰۷

جدول (۹): مقایسه تولیدی الگوریتم پیشنهادی با نتایج ونگ در مثال های با ابعاد بزرگ

DEV	ALNS		ژنتیک		مثال
	اندازه ناوگان	مسافت	اندازه ناوگان	مسافت	
۶	۲۰	۱۵۴۵.۹	۱۹	۱۶۵۳.۵۳	Rdp۱۰۱
۰.۵	۱۸	۱۴۸۰.۲	۱۷	۱۴۸۸.۰۴	Rdp۱۰۲
۱	۱۵	۱۱۹۹.۳۵	۱۴	۱۲۱۶.۱۶	Rdp۱۰۳
۱	۱۱	۱۰۰۳.۱۹	۱۰	۱۰۱۵.۴۱	Rdp۱۰۴
۲	۱۵	۱۳۴۵.۲۳	۱۵	۱۳۷۵.۳۱	Rdp۱۰۵
۰.۴	۱۳	۱۲۴۹.۸	۱۳	۱۲۵۵.۴۸	Rdp۱۰۶
۱	۱۲	۱۰۷۳.۳	۱۱	۱۰۸۷.۹۵	Rdp۱۰۷
۰	۱۰	۹۶۷.۴۹	۱۰	۹۶۷.۴۹	Rdp۱۰۸
۳	۱۳	۱۱۲۰.۰۸	۱۲	۱۱۶۰	Rdp۱۰۹
۰.۶	۱۳	۱۱۰۹.۳	۱۲	۱۱۱۶.۹۹	Rdp۱۱۰
۶	۱۲	۹۹۸.۷۶	۱۱	۱۰۶۵.۲۷	Rdp۱۱۱
۷	۱۱	۸۹۹.۳۱	۱۰	۹۷۴.۰۳	Rdp۱۱۲
۲	۱۱	۹۷۵.۳۶	۱۱	۱۰۰۱.۹۷	Cdp۱۰۱
۰.۷	۱۱	۹۵۴.۱۹	۱۰	۹۶۱.۳۸	Cdp۱۰۲
۱	۱۱	۸۸۷.۴۷	۱۰	۸۹۷.۶۵	Cdp۱۰۳
-۴	۱۰	۹۱۵.۹۴	۱۰	۸۷۸.۹۳	Cdp۱۰۴
-۰.۷	۱۱	۹۹۰.۱۹	۱۱	۹۸۳.۱	Cdp۱۰۵
۲	۱۲	۸۶۰.۴۳	۱۱	۸۷۸.۲۹	Cdp۱۰۶
۱	۱۲	۹۰۱.۷	۱۱	۹۱۳.۸۱	Cdp۱۰۷
۱	۱۱	۹۴۰.۹	۱۰	۹۵۱.۲۴	Cdp۱۰۸
۰.۸	۱۱	۹۳۲.۸	۱۰	۹۴۰.۴۹	Cdp۱۰۹

جدول (۱۰): نتایج الگوریتم پیشنهادی بر روی مساله مسیریابی سبز با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی با مثال های ابعاد متوسط

مثال عددی	ALNS-RR	ALNS-WTR	ALNS-WDR	ALNS	%GAP (RR)	%GAP (WTR)	%GAP (WDR)	تعداد وسایل نقلیه	زمان اجرا (s)
PK10-1	۱۴۵,۲۷	۱۶۷,۳	۱۴۶,۷۴	۱۴۵,۲۷	۰	۰,۱۳	۰,۰۱	۲	۱۰
PK10-2	۱۷۰,۱۸	۱۸۱,۲۸	۱۷۴,۸۴	۱۷۰,۱۸	۰	۰,۰۶	۰,۰۲	۲	۱۴
PK10-3	۱۶۵,۳۷	۱۸۱,۲	۱۷۲,۸۴	۱۶۵,۳۷	۰	۰,۰۸	۰,۰۴	۲	۱۱
PK10-4	۱۷۰,۳۴	۱۷۶,۲۸	۱۷۴,۲۷	۱۶۳,۹۴	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۵	۲	۱۱
PK10-5	۱۶۰,۳۵	۱۷۱,۷۸	۱۶۳,۴	۱۵۳,۷۵	۰,۰۴	۰,۱	۰,۰۵	۲	۱۲
PK10-6	۱۹۸	۲۱۱,۵۶	۲۰۱,۸	۱۹۳,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۸	۰,۰۴	۲	۱۰
PK10-7	۱۷۶,۲۹	۱۸۲,۹	۱۸۲,۹	۱۷۶,۲۹	۰	۰,۰۳	۰,۰۳	۲	۱۱
PK10-8	۱۹۸,۷۷	۲۲۲,۸	۲۰۱,۳	۱۹۵,۴۸	۰,۰۱۷	۰,۱۲	۰,۰۲۸	۲	۱۱
PK10-9	۱۶۷,۵	۱۹۰,۲۳	۱۸۷,۵	۱۵۸,۷۳	۰,۰۵	۰,۱۶	۰,۱۵	۲	۱۱
PK10-10	۱۷۳,۴	۱۸۹,۴	۱۸۹,۴	۱۷۳,۴	۰	۰,۰۸	۰,۰۸	۲	۱۰
PK20-1	۳۱۱,۷	۳۱۷,۰۳	۳۲۲,۳	۳۰۵,۲	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۵	۳	۳۲
PK20-2	۲۸۱,۶	۲۸۰,۹	۲۸۵,۴	۲۷۸,۹	۰,۰۰۹	۰	۰,۰۲	۳	۳۱
PK20-3	۳۴۵,۶	۳۳۷,۵	۳۴۸	۳۲۵,۹	۰,۰۵۷	۰,۰۳	۰,۰۶	۳	۳۰
PK20-4	۳۹۸,۱	۴۰۱,۵	۴۰۱,۵	۳۷۸,۹	۰,۰۴۸	۰,۰۵	۰,۰۵	۳	۳۱
PK20-5	۳۷۵,۴	۳۹۰,۵	۳۸۱,۷	۳۷۵,۴	۰	۰,۰۳۸	۰,۰۱	۳	۳۹
PK20-6	۴۲۱,۶	۴۲۵	۴۲۶,۵	۴۲۱	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۹	۰,۰۲	۳	۳۲
PK20-7	۲۹۵	۲۹۸,۶	۳۰۱,۷	۲۹۵	۰	۰,۰۱۲	۰	۳	۲۷
PK20-8	۴۱۸,۳	۴۲۲,۷	۴۲۰,۶	۴۱۸,۳	۰	۰,۰۱	۰	۳	۳۱
PK20-9	۲۹۰,۰۴	۲۹۴	۲۹۱,۶	۲۹۰,۰۴	۰	۰,۰۱	۰	۳	۲۹
PK20-10	۵۴۰	۵۶۷,۱	۵۵۹,۱	۵۴۰	۰	۰,۰۴۷	۰,۰۳	۳	۲۸

جدول (۱۱): نتایج الگوریتم پیشنهادی بر روی مساله مسیریابی سبز با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی با مثال های ابعاد بزرگ

مثال عددی	ALNS-RR	ALNS-WTR	ALNS-WDR	ALNS	%GAP (RR)	%GAP (WTR)	%GAP (WDR)	تعداد وسایل نقلیه	زمان اجرا (S)
PK50-1	۵۶۲,۳۴	۵۶۲,۴۱	۵۵۷,۸۶	۵۴۹,۹۷	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۱۱	۷۰
PK50-2	۹۵۶,۷	۹۵۷,۳	۹۷۳,۸۵	۹۴۳,۱۲	۰,۱۴	۰,۰۱	۰,۰۳	۱۳	۶۷
PK50-3	۹۱۴,۷۸	۹۰۶,۶۶	۹۰۱,۶	۸۹۱,۶۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۱۲	۷۱
PK50-4	۱۰۲۰,۵	۱۱۱۳,۷۸	۱۱۴۵,۹	۱۰۰۹,۶۷	۰,۰۱	۰,۰۹	۰,۱	۱۳	۶۵
PK50-5	۱۳۰۳,۷	۱۲۹۷,۴	۱۲۹۷,۴	۱۲۹۷,۴	۰	۰	۰	۱۱	۵۱
PK50-6	۹۶۵,۲	۹۶۶,۴۳	۹۷۲,۳۵	۹۱۴,۸	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۱۲	۷۳
PK50-7	۹۴۴,۶۵	۹۵۰	۹۵۳,۴۲	۹۱۷,۴۵	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۳	۱۲	۸۰
PK50-8	۱۱۰۶,۷	۱۱۱۷,۲	۱۱۰۸,۳۹	۱۰۰۹,۴	۰,۰۸	۰,۰۹	۰,۰۸	۱۱	۷۶
PK50-9	۸۹۶,۶۲	۸۹۰,۰۲	۸۷۹,۲۳	۸۸۳,۵۶	۰,۰۱	۰	۰	۱۲	۷۴
PK50-10	۹۴۵,۳۱	۹۲۶,۷۸	۹۳۷,۵	۹۳۷,۵۶	۰	۰	۰	۱۲	۶۷
PK100-1	۱۴۱۹,۳	۱۴۶۱,۳	۱۴۲۸,۵	۱۴۲۳	۰	۰,۰۲	۰,۰۳	۱۵	۱۲۰
PK100-2	۱۳۵۸,۶	۱۳۷۶,۴	۱۳۶۸,۹	۱۳۴۹,۲۶	۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۱۶	۱۱۱
PK100-3	۱۰۲۵,۶	۱۱۲۴,۵	۱۰۲۶,۷	۱۰۲۵,۳	۰	۰,۰۸	۰,۰۰۱	۱۵	۹۴
PK100-4	۱۱۶۵,۳	۱۱۲۶,۶۷	۱۱۸۸,۹	۱۱۴۵,۸	۰,۰۱	۰	۰,۰۳	۱۴	۹۰
PK100-5	۱۲۵۶,۳	۱۱۸۴	۱۲۴۹,۴	۱۱۸۴	۰,۰۵	۰	۰,۰۵	۱۵	۸۷
PK100-6	۱۴۰۴,۳	۱۴۲۶,۹	۱۴۳۱,۶	۱۴۰۶,۰۶	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۱۶	۹۸
PK100-7	۱۳۴۰,۴	۱۳۱۳,۵	۱۳۰۸,۶	۱۳۰۷	۰,۰۲	۰	۰,۰۰۱	۱۶	۹۸
PK100-8	۱۵۳۱,۴	۱۵۴۷,۲	۱۵۵۷,۳	۱۵۲۹,۷	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۱۸	۹۹
PK100-9	۱۳۰۸,۷	۱۳۱۸,۴	۱۳۲۳,۴	۱۳۰۲,۶۹	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۱۶	۹۹
PK100-10	۱۲۴۸,۵	۱۳۰۶,۱۵	۱۳۰۷,۳	۱۳۰۲,۴۲	۰	۰	۰	۱۵	۱۰۰

هزینه‌های سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده که در نتیجه کاهش میزان انرژی مصرفی توسط وسایل نقلیه را نیز به دنبال دارد. با توجه به پیچیده بودن مدل در ابعاد بزرگ، برای حل آن باید از روش های ابتکاری یا فراابتکاری استفاده نمود. بدین ترتیب در این

۷- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک مدل مسیریابی سبز با محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی ارائه شده است. هدف این مدل کاهش

neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223: 346–359.

- [12] Ramos, T., Oliveira, R. (2011). Delimitation of service areas in reverse logistics networks with multiple depots, *Journal of the Operational Research Society*, 62: 1198–1210.
- [13] Taha, M., Fors, M. N., Shoukry, A. A. (2014). An Exact Solution for a Class of Green Vehicle Routing Problem, in *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.
- [14] Kopfer, H. W., Schönberger, J., Kopfer, H. (2013). Emissions Minimization Vehicle Routing Problem in Dependence of Different Vehicle Classes, *Dynamics in Logistics*: 49-58.
- [15] Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G. (2014). The bi-objective Pollution-Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, 232: 464–478.
- [16] Çatay, B. (2010). A new saving-based ant algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *Expert Systems with Applications*, 10(37): 6809-6817.
- [17] Fan, J. (2011). The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Based on Customer Satisfaction, *Procedia Engineering*, 15: 5284-5289.
- [18] Petersen, H. L., Ropke, S. (2011). The pickup and delivery problem with cross-docking opportunity, *Computational Logistics Springer Berlin Heidelberg*: 101-113.
- [19] Coelho, I. M. Munhoz, P.L.A. Haddad, M.N., Souza, M.J.F. Ochi, L.S. (2012). A hybrid heuristic based on General Variable Neighborhood Search for the Single Vehicle Routing Problem with Deliveries and Selective Pickups, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39: 99-106.
- [20] Wang, C. Qiu, Y. (2012). Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Simultaneous Delivery and Pickup Based on the Cross-Entropy Method, *Advances in Automation and Robotics, Springer Berlin Heidelberg*, 2: 55-60.
- [21] Wang, H. F. Chen, Y. Y. (2012). A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window, *Computers & Industrial Engineering*, 62(1): 84–95.
- [۲۲] ستاک مصطفی، عزیز وحید، کریمی حسین (۱۳۹۳). مساله مکان یابی و مسیریابی چنددپویی ظرفیت دار با برداشت و تحویل همزمان و بارهای برش یافته: مدل سازی و حل ابتکاری، نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید، شماره ۴: ۶۷-۸۱.
- [23] Barth, M., Younglove, T., Scora, G. (2005). Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model, *California PATH Research Report*.
- [24] Shaw, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems, in *Proceedings of the 4th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, New York.

مقاله یک روش حل ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی (ALNS) پیشنهاد شده است. برای حل مدل یک الگوریتم ساخت جواب اولیه جدید ارائه شده است که به نحوی عمل می کند که علاوه بر مینیمم کردن میزان بار وزنی، محدودیت پنجره زمانی را با فرض ثابت نبودن زمان سفر و متغیر بودن سرعت وسایل نقلیه لحاظ کند. الگوریتم های بهبود دهنده شامل عملگرهای برداشت و گذاشت می باشد که با استفاده از مکانیسم چرخ رولت به جستجوی موثرتر جواب همسایگی می پردازد. آزمایشات عددی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی روی مثال های موجود در ادبیات انجام شده است. نتایج گزارش شده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را تأیید می کند. تحلیل حساسیت بر روی عملکرد عملگرهای برداشت انجام شده و تأثیر آنها بر کیفیت جواب های تولید شده در قالب جدول و نمودار ارائه شده است.

۸- مراجع

- [1] Salimifard, K., Shahbandarzadeh, H., Raeesi, R. (2012). Green transportation and the role of operation research, international conference on traffic and transportation engineering.
- [2] Palmer, A. (2007). The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles, PhD thesis. Bedford, United Kingdom: Cranfield University.
- [3] Kara et al. (2007). Energy minimizing vehicle routing problem, *Combinatorial optimization and applications*, 4616: 62-71.
- [4] Maden, W., Eglese, R.W., Black, D. (2010). Vehicle routing and scheduling with time varying data: a case study, *Journal of the Operational Research Society*, 61: 515-522.
- [5] Ubeda, S., Arcelus, F. J., Faulin, J. (2011). Green logistics at Eroski: A case study, *International Journal of Production Economics*, 131(1): 44–51.
- [6] Suzuki, Y. (2011). A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(1): 73–77.
- [7] Bektaş, T., Laporte, G. (2011). pollution routing problem, *Transportation Research Part B*, 45(8): 1232–1250.
- [8] Faulin, J., Juan, A., Lera, F., Grasman, S. (2011). Solving the capacitated vehicle routing problem with environmental criteria based on real estimations in road transportation: a case study", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 20: 323–334.
- [9] Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., Xu, Y. (2012). "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, 39(7): 1419–1431.
- [10] Erdoğan, S., Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48: 100–114.
- [11] Demir, E., Laporte, G. (2012). An adaptive large

- [25] Pisinger, D.R.S. (2007). A General Heuristic for Vehicle Routing Problems, *Computers & Operations Research*, 34(8): 2403–2435.
- [26] Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up, *OR Spektrum*, 23: 79-96.



An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Green Vehicle Routing Problem with Simultaneously Pickup and Delivery and Hard Time Windows

S. Majidi, S.M. Hosseini Motlagh*, S. Yaghobi, A. Jokar

Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 June 2015

Accepted 9 Jan 2015

Keywords:

Green vehicle routing
problem
Fuel consumption
Simultaneously pickup and
delivery
Adaptive large neighborhood
search

ABSTRACT

The classical models of vehicle routing generally focused on minimizing total distance and travel time, however in green vehicle routing problem the main objective is minimizing total emissions and fuel consumption besides the other objects.

In this paper, extension of GVRP with minimizing fuel and emission costs presented that considered pickup and delivery constraints with hard time windows. Travel time in this model is not constant and speed of vehicles would be determined in regards to customers' time windows. In this paper, a heuristic based adaptive large neighborhood search proposed for solving the model. Construction algorithm in this method is heuristic based algorithm with proposed criterion according to pick up and delivery constraints and time windows with assumption of variable speed. Computational results confirms efficiency of this algorithm.

* Corresponding author. Seyyed-Mahdi Hosseini-Motlagh
Tel.: 021-73225070 ; E-mail addresses: motlagh@iust.ac.ir