

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

عنوان مقاله:

برنامه ریزی همزمان چندین پروژه ساختمانی با در نظر گرفتن انتخاب تامین کننده و مسیریابی حمل و نقل مواد

(2022)

چکیده

در زنجیره تامین ساخت و ساز، تصمیمات مربوط به تامین می تواند بر زمان بندی پروژه تاثیر بگذارد زیرا فعالیت های پروژه برای آغاز به منابع ضروری نیاز دارد. این مطالعه می خواهد نشان دهد که چگونه ادغام زمان بندی پروژه با انتخاب تامین کننده و مسیریابی حمل و نقل ارزشی را در کل زنجیره تامین پروژه ایجاد می کند. بنابراین، یک مسئله یکپارچه شامل سه مفهوم ذکر شده در سازمانی که چندین پروژه ساختمانی را مدیریت می کند، در نظر گرفته می شود. علاوه بر این، شرایط زیر در مسئله برای نزدیک تر کردن آن به وضعیت واقعی پروژه های ساختمانی در نظر گرفته شده است: (۱) کیفیت همه پروژه ها توسط یک کمیته واحد بررسی می شود. (۲) تامین کنندگان منابع را با تنزیل های افزایشی می فروشند. (۳) روابط تقدم تعمیم یافته بین فعالیت های پروژه در نظر گرفته می شود. به منظور پرداختن به مسئله تحقیق، یک مدل ریاضی بر اساس برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده است. حل این مدل سخت است زیرا به طور همزمان شامل برنامه ریزی چند پروژه و مسیریابی خودرو است. بنابراین، یک روش راه حل مبتنی بر الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) پیشنهاد می شود که با نمونه های مقیاس کوچک و بزرگ اعتبارسنجی شده است. از این روش برای مقایسه مدل پیشنهادی با دو مدل مرتبط استفاده می شود. مقایسه ها نشان می دهد که مدل پیشنهادی تعادل بهتری بین هزینه های بخش های مختلف در زنجیره تامین پروژه ایجاد می کند. دستیابی به این تعادل، کل هزینه مرتبط با مسئله را کاهش می دهد و رضایت مشتری را افزایش می دهد. در نتیجه این یافته ها، مدیران پروژه و محققان مرتبط باید توجه بیشتری به یکپارچگی زنجیره تامین در مسئله خود داشته باشند.

کلید واژه ها:

برنامه ریزی چند پروژه ای

انتخاب تامین کننده

مسیریابی خودرو

تنزیل افزایشی

بازرسی های کیفی

الگوریتم جستجوی ممنوعه

۱. مقدمه

از آنجایی که بسیاری از تامین کنندگان و مشتریان با هر پروژه ساخت و ساز مرتبط هستند، مدیریت زنجیره تامین نقش حیاتی در صنعت ساخت و ساز ایفا می کند. بخش قابل توجهی از هزینه ها در زنجیره تامین ساخت و ساز صرف منابع تجدید ناپذیر (مواد اولیه مانند بتن، سیمان و میلگرد) و منابع تجدیدپذیر (مانند تجهیزات و منابع انسانی) می شود. مواد خام به خودی خود ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه پروژه را تشکیل می دهند و مدیریت مناسب این منابع می تواند به طور قابل توجهی بر زمان بندی پروژه تأثیر بگذارد [۲۵]. اهمیت مدیریت منابع زمانی آشکارتر می شود که زنجیره تامین ساخت و ساز به عنوان یک کل در نظر گرفته شود. در یک زنجیره تامین، هماهنگی بین بخش های مختلف به طور قابل توجهی بر رضایت مشتری تأثیر می گذارد. به عنوان یک فرآیند ضروری در سازمان های پروژه محور، زمان بندی پروژه در صورت هماهنگی با تصمیم های مرتبط با عرضه، مؤثرتر خواهد بود. زمان بندی پروژه کاملاً تحت تأثیر زمان رسیدن مواد است. بنابراین یکپارچه سازی زمان بندی پروژه با انتخاب تامین کننده و حمل و نقل مواد می تواند ارزش قابل توجهی را برای کل زنجیره تامین پروژه به ارمغان بیاورد.

در ادبیات مربوطه، بسیاری از مطالعاتی که به ادغام زمان بندی پروژه و منبع یابی مواد پرداخته اند، وجود تنها یک تامین کننده را فرض کرده اند. با این حال، در دنیای واقعی، زنجیره تامین پروژه ممکن است بسیاری از تامین کنندگان بالقوه را درگیر کند. در این مواقع ضروری است که با توجه به معیارهایی مانند زمان، کیفیت و تنزیل، مناسب ترین تامین کنندگان را انتخاب کنید. یک عامل مهم در انتخاب تامین کننده، نوع و میزان تنزیل پیشنهادی است. اغلب، تامین کنندگان مصالح ساختمانی تمایل دارند یکی از دو نوع تنزیل یعنی تنزیل تمام واحدی و تنزیل افزایشی را برای جلب رضایت مشتریان و افزایش قصد خرید ارائه دهند. علاوه بر این، باید توجه داشته باشیم که اکثر مقالات مرتبط به بررسی مسائل تک پروژه ای پرداخته اند. با این حال، مدیریت منابع به طور قابل ملاحظه ای بر موفقیت سازمان های پروژه محور در محیط های چند پروژه ای تأثیر می گذارد.

حمل و نقل مواد بخش قابل توجهی از هزینه و زمان پروژه را تشکیل می دهد [۲]. در واقع بسیاری از پروژه ها به دلیل تاخیر در دریافت مصالح به حالت تعلیق در می آیند. یکی از بخش های مهم برنامه ریزی حمل و نقل در پروژه های ساختمانی بزرگ، مسیریابی خودرو است [۳۶]. با این وجود، مسیریابی خودرو در محیط های پروژه در تحقیقات قبلی توجه زیادی را به خود جلب نکرده است. علاوه بر این، مقالات معدود ارائه شده در این زمینه تأثیر مسیریابی خودرو را بر زمان بندی پروژه در نظر نمی گیرند.

با توجه به توضیحات فوق، ارائه یک مدل یکپارچه از برنامه ریزی چند پروژه، انتخاب تامین کننده و مسیریابی حمل و نقل می تواند مزایای زیر را داشته باشد:

• از آنجایی که انتخاب تامین کننده و مسیریابی حمل و نقل مواد تعیین می کند که چه زمانی منابع تجدید ناپذیر در دسترس پروژه باشد، در نظر گرفتن این مسائل در زمان بندی پروژه، برنامه ریزی فعالیت را واقعی تر و قابل اجراتر می کند.

• به جای تمرکز بر یک بخش خاص از زنجیره تامین ساخت و ساز، هزینه قطعات مختلف را متعادل می کند و در کل زنجیره تامین ارزش ایجاد می کند.

• توجه بیشتر به اهمیت مدیریت منابع که بخش بزرگی از هزینه های پروژه ها را تشکیل می دهد.

بنابراین، این مقاله یک مدل ریاضی برای هماهنگی زمان بندی پروژه، انتخاب تامین کننده و مسئله مسیریابی خودرو در محیطی شامل پروژه های ساخت و ساز متعدد ارائه می کند. علاوه بر این، برخی از ویژگی ها در نظر گرفته می شود تا مسئله را تا حد امکان به موقعیت های واقعی پروژه های ساختمانی نزدیک کند: (a) تامین کنندگان تنزیل های افزایشی برای خرید مواد ارائه می دهند. (b) یک کمیته بازرسی کیفی پروژه ها را به ترتیبی که توسط پیمانکار اصلی تعیین می شود انجام می دهد. (c) روابط تقدم تعمیم یافته ای بین فعالیت های هر پروژه وجود دارد.

۲. بررسی ادبیات

بسیاری از مقالات در ادبیات زنجیره تامین ساخت و ساز از مدل های ریاضی برای ادغام تصمیمات و ایجاد تعادل بین منافع ذینفعان مختلف استفاده کرده اند. Hsu و همکاران [۱۲] یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای را برای بهینه سازی فرآیندهای لجستیک ساخت و ساز مدولار توسعه داده اند. این مدل تولید، ذخیره سازی و مونتاژ را به طور همزمان پوشش می دهد. در حسینی نسب و همکاران [۱۱]، یک مدل چند هدفه برای ادغام انتخاب، زمان بندی و بودجه بندی پروژه های راه سازی شهری معرفی شد. میرالنقی و همکاران [۱۷] یک چارچوب کلی برای هماهنگی انتخاب و زمان بندی پروژه های جاده ای شهری چند طبقه با قیدهای بودجه در یک افق برنامه ریزی معین ارائه می کنند. سایر مقالات ارائه شده در مورد موضوعات مشابه عبارتند از میرعلینقی و همکاران [۱۸]، حسینی نسب و شتاب بوشهری [۱۰]، ژانگ و همکاران [۳۸] و سرما و عادل [۲۶]. با این حال، چند مطالعه رابطه بین منابع مواد و زمان بندی پروژه را بررسی کرده اند که بیشتر آنها با مسئله PSMO سروکار دارند. یکی از اولین مدل های مربوط به PSMO توسط شیخ سجادیه و همکاران [۲۹] ارائه شد. آنها سعی کردند زمان آغاز و پایان بهینه فعالیت ها و همچنین زمان سفارش مواد را تعیین کنند تا هزینه کل را به حداقل برسانند. فو [۶] مسئله را با در نظر گرفتن فعالیت های چند حالتی که مدت زمان فعالیت بسته به حالت اجرا متفاوت است،

ارزیابی کرد. شهسوار و همکاران [۲۸] تنزیل همه واحدها و روابط تقدم تعمیم یافته را در مسئله PSMO وارد کردند و یک الگوریتم GA-PSO را برای حل مسئله پدیدار شده توسعه دادند. به برخی دیگر از آثار مرتبط می توان اشاره کرد، مانند تبریزی و قادری [۳۲]، زراقی و همکاران [۴۱] و ژانگ و همکاران [۳۹].

در میان مطالعات PSMO، مدل هایی با فرض حضور چندین تامین کننده پیشنهاد شده است. در این راستا، تبریزی و قادری [۳۴] مدلی را توسعه دادند که تامین کنندگان مختلف را با سیاست های تنزیل تمام واحدی متمایز در نظر گرفت. در مطالعه آنها، خرید هر ماده از تامین کننده های منفرد یک زمان پیش بینی داشت که بر زمان بندی پروژه تأثیر گذاشت. همچنین حبیبی و همکاران [۸] مزیت های زیست محیطی و اجتماعی تامین کنندگان بالقوه را کمی کردند و از آنها به عنوان معیاری برای انتخاب تامین کننده استفاده کردند. علاوه بر این مقالات، رحمان و همکاران [۲۱] و تبریزی و قادری [۳۳] نیز به مسئله انتخاب تامین کننده در مدل های PSMO پرداختند. برخلاف اکثر مطالعات مرتبط که تنزیل های تمام واحدی را برای تامین کنندگان در نظر گرفته اند، تنزیل های افزایشی نیز در برنامه های کاربردی دنیای واقعی ارائه می شوند. بر این اساس، تبریزی [۳۱] یک مدل یکپارچه برای زمان بندی پروژه و تهیه مواد پیشنهاد کرد که در آن تامین کنندگان هم تنزیل های تمام واحدی و هم تنزیل های افزایشی را ارائه می کنند.

تمامی مطالعات مذکور یک پروژه واحد را در مدل های خود در نظر گرفته اند. با این حال، هماهنگی بین تصمیمات تامین مواد و زمان بندی پروژه می تواند در یک محیط چند پروژه مهم تر باشد. تحقیق انجام شده توسط چن و همکاران [۳] با مدل سازی همزمان زمان بندی پروژه ها و انتخاب تامین کننده در یک محیط چند پروژه ای سروکار دارد. مواد مورد نیاز برای پروژه ها توسط تامین کنندگان بالقوه تهیه شد و یک کمیته بازرسی، بازرسی نهایی کیفیت همه پروژه ها را انجام داد. رضاحسینی و همکاران [۲۳] روی مسائلی مانند سطح آلودگی خودروها و تعیین ناوگان حمل و نقل در زمان بندی چند پروژه یکپارچه و مسئله انتخاب تامین کننده تمرکز کردند. در هر دو مطالعه ذکر شده، آغاز یک فعالیت به در دسترس بودن منابع تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید به طور همزمان بستگی دارد.

علیرغم اهمیت مدیریت حمل و نقل در پروژه های ساختمانی بزرگ، مقالات کمی مسیریابی خودروها را در محیط پروژه ساخت و ساز مورد مطالعه قرار داده اند. در این راستا زو و گانگ [۳۶] یک مدل فازی تصادفی چندهدفه دو سطحی برای حمل و نقل مصالح ساختمانی ارائه کردند. در سطح اول، شرکت ساختمانی در مورد میزان تقاضا و عرضه تصمیم می گیرد. سپس در سطح دوم، هر آژانس حمل و نقل مسیرهای حمل و نقل را تعیین می کند تا هزینه خود را به حداقل برساند. سایر مطالعات در این زمینه فقط شامل Ma و Xu [۱۶] و Yan و همکاران [۳۷] است.

مقالات ذکر شده در پاراگراف قبل مسئله مسیریابی خودروی بسته (CVRP) را در نظر گرفته اند. در مقابل، یک سازمان ممکن است خودرویی مانند کامیون در شرایط واقعی نداشته باشد، و آنها می توانند توسط آژانس های حمل و نقل یا تدارکات شخص ثالث (3PL) ارائه شوند. در چنین شرایطی، ما با یک مسئله مسیریابی خودرو [۲۷] مواجه هستیم، زیرا خودروها مسیر خود را از تامین کنندگان آغاز می کنند و زمانی که آخرین پروژه را انجام می دهند به مبدا باز نمی گردند. علاوه بر این، در محیط هایی مانند پروژه های ساختمانی، هر ماده توسط چندین تامین کننده تهیه می شود. این شرایط منجر به "مسئله مسیریابی خودروها باز چند انباری (MDOVRP)" می شود. مسئله MDOVRP برای اولین بار توسط تارانتیلیس و کیرانودیس [۳۵] در توزیع گوشت تازه معرفی شد و اولین بار توسط لیو و همکاران [۱۵] فرموله شد. از آنجایی که روش های دقیق برای حل مسئله زمان بر هستند، روش های راه حل مختلفی مانند الگوریتم جستجوی ممنوعه [۳۰] و الگوریتم جستجوی محلی تکراری مبتنی بر حافظه [۱] پیشنهاد شده اند.

با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی ادبیات، نوآوری های اصلی پژوهش حاضر به شرح زیر است.

- تعداد محدودی از مطالعات فرض کرده اند که در دسترس بودن منابع به انتخاب تامین کننده یا مسیریابی خودرو بستگی دارد. علاوه بر این، هیچ مدلی در ادبیات برنامه ریزی پروژه، انتخاب تامین کننده، و مسیریابی خودرو را به طور همزمان در نظر نگرفته است. این تحقیق یک مدل یکپارچه شامل سه مسئله ذکر شده را برای ایجاد یک مبادله بین هزینه ها در زنجیره تامین پروژه ارائه می کند.
- در مدل یکپارچه پیشنهادی، مسیریابی حمل و نقل بر اساس MDOVRP انجام می شود. این رویکرد کاربرد مدل را افزایش می دهد زیرا سازمان ها در دنیای واقعی ممکن است از آژانس های حمل و نقل برای انتقال منابع مورد نیاز خود استفاده کنند.
- در نظر گرفتن مفروضاتی مانند محیط های چند پروژه ای، روابط تقدم تعمیم یافته، بازرسی های کیفیت نهایی و نیاز به هر دو نوع منابع (تجدید پذیر و غیر قابل تجدید) مدل سازی را واقعی تر می کند.
- یک روش کارآمد بر اساس الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مدل ارائه شده و با استفاده از اندازه های مختلف مسائل اعتبار سنجی شده است.

بقیه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است:

بخش ۳ مسئله تحقیق را به تفصیل شرح می دهد و سپس یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای ادغام برنامه ریزی پروژه، انتخاب تامین کننده و مسئله های مسیریابی خودرو ارائه می کند. بخش ۴ یک روش

راه حل را بر اساس الگوریتم جستجوی ممنوعه پیشنهاد می کند. بخش ۵ با عنوان "نتایج عددی" شامل اعتبار سنجی روش حل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد مختلف و یک مطالعه تطبیقی برای روشن شدن مزایای رویکرد پیشنهادی است. در نهایت، نتیجه گیری می کنیم و توصیه هایی را برای تحقیقات آینده در بخش ۶ ارائه می کنیم.

۳. تعریف و مدل سازی مسئله

ابتدا در این بخش، مسئله تحقیق و مفروضات مربوط به آن تشریح می شود. سپس نمادهای استفاده شده در مدل ریاضی را تعریف می کنیم. در نهایت، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای ادغام زمان بندی چند پروژه، انتخاب تامین کننده و مسیریابی خودرو ارائه خواهد شد.

۳.۱. شرح مسئله

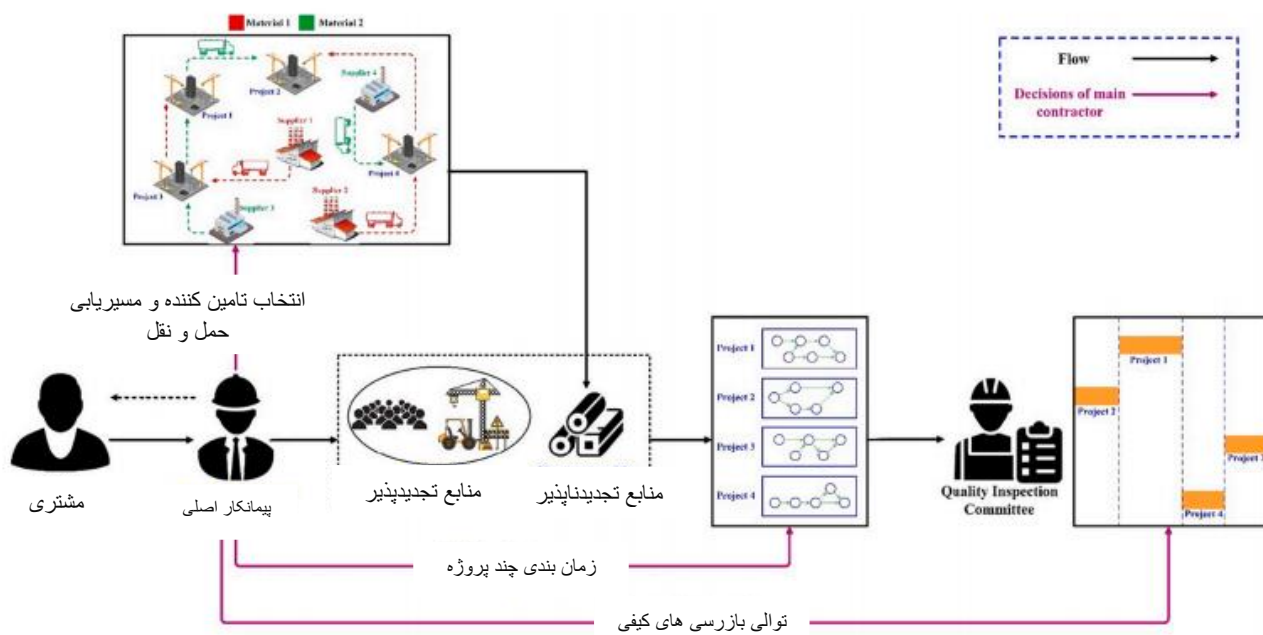
در این مسئله، یک سازمان پروژه محور به عنوان پیمانکار اصلی شبکه ای از پروژه های ساختمانی (J) را به طور همزمان مدیریت می کند. هر پروژه $j \in J$ شامل مجموعه ای از فعالیت های A_j است که باید برای تکمیل پروژه انجام شود. برای انجام هر فعالیت به مجموعه ای از منابع تجدید پذیر (مانند سیمان، میلگرد، سنگ و ... که در این مقاله مواد نامیده می شود) و منابع تجدید پذیر (مانند منابع انسانی، تجهیزات و ...) نیاز است. هر فعالیت $a \in A$ را می توان زمانی آغاز کرد که قید های اولویت برآورده شده باشند و تمام منابع مورد نیاز در دسترس باشند. مجموعه خاصی از منابع تجدید پذیر (L_j) برای پروژه $j \in J$ در دسترس است و هر منبع تجدید پذیر $l \in L_j$ می تواند تنها در یک فعالیت در یک زمان خاص در دسترس باشد. همچنین در این مطالعه روابط تقدم تعمیم یافته بین فعالیت های هر پروژه در نظر گرفته شده است. بنابراین روابطی مانند آغاز به آغاز، پایان به آغاز، پایان به پایان و آغاز به پایان می تواند در هر پروژه وجود داشته باشد.

مقدار نیاز یک پروژه به یک منبع تجدید پذیر بر اساس کل تقاضای فعالیت های پروژه برای آن منبع تعیین می شود. هر منبع غیر قابل تجدید $m \in M$ می تواند توسط مجموعه ای از تامین کنندگان (D_m) با سیاست های تنزیل متفاوت و ظرفیت های خاص ارائه شود. تامین کنندگان تنزیل های افزایشی ارائه می دهند و در نتیجه، مقدار تنزیل به محدوده ای که مقدار سفارش در آن قرار می گیرد بستگی دارد.

در این مسئله، خودروها اجاره شده از یک ارائه دهنده 3PL برای انتقال منابع از تامین کنندگان به پروژه ها استفاده می شود. مسیریابی خودرو توسط پیمانکار اصلی تعیین می شود به طوری که هر خودرو منابعی را از

تامین کننده دریافت کرده و منابع را به مجموعه ای از پروژه های تحت پوشش تامین کننده تحویل می دهد. هر خودرو دارای ظرفیت محدودی است و پس از انجام آخرین پروژه تعیین شده به مبدأ باز نمی گردد. این در ترکیب با این واقعیت که چندین تامین کننده هر ماده خام را ارائه می دهند، ما را به مدل سازی مسیریابی حمل و نقل به عنوان یک MDOVRP در این مطالعه سوق داد.

پس از انجام کلیه فعالیت های یک پروژه، هر زمان که کمیته بازرسی موجود باشد، بازرسی کیفی انجام می شود. این تحقیق فرض می کند که زمان بازرسی شامل تمام کارهایی است که منجر به بسته شدن یک پروژه می شود. در نتیجه زمان بسته شدن پروژه زمانی است که بازرسی کیفیت به پایان می رسد. همچنین زمان اتمام پروژه به عنوان زمانی تعریف می شود که تمام فعالیت های پروژه تکمیل می شود. باید توجه داشته باشیم که فقط یک کمیته بازرسی موجود است که باید همه پروژه ها را ارزیابی کند. بنابراین پیمانکار باید ترتیب بازرسی پروژه ها را مشخص کند تا هزینه های تأخیر به حداقل برسد. شکل ۱ ساختار کلی مسئله را نشان می دهد.



شکل ۱. ساختار کلی محیط مسئله.

به طور خلاصه، پیمانکار اصلی قصد دارد بین هزینه خرید منابع تجدیدناپذیر، هزینه حمل و نقل و هزینه تأخیر پروژه‌ها به واسطه: (a) انتخاب تامین کنندگان هر پروژه، (b) انتخاب مسیرهای بهینه برای حمل و نقل مواد، (c) برنامه ریزی پروژه ها، و (d) تعیین ترتیب بازرسی های کیفیت.

۳.۲. مفروضات مسئله

مفروضات در نظر گرفته شده در این تحقیق به شرح زیر است.

۱. هزینه های حمل و نقل شامل مواردی مانند اجاره خودرو، استهلاک و مصرف سوخت است. این هزینه ها معمولاً به فاصله طی شده بستگی دارد نه وزن حمل شده. در نتیجه هزینه حمل و نقل مواد بین دو نقطه فقط متناسب با فاصله بین دو نقطه است.
۲. هزینه های حمل و نقل شامل مواردی مانند اجاره خودرو، استهلاک و مصرف سوخت است. ما در نظر می گیریم که هر تامین کننده فقط یک منبع غیر قابل تجدید برای ساده سازی مدل سازی ارائه می دهد. بنابراین، تأمین کننده ای که بیش از یک ماده تولید می کند، می تواند به عنوان تأمین کننده جداگانه در همان مکان مدل سازی شود.
۳. فرض بر این است که منابع انسانی و تجهیزات نمی توانند چندین کار را به طور همزمان انجام دهند. بنابراین، هر منبع تجدیدپذیر را می توان تنها به یک فعالیت در یک زمان اختصاص داد.
۴. هر تامین کننده ظرفیت محدودی دارد.
۵. ظرفیت هر خودرو مشخص و برابر Q است.
۶. از آنجایی که خودروها مورد نیاز از یک ارائه دهنده 3PL اجاره می شوند، تعداد خودروها محدود نیست و می توان به هر مسیر یک خودرو اختصاص داد.
۷. مواد مورد نیاز برای هر پروژه تنها توسط یک خودرو و در یک مسیر از طریق پروژه تحویل داده می شود. بنابراین، کل تقاضای فعالیت های پروژه برای یک منبع تجدید ناپذیر با هم به محل پروژه می رسد.
۸. روابط تقدم در هر پروژه مستقل از روابط در پروژه های دیگر است.
۹. منابع تجدیدپذیر بین پروژه ها تقسیم نمی شود.
۱۰. از آنجایی که حمل و نقل مواد در این مطالعه به عنوان مسئله مسیریابی خودروها باز طبقه بندی می شود، هزینه حمل و نقل از گره های پروژه به هر تامین کننده را صفر می کنیم. در نتیجه بخشی از مسیرهای منتهی به دیو حذف شده و در محاسبه هزینه حمل و نقل و تابع هدف لحاظ نمی شود.

۳.۳. نمادها

نمادها و نمادهای مورد استفاده برای مدل سازی مسئله به چهار گروه، یعنی شاخص ها، مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، تقسیم می شوند.

جدول ۲ نمادهای مورد استفاده برای مدل سازی مسئله.

نماد	توضیح
شاخص ها a,b m l (a,b) k i,j u a_0 j_0	شاخص فعالیت ها شاخص منابع تجدید ناپذیر (مواد) شاخص منابع تجدیدپذیر روابط تقدم زمانی که a مقدم بر b باشد شاخص تامین کنندگان فهرست گره ها (شامل پروژه ها و تامین کنندگان) فهرست محدوده های تنزیل یک فعالیت ساختگی با مدت زمان برابر با ۰ است که قبل از همه فعالیت ها آغاز می شود یک پروژه ساختگی با مدت زمان بازرسی برابر با ۰ است که قبل از همه پروژه ها بازرسی می شود
مجموعه ها J A A_j M D_m N_m $V_m = D_m \cup N_m$ L_j E_j^{SS} E_j^{SF} E_j^{FS} E_j^{FF} AL_j^l U_k	مجموعه پروژه ها مجموعه تمام فعالیت ها مجموعه فعالیت هایی که باید در پروژه j تکمیل شود مجموعه ای از منابع تجدید ناپذیر (مواد) مجموعه ای از تامین کنندگان برای منابع غیر قابل تجدید m مجموعه پروژه هایی که نیاز به منابع تجدیدناپذیر دارند مجموعه کلیه تامین کنندگان و پروژه های مرتبط با منابع تجدید ناپذیر m مجموعه ای از منابع تجدیدپذیر متعلق به پروژه j مجموعه ای از روابط تقدم آغاز به آغاز بین فعالیت ها در پروژه j مجموعه روابط تقدم آغاز تا پایان بین فعالیت ها در پروژه j مجموعه ای از روابط تقدم پایان به آغاز بین فعالیت ها در پروژه j مجموعه ای از روابط تقدم پایان به پایان بین فعالیت ها در پروژه j مجموعه ای از فعالیت ها در پروژه j که به منبع تجدیدپذیر l نیاز دارد مجموعه ای از محدوده های تنزیل ارائه شده توسط تامین کننده k

<p>پارامترها</p> ct_{ij}^m cp_{ku} d_{jm} DD_j FF_{ab} FS_{ab} MM DUR_a PC_{max} q_{am} Q r_k R_j CAP_k SF_{ab} SS_{ab} T_{ij}^m TDC_{max} TNC TPC_{max} W_j α_{ku}	<p>هزینه انتقال مواد m از گره $i \in V_m$ به گره $j \in V_m \setminus i$</p> <p>هزینه خرید از تامین کننده k در محدوده تنزیل u</p> <p>مقدار ماده m که توسط پروژه j مورد نیاز است</p> <p>سررسید پروژه j برای بسته شدن</p> <p>حداقل فاصله زمانی از پایان فعالیت a تا پایان فعالیت b</p> <p>حداقل فاصله زمانی از پایان فعالیت a تا آغاز فعالیت b</p> <p>مقدار نسبتاً زیادی</p> <p>مدت فعالیت a</p> <p>حداکثر هزینه خرید منابع تجدیدناپذیر</p> <p>مقدار ماده m مورد نیاز فعالیت a</p> <p>ظرفیت هر خودرو</p> <p>زمان عرضه تامین کننده k</p> <p>مدت زمان بازرسی پروژه j</p> <p>ظرفیت تامین کننده k</p> <p>حداقل فاصله زمانی از آغاز فعالیت a تا پایان فعالیت b</p> <p>حداقل فاصله زمانی از آغاز فعالیت a تا آغاز فعالیت b</p> <p>زمان انتقال مواد m از گره $i \in V_m$ به گره $j \in V_m \setminus i$</p> <p>حداکثر هزینه تاخیر پروژه ها</p> <p>کل هزینه های عادی شده</p> <p>حداکثر هزینه حمل و نقل منابع تجدید ناپذیر</p> <p>هزینه تاخیر پروژه j در واحد زمان</p> <p>قید محدوده تنزیل u مربوط به تامین کننده k</p>
<p>متغیرهای وابسته</p> FT_a f_k	<p>زمان پایان فعالیت a</p> <p>کل مقدار سفارش شده از تامین کننده k</p>
<p>متغیرهای تصمیم گیری</p> x_{ijk}^m y_{jk}^m uq_i^m t_i^m	<p>یک متغیر صفر و یک که اگر خودرو ای که از تامین کننده k شروع می شود به طور مستقیم از گره i به گره j برای حمل مواد m حرکت کند، برابر ۱ است، در غیر این صورت ۰</p> <p>یک متغیر صفر و یک که اگر پروژه j برای تامین مواد m به تامین کننده k اختصاص داده شود برابر با ۱ است، در غیر این صورت ۰</p> <p>کران بالای مقدار ماده m که قبلاً توسط یک خودرو پس از خروج از گره i توزیع شده است</p> <p>حد بالایی در زمانی که خودرو حامل مواد m از گره i خارج می شود</p>

g_{ku}	مقدار سفارش از تامین کننده k در محدوده تنزیل u
λ_{ku}	یک متغیر صفر و یک که اگر مقدار سفارش شده از تامین کننده k در محدوده تنزیل u به حد خود برسد، برابر ۱ است، در غیر این صورت ۰
z_{ij}	یک متغیر صفر و یک که اگر پروژه i بلافاصله قبل از پروژه j بررسی شود برابر با ۱ است، در غیر این صورت ۰ است.
re_{ab}	یک متغیر صفر و یک که اگر فعالیت a قبل از فعالیت b برنامه ریزی شده باشد برابر با ۱ است، در غیر این صورت ۰. $(j \in J \text{ و } l \in L_j \text{ و } a, b \in Al_j^l)$
ST_a	زمان آغاز فعالیت a
CT_j	زمانی که تمام فعالیت های پروژه j تکمیل می شود (زمان اتمام پروژه j)
CS_j	زمان اتمام بازرسی پروژه j (زمان بسته شدن پروژه j)
TD_j	تاخیر پروژه j

۳.۴. ارائه مدل

تابع هدف، که به عنوان هزینه های نرمال شده کل (TNC) نامیده می شود، با جمع کردن مقادیر نرمال شده سه هزینه (معادل (۱)) به دست می آید: هزینه تاخیر پروژه، هزینه خرید مواد و هزینه حمل و نقل. هزینه تاخیر پروژه مجموع هزینه های وزنی تاخیرهای پروژه است. هزینه تاخیر برای هر پروژه تابعی از "زمان تاخیر" و "هزینه تاخیر در واحد زمان" است. هزینه خرید مواد به تامین کنندگان انتخاب شده و محدوده تنزیلی که مقدار سفارش در آن قرار می گیرد بستگی دارد. در نهایت هزینه حمل و نقل برابر با کل هزینه مسیرهای انتخابی است که با فاصله طی شده نسبت مستقیم دارد.

استفاده از هزینه های نرمال شده در تابع هدف نشان می دهد که ما در تلاش برای یافتن بهترین مبادله بین هزینه های زنجیره تامین ساخت و ساز هستیم.

$$minTNC = \left(\frac{\sum_{j \in J} W_j TD_j}{TDC_{max}} + \frac{\sum_{k \in D} \sum_{u=1}^{|U_k|} cp_{ku} g_{ku}}{PC_{max}} + \frac{\sum_{m \in M} \sum_{i \in V_m} \sum_{j \in V_m} \sum_{k \in D_m} ct_{ij}^m \cdot x_{ijk}^m}{TPC_{max}} \right) \times 100 \quad (1)$$

قیدهای مربوط به حمل و نقل مواد در معادلات (۹) - (۲) آمده است، معادله (۲) به این معنی است که خودرو از تامین کننده k ، مواد m را به پروژه j تحویل می دهد، اگر مواد m مورد نیاز پروژه j تامین کننده k باشد. قید (۳) تضمین می کند که پروژه ها هر نوع منبع تجدیدناپذیر را فقط از یک تامین کننده خریداری می کنند، معادله (۴) تضمین می کند که اگر خودرو وارد یک گره شود، باید از آن گره خارج شود. با توجه به قید (۵)، مقدار مواد بارگیری شده به خودرو باید حداقل برابر با کل تقاضای پروژه های اختصاص داده شده به خودرو باشد. معادله (۶) تضمین می کند که قید ظرفیت خودرو برآورده شده است، و قید (۷) اطمینان از تخلیه هیچ ماده ای در مکان های تامین کننده است. معادله (۸) زمان رسیدن وسایل نقلیه به هر پروژه را محاسبه می کند. همچنین معادله (۹) نشان می دهد که یک خودرو نمی تواند یک تامین کننده را قبل از زمان انتشار سفارش ترک کند.

$$\sum_{i \in V_m \setminus j} x_{ijk}^m = y_{jk}^m \forall m \in M, j \in N_m, k \in D_m \quad (2)$$

$$\sum_{k \in D_m} y_{jk}^m = 1 \forall m \in M, j \in N_m \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_m} x_{ijk}^m = \sum_{i \in V_m} x_{jik}^m \forall m \in M, j \in V_m, k \in D_m \quad (4)$$

$$uq_i^m - uq_j^m + Q.x_{ijk}^m \leq Q - d_{jm}.x_{ijk}^m \forall m \in M, \forall i, j \in N_m | i \neq j, k \in D_m \quad (5)$$

$$uq_j^m \leq Q \forall m \in M, j \in N_m \quad (6)$$

$$uq_k^m = 0 \forall m \in M, k \in D_m \quad (7)$$

$$t_i^m - t_j^m + MM.x_{ijk}^m \leq MM - T_{ij}^m.x_{ijk}^m \forall m \in M, \forall i, j \in N_m | i \neq j, k \in D_m \quad (8)$$

$$t_k^m = r_k \forall m \in M, k \in D_m \quad (9)$$

قید های خرید منابع تجدید ناپذیر شامل معادلات زیر است که به ترتیب شرح داده شده است. معادله (۱۰) اعلام می کند که تقاضای هر پروژه برای یک منبع تجدید ناپذیر برابر با کل تقاضای فعالیت های پروژه است. معادله (۱۱) نشان می دهد که کل مبلغ سفارش شده از یک تامین کننده با جمع بندی مبالغ سفارش داده شده در تمام محدوده های تنزیل مربوط به تامین کننده به دست می آید. معادله (۱۲) تضمین می کند که کل مقدار سفارش شده از یک تامین کننده نباید کمتر از کل تقاضای پروژه های واگذار شده باشد. معادله (۱۳) تضمین می کند که

کل مبلغ درخواستی از هر تامین کننده از ظرفیت تامین کننده تجاوز نمی کند. معادله (۱۴) نشان می دهد که هر محدوده تنزیل افزایشی زمانی اعمال می شود که خرید از محدوده قبلی به حد مجاز خود برسد. در نهایت، معادله (۱۵) مقدار متغیر تصمیم λ_{ku} را در اولین و آخرین محدوده تنزیل مربوط به هر تامین کننده تعیین می کند.

$$d_{jm} = \sum_{a \in A_j} q_{am} \forall m \in M, j \in N_m \quad (10)$$

$$f_k = \sum_{u=1}^{|U_k|} g_{ku} \forall k \in D \quad (11)$$

$$f_k \geq \sum_{j \in N_m} d_{jm} \cdot y_{jk}^m \quad \forall m \in M, k \in D_m \quad (12)$$

$$f_k \leq Cap_k \forall k \in D \quad (13)$$

$$\alpha_{ku} \lambda_{ku} \leq g_{ku} \leq \alpha_{ku} \lambda_{k(u-1)} \forall k \in D, u = 1, 2, \dots, |U_k| \quad (14)$$

$$\lambda_{k0} = 1, \lambda_{k|U_k|} = 0 \forall k \in D \quad (15)$$

قید های (۲۵)-(۱۶) زمان شروع و پایان فعالیت ها در پروژه ها را محاسبه می کند. معادله (۱۶) تضمین می کند که هر فعالیت زمانی شروع می شود که منابع تجدید ناپذیر مورد نیاز به محل پروژه رسیده باشد. معادله (۱۷) نحوه محاسبه زمان پایان هر فعالیت را نشان می دهد. همچنین، معادلات (۲۱) - (۱۸) رابطه بین زمان شروع و زمان پایان فعالیت ها را در هر رابطه تقدم مشخص می کند. علاوه بر این، قیدهای (۲۵) - (۲۲) تضمین می کنند که فعالیت هایی که به همان نوع منابع تجدیدپذیر نیاز دارند، به طور همزمان انجام نمی شوند.

$$ST_a \geq t_j^m \forall m \in M, j \in N_m, a \in A_j \quad (16)$$

$$FT_a = ST_a + DUR_a \forall a \in A \quad (17)$$

$$ST_b \geq ST_a + SS_{ab} \forall j \in J, \forall (a, b) \in E_j^{SS} \quad (18)$$

$$ST_b \geq FT_a + FS_{ab} \quad \forall j \in J, \forall (a, b) \in E_j^{FS} \quad (19)$$

$$FT_b \geq FT_a + FF_{ab} \forall j \in J, \forall (a, b) \in E_j^{FF} \quad (20)$$

$$FT_b \geq ST_a + SF_{ab} \forall j \in J, \forall (a, b) \in E_j^{SF} \quad (21)$$

$$ST_b \geq ST_a + P_a - MM(1 - re_{ab}) \quad \forall j \in J, l \in L_j, \forall a, b \in AL_j^l \mid a \neq b \quad (22)$$

$$\sum_{a \in \{AL_j \cup a_0\} \setminus b} re_{ab} \geq 1 \quad \forall j \in J, l \in L_j, b \in AL_j^l \quad (23)$$

$$\sum_{b \in AL_j^l \setminus a} re_{ab} \leq 1 \quad \forall j \in J, l \in L_j, a \in AL_j^l \quad (24)$$

$$\sum_{b \in AL_j^l} re_{a_0b} \leq 1 \quad \forall j \in J, l \in L_j \quad (25)$$

همچنین قید های زیر مربوط به زمان اتمام پروژه ها، زمان بسته شدن و تاخیر می باشد. معادله (۲۶) نشان می دهد که زمان تکمیل هر پروژه قبل از پایان تمام فعالیت های مرتبط نیست. قید (۲۷) نشان دهنده رابطه بین زمان تکمیل و زمان بسته شدن هر پروژه است. قیدهای (۳۱) - (۲۸) توالی بازرسی را مشخص می کنند و اطمینان می دهند که کمیته بازرسی می تواند از یک پروژه در یک زمان بازدید کند. علاوه بر این، معادله (۳۲) همچنین چگونگی ارتباط تاخیر با زمان بسته شدن پروژه را توصیف می کند. در نهایت، قید های (۳۳) و (۳۴) نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می کنند.

$$CT_j \geq ST_a + P_a \forall j \in J, a \in A_j \quad (26)$$

$$CS_j \geq CT_j + R_j \forall j \in J \quad (27)$$

$$CS_j \geq CS_i + R_i - MM(1 - z_{ij}) \quad \forall i, j \in J \mid i \neq j \quad (28)$$

$$\sum_{i \in \{J \cup j_0\} \setminus j} z_{ij} \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J \setminus i} z_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in J \quad (30)$$

$$\sum_{j \in J} z_{j_0j} \leq 1 \quad (31)$$

$$TD_j \geq CS_j - DD_j \forall j \in J \quad (32)$$

$$x_{ijk}^m, y_{jk}^m, \lambda_{ku}, z_{ij}, re_{ab} \in \{0, 1\} \quad (33)$$

$$uq_i^m, t_j^m, g_{ku}, f_k, ST_a, FT_a, CT_j, CS_j, TD_j \geq 0 \quad (34)$$

در پایان این بخش لازم است به چگونگی ادغام در مدل اشاره شود. معادله (۱۶) در مدل ریاضی نشان می دهد که زمان شروع فعالیت ها بر اساس زمان رسیدن منابع تجدید ناپذیر تعیین می شود. علاوه بر این، زمان رسیدن منابع تجدید ناپذیر بر اساس قید های مربوط به مسیریابی محاسبه می شود (معادل (۹) - (۲)). به این معنی که مسیریابی خودرو همراه با برنامه ریزی پروژه انجام می شود و تعامل آنها تعادل هزینه ها را در تابع هدف تعیین می کند. همچنین، از آنجایی که مسیریابی در مدل مبتنی بر MDOVRP است، می توان ادعا کرد که انتخاب تأمین کننده مناسب بر تصمیم گیری های مسیریابی تأثیر می گذارد (معادل (۲)). از سوی دیگر، از آنجایی که تأمین کنندگان تنزیل های افزایشی ارائه می دهند، هماهنگی در برنامه ریزی پروژه ها نقش اساسی در فرآیند انتخاب تأمین کننده ایفا می کند (معادل (۱۵) - (۱۱)).

۴. رویکرد راه حل

با توجه به بخش های قبلی، مسئله ارائه شده می تواند با ساده کردن مفروضات به یک MDOVRP تبدیل شود. با توجه به این موضوع، و با توجه به اینکه MDOVRP NP-hard است [۱]، مسئله پیشنهادی ما نیز به عنوان NP-hard طبقه بندی می شود. بنابراین، در مسائل بزرگ مقیاس، الگوریتم های ابتکاری و فراابتکاری ممکن است کارایی بالاتری نسبت به روش های دقیق داشته باشند. الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) [۷] یک الگوریتم فراابتکاری ثابت شده است که کارایی بالایی هم در مسائل VRP و هم در مسائل زمان بندی چند پروژه دارد. علاوه بر این، این الگوریتم اغلب برای حل مسائل مشابه، مانند MDOVRP [30]، MDVRP [۴،۲۲،۲۴] و زمان بندی چند پروژه [۱۹،۲۰،۴۰] استفاده شده است که منجر به نتایج مطلوبی شده است. از این رو، ما یک الگوریتم فراابتکاری را برای حل مدل پیشنهادی با سفارشی کردن الگوریتم جستجوی ممنوعه بر اساس شرایط مسئله پیشنهاد کردیم.

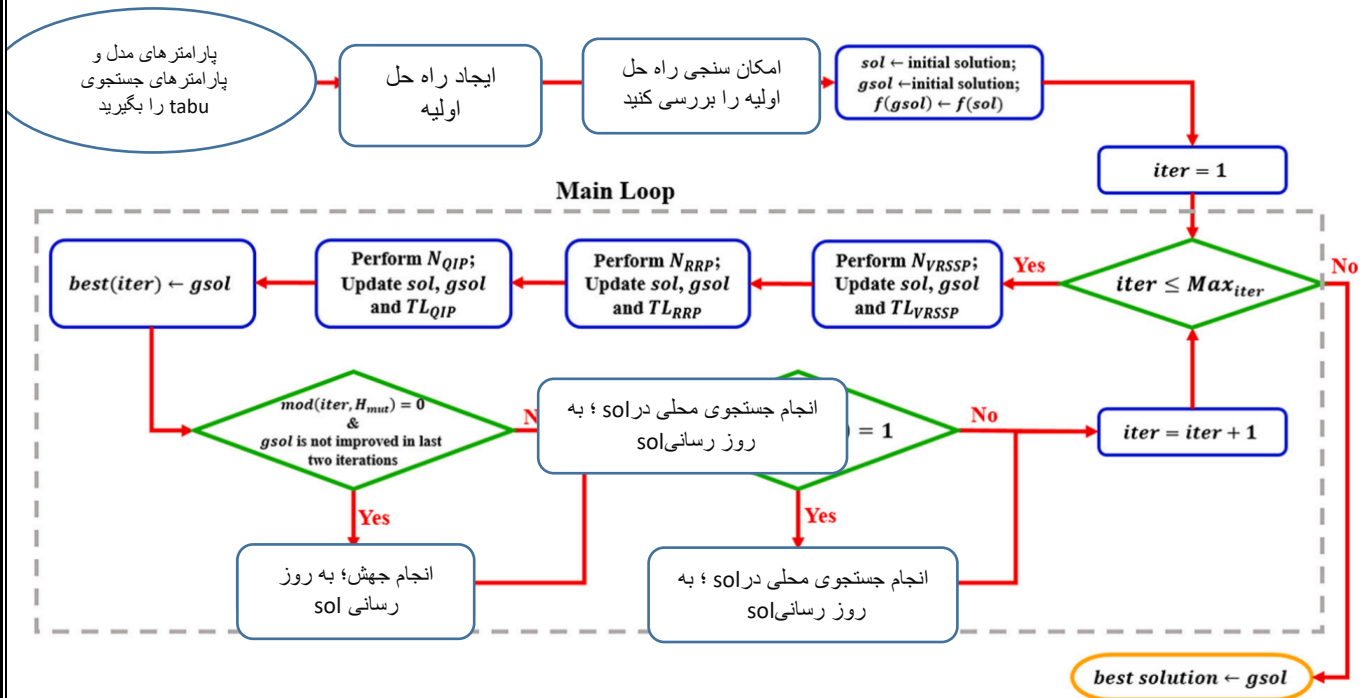
الگوریتم جستجوی ممنوعه یک روش تکراری برای جستجوی فضای راه حل است و سعی می کند با جستجو در میان همسایگان راه حل فعلی به راه حل های جدید دست یابد. در این الگوریتم، راه حل های بررسی شده در تکرارهای قبلی (راه حل های ممنوعه) در یک فهرست ممنوعه ذخیره می شوند تا از به گیر کردن در بهینه محلی جلوگیری شود. جستجوی ممنوعه بهترین راه حل غیر ممنوعه را در همسایگی راه حل فعلی به عنوان راه حل جدید می پذیرد، حتی اگر بدتر از بهترین راه حل مشاهده شده باشد. این ویژگی باعث می شود که الگوریتم

مناطق را که هنوز جستجو نشده اند اولویت بندی کند. باید توجه داشته باشیم که راه حل های موجود در فهرست ممنوعه تنها زمانی پذیرفته می شوند که «معیارانتظار» را داشته باشند. به عنوان مثال، وقتی یک راه حل ممنوعه بهتر از بهترین راه حل مشاهده شده است، با معیار انتظار مطابقت دارد. جدول ۳ نمادهای مورد استفاده برای توضیح روش حل را نشان می دهد.

جدول ۳ نمادهای اعمال شده برای توصیف روش حل.

نماد	توضیح
sol	راه حل فعلی
gsol	بهترین راه حل مشاهده شده
nsol	همسایه راه حل فعلی
f(sol)	ارزش عینی راه حل فعلی
iter	تعداد تکرارهای حلقه اصلی
Max _{iter}	حداکثر تعداد تکرار
best(iter)	بهترین مقدار توابع هدف تا پایان iter
VRSSP	"بخش مسیریابی خودرو و انتخاب تامین کننده" هر راه حل
RRP	"بخش منابع تجدید پذیر" هر راه حل
QIP	"بخش بازرسی کیفیت" هر راه حل
N _{VRSSP}	اپراتور که در هر تکرار همسایه هایی را برای VRSSP ایجاد می کند
N _{RRP}	اپراتوری که در هر تکرار همسایه هایی را برای RRP ایجاد می کند
N _{QIP}	اپراتور که همسایه هایی را برای QIP در هر تکرار ایجاد می کند
TL _{VRSSP}	فهرست ممنوعه مربوط به VRSSP
TL _{RRP}	لیست ممنوعه مربوط به RRP
TL _{QIP}	لیست ممنوعه مربوط به QIP
bfr _{VRSSP}	بهترین همسایه غیر ممنوعه VRSSP
bfo _{VRSSP}	بهترین همسایه ممنوعه VRSSP
limit _{VRSSP}	حداکثر تعداد تکرارهایی که یک حرکت در فهرست ممنوعه VRSSP باقی می ماند
nn _{VRSSP}	تعداد همسایه هایی که برای VRSSP در هر تکرار تولید می شوند
CO _{VRSSP}	ضریب مورد استفاده در محاسبه nn _{VRSSP}
d(route)	کل تقاضای پروژه های واقع در مسیر
dep(route)	انباری که مواد مورد نیاز پروژه های واقع در مسیر r^{th} را تامین می کند
TPC	هزینه حمل و نقل
PC	هزینه خرید مواد
δ_{ku}	قید تجمعی برای محدوده تنزیل u مربوط به تامین کننده k
TDC	هزینه تاخیر پروژه ها

H_{mut}	تعداد تکرار بین دو جهش متوالی
H_{LS}	تعداد تکرار بین دو جستجوی محلی متوالی
$\text{mod}(a,b)$	باقیمانده تقسیم a بر b
$S1, S2, \dots$	تامین کننده ۱، تامین کننده ۲، ...
$P1, P2, \dots$	پروژه ۱، پروژه ۲، ...
RR12	دومین منبع تجدیدپذیر موجود برای پروژه ۱
I_1	بردار اولیه ای که برای تولید VRSSP استفاده می شود



شکل ۲. الگوریتم جستجوی ممنوعه.

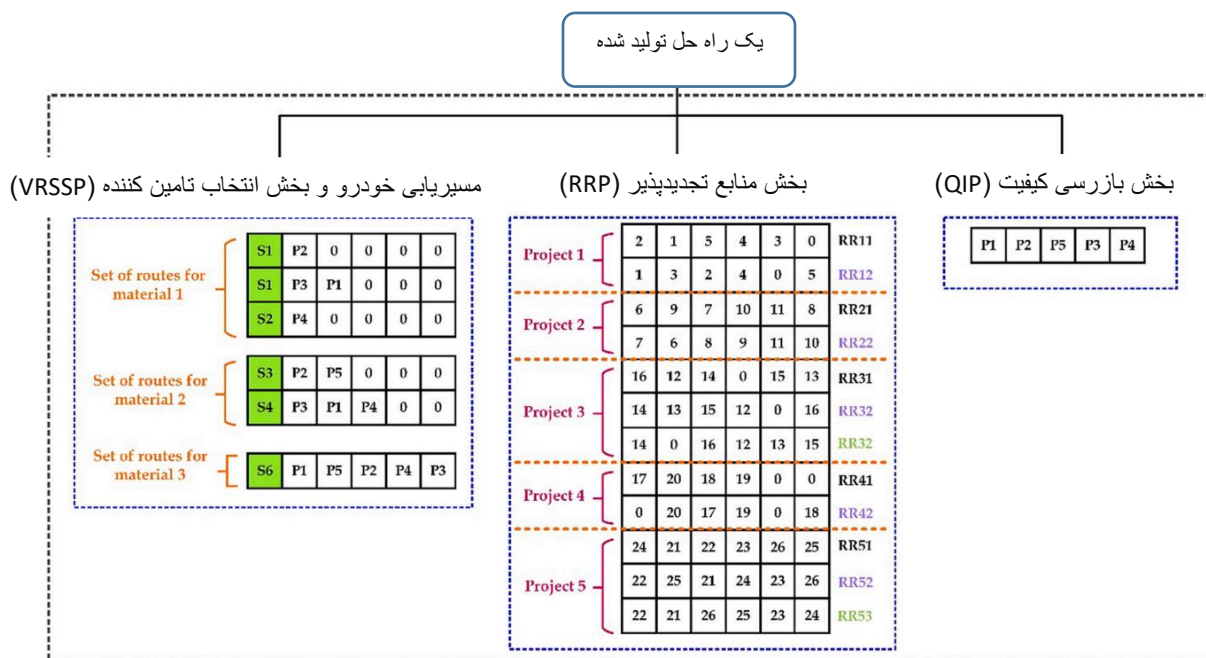
شکل ۲ یک روش کلی از الگوریتم جستجوی ممنوعه را برای حل مسئله تحقیق نشان می دهد. در این الگوریتم یک راه حل اولیه تصادفی شامل سه بخش تولید می شود: (۱) مسیریابی خودرو و بخش انتخاب تامین کننده (VRSSP)، (۲) بخش منابع تجدیدپذیر (RRP) و (۳) بخش بازرسی کیفیت (QIP). پس از تولید محلول اولیه، مقدار بهترین محلول مشاهده شده (gsol) به مقدار هدف به دست آمده توسط محلول اولیه تنظیم می شود. سپس، حلقه اصلی الگوریتم شروع می شود و برای هر قسمت از راه حل اولیه، همسایه هایی تولید می کند. ابتدا، همسایگان برای VRSSP با استفاده از عملگر N_{VRSSP} تولید می شوند و همسایه غیر ممنوعه که بهترین مقدار

TNC را دارد (یا همسایه ممنوعه با مقدار TNC کمتر از gsol) به عنوان راه حل جدید در نظر گرفته می شود. سپس gsol و فهرست tabu مربوط به VRSSP (TLVRSSP) به روز می شوند. علاوه بر این، اپراتورهای NRRP و NQIP همسایه هایی را برای RRP و QIP تولید می کنند و به دنبال آن TLRRP، TLQIP و gsol را به روز می کنند. حلقه اصلی تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار، تکرار می شود.

عملگر جهش در این الگوریتم برای کاهش احتمال به دام افتادن در بهینه محلی استفاده می شود. هنگامی که راه حل بهینه در چندین تکرار بدون تغییر باقی می ماند، این عملگر در تکرارهایی که مضربی از H_{mut} هستند اعمال می شود. از سوی دیگر، اپراتور جستجوی محلی در شرایط زیر برای تشدید فرآیند جستجو پیاده سازی می شود: (۱) هر زمان که یک gsol جدید به دست آمد، (۲) زمانی که باقیمانده در تقسیم عدد تکرار بر H_{LS} برابر با یک باشد. در بخش های بعدی این عملگرها را به تفصیل شرح می دهیم.

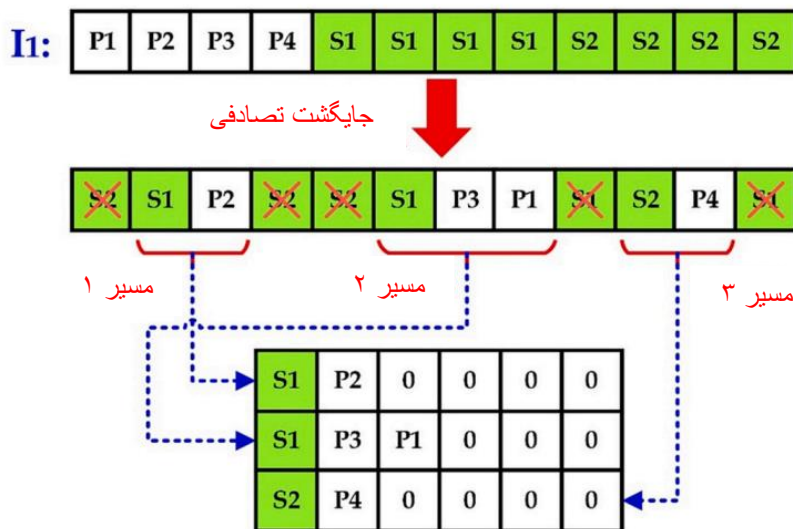
۴.۱. ایجاد راه حل اولیه

همانطور که قبلاً ذکر شد، نمایش راه حل شامل سه بخش است. شکل ۳ نمونه ای از ارائه راه حل شامل سه منبع تجدید ناپذیر، پنج پروژه و شش تامین کننده را نشان می دهد. در این مثال، دو یا سه منبع تجدیدپذیر برای هر پروژه در دسترس است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، سه قسمت ذکر شده باید به صورت زیر تولید شوند.



شکل ۳. نمونه ای از نمایش راه حل.

- مسیریابی خودرو و بخش انتخاب تامین کننده (VRSSP):** برای تولید این قسمت، برای هر ماده m باید مجموعه پروژه هایی که از این ماده استفاده می کنند، یعنی N_m تعیین شود. تعداد هر تکرار تامین کننده در بردار اولیه ($I1$) برابر با کاردینالیته N_m است. به عنوان مثال، در شکل ۴ (که در آن کاردینالیته $N1$ برابر با ۴ است)، چهار $S1$ و چهار $S2$ در بردار $I1$ به عنوان تامین کننده مواد ۱ قرار دارند. سپس یک جایگشت تصادفی از $I1$ ایجاد می شود که در آن اگر تامین کنندگان متوالی ظاهر شوند، ما فقط اولین تامین کننده را نگه می داریم و بقیه آنها را حذف می کنیم. از طرف دیگر، از آنجایی که ما با یک مسئله OVRP سروکار داریم، تامین کنندگانی که در انتهای بردار قرار می گیرند حذف می شوند. بردار به دست آمده پس از تجزیه به ماتریسی با ستون های $1 + |J|$ تبدیل می شود که هر ردیف نشان دهنده یک مسیر است. اگر تعداد گره ها در یک مسیر کمتر از تعداد ستون های ماتریس باشد، ورودی سلول های خالی مقدار صفر می گیرد. چنین ماتریسی برای هر منبع تجدیدناپذیر ایجاد می شود و مجموعه ای از این ماتریس ها VRSSP را می سازد. با تعریف VRSSP به این روش، هر راه حل به طور خودکار قید های (۴) - (۲) را برآورده می کند.



شکل ۴. روش تولید VRSSP.

- بخش منابع تجدیدپذیر (RRP):** برای تولید این بخش، یک جایگشت تصادفی از فعالیت های پروژه برای هر منبع تجدیدپذیر اختصاص داده شده به یک پروژه تولید می کنیم. در واقع، این بخش از راه حل اولیه دارای ردیف های $\sum_{j \in J} |L_j|$ است، همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود. با این حال، تمام فعالیت های یک پروژه لزوماً به یک منبع تجدیدپذیر خاص نیاز ندارند. بنابراین، در هر ردیف، ما فقط بر تغییر فعالیت هایی تمرکز می کنیم که از منابع تجدیدپذیر مرتبط استفاده می کنند. هنگامی که RRP به این

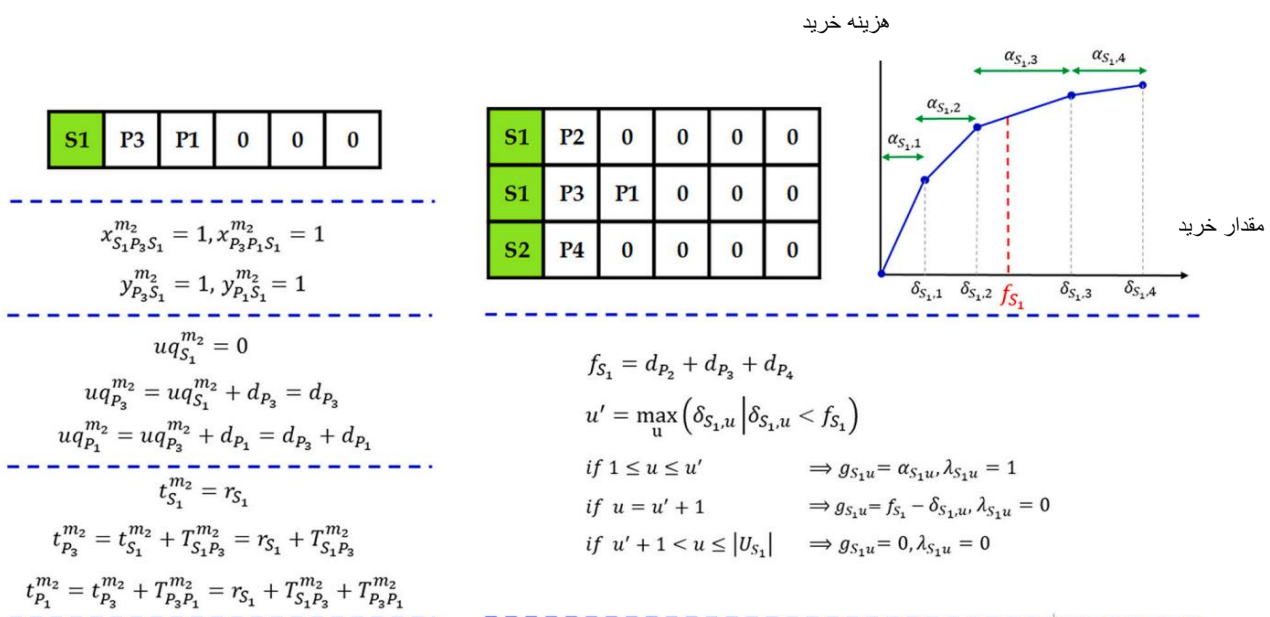
صورت در نظر گرفته می شود، نیازی به بررسی قید های (۲۵) - (۲۳) نیست زیرا این قید ها همیشه برآورده می شوند.

- **بخش بازرسی کیفیت (QIP):** این بخش با ایجاد یک جایگشت تصادفی از تمام پروژه ها ساخته شده است. شکل ۳ نمونه ای را در این زمینه نشان می دهد. ساختار QIP باعث می شود که قید های (۳۱) - (۲۹) برآورده شود.

۴.۲. رابطه بین نمایش راه حل و متغیرهای تصمیم

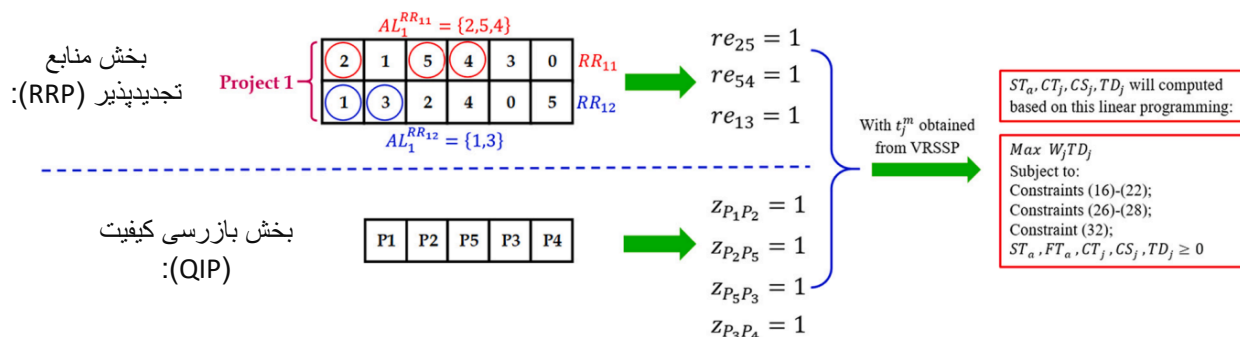
در این بخش، برای تشریح شفافتر رویکرد راه حل، محاسبه هر متغیر تصمیم را بر اساس نمایش راه حل توضیح می دهیم. در این مقاله بخشی از متغیرهای تصمیم به طور مستقیم با استفاده از نمایشگر پاسخ محاسبه شده و بخشی دیگر با حل یک مدل خطی به دست می آید.

- متغیرهای تصمیم $x_{ijk}^m, y_{jk}^m, uq_i^m, t_j^m, g_{ku}$ و λ_{ku} بر اساس VRSSP به دست می آیند. شکل ۵ نحوه محاسبه هر یک از این متغیرها را بر اساس VRSSP نشان می دهد. برای محاسبه g_{ku} و λ_{ku} باید فاصله تنزیلی که بالاترین $\delta_{ku} < f_k$ مربوط به آن است را مشخص کنیم. این فاصله تنزیل به صورت u' در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. رابطه بین VRSSP و متغیرهای تصمیم.

- همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، متغیرهای re_{ab} و Z_{ij} مستقیماً با استفاده از RRP و QIP محاسبه می شوند.



شکل ۶. رابطه بین RRP، QIP و متغیرهای تصمیم.

- پس از محاسبه re_{ab} ، Z_{ij} و t_j^m با توجه به توضیحات فوق، این مقادیر به عنوان پارامتر ورودی به یک مدل زمانبندی پروژه خطی داده می شود. ST_a ، CT_j ، CS_j و TD_j با حل این مدل برنامه ریزی خطی به دست می آیند (شکل ۶).

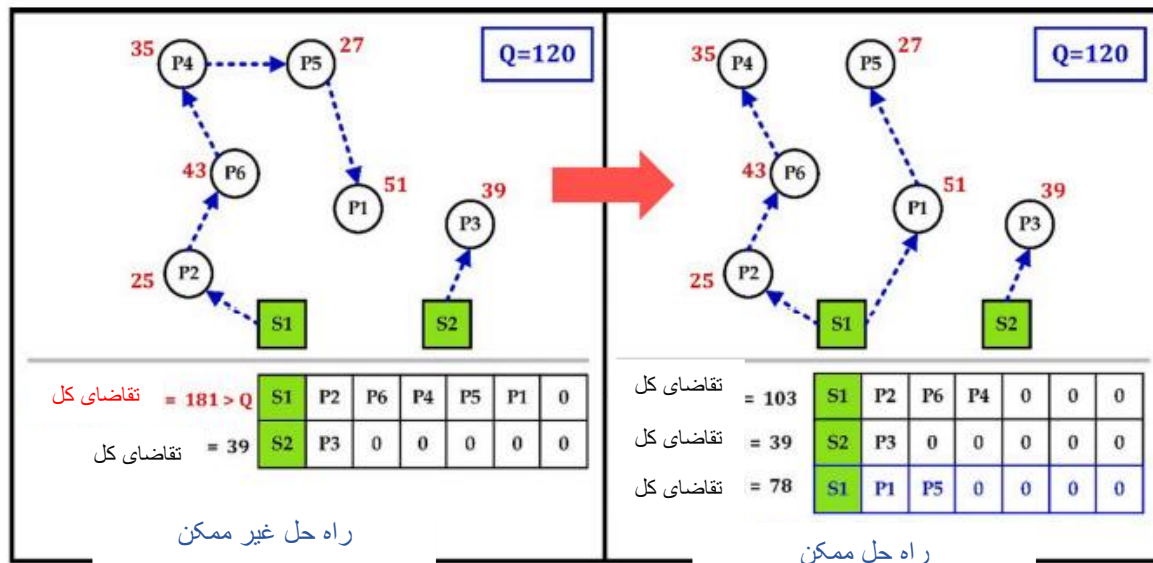
۴.۳. اصلاح راه حل های غیر قابل اجرا

هر راه حل تولید شده زمانی امکان پذیر است که قیود (۶) و (۱۰) مدل های پیشنهادی را برآورده کند. به این معنی که راه حل باید دو شرط را برآورده کند: (۱) کل تقاضای پروژه ها در هر مسیر نباید از ظرفیت خودرو بیشتر شود (Q) و (۲) کل مقدار سفارش شده از هر تامین کننده (f_k) نباید از ظرفیت تامین کننده (CAPK) فراتر رود. راه حل هایی که حداقل یکی از دو قید را نقض می کنند غیرقابل اجرا هستند و باید اصلاح شوند. الگوریتم ۱ در ضمیمه روش اصلاح راه حل های غیرقابل اجرا را نشان می دهد. در ادامه روش های مورد استفاده برای اصلاح راه حل ها ارائه شده است.

۴.۳.۱. قید ظرفیت خودرو

اگر مسیری این قید را نقض کند، ابتدا مواد حمل شده در این مسیر مشخص می شود. سپس با آخرین پروژه در این مسیر آغاز می کنیم، پروژه ها را به طور متوالی حذف می کنیم و آنها را به مسیر جدیدی با همان تامین کننده اضافه می کنیم. این روند تا زمانی ادامه می یابد که تقاضای کل مسیر کمتر از Q شود. در نهایت مسیرهای

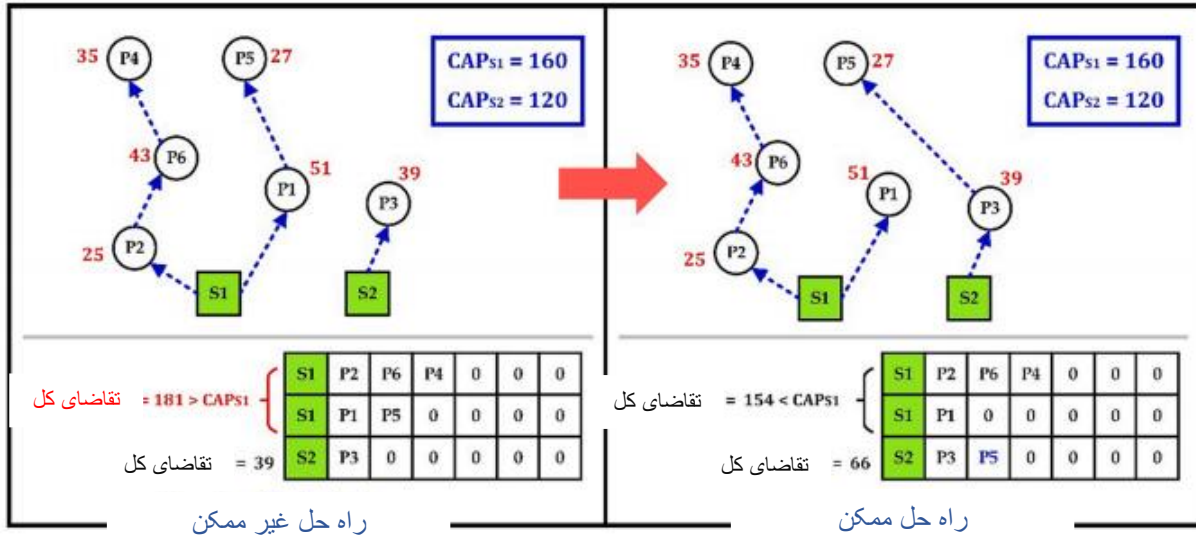
جدید را به مجموعه مسیرهای مربوط به متریکال m اضافه می کنیم. به عنوان مثال، در شکل ۷، مسیر مربوط به $S1$ غیر ممکن است. بنابراین الگوریتم $P1$ و متعاقباً $P5$ را از این مسیر حذف می کند و آنها را به مسیر جدیدی که از $S1$ آغاز شده است اضافه می کند.



شکل ۷. اصلاح راه حلی که قید ظرفیت خودرو را نقض می کند.

۴.۳.۲. قید ظرفیت تامین کننده

اگر مقدار سفارش داده شده از یک تامین کننده بیشتر از ظرفیت تامین کننده باشد، ابتدا مواد ارائه شده توسط تامین کننده مشخص می شود. سپس پروژه های واگذار شده به تامین کننده به طور متوالی از مسیر خود حذف شده و به سایر تامین کنندگان مواد مشخص شده تخصیص داده می شود. این روند تا زمانی که قید ظرفیت تامین کننده برآورده شود ادامه می یابد. همانطور که در الگوریتم ۱ نشان داده شده است، پروژه حذف شده باید به تامین کننده ای با ظرفیت کافی در هر تکرار اختصاص داده شود. از طرف دیگر، باید مسیری را انتخاب کنیم که کل تقاضای آن، زمانی که پروژه اضافه می شود، از Q بیشتر نباشد. شکل ۸ نمونه ای را نشان می دهد که در آن راه حلی که قید ظرفیت تامین کننده ۱ را نقض می کند اصلاح می شود.



شکل ۸. اصلاح راه حلی که قید ظرفیت تامین کننده را نقض می کند.

۴.۴. محاسبه مقدار تابع هدف

همانطور که در بخش ۳ توضیح داده شد، تابع هدف شامل هزینه تاخیر پروژه، هزینه خرید مواد و هزینه حمل و نقل است. هر یک از این هزینه ها بر مقدار حداکثر آن تقسیم می شود تا اهمیت آنها یکسان شود و مقیاس های اندازه گیری حذف شوند. این بخش محاسبه هر هزینه و فرآیند عادی سازی هزینه را شرح می دهد.

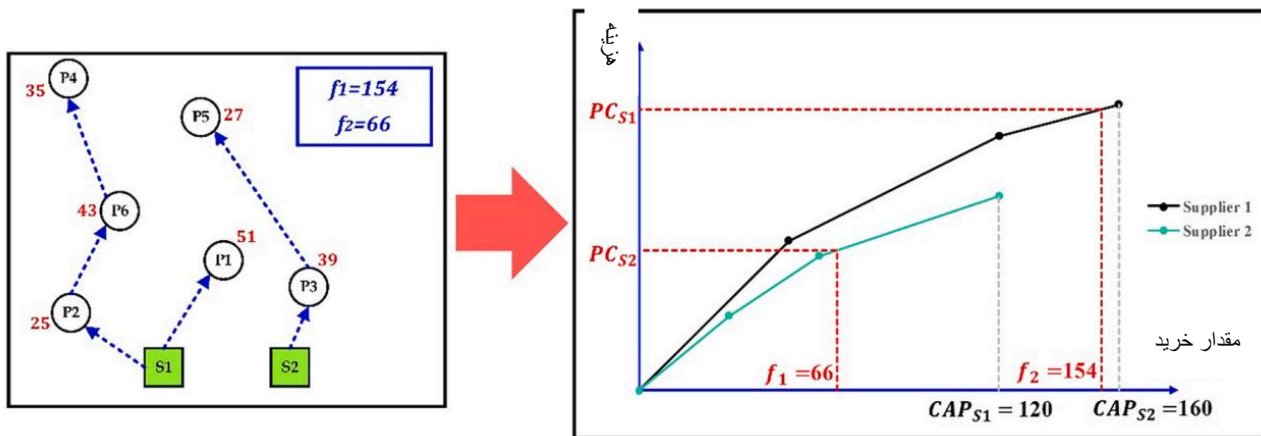
۴.۴.۱. هزینه حمل و نقل

همانطور که قبلاً ذکر شد (شکل ۵)، مقادیر x_{ijk}^m بر اساس VRSSP برای هر راه حل محاسبه می شود. در نتیجه هزینه حمل و نقل از رابطه زیر بدست می آید.

$$TPC = \sum_{m \in M} \sum_{i \in V_m} \sum_{j \in V_m} \sum_{k \in D_m} c_{ij}^m \cdot x_{ijk}^m \quad (35)$$

۴.۴.۲. هزینه خرید مواد

VRSSP هر راه حل پروژه هایی را که به هر تامین کننده اختصاص داده شده است را مشخص می کند. بر اساس تقاضای پروژه برای هر ماده، مقدار خریداری شده از هر تامین کننده (\hat{f}_k) محاسبه می شود. سپس هزینه خرید از هر تامین کننده با در نظر گرفتن تنزیل افزایشی به دست می آید. برای مثال، شکل ۹ نحوه محاسبه هزینه خرید از دو تامین کننده را نشان می دهد. اعداد قرمز رنگ در کنار مکان هر پروژه، مقدار تقاضای هر پروژه را برای منبع غیر قابل تجدید داده شده مشخص می کند. رویکرد استفاده شده در شکل ۹ همان هدفی را دنبال می کند که قیود (۱۵)–(۱۱) در مدل ریاضی دنبال می کنند.



شکل ۹. روش محاسبه هزینه خرید مواد.

۴.۴.۳. هزینه تاخیر پروژه ها

با توجه به RRP و QIP هر راه حل، می توانیم از یک مدل برنامه ریزی خطی برای به دست آوردن هزینه تاخیر استفاده کنیم. هدف این مدل به حداقل رساندن TDC (۳۶) با توجه به قیدهای (۲۲)–(۲۶)، (۱۶)–(۲۸)، (۲۶)–(۳۲) و با تعیین متغیرهای تصمیم نشان داده شده در معادله (۳۷) است. قابل ذکر است که از آنجایی که VRSSP، RRP و QIP مشخص شده اند t_j^m ، re_{ab} و پارامترهای ورودی هستند. در نهایت، هزینه تاخیر پروژه ها، مقدار هدف بهینه بدست آمده از مدل مذکور خواهد بود.

$$TDC = \sum_{j \in J} W_j TD_j \quad (36)$$

$$TD_j, CS_j, CT_j, ST_a, FT_a \geq 0 \forall j \in J, \forall a \in A \quad (37)$$

۴.۴.۴. حداکثر ارزش هزینه ها

برای محاسبه حداکثر مقدار هزینه ها که با TDC_{max} ، PC_{max} و TPC_{max} در تابع هدف نشان داده شده است، رویکرد زیر را اجرا می کنیم.

- **حداکثر هزینه حمل و نقل (TPC_{max}):** برای محاسبه این آیتم، فرض می کنیم که هر پروژه به دورترین تامین کننده یک منبع مورد نیاز اختصاص داده می شود و هر مسیر تنها یک پروژه را پوشش می دهد.
- **حداکثر هزینه خرید مواد (PC_{max}):** این مورد زمانی به دست می آید که پروژه ها هر منبع تجدید ناپذیر را از گران ترین تامین کننده خریداری کنند. علاوه بر این، هر پروژه مستقل از پروژه های دیگر در این شرایط، مواد مورد نیاز را تهیه می کند تا به پیمانکار تنزیل افزایشی داده نشود.
- **حداکثر هزینه تاخیر پروژه ها (TDC_{max}):** این مورد در حالتی محاسبه می شود که پروژه ها به دورترین تامین کننده هر ماده مورد نیاز واگذار می شود. ضمناً ترتیب بازرسی ها به این صورت است که هر چه پروژه دیرتر به اتمام برسد زودتر بازرسی می شود.

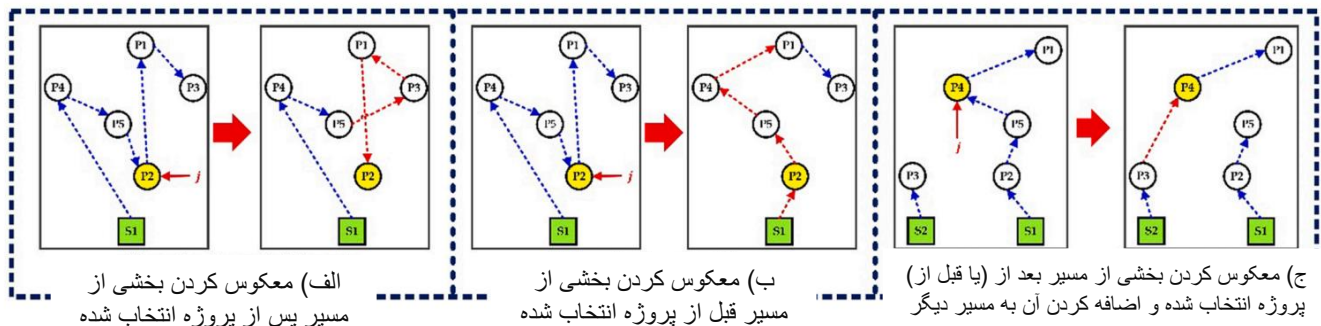
۴.۵. ساختار همسایه ها

برای هر راه حل، همسایگی مجموعه ای از راه حل ها است که از طریق تغییرات و حرکت های خاص ایجاد می شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، هر راه حل تصادفی شامل سه بخش است: $VRSSP$ ، RRP و QIP . این بخش ساختار همسایه های مرتبط با هر بخش از راه حل و فهرست های ممنوعه مرتبط را شرح می دهد.

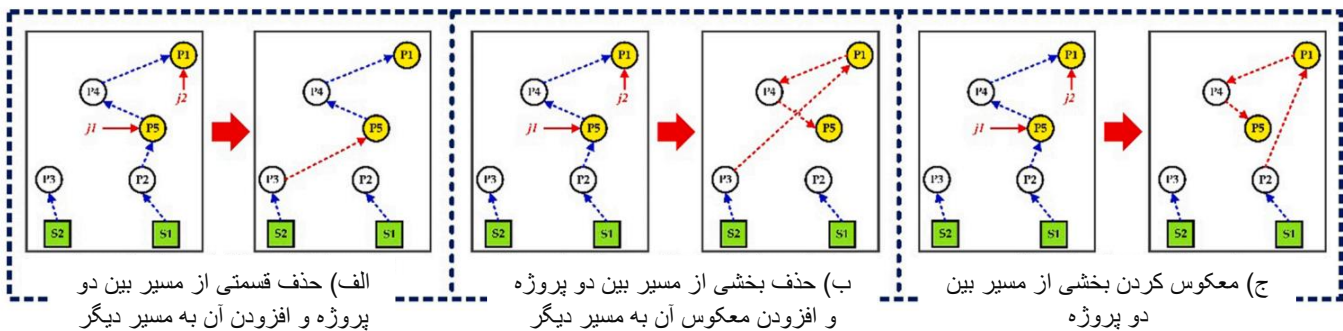
۴.۵.۱. ساختار همسایه های $VRSSP$

عملگر $NVRSSP$ برای ساخت این همسایگی، همانطور که در الگوریتم ۲ (در ضمیمه ارائه شده) بحث شده است، استفاده می شود. این عملگر در هر تکرار از حلقه اصلی جستجوی ممنوعه، همسایه های $nVRSSP$ را برای $VRSSP$ تولید می کند و همسایه غیر ممنوعه (bfr_{VRSSP}) را با بهترین TNC به عنوان راه حل جدید معرفی می کند. بهترین همسایه ممنوعه (bfo_{VRSSP}) تنها در صورتی به عنوان راه حل جدید انتخاب می شود که مقدار TNC آن بهتر از $gsol$ باشد. پس از تعیین راه حل جدید، بهترین راه حل مشاهده شده ($gsol$) به روز می شود. هر زمان که $gsol$ تغییر کرد، یک جستجوی محلی برای جستجوی راه حل های بالقوه بهتر اجرا می شود.

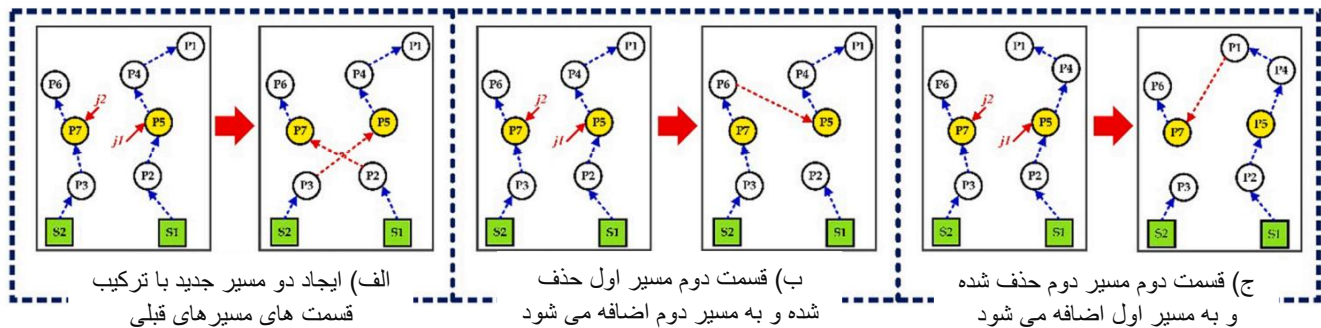
برای ایجاد یک همسایه، N_{VRSSP} یک ماده را به طور تصادفی انتخاب می‌کند و سپس یک نمونه تصادفی را با جایگزینی انتخاب می‌کند که شامل دو عضو در میان پروژه‌هایی است که به مواد نیاز دارند. در این شرایط، چندین سناریو ممکن است ایجاد شود: (۱) دو پروژه انتخاب شده یکسان هستند، (۲) دو پروژه انتخاب شده یکسان نیستند اما در یک مسیر هستند و (۳) دو پروژه انتخاب شده یکسان نیستند و در یک مسیر نیستند. شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ عملگرهای مورد استفاده برای تولید همسایگان را به ترتیب در سناریوهای ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد. در هر سناریو، عملگرها با احتمال مساوی انتخاب می‌شوند. در این ساختار همسایگی، هر حرکت به صورت (j_2, j_1, m) تعریف می‌شود که m متریا ل انتخاب شده است، در حالی که j_1 و j_2 پروژه‌های انتخاب شده هستند. اگر یک همسایه به عنوان یک راه حل جدید مشخص شود، حرکت متناظر آن وارد لیست *tabu* می‌شود و برای تکرارهای $limit_{VRSSP}$ در آن باقی می‌ماند.



شکل ۱۰. عملگرهای مورد استفاده زمانی که دو پروژه انتخاب شده یکسان هستند.



شکل ۱۱. اپراتورهای مورد استفاده زمانی که دو پروژه انتخاب شده یکسان نیستند اما در یک مسیر هستند.



الف) ایجاد دو مسیر جدید با ترکیب قسمت های مسیرهای قبلی

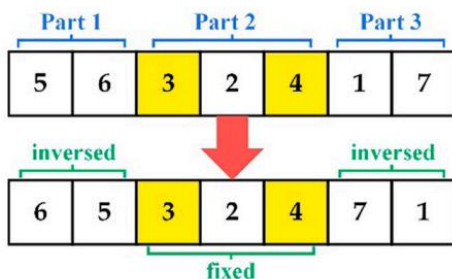
ب) قسمت دوم مسیر اول حذف شده و به مسیر دوم اضافه می شود

ج) قسمت دوم مسیر دوم حذف شده و به مسیر اول اضافه می شود

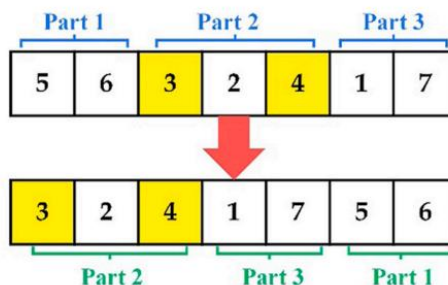
شکل ۱۲. اپراتورهای مورد استفاده زمانی که دو پروژه انتخاب شده یکسان نیستند و در یک مسیر نیستند.

۴.۵.۲. ساختار همسایه های RRP

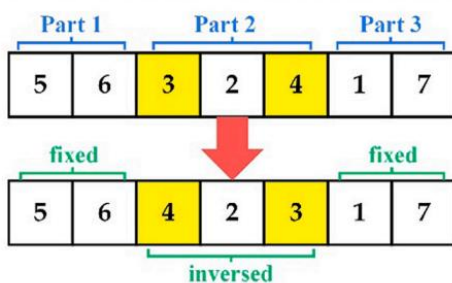
همسایگان RRP در یک راه حل با استفاده از عملگر N_{RRP} تولید می شوند. این عملگر مشابه الگوریتم عمل می کند با این تفاوت که ورودی های آن مختص RRP است و همسایگی برای هر راه حل بر اساس RRP تولید می شود. اپراتور N_{RRP} ابتدا یک پروژه (j) و یک منبع تجدیدپذیر (re) را به طور تصادفی برای تعیین ردیفی از ماتریس RRP انتخاب می کند (شکل ۱۱). سپس دو فعالیت مجزا از پروژه انتخاب شده (a_p و a_q) به صورت تصادفی انتخاب می شوند. از آنجایی که دو فعالیت، ردیف مرتبط ماتریس RRP را به سه قسمت تقسیم می کنند، عملگرهای نشان داده شده در شکل ۱۳ برای تولید همسایگان استفاده می شوند. لازم به ذکر است که حرکت مربوط به هر همسایه توسط (re, a_q, a_p) مشخص می شود و همسایه هایی که به عنوان راه حل جدید انتخاب شده اند وارد TL_{VRSSP} می شوند.



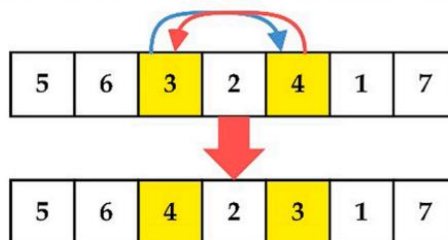
الف) معکوس کردن قسمت اول و آخر و ثابت کردن قسمت میانی



ج) تغییر ترتیب سه قسمت



ب) معکوس کردن قسمت میانی و ثابت کردن قسمت دیگر به قسمت ها



د) مبادله دو فعالیت انتخاب شده

شکل ۱۳. عملگرهایی که همسایه‌هایی را برای RRP تولید می‌کنند.

۴.۵.۳. ساختار همسایه‌های QIP

همانطور که قبلاً ذکر شد، QIP یک برداری است که ترتیب تصادفی بازرسی پروژه را برای هر راه حل نشان می‌دهد. بنابراین، عملگر N_{QIP} شبیه N_{RRP} است، با این تفاوت که این عملگر همسایه‌ها را ایجاد می‌کند و لیست tabu را به سادگی به روز می‌کند. برای این منظور کافی است دو پروژه مجزا (j_p و j_q) را به صورت تصادفی انتخاب کرده و با استفاده از چهار عملیات شرح داده شده در شکل ۱۳، همسایگان را تولید کنید. در این ساختار همسایگی، حرکت هر همسایه به صورت (j_p, j_q) تعریف می‌شود.

۴.۶. جستجوی محلی

طیف وسیعی از اپراتورهای جستجوی محلی در تحقیقات قبلی برای مسئله‌های VRP، OVRP و MDOVRP استفاده شده است [۱، ۵، ۹، ۱۵]. در اینجا، ما از برخی اپراتورهای جستجوی محلی در VRSSP هر راه حل برای تشدید جستجو در اطراف راه حل‌های خوب و امیدوارکننده استفاده می‌کنیم. اپراتورها عبارتند از 1-

Exchange, 1-1Exchange و 2-opt. برای جزئیات بیشتر در مورد این عملگرها، به مقاله لیو و همکاران [۱۵] مراجعه می‌کنیم که توضیح کاملی را ارائه می‌دهد.

لازم به ذکر است که هر اپراتور جستجوی محلی به تعداد معینی تکرار تکرار می‌شود و هر زمان که راه حلی بهتر از راه حل فعلی یافت شود راه حل به روز می‌شود.

۴.۷. عملگر جهش

جهش فرآیندی است که تغییرات تصادفی در راه حل‌ها برای یافتن مناطق جستجوی جدید و جلوگیری از به گیرافتادن در بهینه محلی ایجاد می‌کند. در این تحقیق عملگر جهش به دلیل ماهیت مسئله تنها بر روی VRSSP انجام می‌شود. همانطور که در شکل ۲ اشاره شد جهش‌ها در تکرارهایی انجام می‌شوند که مضربی از H_{mut} هستند. در هر جهش، یکی از عملگرهای زیر به طور تصادفی استفاده می‌شود که منجر به تغییرات تصادفی در sol و تنوع در جستجو می‌شود.

- **تغییر تامین‌کننده مسیر:** این اپراتور با توجه به ویژگی‌های مسئله مورد مطالعه توسعه یافته است. ابتدا یک ماده را به طور تصادفی انتخاب می‌کند، تامین‌کننده مسیرهای مرتبط با مواد را حذف می‌کند و یک تامین‌کننده تصادفی را از بین گزینه‌های موجود جایگزین می‌کند.
- **تخصیص به تامین‌کنندگان استفاده نشده:** این اپراتور بر روی تامین‌کنندگان حداقل انتخاب شده تمرکز می‌کند. برای پیاده‌سازی این عملگر، ابتدا یک ماده (m) را به طور تصادفی انتخاب می‌کنیم و یکی از تامین‌کنندگان مرتبط را که کمترین سفارش به آن اختصاص داده می‌شود، در نظر می‌گیریم. سپس تامین‌کننده به عنوان منبع کلیه مسیرهای مربوط به m تعیین می‌شود.
- **درج تصادفی و حذف:** این عملگر که توسط لاهیانی و همکاران [۱۳] استفاده می‌شود، چندین پروژه مصرف‌کننده هر ماده داده شده را انتخاب می‌کند، آنها را از مسیر فعلی که قرار می‌دهند حذف می‌کند و به مسیر موجود دیگر اضافه می‌کند.
- **پرش‌دگی:** این اپراتور، که توسط Brandao [۱] استفاده می‌شود، برخی از مشتریان هر منبع تجدید ناپذیر را از مسیرهای فعلی خود حذف می‌کند و آنها را به مسیری اضافه می‌کند که از یک تامین‌کننده شروع شده است که کمترین سفارش به آن اختصاص داده شده است.

۵. نتایج عددی

در این بخش ابتدا مقادیر بهینه پارامترهای TS بر اساس رویکرد تنظیم پارامتر مناسب تعیین می شود. سپس روش تولید نمونه های مسئله مورد استفاده در تحلیل عددی را توضیح می دهیم. پس از آن، کارایی روش حل در برخورد با مسائل کوچک و بزرگ ارزیابی می شود. در نهایت، عملکرد مدل تلفیقی پیشنهادی با استفاده از مطالعات تطبیقی ارزیابی می شود.

۵.۱. تنظیم پارامتر

پارامترهای یک الگوریتم فراابتکاری به طور قابل توجهی بر عملکرد الگوریتم تأثیر می گذارد. تنظیم موثر این پارامترها می تواند کیفیت راه حل ها و زمان محاسباتی الگوریتم را بهبود بخشد. بنابراین، برای طراحی یک الگوریتم کارآمد، باید مقادیر بهینه پارامترها را بر اساس رویکرد تنظیم پارامتر مناسب تعیین کنیم. در این مقاله، از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است که منجر به تنظیم پارامتر پیوسته برای الگوریتم جستجوی ممنوعه می شود.

در این تحقیق از طرح های RSM از طرح Box-Behnken استفاده شده است. در طرح Box-Behnken، نقاط طراحی بر روی ترکیبی از سطوح فاکتور بالا و پایین و نقاط میانی آنها قرار دارد. RSM با نه عامل (نه پارامتر الگوریتم پیشنهادی) با استفاده از Minitab 17 طراحی شده است که منجر به ۱۳۰ نقطه آزمایشی می شود. همچنین، شاخص ارزیابی ترکیبی وزنی از مقدار هدف و زمان اجرا الگوریتم در نظر گرفته می شود. پس از اجرای آزمایش ها با استفاده از مسائل تصادفی با ابعاد مختلف، سطوح بهینه برای هر پارامتر با حل معادلات رگرسیون به دست آمد. در نهایت، پارامترها، سطوح مربوطه و مقادیر تنظیم شده آنها در جدول ۴ نشان داده شده است. قابل توجه است که CO_{VRSSP} ، CO_{RRP} و CO_{QIP} برای محاسبه تعداد همسایگان تولید شده برای هر بخش از راه حل در هر تکرار استفاده می شود (معادلات، (۴۰) - (۳۸)).

$$nn_{VRSSP} = CO_{VRSSP} \times |M| \times |J| \quad (38)$$

$$nn_{RRP} = CO_{RRP} \times \max_{j \in J} |L_j| \times \max_{j \in J} |A_j| \quad (39)$$

$$nn_{QIP} = CO_{QIP} \times |J| \quad (40)$$

جدول ۴ خلاصه تنظیم پارامتر.

پارامترها	سطح کد شده			مقدار تنظیم شده
	-1	0	1	
Max_{iter}	100	150	200	200
H_{LS}	2	3	4	2
H_{mut}	4	10	16	4
$limit_{VRSSP}$	10	25	40	10
$limit_{RRP}$	10	30	50	50
$limit_{QIP}$	2	4	6	6
CO_{VRSSP}	4	7	10	10
CO_{RRP}	1	2	3	1
CO_{QIP}	4	7	10	4

۵.۳. اعتبار سنجی روش حل

در این بخش ابتدا کارایی روش حل در حل مسائل در مقیاس کوچک بررسی می شود. برای این منظور، نتایج روش حل پیشنهادی با حل کننده *intlinprog* (در متلب ۲۰۱۸) مقایسه می شود که از روش های دقیق برای حل مسائل MILP استفاده می کند. با این حال، روش اعتبار سنجی برای مسائل در مقیاس بزرگ متفاوت است. همانطور که قبلاً ذکر شد، مسئله تحقیق یک نسخه توسعه یافته از مسئله MDOVRP است. در نتیجه به عنوان مسائل *np-hard* دسته بندی می شود و روش های دقیق در حل نمونه های بزرگ در زمان محدود موثر نیستند. علاوه بر این، این مطالعه مدل جدیدی ارائه می کند که در تحقیقات قبلی به آن پرداخته نشده است. بنابراین در مورد مسائل در مقیاس بزرگ، الگوریتم TS با فراابتکاری ارائه شده برای MDOVRP مقایسه می شود.

۵.۲. ایجاد نمونه های مسئله

نمونه های مورد استفاده در این مطالعه به سه دسته تقسیم می شوند: (۱) نمونه های مقیاس کوچک، (۲) نمونه های مقیاس بزرگ، و (۳) نمونه های مورد استفاده در مطالعات تطبیقی. در ادامه نحوه تولید هر یک از این نمونه ها توضیح داده شده است.

۵.۲.۱. تولید نمونه های در مقیاس کوچک

برای ایجاد مسائل در مقیاس کوچک، چندین سطح برای $|J|$ ، $|M|$ ، $|D_m|$ در نظر گرفته شده است که در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این پارامترها، چندین نمونه در مقیاس کوچک به طور تصادفی ایجاد می شوند که در آنها سایر پارامترها به عنوان جدول ۶ در نظر گرفته می شوند. مقدار پارامترهای α_{uk} و cp_{uk} به طور تصادفی بر اساس میانگین cp_{uk} و تعداد محدوده های تنزیل به دست می آیند.

جدول ۵- سطوح پارامترها در مسائل مقیاس کوچک.

مرحله	تعداد پروژه $ J $	تعداد مواد $ M $	تعداد تامین کنندگان برای هر ماده $ D_m $
1	4	3	2
2	5	4	3
3	6	5	

جدول ۶ پارامترهای مورد استفاده برای ایجاد مسائل تصادفی.

محدوده پارامتر	محدوده پارامتر
$ A_j \sim U(4, 6)$	$ L_j \sim U(2, 3)$
$DD_j = 0$	$MM = 5000$
$r_k \sim U(10, 20)$	$S_k = U(300, 600)$
Average of $cp_{uk} \sim U(8, 12)$	$ U_k \sim U(3, 5)$
$R_j \sim U(10, 30)$	$W_j = 1/ J $
$P_a \sim U(10, 30)$	$d_{jm} = U(10, 100)$
$(a, b) \in E_j^{SS}$ with probability 0.1	$(a, b) \in E_j^{FS}$ with probability 0.2
$(a, b) \in E_j^{FF}$ with probability 0.1	$SS_{ab}, FS_{ab}, FF_{ab} \sim U(5, 10)$
$Q = 2 \times \max_{j,m} d_{jm}$	$ct_{ij}^m = 10 \times \text{distance}(i, j)$
$T_{ij}^m \sim U(8, 12) * \text{distance}(i, j)$	

۵.۲.۲. تولید نمونه های در مقیاس بزرگ

در مورد مسئله های در مقیاس بزرگ، الگوریتم TS با الگوریتم های ارائه شده برای MDOVRP مقایسه می شود. از این رو در این مورد، مجموعه ای از مسائل آزمون MDOVRP که توسط کوردو و همکاران [۴] ارائه شده است، اعمال می شود.

برای مسائل در مقیاس بزرگ، مجموعه ای از مسائل معیار استفاده می شود که توسط کوردو و همکاران [۴] ارائه شده است.

۵.۲.۳. ایجاد نمونه های مورد نیاز برای مطالعات تطبیقی

در بخش های فرعی ۶.۴.۱ و ۶.۴.۲، دو مطالعه مقایسه ای انجام خواهد شد که در آنها نمونه های مسئله با استفاده از طرح های تاگوچی تولید می شوند. چهار سطح برای هر یک از پارامترهای $|J|$ ، $|M|$ ، $|D_m|$ و $|A_j|$ برای اعمال طرح های تاگوچی در نظر گرفته شده است. سطوح این پارامترها در هر مطالعه تطبیقی متفاوت است و در جدول ۹ و جدول ۱۰ قابل مشاهده است. سایر پارامترهای مورد نیاز بر اساس جدول ۶ به صورت تصادفی تولید می شوند.

جدول ۹ مقایسه بین مدل پیشنهادی و مدل PSSS.

شماره مسئله	پارامترها				مدل پیشنهادی				PSSS model			
	$ M $	$ J $	$ D_m $	$ A_j $	TPC	PC	TDC	TNC	TPC	PC	TDC	TNC _{PSSS}
1	5	5	2	U(7,10)	2743.9	20,872.1	362.9	169.5	3459.7	20,872.1	348.5	181.7
2	5	6	3	U(7,10)	2286.8	19,654.5	338.2	150.1	2694.8	19,794.3	337.5	157.4
3	5	7	4	U(11,14)	2715.9	17,830.4	313.7	130.6	3271.4	18,317.6	313.3	139.0
4	5	8	5	U(11,14)	3235.6	21,478.3	325.2	126.1	3376.3	24,135.8	307.1	131.4
5	6	5	3	U(11,14)	4096.2	18,542.3	448.9	142.4	4569.7	21,139.9	432	151.6
6	6	6	2	U(11,14)	4278.4	21,197.6	421.2	149.4	5244.2	22,360.4	419.8	161.0
7	6	7	5	U(7,10)	4368.9	30,716.8	418.4	133.4	5287.9	32,291.7	400.3	141.2
8	6	8	4	U(7,10)	4051.2	27,088.3	353.5	123.4	4523.3	29,078.4	335.8	128.0
9	7	5	4	U(7,10)	4159.9	27,595.1	362.7	126.3	4976.2	28,577.2	343.4	131.8
10	7	6	5	U(7,10)	3418.2	26,479.9	376.5	151.7	3451.6	29,108.5	346.1	154.8
11	7	7	2	U(11,14)	4119.8	25,502.1	380.5	148.6	5225.2	25,502.1	376.5	160.4
12	7	8	3	U(11,14)	5806.1	27,499.1	456.6	164.8	6575.9	29,796.3	447.9	174.9
13	8	5	5	U(11,14)	4367.7	31,265.1	382.2	134.3	4676.9	30,862.4	380.8	135.9
14	8	6	4	U(11,14)	3876.8	28,378.0	370.1	138.1	4595	28,686.4	357	143.1
15	8	7	3	U(7,10)	6043.6	26,860.1	429.0	161.4	7508.8	28,646.5	413.9	175.7
16	8	8	2	U(7,10)	6572.7	29,799.8	464.3	167.7	8772.5	31,700.7	452.1	188.6
17	5	6	2	U(5,6)	2843.1	14,940.2	445.5	173.1	3828.3	16,966.1	397.9	190.6

جدول ۱۰ مقایسه بین مدل پیشنهادی و مدل IDMM.

شماره مسئله	پارامترها				مدل پیشنهادی				IDMM model			
	$ M $	$ J $	$ D_m $	$ A_j $	TPC	PC	TDC	TNC	TPC	PC	TDC	TNC _{IDMM}
18	5	5	2	U(5,6)	2703.9	15,797.7	373.1	181.0	2851.7	14,462.1	464.6	190.0
19	5	6	3	U(7,8)	2818.4	17,647.1	344.3	161.1	3158.0	15,088.5	605.5	191.6
20	5	7	4	U(9,10)	2968.8	18,170.4	364.6	136.2	2952.5	17,637.7	421.2	141.4
21	5	8	5	U(11,12)	3514.8	18,587.5	358.0	125.2	3440.9	18,270.3	460.9	136.1
22	6	5	3	U(9,10)	3060.6	23,008.7	361.0	164.5	3145.8	19,817.9	466.3	173.0
23	6	6	2	U(11,12)	2729.0	17,767.0	508.7	159.4	2964.9	15,747.7	568.8	163.7
24	6	7	5	U(5,6)	3088.1	22,939.3	310.6	116.6	3330.6	19,298.2	402.1	124.5
25	6	8	4	U(7,8)	4266.2	22,493.8	461.4	133.8	4448.6	21,773.5	563.7	145.1
26	7	5	4	U(11,12)	3904.2	25,754.8	375.8	149.7	3889.7	24,548.4	449.4	158.6
27	7	6	5	U(9,10)	3398.5	26,420.3	392.1	131.9	3978.9	20,308.1	569.5	147.3
28	7	7	2	U(7,8)	4943.8	34,249.1	416.0	176.1	5783.8	25,726.6	645.5	205.6
29	7	8	3	U(5,6)	4885.4	30,730.0	384.7	132.6	5025.0	27,850.7	541.6	147.6
30	8	5	5	U(7,8)	2929.2	24,910.9	353.0	138.4	3423.9	20,811.2	473.8	151.3
31	8	6	4	U(5,6)	3950.7	25,548.8	313.4	142.8	4082.2	22,649.7	516.9	170.3
32	8	7	3	U(11,12)	4696.8	39,518.3	374.0	154.2	4796.8	36,424.8	543.4	172.9
33	8	8	2	U(9,10)	6446.6	37,729.2	430.9	154.8	6171.4	36,553.5	561.1	166.7

۵.۳. اعتبار سنجی روش حل

در این بخش ابتدا کارایی روش حل در حل مسائل در مقیاس کوچک بررسی می شود. برای این منظور، نتایج روش حل پیشنهادی با حلگر `intlinprog` (در متلب ۲۰۱۸) مقایسه می شود که از روش های دقیق برای حل مسائل `MILP` استفاده می کند. با این حال، روش اعتبار سنجی برای مسائل در مقیاس بزرگ متفاوت است. همانطور که قبلاً ذکر شد، مسئله تحقیق یک نسخه توسعه یافته از مسئله `MDOVRP` است. در نتیجه به عنوان مسائل `np-hard` دسته بندی می شود و روش های دقیق در حل نمونه های بزرگ در زمان محدود موثر نیستند. علاوه بر این، این مطالعه مدل جدیدی ارائه می کند که در تحقیق قبلی به آن پرداخته نشده است. بنابراین در مورد مسائل در مقیاس بزرگ، الگوریتم `TS` با فراابتکاری ارائه شده برای `MDOVRP` مقایسه می شود.

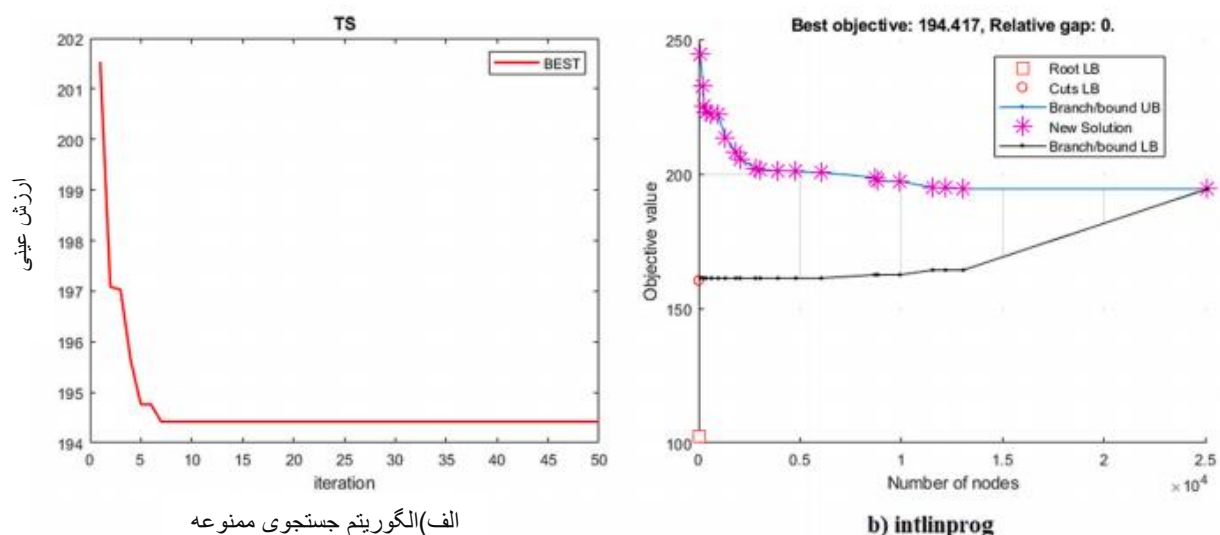
۵.۳.۱. مسئله های در مقیاس کوچک

در این بخش از مسائل در مقیاس کوچک برای مقایسه کارایی الگوریتم جستجوی `tabu` با حل کننده `intlinprog` استفاده شده است. جدول ۷ نتایج به دست آمده با حل مسائل در مقیاس کوچک با استفاده از `intlinprog` و الگوریتم جستجوی `tabu` پیشنهادی را ارائه می دهد.

جدول ۷- اعتبار سنجی روش حل مسائل در مقیاس کوچک.

مسائل	پارامترها			TS algorithm		intlinprog (MATLAB)	
	$ D_m $	$ J $	$ M $	TNC	Run Time (in s)	TNC	Run Time (in s)
a	2	4	3	218.43	5.13	218.43	6.74
b	2	4	4	198.5	20.2	198.5	46.51
c	2	4	5	194.42	16.96	194.42	103.25
d	2	5	3	172.58	23.77	172.58	53.85
e	2	5	4	214.47	17.85	214.47	649.59
f	2	5	5	173.87	53.34	173.87	6734.39
g	3	4	3	160.68	5.26	160.68	20.31
h	3	4	4	167.91	34.7	167.91	59.58
i	3	4	5	140.06	35.07	140.06	322.11
j	3	5	3	151.7	7.21	151.7	55.8
k	3	5	4	174.09	81.23	174.09	4070.78
l	3	5	5	145.84	80.26	152.3	14,400

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می شود، راه حل به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی tabu با راه حل بهینه intlinprog برای مسائل (a)-(k) یکسان است. طبق مطالعات ما، نتایج intlinprog برای این مسائل کاملاً با نتایج به دست آمده از GAMS مطابقت دارد. بنابراین می توان گفت که intlinprog در مسائل کوچک به راه حل بهینه می رسد. در نتیجه می توان ادعا کرد که الگوریتم جستجوی tabu در مثال های (a)-(k) راه حل بهینه را به دست آورده است. به عنوان مثال، شکل ۱۴ همگرایی به راه حل بهینه را برای مسئله (c) جدول ۷ نشان می دهد.



شکل ۱۴. همگرایی به راه حل بهینه.

از سوی دیگر، مشاهده می شود که زمان اجرای حل کننده intlinprog با افزایش هر یک از ابعاد مسئله $|D_m|$ ، $|J|$ ، $|M|$ به طور چشمگیری رشد می کند. در نتیجه، intlinprog پس از چهار ساعت به راه حل بهینه آخرین مسئله نمی رسد، در حالی که الگوریتم TS با زمان اجرا ۸۰ ثانیه به نتیجه بهتری می رسد. با توجه به این نتایج، اگرچه الگوریتم TS لزوماً جواب بهینه را به دست نمی آورد، اما کارایی قابل توجهی در رسیدن به جواب های مناسب دارد.

۵.۳.۲. مسائل در مقیاس بزرگ

این مطالعه با یک مسئله یکپارچه جدید سروکار دارد که در هیچ تحقیق قبلی به آن پرداخته نشده است. پس از آن، هیچ روش حلی در ادبیات برای حل آن پیشنهاد نشده است. علاوه بر این، روش های دقیق در حل نمونه های

مقیاس بزرگ قابل اجرا نیستند زیرا مدل پیشنهادی به عنوان مسائل NP-Hard طبقه‌بندی می‌شود. در نتیجه، برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در مسائل مقیاس بزرگ، آن را با فراابتکاری ارائه شده برای سایر مسائل موجود مقایسه می‌کنیم. مسائل موجود در ادبیات زیر مجموعه‌ای از مدل ما هستند که با حذف برخی ویژگی‌ها از این مدل می‌توان آن‌ها را ایجاد کرد. یکی از این مسائل MDOVRP است که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد. از این رو، بهترین الگوریتم‌های ارائه شده برای MDOVRP برای مقایسه با الگوریتم راه حل پیشنهادی ما استفاده می‌شود.

تا جایی که ما می‌دانیم، مناسب‌ترین الگوریتم‌ها برای MDOVRP توسط [1] Soto, Brandao و همکاران [۳۰] و Liu و همکاران [۱۵] ارائه شده است. همه این مقالات از مسائل معیار ارائه شده توسط کوردو و همکاران [۴] برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های خود استفاده کرده‌اند. بنابراین در این مطالعه، چهارده نمونه مسئله تولید شده توسط کوردو و همکاران [۴] برای بررسی الگوریتم TS در مسائل در مقیاس بزرگ حل شده است.

برای بررسی کارایی روش حل پیشنهادی در مسائل مقیاس بزرگ، از شکاف خطای تجربی (EEG) که توسط لی و همکاران [۱۴] معرفی شده است، همانطور که توسط معادله (۴۱) ارائه شده است، استفاده می‌کنیم. در این معادله، OVTS مقدار هدف ارائه شده توسط الگوریتم TS است و OVBSF مقدار هدف مربوط به بهترین راه حل موجود در ادبیات است. همانطور که در معادله مشاهده می‌شود، هرچه EEG کمتر باشد، راه حل بهتری توسط الگوریتم TS به دست می‌آید.

$$EEG = \frac{OV_{TS} - OV_{BFS}}{OV_{BFS}} \times 100\% \quad (41)$$

جدول ۸ نتایج الگوریتم TS پیشنهادی ما را با بهترین الگوریتم‌های موجود در ادبیات مقایسه می‌کند. عنوان هر مسئله در جدول ۸ همان عنوانی است که در کوردو و همکاران [۴] برای شفاف‌تر کردن مقایسه‌ها استفاده شده است. مقدار هدف در این مسائل «مجموع فواصل (فاصله اقلیدسی) طی شده توسط خودروها است. در جدول، برخی از سرفصل‌های ستون‌ها هنوز آدرس دهی نشده‌اند که به شرح زیر تعریف شده‌اند.

- **nd**: تعداد انبارها (مشابه $|D_m|$ در مدل ما)
- **np**: تعداد نقاط تقاضا (مشابه $|J|$ در مدل ما)
- **Q**: حداکثر باری که یک خودرو می‌تواند حمل کند.
- **M_{ax_d}** : حداکثر فاصله‌ی که یک خودرو می‌تواند طی کند.
- **بهترین راه حل در ادبیات**: بهترین مقدار هدف به دست آمده در ادبیات برای هر مسئله معیار

- راه حل بهینه: راه حل هایی برای برخی مسائل که بهینه بودن آنها ثابت شده است، همانطور که در [1] Brand ao ذکر شده است.

جدول ۸ اعتبار سنجی روش حل برای مسائل در مقیاس بزرگ.

مسئله	پارامترها				بهترین راه حل ما	بهترین راه حل در ادبیات	راه حل بهینه	EEG
	nd	np	Q	Max _d				
p01	4	50	80	∞	386.69	386.18	386.18	0.10%
p02	4	50	160	∞	377.76	375.93	375.93	0.50%
p03	5	75	140	∞	481.56	474.57	474.57	1.50%
p04	2	100	100	∞	686.55	662.22		3.70%
p05	2	100	200	∞	617.87	607.53		1.70%
p06	3	100	100	∞	631.69	611.99		3.20%
p07	4	100	100	∞	626.11	608.9		2.80%
p12	2	80	60	∞	953.26	953.26	953.26	0.00%
p15	4	160	60	∞	1932.51	1885.8	1883.53	2.50%
pr01	4	48	200	500	647.03	647.03	647.03	0.00%
pr02	4	96	195	480	1004.84	979.82	978.82	2.60%
pr03	4	144	190	460	1451.17	1423.48		1.90%
pr07	6	72	200	500	830.78	821.25	821.25	1.20%
pr08	6	144	190	475	1283.43	1254.45		2.30%

طبق جدول ۸ الگوریتم TS در دو مسئله در مقیاس بزرگ به جواب بهینه رسیده است. در دو مورد دیگر، شکاف بین راه حل به دست آمده و بهترین راه حل در ادبیات کمتر از ۱٪ است (راه حل هایی با شکاف کمتر از ۱٪ در جدول ۸ پررنگ شده اند). علاوه بر این، قابل مشاهده است که در ۸ نمونه از ۱۴ مثال حل شده، راه حل به دست آمده از TS در مقایسه با بهترین راه حل موجود در ادبیات، دارای شکاف کمتر از ۲٪ است. این نتایج نشان می دهد که اگرچه روش راه حل پیشنهادی برای MDOVRP طراحی نشده است، اما به اندازه کافی در نمونه های مقیاس بزرگ این مسئله عمل می کند.

۵.۴. مطالعات تطبیقی

این تحقیق یک مدل یکپارچه برای انتخاب تامین کننده، مسیریابی خودرو و زمان بندی پروژه در زنجیره تامین ساخت و ساز ارائه کرده است. هیچ مطالعه ای در ادبیات مربوطه وجود ندارد که به طور همزمان به این سه موضوع بپردازد. بنابراین، مدل های موجود را می توان با حذف برخی از ویژگی ها از مدل ما ایجاد کرد. بر این اساس، ابتدا مدل با مدل برنامه ریزی پروژه یکپارچه و انتخاب تامین کننده (PSSS) مقایسه می شود. این مقایسه نشان می دهد که وقتی مسیریابی حمل و نقل به عنوان مدل در نظر گرفته نمی شود، چگونه بر هزینه ها تأثیر می گذارد. سپس، مدل را با یک رویکرد سنتی مقایسه می کنیم که بررسی می کند اگر مدل یکپارچه به دو مدل فرعی تقسیم شود، زنجیره تامین ساخت و ساز با چه مسئله هایی مواجه است.

۵.۴.۱. مقایسه با مدل PSSS

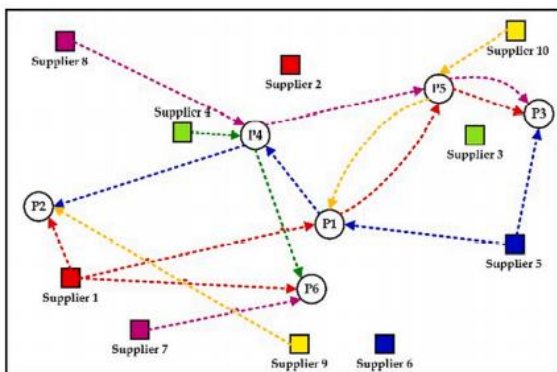
در این بخش، مدل پیشنهادی با مدل یکپارچه زمان بندی پروژه و انتخاب تامین کننده (PSSS) مقایسه می شود تا مقدار ایجاد شده توسط حضور VRP در مدل یکپارچه نشان داده شود. یک مدل PSSS مشابه چن و همکاران [۳] در نظر گرفته می شود با این تفاوت که هزینه حمل و نقل و هزینه خرید مواد در تابع هدف (به عنوان معادله (۱)) به جای قیدها گنجانده شده است. این تنظیم مقایسه را منطقی تر می کند. علاوه بر این، برای بررسی جامع تر تأثیر یکپارچگی بر هزینه های مختلف، فرض می کنیم که مدل PSSS برخلاف چن و همکاران [۳] شامل تنزیل های افزایشی است. در واقع، مدل PSSS با حذف مسیریابی خودرو از مدل پیشنهادی به دست می آید. همانطور که در جدول ۹ مشاهده می شود، مسائل تصادفی ۱ تا ۱۶ با استفاده از طرح های تاگوچی و مسئله ۱۷ با ابعاد کوچکتر صرفاً برای ترسیم نمودارهای تحلیلی طراحی شده است.

جدول ۹ مقایسه بین مدل پیشنهادی و مدل PSSS

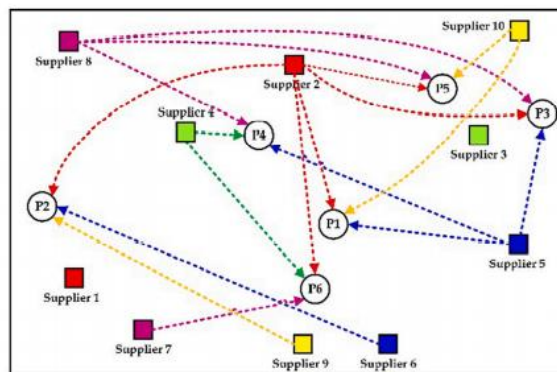
شماره مسئله	پارامترها				مدل پیشنهادی				PSSS model			
	M	J	D _m	A _j	TPC	PC	TDC	TNC	TPC	PC	TDC	TNC _{PSSS}
1	5	5	2	U(7, 10)	2743.9	20,872.1	362.9	169.5	3459.7	20,872.1	348.5	181.7
2	5	6	3	U(7, 10)	2286.8	19,654.5	338.2	150.1	2694.8	19,794.3	337.5	157.4
3	5	7	4	U(11, 14)	2715.9	17,830.4	313.7	130.6	3271.4	18,317.6	313.3	139.0
4	5	8	5	U(11, 14)	3235.6	21,478.3	325.2	126.1	3376.3	24,135.8	307.1	131.4
5	6	5	3	U(11, 14)	4096.2	18,542.3	448.9	142.4	4569.7	21,139.9	432	151.6
6	6	6	2	U(11, 14)	4278.4	21,197.6	421.2	149.4	5244.2	22,360.4	419.8	161.0
7	6	7	5	U(7, 10)	4368.9	30,716.8	418.4	133.4	5287.9	32,291.7	400.3	141.2
8	6	8	4	U(7, 10)	4051.2	27,088.3	353.5	123.4	4523.3	29,078.4	335.8	128.0
9	7	5	4	U(7, 10)	4159.9	27,595.1	362.7	126.3	4976.2	28,577.2	343.4	131.8
10	7	6	5	U(7, 10)	3418.2	26,479.9	376.5	151.7	3451.6	29,108.5	346.1	154.8
11	7	7	2	U(11, 14)	4119.8	25,502.1	380.5	148.6	5225.2	25,502.1	376.5	160.4
12	7	8	3	U(11, 14)	5806.1	27,499.1	456.6	164.8	6575.9	29,796.3	447.9	174.9
13	8	5	5	U(11, 14)	4367.7	31,265.1	382.2	134.3	4676.9	30,862.4	380.8	135.9
14	8	6	4	U(11, 14)	3876.8	28,378.0	370.1	138.1	4595	28,686.4	357	143.1
15	8	7	3	U(7, 10)	6043.6	26,860.1	429.0	161.4	7508.8	28,646.5	413.9	175.7
16	8	8	2	U(7, 10)	6572.7	29,799.8	464.3	167.7	8772.5	31,700.7	452.1	188.6
17	5	6	2	U(5, 6)	2843.1	14,940.2	445.5	173.1	3828.3	16,966.1	397.9	190.6

همانطور که در جدول ۹ مشاهده می شود، مدل پیشنهادی مقادیر هدف بهتری را در همه مثال ها ارائه می دهد (در این جدول، مقادیر هدف با پررنگ برجسته شده اند). این واقعیت نشان می دهد که وجود مسیریابی خودرو در مدل یکپارچه منجر به مبادله بهتر بین هزینه های تهیه منابع و هزینه های برنامه ریزی پروژه شده است. در اکثر نمونه ها، هزینه خرید مواد و هزینه حمل و نقل بدست آمده توسط مدل پیشنهادی کمتر از مدل PSSS است. این نکته با کاربرد مسیریابی خودرو در مدل پیشنهادی مرتبط است، همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود (با حل مسئله ۱۷ به دست آمد). این شکل نشان می دهد که در PSSS، یک خودرو باید مستقیماً از یک تامین کننده به هر پروژه برای حمل و نقل هر ماده برود. بنابراین هزینه حمل و نقل این مدل در مقایسه با سایر هزینه ها به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در نتیجه، مدل PSSS ترجیح می دهد نزدیک ترین تامین کنندگان را برای هر پروژه انتخاب کند تا هزینه های حمل و نقل کاهش یابد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، مدل PSSS تامین کننده ۲ را برای مواد ۱ انتخاب می کند که باعث هزینه خرید بالاتر از مدل پیشنهادی می

شود. علاوه بر این، مطابق شکل ۱۷، مدل پیشنهادی تامین کننده ۵ را برای تهیه مواد ۳ انتخاب می کند، در حالی که PSSS تصمیم می گیرد بخشی از این مواد را از تامین کننده ۵ و بقیه را از تامین کننده ۶ تامین کند. بنابراین پیمانکار نمی تواند از تنزیل های افزایشی استفاده کند و هزینه های خرید مصالح افزایش می یابد. توجه داشته باشید که همه فواصل بر اساس فاصله اقلیدسی محاسبه می شوند و استفاده از منحنی ها در شکل ۱۵ فقط برای وضوح شکل است.

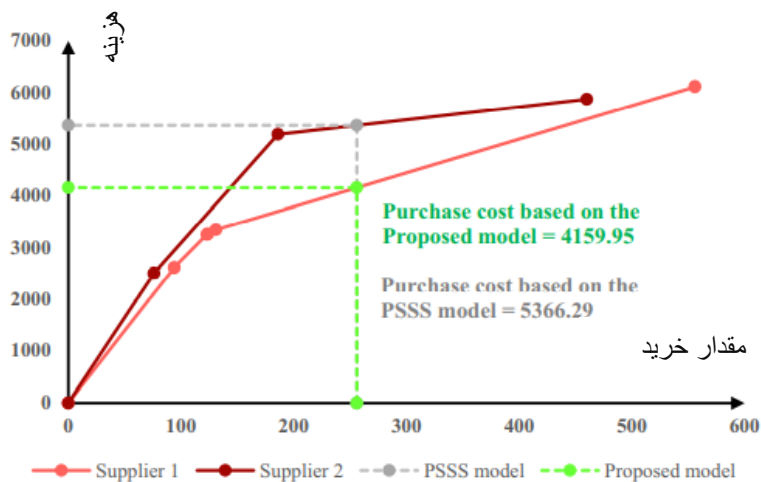


الف) مسیرها بر اساس مدل پیشنهادی

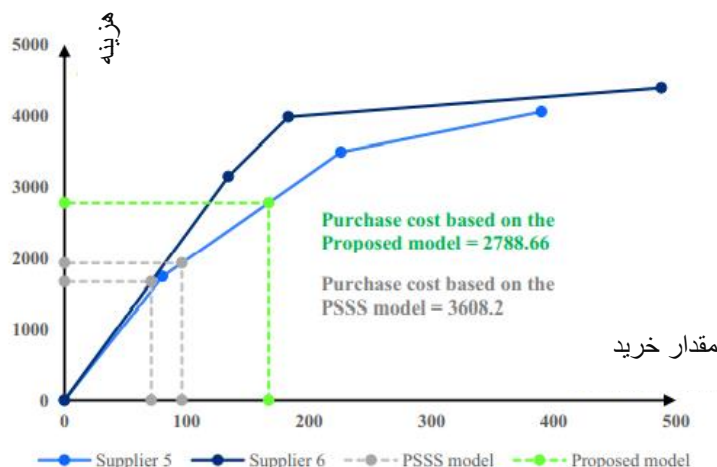


ب) مسیرها بر اساس مدل PSSS

شکل ۱۵. مسیرهای حمل و نقل بر اساس مسئله ۱۷.



شکل ۱۶. هزینه خرید مواد ۱.



شکل ۱۷. هزینه خرید مواد ۳.

همانطور که در پاراگراف قبل مشاهده شد، نتایج بهتر مدل پیشنهادی به دلیل بهبود هزینه حمل و نقل و هزینه خرید در مقایسه با مدل PSSS است. البته شایان ذکر است که هزینه تاخیر پروژه در مدل PSSS اغلب کمتر از مدل پیشنهادی است. این اتفاق می افتد زیرا منابع تجدید ناپذیر مورد نیاز برای هر پروژه مستقیماً از تامین کننده به محل پروژه منتقل می شود. در نتیجه می توان فعالیت های پروژه را زودتر آغاز کرد و هزینه تاخیر را کاهش داد. با این وجود، این کاهش در هزینه ها برای توجیه هزینه های حمل و نقل و خرید کافی نیست و مدل پیشنهادی منجر به TNC بهتر در همه مسئله‌ها می شود.

۵.۴.۲. مقایسه با رویکرد سنتی

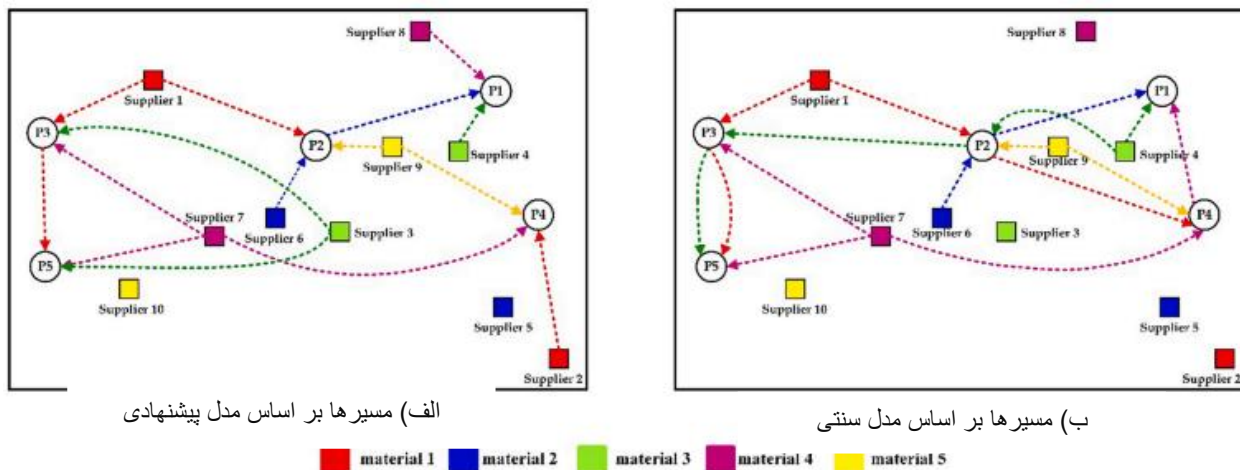
در اکثر رویکردهای سنتی، به ویژه در تجارت به کسب و کار (B2B)، انتخاب تامین کننده در سطوح استراتژیک سازمان انجام می شود. پس از تعیین تامین کنندگان، تصمیماتی مانند برنامه ریزی پروژه در سطوح تصمیم گیری پایین تر سازمان گرفته می شود. بنابراین، ما مدل یکپارچه را با یک مدل دو سطحی مقایسه می کنیم تا مزایای آن را نسبت به رویکردهای سنتی روشن کنیم. مدل دو سطحی که مدل تصمیم گیری مستقل (IDMM) نامیده می شود، ابتدا تامین کنندگان را انتخاب می کند و مسیرهای خودرو را با استفاده از MDOVRP تعیین می کند. راه حل بهینه MDOVRP زمان رسیدن هر ماده به هر پروژه را مشخص می کند که به عنوان ورودی برای برنامه ریزی پروژه در نظر گرفته می شود. در نهایت، مقدار TNC با استفاده از راه حل بهینه مدل دوسطحی به دست می آید تا با نتایج مدل یکپارچه مقایسه شود.

جدول ۱۰ نتایج مقایسه‌ها، از جمله هزینه‌ها و ارزش هدف (که با خط برجسته مشخص شده است) برای هر رویکرد ارائه می‌کند. این نتایج نشان داد که مقدار TNC بدست آمده توسط مدل پیشنهادی بهتر از مقدار حاصل از (TNCIDMM) IDMM است. در مقابل، هزینه خرید مواد ارائه شده توسط مدل IDMM در تمام مسئله‌ها ایجاد شده به طور قابل توجهی کمتر از مقدار مربوطه در مدل ما است. دلیل آن با استفاده از حل مسئله ۱۸ توضیح داده شده است.

جدول ۱۰ مقایسه بین مدل پیشنهادی و مدل IDMM.

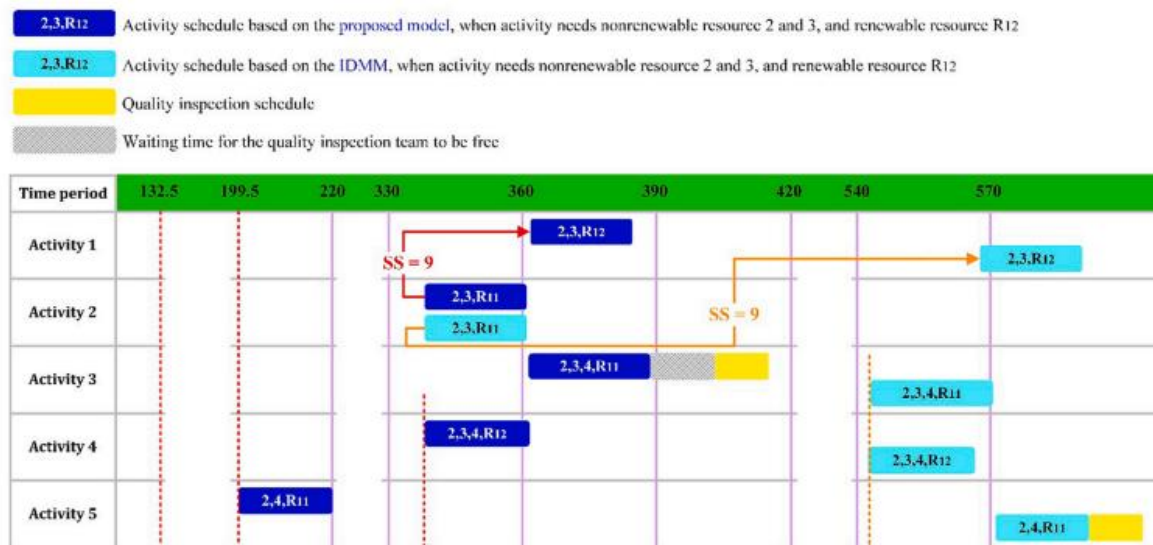
شماره مسئله	پارامترها				مدل پیشنهادی				IDMM model			
	M	J	D _m	A _j	TPC	PC	TDC	TNC	TPC	PC	TDC	TNC _{IDMM}
18	5	5	2	U(5,6)	2703.9	15,797.7	373.1	181.0	2851.7	14,462.1	464.6	190.0
19	5	6	3	U(7,8)	2818.4	17,647.1	344.3	161.1	3158.0	15,088.5	605.5	191.6
20	5	7	4	U(9,10)	2968.8	18,170.4	364.6	136.2	2952.5	17,637.7	421.2	141.4
21	5	8	5	U(11,12)	3514.8	18,587.5	358.0	125.2	3440.9	18,270.3	460.9	136.1
22	6	5	3	U(9,10)	3060.6	23,008.7	361.0	164.5	3145.8	19,817.9	466.3	173.0
23	6	6	2	U(11,12)	2729.0	17,767.0	508.7	159.4	2964.9	15,747.7	568.8	163.7
24	6	7	5	U(5,6)	3088.1	22,939.3	310.6	116.6	3330.6	19,298.2	402.1	124.5
25	6	8	4	U(7,8)	4266.2	22,493.8	461.4	133.8	4448.6	21,773.5	563.7	145.1
26	7	5	4	U(11,12)	3904.2	25,754.8	375.8	149.7	3889.7	24,548.4	449.4	158.6
27	7	6	5	U(9,10)	3398.5	26,420.3	392.1	131.9	3978.9	20,308.1	569.5	147.3
28	7	7	2	U(7,8)	4943.8	34,249.1	416.0	176.1	5783.8	25,726.6	645.5	205.6
29	7	8	3	U(5,6)	4885.4	30,730.0	384.7	132.6	5025.0	27,850.7	541.6	147.6
30	8	5	5	U(7,8)	2929.2	24,910.9	353.0	138.4	3423.9	20,811.2	473.8	151.3
31	8	6	4	U(5,6)	3950.7	25,548.8	313.4	142.8	4082.2	22,649.7	516.9	170.3
32	8	7	3	U(11,12)	4696.8	39,518.3	374.0	154.2	4796.8	36,424.8	543.4	172.9
33	8	8	2	U(9,10)	6446.6	37,729.2	430.9	154.8	6171.4	36,553.5	561.1	166.7

همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، مدل IDMM از مسیرهای طولانی تری برای انتقال مواد استفاده می‌کند. در واقع، از آنجایی که این مدل مستقل از زمان‌بندی پروژه در مورد تهیه منابع تصمیم می‌گیرد، طولانی کردن مسیرها و تامین خواسته‌های پروژه از سوی تامین‌کنندگان ارزان‌قیمت امکان‌پذیر است. اما مسیرهای طولانی باعث می‌شود منابع دیرتر تحویل داده شود و پروژه‌ها با تاخیر بیشتری مواجه شوند.



شکل ۱۸. مسیرهای حمل و نقل بر اساس مسئله ۱۸.

همچنین نمودار گانت (شکل ۱۹) مربوط به پروژه ۱ در مسئله ۱۸ بر این واقعیت دلالت دارد. در حل مدل پیشنهادی، مواد ۴ مورد نیاز پروژه ۱ به تامین کننده ۸ سفارش داده می شود که فاصله کمتری تا محل پروژه دارد اما قیمت بالاتری دارد. این واقعیت باعث می شود که متریکال ۴ در زمان ۱۹۹.۵ به پروژه برسد، در حالی که در راه حل IDMM، متریکال ۴ در زمان ۵۴۱ به محل پروژه می رسد و این باعث تاخیر قابل توجه پروژه می شود. به طور دقیق تر، در IDMM، مواد ۴ بدون توجه به زمان بندی پروژه از تامین کننده ۷ خریداری می شود و خودرو این مواد را پس از یک سفر طولانی به پروژه ۱ تحویل می دهد.



زمان رسیدن مواد ۲ در پروژه ۱ بر اساس هر دو مدل

زمان رسیدن مواد ۴ به پروژه ۱ بر اساس مدل های پیشنهادی

زمان رسیدن مواد ۳ در پروژه ۱ بر اساس هر دو مدل

زمان رسیدن مواد ۴ در پروژه ۱ بر اساس IDMM

شکل ۱۹. نمودار گانت پروژه ۱ بر اساس مسئله ۱۸.

۶. نتیجه گیری

این تحقیق یک مدل MILP را برای ادغام زمان بندی پروژه، انتخاب تامین کننده و مسیریابی خودرو در زنجیره تامین ساخت و ساز ارائه می کند. هدف آن کاهش هزینه های کل زنجیره تامین با هماهنگی تصمیمات به جای تصمیم گیری برای هر بخش به طور جداگانه است. در نتیجه، این مدل به طور مشترک زمان آغاز (و زمان پایان) فعالیت ها، تامین کنندگان منابع تجدید ناپذیر، مسیرهای حمل و نقل مواد و ترتیب بازرسی های کیفیت پروژه را بهینه می کند. برای کاربردی تر کردن مدل در شرایط دنیای واقعی، این مدل روابط تقدم تعمیم یافته بین فعالیت های هر پروژه را در بر می گیرد. همچنین فرض بر این بود که تامین کنندگان تنزیل های افزایشی را بر روی محصولات خود ارائه می دهند.

مسئله این تحقیق گسترش MDOVRP است، بنابراین در کلاس NP-hard طبقه بندی می شود. بنابراین، یک روش حل مبتنی بر الگوریتم جستجوی ممنوعه پیشنهاد شد. در این الگوریتم، ما از روش های مختلف جستجوی محلی و جهش برای دستیابی به راه حل های مطلوب استفاده کردیم. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در مسائل مقیاس کوچک، آن را با intlinprog مقایسه کردیم، حل کننده ای که بر اساس روش های دقیق طراحی شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی ممنوعه در مسائل مقیاس کوچک راه حل بهینه را به دست آورده است. در مورد مسائل در مقیاس بزرگ، الگوریتم TS بر اساس فراابتکاری پیشنهادی برای MDOVRP مورد بررسی قرار گرفت. این ارزیابی نشان داد که TS در حل نمونه های در مقیاس بزرگ به طور موثر عمل می کند.

در نهایت، مدل یکپارچه را با دو مدل دیگر مقایسه کردیم تا کارایی آن را نشان دهیم. هر دو مقایسه ثابت کردند که مدل یکپارچه با متعادل کردن هزینه ها ارزش بیشتری در کل زنجیره تامین پروژه ایجاد می کند.

دو گزینه مختلف را می توان برای گسترش کار حاضر توصیه کرد. ابتدا می توان منابع تجدیدپذیر را در بین پروژه ها به اشتراک گذاشت و مسیرهای مناسبی را برای انتقال این منابع بین پروژه ها تعیین کرد. دوم، مسئله مسیریابی خودرو را می توان به عنوان یک مدل تحویل و تحویل فرمول بندی کرد تا خودروها علاوه بر تحویل منابع، زباله های ساختمانی را بارگیری کنند.

اعلامیه منافع رقابتی

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ منافع مالی رقیب یا روابط شخصی شناخته شده ای ندارند که به نظر می رسد بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر بگذارد.

پیوست اول

الگوریتم های ۱ و ۲ که به ترتیب در بخش های ۵.۳ و ۵.۵.۱ به آنها اشاره شده است، در این قسمت ارائه شده است.

الگوریتم ۱. اصلاح راه حل های غیر ممکن.

```
1 Input: A generated solution
2 Output: A feasible solution
3 repeat for all route ∈ routes related to all materials in the solution
4   if  $d(\text{route}) > Q$  then
5      $dep(\text{NewRoute}) \leftarrow dep(\text{route})$ 
6     while total demand of route >  $Q$  do
7       remove last project in route and add it to NewRoute
8     end
9     update the solution
10  end
11 end
12 repeat for all suppliers ( $k = 1, \dots, K$ )
13   if  $f_k > S_k$  then
14      $m \leftarrow$  the material that is produced by supplier  $k$ 
15     while  $f_k > S_k$  do
16        $p_j \leftarrow$  choose a project randomly from projects that are assigned to supplier  $k$ 
17        $unused(m) \leftarrow$  all suppliers of material  $m$  with enough unused capacity
18        $s \leftarrow$  choose a supplier randomly from  $unused(m)$ 
19        $Feas(s) \leftarrow$  all routes starting from  $s$  that:  $d(\text{route}) + d(p_j) \leq Q$ 
20       if  $Feas(s) \neq \emptyset$  then  $route \leftarrow$  a route that is chosen randomly from  $Feas(s)$ 
21       if  $Feas(s) = \emptyset$  then  $route \leftarrow$  a new route generated starting from  $s$ 
22       remove  $p_j$  from its path and add it to route
23     end
24     update the solution
25   end
26 end
```

الگوریتم ۲. اپراتور NVRSSP که همسایه هایی را برای VRSSP ایجاد می کند.

```

1  Input:  $sol, gsol, TL_{VRSSP}, limit_{VRSSP}, nn_{VRSSP}$ 
2  Output:  $sol, gsol, TL_{VRSSP}$ 
3   $bf_{o_{VRSSP}} \leftarrow \emptyset$ 
4   $bf_{r_{VRSSP}} \leftarrow \emptyset$ 
5  for  $n$  in 1 to  $nn_{VRSSP}$  do
6      create neighbor using  $sol$  that results in  $nsol$  and  $(m, j_1, j_2)$ 
7      if  $TL_{VRSSP}(m, j_1, j_2) > 0$  then
8          if  $f(nsol) < f(bf_{o_{VRSSP}})$  then
9               $bf_{o_{VRSSP}} = nsol$ 
10             end
11         else
12             if  $f(nsol) < f(bf_{r_{VRSSP}})$  then
13                  $bf_{r_{VRSSP}} = nsol$ 
14             end
15         end
16     end
17     if  $f(bf_{o_{VRSSP}}) < f(bf_{r_{VRSSP}})$  and  $f(bf_{o_{VRSSP}}) < f(gsol)$  then
18          $sol \leftarrow bf_{o_{VRSSP}}$ 
19          $TL_{VRSSP}(m, j_1, j_2) \leftarrow limit_{VRSSP}$ 
20     else
21          $sol \leftarrow bf_{r_{VRSSP}}$ 
22          $TL_{VRSSP}(m, j_1, j_2) \leftarrow limit_{VRSSP}$ 
23     end
24      $TL_{VRSSP} \leftarrow \max(0, TL_{VRSSP} - 1)$ 
25     if  $f(sol) < f(gsol)$  then
26          $gsol \leftarrow sol$ 
27          $ngsol \leftarrow local\ search(gsol)$ 
28         if  $f(ngsol) < f(gsol)$  then
29              $gsol \leftarrow ngsol$ 
30              $sol \leftarrow ngsol$ 
31         end
32     end

```