

# مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک توسط حمل‌ونقل

## دووجهی ریل و جاده با در نظرگیری توازن ریسک در شبکه

عبدالسلام قادری (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

مهديه معقولى، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

mail:E- ab.ghaderi@uok.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۳

دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۱

### چکیده

حمل‌ونقل مواد خطرناک برخلاف مواد دیگر به واسطه داشتن مخاطرات متعدد، از جنبه‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی مورد توجه ویژه‌ی شرکت‌های حمل‌ونقل و برنامه‌ریزان حمل‌ونقل قرار دارد. در تحقیق پیش‌رو، به بررسی و مطالعه مسأله مکان‌یابی و مسیریابی مواد خطرناک توسط حمل‌ونقل چندوجهی متشکل از ریل و جاده پرداخته خواهد شد. در این دسته از مسائل، علاوه بر جنبه اقتصادی یا هزینه که توسط حاملان حمل‌ونقل حائز اهمیت است، تمرکز متولیان و مقامات دولتی معمولاً بر جنبه اجتماعی یا توزیع متوازن و عادلانه ریسک معطوف بوده است. از این‌رو، مسائل مطرح شده در این حوزه از حمل‌ونقل دارای اهداف چندگانه و غالباً متناقض از جنس هزینه و ریسک هستند. به همین منظور در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط سه‌هدفه مبتنی به یال و باتوجه به اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی بیشینه ریسک یال‌ها و کمینه‌سازی بیشینه ریسک پایانه‌های انتقال جهت یافتن همزمان مکان بهینه‌ی پایانه‌های چندوجهی و مسیرهای بهینه جابجایی مواد خطرناک ارائه می‌شود. به منظور حل مدل از رویکرد محدودیت اسپیلون بهبودیافته که از لحاظ سرعت و کارآیی نسبت به نسخه سنتی آن برتری قابل ملاحظه‌ای دارد، استفاده خواهد شد. از آنجایی که مدل مطرح شده دارای تعداد بسیار زیادی بهینه پارتویی است و انتخاب بهترین جواب از میان این مجموعه جواب‌ها برای تصمیم‌گیرنده مشکل است؛ بنابراین، مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی متشکل از شاخص‌های توزیع متوازن ریسک داخل شبکه برای انتخاب جواب مناسب‌تر ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل‌هایی صورت گرفته بر روی مسائل نمونه با ابعاد مختلف، نشان از برتری مدل ارائه شده از جنبه‌ی توزیع متوازن و عادلانه ریسک نسبت به مدل‌های مرسوم در شبکه‌های حمل‌ونقل دووجهی ریل و جاده دارد.

واژه‌های کلیدی: توزیع ریسک، حمل‌ونقل چندوجهی، مکان‌یابی-مسیریابی، جابجایی مواد خطرناک.

## ۱. مقدمه

مواد خطرناک شامل مواردی مانند مواد منفجره، قابل اشتعال، اکسیدکننده، رادیواکتیو و گازهای سمی است. امروزه با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی، مسأله حمل‌ونقل مواد خطرناک مورد توجه بسیاری از محققان این حوزه قرار گرفته است. تمرکز زیاد بر این بخش، بیشتر به دلیل ریسک زیست-محیطی و اجتماعی حاصل از انتقال مواد خطرناک است [Ardjmand et al. 2015]. بررسی تحقیقات پیشین نشان داد که حمل‌ونقل مواد خطرناک بیشتر از طریق جاده صورت گرفته و فقط تعداد محدودی از آن‌ها توسط شیوه‌های دیگر حمل‌ونقل مانند ریل انجام شده است [Verma, 2009]. با این حال می‌توان با بهره‌گیری از مزیت‌های شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل از ترکیب این وجوه نیز در جابجایی مواد خطرناک در طول شبکه حمل‌ونقل استفاده نمود.

در تحقیق پیش‌رو، فرض خواهد شد جابجایی محموله‌های خطرناک از طریق شبکه حمل‌ونقل چندوجهی متشکل از ریل و جاده انجام می‌شود. در شبکه دو وجهی مفروض، ریل و جاده تنها در مکانی به نام پایانه‌های چندوجهی (انتقال) به هم متصل شده و عملیات انتقال مواد از کامیون به قطار و برعکس ممکن است صورت پذیرد. معمولاً مکان‌های کاندید برای پایانه‌های انتقال توسط حاملان / فرستندگان کالا<sup>۲</sup> بر اساس ایمنی، امنیت، هزینه و قابلیت استفاده تعیین می‌شود و مکان پایانه‌های انتقال می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تصمیمات مسیریابی و در نتیجه بر روی کل هزینه و ریسک حمل‌ونقل داشته باشد. جابجایی کالاهای خطرناک از دو جنبه اقتصادی و اجتماعی بسیار حائز اهمیت بوده به طوری که علاوه بر مباحث کمینه نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل، نحوه توزیع عادلانه ریسک یکی از نگرانی‌های کلیدی است که می‌تواند مورد توجه مسئولان و شرکت‌های حمل‌ونقلی قرارگیرد. توجه نکردن به این مقوله، قطعاً بر روی مبحث عدالت اجتماعی اثرگذار بوده و ممکن است نارضایتی‌های اجتماعی را به دنبال داشته باشد. در این تحقیق، مسأله جابجایی مواد خطرناک توسط حمل‌ونقل چندوجهی بررسی می‌شود. در مسأله مذکور، به طور همزمان تصمیمات مرتبط با مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی و مسیریابی محموله‌ها در شبکه با در نظرگیری مباحث هزینه و توزیع عادلانه ریسک، پرداخته می‌شود.

## ۲. مرور ادبیات

از آنجاکه حمل‌ونقل مواد خطرناک غالباً توسط حمل‌ونقل تک وجهی انجام می‌شود، تمرکز اغلب مطالعات نیز معطوف به این حوزه بوده و تنها تعداد محدودی از مطالعات به مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک توسط حمل‌ونقل چندوجهی پرداخته‌اند. استورز و پلاکار مدلی تک‌هدفه به منظور کمینه‌سازی ریسک ناشی از تصمیمات مکان‌یابی و حمل‌ونقل را توسعه دادند. در تحقیق مذکور، ریسک را به‌عنوان جمعیت در معرض پسماندهای خطرناک اندازه‌گیری نمودند که مطابق با این ارزیابی، بایستی از جابجایی در مناطق پر جمعیت اجتناب شود [Stowers and Palekar, 1993]. ژاکوبس و وارمردام یک مدل ریاضی به منظور بهینه‌سازی همزمان تصمیمات مکان‌یابی و مسیریابی عملیات دفع، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک ارائه نمودند. آن‌ها در مدل خود ترکیب خطی از هزینه‌های کل (نصب‌وراه‌اندازی و حمل‌ونقل) و ریسک کل (حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و دفع پسماندهای خطرناک) در زمان را به حداقل رساندند و از روش شمارش کامل برای حل مدل استفاده کردند [Jacobs and Warmerdam, 1994]. کورنت و راتیک یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور ایجاد گزینه‌های کارآمد برای مسأله مکان‌یابی تسهیلات و حمل‌ونقل مواد خطرناک را پیشنهاد نمودند. رویکرد پیشنهادی آن‌ها، اهداف مربوط به هزینه، ریسک و توزیع متوازن ریسک را در نظر می‌گیرد. مدل مذکور شامل پنج هدف: کمینه‌سازی ریسک کل حمل‌ونقل مواد خطرناک، کمینه‌سازی ریسک کل مرتبط با مکان‌یابی تسهیلات مواد خطرناک، کمینه‌سازی بیشینه ریسک حمل‌ونقل برای هر فرد، کمینه‌سازی بیشینه ریسک تسهیلات برای هر فرد و کمینه‌سازی هزینه‌های کل عملیاتی، حمل‌ونقل و تسهیلات است [Current and Ratick, 1995].

کیپانرا و همکاران مسأله مکان‌یابی تسهیلات گسسته و مسیریابی فعالیت‌های مضر را بررسی کردند و به منظور حل مدل، روش آزادسازی لاگرانژ را برای تجزیه مسأله به دو زیر مسأله مکان‌یابی و مسیریابی ب کار بردند و آنها را با روش شاخه و کران حل نمودند. تسهیلات مضر به عنوان مثال مکان‌های زباله، کارخانجات صنعتی شیمیایی، شبکه‌های منبع برق،

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

منظور تولید مجموعه‌ای از مسیرها برای جابجایی محموله‌های مواد خطرناک را ارائه نمودند. هدف، تعیین مجموعه مسیریابی است که ریسک کل سفر را کمینه و آن را به صورت عادلانه در میان مناطق جغرافیایی شامل شبکه حمل‌ونقل، توزیع نماید [Gopalan et al. 1990]. کاروتینوت و همکاران مسأله تولید مسیریابی با حداقل ریسک مربوط به حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک بین یک مبدا-مقصد منطقه‌ی مفروض را بررسی کردند. مسأله اصلی انتخاب مسیریابی است که ریسک کل محموله‌های مواد خطرناک را با در نظر گرفتن توزیع عادلانه ریسک برای جمعیت، کمینه کند. این مسأله به صورت ریاضی فرمول‌بندی و دو الگوریتم ابتکاری برای حل آن پیشنهاد شد [Carotenuto, Giordani and Ricciardelli, 2007]. بیانکو و همکاران فرض نمودند، هدف مقامات دولتی محلی و منطقه‌ای کنترل حمل‌ونقل مواد خطرناک با اعمال محدودیت بر میزان عبور مواد خطرناک بر روی یال‌های شبکه است. به طور خاص، هدف مقامات منطقه‌ای<sup>۳</sup> کمینه‌سازی ریسک حمل‌ونقل در کل شبکه است، در حالی که هدف مقامات محلی<sup>۴</sup> کمینه‌سازی ریسک در منطقه حوزه‌های قضایی خود با در نظر گرفتن شرط توزیع عادلانه ریسک بود. آن‌ها فرمولاسیون برنامه‌ریزی دو سطحی خطی را با توجه به کمینه-نمودن ریسک کل و توزیع متوازن ریسک ارائه نمودند. برای حل مدل دو سطحی، سطح دوم را با به‌کارگیری شرایط بهینه‌سازی کاروش-کاهن-تاکر<sup>۵</sup> در سطح یک، ادغام و مسأله را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک سطحی تبدیل و حل نمودند. علاوه بر این، از آنجاکه حل بهینه مدل دو سطحی دشوار بود یک الگوریتم ابتکاری برای مدل دو سطحی ارائه شد [Bianco, Caramia and Giordani, 2009]. کانگ و همکاران مسأله حمل‌ونقل مواد خطرناک را براساس مدل ارزش در معرض ریسک<sup>۶</sup> پیشنهاد نمودند. آن‌ها مدل خود را برای مسأله سفرهای چندگانه با چند نوع ماده خطرناک به کار بردند؛ این مدل با برآورده نمودن محدودیت‌های توزیع عادلانه، نسبت به یافتن مسیریابی که مقدار ارزش در معرض ریسک را کمینه کند، اقدام می‌نماید [Kang, Batta and Kwon, 2014]. توکلی مقدم و همکاران مدل جدیدی به منظور مسیریابی وسائط نقلیه به منظور کمینه‌کردن ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک توسعه داده‌اند. در مدل آن‌ها سعی شده است، در

راکتورهای هسته‌ای و غیره هستند که سبب می‌شود افراد محیط‌زیست در معرض آن‌ها قرار گیرند. مدل مسأله مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی فعالیت‌های مضر به صورت حداقل هزینه جریان شبکه ظرفیت‌دار فرمول‌بندی شد. در تحقیق مذکور، تابع هدف مسأله مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات مضر به صورت کمینه‌سازی هزینه ایجاد تسهیلات و حمل‌ونقل بررسی گردید [Cappanera, Gallo and Maffioli, 2003].

سامانلیوگلو یک مدل چندهدفه عدد صحیح مختلط برای تصمیمات مکان‌یابی- مسیریابی مواد خطرناک صنعتی پیشنهاد نمودند. توابع هدف بررسی شده در مدل ریاضی شامل: کمینه‌سازی هزینه کل، شامل هزینه حمل‌ونقل مواد خطرناک و باقی‌مانده پسماندها و هزینه ثابت ایجاد مراکز عملیات، دفع و بازیافت؛ کمینه‌سازی ریسک کل حمل‌ونقل مربوط به جمعیت در معرض مسیر حمل‌ونقل مواد خطرناک و باقی‌مانده‌های پسماند و همچنین کمینه‌سازی ریسک کل جمعیت پیرامون مراکز دفع و عملیات بود [Samanlioglu, 2013].

اردجمند و همکاران مدلی به منظور مکان‌یابی محل تسهیلات و مسیریابی مواد را پیشنهاد کردند و مسأله را به صورت تک‌محصولی و تک دوره‌ای در نظر گرفتند. هدف مدل، کمینه‌سازی هزینه و ریسک ایجاد تسهیلات، حمل‌ونقل محموله‌ها و مکان‌های دفع بود. در این تحقیق، از الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله استفاده شد [Ardjmand et al. 2015].

زی و همکاران مسأله مکان‌یابی و مسیریابی مواد خطرناک توسط حمل‌ونقل چندوجهی را مدل‌سازی کردند و مکان پایانه‌های انتقال یعنی نقاطی که در آن شیوه‌های حمل‌ونقل می‌تواند تغییر کند را تعیین نمودند. در مقاله مذکور، مسأله‌ی مطرح شده با توجه به کمینه‌سازی مجموع هزینه و ریسک (کمینه‌سازی ریسک کل یال، هزینه کل یال، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای پایانه‌های انتقال و ریسک کل در فرایند انتقال) در قالب یک مدل تک‌هدفه فرموله شد [Xie et al. 2012]. در مطالعه‌ای دیگر، جیانگ و همکاران مدلی دوهدفه جهت حمل‌ونقل مواد خطرناک توسط دو شیوه‌ی ریل و جاده را پیشنهاد دادند. تابع هدف این مقاله، کمینه‌سازی هزینه و ریسک کل بود [Jiang et al. 2014]. گوپالان و همکاران مدلی به

در سال ۲۰۰۷ متوسط مسافت حمل و نقل هر محموله مواد خطرناک توسط حالت تک‌وجهی برابر با ۶۵ مایل ( ۱۰۵ کیلومتر) بوده که این مسافت در حمل و نقل چندوجهی ۸۴۹ مایل (۱۳۶۶ کیلومتر) بوده است؛ ارقام مذکور نشان می‌دهد که حمل و نقل چندوجهی نقش بسزایی در حمل و نقل مواد خطرناک به ویژه برای محموله‌هایی با مسافت‌های طولانی ایفاء می‌کند.

یکی از مسائل اصلی برنامه‌ریزی محموله‌های مواد خطرناک مسیریابی این محموله‌ها است که شامل انتخاب بهترین مسیر از بین مسیرهای جفت مبادی و مقاصد است. نگرانی اصلی مقامات دولتی، کنترل ریسک ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک بر انسان و محیط‌زیست است. علاوه بر کمینه‌سازی ریسک کل، توجه اغلب مقامات دولتی بر ترویج یکنواختی در توزیع ریسک در طول شبکه است. عدم توزیع عادلانه ریسک می‌تواند منجر به نارضایتی‌های اجتماعی در جامعه گردد. بنابراین، در برنامه‌ریزی جابجایی محموله‌های خطرناک، مسأله اصلی پیدا کردن مسیرهایی است به نحوی که ریسک منصفانه در هر منطقه‌ای که در آن شبکه حمل و نقل تعبیه شده است، به صورت یکنواخت گسترش یابد [Bianco, Caramia and Giordani, 2009] بنابراین، افزایش تقاضای حمل و نقل مواد خطرناک توسط شیوه‌ی چندوجهی از یک طرف و کمبود مطالعات صورت گرفته در زمینه مکان‌یابی و مسیریابی مواد خطرناک با حمل و نقل چندوجهی از طرفی دیگر، مستلزم تحقیقات بیشتری است.

مدل‌های مکان‌یابی و مسیریابی ارائه شده موجود در ادبیات توجه کمی به استفاده از مدل‌های چندوجهی در جابجایی کالاهای خطرناک داشته‌اند. بنابراین هدف از تحقیق پیش‌رو مطالعه و بررسی مسأله مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی و حمل و نقل مواد خطرناک با استفاده از شبکه‌ی دو وجهی متشکل از ریل و جاده و باتوجه به مباحث هزینه و توزیع متوازن ریسک است. لازم ذکر است، مدل ارائه شده قابلیت کاربرد در هر شبکه‌ی دو وجهی متشکل از ریل و جاده را دارد تا از مزیت‌های دو نوع شیوه حمل و نقل در جابجایی کالاهای خطرناک استفاده نموده و به صورت متوازن ریسک ناشی از جابجایی این محموله‌ها را بین مراکز جمعیتی توزیع نماید. به

مسیریابی وسائط نقلیه، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های حمل و نقل، کاهش ریسک مسیر نیز مورد توجه قرار گیرد و زمان‌بندی مناسبی برای خدمت‌دهی وسائط نقلیه به مشتریان ارائه شود تا هزینه‌های نیروی انسانی کمینه شود و امکان برنامه‌ریزی بهتری برای مسیریابی و توزیع مواد خطرناک به وجود آید. به منظور حل مدل ارائه شده روش فراابتکاری NSGA-II پیشنهاد شد [Tavakoli Moghadam et al. 1390]. صفارزاده و همکاران مسیره‌های حمل مواد خطرناک را براساس ریسک آنها مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در تحقیق مذکور، مسیر مورد استفاده به قطعات مختلف تفکیک شده و ریسک آنها شامل کمی‌سازی دو مولفه احتمال وقوع و پیامدهای وقوع است. این کمی‌سازی با استفاده از مقایسات زوجی در قطعات مختلف صورت گرفته است [Saffarzadeh et al. 1394]. اخیراً، جلیلی‌بال و همکاران یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی ارائه نموده‌اند. در این مدل علاوه بر کمینه کردن هزینه‌ها و کاهش ریسک، اثرات زیست محیطی نیز مدنظر بوده و برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است [Jalili Bal et al., 1390].

بررسی و مطالعه پیشینه تحقیق مرتبط با موضوع نشان داد، علاوه بر مباحث کمینه‌سازی ریسک و هزینه کل که مورد توجه اغلب محققان این حوزه بوده است، توزیع متوازن ریسک نیز در برخی از مطالعات به آن توجه ویژه‌ای شده است. از طرفی باتوجه به ماهیت چندهدفه بودن جابجایی محموله‌های خطرناک که غالباً در تناقض با یکدیگر نیز هستند، مسائل این حوزه به صورت مدل‌های چندهدفه فرموله شده‌اند. به علاوه، علیرغم مزیت‌های حمل و نقل چندوجهی، در تحقیقات گذشته توجه کمتری به این شیوه از حمل و نقل در جابجایی محموله‌های خطرناک صورت گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته بر روی میزان جریان کالای جابجا شده در سال ۲۰۰۲ در ایالات متحده، نشان داد که ۱۸٫۷ میلیون تن مواد خطرناک توسط حمل و نقل چندوجهی انتقال یافتند [Xie et al. 2012]. با این حال، در سال ۲۰۰۷ این مقدار به ۱۱۱ میلیون تن رسید که نشان از روند روبه‌رشد استفاده از حمل و نقل چندوجهی به منظور جابجایی مواد خطرناک می‌دهد. همچنین،

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

نیازمندی‌های جامعه به مواد خطرناک در مراکز جمعیتی و صنعتی، جابجایی این مواد را بین نقاط عرضه و تقاضا اجتناب‌ناپذیر نموده است. مسأله مورد مطالعه در این تحقیق، مسیریابی این مواد در طول شبکه با استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی و همچنین مکان‌یابی احداث و تجهیز نمودن پایانه‌های انتقال به منظور جابجایی مواد بین دو شیوه حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای تعریف خواهد شد؛ کلیه تصمیمات مسأله با توجه به مباحث هزینه و توزیع عادلانه ریسک گرفته خواهند شد. شبکه مورد مطالعه در این مسأله توسط یک گراف  $G=(N,E)$ ، که  $N=\{N_H, N_R, N_{HR}\}$  مجموعه‌ای از گره‌ها و  $E=\{E_H, E_R\}$  مجموعه‌ای از یال‌ها است، توصیف شده است. مجموعه گره‌ها شامل سه زیرمجموعه:  $N_H$  مجموعه گره‌های جاده،  $N_R$  مجموعه گره‌های ریل،  $N_{HR}$  گره‌هایی که در آن خطوط ریل به جاده اتصال می‌یابد (مجموعه بالقوه پایانه-های انتقال) است. از آنجاکه پایانه‌های انتقال مواد خطرناک نیازمند تجهیزات خاص و اپراتورهای آموزش دیده هستند، تنها گره‌های پایانه انتقال در صورت در دسترس بودن برای انتقال مواد خطرناک ممکن است انتخاب شوند و هیچ فعالیت انتقالی در گره‌های ریل و جاده صورت نمی‌پذیرد؛ همچنین، در مرحله برنامه‌ریزی، تمام گره‌های پایانه انتقال می‌توانند به عنوان مکان‌های کاندید برای پایانه‌های انتقال مواد خطرناک در نظر گرفته شوند.

### ۳-۱ مفروضات مسأله

مفروضات مورد نظر مسأله به شرح زیر است:

- پارامترهای مسأله به صورت ایستا در نظر گرفته شده است.
- شبکه حمل‌ونقل چندوجهی به صورت ریل و جاده است.
- پایانه‌های انتقال و خطوط شبکه دارای محدودیت ظرفیت است.
- امکان استفاده از همه مسیرها در دو جهت رفت و برگشت وجود دارد.
- ریسک جابجایی مواد خطرناک از مسیر بین دو گره در جهت رفت با جهت برگشت برابر است.
- مبادی و مقاصد چندگانه و چند نوع کالای خطرناک در نظر گرفته شده است.

صورت اجمالی، نوآوری‌های تحقیق پیش‌رو در مقایسه با ادبیات موضوع که برخی از خلاءهای موجود در این حوزه را پوشش خواهد داد را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- ارائه یک مدل ریاضی سه هدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مبتنی بر یال برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی مواد خطرناک با تمرکز به مبحث توزیع متوازن ریسک. به این منظور، علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی بیشینه ریسک خطوط و پایانه‌های انتقال نیز در مدل به عنوان هدف‌های جداگانه در نظر گرفته شده‌اند. در ادبیات جابجایی مواد خطرناک، توابع هدف از نوع کمینه‌سازی بیشینه (minmax) به منظور توزیع متوازن ریسک استفاده شده‌اند. علاوه بر این در تحقیق پیش‌رو، جابجایی چند نوع ماده خطرناک با اثرات متفاوت بررسی شده و محدودیت بودجه نیز به منظور فعال‌سازی پایانه‌های انتقال در نظر گرفته شده است.
- ارائه الگوریتم محدودیت اپسیلون بهبودیافته به عنوان رویکردی کارآ جهت حل مدل ریاضی و یافتن جواب-های بهینه پارتویی
- پیشنهاد یکسری شاخص عملکردی به منظور مقایسه جواب‌های بهینه‌ی پارتویی یافته شده با توجه به شاخص‌های توزیع ریسک
- ارائه الگوریتم شناسایی مسیرهای شبکه به منظور محاسبه شاخص‌های توزیع ریسک مسیر جابجایی محموله‌ها

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر تهیه گردیده است. در بخش سوم، مسأله مورد بررسی تشریح شده و یک مدل ریاضی سه هدفه برای آن ارائه گردید. رویکرد حل مسئله در بند چهارم گزارش مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم مقاله، شاخص‌های عملکردی مدل ارائه شده به منظور انتخاب یک جواب از بین تعداد زیاد بهینه پارتویی آورده شده و الگوریتم شناسایی مسیرهای شبکه نیز به منظور محاسبه شاخص ریسک مسیرهای شبکه ارائه شد. نتایج محاسباتی و جمع‌بندی مقاله نیز موضوعات بعدی مقاله را تشکیل خواهد داد.

### ۳. تعریف مسأله

• ریسک حمل و نقل براساس ریسک جمعیتی تعریف شده است.

$\theta_{2i}^c, \theta_{1i}^c$ : متغیرهای کمکی باینری به منظور خطی سازی مدل. حال باتوجه به علائم فوق، مدل ریاضی مبتنی بر یال مسأله مورد مطالعه به صورت زیر فرموله شده است:

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{y \in Y} n^c X_{ij}^{cy} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N_{HR}} \sum_{c \in C} n^c T_i^c r_m^c \theta_i$$

$$\min \max_{(i,j) \in E: i < j} \sum_{c \in C} \sum_{y \in Y} n^c (r_i) \quad (2)$$

$$\min \max_{i \in N_{HR}} \sum_{c \in C} r_i^c n^c T_i^c \quad (3)$$

s. t:

$$\sum_{(i,k) \in E} \sum_{y \in Y} X_{ik}^{cy} \quad (4)$$

$$- \sum_{(k,i) \in E} \sum_{y \in Y} X_{ki}^{cy} = \begin{cases} +1 & i = o(c) \\ 0 & o.w \\ -1 & i = d(c) \end{cases}, \forall i \in N, c \in C$$

$$T_i^c \quad (5)$$

$$= \left| \sum_{(i,k) \in E_H} X_{ik}^{cy} - \sum_{(k,i) \in E_H} X_{ki}^{cy} \right|, \forall i \in N_{HR} : i \neq o(c) \& d(c), c \in C, y$$

$$= 1 \quad (6)$$

$$\sum_{c \in C} n^c T_i^c \leq \delta_i Z_i, \forall i \in N_{HR} \quad (7)$$

$$\sum_{c \in C} n^c X_{ij}^{cy} \leq \gamma_{ij}^y, \forall (i,j) \in E, y \in Y \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_{HR}} e_i Z_i \leq b \quad (9)$$

$$X_{ij}^{cy} \leq P_{ij}^c, \forall (i,j) \in E, c \in C, y \in Y \quad (10)$$

$$X_{ji}^{cy} \leq 1 - P_{ij}^c, \forall (i,j) \in E, c \in C, y \in Y \quad (11)$$

$$P_{ij}^c \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in E, c \in C$$

### ۲-۳ مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی مسأله ارائه می شود. علائمی که برای نمایش این مدل ریاضی استفاده شده است به شرح زیرند:

#### ۱-۲-۳ مجموعه های مدل

$N$  مجموعه گره های شبکه،  $\{N_H, N_R, N_{HR}\} \subset N$

$E$  مجموعه یال های شبکه،  $\{E_H, E_R\} \subset E$

$C$  مجموعه محموله ها (مبداء-مقصد-نوع کالا)،  $c \in C$

$Y$  نوع شیوهی حمل و نقل شامل جاده (۱) و راه آهن (۲)،

$y \in Y$

#### ۲-۲-۳ پارامترهای مدل

$\theta_i$  هزینه تخلیه و بارگیری در پایانه انتقال کاندید  $i$

$e_i$  هزینه های سرمایه ای پایانه انتقال کاندید  $i$

$\delta_i$  ظرفیت پایانه انتقال کاندید  $i$

$\gamma_{ij}^y$  ظرفیت یال  $(i,j)$  متعلق به  $y$

$n^c$  تقاضای محموله  $c$

$o(c)$  گره مبداء محموله  $c$

$d(c)$  گره مقصد محموله  $c$

$l_{ij}^{cy}$  هزینه جابجایی محموله  $c$  بر روی یال  $(i,j)$  توسط

شیوهی حمل و نقل  $y$

$r_i^c$  ریسک محموله  $c$  بر روی پایانه انتقال کاندید  $i$

$r_{ij}^{cy}$  ریسک محموله  $c$  بر روی یال  $(i,j)$  متعلق به  $y$

$b$  حداکثر بودجه پایانه های انتقال

### ۳-۲-۳ متغیرهای تصمیم مدل

$X_{ij}^{cy}$ : نسبتی از محموله  $c$  جابجا شده بر روی یال  $(i,j)$  و

توسط شیوهی حمل و نقل  $y$

$T_i^c$ : نسبتی از محموله  $c$  منتقل شده از طریق پایانه انتقال  $i$  از

مُد حمل و نقل ریل به جاده یا برعکس

$Z_i$ : متغیر مکان یابی است؛ اگر نقطه ی کاندید  $i$  به عنوان پایانه

انتقال انتخاب شود یک، در غیر این صورت صفر است

$q_1$ : بیشینه ریسک یال های شبکه

$q_2$ : بیشینه ریسک پایانه های انتقال

$P_{ij}^c$ : متغیر کمکی باینری به منظور کنترل نمودن جریان وارد

شده و خارج شده محموله  $c$  به یال  $(i,j)$

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

تعداد محدودی از محموله‌های مواد خطرناک می‌تواند جابجا شوند. رابطه (۸) محدودیت بودجه برای پایانه‌های انتقال کاندید را بیان می‌نماید. روابط (۹) و (۱۰) تضمین می‌کند که اگر محموله  $c$  توسط یکی از شیوه‌های ریل یا جاده از طریق یال  $(i,j)$  جابجا گردد، دیگر محموله مذکور در خلاف جهت جابجا نمی‌گردد. به این معنی که اگر محموله‌ای از یک یال توسط یکی از مدهای حمل‌ونقل منتقل شود، امکان برگشت از همان یال توسط هیچکدام از مدهای حمل‌ونقل برای آن محموله مقدور نباشد. این وضعیت ممکن است به واسطه توابع در نظر گرفته شده توزیع ریسک در شبکه اتفاق بیفتد و محدودیت‌های مذکور از این حالت ممانعت خواهند نمود. روابط (۱۱) تا (۱۴) مرتبط با متغیرهای تصمیم مدل هستند.

در مدل ارائه شده همانند آنچه در برخی از مقالات مرتبط با این زمینه بدان پرداخته شده است [Bianco et al. 2009]، به منظور توزیع عادلانه ریسک از توابع هدف کمینه‌سازی بیشینه ریسک یال و پایانه‌های انتقال استفاده شده است. به راحتی می‌توان با تعریف متغیرهای کمکی  $q_1$  و  $q_2$  به ترتیب به جای بیشینه ریسک یال و پایانه انتقال، و تعریف محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸)، توابع هدف از نوع  $\min\max$  را در مدل به صورت زیر وارد نمود. برخلاف توابع هدف  $\min\sum$  که به دنبال کمینه‌سازی ریسک کل شبکه هستند، توابع هدف  $\min\max$  سعی در توزیع متوازن ریسک حاصل از محموله‌ها در طول شبکه دارند. در توابع هدف  $\min\sum$  ممکن است یال‌هایی از شبکه وجود داشته باشند که جمعیت ساکن در جوار آن یال متحمل ریسک بالایی بشوند؛ از طرفی جمعیت واقع شده در اطراف برخی دیگر از خطوط شبکه ممکن است متحمل هیچ‌گونه ریسکی یا مقدار ناچیزی شوند. بنابراین در این دسته از توابع، توزیع نامتوازنی از ریسک بین خطوط شبکه ممکن است اتفاق بیفتد که زیاد مورد قبول جامعه نیست. با این حال توابع هدف  $\min\max$  این مشکل را حل نموده و به توزیع متوازن و عادلانه ریسک بین افراد قرار گرفته داخل شبکه کمک می‌نمایند.

$$\min q_1 \quad (15)$$

$$\min q_2 \quad (16)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{y \in Y} n^c (r_{ij}^{cy} X_{ij}^{cy} + r_{ji}^{cy} X_{ji}^{cy}) \leq q_1, \quad (17)$$

$$\forall (i,j) \in E : i < j$$

$$0 \leq X_{ij}^{cy} \leq 1 \quad (12)$$

$$\forall (i,j) \in E, c \in C, y \in Y$$

$$0 \leq T_i^c \leq 1 \quad (13)$$

$$\forall i \in N_{HR}, c \in C$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$\forall i \in N_{HR}$$

مدل ارائه شده فوق، یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه عدد صحیح مختلط بوده که توابع هدف (۲) و (۳) و همچنین مجموعه محدودیت‌های (۵) بایستی با استفاده از تکنیک‌های مرسوم خطی‌سازی به خطی تبدیل شوند. در این مدل، تابع هدف (۱)، مجموع هزینه‌های جابجایی محموله‌ها توسط ریل و جاده، هزینه تخلیه و بارگیری در پایانه‌های انتقال، تابع هدف (۲) بیشینه ریسک خطوط شبکه و تابع هدف (۳) بیشینه ریسک پایانه‌های انتقال را کمینه می‌نماید.

رابطه (۴)، محدودیت‌های تعادل جریان شبکه بوده و تعادل جریان برای کلیه گره‌های شبکه و برای محموله‌های مختلف را تضمین می‌نماید. به این معنی که اختلاف مابین میزان کالای خارج شده و وارد شده توسط ریل و جاده از گره‌های مبدا و مقصد به ترتیب برابر با  $+1$  و  $-1$  بوده و برای گره‌های میانی این مقدار برابر با صفر است. رابطه (۵)، نشانگر نسبت محموله‌ی  $c$  منتقل شده از یک وجه حمل‌ونقل به وجه دیگر آن (از ریل به جاده و برعکس) توسط پایانه انتقال  $i$  بوده و با متغیر  $T_i^c$  نشان داده شده است. وجود قدرمطلق در این رابطه به معنی خالص جریان انتقالی بین مدهای حمل‌ونقل بوده و به راحتی قابل خطی‌سازی است. بدیهی است، عدم مقدارگیری این متغیر برای یک محموله مشخص نشانگر عدم انتقال محموله موردنظر است. همچنین، در این رابطه می‌توان مقدار  $y$  را با  $2$  جایگزین نموده و به جای خطوط جاده‌ای از خطوط ریلی در شبکه استفاده نمود. چنانچه مشخص است از متغیر  $T_i^c$  به منظور محاسبه ریسک پایانه انتقال  $i$  استفاده شده و این موضوع در تابع هدف سوم نشان داده شده است.

همچنین رابطه (۶) بیان‌کننده این موضوع است تنها در صورت انتخاب یک گره به عنوان مکان کاندید، حداکثر به اندازه ظرفیت آن گره می‌توان محموله‌های مختلف را بین وجوه حمل‌ونقل جابجا نمود. رابطه (۷) محدودیت ظرفیت یال بوده و بیان‌کننده این موضوع است که بر روی یال‌های شبکه تنها

که در آن،  $\chi$  مجموعه جواب‌های موجه یا فضای جواب مسأله و  $\vec{x}$  بردار متغیرهای تصمیم است. همچنین،  $f_i(\vec{x})$  به ازای  $i = 1, 2, 3$  به ترتیب نشانگر توابع هدف هزینه، کمینه‌سازی بیشینه ریسک خطوط شبکه و پایانه‌های انتقال است.

در این مقاله، نخست از روش جمع وزنی جهت حل مدل استفاده شده است؛ به این صورت که برای هر یک از توابع هدف به ترتیب وزن  $w_1$ ،  $w_2$  و  $w_3$  در نظر گرفته شده و تابع هدف جدید به صورت رابطه (۲۴) از حاصل جمع توابع هدف در مقادیر وزن متناظر با هر یک بدست آمده است.

$$\min w_1 f_1(\vec{x}) + w_2 f_2(\vec{x}) + w_3 f_3(\vec{x}), \quad (24)$$

$$s. t. : \vec{x} \in \chi$$

با این حال، باتوجه به ایراداتی که روش جمع وزنی دارد کمتر از آن جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده خواهد شد و رویکرد کارآیی جهت حل این دسته از مسائل محسوب نخواهد شد. مشکلاتی از قبیل تعیین مقادیر وزن هر یک از توابع هدف، تولید جواب‌های مغلوب زیاد، و یکسان نبودن مقیاس توابع هدف منجر به عملکرد نامطلوب رویکرد مذکور خواهد شد. رویکرد دیگری که در حل این دسته از مسائل مورد استفاده قرار گرفته و به صورت دقیق مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه را حل خواهد نمود، روش محدودیت افسیلون است. این رویکرد سعی بر فائق آمدن بر مشکلات مذکور داشته و به بهینه‌سازی یکی از توابع هدف مسأله پرداخته به نحوی که سایر توابع هدف به محدودیت‌های مسأله اضافه خواهند شد. از زمان ارائه روش محدودیت افسیلون، در راستای بهبود عملکرد روش در یافتن جواب‌های بهینه مؤثر تغییراتی بر روی رویکرد مذکور جهت حل مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه عدد صحیح صورت گرفته است.

ماوروتاس [Mavrotas, 2009] و ماوروتاس و فلوریوس [Mavrotas and Florios, 2013] نسخه‌های بهبود یافته (۱) و (۲) را جهت حل این دسته از مسائل ارائه نمودند. در ادامه سعی خواهد شد مروری بر رویکردهای مذکور در حل مسأله مورد مطالعه انداخته شود. در تحقیق پیش‌رو مدل‌های روش محدودیت افسیلون سنتی و بهبود یافته به صورت فرم زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

مدل روش محدودیت افسیلون      مدل روش

$$\sum_{c \in C} r_i^c n^c T_i^c \leq q_2, \quad \forall i \in N_{HR} \quad (18)$$

رابطه (۵) مدل نیز به واسطه داشتن عبارت قدرمطلق نیازمند خطی‌سازی است که به صورت زیر خطی‌سازی شده است [FICO Xpress Team, 2009]:

$$0 \leq T_i^c - \left( \sum_{(i,k) \in E_H} X_{ik}^{cy} - \sum_{(k,i) \in E_H} X_{ki}^{cy} \right) \leq 2 \times \theta_{2i}^c, \quad (19)$$

$$\forall i \in N_{HR} : i \neq o(c) \& d(c), c \in C, y = 1$$

$$0 \leq T_i^c - \left( \sum_{(k,i) \in E_H} X_{ki}^{cy} - \sum_{(i,k) \in E_H} X_{ik}^{cy} \right) \leq 2 \times \theta_{1i}^c, \quad (20)$$

$$\forall i \in N_{HR} : i \neq o(c) \& d(c), c \in C, y = 1$$

$$\theta_{1i}^c + \theta_{2i}^c = 1, \quad (21)$$

$$\forall i \in N_{HR} : i \neq o(c) \& d(c), c \in C$$

$$\theta_{1i}^c, \theta_{2i}^c \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_{HR}, c \in C \quad (22)$$

بنابراین، به این ترتیب مسأله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی سه هدفه عدد صحیح مختلط فرموله خواهد شد.

#### ۴. روش حل

برخلاف مدل‌های تک‌هدفه بهینه‌سازی، در مسائل چندهدفه دستیابی به یک جواب بهینه واحد که به طور همزمان تمام توابع هدف را بهینه نماید امکان‌پذیر نیست. در این دسته از مسائل به جای یافتن جواب بهینه، مجموعه جواب‌های بهینه پارتویی بدست خواهند آمد. جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه رویکردهای مختلفی وجود دارد که از آن‌جمله می‌توان به روشهای جمع وزنی، محدودیت افسیلون و الگوریتم‌های ابتکاری اشاره نمود. از طرفی حل مسائل نمونه در ابعاد مختلف نشان داد که حل‌کننده‌ی CPLEX قادر به حل مسأله مورد بررسی در زمان‌های کوتاه است. بنابراین، حل بهینه مدل در ابعاد بزرگ نیز توسط CPLEX امکان‌پذیر بوده و نیازی به ارائه الگوریتم ابتکاری یا فراابتکاری جهت حل مدل وجود ندارد. حال اگر مسأله سه هدفه مورد مطالعه را به فرم زیر نشان دهیم:

$$\min f(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), f_3(\vec{x})) \quad (23)$$

$$s. t. : \vec{x} \in \chi$$



## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

بهینه مدل با تابع هدف  $I$  و باتوجه به مقدار بهینه تابع هدف  $J$  است. در جدول موازنه از آنجاکه برخی از مدل‌ها باتوجه به مقدار تابع هدف مدل‌های دیگر حل خواهند شد، ترتیب حل مدل‌ها بایستی رعایت شود. به همین دلیل، در هر سطر مدل‌ها به ترتیب با توجه به شماره آنها حل می‌شوند.

نکته دوم قابل توجه، دستیابی به جواب‌های بهینه موثر و عدم بررسی جواب‌های مغلوب است. شرط موثر بودن جواب‌های بهینه مدل (I) این است که محدودیت‌های مرتبط با توابع هدف دوم و سوم به صورت مساوی برقرار گردند. در راستای رسیدن به جواب‌های بهینه مؤثر، مدل (II) به صورت زیر تولید خواهد شد. به این منظور، محدودیت‌های توابع هدف (۲) و (۳) را با اضافه نمودن متغیرهای کمبود به صورت مساوی تبدیل نموده و با یک ضریب بسیار کوچک به تابع هدف به صورتیکه در مدل (II) مشاهده می‌شود آورده خواهد شد. در این مدل، پارامترهای  $(v_2, v_3)$ ، دامنه توابع دوم و سوم؛  $(s_2, s_3)$  متغیرهای کمبود محدودیت‌های دوم و سوم؛ و  $\xi \in [10^{-6}, 10^{-3}]$ . تغییرات داده شده در مدل، در صورت وجود جواب‌های چندگانه، نوعی از بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک بر روی سایر توابع هدف را انجام خواهد داد [Mavrotas and Florios, 2013].

شبه کد الگوریتم محدودیت اپسیلون استفاده شده جهت حل مسأله مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد، در فاز نخست با استفاده از بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک جدول موازنه تشکیل شده و نقاط ایده‌آل و نادر هریک از توابع به دست خواهند آمد. سپس در فاز دوم که فاز اصلی الگوریتم را تشکیل خواهد داد، در هر تکرار با تغییر دادن مقادیر پارامترهای سمت راست محدودیت‌های مرتبط با توابع هدف دوم و سوم، مدل (II) حل خواهد شد. در این فاز تعداد کل مدل‌هایی که ممکن است حل شوند برابر با  $(\tau_2 + 1) \times (\tau_3 + 1)$  خواهد بود.

محدودیت بهبود یافته (II)

اپسیلون سنتی

$$\begin{aligned} & \text{(I)} \\ & \min f_1(\vec{x}) \\ & \text{s. t. :} \\ & f_2(\vec{x}) \leq \varepsilon_2, \\ & f_3(\vec{x}) \leq \varepsilon_3, \\ & \vec{x} \in \chi. \end{aligned} \quad \begin{aligned} & \text{(II)} \\ & \min f_1(\vec{x}) + \xi(s_2/v_2 + 10^{-1}s_3/v_3) \\ & \text{s. t. :} \\ & f_2(\vec{x}) + s_2 = \varepsilon_2, \\ & f_3(\vec{x}) + s_3 = \varepsilon_3, \\ & \vec{x} \in \chi \text{ and } s_2, s_3 \geq 0. \end{aligned} \quad (26)$$

با وجود مزیت‌های روش محدودیت اپسیلون سنتی نسبت به روش جمع‌وزنی توجه به دو نکته زیر حائز اهمیت است: دامنه تغییرات توابع هدف بر روی مجموعه‌ی جواب‌های مؤثر، و تضمین مؤثر بودن جواب‌های به دست آمده. به منظور بکارگیری مناسب روش محدودیت اپسیلون بایستی دامنه تغییرات توابع هدفی که در محدودیت‌ها استفاده خواهند شد مشخص باشد و محاسبه این مقادیر کار ساده‌ای نیست. در واقع کران پایین هر کدام از توابع هدف به راحتی با استفاده از حل مسأله بدون توجه به دو تابع هدف دیگر محاسبه شده و تحت عنوان جواب ایده‌آل<sup>۶</sup> آن تابع شناخته خواهد شد. با این حال یافتن کران بالای هر تابع هدف بر روی جواب‌های مؤثر به این سادگی امکان‌پذیر نیست (نقاط نادر<sup>۸</sup>). رایج‌ترین روش به این صورت است که دامنه تغییرات از جدول موازنه<sup>۹</sup> (جدولی که از بهینه‌سازی تک‌هدفه توابع هدف بدست می‌آید) محاسبه شود. در صورت وجود جواب‌های بهینه چندگانه تضمینی برای این که جواب‌ها مؤثر باشند، وجود ندارد. به منظور رفع این ابهام، ماوروتاس استفاده از بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک برای تولید جدول موازنه برای هر تابع هدف را پیشنهاد نمود [Mavrotas, 2009]. نحوه محاسبه جدول موازنه در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول، در کل ۹ مدل حل خواهند شد. مدل‌های تک‌هدفه بر روی قطراصلی آورده شده و جواب‌های بهینه آنها با  $Z_i^*$  نشان داده شود. جواب بهینه سایر مدل‌ها نیز با  $Z_i^j$  نشان داده شده است که بیانگر جواب

جدول ۱. جدول موازنہ

	$f_1(\vec{x})$	$f_2(\vec{x})$	$f_3(\vec{x})$
$f_1(\vec{x})$	$z_1^* = \min f_1(\vec{x}), s.t.: \vec{x} \in \chi$	$z_2^1 = \min f_2(\vec{x}), s.t.: f_1(\vec{x}) = z_1^*, \vec{x} \in \chi$ (۲۷)	$z_3^1 = \min f_3(\vec{x}), s.t.: f_1(\vec{x}) = z_1^*, f_2(\vec{x}) = z_2^1, \vec{x} \in \chi$ (۲۸) (۲۹)
$f_2(\vec{x})$	$z_1^2 = \min f_1(\vec{x}), s.t.: f_2(\vec{x}) = z_2^*, f_3(\vec{x}) = z_3^2, \vec{x} \in \chi$ (۳۲)	$z_2^* = \min f_2(\vec{x}), s.t.: \vec{x} \in \chi$ (۳۰)	$z_3^2 = \min f_3(\vec{x}), s.t.: f_2(\vec{x}) = z_2^*, \vec{x} \in \chi$ (۳۱)
$f_3(\vec{x})$	$z_1^3 = \min f_1(\vec{x}), s.t.: f_3(\vec{x}) = z_3^*, \vec{x} \in \chi$ (۳۴)	$z_2^3 = \min f_1(\vec{x}), s.t.: f_1(\vec{x}) = z_1^3, f_3(\vec{x}) = z_3^*, \vec{x} \in \chi$ (۳۵)	$z_3^* = \min f_3(\vec{x}), s.t.: \vec{x} \in \chi$ (۳۳)
نقاط ایدہال	$z_1^*$	$z_2^*$	$z_3^*$
نقاط نادر	$\bar{z}_1 = \max\{z_1^2, z_1^3\}$	$\bar{z}_2 = \max\{z_2^1, z_2^3\}$	$\bar{z}_3 = \max\{z_3^1, z_3^2\}$

فاز (۱): تولید کران پایین و کران بالای توابع هدف با استفاده از بهینه سازی لکسیکوگرافیک  $\{(z_i^*, \bar{z}_i), \forall i = 1, 2, 3\}$

$$v_i = (\bar{z}_i - z_i^*), \forall i = 2, 3 \text{ محاسبہ دامنه توابع هدف دوم و سوم،}$$

(۲-۱) تقسیم دامنه توابع هدف به  $\tau_i$  بازه مساوی  $(\tau_i + 1)$  نقطه و محاسبہ گام کاهشی توابع هدف دوم و سوم،

$$step_i = v_i / \tau_i, \forall i = 2, 3$$

فاز (۲): اجرای فرایند زیر و تشکیل مدل (II) و حل آن:

(۱-۲) برای  $k$  برابر با  $\cdot$  تا  $\tau_3$ :

$$\varepsilon_3 = \bar{z}_3 - k * step_3 \text{ محاسبہ مقدار سمت راست تابع هدف سوم،}$$

(۲-۱-۲) برای  $j$  برابر با  $\cdot$  تا  $\tau_2$ :

$$\varepsilon_2 = \bar{z}_2 - j * step_2 \text{ محاسبہ مقدار سمت راست تابع هدف دوم،}$$

(۲-۲-۱) حل مدل (II)

(۳-۲-۱-۲) اگر مدل دارای جواب موجه نیست:

• قرار بدہ  $K = K + 1$ ، برو به گام ۱-۱-۲

(۴-۲-۱-۲) اگر مدل دارای جواب موجه است:

• محاسبہ ضریب عبور،  $\varphi = \text{int}(s_2 / step_2)$  (منظور از  $\text{int}$  بخش صحیح تقسیم است)

• قرار بدہ  $j = j + 1 + \varphi$ ، برو به گام ۱-۲-۱-۲

فاز (۳): نمایش جواب های مؤثر تولید شده مسأله

شکل ۱. شبہ کد الگوریتم محدودیت اپسیلون بهبود یافته

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

است. ذکر این نکته ضروری است که مدل ارائه شده مبتنی بر یال بوده و یافتن مسیر جابجایی هرکدام از مواد به صورت مستقیم از روی جواب مدل امکان‌پذیر نیست. با این حال می‌توان از روی جواب یافته شده مسأله و مقادیر محموله‌های جابجا شده بر روی یال‌های شبکه، مسیرهای جابجایی محموله‌های مختلف را استخراج نمود. در ادامه این تحقیق، الگوریتم شناسایی مسیرهای شبکه به این منظور طراحی شده است. در این تحقیق سه مجموعه و مجموعاً ۷ شاخص جهت مقایسه جواب‌های بهینه‌ی پارتویی تهیه شده‌اند که در جدول (۲) به صورت خلاصه‌وار نشان داده شده‌اند.

شاخص‌های عمومی، شامل ریسک و هزینه کل شبکه بوده و همانگونه در روابط (۲۷) - (۲۸) مشخص است به راحتی قابل محاسبه‌اند. شاخص‌های مبتنی بر یال‌ها و پایانه‌های انتقال با استفاده از ریسک پایانه‌های انتقال و یال‌های شبکه محاسبه خواهند شد. شاخص بیشینه ریسک یال‌ها همان مقدار تابع هدف دوم ( $q_1$ ) بوده که توسط مدل، مقادیر کمینه آن‌ها محاسبه شده است. مقدار ریسک یال ( $i, j$ ) در صورت جابجایی کالای  $C$  از طریق شیوه حمل و نقل  $y$  به صورت رابطه (۴۳) محاسبه می‌شود:

$$rl_{ij}^{cy} = a^y pop_{ij} d_{ij}^y rm^c \quad (43)$$

$$, \forall (i, j) \in E, c \in C, y \in Y$$

همچنین، ریسک جابجایی کالای  $C$  از طریق پایانه انتقال  $i$

طبق رابطه (۴۴) محاسبه می‌شود:

$$r_i^c = pro_i pop_{i,} rm^c \quad (44)$$

$$, \forall i \in N_{HR}, c \in C$$

در رابطه (۴۳)،  $a^y$  احتمال وقوع حادثه و وسیله نقلیه در هر بخش (کیلومتر) از شبکه توسط مُد  $y$ ، پارامترهای  $pop_{ij}$ ،  $d_{ij}^y$ ،  $rm^c$  به ترتیب بیانگر جمعیت ساکن اطراف یال ( $i, j$ )، و مسافت یال ( $i, j$ ) مربوط به مُد حمل و نقل  $y$ ، و ضریب تاثیر انواع مواد خطرناک است. همچنین در رابطه (۴۴)، پارامترهای  $pro_i$  و  $pop_{i,}$  به ترتیب بیانگر احتمال وقوع تصادف و جمعیت مردم قرار گرفته در معرض ریسک در اطراف پایانه انتقال  $i$  است. واحدهای  $rl_{ij}^{cy}$  و  $r_i^c$  تعداد نفر-کالا است. یعنی تعداد افرادی که ممکن است در نتیجه وقوع تصادف مواد خطرناک با مشکل مواجه شوند.

با این حال، معمولاً تعداد مدل‌های حل شده در الگوریتم بسیار کمتر از این تعداد بوده و این موضوع نیز افزایش سرعت الگوریتم را به همراه دارد. در صورتی که برای یک مقدار مشخص،  $E_2$ ، مدل (II) ناموجه گردد (گام ۲-۱-۳)، آنگاه برای مقادیر کمتر از آن نیز مدل موجه نبوده و دیگر نیازی به بررسی این مقادیر نخواهد بود. به همین دلیل در این گام الگوریتم حلقه داخلی را شکسته و به گام ۲-۱-۱ برخورد گشت. حال در صورتی که در هر بار حل مدل، الگوریتم به جواب موجهی بیانجامد (گام ۲-۱-۲) آنگاه مقدار ضریب عبور  $\varphi$ ، محاسبه شده و در صورتیکه مقدار آن بزرگتر از یک گردد، یک پرش به اندازه این مقدار در حل مدل‌های فاز ۲-۱-۲ به وجود خواهد آمد. دلیل آن نیز تولید مجدد جواب‌های مؤثر در این تکرارها بوده و تنها تفاوت آن تغییر یافتن مقادیر متغیرهای کمبود خواهد شد. این موضوع که در محدود اپسیلون سستی وجود ندارد، نیز منجر به افزایش سرعت الگوریتم شده و نیازی به انجام تکرارهای اضافی نخواهد بود.

### ۵. شاخص‌های عملکرد

نتایج محاسباتی انجام شده نشان داد که مسأله مورد مطالعه دارای تعداد بسیار زیاد بهینه پارتویی است. از طرفی، انتخاب از بین مجموعه بسیار زیاد جواب‌های بهینه پارتویی که در آن‌ها توابع هدف هزینه و ریسک محاسبه شده‌اند، ممکن است گمراه‌کننده بوده و تصمیم پیچیده‌ای باشد. به همین دلیل در تحقیقات پیشین حمل و نقل مواد خطرناک از شاخص‌های مختلف به منظور ارزیابی راه‌حل‌های مختلف و نهایتاً انتخاب راه‌حل مناسب‌تر استفاده می‌شود. از آنجا که یکی از اهداف اصلی این مطالعه، توزیع عادلانه ریسک بین افراد ساکن در منطقه‌ی جغرافیایی است، تمرکز بیشتر، بر روی شاخص‌هایی است که میزان توزیع ریسک را اندازه‌گیری می‌کنند. در این مقاله، سه دسته شاخص جهت محاسبه میزان هزینه جابجایی محصولات و ریسک تحمیل شده به هریک از افراد ساکن در منطقه‌ی جغرافیایی که فعالیت جابجایی مواد خطرناک در شبکه‌ی حمل و نقل آن صورت می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفته است. دسته اول، شاخص‌های عمومی شامل هزینه و ریسک کل شبکه؛ دسته دوم، شاخص‌های مبتنی بر میزان کالای جابجا شده بر روی یال‌ها و پایانه‌های انتقال؛ و دسته سوم، شاخص‌های مبتنی بر مسیر جابجایی هرکدام از محموله‌ها

توازن ریسک محدود شده به صورت رابطه (۴۱) تعریف می شود. در این رابطه،  $E_r$  و  $N'_{HR}$  به ترتیب زیرمجموعه ای از یال ها و پایانه های انتقال شبکه  $G$ ، که متعلق به مسیرهای انتخاب شده هستند و  $\mu_r$  متوسط ریسک برای هر شخص در میان جمعیت واقع در همسایگی  $E_r$  و  $N'_{HR}$  است. همانند  $EI$ ، هر چقدر مقدار  $REI$  کوچکتر باشد، توزیع ریسک بر روی جمعیت یال ها و پایانه های انتقال متعلق به مسیر مورد نظر عادلانه تر است. جهت محاسبه دو شاخص مورد بحث، مقادیر  $\mu$ ،  $\mu_r$ ،  $\sigma_{ij}$  و  $\delta_i$  طبق روابط (۴۵) تا (۴۸) محاسبه می شوند:

$$\mu = \left( \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} \sum_{y \in Y} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy} + \sum_{i \in N_{HR}} \sum_{c \in C} n^c T_i^c r_i^c \right) / \left( \sum_{(i,j) \in E} pop_{ij} + \sum_{i \in N_{HR}} pop_u \right) \quad (45)$$

$$\mu_r = \left( \sum_{(i,j) \in E_r} \sum_{c \in C} \sum_{y \in Y} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy} + \sum_{i \in N_{HR}} \sum_{c \in C} n^c T_i^c r_i^c \right) / \left( \sum_{(i,j) \in E_r} pop_{ij} + \sum_{i \in N_{HR}} pop_u \right) \quad (46)$$

$$\sigma_{ij} = \left( \sum_{c \in C} \sum_{y \in Y} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy} \right) / pop_{ij}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (47)$$

$$\delta_i = \left( \sum_{c \in C} n^c T_i^c r_i^c \right) / pop_u, \quad \forall i \in N_{HR} \quad (48)$$

شاخص هفتم مبتنی بر مسیر جابجایی محموله های خطرناک است. بدیهی است هر محموله مواد خطرناک ممکن است از مسیر یا مسیرهای مختلفی استفاده نماید که در مدل ارائه شده به صورت صریح بدست نمی آید. یک مسیر دنباله ای از یال ها و گره ها است که ریسک آن از حاصل جمع ریسک تمام یال ها و پایانه های انتقال انتخاب شده متعلق به مسیر محموله محاسبه می شود. لازم به ذکر است مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق جهت جابجایی مواد خطرناک مبتنی بر یال های شبکه بوده و

علاوه بر این شاخص ها که مقادیر آن به راحتی باتوجه به جواب های مسأله قابل محاسبه است و به صورت کلی مقادیر ریسک بالقوه حاصل از جابجایی مواد خطرناک را نشان می دهند، نحوه عملکرد مدل ارائه شده در توزیع ریسک بین نواحی جغرافیایی (خطوط شبکه) را منعکس نمی کنند. بنابراین ارائه شاخص هایی که به مبحث محاسبه توزیع ریسک داخل شبکه می پردازند از اهمیت ویژه ای برخوردار است که در ادامه روابط مربوطه ارائه خواهند شد. این شاخص ها تحت عناوین شاخص توازن ریسک و شاخص توازن ریسک محدود شده قبلاً در ادبیات این حوزه نام گذاری شده و برای مدل مبتنی بر مسیر در شبکه ی جاده ای معرفی شده اند.

[Carotenuto et al. 2007]. هدف از محاسبه این دو شاخص، آگاهی از نحوه توزیع متوازن و عادلانه ریسک بر روی جمعیت ساکن در منطقه مسکونی است که در معرض ریسک جابجایی مواد خطرناک قرار گرفته اند. شاخص توازن ریسک به عنوان ضریب تغییر پذیری ریسک برای جمعیت واقع شده در اطراف یال ها و پایانه های انتقال شبکه حمل و نقل به صورت رابطه (۴۰) تعریف می شود. در این رابطه:  $\mu$  متوسط ریسک برای هر شخص ساکن در منطقه جغرافیایی اطراف شبکه حمل و نقل  $G=(N,E)$  و  $\sigma_{ij}$  و  $\delta_i$  به ترتیب متوسط ریسک برای هر شخص در اطراف یال  $(i,j)$  و پایانه انتقال  $i$  است. هر چقدر مقدار  $EI$  کوچکتر باشد، یعنی میزان تغییر پذیری ریسک برای افراد جامعه دارای مقدار پایین تری است. بنابراین، مقادیر کمتر این شاخص، بیانگر توزیع عادلانه تر ریسک خواهد بود.

لازم به ذکر است،  $EI$  با توجه به تمام یال ها و پایانه های انتقال محاسبه شده و در واقع متوسط ریسک کلیه افراد واقع شده در اطراف شبکه را محاسبه می نماید؛ با این حال، از آنجایی که در هر راه حل، ممکن است بسیاری از جمعیت، دور از یال ها و پایانه های انتقال انتخاب شده ساکن باشند، در نظر گیری آن ها در شاخص مورد بررسی زیاد منطقی به نظر نرسیده و می توان در محاسبات از آن ها چشم پوشی نمود. بنابراین، شاخص دیگری به نام شاخص توازن ریسک محدود شده را به منظور ارزیابی توزیع عادلانه ریسک تنها بر روی جمعیت یال ها و پایانه های انتقال متعلق به حداقل یکی از مسیرهای انتخاب شده، محاسبه می نماییم. بر این اساس شاخص

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

است از طریق مسیرهای مختلفی جابه‌جا شود که شاخص مسیر را با  $v$  نشان داده‌ایم. میزان کالای جابه‌جا شده  $c$  توسط ریل و جاده در طول یال‌های شبکه با یکدیگر تجمیع شده و با  $XY_{ij}^c$  نشان داده شده است. دلیل انجام این کار در واقع ساده‌سازی مسأله بوده و در حقیقت استخراج مسیر جابجایی محموله‌ها با توجه به ریل و جاده مشکل بوده و بعضاً تفکیک ناپذیر است.  $XP_{ij}^{cv}$  مقدار کالای  $c$  که از یال  $(i,j)$  توسط ریل و جاده و از طریق مسیر  $v$  جابه‌جا می‌شود را نشان می‌دهد

متغیرهای تصمیم جریان حمل‌ونقل در آن، مقدار کالای جابه‌جا شده را توسط هر یک از شیوه‌های حمل‌ونقل بر روی خطوط شبکه منعکس می‌نمایند. بنابراین در صورتی که قرار بر محاسبه شاخصی باشد که ریسک مسیر را محاسبه نمایند، بایستی مسیر یا مسیرهای جابجایی محموله‌ها استخراج شوند. به همین منظور، یک الگوریتم جهت شناسایی مسیرهای شبکه پیشنهاد شده است که در ادامه توضیحات مربوطه آورده شده است.

در شکل ۲ چارچوب و مراحل الگوریتم شناسایی مسیرهای شبکه آورده شده است. علائم و پارامترهای استفاده شده در این الگوریتم به شرح زیر است. هر محموله ممکن

جدول ۲. مجموعه شاخص‌ها

مجموعه شاخص	نام شاخص	ماهیت شاخص - جهت مطلوب	رابطه	فرمول
عمومی	هزینه کل	هزینه - کاهش	(۳۶)	$TC = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} \sum_{y \in (1,2)} n^c X_{ij}^{cy} l_{ij}^{cy}$
	ریسک کل	ریسک - کاهش	(۳۷)	$TR = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} \sum_{y \in (1,2)} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy} + \sum_{i \in N_{HR}} \sum_{c \in C} n^c T_i^c r_i^c$
مبتنی بر یال‌ها و پایانه‌های انتقال	ریسک کل	ریسک - کاهش	(۳۸)	$TRY = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} \sum_{y \in (1,2)} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy}$
	بیشینه ریسک	ریسک - کاهش	(۳۹)	$MRY = \max \left\{ \sum_{c \in C} \sum_{y \in (1,2)} n^c X_{ij}^{cy} r l_{ij}^{cy}, \forall (i,j) \in E \right\}$
	توازن ریسک	توزیع متوازن ریسک - کاهش	(۴۰)	$EI = \frac{1}{\mu} \sqrt{\left( \sum_{(i,j) \in E} (\sigma_{ij} - \mu)^2 + \sum_{i \in N_{HR}} (\delta_i - \mu)^2 \right) /  E + N_{HR} }$
	توازن ریسک محدود شده	توزیع متوازن ریسک - کاهش	(۴۱)	$REI = \frac{1}{\mu_r} \sqrt{\left( \sum_{(i,j) \in E_r} (\sigma_{ij} - \mu_r)^2 + \sum_{i \in N_{HR}} (\delta_i - \mu_r)^2 \right) /  E_r + N'_{HR} }$
مبتنی بر مسیر	میانگین تفاوت مسیر	توزیع متوازن ریسک - افزایش	(۴۲)	$ADI = \frac{DI(c)}{ c }$

گام (۱): استخراج مقادیر متغیرهای تصمیم مسأله و مقداردهی شاخص مسیر  $v = 1$

گام (۲): برای هر محموله  $c$  تکرار مراحل زیر:

- تجميع میزان کالای جابه‌جا شده  $c$  توسط ریل و جاده در طول شبکه،  $XY_{ij}^c = \sum_{y \in (1,2)} X_{ij}^{cy}$

- مقداردهی  $XY_{ij}^c$  و  $m = 1$

- تا زمانیکه  $m > 0$  تکرار مراحل زیر:

○ مقداردهی  $XP_{ij}^{cv} = 0$

○ یافتن کمترین مقدار در ماتریس  $XV$ ، یعنی  $m = \min\{XV_{ij} : XV_{ij} > 0\}$

○ یافتن یال متناظر با  $m$  یعنی  $(i', j')$  (در صورت وجود بیش از یک یال یکی به تصادف انتخاب می‌شود)

○ مقداردهی  $i'' = i'$  (جهت استفاده در حرکت روبه عقب)

○ مقداردهی متغیر متناظر با مسیر  $v$  و یال  $(i', j')$ ،  $XP_{i'j'}^{cv} = m$  و به روزرسانی  $XV_{i'j'} = XV_{i'j'} - m$

حرکت روبه جلو:

○ تا زمانیکه  $d(c) \neq j'$  تکرار مراحل زیر:

▪ یافتن یالی با کمترین مقدار خروجی از  $j'$  و یافتن گره خروجی جدید یعنی  $j''$

▪ به روزرسانی مقادیر جدید  $(i', j')$  به صورت زمانیکه  $i' = j', j' = j''$

▪ به روزرسانی مقادیر  $XP_{i'j'}^{cv} = m$  و  $XV_{i'j'} = XV_{i'j'} - m$

حرکت روبه عقب:

○  $j' = i''$

○ تا زمانیکه  $o(c) \neq j'$  تکرار مراحل زیر:

▪ یافتن یالی با کمترین مقدار ورودی به  $j'$  و یافتن گره ورودی جدید یعنی  $i'$

▪ به روزرسانی مقادیر  $XP_{i'j'}^{cv} = m$  و  $XV_{i'j'} = XV_{i'j'} - m$

▪ به روزرسانی مقدار جدید  $j'$  به صورت  $j' = i'$

○ یافتن کمترین مقدار در ماتریس  $XV$ ، یعنی  $m = \min\{XV_{ij} : XV_{ij} > 0\}$

○ اگر  $m > 0$  آنگاه افزایش شاخص مسیر یعنی  $v = v + 1$  (جهت استخراج مسیر جدید)

گام (۳): نمایش جواب‌های مسأله باتوجه به میزان کالای جابه‌جا شده  $c$  در مسیر  $v$

شکل ۲. الگوریتم شناسایی مسیرهای شبکه

مسأله مشابه با رویکردهایی است که در مقاله زی و همکاران [Xie et al., 2012] و جیانگ و همکاران [Jiang et al., 2014] استفاده شده است. برخی از داده‌ها نیز گفتنی است هدف از تولید داده‌ها در مطالعات اشاره شده نزدیکی به مسائل دنیای واقعی بوده است. در ادامه مقادیر مختلفی که برای هر کدام از پارامترهای محاسبه شده‌اند به همراه منبع مورد استفاده آورده شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق ۳ نوع ماده خطرناک با ضرایب تأثیر ۱، ۲ و ۳ در نظر گرفته شده‌اند. این ضرایب با توجه به درجه ریسک نوع ماده خطرناک تعیین می‌شوند که هر چه درجه ریسک بیشتر باشد ضریب بیشتری به آن اختصاص داده می‌شود. به عنوان مثال ضریب تأثیر پروپان بیشتر از بنزین است. جزئیات چگونگی تولید داده‌های مسأله در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول،  $\Delta S$  هزینه جابجایی هر محموله در هر کیلومتر توسط  $\mu$  است.

مثالی در مقیاس کوچک با شبکه‌ای متشکل از ۱۴ گره، ۱۰ پایانه انتقال کاندید و ۱۰ محموله در نظر گرفته شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. کلیه داده‌های مسأله براساس جدول ۲ تولید شده‌اند. در این شبکه سعی شده است کلیه حالات ممکن در نظر گرفته شود به طوری که برخی از گره‌ها تنها از طریق بزرگراه به یکدیگر ارتباط دارند (گره ۳)؛ ارتباط برخی از گره‌ها از طریق ریل صورت می‌گیرد (گره ۵) و اغلب آن‌ها هم از طریق ریل و جاده به یکدیگر متصل‌اند (گره ۹).

مثال مذکور با روش جمع‌وزنی با ضرایب برابر  $\frac{1}{3}$  برای هر تابع هدف حل شده است، پس از حل مدل از بین گره‌های کاندید، گره‌های ۹ و ۱۱ به عنوان پایانه‌های انتقال انتخاب شده‌اند. همانطور که ذکر شد ۱۰ محموله در نظر گرفته شده است که در شکل ۴، تنها مسیرهای بهینه جابجایی محموله سوم و دهم به صورت نمونه نشان داده شده است. مقصد کالای سوم و دهم به ترتیب (۱۲، ۱) و (۸، ۱۲) است. کالای سوم از یال‌های (۲، ۱)، (۳، ۲)، (۹، ۳) از طریق جاده منتقل شده و سپس در گره ۹ عملیات انتقال صورت گرفته به این معنی که کالا از کامیون به قطار منتقل شده و فرایند انتقال کالا از یال (۱۲، ۹) از طریق خطوط ریل تا رسیدن به مقصد

مفهوم تفاوت مسیر به منظور تضمین گسترش ریسک عادلانه در نظر گرفته شده است [Carotenuto et al., 2007]. چنانچه در ادبیات این حوزه دیده شده، شاخص‌های زیادی به این منظور ارائه شده‌اند. در این مقاله، شاخص میانگین تفاوت مسیر معرفی شده که نحوه محاسبه آن در رابطه (۳۳) نشان داده شده است و میانگین مقدار تفاوت بین  $(p_v^c, p_v'^c)$  از مسیرهای انتخاب شده است.  $(p_v^c, p_v'^c)$  به ترتیب نشانگر مسیر  $U$  و  $U'$  برای محموله  $c$  هستند. تفاوت بین مسیرهای  $p_v^c$  و  $p_v'^c$  در هر محموله به صورت  $D(p_v^c, p_v'^c) = 1 - S(p_v^c, p_v'^c)$  تعریف شده که  $S(p_v^c, p_v'^c)$  تشابه بین دو مسیر است. در این تحقیق، تعریف تشابه بین دو مسیر  $p_v^c$  و  $p_v'^c$  برگرفته از مقاله ارکات و ورتر است که آن‌ها تشابه را به عنوان تابعی از طول مشترک یال‌ها بین دو مسیر اندازه‌گیری نمودند [Erkut and Verter, 1998]. با این حال، در این پژوهش طول مشترک یال‌ها به صورت ریسک مشترک یال‌ها و پایانه‌های انتقال محاسبه می‌شوند و از شاخص تشابه  $L(A \cap B)/L(A \cup B)$  (اشتراک ریسک مسیرها تقسیم بر اجتماع آن‌ها) استفاده شده است؛  $K'$  تعداد مسیرها در هر محموله و  $P^c$  مجموعه‌ی کلیه مسیرهای کالای  $c$  است. در رابطه (۴۹)، مقدار  $DI(c)$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$DI(c) = \frac{\left( \sum_{p_v^c, p_v'^c \in P^c} D(p_v^c, p_v'^c) \right)}{(K'(K' - 1)/2)}, \forall c \in C \quad (49)$$

## ۶. نتایج محاسباتی

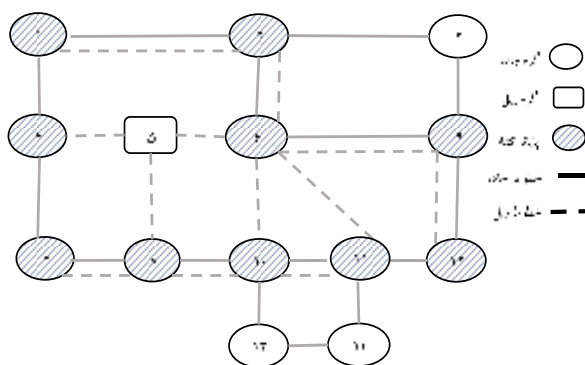
مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS و حل‌کننده CPLEX توسط رایانه‌ای با مشخصات سخت‌افزاری پردازنده مرکزی Intel(R) Core(TM) i5، ۳/۲ گیگا هرترزی و حافظه ۴ گیگابایت اجرا شده و مسائل نمونه زیادی در ابعاد مختلف بر مبنای تعداد گره و محموله حل شده‌اند. از آنجاکه در ادبیات موضوع، مسائل نمونه‌ی مشابهی که بتوان از آن‌ها به عنوان الگو در آزمایشات استفاده نمود وجود ندارد؛ در این تحقیق به تولید نمونه‌های تصادفی برای مسأله در ابعاد مختلف پرداخته شد. با این حال، نحوه تولید داده‌های

علاوه بر مثال فوق، ۴ مسأله نمونه در ابعاد ۴۰ و ۶۰ گرهی و ۲۰ و ۱۰۰ کالایی با روش محدودیت اپسیلون بهبود یافته با نقاط شبکه  $\tau_1, \tau_2 = \{11, 21, 31\}$  حل شده است و جواب های بهینه پارتویی و مقادیر شاخص‌هایی که قبلاً ذکر شد در جدول ۴ نشان داده شده است.

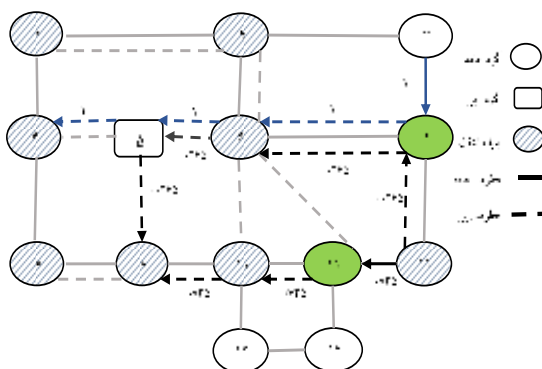
صورت گرفته است. همچنین در محموله دهم بخشی از کالا (۰/۱۴۹) از طریق خطوط ریلی (۱۲,۹) و بخشی دیگر (۰/۸۵۱) از طریق خطوط جاده‌ای (۱۲,۱۱) انتقال یافته و در گره ۱۱ بخشی از کالا (۰/۶۶۵) از طریق جاده و بخشی دیگر (۰/۱۸۶) از طریق ریل جابجا شده و این گره به عنوان پایانه انتقال کاندید انتخاب می‌شود و مقدار محموله عبوری از این پایانه برابر ۰/۱۸۶ است.

جدول ۳. جزئیات چگونگی تولید داده‌های مسأله

پارامتر	مقدار	مرجع	پارامتر	مقدار	مرجع
$e_i$	[۵۲۳۰۰۰, ۹۹۸۰۰۰]	[Jiang et al., 2014]	$d_{ij}^1$	[۵۰, ۳۰۰]	[Jiang et al., 2014]
$\delta_i$	$[۳۰\%, ۵۰\%] \times \sum_{c \in C} n^c$	فرضی	$d_{ij}^2$	$[۰/۸, ۱/۸] \times d_{ij}^1$	فرضی
$\gamma_{ij}^y$	$[۳۰\%, ۵۰\%] \times \sum_{c \in C} n^c$	فرضی	$l_{ij}^y$	$S^y \times d_{ij}^y \times rm^c$	فرضی
$n^c$	[۱۰, ۲۰۰]	فرضی	$pro_i$	[۰/۰۰۰۱۷, ۰/۰۰۰۷۵]	[Jiang et al., 2014]
$S^1$	۱/۰۷	[Forkenbrock, 2001]	$b$	$۰/۳ N_{HR}  \times Av(e_i)$	فرضی
$S^2$	۰/۲۴	[Torrey et al., 2014]	$pop_{ij}$	[۱۰۰۰۰, ۷۰۰۰۰۰]	فرضی
$a^1$	۰/۰۰۰۰۰۰۶۲	[Xie et al., 2012]	$pop_u$	[۱۵۰۰۰۰, ۱۰۰۰۰۰۰]	فرضی
$a^2$	۰/۰۰۰۰۰۰۱۹	[Xie et al., 2012]	$\delta_i$	[۹-۱۱]	فرضی



شکل ۳. نمونه‌ای از شبکه مورد مطالعه



شکل ۴. مسیرهای بهینه جابجایی محموله‌های ۴ و ۱۰



## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

موضوع استفاده بیشتر از خطوط شبکه در صورت جابجایی تعداد محموله‌های بیشتر است. چنانچه قبلاً ذکر شد هرچه این شاخص‌ها کمتر باشد، نشان‌دهنده توزیع ریسک مناسب‌تری است. یکی دیگر از شاخص‌ها که بررسی آن قابل توجه است، شاخص تفاوت مسیر است که با افزایش محموله مقدار آن نیز کاهش یافته و در واقع بدتر می‌شود. دلیل این موضوع نیز وجود یال‌های مشترک بیشتر در مسیرها در صورت جابجایی محموله‌های بیشتر است.

### ۷. عملکرد مدل ارائه شده در توزیع متوازن

#### ریسک و مقایسه با سایر مدل‌ها

یکی دیگر از تحلیل‌های صورت گرفته، بررسی عملکرد مدل از لحاظ شاخص‌های مختلف بالاخص شاخص‌های توزیع متوازن ریسک و مقایسه آن با مدل‌های دیگر مسئله تحت شرایط و مفروضات دیگر است. نتایج محاسبات مربوطه در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جداول،  $m1$  تا  $m5$  نوع مدل را باتوجه به اهداف مختلف نشان داده و به صورت زیر تعریف شده‌اند:

•  $m1$ : مدل مسئله با کمینه‌سازی مجموع هزینه، بیشینه

ریسک یال و بیشینه ریسک پایانه انتقال، هر کدام با

ضرایب برابر  $\frac{1}{3}$ ؛

•  $m2$ : مدل تک‌هدفه با کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های

حمل و نقل؛

•  $m3$ : مدل تک‌هدفه با کمینه‌سازی بیشینه ریسک یال؛

•  $m4$ : یکی از جواب‌های بهینه پارتویی از روش

محدودیت اپسیلون بهبود یافته براساس کمترین مقدار EI

؛

•  $m5$ : مدل تک‌هدفه با کمینه‌سازی مجموع ریسک یال‌ها.

همانطوریکه انتظار می‌رود در کلیه نمونه‌های حل شده،

مدل  $m2$  با توجه به تابع هدف آن دارای مقدار هزینه کمتری

نسبت به سایر مدل‌ها است. این در حالی است که این مقدار

در مدل  $m3$  بسیار بیشتر بوده و در برخی موارد دوبرابر مقدار

بهینه مدل  $m2$  است. تابع هدف مدل سوم به کمینه‌سازی

بیشینه ریسک یال می‌پردازد؛ بنابراین، انتظار می‌رود مقدار این

قابل ذکر است به واسطه پیوسته در نظر گرفتن مقادیر متغیرهای جریان شبکه، تعداد جواب‌های بهینه پارتویی در این مسأله بسیار زیاد بوده و انتخاب یکی از این جواب‌ها یکی از چالش‌های اساسی برای تصمیم‌گیرنده است. در صورتی که نحوه توزیع ریسک دغدغه‌ی اصلی مقامات محلی و تصمیم‌گیرندگان باشد، شاخص‌های توزیع ریسک می‌توانند کمک شایانی در راستای انتخاب جواب مطلوب نماید.

نتایج محاسباتی نشان داد با افزایش تعداد نقاط شبکه، تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتویی تولید شده افزایش خواهد یافت و این موضوع برای زمان حل نیز صادق است. به عنوان مثال، در صورتی که در مسأله نمونه ۲۰-۴۰ که متشکل از ۴۰

گره و ۲۰ محموله است، تعداد ۱۱ نقطه مرزی (مقادیر  $E_2, E_3$  در محدودیت‌های دوم و سوم) در نظر گرفته شود، آنگاه بایستی ۱۲۱ مسأله با استفاده از رویکرد محدودیت اپسیلون حل گردد. با این حال همانطوریکه قبلاً نیز بدان پرداخته شد، به علت تولید جواب‌های بهینه‌ی پارتویی تکراری، پرش‌هایی ممکن است بین مقادیر مختلف  $E_2$  اتفاق بیفتد که نیازی به حل مسأله نباشد. به همین دلیل تعداد مدل‌های حل شده برابر با ۸۹ شده است. از بین این تعداد جواب یافته شده ۴ مورد بهینه پارتویی نبوده و بقیه کلاً بهینه پارتویی هستند. حال در صورت افزایش نقاط شبکه (مرزی) به ۲۱ مورد در هر تابع هدف، بایستی ۴۴۱ مسأله حل شود. در این حالت نیز تعداد مدل حل شده ۳۰۶ و جواب‌های بهینه‌ی پارتویی ۲۹۴ مورد بوده است. بدیهی است با افزایش تعداد مدل‌های حل شده زمان حل الگوریتم نیز به تناسب تعداد مدل‌ها افزایش خواهند یافت.

علاوه بر آمارهای مرتبط با تعداد مدل‌های حل شده و جواب‌های بهینه‌ی پارتویی محاسبه شده، مقادیر شاخص‌ها برای کلیه جواب‌های بهینه‌ی پارتویی محاسبه شدند. با این حال از آنجاکه نمایش این شاخص‌ها برای کلیه راه‌حل‌های بهینه مقدور نبوده، متوسط این شاخص‌ها در هریک از داده‌ها نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود، افزایش نقاط شبکه تأثیر چندانی بر روی مقادیر شاخص‌ها نخواهند گذاشت. با این حال با افزایش تعداد محموله‌ها در یک شبکه مفروض (مثلاً ۴۰ گرهی) از ۲۰ به ۱۰۰ مقادیر شاخص‌های توزیع ریسک (EI, REI) دارای روند افزایشی است. دلیل این

## عبدالسلام قادری، مہدیہ معقولی

از آنجاکہ هدف مسئلہ مورد مطالعہ، توزیع متوازن ریسک است، بنابراین عملکرد مدل ارائه شدہ در این مقالہ بایستی براساس سه شاخص  $EI$ ،  $REI$  و  $ADI$  نسبت بہ مدل‌های دیگر سنجیدہ شود. بہ این منظور نتایج بہترین جواب بہینہ‌ی پارتویی کہ مقدار  $EI$  آن از بقیہ کمتر است در جدول ۵ و تحت عنوان مدل  $m4$  نشان دادہ شدہ است.

شاخص در این مدل نیز بہ مراتب وضعیت مناسب تری نسبت بہ سایر مدل‌ها داشتہ باشد. نمونہ دیگر مقایسہ مدل پنجم و سایر مدل‌ها است. در این مدل، کمینہ‌سازی مجموع ریسک کل یال‌ها مدنظر است بنابراین مقدار این شاخص نسبت بہ سایر مدل‌ها بسیار کمتر است.

جدول ۴. نتایج محاسباتی برای مسائل نمونہ حل شدہ

تعداد محمولہ- گرہ	نقاط شبکه	تعداد مدل حل شدہ	تعداد جواب بہتہ پارتویی	میانگین هزینه	میانگین ریسک یال	$EI$	$REI$	میانگین ریسک کل یال	میانگین ریسک کل	$AvgDI$	زمان حل (ثانیہ)
۴۰-۲۰	۱۱	۸۹	۸۵	۱۴۳۲۰۱۸.۹	۶۱۷۴۸.۷	۰.۰۷۷	۰.۰۵۹	۳۵۶۹۲.۰۲	۱۲۰۰۷۰۲.۱	۰.۱۳۵	۴۴۲
	۲۱	۳۰۶	۲۹۴	۱۴۱۷۲۲۲.۰	۶۰۵۹۲.۰	۰.۰۷۳	۰.۰۵۶	۳۵۴۳۰.۸۸	۱۱۷۰۵۱۹.۴	۰.۱۴۳	۱۶۰۷
	۳۱	۶۵۰	۶۲۲	۱۴۱۷۳۶۵.۹	۵۹۷۵۳.۷	۰.۰۷۲	۰.۰۵۵	۳۵۴۳۱۸.۶	۱۱۶۱۲۵۹.۸	۰.۱۴۳	۴۱۳۲
۴۰-۱۰۰	۱۱	۸۴	۷۸	۵۵۳۵۸۳۳.۲	۱۷۶۸۵۸.۸	۰.۱۶۲	۰.۱۲۷	۱۴۳۱۹۷۲.۹	۳۸۶۴۱۷۷.۱	۰.۰۴۴	۵۷۰۵
	۲۱	۲۹۵	۲۶۶	۵۵۱۴۸۱۳.۲	۱۶۹۰۰۸.۹	۰.۱۵۹	۰.۱۲۵	۱۴۲۲۷۱۷.۷	۳۸۵۸۷۷۹.۸	۰.۰۴۶	۲۱۸۳۲
	۳۱	۶۳۸	۵۷۴	۵۵۱۹۲۵۹.۰	۱۶۹۱۶۱.۶	۰.۱۵۷	۰.۱۲۳	۱۴۲۵۰۷۵.۰	۳۸۴۴۶۳۷.۹	۰.۰۴۶	۴۶۴۰۹
۶۰-۲۰	۱۱	۱۱۹	۱۱۹	۷۰۲۵۹۵.۸	۲۱۱۷۷.۱	۰.۰۱۱	۰.۰۰۵	۱۸۵۷۱۷.۱	۲۶۲۹۰.۹۱	۰.۱۴۴	۴۱۶
	۲۱	۴۳۶	۴۳۶	۶۹۷۷۷۵.۸	۲۱۱۹۳.۲	۰.۰۱۱	۰.۰۰۵	۱۸۶۷۷۹.۶	۲۶۲۸۹۷.۵	۰.۱۴۹	۱۵۲۴
	۳۱	۹۵۳	۹۵۳	۶۹۶۲۹۱.۲	۲۱۱۹۹.۷	۰.۰۱۱	۰.۰۰۵	۱۸۴۵۱۶.۰	۲۶۲۷۶۶.۰	۰.۱۵۰	۳۴۶۹
۶۰-۱۰۰	۱۱	۹۷	۸۶	۳۰۳۹۷۶۷.۰	۴۶۵۵۵.۸	۰.۰۹۴	۰.۰۶۸	۷۰۸۸۰۰.۲	۱۲۵۴۷۹۰.۲	۰.۰۲۶	۴۹۷۳
	۲۱	۳۲۶	۳۰۱	۳۰۲۸۶۹۵.۸	۴۵۷۶۹.۹	۰.۰۹۲	۰.۰۶۷	۷۰۷۳۵۷.۳	۱۲۴۳۴۷۳.۰	۰.۰۲۴	۱۴۸۷۲
	۳۱	۶۹۰	۶۴۰	۳۰۲۹۲۳۵.۹	۴۵۱۵۳.۷۲	۰.۰۹۳	۰.۰۶۷	۷۰۷۳۲۰.۳۵	۱۲۴۵۶۷۲.۸	۰.۰۲۴	۲۳۶۵

جدول ۵. نتایج محاسباتی حالات مختلف مدل برای مسائل نمونہ ۴۰-۲۰ و ۱۰۰؛ و ۶۰-۲۰ و ۱۰۰

تعداد محمولہ- گرہ	مدل	شاخص‌ها						مسیر میانگین تفاوت مسیر	زمان حل (ثانیہ)
		عمومی		یال-یابانه انتقال					
		ریسک کل	هزینه	ریسک کل یال	بیشینه ریسک یال	EI	REI		
۴۰-۲۰	m1	۱۰۷۹۱۳۳.۷	۱۲۹۳۸۴۹.۲	۳۵۰۷۰۴.۶	۸۹۵۷۴.۶	۰.۰۵۵	۰.۰۴۱	۰.۱۰۴	۷۰۰
	m2	۱۶۹۲۷۲۳.۸	۱۱۷۹۱۸۱.۶	۳۰۴۳۶۱.۷	۸۰۵۱۶.۰	۰.۱۴۴	۰.۱۱۶	۰.۰۶۴	۴۰۰
	m3	۱۶۴۵۹۲۳.۴	۲۳۰۷۵۲۱.۸	۵۴۶۲۵۴.۴	۲۲۱۹۱.۰	۰.۰۷۱	۰.۰۶۱	۰.۲۰۶	۴۰۰
	m4	۷۵۳۸۴۲.۹	۱۷۸۷۳۶۰.۹	۴۱۷۶۵۲.۴	۴۱۵۵۰.۵	۰.۰۲۴	۰.۰۱۵	۰.۲۱۶	۴۴۲
	m5	۱۶۹۰۴۵۴.۶	۱۲۳۱۰۱۸.۸	۲۹۲۳۸۷.۲	۷۲۱۱۶.۸	۰.۱۴۲	۰.۱۱۰	۰.۱۰۱	۷۰۰
۴۰-۱۰۰	m1	۴۲۳۳۵۸.۹	۴۸۶۴۹۷۷.۲	۱۳۰۷۸۴۶.۷	۲۱۳۶۸۳.۸	۰.۱۶۶	۰.۱۳۰	۰.۰۳۳	۱۹۰۰
	m2	۴۶۲۴۶۴۸.۵	۴۶۲۹۷۸۰.۰	۱۲۶۲۱۴۴.۱	۲۱۳۶۸۳.۸	۰.۲۲۹	۰.۱۸۴	۰.۰۱۸	۳۲۰۰
	m3	۶۸۲۵۹۲۵.۳	۸۹۸۱۴۴۲.۰	۲۰۸۴۵۴۵.۸	۶۵۷۵۲.۴	۰.۲۳۷	۰.۲۰۴	۰.۰۳۶	۶۰۰۰
	m4	۲۳۷۳۴۸۴.۸	۶۸۶۸۹۳۵.۷	۱۷۳۵۰۰۸.۳	۱۷۸۰۹۰.۲	۰.۰۸۶	۰.۰۵۷	۰.۰۴۹	۵۷۰۵
	m5	۶۶۱۴۸۸۵.۲	۵۱۷۵۸۷۸.۳	۱۱۴۴۲۳۷.۵	۱۸۶۵۶۳.۶	۰.۵۳۵	۰.۴۲۲	۰.۰۳۵	۵۹۰۰
۶۰-۲۰	m1	۲۰۰۶۴۶.۷	۶۵۲۲۷۶.۶	۱۸۲۵۵۵.۶	۲۳۵۰۲.۶	۰.۰۱۱	۰.۰۰۵	۰.۱۶۸	۵۰۰
	m2	۲۷۰۲۱۸.۲	۶۴۸۴۸۶.۴	۱۷۲۵۲۴.۲	۲۳۵۰۲.۶	۰.۰۱۴	۰.۰۰۶	۰.۱۲۶	۴۰۰
	m3	۱۰۲۳۵۶۷.۶	۲۶۷۱۹۷۹.۲	۶۳۸۰۴۶.۰	۱۸۹۲۶.۲	۰.۰۳۳	۰.۰۲۵	۰.۲۰۶	۷۰۰
	m4	۲۶۴۶۳.۷	۶۹۹۴۴۴.۷	۱۸۶۶۲۱.۴	۲۰۷۵۶.۸	۰.۰۱	۰.۰۰۴	۰.۱۷۶	۴۱۶
	m5	۷۹۴۸۹۱.۴	۷۵۲۴۸۸.۴	۱۴۷۷۲۵.۱	۲۳۵۰۲.۶	۰.۱۱۷	۰.۰۷۶	۰.۰۵۹	۴۰۰
۶۰-۱۰۰	m1	۹۸۴۸۳۸.۹	۲۸۶۷۶۸.۵	۶۸۹۱۴۰.۷	۶۰۰۳۸.۹	۰.۰۳۶	۰.۰۲۰	۰.۰۰۷	۱۵۰۰
	m2	۱۲۱۲۶۹۵.۸	۲۸۵۰۵۴۸.۸	۶۵۹۴۷۶.۶	۶۲۶۰۵.۷	۰.۰۶۴	۰.۰۴۱	۰.۰۰۰	۱۳۰۰
	m3	۳۷۵۷۹۳۵.۵	۶۶۴۲۲.۰۵۵	۱۴۰۸۲۴۷.۲	۲۵۹۳۲.۸	۰.۲۳۶	۰.۲۱۷	۰.۰۹۶	۵۹۰۰
	m4	۹۷۴۰۳۳.۴	۲۹۸۴۶۰.۴۲	۷۲۷۵۳۷.۶	۴۱۰۴۵.۳	۰.۰۲۸	۰.۰۱۵	۰.۰۵۶	۴۹۷۳
	m5	۳۰۳۹۹۵۵.۹	۳۲۰۹۲۴۴.۹	۵۹۱۱۷۲.۳	۴۱۰۶۸.۶	۰.۳۴۴	۰.۲۶۵	۰.۰۰۰	۱۵۰۰

## مسأله مکان‌یابی پایانه‌های انتقال و مسیریابی مواد خطرناک

در تحقیق حاضر، به مطالعه و بررسی مسأله مکان‌یابی-مسیریابی مواد خطرناک توسط حمل و نقل چند-وجهی ریل - جاده با در نظر گرفتن ملاحظات هزینه‌های جابجایی و توزیع عادلانه ریسک در طول شبکه به طور همزمان پرداخته شد. به این منظور یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه شد و با کمک تکنیک‌های مرسوم، خطی‌سازی آن صورت گرفت. در اهداف بررسی شده مدل، جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی (توزیع متوازن ریسک) جابجایی محموله‌های خطرناک در نظر گرفته شده به نحوی که کمینه‌سازی هزینه جابجایی و کمینه‌سازی بیشترین ریسک خطوط و یال‌های شبکه در نظر گرفته شدند. نتایج محاسباتی صورت گرفته نشان داد که دسترسی به جواب‌های بهینه پارتویی مسأله با استفاده از رویکرد محدودیت اسپیلون بهبودیافته و بهره‌گیری از حل‌کننده CPLEX در ابعاد مختلف در زمان کوتاه امکان‌پذیر است. از طرفی مسأله مورد مطالعه دارای تعداد بسیار زیادی بهینه‌های پارتویی است و از آنجایی که انتخاب بهترین جواب از میان جواب‌های بهینه پارتویی برای تصمیم‌گیرنده مشکل است، یکسری شاخص عملکردی برای انتخاب جواب مناسب‌تر معرفی و ارائه شده است. به علاوه، وضعیت عملکردی مدل پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های توزیع ریسک با مدل‌های تک‌هدفه مقایسه شده است. از بین شاخص‌های معرفی شده، سه شاخص EI، REI و ADI، نحوه‌ی توزیع ریسک بین خطوط شبکه را نشان می‌دهند که مقایسه مقادیر این شاخص‌ها در مدل‌های مختلف، نشان‌دهنده تفاوت نسبتاً زیاد جواب بهینه پارتویی حاصل از مدل ارائه شده نسبت به سایر مدل‌ها است. بنابراین نتایج شاخص‌ها نشان داد، مدل ارائه شده علاوه بر کمینه‌سازی ریسک منجر به توزیع متوازن ریسک ناشی از جابجایی محموله‌های خطرناک بین افراد ساکن شده در اطراف شبکه خواهد گردید. به منظور مطالعه بیشتر مسأله، در نظرگیری مباحثی نظیر ناوگان حمل و نقل جاده‌ای و ریلی، بلاک‌بندی در حوزه حمل و نقل ریلی، تأخیر در پایانه‌های انتقال، عدم قطعیت ورودی‌های

مقایسه مقادیر شاخص‌های EI و REI در مدل‌های مختلف نشان‌دهنده تفاوت نسبتاً زیاد جواب بهینه پارتویی حاصل از مدل ارائه شده نسبت به سایر مدل‌ها است. این در حالی است که در واقع کمینه‌سازی این شاخص توسط مدل صورت نگرفته و سه هدف دیگر توسط مدل بهینه می‌گردند. با این حال، نوع توابع هدف در نظر گرفته شده که کمینه‌سازی بیشینه ریسک خطوط و پایانه‌های انتقال شبکه‌اند، منجر به توزیع ریسک متوازن خواهد گردید. علاوه بر این، نتایج مدل‌ها می‌تواند با مقادیر متوسط شاخص‌ها در کل جواب‌های بهینه پارتویی مقایسه شود (جدول ۳) که بازهم در کل وضعیت مدل ارائه شده از سایر مدل‌ها بهتر است. مدل‌های دیگر که عملکرد نزدیک‌تری نسبت به مدل ارائه شده دارند، مدل‌های m1 و m3 هستند. مدل m1 در واقع همان مدل ارائه شده است و با توجه به اهمیت یکسان توابع هدف ۱ الی ۳ نتایج محاسبه شده‌اند. در ارتباط با مدل m3، فقط تابع هدف دوم مطالعه شده و سایر توابع نادیده گرفته شده‌اند. بنابراین این موضوع نیز منجر به جواب‌هایی با هزینه بسیار بیشتر خواهند گردید که در جداول نیز قابل مشاهده است.

شاخص دیگر مرتبط با توزیع متوازن ریسک، میانگین تفاوت مسیر است. مقدار بیشتر این شاخص نشانگر بهره‌گیری از مسیرهای متفاوت‌تر جهت جابجایی محموله‌های مواد خطرناک است. مقدار این شاخص نیز در مدل ارائه شده برای کلیه مسائل نمونه نسبت به سایر مدل‌ها به غیر از m3 به مراتب مقدار بیشتری دارد. در مقایسه با m3 جواب بهینه پارتویی آورده شده در ۳ نمونه دارای مقدار بیشتری بوده و در سه مورد مقدار آن کمتر است. دلیل این موضوع نیز به انتخاب جواب بهینه پارتویی برمی‌گردد که براساس کمترین مقدار EI انتخاب شده و نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شد. علاوه بر این نتایج اخذ شده از مدل سوم که با توجه به تابع هدف کمینه‌سازی بیشینه محاسبه شده است نشان می‌دهد استفاده از این نوع تابع هدف در مسأله منجر به توزیع متوازن ریسک خواهد گردید. بنابراین، استفاده از آن در مدل ارائه شده به عنوان یکی از توابع هدف که منجر به توزیع متوازن ریسک خواهد شد، توجیه‌پذیر خواهد بود.

## ۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

-توکلی مقدم، ر.، علینقیان، م.، نوروزی، ن. و سلامت بخش، ع. (۱۳۹۰) «حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۲، شماره ۳، ص. ۲۳۷-۲۲۳.

-صفارزاده، م.، ابریشمی، ا. و حسن پور، س. (۱۳۹۴) «ارزیابی مسیرهای حمل مواد خطرناک مبتنی بر ریسک-مطالعه موردی مسیرهای تهران-مازندران»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۱، صفحه ۷۳-۸۶.

-جلیلی بال، الف.، توکلی مقدم، ر. و جوانشیر، ح. (۱۳۹۵) «ارزیابی مسیرهای حمل مواد خطرناک مبتنی بر ریسک-مطالعه موردی مسیرهای تهران-مازندران»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، در انتظار انتشار.

-FICO Xpress Team (2009) "MIP formulations and linearizations", Xpress Optimization Suite, Reference manual.

-Forkenbrock, D. J. (2001) "Comparison of external costs of rail and truck freight transportation", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 35, No. 4, pp. 321-337.

-Gopalan, R., Kolluri, K.S., Batta, R. and Karwan, M. H. (1990) "Modeling equity of risk in the transportation of hazardous materials", Operations Research, Vol. 38, No. 6, pp. 961-973.

-Jacobs, T. L. and Warmerdam, J. M. (1994) "Simultaneous routing and siting for hazardous-waste operations", Journal of Urban Planning and Development, Vol. 120, No. 3, pp. 115-131.

-Jiang, Y., Zhang, X., Rong, Y. and Zhang, Z. (2014) "A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation based on multi-commodity flow model", Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 138, pp. 791-799.

-Kang, Y., Batta, R. and Kwon, C. (2014) "Generalized route planning model for hazardous material transportation with var and equity considerations", Computers and Operations Research, Vol. 43, pp. 237-247.

مسأله، قابلیت اطمینان خطوط می تواند مدنظر محققان این حوزه قرار گیرد.

## ۹. پی نوشتها

1. Carriers
2. Shippers
3. Regional authority
4. Local authority
5. Karush-Kuhn-Tucker (KKT)
6. Value-at-Risk (VaR)
7. Ideal Point
8. Nadir Points
9. Payoff table

## ۱۰. مراجع

-Ardjmand, E., Weckman, G., Park, N. Taherkhani H. and Singh, M. (2015) "Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials", International Journal of Production Research, Vol. 53, No. 3, pp. 916-928.

-Bianco, L., Caramia, M. and Giordani, S. (2009) "A bilevel flow model for hazmat transportation network design", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 17, No. 2, pp. 175-196.

-Cappanera, P., Gallo, G. and Maffioli, F. (2003) "Discrete facility location and routing of obnoxious activities", Discrete Applied Mathematics, Vol. 133, No. 1, pp. 3-28.

-Carotenuto, P., Giordani, S. and Ricciardelli, S. (2007) "Finding minimum and equitable risk routes for hazmat shipments", Computers and Operations Research, Vol. 34, No. 5, pp. 1304-1327.

-Current, J. and Ratick, S. (1995) "A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials", Location Science, Vol. 3, No. 3, pp. 187-201.

-Erkut, E. and Verter, V. (1998) "Modeling of transport risk for hazardous materials", Operations Research, Vol. 46, No. 5, pp. 625-642.

-Verma, M. (2009) "A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials", *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, Vol. 14, No. 5, pp. 300-308.

-Xie, Y., Lu, W., Wang, W. and Quadrioglio L. (2012) "A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 227, pp. 135-141.

-Mavrotas, G. (2009) "Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 213, No. 2, pp. 455-465.

-Mavrotas, G. and Florios, K. (2013) "An improved version of the augmented  $\epsilon$ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 219, No. 18, pp. 9652-9669.

-Samanlioglu, F. (2013) "A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 226, No. 2, pp. 332-340.

-Stowers, C. L. and Palekar, U. S. (1993) "Location models with routing considerations for a single obnoxious facility", *Transportation Science*, Vol. 27, No. 4, pp. 350-362.

-Torrey, W. Ford and Murray, D. (2014) "An analysis of the operational costs of trucking: , Arlington. Virginia, American Institute of Transportation Engineering.

## عبدالسلام قادری، مهدیه معقولی

عبدالسلام قادری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه کردستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه‌سازی و طراحی شبکه زنجیره تأمین بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه کردستان است.



مهدیه معقولی، درجه کارشناسی در رشته صنایع را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه صنعتی مازندران (بابل) و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه کردستان اخذ نمود.

