

مقاله پژوهشی

یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن ملاحظات امداد رسانی

رخساره ترابی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

آرمین جبارزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محسن یحیایی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: arminj@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹

چکیده

امروزه حمل و نقل مواد خطرناک (هزمت) و امداد رسانی در زمان حادثه ناشی از آن، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله مدلی دو سطحی برای طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک ارائه شده است. سطح اول مدل دو سطحی ارائه شده مقامات نظارتی (دولت) هستند و به دنبال مکان یابی ایستگاه های امداد رسانی از بین مکان های کاندید، خرید تجهیزات این ایستگاه ها با در نظر گرفتن بودجه در دسترس، احداث مسیرهایی در شبکه برای عبور جریان کالاهای خطرناک و حداکثر سازی میزان پوشش مسیرها در صورت وقوع حادثه هستند. سطح دوم آن شرکت های حمل کننده مواد خطرناک هستند و به دنبال حداقل سازی هزینه های حمل و نقل خود با توجه به مسیرهای احداث شده از جانب دولت هستند. با در نظر گرفتن شرایط بهینگی، مدل دو سطحی با روش کوهن - تاکر (KKT) به تک سطحی تبدیل شده است. در بخش نتایج محاسباتی، مدل ارائه شده از جنبه های مختلف و متعددی مورد بحث و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله نتایج حاصل شده تاثیر گذاری مثبت میزان بودجه و همچنین سطح ریسک پذیری بر روی توانمندی امداد رسانی و پوشش در شبکه است.

واژه های کلیدی: ایستگاه امداد رسانی، طراحی شبکه، بهینه سازی دو سطحی، حمل و نقل مواد خطرناک

۱. مقدمه

دپارتمان حمل و نقل امریکا، مواد خطرناک (هزمت)^۱ را هر موادی معرفی می‌کند که برای افراد، اموال و محیط زیست مضر باشد. بر همین اساس، سازمان ملل متحد مواد خطرناک را بر اساس ویژگی آن‌ها به ۹ گروه تقسیم می‌کند: مواد منفجره و تجهیزات آتش‌بازی، گازها، مایعات قابل احتراق و اشتعال، جامدات قابل احتراق و اشتعال و جامداتی که هنگام رطوبت خطرناک هستند، اکسیدکننده‌ها و پراکسیدهای آلی، مواد سمی و عفونی، مواد رادیو اکتیو، مواد خورنده مانند اسید و کالاهای خطرناک متفرقه. مواد خطرناک کاربرد بسیاری در صنعت و زندگی روزمره افراد دارند، بنابراین می‌توانند برای محیط زیست و انسانها ضرر قابل توجهی داشته باشند. این مواد برای سلامتی انسان و محیط زیست بسیار مضر هستند و محتویات سمی آنان می‌تواند باعث صدمه و یا نابودی گیاهان، حیوانات و انسان شود [United Nations, 2009].

اگرچه مواد خطرناک برای محیط زیست و انسان‌ها مضر هستند اما برای توسعه صنعتی بسیار ضروری هستند. از جمله موارد عمده مصرف مواد خطرناک می‌توان به سوخت رسانی وسایل نقلیه، گرمایش مناطق مسکونی، تولید، کشاورزی، معدن و پزشکی اشاره کرد. اگرچه حوادث مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک با احتمال کمی رخ می‌دهند ولی در صورت وقوع، صدمات جبران‌ناپذیری از جمله خسارات جانی و مرگ و میر، آلودگی‌ها و آسیب‌های زیست محیطی و مشکلات اقتصادی را به همراه دارند [United Nations, 2009]. بر همین اساس و با توجه به اهمیت این موضوع، امروزه برنامه ریزی حمل و نقل مواد خطرناک مورد توجه واقع شده است و تحقیقات زیادی در این حوزه انجام پذیرفته است که تمرکز اصلی اغلب این پژوهشها طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک بوده است. از جمله این تحقیقات، می‌توان به مقاله کارا و ورترا اشاره نمود [Kara and Verter, 2004]. ایشان مدلی دو سطحی

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

ارائه کردند که رهبر به دنبال حداقل سازی ریسک حمل و نقل مواد خطرناک و پیرو به دنبال حداقل سازی هزینه های خود است. برای حل آن از رویکرد KKT استفاده کرده اند.

در این مقاله یک مدل برنامه ریزی دو سطحی جدید برای طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک توسعه یافته است تا با در نظر گرفتن این ملاحظات کاربردی بتواند مدلی را ارائه نماید که شرایط واقعی‌تری را مورد نظر قرار دهد. از جمله این ملاحظات در نظر گرفتن برنامه عملیاتی برای پاسخ دهی به یک بحران احتمالی است که پاسخ دهی به این بحران نیز براساس مفاهیم پوشش تدریجی مد نظر قرار گرفته است. علاوه بر آن محدودیت های مختلفی نظیر محدودیت بودجه در دسترس برای احداث ایستگاه های امدادرسانی، احداث مسیرها و خرید تجهیزات ضروری ایستگاه ها در نظر گرفته شده است. با توجه به این واقعیت که افراد و سازمان های دخیل در شبکه مواد خطرناک، ساختار تصمیم خاص خود را دارا هستند، در این مقاله از رویکرد دوسطحی برای مدلسازی این مساله استفاده شده است. تصمیم گیرنده سطح اول رهبر (دولت) هست و درباره طراحی شبکه مواد خطرناک، مکانیابی ایستگاه های امداد رسانی و میزان تجهیزات تخصیص داده شده به محل حادثه تصمیم گیری می‌کند. شرکت های حمل کننده، تصمیم گیرندگان سطح دوم هستند و درباره میزان کالاهای خطرناک حمل و نقل شده تصمیم گیری می‌کنند. نهایتاً، برای حل مساله دوسطحی و تبدیل آن به مساله تک سطحی، از رویکرد کاروش کاهن تاکر (KKT) بهره گرفته شده است.

ممکن است در حین انتقال مواد خطرناک حادثه ای رخ دهد (به عنوان مثال فاجعه انفجار قطار نیشابور) که در اثر آن افرادی دچار آسیب شده و نیازمند امدادرسانی باشند که در این تحقیق از مدل پوشش جزئی برای پاسخ به این حادثه استفاده شده است. البته شایان ذکر است که تحقیقاتی این مبحث استفاده از پوشش را مورد بررسی قرار دادند (به عنوان مثال [Berman et al. 2007, Xu et al. 2013, Hamouda 2004, Rezaei

[Ehsan, 2012] که حاکی از مهم بودن این ملاحظه است. اما تاکنون ملاحظه در شرایطی که تصمیم گیرندگان متعددی مد نظر قرار باشند (دو سطحی)، مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین نوآوری اصلی ما در این مقاله ارائه مدلی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن مکانیابی ایستگاه های امداد رسانی با هدف حداکثر سازی پوشش مسیرهای تردد در شبکه می باشد. منظور از پوشش مسیرها، میزان پاسخ گویی و امداد رسانی به جمعیتی آسیب دیده از حوادث از جنس حمل مواد خطرناک میباشد. البته شایان ذکر است که بر خلاف تابع پوششی متداول که پوشش یک نقطه را مد نظر قرار می دهند، در این تحقیق پوشش یال مد نظر قرار گرفته است که از دیگر نوآوری های این تحقیق به شمار می رود.

این مقاله به صورت زیر ساختار یافته است: مروری بر مقالات مرتبط با حوزه حمل و نقل مواد خطرناک در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ ضمن تعریف مساله، پارامترها، متغیرها و در نهایت فرمول نویسی مدل ارائه شده است. در بخش ۴، روش حل KKT بیان و مدل بر اساس این رویکرد بازنویسی شده است. بخش ۵ شامل نتایج محاسباتی و آنالیز حساسیت است و در نهایت در بخش آخر، نتیجه گیری و پیشنهادات آتی مطرح شده است.

۲. مرور ادبیات

مساله حمل و نقل دارای مواد طیف کاربردی وسیعی می باشد و در به صورت تک سطحی و چند سطحی مورد بررسی محققان قرار گرفته است. به عنوان مثال [Zegordi, Kamal Abadi and Beheshti Nia, 2010] یک مساله زمان بندی تولید و حمل در زنجیره تامین دو مرحله ای را مورد بررسی قرار دادند. مرحله اول شامل چند تامین کننده است که قطعاتی را که توسط یک شرکت تولید کننده سفارش داده شده است، تولید می کنند. در مرحله دوم وسایل حمل و

نقل قطعات را از تامین کنندگان به شرکت تولید کننده حمل می کنند که حمل این قطعات می تواند به صورت دسته ای صورت پذیرد. در تحقیقی دیگر [Borumand and Beheshti Nia, 2018] یک رویکرد تصمیم گیری یکپارچه برای مساله حمل و نقل و مساله زمان بندی تولید در یک زنجیره تامین دو مرحله ای ارائه کردند. توابع هدف شامل حداقل سازی دیرکرد در تحویل، هزینه تولید و انتشار توسط تامین کنندگان و وسایل حمل و نقل و حداکثر سازی کیفیت تولید است. [Beheshti Nia and Ghasemi, 2017] مساله تامین کننده و زمان بندی وسایل حمل و نقل را از نظر مسیریابی برای حمل و نقل مواد خام از تامین کنندگان به بعضی از مراکز تولیدی در نظر می گیرند. هدف اصلی مساله حداقل سازی کل دیرکرد در تخصیص سفارشات به تامین کنندگان و همچنین حداقل سازی مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل است. [Beheshti Nia, Ghasemi and Farrokhnia, 2017] مساله زمان بندی زنجیره تامین و مسیریابی در سیستم تولید کننده چند مکانی را بررسی قرار دادند. تحقیقات مطرح شده فوق مصداق هایی از کاربرد مساله حمل و نقل تک سطحی (تک تصمیم گیرنده) می باشد. البته با توجه به آنکه مساله مورد بررسی در این تحقیق طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک می باشد، در ادامه صرفا ادبیات تحقیق مربوط حمل و نقل و امداد رسانی حوادث ناشی از آن مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به این گستردگی و برای مروری مناسب تر، ادبیات مرتبط به چهار دسته طراحی شبکه، آنالیز ریسک، پوشش و پاسخ دهی اضطراری^۲ تقسیم بندی شده است

۱-۲ طراحی شبکه مواد خطرناک

جیانگ و همکاران مدل برنامه ریزی عدد صحیح چند هدفه ای را برای طراحی شبکه مواد خطرناک ارائه نمودند [Jiahong

[and Bin, 2010]. اهداف مورد نظر در مدل مذکور حداقل سازی زمان حمل و نقل، هزینه حمل و نقل و حداکثر سازی میزان پاسخ گویی به حوادث است. ارجمند و همکاران یک مدل ریاضی برای مکان یابی تسهیلات و مراکز انهدام و حمل و نقل شبکه مواد خطرناک برای شرایط قطعی و غیرقطعی و با در نظر گرفتن اهدافی نظیر حداقل سازی هزینه های مکان یابی، حمل و نقل و ریسک ارائه کردند [Ardjmand et al. 2016].

بایستی به این نکته توجه داشت که برنامه ریزی دوسطحی از رویکردهای رایج برای مدلسازی شبکه های حمل و نقل مواد خطرناک است. زیرا تصمیم گیرندگان و ذینفعان متفاوتی در شبکه های مربوط به مواد خطرناک وجود دارند که هر کدام به دنبال مطلوبیت های خود هستند. بهتر است، حل مساله طراحی شبکه مواد خطرناک با انتخاب و تصمیم گیری دو گروه با دیدگاه های متفاوت انجام پذیرد. زیرا دولت در این مساله به دلیل اختیارات و قدرتی که دارد در جایگاه رهبر است و حمل کنندگان برای ادامه کار خود موظف به پیروی از دولت هستند. [Kara and Verter 2004]. در حالی که دولت شبکه را طراحی میکند حمل کنندگان به دنبال کم هزینه ترین مسیر ممکن برای رسیدن به مقصد هستند. بنابراین انتظار میرود که دولت این موضوع را مد نظر قرار دهد. این امر منطقی نیست که یک شبکه را با این فرض که حمل کننده ها مسیرهایی با حداقل ریسک را انتخاب میکنند، طراحی کنند. همچنین دولت نمیتواند هیچ مسیری را به حمل کننده تحمیل کند (از لحاظ اقتصادی و عملی ممکن نیست). حاملان آزاد هستند هر مسیری را انتخاب کنند و ممکن است مسیر انتخابی آنها منجر به کمترین ریسک نشود. این انتخاب مشکلات شبکه طراحی مواد خطرناک را پیچیده می کند، از این رو دولت باید این دیدگاه حامل را در طراحی شبکه مد نظر قرار دهد. بنابراین استفاده از مدل دو سطحی مناسب ترین حالت ممکن است [Erkut and Gzara, 2008].

در این زمینه کارا و ورتز، یک مدل دو سطحی با در نظر گرفتن رابطه دولت (رهبر) و شرکت های حمل و نقل (پیرو) برای طراحی شبکه مواد خطرناک ارائه کردند [Kara and Verter, 2004]. مساله به دنبال یافتن بهترین ساختار شبکه و مسیریابی است، به گونه ای که ریسک کل شبکه (تابع هدف رهبر) با در نظر گرفتن مسیره های بهینه که حمل کننده ها انتخاب می کنند، حداقل شود. برای حل مساله، ایشان با استفاده از رویکرد کاروش کاهن تاکر مدل دو سطحی را به مدل تک سطحی تبدیل کرده اند. بیانکو و همکاران مدلی دو سطحی برای طراحی شبکه مواد خطرناک ارائه کردند. در این مدل دولت های منطقه ای و محلی قصد داشتند با وضع قوانینی در رابطه با میزان جریان مواد خطرناک، ترافیک این مواد را در سطح شبکه کنترل کنند [Bianco, Caramia and Giordani, 2009]. همچنین مدل برنامه ریزی عدد صحیح دو سطحی در طراحی شبکه مواد خطرناک توسط آمالدی و همکاران مطرح شد [Amaldi, Bruglieri and Fortz, 2011]. در این مدل، هدف حداقل سازی ریسک شبکه با توجه به انتخاب مسیر با کمترین هزینه، توسط حمل کننده است. علاوه بر آن، طراحی شبکه مواد خطرناک با رویکرد مسیریابی - زمان بندی توسط روجی پرادهانانگا و همکاران برای طراحی شبکه لجستیک واقعی در شهر اوزاکای ژاپن مورد بررسی قرار گرفت [Pradhananga et al. 2014]. محمدی و همکاران مدلی برای طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن مکان یابی هاب در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند [Mohammadi, Jula and Tavakkoli, 2017]. هاب های در نظر گرفته شده ممکن است دچار حوادثی مانند انفجار مواد خطرناک شوند. هدف اصلی به حداقل رساندن ریسک ناشی از وقوع حوادث هست. از دیگر ملاحظات که در طراحی شبکه مواد خطرناک مورد تحقیق قرار گرفته است می توان به موارد زیر اشاره کرد: چئو [Chiou, 2016] یک مدل دو سطحی برای حمل و نقل

مقاله پژوهشی: یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

ارزش در معرض ریسک ارائه کردند و این مدل در پی یافتن مسیرهای با کمترین ارزش در معرض ریسک است [Kang, Batta and Kwon, 2014]. سین و همکاران مسئله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک را با ریسک در شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند و از تابع تاسف جهت حل مدل استفاده کرده اند [Xin et al. 2015] سان و همکاران مدلی استوار در شرایط عدم قطعیت برای طراحی شبکه مواد خطرناک ارائه کردند [Sun, Karwan and Kwon, 2015]. ایشان ریسک را برای کل محموله های مواد خطرناک به صورت جمعی و برای تک تک محموله ها در نظر گرفتند و یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل استوار ارائه نمودند. لیو مدلی ارائه کرد که به بررسی رابطه بین فرکانس طول موج ایجاد شده ناشی از انفجار مواد خطرناک در ریل راه آهن و ریسک ناشی از حمل و نقل این مواد پرداخته است [Liu, 2017] تسلیمی و همکاران مدل کارا و ورتر [Kara and Verter, 2004] را تعمیم داده و علاوه بر معرفی تابعی برای اندازه گیری معیار ریسک، مدل را در شرایط عدم قطعیت نیز حل کردند [Taslimi, Batta and Kwon, 2017].

۳-۲ مساله پوشش

مساله پوشش یکی از پرکاربردترین مسائل در علوم مختلف از جمله مهندسی صنایع است. در این مساله هدف حداکثرسازی پوشش نقاط تقاضا با استفاده از حداقل تسهیلات (حداقل هزینه) است. مساله پوشش همواره با شعاع پوشش همراه است، اگر نقطه تقاضا درون این شعاع پوشش قرار گیرد پوشش داده می شود. مسئله پوشش به دو زیرمجموعه تقسیم می شود:

۱. مسئله پوشش کلی: که به دنبال پوشش همه نقاط تقاضاست و هدف پیدا کردن حداقل تعداد تسهیلات برای

مواد خطرناک با در نظر گرفتن همزمان هزینه های حمل و نقل و اثرات زیست محیطی، ارائه کرد. اسدی پور و همکاران [Assadipour, Ke and Verma, 2016] مدلی دو سطحی برای محموله های مواد خطرناک با حمل و نقل چند وجهی و با در نظر گرفتن معیار ریسک ارائه کردند.

۲-۲ آنالیز ریسک

طبق گفته گپالان و همکاران ریسک های ناشی از وقوع حادثه مواد خطرناک شامل مرگ و میر، خسارات مالی، اثرات زیست محیطی است [Gopalan et al. 1990]. با توجه به اهمیت در نظر گرفتن ریسک، کورنت و راتیک مساله مکان یابی-مسیریابی چند هدفه را در حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن ریسک مورد بررسی قرار دادند [Current and Ratick, 1995]. در این مدل، ایشان ریسک را به صورت یک محدودیت در نظر گرفته و یک متغیر آستانه ای برای آن تعیین کردند و مدل در پی حداقل سازی این متغیر آستانه ای است. ارکات و آلپ مدلی دو سطحی برای طراحی شبکه مواد خطرناک با هدف حداقل سازی ریسک شبکه ارائه کردند و مدل ارائه شده را نیز با رویکرد KKT حل کردند. [Erkut and Alp, 2007]. کاروتنوتو و همکاران مدلی برای مکان یابی و مسیریابی با حداقل سازی ریسک برای حمل محموله های مواد خطرناک در یک منطقه ارائه کردند. یکی از ویژگی های مهم این مدل، انتخاب مسیرهایی است که ریسک را به طور یکسان و عادلانه به جمعیت در معرض ریسک، تحمیل کند [Carotenuto, Giordani and Ricciardelli, 2007]. ایشان از روشی بر مبنای رویکرد لاگرانژ برای حل مدل استفاده نمودند. ارکات و جی زارا مدلی دو سطحی برای در نظر گرفتن ریسک و هزینه (تابع هدف رهبر) ارائه نمودند [Erkut and Gzara, 2008]. کنگ و همکاران مدلی چند سفره و چند کالایی برای مسیریابی مواد خطرناک بر مبنای

پوشش همه نقاط تقاضا و تخصیص آن‌ها به تسهیل‌های احداث شده است.

۲. مسئله پوشش جزئی: که در آن هدف حداقل کردن هزینه (مسافت) در بخشی از محدوده نقاط تقاضا است. با توجه به محدود بودن منابع و بودجه در بیشتر اوقات از این پوشش استفاده می‌شود.

۲-۳-۱ مسئله پوشش تدریجی

با توجه به ماهیت مساله پوشش تدریجی، که حداکثر سازی پوشش با توجه به محدودیت منابع است، این مساله می‌تواند به عنوان زیر مجموعه‌ای از مساله پوشش جزئی محسوب شود. در این مساله حداقل دو شعاع پوشش برای سرویس دهی در شبکه مد نظر قرار می‌گیرد. بدین صورت که اگر فاصله نقطه تقاضا از تسهیل احداث شده کمتر از شعاع کوچک‌تر باشد ($d \leq r$)، پوشش کامل و اگر فاصله مشتری تا تسهیل بین شعاع کوچک‌تر و بزرگ‌تر باشد ($r < d \leq u$)، پوشش با تابع خاصی برحسب میزان فاصله نقطه تقاضا تا تسهیل در نظر گرفته می‌شود و اگر فاصله نقطه تقاضا تا تسهیل بیشتر از شعاع بزرگ‌تر باشد ($d > u$)، میزان پوشش به صفر خواهد رسید و پوششی انجام نخواهد شد. در حل مسئله پوشش تدریجی به دنبال نقاطی هستیم که بتوان حداکثر پوشش را با قرار دادن تسهیلات مورد نظر در آن نقاط به دست آورد. درزیر و همکاران با استفاده از تابع خطی کاهنده به بررسی مساله پوشش تدریجی در فضای پیوسته پرداختند [Drezner, Wesolowsky and Drezner, 2004]. مدل پوشش تدریجی با تقاضاهای تصادفی با توزیع نامعلوم [Berman et al. 2009] مدل پوشش تدریجی شبکه‌های تلفن همراه با حداقل هزینه از لحاظ مصرف برق [Chen and Yuan, 2010] از دیگر تحقیقات این حوزه است. در حوزه پاسخ گویی به حوادث مواد خطرناک، برمان و همکاران مدلی جهت مکان‌یابی و طراحی تیم تخصصی جهت پاسخ گویی هرچه سریع‌تر به تصادفات مواد خطرناک ارائه کردند [Berman,

Verter and Kara, 2007]. زو و همکاران مدل بهینه سازی دو سطحی برای طراحی شبکه مواد خطرناک ارائه کردند و به گونه‌ای به مکان‌یابی ایستگاه‌های پاسخگویی اضطراری پرداختند که در نهایت میزان پوشش را به حداکثر رسانند [Xu, Gang and Lei, 2013].

۲-۴ مکان‌یابی تیم پاسخ گویی اضطراری به مواد

خطرناک

مکان تیم (ایستگاه) پاسخ گویی اضطراری به حوادث و تصادفات مواد خطرناک با توجه به نقش آن در کاهش خطرات حمل و نقل مواد خطرناک، بسیار حائز اهمیت است. لیست و ترن کویست یک مساله چند هدفه مسیریابی مواد خطرناک را ارائه نمودند [List and Turnquist, 1998]. که یکی از ملاحظات اصلی آن مکان‌یابی تیم‌های پاسخ گویی به تصادفات مواد خطرناک است به طوری که نزدیکی مکان تیم پاسخ گویی به مسیرهای با جریان و یا جمعیت زیاد مورد ملاحظه ایشان قرار گرفته است. هاموندا مدلی را برای یافتن مکان‌های بهینه تیم پاسخ گویی مواد خطرناک از بین مکان‌های کاندید به منظور حداقل سازی ریسک کل شبکه ارائه نمود [Hamouda, 2004]. مدل ارائه شده توسط ایشان تضمین می‌کند که زمان پاسخ گویی به هر نقطه تقاضا از مقدار مشخصی تجاوز نخواهد کرد. برمان و همکاران مدلی جهت مکان‌یابی و طراحی تیم تخصصی برای پاسخ گویی هرچه سریع‌تر به تصادفات مواد خطرناک ارائه کردند. هدف اصلی مدل نیز حداکثر سازی میزان پوشش در صورت وقوع تصادف است [Berman, Verter and Kara, 2007]. رضایی احسان و همکاران مدلی چند هدفه برای مکان‌یابی مراکز پاسخ گویی اضطراری برای حمل و نقل مواد خطرناک ارائه کردند. در مدل ارائه شده توسط ایشان، تقاضا در شبکه به صورت غیر قطعی و با ماهیت فازی بیان شده است [Rezaei Ehsan, Makui and Shahanaghi, 2012]. زو و همکاران مدل

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

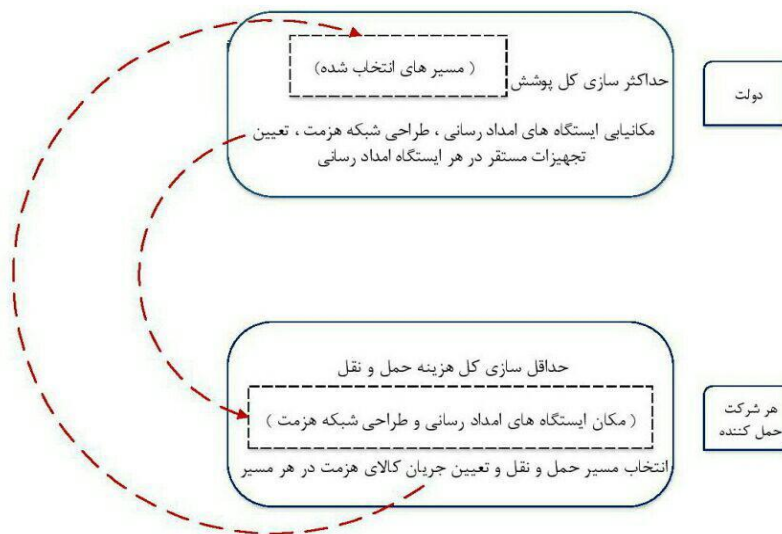
شبکه وجود دارند) که ضمن در نظر گرفتن پوشش به صورت تدریجی برای امداد رسانی به یک حادثه محتمل در شبکه، ریسک عملیاتی را نیز در مرحله طراحی شبکه مورد ملاحظه قرار دهد. همچنین در این مقاله به بسط مفهوم پوشش تدریجی یک نقطه با توجه به ماهیت مساله پرداخته شده است و تحت عنوان پوشش تدریجی یال معرفی شده است. همچنین تعداد تجهیزات موجود در ایستگاه های امداد رسانی و ظرفیت و نوع تکنولوژی به کار رفته در تجهیزات مورد توجه نبوده است. حال آنکه در دنیای واقعی محدودیت بودجه از عناصر مهم تصمیم گیری است. بر همین اساس، در نظر گرفتن محدودیت بودجه و همچنین سطوح مختلف تخصیص منابع و تجهیزات به ایستگاه های امداد رسانی با توجه به محدودیت بودجه از دیگر ملاحظات مهم تحقیق پیشرو است.

بهینه سازی دو سطحی برای طراحی شبکه مواد خطرناک با ملاحظه مکان یابی تیم پاسخ گویی ارائه نمودند [Xu, Gang and Lei, 2013]

جدول ۱ خلاصه از تحقیقات مرتبط با مساله مورد مطالعه و همچنین جایگاه مدل ارائه شده را در میان پژوهش های موجود نشان می دهد. با توجه به مرور ادبیات مشاهده می شود، اگرچه پاسخ گویی به حوادث مواد خطرناک با رویکرد در نظر گرفتن سطح پوشش برای این نوع سرویس بسیار کاربردی است اما مدل جامعی از طراحی شبکه مواد خطرناک که در آن ضمن در نظر گرفتن ریسک حمل و نقل، با مساله پوشش برای پاسخ دهی به حوادث را مد نظر قرار دهد، مورد بررسی قرار نگرفته است. بر همین اساس در این تحقیق، هدف ارائه یک مدل برنامه ریزی دوسطحی برای طراحی شبکه مواد خطرناک است (با توجه به این واقعیت که تصمیم گیرندگان متعدد در

جدول ۱. جایگاه پژوهش حاضر در مقایسه با تحقیقات پیشین

ردیف	مقاله	رویکرد مدل سازی		طراحی شبکه	ریسک	هزینه	پوشش		بودجه
		تک سطحی	دو سطحی				پوشش جزئی	پوشش تدریجی	
۱	Kara and Verter (2004)		*	*	*	*			
۲	Erkut and Alp (2007)		*	*	*	*			
۳	Verter and Kara (2008)	*		*	*				
۴	Jiahong and Bin (2010)	*		*	*	*	*		
۵	Rezaei et al. (2012)	*		*	*	*	*		
۶	Gzara (2013)		*	*	*	*			
۷	Sun et al. (2015)		*	*	*	*			
۸	Xin et al. (2015)		*	*	*	*			
۹	Ardjmand et al. (2016)	*			*	*			
۱۰	Assadipour et al. (2016)		*		*	*			
۱۱	Bianco et al. (2016)		*		*	*			
۱۳	Tasslimi et al. (2017)		*	*	*	*	*		*
۱۴	این تحقیق		*	*	*	*		*	*



شکل ۱. رویه تصمیم سازی دو سطحی ارائه شده برای طراحی شبکه مواد خطرناک

مورد پوشش و امداد رسانی قرار خواهند گرفت، نشان داده شده است. با مشخص کردن منطقه پوشش کامل و جزئی و یک ایستگاه امداد رسانی فرضی، حداکثر و حداقل فاصله مسیر از ایستگاه امداد رسانی فرضی، مشخص شده است. با توجه به شکل ۲، برای پوشش مسیرهای فوق تابعی پنج ضابطه ای به صورت زیر ارائه شده است:

$$u_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{mi} \leq l, d_{mj} \leq l \\ \alpha + \beta \frac{\left(\frac{T-d_{mi}}{T-l} + 1\right)}{2} & \text{if } d_{mi} \leq l, l \leq d_{mj} \leq T \\ \frac{\left(\frac{T-d_{mi}}{T-l} + \frac{T-d_{mj}}{T-l}\right)}{2} & \text{if } l \leq d_{mi}, d_{mj} \leq T \\ \beta \left(\frac{T-d_{mi}}{T-l}\right) & \text{if } l \leq d_{mi} \leq T, d_{mj} \geq T \\ 0 & \text{if } d_{mi} > T, d_{mj} > T \end{cases} \quad (1)$$

در عبارت فوق،

l : عبارت است از حداکثر فاصله جهت پوشش کامل (یعنی اگر فاصله مسیری از هر ایستگاه امداد رسانی کوچک تر از این عبارت باشد، در صورت وقوع حادثه آن مسیر به طور کامل تحت پوشش ایستگاه امداد رسانی مربوطه قرار خواهد گرفت).

۳. تعریف مساله و مدل سازی

مساله مورد بررسی در این مقاله طراحی شبکه مواد خطرناک با در نظر گرفتن تصمیم گیرندگان متفاوت است. بر همین اساس، در مدل دو سطحی ارائه شده، دولت (رهبر) با تصمیم گیری درباره مکان یابی ایستگاه های امداد رسانی و احداث مسیر حمل و نقل بر تصمیمات شرکت حمل کننده (پیرو) تاثیر می گذارد و شرکت حمل کننده نیز با انتخاب مسیر و میزان جریان حمل بر تصمیمات رهبر موثر است. برای مقابله با عواقب ناشی از حوادث مواد خطرناک در شبکه، دولت، شرکت های حمل کننده را به انتخاب مسیرهایی تشویق می کند که حداقل امکان به ایستگاه های امداد رسانی نزدیک تر باشند. به این ترتیب میزان پوشش (میزان پاسخ گویی به حوادث) به حداکثر خود خواهد رسید. شکل ۱ مفهوم مساله و رابطه بین دولت و شرکت های حمل کننده و نحوه تاثیر گذاری آن ها بر یکدیگر را نشان می دهد. شکل ۲ شبکه مساله ما در این مقاله و میزان پوشش مسیر ها را در صورت بروز حادثه، توسط ایستگاه های امداد رسانی نشان می دهد. در شکل ۲، پنج نوع مسیر (بال) متفاوت را که هر کدام در هنگام بروز حادثه به شکلی متفاوت

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

کامل و جزئی، پوشش داده خواهد شد. ضابطه سوم کل مسیر را تحت پوشش جزئی قرار می دهد (مسیر ۲ در شکل ۲). ضابطه چهارم بخشی از مسیر را به صورت جزئی پوشش داده و قسمتی را که از حداکثر فاصله برای پوشش نیز تجاوز می کند، پوشش نمی دهد (مسیر ۴ در شکل ۲) و در انتها ضابطه پنجم را داریم که میزان پوشش به دلیل قرار گرفتن مسیر خارج از محدوده، به صفر می رسد (مسیر ۵ در شکل ۲).

برای فرموله کردن مساله، یک مدل دو سطحی بکار گرفته گرفته شده است. در این مدل و در سطح اول (دولت) که با p_1 نشان داده شده است. به دنبال حداکثرسازی میزان پوشش خود و سطح دوم (شرکت حمل کننده) که با p_2 نشان داده شده است به دنبال کاهش هزینه های حمل و نقل خود است. تصمیم در مورد احداث مسیر در شبکه، تخصیص ایستگاه های امدادرسانی به هر مسیر و احداث ایستگاه های امدادرسانی توسط رهبر تعیین می شود و پیرو نیز با انتخاب مسیر حمل و نقل از میان مسیرهایی که قبلاً توسط رهبر احداث شده، در تلاش است هزینه های حمل و نقل خود را کاهش دهد.

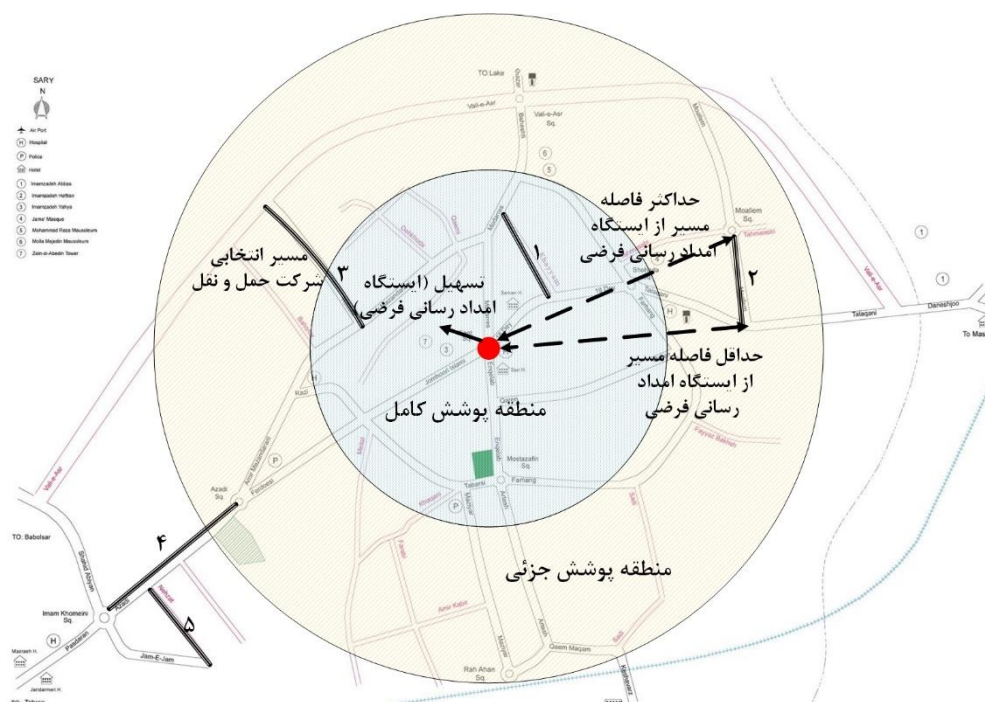
T : عبارت است از حداکثر فاصله جهت پوشش جزئی (یعنی اگر فاصله مسیری از هر ایستگاه امدادرسانی از این عبارت کوچک تر و از l بزرگ تر باشد، در صورت وقوع حادثه آن مسیر به طور جزئی تحت پوشش ایستگاه امداد رسانی مربوطه قرار خواهد گرفت).

α درصدی از مسیر است که تحت پوشش کامل قرار می گیرد.

β درصدی از مسیر است که تحت پوشش جزئی قرار می گیرد.

بر اساس رابطه (۱)، برای محاسبه تابع پوشش پنج ضابطه خواهیم داشت:

ضابطه اول به دلیل قرار گرفتن مسیر قبل از حداکثر فاصله برای پوشش کامل، تحت پوشش کامل قرار می گیرد (مسیر ۱ در شکل ۲). لذا میزان پوشش کل مسیر ۱۰۰ درصد خواهد بود. ضابطه دوم بخشی از مسیر را تحت پوشش کامل و قسمتی را تحت پوشش جزئی خود دارد (مسیر ۳ در شکل ۲). α درصدی از مسیر است که تحت پوشش کامل قرار می گیرد و β درصد باقی مانده است که به صورت میانگینی از پوشش



شکل ۲. مناطق تحت پوشش. (۱) نمونه ای از یک مسیر که در صورت وقوع حادثه تحت پوشش کامل قرار می گیرد. (۲) نمونه ای از یک مسیر که در صورت وقوع حادثه تحت پوشش جزئی قرار میگیرد. (۳) نمونه ای از یک مسیر که در صورت وقوع حادثه بخشی از آن تحت پوشش کامل و بخشی از آن تحت پوشش جزئی قرار میگیرد. (۴) نمونه ای از یک مسیر که در صورت وقوع حادثه بخشی از آن تحت پوشش جزئی و مابقی تحت پوشش قرار نمیگیرد. (۵) نمونه ای از یک مسیر که در صورت وقوع حادثه تحت پوشش قرار نمیگیرد.

در این مقاله برای مدلسازی از نماد های زیر استفاده شده است:	q_{me}	هزینه خرید تجهیزات با سطح تکنولوژی e در ایستگاه امداد رسانی m
مجموعه ها	b	کل بودجه در دسترس
A	$capa_e$	ظرفیت هر تجهیز (ماشین) با سطح تکنولوژی e
اندیس گذاری شده است. i, j که با	cap_{ij}	ظرفیت لینک (i, j) این ظرفیت نشان دهنده این است که آن لینک تا یک حدی میتواند جریان کالا را از خود عبور دهد و توانایی انتقال بیشتر از آن را ندارد.
C		مجموعه محموله های مواد خطرناک
m		مجموعه محل استقرار تیم مواد خطرناک (ایستگاه های تیم مواد خطرناک)
E		مجموعه تجهیزات با سطح تکنولوژی e در هر ایستگاه
G		مجموعه ظرفیت ایستگاه ها
پارامترها		متغیرهای تصمیم
θ	X_{ij}^c	میزان جریان کالای خطرناک نوع c که از نقطه i نقطه j حمل می شود.
u_{ij}^m	Y_{ij}	متغیر صفر و یک اگر لینک (i, j) فعال شود (احداث شود).
p_c	Z_{mg}	امداد رسانی m احتمال وقوع حادثه در حین ارسال محموله
d_{ij}	V_{ij}^m	مواد خطرناک نوع c فاصله بین نقاط (i, j)
k_{ij}^c	α_{ij}^{em}	میزان کل جمعیتی که در لینک (i, j) در معرض حادثه محموله مواد خطرناک نوع c هستند.
n_c	β_{me}	تعداد کل محموله های مواد خطرناک عددی به اندازه کافی بزرگ
M		ماکزیمم فاصله برای پوشش کامل
l		ماکزیمم فاصله برای پوشش جزئی
T		هزینه ثابت احداث ایستگاه امداد رسانی m با ظرفیت g
f_{mg}		هزینه احداث لینک (i, j)
h_{ij}		

$$P_1 \max \sum_{(i,j) \in A} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} u_{ij}^m \times X_{ij}^c \times V_{ij}^m \quad (2)$$

subject to :

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

جهت احداث ایستگاه های امداد رسانی، مسیرها و تجهیزات لازم را نشان می دهد. محدودیت (۹) حداکثر تجهیزات ارسالی جهت مقابله با حادثه را نشان می دهد. محدودیت (۱۰) بیان می کند که جریان محصولات نباید از ظرفیت تجهیزات ارسالی در حوادث تجاوز کند. محدودیت (۱۱) دامنه هر یک از متغیرها را نشان می دهد.

عبارت غیرخطی (۲) و (۳) ضرب دو متغیر V_{ij}^m و X_{ij}^c را نشان می دهند. برای خطی سازی این عبارات به صورت زیر عمل می کنیم:

$$\tau_{ij}^{mc} \geq X_{ij}^c - M(1 - V_{ij}^m) \quad \forall (i,j) \in A, c \in C, m \in M \quad (12)$$

$$\tau_{ij}^{mc} \leq M \times V_{ij}^m \quad \forall (i,j) \in A, c \in C, m \in M \quad (13)$$

$$\tau_{ij}^{mc} \leq X_{ij}^c \quad \forall (i,j) \in A, c \in C, m \in M \quad (14)$$

محدودیت های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) بیانگر این است که در صورت صفر شدن متغیر V_{ij}^m ، τ_{ij}^{mc} نیز مقدار صفر و در صورت یک شدن متغیر V_{ij}^m ، τ_{ij}^{mc} مقداری برابر با X_{ij}^c را اختیار کند.

مدل مساله سطح دوم (پیرو) به صورت زیر نوشته می شود:

$$P_2 \quad (15)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{c \in C} n_c \times d_{ij} \times X_{ij}^c$$

subject to :

$$X_{ij}^c \leq \text{cap}_{ij} \times y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (16)$$

$$\sum_j X_{ij}^c = re_c \quad \forall i \in o(c) \quad \forall c \in C \quad (17)$$

$$\sum_j X_{ji}^c = re_c \quad \forall i \in d(c) \quad \forall c \in C \quad (18)$$

$$\sum_j X_{ij}^c - \sum_j X_{ji}^c = 0 \quad \forall i \quad \forall c \in C \quad (19)$$

$$X_{ij}^c \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (20)$$

عبارت (۱۵) تابع هدف پیرو را نشان می دهد که به دنبال حداقل کردن مجموع هزینه های حمل و نقل خود می باشد. محدودیت (۱۶) ظرفیت هر مسیر را نشان می دهد. محدودیت

$$\sum_{c \in C} \sum_{m \in M} p_c \times d_{ij} \times k_{ij}^c \times n_c \times X_{ij}^c \times \quad (3)$$

$$V_{ij}^m \leq \theta \quad \forall (i,j) \in A$$

$$V_{ij}^m \leq Y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A, m \in M \quad (4)$$

$$V_{ij}^m \leq \sum_{g \in G} Z_{mg} \quad \forall (i,j) \in A, m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G} Z_{mg} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M} V_{ij}^m \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{g \in G} f_{mg} \times Z_{mg} + \sum_{(i,j) \in A} h_{ij} \times Y_{ij} + \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} q_{me} \times \beta_{me} \leq b \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^{me} \leq \beta_{me} \quad \forall m \in M, e \in E \quad (9)$$

$$X_{ij}^c \leq \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \text{capa}_e \times \alpha_{ij}^{me} \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (10)$$

$$\alpha_{ij}^{em}, \beta_{em}, X_{ij}^c, V_{ij}^m, Z_{mg}, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, c \in C, m \in M, e \in E, g \in G \quad (11)$$

عبارت (۲) تابع هدف رهبر را نشان می دهد که میزان پوشش مسیرها توسط ایستگاه های امداد رسانی را حداکثر می کند. منظور از پوشش مسیرها در واقع همان قدرت و سرعت پاسخ گویی است. بنابراین هدف اصلی مدل ارائه شده حداکثر سازی پوشش مسیرهایی است که در صورت وقوع حادثه مورد پاسخ گویی قرار می گیرند. محدودیت (۳) تضمین می کند میزان ریسک هر مسیر از مقدار مشخص (θ) بیشتر نشود. محدودیت های (۴) و (۵) به ترتیب تضمین می کنند که تا قبل از احداث مسیر، ایستگاهی به آن تخصیص نیابد و تا قبل از احداث ایستگاه، آن را به هیچ مسیری تخصیص ندهیم. محدودیت (۶) نشان می دهد که هر ایستگاه حداکثر باید با یکی از ظرفیت های (زیاد، متوسط و کم) احداث شود. محدودیت (۷) نشان می دهد که به هر مسیری حداکثر باید یک ایستگاه امداد رسانی تخصیص یابد. محدودیت (۸) بودجه در دسترس

با توجه به اینکه مساله سطح دوم ارائه شده در این تحقیق، دارای فرم خطی هست، در این تحقیق از رویکرد KKT برای حل مساله استفاده شده است تا جواب دقیق برای مساله ارائه شده بدست آید. در زیر به صورت اجمالی به بیان این روش می‌پردازیم. عبارات زیر فرم عمومی مساله برنامه ریزی دو سطحی را نشان می‌دهد:

$$\min_{x \in X} F(x, y) = c_1 x + d_1 y \quad (21)$$

$$s. t. A_1 x + B_1 y \leq b_1 \quad (22)$$

$$\min_{y \in Y} f(x, y) = c_2 x + d_2 y \quad (23)$$

$$s. t. A_2 x + B_2 y \leq b_2 \quad (24)$$

عبارت (21) تابع هدف رهبر و عبارت (22) محدودیت رهبر را نشان می‌دهد. عبارات (23) و (24) نیز به ترتیب، گویای تابع هدف و محدودیت های پیرو هستند. شرایط بهینگی روش KKT به صورت زیر است:

۱. شرایط شدنی بودن مساله سطح دوم: $Ax^* \leq b$.

۲. شرایط شدنی بودن دوگان مساله سطح دوم: $wA \geq c$.

۳. شرایط مکمل زاید: $w(Ax^* - b) = 0$ یا $(wA - c)x^* = 0$.

که شرایط سه گانه فوق به صورت محدودیت به مساله اصلی (مساله رهبر) اضافه می‌شود. بر همین اساس مساله دوگان پیرو به صورت زیر به مساله رهبر اضافه می‌شود.

$$\varphi_i^c - \varphi_j^c - \rho_{ij}^c + \mu_{ij}^c = n_c d_{ij} \quad (25)$$

$$\forall (i, j) \in A, c \in C$$

$$\rho_{ij}^c (X_{ij}^c - cap_{ij} y_{ij}) = 0 \quad \forall (i, j) \in A, c \in C \quad (26)$$

$$\mu_{ij}^c (X_{ij}^c) = 0 \quad \forall (i, j) \in A, c \in C \quad (27)$$

$$\mu_{ij}^c, \rho_{ij}^c \geq 0 \quad \varphi_i^c \text{ free} \quad X_{ij}^c \geq 0 \quad (28)$$

$$\forall (i, j) \in A, c \in C$$

که در بالا، μ_{ij}^c ، φ_i^c ، ρ_{ij}^c متغیرهای دوگان محدودیت های مساله پیرو هستند. عبارت (25) محدودیت مساله دوگان و عبارات (26)، (27)، و (28) شروط مکمل زائد هستند.

های (17)، (18) و (19) میزان تقاضای گره های ابتدائی، انتهایی و میانی در شبکه را نشان می‌دهد و محدودیت (20) نیز دامنه متغیر مساله هست.

۴. تبدیل مدل دو سطحی به مدل تک سطحی

مدل ارائه شده در بالا به صورت مستقیم توسط نرم افزارهای رایج تجاری قابل حل نیست. همچنین فرض می‌شود که تصمیم گیرندگان اطلاعات کامل از واکنش یکدیگر دارند و واکنش ها منطقی هستند. در این ساختار، جای رهبر و پیرو قابل تعویض نیست. نخعی کمال آبادی و همکاران روش های ارائه شده برای حل مدل های دو سطحی را به صورت زیر دسته بندی می‌کنند [Nakhe Kkamal, Abadi, Hosseini and Fathi, 2014]:

۱. روش های شمارشی (بر اساس شمارش رئوس): در روش های شمارشی نقطه بهینه یکی از نقاط راسی فضای شدنی مساله مورد نظر است.
۲. روش های فازی: در این دسته از روش ها تابع تعلق برای تابع هدف ها، محدودیت ها، متغیر ها و یا ترکیبی از آن ها در هر دو مساله سطح اول و دوم تعریف می‌شود.
۳. روش های فرا ابتکاری: روش های فرا ابتکاری جز روش های دقیق برای حل مساله دوسطحی نیستند و یک جواب تقریبی ارائه می‌کنند.
۴. روش هایی بر اساس شرایط کروش-کوهن-تاکر (KKT): در این دسته از روش ها شرایط KKT برای تابع هدف سطح دوم جایگزین می‌شود به طوری که مساله سطح دوم به محدودیت هایی برای مساله سطح اول تبدیل شده و مساله با تابع هدف سطح اول حل می‌گردد. این روش ها برای حل مساله برنامه ریزی دو سطحی در هر دو حالت خطی و غیر خطی کاربرد دارد و همچنین جواب دقیق ارائه می‌دهند. نکته مهم در بکار گیری این نوع روش آن است که مساله پیرو بایستی دارای فرم خطی باشد.

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

روش ارائه شده در کار [Fortuny-Amat, and McCarl, 1981] استفاده شد. بدین صورت که برای هریک از متغیرهای دوگان محدودیت های (۲۶) و (۲۷) $(\mu_{ij}^c, \rho_{ij}^c)$ یک متغیر صفر و یک به نام های Γ_1 و Γ_2 تعریف شد و با در نظر گرفتن M به عنوان یک عدد بسبار بزرگ، محدودیت های زیر نوشته شد.

بنابراین با اضافه کردن محدودیت های (۲۹)، (۳۰) و (۳۱)

به مساله تک سطحی فوق، مدل خطی خواهد بود.

$$\rho_{ij}^c \leq M \Gamma_1 \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (29)$$

$$cap_{ij} y_{ij} - X_{ij}^c \leq M (1 - \Gamma_1) \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (30)$$

$$\mu_{ij}^c \leq M \Gamma_2 \quad \forall (i,j) \in A, c \in C \quad (31)$$

نهایتاً به منظور تبدیل کردن مدل دو سطحی به تک سطحی، محدودیت های مساله دوگان، شروط مکمل زائد و محدودیت های مساله پیرو p_2 را به مدل رهبر p_1 اضافه نموده و مدل تک سطحی را به صورت یکپارچه می نویسیم:

$$\max \sum_{(i,j) \in A} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} u_{ij}^m \times X_{ij}^c \times V_{ij}^m$$

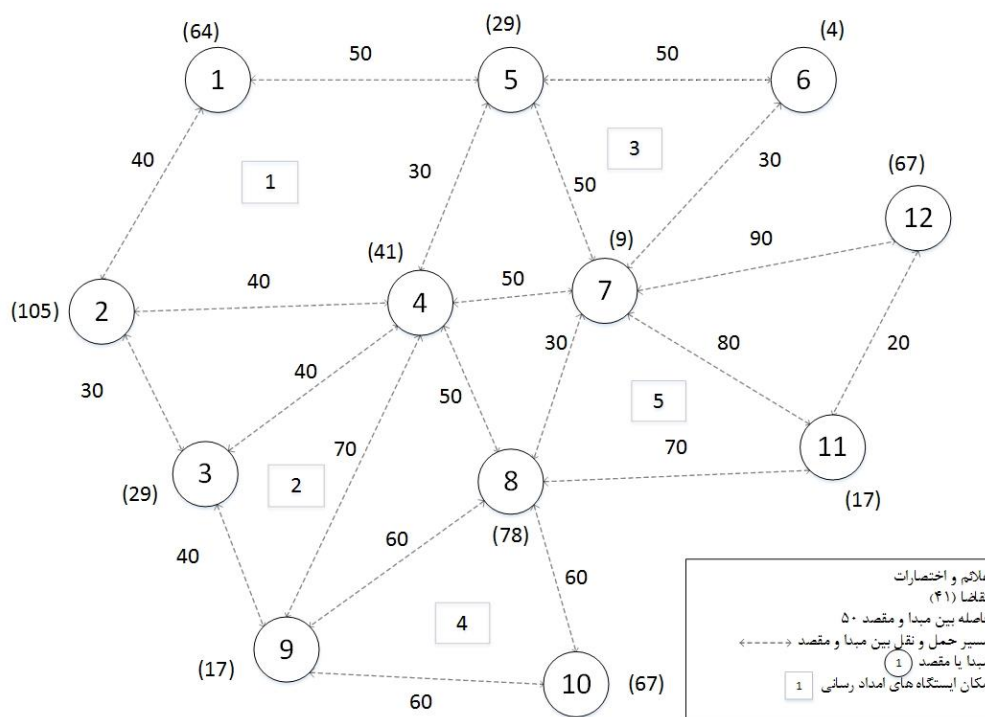
subject to :

$$(27), (26), (25), (19), (18), (17), (16), (10), (9), (8), (7), (6), (5), (4), (3) \\ \alpha_{ij}^{em}, \beta^{em}, X_{ij}^c, \mu_{ij}^c, \rho_{ij}^c \geq 0 \quad V_{ij}^m, Z_{mg}, Y_{ij} \in \{0,1\}$$

$$\forall (i,j) \in A, c \in C, m \in M, e \in E, g \in G$$

مدل تک سطحی فوق به علت وجود محدودیت های

(۲۶) و (۲۷) غیر خطی است. بنابراین برای خطی کردن آن از



شکل ۳. شبکه مورد مطالعه در این تحقیق

۵. نتایج محاسباتی

برای تحلیل مدل ارائه شده در این تحقیق، شبکه ای شامل ۱۲ نقطه همانند شکل ۳ مورد استفاده قرار گرفته است [Melkote and Daskin, 2001]. در شکل ۳، خط چین ها مسیرهای بین این نقاط تقاضا را نشان می دهند و همچنین تعداد ۵ نقطه به عنوان مکان های کاندید برای احداث ایستگاه امداد رسانی در نظر گرفته شده است.

۱-۵ بررسی رابطه بین مقدار تابع هدف و میزان سطوح ریسک

در جدول ۲ به بررسی رابطه بین مقدار تابع هدف و سطوح مختلف ریسک با شعاع های پوشش متفاوت پرداخته شده است. همچنین معیار ریسک از دامنه ۸۰۰۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ رابطه بین سطوح مختلف ریسک و میزان پوشش را نشان می دهد. محور افقی شکل ۴ معیار ریسک و محور عمودی میزان پوشش را نشان می دهد. با در نظر گرفتن شعاع های متفاوت برای امداد رسانی، در می یابیم که ریسک و پوشش

با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. هرچه میزان ریسک قابل پذیرش در شبکه بیشتر شود، آنگاه میزان پوشش مسیرها نیز افزایش می یابد. با توجه به جدول ۲، افزایش میزان ریسک تا حدی بر پوشش تاثیر گذار است و از جایی به بعد میزان پوشش با افزایش سطح ریسک قابل پذیرش تغییر نخواهد کرد. همچنین دلیل نزدیک شدن دو خط انتهایی شکل ۴ این است که میزان افزایش سطح پذیرش ریسک از حدی به بعد دیگر باعث افزایش چشم گیر تابع هدف نخواهد شد. در بازه پیشنهادی مشاهده می شود که افزایش سطح ریسک به مقادیر بیشتر از ۱۳۰۰۰۰۰۰ دیگر باعث افزایش میزان پاسخ گویی مسیرها نخواهد شد.

۲-۵ بررسی رابطه بین مقدار تابع هدف و میزان بودجه در دسترس

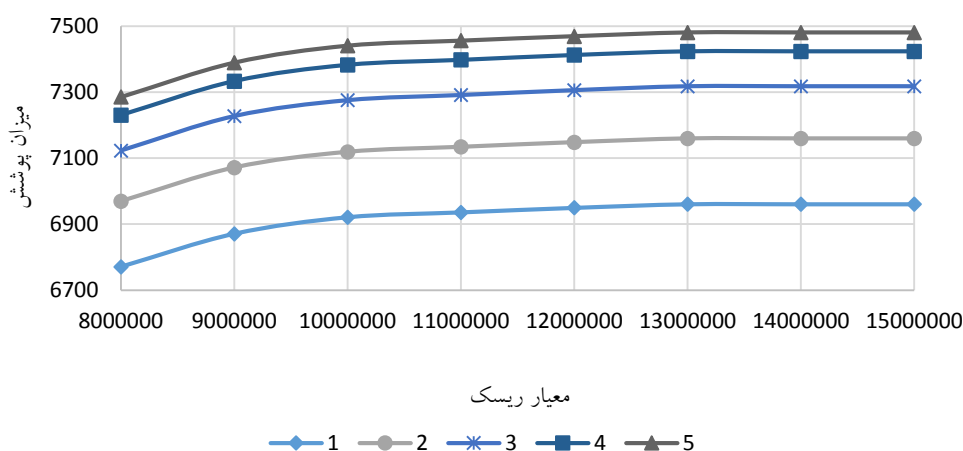
در جدول ۳ رابطه بین مقدار تابع هدف و بودجه در دسترس با شعاع های پوشش متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه میزان بودجه در دسترس از ۴۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰۰ میلیون در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. روند تغییرات تابع هدف با توجه به تغییرات سطوح ریسک (θ) با شعاع های پوشش کامل (L) و جزئی (T) کیلومتر متفاوت

θ	T = ۱۰۰ L = ۵۰	T = ۱۳۰ L = ۶۰	T = ۱۵۰ L = ۷۰	T = ۱۸۰ L = ۸۰	T = ۲۰۰ L = ۹۰
۸۰۰۰۰۰۰	۶۷۷۰/۶	۶۹۶۹/۲	۷۱۲۲/۷	۷۲۳۰/۴	۷۲۸۵/۲
۹۰۰۰۰۰۰	۶۸۷۰/۷	۷۰۷۱/۳	۷۲۲۶/۶	۷۳۳۳/۲	۷۳۸۹/۱
۱۰۰۰۰۰۰	۶۹۲۰/۹	۷۱۱۸/۸	۷۲۷۵/۲	۷۳۸۲/۴	۷۴۴۰/۴
۱۱۰۰۰۰۰	۶۹۳۵/۷	۷۱۳۳/۸	۷۲۹۰/۹	۷۳۹۷/۵	۷۴۵۵/۶
۱۲۰۰۰۰۰	۶۹۴۹/۳	۷۱۴۷/۹	۷۳۰۵/۶	۷۴۱۲/۲	۷۴۶۹/۱
۱۳۰۰۰۰۰	۶۹۶۰/۳	۷۱۵۹/۳	۷۳۱۷/۴	۷۴۲۳/۴	۷۴۸۰/۴
۱۴۰۰۰۰۰	۶۹۶۰/۳	۷۱۵۹/۳	۷۳۱۷/۴	۷۴۲۳/۴	۷۴۸۰/۴
۱۵۰۰۰۰۰	۳/۶۹۶۰	۷۱۵۹/۳	۷۳۱۷/۴	۷۴۲۳/۴	۷۴۸۰/۴

میزان پوشش افزایش می یابد. با بودجه کمتر از ۴۰۰۰۰۰ مدل کارایی لازم را نخواهد داشت و امکان طراحی شبکه وجود نخواهد داشت. اما با افزایش بودجه در دسترس تا سقف ۴۰۰۰۰۰ می توان میزان پوشش را به طرز قابل توجهی افزایش داد. در جدول ۳ مشاهده می شود که حساسیت تابع هدف به میزان بودجه در دسترس نسبت به میزان ریسک بیشتر است. یعنی افزایش میزان بودجه در دسترس نسبت به افزایش معیار ریسک، بیشتر می تواند میزان تابع هدف را افزایش دهد.

برحسب نتایج بدست آمده از جدول ۳، میزان بودجه در دسترس و میزان پوشش مسیرها با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. شکل ۵ این ارتباط را به خوبی نشان می دهد. کاهش میزان بودجه در دسترس موجب کاهش میزان پوشش مسیرها می شود. علت این امر بدیهی است، زیرا هرچه بودجه در دسترس افزایش یابد، رهبر قادر به احداث ایستگاه های امداد رسانی بیشتر در شبکه همراه تجهیزات پیشرفته تری خواهد بود و مسیرها بیشتری تحت پوشش قرار خواهد گرفت و در نتیجه

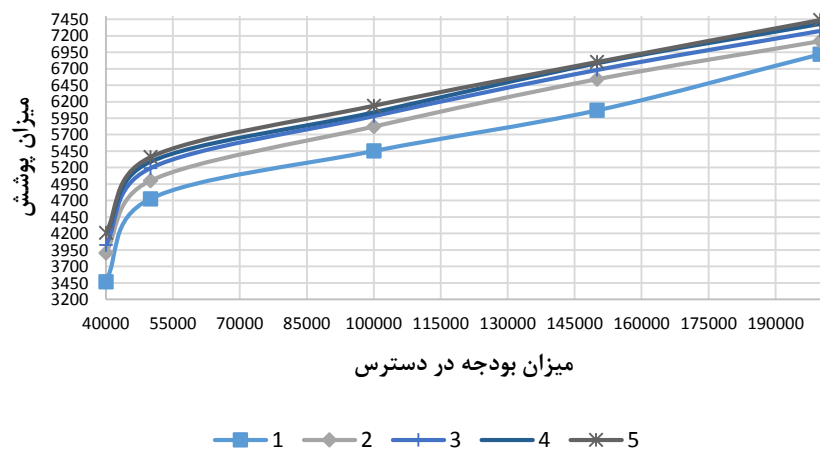


شکل ۴. تاثیر سطوح مختلف ریسک بر پوشش مسیرها

جدول ۳. روند تغییرات تابع هدف با توجه به تغییرات میزان بودجه در دسترس (b میلیون) با شعاع های پوشش کامل (L) و جزئی

(T) کیلومتر متفاوت

b	T = ۱۰۰ L = ۵۰	T = ۱۳۰ L = ۶۰	T = ۱۵۰ L = ۷۰	T = ۱۸۰ L = ۸۰	T = ۲۰۰ L = ۹۰
۲۰۰۰۰	۶۹۲۰/۹	۷۱۱۸/۸	۷۲۷۵/۲	۷۳۸۲/۴	۷۴۴۰/۴
۱۵۰۰۰	۶۰۶۹/۴	۶۵۴۰/۹	۶۶۸۲/۱	۶۷۸۴/۳	۶۸۰۳/۳
۱۰۰۰۰	۵۴۵۲/۶	۵۸۲۲/۲	۵۹۸۱/۶	۶۰۳۸/۴	۶۱۳۹/۷
۵۰۰۰	۴۷۲۶/۹	۵۰۰۰/۷	۵۱۹۱/۸	۵۲۸۷/۷	۵۳۵۹/۸
۴۰۰۰	۳۴۷۰/۲	۳۹۰۶/۷	۴۰۲۴/۵	۴۱۸۷/۶	۴۲۰۹/۵



شکل ۵. تاثیر سطوح مختلف بودجه در دسترس (میلیون) بر پوشش مسیرها

می باشد. این نتایج حاکی از آن است که شبکه مورد بررسی در این تحقیق در زمان معقولی به صورت دقیق قابل حل می باشد. همچنین شکل مذکور نشان می دهد که به صورت کلی با افزایش سطح ریسک قابل پذیرش، زمان حل کاهش می یابد.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

امروزه حمل و نقل مواد خطرناک و امداد رسانی در زمان حادثه ناشی از آن، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله مدلی دو سطحی برای طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک ارائه شد. هدف اصلی مدل مطرح شده، حداکثر سازی میزان پوشش شبکه بوده است.

۳-۵ بررسی رابطه همزمان مقدار تابع هدف با سطوح

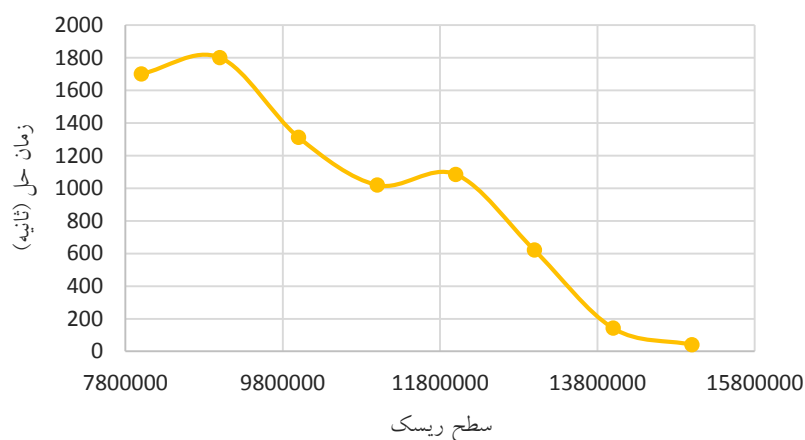
متفاوت ریسک و میزان بودجه در دسترس

در جدول ۴ میزان اثرگذاری سطوح متفاوت ریسک و میزان بودجه در دسترس به صورت همزمان بر مقدار تابع هدف در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل نشان دهنده آن است که از حیث میزان امداد رسانی، بودجه اثرگذاری بیشتری نسبت به پارامتر ریسک و یا به عبارتی سطح ریسک پذیری دارد. شکل ۶ مدت زمان حل مساله را برای مقادیر مختلف θ و مقدار $b = 200000$ نشان می دهد. بر اساس این شکل، حداقل زمان لازم برای حل مساله ۴۱ ثانیه و حداکثر زمان لازم برابر ۱۸۰۱ ثانیه

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

جدول ۴. روند تغییرات تابع هدف با توجه به تغییرات همزمان میزان بودجه در دسترس (b میلیون) و سطوح ریسک (θ) با شعاع پوشش کامل و جزئی ثابت $T=100$ و $L=50$ کیلومتر.

θ	$b = 40000$	$b = 50000$	$b = 100000$	$b = 150000$	$b = 200000$
8000000	3044/1	4405/9	5264/7	5909/1	6770/6
9000000	3470/2	4726/9	5371/8	6037/1	6870/7
10000000	3521/2	4787/5	5452/6	6069/4	6920/9
11000000	3570/3	4822/4	5486/6	6085/9	6935/7
12000000	3645/6	4893/1	5552/6	6099/9	6949/3
13000000	3770/2	4926/9	5603/5	6169/9	6960/3
14000000	3770/2	4926/9	5603/5	6169/9	6960/3
15000000	3770/2	4926/9	5603/5	6169/9	6960/3



شکل ۶. تاثیر سطوح مختلف ریسک قابل پذیرش بر زمان حل مساله ($b = 200000$ و $L=50 - T=100$)

وقوع حادثه است. از سوی دیگر شرکت های حمل و نقل به دنبال حداقل سازی هزینه های حمل و نقل خود، با توجه به مسیرهای احداث شده از جانب دولت هستند. تصمیمات دولت در رابطه با مکان یابی ایستگاه های امداد رسانی و احداث مسیرها، گزینه های بیشتری را برای انتخاب مسیر پیش روی شرکت های حمل و نقل قرار داده است، که در نتیجه باعث

سطح اول دولت و سطح دوم شرکت های حمل کننده هستند و رابطه رهبر - پیرو بین دو سطح وجود دارد. دولت به دنبال مکان یابی ایستگاه های امداد رسانی از بین مکان های کاندید، خرید تجهیزات این ایستگاه ها با در نظر گرفتن بودجه مناسب، احداث مسیرهایی در شبکه برای عبور جریان کالاهای خطرناک و حداقل سازی میزان پوشش مسیرها در صورت

۷. مراجع

-Amaldi, E., Bruglieri, M. and Fortz, B. (2011) "On the hazmat transport network design problem", Germany, Network Optimization.

-Ardjmand, E., Young, W. A., Weckman, G. R., Bajgiran, O. S., Aminipour, B. and Park, N. (2016) "Applying genetic algorithm to a new bi-objective stochastic model for transportation, location, and allocation of hazardous materials", Expert Systems with Applications, Vol. 51, No. 1, pp. 49-58.

-Assadipour, G., Ke, G. Y. and Verma, M. (2016) "A toll-based bi-level programming approach to managing hazardous materials shipments over an intermodal transportation network", Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 47, pp. 208-221.

-Beheshtinia, M. A., & Ghasemi, A. (2017). A multi-objective and integrated model for supply chain scheduling optimization in a multi-site manufacturing system. Engineering Optimization, pp. 1-19.

-Beheshtinia, M. A., Ghasemi, A., & Farokhnia, M. (2018) "Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system (case study: a drug manufacturing company)", Journal of Modelling in Management, Vol. 13, No.1, pp. 27-49.

-Berman, O., Drezner, Z., Krass, D. and Wesolowsky, G. O. (2009) "The variable radius covering problem.", European Journal of Operational Research, Vol. 196, No. 2, pp. 516-525.

-Berman, O., Verter, V. and Kara, B. Y. (2007) "Designing emergency response networks for

تسهیل و افزایش میزان پوشش شد. با در نظر گرفتن شرایط بهینگی، مدل دو سطحی غیر خطی را به مدل تک سطحی خطی تبدیل کرده و آن را در شرایط قطعی با نرم افزار CPLEX 12.6 و در شبکه ای فرضی با 12 گره (شهر) حل کرده ایم. نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت نشان می دهد که در نظر گرفتن همزمان طراحی شبکه و پاسخ دهی اضطراری، در افزایش میزان پوشش بسیار موثر است. همچنین طی تحلیل حساسیت های انجام شده دریافتیم که افزایش بودجه در دسترس و افزایش حداکثر معیار ریسک نیز باعث افزایش میزان پوشش شد. لازم به ذکر است که میزان پوشش نسبت به افزایش بودجه در دسترس حساسیت بیشتری از خود نشان داد. بدین صورت که هر چه میزان بودجه بیشتر افزایش یابد، رهبر قادر به احداث ایستگاه های امداد رسانی و مسیر های بیشتری خواهد بود و همچنین تجهیزات بیشتری برای مقابله با حوادث خریداری خواهد شد، در نتیجه میزان پوشش افزایش بیشتری داشت. در پایان به تجزیه تحلیل و اعتبار مدل پرداخته و مشاهده کردیم که بودجه در دسترس و معیار ریسک هر دو با میزان پوشش (تابع هدف) ارتباط مستقیم دارند و با افزایش بودجه و ریسک، میزان پوشش نیز افزایش پیدا کرد. در دنیای واقعی، نمونه های بسیاری از تصادفات مواد خطرناک وجود دارد. ما مدل را در شرایط قطعی حل کرده ایم. در پژوهش های آینده برای حل مدل، میتوان از بهینه سازی استوار در شرایط عدم قطعیت، بهره جست. در مدل ارائه شده، ایستگاه های امداد رسانی جهت مقابله با حوادث مواد خطرناک احداث می شوند. در تحقیقات آینده میتوان از واحدهای دیگر امداد رسانی از جمله خدمات اورژانس پزشکی، پلیس و یا آتش نشانی استفاده کرد. همچنین برای پژوهش های آتی، میتوان از الگوریتم های ابتکاری و یا فرابتکاری برای حل این مساله در ابعاد بزرگ استفاده کرد و توانایی حل این روش ها را با روش بکار برده شده در این مقاله مورد تحقیق قرار داد.

1. Hazardous Materials (Hazmat)
2. Emergency Response

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

- Drezner, Z., Wesolowsky, G. O. and Drezner, T. (2004) "The gradual covering problem", Naval Research Logistics (NRL), Vol. 51, No. 6, pp. 841-855.
- Erkut, E. and Alp, O. (2007) "Designing a road network for hazardous materials shipments", Computers & Operations Research, Vol. 34, No. 5, pp. 1389-1405.
- Erkut, E. and Gzara, F. (2008) "Solving the hazmat transport network design problem", Computers & Operations Research, Vol. 35, No. 7, pp. 2234-2247.
- Fortuny-Amat, J. and McCarl, B. (1981) "A representation and economic interpretation of a two-level programming problem", Journal of Operational Research Society, Vol. 32, No. 9, pp. 783-792.
- 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.
- Gzara, F. (2013) "A cutting plane approach for bilevel hazardous material transport network design", Operations Research Letters, Vol. 41, No. 1, pp. 40-46.
- Hamouda, G. (2004) "Risk-based decision support model for planning emergency response for hazardous materials road accidents", Waterloo, Ontario, Canada, UWspace.
- Jiahong, Z. and Bin, S. (2010) "A new multi-objective model of location-allocation in emergency response network design for hazardous materials transportation", Emergency Management and Management Sciences Conference, pp. 246-249
- hazardous materials", transportation. Computers & operations research, Vol. 34, No. 5, pp. 1374-1388.
- 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.
- Bianco, L., Caramia, M., Giordani, S. and Piccialli, V. (2016). "A game-theoretic approach regulating hazmat transportation", Transportation Science, Vol. 50, No. 2, pp. 424-438.
- Borumand, A. and Beheshtinia, M. A. (2018) "A developed genetic algorithm for solving the multi-objective supply chain scheduling problem. Kybernetes, Vol. 47, No. 7, pp.??
- Carotenuto, P., Giordani, S. and Ricciardelli, S. (2007) "Finding minimum and equitable risk routes for hazmat shipments", Computers & Operations Research, Vol. 34, No. 5, pp. 1304-1327.
- Chen, L. and Yuan, D. (2010) "Solving a minimum-power covering problem with overlap constraint for cellular network design", European Journal of Operational Research, Vol. 203, No. 3, pp. 714-723.
- Chiou, S. W. (2016) "A bi-objective bi-level signal control policy for transport of hazardous materials in urban road networks", Transportation research part D: Transport and Environment, Vol. 31, No. 42, pp. 16-44.
- 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.

for hazardous materials transportation with uncertain demand", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 3, No. 5, pp. 893-906.

-Sun, L., Karwan, M. H. and Kwon, C. (2015) "Robust hazmat network design problems considering risk uncertainty", *Transportation Science*, Vol. 50, No. 4, pp. 1188-1203.

-Taslimi, M., Batta, R. and Kwon, C. (2017) "A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk", *Computers & Operations Research*, Vol. 79, pp. 119-130.

-United Nations (2009) "Recommendations on the transport of dangerous goods, model regulations", New York, United Nations Publications.

-Xin, C., Qingge, L., Wang, J. and Zhu, B. (2015) "Robust optimization for the hazardous materials transportation network design problem", *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 30, No. 2, pp. 320-334.

-Xu, J., Gang, J. and Lei, X. (2013) "Hazmat transportation network design model with emergency response under complex fuzzy environment", *Mathematical Problems in Engineering*, Chengdu: May 2013.

-Zegordi, S. H., Abadi, I. K. and Nia, M. B. (2010) "A novel genetic algorithm for solving production and transportation scheduling in a two-stage supply chain", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, pp. 373-381.

نخعی کمال آبادی، عیسی و حسینی، اقبال و فتحی، محمد (1393) "توسعه روش های حل برنامه ریزی دو سطحی خطی بر اساس روش شمارش ضمنی و روش دوگان"، *مجله مدل سازی پیشرفته ریاضی*، سال چهارم، شماره اول، ص. ۵۳-۲۷.

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

-Kara, B. Y. and Verter, V. (2004) "Designing a road network for hazardous materials transportation", *Transportation Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 188-196.

-List, G. F. and Turnquist, M. A. (1998) "Routing and emergency-response-team siting for high-level radioactive waste shipments", *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 45, No. 2, pp. 141-152.

-Liu, X. (2017) "Optimizing rail defect inspection frequency to reduce the risk of hazardous materials transportation by rail", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 48, pp. 151-161.

-Melkote, S., and Daskin, M. S. (2001). "An integrated model of facility location and transportation network design", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, No. 6, pp. 515-538.

-Mohammadi, M., Jula, P. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017) "Design of a reliable multi-modal multi-commodity model for hazardous materials transportation under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 257, No. 3, pp. 792-809.

-Pradhananga, R., Taniguchi, E., Yamada, T. and Qureshi, A. G. (2014) "Bi-objective decision support system for routing and scheduling of hazardous materials", *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 48, No. 2, pp. 135-148.

-Rezaei Ehsan, E., Makui, A. and Shahanaghi, K. (2012) "Emergency response network design

مقاله پژوهشی : یک مدل ریاضی دو سطحی برای مساله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن...

رخساره ترابی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب اخذ نمود و در حال حاضر دانشجوی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع گرایش لجستیک و زنجیره تامین در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مکان یابی و حمل و نقل مواد خطرناک است.



آرمین جبارزاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه سازی در زنجیره تامین و لجستیک، برنامه ریزی تولید و موجودی و بهینه سازی کاربردی در شرایط عدم قطعیت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



محسن یحیایی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه علوم و فنون مازندران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه شاهد تهران اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری در رشته مهندسی صنایع در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی شبکه لجستیک، مکانیابی تسهیلات و بهینه سازی در شرایط عدم قطعیت است.

