

# توسعه مدل بهینه سازی جابجایی و حمل و نقل مواد خطرناک

سید محمد سید حسینی<sup>i</sup>؛ امیرسامان خیرخواه<sup>ii</sup>

## چکیده

در این مقاله، مسأله تعیین مسیرهای بهینه برای جابجایی های مواد خطرناک بررسی شده است. مسیریابی یا تعیین مسیر مناسب حمل و نقل، یکی از راه های کاهش خطرات جابجایی مواد خطرناک است که محققین آن را بررسی و مدل های متفاوتی تاکنون در این مورد ارائه کرده اند. این مدل ها را می توان به دو دسته تقسیم کرد: مدل هایی که برای تعیین مسیر یک جابجایی توسعه یافته و مدل هایی که مسیرهای چندین جابجایی را مشخص می کنند. در این مقاله، با توجه به مقررات حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک در ایران، یک مسأله مسیریابی طرح می شود. در این مسأله، باید مسیر بهینه چندین جابجایی مستقل بطور همزمان مشخص شود. ابعاد و ویژگی های خاص این مسأله به کمک بررسی یک مورد خاص؛ یعنی جابجایی دو نوع ماده خطرناک در شبکه راه های استان مازندران تشریح می شود و از روش برنامه ریزی ریاضی (برنامه ریزی عدد صحیح) برای فرموله کردن و تحلیل مسأله مسیریابی استفاده می شود.

## کلمات کلیدی

حمل و نقل، مواد خطرناک، مسیریابی، خطر، برنامه ریزی ریاضی، برنامه ریزی عدد صحیح، مدل سازی.

## *An Optimization Model for Transportation of Hazardous Materials*

S.M. Seyed-Hosseini; A.S. Kheirkhah.

### ABSTRACT

In this paper, the optimal routing problem for transportation of hazardous materials is studied. Routing for the purpose of reducing the risk of transportation of hazardous materials has been studied and formulated by many researchers and several routing models have been presented up to now. These models can be classified into two categories: the models for routing a single movement and the models for routing multiple movements. In this paper, according to the current rules and regulations of road transportation of hazardous materials in Iran, a routing problem is designed. In this problem, the routes for several independent movements are simultaneously determined. To examine the model, the problem of transportation of two different dangerous materials in the road network of Mazandaran province in the north of Iran is formulated and solved by applying Integer programming model.

### KEYWORDS

Transportation, Hazardous Materials, Routing, Risk, Integer Programming, Modeling

<sup>i</sup> دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران: seyedhoseini@yahoo.com

<sup>ii</sup> استادیار دانشگاه بوعلی سینا: kheirkhah@iust.ac.ir

حداقل سازی مقیاس خطر جمعی در کل شبکه حمل و نقل و با در نظر داشتن معیار حدی خطر جمعی در هر بخش از شبکه جاده ای صورت گیرد.

این درحالی است که در مدل هایی که تاکنون ارائه شده است یا مسیر برای یک نوع جابجایی بخصوص تعیین می شود و یا اینکه مسیرهای چندین جابجایی مشابه از نظر نوع وسیله و نوع ماده خطرناک و زمان انجام حمل و نقل معین می شود. این تفاوت ها به فرایند تحلیل و فرموله کردن و سپس به حصول یک مدل متفاوت منجر می شود. ساختار مدل جدید در این مقاله طرح شده و ویژگی های خاص آن به کمک طرح یک مسأله خاص تشریح می شود. در ادامه، ابتدا ادبیات موجود در زمینه مسیر یابی در حمل و نقل مواد خطرناک مرور می شود، سپس در بخش سه، مسأله مسیریابی به طور دقیق، در مورد جابجایی دو نوع ماده خطرناک بر روی بخشی از شبکه جاده ای استان مازندران طرح و سپس فرضیات این مسأله بیان می شود. در این بخش، به منظور فرموله کردن مسأله در قالب یک مدل برنامه ریزی ریاضی، متغیرهای تصمیم تعریف و ضمن تحلیل ویژگی های مسأله، تابع هدف و محدودیت های مسأله نیز تعریف می شوند و در بخش چهارم، مدل مسیریابی ارائه و مسأله مسیر یابی با فرضیات مختلف حل می شود. نهایتاً در بخش آخر، جمع بندی و نتیجه گیری از مطالب ارائه می شود.

## ۲- مدل های مسیریابی مواد خطرناک

در زمینه مسیریابی، مدل های موجود به دو دسته تقسیم می شوند: مدل های تعیین مسیر برای یک جابجایی و مدل های تعیین مسیر برای چند جابجایی. مدل های مسیریابی برای یک جابجایی نیز به سه دسته تقسیم می شوند: مدل های تک معیاره، مدل های چند معیاره و مدل های پویا.

### ۲-۱- مدل ها و روش های مسیریابی برای یک جابجایی

در مورد یک جابجایی، ماده خطرناکی که حمل می شود، نوع بارگیر و نحوه بارگیری آن و نوع وسیله نقلیه و نیز مبدا و مقصد حرکت مشخص است (در واقع این موارد، در کل این مقاله به عنوان مشخصه های یک جابجایی در نظر گرفته می شوند). در مدل ها و روش هایی که در این بخش مرور می شود، نحوه ارزیابی و مقایسه و انتخاب یک مسیر از بین مسیرهای موجود برای انجام یک جابجایی بیان شده است. این مدل ها و روش ها در سه گروه قرار می گیرند: مدل های تک هدفه و یا تک معیاره، مدل های چندهدفه و مدل های پویا (مدل هایی که تغییرات مشخصه های مسیر در طول زمان جابجایی را در نظر می گیرند).

منظور از مواد خطرناک، مجموعه هایی از مواد و اقلام است که به دلیل خصوصیات ویژه ای که دارند، نظیر قابلیت انفجار، قابلیت اشتعال، سمی بودن، اکسید کننده بودن، قابلیت ایجاد خوردگی، داشتن پرتوهای خطرناک و یا به خاطر نحوه حمل و نقل آنها؛ مانند گازهای متراکم و یا موارد دیگر؛ مانند مواد مذاب و ... قابلیت بالایی در آسیب رساندن به سلامت انسان ها و یا محیط زیست و یا تخریب اموال و از جمله تاسیسات و تسهیلات زیر بنایی حمل و نقل نظیر پل ها و تونل ها را دارند. در حال حاضر مواد و کالاهای خطرناک با کامیون ها و وسایل ویژه حمل و نقل این مواد بین نقاط مختلف از شبکه جاده ای کشور جابجا می شوند. انجام این جابجایی ها سلامت افرادی را که در جاده ها درحال تردد هستند و یا ساکنین اطراف مسیرهای حمل و نقل را در معرض خطر قرار می دهد. نظر به اینکه سلامت افراد در اثر وقوع تصادف و آزاد شدن ماده خطرناک از کانتینر ممکن است تهدید شود و راه ها و مسیرهای مختلف شبکه جاده ای از نظر احتمال وقوع تصادف، پراکندگی جمعیت پیرامونی و حجم ترافیک و تردد، یکسان نیستند، لذا می توان با انتخاب مسیر مناسب برای جابجایی های مختلف میزان خطرات این جابجایی ها را کاهش داد و یا با توجه به معیارهای حدی کنترل خطر، آنها را کنترل کرد.

محققان این عرصه به مسأله کاهش و یا کنترل خطر حمل و نقل مواد خطرناک از طریق انتخاب مسیر مناسب، توجه کرده اند و مدل های متفاوتی در قالب مقاله ها در این زمینه ارائه شده است. جدا از مقالات و متونی که در خصوص ارزیابی خطرات حمل و نقل مواد خطرناک نوشته شده است، سایر مقالات، مسأله مسیریابی را به صورت یک مسأله برنامه ریزی ریاضی فرموله کرده اند. در این مقاله نیز مسأله مسیریابی به صورت یک مسأله برنامه ریزی ریاضی فرموله می شود.

تفاوت مسأله در اینجا، نسبت به مسائل مطرح شده در سایر مقالات در نوع جابجایی ها، چگونگی و معیارهای انتخاب مسیرهاست؛ اولاً؛ در اینجا فرض می کنیم مسیر جابجایی هایی که در یک دوره زمانی مشخص انجام می شود، بوسیله یک سازمان ناظر، مانند سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای کشور و یا یکی از شرکت های تابعه آن (و یا یک سازمان مشابه) مشخص و سپس حمل و نقل به وسیله شرکت هایی مستقل از این سازمان انجام می شود. ثانیاً؛ به منظور انتخاب مسیرها دوتنوع مقیاس برای سنجش خطر (مقیاس خطر فردی و جمعی) تعریف می شود. مقیاس خطر جمعی را می توان برای کل شبکه حمل و نقل و یا برای هر بخش از راه های شبکه تعریف کرد. در اینجا فرض بر آن است که انتخاب مسیرها باید با هدف

در مقاله باتا و چپو [۱]، دو مقیاس برای ارزیابی خطر یک جابجایی برای افراد اطراف مسیر تعریف شده است. مقیاس اول، جمع کل زمان هایی را می سنجد که افراد اطراف مسیر در معرض خطر قرار دارند. مقیاس دوم، مقدار انتظاری خسارات (تعداد انتظاری تلفات) ناشی از یک جابجایی بر روی یک مسیر است. در این مقاله نشان داده می شود که با فرض کوچک بودن مقدار احتمال تصادف در واحد طول، از هر راه می توان مقیاس خطر برای یک مسیر را با جمع مقیاس خطر برای هر بخش از مسیر به دست آورد و در نتیجه، یافتن مسیر بهینه از نظر مقیاس خطر نیز با بکار گیری روش هایی؛ مانند روش دایکسترا [۲]، امکان پذیر است.

در مقاله ارکوت و ورتتر [۳]، ضمن اشاره به فرضیات مقاله فوق در ارزیابی مقیاس خطر، نحوه محاسبه مقیاس خطر جمعی، وقتی که مسیر از میان یک مرکز شهری می گذرد، ارائه شده است.

در مقاله کارکازیس و بوفی [۴]، فرض بسیار کوچک بودن مقدار احتمال وقوع تصادف و خارج شدن ماده خطرناک، نادیده گرفته شده است و چون روش دایکسترا [۲] در این رابطه مناسب نبوده و روشی جدید مبتنی بر جستجوی شاخه و کران ارائه شده است.

با در نظر داشتن فرضیات مقاله ارکوت و ورتتر [۳]، در مقاله ارکوت و اینگلسون [۵] اشاره شده است که در تعریف مقیاس خطر به صورت تعداد انتظاری تلفات، ریسک گریز بودن مردم و تصمیم گیرندگان در مواجهه با پیشامدها؛ که تلفات زیادی دارند؛ ولی احتمال وقوعشان کم است، در نظر گرفته نشده است. در ادامه این مقاله اشاره می شود که مسیریابی به منظور پرهیز از فاجعه (یا حادثه ای که تلفات بسیار زیادی به همراه دارد) می تواند یک کار عاقلانه در حمل و نقل مواد خطرناک باشد. بر این اساس، سه مدل در این مقاله ارائه شده است: در مدل اول، پرهیز از فاجعه با حداقل کردن حداکثر جمعیتی که در اثر حادثه در معرض خطر قرار می گیرند، حاصل می شود؛ در مدل دوم، واریانس تعداد تلفات در یک مسیر در تابع هدف وارد شده است و در مدل سوم، از تابع مطلوبیت استفاده شده است.

در مقاله ارکوت و گلیکمن [۶]، یک مدل مسیریابی دوهدفه ارائه شده است. در این مدل، تابع هدف اول، حداقل سازی زمان حمل و نقل و تابع هدف دوم، حداقل سازی حداکثر جمعیتی است که بر اثر تصادف و آزاد شدن ماده خطرناک در معرض خطر قرار می گیرند. در این مقاله، روشی برای حل مدل و یافتن راه حل های غیر مغلوب<sup>۱</sup> مسأله (راه حل هایی که هیچ جواب شدنی دیگری از نظر هر دو معیار به طور همزمان بهتر از آنها وجود ندارد) ارائه شده است. در مقاله ویجراتن و دیگران [۷]، روشی برای تعیین مسیرهای غیرمغلوب درحالتی که بعضی از

معیارها متغیری تصادفی هستند، ارائه و کاربرد مدل در مورد حمل و نقل مواد خطرناک بایک مثال تشریح شده است. در مقاله کلین [۸]، مدلی چند هدفه و با اهداف فازی ارائه، و از برنامه ریزی پویای تعمیم یافته برای توسعه الگوریتمی به منظور تعیین جواب های موثر برای مدل استفاده شده است.

میلر هوکس و مهمسانی [۹]، نوزیک و دیگران [۱۰] و آلپ و ارکوت [۱۱] مدل هایی پویا برای مسیریابی و زمانبندی همزمان حمل و نقل مواد خطرناک ارائه کرده اند.

## ۲-۲- مدل ها و روش های مسیریابی برای چند جابجایی

در مقاله گوپالان و دیگران [۱۲]، ضمن در نظر گرفتن فرضیات مقاله ارکوت و ورتتر [۳]، و تعریف مقیاس خطر به صورت تعداد تلفات انتظاری، به این نکته اشاره شده است که انجام چند جابجایی بر روی یک مسیر، موجب توزیع نابرابر خطر در نواحی مختلف می شود و این امر، نامطلوب است. در این مقاله، این مسأله برای حالتی که چند جابجایی مشابه بین یک مبدا و مقصد مشخص انجام می شوند، فرموله شده و با توجه به ساختار خاص مسأله (به دلیل در نظر گرفتن توزیع خطر) یک روش ابتکاری برای حل مسأله ارائه شده است.

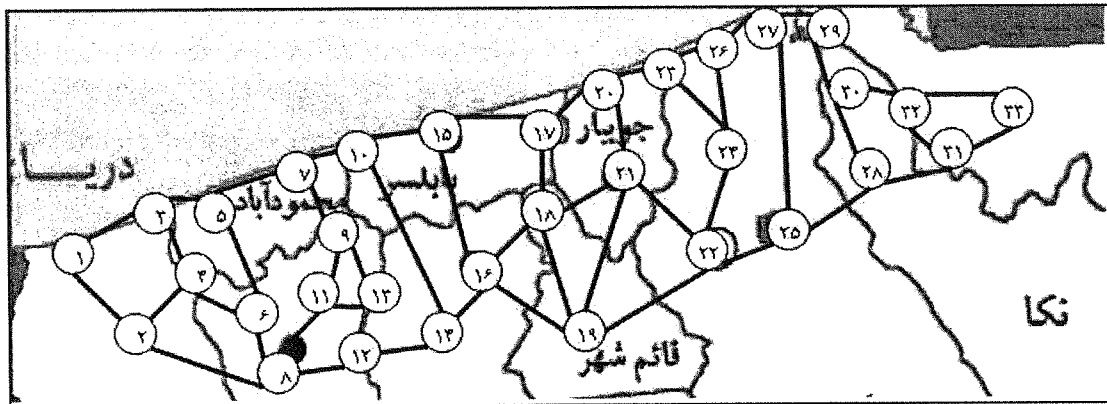
در مقاله سیواکومار و دیگران [۱۳]، فرض شده است که یک نوع جابجایی بین یک مبدا و مقصد مشخص، تا وقوع یک حادثه تکرار می شود؛ از این رو در مدل آنها، حداقل سازی خسارات انتظاری به شرط وقوع یک حادثه، تابع هدف در نظر گرفته شده است. در مقاله جین و دیگران [۱۴]، شرایطی مشابه شرایط مقاله سیواکومار و دیگران [۱۳]، ارائه شده است؛ با این تفاوت که در آن فرض شده است جابجایی ها تعداد مشخصی دارند و هنگامی حمل و نقل متوقف می شود که یا تمام جابجایی ها انجام و یا تعداد مشخصی از جابجایی ها به علت تصادف و آزاد شدن ماده خطرناک متوقف شده باشند.

در مقاله شیرعلی و دیگران [۱۵]، فرض بر این اساس است که جابجایی ها تا وقوع یک حادثه فاجعه آمیز؛ یعنی حادثه ای که تلفات گسترده ای دارد، ادامه می یابد. سایر فرضیات در مورد جابجایی ها مشابه مقاله [۱۳] است. در مدل های فوق الذکر فرض شده است که یک نوع جابجایی، چند مرتبه و در شرایطی مشابه بین یک جفت مبدا و مقصد مشخص تکرار می شود.

در مقاله لئونلی و دیگران [۱۶]، فرض شده است که در شبکه جاده ای، چند مرکز عرضه و چند مرکز تقاضا برای یک نوع ماده خطرناک وجود دارد و هدف، تعیین تعداد بهینه جابجایی بین نقاط عرضه و تقاضا و مسیر بهینه هر جابجایی است، به نحوی که جمع هزینه های عملیات حمل و نقل (سوخت و ...) و هزینه انتظاری حوادث احتمالی حین حمل و نقل به

حداقل برسد. از آنجا که در این مقاله فرض شده تامین تقاضای هر محل تقاضا از هر محل عرضه امکان پذیر است، ساختار کلی

مدل ارائه شده در این مقاله ساختار مسأله کم هزینه ترین جریان در شبکه<sup>۲</sup> [۲] را پیدا کرده است.



شکل (۱): شبکه  $T(N,A)$  مدل

### ۳- تعریف و فرموله کردن مسأله

با فرض لزوم انجام جابجایی مواد خطرناک بین نقاط مختلف یک شبکه جاده ای، مسأله مورد نظر در اینجا، تعیین مسیر بهینه برای انجام این جابجایی هاست. برای یک جابجایی، دو مشخصه اصلی در نظر می گیریم: ۱- مبدأ و مقصد، ۲- نوع وسیله حمل و نقل ( و در نتیجه شرایط بار گیری و نوع ماده خطرناک). براساس این دو مشخصه، جابجایی ها را گروه بندی می کنیم: جابجایی های داخل هر گروه مشابه اند و باید برای تمامی آنها یک مسیر مشخص شود؛ اما جابجایی هایی که متعلق به یک گروه نیستند، لزوماً مشابه نیستند و در نتیجه مسیر های متفاوتی می توانند داشته باشند.

تعدادی انتظاری افرادی را که بر اثر تماس با ماده خطرناک در نتیجه یک تصادف جاده ای آسیب می بینند ( تلف می شوند) به عنوان مقیاس خطر جمعی در نظر می گیریم. از این نظر، مسیرها باید به گونه ای تعیین شوند که پس از انجام تمام جابجایی ها اولاً، مقیاس خطر جمعی برای منطقه مورد مطالعه

به حداقل برسد و ثانیاً، این مقیاس خطر در بعضی از نواحی، به علت تردد زیاد وسایل حمل مواد خطرناک، بیش از حد بالا نرود.

به عنوان یک مورد خاص، حمل و نقل دو نوع ماده خطرناک بر روی بخشی از شبکه راه های جاده ای استان مازندران در نظر می گیریم و مسأله را به ترتیب زیر فرموله می کنیم:

۱- ابتدا شبکه حمل و نقل توصیف می شود

۲- مشخصات جابجایی ها بیان می شود

۳- متغیر تصمیم تعریف می شود و تابع هدف و محدودیت های مسأله مشخص می شوند.

### ۳-۱- توصیف شبکه حمل و نقل

شبکه حمل و نقل  $T(N,A)$  در اینجا نشانگر بخشی از شبکه جاده ای در استان مازندران است، گره های آن منطبق بر نقاطی از راه های این استان و کمان های آن منطبق بر راه های واصل بین این نقاط است.

شکل (۱) ساختار شبکه و موقعیت آن در استان را به صورت تقریبی نشان می دهد. همان طور که در شکل (۱) مشخص است، این شبکه ۳۳ گره و ۵۱ راه دوطرفه ( یا ۱۰۲ کمان ) دارد و به دلیل آنکه حرکت در هر دو جهت هر راه مجاز است، هر راه در شبکه به صورت یک خط مستقیم ( بدون نشان دادن جهت حرکت) در شکل نشان داده شده است.

### ۳-۲- مشخصات جابجایی ها

دو نوع وسیله و چهار جابجایی در این بخش مطابق با جدول (۱) تعریف می شود. وسایل حمل و نقل عبارتند از: نفتکش حامل مایع قابل اشتعال با ظرفیت ۲۵۰۰۰ لیتر ( $V=1$ ) و

کامیون مخزن‌دار (تانکر) حامل گاز مایع قابل اشتعال با ظرفیت ۱۰ تن ( $v=2$ ).

جدول (۱): جابجایی‌ها در شبکه مورد مطالعه

دفعات حمل و نقل	وسیله (v)	مقصد-مبدا	جابجایی (mo)
۲	۱	۱-۱۸	۱
۱	۲	۸-۲۳	۲
۱	۲	۱۶-۲۴	۳
۲	۱	۲۸-۲۴	۴

با توجه به مشخصه جابجایی‌ها و شبکه حمل و نقل و با استفاده از روش ارائه شده به وسیله ارکوت و ورتن در [۳] و همچنین با استفاده از داده‌های منطقه‌ای، تعداد انتظاری افراد آسیب دیده در مراکز جمعیتی اطراف مسیر، به شرط انجام جابجایی بر روی هر کمان از شبکه (یا مقیاس خطر جمعی) محاسبه شده و در جدول (۴) برای هر جابجایی ارائه شده است.

### ۳-۳- تعریف متغیرهای تصمیم و تابع هدف

با توجه به تعریف مسأله و فرضیات ارائه شده، مسأله تصمیم‌گیری عبارت از تعیین مسیر برای هر جابجایی است. با توجه به اینکه هر مسیر، ترکیبی از کمان‌هاست، باید تعیین کنیم مسیر هر جابجایی از چه کمان‌هایی از شبکه تشکیل شده است. بنابراین، متغیرهای تصمیم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_{(i,j),mo} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کمان } (i,j) \text{ در مسرتجانب } mo \\ 0 & \text{اگر کمان } (i,j) \text{ در مسرتجانب } mo \text{ نباشد.} \end{cases}$$

با توجه به تعریف متغیرهای تصمیم، اکنون می‌توانیم تابع هدف را مشخص سازیم: هدف، حداقل سازی تعداد انتظاری کل افرادی است که از تمام جابجایی‌ها آسیب می‌بینند. اگر جابجایی  $mo$  بر روی کمان  $(i,j)$  انجام شود، تعداد انتظاری افراد آسیب دیده در مراکز جمعیتی  $a_{(i,j),mo}$  خواهد بود، اما بجز این مقادیر، رانندگان و مسافرینی که بر روی راه‌های شبکه نیز در حرکت هستند، در اثر حادثه آسیب می‌بینند. تعداد انتظاری این افراد را برای انجام جابجایی  $mo$  بر روی کمان  $(i,j)$  به وسیله  $a'_{(i,j),mo}$  نشان می‌دهیم. بنابراین، مقدار انتظاری کل افراد آسیب دیده حاصل از انجام جابجایی  $mo$  بر روی کمان  $(i,j)$  یا  $R_{(i,j),mo}$  به وسیله رابطه (۱) مشخص می‌شود.

$$R_{(i,j),mo} = a'_{(i,j),mo} + a_{(i,j),mo} \quad (1)$$

در این مقاله نیز مانند مقالات [۲] و [۱] با توجه به کوچک بودن مقدار احتمال وقوع یک حادثه برای وسیله حامل ماده خطرناک، مقدار انتظاری کل تعداد افراد آسیب دیده حاصل از انجام جابجایی بر روی یک مسیر را با جمع این مقادیر انتظاری برای انجام جابجایی بر روی کمان‌های مسیر به دست می‌آوریم. بنابراین، با توجه به تعریف متغیرهای تصمیم، برای هر تصمیم برای جابجایی  $mo$  مقدار انتظاری کل افراد آسیب دیده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_{mo} = \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j),mo} \cdot x_{(i,j),mo} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $A$  مجموعه کل کمان‌های شبکه حمل و نقل است. با توجه به مطالب فوق، تابع هدف به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$Z = \sum_{mo=1}^{N_{mo}} R_{mo} = \sum_{mo=1}^{N_{mo}} \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j),mo} \cdot x_{(i,j),mo} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $N_{mo}$  تعداد کل جابجایی‌هاست. مقدار  $a'_{(i,j),mo}$  مانند مقادیر  $a_{(i,j),mo}$  محاسبه می‌شود. مقادیر  $R_{(i,j),mo}$  که مورد نیاز در اینجا است، در جدول (۴) ارائه شده است.

یکی از ویژگی‌های این تابع هدف، آن است که از جمع  $R_{mo}$ ‌ها بدست آمده است. در نتیجه، اگر جابجایی‌های  $mo$  وابستگی نداشته باشند، حداقل تابع هدف از جمع مقادیر حداقل  $R_{mo}$  به دست می‌آید؛ یعنی می‌توانیم مسیر بهینه را برای هر جابجایی بدون در نظر گرفتن سایر جابجایی‌ها به دست آوریم. مسیر یابی برای هر جابجایی به وسیله روش یافتن کوتاه‌ترین مسیر در شبکه‌ها [۲] به سادگی قابل انجام است. در

جدول (۲) کوتاه‌ترین مسیرها و کم‌خطرترین مسیرها برای چهار جابجایی تعریف شده در این مقاله، مشخص شده است.

همانطور که مشخص است، کوتاه‌ترین مسیر و کم‌خطرترین مسیر برای هر جابجایی یکی نیست. این اختلافات نشان می‌دهند که ممکن است مسیرهای بهینه تعیین شده به وسیله مدل از نظر شرکت‌های حمل و نقل مناسب نباشد و بنابراین اعمال محدودیتی بر روی طول مسیرها ممکن است، الزامی باشد؛ (فرض بر این است که از نظر شرکت‌های حمل و نقل، مسیرهای کوتاه‌تر مطلوب‌تر است) در این مقاله، این محدودیت‌ها اعمال نمی‌شوند.

جدول (۲): کوتاه‌ترین و کم‌خطرترین مسیرها برای هر جابجایی

جابجایی	کوتاه ترین مسیر	کم خطر ترین مسیر
۱	۱-۲-۵-۷-۱۰-۱۵-۱۷-۱۸	۱-۲-۸-۱۲-۱۴-۱۶-۱۸
۲	۸-۱۲-۱۴-۱۶-۱۹-۲۲-۲۵-۲۸-۳۲-۳۳	۸-۱۲-۱۴-۱۶-۱۹-۲۲-۲۴-۲۶-۲۷-۲۹-۳۰-۳۲-۳۳
۳	۱۶-۱۸-۲۱-۲۰-۲۳-۲۴	۱۶-۱۹-۲۲-۲۴
۴	۲۴-۲۲-۲۵-۲۸	۲۴-۲۶-۲۷-۲۹-۳۰-۳۲

### ۳-۴- محدودیت های مسأله

$$\sum_{mo=1}^{N_{mov}} a_{(i,j),mo} \cdot x_{(i,j),mo} + \sum_{mo=1}^{N_{mov}} a_{(j,i),mo} \cdot x_{(j,i),mo} \leq UR_{(i,j)} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، سمت چپ نامعادله، تعداد انتظاری کل افراد آسیب دیده بر اثر انجام جابجایی بر روی کمان های  $(i,j)$  و  $(j,i)$  و یا به طور کلی راه  $\{i,j\}$  از شبکه و  $UR_{(i,j)}$  حد بالای این مقدار است. در مورد مثال بررسی شده در این مقاله؛ یعنی حمل و نقل دو نوع ماده خطرناک در شبکه راه های جاده ای استان مازندران، مقادیر  $UR_{(i,j)}$  با در نظر گرفتن یک حد بالا برای مقیاس خطر فردی و تعداد کل افرادی که بر اثر انجام جابجایی بر روی راه  $\{i,j\}$  آسیب می بینند، مشخص شده و در جدول (۵) ارائه شده است.

### ۴- ارائه و تحلیل مدل مسیریابی

با توجه به تعریف تابع هدف و محدودیت های مسأله مدل مسیریابی را می توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$\text{Min} : Z = \sum_{mo=1}^{N_{mo}} R_{mo} = \sum_{mo=1}^{N_{mo}} \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j),mo} \cdot x_{(i,j),mo}$$

$$\sum_{j \in N} x_{(O_{mo},j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,O_{mo}),mo} = 1$$

$$\sum_{j \in N} x_{(l,j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,l),mo} = 0 \dots \forall l \in A \& mo \quad (۷)$$

$$\sum_{j \in N} x_{(D_{mo},j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,D_{mo}),mo} = -1$$

$$\sum_{mo=1}^{N_{mov}} a_{(i,j),mo} \cdot x_{(i,j),mo} + \sum_{mo=1}^{N_{mov}} a_{(j,i),mo} \cdot x_{(j,i),mo} \leq UR_{(i,j)} \quad \forall \{i,j\}$$

$$x_{(i,j),mo} \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in A \& mo = 1, \dots, N_{mo}$$

مدل فوق نشان دهنده یک مسأله برنامه ریزی عدد صحیح یا برنامه ریزی صفر و یک است و بجز محدودیت های صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم، دارای  $(|N|+2) \cdot N_{mo} + |A|/2$  محدودیت است. در مسأله مورد بررسی این مقدار برابر است با  $191 = (33+2) \cdot 4 + 51$  و به همین دلیل حل آن دشوار است بویژه با این علم که نمی توانیم محدودیت صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم را حذف کنیم.

برای نشان دادن الزامی بودن اعمال شرط صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم، مدل فوق را در دو حالت برای دو مورد خاص فرموله کردیم؛ در مورد اول فرض کردیم تنها

از آنجا که متغیرهای تصمیم مشخص می کنند که آیا کماتی متعلق به مسیر انجام جابجایی  $mo$  هست یا خیر، باید کمان های مشخص شده به وسیله مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم یک مسیر را مشخص کنند. بنابراین، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم باید در محدودیت هایی موسوم به محدودیت های موازنه جریان؛ که به ترتیب زیر برای هر جابجایی نوشته می شود، صدق کنند:

$$\sum_{j \in N} x_{(O_{mo},j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,O_{mo}),mo} = 1$$

$$\sum_{j \in N} x_{(l,j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,l),mo} = 0 \quad l = 1, \dots, |N|$$

$$\sum_{j \in N} x_{(D_{mo},j),mo} - \sum_{i \in N} x_{(i,D_{mo}),mo} = -1 \quad (۴)$$

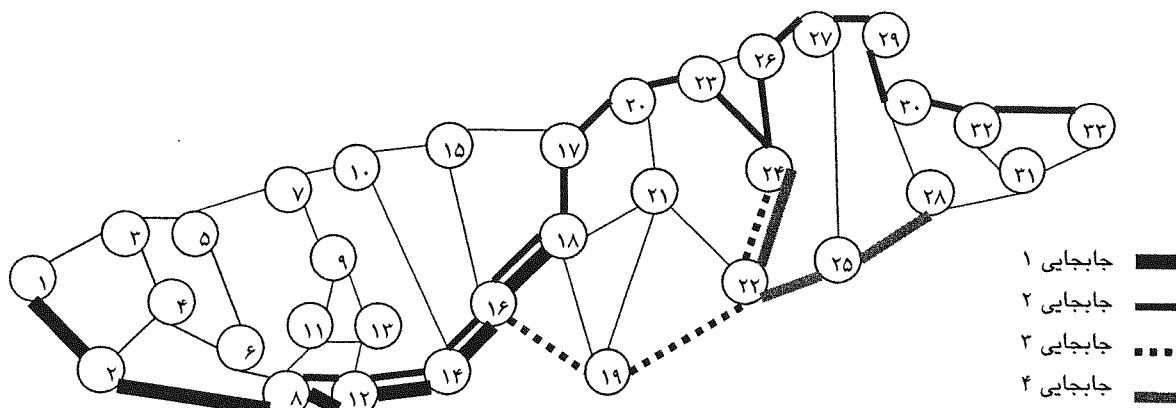
در مجموعه معادلات فوق  $O_{mo}$  و  $D_{mo}$  به ترتیب، شماره گره های مشخص کننده مبدا و مقصد برای جابجایی  $mo$  هستند و  $N$  مجموعه گره های شبکه است. علاوه بر این محدودیت صفر یا یک بودن متغیرهای تصمیم باید در مدل مسأله در نظر گرفته شود:

$$x_{(i,j),mo} \in \{0,1\}, \quad (۵)$$

از آنجا که مجموعه محدودیت های فوق هیچگونه وابستگی بین انتخاب مسیر جابجایی های مختلف ایجاد نمی کنند، در صورتی که محدودیت های دیگری وجود نداشته باشد، هدف با انتخاب کم خطرترین مسیرها برای هر جابجایی حاصل می شود جدول (۲)؛ اما اتخاذ چنین تصمیم هایی، باعث می شود بر روی بخش هایی از شبکه حمل و نقل چندین جابجایی انجام شود. به عنوان مثال، بخش ها (۱۹،۱۶) و (۲۲،۱۹) در مسیرهای بهینه جابجایی های دو و سه مشترک است. این موضوع باعث می شود خطر جمعی و فردی در مراکز جمعیتی مجاور این بخش ها بالا برود. از نظر ایمنی، علاوه بر اینکه باید به دنبال حداقل کردن مقدار کل خطر جمعی باشیم، باید مسیرها را به گونه ای تعیین کنیم که مقدار مقیاس های خطر فردی (احتمال آسیب دیدن یک نفر) و جمعی در مراکز جمعیتی؛ که در مجاورت مسیرهای حمل و نقل هستند، بیش از حد بالا نرود. در این مقاله این محدودیت با در نظر گرفتن نامعادله زیر برای هر راه  $\{i,j\}$  از شبکه در نظر گرفته می شود:

متغیرها مقدار بین صفر و یک گرفتند و مشخص شد که اعمال محدودیت الزامی است. در حالت دوم، مسائل با در نظر گرفتن عدد صحیح بودن متغیرهای تصمیم حل شد. نتایج حل در جدول (۳) آورده شده است.

جابجایی های ۲ و ۳ وجود دارند (مسئله اول) و در مورد دوم (یا مسئله دو) جابجایی های ۲ و ۴ در نظر گرفته شدند. مسئله اول و دوم به کمک نرم افزار LINGO [۱۹] در دو حالت حل شدند. در حالت اول محدودیت صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم اعمال نشد. در جواب حاصله، بعضی از



شکل (۲): جواب بهینه مسئله ۳

مسئله سوم با استفاده از نرم افزار حرفه ای LINGO در شکل (۲) ارائه شده است.

جدول (۳): نتایج حل مسائل یک و دو در دو حالت مختلف

مسیریابی همزمان برای جابجایی های دو و سه
۸-۱۲-۱۴-۱۶-۱۸-۱۷-۲۰-۲۳-۲۴-۲۶-۲۷-۲۹-۳۰-۳۲-۳۳
(مسیرجابجایی دو)
۱۶-۱۹-۲۲-۲۴ (مسیرجابجایی ۳)
مسیریابی همزمان برای جابجایی های دو و چهار
۸-۱۲-۱۴-۱۶-۱۹-۲۲-۲۴-۲۶-۲۷-۲۹-۳۰-۳۲-۳۳ (مسیرجابجایی ۲)
۲۴-۲۲-۲۵-۲۸ (مسیرجابجایی ۴)

### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، یک مسئله مسیریابی در زمینه حمل و نقل مواد خطرناک، با در نظر گرفتن یک مورد خاص؛ یعنی حمل و نقل دو نوع ماده خطرناک در شبکه راه های جاده ای استان مازندران فرموله و ویژگی های آن بررسی شد. پیش از گسترش مدل مسیریابی، مدل های موجود در مقالات مرور شد و در مقایسه با این مدل ها، اشاره شد که مسئله مورد بررسی در این مقاله به هنگامی مربوط است که چند جابجایی وجود دارد.

با در نظر گرفتن تعداد انتظاری افرادی که در نتیجه انجام جابجایی ها آسیب می بینند، به عنوان یک معیار سنجش خطر، اشاره شد که در مسئله مورد بررسی در این مقاله؛ همچون بعضی از مقالات دیگر، تعیین مسیرهای جابجایی با هدف حداقل سازی تعداد انتظاری افراد آسیب دیده از جابجایی ها صورت می گیرد؛ اما مسئله این مقاله از نظر ماهیت در موارد زیر با مسائل بررسی شده در دیگر مقالات تفاوت دارد:

اولاً، هر جابجایی به وسیله مبدا و مقصد، نوع وسیله، ماده خطرناک و شرایط حمل مشخص می شود و برای هر جابجایی؛ بدون توجه به تعداد دفعاتی که باید این جابجایی تکرار شود، باید یک مسیر مشخص شود. ثانیاً، مسیرها به وسیله سازمانی مستقل از شرکت های حمل و نقل و یا متقاضیان حمل و نقل مشخص می شود. ثالثاً، مشخصه های جابجایی را نمی توان

تعداد زیاد محدودیت های مدل و لزوم رعایت محدودیت های صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم، موجب دشوار شدن مراحل حل با استفاده از روش های عمومی حل مسائل صفر و یک می شود اما ساختار ویژه مدل مبنی بر قابل تجزیه بودن مسئله به  $N_{mo}$  مسئله ساده مجزا، در صورت نبودن محدودیت های مشخص شده با نامعادله

(۶) امکان گسترش روش های خاص و کاراتر را فراهم می آورد.

در [۱۷] و [۱۸] به این گونه مسائل پرداخته شده است. استفاده از تکنیک های ارائه شده در این مقالات برای گسترش روشی کارا برای حل مسئله، مورد توجه ما بوده است؛ اما گسترش الگوریتمی کارا برای حل مدل های مشابه مدل ارائه شده در این مقاله را همچنان با توجه به کاربردی بودن مسئله، به محققین پیشنهاد می کنیم. در حالتی که هر چهار جابجایی به طور همزمان در نظر گرفته می شود (مسئله سوم)، به دلیل بزرگ بودن ابعاد مسئله، لازم است از روش های حل کارا و یا نرم افزارهای حرفه ای مسئله را حل کرد. در اینجا نتیجه حل

تغییر داد (برای مثال نمی توانیم مبدا و مقصد جابجایی ها را تغییر دهیم).

با توجه مطالب فوق و همچنین فرضیاتی دیگر، مسأله مسیریابی به صورت یک مسأله صفر و یک فرموله و مدل مسأله ارائه و ویژگی های آن بیان شد:

۱- به دلیل وجود جابجایی های چندگانه و امکان افزایش بیش از حد تردد وسایل حمل و نقل از بعضی از راه های شبکه، باید محدودیت هایی برای توزیع جابجایی ها در شبکه در نظر گرفته شود.

۲- اعمال محدودیت های مذکور به وابسته شدن مسیر یابی جابجایی ها منجر شده و در نتیجه، ابعاد مسأله می تواند در عمل بسیار بزرگ باشد. همچنین این محدودیت ها اعمال شرط صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم را هنگام حل مسأله الزامی می کند و این امر، به دشواری تحلیل مسأله می افزاید.

۳- اینکه مسأله با حذف محدودیت های مورد اشاره، به چند مسأله ساده قابل حل به وسیله الگوریتم دایکسترا [۲] تبدیل می شود، موجب می شود که بتوان با استفاده از ساختار ویژه

مسأله، روش های کاراتری برای حل آن گسترش داد. ما به این موضوع توجه کردیم و در این رابطه بهره گیری از مطالب دو مرجع [۱۸] و [۱۹] را به محققین پیشنهاد می کنیم.

در خصوص تحقیقات آتی در این زمینه، علاوه بر گسترش روش های حل، می توان به فرضیات محدود کننده ای در هنگام فرموله کردن و یا تعریف مسأله که در این مقاله به کار گرفته شده است، اشاره کرد. در واقع، می توان با تغییر دیگر فرضیات در نظر گرفته شده در این مقاله، مسائل تحلیلی و یا کاربردی دیگری به وجود آورد، لذا با توجه به تنوع مسائل مطرح در این رابطه و نیز اهمیت مسأله حمل و نقل مواد خطرناک؛ که مورد توجه جامعه ما و نیز جامعه جهانی است، انجام تحقیقات بیشتر بر روی ابعاد مختلف مسأله حمل و نقل مواد خطرناک توصیه می شود.

## ۶- ضمائم

جدول (۴): آسیب پذیری از جابجایی ها در کمان ها و طول کمان ها

مقیاس خطرجمعی در کمان ها × یک ملیونیوم			طول	کمان	مقیاس خطرجمعی در کمان ها × یک ملیونیوم			طول	کمان	مقیاس خطرجمعی در کمان ها × یک ملیونیوم			طول	کمان
$mo=4$	$mo=2,3$	$mo=1$			$mo=4$	$mo=2,3$	$mo=1$			$mo=4$	$mo=2,3$	$mo=1$		
۱۰۶۰	۶۹۲	۷۰۷	۸	۱۰-۷	۲۵۴۵	۱۶۶۲	۱۶۹۶	۱۶-۱۹	۲۰	۲۸۴۱	۱۸۵۶	۱۸۹۴	۴۰	۲-۱
۸۷۴	۵۷۱	۵۸۲	۵	۱۱-۸	۹۸۲	۶۴۲	۶۵۶	۱۷-۱۸	۱۴	۳۱۱۰	۲۰۲۲	۲۰۷۲	۲۵	۳-۱
۳۰۹	۲۰۲	۲۰۶	۷	۱۲-۸	۹۸۲	۶۴۲	۶۵۶	۱۷-۲۰	۱۹	۴۲۷	۲۸۶	۲۹۱	۱۵	۴-۲
۲۱۹	۱۴۲	۱۴۶	۱۰	۱۱-۹	۱۵۸۴	۱۰۳۵	۱۰۵۶	۱۸-۱۹	۱۳	۹۸۳	۶۴۲	۶۵۶	۹	۸-۲
۱۰۹	۷۱	۷۳	۷	۱۳-۹	۱۳۶۶	۸۹۲	۹۱۱	۱۸-۲۱	۱۵	۱۲۷۲	۸۳۱	۸۴۸	۱۲	۴-۳
۸۱۹	۵۳۵	۵۴۶	۲۶	۱۴-۱۰	۲۱۸۵	۱۴۲۸	۱۴۵۷	۱۹-۲۱	۲۲	۱۵۵۵	۱۰۱۶	۱۰۲۷	۱۲	۵-۳
۱۲۷۲	۸۳۱	۸۴۸	۴	۱۵-۱۰	۵۶۸	۳۷۱	۳۷۹	۱۹-۲۲	۲۲	۲۸۳	۱۸۵	۱۸۸	۱۰	۶-۴
۱۰۹	۷۱	۷۳	۵	۱۳-۱۱	۱۵۸۴	۱۰۳۵	۱۰۵۶	۲۰-۲۱	۷	۴۲۷	۲۸۶	۲۹۱	۲۱	۶-۵
۶۰۱	۳۹۲	۴۰۱	۸	۱۳-۱۲	۶۰۱	۳۹۲	۴۰۱	۲۰-۲۳	۴	۲۰۵۰	۱۲۳۹	۱۳۶۷	۱۴	۷-۵
۲۲۲	۱۴۵	۱۴۸	۲۶	۱۴-۱۲	۳۷۱۵	۲۴۲۷	۲۴۷۶	۲۱-۲۲	۲۱	۱۲۷۲	۸۳۱	۸۴۸	۴	۸-۶
۲۲۲	۱۴۵	۱۴۸	۷	۱۴-۱۶	۳۴۰	۵۴۹	۵۶۰	۲۲-۲۴	۱۴	۶۰۱	۳۹۲	۴۰۱	۷	۹-۷
۹۲۹	۶۱۴	۶۲۶	۱۴	۱۵-۱۶	۹۲۷	۶۰۵	۶۱۸	۲۲-۲۵	۱۴	۲۱۹	۱۴۲	۱۴۶	۱۵	۲۴-۲۶
۱۸۰۳	۱۱۷۸	۱۲۰۲	۱۲	۱۵-۱۷	۹۹	۶۵	۶۶	۲۳-۲۴	۱۴	۱۰۳۸	۶۷۸	۶۹۲	۲۹	۲۵-۲۷
۱۵۸۴	۱۰۳۵	۱۰۵۶	۱۳	۱۶-۱۸	۴۳۷	۲۸۶	۲۹۱	۲۳-۲۶	۲۶	۱۷۶۷	۱۱۵۴	۱۱۷۸	۱۱	۲۵-۲۶
۶۰۱	۳۹۲	۴۰۱	۸	۲۱-۲۲	۱۷۶۷	۱۱۵۴	۱۱۷۸	۲۸-۳۱	۱۲	۲۱۹	۱۴۲	۱۴۶	۸	۲۶-۲۷
۲۵۰	۱۳۳۹	۱۳۶۷	۱۱	۲۱-۲۳	۴۳۷	۲۸۶	۲۹۱	۲۹-۳۰	۱۳	۲۱۹	۱۴۲	۱۴۶	۵	۲۷-۲۹
۹۸۳	۶۴۲	۶۵۶	۱۵	۲۲-۲۳	۴۳۷	۲۸۶	۲۹۱	۳۰-۳۲	۱۷	۱۴۲۰	۹۲۸	۹۴۶	۲۱	۲۸-۳۰



جدول (۵): حد بالای مقیاس خطر جمعی برای هر  $(i, j)$ 

UR(i,j)	شماره کمان	UR(i,j)	شماره کمان	UR(i,j)	شماره کمان	UR(i,j)	شماره کمان
۲۸۷	۲۴-۲۶	۱۲۹۲	۱۷-۱۸	۱۷۹۴	۸-۱۲	۳۷۳۱	۱-۲
۱۳۶۳	۲۵-۲۷	۱۲۹۲	۱۷-۲۰	۲۸۷	۹-۱۱	۳۱۵۷	۱-۳
۱۷۹۴	۲۵-۲۸	۲۰۸۱	۱۸-۱۹	۱۴۴	۹-۱۳	۵۷۴	۲-۴
۲۸۷	۲۶-۲۷	۱۷۹۴	۱۸-۲۱	۱۰۷۶	۱۰-۱۴	۱۲۹۲	۲-۸
۲۸۷	۲۷-۲۹	۲۸۷۰	۱۹-۲۱	۱۲۹۲	۱۰-۱۵	۱۲۹۲	۳-۴
۱۸۶۶	۲۸-۳۰	۲۳۰۱	۱۹-۲۲	۱۴۴	۱۱-۱۳	۱۵۷۹	۳-۵
۱۷۹۴	۲۸-۳۱	۲۰۸۱	۲۰-۲۱	۷۸۹	۱۲-۱۳	۲۸۷	۴-۶
۵۷۴	۲۹-۳۰	۷۸۹	۲۰-۲۳	۱۲۹۲	۱۲-۱۴	۵۷۴	۵-۶
۵۷۴	۳۰-۳۲	۴۸۷۹	۲۱-۲۲	۱۲۹۲	۱۴-۱۶	۲۰۸۱	۵-۷
۷۸۹	۳۱-۳۲	۴۸۷۹	۲۲-۲۴	۵۴۵۳	۱۵-۱۶	۱۲۹۲	۶-۸
۲۰۸۱	۳۱-۳۲	۵۳۸۱	۲۲-۲۵	۲۲۶۸	۱۵-۱۷	۷۸۹	۷-۹
۱۲۹۲	۳۲-۳۳	۵۷۴	۲۳-۲۴	۲۰۸۱	۱۶-۱۸	۱۰۷۶	۷-۱۰
		۵۷۴	۲۳-۲۶	۲۵۸۳	۱۶-۱۹	۱۱۴۸	۸-۱۱

## ۷- مراجع

- Alp, O.; E. Erkut; "Integrated routing and scheduling of hazmat trucks", Proc. CORS 2002, University of Alberta, Toronto, Canada, 85-93, 2002. [۱۱]
- Gopalan, R.; K. S. Kolluri; R. Batta; M. H. Karwan; "Modeling equity of risk in the transportation of hazardous materials", Operations Research, 38(6), 961- 973, 1990. [۱۲]
- Sivakumar, R.A.; R. Batta; M.H. Karwan; "A network-based model for transporting extremely hazardous materials", Operations Research Letters, 13(2), 85- 93, 1993. [۱۳]
- Jin, H.; R. Batta; M. H. Karwan; "On the analysis of two new models for transporting hazardous materials", Operations Research, 44(5), 710-723, 1996. [۱۴]
- Sherali, H.D.; L.D. Berzindine; S. Subramanian; "Low-probability-high consequence considerations in routing hazardous materials shipment", Transportation Science, 31(3), 237- 251, 1997. [۱۵]
- Leonelli, P.; S. Bonvicini; G. Spadoni; "Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology", Journal of Hazardous Materials, 71(3), 283- 300, 2000. [۱۶]
- Fisher, M.L.; "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", Management Science, 27(1), 1-19, 1981. [۱۷]
- Barnhart, C.; E.L. Johnson; G.L. Nemhauser; M.W.P. Savelsbergh; P.H. Vance; "Branch and Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs", Operations Research, 46(3), 316- 329, 1998. [۱۸]
- Shrage, L.; Optimization modelling with LINGO, Lindo Systems, 1999. [۱۹]
- Batta, R.; S.S. Chiu; "Optimal obnoxious paths on a network: transportation of hazardous materials", Operations Research, 36(1), 84- 92, 1988. [۱]
- Bazaraa, M.S.; J.J. Jarvis; H.D. Sherali; Linear Programming and Network Flows, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons, 1990. [۲]
- Erkut, E.; V. Verter; "A framework for hazardous materials transport risk assessment", Risk Analysis, 15, 589- 601, 1995. [۳]
- Karkazis, J.; T. B. Boffey; "Optimal location of routes for vehicles transporting hazardous materials", European Journal of Operational Research, 86, 201- 215, 1995. [۴]
- Erkut, E.; A. Ingolfsson; "Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning", Transportation Science, 34(2), 165- 179, 2000. [۵]
- Erkut, E.; T. Glickman; "Minimax population exposure in routing highway shipments of hazardous materials", Transportation Research Record, 1602, 93- 100, 1997. [۶]
- Wijeratne, A.B.; M. A. Turnquist; P. B. Mirchandani; "Multiobjective routing of hazardous materials in stochastic networks", European Journal of Operational Research, 65, 33-43, 1993. [۷]
- Klein C. M.; "A model for the transportation of hazardous waste", Decision Science, 22, 1091- 1108, 1991. [۸]
- Miller- Hooks, E.D.; H. S. Mahmassani; "Optimal routing of hazardous materials in stochastic, time-varying transportation networks", Transportation Research Record, 1645, 143- 151, 1998. [۹]
- Nozick, L.K.; G.F. List; M.A. Turnquist; "Integrated routing and scheduling in hazardous materials transportation", Transportation Science, 31(3), 200- 215, 1997. [۱۰]

## زیر نویس ها

<sup>۱</sup> Non-dominated solution.<sup>۲</sup> Minimal cost network flow problem.