

طراحی مدل ریاضی مسیریابی حمل مواد خطرناک (مورد مطالعه: شبکه راه‌های استان فارس)

عادل آذر^۱، محمود صفارزاده^۲، علی احسانی^{۳*}

- ۱- استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد
- ۲- استاد گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست
- ۳- کارشناس ارشد مدیریت صنعتی دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد

ali.ehsani.n@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰

چکیده- در این مقاله، حمل چند گروه از مواد خطرناک در شبکه‌ای از راه‌ها با مبدأ و مقصد متفاوت و تقاضای معین بررسی شده است. نخست، شاخص ریسک با مؤلفه‌های جمعیت، محیط زیست و ابنیه مسیر، طراحی و ریسک در هر مسیر محاسبه شد. در مسیریابی هم به ریسک در کل شبکه و هم به ریسک در مسیر توجه شده است تا عدالت در توزیع ریسک برقرار باشد. بنابراین مدل اصلی پیشنهادی این پژوهش یک مدل خطی دوسطحی با توجه تنها به مقوله ایمنی است. سپس با توجه به اهمیت اقتصادی بودن مسیرهای به دست آمده، با تلفیق جواب مدل ایمنی در مدلی دیگر، مسیریابی ایمن و اقتصادی برای حمل مواد خطرناک پیشنهاد شده است. در نهایت نتایج دو مدل مقایسه شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان در جلوگیری از حوادث حمل مواد خطرناک و مدیریت ناوگان ترابری این مواد بهره گرفت.

واژگان کلیدی: شبکه حمل و نقل، ارزیابی ریسک، مدل‌سازی ریاضی، مدل دوسطحی، توزیع ریسک

۱- مقدمه

زمان حمل مواد خطرناک روی می‌دهد، همواره پتانسیل زیادی برای تبدیل به یک فاجعه بشری دارد. طبق تعریف دپارتمان حمل و نقل^۱ آمریکا، ماده خطرناک شامل هر جنس و یا ماده‌ای است که قابلیت صدمه زدن به انسان، اموال و محیط را داشته باشد [۲]. هزاران نوع متفاوت از مواد خطرناک وجود دارد که بر اساس خواص اتمی، شیمیایی و فیزیکی در نه گروه طبقه‌بندی شده است [۳]. تقریباً در همه موارد، ماده خطرناک از مکانی به غیر از

بیش از ۹۰ درصد جابه‌جایی کالا در کشور از راه حمل و نقل جاده‌ای انجام می‌شود [۱]. بخشی از محمولات حمل و نقل جاده‌ای، کالاهای خطرناک است که به دلیل ماهیت آن‌ها با شرایط و تدابیر ویژه‌ای باید جابه‌جا شوند. براساس آمار سازمان ملل، حدود نیمی از بارهایی که حمل می‌شوند، در گروه مواد خطرناک است. از سوی دیگر امروزه تصادفات جاده‌ای به عنوان یکی از مهمترین چالشها و معضلات کارشناسان حمل و نقل تبدیل شده است؛ تصادفاتی که در

1- Department of transportation (DOT)

مقصد نهایی اش به دست می آید. برای مثال، نفت از مناطق نفت خیز گرفته و به پالایشگاه‌ها منتقل می شود و خیلی از محصولات مشتق از نفت از پالایشگاه به مناطق دیگر ارسال می شود. بنابراین، سیستم حمل و نقل، نقش عمده‌ای در جابه‌جایی امن مواد خطرناک دارد [۴]. در ایران در سال ۱۳۸۷ بر اساس آمارها، حدود ۳۱۹ میلیون تن کالا به وسیله ۹/۲۳ میلیون سفر در سطح کشور با متوسط وزن ۳/۱۳ تن و متوسط مسافت ۴۸۰ کیلومتر در هر سفر، جابه‌جا شده است. در این میان، انواع کالا و ترکیبات شیمیایی (شامل قسمتی از مواد خطرناک موجود در کشور) با حدود ۱۵ درصد بیشترین سهم را دارد [۵].

کاهش ریسک حمل و نقل مواد خطرناک از راه‌های گوناگون در تحقیقات پیشین بررسی شده است. برخی کارهای ابتدایی مانند تعلیم رانندگان حرفه‌ای، بازرسی منظم وسایل نقلیه و اقداماتی پیشرفته‌تر مانند استفاده از فنون پژوهش در عملیات و مدل‌سازی در مسیریابی بررسی شده است [۶]. رویکرد استفاده شده در این پژوهش نیز کاربرد دانش مدل‌سازی و طراحی یک مدل ریاضی برای مسیریابی حمل مواد خطرناک در شبکه راه‌های استان فارس است.

مسیریابی حمل مواد خطرناک، انتخاب بهترین مسیر بین مبدأ و مقصد است. از دیدگاه شرکت‌های حمل و نقل، قراردادهای حمل مستقل بسته می‌شود و تصمیمات مسیریابی برای هر مسیر باید جداگانه گرفته شود که به آن برنامه‌ریزی مسیریابی محلی^۱ گویند. در سطح کلان، مسیریابی مواد خطرناک یک مسئله "چند در چند" است که مبداهای متعدد و مقاصد حتی بیشتری دارد. در نتیجه چنین مسائلی را برنامه‌ریزی مسیریابی سراسری^۲ گویند [۷].

کارا و ورتنر در سال ۲۰۰۴ یک مدل دوسطحی خطی عدد صحیح را برای مسئله مسیریابی مواد خطرناک ارائه

دادند که دربرگیرنده چندین نوع مواد خطرناک بود. هدف آن‌ها طراحی یک شبکه حمل و نقل بود که کل ریسک ناشی از انتخاب مسیر توسط شرکت‌های حمل و نقل را حداقل کند. این مدل با استفاده از شرایط کاروش کاهن-تاکر^۳ به یک مسئله برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح تک هدفی تبدیل و حل شد [۸]. ارکوت و زارا در سال ۲۰۰۵ یک مسئله طراحی شبکه دوهدفی دوسطحی مشابه مدل کارا و ورتنر ارائه دادند [۹].

همچنین در سال ۲۰۰۴ زوگرافوس و آندروتوپولوس یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله توزیع مواد خطرناک ارائه دادند. از دید آن‌ها مسیریابی توزیع مواد خطرناک می‌تواند یک مسئله دوهدفی با پنجره زمانی باشد که در آن کمینه‌سازی ریسک و هزینه در کنار هم انجام می‌شود [۱۰]. ارکوت و آلپ در سال ۲۰۰۵، مسئله طراحی شبکه ماده خطرناک با کمترین ریسک را به عنوان یک مسئله درخت انتخاب استینر نشان دادند [۱۱]. در سال ۲۰۰۸/ارکوت و زارا مدلی برای شبکه حمل و نقل مواد خطرناک ارائه دادند که در آن، دولت محلی، شبکه‌ای از راه‌ها تخصیص داده و شرکت‌های حمل باید از این مسیرها انتخاب کنند. آن‌ها مسئله را به صورت یک شبکه جریان دوسطحی فرمول‌سازی کردند و با ارائه یک الگوریتم ابتکاری بر پایه انتخاب مسیرهای نامتشابیه، مدل ارائه‌شده را حل کردند [۱۲]. در سال ۲۰۱۰ نیز کنستانتینوس و همکارانش یک مدل با معیار مسیریابی و زمان‌بندی را در برنامه‌ریزی توزیع مواد خطرناک ارائه و آن‌ها الگوریتمی برای حل مسئله دومعیاره پیشنهاد کردند [۱۳].

در سال ۲۰۰۹ قطعی و همکارانش، مسئله کمینه جریان هزینه با هزینه‌های فازی را ارائه دادند. در این مقاله پس از ارائه مدل برای مسئله مدیریت فوری مواد خطرناک، راهکار

1- Local routing
2- Global routing

3- KKT, Karush-Kuhn-Tucker

$$R = P (w_1c_1 + w_2c_2 + w_3c_3)$$

در این رابطه، p ، احتمال تصادف در مسیر و c_1, c_2 و c_3 به ترتیب متناظر با شدت آسیب به جمعیت، محیط زیست و ابنیه و w_1, w_2 و w_3 به ترتیب اوزان متناظر با هر کدام از مؤلفه‌های شدت حادثه است. میزان ریسک برای همه مسیرها و به ازای همه انواع مواد خطرناک عبوری محاسبه می‌شود.

۳- ملاحظات مدل سازی

در طراحی مدل ریاضی این پژوهش مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. روابط بین متغیرها، خطی است.
۲. هر گره می‌تواند نقطه‌ی تقاضا یا نقطه عرضه باشد.
۳. از همه مسیرها در دو جهت رفت و برگشت استفاده می‌شود.
۴. فرض شده ریسک عبور مواد خطرناک از مسیر بین دو گره در جهت رفت با جهت برگشت برابر است.
۵. فرض شده هر ارسال شامل یک تانکر با مقدار مشخصی ماده خطرناک است و به ازای هر ارسال با توجه به ماده ارسالی، ریسک مشخصی در مسیر وجود دارد.

۴- طراحی مدل ریاضی مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک در جاده‌های کشور با رویکرد توجه تنها به ایمنی

در این بخش مدل ریاضی طراحی شده برای مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک در شبکه راه‌های کشور معرفی می‌شود. در این مدل با توجه به نظر تصمیم‌گیرنده، تنها به ایمنی و ریسک توجه شده و اقتصادی یا غیراقتصادی بودن مسیر در نظر نیست. در طراحی این مدل دو هدف دنبال شده است. نخست به دنبال کمینه‌سازی ریسک در کل شبکه راه‌ها هستیم و سپس

جانمایی مسئله با یک مسئله چندمعیاری خطی مخلوط با عدد صحیح ارائه می‌شود [۱۴]. در سال ۲۰۱۰ پرادانانگا و همکارانش الگوریتمی فرا ابتکاری بر پایه کلونی مورچگان برای مسائل بهینه‌سازی حمل و نقل مواد خطرناک با پنجره زمانی ارائه دادند. الگوریتم آن‌ها نیز از ایده مسیرهای متشابه بهره گرفته است [۱۵].

۲- ارزیابی ریسک

ریسک ابتدایی‌ترین عاملی است که مسائل حمل و نقل مواد خطرناک را از دیگر مسائل حمل و نقل جدا می‌کند و مؤثرترین عامل در مسیریابی حمل مواد خطرناک است. در متون علمی حمل و نقل مواد خطرناک به محاسبه احتمال و شدت آسیب به گیرنده در معرض ریسک از طریق حوادث ناخواسته ناشی از مواد خطرناک، ریسک گفته می‌شود [۱۶].

در این پژوهش و برای محاسبه ریسک مواد خطرناک عبوری با این فرض که هر تصادفی در مسیر منجر به حادثه می‌شود، احتمال و یا نرخ تصادف در مسیر به عنوان احتمال حادثه در نظر گرفته شد. برای محاسبه شدت حادثه نیز از میان عوامل شناخته شده در تحقیقات پیشین مطابق نظر کارشناسان سازمان راهداری و حمل جاده‌ای به عنوان تصمیم‌گیرنده، سه عامل جمعیت تحت تأثیر، محیط زیست در معرض آسیب و تعداد و اهمیت ابنیه مسیر، انتخاب شدند. همه اطلاعات مربوط به احتمال و شدت حادثه از طریق پرسش‌نامه جمع‌آوری شد. همان‌طور که اشاره شد، مواد خطرناک به ۹ گروه متفاوت تقسیم می‌شوند. برای تعیین وزن و میزان تأثیر نوع ماده بر شدت حادثه از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی گروهی استفاده شد. سرانجام ریسک در هر مسیر با به‌کارگیری رابطه زیر محاسبه شد:

هدف در سطح اول کمینه‌سازی ریسک عبور مواد خطرناک از هر یک از مسیرها است و براساس محدودیت شمارهٔ یک، ریسک در هر مسیر به ازای همهٔ مواد عبوری از مسیر در هر دو جهت رفت و برگشت از مقدار مشخصی نباید فراتر رود. هدف در سطح دوم، کمینه‌سازی ریسک در کل شبکه راه‌هاست و محدودیت شماره دو، تضمین‌کننده ارسال و دریافت تقاضا به ازای مواد مختلف و مبدأها و مقاصد موجود است. محدودیت سه نیز بیان می‌کند که مقدار ماده عبوری از هر مسیر، متغیری به صورت عدد صحیح است.

برای حل مدل دوسطحی این پژوهش با توجه به این‌که تابع هدف و محدودیت‌ها خطی است، می‌توان سطح دوم را با به‌کارگیری شرایط بهینهٔ کاروش-کاهن-تاکر در سطح یک، ادغام و مسئله را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌سطحی تبدیل و حل کرد. بنابراین از متغیرهای زیر بهره گرفته می‌شود.

m_i^c متغیر دوگان محدودیت اول و Z_{ij}^c متغیر کمبود محدودیت ثانویه است.

$$\begin{aligned} \lambda^* &= \text{MIN } \lambda \\ \sum_{c \in C} (\Gamma_{ij}^c X_{ij}^c + \Gamma_{ji}^c X_{ji}^c) &\leq \lambda \\ \sum_{j \in FS(i)} X_{ij}^c - \sum_{j \in BS(i)} X_{ji}^c &= \begin{cases} d(c) & \text{if } i = S(c) \forall c \in C \\ -d(c) & \text{if } j = E(c) \forall c \in C \\ 0 & \text{o.w } \forall c \in C \end{cases} \quad (3) \\ \Gamma_{ij}^c - m_i^c + m_j^c - z_{ij}^c &= 0 \\ X_{ij}^c \cdot Z_{ij}^c &= 0 \\ X_{ij}^c, Z_{ij}^c &\geq 0 \\ m_i^c &\text{ free} \end{aligned}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این مدل محدودیت درجه دو دارد که می‌توان آن را از طریق به‌کارگرفتن متغیرهای دودویی b_{ij}^1, b_{ij}^2 و اعداد به اندازه کافی بزرگ M^1 و M^2 تبدیل به مدل خطی کرد. سرانجام، مدل خطی‌سازی شده

به این امر توجه داریم که ریسک در هر مسیر از حد معینی بیشتر نشود و در واقع عدالت در توزیع ریسک برقرار باشد. با توجه به این‌که هدف نخست در سطح کل شبکه (استان) و هدف دوم در سطح پایین‌تر (شهرستان) مطرح می‌شود و در واقع دو سطح تصمیم‌گیری جداست، این مدل با برنامه‌ریزی خطی دوسطحی طراحی شده است.

با فرض این‌که شبکه مورد نظر به صورت $G(N, E)$ که در آن N مجموعه گره‌ها و E مجموعه کمان‌های شبکه است، تعریف شود، مدل ریاضی مسیریابی این پژوهش به صورت زیر است:

سطح اول

$$\begin{aligned} \lambda^* &= \text{MIN } \lambda \\ \text{s.t:} \\ \sum_{c \in C} (\Gamma_{ij}^c X_{ij}^c + \Gamma_{ji}^c X_{ji}^c) &\leq \lambda \end{aligned} \quad (1)$$

سطح دوم

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}}^* &= \sum_{c \in C} \sum_{i, j \in A} \Gamma_{ij}^c X_{ij}^c \\ \text{s.t:} \\ \sum_{j \in FS(i)} X_{ij}^c - \sum_{j \in BS(i)} X_{ji}^c &= \begin{cases} d(c) & \text{if } i = S(c) \forall c \in C \\ -d(c) & \text{if } j = E(c) \forall c \in C \\ 0 & \text{o.w } \forall c \in C \end{cases} \quad (2) \\ X_{ij}^c &\text{ integer} \\ X_{ij}^c &\geq 0 \end{aligned}$$

در این مدل، C نوع ماده، z_{ij} علامت کمان عبوری از مبدأ i به مقصد j ($\langle i, j \rangle, \langle j, i \rangle: \langle i, j \rangle \in E$)، S^c گره مبدأ ماده نوع c ، E^c گره مقصد ماده نوع c ، d^c تقاضای ماده نوع c ، Γ_{ij}^c ریسک عبور ماده نوع c از کمان با مبدأ i به مقصد j ، X_{ij}^c تعداد تانکر عبوری ماده نوع c از کمان با مبدأ i به مقصد j و λ بیشترین ریسک ناشی از عبور انواع مواد خطرناک از مسیرهای شبکه است.

نهایی زیر به دست می آید:

زیر خواهد بود:

$$L_{tot}^* = \sum_{c \in C} \sum_{i,j \in A} l_{ij}^c X_{ij}^c$$

s.t:

$$\sum_{c \in C} (r_{ij}^c X_{ij}^c + r_{ji}^c X_{ji}^c) \leq \lambda$$

$$\sum_{j \in FS(i)} X_{ij}^c - \sum_{j \in BS(i)} X_{ji}^c = \begin{cases} d(c) & \text{if } i = S(c) \forall c \in C \\ -d(c) & \text{if } j = E(c) \forall c \in C \\ 0 & \text{o.w } \forall c \in C \end{cases} \quad (5)$$

$$X_{ij}^c \text{ integer}$$

$$\lambda^* = \text{MIN } \lambda$$

$$\sum_{c \in C} (r_{ij}^c X_{ij}^c + r_{ji}^c X_{ji}^c) \leq \lambda$$

$$\sum_{j \in FS(i)} X_{ij}^c - \sum_{j \in BS(i)} X_{ji}^c = \begin{cases} d(c) & \text{if } i = S(c) \forall c \in C \\ -d(c) & \text{if } j = E(c) \forall c \in C \\ 0 & \text{o.w } \forall c \in C \end{cases}$$

$$r_{ij}^c - m_i^c + m_j^c - z_{ij}^c = 0$$

$$X_{ij}^c \leq M^1_c b^1_{ijc}$$

$$z_{ij}^c \leq M^2_c b^2_{ijc}$$

$$b^1_{ijc} + b^2_{ijc} \leq 1$$

$$X_{ij}^c, z_{ij}^c \geq 0$$

$$m_i^c \text{ free}$$

$$b^1_{ijc}, b^2_{ijc} \in \{0,1\}$$

$$X_{ij}^c \text{ int}$$

در این مدل، l_{ij} طول کمان با مبدأ i و مقصد j بوده و سایر تعاریف مانند مدل قبلی است.

۶- مطالعه موردی

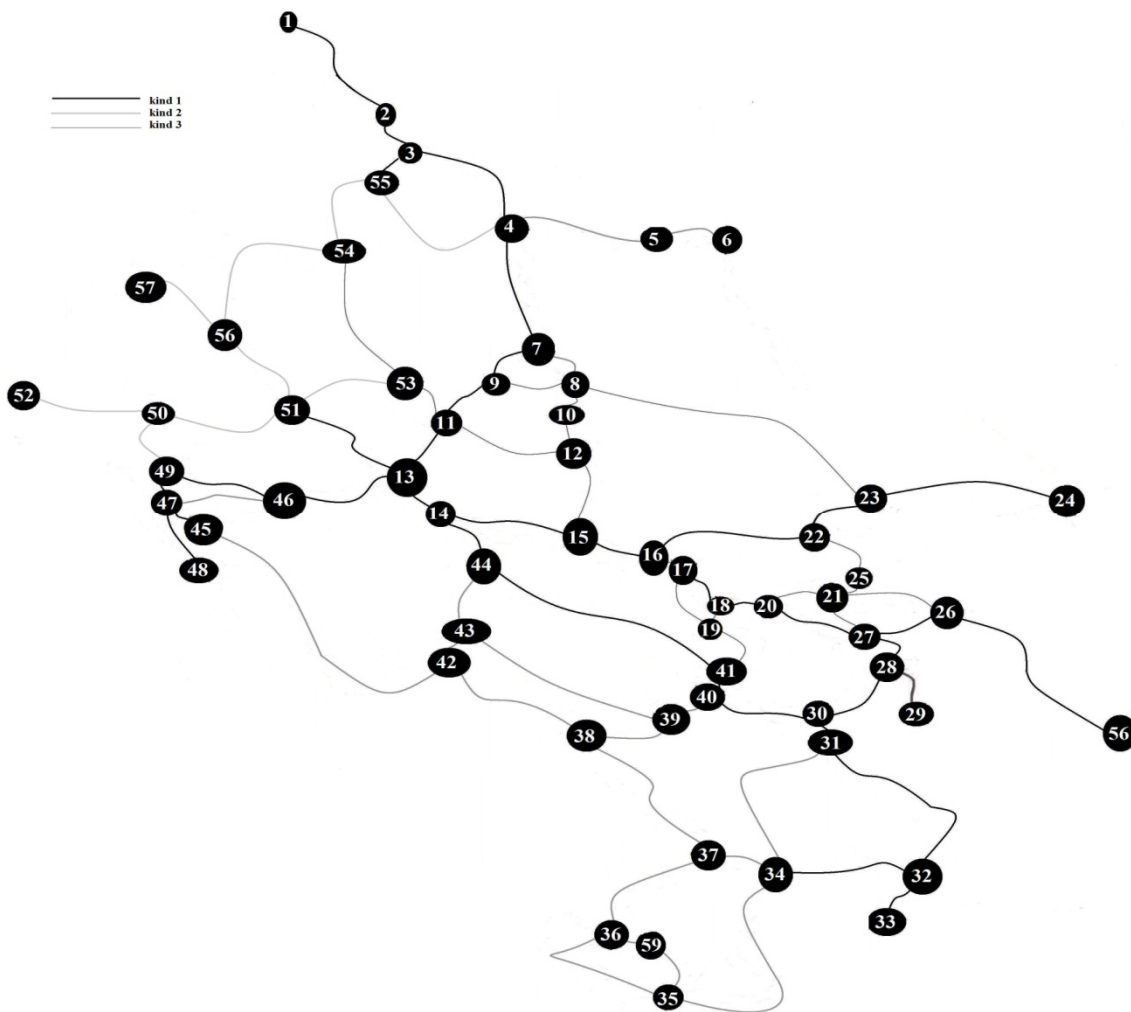
شبکه مطالعه موردی این پژوهش شبکه راههای استان فارس است. این شبکه دارای ۵۹ گره و ۸۰ کمان دارد و نمونه‌ای از آن در شکل (۱) آورده شده است. بنزین معمولی، بنزین سوپر، نفت سفید و گازوئیل از گروه مایعات قابل اشتعال و اسید سولفوریک، اسید نیتریک و پرکلرین از گروه مواد خورنده، موادی است که تقاضای واقعی آن‌ها برای مبدأها و مقاصد گوناگون (عبوری از استان فارس) در ماه اسفند سال ۱۳۸۸ در این پژوهش لحاظ شده است. تقاضای این مواد مطابق جدول زیر است:

جدول (۱) تقاضا و مبدأها و مقاصد حمل

مقدار	نوع ماده	مقصد	مبدأ
۵۰	پرکلرین	لار (۳۲)	اصفهان (۳)
۹۳۶	نفت سفید	شیراز (۱۳)	اصفهان (۳)
۱۲۸	اسید سولفوریک	جهرم (۴۰)	اصفهان (۳)
۲۷۴	گازوئیل	فسا (۱۷)	خوزستان (۵۰)
۵۳۱	بنزین معمولی	خنج (۳۷)	کرمان (۲۳)
۷۷۵	بنزین سوپر	سپیدان (۵۶)	هرمزگان (۲۶)
۱۷۰	اسید نیتریک	کازرون (۴۵)	هرمزگان (۳۲)

۵- طراحی مدل ریاضی مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک با رویکرد ایمنی-اقتصادی

در سال ۱۹۹۲/بکویتز و همکارانش نشان دادند اگر در مسیریابی تنها به دنبال پیدا کردن مسیرهای ایمن باشیم، مسیرهای به دست آمده به طور متوسط دو برابر طول کوتاه‌ترین مسیر خواهد بود [۱۷]. به همین دلیل و با توجه به اینکه مسیر تنها ایمن ممکن است برای هیچ شرکت حمل و نقلی توجیه اقتصادی نداشته باشد، مدلی دیگر طراحی شد تا با تلفیق جواب به دست آمده از حل مدل، توجه تنها به ایمنی با شاخص طول مسیر، هر جنبه اقتصادی و ایمن بودن را در نظر بگیرد. هدف این مدل کمیته‌سازی مسافت کل طی شده به ازای همه مواد و در کل شبکه است و محدودیت اصلی آن ریسک است که ریسک عبور مواد خطرناک از هر مسیر از حد معینی (به دست آمده از اجرای مدل مسیریابی توجه تنها به ایمنی) فراتر نرود. با فرض این که چنین شبکه‌ای به صورت $G(N,E)$ تعریف شود، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مورد نظر به شکل



شکل (۱) شبکه راه‌های استان فارس

جدول (۲) حل مدل با رویکرد توجه تنها به ایمنی

مسیر و تعداد حمل	نوع ماده
۲۷۸ واحد از ۳ به ۴- ۲۷۸ واحد از ۴ به ۷- ۲۷۸ واحد از ۷ به ۸- ۲۷۸ واحد از ۸ به ۱۰- ۲۷۸ واحد از ۱۰ به ۱۲- ۲۷۸ واحد از ۱۲ به ۱۵- ۲۷۸ واحد از ۱۵ به ۱۴- ۲۷۸ واحد از ۱۴ به ۱۳- ۶۵۸ واحد از ۳ به ۵۵- ۶۵۸ واحد از ۵۵ به ۱۸۶- ۵۴ واحد از ۵۴ به ۵۶- ۴۷۰ واحد از ۵۴ به ۵۳- ۱۸۸ واحد از ۵۶ به ۵۱- ۴۷۰ واحد از ۵۳ به ۵۱- ۱۵۶ واحد از ۵۱ به ۱۳- ۵۰۲ واحد از ۵۱ به ۵۰- ۵۰۲ واحد از ۵۰ به ۴۹- ۴۹۶ واحد از ۴۹ به ۴۶- ۶ واحد از ۴۹ به ۴۷- ۶ واحد از ۴۷ به ۴۵- ۶ واحد از ۴۵ به ۴۶- ۵۰۲ واحد از ۴۶ به ۱۳	تفصیلی

۷- حل مدل‌ها

پس از محاسبه ریسک در هر مسیر با توجه به دو نوع ماده لحاظ شده و با توجه به تقاضای مواد مطالعه شده، مدل مسیریابی حمل مواد خطرناک در شبکه راه‌های استان فارس با رویکرد توجه تنها به ایمنی، ۵۳۴۵ متغیر شامل ۳۰۹۴ متغیر عدد صحیح دارد. تعداد ۴۳۴۴ محدودیت نیز در مدل وجود دارد. در نهایت پس از اجرای مدل در نرم افزار، مقدار تابع هدف برابر ۳۳۶/۳ به دست آمد و مقادیر متغیرهای تصمیم و مسیرها در جدول زیر نشان داده شده است:

در این مرحله با به کارگیری مقدار تابع هدف مدل توجه تنها به ایمنی، مدل ایمنی-اقتصادی اجرا شد. این مدل ۹۸۱ متغیر عدد صحیح و ۴۸۴ محدودیت دارد. مقدار تابع هدف آن پس از حل، برابر ۱۱۷۱۲۱۵ کیلومتر به دست آمد. مقادیر متغیرهای تصمیم و مسیرها مطابق جدول زیر است:

جدول (۳) حل مدل با رویکرد ایمنی-اقتصادی

نوع ماده	مسیر و تعداد حمل
پرکلرین	۲۱۵ واحد از ۳ به ۴-۲۱۵ واحد از ۴ به ۷-۲۱۵ واحد از ۷ به ۸-۲۱۵ واحد از ۸ به ۱۰-۲۱۵ واحد از ۱۰ به ۱۲-۲۱۵ واحد از ۱۲ به ۱۵-۲۱۵ واحد از ۱۵ به ۱۴-۲۱۵ واحد از ۱۴ به ۱۳-۷۲۱ واحد از ۳ به ۵۵-۷۲۱ واحد از ۵۵ به ۵۴-۳۹۶ واحد از ۵۴ به ۵۶-۳۲۵ واحد از ۵۶ به ۵۴-۳۹۶ واحد از ۵۶ به ۵۱-۳۲۵ واحد از ۵۳ به ۵۱-۴۷۳ واحد از ۵۱ به ۱۳-۲۴۸ واحد از ۵۱ به ۵۰-۲۴۸ واحد از ۵۰ به ۴۹-۲۴۸ واحد از ۴۹ به ۴۶-۲۴۸ واحد از ۴۶ به ۱۳
پرکلرین	از ۳ به ۴-از ۴ به ۷-از ۷ به ۸-از ۸ به ۲۳-از ۲۳ به ۲۲-از ۲۲ به ۲۵-از ۲۵ به ۲۶-از ۲۶ به ۲۷-از ۲۷ به ۲۸-از ۲۸ به ۳۰-از ۳۰ به ۳۱-از ۳۱ به ۳۲ همگی به مقدار ۵۰ واحد
گازوئیل	۸۴ واحد از ۵۰ به ۵۱-۸۴ واحد از ۵۱ به ۵۳-۸۴ واحد از ۵۳ به ۱۱-۸۴ واحد از ۱۱ به ۱۲-۸۴ واحد از ۱۲ به ۱۵-۱۹۰ واحد از ۱۵ به ۱۳-۱۹۰ واحد از ۱۳ به ۱۴-۱۹۰ واحد از ۱۴ به ۱۶-۲۷۴ واحد از ۱۵ به ۱۶-۲۷۴ واحد از ۱۶ به ۱۷
بترین سوپر	۱۲۵ واحد از ۲۶ به ۲۷-۱۲۵ واحد از ۲۷ به ۲۰-۱۲۵ واحد از ۲۰ به ۱۶-۶۵۰ واحد از ۲۶ به ۲۵-۶۵۰ واحد از ۲۵ به ۲۲-۴۳۶ واحد از ۲۲ به ۲۳-۴۳۶ واحد از ۲۳ به ۸-۱۷۹ واحد از ۸ به ۷-۱۷۹ واحد از ۷ به ۴-۱۷۹ واحد از ۴ به ۵۵-۱۷۹ واحد از ۵۵ به ۵۴-۲۵۷ واحد از ۸ به ۱۰-۲۵۷ واحد از ۱۰ به ۱۲-۲۱۴ واحد از ۱۲ به ۲۲-۳۳۹ واحد از ۱۲ به ۱۱-۵۹۶ واحد از ۱۱ به ۵۳-۳۲۵ واحد از ۵۳ به ۵۴-۵۰۴ واحد از ۵۴ به ۵۶-۲۷۱ واحد از ۵۳ به ۵۱-۲۷۱ واحد از ۵۱ به ۵۶
بترین معمولی	۵۳۱ واحد از ۲۳ به ۲۲-۵۳۱ واحد از ۲۲ به ۲۵-۲۹۶ واحد از ۲۵ به ۲۰-۲۹۶ واحد از ۲۰ به ۲۱-۲۹۶ واحد از ۲۱ به ۲۶-۲۳۵ واحد از ۲۶ به ۲۵-۲۳۵ واحد از ۲۵ به ۲۶-۲۳۵ واحد از ۲۶ به ۲۸-۵۳۱ واحد از ۲۸ به ۳۰-۵۳۱ واحد از ۳۰ به ۳۱-۵۳۱ واحد از ۳۱ به ۳۴-۵۳۱ واحد از ۳۴ به ۳۷

نوع ماده	مسیر و تعداد حمل
پرکلرین	از ۳ به ۵۵-از ۵۵ به ۵۴-از ۵۴ به ۵۳-از ۵۳ به ۵۱-از ۵۱ به ۱۳-از ۱۳ به ۱۴-از ۱۴ به ۴۴-از ۴۴ به ۴۳-از ۴۳ به ۳۹-از ۳۹ به ۳۸-از ۳۸ به ۳۷-از ۳۷ به ۳۴-از ۳۴ به ۳۱-از ۳۱ به ۳۲ همگی به مقدار برابر ۵۰ واحد
گازوئیل	۲۷۴ واحد از ۵۰ به ۵۱-۱۲۷ واحد از ۵۱ به ۵۳-۱۲۷ واحد از ۵۳ به ۱۰-۸۱ واحد از ۱۱ به ۱۲-۸۱ واحد از ۱۲ به ۲۲-۸۱ واحد از ۲۲ به ۲۳-۸۱ واحد از ۲۳ به ۲۱-۸۱ واحد از ۲۱ به ۲۵-۸۱ واحد از ۲۵ به ۲۱-۸۱ واحد از ۲۱ به ۲۰-۸۱ واحد از ۲۰ به ۲۰-۸۱ واحد از ۲۰ به ۱۵-۱۶-۱۶ واحد از ۱۶ به ۱۷-۱۴۷ واحد از ۱۴۷ به ۵۱-۱۳-۱۴۷ واحد از ۱۳ به ۱۴-۱۴۷ واحد از ۱۴ به ۴۴-۱۴۷ واحد از ۴۴ به ۴۱-۱۴۷ واحد از ۴۱ به ۱۹-۲۲۸ واحد از ۱۹ به ۱۷
بترین سوپر	۲۹۹ واحد از ۲۶ به ۲۷-۲۹۹ واحد از ۲۷ به ۲۰-۲۹۹ واحد از ۲۰ به ۲۱-۲۹۹ واحد از ۲۱ به ۲۶-۲۹۹ واحد از ۲۶ به ۲۵-۲۹۹ واحد از ۲۵ به ۲۲-۲۳-۲۳ واحد از ۲۳ به ۲۲-۲۳-۲۳ واحد از ۲۳ به ۷-۲۶۴ واحد از ۷ به ۴-۲۶۴ واحد از ۴ به ۵۵-۲۶۴ واحد از ۵۵ به ۵۴-۲۱۲ واحد از ۵۴ به ۱۰-۲۱۲ واحد از ۱۰ به ۱۲-۲۹۹ واحد از ۱۲ به ۲۲-۲۹۹ واحد از ۲۲ به ۱۱-۱۱-۵۱۱ واحد از ۱۱ به ۵۳-۵۱۱ واحد از ۵۳ به ۵۴-۷۷۵ واحد از ۵۴ به ۵۶
بترین معمولی	۱۳۷ واحد از ۲۳ به ۸-۱۳۷ واحد از ۸ به ۱۰-۱۳۷ واحد از ۱۰ به ۱۲-۱۳۷ واحد از ۱۲ به ۱۵-۱۳۷ واحد از ۱۵ به ۱۶-۱۳۷ واحد از ۱۶ به ۱۷-۱۳۷ واحد از ۱۷ به ۱۹-۱۳۷ واحد از ۱۹ به ۴۱-۱۳۷ واحد از ۴۱ به ۴۰-۱۳۷ واحد از ۴۰ به ۳۹-۱۳۷ واحد از ۳۹ به ۳۸-۱۳۷ واحد از ۳۸ به ۳۷-۳۹۴ واحد از ۳۷ به ۲۳-۳۹۴ واحد از ۲۳ به ۲۲-۳۹۴ واحد از ۲۲ به ۲۵-۳۹۴ واحد از ۲۵ به ۲۶-۳۹۴ واحد از ۲۶ به ۲۷-۳۹۴ واحد از ۲۷ به ۲۸-۳۹۴ واحد از ۲۸ به ۳۰-۳۹۴ واحد از ۳۰ به ۳۱-۳۹۴ واحد از ۳۱ به ۳۴-۳۹۴ واحد از ۳۴ به ۳۷
اسید سولفوریک	۱۲۸ واحد از ۳ به ۵۵-۱۲۸ واحد از ۵۵ به ۵۴-۱۲۸ واحد از ۵۴ به ۵۱-۱۲۸ واحد از ۵۱ به ۱۳-۱۲۸ واحد از ۱۳ به ۱۴-۱۲۸ واحد از ۱۴ به ۴۴-۱۲۸ واحد از ۴۴ به ۴۱-۱۲۸ واحد از ۴۱ به ۴۰
اسید نیتریک	۱۷۰ واحد از ۳۲ به ۳۴-۱۷۰ واحد از ۳۴ به ۳۷-۱۷۰ واحد از ۳۷ به ۳۸-۱۷۰ واحد از ۳۸ به ۴۲-۱۷۰ واحد از ۴۲ به ۴۵

این مدل در مدل ایمنی- اقتصادی به دست می آید. در مجموع استفاده از مدل های ریاضی و نیز شاخص ریسک ارائه شده در پشتیبانی از تصمیمات مسیریابی حمل مواد خطرناک نتایج مثبتی در پی خواهد داشت. تلفیق رویکرد ایمنی و اقتصادی می تواند رضایت شرکت های حمل و نقل را از لحاظ اقتصادی به دست آورد و ایمنی را لحاظ می کند. ضمن این که با تعیین سقف ریسک برای مسیرها و کمینه سازی آن به توزیع ریسک توجه ویژه ای می شود و عدالت در توزیع ریسک رعایت می شود. همچنین به دلیل جامعیت نسبی شاخص ریسک تعریف شده، نهادهای متعدد درگیر در حمل مواد خطرناک نیز از مسیرهای به دست آمده استقبال خواهند کرد. مدل پیشنهادی این پژوهش می تواند ابزار برنامه ریزی حمل و نقل جاده ای با رعایت مشخصات فنی و ضوابط مربوط به محورهای استفاده شده برای حمل انواع کالاهای خطرناک باشد و منجر به شکل گیری سیستمی نوین برای مدیریت مسیر ناوگان ترابری حمل مواد خطرناک شود.

۹- تقدیر و تشکر

"این پژوهش با همکاری دفتر برنامه ریزی و آموزش سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای انجام شده است"

۱۰- منابع

[۱] فریبرز عراقی، فرشید و همکاران، آشنایی با مفاهیم حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک، آبان ۱۳۸۵.

[2] US DOT (2004). List of hazardous materials. The Office of Hazardous Materials Safety, US Department of Transportation, Washington, DC.

[3] UN (2001). UN recommendation on the transport of dangerous goods, model regulations. United Nations Economic and Social Council's Committee of Experts on the Transport of

نوع ماده	مسیر و تعداد حمل
اسید سولفوریک	۱۲۸ واحد از ۳ به ۴-۱۲۸ واحد از ۴ به ۷-۱۲۸ واحد از ۷ به ۸- ۱۲۸ واحد از ۸ به ۱۰-۱۲۸ واحد از ۱۰ به ۱۲-۱۲۸ واحد از ۱۲ به ۱۵-۱۲۸ واحد از ۱۴ به ۱۴-۴۴-۱۲۸ واحد از ۴۴ به ۴۱-۱۲۸ واحد از ۴۱ به ۴۰
اسید نیتریک	۱۷۰ واحد از ۳۲ به ۳۴-۱۷۰ واحد از ۳۴ به ۳۷-۱۷۰ واحد از ۳۷ به ۳۸-۱۷۰ واحد از ۴۲ به ۴۵

برای مقایسه بهتر مدل ها، نتایج به دست آمده در جدول زیر خلاصه شده است:

جدول (۴) مقایسه مدل ها

شاخص	مدل ایمنی	مدل ایمنی-اقتصادی
ریسک کل	۹۹۳۶	۸۸۸۶
مسافت کل	۱۳۶۸۰۷۳km	۱۱۷۱۲۱۵km

همان طور که در مسیرهای پیشنهادی و نیز جدول بالا مشاهده می شود، رویکرد توجه تنها به ایمنی با وجود ریسک و مسافت کل زیاد، توزیع ریسک بهتری دارد و تنها ۱۱ کمان بدون استفاده می ماند؛ در حالی که ۱۳ کمان ریسک بالاتر از ۳۰۰ واحد متحمل می شوند. استفاده از رویکرد ایمنی- اقتصادی، ریسک و مسافت کل را بسیار کاهش می دهد. اگرچه در این رویکرد ۲۱ کمان بدون استفاده می ماند ولی وجود محدودیت حد بالای ریسک و این که تنها ۸ کمان ریسک بالاتر از ۳۰۰ واحد دریافت می کنند، این رویکرد را از لحاظ توزیع ریسک توجیه می کند.

۸- نتیجه گیری

با توجه به جواب های به دست آمده از مدل ها به نظر می رسد بهترین و یا در واقع ایمن ترین و اقتصادی ترین مسیرهای ممکن از راه حل مدل ایمنی و استفاده از جواب

- [11] Erkut, E., Alp, O. (2005). Integrated routing and scheduling of hazmat trucks with stops enroute. *Transportation Science*, in press.
- [12] Erkut E., Gzara F, (2008). Solving the hazmat transport network design problem, *Computers & Operations Research* 35 (2008) 2234– 2247
- [13] Konstantinos N., et al ,(2010). Solving the bicriterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 18, Issue 5, 713-726
- [14] Preemptive priority-based algorithms for fuzzy minimal cost flow problem: An application in hazardous materials transportation, *Computers & Industrial Engineering* 57 (2009) 341–354
- [15] Pradhananga R, Taniguchi E, Yamada T.,(2010). Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation . *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, Volume 2, Issue 3, 6097-6108
- [16] Alp, E. (1995). Risk-based transportation planning practice overall methodology and a case example. *INFOR* 33 (1), 4–19.
- [17] Abkowitz, M., Lepofsky, M., Cheng, P. (1992). Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes. *Transportation Research Record* 1333, 30–35.
- Dangerous Goods.
- [4] Erkut, E., Introduction to the special issue, *Computers & Operations Research* 34 (2007) 1241–1242.
- [۵] گزارشی از آمارهای جاده‌ای، سازمان حمل و نقل و راهداری، ۱۳۸۷.
- [6] Abkowitz, M., Cheng, P.D.M. (1988). Developing a risk cost framework for routing truck movements of hazardous materials. *Accident Analysis and Prevention* 20 (1), 39–51
- [7] Abkowitz, M., Lepofsky, M., Cheng, P. (1992). Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes. *Transportation Research Record* 1333, 30–35.
- [8] Kara, B.Y., Verter, V. (2004). Designing a road network for hazardous materials transportation. *Transportation Science* 38 (2), 188–196.
- [9] Erkut, E., Gzara, F. (2005). A bi-level programming application to hazardous material transportation network design. Research report, Department of Finance and Management Science, University of Alberta School of Business, Edmonton, Alberta, Canada.
- [10] Zografos, K.G., Androutopoulos, K.N. (2004). A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems. *European Journal of Operational Research* 152 (2), 507–519.