

توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی

الهام جلیلی بال، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدهگان فنی، دانشگاه تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

حسن جوانشیر، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱

دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۷

چکیده

در این مقاله، مسأله مسیریابی وسایل حمل و نقل مواد سوختی با در نظر گرفتن محدودیت پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل علاوه بر کمینه کردن هزینه ها و کاهش ریسک، برقراری تعادل در مسیر پیمایشی هر وسیله نقلیه را با در نظر گرفتن پیامدهای زیست محیطی مد نظر قرار داده تا ضمن اینکه ایمن‌ترین مسیرها در عین اقتصادی بودن یافت شود. مسیرهای انتخابی برای وسایل نقلیه به گونه ای انتخاب شود که انتشار آلودگی‌های زیست محیطی از یک مقدار مشخص تجاوز نکند. چنانچه در مطالعات صورت گرفته پیشین، در خصوص مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی، این توابع هدف چندگانه به صورت یکپارچه با در نظر گرفتن پیامدهای زیست محیطی دیده نشده است. با توجه به *NP-Hard* بودن مسأله برای حل آن در ابعاد بزرگ، از الگوریتم‌های فراابتکاری *NSGA-II* و *MOVDO* بهره گرفته که با روش طراحی آزمایشات تاگچی تنظیم پارامتر می‌شوند. همچنین از پنج شاخص برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. در انتها به منظور بررسی کاربردی بودن مدل ارائه شده، ۱۵ مسأله در اندازه‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود و سپس به تشریح نتایج معیارهای بدست آمده برای هر یک از الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. نتایج بدست آمده از حل مسائل نمونه با اندازه‌های مختلف نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم کارایی و اثربخشی مناسبی در حل مسائل مختلف بخصوص با اندازه های بزرگ را در زمان کوتاه دارند.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه، مواد خطرناک، عوامل زیست محیطی، بهینه سازی میرایی ارتعاشات

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

صورت وقوع هر نوع حادثه ای خسارت‌های غیرقابل جبرانی به محیط زیست و انسان‌ها وارد می‌شود [Zografos and Androutsopoulos, 2004].

به دلایل نگرانی‌های مذکور فوق، در تابع هدف مسأله مسیریابی وسایل نقلیه^۲ مواد خطرناک علاوه بر کمینه کردن هزینه‌ها، کاهش ریسک حمل‌ونقل این مواد نیز در نظر گرفته می‌شود [List, et.al., 1991]. طراحی مسیر بهینه به عنوان یک مسأله چند هدفه با اهداف متناقض در نظر گرفته می‌شود، زیرا کاهش احتمال ریسک مسیرها به افزایش در هزینه حمل‌ونقل منجر می‌شود [McCord and Leu, 1995]. مسیرهای مجاز برای حمل‌ونقل مواد خطرناک با توجه به معیارهای متعددی از جمله ایمنی مسیر، شرایط زیست محیطی، جمعیت اطراف راه‌های مورد استفاده تعیین می‌شود و الزاماً تعیین کوتاهترین مسیر نمی‌باشد. بنابراین تصمیمات مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه این گونه مواد می‌تواند در کاهش ریسک در ناحیه حمل‌ونقل مواد خطرناک کارا و مؤثر باشد.

جوی و همکاران اولین بار از الگوریتم کلاسیک کوتاه‌ترین مسیر برای حل مسأله زمانبندی وسایل حمل‌ونقل مواد خطرناک استفاده کردند [Joy et. al., 1981]. باتا و چپو ریسک حمل‌ونقل را در مطالعه خودشان در نظر گرفتند و دو مدل مسیریابی تک هدفه که در آن تعداد افراد در معرض خطر به عنوان مقدار ریسک مد نظر قرار داده شده بود را طراحی کردند [Batta & Chiu, 1988]. ریسک حمل‌ونقل متغیر با زمان برای اولین بار توسط نوزیک و همکاران در نظر گرفته شد [Nozick et. al., 1997]. آنها مدل چند هدفه مسیریابی وسایل نقلیه مواد خطرناک را بر اساس پارامترهای متغیر با زمان با هدف کمینه کردن طول مسیر، احتمال کل تصادف و کل جمعیتی که در طول مسیر در معرض خطر قرار دارند ارائه کردند. توکلی مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل مسیریابی وسایل نقلیه چندهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل و ریسک وقوع حوادث در جابه‌جایی مواد خطرناک را ارائه کردند [Tavakkoli-

مدت زمان زیادی است که مدیریت لجستیک در حوزه‌ی صنعت و آکادمی مورد توجه واقع شده است. از سوی دیگر، حمل‌ونقل مواد خطرناک^۱ همانند مواد منفجره، قابل اشتعال، سمی و اکسید کننده به عنوان مواد اولیه یا محصول استراتژیک در صنایع مختلف، نقش بسیار مهمی در توسعه صنعتی کشور ایفا می‌کند. بر اساس آمار سازمان ملل، حدود نیمی از بارهایی که حمل می‌شوند، در گروه مواد خطرناک است. مواد خطرناک بر اساس کنوانسیون حمل‌ونقل جاده‌ای کالا و محصولات خطرناک^۲ (ADR)، به نه طبقه مجزا تقسیم شده‌اند. طبقات مورد نظر کنوانسیون فوق به ترتیب مواد منفجره، گازها، مایعات قابل اشتعال، جامدات قابل اشتعال، مواد اکسید کننده، مواد سمی و عفونی، مواد رادیواکتیو، مواد خورنده و در نهایت ضایعات می‌باشند. وابستگی کشورهای صنعتی به مواد خطرناک یک حقیقت می‌باشد به گونه ای که میزان جابه‌جایی سالانه محمولات خطرناک معادل چهار میلیارد تن در دنیا برآورد شده است [Zografos and Androutsopoulos, 2004].

با توجه به ماهیت و طبیعت خطرآفرین این گونه مواد، جابه‌جایی آن‌ها همواره با درجاتی از ریسک همراه می‌باشد. تحقیقات نشان داده است از هر ۲۰ حادثه حمل محمولات خطرناک یکی منجر به آتش‌سوزی شده و از هر ۴/۵ حادثه منجر به آتش‌سوزی نیز یکی به انفجار انجامیده است. در موارد حوادث مرتبط با حمل گازها از هر هفت حادثه نیز یکی منجر به پخش گاز در محیط شده است. اهمیت برنامه‌ریزی و نگرانی‌های مربوط به حمل‌ونقل مواد خطرناک عمدتاً به مسایل و تبعات ناشی از حوادث احتمالی آن‌ها مرتبط می‌شود و این موضوع بحث‌های متفاوت در این زمینه را به مسایل جدید در حمل‌ونقل تبدیل نموده است. بنابراین علاوه بر جنبه‌های اقتصادی حمل‌ونقل مواد خطرناک، شاخص‌های انسانی و زیست محیطی نیز می‌بایست به منظور حمل‌ونقل این نوع مواد در نظر گرفته شود. اگر چه احتمال وقوع حوادث در حمل‌ونقل این گونه مواد بسیار کم است، ولی در

توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی

مواد خطرناک می‌باشند. زاهدیان و توکلی مقدم مطالعه‌ای در خصوص یک مدل ریاضی دوهدفه برای حمل‌ونقل که سازگار با محیط زیست باشد، انجام دادند [Zahedian and Tavakkoli-Moghaddam, 2015].

امروزه، حمل‌ونقل موادخطرناک به دلیل خطرات ناشی از این نوع حمل‌ونقل‌ها، یک مسأله بسیار مهم برای محققان می‌باشد که می‌بایست برای توسعه صنایع و صنعت حمل‌ونقل در نظر گرفته شود. بنابراین مدلی باید در نظر گرفته شود که ریسک و خطرات زیست‌محیطی ناشی از حمل‌ونقل اینگونه مواد در آن لحاظ شده باشد. با توجه به هزینه‌های مربوطه، کاربردی و واقعی بودن مدل نیز بسیار مهم است. در این مقاله یک مدل دو هدفه برای مسیریابی پایانه‌های راه آهن چند وجهی با در نظر گرفتن هزینه و ریسک به عنوان توابع هدف ارائه شده است. علاوه بر این، یک مفهوم فازی در مدل ارائه شده، در نظر گرفته شده است. مدل برای یک مثال عددی توسط نرم افزار رایج و با استفاده از یک حل کننده معتبر تأیید شده است.

در این مقاله، مسأله مسیریابی موادخطرناک با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست‌محیطی به صورت یک مسأله چندهدفه ارائه شد که کمینه کردن هزینه سفر و هزینه ناشی از تأخیر وسایل نقلیه را در تابع هدف اول دنبال می‌کنیم، در تابع هدف دوم به دنبال این هستیم تا تمام وسایل نقلیه مسیر متعادلی را طی کنند به این معنا که تمامی وسایل نقلیه مسافت یکسانی را طی کنند و در سومین تابع هدف کمینه کردن ریسک مسیر مد نظر قرار داده شده است. مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جزء مسائل NP-Hard است، [Lenstra and Rinnoy Kan, 1981]، در نتیجه حل این مسائل دارای پیچیدگی‌های بسیار زیادی به‌ویژه در ابعاد بزرگ است. به همین دلیل از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر NSGA-II⁺ و MOVD^o در حل این مدل استفاده خواهد شد.

در ادامه، ابتدا به تعریف مسأله پرداخته شده و سپس در بخش بعد مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد. سپس به منظور حل مدل،

[Moghaddam et. al., 2012] همچنین در سال ۲۰۱۳ توکلی مقدم و همکاران مدل ریاضی دو معیاره با رویکرد مد نظر قرار دادن ریسک و هزینه برای جابه‌جایی موادخطرناک با هدف تعیین بهترین مسیر برای انتقال مواد سوختی از انبار توزیه به هر یک از نقاط تقاضا بر اساس دو معیار ریسک و هزینه ارائه کردند [Tavakkoli-Moghaddam et. al., 2013].

محمودآبادی و سید حسینی در مقاله خود رویه‌ای تکراری را بر اساس تئوری آشوب مبتنی بر تعریف ریسک دینامیکی برای تعیین بهترین مسیر حمل‌ونقل مواد خطرناک ارائه کردند [Mahmoudabadi and Seyedhosseini, 2013]. هدف اصلی این مقاله بهبود همزمان زمان سفر و ریسک به گونه‌ایست که برای مقامات محلی و ملی در شبکه حمل‌ونقل رضایت‌بخش باشد. بر اساس رویه پیشنهادی آنها چهار مؤلفه مهم ریسک شامل اطلاعات تصادف، جمعیت، محیط زیست و جنبه‌های زیرساختی آن تحت متغیرهای کلامی ارائه شده است که با استفاده از روش تبدیل متغیرهای کلامی به اعداد کمی، کمی-سازی شده‌اند. به کارگیری مدل ارائه شده نشان می‌دهد که در حالیکه متغیرهای بی‌نظم به شرایط اولیه وابسته هستند، پرتکرارترین مسیر، مستقل باقی خواهد ماند. پرادانانگا و همکاران در مقاله خود تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی از جواب‌های بهینه پارتو دو هدفه مسأله زمانبندی و مسیریابی وسایل نقلیه مواد خطرناک با محدودیت پنجره زمانی ارائه دادند [Pradhananga et. al., 2014]. از آنجاییکه تمام جواب‌های مسیریابی پارتو جواب‌های موازنه‌ای از منظر هزینه و ریسک است، مقایسه اثرات زیست‌محیطی می‌تواند اطلاعات بیشتری را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم کند تا در فرآیند تصمیم‌گیری به آنها کمک کند. ترمهای هزینه و زمان ارائه شده در این مدل بر اساس ترمهای زمان سفر و جمعیت در معرض خطر است. بنابراین با در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی و پویا بودن زمان سفر و جمعیت در معرض خطر مدل ارائه شده دارای حوزه‌ی قابل ارتقاء به مسأله مسیریابی چندهدفه پویا و واقعی در حمل

کنند، در سومین تابع هدف کمینه کردن ریسک مسیر مد نظر قرار داده می‌شود.

۲-۱ مفروضات

۱. وسایل حمل و نقل ناهمگن می‌باشند.
۲. وسایل نقلیه مسیر متعادل را طی می‌کنند که کمترین ریسک و هزینه را داشته باشد.
۳. به تمام مشتریان سرویس می‌دهیم.
۴. در یک مرتبه بازدید مشتری تمام تقاضایش برآورده می‌شود.
۵. پنجره زمانی برای هر مشتری در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که اگر تقاضای هر مشتری در پنجره زمانی از پیش تعیین شده‌ای تأمین نگردد جریمه تأخیر باید پرداخته شود.

۳-۱ اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

$I = \{1, \dots, m, m+1, \dots, m+n\}$ مجموعه نقاط تقاضا و دپو I

$i, j = \{1, \dots, m, m+1, \dots, m+n\}$ اندیس مربوط به گره‌های مشتری و دپو که در آن از ۱ تا m دپو و از $m+1$ تا $m+n$ گره‌های مشتری را نشان می‌دهد i, j

$k = 1, \dots, K$ اندیس وسیله نقلیه k

$r = 1, \dots, R$ اندیس مسیر r

Cap_k ظرفیت حمل وسیله نقلیه k

d_j تقاضای گره j

t_{ijr} زمان سفر بین نقاط i و j در مسیر r

ta_i مدت زمان تخلیه بار گره i

tb_j مدت زمان بارگیری مشتری j در هر دپو

a_i حداقل زمان رسیدن به گره i

b_i حداکثر زمان رسیدن به گره i

D_{ik}^e میزان تأخیر وسیله نقلیه k در گره i

cc میزان جریمه حمل‌کننده به ازای هر واحد دیرکرد

R_{ijk} میزان ریسک مربوط به مسیر $i-j$ که وسیله نقلیه k از مسیر r آن را طی می‌کند

tc_{ijr} هزینه واحد حمل و نقل بین گره i و j در مسیر r

dis_{ijr} فاصله مکانی بین گره‌های i و j در مسیر r

توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی

$$b = \{1, \dots, B\}$$

مجموعه اثرات زیست محیطی برای مسیر i به j

میزان اثر زیست محیطی b در صورت بکارگیری ماشین k از نود i به نود j از مسیر r به ازای حمل هر واحد جریان

$$e_{ijr}^{bk}$$

حداکثر اثر زیست محیطی نوع b قابل انتشار

$$\theta_b$$

متغیرها: X_{ijk}

اگر وسیله نقلیه k از گره i به گره j در مسیر r سفر کند
در غیر اینصورت

Y_{ir} : متغیر کمکی برای حذف زیرتورهای مسیر r

۲. روش پژوهش

۱-۲ مدل ریاضی پیشنهادی مسأله

AT_i^k : زمان رسیدن وسیله نقلیه k ام به گره i ام

توابع هدف و محدودیت های مسأله به قرار زیر است:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R tc_{ijr} x_{ijk} + cc_i \sum_{i=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^K D_{ik}^e$$

$$\text{Min} \left[\text{Max}_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^R dis_{ijr} x_{ijk} \right) - \text{Min}_K \left(\sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^R dis_{ijr} x_{ijk} \right) \right]$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R R_{ijrk} x_{ijk}$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^R x_{jirk} = 1 \quad i = M+1, \dots, M+N \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^R x_{ijrk} = 1 \quad i = M+1, \dots, M+N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=M+1}^N \sum_{r=1}^R x_{ijrk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^R x_{jirk} = 1 \quad \forall i \in I, k \in K, r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R x_{ijrk} \leq K \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{r=1}^R d_j x_{ijrk} \leq Cap_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$AT_{ik} \geq \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{r=1}^R tb_j x_{ijrk} \quad (7)$$

$$\forall k \in K, i = 1, \dots, M$$

$$-AT_j^k + AT_i^k + t_{ijr} + ta_i \leq (1 - x_{ijrk})M \quad (8)$$

$$\forall i \in I, j \in I, k \in K, r \in R$$

$$a_i \leq AT_i^k \quad \forall i \in I, k \in K \quad (9)$$

$$D_{ik}^e \geq AT_i^k - b_i \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$D_{ik}^e \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{k=1}^K e_{ijr}^{bk} x_{ijk} \leq \theta_b \quad \forall b \in B \quad (12)$$

$$Y_{ir} - Y_{jr} + N \cdot x_{ijk} \leq N - 1 \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, m ; k \in K, r \in R$$

$$j = m + 1, m + 2, \dots, m + n$$

$$Y_{ir} \geq 0 \quad (14)$$

آن مشتری بیشتر باشد تأخیر صورت گرفته، در غیر اینصورت صفر است. محدودیت (۱۲) بیان می کند که مجموع آثار زیست محیطی انتشار یافته از تمام وسایل نقلیه در تمام مسیرها باید از یک مقدار از پیش تعیین شده کمتر باشد. محدودیت (۱۳) مربوط به جلوگیری از رخداد زیر تور می باشد. محدودیت (۱۴) بیانگر نوع متغیر است.

۲-۲ روش حل پیشنهادی مسأله

از آنجاییکه این مسأله جزء مسائل NP-Hard به شمار می رود برای حل مسائل در ابعاد بزرگ از الگوریتم های فراابتکاری NSGA-II چندهدفه و MOVD0 بهره جسته شده است که با روش طراحی آزمایشات تاگوچی تنظیم پارامتر شده اند. همچنین از پنج شاخص برای مقایسه عملکرد الگوریتم ها استفاده شده است.

۲-۲-۱ الگوریتم NSGA-II

روش NSGA یک روش متداول برای حل مسایل با چند تابع هدف بر مبنای الگوریتم ژنتیک است [Srinivas and Deb, 1994]. این الگوریتم یک روش کارآمد به منظور حل مسایل با چند تابع هدف است، ولی به منظور انتخاب ذره های غالب و در پیچیدگی محاسباتی دارای نقاط ضعف است، به همین منظور یک روش اصلاح شده به نام NSGA-II توسعه داده شد. این روش از الگوریتم NSGA بهتر عمل می کند زیرا از اطلاعات NP و S_p یعنی مجموع اعضای جمعیتی که توسط ذره P مغلوب

تابع هدف اول کمینه سازی هزینه های سفر و هزینه های ناشی از داشتن تأخیر را شامل می شود. تابع هدف دوم برقراری تعادل تخصیص بار برای هر وسیله نقلیه را بر عهده دارد به این مفهوم که تمام وسایل نقلیه مسیر تعادلی را طی کنند و تابع هدف سوم کمینه سازی میزان ریسک مرتبط با مسیر مواصلاتی را نشان می دهد.

محدودیت های (۱) و (۲) مربوط به گره مشتری است و این مفهوم را بیان می کند که به ازای هر یک ورود به گره مشتری یک خروج داریم. محدودیت (۳) نشان می دهد که هر ماشین فقط از یک دپو می تواند خارج شود. محدودیت (۴) وجود توازن بین ورود و خروج گره مشتری را نشان می دهد، محدودیت (۵) مربوط به تعداد وسایل نقلیه است و این مفهوم را بیان می کند که تعداد کل ماشین هایی که از دپوها به مشتری ها می روند باید از تعداد کل ماشین ها کوچکتر مساوی باشد. محدودیت (۶) مربوط به ظرفیت وسیله نقلیه است. محدودیت (۷) برای هر دپو زمان بارگیری محصولات مشتریان تخصیص داده شده به هر ماشین را حساب می کند. محدودیت (۸) زمان رسیدن به گره j را در صورتیکه گره j بعد از گره i باشد، نشان می دهد. محدودیت (۹) این نکته را بیان می کند که زمان رسیدن وسیله نقلیه k به مشتری i باید از زودترین زمان رسیدن به آن بیشتر باشد. محدودیت (۱۰) و (۱۱) مربوط به دیرکرد (تأخیر) وسیله نقلیه است که اگر زمان رسیدن به مشتری i از دیرترین زمان رسیدن

توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی

چهارم نیز انبار تخصیص داده شده به هر ماشین را نشان می‌دهد. شکل زیر یک نمونه از کروموزم را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ به طور فرضی یک نمونه جواب در نظر گرفتیم. همانطور که سطر اول نشان می‌دهد وسیله نقلیه ۱، مشتریان ۱ و ۳ را بترتیب بازدید می‌کند. ماشین ۳ نیز به ترتیب مشتریان ۲، ۵ و ۴ را بازدید می‌کند. انبار شماره ۱ به ماشین ۱ و انبار شماره ۲ به ماشین سوم اختصاص داده شده است. همچنین مسیرهای ۱ برای ماشین اول و مسیر دوم نیز برای ماشین ۳ در نظر گرفته شده است.

مشتریان	۱	۲	۳	۴	۵
توالی	۱	۱	۲	۳	۲
ماشین	۱	۳	۱	۳	۳
مسیر	۱	۲	۱	۲	۲
انبار	۱	۲	۱	۲	۲

شکل ۱. نمایش جواب

۲-۲-۴ نحوه تولید جمعیت اولیه

یک توالی تصادفی از وسایل نقلیه ایجاد می‌شود. از ماشین اول شروع کرده و سپس بصورت تصادفی مشتریان به وسایل نقلیه تخصیص داده می‌شود تا ظرفیت وسیله نقلیه پر شود. سپس به وسیله نقلیه بعدی می‌رویم و فرایند تخصیص مشتری را از مابقی مشتریان انجام می‌دهیم تا ظرفیت آن پر شود. این روند تا زمانی که تمام مشتریان بازدید شوند ادامه پیدا می‌کند. سپس به وسایل نقلیه استفاده شده مسیر و انبار تخصیص می‌دهیم. در مرحله آخر نیز زمان بازدید هر مشتری توسط وسیله نقلیه محاسبه می‌گردد.

۲-۲-۵ عملگر جهش و ترکیب و شرط توقف الگوریتم

NSGA-II

برای الگوریتم ژنتیک برای کروموزم مسأله از عملگر تقاطع تک نقطه ای برای ترکیب استفاده شده است:

$$Ch_1 = \text{round} (Parent_1 (1 : Alpha) + Parent_2 (1 + Alpha : N))$$

$$Ch_2 = \text{round} (Parent_2 (1 : Alpha) + Parent_1 (1 + Alpha : N))$$

شده است و تعداد دفعاتی که ذره P توسط سایر ذرات مغلوب شده است استفاده می‌کند.

۲-۲-۲ الگوریتم MOVDO

الگوریتم بهینه سازی میرایی ارتعاشات (VDO) برای اولین بار توسط مهدیزاده و توکلی مقدم [Mahdizade and Tavakkoli-Moghadam, 2009] ارائه شد که از میرایی دامنه نوسانات در تئوری ارتعاشات الهام گرفته شده است. فرایند کاهش دامنه نوسان که با گذشت زمان به صفر تمایل پیدا کند را فرایند میرایی می‌گویند. این روش به این ترتیب عمل می‌کند که حرکت از یک جواب اولیه تصادفی شروع می‌شود (در دامنه آغازین) آنگاه جواب جدید در مجاورت جواب قبلی با استفاده از یک ساختار همسایگی مناسب بطور تصادفی تولید و ارزیابی می‌شود. در صورتی که جواب جدید جواب بهتری باشد یعنی انرژی نوسان را کاهش دهد به عنوان جواب قابل قبول در فضای جستجو انتخاب می‌شود و اگر بدتر باشد، جواب جدید با احتمال ریلی پذیرفته می‌شود. این توزیع احتمال اجازه می‌دهد تا سیستم از جواب حداقل محلی فرار کند. این قدم‌ها تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد. اگر شرط توقف برقرار بود بطور کامل متوقف شده، در غیر اینصورت از برنامه میرایی جهت کاهش دامنه نوسان استفاده نموده و دامنه را کاهش داده و مجدداً قدم‌های فوق تکرار می‌شود.

۲-۲-۳ نحوه نمایش جواب‌ها

در مدل مفروض، کروموزم مسأله یک ماتریس می‌باشد که دارای ۴ سطر بوده و به تعداد مشتریان دارای ستون می‌باشد. ستون‌ها به ترتیب نشان دهنده یک مشتری می‌باشند. یعنی ستون اول مربوط به مشتری ۱ و ستون دوم مربوط به مشتری ۲ و، ستون آخر نیز مربوط به مشتری N می‌باشد. سطر اول توالی بازدید هر مشتری توسط وسیله نقلیه تخصیصی را نشان می‌دهد. سطر دوم ماشین تخصیص داده شده به هر مشتری را نشان می‌دهد. سطر سوم نیز مسیر تخصیص داده شده به ماشین و سطر

دو ماشین بصورت تصادفی انتخاب شده و مشتری های تخصیص داده شده به آن را عوض می کنیم و مسیر و انبار آن را نیز تغییر می دهیم. بطور مثال در شکل ۳ وسیله ۱ و ۳ انتخاب می شوند.

که $Parent_1$ و $Parent_2$ به ترتیب پدر و مادر انتخابی بوده و آلفا یک نقطه برش بین ۱ تا $N-1$ می باشد و Ch_1 و Ch_2 فرزندان حاصل شده می باشند. این عملیات بصورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است: (مقدار $Alpha$ برابر ۳ می باشد). برای عمگر جهش نیز دو روش در نظر گرفته شده است. در روش اول ابتدا یک والد بصورت تصادفی انتخاب شده و سپس

$Parent_1 * Alpha$			$Parent_2 * (1+Alpha)$		→	فرزند اول				
۱	۲	۱	۳	۱		۱	۲	۱	۳	۱
۳	۱	۱	۱	۲		۳	۱	۱	۱	۲
۱	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱	۱		۳	۱	۱	۱	۱
$Parent_1 * (1+Alpha)$			$Parent_2 * Alpha$		→	فرزند دوم				
۱	۲	۱	۴	۳		۱	۲	۱	۴	۳
۳	۱	۱	۱	۱		۳	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱		۲	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۱

شکل ۲. عملگر ترکیب

۴ جایجا می شوند. شرط توقف در الگوریتم ارائه شده برابر حداکثر تعداد تکرار الگوریتم می باشد.

۲-۲-۶ تنظیم پارامتر

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم های پیشنهادی از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده است. برای روش NSGA-II چهار فاکتور تعداد جمعیت اولیه (n_{pop})، حداکثر تعداد تکرار (max_it)، ضریب جهش ($Mutation$) و ضریب جایجایی ($Crossover$) در نظر گرفته شده است، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است. برای روش VDO پنج فاکتور تعداد جمعیت اولیه (n_{pop})، حداکثر تعداد تکرار (max_it)، دامنه اولیه ارتعاشات ($A0$) و پارامتر توزیع ریلی (σ) و ضریب میرایی (γ) در نظر گرفته شده است، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است.

قبل از جهش					→	بعد از جهش				
۱	۲	۱	۳	۱		۱	۲	۱	۳	۱
۳	۱	۱	۱	۲		۱	۳	۳	۳	۲
۲	۱	۱	۱	۱		۱	۲	۲	۲	۱
۱	۱	۱	۱	۱		۲	۳	۳	۳	۱

شکل ۳. عملگر جهش

قبل از جهش					→	بعد از جهش				
۱	۲	۱	۳	۱		۳	۲	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱	۲		۱	۱	۱	۳	۲
۲	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۲	۱
۱	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۱

شکل ۴. عملگر جهش

در روش دیگر دو مشتری انتخاب شده و وسیله نقلیه تخصیص داده شده به آنها عوض می شود. بطور مثال در شکل ۴ نود ۱ و

توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی

(Diversity) مقادیر بالاتر مطلوب تر می‌باشد. سپس برای معیار فاصله از جواب ایده آل (MID) و معیار فاصله‌گذاری (Spacing) هر چه مقدار این معیارها کمتر باشد مطلوب‌تر هستند. همچنین برای معیار زمان حل مسأله (Time) مقادیر کمتر، از مطلوبیت بالاتری برخوردار است.

در جداول ۳ و ۴ نتایج حاصل از حل برای هر کدام از الگوریتم‌ها در شاخص‌های مذکور نشان داده شده است. در ادامه نمودار پارتو حاصل از هر دو الگوریتم برای مسأله ۱۱ با ۳۰ مشتری، در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اکثر جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم‌ها برای توابع هدف دوم و سوم هر دو در یک رنج عددی می‌باشد. یعنی جواب‌های یافت شده برای تابع هدف دوم در رنج صفر تا سیصد و تابع هدف سوم ۳۱ تا ۳۲٫۵ می‌باشد. اما برای تابع هدف اول، الگوریتم NSGA-II جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم MOVDO بدست آورده است. زیرا رنج جواب‌ها یافت شده توسط NSGA-II بین ۱۶۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ و حدود جواب‌های یافت شده توسط MOVDO بین ۲۸۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ می‌باشد. با توجه به اینکه تابع هدف اول از نوع حداقل سازی می‌باشد پس الگوریتم NSGA-II جواب‌های بهتری را بدست آورده است. همچنین نمودار پارتو حاصل از هر دو الگوریتم برای مسأله ۱۴ با ۴۰ مشتری، در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اکثر جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم‌ها برای توابع هدف سوم هر دو در یک رنج عددی می‌باشد. یعنی جواب‌های یافت شده برای تابع هدف سوم ۴۲ تا ۴۳٫۵ می‌باشد.

جدول ۱. نتایج تنظیم پارامترها الگوریتم NSGA-II

تعداد تکرار	جمعیت	نرخ	نرخ
الگوریتم	اولیه	ترکیب	جهش
نتایج	۷۵	۳۰	۰/۷

جدول ۲. نتایج تنظیم پارامترها الگوریتم VDO

تعداد تکرار	جمعیت	A ₀	Sigma	Gamma
الگوریتم	اولیه			
نتایج	۱۰۰	۳۰	۰/۰۰۷	۴

۲-۲-۷ شاخص‌های مقایسه

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه دو دسته اصلی متریک وجود دارد: (۱) متریک‌های همگرایی (۲) متریک‌های پراکندگی. در این مقاله برای انجام مقایسه، از پنج شاخص که ترکیبی از شاخص‌های هر دو دسته اصلی می‌باشد، استفاده شده است. که معیارهای دسته اول عبارتند از: معیار تعداد جواب پارتو، معیار فاصله از جواب ایده آل و معیارهای مربوط به دسته دوم عبارتند از: معیار فاصله‌گذاری، معیار تنوع. همچنین معیار زمان اجرای الگوریتم برای مقایسه نیازمندی‌های محاسباتی در نظر گرفته شده است.

۳. تحلیل داده‌ها

در این مقاله، ۱۵ مسأله در اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده- اند که تعداد مشتریان از ۸ تا ۵۰ و انبارها از ۲ تا ۴ و وسایل نقلیه از ۲ تا ۱۵ در نظر گرفته شده است. قبل از تشریح نتایج معیارهای بدست آمده برای هر یک از الگوریتم‌ها، قابل ذکر است که برای سه شاخص تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NOS) و معیار تنوع

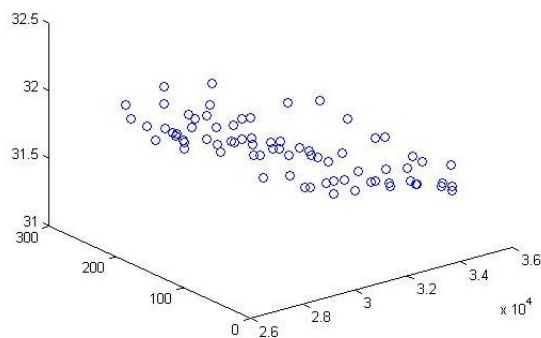
جدول ۳. مقدار مقیاس فاصله و تنوع برای الگوریتم‌های پیشنهادی

شماره مسأله	NSGA-II		MOVDO	
	Spacing	Diversity	Spacing	Diversity
۱	۰٫۴۹	۱۷۶٫۰۴	۰٫۳۷	۲۶۰٫۱۸
۲	۰٫۶۱۷	۴۶۲٫۱۴	۰٫۶۱۴	۱۸۶٫۴۶
۳	۰٫۵۵۷	۳۴۶٫۱۵	۰٫۸۳۵	۱۶۴٫۲۵
۴	۰٫۵۹۶۷	۴۱۸٫۴۸	۰٫۷۳۸	۳۱۶٫۹۶
۵	۰٫۶۱۳	۲۰۱٫۰۷۹	۰٫۶۱۸	۳۳۵٫۳۳

شماره مسأله	NSGA-II		MOVDO	
	Spacing	Diversity	Spacing	Diversity
۶	۰,۶۶۴	۳۸۹,۹۵	۰,۵۸	۴۱۹,۹
۷	۰,۹۸۲	۲۳۶,۹	۰,۵۴۸	۸۰۱,۹
۸	۰,۶۸۱	۵۹۴,۷۸	۰,۷۴	۶۶۵,۳۷
۹	۰,۶۱	۷۱۲,۶۱	۰,۷۴	۵۴۹,۳۴
۱۰	۰,۸	۱۱۴۸,۴۶	۰,۸۴	۱۲۵۴,۹۲
۱۱	۰,۶۷۹	۶۷۹,۶	۰,۶۴	۷۰۲,۸۵
۱۲	۰,۶۵	۸۴۹,۱۱	۰,۷۷	۱۰۶۷,۱۳
۱۳	۰,۷۱۴	۱۰۳۸,۲	۰,۷۷	۱۱۹۳,۹۴
۱۴	۰,۶۱۱	۹۶۵	۰,۷۶	۱۴۲۶,۴۷
۱۵	۰,۵۵۶	۹۳۲,۳۲	۰,۷۴	۱۴۵۸,۱۴

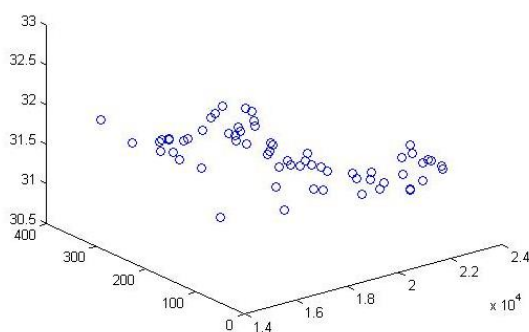
جدول ۴. مقدار مقیاس زمان و تعداد جواب پارتو و MID

شماره مسأله	NSGA-II			MOVDO		
	MID	NOP	Time	MID	NOP	Time
۱	۲۶۵۶,۳۸	۳۳	۴,۷۷	۳۵۰۷,۱	۳۰	۴,۳۷
۲	۳۱۷۸	۵۷	۸,۰۷	۴۴۵۵,۷۲	۱۲	۴,۳۴
۳	۳۲۱۹,۵۶	۵۸	۸,۵۲	۴۴۷۰,۵۴	۱۳	۴,۳۷
۴	۲۹۳۶,۶	۵۵	۸,۲۸	۴۷۰,۲۸	۳۱	۵
۵	۳۶۸۴,۶۲	۳۸	۶,۱۲	۷۱۰۹,۸۷	۲۳	۵,۱۱
۶	۴۱۳۱,۵	۵۷	۸,۱	۸۶۵۲,۱۱	۲۸	۶,۳۴
۷	۴۸۲۴,۵۶	۲۷	۶,۵۳	۱۱۸۶۱	۶۱	۸,۱۱
۸	۹۸۲۹,۳۵	۶۴	۷,۷۸	۱۷۴۰۶,۱۰۵	۵۲	۷,۶
۹	۱۰۰۹۶,۰۲	۷۳	۱۳,۳۲	۱۷۹۰۳,۶۸	۲۹	۶,۸۱
۱۰	۱۱۸۸۹,۳۶	۹۸	۱۲,۳۷	۲۴۲۸۳,۱۸	۷۰	۹,۷۲
۱۱	۱۷۹۳۷	۶۳	۱۳,۴۴	۳۰۵۴۸,۸۸	۷۵	۱۶,۴۸
۱۲	۱۱۵۲۸,۸	۷۶	۱۱,۸۱	۲۱۵۵۰,۹	۸۲	۱۰,۹۹
۱۳	۱۶۹۱۸,۶	۱۰۴	۱۷,۶۴	۳۱۹۲۴,۸	۷۰	۱۲,۲۷
۱۴	۲۴۹۹۰,۳۱	۹۴	۱۴,۶۴	۲۵۱۸۴,۸۴	۸۰	۱۱,۹
۱۵	۲۵۶۷۲,۱۸	۱۱۷	۱۸,۲۵	۴۱۰۱۲,۴۱	۸۶	۱۵,۲۹



شکل ۵. نمودار پارتو برای مسأله ۳۰ مشتری و ۳ انبار و ۷ وسیله نقلیه برای الگوریتم MOVDO

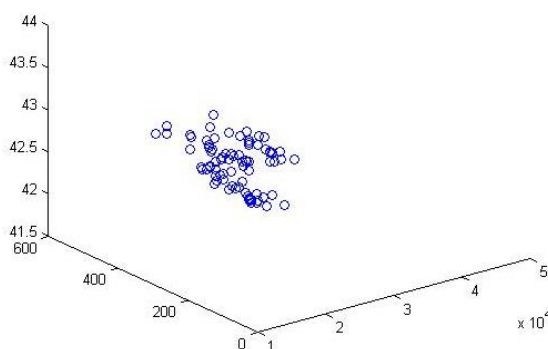
توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه جهت حمل مواد سوختی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی



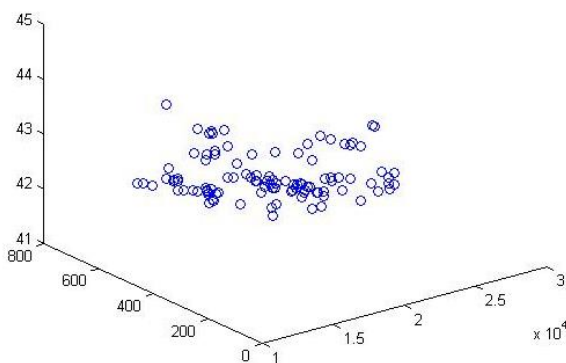
شکل ۶. نمودار پارتو برای مسأله ۳۰ مشتری و ۳ انبار و ۷ وسیله نقلیه برای الگوریتم NSGA-II

NSGA-II الگوریتم MOVDO جواب های بهتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II بدست آورده است. زیرا رنج جواب ها یافت شده توسط NSGA-II بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ و رنج جواب ها یافت شده توسط MOVDO بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ می باشد. با توجه به اینکه تابع هدف دوم از نوع حداقل سازی می باشد پس الگوریتم MOVDO جواب های بهتری را بدست آورده است.

اما برای تابع هدف اول، الگوریتم NSGA-II جواب های بهتری را نسبت به الگوریتم MOVDO بدست آورده است. زیرا رنج جواب های یافت شده توسط NSGA-II بین ۱۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ و رنج جواب های یافت شده توسط MOVDO بین ۲۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ می باشد. با توجه به اینکه تابع هدف اول از نوع حداقل سازی می باشد پس الگوریتم NSGA-II جواب های بهتری را بدست آورده است و برای تابع هدف دوم، الگوریتم



شکل ۷. نمودار پارتو برای مسأله ۴۰ مشتری و ۴ انبار و ۱۲ وسیله نقلیه برای الگوریتم MOVDO



شکل ۸. نمودار پارتو برای مسأله ۴۰ مشتری و ۴ انبار و ۱۲ وسیله نقلیه برای الگوریتم NSGA-II

۴. نتیجه گیری

مطالعه موردی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۲، شماره ۳، ص. ۲۲۳-۲۳۷.

- توکلی مقدم، رضا، محمودسلطانی، فرزاد، محمودآبادی، عباس (۱۳۹۲) "حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۴، شماره ۳، ص. ۲۰۹-۲۲۰.

- مهدی زاده، اسماعیل. توکلی مقدم، رضا. بهینه سازی یک مسأله زمانبندی ماشین های موازی به کمک میرایی ارتعاشات، دومین کنفرانس بین المللی تحقیق در عملیات، ۱۳۸۸.

- Batta, R., Chiu, S.S. (1988) "Optimal obnoxious paths on a network Transportation of hazardous materials", Operations Research, Vol. 36, No. 1, pp. 84-92.

- Joy, R.M., Stark, C.G., Gordon, C.S., Peterson, S.L., and Albertson, T.E. (1981). EKP. Vol. 73, pp.588-594.

- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1981) "Complexity of vehicle and scheduling problem", Networks, Vol. 11, pp. 221-227.

- List, G., Mirchandani, P. (1991) "An integrated network planar multi-objective model for routing and siting for hazardous materials and wastes", Transportation Science, Vol. 25, No. 2, pp. 146-156.

- McCord, M., Leu, A. (1995). "Sensitivity of optimal hazmat routes to limited preference specification", INFOR, Vol. 33, No. 2, pp. 68-83.

- Nozick, L.K., List, G.F., Turnquist, M.A. (1997) "Integrated routing and scheduling in hazardous materials transportation", Transportation Science, Vol. 31, No. 3, pp.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره دوم (۶۳) / زمستان ۱۴۰۳

در این مقاله، یک مدل سه هدفه برای مسأله مسیریابی وسایل حمل و نقل مواد سوختی با در نظر داشتن پنجره زمانی و عوامل زیست محیطی جهت کمینه سازی هزینه های سفر و هزینه ناشی از تأخیر، همچنین برقراری تعادل در مسیر پیمایشی هر وسیله نقلیه و کمینه کردن ریسک مسیر ارائه شده است. مدل ارائه شده توسط دو الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل و نتایج حاصل از آن با یکدیگر مقایسه شد. این نتایج نشان می دهد که زمان حل الگوریتم MOVDO کمتر می باشد این الگوریتم دارای سرعت محاسباتی بهتری می باشد. اما در معیارهای تعداد جواب پارتو و معیار فاصله از جواب ایده آل الگوریتم NSGA-II دارای عملکرد بهتری می باشد. در نتیجه در سطح معناداری ۱۸٪، الگوریتم NSGA-II در دو معیار بطور معنا دار و در یک معیار نیز عملکرد نسبتاً بهتری به الگوریتم MOVDO دارا می باشد. از این رو می توان گفت که الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم MOVDO دارا می باشد. از طرفی با توجه به این که در معیارهای کیفیت یعنی معیار فاصله از جواب ایده آل و معیار فاصله الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری را دارا می باشد بر این اساس کیفیت جواب های یافت شده توسط الگوریتم NSGA-II بهتر می باشد.

۵. پی نوشت ها

1. Transportation of Hazardous Materials
2. Agreement for Carriage Dangerous Goods and Substance by Road
3. Vehicle Routing Problem
4. Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm
5. Multi Objective Vibration Damping Optimization

۶. مراجع

- توکلی مقدم، رضا، علینقیان، مهدی، نوروزی، نرگس و سلامت بخش ورجوی، علیرضا (۱۳۹۱) "توسعه مدل ریاضی مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد سوختی تحت شرایط فازی -

200–215.

- Pradhananega, R., Taniguchi E., Yamada T., (2014), "Environmental analysis of Pareto optimal routes in hazardous material transportation", Social and Behavioral Science, The 8th International Conference on City Logistics, Vol. 125, pp. 506–517.

- Srinivas, N. and Deb, K. (1994) "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 2, pp. 221–248.

- Seyedhosseini, S.M., Mahmoudabadi, A., (2014) "Developing a chaotic pattern of dynamic hazmat routing problem", IATSS Research, Vol. 37, No. 2, pp. 110–118.

- Zahedian, Z., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015) "A fuzzy bi-objective mathematical model for sustainable hazmat transportation", International Journal of Transportation Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 231–244.

- Zografos, K.G., Androutsopoulos, K.N. (2004) "A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems", European Journal of Operational Research, Vol. 152, No. 2, pp. 507–519.