

# حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک

رضا توکلی مقدم (نویسنده مسئول)، استاد، گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
مهدی علی‌نقیان، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
نرگس نوروزی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
علیرضا سلامت بخش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۱/۳۰

## چکیده

مواد خطرناکی همانند مواد منفجره، اشتعال‌پذیر، سمی و اکسیدکننده، به عنوان مواد اولیه یا محصول استراتژیک در صنایع گوناگون، نقش بسیار مهمی در توسعه صنعتی کشور ایفا می‌کنند. همچنین، حمل و نقل این مواد نیز به دلیل ماهیت این نوع مواد، دارای ویژگی‌های منحصر به فرد است. به همین دلیل، مسیریابی مواد خطرناک، پیچیدگی‌های بسیار بیشتری نسبت به مسیریابی مواد معمولی دارد، زیرا در این نوع مسیریابی، علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، ریسک حمل و نقل مواد خطرناک در مسیرها نیز باید در نظر گرفته شود. همچنین، بعد زمان نیز با در نظر گرفتن زمان رسیدن مواد خطرناک به مشتریان و زمان تخلیه آن، می‌بایست در نظر گرفته شود. در این مقاله مدل جدیدی به منظور مسیریابی وسائط نقلیه به کمینه کردن ریسک حمل و نقل مواد خطرناک توسعه داده شده است. در این مدل سعی شده است، در مسیریابی وسائط نقلیه، علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل، کاهش ریسک مسیر نیز مورد توجه قرار گیرد و زمان‌بندی مناسبی برای خدمت‌دهی وسائط نقلیه به مشتریان ارائه شود تا هزینه‌های نیروی انسانی کمینه شود و امکان برنامه‌ریزی بهتری برای مسیریابی و توزیع مواد خطرناک به وجود آید. مسأله مسیریابی وسائط نقلیه مورد بررسی از نوع مسایل NP-Hard است، بنابراین با توجه به مدل ارائه شده چند هدفه، روش فراابتکاری NSGA-II پیشنهاد و برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، جواب‌های به دست آمده در ابعاد کوچک با جواب‌های به دست آمده از روش محدودیت‌آپسیلون مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که درصد خطای توابع هدف نسبت به روش محدودیت‌آپسیلون در تمامی مسایل حل شده کمتر از ۲٪ است که کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، زمان حل مسایل در دو بخش NSGA-II و روش محدودیت‌آپسیلون نشان دهنده افزایش نمایی زمان حل با استفاده از روش محدودیت‌آپسیلون است. در مقابل زمان حل مسأله توسط NSGA-II با افزایش خطی نسبت به تغییرات در ابعاد مسأله مواجه شد، که این امر نشان دهنده کارایی روش حل توسعه داده شده، برای حل مسأله در ابعاد واقعی و بزرگ است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسائط نقلیه، حمل و نقل مواد خطرناک، روش دقیق محدودیت‌آپسیلون، الگوریتم NSGA-II

## ۱. مقدمه

مسئله مسیریابی وسائط نقلیه<sup>۱</sup> یکی از مهم ترین مباحثی است که در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از سوی دیگر، حمل و نقل مواد خطرناک<sup>۲</sup> همانند مواد منفجره، اشتعال پذیر، سمی و اکسید کننده به عنوان مواد اولیه یا محصول استراتژیک در صنایع مختلف، نقش بسیار مهمی در توسعه صنعتی کشور ایفا می کند. آمار نشان می دهد که سالانه ۴ میلیون تن مواد خطرناک در سطح جهانی حمل می شود [Zografos and Androutsopoulos, 2004]. در بیشتر موارد، فاصله محل تولید مواد خطرناک با محل مصرف آن بسیار زیاد است، به همین جهت، از مسئله مسیریابی وسائط نقلیه، به منظور حمل مواد خطرناک با در نظر گرفتن کمینه کردن طول مسیر و هزینه های حمل و نقل استفاده می شود. علاوه بر جنبه های اقتصادی حمل و نقل مواد خطرناک، شاخصهای انسانی و زیست محیطی نیز می بایست به منظور حمل و نقل این نوع مواد در نظر گرفته شود. اگر چه احتمال وقوع حوادث در حمل نقل مواد خطرناک بسیار کم است، ولی در صورت وقوع هر نوع حادثه ای خسارتهای غیرقابل جبرانی به محیط زیست و انسانها وارد می شود [Zografos and Androutsopoulos, 2004]. به دلیل همین نگرانیها، در تابع هدف مسئله مسیریابی وسائط نقلیه مواد خطرناک علاوه بر کمینه کردن هزینه ها، کاهش ریسک حمل و نقل مواد خطرناک نیز در نظر گرفته شد [List, et.al., 1991]. طراحی مسیر بهینه به عنوان یک مسئله چند هدفه با اهداف متناقض در نظر گرفته می شود، زیرا کاهش احتمال ریسک مسیرها به افزایش در هزینه حمل و نقل منجر می شود [McCord and Leu, 1995].

مفهوم ریسک در حمل و نقل مواد خطرناک، احتمال وقوع حوادث در بازه های زمانی متوالی است. بنابراین، در حمل و نقل مواد خطرناک می بایست، احتمال وقوع حوادث و فاکتورهای وقوع حوادث نیز در نظر گرفته شود [Zografos and Androutsopoulos, 2004]. همچنین کازانتزی و همکاران چارچوبی سیستماتیک برای توسعه مدل حمل و نقل خطرناک ارائه کردند، به گونه ای که هزینه حمل و نقل به کمترین میزان برسد، در

حالی که خطرات احتمالی در سطوح تعیین شده کاهش می یابد. آنها از شبیه سازی مونت کارلو به عنوان ابزاری جامع و ساده برای ارزیابی داده های موثر بر رفتار ریسک در سیستم حمل و نقل استفاده کردند [Kazantzi, Kazantzis and Gerogian-nis, 2011]. زوگرافوس و دیویس به ارائه مدلی پرداختند که علاوه بر کاهش ریسک، به کمینه کردن زمان سفر و زیانهای حاصله نیز توجه داشت [Zografos and Davis, 1989].

آشتاکالا و انو علاوه بر بهینه کردن کاهش هزینه سفر میان نقاط مبدا و مقصد، بهینه سازی ریسک حمل و نقل بر اساس ریسک جمعیتی نرمال و ریسک محیط زیست را برای سه ماده خطرناک گاز کلر، گاز مایع و اسید سولفوریک ارایه کردند، به گونه ای که ریسک در هر مسیر، توسط در نظر گرفتن احتمال وقوع تصادف محاسبه می شود [Ashtakala and Eno, 1996]. کارا و ورتز مدل دو مرحله ای ارایه کردند که کمینه نمودن ریسک حمل نقل و بهینه کردن طول مسیر از اهداف آن بود [Kara and Verter, 2004]. همچنین یکی از اهداف مهم مسایل در حوزه حمل و نقل مواد خطرناک، مسئله مسیریابی وسائط نقلیه در کاهش هزینه حمل و نقل و کاهش ریسک این نوع مسایل است [Desrosiers et.al., 1989, Golden and Asad, 1995]. مدل کلاسیک مسیریابی وسائط نقلیه در ابتدا توسط دنتزیگ و رامسر [Dantzig and Ramser, 1959] ارایه و بر اساس روشهای دقیق حل شد. در ادامه، کلارک و رایت الگوریتم صرفه جویی را برای حل VRP پیشنهاد کردند که مبنای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت [Clarke and Wright, 1964]. فیشر و لاپورته و همکاران برای حل مسئله مسیریابی وسائط نقلیه، رویکردهای گوناگونی همانند روش شاخه و حد را توسعه دادند [Fisher, 1995]. با پیشرفت های اخیر در حل این گونه مسایل و با در نظر گرفتن مفروضات و قیود پیچیده تر، روشهای فراابتکاری همانند روش الگوریتم ژنتیک [Potvin and Bengio, 1994]. جستجوی ممنوع [Gen-dreau, Hertz and Laporte, 1994]، سیستم بهینه سازی مورچگان [Reimann, Stummer and Doerner, 2002]

## حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

برای دریافت کالا برای هر یک از مشتریان را می‌توان به صورت یک بازه زمانی تعریف کرد. انحراف از این بازه زمانی (به طور مثال زودتر رسیدن وسیله نقلیه به مشتری زودتر از بازه زمانی تعیین شده) باعث افزایش انتظار وسیله نقلیه و کاهش مطلوبیت مسیر می‌شود. به همین دلیل، در این مقاله، ابتدا بازه زمانی مطلوب هر یک از مشتریان شناسایی شده و در مسیریابی سعی شده است تا زمان رسیدن وسیله نقلیه به مشتریان در این بازه زمانی اتفاق بیفتد. انحراف از این بازه زمانی با جریمه‌ای در مدل توسعه داده شده، در نظر گرفته شده است. بنابراین، مسأله توزیع مواد خطرناک را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از وسائط نقلیه و مشتریان با تقاضای قطعی در نظر گرفت که دارای مفروضات زیر است [Desrochers, Desrosiers and Solomom, 1992]:

- هر وسیله نقلیه از دپو شروع به حرکت می‌کند و در نهایت باید به همان دپو باز گردد.
- هر وسیله نقلیه باید در یک بازه زمانی مشخص که شامل زودترین زمان رسیدن و دیرترین زمان رسیدن است، به مشتریان (گروه) خدمت رسانی کند.
- تقاضای مشتریان ثابت و قطعی است.
- ظرفیت وسایط نقلیه باید دقیقاً شامل مجموع تقاضای مشتریانی باشد که وسیله نقلیه قرار است به آنها خدمت‌رسانی کند.
- مجموع زمانهای خدمت‌رسانی وسایط نقلیه به مشتریان دارای قید بوده و ثابت است.

- مسیره‌ها باید چنان تعیین شود که میزان هزینه حمل و نقل کمینه گردد و جریمه ناشی از دیر کرد رسیدن وسائط نقلیه به مشتریان نیز کمینه شود. همچنین مسیره‌ها باید چنان طراحی گردند که حمل و نقل در نهایت ایمنی انجام شود.

بر طبق مفروضات ذکر شده، ریسک حمل و نقل، انتظار وقوع حوادث ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک را نشان می‌دهد که این حوادث می‌تواند شامل حوادث جانی، خسارات مالی و زیست محیطی باشد. از میان جنبه‌های حوادث یادشده، خسارات جانی دارای بیشترین اهمیت است. به همین دلیل، اکثر پژوهشها در زمینه کاهش خسارات انسانی انجام شده است. بنابراین، فرمول

و شبیه‌سازی تبرید [Chiang and Russel, 1996] توسعه داده شده است. در ادامه نیز بریوب و همکاران به بررسی مسایل چند هدفه و بررسی حل آنها به وسیله روش  $\epsilon$ -constraint پرداختند و آن را با ارایه روشهای فراابتکاری سریع در حالت چند هدفه حل کردند [Berube, Gendreau and Potvin, 2009]. راسل به منظور بهبود جوابهای ارایه شده روش مناسبی برای ایجاد زیرتور و جستجوی محلی ارایه کرد. در این مقاله، مسأله مسیریابی مواد خطرناک با پنجره زمانی به صورت یک مسأله چند هدفه ارایه شد که کمینه‌کردن هزینه حمل و نقل ریسک و متعادل ساختن ظرفیت وسائط نقلیه از اهداف این مقاله بود. مسأله مسیریابی وسائط نقلیه جز مسایل NP-Hard است، [Lenstra and Rinnoy Kan, 1981]، در نتیجه حل این مسایل دارای پیچیدگیهای بسیار زیادی به‌ویژه در ابعاد بزرگ است. به همین دلیل از الگوریتم NSGA-II3 در حل این مدل استفاده خواهد شد.

در ادامه، ابتدا مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی با در نظر گرفتن کمینه سازی ریسک عبور از مسیره‌ها نشان داده می‌شود و سپس مدل پیشنهادی ارایه می‌گردد. در ادامه، به منظور حل مدل پیشنهادی، الگوریتم NSGA-II ارایه می‌شود و به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نمونه مسایل سالومون حل، و نتایج بررسی و مقایسه می‌شوند.

## ۲. تعریف مسأله

در این بخش ابتدا مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی نرم با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سفر، ریسک مسیر و بالانس کردن ظرفیت وسائط نقلیه نشان داده خواهد شد و سپس پژوهشهای انجام شده در این حوزه بررسی می‌گردد. چنان که قبلاً توضیح داده شد، تابع هدف اصلی مدل مسیریابی وسائط نقلیه مواد خطرناک، کاهش هزینه‌ها و کاهش ریسک عبوری از مسیره‌هاست. اهمیت زمان دریافت مواد به دلیل افزایش توانایی و انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی نیروی انسانی و تخلیه مواد خطرناک از جمله اهداف دیگر این پژوهش است. بهترین زمان

کمتر از  $\lambda$  در بخش  $S$  باشند برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است. براین اساس می توان ریسک وقوع حادثه در بخش  $S$  را بر اساس رابطه ۳ مشخص کرد.

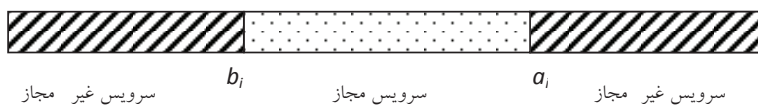
$$R_S = P_S C_S \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $P_S$  احتمال وقوع حادثه برای وسیله نقلیه حمل کننده مواد خطرناک در بخش  $S$  است و  $C_S$  تعداد افرادی هستند که در شعاع کمتر از  $\lambda$  در بخش  $S$  قرار دارند. بنابراین میزان ریسک در مسیر  $P$  برابر با مجموع ریسک در قطعه‌ها تعریف می شود که در رابطه ۴ نشان داده شده است.

$$R_P = \sum_{S=1}^N P_S C_S \quad s \in P \quad (4)$$

در این مقاله، علاوه بر ریسک مسیر، زمان رسیدن وسائط نقلیه به مشتریان (گره‌ها) نیز با توجه به دنیای واقعی در نظر گرفته شده است. به همین منظور، مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این حالت برای مشتری  $i$  فقط در یک بازه زمانی معین  $[a_i, b_i]$  امکان خدمت‌دهی وجود دارد، به این بازه زمانی اصطلاحاً پنجره زمانی گفته می‌شود، به طوری که اگر وسیله نقلیه در این بازه در دسترس نباشد، برای مشتری هزینه‌های زیادی ایجاد می‌کند که در شکل ۱ نشان داده شده است.

زمان خروج وسائط نقلیه از دپو، زمان عبوری بین مشتریان و زمان خدمت‌رسانی به ازای هر مشتری به عنوان زمان ورود وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شود. خدمت‌رسانی به هر مشتری باید در پنجره زمانی مربوط به او آغاز شود و وسیله نقلیه باید به مدت مشخصی در مکان مشتری  $i$  خدمت‌رسانی کند و در صورتی که وسیله نقلیه زودتر از پنجره زمانی مشتری به مشتری برسد مجاز است تا شروع پنجره زمانی او  $a_i$  منتظر بماند. در این مقاله، مواد خطرناک به عنوان یک مواد اولیه جهت مراکز صنعتی شناخته می‌شود، به این دلیل، از یک طرف دیرتر رسیدن این نوع مواد به مشتریان باعث ضرر آنها، به دلیل توقف خط تولید یا خدمت‌رسانی می‌شود



شکل ۱. سرویس‌دهی در حالت TW سخت

عمومی ریسک برابر مرکز جمعیت ( $i$ ) و نوع مواد خطرناک حمل شده ( $m$ ) در مسیر عبوری ( $p$ ) تعریف می‌شود که در رابطه ۱ تعریف شده است.

$$R_{ipm} = IR_{ipm} POP_i \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $IR_{ipm}$  به عنوان ریسک منحصر به فرد برای مسیر عبوری  $P$  است. به عبارت دیگر  $IR_{ipm}$  بیان‌گر احتمال وقوع حادثه برای فردی که در مسیری عبوری  $P$  قرار دارد، است. همچنین  $POP_i$  برابر تعداد افرادی که در مسیر عبوری  $P$  وجود دارند، تعریف می‌شود. همچنین، ریسک منحصر به فرد برابر احتمال مرگ، برای فردی است که در مسیر  $p$  قرار دارد و حادثه در آن مسیر اتفاق می‌افتد که این مقدار در رابطه ۲ محاسبه شده است.

$$IR_{ipm} = \sum_s P_s(A) P_{sm}(R|A) P_m(I|R) P_{ism}(D|I) \quad (2)$$

به دلیل آنکه مسیرهای عبوری ممکن است طولانی باشند، مسیر  $P$  در رابطه ۲، به بخشهای مساوی  $S$  تقسیم شده است. در این حالت، احتمال ریسک فردی که در مسیر  $P$  از مجموع ریسکهای موجود در بخشهای تقسیم شده به دست می‌آید وجود دارد. در رابطه ۲،  $P_s(A)$  احتمال وقوع حادثه برای وسیله نقلیه حمل کننده مواد خطرناک در مسیر  $S$  وجود دارد.  $P_{sm}(R|A)$  احتمال نشت مواد خطرناک در صورت وقوع حادثه است.  $P_m(I|R)$  احتمال انفجار و یا آتش‌سوزی مواد خطرناک در صورت نشت مواد خطرناک است.  $P_{ism}(D|I)$  احتمال وقوع مرگ برای افراد در صورت وقوع انفجار و یا آتش‌سوزی است. محاسبه احتمال وقوع مرگ در صورت انفجار بسیار سخت است، به همین دلیل [Erkut and Verter, 1995] به منظور ساده کردن محاسبه احتمال وقوع مرگ در صورت انفجار، از پارامتر  $\lambda$  استفاده کرده‌اند. یعنی اگر انفجاری در شعاع  $\lambda$  و یا کمتر از آن به وقوع بپیوندد، تمامی افرادی که در آن فاصله قرار دارند می‌میرند و یا اگر بیشتر باشد زنده می‌مانند. به عبارت دیگر  $P_{ism}(D|I)$  یک رابطه صفر و یک است که اگر انسانها در شعاع

### حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

$P_e$ : جریمه یک واحد زودکرد.

$P_l$ : جریمه یک واحد دیرکرد.

$Y_{eki}$ : مقدار زودکرد وسیله نقلیه  $k$  ام برای خدمت رسانی به مشتری  $i$  ام.

$Y_{lki}$ : مقدار دیرکرد وسیله نقلیه  $k$  ام برای خدمت رسانی به مشتری  $i$  ام.

$S_{ik}$ : وسیله نقلیه  $k$  به مشتری  $i$  در زمان  $S_{ik}$  سرویس دهی می‌کند. اگر وسیله نقلیه  $k$  مشتری  $i$  را ملاقات نکند  $S_{ik}$  بی معنی است.

$R_{ij}$ : میزان ریسک مرتبط به مسیر  $i-j$

متغیر تصمیم گیری  $X_{ijk}$  است با تعریف زیر:

همچنین فرض می‌شود، کلیه وسائط نقلیه همانند بوده و تقاضای

هر مشتری کمتر از ظرفیت هر وسیله نقلیه  $q$  است.

اگر خودرو  $k$  از گره  $i$  مستقیماً به گره  $j$  برود،  

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$
 در غیر این صورت

### ۳. مدل ریاضی پیشنهادی مسأله

سه تابع هدف در حل مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی و با در نظر گرفتن ریسک بر اساس مدل پیشنهادی سالومون ارایه شده است که به شرح زیر است:

$$\min z_1 = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K C_{ijk} X_{ijk} \right) \quad (5)$$

$$\min z_2 = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K R_{ij} X_{ijk} \right)$$

$$\min z_3 = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (P_e Y_{eki} + P_l Y_{lki}) \right)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N (d_i \sum_{j=1}^N x_{ijk}) \leq q \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{1jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ihk} - \sum_{j=1}^N x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N, \forall k \in V \quad (9)$$

و از سوی دیگر، به دلیل شرایط خاص مواد خطرناک نگهداری این مواد، هزینه زیادی را متوجه متقاضیان می‌کند. به همین جهت مواد خطرناک نمی‌توانند زودتر از زمان معینی به دست مشتریان برسند و مسیریابی وسائط نقلیه باید چنان طراحی شود که در یک بازه زمانی مشخص به مشتریان سرویس داده شود. در غیر این صورت توزیع کنندگان جریمه می‌شوند. با توجه به مطالب بیان شده، کمیته‌کردن جریمه یکی دیگر از اهداف این مقاله است.

بر اساس مفروضات مسأله، فرض کنید  $G=(C, A)$  یک گراف با مجموعه از گره‌ها (تعداد نقاط تقاضا) باشد. پارامترهای مسأله به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$N$ : مجموعه نقاط تقاضا (گره‌ها):  $N = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$  نقطه تقاضای شماره یک، معرف قرارگاه مرکزی است.

مجموعه  $A$  یک مجموعه ای از کمانها (یالها یا اتصالات بین نقاط

تقاضا):  $A = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$

$V$ : تعداد وسائط نقلیه در دسترس، مجموعه  $V = \{1, 2, \dots, K\}$

که نماینده تمامی وسائط نقلیه است و  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  نمایش‌دهنده مجموعه مشتریان است.

$q$ : ظرفیت هر وسیله نقلیه

$d_i$ : مقدار تقاضای مشتری  $i$

$t_{ik}$ : زمان مورد نیاز برای ارایه خدمت به مشتری  $i$  توسط وسیله نقلیه  $k$

$t_{ijk}$ : زمان مورد نیاز جهت طی سویه  $(i, j)$  توسط وسیله نقلیه  $k$

$T_k$ : حداکثر زمان خدمت دهی جهت و زمان طی مسیر، توسط

وسيله نقلیه  $k$

$s_i$ : زمان سرویس رسانی چنان که که  $(s_i = 0)$

$[e_i, l_i]$ : پنجره زمانی سرویس دهی به مشتری  $i$  ام

$c_{ijk}$ : برای هر کمان  $(i, j) \in A$  یک هزینه سفر غیر منفی به

ازای وسیله نقلیه  $k$  و زمان سفر غیر منفی  $t_{ij}$  موجود است.

$e_i$ : حد پایین پنجره زمانی نرم؛ زودترین زمان شروع خدمت

رسانی به هر مشتری بدون پرداخت جریمه.

$l_i$ : حد بالای پنجره زمانی نرم؛ دیرترین زمان ممکن خدمت

رسانی به هر مشتری بدون پرداخت جریمه.

تابع هدف و همچنین روش  $\epsilon$ -constraint که مربوط به حل مدل پیشنهادی است ارایه می‌گردد. همچنین، روش حل مدل پیشنهادی در ابعاد بزرگ، توسط الگوریتم NSGA-II توضیح داده خواهد شد.

#### ۴-۱ الگوریتم بهینه سازی توابع چند هدفه

در سالهای گذشته به منظور حل مسایل چند هدفه، الگوریتمهای بهینه‌سازی توابع چند هدفه (MOA) توسعه داده شدند که بر اساس رابطه ریاضی (۱۶) نشان داده شده است.

$$\text{Min } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$$

$$\text{s.t.} \quad (16)$$

$$C(x) \leq 0$$

در رابطه ۱۶ اگر  $n$  تعداد توابع هدف تعیین شود، اگر  $n > 1$  باشد آنگاه  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  تعداد متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شود و  $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$  بیانگر فضاهای جوابهای موجه است. همچنین  $C(x)$  بیانگر قیود مسأله است. جوابهای پارتو در مسأله چند هدفه به مجموعه‌ای از نقاط غیرمغلوب گفته می‌شود که تمامی جوابهای دیگر را مغلوب می‌کنند. لازم به ذکر است که جوابهای به دست آمده در صورتی هم‌دیگر را مغلوب می‌کنند که دارای شرایط زیر (روابط ۱۷ و ۱۸) باشند [Deb et.al, 2008]

$$f_i(y) \leq f_i(z) \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (17)$$

$$f_i(y) < f_i(z) \quad \exists i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (18)$$

#### ۴-۲ روش محدودیت اسیلون<sup>۵</sup> ( $\epsilon$ -constraint)

روش محدودیت اسیلون یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسایل چند هدفه که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت به حل این نوع مسایل می‌پردازد [Ehr-] [gott and Gandibleux, 2002]. مرز پارتو<sup>۶</sup> می‌تواند با روش قید  $\epsilon$  ایجاد شود [Berube, Gendreau and Potvin, 2009].

$$\text{min } f_1(x) \quad (19)$$

$$x \in X \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{ik} \sum_{j=1}^N X_{ijk} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij} X_{ijk} \leq T_k \quad \forall k \in V \quad (10)$$

$$S_{ik} + t_i + t_{ij} - K(1 - X_{ijk}) \leq S_{jk} \quad (11)$$

$$\forall i, j \in N, \forall k \in V$$

$$Ye_{ik} \geq e_i - S_{ik} \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (12)$$

$$Yl_{ik} \geq S_{ik} - l_i \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in S} \sum_{j \notin S} x_{ij}^k \leq |S| - r(S) \quad \forall S \subseteq A - \{1\} \quad S \neq \phi \quad (14)$$

$$X \in S, X_{ijk} \in \{0,1\}, S_{ik}, Ye_{ki} \quad \forall i, j \in N, k \in v \quad (15)$$

در رابطه ۵، تابع هدف  $Z_1$  به منظور کمینه کردن کل هزینه سفر است. تابع هدف  $Z_2$  مربوط به کاهش ریسک سفر و تابع هدف  $Z_3$  مربوط به کاهش هزینه‌های دیرکرد و زودکرد است، که مشروط بر موجه بودن قیود ظرفیت وسیله نقلیه، زمان سفر و زمان ورود است. رابطه ۶ مربوط به بیشینه ظرفیت وسائط نقلیه است. قید (رابطه ۷) بیان می‌کند که به تمامی مشتریان بایستی خدمت‌رسانی شود. رابطه ۸ بیان می‌کند که در صورت استفاده از وسیله نقلیه  $k$  ام این وسیله بایستی سفر خود را از دپو شروع کند. رابطه ۹ بیان می‌کند که در صورت ورود یک وسیله نقلیه به یک گره بایستی از آن خارج شود، همچنین، این رابطه پیوستگی مسیرها را تضمین می‌کند. قید رابطه ۱۰ مربوط به حداکثر زمان طی مسیر است. قید (رابطه ۱۵) بیان می‌کند که زمان شروع خدمت‌رسانی به هر گره وابسته به زمان شروع خدمت‌دهی و مدت زمان خدمت‌دهی به مشتری (گره) بازدید شده قبلی و فاصله دو مشتری (گره) است. قیود (روابط ۱۲ و ۱۳) مربوط به محاسبه زمان شروع خدمت‌رسانی به مشتریان و محاسبه مدت زمان دیرکرد و زودکرد. رابطه ۱۴ مربوط به حذف زیر تورها در مدل است. رابطه ۱۵ مربوط به معرفی متغیرهای مسأله است.

#### ۴. رویکرد های حل مسأله

در این بخش مفاهیم اصلی روشهای بهینه سازی مسایل با چند

## حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

۲. در این مرحله می بایست ذرات را بر مبنای مغلوب بودن، مرتب و آنها را در جبهه‌ها<sup>۶</sup> تقسیم بندی کنید. هر چه شماره جبهه‌ها کمتر باشد، به آن معناست که ذراتی که در آن هستند تعداد بیشتری از ذرات را مغلوب کرده‌اند. به همین منظور گامهای زیر را برای هر یک از ذرات مانند P اجرا کنید:

۱.۲.  $S_p$  را به عنوان مجموع اعضای جمعیتی که توسط ذره P مغلوب

است در نظر بگیرید و مقدار آن را صفر در نظر بگیرید.  $S_p = \emptyset$

۲.۲.  $N_p$  را به عنوان تعداد دفعاتی که ذره P توسط سایر ذرات مغلوب است در نظر بگیرید و مقدار آن را برابر صفر در نظر

بگیرید.  $N_p = \emptyset$

۳.۲. برای هر عضو از اعضای جمعیت  $n=1, \dots, \text{pop\_size}$  همانند q مراحل زیر را انجام دهید.

۱.۳.۲ اگر ذره P توانست ذره q را مغلوب کند، آنگاه q را به مجموعه  $S_p$  اضافه کنید.

۲.۳.۲ اگر ذره q توانست ذره P را مغلوب کند، آنگاه یک واحد به مجموعه  $N_p$  اضافه کنید.

۳. اگر بعد از بررسی تمام ذرات  $N_p = \emptyset$  شود آنگاه می توان نتیجه گرفت که P توسط هیچ ذره دیگری مغلوب نشده است. بنابراین

P به جبهه  $f_i$  اضافه می شود به عبارت دیگر  $f_i = f_i \cup \{P\}$

۴. تمامی مراحل زیر را تا زمانی که تعداد ذره های موجود در جبهه برابر صفر نیست ( $f_i \neq \emptyset$ ) ادامه دهید.

۱.۴ مجموعه ذراتی که در جبهه  $i+1$  در نظر گرفته میشود را Q و آن را برابر صفر در نظر بگیرید. ( $Q = \emptyset$ ) سپس برای هر ذره P که در مجموعه  $f_i$  است مراحل زیر را انجام دهید.

۲.۴ برای هر ذره مانند q که در مجموعه  $S_p$  که در جبهه  $f_i$  قرار دارد مراحل زیر را طی کنید. (لازم به ذکر است که،  $S_p$  مجموعه‌ای از ذرات است که توسط ذره P در مرحله قبل مغلوب شده است).

۱.۲.۴ یک واحد از  $N_q$  کم کنید. این کار نشان دهنده آن است که ذره q چند بار مغلوب شده است.

۲.۲.۴ اگر  $N_q = \emptyset$  نشان دهنده آن است که ذره q در جبهه  $f_{i+1}$  قرار می گیرد، در این صورت می بایست Q را با q جابجا کنید

$$f_2(x) \leq \varepsilon_2$$

...

$$f_n(x) \leq \varepsilon_n$$

(۲۱)

گامهای روش  $\varepsilon$ -constraint به صورت زیر است:

۱. یکی از توابع هدف را به عنوان تابع اصلی انتخاب کنید

۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف T، مسأله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به دست آورید.

۳. بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم بندی کنید و یک جدول مقادیر برای  $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  به دست آورید.

۴. هر بار مسأله را با تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر  $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  حل کنید.

۵. جوابهای پارتویی یافته شده را گزارش کنید.

### ۳-۴ 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 ذره‌های 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  $N_p$  و  $S_p$  یعنی مجموع اعضای جمعیتی که توسط ذره P مغلوب شده است و تعداد دفعاتی که ذره P توسط سایر ذرات مغلوب شده است استفاده می کند.

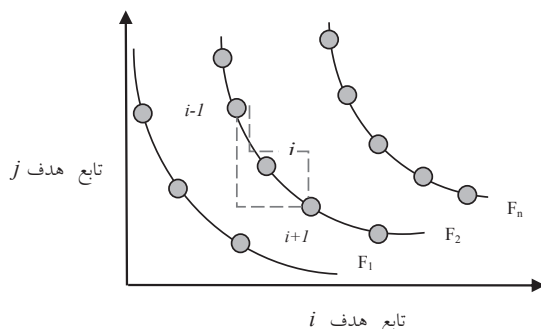
### ۳-۴-۱ گامهای الگوریتم NSGA-II

برای اجرای الگوریتم NSGA-II گامهای زیر را اجرا کنید [Deb et al, 2008]:

۱. یک جواب اولیه تصادفی به اندازه  $i=1, \dots, \text{pop size}$  تولید کنید و k تعداد تکرار الگوریتم NSGA-II را برابر ۱ قرار دهید  $K=1$

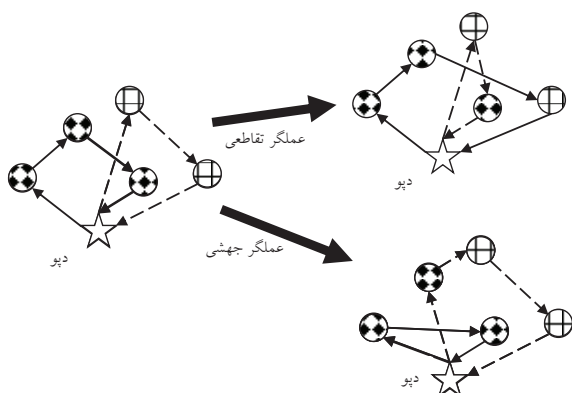
$$I(d_k).m = \frac{I(k+1).m - I(k-1).m}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (23)$$

در رابطه (۲۲) منظور از فاصله ازدحامی  $I(d_k).m$  در تابع هدف  $m$  است و به منظور محاسبه فاصله ازدحامی کل می بایست  $I(d_k)$  را برای تمامی توابع هدف محاسبه و جمع شود که در رابطه ۲۳ مشخص شده است. شکل ۲ نشان دهنده چگونگی تعیین فاصله ازدحامی در جبهه‌هاست.



شکل ۲. روش محاسبه فاصله ازدحامی در جبهه‌ها

۴.۲.۵ پس از محاسبه فاصله ازدحامی (CD)، آن ذره ای که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد انتخاب می گردد. ۶. بعد از انتخاب ذرات در مرحله قبل، یک حوضچه به وجود می آید که جمعیت منتخب نامیده می شود؛ سپس به منظور ایجاد جمعیت فرزندان از اپراتورهای ژنتیکی استفاده می شود. عملگرهای ژنتیکی بکار رفته در این مقاله عملگرهای تقاطعی<sup>۹</sup> و جهشی<sup>۱۰</sup> هستند.



شکل ۳. عملگر تقاطعی و جهشی

۷. پس از تعیین جمعیت فرزندان حاصل از اپراتورهای ژنتیکی  $P_t$  این جمعیت با جمعیت اصلی  $Q_t$  ادغام می شود. هر حوضچه به مقدار  $n$

$$(f_{i+1} = QU\{q\})$$

۳.۴ یک واحد به  $i$  اضافه کنید. ( $i=i+1$ )

۵. پس از جبهه بندی ذرات بر مبنای میزان مغلوب کردن سایر ذرات، به منظور ایجاد نسل بعدی، تعدادی از آنها انتخاب شوند. در این مقاله، به منظور تعیین ذره‌ها از روش دودویی استفاده شده است. به این منظور ابتدا دو ذره به طور تصادفی انتخاب می شوند و بین آنها مقایسه انجام می گیرد و هر کدام که بهتر بود به مخزن جوابها اضافه می شود. ملاک بهتر بودن جوابها بر ۲ معیار زیر تعیین می شود:

۱.۵ اولویت رتبه: در این اولویت جوابهایی که دارای رتبه پایین تر یا جبهه پایین تر است انتخاب می شوند، زیرا ذرات این جبهه‌ها می توانند بیشتر ذره‌ها را مغلوب کنند.

۲.۵ در بعضی از موارد ممکن است، دو ذره ای که انتخاب شده اند در یک رتبه باشند. به عبارت دیگر، ممکن است هر دو در یک جبهه باشند در این صورت از معیاری به نام  $CD$ <sup>۹</sup> استفاده شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۱.۲.۵ برای هر ذره  $n_i, f_i$  را به عنوان تعداد ذره های موجود در آن ذره در نظر بگیرید.

۲.۲.۵ فاصله بین ذره ها در جبهه ها را  $d_i$  بنامید و فاصله همه ذرات با یکدیگر را برابر صفر قرار دهید.  $f_i(d_i) = 0$

۳.۲.۵ برای هر ذره همانند  $z$  در جبهه  $F_i$  هر یک از تابع های هدف مسأله همانند  $m$  را در نظر بگیرید و مراحل زیر را انجام دهید:

۱.۳.۲.۵ در جبهه  $F_i$  تمامی ذرات را بر مبنای تابع هدف  $m$  مرتب کنید. به عبارت دیگر، ذرات موجود در جبهه  $F_i$  را بر مبنای توابع هدفشان به طور مجزا مرتب کنید.

۲.۳.۲.۵ بعد از مرتب کردن ذرات در جبهه  $F_i$  بر مبنای تابع هدف  $m$ ، فاصله ازدحامی  $I(d_k)$  ذره اول و آخر را برابر بی نهایت قرار دهید  $I(d_k) = I(d_n) = \infty$  دلیل این امر آن است که در کنار ذرات، ذره دیگری وجود ندارد که آن را پوشش دهد. برای ذرات ۲ تا  $n-1$ ، فاصله ازدحامی  $I(d_k)$  بر اساس (روابط ۲۲ و ۲۳) مشخص می شود.

$$CD_K = I(d_k)_1 + \dots + I(d_k)_m \quad (22)$$



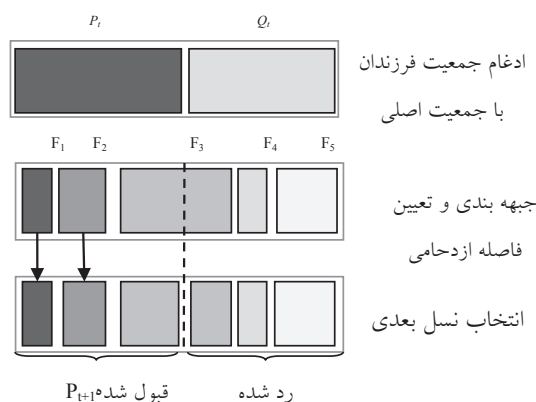
## حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

در این مدل از روش پیشنهادی [Tavakkoli, et.al, 2011] به منظور ایجاد جوابهای اولیه استفاده شده است. به همین منظور ابتدا یک کروموزوم به اندازه  $n$  (تعدادگره) تعریف شد و سپس به هر ژن موجود در هر کروموزوم یک عدد تصادفی صحیح در بازه  $[0, m+1-\epsilon)$  تخصیص داده شده است. از همین رو، در هر کروموزوم، هر ژن همانند  $i$ -ام نشان دهنده‌ی گره  $i$ -ام است و مقدار صحیح داخل هر ژن نشان دهنده شماره وسیله نقلیه‌ای است که به آن گره خدمت می‌دهد. سپس برای تعیین اولویت عبور وسائط نقلیه از گره‌ها به هر یک از اعداد صحیح ژنها بر اساس ترتیب عبوری وسیله نقلیه از گره  $i$ -ام عدد اعشاری اضافه می‌شود. در نتیجه، مقدار اعشاری تخصیص داده به ژنها نشان دهنده ترتیب عبور وسیله نقلیه از تور است. شکل ۴ نشان دهنده روش بکار رفته در ایجاد جواب اولیه است.

### ۴-۳-۳ تعیین پارامترها

الگوریتمهای فراابتکاری معمولاً روی پارامترهای خود حساس هستند و جوابهای ارایه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترهای آنان بستگی دارند. در این بخش پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل این مدل فرا ابتکاری توضیح داده خواهد شد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم NSGA-II در جدول ۱ نشان داده شده است. برای

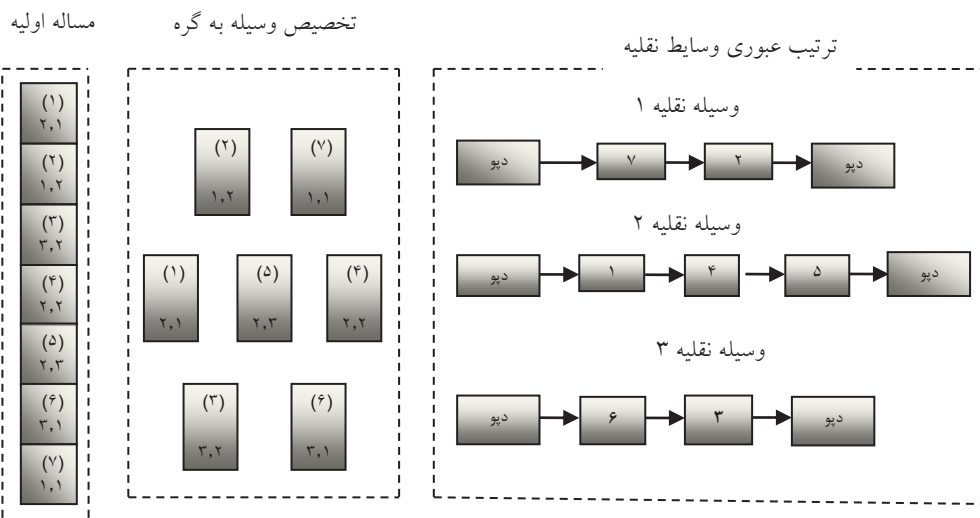
ظرفیت دارد و تعدادی از ذرات که با یکدیگر ادغام شده اند، باید حذف شوند. به همین منظور برای رسیدن به ظرفیت  $n$  مراحل زیر را اجرا کنید. ۱.۷ ابتدا ذره‌ها را بر طبق روش بیان شده در مرحله ۲ جبهه‌بندی کنید. ۲.۷ فاصله ازدحامی هر یک از ذره‌ها در جبهه‌ها را مشخص نمایید. ۳.۷ از جبهه  $f_1$  شروع کنید و ذرات آنرا بر طبق CD انتخاب کرده و به حوضچه جمعیت جدید  $(K+1)$  بریزید. این مرحله را تا زمانی ادامه دهید تا ظرفیت حوضچه جمعیت جدید  $(K+1)$  به  $n$  برسد شکل ۴ نشان دهنده روش انتخاب جمعیت جدید است. ۸. پس از ایجاد جمعیت  $(k+1)$  به مرحله ۲ بروید و این مراحل را به اندازه تعیین شده تکرار کنید.



شکل ۴. روش ایجاد جمعیت جدید

### ۴-۳-۲ شیوه نمایش جواب‌ها

در این بخش شیوه نمایش جوابها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۵. شیوه نمایش جوابها

روش دقیق  $\epsilon$ -constraint و زمان حل مسأله به ترتیب در چهار ستون بعدی ارائه شد. در ستونهای هشتم تا یازدهم مقادیر مرتبط با روش NSGA-II نشان داده شده است. در سه ستون انتهایی نیز خطای حاصل از روش NSGA-II در هر یک از توابع هدف گزارش شده است. به منظور ارزیابی خطای نتایج حاصل از عملکرد الگوریتمهای پیشنهادی (RG)<sup>۱۱</sup> به ازای هر تابع هدف، ابتدا بهترین نتیجه به دست آمده (BR)<sup>۱۲</sup> از الگوریتمها در نظر گرفته شد و سپس بهترین جواب به دست آمده با جواب هر یک از الگوریتمها (RA)<sup>۱۳</sup> مقایسه شد (رابطه ۲۴).

$$RG = \frac{BR - RA}{BR} \quad (24)$$

بررسی زمان حل مسایل در دو بخش NSGA-II و  $\epsilon$ -constraint نشان از افزایش نمائی زمان حل با استفاده از  $\epsilon$ -constraint داشته و در مقابل، زمان لازم برای حل مسأله به وسیله نرم افزار NSGA-II با افزایش خطی در حل مسائل مواجه است. یادآوری می شود که جمع زمانهای لازم برای حل ۹ زیر مسأله مربوط به روش  $\epsilon$ -constraint در این جدول نشان شده است. با بررسی افزایش زمانهای حل نیز می توان به تاثیر بسیار بالای افزایش وسائط نقلیه در زمان حل مسایل پی برد. به طور متوسط زمان حل مسائل توسط روش  $\epsilon$ -constraint برابر با ۶۱۱۳/۴۰ ثانیه است که این مقدار برای روش فرا ابتکاری ۳۱/۵۱ ثانیه است، این امر نشان از زمان

تنظیم پارامترهای مسأله از روش آزمایش و خطا استفاده شد. برای این منظور یک مسأله به صورت تصادفی انتخاب شد و با تغییر پارامترهای روش به حل مسأله پرداخته شد.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم NSGA-II

تعداد ذره ها	۱۰۰
عملگر تقاطعی	۰/۷
عملگر جهشی	۰/۳

## ۵. نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی ناشی از حل مدل در ابعاد کوچک و ابعاد بزرگ نشان داده خواهد شد. برای نشان دادن کارائی الگوریتم NSGA-II پنج مسأله در ابعاد کوچک تولید شد و نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش  $\epsilon$ -constraint مقایسه شد. در روش  $\epsilon$ -constraint تعداد ۳ شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شد و در مجموع حداکثر نه نقطه پارتویی برای هر مسأله تولید شد. به دلیل NP-Hard بودن مسأله، روش حل دقیق  $\epsilon$ -constraint قابلیت حل مدل را در ابعاد بزرگ ندارد، بنابراین پس از ۱۲۰۰ ثانیه حل مدل متوقف و جواب حاصل گزارش شد. در جدول ۲ نتایج مربوط به حل مسائل کوچک و متوسط نشان داده شده است. در این جدول سه ستون اول مربوط به مشخصات مسأله است. بهترین جواب یافته شده برای تابع هدف اول، دوم و سوم در بین نقاط پارتویی

جدول ۲. نتایج محاسباتی برای حل مسایل با ابعاد کوچک

شماره مسأله	تعداد مشتریان	$\epsilon$ -constraint			NSGA-II			خطای NSGA-II		
		هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳
۱	۲	۹۶/۶۰	۱۱/۶۰	۴۵/۲۱	۹۶/۶۰	۱۱/۶۰	۴۵/۲۱	۶/۹۰	٪۰/۰۰	٪۰/۰۰
۲	۶	۱۰۰/۳۶	۱۳۰/۶۲	۵۵/۶۹	۱۰۰/۵۰	۱۳۰/۸۵	۵۷/۴۹	۱۴/۱۸	٪۰/۹۸	٪۰/۱۷
۳	۸	۱۰۱/۲۰	۱۴۵/۳۶	۶۵/۶۰	۱۰۱/۲۰	۱۴۵/۳۶	۶۵/۶۰	۳۱/۱۲	٪۰/۰۰	٪۰/۰۰
۴	۱۰	۱۱۰/۵۸	۱۴۸/۳۰	۶۸/۳۶	۱۱۱/۵۴	۱۵۰/۸۱	۶۹/۱۲	۵۶/۹۲	٪۰/۸۶	٪۱/۶۹
۵	۱۲	۱۱۷/۳۶	۱۶۵/۳۰	۷۹/۸۹	۱۱۷/۹۸	۱۶۷/۱۹	۶۹/۱۲	۸۰/۴۵	٪۰/۰۵	٪۱/۱۴
میانگین		۱۰۴/۲۲	۱۲۰/۲۳	۶۳/۱۵	۶۱۱۳/۴۰	۱۱۹/۷۶	۶۰/۹۹	۳۵/۵۱	٪۰/۳۷	٪۰/۶

### حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

با توجه به نتایج به دست آمده، تعداد حل‌های غیر مغلوب کسب شده در الگوریتم NSGA-II با ۵۰۰ تکرار به طور کلی بهتر از تعداد حل‌های غیر مغلوب کسب شده با ۱۰۰ و ۲۰۰ تکرار بوده است. الگوریتم NSGA-II با ۵۰۰ تکرار به طور متوسط تعداد ۳۸/۲۹ حل غیر مغلوب برای هر مسأله تولید می‌کند؛ این در حالی است که حل غیر مغلوب با ۱۰۰ و ۲۰۰ تکرار به ترتیب برابر ۳۰/۷۵ و ۱۴/۳۴ است. با توجه به شاخص پراکندگی نیز، الگوریتم در ۵۰۰ تکرار نسبت به تکرارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ بهتر عمل نموده است. میانگین کلی این شاخص برای ۵۰۰ تکرار برابر ۱/۱۶ و برای ۱۰۰ و ۲۰۰ تکرار به ترتیب برابر ۱/۴۵ و ۱/۴۸ است. در مورد زمان حل نیز، با افزایش تکرارها، زمان حل هم افزایش می‌یابد، چنان که میانگین زمان حل برای ۵۰۰ برابر ۶۹/۴۷۳ ثانیه خواهد بود. این در حالی است که میانگین زمان حل برای تکرارهای ۱۰۰

حل بسیار مناسب روش فرا ابتکاری دارد. کیفیت جوابهای ارائه شده در روش NSGA-II از نظر بهترین جواب حاصل برای هر یک از توابع هدف نیز قابل قبول است و میانگین خطا برای توابع هدف به ترتیب برابر با ۱٪، ۱٪ و ۰٪ است. برای بررسی کیفیت جوابها در برابر زمان حل الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بزرگ ۵۶ مسأله نمونه سولومن توسط روش حل و بررسی شدند. از طرفی عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه از عملکرد الگوریتم‌های یک هدفه بسیار پیچیده‌تر است و با توجه به معیارهای ارایه شده، یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جوابهای حاصل از الگوریتمهای ارایه شده کافی باشد. از این رو در این مقاله، برای بررسی کیفیت جوابهای حاصل از الگوریتم NSGA-II از دو شاخص مقایسه  $Q$  و  $S$  metric (تعداد جواب‌های غیر مغلوب یافت شده) و  $S$  me-ric<sup>۱۵</sup> (شاخص پراکندگی) در ابعاد بزرگ استفاده می‌شود.

جدول ۳. نتایج محاسباتی الگوریتم NSGA-II برای مجموع مسایل دسته C

مسأله	تعداد وسائط	NAGA-II با ۱۰۰ تکرار			NAGA-II با ۲۰۰ تکرار			NAGA-II با ۵۰۰ تکرار		
		زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S
C101	۱۰	۱۳۸/۸۸	۳۴	۱/۰۴	۲۷۳/۷۵	۳۸	۰/۹۳	۷۳۷/۱۷	۴۶	۰/۸۵
C102	۱۰	۱۴۱/۸۸	۴۳	۰/۹۴	۲۷۳/۷۶	۴۳	۰/۷۲	۷۳۹/۸۸	۴۷	۰/۸۶
C103	۱۰	۱۴۱/۹۹	۴۳	۱/۱۱	۲۷۹/۹۸	۴۳	۱/۰۰	۷۵۴/۰۱	۴۵	۰/۶۶
C104	۱۰	۱۴۲/۹۹	۳۶	۰/۹۸	۲۷۷/۹۷	۴۱	۰/۸۸	۷۴۵/۸۷	۴۴	۰/۷۵
C105	۱۰	۱۶۱/۵۹	۴۳	۰/۸۵	۳۱۹/۱۷	۴۳	۱/۳۳	۸۵۹/۹۳	۴۵	۰/۷۷
C106	۱۰	۱۴۵/۶	۴۲	۰/۶۹	۲۸۳/۲	۴۶	۰/۸۳	۷۶۰/۰۰	۴۱	۱/۸۱
C107	۱۰	۱۴۶/۰۳	۴۱	۱/۳۵	۲۸۸/۰۵	۴۴	۰/۹۴	۷۷۵/۸۲	۴۳	۱/۳۴
C108	۱۰	۱۵۰/۶	۴۰	۰/۹۶	۲۹۳/۲۱	۴۶	۰/۸۱	۷۸۷/۰۵	۴۸	۰/۹
C109	۱۰	۱۴۳/۰۶	۳۹	۱/۹۸	۲۸۲/۱۲	۳۸	۱/۰۷	۷۵۹/۷۹	۴۷	۰/۷۷
C201	۳	۱۱۰/۴۹	۴۵	۱/۷۶	۲۱۲/۹۷	۴۴	۱/۷۸	۵۷۰/۲۰	۴۸	۰/۴۸
C202	۳	۱۰۷/۹۴	۴۱	۲/۲۴	۲۱۱/۸۸	۴۸	۰/۹۸	۵۶۹/۹۴	۴۲	۰/۷۶
C203	۳	۱۱۱/۲۷	۴۶	۱/۵۵	۲۱۴/۵۵	۳۸	۰/۹۶	۵۷۴/۴۵	۴۲	۱/۰۴
C204	۳	۱۰۴/۲۴	۳۷	۱/۰۹	۲۰۴/۴۷	۴۰	۱/۱۶	۵۴۹/۹۳	۴۲	۰/۹
C205	۳	۱۰۶/۰۰	۳۳	۲/۱۸	۲۰۳/۹۹	۴۰	۱/۵۳	۵۴۵/۹۳	۴۲	۰/۸۰
C206	۳	۱۰۵/۲۳	۴۳	۰/۹۱	۲۰۶/۴۶	۴۳	۰/۹۱	۵۵۵/۳۰	۵۰	۱/۰۸
C207	۳	۱۰۸/۱۷	۴۶	۰/۷۸	۲۰۸/۳۵	۴۳	۲/۰۴	۵۵۷/۷۰	۴۱	۰/۹۱
C208	۳	۱۰۶/۴۲	۴۰	۰/۹۹	۲۰۸/۸۴	۴۳	۱/۴۸	۵۶۱/۷۲	۴۳	۱/۲۲
میانگین		۱۲۷/۷۹	۴۱/۰۶	۱/۲۹	۲۴۹/۶۹	۴۲/۴۷	۱/۱۵	۶۷۰/۸۶	۴۴/۴۷	۰/۹۶

بر این، سایر قیود مسأله شامل قیود ظرفیت و زمان توزیع به منظور کمینه سازی هزینه حمل نیز مورد توجه قرار گرفت. مدل ارایه شده توسط الگوریتم NSGA-II برای ابعاد بزرگ حل و مشخص شد که درصد خطای تابع هدف نسبت به روش  $\epsilon$ -constraint در تمامی مسایل حل شده، کمتر از ۲ درصد بود که کارایی نرم افزار طراحی شده را نشان می دهد. همچنین برای بررسی کیفیت جوابهای حاصل از الگوریتم NSGA-II در ابعاد بزرگ، از دو شاخص مقایسه تعداد جوابهای غیرمغلوب یافت شده (Q metric) و پراکندگی (S metric) در نمونه مسایل سالومون استفاده شد. نتایج حل الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از روش قید با قید زمانی ۱۲۰۰ ثانیه مقایسه شد.

و ۲۰۰ به ترتیب برابر ۱۲۸/۳۸ و ۷۶/۲۵۰ ثانیه است. همچنین بیشترین زمان حل برای مسأله R1۰۱ با ۹۶۷/۰۲ ثانیه است. شکل ۶ نمودار جوابهای پارتویی حاصل از حل مسأله C1۰۴ را در تکرارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ نشان می دهد.

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل مسیریابی وسائط نقلیه چند هدفه شامل کمینه سازی هزینه حمل و نقل و ریسک وقوع حوادث در حمل و نقل مواد خطرناک ارایه شد. همچنین اهمیت زمان دریافت مواد، به دلیل توانایی در برنامه ریزی نیروی انسانی و تخلیه مواد خطرناک از جمله اهداف دیگر این پژوهش بود. افزون

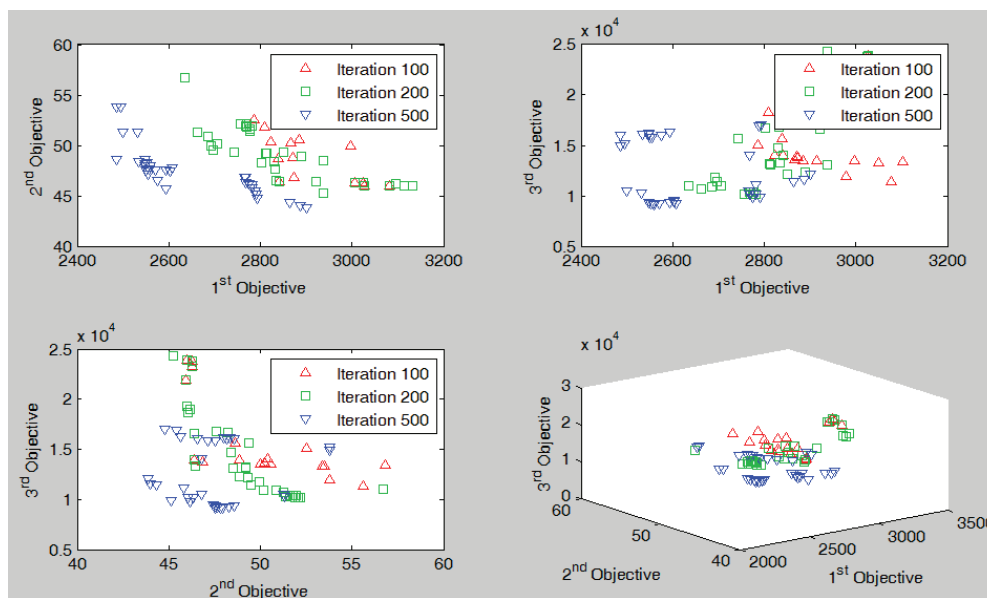
جدول ۴. نتایج محاسباتی الگوریتم NSGA-II برای مجموع مسایل دسته R

	زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S	
R101	۱۹	۱۸۳/۹۰	۲۱	۱/۵۶	۳۵۹/۰۸	۳۳	۱/۳۵	۹۶۷/۰۲	۳۷	۱/۴۲
R102	۱۷	۱۷۱/۲۸	۴۰	۰/۸۸	۳۳۸/۵۷	۳۷	۳/۷۰	۹۱۲/۳۵	۳۹	۰/۷۸
R103	۱۳	۱۵۵/۰۵	۲۷	۰/۹۱	۳۰۳/۰۰	۳۳	۰/۸۱	۸۱۳/۵۰	۴۲	۱/۳۰
R104	۹	۱۳۰/۰۷	۳۷	۰/۷۵	۲۵۶/۴۰	۲۲	۱/۰۴	۶۸۹/۵۷	۳۹	۱/۷۴
R105	۱۴	۱۶۰/۷۷	۲۶	۱/۴۸	۳۱۳/۵۴	۳۳	۰/۷۴	۸۴۲/۰۰	۴۲	۱/۱۶
R106	۱۲	۱۴۷/۷۷	۱۳	۱/۰۸	۲۹۱/۵۵	۱۹	۰/۷۸	۷۸۵/۲۷	۴۱	۰/۹۱۳
R107	۱۰	۱۳۹/۱۴	۲۸	۰/۶۲	۲۷۰/۱۸	۳۶	۰/۸۹	۷۲۵/۰۷	۳۵	۸۷
R108	۹	۱۲۸/۰۹	۲۵	۱/۹۳	۲۵۲/۱۷	۲۶	۱/۱۷	۶۸۷/۸۴	۲۶	۰/۹۱
R109	۱۱	۱۴۳/۴۱	۱۵	۰/۹۵	۲۷۸/۸۱	۳۰	۲/۴۱	۷۴۸/۱۴	۳۵	۱/۷۷
R110	۱۰	۱۳۵/۴۹	۳۰	۲/۲۴	۲۶۶/۹۷	۳۱	۱/۸۹	۷۱۸/۸۵	۳۸	۱/۲۲
R111	۱۰	۱۴۰/۶۴	۲۳	۰/۹۹	۲۷۳/۲۸	۲۹	۱/۳۲	۷۳۳/۱۸	۳۶	۰/۹۶
R112	۹	۱۱۰/۴۵	۲۹	۱/۲۵	۲۱۲/۹۰	۳۷	۱/۳۸	۵۷۰/۰۰	۳۷	۰/۹۰
R201	۴	۱۳۲/۱۵	۲۳	۱/۵۴	۲۶۰/۲۹	۳۰	۲/۷۵	۷۰۰/۷۹	۳۶	۱/۲۵
R202	۳	۱۴۱/۴۷	۲۸	۱/۵۷	۲۷۸/۹۴	۳۲	۱/۳۳	۷۵۱/۲۰	۳۵	۰/۹۲
R203	۳	۱۲۱/۰۴	۲۱	۱/۹۹	۲۳۴/۰۸	۳۷	۰/۷۸	۶۲۷/۳۵	۳۸	۱/۰۳
R204	۲	۹۵/۰۱	۲۴	۱/۳۷	۱۸۶/۰۳	۳۱	۱/۵۰	۵۰۰/۰۸	۴۰	۱/۸۹
R205	۳	۱۵۰/۵۷	۳۰	۲/۷	۲۹۳/۱۳	۳۹	۱/۲۶	۷۸۶/۸۵	۴۰	۰/۸۲
R206	۳	۱۰۷/۳۶	۳۳	۱/۱۵	۲۱۲/۷۲	۳۷	۱/۰۳	۵۷۲/۲۲	۴۱	۰/۹۵
R207	۲	۹۷/۷۵	۴۱	۱/۰۵	۱۸۷/۴۹	۳۴	۴/۷۰	۵۰۱/۳۳	۳۷	۱/۰۱
R208	۲	۱۰۴/۵۲	۲۴	۱/۷۲	۲۰۵/۰۴	۲۷	۱/۱۶	۵۵۱/۴۶	۲۹	۲/۹۱
R209	۳	۱۰۶/۳۵	۲۹	۱/۰۹	۲۰۴/۷۰	۳۲	۲/۰۲	۵۴۷/۸۵	۴۲	۱/۲۲
R210	۳	۱۰۷/۲۷	۳۲	۱/۶۰	۲۱۰/۵۵	۳۱	۰/۸۵	۵۶۶/۳۵	۳۴	۱/۳۲
R211	۲	۱۰۳/۴۳	۱۴	۰/۹۶	۱۹۸/۸۵	۳۱	۱/۷۴	۵۳۲/۰۴	۳۹	۲/۲۷
میانگین		۱۳۱/۰۶	۲۶/۴۳	۱/۷۹	۲۵۶/۰۴	۳۱/۵۲	۱/۶۲	۶۸۷/۸۸	۳۷/۳۵	۱/۳۰

حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی ...

جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم NSGA-II برای مجموع مسایل دسته RC

مسأله	تعداد وسائط	تکرار ۱۰۰ با NAGA-II			تکرار ۲۰۰ با NAGA-II			تکرار ۵۰۰ با NAGA-II		
		زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S	زمان حل	Q	S
RC101	۱۴	۱۵۹/۶۹	۳۱	۱/۶۱	۳۱۵/۳۹	۳۱	۰/۸۶	۸۴۹/۶۹	۳۳	۰/۸۴
RC102	۱۲	۱۷۳/۸۲	۳۵	۰/۸۸	۲۳۹/۶۴	۳۷	۰/۷۸	۹۱۲/۵۳	۳۹	۰/۷۸
RC103	۱۱	۱۴۲/۷۹	۲۱	۰/۵۲	۲۸۱/۵۹	۳۷	۱/۸۰	۷۵۸/۳۴	۳۹	۱/۳۷
RC104	۱۰	۱۳۹/۱۶	۱۵	۰/۵۸	۲۷۰/۳۲	۲۱	۱/۱۰	۷۲۵/۱۹	۲۸	۱/۳۴
RC105	۱۳	۱۵۳/۳۱	۲۵	۲/۵۴	۳۰۲/۶۲	۲۴	۱/۳۰	۸۱۵/۱۹۴	۲۷	۱/۱۳
RC106	۱۱	۱۴۵/۸۴	۱۳	۰/۶۱	۲۸۳/۶۹	۲۳	۰/۹۱	۷۶۱/۳۲	۳۵	۱/۱۵
RC107	۱۱	۱۴۳/۱۲	۱۵	۱/۰۶	۲۸۲/۲۵	۳۴	۱/۷۵	۷۶۰/۱۳	۳۵	۲/۵۱
RC108	۱۰	۱۳۵/۷۴	۱۹	۱/۸۰	۲۶۳/۴۸	۲۰	۲/۸۲	۷۰۶/۷۰	۳۷	۱/۰۴
RC201	۴	۱۰۶/۰۵	۲۲	۱/۳۶	۲۰۸/۰۹	۳۰	۱/۲۱	۵۵۹/۷۸	۳۱	۱/۰۵
RC202	۳	۹۹/۴۱	۳۰	۲/۰۷	۱۹۰/۸۱	۲۶	۲/۶۹	۵۱۰/۳۰	۲۸	۱/۵۸
RC203	۳	۱۰۰/۴۹	۳۲	۱/۰۸	۱۹۶/۹۸	۳۰	۰/۷۹	۵۲۹/۶۷	۳۳	۰/۵۱
RC204	۳	۱۰۷/۲۳	۱۷	۱/۳۷	۲۰۶/۴۶	۳۵	۱/۵۴	۵۵۲/۶۰	۴۱	۱/۲۷
RC205	۴	۱۰۴/۹۸	۳۲	۰/۷۶	۲۰۵/۹۷	۳۵	۳/۵۵	۵۵۳/۹۶	۳۳	۱/۱۰
RC206	۳	۱۰۲/۸۴	۳۲	۱/۶۴	۱۹۷/۶۹	۲۰	۲/۱۰	۵۲۸/۸۹	۲۹	۱/۷۳
RC207	۳	۱۴۳/۰۳	۱۹	۰/۹۴	۲۰۴/۰۷	۲۸	۱/۴۴	۵۴۸/۸۳	۲۹	۰/۸۴
RC208	۳	۱۰۱/۹۶	۳۳	۱/۵۸	۱۹۵/۹۲	۳۱	۱,۹۹	۵۲۴/۱۱	۳۶	۰/۹۷
میانگین		۱۲۶/۲۸	۲۴/۷۵	۱/۲۸	۲۴۶/۵۶	۲۸/۴۴	۱/۶۷	۶۶۲/۳۲	۳۳/۰۶	۱/۶۷



شکل ۶. جوابهای پارتوی حاصل از حل مسأله C104 در تکرارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰

افزایش خطی در ابعاد بسیار بالا حاصل خواهد شد که با بررسی افزایش زمان‌های حل نیز می‌توان به تاثیر بسیار بالای افزایش وسائط نقلیه در زمان حل مسایل پی برد.

بررسی زمان حل مسایل در دو بخش NSGA-II و LINGO نشان از افزایش نمائی زمان حل با استفاده از روش  $\epsilon$ -constraint داشته و در مقابل زمان لازم برای حل مسأله بوسیله نرم افزار NSGA-II با

(2008) "A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 182-197.

- Desrochers, M., Desrosiers, J., Solomon, M. (1992) "A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows", Operations Research, Vol. 40, pp. 342-354.

- Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. and Soumis, F. (1995) "Time constrained routing and scheduling", in: Network routing, Handbooks in Operations Research and Management Science, North-Holland, Amsterdam.

- Ehrgott, M. and Gandibleux, X. (2002) "Multiobjective combinatorial optimization theory, methodology and applications" in: M. Ehrgott, X. Gandibleux (Eds.), Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys, Kluwer Academic Publishers, pp. 369-444.

- Erkut, E., Verter, V. (1995) "Hazardous materials logistics", in: Z. Drezner (Ed.), Facility location: A survey of applications and methods, Springer, Berlin.

- Fisher, M. (1995) "Vehicle routing", Handbooks in OR and MS, M.O. Ball et al., Vol. 8.

- Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G. (1994) "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", Manage Science, Vol. 40, pp. 1276-1290.

- Golden, B. L. and Assad, A. A. [Eds.] (1988) "Vehicle routing: Methods and studies". Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

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

- Kazantzi, V., Kazantzis, N. and Gerogiannis, V.C. (2011) "Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24, pp. 767-773.

- Laporte, G., Mercure, H. and Nobert, Y. (1992) "A branch and bound algorithm for a class of asym-

- 1- Vehicle Routing Problem
- 2- Hazardous
- 3- Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm
- 4- Time Window
- 5- Constraint Method
- 6- Pareto Front
- 7- Front
- 8- Crowding Distance
- 9- Crossover
- 10- Mutation
- 11- Relative Gap
- 12- Best Result
- 13- Result of each Algorithm
- 14- Quantity Metric
- 15- Spacing Metric

## ۹. مراجع

- Ashtakala, B. and Eno, L. A. (1996) "Minimum risk route model for hazardous materials", Journal of Transportation Engineering, vol. 5, No. 122, pp. 45-56.

- Bérubé, J. F., Gendreau, M. and Potvin, J.Y. (2009) "An exact  $\epsilon$ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the traveling salesman problem with profits", European Journal of Operational Research, Vol. 194, pp. 39-50.

- Chiang, W.C. and Russell, R. (1996) "Simulated annealing meta-heuristics for the vehicle routing problem with time windows", Oper Res. Vol. 93, pp. 3-27.

- Clarke, G., Wright, J. W. (1964) "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", Operations Research, Vol. 12, pp. 568-589.

- Dantzig, G. and Ramser, J. H. (1959) "The truck dispatching problem", Management Science, Vol. 6, pp. 80-91.

- Deb, K. (2003) "Multi objective optimization using evolutionary algorithms", London: John Wiley & Sons.

- Deb, K., Pratap, A., Sameer A. and Meyarivan T.

- Srinivas, N. and Deb, K. (1994) "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, Vol. 2, pp. 221-248.
- Tavakoli-Moghadam, R., Gazanfari, M., Alinaghian, M., Salamatbakhsh, A. and Norouzi, N. (2008) "A new mathematical model for a competitive vehicle routing problem with time windows solved by simulated annealing", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, pp. 83-92.
- Zografos, K.G. and Androusoopoulos, K.N. (2004) "A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, pp. 507-519.
- Zografos, K.G., Davis, C.F. (1989) "Multi-objective programming approach for routing hazardous materials", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 115, No. 6, pp. 116-131.
- Zografos, K.G., Vasilakis, G.M. and Androusoopoulos, K.N. (2002) "A real time decision support system for roadway network incident response logistics", *Transportation Research - Part C*, Vol. 10, pp. 1-18.
- Zografos, K.G., Vasilakis, G.M., Giannouli, G.M. (2000) "A unified framework for developing DSS for hazardous materials risk management", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 71, pp. 503-552.
- metrical vehicle routing problems", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 43, pp. 469-481.
- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1981) "Complexity of vehicle and scheduling problem", *Networks*, Vol. 11, pp. 221-227.
- List, G. F., Mirchandani, P.B., Turnquist, K M. and Zografos, G. (1991) "Modeling and analysis for hazardous materials transportation: Risk analysis, routing/scheduling and facility location", *Transportation Science*, Vol. 25, No. 2, pp. 100-114.
- McCord, M. R. and Leu, A. Y. C. (1995) "Sensitivity of optimal hazmat routes to limited preference specification", *Information Systems and Operational Research*, 33, pp. 68-83.
- Potvin, J. Y. and Bengio, S. (1994) "A genetic approach to the vehicle routing problem with time windows", *Publication CRT-953*, Centre de Recherche sur les Transports, University of Montreal.
- Reimann, M., Stummer, M. and Doerner, K. (2002) "A savings based ant system for the vehicle routing problem", W.B. Langdon, et al. (Eds.). Kaufmann M (GECCO 2002) *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, San Francisco.
- Russell, R. A. (1977) "An effective heuristic for the M-tour traveling salesman problem with some side conditions", *Operations Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 517-524.