

مسیریابی تجهیزات امدادی در شرایط بحران با رویکرد پوششی و تقاضای فازی با استفاده از الگوریتم هیبریدی جست و جوی هارمونی

مهدی علینقیان^{۱*}، علی رضا گلی^۲، فریماه مخاطب رفیعی^۳

۱. استادیار دانشکده صنایع و سیستم‌های دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار دانشکده فنی بخش مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۹۳/۳/۱۷ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۳/۱۰/۱۶ - تاریخ تصویب ۹۳/۱۰/۲۸)

چکیده

یکی از اقدامات مهمی که لازم است هنگام وقوع بحران صورت پذیرد بهینه‌سازی نحوه توزیع و تخصیص منابع بین افراد است. زمان در افزایش تعداد افراد نجات‌یافته توسط فعالیت‌های امدادی تأثیری به‌سزا دارد. در این پژوهش یک مدل مسیریابی وسایل نقلیه امدادی مبتنی بر مسیریابی پوشش تور در منطقه آسیب‌دیده توسعه داده شد. همچنین، به دلیل اینکه تعیین میزان دقیق تقاضا برای کالاهای اساسی هنگام وقوع فجایع، که مهم‌ترین آن‌ها داروست، بسیار دشوار و در بسیاری موارد ناممکن است و به منظور نزدیک‌سازی مدل به شرایط واقعی عدم قطعیت تقاضا بر اساس اعداد فازی مدّنظر قرار گرفت. به منظور صحت‌گذاری بر مدل ارائه‌شده چندین نمونه عددی به کمک روش شاخه و کران حل شد. همچنین یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم جست‌وجوی هارمونی همراه شبیه‌سازی تصادفی توسعه داده شد. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ارائه‌شده در مقایسه با نتایج حاصل از روش دقیق خطای ۱ درصد را برای الگوریتم نشان می‌دهد. این موضوع نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم ارائه‌شده است. به منظور بررسی الگوریتم ارائه‌شده در ابعاد بزرگ، نتایج حاصل از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با نتایج حاصل از ترکیب الگوریتم با الگوریتم ابتکاری GRASP مقایسه شد. بررسی‌ها کارایی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، تئوری اعتبار فازی، تور پوششی، شبیه‌سازی تصادفی، لجستیک بحران.

مقدمه

منظور ایجاد دسترسی سریع‌تر برای همه مناطق آسیب‌دیده، در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا با رویکرد تئوری اعتبار، در نظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی زمان رسیدن به آخرین مشتری، بهینه‌یابی اعتبار بهینه مسئله با تلفیق شبیه‌سازی و روش شاخه و کران و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، و در نهایت ارائه یک روش فراابتکاری ترکیبی بر پایه الگوریتم هارمونی است.

در ادامه مقاله و در بخش دوم پیشینه موضوع مسیریابی در شرایط بحران بررسی می‌شود. در بخش سوم تئوری اعتبار فازی مطرح می‌شود. در بخش چهارم مدل ریاضی مسیریابی وسایل نقلیه امدادی با رویکرد تور پوششی ارائه می‌شود. در بخش پنجم الگوریتم جست‌وجوی هارمونی معرفی می‌شود. در بخش ششم نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی، حل دقیق، و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش هفتم نتایج و پیشنهادها بیان می‌شود.

امروزه، به‌رغم پیشرفت‌های تکنولوژیکی موجود، عدم آمادگی و مقابله مناسب با مصائب ناشی از سوانح طبیعی (زلزله، سیل، توفان، صاعقه، بهمن، گردباد، آتش‌سوزی، آتشفشان، و ...) و غیر طبیعی (جنگ، حوادث تروریستی، تصادفات جاده‌ای، حوادث صنعتی، ناآرامی‌های سیاسی، مهاجرت آوارگان، و ...) با تحت تأثیر قرار دادن سه شاخص اقتصاد، اجتماع، و محیط تلفات و خسارات سنگینی را به ملت‌ها و دارایی‌های آن‌ها وارد می‌کند که بعضاً جبران‌ناپذیر است. بنابراین بحران‌ها از موانع اصلی توسعه پایدار کشورها به شمار می‌رود و از اولویت‌های برنامه‌های هر کشور محسوب می‌شود. لجستیک بحران به فرایند برآورد، تأمین، حمل‌ونقل، نگهداری، و توزیع کالاها و خدمات مورد نیاز در بحران گفته می‌شود که به جهت داشتن نقشی اساسی در کل این زنجیره تأمین یکی از عوامل شاخص اثرگذار در موفقیت مدیریت بحران است [۱].

از نوآوری‌های این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر پوشش تور برای مسیریابی امدادی (DRVRP) به

پیشینه موضوع

تحقیقات در زمینه حمل و نقل اقلام امدادی را اولین بار نات در سال ۱۹۸۷ انجام داد. نات با دراختیارداشتن منابع محدود به مدل سازی شرایطی پرداخت که در آن تعدادی از وسایل نقلیه متفاوت در یک انبار قرار داشت و هدف کمینه سازی تقاضاهای ازدست رفته بود [۲]. هانگ و همکاران حالت چندکالایی را برای امداد رسانی به نیازمندان در شرایط بحران در نظر گرفتند و به هر یک از کالاها وزنی تخصیص دادند و میانگین وزن دار زمان رسیدن هر کالا به نقاط آسیب دیده را حداقل کردند [۳]. مت و زابینسکی هزینه ایجاد انبار در نقاط آسیب دیده را همراه کل زمان رساندن کالا به این انبارها در مدل خود در نظر گرفتند [۴]. نولز و همکاران زمان رسیدن به آخرین نقطه آسیب دیده را در حالتی حداقل کردند که بیشترین تقاضای ممکن برآورده شود [۵].

به جهت اهمیت عدم قطعیت در مدیریت بلایا، تعدادی از محققان به بهینه سازی تصادفی در برنامه ریزی امداد بلایا توجه کردند. ژو و همکاران عرضه کالا در شرایط بحران را پارامتری تصادفی در نظر گرفتند. آن ها در فاز اول به مکان یابی انبارهای میانی قبل از وقوع بلایا و تعیین ظرفیت آن ها بدون دخالت دادن تقاضا پرداختند [۶]. در فاز دوم هنگام وقوع بلایا به مسیریابی وسایل نقلیه، به منظور انتقال کالاها از انبارهای میانی به مناطق نیازمند، پرداختند. شن و همکاران در سال ۲۰۰۹ تقاضای مناطق آسیب دیده را غیر قطعی در نظر گرفتند. آن ها نیز از رویکرد دومرحله ای برای مقابله با عدم قطعیت تقاضا استفاده کردند. در مرحله اول مسیر حرکت وسایل نقلیه تعیین و در مرحله دوم میزان کالای تحویلی به هر نقطه تقاضا مشخص می شود [۷].

استفاده از تور پوششی رویکردی است که برخی محققان در زمینه امداد رسانی هنگام بحران به کار گرفته اند. نکته قابل توجه در این زمینه آن است که اکثر تحقیقات شعاع پوشش بسیار کوچکی را مدنظر قرار داده اند تا تقاضای افراد در کوتاه ترین فاصله از آن ها برآورده شود. در کنار مسیریابی به روش تور پوششی، مکان یابی مراکز امداد رسانی و مراکز توزیع کالاهای مورد نیاز انجام می شود. در برخی تحقیقات ایجاد این مراکز به صورت سرپایی مطرح است تا در کمترین زمان ممکن احداث و راه اندازی آن ها صورت گیرد.

عظیمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ مدلی را برای مکان یابی نقاط امداد و مسیریابی تجهیزات تأمین ارائه

کردند. آن ها اعلام کردند که در بسیاری از موارد تجهیزات امدادی نمی توانند از همه نقاط بازدید کنند. به همین دلیل نقاط امدادی را در فاصله کمی از آن ها قرار دادند تا افراد نیازمند، خود، به این مراکز مراجعه و کالای مورد نیاز خود را دریافت کنند. همه تقاضاها باید برآورده شوند و نقاط امدادی به گونه ای باید مکان یابی شوند که نقاط تقاضا در فاصله ای کمتر از حداکثر فاصله مجاز (شعاع پوشش) از یک مرکز امدادی قرار گیرند. هدف این مدل مسیریابی وسایل نقلیه این است که کل مسافت طی شده با وسایل نقلیه حداقل شود [۸].

در این پژوهش از مسیریابی پوشش تور به منظور مسیریابی در شرایط بحران بهره برده شد. آنچه این پژوهش را از سایر پژوهش ها متفاوت می کند عبارت است از ۱. در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا که در شرایط بحران یک فرض انکارناپذیر است؛ ۲. در نظر گرفتن تابع هدف کاهش زمان رسیدن وسایل نقلیه به آخرین گره امدادی بازدید شده؛ ۳. یافتن سطح اعتبار بهینه با ترکیب شبیه سازی با روش دقیق شاخه و کران و الگوریتم هارمونی؛ و ۴. ارائه الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم جست و جوی هارمونی.

تئوری فازی و معیار اعتبار فازی

یک مجموعه کلاسیک به طور عادی مجموعه ای از اعضای آن تعریف می شود. هر داده به تنهایی می تواند عضو این مجموعه باشد یا نباشد. در نتیجه، عضویت یا عدم عضویت هر داده به وضوح مشخص است. اما در برخی مجموعه ها عضویت با قطعیت همراه نیست. در برخورد با چنین مجموعه هایی از تئوری فازی استفاده می شود. تئوری مجموعه فازی را ابتدا زاده [۹] معرفی کرد و برای مسائل گوناگون توسعه داده شد. لی [۱۰] در تحقیقات خود به تئوری اعتبار پی برد. در این قسمت به طور مختصر مفاهیم اساسی مجموعه فازی و اندازه گیری فازی معرفی می شود. ابتدا اصول معیار امکان^۳ معرفی می شود که پایه و اساس مفهوم اعتبار است.

Θ را مجموعه ای غیر تهی و $P(\Theta)$ را توان مجموعه Θ در نظر بگیرید. هر عضو $P(\Theta)$ یک رخداد نامیده می شود. همچنین $\emptyset$ را یک مجموعه تهی در نظر بگیرید. برای هر رخداد A ، که $A \in P(\Theta)$ است، عدد غیر منفی $pos\{A\}$ وجود دارد که از چهار اصل پیروی می کند:

اصل ۱. $Pos\{\emptyset\} = 0$

اصل ۲. $Pos\{\Theta\} = 1$

$$\mu_{\tilde{D}}(x) = \begin{cases} \frac{(x-d_1)}{(d_2-d_1)} & d_1 \leq x \leq d_2 \\ 1 & x = d_2 \\ \frac{(d_3-x)}{(d_3-d_2)} & d_2 \leq x \leq d_3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸)$$

بر این اساس، تقاضای یک مشتری از d_1 کمتر و از d_3 نیز بیشتر نیست و d_2 معقول‌ترین مقدار برای تقاضای مشتری است. بر اساس تعاریف فوق توابع امکان و الزام و اعتبار به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$Pos\{\tilde{D} \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{if } r \leq d_2 \\ \frac{d_3-r}{d_3-d_2} & \text{if } d_2 \leq r \leq d_3 \\ 0 & \text{if } r \geq d_3 \end{cases} \quad (۹)$$

$$Nec\{\tilde{D} \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{if } r \leq d_1 \\ \frac{d_2-r}{d_2-d_1} & \text{if } d_1 \leq r \leq d_2 \\ 0 & \text{if } r \geq d_2 \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$Cr\{\tilde{D} \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{if } r \leq d_1 \\ \frac{2d_2-d_1-r}{2(d_2-d_1)} & \text{if } d_1 \leq r \leq d_2 \\ \frac{d_3-r}{2(d_3-d_2)} & \text{if } d_2 \leq r \leq d_3 \\ 0 & \end{cases} \quad (۱۱)$$

تعریف مسئله

یکی از اقدامات بسیار مهم که لازم است هنگام فاز پاسخ بحران صورت پذیرد بهینه‌سازی نحوه توزیع و تخصیص منابع بین افراد است. در این مدل هدف تعیین مراکز امداد مناسب در منطقه آسیب‌دیده و مسیریابی وسایل نقلیه به منظور تأمین تقاضای این مراکز است. این مراکز می‌تواند در یکی از نقاط آسیب‌دیده یا در محلی بیرون از آن‌ها مستقر شود. بنابراین، مدل ارائه‌شده مناسب‌ترین سیاست امداد رسانی را در زمانی که برآورده‌ساختن نیاز نواحی آسیب‌دیده به دو شکل ملاقات مستقیم یا تحت پوشش قرار گرفتن امکان‌پذیر است پیشنهاد می‌دهد. به عبارت دیگر، تقاضای نقاط می‌تواند در همان مکانی که واقع شده‌اند تحویل داده شود یا به مکان دیگری که در فاصله‌ای معقول قرار گرفته است برده شود تا افراد با پیمودن مسیری کوتاه کالای امدادی را دریافت کنند. وظیفه مراکز امداد برطرف‌ساختن تقاضای افراد آسیب‌دیده در نقاط آسیب‌دیده برای کالاهای ضروری و داروهای مورد نیاز

اصل ۳. برای هر زیرمجموعه دلخواه $\{A_k\}$ از مجموعه $P(\Theta)$ رابطه ۱ برقرار است:

$$Pos\{\cup_k A_k\} = \sup_k (A_k) \quad (۱)$$

سه‌تایی $(\Theta, P(\Theta), Pos)$ فضای امکان نامیده می‌شود و تابع $pos\{\}$ معیار سنجش امکان معرفی می‌شود.

اصل ۴. اگر Θ_i یک مجموعه غیر تهی باشد و تابع $Pos_i\{\}$ $i = 1, 2, \dots, n$ دارای سه اصل فوق باشد و $\Theta = \Theta_1 \times \Theta_2 \times \dots \times \Theta_n$ ، آن‌گاه برای هر A در $P(\Theta)$ رابطه زیر برقرار است:

$$Pos\{A\} = \sup_{(\Theta_1, \dots, \Theta_n) \in A} Pos_1\{\Theta_1\} \wedge Pos_2\{\Theta_2\} \wedge \dots \wedge Pos_n\{\Theta_n\} \quad (۲)$$

به کمک چهار اصل فوق می‌توان اساس معیار امکان را تشکیل داد و همه مفاهیم امکان را از آن‌ها مشتق کرد. بدین منظور دو تعریف ارائه می‌شود:

تعریف ۱. $(\Theta, P(\Theta), Pos)$ را فضای امکان و A را مجموعه‌ای در $P(\Theta)$ در نظر بگیرید. آن‌گاه معیار الزام^۴ به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$Nec\{A\} = 1 - Pos\{A^c\} \quad (۳)$$

تعریف ۲. $(\Theta, P(\Theta), Pos)$ را فضای امکان و A را مجموعه‌ای در $P(\Theta)$ در نظر بگیرید. آن‌گاه معیار اعتبار به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$Cr\{A\} = \frac{1}{2} (Nec\{A\} + Pos\{A\}) \quad (۴)$$

اگر تابع $\mu_{\tilde{D}}(x)$ عضویت پارامتر فازی $\tilde{D}$ باشد، برای رخداد $\{\tilde{D} \geq r\}$ امکان، الزام، و اعتبار به صورت زیر خواهد بود:

$$Pos\{\tilde{D} \geq r\} = \sup_{x \geq r} \mu_{\tilde{D}}(x) \quad (۵)$$

$$Nec\{\tilde{D} \geq r\} = 1 - \sup_{x < r} \mu_{\tilde{D}}(x) \quad (۶)$$

$$Cr\{\tilde{D} \geq r\} = \frac{1}{2} (Pos\{\tilde{D} \geq r\} + Nec\{\tilde{D} \geq r\}) \quad (۷)$$

در اینجا اعتبار یک رخداد فازی میانگین امکان و الزام آن رخداد تعریف شده است. یک رخداد فازی ممکن است شکست بخورد، حتی اگر امکان رخ دادن آن برابر ۱ باشد. و ممکن است اتفاق بیفتد، حتی اگر الزام آن ۰ باشد. به همین دلیل معیار اعتبار از ترکیب این دو تابع استفاده می‌کند و در اصل نقش احتمال رخداد را در شرایط فازی ایفا می‌کند [۱۱، ۱۲].

امداد بین نقاط آسیب دیده وجود دارد و این مراکز می تواند در نقاط آسیب دیده یا در نقاط میانی تأسیس شود.

مجموعه ها

R' : تعداد کل نقاط $R' = \{1, 2, \dots, R, R+1\}$ نقطه ۱ دپو و نقطه $R+1$ نقطه مجازی است.

n' : مجموعه نقاط حادثه دیده

$$n' \subset R, n' = \{1, \dots, n\}$$

k : مجموعه وسایل نقلیه $k = 1, 2, \dots, K$

پارامترها

t_{lm} : مدت زمان طی کردن فاصله بین دو نقطه l و m با

هر یک از وسایل نقلیه $l, m \in \{0, 1, 2, \dots, R\}$

$\tilde{d}_i$: تقاضای فازی نقطه i ام $i \in \{1, 2, \dots, n\}$

dis_{max} : حداکثر شعاع پوشش

a_{il} : پارامتر باینری که برابر ۱ خواهد بود اگر فاصله

نقطه تقاضای i ام و نقطه l ام کمتر از dis_{max} باشد

$$l \in \{1, 2, \dots, R\}, i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

Q_k : ظرفیت وسیله نقلیه k ام $k \in \{1, 2, \dots, K\}$

M : عدد خیلی بزرگ

متغیرهای تصمیم

x_{lmk} : برابر ۱ خواهد بود اگر مسیر بین دو گره l و m با

وسیله m طی شود. در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}, l, m \in \{1, 2, \dots, R+1\}$$

CD_l : تقاضای جمع شده در نقطه l $l \in \{1, 2, \dots, R\}$

y_l : برابر ۱ خواهد بود اگر نقطه l با یکی از وسایل نقلیه

بازدید شود. در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}, l \in \{1, 2, \dots, R\}$$

D_{il} : برابر ۱ خواهد بود اگر برآورده سازی تقاضای نقطه i

به نقطه بازدید شده l واگذار شود. در غیر این صورت

برابر ۰ خواهد بود

$$l \in \{2, 3, \dots, R\}, i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}$$

u_{lk} : زمان رسیدن وسیله نقلیه k ام به نقطه

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}, l \in \{1, 2, \dots, R\}$$

Z : زمان رسیدن کالا به آخرین مرکز امداد مستقر شده

مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی تشریح می شود.

است. از طرف دیگر، تأمین کالای مورد نیاز این مراکز امداد از طریق دپوی مرکزی صورت می گیرد. این کالاهای توسط وسایل نقلیه با ظرفیت مشخص به نقاطی که مراکز امداد در آن ها برپا شده حرکت می کنند و با تشکیل یک تور مشخص پس از عبور از چند نقطه دریافت کالا دوباره به دپوی مرکزی برمی گردند. همچنین در بسیاری از فجایع تعیین مقدار دقیق کالای مورد نیاز (تقاضا) کاری بسیار دشوار است. بنابراین در این پژوهش تقاضای هر نقطه آسیب دیده را عددی فازی با تابع عضویت مثلثی به صورت $\tilde{d}_i = (d_{1i}, d_{2i}, d_{3i})$ در نظر می گیریم. از آنجا که در فجایع برطرف سازی فوری نیازهای اولیه افراد آسیب دیده و تأمین کالاهای درمانی آن ها اهمیتی ویژه دارد، در مسیریابی وسایل نقلیه برای این مسئله هدف کاهش زمان رسیدن کالاهای مورد نیاز به نقاط امداد رسانی است.

فرضیات

فرضیات این مدل در پی می آید.

- تابع هدف مدل ارائه شده کمینه کردن زمان رسیدن

کالا به آخرین نقطه امداد رسانی است.

- مدل تک کالایی است. در واقع امکان یکپارچه سازی کالاهای وجود دارد.

- هر مرکز امداد فقط از یک وسیله نقلیه کالا دریافت می کند.

- نقاط تحت پوشش کالای مورد نیاز خود را فقط از یک نقطه ملاقات شده دریافت می کنند.

- تقاضای هر نقطه آسیب دیده از ظرفیت وسایل نقلیه کمتر است.

- کل تقاضای همه نقاط آسیب دیده باید برآورده شود.

- به منظور رساندن کالاهای در اسرع وقت از همه وسایل نقلیه موجود استفاده می شود.

- وسایل نقلیه به جز در مراکز امداد در هیچ نقطه دیگر توقف ندارند.

- وسایل نقلیه همسان اند. به عبارت دیگر، ظرفیت همه آن ها یکسان و زمان طی کردن یک مسیر بین همه وسایل نقلیه یکسان است.

- هر نقطه حداکثر توسط یک وسیله نقلیه بازدید می شود.

- از زمان بارگیری و تخلیه صرف نظر می شود و زمان رسیدن یک وسیله به نقطه مشخص برابر زمان طی کردن مسیر رسیدن به آن نقطه است.

- یک سری نقاط کاندید ایمن با شرایط تأسیس مراکز

نقلیه باید از دپو خارج شوند و امکان بازگشت وسائط نقلیه به دپو وجود ندارد. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ بیان می‌کند که همه وسائط نقلیه باید به گره مجازی (R+1) وارد شوند و هیچ وسیله‌ای نباید از این گره خارج شود. درباره گره مجازی در بخش «گره مجازی» توضیحاتی می‌آید. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای به یک گره وارد شود، باید از آن خارج شود. محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ بیان می‌کند هر نقطه دارای تقاضا باید به یک مرکز امداد موقت در فاصله پوشش آن تخصیص یابد. محدودیت ۲۱ تقاضای جمع‌شده در هر یک از مراکز را محاسبه می‌کند. محدودیت ۲۲ مربوط به ظرفیت وسائط نقلیه است. محدودیت ۲۳ به این موضوع اشاره می‌کند که اگر نقطه بازدیدشده تقاضا داشته باشد، نباید تقاضای خود را از مرکز دیگری که در فاصله پوشش آن قرار گرفته تأمین کند. محدودیت ۲۴ زمان خروج وسایل نقلیه از دپوی مرکزی را برابر ۰ در نظر می‌گیرد. محدودیت ۲۵ زمان رسیدن هر وسیله نقلیه را به نقطه‌ای که در تور آن قرار دارد محاسبه می‌کند. همچنین، این محدودیت باعث حذف زیرتورهای غیر مجاز برای هر وسیله نقلیه می‌شود. رابطه‌های ۲۶ و ۲۷ نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

گره مجازی

به منظور مدل‌سازی مسئله مطرح‌شده به طور ابتکاری از یک گره مجازی (R+1) بهره برده شد. فاصله این گره نسبت به همه نقاط برابر صفر است و همه وسایل نقلیه پس از عبور از نقاط تعیین‌شده به مبدأ برنمی‌گردند؛ بلکه به این گره مجازی می‌روند. با استفاده از این نوآوری، این امکان به وجود آمد که تابع هدف کمینه‌کردن زمان رسیدن به آخرین نقطه امدادی مدّ نظر واقع شود. گفتنی است برای هر وسیله نقلیه مدت زمان طی تور برابر زمان رسیدن آن به گره مجازی R+1 در نظر گرفته می‌شود.

خطی‌سازی مدل

به دلیل غیرخطی بودن تابع هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان رسیدن به مناطق تابع هدف معادله ۱۲ با معادله ۲۸ جایگزین می‌شود. محدودیت ۲۹ نیز به محدودیت‌های مدل اضافه می‌شود.

$$\text{Min } Z \quad (28)$$

$$Z \geq u_{lk} \quad l=1,2,\dots,R \quad (29)$$

$$k=1,2,\dots,K$$

$$\text{Minimize } Z = \max_{l,k} \{u_{lk}\} \quad (12)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^R x_{ijk} = y_j \quad \forall j=2,\dots,R \quad (13)$$

$$\sum_{j=2}^R x_{1jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{R+1} x_{i1k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{i=2}^R x_{i(R+1)k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{R+1} x_{(R+1)jk} = 0 \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^R x_{ilk} - \sum_{j=2}^{R+1} x_{ljk} = 0 \quad \forall l=2,\dots,R, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{j=2}^R a_{ij} D_{ij} = 1 \quad \forall i \in Af \quad (19)$$

$$a_{ij} D_{ij} \leq y_j \quad \forall j=2,\dots,R, i \in n \quad (20)$$

$$\sum_{i \in n} \tilde{d}_i D_{ij} = CD_j \quad \forall j=2,\dots,R \quad (21)$$

$$\sum_{i=2}^R \sum_{j=2}^{R+1} CD_i x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$y_i = D_{ii} \quad i \in n \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^K u_{1k} = 0 \quad (24)$$

$$u_{lk} + t_{lm} \leq u_{mk} + M(1 - x_{lmk}) \quad (25)$$

$$l=1,2,\dots,R+1 \quad m=1,2,\dots,R+1$$

$$k=1,2,\dots,K$$

$$x_{lmk}, y_l, D_{il} \in \{0,1\}$$

$$l, m=1,2,\dots,R+1 \quad (26)$$

$$k=1,2,\dots,K$$

$$CD_l, u_{lk} \geq 0$$

$$i=1,2,\dots,n \quad l=1,2,\dots,R \quad (27)$$

$$k=1,2,\dots,K$$

رابطه ۱۲ تابع هدف مدل است که کمینه‌کردن زمان رسیدن به آخرین منطقه امدادی در آن مدّ نظر است. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند که وسایل نقلیه فقط از نقاطی که مراکز امدادی موقت در آن‌ها تأسیس شده‌اند عبور می‌کنند. محدودیت ۱۴ و ۱۵ بیان می‌کنند که همه وسائط

این الگوریتم سه فاز اصلی دارد:

۱. نسل اولیه (مقداردهی اولیه)؛ ۲. بهبود بردار هارمونی جدید؛ ۳. به روز کردن حافظه هارمونی.
- در فاز اول، یک نسل اولیه از بردارهای هارمونی به طور تصادفی ایجاد و در حافظه هارمونی (HM) ذخیره می شود.
- در فاز دوم، بردار هارمونی جدید X_{new} با استفاده از سه قانون اصلاح می شود: ملاحظه حافظه^{۱۱}، تنظیم دانگ^{۱۲}، انتخاب تصادفی^{۱۳}. اول، عدد تصادفی یکنواخت r_1 در محدوده $[0, 1]$ ایجاد شده است. اگر r_1 کمتر از HMCR باشد، متغیر تصمیم گیری با ملاحظه حافظه ایجاد می شود. در غیر این صورت، $x_{new}(k)$ با انتخاب تصادفی به دست می آید (مقداردهی مجدد بین مرزهای جست و جو انجام می شود). $x_{new}(k)$ در ملاحظه حافظه، از هر بردار هارمونی i در $1, 2, \dots, HMS$ انتخاب می شود. بعد، هر مقدار $x_{new}(k)$ را می توان با مقادیر خوب ذخیره شده، با احتمال PAR، تنظیم کرد [۱۳].

```

for (j=1 to n) do
  if ( $r_1 < HMCR$ ) then
     $X_{new}(j) = X_a(j)$  where  $a \in (1, 2, \dots, HMS)$ 
    if ( $r_2 < PAR$ ) then
       $X_{new}(j) = X_{new}(j) + r_3 \times BW$  where  $r_1, r_2, r_3 \in (0, 1)$ 
    end if
  else
     $X_{new}(j) = LB_j + r \times (UB_j - LB_j)$ , where  $r \in (0, 1)$ 
  end if
end for

```

شبه کد تولید هارمونی جدید

در فاز سوم، هارمونی جدید تولید شده با بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی مقایسه می شود. اگر بردار هارمونی جدید مقدار تابع هدف بهتری نسبت به بدترین بردار هارمونی موجود داشته باشد، هارمونی جدید به حافظه هارمونی اضافه و بدترین هارمونی از حافظه هارمونی حذف می شود.

تنظیم پارامترهای الگوریتم جست و جوی هارمونی

به منظور استفاده از الگوریتم جست و جوی هارمونی، مقدار پارامترهای این الگوریتم، از روش سعی و خطا و حل سه مسئله نمونه و با توجه به میانگین جواب های حاصله، تنظیم شده است. تنظیم پارامترها در جدول ۱ می آید.

به منظور حل مدل فوق، با توجه به فازی بودن پارامتر تقاضا، فاکتور cr را در بازه $[0, 1]$ تغییر می دهیم و سپس با توجه به رابطه تابع اعتبار میزان تقاضای هر یک از نقاط تعیین می شود و با استفاده از الگوریتم جست و جوی هارمونی و نیز سولور CLPEX بهترین جواب ممکن با توجه به پارامتر cr تعیین می شود.

روش حل

در این قسمت روش های حل استفاده شده در حل مدل، که شامل الگوریتم جست و جوی هارمونی پیشنهادی و روش ابتکاری است، تشریح می شود. سپس، رشته استفاده شده در الگوریتم بیان می شود. در نهایت، نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم می آید.

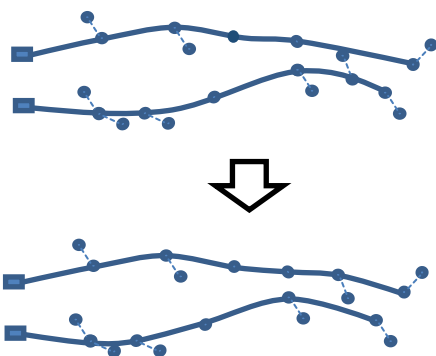
الگوریتم جست و جوی هارمونی

الگوریتم جست و جوی هارمونی (HS) به دلیل کاربردی بودن برای مسائل بهینه سازی گسسته و پیوسته، محاسبات ریاضیاتی کم، مفهوم ساده، پارامترهای کم، و اجرای آسان به یکی از الگوریتم های پر کاربرد بهینه سازی در سال های اخیر در مسائل مختلف تبدیل شده است [۱۳]. این الگوریتم در مقایسه با سایر روش های فرا ابتکاری الزامات ریاضیاتی کمتری دارد و می توان آن را در مسائل مختلف مهندسی با تغییر در پارامترها و عملگرها تطبیق داد [۱۳].

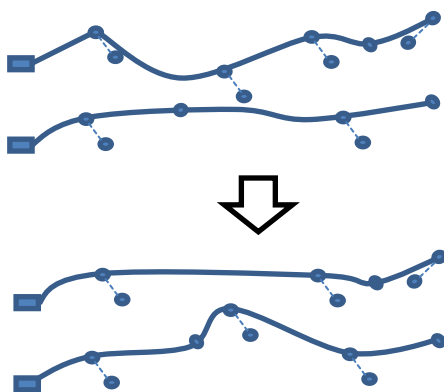
گام های الگوریتم جست و جوی هارمونی

پارامترهای الگوریتم جست و جوی هارمونی عبارت اند از تعداد بردارهای راه حل در حافظه هارمونی (HMS)^۵، نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR)^۶، نرخ تنظیم دانگ صدا (PAR)^۷، فاصله پهنای باند (BW)^۸، و تعداد بداهه سرائی ها (NI)^۹. NI با تعداد کل تکرار برابر است. در این الگوریتم هر حل یک هارمونی نامیده می شود و با یک بردار N مؤلفه ای نمایش داده می شود. الگوریتم جست و جوی هارمونی دارای حافظه ذخیره سازی، به نام حافظه هارمونی (HM)^{۱۰}، است؛ که شامل بردارهای هارمونی حافظه هارمونی است. بردارهای هارمونی و مقادیر تابع هدف متناظر در حافظه هارمونی بیان و به منزله ماتریس در (۳۰) ذخیره می شود.

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (30)$$



شکل ۱. مثالی از انتقال نقاط



شکل ۲. مثالی از پوشش نقطه ملاقات شونده

تأثیر سطح اعتبار بر کیفیت جواب

به منظور تخمین تقاضای مشتری از روش اعتبار در این پژوهش بهره برده شد. برای این منظور یک سطح اعتبار در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن مقدار تقاضای مشتریان تخمین زده می‌شود. در ادامه، با توجه به تقاضای تخمین زده شده، مسیریابی انجام می‌شود. یافتن مقدار بهینه Cr نقشی تعیین کننده در مقدار تابع هدف واقعی مسئله خواهد داشت. تعیین مقدار ابتدایی تقاضای مشتریان بر اساس اعتبار یک تخمین است و مسلماً ممکن است هنگامی که وسایل نقلیه قصد برآورده سازی تقاضای نقاط عبوری و نقاط پوششی خود را دارند با تقاضای متفاوتی نسبت به میزان از پیش تعیین شده مواجه شوند. انتخاب مقادیر بزرگ برای اعتبار باعث می‌شود مقادیر در نظر گرفته شده برای تقاضای مشتریان با مقدار کمینه ممکن تخمین زده شود. این موضوع باعث کاهش زمان پاسخ می‌شود. ولی امکان شکست در مسیرها به وجود می‌آید. زیرا ممکن است مقدار تخمین زده شده تقاضا از مقدار واقعی آن بیشتر باشد. شکست بدین معنی است که وسیله نقلیه برای برآورده سازی تقاضای بقیه مشتریان تور خود مجبور شود به دپو بازگردد و بازپسری را انجام دهد.

جدول ۱. مقدار تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم

پارامتر	مقدار تنظیم شده
اندازه حافظه هارمونی (HMS)	۱۰۰۰
نرخ انتخاب از حافظه هارمونی (HMCR)	۰/۹
نرخ تنظیم گام (PAR)	۰/۱
پهنای باند (BW)	۰/۰۱
تعداد تکرار الگوریتم (NI)	۱۰۰۰۰

الگوریتم بهبوددهنده

هنگام اجرای الگوریتم جست و جوی هارمونی، از رویکردی ابتکاری به منظور بهبود جواب‌های به دست آمده استفاده می‌شود. رویکرد ابتکاری در نظر گرفته شده بر مبنای روش GRASP است [۱۴].

الگوریتم GPASP یک الگوریتم فرااکتشافی ساده است که اکتشافات ساختاری و جست و جوی محلی را ترکیب می‌کند. ساختار آن رویه‌ای تکراری شامل دو فاز است: ساخت راه حل و بهبود راه حل. هنگام اتمام رویه جست و جوی، بهترین راه حل یافته شده برگردانده می‌شود.

به منظور استفاده از الگوریتم GRASP از فاز تولید جواب اولیه صرف نظر و از خروجی‌های الگوریتم جست و جوی هارمونی استفاده می‌شود. همچنین، به منظور اجرای فاز جست و جوی محلی، از شش روش جست و جوی به منظور بهبود جواب‌های در دست استفاده می‌شود. این شش روش عبارت است از:

۱. انتقال نقاط: یک نقطه ملاقات شده همراه همه نقاطی که تحت پوشش آن است به تور دیگری تخصیص می‌یابد.

۲. تعویض نقاط در داخل مسیر: جای دو نقطه ملاقات شده داخل یک مسیر تعویض می‌شود.

۳. تعویض نقاط در دو مسیر: جای دو نقطه ملاقات شده در حالت کلی عوض می‌شود.

۴. تخصیص نقاط: امکان پوشش مجدد یک نقطه پوشش داده شده به جایی مناسب تر بررسی می‌شود.

۵. جابه جایی نقاط: امکان جابه جایی یک نقطه تحت پوشش را با نقطه پوشش دهنده آن (نقطه بازدید شده) بررسی می‌کند.

۶. پوشش نقطه ملاقات شده: یک نقطه ملاقات شده از مسیر خود بیرون کشیده و با بهترین نقطه ممکن پوشیده می‌شود.

الگوریتم بهبوددهنده بر مبنای GRASP در هر مرحله از الگوریتم و بر هر یک از جواب‌های (هارمونی) حافظه هارمونی بهبودهای ممکن را به وجود می‌آورد.

گام ششم: مقدار Cr با کمترین مقدار میانگین تابع هدف را به منزله Cr بهینه گزارش کنید.

نتایج عددی

در این بخش، ابتدا نحوه تولید مثال‌های نمونه برای مسئله مطرح توضیح داده می‌شود. سپس اعتبار بهینه بررسی می‌شود. در ادامه چندین مسئله کوچک، متوسط، و بزرگ حل و الگوریتم‌های پیشنهادی بررسی می‌شود.

تولید نمونه‌های تصادفی

به منظور تولید مسائل نمونه از روشی که در ادامه می‌آید بهره گرفته شد. مختصات هر یک از نقاط به صورت تصادفی در فضای دوبعدی (10×10) تعیین شد. در همه مسائل، دپوی مرکزی در نقطه مبدأ مختصات قرار داده شد. به منظور تولید حدود تقاضای هر یک از مشتریان، ابتدا حد پایین عدد فازی با بهره‌گیری از توزیع یکنواخت پیوسته با کران‌های ۳ و ۸ تولید شد. به منظور تولید حد میانی، عددی تصادفی در بازه ۱ تا ۷ تولید و با حد پایین تقاضا جمع شد. در نهایت برای تولید حد بالای تقاضا عددی در بازه ۱ تا ۱۰ تولید و با حد میانی تقاضا جمع شد. مقدار ظرفیت وسائط نقلیه به گونه‌ای در نظر گرفته شد که جمع ظرفیت وسائط نقلیه برابر با جمع حد بالای تقاضای مشتریان باشد. به منظور ایجاد مسائل گسترده، شعاع پوشش ثابت در نظر گرفته نشد و شاخصی به نام ρ (چگالی ماتریس پوشش) تعریف شد. برای تولید چگالی ماتریس پوشش از توزیع یکنواخت پیوسته با پارامترهای $0/1$ و $0/4$ استفاده شد. بر اساس مقدار چگالی ماتریس پوشش مقدار حداکثر شعاع قابل محاسبه است. تعداد نقاط دارای تقاضا درصدی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد کل نقاط در نظر گرفته شد. برای تولید مسائل، از مسائل با ابعاد کوچک شروع و با افزایش نقاط تقاضا و وسائط نقلیه مسائل بزرگ‌تری تولید شد.

نتایج عددی تعیین سطح بهینه اعتبار

به منظور پیدا کردن سطح بهینه اعتبار از الگوریتم زیربخش (تعیین سطح اعتبار بهینه) استفاده شد. برای این منظور ابتدا پانزده مسئله نمونه، با توجه به الگوی ارائه شده در زیربخش (تولید نمونه‌های تصادفی)، تولید شد. جدول ۲ پارامترهای مسائل استفاده شده را نشان می‌دهد. در این جدول R تعداد کل نقاط و n تعداد نقاط دارای تقاضاست. Q ظرفیت هر یک از وسائط نقلیه است و تعداد وسائط نقلیه با K نشان داده می‌شود.

از سوی دیگر، انتخاب مقدار اعتبار کوچک سبب می‌شود برای هر مشتری حد بالای تقاضا انتخاب شود. این موضوع باعث می‌شود مسیرهای یافته شده برای مسئله پایدار باقی بماند و امکان عدم پاسخگویی به تقاضای مشتریان رخ ندهد. در این شرایط، به دلیل برآورد بیش از حد تقاضای مشتریان، از ظرفیت وسائط نقلیه استفاده مناسب به عمل نمی‌آید و ممکن است زمان پاسخ‌دهی افزایش یابد. به منظور یافتن بهترین مقدار اعتبار، که با توجه به آن مقدار تقاضای مشتریان تخمین زده شود، لازم است از ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو بهره برده شود.

تعیین سطح اعتبار بهینه

حال، به منظور یافتن مقدار بهینه پارامتر Cr از الگوریتم زیر، که در مراجع [11,12] ارائه شد، استفاده می‌شود.

گام اول: برای $Cr=0:0.1:1$ گام‌های دوم تا پنجم را تکرار کنید.

گام دوم: در سطح cr انتخاب شده تقاضای مشتریان را مشخص کنید و جواب بهینه مسئله را بیابید.

گام سوم: زیربرنامه تولید عدد تصادفی را برای مشخص کردن تقاضای نقاط حادثه دیده اجرا کنید. زیربرنامه تولید عدد تصادفی:

زیرگام اول: $i=1$

زیرگام دوم: یک عدد تصادفی m_i بین حد بالا و پایین عدد فازی تقاضای نقطه i ام تولید و مقدار درجه عضویت (f) آن را بر اساس تابع عضویت تقاضای نقطه حادثه دیده i مشخص کنید.

زیرگام سوم: عدد تصادفی r را در بازه $(0,1)$ تولید کنید.

زیرگام چهارم: اگر $r \leq f$ ، بود، m_i را به منزله مقدار واقعی تقاضای نقطه i ام معرفی کنید و به گام چهارم بروید. در غیر این صورت به گام دوم بروید.

زیرگام پنجم: i را یک واحد افزایش دهید. اگر $i \leq n$ به زیرگام دوم بروید. در غیر این صورت به زیرگام ششم بروید.

زیرگام ششم: پایان.

گام چهارم: با توجه به تقاضای شبیه‌سازی شده نقاط حادثه دیده، هزینه تورهای بهینه در سطح cr مشخص را به دست آورید. در محاسبه طول تورها، هزینه شکست‌های رخ داده در نظر گرفته می‌شوند.

گام پنجم: هزار مرتبه گام‌های چهارم و پنجم را انجام دهید و میانگین هزینه‌ها را محاسبه کنید.

جدول ۲. پارامترهای مسائل تصادفی ایجادشده

	R	n	K	Q	dis _{max}	ρ
P1	۵	۴	۳	۱۵	۴	۰/۱۷
P2	۶	۵	۳	۱۹	۶	۰/۳۳
P3	۸	۶	۳	۲۴	۶	۰/۲۱
P4	۹	۷	۳	۳۰	۹	۰/۴۳
P5	۱۰	۷	۳	۲۷	۸	۰/۲۸
P6	۱۰	۹	۳	۳۵	۷	۰/۳۰
P7	۱۱	۷	۳	۳۴	۵	۰/۱۴
P8	۲۱	۸	۳	۳۰	۸	۰/۳۶
P9	۱۳	۸	۳	۳۸	۶	۰/۲۱
P10	۱۳	۹	۳	۳۶	۷	۰/۲۵
P11	۲۰	۱۵	۳	۱۲۵	۱۷	۰/۲۷
P12	۳۰	۲۵	۳	۲۱۰	۱۵	۰/۲۵
P13	۴۰	۳۵	۳	۲۹۰	۱۷	۰/۲۶
P14	۴۵	۴۰	۵	۲۰۰	۱۶	۰/۲۵
P15	۵۰	۴۵	۵	۲۲۵	۱۵	۰/۲۶



شکل ۳. نمودار متوسط میانگین تابع هدف برای مسائل با ابعاد کوچک

بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم جست و جوی هارمونی، ابتدا در ابعاد کوچک نتایج حاصل از حل الگوریتم با نتایج حاصل از حل دقیق مسئله با حل کننده CLPEX در سطح اعتبار بهینه برای مسائل با ابعاد کوچک مقایسه شد. خلاصه نتایج این مقایسه در جدول ۳ می آید.

در جدول ۳ مقدار تابع هدف برنامه ریزی شده بهینه با B و میانگین تابع هدف با M نشان داده شد. T نیز زمان اجرا را نشان می دهد. در جدول ۳ GAP اختلاف درصدی تابع هدف برنامه ریزی شده بهینه با بهترین تابع هدف برنامه ریزی شده، که با الگوریتم جست و جوی هارمونی به دست آمد، بر مقدار بهینه تابع هدف برنامه ریزی شده تقسیم شد. به عبارت دیگر، مقدار GAP با رابطه ۳۱ به دست می آید:

$$GAP = \frac{Z^* - Z_{best}}{Z^*} \times 100 \quad (31)$$

همان گونه که مشخص است، به طور میانگین، میزان زمان مورد نیاز برای حل مسئله در ابعاد کوچک برای روش دقیق در حدود ۱۲۴۰ ثانیه و زمان لازم برای حل مسئله برای الگوریتم پیشنهادی در حدود ۱۸ ثانیه است. این اطلاعات نشان دهنده سرعت بسیار مناسب الگوریتم هیبریدی جست و جوی هارمونی است. بیشترین زمان حل با روش جست و جوی هارمونی مربوط به مسئله ۱۰ است. در این مسئله زمان حل برابر ۳۱ ثانیه است. در شکل ۴ زمان حل CPLEX و الگوریتم هیبریدی جست و جوی هارمونی برای مسائل مختلف می آید.

در گام دوم، بر اساس سطح اعتبار در نظر گرفته شده، برآورد تقاضای نقاط انجام شد و بر اساس تقاضای تخمین زده شده میزان تابع هدف بهینه برنامه ریزی شده آن برای مسائل کوچک با حل مدل ریاضی با حل کننده CPLEX و برای مسائل بزرگ با حل الگوریتم پیشنهادی جست و جوی هارمونی به دست آمد. در گام بعد، تورهای حاصل از جواب بهینه در نظر گرفته شد و با استفاده از الگوریتم زیربخش (تعیین سطح اعتبار بهینه) تقاضای واقعی نقاط تولید و تابع هدف مسئله با توجه به شکست های رخ داده محاسبه شد. تولید تقاضای واقعی و محاسبه هزینه حاصله هزار مرتبه تکرار و میانگین هزار بار شبیه سازی به منزله هزینه مسئله در سطح اعتبار معین در نظر گرفته شد. بر اساس میانگین حاصل از میانگین هزینه های مسائل در نظر گرفته شده، سطح بهینه اعتبار تعیین شد. جدول ۶ نتایج حل بهینه و شبیه سازی را نشان می دهد.

در جدول ۶، B نشان دهنده تابع هدف حل مسئله با میزان تقاضای برنامه ریزی شده بر اساس سطح اعتبار مشخص و M میانگین تابع هدف حاصل از شبیه سازی تقاضا و محاسبه میزان شکست در جواب برنامه ریزی شده است. همان گونه که در شکل ۳ دیده می شود با افزایش اعتبار میانگین تابع هدف کاهش می یابد. این روند تا سطح اعتبار ۰/۵ ادامه می یابد و کمترین میزان تابع هدف در این سطح رخ می دهد. سپس با افزایش سطح اعتبار میزان میانگین تابع هدف افزایش می یابد. با توجه به نتایج، سطح بهینه اعتبار برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد.

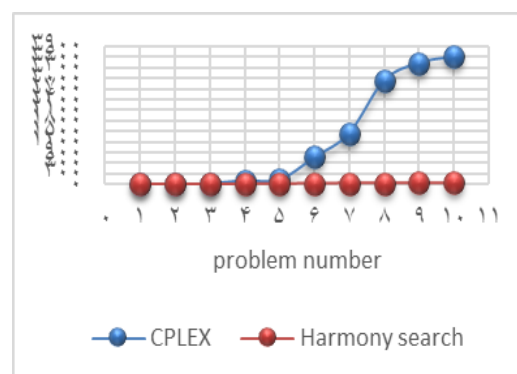
جدول ۳. مقایسه خروجی الگوریتم جست و جوی هارمونی و حل کننده سیپلکس

مسئله	سیپلکس			الگوریتم جست و جوی هارمونی			GAP (%)
	B	M	T	B	M	T	
P1	۱۳/۷۰	۱۷/۱۳	۶/۷۰	۱۳/۷۰	۱۸,۶۷	۳/۹۰	۰/۰۰
P2	۲۴/۸۰	۲۴/۸۰	۷/۴۸	۲۴/۸۰	۲۴,۸۰	۴/۱۰	۰/۰۰
P3	۲۴/۸۰	۴۲/۷۳	۱۸,۳۰	۲۴/۸۰	۷۴/۳۸	۶/۶۰	۰/۰۰
P4	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۰۷/۹۰	۱۸/۴۰	۲۱,۶۴	۱۱/۹۰	۰/۰۰
P5	۲۹/۱۰	۴۱/۴۱	۱۲۰/۴۰	۲۹/۱۰	۵۶/۴۷	۱۴/۱۰	۰/۰۰
P6	۱۸/۴۰	۱۸/۴۷	۷۵۹/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۲۱/۶۰	۰/۰۰
P7	۱۸/۴۰	۴۵/۶۰	۱۴۳۵/۷۰	۱۸/۴۰	۴۳,۱۱	۲۷/۰۰	۰/۰۰
P8	۲۴/۷۰	۲۴/۷۰	۲۹۲۱/۷۰	۲۴/۷۰	۴۵/۹۰	۲۹/۴۰	۰/۰۰
P9	۱۸/۶۰	۶۸/۴۹	۳۴۲۶/۹۰	۱۸/۹۰	۶۴,۱۸	۳۱/۱۰	۰/۰۲
P10	۱۸/۴۰	۲۰/۲۰	۳۶۰۰/۰۰	۱۹/۷۰	۲۲/۶۶	۳۱/۶۰	۰/۰۷
میانگین	۲۰/۹۳	۳۲/۱۹	۱۲۴۰/۴۵	۲۱/۰۹	۳۹/۰۲	۱۸/۱۳	۰/۰۱

جدول ۴. اطلاعات ده مسئله تصادفی تولید شده در ابعاد بزرگ

مسئله	R	n	K	Q	dismax	ρ
P11	۲۰	۱۵	۳	۱۲۵	۱۷	۰/۲۷
P12	۳۰	۲۵	۳	۲۱۰	۱۵	۰/۲۵
P13	۴۰	۳۵	۳	۲۹۰	۱۷	۰/۲۶
P14	۴۵	۴۰	۵	۲۰۰	۱۶	۰/۲۵
P15	۵۰	۴۵	۵	۲۲۵	۱۵	۰/۲۶
P16	۶۰	۵۰	۵	۲۵۰	۱۵	۰/۲۵
P17	۶۵	۶۰	۸	۱۸۷	۲۱	۰/۶۷
P18	۷۰	۶۰	۸	۲۲۵	۱۷	۰/۳
P19	۸۰	۷۰	۱۰	۱۷۵	۲۰	۰/۵۳
P20	۱۰۰	۸۰	۱۰	۲۰۰	۱۹	۰/۴۲

نتایج حل مسئله با الگوریتم هارمونی و ترکیبی با الگوریتم GRASP در جدول ۵ می آید. در شکل ۵ روند تغییرات زمان حل برای مسائل با ابعاد بزرگ برای الگوریتم جست و جوی هارمونی و الگوریتم ترکیبی می آید. همان گونه که پیش بینی می شود، میانگین زمان حل الگوریتم جست و جوی هارمونی نسبت به الگوریتم ترکیبی کمتر است. به طور متوسط، مدت زمان حل توسط الگوریتم هارمونی ۱۰۵ ثانیه، در حالی که این زمان برای الگوریتم ترکیبی ۱۳۹/۶۱ ثانیه است. از منظر کیفیت جواب الگوریتم ترکیبی توانست به طور میانگین ۲ درصد جواب ها را بهبود بخشد. میانگین خطا برای الگوریتم هارمونی به طور میانگین ۳ درصد و میانگین خطا در الگوریتم ترکیبی حدود ۱ درصد بود.



شکل ۴. نمودار زمان حل CPLEX و الگوریتم جست و جوی هارمونی برای ۱۰ مسئله در ابعاد کوچک

میزان خطا در روش جست و جوی هارمونی نسبت به روش دقیق به طور متوسط برابر ۱ درصد است که این میزان خطا توانایی الگوریتم در یافتن جواب های مناسب را نشان می دهد.

بررسی کارایی الگوریتم جست و جوی هارمونی در ابعاد بالا

به منظور بررسی توانایی الگوریتم جست و جوی هارمونی ارائه شده در ابعاد بالا و بررسی ترکیب این الگوریتم با الگوریتم GRASP، ده مسئله در ابعاد بالا با الگوی ارائه شده در زیربخش (تولید نمونه های تصادفی) تولید شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

است در یک اجرا جواب حاصل از الگوریتم بهتر و در اجرای دیگر جواب بدتر شود. بنابراین، برای مقایسه استفاده از میانگین نتایج حاصل حل ده مسئله مورد توجه قرار گرفت. شکل ۶ میزان بهبود نتایج الگوریتم هارمونیک را با ترکیب GRASP در مسائل مختلف نشان می‌دهد.

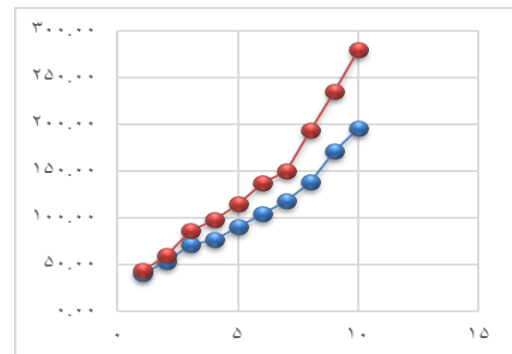
بیشترین میزان بهبود در جواب با ترکیب دو الگوریتم در مسئله ۲۰ رخ داد و ۹ درصد بهبود در جواب ایجاد شد. در مسئله ۱۹ نتیجه‌ای غیر منتظره رخ داد؛ خطای حل مسئله با ترکیب الگوریتم‌ها افزایش یافت. دلیل این موضوع تصادفی بودن الگوریتم‌هاست. به دلیل اینکه در این پژوهش هر مسئله یک بار با هر الگوریتم حل شد ممکن

جدول ۵. مقایسه عملکرد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم ترکیبی با GRASP برای مسائل با ابعاد بالا

مسئله	الگوریتم جست‌وجوی هارمونی			الگوریتم ترکیبی با GRASP		
	Z	T	GAP %	Z	T	GAP %
P11	۲۵/۳۵	۴۰/۵۹	۰/۰۰	۲۳/۳۵	۴۳/۷۵	۰/۰۰
P12	۸۶/۵۴	۵۲/۹۴	۰/۰۰	۸۶/۵۴	۵۹/۰۱	۰/۰۰
P13	۱۰۱/۲۴	۷۱/۳۵	۰/۰۱	۱۰۰/۱۶	۸۶/۴۶	۰/۰۰
P14	۱۰۸/۹۳	۷۶/۴۸	۰/۰۳	۱۰۵/۵۸	۹۷/۳۲	۰/۰۰
P15	۹۵/۱۰	۹۰/۴۱	۰/۰۴	۹۱/۱۰	۱۱۴/۸۳	۰/۰۰
P16	۱۴۸/۳۸	۱۰۳/۷۳	۰/۰۶	۱۳۹/۹۷	۱۳۷/۲۶	۰/۰۰
P17	۲۱۴/۸۸	۱۱۷/۵۷	۰/۰۴	۲۰۵/۸۸	۱۵۰/۳۲	۰/۰۰
P18	۹۹/۷۸	۱۳۷/۹۲	۰/۰۳	۹۶/۷۸	۱۹۳/۱۹	۰/۰۰
P19	۱۳۷/۵۵	۱۷۰/۶۱	۰/۰۰	۱۴۷/۵۵	۲۳۴/۶۸	۰/۰۷
P20	۱۹۳/۶۲	۱۹۵/۶۷	۰/۰۹	۱۷۷/۰۸	۲۷۹/۲۵	۰/۰۰
میانگین	۱۲۰/۹۴	۱۰۵/۷۳	۰/۰۳	۱۱۷/۳۸	۲۳۹/۶۱	۰/۰۱



شکل ۶. نمودار بهبود نتایج ترکیب الگوریتم هارمونی با الگوریتم GRASP



شکل ۵. نمودار زمان حل الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم ترکیبی با GRASP در مسائل با ابعاد بزرگ

جست‌وجوی هارمونی همراه یک روش ابتکاری بهبوددهنده بر مبنای الگوریتم GRASP برای حل این مدل گسترش داده شد.

نتایج نشان داد نتایج الگوریتم هارمونی پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک جواب‌هایی نزدیک بهینه ارائه می‌دهد. همچنین برای مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم جست‌وجوی هارمونی ترکیبی پیشنهادی تا حدود ۱۰ درصد نسبت به الگوریتم هارمونیک پایه بهبود ایجاد می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل خطی عدد صحیح در زمینه مسیریابی وسایل نقلیه امدادی، با استفاده از رویکرد تور پوششی و با هدف کمینه‌سازی آخرین زمان رسیدن وسایل نقلیه به نقاط آسیب‌دیده، ارائه شد. در این مدل تقاضای نقاط آسیب‌دیده به صورت عددی فازی در نظر گرفته شد و برای بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت تئوری اعتبار فازی به کار رفت. همچنین الگوریتم

پیشنهاد برای تحقیقات آتی

مدل ریاضی و روش حل ارائه شده در این پژوهش قابلیت گسترش برای تحقیقات آتی را دارد. در همین زمینه ارائه

یک مدل با فرض وجود چند دپوی مرکزی، بهینه سازی شاخص عدالت، و نیز استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار به منظور بهینه سازی مدل در شرایط عدم قطعیت پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی است.

REFERENCES

- Kovács, G. and Spens, K. M. (2007). "Humanitarian logistics in disaster relief operations." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(2), 99-114.
- Knott, R. (1987). The logistics of bulk relief supplies. *Disasters*, 11(2), 113-115.
- Huang, M., Smilowitz, K., and Balcik, B. (2012). "Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy." *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(1), 2-18.
- Mete, H. O. and Zabinsky, Z. B. (2010). "Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management." *International Journal of Production Economics*, 126(1), 76-84.
- Nolz, P. C., Doerner, K. F., Gutjahr, W. J., and Hartl, R. F. (2010). "A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning." In: Coello, C.A. et al., (Eds.) *A dv. in Multi- Objective Nature Inspired Computing*. SCI 272, 167-187.
- Zhu, J., Huang, J., Liu, D., and Han, J. (2008). "Resources allocation problem for local reserve depots in disaster management based on scenario analysis." *In The 7th International Symposium on Operations Research and its Applications*. Lijiang, China, 395-407.
- Shen, Z., Dessouky, M. M., and Ordóñez, F. (2009). "A two-stage vehicle routing model for large-scale bioterrorism emergencies." *Networks*, 54(4), 255-269.
- Naji-Azimi, Z., Renaud, J., Ruiz, A., and Salari, M. (2012). "A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid." *European Journal of Operational Research*, 222(3), 596-605.
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Liu, B. (2004). *Uncertainty theory: "an introduction to its axiomatic foundations"* (Vol. 154). Springer.
- Ghaffari-Nasab, N., Ahari, S. G., and Ghazanfari, M. (2013). "A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands." *Scientia Iranica*, 20(3), 919-930.
- Cao, E. and Lai, M. (2010). "The open vehicle routing problem with fuzzy demands". *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2405-2411.
- Wu, B., Qian, C., Ni, W., and Fan, S. (2012). "Hybrid harmony search and artificial bee colony algorithm for global optimization problems." *Computers & Mathematics with Applications*, 64(8), 2621-2634.
- Erbao, C. and Mingyong, L. (2009). "A hybrid differential evolution algorithm to vehicle routing problem with fuzzy demands." *Journal of computational and applied mathematics*, 231(1), 302-310.
- Arkin, E. M. and Hassin, R. (1994). "Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem." *Discrete Applied Mathematics*, 55(3), 197-218.
- Barbaroso, and gcaron, G. (2004). "A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response." *Journal of the Operational Research Society*, 55(1), 43-53.
- Fischetti, M., Salazar Gonzalez, J. J., and Toth, P. (1997). "A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem." *Operations Research*, 45(3), 378-394.
- Kaufmann, A. and Bonaert, A. P. (1977). "Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets"-vol. 1: Fundamental Theoretical Elements. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 495-496.
- Nahmias, S. (1978). "Fuzzy variables. Fuzzy sets and systems", 1(2), 97-110.
- Najafi, M., Eshghi, K., and Dullaert, W. (2013). "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 217-249.
- Haghani, A. and Oh, S. C. (1996). "Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations." *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(3), 231-250.
- Ozdamar, L. (2011). "Planning helicopter logistics in disaster relief". *OR spectrum*, 33(3), 655-672.
- Sakakibara, H., Kajitani, Y., and Okada, N. (2004). "Road network robustness for avoiding functional isolation in disasters." *Journal of transportation Engineering*, 130(5), 560-567.
- Wohlgemuth, S., Oloruntoba, R., and Clausen, U. (2012). "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief." *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(4), 261-271.
- Zadeh, L. A. (1975). "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning." *Information sciences*, 8(3), 199-249.

واژگان لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Disaster Relief Vehicle Routing Problem
 2. Credibility
 3. Possibility
 4. Necessity
 5. Harmony Memory Size
 6. Harmony Memory Consideration Rate
 7. Pitch Adjustment Rate
 8. Band Width
 9. Number of Improvisation
 10. Harmony Memory
 11. Memory Consideration
 12. Pitch Adjustment
 13. Random Key
-

پیوست

جدول ۶. مقادیر بهینه تابع هدف برنامه‌ریزی شده و میانگین تابع هدف برای مسائل مختلف

Cr	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱/۰
P1	B	۱۴/۹	۱۴/۹	۱۴/۹	۱۴/۹	۱۶/۷	۱۳/۷	۱۳/۷	۱۳/۷	۱۳/۷	۱۳/۷
	M	۱۴/۹	۲۰/۵	۱۸/۸	۱۸/۴	۱۷/۱	۱۹/۴	۱۹/۵	۲۰/۳	۲۱/۸	۲۲/۵
P2	B	۲۹/۶	۲۹/۶	۲۹/۶	۲۹/۶	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸
	M	۲۹/۶	۷۲/۴	۷۴/۴	۷۴/۴	۲۴/۸	۲۴/۸	۵۱/۵	۵۲/۵	۷۴/۴	۷۴/۴
P3	B	۲۹/۳	۲۹/۳	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸	۲۴/۸
	M	۲۹/۳	۷۴/۴	۷۴/۴	۲۷/۵	۴۲/۷	۵۲/۵	۵۶/۱	۷۴/۴	۷۴/۴	۷۴/۴
P4	B	۲۱/۲	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴
	M	۲۱/۲	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۳۶/۰	۴۲/۷	۴۲/۷
P5	B	۳۵/۴	۳۱/۸	۳۱/۸	۳۱/۸	۲۹/۱	۲۸/۶	۲۸/۶	۲۸/۶	۲۸/۶	۲۸/۶
	M	۳۵/۴	۴۱/۵	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴	۴۱/۴
P6	B	۲۴/۹	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴
	M	۲۴/۹	۵۵/۲	۵۴/۸	۱۸/۵	۱۸/۵	۱۸/۵	۱۸/۵	۴۴/۲	۵۵/۰	۵۵/۱
P7	B	۵۲/۸	۲۲/۹	۱۹/۷	۱۹/۷	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۶/۵	۱۵/۲
	M	۵۲/۸	۵۸/۲	۱۹/۷	۲۲/۷	۴۵/۶	۴۵/۶	۴۹/۹	۵۰/۰	۵۰/۱	۶۰/۵
P8	B	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶
	M	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۴۹/۳	۵۱/۳	۵۵/۵	۵۹/۴
P9	B	۵۲/۸	۲۸/۹	۱۷/۷	۱۹/۰	۱۸/۶	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۶/۵	۱۵/۲
	M	۵۲/۸	۴۹/۶	۵۳/۳	۴۹/۶	۶۸/۵	۶۸/۳	۶۸/۳	۷۳/۴	۶۹/۴	۷۶/۷
P10	B	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۸/۴
	M	۱۸/۶	۵۰/۵	۴۹/۹	۴۸/۳	۲۰/۲	۴۵/۶	۴۸/۷	۴۹/۹	۵۱/۰	۵۱/۳
P11	B	۶۴/۳	۷۰/۷	۹۵/۱	۴۲/۸	۲۱/۵	۲۳/۴	۲۳/۴	۲۶/۵	۳۱/۶	۳۵/۰
	M	۶۴/۳	۷۵/۰	۷۳/۱	۵۳/۸	۲۱/۵	۲۹/۴	۳۵/۴	۴۹/۵	۶۱/۶	۱۲۱/۷
P12	B	۱۲۴/۶	۱۲۴/۶	۱۲۳/۸	۱۰۰/۸	۹۵/۰	۸۶/۵	۷۹/۷	۷۹/۶	۷۲/۳	۵۹/۶
	M	۱۲۴/۶	۱۲۴/۶	۱۲۷/۹	۱۰۳/۵	۹۷/۳	۸۸/۳	۸۹/۶	۹۶/۵	۱۰۰/۰	۱۳۶/۳
P13	B	۱۵۵/۱	۱۴۶/۸	۱۳۵/۶	۱۲۱/۹	۱۰۰/۶	۱۰۰/۲	۹۸/۳	۷۸/۴	۷۷/۵	۱۱۲/۰
	M	۱۵۵/۱	۱۵۰/۶	۱۳۵/۶	۱۴۰/۶	۱۰۰/۹	۱۰۵/۲	۱۰۰/۲	۹۸/۳	۱۰۰/۶	۱۳۸/۱
P14	B	۱۴۸/۶	۱۴۲/۲	۱۳۸/۲	۱۳۰/۸	۱۱۵/۷	۱۰۵/۶	۱۰۱/۰	۱۰۵/۵	۱۰۴/۰	۹۴/۲
	M	۱۴۸/۶	۱۴۴/۲	۱۳۸/۲	۱۴۰/۴	۱۳۱/۰	۱۴۰/۵	۱۵۰/۳	۱۳۹/۲	۱۴۰/۶	۱۵۱/۱
P15	B	۱۰۶/۲	۹۹/۶	۱۰۳/۰	۹۹/۹	۱۰۳/۱	۹۹/۱	۱۰۴/۲	۱۰۷/۴	۱۰۲/۸	۸۲/۲
	M	۱۰۶/۲	۹۹/۶	۱۰۳/۰	۹۹/۹	۱۰۳/۱	۹۱/۱	۱۵۰/۱	۱۶۹/۳	۱۷۴/۲	۱۸۰/۷
میانگین											
	۶۰/۲	۷۰/۸	۶۸/۱	۵۹/۳	۵۱/۰	۵۴/۴	۶۱/۵	۶۸/۴	۷۳/۳	۸۱/۱	۸۶/۳