

# بررسی و حل مسئله‌ی امدادرسانی دوسطحی نقاط آسیب‌دیده از بحران

حسین جمالی: دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.  
مه‌دی بشیری\*: دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ Email: bashiri.m@gmail.com  
رضاتوکلی مقدم: استاد، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۴

## چکیده

امدادرسانی به نقاط آسیب‌دیده نیازمند برنامه‌ریزی مناسبی است. معمولاً، در حوادث پیش‌آمده، دسترسی به همه‌ی نقاط امکان‌پذیر نیست؛ از این رو، امدادرسانی در دو سطح با امکانات متفاوت شاید راه‌حل مناسبی باشد. این مقاله به بررسی مسئله‌ی امدادرسانی دوسطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت برای افرادی می‌پردازد که در ناحیه‌ای بحران‌زده قرار گرفته‌اند. هدف این مقاله تعیین مجموعه‌ای بهینه از پایگاه‌های امداد جهت استقرار گروه‌های امداد رسانی و مسیریابی بهینه‌ی این گروه‌ها برای امدادرسانی به کلیه‌ی نقاط آسیب‌دیده، با کمترین زمان و هزینه، است. پس از معرفی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی مورد نظر در ابعاد بزرگ ارائه شده است. نتایج بررسی مثال‌های عددی حاکی از کارایی الگوریتم پیشنهادی است. همچنین، به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی برای مسئله‌ی امدادرسانی، مدل‌های دیگر مورد استفاده بررسی شدند و نتایج مقایسه‌ای با دیگر مدل‌های مرتبط نظیر مسئله‌ی مسیریابی - مکان‌یابی یک سطحی و مسئله‌ی تور پوششی در موقعیت امدادرسانی حاکی از عملکرد مناسب‌تر مدل پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: مسئله‌ی مسیریابی - مکان‌یابی دوسطحی، پنجره‌های زمانی سخت، الگوریتم ژنتیک، امدادرسانی، تحلیل حساسیت

## Modeling and a Genetic Algorithm for the Two-Echelon Relief logistics Problem

Hossein Jamali<sup>1</sup>, Mahdi Bashiri<sup>\*2</sup>, Reza Tavakkoli Moghaddam<sup>3</sup>

### Abstract

Disaster relief to the affected areas is one of the necessities for any proper planning. Usually during disaster, the accesses to areas are limited; therefore, disaster relief using two-level with different features could be a good solution. In this paper, a two-echelon capacitated relief problem with hard time windows is proposed for people who have been affected in disaster area. The aim of this paper is to determine the optimal set of relief center services to establish the optimal routing aid and relief teams to the affected areas with minimal time and cost. After the introduction of a mixed-integer linear programming, a genetic algorithm for solving the problem of large-scale is provided. The results of numerical examples show the efficiency of the proposed algorithm. In addition, to evaluate the effectiveness of the proposed model for the relief problems, other existing models are investigated and examined. Comparative results with other related models such as one-level location-routing problem and covering tour problem in disaster relief illustrate the superior performance of our proposed model.

**Keywords:** *Two-Echelon Location Routing Problem, Hard Time Windows, Genetic Algorithm, Relief, Sensitivity Analysis*

<sup>1</sup> Ph.D. Student of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran; Email: bashiri.m@gmail.com

<sup>3</sup> Professor, Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۵

شماره هشتم

پاییز و زمستان

۱۳۹۴

دوفصلنامه علمی و پژوهشی

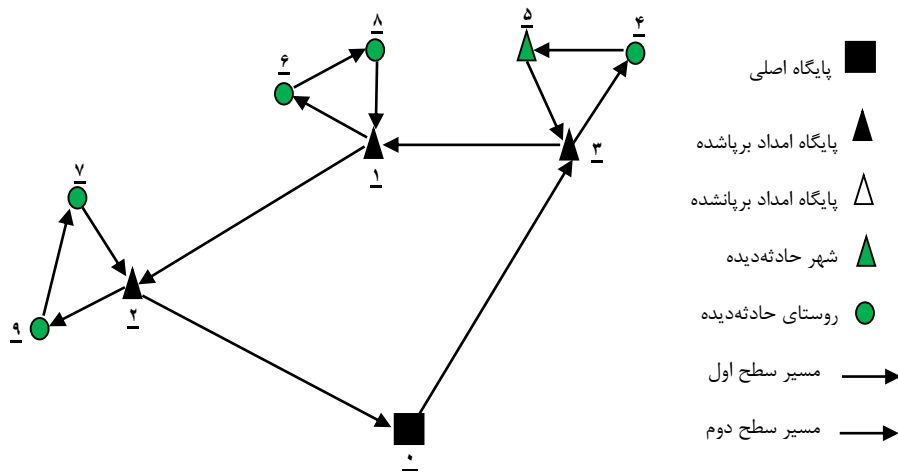


افزایش تعداد حوادث غیرمترقبه در سال‌های اخیر و آسیب‌های فراوان ناشی از این حوادث باعث شده است که مجامع علمی در حوزه‌ی حمل‌ونقل اورژانسی در این سال‌ها به تحقیق و پژوهش بیشتری بپردازند [۱]. بنابراین، شگفت‌انگیز نیست که چنین موضوعی تلاش‌های بسیاری را در مجامع علمی موجب شده است. معمولاً، در حوادث غیرمترقبه، دسترسی مستقیم به تمامی نقاط آسیب‌دیده امکان‌پذیر نیست و اگر برنامه‌ریزی مناسبی انجام نگیرد، هرج‌ومرج، اتلاف وقت، هزینه و امکانات به وجود می‌آید و، در این صورت، ممکن است جان افراد بسیاری به خطر بیفتد. در این حالت، امداد رسانی در دو سطح با امکانات متفاوت راه‌حل مناسبی است. این مقاله به بررسی مسئله‌ی مسیریابی- مکان‌یابی دوسطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت<sup>۱</sup> (2E-CLRPHTW) در موقعیت امداد رسانی<sup>۲</sup> برای افرادی می‌پردازد که در ناحیه‌ی بحران‌زده قرار گرفته‌اند. در چنین موقعیتی، گروه‌های امداد رسان باید در اسرع وقت افراد را تحت حمایت خود بگیرند و لازمه‌ی این امر یافتن مسیرهای بهینه جهت حمل‌ونقل سریع این گروه‌ها و ارائه‌ی کالاهای ضروری به افراد حادثه‌دیده است. علت استفاده از پنجره‌های زمانی سخت این است که جان افراد حادثه‌دیده در خطر است. در حوادث طبیعی نظیر سیل و زلزله، به شهرها و روستاها آسیب می‌رسد. معمولاً، به سبب مقاومت‌سازی و استاندارد بودن سازه‌ها در شهرها آسیب کمتری دیده می‌شود اما، برعکس، روستاها در این‌گونه حوادث بیشتر در معرض آسیب‌اند. در این مقاله، امداد رسانی از پایگاه اصلی به شهرها و روستاهای حادثه‌دیده و از طریق شهرهایی که حادثه ندیده‌اند، صورت می‌گیرد. در این مسئله، پایگاهی اصلی وجود دارد که امکاناتی نظیر وسایل حمل‌ونقل جهت امداد رسانی و مواد مورد نیاز افراد حادثه‌دیده در آنجا در دسترس است. همچنین، تعدادی شهر هست که به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول شهرهایی که حادثه ندیده‌اند و می‌توان در آن‌ها پایگاه امداد با ظرفیت محدود جهت خدمت‌رسانی به نقاط حادثه‌دیده برپا کرد. هر کدام از این شهرها یک هزینه‌ی استقرار دارند؛ دسته‌ی دوم شهرهایی هستند که حادثه دیده‌اند و نه تنها نمی‌توان از آن‌ها به صورت مراکز امداد رسانی استفاده کرد، بلکه باید به آن‌ها توسط پایگاه‌های امداد مستقر شده امداد رسانی نمود. نهایتاً، نقاطی از افراد حادثه‌دیده شامل شهرها و روستاها وجود دارد که گروه‌های امداد رسان باید به آن‌ها خدمت‌رسانی کنند. هدف این مقاله تعیین مجموعه‌ای بهینه از پایگاه‌های امداد جهت استقرار گروه‌های امداد رسان، مسیریابی بهینه‌ی این گروه‌ها از پایگاه اصلی به پایگاه‌های امداد برپاشده و سپس از این پایگاه‌ها به نقاط حادثه‌دیده است؛ به طوری که کل تقاضا برآورده گردد و هزینه‌ی کل، که شامل مجموع هزینه‌ی برپا شدن پایگاه‌های امداد و هزینه‌های حمل‌ونقل است، حداقل گردد. بنابراین، این مسئله دو سطح دارد: سطح اول شامل پایگاه اصلی و پایگاه‌های امداد برپاشده و سطح دوم شامل این پایگاه‌ها و نقاط حادثه‌دیده است. در هر سطح، یک ناوگان از وسایل نقلیه‌ی مشابه، با ظرفیت‌های

یکسان و معین، قرار دارد. وسایل حمل‌ونقل سطح اول در پایگاه اصلی موجودند. هر وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح اولی یک زیرمجموعه از پایگاه‌های امداد را می‌پیماید و سپس به پایگاه اصلی برمی‌گردد. در پایگاه‌های امداد، کالاها از وسایل نقلیه‌ی سطح اول به وسایل نقلیه‌ی سطح دوم انتقال می‌یابند. سپس، هر وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح دومی از یک پایگاه امداد شروع می‌کند، مسیری را که برای ارائه‌ی خدمت و توزیع مواد امدادی به افراد حادثه‌دیده در نظر گرفته شده می‌پیماید و سپس به همان پایگاه برمی‌گردد. در این مسئله، وسایل نقلیه‌ی سطح اول ظرفیت بیشتری در مقایسه با وسایل نقلیه‌ی سطح دوم دارند. هر پایگاه امداد برپاشده باید دقیقاً با یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح اول بازدید شود؛ به طور مشابه، هر نقطه‌ی متقاضی دریافت خدمات امداد باید دقیقاً با یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح دوم، که از یک پایگاه امداد برپاشده شروع به حرکت کرده است، خدمت‌رسانی گردد. بنابراین، باید مقدار تقاضای هر متقاضی کوچک‌تر از ظرفیت هر یک از وسایل نقلیه‌ی سطح دوم باشد. در نهایت، این تحقیق با عنوان مسئله‌ی مسیریابی- مکان‌یابی وسایل حمل‌ونقل ظرفیت‌دار در موقعیت امداد رسانی با محدودیت پنجره‌های زمانی سخت نام‌گذاری می‌شود که به اختصار در این مقاله مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی نامیده می‌شود. نوآوری‌های تحقیق حاضر را می‌توان در این موارد عنوان کرد: مدل‌سازی مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی با پنجره‌های زمانی سخت، طراحی الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل این مسئله در اندازه‌های واقعی و تحلیل حساسیت آن، همچنین مقایسه‌ی این مسئله با مسائل مسیریابی- مکان‌یابی یک سطحی ظرفیت‌دار<sup>۳</sup> (CLRP) و مسئله‌ی تور پوششی<sup>۴</sup> (CTP) در موقعیت امداد رسانی.

تصویر ۱ راه‌حلی شدنی را برای مثال کوچکی از مسئله‌ی مورد بررسی در این تحقیق نشان می‌دهد. در این مثال، یک پایگاه امداد اصلی (D)، ۳ پایگاه امداد بالقوه (S) که در هر ۳ پایگاه، گروه‌های امداد مستقر شده‌اند. همچنین، ۶ نقطه‌ی حادثه‌دیده وجود دارد (T) که ۵ رأس آن را روستاهای حادثه‌دیده و یک رأس را شهر حادثه‌دیده تشکیل می‌دهد. همه‌ی نقاط حادثه‌دیده از طریق پایگاه‌های امداد برپاشده امداد رسانی شده‌اند. همچنین، در این تصویر، نحوه‌ی امداد رسانی از پایگاه اصلی به پایگاه‌های برپاشده در تور سطح اول و سپس امداد رسانی از این پایگاه‌ها به نقاط حادثه‌دیده در سطح دوم به ترتیب و به طور هم‌زمان نمایش داده شده‌اند.

مقاله‌ی حاضر به صورت زیر سازمان‌دهی شده است که، در بخش دوم مقاله، مطالعات پیشین بررسی شده و خلأ تحقیقاتی مرتبط استخراج شده است. در بخش سوم، مسئله‌ی مسیریابی- مکان‌یابی دوسطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت در موقعیت امداد رسانی بیان می‌شود و مدل ریاضی آن مطرح می‌گردد. در بخش چهارم، روش حل مسئله توضیح داده شده است. بخش پنجم شامل ساختار الگوریتم ژنتیک پیشنهادی جهت حل مسئله با پارامترهای تنظیم شده است. بخش‌های ششم و هفتم مثال‌های عددی حل شده و تحلیل حساسیت انجام شده



تصویر ۱: یک راه حل شدنی برای مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی با  $|D|=1, |S|=3, |T|=6$

نولز و همکاران (۲۰۱۰) یک مسئله‌ی تور پوششی چندهدفه<sup>۱۰</sup> (MOCTP) را پیشنهاد دادند که در آن یک ایستگاه مرکزی و مجموعه‌ای از وسایل نقلیه یکسان فرض شده بود. در این تحقیق، امداد رسانی از طریق توزیع کمک‌های حیاتی مانند غذا و دارو به افراد حادثه‌دیده در یک سطح و به صورت غیرمستقیم صورت می‌گیرد. هدف این مطالعه مسیریابی برای تحویل آب آشامیدنی به افراد حادثه‌دیده در یک منطقه بعد از وقوع فاجعه است. برای حل مسائل، در این مقاله، از هر دو روش دقیق و فراابتکاری استفاده شده است. روش دقیق استفاده شده E- محدودیت<sup>۱۱</sup> است. همچنین از روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی و الگوریتم NSGA-II استفاده شده است [۸]. کرانیک و همکاران (۲۰۱۱) سه مدل سازی بر پایه‌ی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۱۲</sup> (MILP) برای مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی با ظرفیت محدود معرفی کردند که از نظر نوع و تعداد متغیرهای مسیریابی با هم تفاوت دارند. مدل‌های اول و سوم در این مطالعه از مدل سازی VRP کلاسیک استنتاج شده است و مدل سازی دوم از مدل سازی MDVRP الهام گرفته شده است. هدف این مقاله معرفی مسئله‌ی ۲E-LRP و رسیدن به این بینش است که این مسئله، با توجه به مدل‌های ارائه‌شده، برای مثال‌های گوناگون چگونه عمل می‌کند [۹]. کرانیک و همکاران (۲۰۱۱) در مقاله‌ای روش فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع را برای حل مسئله‌ی ۲E-LRP پیشنهاد دادند. هدف این مقاله مشخص کردن مکان و تعداد دو نوع از تسهیلات دارای ظرفیت، تعداد دو ناوگان از وسایل حمل‌ونقل مختلف و مسیرهای مرتبط در هر سطح است. الگوریتم TS پیشنهاد شده بر اساس تجزیه‌ی مسئله‌ی ۲E-LRP به دو زیرمسئله‌ی LRP در هر سطح عمل می‌کند. سپس، هر زیرمسئله به یک مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات دارای ظرفیت و یک مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل‌ونقل چندایستگاهی تجزیه می‌شود. این چهار زیرمسئله به ترتیب و به صورت مکرر حل می‌شوند و راه‌حل‌های آن‌ها به منظور تعیین یک راه‌حل کلی خوب با هم ترکیب می‌شوند.

را در بر دارند. نهایتاً، در بخش آخر جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## پیشینه‌ی پژوهش

یکی از اولین و مهم‌ترین مقالات در زمینه‌ی مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی<sup>۵</sup> (۲E-LRP) را جاکوبسن و مدسن (۱۹۸۰) ارائه کردند. آن‌ها در این مقاله یک کاربرد واقعی این مسئله را در زمینه‌ی توزیع و پخش روزنامه در بخش غربی دانمارک به کار بردند. هدف این مسئله مکان‌یابی مراکز توزیع، یافتن مسیرهای بهینه برای سطح اول و دوم با حداقل هزینه است. نویسندگان این مقاله سه الگوریتم ابتکاری مختلف را برای حل این مسئله ارائه کردند [۲]. مدسن (۱۹۸۳)، با انجام اصلاحاتی بر روی دو الگوریتم از سه الگوریتم ابتکاری بیان شده در قبل، کارایی آن‌ها را افزایش داد و برای همان مسئله از آن‌ها استفاده کرد [۳]. بوسیا و همکاران (۲۰۱۰) یک روش حل فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع<sup>۶</sup> (TS) را، که در اصل برای مسائل LRP طراحی شده بود و قبلاً آن‌ها را ناگی و صالحی [۴] و توزان و بورکه [۵] پیشنهاد کرده بودند، برای مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی با ظرفیت محدود ارائه نمودند. ایده‌ی اصلی این الگوریتم اولاً تجزیه‌ی مسئله‌ی اصلی به دو مسئله‌ی LRP و ثانیاً تجزیه‌ی هر LRP به یک مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات دارای ظرفیت<sup>۷</sup> (CFLP) و یک مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل‌ونقل چندایستگاهی<sup>۸</sup> (MDVRP) است [۶]. نیک‌بخش و ذگردی (۲۰۱۰) یک مدل ریاضی چهاراندیشه، یک هیوریستیک سریع و کارا و یک کران پایین را برای مسئله‌ی ۲E-LRP با محدودیت‌های پنجره‌های زمانی نرم<sup>۹</sup> ارائه دادند. روش ابتکاری پیشنهاد شده تلاش می‌کند تا مسئله را با استفاده از ساختن راه‌حل اولیه، بهبود دادن به آن از طریق جست‌وجوی شش همسایه از راه‌حل اولیه و استفاده از روش ابتکاری Or-opt حل نماید. در پایان، نتایج محاسباتی نشان از کارایی روش ابتکاری پیشنهاد شده و استفاده از کران پایین ارائه شده دارد [۷].

الگوریتم TS پیشنهاد شده بر روی سه مجموعه از مثال‌های با اندازه‌ی بزرگ و متوسط و کوچک آزمایش شد و نتایج به دست آمد و با نتایج مدل‌های دیگر مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که TS پیشنهاد شده، از نظر کیفیت راه‌حل‌ها و زمان محاسباتی در اکثر مثال‌های حل شده، کارا و اثربخش است [۱۰]. راس و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه را برای یک مسئله‌ی مسیریابی - مکان‌یابی انبار جهت امداد رسانی بعد از وقوع حادثه پیشنهاد دادند. در این مسئله، چند ایستگاه وجود دارد که باید در ابتدا مکان‌یابی شوند، سپس متقاضیان به این ایستگاه‌ها تخصیص یابند و در ادامه، مسیریابی به این متقاضیان با یک ناوگان از وسایل حمل‌ونقل با ظرفیت یکسان انجام گیرد. کالاها از یک مجموعه از کارخانه‌ها به یک یا چند انبار و سپس از آنجا به سوی متقاضیان حمل می‌شوند. تعداد، اندازه و مکان انبارها، تخصیص متقاضیان به انبارها و مسیریابی حمل کالاها باید به گونه‌ای انجام گیرد که حداقل هزینه را در بر داشته باشد. نویسندگان برای حل این مسئله از روش دقیق  $\epsilon$ - محدودیت و الگوریتم ابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر<sup>۱۳</sup> (VNS) استفاده کرده‌اند [۱۱].

تنها روش دقیق موجود در ادبیات مسئله‌ی  $\epsilon$ -LRP الگوریتم شاخه و برش<sup>۱۴</sup> (B & C) است که آن را کونتاردو و همکاران (۲۰۱۲) پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله، نویسندگان یک مدل‌سازی جریان‌مبنای وسایل نقلیه‌ی دواندیشه‌ی جدید را پیشنهاد دادند که بر اساس الگوریتم شاخه و برش طراحی شده و قادر است مثال‌های در اندازه‌های کوچک و متوسط را به صورت بهینه در یک زمان محاسباتی منطقی حل کند. این فرموله‌بندی ریاضی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است که با چندین نامساوی معتبر گرفته شده از مقالات بلنگور و همکاران [۱۲] و کونتاردو و همکاران [۱۳] تقویت گردیده است. همچنین، نویسندگان یک الگوریتم ALNS<sup>۱۵</sup> را برای حل این مسئله پیشنهاد دادند. هر دو الگوریتم دقیق و فراابتکاری ارائه شده بر اساس تجزیه‌ی مسئله‌ی  $\epsilon$ -CLRP به دو مسئله‌ی LRP در هر سطح طراحی شده‌اند. نتایج محاسباتی که بر روی مجموعه‌ی بزرگی از مثال‌ها انجام گرفت، حاکی از آن است که الگوریتم ALNS کارا تر از هیوریستیک‌های موجود است. علاوه بر این، روش شاخه و برش ارائه شده کران‌های پایینی دقیقی را فراهم می‌آورد [۱۴]. نگوین و همکاران (۲۰۱۲) مسئله‌ی مسیریابی - مکان‌یابی دوسطحی با ظرفیت محدود و دارای یک ایستگاه<sup>۱۶</sup> ( $\epsilon$ -CLRP) را، که تعمیمی از مسئله‌ی  $\epsilon$ -CLRP است و در آن فقط یک ایستگاه با مکان مشخص وجود دارد، بررسی کردند. آن‌ها این مسئله را با یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و با استفاده از متغیرهای تصمیم دواندیشه مدل‌سازی کردند. همچنین، آن‌ها چهار روش هیوریستیک سازنده، یک روش فراابتکاری ترکیبی GRASP<sup>۱۷</sup> را، که با استفاده از learning process و path relinking تقویت گردیده است، برای حل این مسئله ارائه نمودند. الگوریتم GRASP از سه هیوریستیک تصادفی حریصانه برای تولید راه‌حل‌های آزمایشی و دو روش VND<sup>۱۸</sup> برای بهبود آن‌ها استفاده

می‌کند. نویسندگان این مقاله دو مجموعه مثال را برای این مسئله تعریف کردند که شامل حداکثر ۱۰ مرکز توزیع و ۲۰۰ متقاضی بودند. نتایج محاسباتی نشان دادند که الگوریتم GRASP ترکیبی مذکور کارا تر از دیگر هیوریستیک‌های بیان شده در این مقاله‌اند [۱۵].

نگوین و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید و یک الگوریتم جست‌وجوی محلی تکراری<sup>۱۹</sup> (ILS) چندشروعی با تعدادی ویژگی خاص را برای  $\epsilon$ -CLRP پیشنهاد دادند. این ویژگی‌ها از این قرارند: اولین ویژگی یک معیار پذیرش برای راه‌حل‌هاست؛ به طوری که این راه‌حل‌ها فقط در صورتی پذیرفته می‌شوند که اختلافشان از بهترین راه‌حل شناخته شده از مقداری معین تجاوز نکند. دومین ویژگی شامل دو روش بهبودیافته بر پایه‌ی جست‌وجوی دو همسایه با پیچیدگی متفاوت است و سومین ویژگی شامل فهرستی است که راه‌حل‌های بازدید شده‌ی اخیر توسط یک الگوریتم TS را ذخیره می‌کند. در ادامه، نتایج الگوریتم ILS چندشروعی با روش path relinking تقویت گردید. این الگوریتم همراه با تعدادی هیوریستیک ساده‌تر و با کارایی کمتر بر روی تعدادی از مثال‌های پایه، که در مقاله‌ی [۱۵] تولید شده بودند، مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، در این مقاله، نویسندگان فقط بهترین مقادیر به دست آمده از تعدادی اجرا را گزارش داده‌اند، در حالی که هیچ اطلاعاتی در مورد میانگین عملکرد اجراها داده نشده است [۱۶]. مقایسه‌ی دو مقاله‌ی [۱۵] و [۱۶] نشان می‌دهد که ILS چندشروعی ترکیب شده با path relinking در مقاله‌ی [۱۶] کمی بهتر از الگوریتم GRASP ترکیب شده با learning process و path relinking بیان شده در مقاله‌ی [۱۵] است. اسچونگر و همکاران (۲۰۱۲) روش ابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) را برای  $\epsilon$ -CLRP گسترش دادند که این الگوریتم را قبلاً پیر کویسر و همکاران [۱۷] برای مسئله‌ی LRP طراحی کرده بودند. محاسبات بر روی سه مجموعه از مثال‌های به‌کاررفته در مقاله‌ی [۱۴] انجام گرفت و نتایج به دست آمدند. کارایی الگوریتم VNS در مقایسه با کارایی الگوریتم آزمون شده در مقالات [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] مورد تأیید قرار گرفت. نتایج محاسباتی نشان دادند که الگوریتم VNS پیشنهاد شده بهتر از روش‌های فراابتکاری پیشنهاد شده در [۱۶، ۱۵] هستند، اما به طور متوسط الگوریتم ALNS ارائه شده در [۱۴] عملکرد بهتری داشته است [۱۸]. ناجی عظیمی و همکاران (۲۰۱۲) مسئله‌ی تور پوششی را برای مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه دادند. این مسئله به بررسی مکان‌یابی مراکز توزیع در جهت کمک به ارائه‌ی خدمات بشردوستانه برای همه‌ی افرادی که در یک ناحیه‌ی حادثه‌دیده قرار گرفته‌اند، می‌پردازد. برای حل این مسئله از هیوریستیک multi-start استفاده شده است. نتایج محاسباتی بر روی داده‌هایی که به طور تصادفی تولید شده‌اند نشان می‌دهند که فقط مثال‌های کوچک با استفاده از مدل ریاضی به صورت کارا حل می‌شوند و هیوریستیک پیشنهادی مثال‌های در اندازه‌ی واقعی را با کیفیت بالا و در یک زمان منطقی حل می‌کند [۱۹]. گویندان و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را برای

یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی فاسدشدنی پیشنهاد دادند. این مدل یک مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی با پنجره‌های زمانی برای طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین و بهینه‌سازی اهداف محیطی و اقتصادی در یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی فاسدشدنی را تعریف می‌کند. هدف این مدل شناسایی تعداد و مکان تسهیلات، بهینه‌سازی مقدار مواد حمل‌شده به سطوح پایین و مسیریابی در هر سطح است. همچنین، هدف دیگر این مقاله کاهش هزینه‌های مرتبط با کربن ناشی از تماس لاستیک‌های وسایل نقلیه با سطح جاده و انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل شبکه است. روش پیشنهادشده شامل یک رویکرد هیبریدی چندهدفه‌ی جدید به نام MHPV، ترکیبی از دو الگوریتم چندهدفه‌ی شناخته‌شده به نام الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات چندهدفه<sup>۲۰</sup> (MOPSO) و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر چندهدفه‌ی تعدیل‌شده<sup>۲۱</sup> (AMOVNS) است. نتایج نشان می‌دهند که این رویکرد هیبریدی راه‌حل‌های بهتری در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهند [۲۰]. وانگ و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل مسیریابی-مکان‌یابی عدد صحیح غیرخطی را برای مسئله‌ی توزیع امداد یک‌سطحی با در نظر گرفتن مدت‌زمان پیموده‌شده، کل هزینه و قابلیت اطمینان تعریف کردند؛ به طوری که در این مدل شکست تقاضا مجاز است؛ به این معنی که وسایل حمل‌ونقل می‌توانند در آخرین نقطه‌ی توقفشان تا فرارسیدن مأموریت بعدی منتظر بمانند، بدون اینکه به ایستگاه برگردند. توزیع امداد شامل مکان‌یابی مراکز توزیع، مسیریابی وسایل نقلیه و زمان بندی پس از وقوع زلزله است. در این مسئله، از یک ناوگان وسایل حمل‌ونقل ناهمگون، که ظرفیت و سرعت‌های متفاوتی دارند، استفاده شده است. هدف این مسئله مشخص کردن یک زیرمجموعه از مراکز توزیع جهت بازگشایی، تخصیص نواحی بحران‌زده و وسایل حمل‌ونقل به مراکز توزیع و برنامه‌ریزی مسیرها از مراکز توزیع به نواحی حادثه‌دیده با توجه به ظرفیت وسایل حمل‌ونقل و مجاز بودن شکست تقاضاست. نویسندگان این مقاله از دو روش فراابتکاری NSGA-II و NSDA برای حل مدلشان استفاده کردند. این دو روش در عملگرهای تقاطع و جهش با هم تفاوت دارند. برای ارزیابی کارایی دو روش پیشنهادشده، ۵ مجموعه از مثال‌ها در اندازه‌های مختلف به صورت تصادفی تولید و با مدل‌های پیشنهادی حل گردید. مقایسه‌ی جواب‌ها نشان داد که روش NSGA-II در اکثر موارد در مقایسه با روش NSDA عملکرد بهتری داشته است [۲۱].

جدول ۱، به طور خلاصه، ویژگی‌های مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی مسائل مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی و امدادرسانی را به همراه خلأهای تحقیقاتی نشان می‌دهد. با مشاهده‌ی جدول زیر، واضح است که مسئله‌ی امدادرسانی دوسطحی بیان‌شده در این تحقیق و حل این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک از نکاتی هستند که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.

## تعریف امدادرسانی دوسطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت و مدل‌سازی ریاضی

در مسئله‌ی امدادرسانی مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت<sup>۲۲</sup> (PHTW-CRLR-E-2)، مجموعه‌ای از متقاضیان دریافت امداد (نقاط حادثه‌دیده) و مجموعه‌ای از نقاط کاندیدای احداث پایگاه‌های امدادرسانی وجود دارد. مقدار تقاضای نقاط آسیب‌دیده و ظرفیت پایگاه‌ها از ابتدا مشخص‌اند. وسایل حمل‌ونقل کالا در هر سطح مشابه و دارای ظرفیتی یکسان‌اند. همچنین، این مسئله شامل دو مجموعه از مسیرهای وسایل حمل‌ونقل نیز هست. در مسیرهای سطح اول، مجموعه‌ای از پایگاه‌های امداد موجودند که در ابتدا باید مکان‌یابی و سپس توسط پایگاه اصلی تأمین شوند. مسیرهای سطح دوم متقاضیان را از طریق پایگاه‌های امداد برپاشده تأمین می‌کنند. هر نقطه یک بازه‌ی زمانی از قبل مشخص شده  $[es_i, ls_i]$  دارد که بیانگر این موضوع است که باید در این بازه به این نقطه خدمت‌رسانی صورت گیرد. در اینجا،  $es_i$  زودترین زمان شروع دریافت خدمت و  $ls_i$  دیرترین زمان شروع دریافت خدمت در نقطه‌ی  $i$  است. یکی از علت‌های تعریف این بازه شاید میزان شدت آسیب به نقاط حادثه‌دیده باشد. هدف از این موضوع اولویت‌بندی نقاطی است که آسیب بیشتری دیده‌اند و نیاز به امدادرسانی سریع‌تری از زمان بروز حادثه دارند. در حالت پنجره‌های زمانی سخت، تقاضای باید خدمت را فقط در بازه‌ی زمانی تعریف‌شده دریافت کند، ولی در حالت پنجره‌ی زمانی نرم، اگر تقاضای خدمت مورد نظر در بازه‌ی زمانی تعریف‌شده دریافت نکند، آن‌گاه جریمه‌ای به مدل مسئله تحمیل می‌شود. بنابراین، از آنجاکه در این مسئله با جان افراد سروکار داریم و باید حتماً به افراد حادثه‌دیده امدادرسانی شود، از پنجره‌های زمانی سخت استفاده شده است. هدف از این مسئله کمینه کردن هزینه‌های مربوطه، تعیین مکان‌های مناسب احداث پایگاه‌های امداد، تعیین و برنامه‌ریزی تورهای وسایل نقلیه در هر سطح است؛ به طوری که همه‌ی تقاضاها برآورده شوند. این مسئله بر روی گراف کامل و متقارن  $G = (V, A, C)$  تعریف می‌شود. مجموعه‌ی  $V$  شامل پایگاه اصلی (گره صفر)، مجموعه‌ی پایگاه‌های امداد بالقوه‌ی  $S$  شامل  $m$  رأس و مجموعه‌ی نقاط حادثه‌دیده‌ی  $T$  شامل  $n$  رأس است  $(V = \{0\} \cup S \cup T)$ . ماتریس  $C = c_{ij}$  هزینه‌ی طی مسافت از گره  $i$  به گره  $j$ ، ماتریس  $(t_{ij}) = Time$  مدت‌زمان طی مسیر از گره  $i$  به گره  $j$  برای همه‌ی رئوس مجموعه‌ی  $V$  در مجموعه‌ی یال‌های  $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$  را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که نامساوی مثلثی برای اعضای این مجموعه برقرار باشد. در این مقاله، فرض شده است که پایگاه اصلی و پایگاه‌های امداد برپاشده می‌توانند کل مقدار تقاضا را برآورده سازند. یک راه‌حل شدنی شامل زیرمجموعه‌ای از پایگاه‌های امداد برپاشده و یک زیرمجموعه از مسیرهای سطح اول و دوم است. محدودیت‌های زیر باید اعمال گردند: هر نقطه‌ی حادثه‌دیده باید با فقط یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح دوم خدمت‌رسانی شود و هر مرکز پایگاه امداد برپاشده باید فقط با یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح اول تأمین



گردد. کل مقدار کالای تحویل داده شده توسط یک وسیله نقلیه نمی تواند از ظرفیتش تجاوز کند. هر مسیر سطح دوم باید از یک پایگاه امداد برپاشده شروع شود و در همان پایگاه پایان یابد. کل مقدار کالای دریافت شده توسط یک پایگاه امداد باید به طور کامل به متقاضیان تحویل داده شود (ذخیره سازی مجاز نیست). تابع هدف، که کل هزینه سیستم است و شامل هزینه استقرار پایگاه های امداد، هزینه های ثابت وسایل نقلیه استفاده شده و هزینه های مسیرهای سطح اول و سطح دوم، باید حداقل گردد. برای بیان مدل سازی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MILP) مسئله ی مورد تحقیق، ابتدا نمادها و دیگر پارامترهای به کاررفته در مدل تشریح می گردند. برای این مدل سازی از مقاله ی نگوین و همکاران [۱۶] استفاده شده است؛ به این صورت که برای کاربردی کردن مدل سازی برای موضوعیت امداد رسانی، محدودیت های پنجره های زمانی (محدودیت های ۱۴ تا ۱۸) به این مدل سازی افزوده شده اند. با این کار، زمان رسیدن تورهای امداد رسان به نقاط حادثه دیده و امداد رسانی به آنها، اولویت بندی زمانی نقاط حادثه دیده جهت امداد رسانی با توجه به شدت آسیب و محدودیت زمان کل امداد رسانی با در نظر گرفتن نجات افراد حادثه دیده در نظر گرفته می شود. همچنین، تعداد محدودیت ها و زمان حل مثال ها در نرم افزار GAMS کاهش می یابد.

#### مجموعه های استفاده شده در مسئله

- V مجموعه ی کل رئوس برابر با  $\{0\} \cup S \cup T$
- S مجموعه ی پایگاه های امداد بالقوه
- T مجموعه ی نقاط حادثه دیده
- A<sub>1</sub> مجموعه ی مسیرهای سطح اول
- A<sub>2</sub> مجموعه ی مسیرهای سطح دوم
- K مجموعه ی وسایل نقلیه ی سطح اول
- L مجموعه ی وسایل نقلیه ی سطح دوم

#### پارامترهای استفاده شده در مسئله

- W<sub>s</sub> ظرفیت پایگاه امداد S
- O<sub>s</sub> هزینه ی استقرار پایگاه امداد S
- d<sub>t</sub> مقدار تقاضای امدادی هر نقطه ی حادثه دیده ی
- Q ظرفیت وسایل نقلیه ی سطح اول
- R ظرفیت وسایل نقلیه ی سطح دوم
- F هزینه ی ثابت استفاده از وسایل نقلیه ی سطح اول
- G هزینه ی ثابت استفاده از وسایل نقلیه ی سطح دوم
- M عددی بسیار بزرگ
- c<sub>ij</sub> هزینه ی طی مسافت از گره به گره
- t<sub>ij</sub> مدت زمان طی مسیر از گره به گره
- es<sub>i</sub> زودترین زمان شروع سرویس به گره
- ls<sub>i</sub> دیرترین زمان شروع سرویس به گره
- st<sub>i</sub> مدت زمان ارائه ی سرویس به گره

#### متغیرهای استفاده شده در مسئله

متغیر باینری  $x_{ij}^k = 1$  اگر وسیله ی نقلیه ی سطح اول  $k$  کمان  $(i, j)$  را پیموده باشد و در غیر این صورت صفر است.

متغیر باینری  $y_{ij}^k = 1$  اگر وسیله ی نقلیه ی سطح دوم  $l$  کمان  $(i, j)$  را پیموده باشد و در غیر این صورت صفر است. متغیر باینری  $z_s = 1$  اگر پایگاه امداد  $s \in S$  برپا شده باشد و در غیر این صورت صفر است. متغیر باینری  $u_{st} = 1$  اگر پایگاه امداد  $s \in S$  به نقطه ی حادثه دیده ی  $t \in T$  خدمت رسانی کرده باشد. متغیر نامنفی  $b_s^k$  که مقدار کالای تحویل داده شده به پایگاه امداد  $s \in S$  با وسیله ی نقلیه ی  $k$  را نشان می دهد. متغیر نامنفی  $TW_i$  زمان رسیدن یک وسیله ی نقلیه به گره  $i \in S \cup T$  را نشان می دهد.

حال با استفاده از تعاریف فوق می توان مسئله ی امداد رسانی دوسطحی نقاط آسیب دیده از بحران را به صورت زیر فرموله کرد:

$$\text{Min } \sum_{s \in S} o_s z_s + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} F x_{0s}^k + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} G y_{st}^l + \sum_{(i,j) \in A_1} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in A_2} \sum_{l \in L} c_{ij} y_{ij}^l \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in S \cup T} \sum_{l \in L} y_{ti}^l = 1, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S \cup T} y_{ji}^j = \sum_{j \in S \cup T} y_{ij}^j, \quad \forall i \in S \cup T, l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} y_{st}^l \leq 1, \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in S \cup T} d_t y_{tj}^l \leq R, \quad \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in T} y_{si}^l + \sum_{i \in S \cup T} y_{it}^l \leq 1 + u_{st}, \quad \forall s \in S, t \in T, l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} u_{st} = 1, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} d_t u_{st} \leq W_s z_s, \quad \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{i \in S \cup \{0\}} \sum_{k \in K} x_{si}^k = z_s, \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{j \in S \cup \{0\}} x_{ji}^k = \sum_{j \in S \cup \{0\}} x_{ij}^k, \quad \forall k \in K, i \in S \cup \{0\} \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} b_s^k = \sum_{t \in T} d_t u_{st}, \quad \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{s \in S} b_s^k \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$b_s^k \leq Q \times \sum_{i \in S \cup \{0\}} x_{si}^k, \quad \forall s \in S, k \in K \quad (13)$$

$$es_i \leq TW_i \leq ls_i, \quad \forall i \in V \quad (14)$$

$$TW_0 + st_s + t_{0s} - M(1 - x_{0s}^k) \leq TW_s, \quad \forall k \in K, s \in S \quad (15)$$

$$TW_s + st_s + t_{sj} - M(1 - x_{sj}^k) \leq TW_j, \quad .16$$

$$\forall k \in K, s, j \in S$$

$$TW_s + st_s + t_{st} - M(1 - y_{st}^l) \leq TW_t, \quad .17$$

$$\forall l \in K, s \in S, t \in T$$

$$TW_i + st_i + t_{ij} - M(1 - y_{ij}^l) \leq TW_j, \quad .18$$

$$\forall l \in K, i, j \in T$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A_1, k \in K \quad .19$$

$$y_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A_2, l \in L \quad .20$$

$$z_s \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S \quad .21$$

$$u_{st} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, t \in T \quad .22$$

$$TW_i \geq 0, \quad \forall i \in S \cup T \quad .23$$

$$b_s^k \geq 0, \quad \forall s \in S, k \in K \quad .24$$

تابع هدف ۱ شامل هزینه‌های استقرار پایگاه‌های امداد، هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه‌ی سطوح اول و دوم و هزینه‌های مسیریابی هر دو سطح است. محدودیت‌های ۲ تا ۹ مربوط به سطح دوم است. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که همه‌ی نقاط حادثه‌دیده بازدید شوند. محدودیت ۳ تضمین می‌کند که یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح دوم به پایگاه امداد اولیه‌اش برگردد. در محدودیت ۴، هر وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح دومی حداکثر از یک پایگاه امداد حرکت می‌کند. محدودیت ۵ مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح دوم است. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که پایگاه امداد  $s$  به نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی  $t$  خدمت‌رسانی می‌کند ( $u_{st} = 1$ ) اگر یک وسیله‌ی نقلیه‌ی  $l \in L$  وجود داشته باشد که پایگاه امداد  $s$  را ترک کرده و به نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی  $t$  رسیده باشد. همچنین،  $u_{st}$  می‌تواند مساوی یک باشد، حتی اگر هیچ وسیله‌ی نقلیه‌ای از  $s$  به  $t$  نرفته باشد. محدودیت ۷ برای تخصیص هر نقطه‌ی حادثه‌دیده به یک پایگاه امداد به کار می‌رود. محدودیت ۸ بیان می‌دارد که اگر پایگاه امداد  $s$  برپا نشده باشد، آن‌گاه هیچ نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ای به آن تخصیص نمی‌یابد و در غیر این صورت اگر پایگاه امداد  $s$  برپا شده باشد، آن‌گاه کل تقاضای تخصیص یافته به آن نمی‌تواند از ظرفیتش تجاوز کند. محدودیت‌های ۹ تا ۱۳ مربوط به سطح اول‌اند. محدودیت ۹ بیان می‌دارد که هر پایگاه امداد برپا شده باید با یک وسیله‌ی نقلیه‌ی سطح اول بازدید گردد. محدودیت ۱۰ یک سفر پیوسته را برای هر وسیله‌ی نقلیه‌ی به‌کارگرفته‌شده در سطح اول تضمین می‌کند. محدودیت ۱۱ مقدار جریان را در هر پایگاه امداد  $s$  نشان می‌دهد؛ به این صورت که کل مقدار کالای آورده‌شده به پایگاه امداد  $s$  با وسایل نقلیه‌ی سطح اول باید با کل تقاضای تخصیص یافته به

این پایگاه امداد برابر باشد (ذخیره‌سازی مجاز نیست). محدودیت ۱۲ مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح اول است. محدودیت ۱۳ بیان می‌دارد که اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی  $k$  پایگاه امداد  $s$  را بازدید نکرده باشد، مقدار کالای ارائه‌شده با وسیله‌ی نقلیه‌ی  $k$  به پایگاه امداد  $s$  باید صفر باشد. محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۸ محدودیت‌های پنجره‌های زمانی مسئله‌اند. محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۴ متغیرهای تصمیم مسئله را تعریف می‌کنند.

### روش حل مسئله

برای حل این مسئله از هر دو روش دقیق و فراابتکاری در این مقاله استفاده می‌شود. این مسئله یک مسئله‌ی Np-hard است؛ زیرا تعمیمی از مسائل شناخته‌شده‌ی Np-hard مانند مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات دوسطحی<sup>۲۳</sup> (۲E-FLP) مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل‌ونقل دوسطحی<sup>۲۴</sup> (۲E-VRP) و مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی با ظرفیت محدود (CLRP) است [۱۶]. در ابتدا مسئله برای مثال‌های در ابعاد کوچک با نرم‌افزار Gams به صورت دقیق حل می‌شود. از آنجا که این مسئله در حوزه‌ی مسائل Np-hard قرار دارد و با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله روش‌های دقیق جهت حل مسئله مناسب نیستند، برای ابعاد بزرگ‌تر مسئله از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود؛ به این صورت که مسئله‌ی مذکور در نرم‌افزار Matlab کدنویسی شده و سپس حل گردیده است. با مقایسه‌ی جواب‌های به‌دست‌آمده بعد از حل مسئله در ابعاد کوچک با هر دو روش دقیق و فراابتکاری و اینکه جواب‌ها یکسان‌اند، عملکرد الگوریتم حل ارائه‌شده قابل تأیید است.

### الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله‌ی امداد دوسطحی

#### نمایش جواب‌شدنی

برای این مسئله یک جواب‌شدنی در قالب دو سطح است: در سطح اول، پایگاه‌های امداد برپا شده با وسایل نقلیه‌ای که در پایگاه اصلی موجودند، تأمین می‌شوند. در سطح دوم، از طریق وسایل نقلیه‌ای که در پایگاه‌های امداد برپا شده موجودند، به نقاط حادثه‌دیده امداد رسانی می‌شود. برای توضیح بیشتر، مثال زیر را در نظر بگیرید:

فرض کنید در یک منطقه حادثه‌ای رخ داده که در آن منطقه ۸ پایگاه امداد بالقوه و ۸ نقطه‌ی حادثه‌دیده وجود دارد. آرایه‌ی زیر را در نظر بگیرید:

$$[ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 ]$$

تعداد اعضای این آرایه برابر با تعداد پایگاه‌های امداد بالقوه است که از ۱ تا ۸ شماره‌گذاری شده‌اند. نقاط حادثه‌دیده از ۹ تا ۱۶ شماره‌گذاری شده‌اند. پایگاه اصلی امداد نیز با عدد صفر نشان داده می‌شود. اعداد این آرایه در هر تکرار به تصادف شامل اعداد صفر و یک‌اند. عدد صفر به این معنی است که پایگاه مذکور برپا نشده است و عدد یک نشان‌دهنده‌ی این است که پایگاه مذکور برپا شده است. بنابراین، آرایه‌ی بالا نشان می‌دهد که پایگاه‌های شماره‌ی ۲، ۴، ۶ و ۷ برپا شده‌اند. در ادامه، نزدیک‌ترین نقاط حادثه‌دیده به این پایگاه‌ها مشخص می‌شوند و تخصیص می‌یابند. فرض



کنید که نقاط حادثه‌دیده‌ی ۹ و ۱۰ به پایگاه امداد ۲، نقاط ۱۱ و ۱۲ به پایگاه ۴، نقاط ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ به پایگاه ۶ و نقطه‌ی ۱۶ به پایگاه ۷ تخصیص یابند. ترتیب قرار گرفتن پایگاه‌های امداد برپاشده در سطح اول و همچنین ترتیب بازدید نقاط حادثه‌دیده از پایگاه‌های امداد برپاشده، با توجه به تخصیص انجام‌گرفته، به صورت کاملاً تصادفی است؛ به گونه‌ای که تور تشکیل‌شده کمترین هزینه را داشته باشد. بنابراین، یک راه‌حل شدنی اولیه برای این مثال به صورت زیر است:

$$0-2-9-10-2-4-11-12-4-6-13-14-15-6-7-16-7-0$$

### عملگر تقاطع

از این عملگر برای جست‌وجوی محلی در فضای پاسخ استفاده می‌شود. این عملگر انواع مختلفی مانند یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و چندنقطه‌ای دارد. در این مقاله، به منظور تولید دو مسیر جدید از دو مسیر اولیه، از عملگر یک نقطه‌ای استفاده شده است.

فرض کنید OldBase ۱ و OldBase ۲ نشان‌دهنده‌ی والد اول و والد دوم، CrossPoint نقطه‌ی تقاطع، NewBase ۱ و NewBase ۲ فرزند اول و فرزند دوم باشند. فرزند اول از قسمت اول والد اول و قسمت دوم والد دوم و فرزند دوم از قسمت اول والد دوم و قسمت دوم والد اول با توجه به نقطه‌ی تقاطع تشکیل می‌شود؛ مثلاً نحوه‌ی قرارگیری پایگاه‌های امداد در دو مسیر جدید با استفاده از دو مسیر قدیم، با توجه به نقطه‌ی تقاطع، به صورت زیر است. در ادامه، با توجه به نحوه‌ی تخصیص نقاط حادثه‌دیده به پایگاه‌های امداد برپاشده، که در قسمت قبل توضیح داده شد، نقاط تخصیصی داده می‌شوند.

$$\text{CrossPoint} = 4$$

$$\begin{aligned} \text{OldBase1} &= [ \cdot \quad 1 \quad \cdot \quad 1 \quad | \quad \cdot \quad 1 \quad 1 \quad 1 ] \\ \text{OldBase2} &= [ \cdot \quad \cdot \quad 1 \quad \cdot \quad | \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 ] \\ \text{NewBase1} &= [ \cdot \quad 1 \quad \cdot \quad 1 \quad | \quad 1 \quad \cdot \quad 1 \quad 1 ] \\ \text{NewBase2} &= [ \cdot \quad \cdot \quad 1 \quad \cdot \quad | \quad \cdot \quad 1 \quad 1 \quad 1 ] \end{aligned}$$

### عملگر جهش

بعد از اینکه عملگر تقاطع روی پایگاه‌های امداد اولیه (Old Base) صورت گرفت، باید از عملگر جهش بر روی پایگاه‌های امداد جدید تولیدشده (NewBase) به منظور تولید مسیرهای جهش‌یافته استفاده کرد. ابتدا به صورت تصادفی، از آرایه‌های جدید، نمونه‌هایی انتخاب می‌شوند. سپس، برای هر آرایه‌ی جدید، جای دو مقدار به طور تصادفی با هم عوض می‌شود که این امر موجب ایجاد جهش در فضای پاسخ خواهد شد؛ مثلاً دو عدد تصادفی برابر ۲ و ۶ به دست آمده است و این بدان معناست که برای NewBase ۱ جای دو تسهیل ۲ و ۶ با هم جابه‌جا شود و آرایه‌ی جهش‌یافته به وجود آید.

$$\text{NewBase1} = [ \cdot \quad 1 \quad \cdot \quad 1 \quad | \quad \cdot \quad 1 \quad 1 \quad 1 ]$$

آرایه‌ی جهش‌یافته به صورت زیر خواهد بود. حال با توجه به توضیحات قسمت‌های قبل، نقاط حادثه‌دیده به پایگاه‌های امداد برپاشده تخصیص می‌یابند و راه‌حل جهش‌یافته به وجود می‌آید.

$$\text{MutatedBase} = [ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad 1 \quad | \quad 1 \quad 1 \quad 1 ]$$

### عملگر انتخاب

برای تولید نسل جدید، از عملگر انتخاب استفاده می‌شود. نسل جدید همواره شامل تعدادی از مسیرهای برتر نسل قبل، مسیرهای جدید تولیدشده و مسیرهای جهش‌یافته است. این عمل با استفاده از عملگر چرخ<sup>۲۵</sup> رولت صورت می‌پذیرد. درصد مربوط به هر قسمت با توجه به طراحی آزمایش‌ها برای هر مثال به دست آمده است؛ مثلاً برای مثال ۳، ۷۰ درصد جمعیت نسل جدید از عملگر تقاطع، ۲۰ درصد از عملگر جهش و ۱۰ درصد بقیه نیز از جمعیت برتر نسل قبل به وجود آمده‌اند. شبه کد الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده در این مقاله به صورت زیر است:

پارامترهای اولیه‌ی الگوریتم را تعیین کنید.  
جمعیت اولیه را به صورت تصادفی تولید کنید.  
مقدار تابع هدف برای هر یک از جواب‌ها را محاسبه کنید.  
برای  $i=1$  تا تعداد نسل‌ها تکرار کنید.  
برنامه‌ی تورها (به منزله‌ی والدین) را انتخاب کنید.  
تورهای جدید را براساس عملگرهای ادغام و جهش تولید کنید.  
مقدار تابع هدف برای تورهای جدید را محاسبه کنید.  
اعضای نسل جدید را از داخل اعضای نسل قبل و تورهای جدید ایجادشده انتخاب کنید.  
پایان

### استفاده از طراحی آزمایش‌ها برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی تعریف‌شده در این مقاله نرخ جهش، نرخ تقاطع، جمعیت و تعداد تکرارها هستند. برای تعیین اثر تغییر این پارامترها در کیفیت جواب‌ها از طرح آزمایشی تاگوچی استفاده شده است. برای هر یک از عوامل سه سطح در نظر گرفته شده است. نرخ تقاطع ۰٫۷، ۰٫۷۵، ۰٫۸، نرخ جهش ۰٫۱، ۰٫۱۵، ۰٫۲، جمعیت ۴۰، ۵۰، ۶۰ و برای حداکثر تکرارها ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ در نظر گرفته شده است. برای حل هر یک از مسائل تنظیم پارامترها انجام گرفته و در نهایت مسئله با الگوریتم تنظیم شده حل گردیده است؛ مثلاً در جدول ۲ برای مثال ۶، طرح آزمایش تاگوچی دارای ۹ آزمایش بوده که با نرم‌افزار مینی‌تب به دست آمده است. در ستون آخر، جواب الگوریتم ژنتیک به صورت میانگین بعد از ۵ بار تکرار آورده شده است.

با در نظر گرفتن ستون میانگین در نرم‌افزار مینی‌تب، طرح ۲-۲-۳ بهترین طرح معرفی می‌گردد؛ یعنی برای مثال ۶ نرخ تقاطع ۰٫۸، نرخ جهش ۰٫۱۵، تعداد جمعیت ۵۰ و حداکثر تعداد تکرارها برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. با وارد کردن اعداد بالا در الگوریتم ژنتیک مذکور و بعد از ۵ بار اجرا با نرم‌افزار متلب، جواب به صورت میانگین برابر ۱۳۳٫۹۱۲۴ شده است. برای بقیه‌ی مثال‌های CLRP-۲E و CTP نیز آزمایش تاگوچی انجام شده

جدول ۲: نتایج طرح آزمایش تاگوجی برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک مثال ۶ در مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی

شماره‌ی طرح	طرح آزمایش	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	تکرار ۴	تکرار ۵	میانگین
۱	۱-۱-۱-۱	۱۳۵,۷۹۵۴	۱۳۹,۴۵۶۱	۱۳۰,۳۳۱۴	۱۲۹,۹۶۸۶	۱۳۴,۲۶۱۵	۱۳۳,۹۶۲۶
۲	۱-۲-۲-۲	۱۴۱,۸۶۰۴	۱۴۱,۱۴۳۶	۱۴۰,۳۰۱۱	۱۳۸,۷۲۹۲	۱۳۳,۷۷۶۱	۱۳۹,۱۶۲۱
۳	۱-۳-۳-۳	۱۳۶,۰۲۰۶	۱۳۳,۵۵۴۲	۱۳۸,۸۹۶۹	۱۳۶,۸۶۹۵	۱۳۲,۱۵۸۳	۱۳۵,۵۰۰۰
۴	۲-۱-۲-۳	۱۳۴,۶۱۵۶	۱۳۷,۵۰۰۴	۱۳۷,۵۶۱۸	۱۳۷,۱۸۲۷	۱۳۴,۹۴۰۰	۱۳۶,۳۶۰۱
۵	۲-۲-۳-۱	۱۳۶,۰۸۱۶	۱۳۹,۸۰۹۰	۱۳۵,۶۶۵۳	۱۳۶,۱۳۵۳	۱۳۶,۴۰۹۴	۱۳۶,۸۲۰۱
۶	۲-۳-۱-۲	۱۳۷,۲۳۷۴	۱۳۴,۱۹۶۶	۱۳۴,۶۸۵۷	۱۳۹,۵۴۵۰	۱۳۳,۴۹۹۱	۱۳۵,۸۳۲۸
۷	۳-۱-۳-۲	۱۳۷,۱۱۸۰	۱۳۷,۵۸۴۹	۱۳۶,۵۲۴۴	۱۳۶,۵۲۸۵	۱۴۰,۱۹۲۹	۱۳۷,۵۸۹۷
۸	۳-۲-۱-۳	۱۳۴,۸۵۲۱	۱۴۰,۴۶۱۰	۱۳۹,۳۲۴۹	۱۳۱,۴۳۹۷	۱۳۸,۰۸۳۶	۱۳۶,۸۳۲۳
۹	۳-۳-۲-۱	۱۳۸,۳۰۶۴	۱۳۹,۱۶۹۲	۱۲۹,۸۲۳۷	۱۴۰,۶۴۳۷	۱۲۸,۸۸۲۱	۱۳۵,۳۶۵۰

در اینجا، برای درک بهتر مثال‌ها، به تشریح مثال ۲ پرداخته می‌شود. این مثال شامل ۱۰ رأس است که یک رأس مربوط به پایگاه امداد اصلی، ۳ رأس مربوط به پایگاه‌های امداد بالقوه و ۶ رأس مربوط به نقاط حادثه دیده‌اند (۵ رأس آن روستاهای حادثه دیده و یک رأس دیگر شهر آسیب دیده است). در این مثال، از ۳ رأس پایگاه امداد بالقوه، هر ۳ پایگاه برپا شده‌اند و کل هزینه‌ی بهینه‌ی امداد رسانی در این مثال برابر با ۳۶,۴۳۳ واحد شده است. جدول ۴ مشخصات مثال ۲ را نشان می‌دهد.

راه حل ترسیمی این مثال در تصویر ۱ نشان داده شده است؛ همچنین، ترتیب ویزیت شدن گره‌ها و زمان رسیدن وسایل نقلیه‌ی امدادی به گره‌ها در تور با استفاده از نرم‌افزار Gams در جدول ۵ آمده است.

در اینجا، برای درک بهتر اهمیت این مسئله، مسائل مسیریابی-مکان‌یابی وسایل حمل و نقل با ظرفیت محدود (CLRP) و تور پوششی (CTP) در موقعیت امداد رسانی بیان و مثال‌های قبل برای این مسائل نیز حل و جواب‌ها با هم مقایسه می‌شوند.

#### مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی وسایل حمل و نقل ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت در موقعیت امداد رسانی

مسائل مسیریابی-مکان‌یابی وسایل حمل و نقل با پنجره‌های زمانی سخت<sup>۲۶</sup> (CLRPHTW) جزء مجموعه مسائل بهینه‌سازی‌اند که در آن‌ها دو نوع گره وجود دارد: گره‌های نوع اول، که مربوط به ایستگاه‌های بالقوه است، و گره‌های نوع دوم، که مربوط به متقاضیان است. در این نوع مسائل، مجموعه‌ای از ایستگاه‌های بالقوه، یک ناوگان از وسایل نقلیه‌ی مشخص با ظرفیت محدود و یک مجموعه از متقاضیان با مقدار تقاضای مشخص وجود دارد. مسئله‌ی LRP کلاسیک شامل افتتاح یک زیرمجموعه از ایستگاه‌ها، تخصیص متقاضیان به آن‌ها و مشخص کردن مسیر وسایل نقلیه است؛ به طوری که کل هزینه، که شامل

و نتایج در جداول قبل اعمال شده‌اند. لازم است یادآوری شود که مثال‌های LRP از طریق نرم‌افزار Gams به طور دقیق حل گردیده‌اند.

#### مثال‌های عددی

در ادامه، ۱۰ مثال برای مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی در اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. برای همه‌ی مثال‌ها فرض شده است که هزینه‌ی ثابت حمل با وسایل نقلیه‌ی سطح اول برابر با ۱۰ واحد ( $F=10$ ) و برای وسایل نقلیه‌ی سطح دوم برابر با یک واحد ( $G=1$ ) است. همچنین،  $Q$  ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح اول و  $R$  ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح دوم را نشان می‌دهد. راه حل بهینه‌ی این مثال در تصویر ۱ نشان داده شده است. در ابتدا، برای ۷ مثال اول کدنویسی در نرم‌افزار Gams صورت گرفته و جواب‌ها به طور دقیق همراه با زمان حل آمده است. در این مثال‌ها، برای ساده‌سازی، پنجره‌ی زمانی مربوط به پایگاه‌های امداد و متقاضیان امداد به صورت  $[0,100]$  در نظر گرفته شده است. در ادامه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای ۷ مثال اول در نرم‌افزار متلب کدنویسی صورت گرفته و مثال‌ها حل شده و زمان حل آن‌ها نیز آمده است. در ادامه، برای جواب‌های به دست آمده از دوروش دقیق و فراابتکاری با استفاده از آزمون  $t$  زوجی در سطح معناداری ۹۵ درصد مقایسه‌ای انجام شد و مقدار  $p\text{-value} = 0.947$  نشان می‌دهد که دوروش تفاوت معناداری ندارند. نتایج در تصویر شماره‌ی ۲ ارائه شده است. نتیجه‌ی حاصل شده کارایی الگوریتم ژنتیک را تأیید می‌کند و می‌توان از آن در جهت حل مسائل در ابعاد بزرگ‌تر بهره برد. از آنجاکه برای مثال‌های با ابعاد بزرگ‌تر زمان حل به شدت افزایش می‌یابد، این مثال‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده‌اند.

شایان ذکر است که انجام همه‌ی محاسبات در کامپیوتری با مشخصات  $i5$  Intel Core،  $4\text{GB}$  RAM،  $4\text{GHz}$  CPU و  $4\text{GB}$  انجام گرفته است. نتایج در جدول ۳ مشاهده می‌شوند.

Difference =  $\mu (C1) - \mu (C2)$   
 Estimate for difference: -1.6  
 95% CI for difference: (-51.6; 48.5)  
 T-Test of difference = 0 (vs  $\neq$ ): T-Value = -0.07 P-Value = 0.947 DF = 12  
 Both use Pooled StDev = 42.9369

تصویر ۲: نتیجه‌ی مقایسه‌ی دوروش دقیق و فراابتکاری در نرم‌افزار مینی‌تب

جدول ۳: حل مثال‌های امداد رسانی دوسطحی با استفاده از نرم‌افزار Gams و الگوریتم ژنتیک

شماره ی مثال	مشخصات مسئله ی امداد رسانی دوسطحی	Gams	زمان حل Gams با	الگوریتم ژنتیک	زمان حل با ژنتیک	GAP
۱	$n = 7,  S  = 2,  T  = 4, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۴۷,۸۲۶	۰	۴۷,۸۲۶	۰,۱۴۶	۰
۲	$n = 10,  S  = 3,  T  = 6, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۳۶,۴۳۳	۵۰	۳۶,۴۳۳	۸,۵۶۱	۰
۳	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۹۳,۶۸۸	۲۵۰	۹۳,۶۸۸	۱۲۰,۷۸	۰
۴	$n = 13,  S  = 5,  T  = 7, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۹۲,۲۳۲	۲۵۳	۹۲,۲۳۲	۱۹۰,۵۴	۰
۵	$n = 16,  S  = 7,  T  = 8, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۱۰۳,۳۱۰	۶۲۶	۱۰۳,۳۱۰	۲۳۰,۴۶۵	۰,۰۲۱
۶	$n = 20,  S  = 7,  T  = 12, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۱۲۸,۹۳۳	۱۰۱۷	۱۲۸,۹۳۳	۲۶۰,۹۹۸	۰,۰۳۹
۷	$n = 25,  S  = 8,  T  = 16, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	۱۵۶,۱۸۸	۲۹۴۵	۱۵۶,۱۸۸	۲۷۰,۷۰۰	۰,۰۲۵
۸	$n = 35,  S  = 8,  T  = 26, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	-	-	-	۴۰۰,۵۶	-
۹	$n = 45,  S  = 9,  T  = 35, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	-	-	-	۶۰۰,۵۹۹	-
۱۰	$n = 55,  S  = 10,  T  = 44, Q = 20, R = 10, F = 10, G = 1$	-	-	-	۷۳۰,۹۴۹	-

جدول ۴: مشخصات مثال ۲ تولید شده برای مسئله ی ۲E-CRLRPHTW

نقاط	مختصات مکانی		نوع گره	نوع مرکز	زمان سرویس	مقدار تقاضا	پنجره ی زمانی	
	X	Y					ES	LS
۰	۱۳	۱	ایستگاه اصلی	سالم			۰	۰
۱	۱۲	۱۳	پایگاه امداد	سالم	۱		۰	۱۰۰
۲	۵	۸	پایگاه امداد	سالم	۲		۰	۱۰۰
۳	۱۶	۹	پایگاه امداد	سالم	۱		۰	۱۰۰
۴	۲۱	۱۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۵	۱۷	۱۷	پایگاه امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰
۶	۹	۱۶	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۷	۴	۱۱	متقاضی امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰
۸	۱۲	۱۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۹	۳	۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰

جدول ۵: راه حل مثال ۲ تولید شده برای مسئله ی ۲E-CRLRPHTW به همراه زمان‌ها

گره	۰	۳	۴	۵	۳	۱	۶	۸	۱	۲	۹	۷	۲	۰
زمان رسیدن به گره	۰	۹۰۴۴	۱۹۹۷۸	۲۵۰۹۷۸	۹۵۴۴	۱۶۰۲۰۱	۲۱۴۴۳	۲۶۰۶۰	۱۶۰۲۰۱	۲۵۰۹۷۸	۲۱۰۳۹	۳۴۱۶۲	۲۵۰۹۷۸	۲۶۰۶۰

اگر هدف بازدید مستقیم تمامی نقاط حادثه دیده از ایستگاه با وسایل نقلیه باشد، باید به مسئله ی LRP پرداخته شود. در مثال ۲ قبل، اگر همه ی نقاط حادثه دیده مستقیماً با وسایل حمل و نقل قابل دسترسی از ایستگاه باشند، آن‌گاه این مسئله به یک مسئله ی LRP با ۷ رأس تبدیل می‌شود که یک رأس آن ایستگاه ( $D=1$ ) و ۶ رأس دیگر شامل نقاط حادثه دیده ( $T=6$ ) است و ۳ رأس مربوط به پایگاه امداد در نظر گرفته نمی‌شوند. در این موقعیت، هزینه ی بهینه ی تور تشکیل شده برابر با ۱۲۲,۹۰۷ است که با نرم‌افزار Gams به طور دقیق محاسبه شده است. همچنین، از آنجاکه در این مسئله فقط یک سطح داریم، وسایل نقلیه ای که

هزینه ی بازگشایی ایستگاه‌ها، هزینه های ثابت وسایل نقلیه ی به کارگرفته شده و کل هزینه ی مسیریابی‌ها می‌شود، حداقل گردد. ظرفیت ایستگاه‌ها یا محدود است و یا نامحدود. هر وسیله ی نقلیه می‌تواند فقط یک مسیر را بپیماید [۲۲]. برای یکسان سازی مسئله ی تعریف شده در این مقاله فرض شده است که فقط یک ایستگاه وجود دارد. هدف این مسئله شامل بهینه سازی توزیع کالا از ایستگاه به مجموعه ای از نقاط حادثه دیده با تقاضای مشخص و تعداد معینی از وسایل نقلیه ی با ظرفیت ثابت است. در این مسئله، کالا از ایستگاه با وسایل نقلیه مستقیماً به متقاضیان تحویل داده می‌شود. برای مطالعه ی بیشتر ← [۲۲].

جدول ۶: مشخصات مثال ۲ تولیدشده برای مسئله ی CLRPTW یک سطحی

نقاط	مختصات مکانی		نوع گره	نوع مرکز	زمان سرویس	مقدار تقاضا	بجریه ی زمانی	
	X	Y					ES	LS
۰	۱۳	۱	ایستگاه اصلی	سالم			۰	۰
۱	۲۱	۱۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۲	۱۷	۱۷	پایگاه امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰
۳	۹	۱۶	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۴	۴	۱۱	متقاضی امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰
۵	۱۲	۱۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۲	۱	۰	۱۰۰
۶	۳	۷	متقاضی امداد	آسیب دیده	۱	۱	۰	۱۰۰

دریافت خدمات امدادرسانی مراجعه کنند؛ بنابراین، هزینه ای بدین جهت در مدل در نظر گرفته شده است. در این مقاله، سه نوع هزینه وجود دارد: یکی هزینه ی ثابت استفاده از وسایل نقلیه جهت پیمودن تور است که، با توجه به اینکه امدادرسانی از ایستگاه اصلی صورت می گیرد، این وسایل نقلیه همان وسایل سطح اول مسئله ی امدادرسانی دوسطحی اند. هزینه ی دوم مربوط به پیاده روی افراد از نقاط حادثه دیده تا مرکز امداد به صورت رفت و برگشت است که باید در نظر گرفته شود و هزینه ی سوم فاصله ی بین شهرها (پایگاه های امداد) در تور است که باید پیموده شوند. جدول ۷ مشخصات مثال ۲ را در این حالت نشان می دهد.

تصویر ۴ حل این مثال را در حالتی که به صورت تور پوششی باشد نشان می دهد. هزینه ی بهینه ی تور تشکیل شده در این حالت برابر با ۱۴۱,۷۸۵۸ است.

در ادامه، برای ۱۰ مثال بیان شده در جدول ۸ مسائل ۲E- CTP و CRLRPHTW و LRPHTW و CTP حل گردیده که به اختصار ۲E-LRP و LRP و CTP بیان شده و نتایج آن ها با هم مقایسه می شوند. از جدول ۸ و تصویر ۵ مشخص است که ۲E-LRP از CTP و CTP از LRP نتایج بهتری را نشان داده اند.

#### تحلیل حساسیت مسئله ی حمل و نقل دوسطحی

در این قسمت، به تحلیل حساسیت مسئله ی مورد بررسی از نظر پارامترهای مؤثر مسئله پرداخته می شود.

#### تحلیل حساسیت از نظر ظرفیت و هزینه ی وسایل حمل و نقل

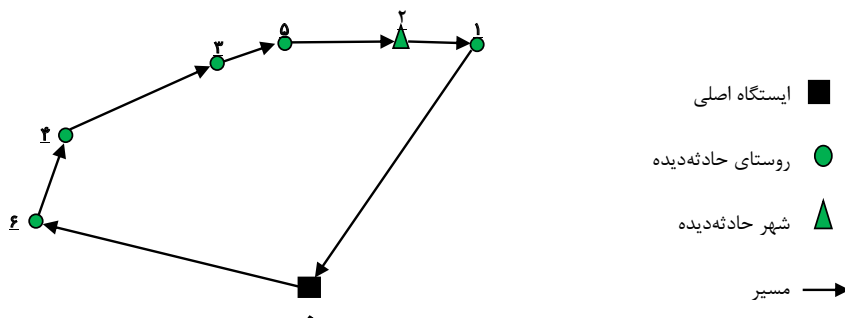
در اینجا، به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت و هزینه ی مربوط به وسایل نقلیه ی سطح دوم پرداخته می شود. فرض می شود که هزینه ی ثابت استفاده از وسایل حمل و نقل سطح

در این مسئله به کار می روند وسایل نقلیه ای هستند که در ایستگاه اصلی موجودند؛ بنابراین، وسایل نقلیه ی مورد استفاده در این مسئله همان هایی هستند که در سطح اول مسئله ی ۲E-CLRP به کار رفته اند. جدول ۶ مشخصات مثال ۲ را در این حالت نشان می دهد.

تصویر ۳ مسئله ی CLRPTW حاصل شده از مثال ۲ و تور به دست آمده با نرم افزار GAMS را نشان می دهد.

#### مسئله ی تور پوششی در موقعیت امدادرسانی

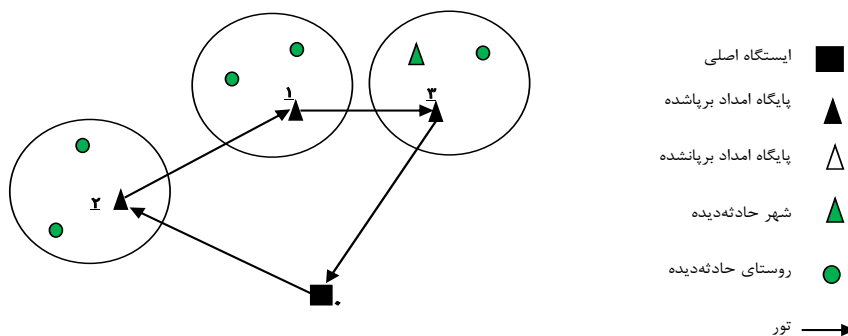
گاهی به علت محدودیت امکانات، هزینه، زمان و ... امکان اینکه گروه های امداد رسان همه ی نقاط حادثه دیده را بازدید کنند ممکن نیست و در عوض مردم حادثه دیده نیاز دارند که برای دستیابی به کالاهای اساسی به مراکز امدادرسانی مراجعه کنند. مراکز امدادرسانی باید در یک فاصله ی قابل دسترسی (فاصله ی پوششی) برای مردم حادثه دیده قرار داشته باشند؛ بنابراین، در این وضعیت، از روش مسئله ی تور پوششی استفاده می شود [۲۳]. در مسئله ی تور پوششی بیان شده در این مقاله، تعدادی شهر و روستا وجود دارد که در اوضاع بحرانی بعد از وقوع حادثه قرار دارند. از آنجا که هدف امدادرسانی به نقاط حادثه دیده (شهرها و روستاهای حادثه دیده) به واسطه ی تجهیز برخی شهرها از طریق ایستگاه امداد اصلی و ایجاد پایگاه های امدادرسانی در این شهرهاست، بر اساس تعریف مسئله ی تور پوششی، تعداد شهرهایی که می توانند در تور قرار گیرند آزاد در نظر گرفته می شود و فقط ایستگاه امداد اصلی است که باید در تور قرار گیرد. اهالی نقاط حادثه دیده مستقیماً مورد بازدید گروه های امداد رسان قرار نمی گیرند و این گروه ها در شهرها و در پایگاه های امداد مستقرند و اهالی این نقاط باید به آن شهری که تخصیص یافته اند برای



تصویر ۳: راه حل ترسیمی مسئله ی LRP یک سطحی مرتبط با مسئله ی امدادرسانی دوسطحی مثال ۲ با  $|D|=1, |T|=6$

جدول ۷: مشخصات مثال ۲ تولیدشده برای مسئله CTP

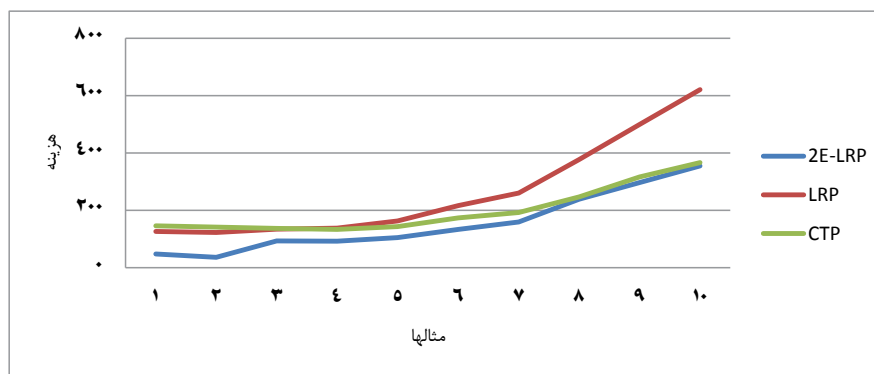
نقاط	مختصات مکانی		نوع گره	نوع مرکز	زمان سرویس	پنجره زمانی	
	X	Y				ES	LS
۰	۱۳	۱	ایستگاه اصلی	سالم		۰	۰
۱	۱۲	۱۳	پایگاه امداد	سالم	۱	۰	۱۰۰
۲	۵	۸	پایگاه امداد	سالم	۲	۰	۱۰۰
۳	۱۶	۹	پایگاه امداد	سالم	۱	۰	۱۰۰



تصویر ۴: راه حل تریبیمی مسئله CTP مرتبط با مسئله امداد رسانی دوسطحی مثال ۲ با  $|D|=1, |S|=3, |T|=6$

جدول ۸: نتایج حل مسائل LRP، ۲E-LRP و CTP در حالت امداد رسانی

CTP	LRP	۲E-LRP	مشخصات مسئله	مثال
۱۴۵.۸۲۷۶	۱۲۶.۱۴۲	۴۷.۸۲۶	$n = 7,  S  = 2,  T  = 4, F = 10, G = 1$	مثال ۱
۱۴۱.۷۸۵۸	۱۲۲.۹۰۷	۳۶.۴۳۳	$n = 10,  S  = 3,  T  = 6, F = 10, G = 1$	مثال ۲
۱۳۶.۸۱۹۴	۱۳۴.۵۶۴	۹۳.۶۸۸	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, F = 10, G = 1$	مثال ۳
۱۳۳.۷۹۶۴	۱۳۸.۰۲۹	۹۲.۲۳۲	$n = 13,  S  = 5,  T  = 7, F = 10, G = 1$	مثال ۴
۱۴۳.۲۳۶۹	۱۶۲.۹۱۰	۱۰۵.۴۹۵۴	$n = 16,  S  = 7,  T  = 8, F = 10, G = 1$	مثال ۵
۱۷۳.۸۹۷۶	۲۱۶.۲۷۸	۱۳۳.۹۱۲۴	$n = 20,  S  = 7,  T  = 12, F = 10, G = 1$	مثال ۶
۱۹۲.۱۶۶۴	۲۶۰.۲۴۷	۱۵۹.۹۰۸۹	$n = 25,  S  = 8,  T  = 16, F = 10, G = 1$	مثال ۷
۲۴۷.۳۲۱۹	۳۷۷.۲۴۵	۲۳۸.۷۶۵۳	$n = 35,  S  = 8,  T  = 26, F = 10, G = 1$	مثال ۸
۳۱۶.۱۸۳	۴۹۹.۸۱۸	۲۹۷.۱۷۲	$n = 45,  S  = 9,  T  = 35, F = 10, G = 1$	مثال ۹
۳۶۶.۴۷۷۹	۶۲۰.۴۳۹	۳۵۵.۳۴۶۰	$n = 55,  S  = 10,  T  = 44, F = 10, G = 1$	مثال ۱۰



تصویر ۵: هزینه‌ی مربوط به مثال‌های حل‌شده برای مسائل ۲E-LRP و LRP و CTP

دوم بسیار کوچک و ظرفیت این وسایل نیز در هر مرحله کاهش یابد. این تحلیل حساسیت برای مثال ۳ انجام گرفته است. با این وضع، مسئله‌ی امدادرسانی دوسطحی مثال ۳ در هر مرحله حل شده و جواب‌ها در جدول ۹ آمده‌اند. لازم است یادآوری شود که  $Q$  ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح اول و  $R$  ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح دوم است. همان‌گونه که از جدول و تصویر استنتاج می‌شود، با کاهش ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح دوم، مسئله‌ی امدادرسانی دوسطحی به مسئله‌ی تور پوششی در موقعیت امدادرسانی همگرا می‌شود.

#### تحلیل حساسیت از نظر ظرفیت وسایل نقلیه و ظرفیت پایگاه‌های امدادرسانی

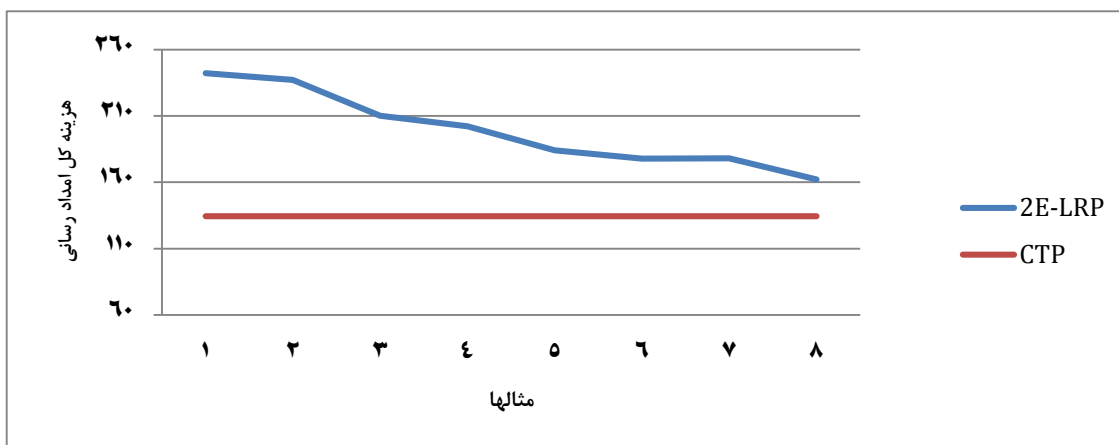
در این قسمت، به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح دوم و ظرفیت پایگاه‌های امدادرسانی پرداخته می‌شود. واضح است که هر چقدر پایگاه‌های امداد با ظرفیت بیشتری برپا شوند، به تعداد پایگاه‌های کمتری نیاز است و در این حالت باید از وسایل نقلیه‌ی بزرگ‌تر و با ظرفیت بیشتری برای این پایگاه‌ها در سطح دوم استفاده کرد. بر اساس تصویر ۷، مشخص است که به طور کلی، با افزایش پارامترهای مذکور، مسائل LRP-2E و LRP به هم نزدیک می‌شوند.

#### تحلیل حساسیت از نظر ظرفیت و تعداد پایگاه‌های امداد برپاشده و تأثیر آن در امدادرسانی

در این قسمت، به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت و تعداد پایگاه‌های امدادرسانی برپاشده و ظرفیت وسایل حمل و نقل موجود در آن پایگاه‌ها و تأثیر آن در سرعت امدادرسانی به نقاط حادثه‌دیده پرداخته می‌شود. واضح است که هر پایگاه امدادی که برپا می‌شود دارای یک هزینه جهت برپا شدن است. از طرفی نیز، در امدادرسانی به نقاط حادثه‌دیده، مدت زمانی در پایگاه‌های امداد جهت تخلیه‌ی مواد امدادی از وسایل نقلیه‌ی سطح اول و بارگیری آن‌ها در وسایل نقلیه‌ی سطح دوم تلف می‌شود که از مدت زمان اختصاص یافته به نقاط حادثه‌دیده برای امدادرسانی بیشتر است؛ از این رو، می‌توان با یک برنامه‌ریزی درست و پیش‌بینی این موارد سرعت امدادرسانی را بالا برد و جان افراد حادثه‌دیده‌ی بیشتری را نجات داد؛ لذا این تحلیل حساسیت برای مثال شماره‌ی ۳ از امدادرسانی دوسطحی انجام گرفته است. در هر مرحله، ظرفیت پایگاه‌ها بالا رفته و بالتبع از وسایل نقلیه‌ی با ظرفیت حمل بیشتری که هزینه‌ی حمل بیشتری نیز دارند، استفاده شده است. ظرفیت وسایل حمل سطح اول ۱۵، هزینه‌ی ثابت استفاده از این وسایل نقلیه نیز ۲۰ و هزینه‌ی برپایی پایگاه‌های

جدول ۹: تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت و هزینه‌ی وسایل نقلیه‌ی سطح دوم و مقایسه‌ی آن با مسئله‌ی تور پوششی

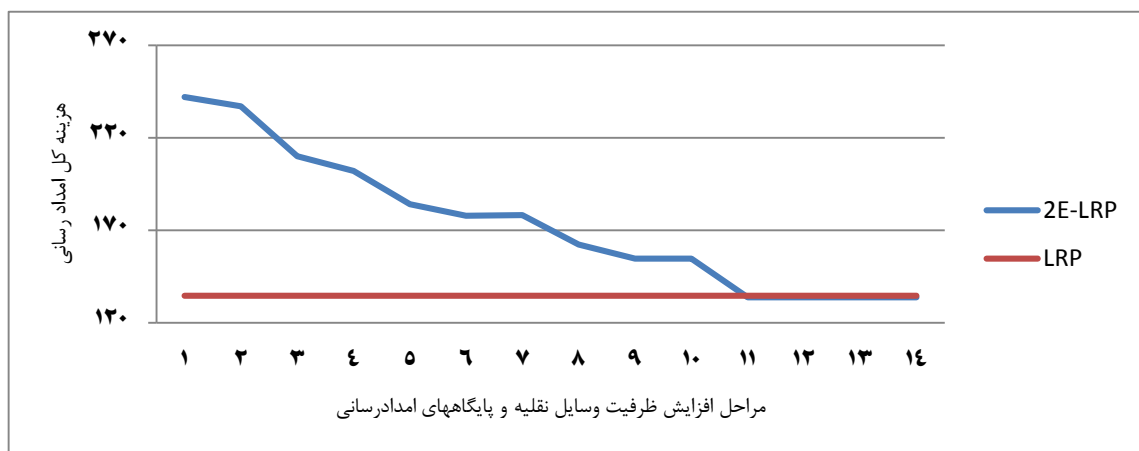
مرحله	مشخصات مسئله	جواب مسئله‌ی 2E-LRP	جواب مسئله‌ی CTP	اختلاف جواب CTP و 2E-LRP
۱	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 10$	۸۵,۶۸۸	۱۳۶,۸۱۹	۵۱,۱۳۱
۲	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 8$	۸۵,۶۸۸	۱۳۶,۸۱۹	۵۱,۱۳۱
۳	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 6$	۸۹,۱۴۲	۱۳۶,۸۱۹	۴۷,۶۷۷
۴	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 5$	۹۲,۹۰۳	۱۳۶,۸۱۹	۴۳,۹۱۶
۵	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 4$	۹۵,۴۸۲	۱۳۶,۸۱۹	۴۰,۹۷۷
۶	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 3$	۱۰۱,۲۴۵	۱۳۶,۸۱۹	۳۵,۵۷۴
۷	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 2$	۱۱۴,۰۵۴	۱۳۶,۸۱۹	۲۲,۷۶۵
۸	$n = 12,  S  = 4,  T  = 7, Q = 20, R = 1$	۱۳۹,۸۱۹	۱۳۶,۸۱۹	۳



تصویر ۶: تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت و هزینه‌ی وسایل نقلیه‌ی سطح دوم و مقایسه‌ی آن با مسئله‌ی تور پوششی

جدول ۱۰: تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل نقلیه و پایگاه‌های امداد رسانی و مقایسه‌ی آن با مسئله‌ی LRP

مرحله	ظرفیت پایگاه‌ها				ظرفیت وسایل نقلیه‌ی سطح دوم	جواب مسئله‌ی 2E-LRP	جواب مسئله‌ی LRP	اختلاف دو جواب
	اول	دوم	سوم	چهارم				
۱	۲	۲	۲	۲	۱	۲۴۲,۱۲۷	۱۳۴,۵۶۴	۱۰۷,۵۶۳
۲	۲	۲	۳	۲	۱	۲۳۷,۰۸۵	۱۳۴,۵۶۴	۱۰۲,۵۲۱
۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲۱۰,۱۲۸	۱۳۴,۵۶۴	۷۵,۵۶۴
۴	۲	۲	۲	۳	۲	۲۰۲,۱۸۷	۱۳۴,۵۶۴	۶۷,۶۲۳
۵	۲	۳	۳	۲	۳	۱۸۴,۰۴۳	۱۳۴,۵۶۴	۴۹,۴۷۹
۶	۴	۲	۲	۲	۳	۱۷۷,۹۴۰	۱۳۴,۵۶۴	۴۳,۳۷۶
۷	۳	۳	۳	۳	۳	۱۷۸,۱۷۶	۱۳۴,۵۶۴	۴۳,۶۱۲
۸	۴	۴	۴	۴	۴	۱۶۲,۲۳۲	۱۳۴,۵۶۴	۲۷,۶۶۸
۹	۵	۵	۵	۵	۵	۱۵۴,۷۰۶	۱۳۴,۵۶۴	۲۰,۱۴۲
۱۰	۶	۶	۶	۶	۶	۱۵۴,۷۰۶	۱۳۴,۵۶۴	۲۰,۱۴۲
۱۱	۷	۷	۷	۷	۷	۱۳۳,۶۸۸	۱۳۴,۵۶۴	۰,۸۷۶
۱۲	۸	۸	۸	۸	۸	۱۳۳,۶۸۸	۱۳۴,۵۶۴	۰,۸۷۶
۱۳	۹	۹	۹	۹	۹	۱۳۳,۶۸۸	۱۳۴,۵۶۴	۰,۸۷۶
۱۴	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۳۳,۶۸۸	۱۳۴,۵۶۴	۰,۸۷۶



تصویر ۷: تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل نقلیه و پایگاه‌های امداد رسانی و مقایسه‌ی آن با مسئله‌ی LRP

همان‌گونه که از تصویر مشخص است، در مرحله‌ی شماره‌ی ۶، زمان و هزینه کمترین مقدار را دارند؛ بنابراین نقطه‌ی بهینه‌اند.

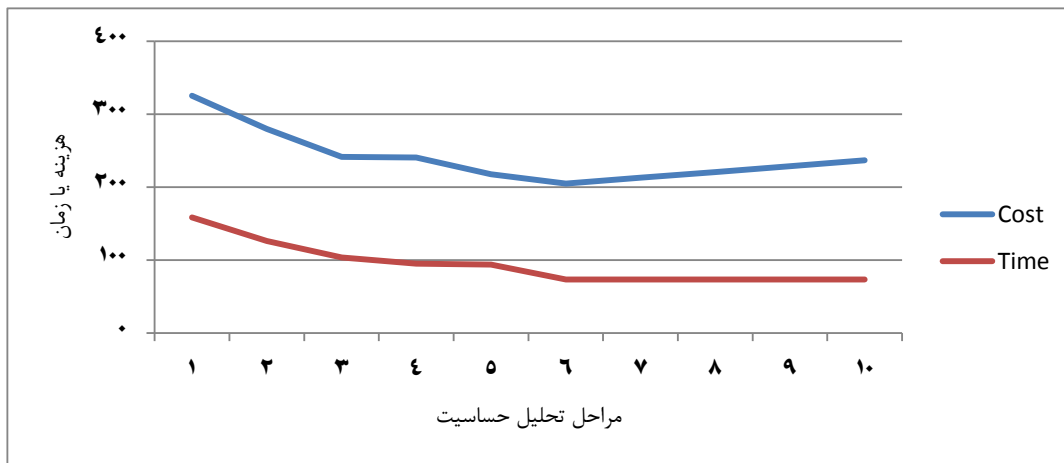
### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات انجام‌شده، به نظر می‌رسد که مدل‌سازی مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی در موقعیت امداد رسانی با در نظر گرفتن محدودیت پنجره‌های زمانی سخت تاکنون انجام نگرفته است، حال آنکه طراحی یک شبکه‌ی امداد رسانی مبتنی بر شبکه‌ی دوسطحی ممکن است سرعت و کیفیت امداد رسانی در وضعیت بحران را به همراه داشته باشد. در این تحقیق، در ابتدا مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی تعریف و سپس مدل‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از حل مسئله با نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی کارا و کاربردی است. این مسئله با مسائل مسیریابی-مکان‌یابی یک‌سطحی و تور پوششی در موقعیت امداد رسانی طی چندین مثال و در موقعیت‌های یکسان مقایسه

امداد ۲۰ واحد در نظر گرفته شده است. بقیه‌ی پارامترها، که متغیر هستند، در جدول زیر نشان داده شده‌اند. نتایج حل هر مرحله در جدول زیر آمده است. با مشاهده‌ی جدول نتیجه می‌شود اینکه تا زمانی که ظرفیت پایگاه‌ها حداکثر برابر با مقدار تقاضای کل افراد حادثه‌دیده باشد، افزایش ظرفیت پایگاه‌ها مجاز است و می‌توان در آن پایگاه‌ها از وسایل حمل‌ونقل متناظر با ظرفیت آن پایگاه‌ها بهره برد و در این صورت امداد رسانی با هزینه‌ی کمتر و سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت. ولی اگر با یک برنامه‌ریزی نادرست، پایگاه‌های امداد با ظرفیت بیشتر از حد نیاز برپا شوند، با آنکه این کار هزینه‌ی امداد رسانی بیشتری در بر دارد، در سرعت امداد رسانی تأثیر چندانی نمی‌گذارد؛ بنابراین، پایگاه‌های امداد باید با ظرفیت بهینه و متناسب با میزان تقاضای افراد حادثه‌دیده برپا گردند که در این مثال این نقطه‌ی بهینه در مرحله‌ی ۶ اتفاق افتاده است. جدول ۱۱ و تصویر ۸ گویای این وقایع‌اند.

جدول ۱۱: تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت و تعداد پایگاه‌های امداد برپاشده و تأثیر آن در امداد رسانی

زمان کل امداد رسانی	هزینه کل امداد رسانی	هزینه ثابت وسایل نقلیه ی سطح دوم	ظرفیت وسایل نقلیه ی سطح دوم	هزینه ی برپایی پایگاه‌ها	ظرفیت پایگاه‌ها				مرحله
					چهارم	سوم	دوم	اول	
۱۵۸.۵۸۴	۳۲۵.۱۲۸	۵	۲	۲۰	۲	۲	۲	۲	۱
۱۲۶.۰۶۱	۲۷۹.۶۹۱	۶	۳	۲۰	۳	۳	۳	۳	۲
۱۰۳.۵۲۷	۲۴۱.۵۶۹	۷	۴	۲۰	۴	۴	۴	۴	۳
۹۵.۰۷۶	۲۴۰.۷۰۶	۸	۵	۲۰	۵	۵	۵	۵	۴
۹۳.۶۷۰	۲۱۷.۷۳۳	۹	۶	۲۰	۶	۶	۶	۶	۵
۷۳.۱۴۴	۲۰۴.۶۸۸	۱۰	۷	۲۰	۷	۷	۷	۷	۶
۷۳.۱۴۴	۲۱۲.۶۸۸	۱۱	۸	۲۰	۸	۸	۸	۸	۷
۷۳.۱۴۴	۲۲۰.۶۸۸	۱۲	۹	۲۰	۹	۹	۹	۹	۸
۷۳.۱۴۴	۲۲۸.۶۸۸	۱۳	۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۹
۷۳.۱۴۴	۲۳۶.۶۸۸	۱۴	۱۱	۲۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰



تصویر ۸: هزینه و سرعت امداد رسانی با توجه به ظرفیت پایگاه‌های امداد برپاشده

### پی‌نوشت

- Two-Echelon Capacitated Location Routing Problem with Hard Time Windows
- relief
- Capacitated Location Routing Problem
- Covering Tour Problem
- Two-Echelon Location Routing Problem
- Tabu Search
- Capacitation Facility Location Problem
- Multi-Depot Vehicle Routing Problem
- soft time windows
- Multi Objective Covering Tour Problem
- $\epsilon$ -constraint
- Morixed Integer Linear Programming
- Variable Neighborhood Search
- Branch-and-Cut
- Adaptive Large Neighborhood Search
- Tow-Echelon Capacitated Location Routing Problem with a Single Depot
- Greendy Randomized Adaptive Search Procedure
- Variable Neighborhood Descent
- Interated Local Search
- Multi-Objective Particle Swarm Optimizaton
- Adapted Multi-Objective Variable Neighborhood Search
- Two-Echelon Capacitated Relief Location Routing Problem with Hard Time
- Two-Echelon Facility Location Problem

گردید و نتیجه‌گیری شد که این مسئله به مراتب هزینه‌ی کمتری دارد و بنابراین کارا تر است. در ادامه، به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل و نقل، ظرفیت پایگاه‌های امداد و تعداد این پایگاه‌ها پرداخته شد و نتیجه‌گیری شد که، با کاهش ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح دوم، مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی به مسئله‌ی تور پوششی همگرا می‌شود؛ همچنین، با افزایش ظرفیت پایگاه‌های امداد و استفاده از وسایل حمل و نقل بزرگ‌تر، این مسئله به مسئله‌ی مسیریابی-مکان‌یابی یک سطحی همگرا می‌شود و نهایتاً، با برپایی پایگاه‌های امداد با ظرفیت بیشتر و استفاده از وسایل حمل و نقل متناظر با آن‌ها، امداد رسانی با هزینه‌ی کمتر و سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت. در نظر گرفتن شعاع‌های پوشش متفاوت برای هر پایگاه امداد با توجه به امکانات موجود در آن‌ها و یا در نظر گرفتن شعاع پوشش تغییرپذیر برای هر پایگاه امداد و سپس حل مسئله در دو سطح به عنوان مطالعات آتی مرتبط پیشنهاد می‌گردد.



Computers and Operations Research, 38, 931-941.

13. Contardo, C.; Cordeau, J. F.; Gendron, B. (2013). A Computational Comparison of Flow Formulations for the Capacitated Location-Routing Problem. *Discrete Optimization*, 10, 263-295.
14. Contardo, C.; Crainic, T. G.; Hemmelmayr, V. (2012). Lower and Upper Bounds for the Two-Echelon Capacitated Location-Routing Problem. *Computers and Operations Research*, 39, 3215-3228.
15. Nguyen, V.-P.; Prins, C.; Prodhon, C. (2012a). Solving the Two-Echelon Location-Routing Problem by a GRASP Reinforced by a Learning Process and Path Relinking. *European Journal of Operational Research*, 216, 113-126.
16. Nguyen, V.-P.; Prins, C.; Prodhon, C. (2012b). A Multi-Start Iterated Local Search with Tabu List and Path Relinking for the Two-Echelon Location-Routing Problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 56-71.
17. Pirkwieser, S.; Raidl, G. R. (2010). Variable Neighborhood Search Coupled with ILP-Based Very Large Neighborhood Searches for the (Periodic) Location-Routing Problem. M. J. Blesa, C. Blum, G. Raidl, A. Roli and M. Sampels Hybrid Metaheuristics: Lecture Notes in Computer Science, Springer, 6373, 174-189.
18. Schwengerer, M.; Pirkwieser, S.; Raidl, G. R. (2012). A Variable Neighborhood Search Approach for the Two-Echelon Location-Routing Problem. J.-K. Hao and M. Middendorf (eds.) *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization: Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 7245, 13-24.
19. Naji-Azimi, Z. et al. (2012). A Covering Tour Approach to the Location of Satellite Distribution Centers to Supply Humanitarian Aid. *European Journal of Operational Research*, 222, 596-605.
20. Govindan, K. et al. (2013). Two-Echelon Multiple-Vehicle Location-Routing Problem with Time Windows for Optimization of Sustainable Supply Chain Network of Perishable Food. *Int. J. Production Economics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>.
21. Wang, H.; Du, L.; Ma, Sh. (2014). Multi-Objective Open Location-Routing Model with Split Delivery for Optimized Relief Distribution in Post-Earthquake. *Transportation Research Part E*, 69, 160-179.
22. Prodhon, C.; Prins, C. (2014). A Survey of Recent Research on Location-Routing Problems. *European Journal of Operational Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>.

24. Two-Echelon Vehicle Routing Problem
25. Roulette Wheel
26. Capacitated Location Routing Problem with Hard Time Windows

## منابع

1. Altay N., Green; III, W.G. (2006). OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, 175, 475-493.
2. Jacobsen, S. K.; Madsen, O. B. G. (1980). A Comparative Study of Heuristics for a Two-Level Routing-Location Problem. *European Journal of Operational Research*, 5, 378-387.
3. Madsen, O. B. G. (1983). Methods for Solving Combined Two Level Location-Routing Problems of Realistic Dimensions. *European Journal of Operational Research*, 12, 295-301.
4. Nagy, G.; Salhi, S. (1996). Nested Heuristics Methods for the Location-Routing Problem. *Journal of Operational Research Society*, 47, 1166-1174.
5. Tuzun, D.; Burke, L. I. (1999). A Two-Phase Tabu Search Approach for the Location-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 116, 87-99.
6. Boccia, M. et al. (2010). A Metaheuristic for a Two Echelon Location-Routing Problem. Festa P. (eds.) *Experimental Algorithms: Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 6049, 288-301.
7. Nikbakhsh, E.; Zegordi, S. H. (2010). A Heuristic Algorithm and a Lower Bound for the Two-Echelon Location-Routing Problem with Soft Time Window Constraints. *SCIENTIA IRANICA*, 17, 36-47.
8. Nolz, P. C. et al. (2010). A Bi-Objective Metaheuristic for Disaster Relief Operation Planning. Coello C. A. et al. in *Multi Objective Nature Inspired Computing*, SCI, 272, 167-187.
9. Crainic, T. G.; Sforza, A.; Sterle, C. (2011a). Location-Routing Models for Two-Echelon Freight Distribution System Design. Technical Report CIRRELT-2011, 40.
10. Crainic, T. G.; Sforza, A.; Sterle, C. (2011b). Tabu Search Heuristic for a Two-Echelon Location-Routing Problem. Technical Report CIRRELT-2011-07.
11. Rath, S.; Gutjahr, W.J. (2011). A Math-Heuristic for the Warehouse Location-Routing Problem in Disaster Relief. *Computers and Operations Research*, doi:10.1016/j.cor.2011.07.016.
12. Belenguer, J. et al. (2011). A Branch-and-Cut Method for the Capacitated Location-Routing Problem.

23. Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F. (1997). The Covering Tour Problem. Operation Research, 45, 568-576.

۲۲

شماره هشتم  
پاییز و زمستان  
۱۳۹۴  
دوفصلنامه  
علمی و پژوهشی



از بهران  
پژوهشی و حل مسئله‌ی امداد رسانی دوسطحی نقاط آسیب‌دیده