توسعه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن تحت شرایط بحران

فریبا فرح بخش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران
رضا توکلی مقدم (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
وحید رضا قضاوتی، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۰۹/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۵/۰٦/۲۰

چکیده

مسأله مسیریابی بهینه برای انتقال مجروحین و کمک‌رسانی امداد از مسائل مهم و اساسی به هنگام وقوع بحران می‌باشد در هنگام وقوع بحران اهمیت دو فاکتور زمان و هزینه برای کمک‌رسانی امداد و نجات مجروحین دو چندان می‌شود. در این مقاله هدف یافتن مسیر بهینه برای رسیدن از یک مرکز امداد و نجات تا یک مرکز بحران است. مدل ریاضی ارائه شده کمینه‌کردن زمان و هزینه را برای دسترسی به مراکز بحران هدف قرار داده است و همچنین مفروضاتی همچون چندانباره بودن، چندمسیره بودن، چندسناریو بودن، تحویل انشعابی، چندمحصولی، ناهمگن بودن وسایل‌نقلیه و پنجره زمانی را به صورت همزمان در نظر گرفته است. با توجه به اینکه در مواقع بحرانی مقادیر برخی از پارامترها از قبیل تقاضا و زمان سفر قطعی نیستند، در این مقاله با در نظرگرفتن مفروضات بیان شده و غیرقطعی در نظرگرفتن پارامترهای تقاضا و زمان سفر مسأله مربوطه به مسأله واقعی نزدیکتر شده است. در صورتیکه بیشتر مسائلی که در این زمینه مطرح شده‌است مفروضات بیان شده را به صورت همزمان مورد بررسی قرار نداده‌اند و پارامترهای ذکرشده (زمان و تقاضا) نیز به صورت قطعی در نظرگرفته شده است. در نهایت برای یافتن جواب‌های دقیق باتوجه به چندهدفه بودن مدل و فازی بودن پارامترهای تقاضا و زمان سفر از روش محدودیت اپسیلون در ابعاد کوچک بهره گرفته شده و در ادامه با توجه به NP-Hard بودن مسأله برای حل آن در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOHS استفاده شده که بر روی ۱۵ مسأله در اندازه‌های مختلف حل شده که نتایج بدست آمده از حل مسائل عددی نشان می‌دهد هر دو الگوریتم توانایی بالایی در تولید جواب‌های مناسب در زمان مناسب را دارند به طوری که برای حل بزرگترین و پیچیده‌ترین مسأله زمانی کمتر از ٤٨٠ ثانیه صرف شده است که با توجه به NP-Hard بودن، غیرقطعی بودن و چندهدفه بودن مدل بسیار مناسب است.

واژه های کلیدی: مسیریابی وسایل‌نقلیه، بحران، لجستیک امدادی، الگوریتم جستجوی هارمونی

۱. مقدمه

بلایای طبیعی رخدادهایی هستند که انسان دخالت مستقیم در وقوع آنها ندارد ولی به علت گستردگی و تاثیر بر منابع مادی و انسانی و قطع روند طبیعی حیات، پتانسیل ایجاد بحران‌هایی بزرگ را دارند و برنامه‌ریزی پیش از وقوع حوادث در کاهش قابل توجه مرگ‌ومیر و صدمات ناشی از این حوادث بسیار مهم است. مقوله مدیریت بحران در جهان چه درحوزه مهندسی و چه به عنوان یک مقوله اجتماعی حائز اهمیت است. هر ساله بلایای طبیعی همچون زلزله، سیل، طوفان و غیره تلفات مالی و انسانی زیادی را به دولت-ها و جوامع مختلف وارد می‌کنند و با بروز شریط بحرانی و نتیجتاً کاهش توانمندی‌ها به دلیل تخریب زیرساخت‌ها، تقاضا برای خدمات و کالاهای لجستیکی افزایش می‌یابد. امروزه زمان و هزینه درصورت‌های مختلف مانند مالی، مسافت و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری که در زمینه‌های مختلف دانشمندان سعی در بهینه‌سازی زمان و هزینه دارند حال اگر در شرایط بحران مانند زلزله، جنگ و غیره که دائماً زندگی انسان را تهدید می‌کنند قرار بگیریم اهمیت دو فاکتور زمان و هزینه (نه صرفا مالی) برای کمک-رسانی و امداد و نجات مجروحین و مصدومین دو چندان می‌شود. نکته قابل توجه این است که اخیراً این موضوع در حوزه بحران بیشتر مورد توجه واقع شده است چرا که مسیریابی تجهیزات به هنگام بروز بحران می‌تواند بسیاری از عواقب ناشی از بحران‌ها را کاهش دهد. در نتیجه مطالعه مسأله مسیریابی در حوزه بحران بسیارحائز اهمیت می‌باشد. مراکز امدادرسانی به عنوان اساسی‌ترین و مهم‌ترین موسسات درمانی درهنگام حادثه، باید قبل از وقوع حوادث از آمادگی لازم و کافی برخوردار بوده تا بتوانند در هنگام رویارویی با بحران، پاسخگویی صحیح و سریع به حادثه را تضمین نمایند یکی از مهم‌ترین استراتژی‌ها جهت بهبود عملکرد در هنگام وقوع بحران اینست که بتوانیم کالاهای امدادی را به افراد آسیب دیده رسانده و مجروحان را در کمترین زمان ممکن از محل حادثه به مراکز امداد منتقل نمائیم. و همچنین با توجه به بحث عدم‌قطعیت در تقاضای ایجاد شده برای کالا در هر منطقه و همچنین خروج مجروحان در شرایط بحران این مسأله که چگونه امدادرسانی کنیم تا فاکتور زمان و هزینه کاهش پیدا کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این مقاله ارائه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه جهت کمینه‌سازی زمان طی شده و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل از یک مرکز امداد و نجات تا یک مرکز بحران می‌باشد. در ادامه این مقاله، در بخش ۲ تاریخچه مهم‌ترین کارهای مرتبط در حوزه مسائل مسیریابی وسایل‌نقلیه در شرایط بحران بیان خواهد شد. در بخش ۳ جزئیات مدل پیشنهادی به تفصیل شرح داده می‌شود و سپس در بخش ٤ جزئیات روش حل مسأله پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۵ نیز نتایج محاسباتی الگوریتم بررسی و مقایسه شده است و در بخش ٦، به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی اختصاص دارد.

۲. مرور ادبیات

مسأله مسیریابی وسایل‌نقلیه[1] (VRP) که یک مسأله بهینه‌سازی ترکیبی است، ابتدا در مقاله‌ای توسط دنتزینگ و رامسر [Dantzig and Ramser, 1959] معرفی شد که تاکنون به صورت وسیعی مورد بررسی قرارگرفته است. تحقیقات متعددی برروی انواع مدل-های VRP انجام گرفته است. با توجه به این که در این مقاله هدف، توسعه مدل مسیریابی وسایل‌نقلیه تحت شرایط بحران است و مدل پیشنهادی این مقاله در حالت چندهدفه و با درنظرگرفتن مهم‌ترین محدودیت‌ها ومفروضات موجود در دنیای واقعی با الگوریتم جستجوی هارمونی حل شده است، هدف از این بخش بررسی خلاصه‌ای از کارهای پیشین و تحقیقات صورت گرفته درحوزه مسیریابی وسایل‌نقلیه در شرایط بحران می‌باشد.

برکون و همکاران [Berkoune et. al., 2012] مسأله پیچیده حمل‌ونقل چندمحصولی، چندانباری و چندوسیله‌ای در عملیات پاسخگویی حادثه را مطالعه کردند آنها یک مدل ریاضی و یک الگوریتم ژنتیک برای حل نمونه‌های در اندازه واقعی را پیشنهاد

دادند. ژنگا و چن و لینگ[Zheng, Chen and Ling, 2015] به بررسی الگوریتم‌های تکاملی بر روی عملیات امداد در شرایط بحران پرداخته است که برنامه‌ریزی مؤثر و برنامه‌ریزی عملیات‌های امدادی نقش کلیدی در کاهش خسارات در بلایای طبیعی را باز می‌کند.

مایکل و کارن و اسمایلیوتز [Michael, Karen and Smilowitza, 2013] یک روش تقریبی برای ارزیابی مسیریابی امدادرسانی را ارائه نمودند در این مقاله برروی مسأله مسیریابی با در نظر گرفتن مسیرهای مختلف جهت ارزیابی میزان خسارت و نیازهای امدادرسانی تمرکز شده است ومسأله مسیریابی با هدف حداقل‌نمودن مجموع زمان رسیدن به افراد حادثه دیده در نظرگرفته شده است. لوکا تالاریکو و هایجین و سورنسن [Talarico, Haijun and Sorensen, 2014] مسأله مسیریابی آمبولانس در یک سناریو واکنش به بلایای طبیعی که تعداد زیادی از افراد مجروح همزمان نیاز به کمک‌های پزشکی دارند ارائه نمودند در این پژوهش دو مدل ریاضی برای به دست آوردن برنامه‌های مسیر و کم کردن زمان مورد انتظار مجروحین در نظرگرفته شده است. از آنجایی که واکنش به بلایای طبیعی نیازمند راه حل‌های با کیفیت بالا در عرض چند ثانیه می‌باشد در این مقاله از روش فراابتکاری جستجوی محلی بهره گرفته شده است. این رویکرد در حالت عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده و همچنین پارامترهای مختلف از جمله تعداد آمبولانس، بیمارستان‌ها و نوع بیماران و ظرفیت ناوگان نیز در نظرگرفته شده است. نصیری و شیشه گر [Nasiri and Shishehgar, 2014] در این مقاله مسأله مسیریابی در عملیات امدادرسانی با درنظرگرفتن وسایل‌نقلیه ناهمگن و قابلیت اطمینان مسیرها با استفاده از رویکرد MADM در نظرگرفته‌اند که در چنین شرایطی انتخاب مسیرهای قابل‌اعتمادتر موجب می‌گردد تیم نجات عملکرد مؤثرتری داشته باشد علاوه بر این مدل سعی در به حداقل رساندن هزینه کل تکمیلی به سیستم را دارد.

نجفی و عشقی [Najafi and Eshghi, 2013] از مدل چندهدفه، چندحالته، چندکالایی و تصادفی چنددوره‌ای برای مدیریت تدارکات کالا و هم مردم آسیب‌دیده در پاسخ زلزله استفاده کرده‌اند و برای روش حل آن با توجه به توابع هدف از روش سلسله مراتبی استفاده شد و در تابع هدف بالاترین اولویت به ارائه خدمت به مجروحین و بعد از آن حمل‌ونقل کالاهای امدادی و کمترین اولویت هم برای وسایل‌نقلیه در نظر گرفته شد. چن و چو و سو [Chen, Chou and Hsueh, 2008] مسأله مسیریابی دینامیک وسایل حمل‌ونقل برای لجستیک امداد در حوادث طبیعی را توصیف می‌کند. در واقع از آنجائیکه در یک عملیات امداد حادثه، مرکز هماهنگ‌کننده ممکن است از همه اطلاعات برای زمانبندی مسیر در زمان آغاز فرآیند مسیریابی آگاه نباشد و همچنین تقاضاهای برداشت یا تحویل و زمان‌های سفر ممکن است بعد از مسیریابی اولیه‌ای که ساخته شده بود تغییر کند و وقتی هم یک تقاضای جدید اتفاق می‌افتد وظیفه‌ی اصلی مرکز هماهنگی لجستیک اینست که تقاضای جدید را در زمانبندی مسیریابی لحاظ کند. بعلاوه اگر زمان‌های سفر به علت رویداد پیش‌بینی نشده تغییر کرده باشد، به منظور برآورده‌کردن محدودیت‌های پنجره‌زمانی و بدست آوردن هزینه پایین‌تر، مسیرهای زمانبندی شده می‌بایست دوباره براساس موقعیت‌های وسایل‌نقلیه زمانبندی شوند. هدف نهایی در این مدل پیدا کردن یک مجموعه از مسیرهای حمل‌ونقل با حداقل هزینه است که از گره‌های بحرانی یا انبار شروع شده و ملاقات دیگر گره‌های خدمت داده نشده می‌باشد. طالبیان شریف و سالاری [Talebian Sharif and Salari, 2015] به توسعه یک روش جستجو تصادفی تطبیقی برای حل مسأله حمل‌ونقل در شرایط امدادرسانی پرداخته‌اند در این مقاله تقاضا مجموعه‌ای از مشتریان را بر روی برخی از مسیرهای باز با استفاده از تعداد محدودی از وسایل نقلیه واقع در انبار مرکزی تامین می‌گردد و همچنین تقاضا مشتری در هر بازدید برطرف می‌شود عملکرد

الگوریتم به کار رفته در نمونه‌های مختلف بررسی و اثر بخشی آن نیز مشخص شده است.

بزرگی و جبل عاملی [Bozorgi and Jabalameli, 2011] یک شیوه برنامه‌ریزی احتمالی چندهدفه برای لجستیک امداد در شرایط عدم اطمینان توسعه دادند. در این شیوه نه فقط تقاضا بلکه ملزومات و هزینه تدارکات و حمل‌ونقل به عنوان پارامترهای عدم-اطمینان در نظرگرفته می‌شوند. بعلاوه عدم‌اطمینان در مورد مکان-هایی که تقاضای آنها ممکن است افزایش پیدا کند و امکان اینکه بعضی از ملزومات از پیش تعیین شده در مراکز توزیع امداد ممکن است بوسیله حادثه ویران شده باشد درنظرگرفته می‌شود. این مدل تلاش می‌کند تا مجموع هزینه نهایی مورد انتظار و تغییرات هزینه نهایی را حداقل کند. حامدی و حقانی [Hamedi and Haghani, 2012]یک مدل مسیریابی و زمانبندی حمل‌ونقل زنجیره تأمین انسان دوستانه را ارائه دادند. در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی چندهدفه برای تعیین مسیری که هم زمان سفر و هم هزینه قابلیت اطمینان را حداقل می‌کند ارائه می‌شود. مسأله بوسیله معرفی مجموعه‌ای از وزنها به یک مسأله تک‌هدفه تبدیل می‌شود. خروجی الگوریتم مسیریابی و زمانبندی ناوگان حمل‌ونقل کامیون‌های انسان‌دوستانه تحت شبکه حمل‌ونقل می‌باشد. الگوریتم تلاش می-کند تا از تقسیم بخش غیرقابل‌اطمینان مسیر اجتناب کند یعنی در صورتی که قسمتی از مسیر غیرقابل‌اطمینان باشد، حتی در صورت وجود مسیر جایگزین، بعلت سطح ریسکی که در تابع هدف وزن-دار منعکس می‌شود ممکن نیست آن مسیر انتخاب شود بنابراین با زمانبندی مجدد مسأله را حل می‌کند و از این نیز مهم است که زمانبندی مجدد همیشه ارزان نیست زیرا هزینه تأخیر تحویل ملزومات را به مدل اضافه می کند.

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه عدد صحیح خطی برای مسأله موردنظر ارائه شده است. مدل ارائه شده یک مدل چندهدفه برحسب سناریو می‌باشد. تابع هدف اول سعی در کاهش زمان بازدید مشتریان می‌باشد و تابع هدف دوم مسأله قصد دارد هزینه حمل‌ونقل و کمبود را کاهش دهد. این مدل از نوع چندانباره و چندمحصوله بوده و تقاضای مشتریان می‌تواند براساس تحویل چندگانه ارضاء شود. همچنین کمبود مجاز بوده و پنجره‌زمانی از نوع نرم در نظرگرفته شده است. همچنین وسایل‌نقلیه و انبارهای با ظرفیت محدود و غیرهمگن می‌باشند. یکی از این فرضیات این مقاله تعیین نوع پارامتر تقاضا و زمان سفر می‌باشد. از آنجایی که میزان تقاضای مشتریان به هنگام وقوع بحران بالا و نامشخص است، لذا در نظرگرفتن پارامتر تقاضا به صورت فازی منطقی‌تر از فرض آن به صورت قطعی است. از طرفی، بنا به این دلیل که به هنگام بروز بحران زمان رفت از گرهی به گره دیگر مقدارمشخص و معینی ندارد، در نتیجه بهتر است که پارامتر زمان سفر نیز به صورت فازی فرض شود. از طرفی در اکثر مقالات برای همه‌ی انبارها به تعداد مساوی وسایل‌نقلیه با ظرفیت برابر و یکسان در نظرگرفته شده است، درحالیکه درهرانبار، تعداد و ظرفیت وسایل-نقلیه می‌تواند متفاوت باشد. لذا فرض ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل-نقلیه منطقی‌تر است. لذا یکی از فرضیاتی که در این مقاله افزوده شده است، فرض ناهمگن‌بودن وسایل‌نقلیه است. قابل توجه است که در هرانبار تعداد معدودی وسیله‌نقلیه با ظرفیت مشخصی وجود دارد، لذا هروسیله می‌تواند به تعداد معدودی مشتری سرویس ارائه نماید. اما اینکه هرمشتری حداکثر توسط یک وسیله‌نقلیه سرویس-دهی شود یا مجاز باشد که توسط تعدادی وسیله‌نقلیه سرویس‌دهی شود، باید مشخص شود (فرض انشعابی‌بودن) که یکی از فواید آن استفاده کارآمدتر و با صرفه‌تر از وسایل‌نقلیه بوده و از طرفی مسأله به یک مسأله واقعی نزدیک می‌شود. همینطور برای هرمشتری مفهومی به نام پنجره‌های زمانی قابل مطرح شدن است. این مفهوم به معنای مشخص‌بودن زودترین و دیرترین زمان‌های مجاز سرویس‌دهی به مشتریان است. ولیکن در مواقع بحرانی معمولاً

موعد تحویل یا دیرترین زمان مجاز برای تحویل بسیارمهم می-باشد، چرا که تحویل بعد از آن منجر به تأخیرشده و هر لحظه تأخیرمی‌تواند جان بسیاری از انسان‌ها را تهدید نماید. لذا در موارد بحرانی برای موعدتحویل یک پنجره زمانی نرم با حد بالا تعریف می‌شود بدین معنی که تحویل کالا بعد از آن موعد شدنی بوده ولی جریمه‌ای به اندازه مدت زمان تأخیر به تابع هدف اضافه می‌شود. در جدول ۱ نگاهی بر مطالعات پیشین خواهیم داشت

۳. مدلسازی ریاضی

در این بخش مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل پیشنهادی برای مسأله مسیریابی وسایل‌نقلیه ناهمگن تحت شرایط بحران ارائه می‌شود.

۳-۱ مفروضات

۱) وسایل حمل‌ونقل ناهمگن هستند به این معنا که تمام ماشین‌ها دارای شرایطی یکسان نمی‌باشند.
۲) به تمام مشتریان سرویس می‌دهیم.
۳) هر مشتری می تواند در چند مرتبه بازدید شود.
٤) پنجره‌زمانی برای هر مشتری در نظرگرفته شده است، به گونه‌ای که اگر تقاضای هر مشتری در پنجره زمانی از پیش تعیین شده‌ای تأمین نگردد جریمه تأخیر باید پرداخته شود.
۵) تقاضای هر گره (مشتری) می‌تواندبه طور کامل برآورده نشود و به صورت کمبود باشد.
٦) میان گره‌های مختلف مسیرهای مختلف وجود دارد.
۷) مسأله تحت سناریو می‌باشد.

جدول ۱. نگاهی بر مطالعات پیشین

	تابع هدف			مفروضات										روش حل		
مراجع/ سال	کمینه نمودن هزینه	کمینه نمودن تقاضای برآورد نشده	کمینه نمودن زمان پاسخگویی	چند انباری	چند کالایی	تحویل انشعابی	ناوگان ناهمگن	پنجره زمانی	ظرفیت وسیله نقلیه	تقاضا فازی	زمان سفر فازی	تصادفی بودن تقاضا	دقیق	ابتکاری یا فرا ابتکاری
Bozorgi ۲۰۱۱	*	*										*	*	*
Berkoune ۲۰۱۲			*	*	*		*							*
hamedi ۲۰۱۲	*		*				*							*
Michael ۲۰۱۳			*											*
Talarico ۲۰۱۴			*				*		*					*
Nasiri ۲۰۱۴	*						*							*
Talebian ۲۰۱۵			*						*					*
این مقاله	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*

۳-۲ اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

M: تعداد انبارها

N: تعداد نقاط تقاضا

I: مجموعه نقاط تقاضا و دپو $I=\{1, \dots, M+N\}$ که از ۱ تا M مجموعه انبار و از $M+1$ تا $M+N$ مجموعه نقاط تقاضا

i,j: اندیس مربوط به گره های مشتری

K: اندیس وسیله نقلیه $(k=1, \dots, K)$

r: اندیس مسیر $(r=1, \dots, R)$

s: اندیس سناریوها $(s=1, \dots, S)$

p: اندیس محصولات $(p=1, \dots, P)$

Ca_k: ظرفیت حمل وسیله نقلیه k ام

S_p: مقدار موجودی محصول p ام در دپو

dl_{is}: موعد تحویل مشتری i تحت سناریو s ام

$\widetilde{D_{ips}}$: تقاضای محصول p ام از مشتری i ام تحت سناریو s ام

$\widetilde{TT}_{ijrs}$: زمان سفر از مشتری i ام به مشتری j ام از مسیر r ام تحت سناریو s ام

dis_{ijr}: مسافت مشتری i ام به مشتری j ام از مسیر r ام

$\tilde{C}_{ijr}^{k}$: هزینه طی‌کردن یک واحد مسافت مشتری i ام به مشتری j ام از مسیر r ام توسط وسیله نقلیه k ام

$\widetilde{C}_{ips}$: هزینه کمبود یک واحد محصول p ام از مشتری i ام تحت سناریو s ام

X_{ijkrs} {
۱ اگر وسیله‌نقلیه k از گره i به گره j در مسیر r تحت سناریو s سفر کند
۲. در غیر این‌صورت محصول
}

y_{jikps} :مقدار محصول نوع p که توسط وسیله نقلیه k به گره I از انبار j تحت سناریو s حمل می‌شود.

U_{ips}: مقدار تقاضای مقدار محصول نوع p برای مشتری i تحت سناریو s که برآورده نشده است.

T_{iks}: زمان رسیدن وسیله‌نقلیه k به گره i تحت سناریو s

۳-۳- مدل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط بحران

توابع هدف و محدودیت‌های مسأله به قرار زیر است:

$$\text{Min} \sum_{i=M+1}^{M+N}\sum_{k=1}^{K}\sum_{s=1}^{S}\alpha_s T_{iks}$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{N+M}\sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{N+M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{s=1}^{S}\alpha_s \tilde{C}_{ijr}^{k} dis_{ijr} x_{ijkrs} + \sum_{i=1+M}^{M+N}\sum_{p=1}^{P}\sum_{s=1}^{S}\alpha_s \widetilde{C}_{ips} U_{ips}$$

s.t.

$$\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} \le 1 \qquad i = 1, \dots, M+N, j = M+1.., M+N, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S \quad (۱)$$

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} = 0 \qquad j = 1.., M,\ s = 1, \dots, S \quad (۲)$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} \le 1 \qquad i = 1, \dots, M, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} \le 1 \qquad j = M+1.., M+N, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S \quad (٤)$$

$$\sum_{i=1}^{M+N}\sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} \ge 1 \qquad j = M+1.., M+N, j \ne i,\ s = 1, \dots, S \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} = \sum_{p=1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{jpkrs} \qquad j = M+1.., M+N, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S \quad (٦)$$

$$\sum_{i=M+1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{ijkrs} = \sum_{p=M+1}^{M+N}\sum_{r=1}^{R} x_{jpkrs} \qquad j = 1, \dots, M, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{N+M}\sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{N+M} x_{ijkrs} \le N-1 \qquad k = 1, .., K,\ s = 1, \dots, S \quad (۸)$$

$$T_{iks} + \widetilde{TT}_{ijrs} - T_{jks} \le \left(1 - x_{ijkrs}\right).M \qquad i = 1, \dots, M+N, j = M+1.., M+N, j \ne i, k = 1, .., K, \quad (۹)$$

$$r = 1, \dots, R \ , s = 1, \dots, S$$

$$0 \le T_{iks} \le \sum_{j=1}^{M+N} \sum_{r=1}^{R} x_{jikrs} \cdot M \qquad i = (10)$$
$$M+1, \dots, M+N, k = 1, .., K, s1, \dots, S$$

$$T_{iks} \le \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{r=1}^{R} x_{jikrs} \cdot dl_{is} \qquad i = (11)$$
$$M+1, \dots, M+N, k = 1, .., K, s = 1, \dots, S$$

$$S_{jp} \ge \sum_{i=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{K} y_{jikps} \qquad j = (12)$$
$$1, \dots, M, p = 1, \dots, P, s = 1, \dots, S$$

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{K} y_{jikps} = \widetilde{D}_{ips} - U_{ips} \qquad i = (13)$$
$$M+1, \dots, M+N, p = 1, \dots, P, s = 1, \dots, S$$

$$C_k \ge (14)$$
$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{p=1}^{p} \sum_{i=M+1}^{M+N} y_{jikps} \cdot W_{kp} \qquad k = 1, .., K, s = 1, \dots, S$$

$$C_k . \sum_{r=1}^{R} x_{jikrs} \ge (15)$$
$$\sum_{p=1}^{p} y_{jikps} \cdot W_{kp} \qquad j = 1, \dots, M, i = M+1, \dots, M+N, k = 1, .., K, s = 1, \dots,$$

$$y_{irs} - y_{jrs} + N . x_{ijkrs} \le N - 1 \qquad i = (16)$$
$$1, \dots, N+M, j = 1.., N+M, k = 1, .., K, r = 1, \dots, R, s = 1, \dots, S$$

$$T_{iks} = 0 \qquad i = 1, .., M, k = 1, .., K, s1, \dots, S \quad (17)$$

$$y_{jikps} \ge 0 \quad , T_{iks} \ge 0 \, , U_{ips} \ge 0, \qquad i = (18)$$
$$1, \dots, N+M, k = 1, .., K, p = 1, \dots, P, s = 1, \dots, S$$

$$x_{ijkrs} \in \{0,1\}, \qquad i = 1, \dots, N+M, j = (19)$$
$$1.., N+M, k = 1, .., K, r = 1, \dots, R, s = 1, \dots, S$$

تابع هدف اول قصد دارد زمان رسیدن به مشتریان راکاهش دهد. تابع هدف دوم کمینه‌سازی هزینه مسافت طی شده توسط وسایل-نقلیه و هزینه کمبود محصولات را نشان می‌دهد. محدودیت (۱) بیان می‌کند که گره‌ها برای هر ماشین توسط یک مسیر به یکدیگر متصل شوند. محدودیت (۲) بیان می‌کند که هیچ وسیله نقلیه‌ای حق ندارد از انبار مستقیم به انبار برود. محدودیت (۳) بیان می-کندکه هر وسیله تنها یک بار می‌تواند از انبار خارج شود. محدودیت (٤) بیان می‌کند که هر وسیله می‌تواند توسط یک مسیر و تنها به یک گره بعد از گره که انرا بازدید کرد برود. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که هر مشتری می‌تواند توسط چند ماشین بازدید شود. محدودیت‌های (٦) و (۷) وجود توازن بین ورود و خروج گره مشتری و گره‌های انبار برای هرماشین را نشان می‌دهد محدودیت (۸) مربوط به وسایل نقلیه است و این مفهوم را بیان می‌کند که مجموع تعداد گره‌هایی که هر ماشین بازدید می‌کند از تعداد کل گره‌ها کمتر باشد. محدودیت (۹) و (۱۰) زمان رسیدن به گره j را در صورتیکه گره j بعد از گره i باشد، نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) این نکته را بیان می‌کند که زمان رسیدن وسیله نقلیه k به مشتری i باید از دیرترین زمان رسیدن به آن کمتر باشد محدودیت (۱۲) ظرفیت انبارها از هر محصول را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۳) این نکته را بیان می‌کند که اگر تقاضای مشتری برآورده نشد بصورت تقاضای برآورده نشده در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های (١٤) و (۱۵) مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه می-باشد. محدودیت (١٦) برای جلوگیری از ایجاد زیر تور می‌باشد. محدودیت (۱۷) بیان می‌کند که ماشین‌ها در زمان صفر از انبارها خارج می‌شوند. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) حالت های مربوط به متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-٤ دی فازی‌کردن مدل پیشنهادی

فازی بودن مدل به دلیل وجود عدم‌قطعیت در پارامترهایی همچون تقاضا محصول، زمان و هزینه سفر در محدودیت‌های ۱۱،۱۵ و تابع هدف دوم می‌باشد به منظور دی فازی کردن مدل پیشنهادی با ایجاد تغییراتی در ساختار هر یک از محدودیت‌های ۱۱،۱۵ و تابع هدف ۲ تبدیل به مدل قطعی می‌شود. در این مقاله از روشی که خمینز و همکاران [Jiménez et. al., 2007] برای دفازی نمودن پارامترها

آورده بود، استفاده شده است. در ادامه به توضیح این روش پرداخته شده است. با توجه به این مقاله درجه‌ای که نشان می‌دهد عدد فازی a بزرگتر مساوی عدد b است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_M = \begin{cases} 0 & if\ E_2^a - E_1^b < 0 \\ \frac{E_2^a - E_1^a}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_2^b)} & if\ 0 \in [E_1^a - E_2^b, E_2^a - E_1^b]) \\ 1 & if\ E_1^a - E_2^b > 0 \end{cases} \quad (۲۰)$$

به طوریکه $[E_1^a, E_2^b]$ و $[E_1^a, E_2^b]$ فواصل مورد انتظار $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ هستند. اگر $\mu_A(\tilde{a}, \tilde{b}) = 0.5$ باشد دو عدد $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ برابر هستند. وقتی $\mu_A(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$ می گوییم $\tilde{a}$ در درجه α بزرگتر یا مساوی $\tilde{b}$ است و با $\tilde{a} \gg \alpha\tilde{b}$ نشان می‌دهیم.

تعریف: اگر محدودیت به صورت زیر باشد:

$$\tilde{a}_i x \geq \alpha \tilde{b}_i, \quad i = \quad (۲۱)$$

باتوجه به توضیحات بالا می‌توان آن را به صورت زیر نشان داد.

$$\frac{E_2^{a_i x} - E_1^{b_i}}{E_2^{a_i x} - E_1^{a_i x} + E_2^{b_i} - E_1^{b_i}} \geq \alpha \quad \text{OR} \quad [(1-\alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}]x \geq \alpha E_2^{b_i} + (1-\alpha)E_1^{b_i} \quad i = 1, \dots, m \quad (۲۲)$$

برای محدودیت‌های مساوی، محدودیت را به ۲ محدودیت $\geq$ یا $\leq$ تبدیل می‌کنیم و از روش بالا برای دفازی نمودن آن استفاده می‌کنیم.

ساختار مدل قطعی محدودیت ۱۱ و ۱۵ و تابع هدف قطعی ۲ به شکل زیر تغییر بافته است و مابقی محدودیت‌ها بدون تغییر باقی مانده است.

$$min \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{r=1}^{R} \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{k=1}^{K} \sum_{s=1}^{S} \alpha_s \left(\frac{C_{ijr}^1 + 2C_{ijr}^2 + C_{ijr}^3}{4}\right) dis_{ijr} x_{ijkrs} + \sum_{i=1+M}^{M+N} \sum_{p=1}^{P} \sum_{s=1}^{S} \alpha_s \left(\frac{C_{ips}^{11} + 2C_{ijr}^{12} + C_{ips}^{13}}{4}\right) U_{ips} \quad (۲۳)$$

$$T_{iks} + \alpha\left(\frac{TT_{ijrs}^3 + TT_{ijrs}^2}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{TT_{ijrs}^1 + TT_{ijrs}^2}{2}\right) - T_{jks} \leq (1 - x_{ijkrs}).M \quad \forall i = 1, \dots, M+N, j = M+1.., M+N, j \neq i, k = 1, .., K, \ r = 1, \dots, R \ , s = 1, \dots, S \quad (۲۴)$$

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{K} y_{jikps} = \alpha\left(\frac{D_{ips}^3 + D_{ips}^2}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{D_{ips}^1 + D_{ips}^2}{2}\right) - U_{ips} \quad \forall i = M+1, \dots, M+N, p = 1, \dots, P, s = 1, \dots, S \quad (۲۵)$$

٤. روش حل و نتایج عددی

در این مقاله ۱۵ مسأله در اندازه‌های مختلف در نظرگرفته شده که تعداد مشتریان از ۸ تا ۵۰، انبارها از ۲ تا ٤، وسایل‌نقلیه از۲ تا ۱۸، محصولات از ۲ تا ٦ و تعداد سناریوها از ۲ تا ٤ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که مدل پیشنهادی جدید بوده طبق تحقیقات صورت گرفته مسائل نمونه معیاری برای مسأله مطرح شده وجود ندارد و از مقالات ارائه شده در حوزه VRP برای تولید تصادفی مسائل نمونه و سپس حل توسط الگوریتم‌های پیشنهادی بهره برده می‌شود. در این مقاله از پانزده مسأله مطابق جدول ۲ برای تولید جواب‌ها و از جدول ۳ برای تولید پارامترها استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات مسائل حل شده

محصولات	وسایل نقلیه	سناریوها	مشتریان	مراکز انبار	مسأله
۲	۲	۲	۵	۲	۱
۳	۳	۳	۵	۲	۲
۳	۳	۳	۸	۲	۳
۳	۳	۳	۱۰	۲	٤
۳	٤	۳	۱۲	۲	۵
٤	٤	٤	۱۲	۳	٦
۳	۵	۳	۱۵	۳	۷
۳	٦	۳	۲۰	۳	۸
٤	۷	٤	۲۰	۳	۹
٤	۷	۳	۲۵	۳	۱۰
٤	۸	۳	۳۰	۳	۱۱
۵	۹	٤	۳۰	٤	۱۲
۵	۱۲	٤	٤۰	٤	۱۳
٦	۱۵	٤	٤۰	٤	۱٤
٦	۱۸	٤	۵۰	٤	۱۵

جدول۳. توابع توزیع احتمال برای تولید پارامترها

پارامتر	$\mathbf{U(a,b)}$
cak	U(۵۰۰,۹۰۰)
Sip	U(٦۰۰,۹۰۰)
W_{kp}	U(۰,۸,۱,۲)
dlis	U(۷,۲۵)
$\widetilde{D_{ips}}$	U(۷۰,۱۳۰)
$\widetilde{TT}_{ijrs}$	U(۰,۲,۰,۰٤)* disijr
disijr	U(۲۰,۷۰)
$\tilde{C}_{ijr}^{k}$	U(۵,۷)
$\tilde{C}_{ips}$	U(٦۰۰,,۹۰۰)
α_s	U(۱۰,,۱۰)

به منظورحل مسأله دو روش حل دقیق و حل ابتکاری پیشنهاد شده است. در ادامه نیز روش‌های حل پیشنهادی به صورت مبسوط شرح داده شده است.

٤-١ روش محدودیت اپسیلون

این روش اولین بار توسط هیمس و لاسدان و ویسمر [Haimes, Lasdon and Wismer, 1971] در سال ۱۹۷۱ ارائه شد. این روش مبتنی بر تبدیل مسأله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌باشد. به این صورت که تنها یک هدف بهینه می‌شود و مابقی اهداف به عنوان محدودیت در نظرگرفته می‌شوند. در حقیقت این روش یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه می‌باشد که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت، به حل این مسائل می‌پردازد روش اپسیلون محدودیت بدین صورت است که ابتدا یکی از اهداف چندگانه، به عنوان تابع هدف اصلی مسأله بهینه‌سازی انتخاب می‌شود و بقیه توابع هدف ضمن در نظرگرفتن یک حد بالا و پایین برای آنها، به محدودیت‌های مسأله منتقل می-گردند. بدین ترتیب تمامی جواب‌های پارتوی ممکن برای مسأله چندهدفه تولید می‌گردد. فرمت مسأله محدودیت اپسیلون به صورت رابطه ٢٦ می‌باشد :

$$\text{Min } y=f(x)=f_1(x) \quad f_2(\vec{x}) \le \varepsilon_2 \quad \in x,y \qquad (٢٦)$$

$$f_n(\vec{x}) \le \varepsilon_n$$

در این قسمت به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی ٤ مسأله در ابعاد کوچک در نظرگرفته شده است. نتایج حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی با نتایج حاصل از روش ε-constraint مقایسه شد. در روش ε-constraint تعداد ۹ شکست برای تابع هدف قرار داده شده در محدودیت در نظرگرفته شد و در مجموع ۹ نقطه پارتویی برای هر مسأله تولید شد ولی به دلیل NP-hard بودن مسأله، روش ε-constraint قابلیت حل مدل در ابعاد بزرگ را ندارد به همین منظور در ادامه به حل مسأله در ابعاد کوچک خواهیم پرداخت. نتایج حل حاصل از مقایسه روش‌های محدودیت اپسیلون و روشهای NSGA-II[٢] و MOHS[٣] در جداول زیر ارائه شده است. در این جداول دو ستون اول از سمت چپ مشخصات مسأله است و جواب‌های یافت شده توسط روش ε-constraint و زمان حل مسأله به ترتیب در سه ستون بعدی ارائه شده است. در ستون‌های ششم تا هشتم مقادیر مربوط به روش فراابتکاری نشان داده شده است و در دو ستون آخر نیز خطای حاصل از این روش‌های فراابتکاری در هر یک از توابع هدف گزارش شده است. به منظور ارزیابی خطای نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم‌های پیشنهای (RG) به ازای هر تابع هدف، ابتدا بهترین نتیجه بدست آمده (BR) از الگوریتم‌ها در نظرگرفته شد و سپس بهترین جواب هر یک از الگوریتم‌ها (RA) مقایسه شد که این موضوع در رابطه ٢٧ نشان داده شده است.

$$RG = \frac{BR-RA}{BR} \times 100 \qquad (٢٧)$$

همانطور که از جداول ٤ و ٥ مشخص می‌باشد زمان حل لینگو با افزایش سایز مسأله بصورت نمایی افزایش می‌یابد و پس از افزایش کمی در سایز مسأله زمان حل بشدت افزایش می‌یابد در نتیجه برای سایزهای متوسط و بزرگ نمی‌توان از الگوریتم محدودیت اپسیلون برای حل مسأله استفاده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-II در تابع هدف اول و تابع هدف دوم خطای کمتری را از خود نشان می‌دهد و مقدار میانگین خطای یافت شده توسط این الگوریتم به ازای تابع هدف اول کمتر از ٤٪ می‌باشد. وبرای تابع هدف دوم، میانگین خطای یافت شده کمتر ۷٫۵٪ است. همچنین میانگین خطای یافت شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی برای هر دو تابع هدف به ترتیب ۱۷٪ و ٢٦٪ می باشد.

جدول ٤. مقایسه نتایج حل روش‌های NSGA-II و ε-Constraint

خطای (RG)		NSGA-II			ε-Constraint			مسأله
هدف ۲	هدف ۱	زمان	هدف ۲	هدف ۱	زمان	هدف ۲	هدف ۱	
۰,۰۲	۰,۰۵	۱۳,۸۳	۲۲٦۲۳۵,٤۷	۳,۷٦	۲۰	۲۲۱۲٦۳,۲۳	۳,۵۵	۱
۰,۰۳	۰,۱۱	۱۸,۸۱	۳۸۲۸٤٦,۷۵	٤,٤۵	۱۰۳	۳۷۰۲۱۲,۸	٤,۰۲	۲
۰,۰۳	۰,۰٤	٤۵,۷۵	۱۰۷۵۵۷٤,٤۳	۷,۳۳	۹۸۳	۱۰٤٦۷۸۳,۹	۷,۰۲	۳
۰,۰٦	۰,۰۹	۳۰,۵۹	۱۷۸۱۱٤۷,۲٦	۱۰,۰۳	۱۰٦۱۳	۱٦۷۲٤۹۷,۲	۹,۲۳	٤

جدول ۵. مقایسه نتایج حل روش‌های MOHS و ε-CONSTRAINT

خطای (RG)		MOHS			ε-Constraint			مسأله
هدف ۲	هدف ۱	زمان	هدف ۲	هدف ۱	زمان	هدف ۲	هدف ۱	
۰,۲۸	۰,۱۳	۱۶,۱۸	۲۸۲۹۴۹,۵۷	۴	۲۰	۲۲۱۲۶۳,۲۳	۳,۵۵	۱
۰,۲۵	۰,۰۲	۲۳,۸۶	۴۶۱۰۹۸,۵	۴,۱۱	۱۰۳	۳۷۰۲۱۲,۸	۴,۰۲	۲
۰,۰۸	۰,۴۷	۳۰,۲۹	۱۱۳۴۵۳۷,۳۷	۱۰,۳۴	۹۸۳	۱۰۴۶۷۸۳,۹	۷,۰۲	۳
۰,۰۷	۰,۴۲	۵۴,۴۷	۱۷۸۴۶۸۹,۶	۱۳,۱۱	۱۰۶۱۳	۱۶۷۲۴۹۷,۲	۹,۲۳	۴

٤-۲ الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) است که توسط دب و همکاران [Deb et. al., 2002] ارائه شد این الگوریتم یکی از سریع‌ترین و توانمندترین الگوریتم‌های بهینه-سازی است که نسبت به سایر روش‌ها از پیچیدگی عملیاتی کمتری برخوردار بوده و با استفاده از اصل عدم‌تسلط (عدم غلبه‌کردن) و محاسبه فاصله ازدحام نقاط بهینه پارتو را به دست می‌آورد که از گستردگی مطلوبی در حوزه تغییرات توابع اهداف برخوردارند و به طراح، آزادی انتخاب طراحی مورد نظر خود را ازمیان طراحی-های بهینه شده می‌دهد. در NSGA-II، به طور همزمان حفظ نخبه‌گرایی و پراکندگی مد نظر قرارگرفته است. در این روش ابتدا یک جمعیت از فرزندان با استفاده از جمعیت والدین ایجاد می‌شود که اندازه هر دو جمعیت N است. این دو جمعیت با هم ادغام می‌شوند و یک جمعیت با $2N$ عضو را به وجود می‌آورند. این جمعیت با استفاده از مرتب‌سازی نامغلوب دسته‌بندی شده و درنهایت جمعیت جدید شامل بهترین اعضاء تا N عضو به دست می‌آید. به هر جمعیت دسته بندی شده یک جبهه می‌گویند.

٤-۳ الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هماهنگی یک روش فراابتکاری جدید تکاملی بر مبنای فرایند موزیک است که با نسلی از بردارهای حل در قالب حافظه الگوریتم شروع به جستجوی فضای حل مسأله می‌کند و براساس رویکرد احتمالی به سمت فضاهای بهینه حرکت می‌کند. الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) یکی از ساده‌ترین و جدیدترین روشهای فراابتکاری است که در فرایند جستجوی جواب شدنی

بهینه در مسائل بهینه‌سازی، از فرایند نواختن همزمان گروه ارکستر موزیک الهام گرفته شده است. به عبارت دیگر، میان پیدا کردن یک حل بهینه در مسأله پیچیده و فرایند اجرای موزیک تشابه وجود دارد. این روش را اولین بار گیم و کیم و لاگاناتان [Geem, Kim and Loganathan, 2001] ارائه کرد مطابق با منطق این روش فراابتکاری، تلاش برای بدست آوردن هارمونی (هماهنگی) در یک فرآیند موسیقی، مشابه یافتن حل بهینه در مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. روش جستجوی هارمونی همانند ژنتیک جزء روش‌های بهبوددهنده می‌باشد. به عبارت دیگر، با نسلی از بردارهای حل شروع و برای ایجاد نسلهای جدید از فرایند انتخاب استفاده می‌شود، اما برخلاف الگوریتم ژنتیک (که در آن از دو کروموزم برای تولید کروموزوم یا بردار حل جدید استفاده می‌شود) در این روش از همه‌ی بردارهای حل موجود در حافظه برای تولید جواب‌های فالبداهه‌ی جدید استفاده می‌شود. از مزایای این الگوریتم، همگرایی سریع آن به دلیل ساختار مناسب آن است و از معایب آن افتادن در دام محلی به دلیل جستجو با تنوع کم در تکرارهای پایانی الگوریتم است که برای رفع آن از تکنیک فاز شروع دوباره و تغییر در قواعد الگوریتم به خصوص در تکرارهای پایانی استفاده می‌شود. هرنوازنده‌ی موسیقی، گام‌هایی از ابزارهای موسیقی خود را می‌نوازد تا شرایطی بهتر از هماهنگی در ارکستر به وجود آورد. هدف از این فرآیند رسیدن به شرایطی است که هماهنگی کاملی از آواهای موسیقی ایجاد شود که خروجی این هماهنگی کامل آوایی خوش‌آهنگ است که با استانداردهای زیبایی مقایسه می‌گردد. ساختار روش حل در این الگوریتم بدین صورت می‌باشد که هر حل یک هارمونی نامیده شده و با یک بردار N بعدی نمایش داده می‌شود. این الگوریتم سه فاز اصلی دارد:

۱. نسل اولیه (مقداردهی اولیه)
۲. بهبود بردار هارمونی جدید (بداهه سرایی)
۳. به روز کردن حافظه الگوریتم

مطابق با مرحله اول، یک نسل اولیه از بردارهای هارمونی به طور تصادفی ایجاد و در حافظه هارمونی ذخیره می‌گردد. در مرحله دوم یک بردار هارمونی جدید (حل جدید) با استفاده از قواعد در نظرگرفتن حافظه، تطبیق گام و دوباره نسل‌سازی تصادفی از حل‌های موجود در حافظه الگوریتم ایجاد می‌گردد.

گام‌های الگوریتم جستجوی هارمونی عبارتند از:

گام اول: تعیین مقادیر اولیه پارامترهای الگوریتم

گام دوم: تعیین مقادیر ابتدایی حافظه هارمونی

گام سوم: تولید بردار حل جدید (بداهه سازی)

گام چهارم: به روزآوری حافظه هارمونی

گام پنجم: آزمون قاعده‌ی توقف

۱. ابتدا پارامترهای الگوریتم شامل اندازه‌ی حافظه‌ی هارمونی یا تعداد بردارهای حل در حافظه[4]، نرخ در نظر گرفتن هارمونی، نرخ تطبیق گام، فاصله پهنای باند و تعداد بهبودها که شرط توقف روش جستجوی هارمونی است، تعیین می‌گردد.

۲. جمعیتی از بردارهای حل در ماتریس حافظه الگوریتم جستجوی هماهنگی شامل تعداد بردارهای حل در حافظه، بصورت تصادفی ثبت می‌گردد. مؤلفه‌های هر بردار حل باید در محدوده آن باشد.

۳. در این مرحله بردار حل جدید تولید می‌شود. مطابق با شبه کد زیر، به منظور تولید حل جدید، ابتدا مؤلفه اول به دست می‌آید و این کار تا مؤلفه N ام بردارحل تکرار می‌شود. روند ایجاد هر مؤلفه براساس۳ قاعده می‌باشد. قاعده‌ی اول، قاعده‌ی درنظرگرفتن حافظه است. در این قاعده اگر مقدار Rand (مقداری تصادفی بین صفر و یک از تابع توزیع احتمال یکنواخت) از نرخ در نظرگرفتن حافظه‌ی هارمونی کوچکتر باشد، مقدار مؤلفه iام یکی از جواب‌های موجود در حافظه بصورت تصادفی مقداردهی می‌شود. در غیراینصورت مطابق قاعده‌ی سوم (انتخاب تصادفی) مقدار مؤلفه به صورت تصادفی از محدوده‌ی مشخص آن مؤلفه مقداردهی می‌شود. قاعده دوم الگوریتم (تنظیم آوا) زمانی که قاعده‌ی اول اجرا شد استفاده می‌گردد که مطابق با آن درصورتی که Rand از نرخ

تطبیق گام، کوچکتر باشد، تغییری متناسب با مقدار فاصله پهنای باند در مقدار مؤلفه حل جدید ایجاد می‌شود. به طور جداگانه در یک حلقه و در هر تکرار برای کل مؤلفه‌های هر حل این کار تکرار می‌شود.

٤. اگر مقدار تابع‌هدف حاصل از بردار حل جدید از مقدار تابع-هدف بدترین حل موجود در حافظه بهتر بود جایگزین جواب موجود در حافظه هارمونی (HM) می‌گردد (حافظه به روز می-شود).

٥. فرآیند بالا ادامه می‌یابد تا شرط توقف (تعداد بردارهای جدید یا تعداد بهبودها) برقرار شده است، حاصل گردد.

٤-٤ نحوه نمایش جواب

در این بخش، ابتدا نحوه نمایش جواب برای مسأله مورد بررسی ارائه شده در مدل مفروض نحوه نمایش جواب مسأله یک آرایه می‌باشد که به تعداد ماشین‌ها دارای سطر بوده و به تعداد سناریوها دارای ستون می‌باشد. در هرآرایه یک ماتریس وجود دارد. این ماتریس مشتریانی که توسط هر ماشین و در هر سناریو بازدید شده و مقدار محصول ارسالی به آنها را نشان می‌دهد. این ماتریس‌ها به تعداد مشتریان دارای ستون می‌باشد و به تعداد محصولات +٢ دارای سطر می‌باشد. سطراول توالی مشتریانی که توسط آن وسیله-نقلیه بازید می‌شوند را نشان می‌دهد و سطر دوم نیز مسیر اختصاص داده شده به آن مشتری را نشان می‌دهد. سطرهای٣ تا $P+2$ نیز بار ارسالی توسط وسیله‌نقلیه به هر یک از مشتریان را نشان می‌دهد. شکل ١ یک نمونه از ماتریس برای یک وسیله‌نقلیه را نشان می‌دهد. در اینجا به طور فرضی یک نمونه جواب درنظرگرفتیم. همانطورکه مشاهده می‌شود هر ستون مربوط به یک مشتری می‌باشد. سطر اول نشان دهنده توالی مشتریانی است که توسط وسیله‌نقلیه بازدید می-شوند. دراین مثال وسیله‌نقلیه ابتدا مشتری ٤ سپس مشتری ١و درنهایت مشتری ٣ را بازدید می‌کند. سطردوم مسیرهای تخصیص داده شده را نشان می‌دهد. سطرهای بعدی نیز محصول ارسال شده برای هر مشتری را نشان می‌دهد. بطور نمونه از محصول اول برای مشتری ٤ مقدار ٨٥ واحد و برای مشتری ١ نیز ١٠٠ واحد محصول ارسال می‌شود.

٤-٥ تنظیم پارامتر و مشخصات مسائل نمونه

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده است برای روش NSGA-II چهار فاکتور تعداد جمعیت اولیه (npop)، حداکثرتعداد (max-it)، ضریب جهش (Mutation) و ضریب جابجایی (Crossover) در نظرگرفته شده است، همانطور که در جدول ٦ نشان داده شده است.

مشتریان	١	٢	٣	٤	٥
توالی	٢	٠	٣	٤	٥
مسیر	٣	٠	٢	٢	٠
محصول ١	١٠٠	٠	١٠٠	٨٥	٠
محصول ٢	٠	٠	١١٥	٢٠	٠
محصول ٣	٧٥	٠	٩٥	٠	٠

شکل ١. نمایش جواب

جدول٦. نتایج تنظیم پارامترها الگوریتم ژنتیک

نتایج	تعداد تکرار الگوریتم	جمعیت اولیه	نرخ ترکیب	نرخ جهش
	۱۲۵	۳۰	۰/۷	۰/۳

جدول۷. نتایج تنظیم پارامترها الگوریتم جستجوی هارمونی

نتایج	تعداد تکرار	جمعیت اولیه	حافظه هارمونی	نرخ تنظیم گام	نرخ پهنای باند
	۱۲۵	۳۰	۰/٦	۰/٤	۲

برای روش Mohs پنج فـاکتور تعـداد جمعیـت اولیـه (npop)، حداکثر تعداد (max-it)، ضـــریب حافظه هارمونی (hmcr)، نرخ تنظیم گام (par) و نرخ پهنای باند (bw) در نظرگرفته شده است. همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است.

٤-٦ شاخص‌های مقایسه

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه دو دسته اصلی متریک وجود دارد:

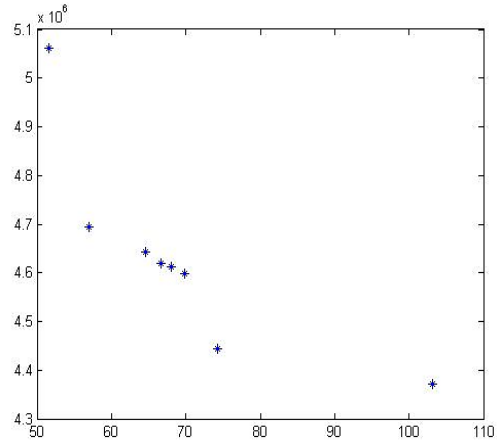
۱) متریک‌های همگرایی ۲) متریک‌های پراکندگی. در این مقاله برای انجام مقایسه، از شش شاخص که ترکیبی از شاخص‌های هر دودسته اصلی می‌باشد، استفاده شده است. که معیارهای دسته اول عبارتند از: معیارتعداد جواب پارتو، معیار فاصله از جواب ایده آل، معیار پوشش مجموعه‌ها و معیارهای مربوط به دسته دوم عبارتند از: معیار فاصله‌گذاری، معیار تنوع، معیار بیشترین گسترش. همچنین معیار زمان اجرای الگوریتم برای مقایسه نیازمندی های محاسباتی در نظر گرفته شده است.

۵. نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی

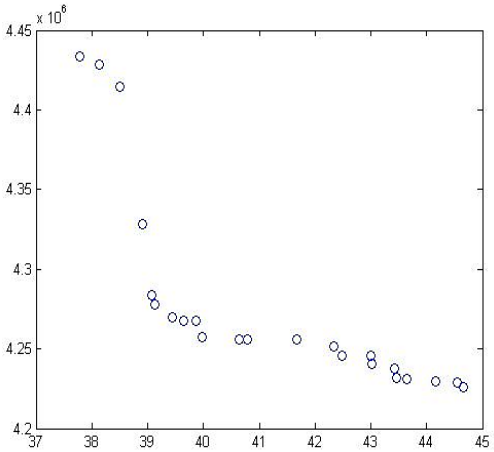
در این مقاله ۱۵ مسأله در اندازه‌های مختلف در نظرگرفته شده اند که تعداد مشتریان از ۸ تا ۵۰ ، انبارها از ۲تا ٤، وسایل‌نقلیه از۲ تا ۱۸، محصولات از ۲ تا ٦ و تعداد سناریوها از ۲ تا ٤ در نظرگرفته شده است. قبل از تشریح نتایج معیارهای بدست آمده برای هر یک از الگوریتم‌ها، قابل ذکراست که برای دو شاخص تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NOS) و معیار تنوع (Diversity) مقادیر بالاترمطلوب‌تر می‌باشد. سپس برای معیار فاصله از جواب ایدآل (MID) و معیار فاصله‌گذاری (Spacing) هرچه مقدار این معیارها کمتر باشد مطلوب می‌باشد. همچنین برای معیار زمان حل مسئله (Time) مقادیر کمتر، از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. مقادیر هر کدام از آنها مطابق جدول ۸ می‌باشد. نمودار پارتو حاصل از هر دو الگوریتم برای مسأله ۱۱ با ۳۰ مشتری در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود رنج تابع هدف اول برای الگوریتم جستجوی هارمونی ما بین ۵۰ تا ۱۱۰ می‌باشد در حالی که این رنج برای تابع هدف در الگوریتم NSGA-II بین ۳۷ تا ٤۵ می‌باشد. دامنه تابع هدف دوم در الگوریتم جستجوی هارمونی ما بین ٤/۳ تا ۵/۱ میلیون می‌باشد در صورتی که این عدد در NSGA-II بین ٤/۱ تا ٤/٤۵ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود رنج هر دو تابع هدف در الگوریتم NSGA- II از الگوریتم MOHS بهتر می‌باشد.

جدول۸. نتایج محاسباتی الگوریتم **NSGA- II** و **MOHS** برای مسائل نمونه

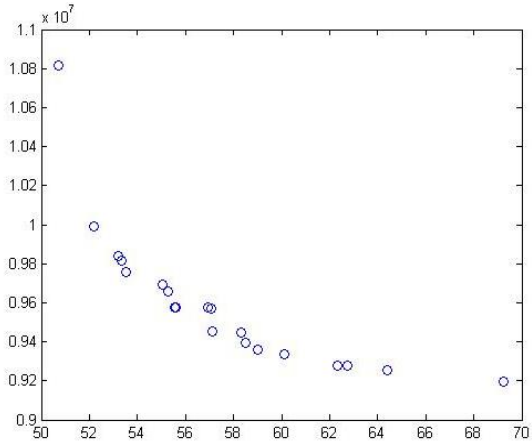
Test Problem Number	NSGA- II					MOHS				
	MID	NOP	Time	Spacing	Diversity	MID	NOP	Time	Spacing	Diversity
۱	۲٦٤۳۷۳,٥٤	۱۷	۱۳,۸۳	۱,٥۹	۱۷۷۳,۳۸	٤۳٥۱۸۰,۸۱	۱۲	۱٦,۱۸	۰,٥۸	۱۸۲٥,۷
۲	٥۲۸۲۳۱,۹	۲۲	۱۸,۸۱	۱,۱۷	۳۳٤۰,٥۲	٦۲۰۳۳۳,۲۳	۸	۲۳,۸٦	۰,٤۷	۱٥۸۹,۳۱
۳	۱۰۸٥۲۲٤,۱۸	۱۱	٤٥,۷٥	۰,۹٤	٤۳۳,۷٤	۱۲۸۲٥٦۱,۸	۱۰	۳۰,۲۹	۱,۰۳	۱۷۲۱,۹
٤	۱۷۸۳۹۹٦	۷	۳۰,٥۹	۰,۷۷	۲۰٤,۱۸	۱۸٦۱۷۳۹	۱٥	٥٤,٤۷	۰,۸٦	۱٥۱۰,۲٤
٥	۲۱۰۸۲۳۳,۳٥	۱٤	۲۹,۳٥	۱,۹٦	۱۲۲٤,٦۸	۲۲٥۸٤۷۹,۰٥	۱٦	٤٦,۲	۱,۰٤	۲۸٥۷,٤۲
٦	۱۳۷۹۳۹٥	۳٤	۳۱,۱۲	۱,۱۳	۳۸۱۲,۲۹	۱۷۳٥۷٥٦,۹۸	۱۲	٤۰,۸۹	۱,۰۲	۳۰٦٦,۲٦
۷	۲٦۳۸٥۱۱,٥	٥	۳٤,۲۳	۱,۰۳	۳٥۰,٤٥	۲۸۱۸٤٤٤	۱٥	٥۲,۱٦	۱,٥٥	۲۷۹۸,۷٦
۸	۳٥۱٦٤۳۷,٦۲	۲۱	٤۷,٤۹	۱,۲۲	۱۸۷٥,۰۸	۳٦۰٥٤۲٤,۱٤	۱۳	۷٦,٦۲	۰,۸٦	۱۹۷۷,۹۲
۹	٥۲۹٤۸۱۳	۱۱	۲۸۱	۱,۳۷	۱۷۳۰,۲۳	٥۳۷۹۱۷۰,۷٤	۱۲	۳۷۰	۱,۱۸	۲۲۸۸,۳۱
۱۰	۳۱۰۲۳۸٦,۸۸	۳۰	٦۱,۱۷	۰,۹۹	٥۰۱۳,۳٤	۳۸۲٥٦٥۹,٥۸۳	۱۱	٦۳,۷۸	۰,٥۹	۳۹٦۲,٥
۱۱	٥۲۷٦۷۸۳,٥٦	۲۳	٤۹,۲۳	۱,۱۰	۲۰٤٤,۲۳	٤٦۳۰۱٥۰,۸	۸	۸۲	۱,۰۸	۲۰۳٥,۸۷
۱۲	٥٦۲۳۷٦۹,۷٤	۹	۷۰,۹	۰,۷٤	٥۲٥,٦۲	٦۱۰٥٦٤٦,۲۷	۱۸	۱٥۲,۹	۱,۳	٥٦۱۳,۱۳
۱۳	۷۹۱۸۰۸٦	۱٦	۱۹۲,۲۷	۰,۸۲	۲۰۲۳,۸٤	۸۲۷۲۲۰٤,۰۱	۲۲	۲۱٦,۷۸	۰,۹	٤۲٦٥,۰۲
۱٤	۹٥۹۲٦۲۷,۳٤	۲۰	۱۹٦,٤۷	۱,۳۲	٥۱۰۹,۱٥	۹۸۸٦۳۳۱,۸۱	۱٥	۳۱۹,۰٤	۰,۹٤	۳٤۱۰,٥۳
۱٥	۱۲۲٦۱۹۷٤,۱٦	۳۱	٤۸۲,۳۲	۱,۳۷	٦٥۷۰,۲۱	۱۲٦۸۸۰۸٦,۲٦	۱۳	٤۷۸,۳۷	۰,۸٤	٥۱۷٥,۹۷



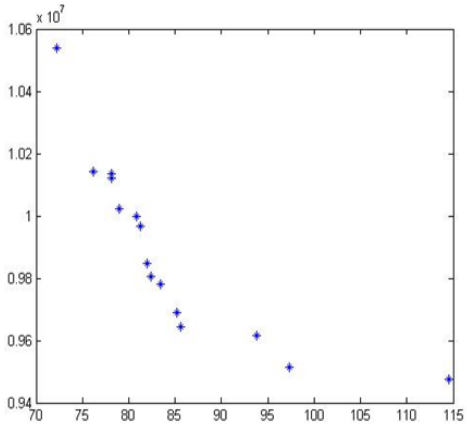
شکل ۲. نمودار پارتو برای مسئله ۳۰ مشتری و ۳ انبار و ۷ وسیله نقلیه برای الگوریتم MOHS



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



شکل٤. نمودار پارتو برای مسئله ٤٠ مشتری و ٤ انبار و ١٥ وسیله‌نقلیه برای الگوریتم NSGA- II



شکل ٥. نمودار پارتو برای مسئله ٤٠ مشتری و ٤ انبار و ١٥ وسیله نقلیه برای الگوریتم MOHS

همچنین نمودار پارتو حاصل از هر دو الگوریتم برای مسأله ١٤ با ٤٠ مشتری در شکل٤ و ٥ ارائه شده است. رنج تابع هدف اول برای الگوریتم جستجوی هارمونی ما بین ٧٠ تا ١١٥ می‌باشد این رنج برای تابع هدف در الگوریمتم NSGA-II بین٥٠ تا ٧٠ می‌باشد. یعنی مقادیر تابع هدف اول در الگوریتم NSGA-II از مقادیر الگوریتم MOHS بهتر است دامنه تابع هدف دوم در الگوریتم جستجوی هارمونی مابین ٩/٤ تا ١٠/٦میلیون می‌باشد در صورتی که این عدد در NSGA-II بین ٩/٢ تا ١٠/٨ می باشد. . رنج تابع هدف هر دو الگوریتم برابر بوده و دارای عملکرد یکسانی می‌باشند. البته بیشتر جواب‌های پارتو در MOHS در رنج ٩/٥ تا ١٠/١ میلیون وبرای NSGA-II مابین ٩/٢ تا ١٠ میلیون است.

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه عددصحیح خطی برای مسأله موردنظر ارائه شده است. مدل ارائه شده یک مدل چندهدفه برحسب سناریو می‌باشد. تابع هدف اول سعی در کاهش زمان بازدید مشتریان می‌باشد و تابع هدف دوم مسأله قصد دارد هزینه حمل‌ونقل و کمبود را کاهش دهد. این مدل از نوع چندانباره و چندمحصوله بوده و تقاضای مشتریان می‌تواند براساس تحویل چندگانه ارضاء شود. همچنین کمبود مجاز بوده و پنجره‌زمانی از نوع نرم درنظر گرفته شده است. همچنین وسایل‌نقلیه و انبارهای با ظرفیت محدود و غیرهمگن می‌باشند. مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون والگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOHS بر روی ١٥ مسأله نمونه حل شده است. نتایج بدست آمده از حل مسائل عددی نشان می‌دهد هر دو الگوریتم توانایی بالایی در تولید جواب‌های مناسب در زمان مناسب را دارند بطوریکه برای حل بزرگترین و پیچیده‌ترین مسأله با ٥٠ مشتری، ١٨ وسیله‌نقلیه در زمانی کمتر از ٤٨٠ ثانیه صرف شده است که با توجه به NP-Hard بودن، غیرقطعی‌بودن و چندهدفه بودن مدل بسیار مناسب می‌باشد. بطورکلی، الگوریتم NSGA-II با صرف زمان بیشتر، جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم MOHS تولید می‌کند. الگوریتم NSGA-II در معیار تعداد جواب پارتو و الگوریتم MOHS در معیار فاصله از عملکرد مناسبی برخوردار می‌باشند. اما در دو معیار دیگر معیار زمان (Time) و معیار تنوع (Diversity) الگوریتم NSGA-II بطور ضمنی از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. در نتیجه بطور کلی الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم

MOHS دارا می باشـد. از طرفی با توجه به این که در معیارهای کیفیت یعنی معیار فاصـله الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری را دارا می‌باشـد بر این اسـاس کیفیت جواب‌های یافت شـده توسط الگوریتم NSGA-II بهتر اسـت. همچنین نتایج حاصل از تحلیل حسـاسـیت نشـان می‌دهد که با کاهش ظرفیت وسایل نقلیه دامنه توابع هدف کم شـــده و تنوع جواب‌های پارتو یافت شـــده کمتر می‌شـود. بطوریکه در ظرفیت‌های بسـیار پایین ماکزیمم و مینیمم مقدارتوابع هدف به یکدیگر بسـیار نزدیک می‌شـوند. همچنین از طرف دیگر کـاهش تعـداد وســـایل‌نقلیه از طرفی مقدار هزینه را کـاهش می‌دهـد و ازطرف دیگر نیز باعث می‌شـــود زمان بازدید مشـتریان افزایش یابد زیرا هر وسـیله‌نقلیه مشـتریان بیشـتری را بازدید می‌نماید.

۷. پی نوشت

1-Vehicle Routing Problem
2- Non-dominated Sorted Genetic Algorithm
3- Multi-Objective Harmony Search
4- Termination Conditions

۸. مراجع

- Berkoune, D., Renaud, J., Rekik, M., Ruiz, A., (2012) "Transportation in disaster response operations", Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 46, PP. 23-32.

- Bozorgi, A., Jabalameli, M.S., (2011) "A multi objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty", Production Economics VoL.35, pp. 905-933.

- Chen, HK., Chou, HW., Hsueh, C.F., (2008) "Dynamic vehicle routing for relief logistics in natural disasters", Source: Vehicle Routing Problem, Book edited by: Tonci Caric and Hrvoje Gold, pp. 142.

- Dantzig, G.B., Ramser, J.H., (1959) "the truck dispatching problem", management science, Vol.6, No.1, pp.80-91.

- Deb, K., pratap, A., Agrwal, s., Meyarivan, T., (2002) "A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol.6, NO.2, pp. 182-197.

- Geem, Z.W., Kim J.H, Loganathan G.V., (2001) "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", Simulations, vol. 76, pp. 60–68.

- Haimes, Y.Y., Lasdon, L.S., Wismer, D.A., (1971) "On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization", IEEE Transactions on system, vol. 1, pp. 296–297.

- Hamedi, M., Haghani, A., (2012) "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response", Social and Behavioral Sciences, vol. 54, pp.1205–1219.

- Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., Rodríguez, V., (2007) "Linear programming with fuzzy parameters - An interactive method resolution", European Journal of Operational Research, vol. 177, PP.1599-1609.

- Michael, H., Karen, R., Smilowitza, B., (2013) "A continuous approximation approach for assessment routing in disaster relief", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 50, pp. 20-41.

- Najafi, M., Eshghi, K.(2013) "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 49, pp. 217–249.

- Nasiri, M., Shishehgar, S., (2014) "Disaster Routing by considering heterogeneous vehicles and reliability of routes using an MADM approach", Uncertain Supply Chain Management, Vol. 2, pp. 137-150.

- Talarico, L., Haijun, W., Sorensen, K., (2014) "Ambulance routing for disaster response with patient groups", Computers and Operations Research, Vol. 56, pp. 120-133.

- Talebian Sharif, M., Salari, M., (2015) "A GRASP algorithm for a humanitarian relief transportation problem", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 41, pp. 259–269.

- Zheng, Yn-Jun., Chen, Sheng-Yong., Ling, Hai-Feng., (2015) "Evolutionary optimization for disaster relief operations: A survey", Soft Computing, vol. 27, pp. 553-566.

فریبا فرح بخش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع – برنامه ریزی و تحلیل سیستم ها را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد اسلامی – واحد تهران جنوب و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع – گرایش صنایع را در سال ۱۳۹٤ از همان دانشگاه اخذ نمود. ایشان فارغ التحصیل ممتاز در هر دو مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد بوده و زمینه های پژوهشی مورد علاقه وی مسیریابی وسایل نقلیه، بهینه سازی مسائل حمل ونقل، زمان بندی وسایل حمل و نقل، حمل ونقل تحت شرایط بحران است.

رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن – استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین‌برن – استرالیا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم‌های صنعتی (مکان‌یابی و استقرار تسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.

وحیدرضا قضاوتی هم اکنون دانشیار دانشکده مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب است. ایشان مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی صنایع و در گرایش تولید صنعتی در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمودند. همچنین ایشان مدارک کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی صنایع گرایش مهندسی صنایع به ترتیب در سالهای ۱۳۸٦ و ۱۳۸۹ از دانشگاه علم وصنعت ایران اخذ نموده اند. زمینه های تحقیقاتی ایشان شامل مدلسازی زنجیره تامین، بهینه سازی سیستم های تولید سلولی، تئوری صف و برنامه ریزی عدد صحیح می باشد. ایشان مقالات متنوعی را در مجلات بین المللی مختلفی شامل SOCO، CAIE، ESWA، CAM، IJAMT، CJOR، IJCIC و .... چاپ نموده اند.