مکان‌یابی انبارهای محلی و کنترل موجودی و تخصیص اقلام عادی و فاسدشدنی پس از بحران با تقاضا و بودجه غیرقطعی

زهره صحرایی: کارشناس ارشد، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
پروانه سموئی*: استادیار، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۹/۳ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۳/۴

چکیده

حوادثی که در اثر عملکردهای طبیعی و انسانی به طور ناگهانی به وجود می‌آیند و مشقت و سختی را به یک جامعه تحمیل می‌کنند اصطلاحاً بحران نامیده می‌شوند. ازآنجاکه در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات پیش‌آمده در شرایط جوی زمین، تعداد بحران‌های طبیعی اعم از زلزله، سیل، طوفان و ... روبه‌افزایش است، لزوم مدیریت بحران و برنامه‌ریزی‌های لازم در شرایط بحرانی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این پژوهش هدف مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی انبارهای محلی و تخصیص و کنترل موجودی اقلام عادی و فاسدشدنی در شرایط پس از بحران است. ازآنجاکه در دنیای واقعی تقاضای نقاط آسیب‌دیده به هر دلیلی نظیر شدت آسیب مناطق و افراد، امکان وجود پس‌لرزه‌هایی با شدت بالاتر و در فاصله زمانی کم از زلزله یا سانحه اولیه داشته باشند و همچنین میزان فوت و مرگ‌ومیر قطعی نیست، در این تحقیق مقدار تقاضا غیرقطعی لحاظ شده است. علاوه بر این، ازآنجاکه میزان بودجه نیز از قبل برای برنامه‌ریزیان قطعی و مشخص نیست و بسته به‌شدت بحران و همچنین امکان وجود حمایت‌های سازمان‌های بشردوستانه و کمک‌های نقدی مردمی مقدور است، میزان بودجه نیز غیرقطعی لحاظ شده است. برای این مسئله، یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، توسعه داده شده است و برای حل آن از نرم‌افزار گمز برای مسائل سایز کوچک و باتوجه‌به NP-hard بودن مسئله از الگوریتم الکترومغناطیس برای مسائل با سایز بزرگ بهره گرفته شده است تا در شرایط بحران که واکنش سریع و یافتن پاسخ‌های به‌موقع برای جلوگیری از هدررفتن زمان ضروری است، بتوان از این الگوریتم کمک گرفت. نتایج عددی روی مثال‌های مختلف نشان‌دهنده کارایی الگوریتم ارائه شده از منظر زمان حل و کیفیت پاسخ‌های به‌دست‌آمده است.

کلمات کلیدی:مکان‌یابی، تخصیص، موجودی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، الگوریتم فرا ابتکاری الکترومغناطیس

Locating local warehouses and controlling inventory and allocating normal and perishable items in post-crisis with uncertain demand and budget

Zohreh Sahraei[1], parvaneh Samouei[2*]

Abstract

The events that occur suddenly as a result of natural and human actions and impose hardship on society are called Disasters. In recent years, due to changes in the Earth's climate, the number of natural crises, including earthquakes, floods, storms, etc been increasing. Thus, the need for disaster management and planning is felt more than ever. In this research, the aim is to model and solve the problem of locating local warehouses and allocating and controlling the inventory of normal and perishable items in post-crisis conditions. Because in the real world, the demand for affected areas for any reason, such as the severity of damage to areas and people, the possibility of aftershocks with higher intensity and in a short time after the initial earthquake, and the rate of death is not certain. In addition, in most of the conditions, the budget is not clear for the managers and it depends on the severity of the crisis, the support of humanitarian organizations, and public donations. S the budget is uncertain. Therefore, we considered uncertain demand and budget in this research. For this problem, a mixed-integer linear mathematical model has been developed. To solve the problem, GAMS software and the electromagnetic algorithm have been used for small-sized and large-sized problems, respectively. Numerical results on different examples show the efficiency of the proposed algorithm in terms of time and the quality of results. **Keywords**: Location, Allocation, Inventory, Mixed Integer Linear Programming, Electromagnetic Meta-Huristic Algorithm

[1] Msc., Industrial Engineering department, Faculty of engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

[2*] Assistant Professor, Industrial Engineering department, Faculty of engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

مقدمه

فاجعه یا بحران، مجموعه حوادثی است که به مختل‌شدن ارتباطات زیست‌محیطی بشر با محیط اطرافش منجر می‌شود. به دلیل ماهیت تصادفی بودن و پیش‌بینی‌ناپذیری بحران‌های طبیعی باید طرح‌های جامعی به‌منظور کاهش و تسکین خطرها و نتایج ناشی از بحران و مقابله با آن ارائه شود. از طرفی تعداد بلایای طبیعی وابسته به آب‌وهوا مانند سیل، خشک‌سالی و ... در حال افزایش است. همچنین بحران‌های طبیعی به دلیل ماهیت غیرمترقبه‌ای که دارند، خسارات سنگین و گاه جبران‌ناپذیری را به ملت‌ها وارد می‌کنند. به همین دلیل فرایندهایی که در هنگام امدادرسانی پس از وقوع یک بحران به انجام می‌رسند، لازم است به نحوی برنامه‌ریزی شوند تا با کمترین هزینه پاسخگوی نیاز آسیب‌دیدگان باشند.

یکی از مسائلی که لازم است هنگام وقوع یک بحران انجام شود، اقدامات لازم در جهت احداث تسهیلات اضطراری مانند انبارهای محلی برای انتقال مواد دارویی، غذایی و سایر مایحتاج آسیب‌دیدگان در این شرایط است. به همین دلیل پس از بررسی جغرافیایی محل وقوع بحران، نقاط بالقوه جهت احداث انبارهای موقت باید مشخص‌شده و مکان‌های بهینه تعیین شوند. از سوی دیگر اقدامات لازم جهت خرید کالاها و انتقال آن‌ها به انبارها باید صورت گیرد. همچنین پس از شناسایی نقاط تحت‌تأثیر فاجعه، تخصیص بهینه این نقاط به انبارهای احداث‌شده به‌گونه‌ای باید انجام شود تا حداکثر پوشش اتفاق بیفتد. پس از تهیه کالاها در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی مدیریت و کنترل موجودی کالاها نیز در هر دوره باید انجام شود. ازآنجاکه فاکتور هزینه یکی از فاکتورهای مهم در تصمیم‌گیری است و بدون درنظرگرفتن آن امکان هدررفت بودجه و تجهیزات وجود دارد درنتیجه کاهش هزینه‌های موجود در تمام شرایط حتی در زمان بحران نیز یکی از اهداف مهم است.

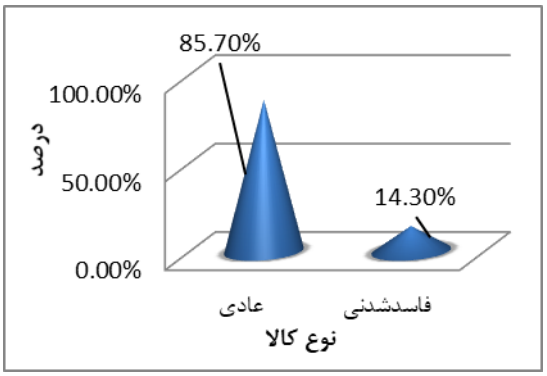
پیشینه تحقیق

ازآنجاکه در این تحقیق به مسئله مکان‌یابی، موجودی و تخصیص در شرایط بحران پرداخته شده است، از بین پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر تعدادی از تحقیقاتی را که به مسئله بحران و مدیریت آن پرداخته‌اند را مورد بررسی قرار داده‌ایم. ناجی عظیمی و همکاران [۱] یک مدل مکان‌یابی را ارائه دادند که در آن نقاطی از میان تعدادی نقطه بالقوه به‌عنوان مراکز توزیع ماهواره‌ای انتخاب می‌شود و مردم برای دریافت اقلام امدادی به این مکان‌ها مراجعه می‌کنند. نیاز این مراکز توزیع نیز توسط یک تأمین‌کننده تأمین می‌شود. از الگوریتم ابتکاری جست‌وجوی محلی تغییریافته برای حل مدل خود استفاده کردند. هدف آن‌ها حداقل کردن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه بوده است. صحراییان و همکاران [۲] مسئله مکان‌یابی و مسیریابی توزیع کالا در شرایط بحرانی را مورد بررسی قراردادند. هدف آن‌ها از این تحقیق حداقل کردن مجموعه هزینه‌های تأخیر دررسیدن به مناطق آسیب‌دیده، حمل‌ونقل و هزینه‌های راه‌اندازی پایگاه امدادرسانی است. آن‌ها مسئله خود را در سایز کوچک با نرم‌افزار گمز برای استان فارس حل کردند. فتر و راکز [۳] مسئله بازیافت پسماند پس از فاجعه و ریزش آوار را برای منطقه چیانگ رأی تایلند که براثر طوفان ایزابل در سال ۲۰۰۳ دچار حادثه شده بود، مورد بررسی قراردادند. آن‌ها یک مدل تصمیم‌گیری برای تعیین مکان‌های موقت تأسیسات بازیافت و دفع زباله را باهدف حمایت از عملیات پاک‌سازی آوار و زباله پیشنهاد دادند. نتایج نشان می‌داد که اجازه‌دادن به محلات برای حفظ درآمد بازیافت که باعث ایجاد اولویت در برنامه‌ریزی‌شده است، نه‌تنها درآمد قابل‌توجهی را برای این منطقه فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند هزینه‌های کلی را نیز کاهش دهد. بااین‌حال، نتایج دیگر نشان می‌داد که بیش‌ازحد بازیافت زیان‌آور است و می‌تواند هزینه‌ها را افزایش دهد. هیو و شئو [۴] مسئله زنجیره تأمین معکوس در مدیریت پسماند پس از وقوع فاجعه را مورد بررسی قراردادند. مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه آن‌ها هزینه‌های لجستیکی معکوس، ریسک‌های محیطی و عملیاتی متناظر و آسیب‌های روانی ساکنان محلی را به حداقل می‌رساند. بزرگی امیری و همکاران [۵] یک مدل تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی تسهیلات در شهر تهران به‌منظور بهبود آمادگی در برابر بلایای طبیعی را ارائه دادند. آن‌ها از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای حل مسئله خود استفاده کردند. آن‌ها در این روش ۲۲ منطقه از تهران را جزء مکان‌های کاندید قرار داده و ۸ معیار را برای انتخاب محل احداث مراکز توزیع اقلام امدادی در نظر گرفتند. در همان سال بزرگی امیری و همکاران [۶] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای لجستیک امدادی در بلایای طبیعی تحت شرایط نامشخص پیشنهاد کردند. در مدل آن‌ها علاوه بر تقاضا، عرضه، هزینه‌های تأمین، هزینه‌های حمل‌ونقل، مکان وقوع حادثه و احتمال آسیب‌دیدن برخی تسهیلات در حادثه را به‌صورت غیرقطعی فرض شده‌اند.

. همچنین در مدل آن‌ها به طور هم‌زمان مکان مراکز توزیع و تخصیص آن به نقاط تقاضا تعیین می‌شود. به‌علاوه، آن‌ها رویکرد بهینه‌سازی ازدحام ذرات را به‌منظور حل مدل ریاضی پیشنهادی خود توسعه دادند. درنهایت نتایج محاسباتی را برای چندین مورد از این مسئله به‌منظور نشان‌دادن امکان‌سنجی و اثربخشی مدل پیشنهادی و الگوریتم خود ارائه کردند. یک سال بعد بزرگی امیری و همکاران [۷] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه را در شرایط عدم‌قطعیت به‌منظور تدارکات در زنجیره تأمین انسان‌دوستانه را توسعه دادند. در مدل آن‌ها نه‌تنها تقاضا بلکه عرضه و هزینه‌های تدارکات و حمل‌ونقل به‌صورت نامعین در نظر گرفته‌شده است. علاوه‌برآن عدم‌قطعیت برای کالاهایی که نزد تأمین‌کننده هستند یا هنوز در مرکز توزیع مستقر نشده‌اند در نظر گرفته‌شده است، به‌گونه‌ای که ممکن است تا حدی در اثر وقوع فاجعه از بین بروند. به‌طورکلی رایج‌ترین موارد در نظر گرفته‌شده توسط آن‌ها مربوط به مکان‌یابی تسهیلات، خرید تدارکات، نگهداری موجودی، حمل آذوقه و جریمه‌های مربوط به کمبود بود. آن‌ها طی مرحله اول عملیات مربوط به مکان تسهیلات، خرید و نگهداری موجودی انبار و طی مرحله دوم هزینه حمل‌ونقل و کمبود در مرحله دوم در نظر گرفتند. حبیب و سرکار [۸] یک مدل مکان‌یابی - تخصیص در شرایط بحرانی غیرقطعی را جهت مدیریت آوار پس از فاجعه ارائه دادند. آن‌ها طی دوفاز به انتخاب منطقه مدیریت اسکان موقت (TDDMS) و تخصیص زباله‌های مناطق تحت تأثیر حادثه به مناطق انتخاب‌شده پرداختند. در فاز اول یک روش برای انتخاب TDDMS پیشنهاد کردند که متشکل از فرایند تحلیل شبکه‌ای و یک تکنیک فازی مشابه راه‌حل ایده آل (TOPSIS) بود. در فاز دوم یک مدل بهینه‌سازی تخصیص پسماند یا زباله آوار از مناطق آسیب‌دیده به TDDMS انتخاب‌شده توسعه دادند. برای اهداف تخصیص زباله، پنج TDDMS کاندید شد که در میان آن‌ها سه مکان با استفاده از روش پیشنهادی انتخاب شد. برای نشان‌دادن کاربرد این مطالعه پیشنهادی، یک مثال عددی با دو سناریوی مختلف ارائه شد. اونان و همکاران [۹] به‌منظور مدیریت آوار پس از وقوع فاجعه، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه توسعه دادند و با الگوریتم بهینه‌سازی هدفمند NSGA II آن را حل کردند. هدف آن‌ها ایجاد چارچوبی برای تعیین مکان تسهیلات ذخیره‌سازی موقتی بود و شامل برنامه‌ریزی برای جمع‌آوری و حمل‌ونقل ضایعات فاجعه به‌منظور مدیریت آن به یک روش پایدار برای محیط‌زیست بوده است. مدل ریاضی آن‌ها برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و اهداف مدل حداقل رساندن هزینه‌های کلی و ریسک ناشی از آلودگی مواد زائد خطرناک بود. آن‌ها همچنین روش‌های تخمین تلفات بلایا را با مدیریت پسماند پس از فاجعه ادغام کرده‌اند. پائول و مک‌دونالد [۱۰] یک چارچوب مدل‌سازی تصادفی برای تعیین مکان و ظرفیت‌های مراکز توزیع برای ذخایر اضطراری جهت بهبود آمادگی در رویداد فاجعه‌ای که در آن هیچ اخطار قبلی وجود ندارد، ایجاد کردند. چارچوب پیشنهادی آن‌ها برای برنامه‌ریزی اضطراری قابل‌استفاده است که باید منابع متعددی از عدم‌قطعیت، ازجمله زمان‌بندی و شدت یک رویداد بالقوه و همچنین تأثیر حاصله را در نظر بگیرد. آن‌ها برای نشان‌دادن رویکرد مدل‌سازی، آن را به منطقه‌ای که مستعد وقوع زمین‌لرزه‌ها بود، اعمال کردند. مدل آن‌ها شامل ابهامات متعددی از قبیل خسارت تأسیسات و میزان تلفات، بر اساس شدت آن‌ها بود. باتوجه‌به پیچیدگی محاسباتی مسئله، آن‌ها یک هیوریستیک بهینه‌سازی تکاملی را با کمک یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه دادند که راه‌حل‌هایی باکیفیت بالا تولید می‌کرد. آن‌ها اثربخشی روش پیشنهادی خود را از طریق یک مطالعه موردی با نرم‌افزار HAZUS MH از اداره مدیریت بحران فدرال نشان دادند. بونمی و همکاران [۱۱] یک مدل بهینه‌سازی ریاضی یکپارچه و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی را برای انتخاب محل سرپناه و برنامه‌ریزی تخلیه مورد بررسی قراردادند. مدل پیشنهادی بامطالعه موردی واقعی در شهرداری بنت، استان چیانگ رأی تایلند مورد آزمایش قرار گرفت. درنهایت، یک طرح مناسب و واقع‌بینانه برای انتخاب توسط سازمان یا دولت (تصمیم‌گیرنده) در شهرداری بنت پیشنهاد شد. یک سال بعد بونمی و همکاران [۱۲] مسئله مدیریت پسماند بلایا بعد از بحران را باهدف بهینه‌سازی محل و تخصیص منابع، مورد بررسی قراردادند. از طرفی هدف آن‌ها ارائه یک سیستم استراتژی توسعه‌یافته در مدیریت زنجیره تأمین پسماند، همراه با سیستم تصمیم‌گیری یکپارچه برای جداسازی مکان داخل و بیرون زباله‌های قابل‌بازیافت است. آن‌ها جهت حل مسئله، به دلیل محدودیت استفاده از روش دقیق برای مسائل بزرگ از دو رویکرد فراابتکاری کارآمد با طرح‌های رمزگذاری و رمزگشایی خاص استفاده کرده‌اند.

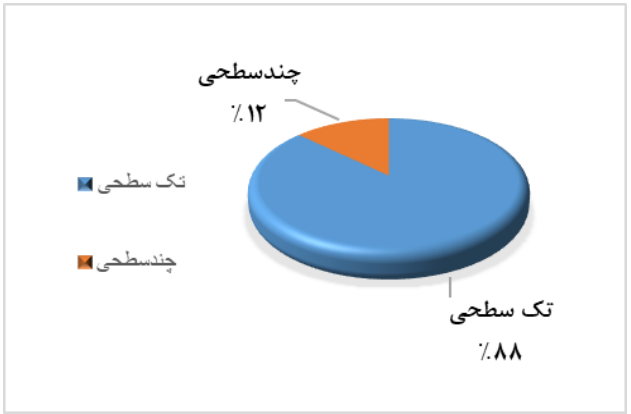
الگوریتم مورداستفاده آن‌ها بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی است. لورکا و همکاران [۱۳] یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را ارائه دادند که به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری با استفاده از مدل‌های تحلیلی برای کمک به مدیریت بلایا و مدیریت پسماند با تصمیمات مربوط به جمع‌آوری، حمل‌ونقل، کاهش، بازیافت و دفع زباله محسوب می‌شود. مدل آن‌ها به بهینه‌سازی و توازن هزینه‌های مالی و محیطی، مدت عملیات جمع‌آوری و دفع، استفاده از دفن زباله و میزان مواد بازیافتی کمک می‌کرد. یو [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف حداکثرسازی حداقل تضمین دستیابی و حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی برای پیش تعیین موقعیت تأسیسات اضطراری پیشنهاد کردند. آن‌ها این دو هدف را به ترتیب به‌عنوان مسائل حداکثر جریان و کوتاه‌ترین مسیر مدل‌سازی کردند. همچنین آن‌ها با حل یک مثال و مقایسه تعداد نقاط غیرقابل‌دسترسی در سناریوهای تصادفی مختلف، تأثیر حداقل تضمین دستیابی را در مدل نشان دادند و ثابت کردند مدل ارائه‌شده می‌تواند در تعیین موقعیت مناسب تسهیلات اضطراری کارا باشد. اوکسوز و ستوگلو [۱۵] یک مدل تصادفی دومرحله‌ای برای تعیین مکان و تعداد مراکز درمانی موقت در صورت بروز فاجعه، باهدف حداقل‌سازی هزینه‌های کل احداث و حمل‌ونقل ارائه کردند. آن‌ها سعی کردند با درنظرگرفتن موقعیت بیمارستان‌های موجود، انواع تلفات (تریاژ) ، تقاضا، امکان خسارت به جاده‌ها و بیمارستان‌ها و فاصله بین مناطق فاجعه و مرکز پزشکی، یک راه‌حل بهینه برای مکان‌یابی مراکز درمانی موقت پیدا کنند. آن‌ها مدل خود را برای یک مورد زمین‌لرزه واقعی که در منطقه‌ای از شهر استانبول اتاق افتاده است، در دو حالت فرض و عدم فرض طبقه‌بندی بیماران آزمایش کردند. نتایج حاکی از آن است که اگر زمین‌لرزه‌ای با بزرگی مورد واقعی اتفاق بیفتد بیمارستان و مراکز درمانی موقت ظرفیت و توانایی پاسخ را ندارند و اگر طبقه‌بندی بیماران انجام نشود، درصد بیماران رسیدگی نشده مورد انتظار به‌صورت چشمگیری افزایش خواهد یافت. درنتیجه مدیران دولتی یا باید ظرفیت بیمارستان‌های موجود را افزایش داده و یا برای انتقال تلفات به بیمارستان‌هایی که خارج از شهر هستند برنامه‌ریزی کنند. عدم‌قطعیت یکی از شاخص‌های مهم در مدیریت بحران است. تقریباً می‌توان گفت در تمام پارامترهای فاجعه در واقعیت عدم‌قطعیت وجود دارد که زنجیره تأمین امدادی را پیچیده‌تر خواهد کرد. به طور مثال در زمان و محل وقوع حادثه، شدت وقوع، احتمال اعتصاب، اختلال در زیرساخت‌ها، میزان خسارات وارده، دسترسی به راه‌های ارتباطی مکان‌های حادثه‌دیده، تقاضای کالاهای امدادی، عرضه و ... عدم‌قطعیت وجود دارد. به همین دلیل فرض نامعین بودن این پارامترها مسئله را به واقعیت نزدیک‌تر خواهد کرد. ربانی و همکاران [۱۶] طی یک برنامه‌ریزی دومرحله‌ای سیاست‌های موجودی کنشی و واکنشی مربوط به عملیات بشردوستانه را بررسی کردند. آن‌ها ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای توسعه دادند که در آن فهرست موجودی انبار، سطوح موجودی و مقادیر توزیع کوتاه‌مدت را تعیین می‌کردند. سپس طی مرحله دوم مقدار بهینه سفارش و نقطه سفارش دهی هر یک از اقلام امدادی از طریق به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های مربوطه و کمبود احتمالی در طول عملیات امدادرسانی بلندمدت را به دست آوردند. آن‌ها در تحقیق خود فرض فاسدشدنی بودن تمام کالاها و فرض ترکیبی‌بودن نوع کمبود (پس‌افت و ازدست‌رفته) را در نظر گرفتند. برای حل مدل، یک روش رتبه‌بندی فازی با استفاده از عملگر میانگین برای رسیدن به راه‌حل بهینه اتخاذ کردند و به‌منظور نشان‌دادن قابلیت کاربرد مدل‌های پیشنهادی، یک مطالعه موردی و یک نمونه عددی فرضی نیز ارائه کردند. یک سال بعد توفیقی و همکاران [۱۷] یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای توسعه داده‌اند که متشکل از انبارهای مرکزی چندگانه (CWs) و مراکز توزیع محلی (LDCs) است. آن‌ها شبکه امدادی خود را روی شهر تهران در مراحل قبل و بعد از زمین‌لرزه احتمالی پیاده‌سازی کرده‌اند. آن‌ها در مرحله اول به مکان‌یابی CWs و LDCs و تعیین سطح موجودی اقلام امدادی در انبارها پرداختند و سپس در مرحله دوم برنامه توزیع اقلام امدادی را بر اساس سناریوهای مختلف فاجعه توسعه دادند. آن‌ها عرضه، تقاضا و سطح دسترس‌پذیری راه‌های ارتباطی را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفتند و آن‌ها این تحقیق را باهدف حداقل‌سازی کل زمان توزیع، حداکثر زمان وزنی توزیع، هزینه کل موجودی استفاده‌نشده و کمبود وزنی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی حل کردند. نتایج حاکی از عملکرد نویدبخش مدل پیشنهادی در مقایسه با شبکه امدادی موجود در تهران است. گل محمدی و ماهوتچی [۱۸] یک مدل تصادفی دومرحله‌ای طراحی زنجیره تأمین یکپارچه به‌منظور توزیع اقلام امدادی بین مناطق آسیب‌دیده ارائه کردند. آن‌ها فعالیت‌های زنجیره تأمین امداد را ازلحاظ زمانی به دوفاز قبل از بحران یا آماده‌سازی و فاز بعد از بحران یا پاسخ تقسیم‌بندی کردند.

در فاز آماده‌سازی، یک زنجیره تأمین امداد دوسطحی شامل انبار مرکزی و نقاط بالقوه انبارهای منطقه‌ای وجود داشت که در آن مکان بهینه برای احداث انبارهای منطقه از بین نقاط بالقوه و تصمیمات بهینه میزان پیش موجودی ذخیره‌شده در هر انبار مشخص شد و فاز دوم شامل طراحی شبکه توزیع اقلام امدادی و تعیین جریان کالایی درون آن بود. تابع هدف موردنظر آن‌ها مدل کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره امدادرسانی بود. درنظرگرفتن انبارهای منطقه‌ای در شبکه توزیع اقلام امدادی موجب افزایش سرعت و اثربخشی فعالیت‌های فاز بعد از بحران و به رابطه دیگر افزایش قابلیت پاسخ‌دهی سیستم مدیریت بحران شد. در همان سال هیو و همکاران [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را در شرایط بحران برای یکپارچه‌سازی تصمیمات ارائه دادند، به‌طوری‌که در مرحله اول به تعیین مکان و تعداد تأمین‌کننده و سطح موجودی قبل از فاجعه می‌پردازد و در مرحله دوم، تصمیمات مربوط به تعیین مقادیر تدارکات، ناوگان حمل‌ونقل و انتخاب مقادیر تأمین پس از فاجعه را اتخاذ می‌کند. هدف آن‌ها حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل، تدارکات، احداث و جریمه نارضایتی مشتری است. توانا و همکاران [۲۰] مسئله مکان‌یابی - موجودی - مسیریابی در زنجیره تأمین بشردوستانه با فرض مدیریت قبل و بعد از فاجعه را مورد بررسی قراردادند. در مدل آن‌ها مکان انبارهای مرکزی و میزان خرید و انتقال کالا از تأمین‌کنندگان به انبارهای مرکزی باتوجه‌به پیش‌بینی تقاضای محصولات قبل از رخداد حادثه و مکان انبارهای محلی، تخصیص نقاط تقاضا به این انبارها کنترل موجودی آن‌ها در مرحله دوم؛ یعنی بعد از فاجعه تعیین می‌شود. آن‌ها یک روش محدودیت اپسیلون، یک الگوریتم ژنتیکی طبقه‌بندی نامغلوب به نام NSGA-II و یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد کردند. بهارمند و همکاران [۲۱] یک مدل چندهدفه چندلایه جهت مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات هنگام وقوع فجایع ناگهانی، با فرض محدودیت در تعداد و ظرفیت امکانات و ناوگان ارائه کردند. آن‌ها زلزله سال ۲۰۱۵ نپال را جهت حل مدل به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند مدل‌های تخصیص منابع، به تخصیص منابع یا وظایف، بدون درنظرگرفتن جریان کالا در هر مسیر می‌پردازند [۱۸]. اغلب اوقات محققان در کنار مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص منابع را نیز مدل می‌کنند. کلیک و همکاران [۲۲] یک مدل تصادفی دومرحله‌ای مکان‌یابی - تخصیص را به‌منظور تعیین تعداد و مکان مراکز توزیع اقلام امدادی قبل از فاجعه و تخصیص نقاط تقاضا به آن‌ها بعد از وقوع حادثه، پیشنهاد کردند. لور و همکاران [۲۳] یک مدل ریاضی برای تعیین مکان مراکز توزیع (PODs) و تخصیص آن به نقاط تقاضا در شرایط پس از بحران توسعه دادند. در مدل آن‌ها فرض شده بود که نقاط تقاضا بتوانند توسط چندین مرکز توزیع پوشش داده شوند. آن‌ها مسئله خود را باهدف حداقل کردن هزینه‌های احداث، تدارکات و محرومیت (مانند عدم دسترسی برخی نقاط تقاضا به منابع حیاتی) مدل‌سازی کردند. آن‌ها جهت حل مدل از الگوریتم B-OA استفاده کردند.



تصویر (۱): مقایسه نوع کالاهای موردنظر در شرایط بحرانی

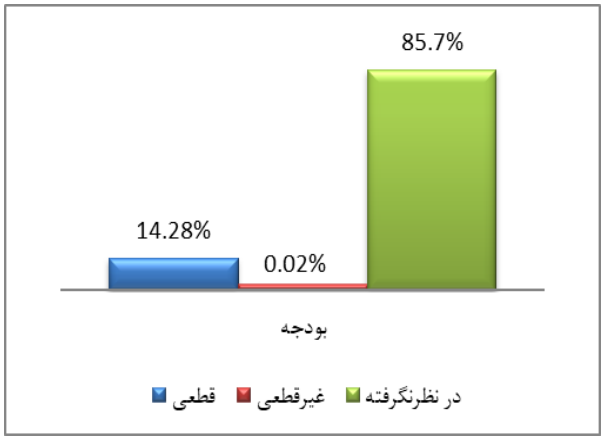
همان‌طور که در تصویر ۱ نشان داده شده است، بیش از ۸۵ درصد تحقیقاتی که از سال ۲۰۱۲ تا اکنون درزمینه موضوع بحران انجام‌شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نوع کالاها را عادی در نظر گرفته‌اند. درصورتی‌که مواد غذایی جزء کالاهای ضروری امدادی و فاسدشدنی هستند. درنتیجه این موضوع یکی از شکاف‌های تحقیقاتی محسوب می‌شود.



تصویر (۲): مقایسه سطوح تصمیم‌گیری در تحقیقات پیشین

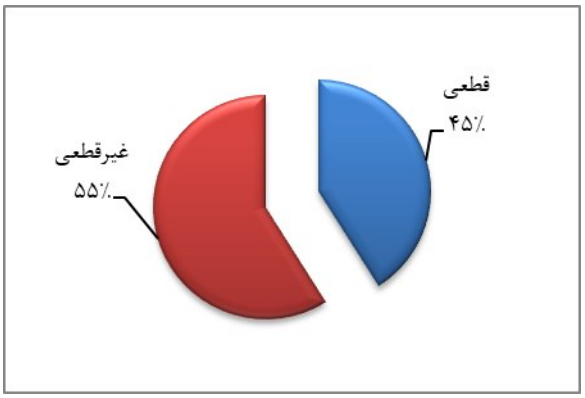
مدیریت عملیات امداد بشردوستانه بازیگران زیادی را درگیر می‌کند که از منظر فرهنگ، اهداف، علایق، تعهدات، ظرفیت و همچنین مهم‌تر از همه تخصص باهم متفاوت هستند [۲۴]. ازاین‌رو هر یک از بازیگران نقش و وظیفه متفاوتی را در مدیریت بحران دارند. در بسیاری از مقالاتی که در این پژوهش بررسی شدند (حدود ۸۸٪ مقالات)، تنها یک تصمیم‌گیرنده برای برنامه‌ریزی مسئله خود در نظر گرفتند که تصمیمات مربوط به مکان‌یابی تسهیلات، کنترل موجودی یا تخصیص منابع را اتخاذ می‌کند؛ اما در دنیای واقعی سازمان‌های مختلفی در مدیریت بحران نقش داشته که وظایف متفاوتی دارند و ضروری است که هماهنگی‌های لازم جهت تبادل اطلاعات و ایجاد ارتباط هماهنگ در تصمیمات برقرار شود. به این نوع برنامه‌ریزی، چندسطحی گفته می‌شود. طبق مقالات مرور شده، همان‌طور که در تصویر ۲ نیز مشخص است، این موضوع جزء شکاف‌های تحقیقاتی محسوب می‌شود و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

تصویر (۳): مقایسه عدم‌قطعیت و قطعیت در بودجه در تحقیقات پیشین



عدم‌قطعیت، یکی از شاخص‌های مهم در مدیریت بحران است و تقریباً می‌توان گفت در تمام پارامترهای فاجعه در واقعیت عدم‌قطعیت وجود دارد. در این تحقیق سعی شده است که تحقیقات پیشین که درزمینه مدیریت بحران انجام‌شده‌اند، ازنظر عدم‌قطعیت در پارامترهای بودجه و تقاضا مورد بررسی قرار گیرند. تصویر ۳ نشان می‌دهد که اکثر مقالات مسئله بودجه را در تحقیقات خود در نظر نگرفته و فرض کرده‌اند که منابع مالی به‌اندازه کافی و همواره در دسترس است؛ اما در واقعیت ممکن است این‌گونه نباشد؛ زیرا مسئلهٔ بررسی کسری و مازاد بودجه یکی از مسائل چالش‌برانگیز پیش روی سازمان‌ها است. دراین‌بین تنها ۱۴/۳ درصد از تحقیقات بودجه را در مدل خود اعمال کرده‌اند که ۰/۰۲ درصد از آن‌ها پارامتر بودجه را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته است و مابقی آن را قطعی فرض کرده‌اند. عدم‌قطعیت در تقاضا نیز یکی از موضوعات مورد بررسی در این تحقیق است.

تصویر (۴): مقایسه قطعیت و عدم‌قطعیت در تقاضا در تحقیقات پیشین



همان‌طور که در تصویر ۴ نیز مشخص است، بیش از نیمی از مقالات تقاضا را غیرقطعی در نظر گرفتند. یکی از مسائلی که در شرایط بحران دنیای واقعی، با آن درگیر هستیم مسئله عدم‌قطعیت در تقاضا است که ازاین‌رو این شرایط در این تحقیق منظور گردیده است. پس از بررسی تحقیقات سال‌های اخیر (سال‌های ۲۰۱۲ به بعد) عدم‌قطعیت در بودجه و تقاضا، برنامه‌ریزی چندسطحی و فرض فاسدشدنی بودن کالاها جزء شکاف‌های تحقیقاتی شناخته‌شده است و سعی بر این است که این شکاف‌ها پوشش داده شود؛ بنابراین در این پژوهش یک مدل مکان‌یابی، تخصیص و موجودی در شرایط بحران توسعه داده شده است. فرض شده است فاجعه اتفاق افتاده زمین‌لرزه و هدف مسئله حداقل کردن کل هزینه‌های موجود است. در این مدل که برای فاز پس از بحران نوشته‌شده است، مکان بهینه احداث انبارهای محلی از بین نقاط بالقوه، مقدار بهینه خرید کالاها و متغیرهای موجودی تعیین‌شده‌اند. تقاضا و بودجه به‌صورت غیرقطعی تحت سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شده است. همچنین فرض شده است کالاهای امدادی شامل کالاهای فاسدشدنی مانند غذا و دارو نیز هستند. به‌این‌ترتیب یک نوع سیاست کنترل موجودی در نظر گرفته‌شده است که جهت جلوگیری از فساد کالاها، آن‌ها را در دوره‌های مشخص‌شده‌ای با صرف هزینه‌ای از انبار خارج کند. درنهایت نیز برنامه‌ریزی تک‌سطحی و چندسطحی (دوسطحی) در این مدل مورد مقایسه قرار گرفته است

تعریف مسئله و مدل‌سازی

هنگام وقوع یک حادثه تقاضا برای کالاهای اضطراری افزایش می‌یابد، لذا مسئولین در سازمان‌های بشردوستانه نیاز به تهیه به‌موقع این کالاها و کنترل و مدیریت موجودی آن‌ها به‌منظور استفاده بهینه با کمترین هزینه و بیشترین بهره‌وری دارند. مسئله مکان‌یابی تسهیلات در سطح استراتژیک طراحی یک شبکه زنجیره تأمین قرار دارد که به دنبال تعیین تعداد تسهیلات موردنیاز و مکان قرارگیری آن‌ها است. مدیریت و کنترل موجودی در سطح تاکتیکی قرار دارد که به دنبال مکان و مقدار کالای موردنیاز برای نگهداری با اهدافی همچون کمترین هزینه، بیشترین پاسخگویی و... است. در رویکردهای سنتی مسائل مربوط به هر سطح به‌صورت جداگانه بررسی می‌شدند؛ اما در سال‌های اخیر به دلیل تأثیر متقابل مسائل بر روی یکدیگر تصمیمات جدی در جهت ادغام این مسائل صورت‌گرفته است که نشان می‌دهد به مدل یکپارچه‌ای نیاز است تا فرایندهای مربوط به مدیریت بحران را به طور هم‌زمان در نظر بگیرد دراین‌بین ما به دنبال مکان‌یابی مراکز توزیع (انبارها) از بین چند نقطه بالقوه و برنامه‌ریزی موجودی کالاهای امدادی و اضطراری در شرایط بحران هستیم. مشخص است که فرض عدم‌اطمینان مالی و وجود چند سازمان تصمیم‌گیرنده مسئله را به واقعیت نزدیک‌تر خواهد کرد. در این تحقیق ما یک زنجیره تأمین بشردوستانه سه سطحی داریم که شامل یک تأمین‌کننده (انبار مرکزی)، چند توزیع‌کننده (انبار محلی) و چند نقطه تقاضا است. مکان انبار مرکزی معلوم و ظرفیت آن نامحدود است. کالاها که شامل دودسته فاسدشدنی و عادی هستند از انبار مرکزی به انبارهای محلی فرستاده‌شده و ازآنجا در مرحله آخر در اختیار نقاط تقاضا قرار می‌گیرند. مسئله، تعیین بهترین مکان برای انبارهای محلی از میان چندین نقطه کاندید و تخصیص نقاط تقاضا به آن‌ها است. باتوجه‌به اینکه برخی محصولات فاسدشدنی هستند لازم است که بهترین سیاست برای بازیابی محصولات فاسدشدنی اتخاذ گردد. به رابطه دیگر باید یک سیاست کنترل برای کالاها در انبارهای محلی در نظر گرفته شود به‌گونه‌ای که زمان باقی‌مانده محصولات را به طور مداوم چک کند و مقداری که باید حذف شود و خریداری شود تعیین گردد. بعد از تعیین مکان انبارهای محلی و طرح کنترل موجودی بسته به موقعیت و تقاضای مناطق آسیب‌دیده مدل باید بتواند بهترین برنامه توزیع را به‌منظور به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های مربوط به عملیات امدادی ارائه دهد. مدل پیشنهادی در این تحقیق شامل موارد و محدودیت‌های مربوط به‌ضرورت یافتن مکان صحیح برای انبارهای محلی و اجرای کنترل موجودی برای محصولات عادی و فاسدشدنی و همچنین طراحی یک برنامه توزیع کالاهای امدادی از طریق تدوین یک مسئله تخصیص پس از وقوع فاجعه است.

مفروضات مدل

مسئله موردنظر به‌صورت یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی تک‌هدفه مدل‌سازی شده است. وجود یک محدودیت درجه دوم باعث شده است که مدل از حالت خطی خارج شود. برای بهبود در مدل‌سازی با یک‌سری تغییرات مدل را به حالت خطی تبدیل می‌کنیم. پس ابتدا مدل غیرخطی را پیشنهاد داده سپس مراحل خطی‌سازی آن را انجام می‌دهیم.

- مسئله موردنظر یک شبکه زنجیره تأمین سه سطحی با یک انبار مرکزی (تأمین‌کننده)، چند انبار محلی (توزیع‌کننده) و چند نقطه تقاضا (نقاط تحت‌تأثیر فاجعه) است.
- کالاهای امدادی شامل دودسته کالاهای عادی و فاسدشدنی است.
- مدیریت بحران مربوط به فاز پس از فاجعه است.
- مکان انبار مرکزی و نقاط تقاضا معلوم و مکان انبارهای محلی مجهول است.
- سیاست موجودی به روش مقاله [۲۵] در نظر گرفته‌شده است. ازآنجاکه کالاهای فاسدشدنی دارای طول عمر باقی‌مانده (تاریخ انقضا) هستند، هنگام خرید این کالاها به تاریخ آن‌ها توجه کرده و برای کاهش احتمال ماندن کالا در انبار و فاسدشدن آن، کالاهایی با طول عمر کمتر از یک مقدار خاص خریداری نمی‌شوند. همچنین ازآنجاکه فاسدشدن برخی کالاها مثل کنسرو، خون و ... می‌تواند جان انسان‌ها را به خطر بیندازد و حتی محیط انبار را هم آلوده کند، قبل از اینکه تاریخ این کالاها تمام شود آن‌ها را از انبار با صرف هزینه‌ای خارج می‌کنیم.
- تقاضا و بودجه به‌صورت احتمالی در نظر گرفته‌شده‌اند.

در این مقاله سیاست تصمیم‌گیری دوسطحی در نظر گرفته‌شده است. به این صورت که تصمیم مکان‌یابی انبارها بر عهده یک سازمان و تخصیص و کنترل موجودی بر عهده سازمان دیگری قرار می‌گیرد و این دو سازمان با مشارکت و تبادل اطلاعات با یکدیگر تصمیم بهینه را اتخاذ می‌کنند.

$Min\ z = \sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S} f_{is} p_s +$ $\sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\tau_{jkst} W_{jkst} p_s + \sum_{i=1}^{I} SP_k E_{kit} + \sum_{s=1}^{S}\left(\sum_{h_k=\alpha_k}^{H_i} Q_{kits h_k}(CM_{ki}+CP_k) p_s + \sum_{h_k=1}^{\beta_i} CE_k b_{kits h_k} + \sum_{h_k=1}^{H_i}\left(CH_k I_{kits h_k} p_s + \sum_{j=1}^{J} CT_{kijts h_k} X_{ijkst h_k} p_s\right)\right)\right)\right)$ $s.t:$	(۱)
$I_{kits h_k} = 0$ $\quad \forall k,i,s,h_k,t=0$	(۲)
$X_{ijkst h_k} = 0$ $\quad \forall j,i,k,s,h_k,t=0$	(۳)
$I_{kits h_k} = I_{kit-1s h_k+1} + Q_{kits h_k} - b_{kits h_k} - \sum_{j=1}^{J} X_{ijkst h_k} p_s$ $\quad \forall k,i,s,h_k,t\neq 0$	(۴)
$I_{kits h_k} = 0$ $\quad \forall k,i,s,h_k \in \{\beta_k+1,\ldots,H_k\}, t\in\{1,\ldots,T\}$	(۵)
$Q_{kits h_k} = 0$ $\quad \forall k,i,s,h_k \in \{1,\ldots,\alpha_k\}, t\neq 0$	(۶)
$b_{kits h_k} \le I_{kits h_k}$ $\quad \forall k,i,s,h_k \in \{1,\ldots,\beta_k\}, t\neq 0$	(۷)
$\sum_{h_k=\alpha_k}^{H_k} Q_{kits h_k} \le U_{ik} y_i$ $\quad \forall k,s,i,t$	(۸)
$X_{ijkst h_k} \le g_{ij} I_{kits h_k}$ $\quad \forall i,j,k,s,h_k,t\neq 0$	(۹)
$W_{jkst} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{h_k}^{H_k} X_{ijkst h_k} = d_{jkst}$ $\quad \forall j,k,s,t\neq 0$	(۱۰)
$W_{jkst} \le \psi_{jks} d_{jkst}$ $\quad \forall j,k,s,t\neq 0$	(۱۱)
$\sum_{i=1}^{I} f_{is} y_i \le B_s$ $\quad \forall s$	(۱۲)
$g_{ij} \le y_i$ $\quad \forall i,j$	(۱۳)
$-\Delta_{pq} \le \varphi_{pt} - \varphi_{qt} \le \Delta_{pq}$ $\quad \forall p,q\in\{1,\ldots,J\}, t \quad p\neq q$	(۱۴)
$\varphi_{jt} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{s=1}^{S} W_{jkst} * p_s$ $\quad \forall j,t\neq 0$	(۱۵)
$E_{kit} = \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} d_{jkst} g_{ij} * p_s - \sum_{s=1}^{S}\sum_{h_k=1}^{H_k} I_{ijkst h_k} * p_s$ $\quad \forall k,i,t\neq 0$	(۱۶)
$X_{ijkst h_k}, W_{jkst}, E_{kit}, Q_{kits h_k}, I_{ijkst h_k}, b_{kits h_k}, \varphi_{jt} \ge 0$ $\quad \forall i,j,k,s,t,h_k$	(۱۷)
$g_{ij}, y_i \in \{0,1\}$ $\quad \forall j,i$	(۱۸)
$X_{ijkst h_k} \le g_{ij} U_{ik}$ $\quad \forall i,j,k,s,h_k,t\neq 0$	(۱۹)
$X_{ijkst h_k} \le \sum_{h_k=1}^{H_k} I_{ijkst h_k} * \rho_{iks}$ $\quad \forall i,j,k,s,h_k,t\neq 0$	(۲۰)

رابطه شماره (۱) تابع هدف مسئله است که بخش اول مربوط به هزینه‌های احداث انبارها، بخش دوم مربوط به هزینه کمبود در نقاط تقاضا، بخش سوم مربوط به هزینه کمبود در انبارها و بخش چهارم مربوط به هزینه‌های خرید و حمل کالاها از انبار مرکزی به انبارهای محلی است. بخش پنجم تا هفتم نیز به ترتیب هزینه‌های انتقال کالاها به خارج از انبار برای جلوگیری از فاسد شدگی و هزینه‌های نگهداری و حمل کالاها از انبارهای محلی به نقاط تقاضا را نشان می‌دهد. در این مدل ما لحظه $t = 0$ را لحظه وقوع حادثه در نظر می‌گیریم؛ بنابراین طبق روابط (۲) تا (۴) در آن لحظه میزان موجودی کالاها در انبارها و خرید و انتقال آن‌ها به نقاط تقاضا صفر خواهد بود. روابط (۵) و (۶) محدودیت تعادل موجودی را نشان می‌دهد که تفاوت آن‌ها در طول عمر کالاهای خریداری‌شده و انتقال‌یافته است. رابطه (۷) نشان می‌دهد که مقدار کالای انتقال‌یافته به خارج از انبار برای جلوگیری از فاسد شدگی باید کمتر از میزان موجودی آن کالا در آن دوره باشد. رابطه (۸) تضمین می‌کند که اگر انباری احداث شود، مجموع کالاهای خریداری‌شده برای آن انبار از ظرفیتش بیشتر نباشد. رابطه (۹) تضمین می‌کند درصورتی‌که یک انبار به یک نقطه تقاضا تخصیص داده شود، مقدار کالای ارسالی از آن انبار به آن نقطه بیشتر از موجودی قابل‌استفاده آن انبار نباشد. رابطه (۱۰) و (۱۱) ثابت می‌کنند کمبود در یک نقطه برابر اختلاف مقدار تقاضای آن نقطه و مقدار کالای ارسالی به نقطه است و همچنین نباید بیشتر از حد مجاز باشد. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند احداث انبارها هزینه‌ای بیش از مقدار بودجه در دسترس نداشته باشد. رابطه (۱۳) ثابت می‌کند در صورت عدم احداث یک انبار نقطه تقاضایی به آن اختصاص داده نشود. رابطه (۱۵) کمبود وزنی یک نقطه در دوره‌های مختلف را حساب می‌کند و رابطه (۱۴) نشان می‌دهد اختلاف کمبود دونقطه در یک دوره نباید از یک مقدار مشخصی تجاوز کند. در وقع این محدودیت تضمین می‌کند کمبود نقاط نزدیک به هم باشد. رابطه (۱۶) کمبود در هر انبار و روابط (۱۷) و (۱۸) انواع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند. چون این مدل ریاضی غیرخطی است، جهت حل ساده‌تر محدودیت غیرخطی را به دو محدودیت ۱۹ و ۲۰ تبدیل کرده‌ایم که نشان می‌دهد مقدار کالای ارسالی از ظرفیت و موجودی انبار بیشتر نخواهد بود.

روش حل

ازآنجاکه مسئله موردنظر از نوع مسائل NP-hard است، با بزرگ‌تر شدن سایز مسئله روش‌های حل دقیق در زمان محدود قادر به حل مسئله نخواهد بود. درنتیجه جهت حل مسائل سایز بزرگ از الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس و مسائل کوچک از نرم‌افزار گمز استفاده کرده‌ایم. شایان‌ذکر است که اگر بحران در شرایطی اتفاق افتاده باشد که دارای ابعاد کوچک باشد، استفاده از نرم‌افزار گمز که می‌تواند پاسخ بهینه را در زمان معقولی به دست آورد منطقی خواهد بود. اما بدیهی است که با افزایش ابعاد مسئله، قطعاً یافتن پاسخ بهینه در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو باتوجه‌به کلاس پیچیدگی این مسئله که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را در مسائل با سایز بزرگ برای یافتن پاسخ معقول و در زمان کم توجیه می‌کند (این موضوع در شرایط بحران نیز که واکنش سریع، بسیار لازم و ضروری است)، از الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس برای حل این دسته از مسائل استفاده می‌شود.

الگوریتم الکترومغناطیس

الکترومغناطیس شاخه‌ای از علوم فیزیک است که پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی و ارتباط این دو را باهم در نظر می‌گیرد. در نظریه الکترومغناطیس نیروها به‌وسیله میدان الکترومغناطیسی توصیف می‌شوند. درواقع در اصل انطباق، الکترومغناطیس بیان می‌دارد که نیروی واردشده بر یک نقطه از طرف نقاط دیگر رابطه معکوس بافاصله بین نقاط و رابطه مستقیمی با بار این نقاط دارد. این الگوریتم مثل اکثر الگوریتم‌های فراابتکاری یک روش مبتنی بر جمعیت است. همان‌طور که در روش ژنتیک یک جواب را معادل با یک کروموزوم در نظر می‌گرفتیم، در اینجا به هر جواب یک‌ذره باردار می‌گوییم. درواقع در این روش هر نقطه یک‌ذرهٔ بارداری در فضا فرض شده و مقدار بار آن نیز بر اساس مقدار تابع هدف آن تغییر می‌کند. درنتیجه تابع برازندگی در این الگوریتم همان بار ذره است. پس از تغییر بار هر نقطه از جمعیت برآیند نیروهای وارد بر نقاط و حرکت آن‌ها در هر تکرار مشخص می‌شود؛ مانند نیروهای الکترومغناطیس برآیند نیروی وارد بر هر نقطه از جمع برداری تمام نیروهای وارد بر آن به دست می‌آید. پس بعدازاین که جمعیت اولیه خود را به دست آوردیم کل نیروهای وارد بر هر ذره را نیز محاسبه می‌کنیم و سپس با استفاده از برآیند واردشده بر هر ذره آن ذره حرکت خواهد کرد [۲۶].

این الگوریتم شامل ۴ فاز اصلی است:

- راه‌اندازی یا همان تولید جمعیت اولیه
- جستجوی محلی (استفاده از جستجوی محلی در همسایگی‌ها برای پیداکردن بهینه محلی)
- محاسبه نیروی وارد بر هر ذره (محاسبه کل نیرویی که بر هر یک از ذرات وارد می‌شود)
- حرکت (حرکت در جهت نیروی واردشده)

در فاز یک تعدادی نقطه تصادفی با استفاده از رابطه ۲۱ از فضای مسئله انتخاب می‌شود که در آن u_k و l_k به ترتیب حد بالا و حد پایین بازه و θ عدد تصادفی بین صفر و یک است و x_k^i مقدار سلول k ام در ذره‌ی i ام است.

$$X_k^i = l_k + \theta(u_k - l_k) \qquad (۲۱)$$

مقدار تابع هدف برای هر نقطه محاسبه و بهترین نقطه ازنظر تابع هدف (برازندگی) به‌عنوان x_{best} تعیین می‌شود. طبق رابطه ۲۲ مقدار بار هر ذره q_i است، که برای تمامی ذرات (نقطه اولیه) محاسبه می‌شود. نقاطی که دارای تابع هدف بهتری هستند بار بیشتری خواهند داشت.

$$q_i = -n\frac{f(x_i) - f(x_{best})}{\sum_{k=1}^{m}\{f(x_k) - f(x_{best})\}} \qquad i = 1.2.\ldots$$

نیروی بین ذرات با استفاده از رابطه ۲۳ و پس‌ازآن بردار نیروی کل وارد بر هر ذره با استفاده از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود. هر ذره باتوجه‌به جهت و مقدار نیروی کل وارد بر آن حرکت کرده و در موقعیت جدید خود در فضای حل قرار می‌گیرد. موقعیت جدید ذره از رابطه ۲۵ به دست می‌آید که در آن α متغیر تصادفی بین (۰، ۱) است. حاصل تقسیم بردار نیروی کل وارده بر هر ذره بر اندازه آن، راستای حرکت آن ذره را مشخص می‌کند و همچنین RNG_k مقدار پارامتر حداکثر حرکت مجاز به سمت بالا و پایین را تعیین می‌کند که از رابطه ۲۶ محاسبه می‌شود [26].

$$F_{=}^{i,j}\begin{cases}\left(x_j - x_i\right)\dfrac{q_i q_j}{\left|x_j - x_i\right|^2}, & if\ f(x_j) < f(x_i)\\ \left(x_i - x_j\right)\dfrac{q_i q_j}{\left|x_j - x_i\right|^2}, & if\ f(x_i) < f(x_j)\end{cases} \quad \begin{matrix} i = 1.2.\ldots.m \\ j = 1.2.\ldots.m \end{matrix} \qquad (۲۳)$$

$$F^i = \sum_{j\neq i}^{m} F^{i,j} \quad i = 1.2.\ldots.m \qquad (۲۴)$$

$$x_i = x_i + \alpha(RNG)\frac{F^i}{|F^i|} \quad i = 1.2.\ldots.m \qquad (۲۵)$$

$$RNG_k = \begin{cases} u_k - x_k^i & \text{if } F_k^i > 0 \\ x_k^i - l_k & \text{if } F_k^i < 0 \end{cases} \quad k = 1.2.\ldots. \qquad (۲۶)$$

نحوه نمایش جواب

اولین گام در به‌کارگیری و پیاده‌سازی هر الگوریتم فراابتکاری نمایش جواب‌های مسئله است. در هر الگوریتم و برای هر مسئله نحوه نمایش جواب می‌تواند منحصر به آن الگوریتم یا مسئله باشد و این برنامه‌نویس است که باید جواب مسئله را به یک روشی کدینگ کرده و به الگوریتم بفهماند. پس‌ازآن نیز بتواند آن جواب را رمزگشایی کرده و به جواب مسئله تبدیل کند.

در این تحقیق برای الگوریتم الکترومغناطیس نحوه نمایش جواب به‌صورت تصویر ۵ در نظر گرفته‌شده است. در این مسئله نحوه نمایش جواب به‌صورت یک‌ذره باردار در نظر گرفته‌شده است که طول آن از طریق حاصل‌ضرب تعداد کالاها درمجموع تعداد انبارهای محلی و نقاط تقاضا به دست می‌آید. همچنین عدد ۱۰ و ۱۰- به‌عنوان حد پایین و بالا برای مقادیر سلول‌ها و اعداد حقیقی تصادفی بین این دو عدد به‌عنوان مقدار هر سلول به‌عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته‌شده است. نسل‌های بعدی هم طبق ساختار الگوریتم تولید می‌شوند. ازآنجاکه فضای حل مسئله موردنظر گسسته بوده و الگوریتم الکترومغناطیس ازنظر ساختاری برای مسائل پیوسته است، جهت تبدیل به جواب گسسته پس از ایجاد جمعیت اولیه ذره باردار را به تعداد کالاها و مجموع تعداد انبارها و نقاط تقاضا تغییر شکل داده و آن را به یک ماتریس تبدیل می‌کنیم سپس اعداد هر سطر را مرتب می‌کنیم تا ماتریسی شامل اعداد صحیح تولید شود. در این مرحله تعداد سطرها برابر تعداد کالاها و تعداد ستون‌ها برابر مجموع تعداد انبارهای محلی و تعداد نقاط تقاضا است. در هر سطر سلول‌ها مقادیری صحیح بین یک و مجموع تعداد انبارهای محلی و تعداد نقاط تقاضا را به خود اختصاص می‌دهند. این مقادیر اولویت انبارها در توزیع کالای موردنظر یا اولویت دریافت کالا از سوی نقاط تقاضا را نشان می‌دهند. به‌گونه‌ای که اعداد بزرگ‌تر اولویت بالاتر را نشان می‌دهند. تصویر ۵ نمونه‌ای از نحوه کدینگ جواب در الگوریتم الکترومغناطیس را نشان می‌دهد که برای مسئله‌ای با ۳ نوع کالا، ۲ نقطه تقاضا و ۲ انبار محلی تهیه‌شده است. تصویر ۶ تبدیل‌شده آرایه به ماتریس را نشان می‌دهد. نحوه تبدیل‌شدن تصویر ۵ به تصویر ۶ نیز به این صورت

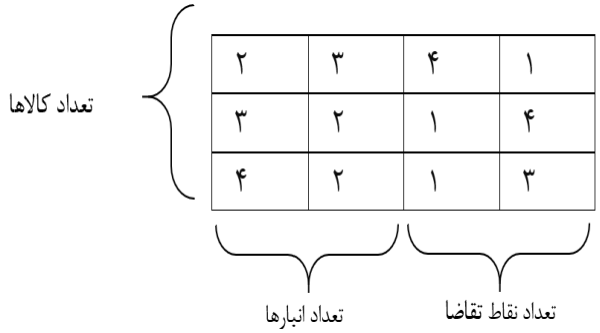
صورت است که آرایه موردنظر به یک ماتریس با تعداد سطر برابر با تعداد کالا و تعداد ستون برابر با مجموع تعداد انبارها و نقاط تقاضا تبدیل می‌شود. در نرم‌افزار متلب از تابع Reshape بدین منظور استفاده می‌شود. همچنین تصویر ۷ حالت مرتب شده ماتریس نمایش‌داده‌شده در تصویر ۶ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر ۷ نمونه‌ای از نمایش جواب را مشاهده می‌کنید، سطر اول اولویت‌های توزیع کالای یک را نشان می‌دهد. در این سطر باتوجه‌به این‌که بزرگ‌ترین عدد یعنی عدد ۴ در سلول سوم قرار داشته و این سلول متعلق به نقطه تقاضای اول است، اولویت اول توزیع کالای یک به نقطه تقاضای اول است. باتوجه‌به ماتریس هزینه‌های توزیع که جزء پارامترهای ورودی مسئله است از بین ۲ انبار موجود انباری که هزینه ارسال کالا از آن انبار به این نقطه از همه کمتر باشد جواز ارسال کالا را گرفته و آن کالا به این نقطه ارسال می‌شود. مقدار ارسال کالا نیز بر اساس ظرفیت انبار برابر یا کمتر از مقدار تقاضای آن نقطه است. به‌این‌ترتیب بر اساس اولویت هر انبار یا نقطه تقاضا کالاها توزیع می‌شوند. نحوه برنامه‌نویسی مسئله به‌گونه‌ای است که اگر انباری از بین نقاط بالقوه احداث نشده باشد مقدار سلول آن انبار برابر صفر، هزینه ارسال کالاها برابر بی‌نهایت و مقدار ارسال کالاها از این انبار نیز برابر صفر خواهد بود. پس‌ازآن تابع برازندگی محاسبه‌شده و الگوریتم تا شرط توقف رویه را ادامه می‌دهد.

۰/۲۵	۲/۱۵	۵/۲۴	-۲/۵	۴/۹۵	-۷/۵۹	-۸/۱۴	۷/۶۵	۵/۷۸	۳/۶۹	-۴/۸۷	۳/۷۸

تصویر (۵): نمونه‌ای از نحوه نمایش جواب در الگوریتم الکترومغناطیس

۰/۲۵	۲/۱۵	۵/۲۴	-۲/۵
۴/۹۵	-۷/۵۹	-۸/۱۴	۷/۶۵
۵/۷۸	۳/۶۹	-۴/۸۷	۳/۷۸

تصویر (۶): آرایه تصویر ۵ تبدیل‌شده به ماتریس



تصویر (۷): حالت مرتب شده تصویر ۶

شرط توقف الگوریتم

مراحل تکرار الگوریتم‌ها و تولید نسل جدید تا زمان برقرارنشدن شرط توقف ادامه می‌یابد. شرط توقف در الگوریتم‌ها می‌تواند یکی از موارد زیر باشد:

- رسیدن به حداقل قابل‌قبولی از پاسخ goal
- تعداد تکرار
- زمان
- همگرایی

در این تحقیق شرط توقف الگوریتم تعداد تکرار تولید نسل جدید در نظر گرفته‌شده است.

حل مسئله

چندین مسئله فرضی در ابعاد کوچک و متوسط در نرم‌افزار گمز ورژن ۲۴.۱.۳ توسط سیستم‌عامل ۵ هسته‌ای با حافظه ۴ گیگ حل‌شده‌اند که اطلاعات مربوط به سایز مسئله و نتایج مربوط به مقدار تابع هدف و زمان حل و تعداد انبارهای احداث‌شده در جدول ۲ ارائه‌شده است. مقدار کالاهای اختصاص‌یافته به نقاط تقاضا از انبارهای محلی نیز برای ۳ مسئله اول در جدول ۳ نشان‌داده‌شده است. شرط توقف نرم‌افزار نیز محدودیت زمانی ۲۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته‌شده است. . همان‌طور که از جدول ۲ استنتاج می‌شود با افزایش تعداد انبارها و نقاط تقاضا سایز مسئله بزرگ‌تر شده و مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد، همچنین مسئله پیچیده‌تر می‌شود به‌گونه‌ای که سایزهای بالاتر با نرم‌افزار گمز در زمان محدود قابل‌حل نیست. . در مسئله شماره ۲ تعداد نقاط تقاضا ۲ و انبارهای کاندید ۳ است. به عبارتی می‌خواهیم با سه انبار که ظرفیت محدودی هم دارند، دونقطه تقاضا را پوشش دهیم. پس از حل مسئله متوجه می‌شویم که انبارهای ۱ و ۲ پاسخگوی نیاز هر دونقطه هستند و نیازی به احداث انبار سوم نیست؛ اما در مسئله سوم که یک واحد به تعداد نقاط تقاضا افزوده می‌شود دیگر دو انبار اول توانایی پاسخگویی به نیازهای همه نقاط را ندارند، به همین دلیل انبار سوم نیز باید احداث

شود. میزان کالای ارسال‌شده در دوره‌های مختلف، تحت سناریوهای مختلف و با طول عمرهای متفاوت، از انبارها به این نقاط تقاضا در جدول شماره ۳ نشان‌داده‌شده است.

سناریوها

بر اساس مقاله رضایی ملک و همکاران (۲۰۱۶) بزرگی زمین‌لرزه در سه بازه کمتر از ۶ ریشتر، بین ۶ تا ۸ ریشتر و بیشتر از ۸ ریشتر در نظر گرفته‌شده است که احتمال وقوع آن‌ها به ترتیب ۰٫۳، ۰٫۵ و ۰٫۲ است. همچنین ما در این مقاله ساعات شبانه‌روز را به دودسته استراحت و خواب و ساعات کاری تقسیم‌بندی می‌کنیم که به ترتیب ۸ و ۱۶ ساعت از شبانه‌روز را به خود اختصاص می‌دهند. اهمیت این تقسیم‌بندی ازآن‌جهت است که سرعت واکنش به زمین‌لرزه از سوی انسان در زمان خواب‌وبیداری متفاوت است درنتیجه میزان خسارات احتمال نیز متفاوت خواهد بود. براین‌اساس ۶ سناریو مختلف با احتمالات متفاوت مدنظر قرار می‌گیرد که احتمالات هریک در جدول ۱ محاسبه و نشان‌داده‌شده است.

به طور مثال احتمال سناریو اول که مربوط به زلزله با بزرگی کمتر از ۶ ریشتر در زمان خواب یا استراحت است به‌صورت رابطه ۲۷ محاسبه‌شده است.ازآنجاکه مسئله موردنظر مربوط به فاز پس از بحران است، سناریوها برای پس‌لرزه‌های احتمالی در نظر گرفته‌شده‌اند.

$$p_1 = \left(\frac{8}{24}\right) \times 0{,}3 = 0{,}1 \quad (27)$$

	۶		بین ۶ تا ۸		۸	
زمان	استراحت	کار	استراحت	کار	استراحت	کار
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶
احتمال	۰/۱	۰/۲	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۱۳

جدول (۱): احتمال وقوع سناریوها

حل مسائل کوچک و متوسط

ازآنجاکه مسئله موردنظر از نوع مسائل Np-Hard است و در زمان چندجمله‌ای در ابعاد بزرگ‌تر قابل‌حل نیست، چندین مسئله کوچک را با نرم‌افزار گمز حل کردیم. با بزرگ‌تر شدن سایز مسئله، نرم‌افزار گمز در زمان محدود قادر به حل مسئله در زمان محدود نخواهد بود، به‌طوری‌که حتی با دو انبار محلی و دونقطه تقاضا، وجود شش سناریویی که فرض کردیم، باعث می‌شود نرم‌افزار گمز نتواند در زمان کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه مسئله حل کند. به همین دلیل تنها دو سناریو با احتمالات ۰٫۲۵ و ۰٫۷۵ را برای مسائل مختلف در نظر گرفته‌ایم و تعدادی مسئله کوچک و متوسط را حل کرده و نتایج آن را در جدول ۲ نمایش داده‌ایم. جهت حل مسائل سایز بزرگ از تمامی شش سناریوی محاسبه‌شده استفاده کرده‌ایم.

مسئله	I. J	T	S	K	H_k	مقدار تابع	انبارهای احداث‌شده	زمان حل (ثانیه)
۱	۲،۲	۲	۲	۱	۲	۹۴۳۴	۱، ۲	۱
۲	۳،۲	۲	۲	۱	۲	۸۴۱۹	۱، ۲	۱۰۰۰
۳	۳،۳	۲	۲	۱	۲	۱۷۳۸۷	۱، ۲، ۳	۴۲۸
۴	۲،۳	۲	۲	۱	۲	۱۳۶۴۰	۱، ۲	۱۲
۵	۲،۴	۲	۲	۱	۳	۱۹۴۸۱	۱، ۲	۱۹۹۵
۶	۳، ۴	۲	۲	۱	۳	۱۵۵۵۰	۳،۱	۱۸۷۲
۷	۲،۲	۵	۲	۱	۲	۱۵۹۵۲	۲،۱	۳
۸	۲،۲	۵	۲	۱	۵	۱۲۲۷۲	۲،۱	۱۳

جدول (۲): نمونه مسائل حل‌شده

مسئله	سناریو	دوره	عمر باقی‌مانده	انبار	نقطه تقاضا	
					۱	۲
۱	۱	۱	۱	۱	۱۹	۳
				۲	–	۰
			۲	۱	۳۰	۶۳
				۲	–	۳۰
		۲	۱	۱	۲۸	۳۵
				۲	–	۱۹
			۲	۱	۱۹	۴
				۲	–	۰
	۲	۱	۱	۱	۱۸	۱۶
				۲	–	۰
			۲	۱	۵	۴
				۲	–	۳۰
		۲	۱	۱	۲۳	۲۴
				۲	–	۷
			۲	۱	۰	۱۷
				۲	–	-
۲	۱	۱	۱	۱	۲۸	۲۸
				۲	–	۳
				۳	–	–
			۲	۱	۱۸	۶۰
				۲	–	۸
				۳	–	–
		۲	۱	۱	۴۴	۴۵
				۲	–	۷
				۳	–	–
			۲	۱	۳	۴۵
				۲	–	۰
				۳	–	–
	۲	۱	۱	۱	۲۲	۳۰
				۲	–	۳
				۳	–	–
			۲	۱	۰	۱۴
				۲	–	۰
				۳	–	–
		۲	۱	۱	۲۲	۴۷
				۲	–	۳
				۳	–	–
			۲	۱	۰	۰
				۲	–	۳
				۳	–	-

جدول (۳): توزیع کالا از انبارها به نقاط تقاضا

مسئله	سناریو	دوره	عمر باقی‌مانده	انبار	نقطه تقاضا		
					۱	۲	۳
۳	۱	۱	۱	۱	۳۰	۱۶	۳۱
				۲	۲	۶۴	-
				۳	-	۰	۳۸
			۲	۱	۰	۵	۷۱
				۲	۱۵	۱۵	-
				۳	-	۰	۵۶
		۲	۱	۱	۴۵	۴۸	۵۳
				۲	۲	۶	-
				۳	-	۰	۴۸
			۲	۱	۰	۴۴	۵۲
				۲	۰	۱	-
				۳	-	۱	۴۳
	۲	۱	۱	۱	۹	۳۰	۲۲
				۲	۰	۲	-
				۳	-	۰	۳۴
			۲	۱	۰	۰	۰
				۲	۱۴	۱۶	-
				۳	-	۰	۲۴
		۲	۱	۱	۱۷	۲۱	۵۶
				۲	۶	۶	-
				۳	-	۰	۰
			۲	۱	۰	۰	۲۴
				۲	۰	۱	-
				۳	-	۲۰	۰

ادامه جدول (۳): توزیع کالا از انبارها به نقاط تقاضا

در جدول ۳، خط فاصله (-) نشان‌دهنده آن است که نقطه تقاضا **j** به انبار **i** اختصاص داده نشده است و مقدار۰ نشان‌دهنده آن است که نقطه تقاضا **j** به انبار **i** اختصاص داده‌شده است ولی در یک دوره یا تحت یک سناریو یا محصولی با طول عمر خاص، از این انبار به آن نقطه فرستاده نشده است. به‌طور مثال در جدول ۳ در مسئله یک نقطه تقاضای شماره ۱ به انبار شماره ۲ اختصاص داده نشده است ولی نقطه شماره ۲ به این انبار اختصاص داده‌شده با این تفاوت که در سناریو ۱ و دوره ۱، محصولی با طول عمر ۱ ارسال نشده و در همین دوره و تحت همین سناریو ۳۰ عدد از این محصول با طول عمر ۲ به نقطه شماره ۲ ارسال‌شده است.

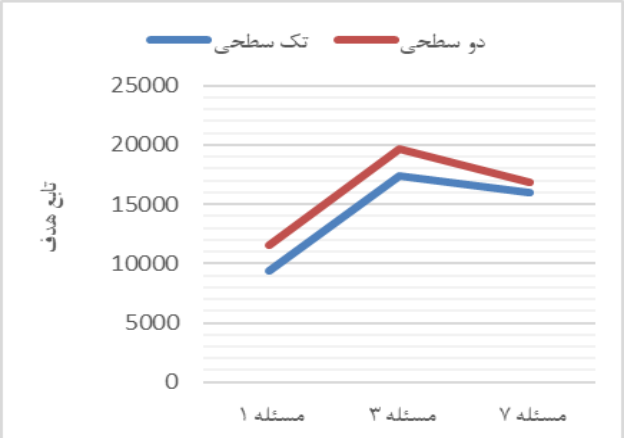
برنامه‌ریزی چند سطحی (دوسطحی)

برنامه‌ریزی چند سطحی ابزاری قوی برای مدل‌سازی و حل مسائل برنامه‌ریزی غیرمتمرکز است؛ اما پیچیدگی محاسباتی آن بسیار زیاد است. در دنیای واقعی بسیاری از سیستم‌های موجود دارای زیرسیستم‌های مختلفی هستند که آن را تبدیل به ساختار سلسله مراتبی می‌کند که تصمیم‌گیری در این ساختار ویژگی‌های خاص خود را دارد. به‌عنوان‌مثال یک شرکت را در نظر بگیرید که دارای چندین کارخانه است. مسلماً هیئت‌مدیره در رأس تصمیم‌گیری قرار دارد و با توجه به مسئولیت و اطلاعاتی که دارد تصمیمات مهم‌تری را جهت توسعه و بهینه‌سازی اهداف شرکت می‌گیرد. این تصمیمات چون در سطح بالاتری قرار دارد باید توسط مدیران کارخانه‌های تابعه اجرا شود؛ اما مدیران کارخانه‌های نیز در حوزه اختیارات خود می‌توانند تصمیماتی را اتخاذ کنند، به‌گونه‌ای که معیارهای عملکردی خود را بهینه کنند. بخش‌های مختلف کارخانه‌های نیز نسبت به مدیران چنین وضعیتی دارند.

. از طرفی این تصمیمات می‌تواند روی هدف کل شرکت و فضای تصمیم‌گیری هیئت‌مدیره اثر بگذارد و آن‌ها را مجبور به تغییر در تصمیمات خود بکند. به این نوع تصمیم‌گیری‌ها برنامه‌ریزی چند سطحی گفته می‌شود (جعفر نژاد، ۱۳۹۶). در این نوع برنامه‌ریزی تصمیم‌گیری‌ها در سطوح مختلف قرار دارند و هرکدام تنها تعدادی از متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کنند. در این تحقیق نیز ما مسئله را به برنامه‌ریزی چند سطحی تبدیل کردیم که تصمیم‌گیرنده رهبر متغیر مکان بهینهٔ انبارها را مشخص می‌کند و به‌تبع آن تصمیم‌گیرنده‌ای که در سطح پایین‌تر قرار دارد مقدار بهینه تخصیص کالاها و کنترل موجودی را با توجه به پارامترها و معیارهای عملکردی خود تعیین می‌کند. از بین مسائل حل‌شده در جدول ۲ سه مسئله را انتخاب کرده و با نرم‌افزار گمز به روش برنامه‌ریزی دوسطحی حل کردیم. نتایج تصویر ۸ نشان می‌دهد هزینه کل در برنامه‌ریزی چند سطحی افزایش می‌یابد زیرا این نوع برنامه‌ریزی پیچیدگی‌هایی دارد که با صرف هزینه به جواب بهینه می‌رسد.

سطوح	Maxiter	Npop	alpha
۱	۱۰۰	۵۰	۰/۷
۲	۱۵۰	۱۰۰	۰/۸
۳	۲۰۰	۱۵۰	۰/۹

جدول (۴): سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم الکترومغناطیس



تصویر (۸): مقایسه برنامه‌ریزی تک سطحی و دوسطحی

مسائل سایز بزرگ

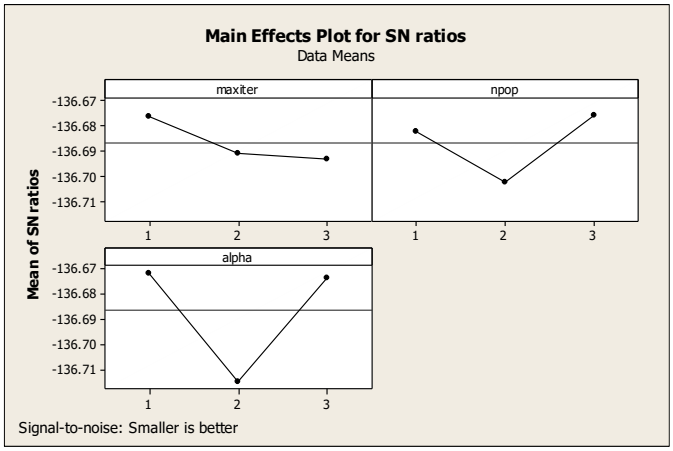
مسائل کلاس NP-hard مسائلی هستند که هیچ الگوریتم قطعی شناخته‌شده‌ای وجود ندارد که آن‌ها را در زمان چندجمله‌ای حل کند. درواقع با افزایش سایز مسئله زمان حل آن به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد که در برخی مواقع به بیش از چندین سال زمان نیاز است تا جواب بهینه مسئله پیدا شود. در این مواقع از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای یافتن جواب‌های نزدیک به جواب بهینه در زمان‌های خیلی کوتاه استفاده می‌کنیم [۲۶].در این تحقیق ما چندین مسئله نسبتاً بزرگ را توسط الگوریتم فرا ابتکاری الکترومغناطیس حل کرده و نتایج آن را در جدول ۶ نمایش داده‌ایم.

تنظیم پارامتر

اهمیت پارامترهای هر الگوریتم بهینه‌سازی، خصوصاً الگوریتم‌های فرا ابتکاری که به‌منظور ساده‌سازی حل مسائل بهینه‌سازی به وجود آمده‌اند، امری اجتناب‌ناپذیر است. مقادیر بهینه این پارامترها که عموماً به مشخصات مسئله موردنظر وابسته است، تأثیر قابل‌توجهی در عملکرد الگوریتم‌های مذکور و جستجوی بهتر فضای جواب دارد. لذا با توجه به این موضوع در این تحقیق پارامترهای هر دو الگوریتم جهت حل مسائل مختلف به روش تاگوچی تنظیم‌شده‌اند.

روش تاگوچی یک طرح عاملی کسری است که سطح‌های مورد آزمایش را از روی آرایه‌های متعامد انتخاب می‌کند. هر آرایه مجموعه مشخص از سطح‌های پارامترهایی است که باید آزمایش شوند. فاکتور مهم و کلیدی درروش تاگوچی کاهش تغییرپذیری است. تاگوچی دور شدن از این مقدار هدف را با یک تابع زیان جریمه کرده تا وجود اختلاف بین مقادیر بهینه و غیر بهینه پارامترها را کاهش دهد [۲۶].

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده‌شده است، سه سطح مختلف جهت تنظیم پارامترها با توجه به اینکه در اکثر مقالات به این صورت سطح‌بندی شده‌اند، در نظر گرفته‌ایم که نمونه‌ای از جواب طراحی آزمایش به این روش در تصویر ۹ نشان داده‌شده است. این آزمایش برای مسئله شماره ۲ که در جدول ۲ مشخص‌شده است، طراحی‌شده و پارامترهای آن به روش تاگوچی تنظیم‌شده است.در جدول ۴ Maxiter تعداد تکرار الگوریتم، Npop تعداد جمعیت،Pc و Pm به ترتیب نرخ تقاطع و جهش، beta فشار انتخاب به روش چرخه رولت و alpha شعاع حرکتی است. پس از طراحی آزمایش‌ها و تنظیم پارامتر به روش تاگوچی سطوح بهینه این پارامترها برای هر مسئله به‌دست‌آمده است. نمونه‌ای از نرخ‌های SN در این آزمایش که برای مسئله شماره ۲ انجام‌شده است در تصویر ۹ نشان داده‌شده است.هرچه مقدار نرخ SN بیشتر باشد عملکرد الگوریتم در آن مقدار بهتر خواهد بود. درنتیجه مقدار بهینه پارامترها برای هر دو الگوریتم در این مسئله در جدول ۵ نشان داده‌شده است.



تصویر (۹): نرخ SN در الگوریتم الکترومغناطیس

الگوریتم	Npop	Maxiter	alpha
الکترومغناطیس	۱۵۰	۱۰۰	۰/۷

جدول (۵): مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم‌ها

پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم الکترومغناطیس ۱۰ مرتبه ۱۰ عدد مسئله را در سایزهای مختلف توسط این الگوریتم و نرم‌افزار گمز حل کرده و نتایج حاصل از آن را در جدول ۵ ارائه کرده‌ایم. در این جدول اطلاعات مربوط به بیشترین مقدار، کمترین مقدار و میانگین مقدار تابع هدف و زمان حل مسائل در الگوریتم الکترومغناطیس و مقدار تابع هدف و زمان حل آن در نرم‌افزار گمز نشان داده‌شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود الگوریتم الکترومغناطیس در زمان بسیار کمتر از نرم‌افزار گمز به یک جواب خوب دست پیداکرده است. به‌طور مثال نرم‌افزار گمز در ۲۰۰۰ ثانیه نتوانسته است جواب بهینه مسئله شماره ۱ را به دست آورد، این در حالی است که پس از ۱۰ مرتبه حل توسط الگوریتم الکترومغناطیس، این الگوریتم به‌طور میانگین در کمتر از ۵۰ ثانیه یک جواب خوب از این مسئله را به دست آورده است. در مواقعی مانند شرایط بحرانی که زمان رسیدن به جواب مسئله بسیار حیاتی است، رسیدن به یک جواب نزدیک به بهینه در زمان بسیار کوتاه عاقلانه است. در ابعاد کوچک نیز الگوریتم الکترومغناطیس می‌تواند در زمان بسیار کمتر از نرم‌افزار گمز جواب بهینه را پیدا کند. به‌طور مثال مقدار جواب مسئله شماره ۶ در الگوریتم الکترومغناطیس و نرم‌افزار گمز یکسان و برابر ۱۳۶۴۰ به‌دست‌آمده است، درحالی‌که الگوریتم الکترومغناطیس در متوسط زمان ۲/۳۸ ثانیه و نرم‌افزار گمز در زمان ۳۰ ثانیه به جواب رسیده است.

شماره مسئله	سایز مسئله	بیشترین مقدار تابع هدف	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین زمان حل	کمترین زمان حل	میانگین زمان حل	تابع هدف	زمان حل
	I,J,K,S,T,Hk	ELA	ELA	ELA	ELA	ELA	ELA	Gams	
۱	۳,۲,۳,۲,۳ ۳	۱۱۳۷۴۳۰	۱۱۳۷۴۳۰	۱۱۳۷۴۳۰	۵۰٫۶۷	۴۹٫۲۵	۴۹٫۸۸	infeasible	۲۰۰۰
۲	۵, ۱۰, ۳, ۲, ۳ ۳	۶۸۶۴۲۷۰	۶۷۷۱۳۴۴	۶۸۲۶۸۹۳٫۴	۹۳٫۶	۸۹٫۸۶	۹۱٫۹۵۲	infeasible	۲۰۰۰
۳	۱۰, ۱۰, ۳, ۲, ۳ ۳	۷۶۵۷۹۵۹	۷۱۵۶۶۹۰	۷۳۶۰۰۶۷٫۴	۱۲۵٫۲	۱۱۴٫۱۲	۱۱۷٫۸۳۱	infeasible	۲۰۰۰
۴	۵, ۱۰, ۳, ۶, ۳ ۳	۱۴۵۷۲۲۵۸	۱۴۳۳۱۵۹۸	۱۴۴۹۰۰۵۸	۲۳۷٫۲	۲۲۶٫۸۸	۲۳۱٫۱۰۶	infeasible	۲۰۰۰
۵	۱۰, ۱۰, ۳, ۶, ۳ ۳	۲۳۵۷۸۴۶۱	۲۱۹۶۸۳۲۲	۲۲۸۶۳۹۳۸	۳۳۴٫۲	۳۱۴٫۸۹	۳۲۸٫۰۲۴	infeasible	۲۰۰۰
۶	۱۰, ۱۵, ۳, ۲, ۳ ۳	۹۳۶۹۲۹۸	۹۳۵۱۹۵۰	۹۳۶۲۴۷۷٫۲	۲۰۸٫۴۱	۲۰۲٫۶	۲۰۴٫۹۳۹	infeasible	۲۰۰۰
۷	۱۵, ۱۵, ۳, ۲, ۳ ۳	۱۲۴۶۳۹۵۲	۱۲۳۶۲۳۵۴	۱۲۴۰۴۵۱۷	۲۳۵٫۱۶	۲۲۴٫۱۵	۲۲۹٫۳۷۶۸	infeasible	۲۰۰۰
۸	۱۰, ۱۰, ۵, ۶, ۳ ۳	۳۶۳۱۲۴۸۸	۳۴۱۲۵۸۷۴	۳۵۱۰۳۰۰۲	۴۲۱٫۶۵	۳۸۶٫۱۴	۴۰۷٫۴۷۲	infeasible	۲۰۰۰
۹	۲,۳,۱,۲,۲ ۲	۱۳۶۴۰	۱۳۶۴۰	۱۳۶۴۰	۲٫۴۹	۲٫۲۹	۲٫۳۸۴	۱۳۶۴۰	۳۰
۱۰	۳,۴,۱,۲,۲ ۲	۱۵۵۵۰	۱۵۵۵۰	۱۵۵۵۰	۲۶٫۸۷	۲۵٫۱۵	۲۶٫۰۲۳	۱۵۵۵۰	۱۸۷۲

جدول (۶): نتایج حاصل از حل مسائل مختلف با الگوریتم الکترومغناطیس و نرم‌افزار گمز

نتیجه‌گیری

فاجعه یا بحران پیشامدی است که به‌صورت ناگهانی و گاهی فزاینده رخ می‌دهد و به وضعیتی خطرناک و ناپایدار برای فرد، گروه یا جامعه می‌انجامد. بحران باعث به وجود آمدن شرایطی می‌شود که نیاز به اقدامات اساسی و فوق‌العاده است. ماهیت تصادفی بودن و غیرقابل‌پیش‌بینی بحران ایجاب می‌کند که طرح‌های بحرانی جامعی به‌منظور کاهش و تسکین خطرها و نتایج ناشی از بحران ارائه شود. در راستای رسیدن به این اهداف پشتیبانی و امدادرسانی حوزه‌ای است که بهبود در آن نتایج اثربخشی را به دنبال دارد. پس از بررسی ادبیات موجود در تحقیقات پیشین مواردی از قبیل فرض وجود بودجه جهت هزینه‌های امدادرسانی، وجود عدم قطعیت در مقدار بودجه و تقاضا، برنامه‌ریزی چند سطحی در مسائل بحرانی و عدم فرض فساد کالاها در اکثر مقالات مرور شده به‌عنوان شکاف تحقیقاتی شناسایی شدند. هدف از این تحقیق پوشش دادن شکاف‌های تحقیقاتی شناسایی‌شده، است. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح را توسعه دادیم که مکان بهینه انبارهای محلی را از بین نقاط موجود یافته و تخصیص بهینه نقاط تقاضا و مقدار بهینه کالاهای ارسالی به آن نقاط را تعیین می‌کند. همچنین سیاست موجودی در نظر گرفته‌شده به‌گونه‌ای است که برای جلوگیری از فساد کالاها آن‌ها را پیش از موعد از انبار با صرف هزینه‌ای خارج می‌کند. جهت بررسی مدل پیشنهادی چندین مسئله فرضی را در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار گمز و ابعاد بزرگ‌تر را توسط الگوریتم فرا ابتکاری الکترومغناطیس حل کردیم. مقایسه‌ی میان پاسخ‌ها و زمان‌های حل برای خروجی‌های الگوریتم فراابتکاری ارائه شده و نرم افزار GAMS نشان می‌داد، در مسائل با ابعاد کوچک دقیقاً پاسخ هر دو روش یکسان بود و می‌توانستند به پاسخ بهینه دست یابند. اما برای مسائل با ابعاد بزرگ، نرم افزار گمز حتی با گذشت ۲۰۰۰ ثانیه نیز نمی‌توانست به هیچ پاسخی دست یابد، این در حالی بود که الگوریتم الکترومغناطیس ارائه شده، می‌توانست حتی در زمان کمتر از ۵۰ ثانیه به پاسخ مناسب برسد. که این موضوعات نشان‌دهنده کارایی الگوریتم ارائه شده می‌باشند.

در عملیات امدادرسانی مانند هر عملیات دیگری نیاز به تأمین هزینه‌های موجود است. ازاین‌رو فرض وجود بودجه آن‌هم در شرایط غیرقطعی مسئله را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. همچنین فرض عدم قطعیت در تقاضا نیز مسئله را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. در این تحقیق شکاف برنامه‌ریزی چند سطحی را نیز پوشش دادیم. پس از حل یک مسئله در دو حالت تک سطحی و دوسطحی و ثبت مقدار تابع هزینه آن متوجه شدیم که این فرض هزینه کل را مقداری افزایش می‌دهد. این افزایش هزینه‌ای منطقی است زیرا جهت هماهنگی‌های لازم برای تصمیم‌گیری گاهی اوقات مجبور به تغییر تصمیم خواهیم بود به همین دلیل هزینه‌ها افزایش می‌یابد. پذیرش مقدار افزایش هزینه نسبت به حالت تک سطحی بر عهده سازمان‌های مسئول است که آیا حاضر به پرداخت این هزینه در مقابل بهره‌برداری از مزایای برنامه‌ریزی چند سطحی هستند یا خیر.

سازمان‌های ذی‌ربط هنگام مواجهه با زلزله جهت تصمیم‌گیری در رابطه با تعیین مکان بهینه احداث انبارها یا چادرهای صحرایی، تعیین مقدار بهینه خرید کالاها و انبارش آن‌ها در انبارهای محلی و تخصیص بهینه این کالاها به نقاط تقاضا در شرایطی که مقدار بودجه و تقاضا قطعی نیست می‌تواند از این مدل کارا استفاده کنند. ازآنجاکه در این تحقیق سناریوها بر اساس شدت وقوع حادثه چیده شده‌اند قابل‌تعمیم به بحران‌های دیگر مانند سیل و طوفان و ... نیز هستند. همچنین ازآنجاکه هنگام وقوع یک حادثه احتمال از بین رفتن زیرساخت‌ها برای امدادرسانی زیاد است، جهت توسعه مدل پیشنهاد می‌شود مسئله مسیریابی و انتقال کالاها از راه‌های ارتباطی مختلف مانند زمینی و هوایی نیز به مسئله اضافه شود. همچنین جهت رسیدگی به آسیب‌دیدگان نیاز به بیمارستان‌های موقت با تجهیزات و شرایط مختلف احساس می‌شود که می‌توان مفروضات آن را نیز به مسئله اضافه کرد. از طرفی اهداف دیگری مانند میزان رضایت آسیب‌دیدگان و از همه مهم‌تر زمان پاسخگویی به تقاضا در این شرایط بحرانی که از اهمیت بالایی برخوردار است می‌تواند به‌عنوان اهداف دیگری به مدل اضافه شود.

منابع و مراجع

1. Naji-Azimi, Z., Renaud, J., Ruiz, A., & Salari, M. (2012). A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid. European Journal of Operational Research, 222(3), 596-605.

2. صحراییان، کیانا؛ شیرویه‌زاد، هادی و کشاورز، سیروس، (۲۰۱۸)، طراحی مدل ریاضی برای مکان‌یابی و مسیریابی توزیع کالا در پایگاه زنجیره امدادی سوانح استان فارس، *پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های مدیریت و مهندسی صنایع*، صفحات ۱۰-۱.

3. Fetter, G., & Rakes, T. (2012). Incorporating recycling into post-disaster debris disposal. Socio-Economic Planning Sciences, 46(1): 14-22.

4. Hu, Z. H., & Sheu, J. B. (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. Transportation Research Part B: Methodological, 55: 118-141.

5. بزرگی امیری، علی؛ کبیری، مریم و نوروزی، حامد(۲۰۱۲)، بهبود فاز آمادگی زنجیره امداد در برابر بلایا: ارائه مدل تصمیم‌گیری جهت مکان‌یابی تسهیلات، مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران، *نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع*، ۱-۶.

6. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., Alinaghian, M., & Heydari, M. (2012). A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 60(1-4): 357-371.

7. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Al-e-Hashem, S. M. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. OR spectrum, 35(4): 905-933.

8. Habib, M. S., & Sarkar, B. (2017). An integrated location-allocation model for temporary disaster debris management under an uncertain environment. Sustainability, 9(5): 716.

9. Onan, K., Ülengin, F., & Sennaroğlu, B. (2015). An evolutionary multi-objective optimization approach to disaster waste management: A case study of Istanbul, Turkey. *Expert Systems with Applications*, 42(22): 8850-8857.

10. Paul, J. A., & MacDonald, L. (2016). Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of unexpected disasters. European Journal of Operational Research, 251(1): 252-263.

11. Boonmee, C., Naotaka, I., Takumi, A., & Mikiharu, A. (2016). Multi-model optimization for shelter-site selection: A case study in Banta municipality, Thailand. Proc. of Infrastructure Planning in Japan Society of Civil Engineers, 53: 2175-2181.

12. Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2018). Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31: 902-917.

13. Lorca Gálvez, Á. H., Çelik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2017). An Optimization-Based Decision-Support Tool for Post-Disaster Debris Operations.

14. Yu, W. (2020). Reachability guarantee-based model for pre-positioning of emergency facilities under uncertain disaster damages. International journal of disaster risk reduction, 42: 101335.

15. Oksuz, M. K., & Satoglu, S. I. (2020). A two-stage stochastic model for location planning of temporary medical centers for disaster response. International Journal of Disaster Risk Reduction, 44:101426.

16. Rabbani, M., Manavizadeh, N., Samavati, M., & Jalali, M. (2015). Proactive and reactive inventory policies in humanitarian operations. Uncertain Supply Chain Management, 3 (3): 253-272.

17. Tofighi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. European Journal of Operational Research, 250(1): 239-250.

۱۸. گل محمدی، سجاد و ماهوتچی، مسعود، (۲۰۱۷)، توسعه یک مدل تصادفی برای ایجاد یک شبکه امدادرسانی پس از بلایای طبیعی: مطالعه موردی: زلزله احتمالی در شهر تهران، نشریه مهندسی صنایع، سال ۵۱، شماره ۴، صفحات ۴۱۷-۴۳۳.

19. Hu, S. L., Han, C. F., & Meng, L. P. (2017). Stochastic optimization for joint decision making of inventory and procurement in humanitarian relief. Computers & Industrial Engineering, 111: 39-49.

20. Tavana, M., Abtahi, A. R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre-and post-disaster management considerations. Socio-Economic Planning Sciences, 64: 21-37.

21. Baharmand, H., Comes, T., & Lauras, M. (2019). Bi-objective multi-layer location–allocation model for the immediate aftermath of sudden-onset disasters. *T*ransportation Research Part E: Logistics and Transportation

22. Celik, E., Aydin, N., & Gumus, A. T. (2016). A stochastic location and allocation model for critical items to response large-scale emergencies: A case of Turkey. An international journal of optimization and control: theories & applications (IJOCTA), 7(1): 1-15.

23. Loree, N., & Aros-Vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 116: 1-24.

۲۴. جعفر نژاد، احمد؛ هاشمی پطرودی، حمید و طلایی، حمیدرضا، ۱۳۹۶، رویکردهای نوین در مدیریت زنجیره تأمین، نشر نگاه دانش، تهران،

25. Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. Computers & Industrial Engineering, 94: 201-215.

۲۶. بهنامیان، جواد، (۱۳۹۵)، حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده: روش‌ها و الگوریتم‌ها، مرکز نشر دانشگاه بوعلی سینا، همدان.