مدل لجستیک امدادرسانی برای کاهش تلفات پس از زلزله در ابعاد بسیار بزرگ و واقعی

مرتضی احمدی*- کارشناس ارشد، مهندسی صنایع- لجستیک و زنجیره‌ی تأمین، دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، mortezaahmadi@aut.ac.ir

عباس سیفی- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علیرضا قرهی- کارشناس ارشد، مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی- مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

با نگاهی به حوادث طبیعی چند دهه‌ی اخیر به روشنی در می‌یابیم که بروز بلایای طبیعی موجب به وجود آوردن هزینه‌های مالی و انسانی سنگین برای دولت‌ها و جوامع می‌شود و روز به روز نگرانی‌ها را در این زمینه افزایش می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌هایی که در هر عملیات امدادرسانی صورت می‌پذیرد و تقریباً ۸۰ درصد حجم کل فعالیت‌ها را شامل می‌شود، لجستیک است. لجستیک امدادرسانی که در چند سال اخیر مطرح شده است، می‌کوشد تا با استفاده از مدل‌های رایج در لجستیک تجاری و در نظر گرفتن شرایط خاص و ویژه‌ای همچون تقاضای نامشخص، دسترسی نداشتن به اطلاعات دقیق در شرایط پس از بحران، خراب شدن و از بین رفتن مسیرهای حمل و نقل شهری و برون شهری و محدود بودن زمان امدادرسانی در صورتی که حجم فعالیت‌ها و هماهنگی‌های مورد نیاز بسیار بالا و فشرده است، تا حد امکان تلفات انسانی را کاهش دهد. در این پژوهش یک مدل لجستیک امدادرسانی با رویکرد برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح (MINLP) با در نظر گرفتن خرابی مسیرهای حمل و نقل شهری پس از وقوع زلزله، زمان استاندارد و بین‌المللی امدادرسانی و استفاده از داده‌های برخط حاصل شده از نظام اطلاعات مکانی (GIS)، برای مکان‌یابی مراکز توزیع محلی کالاهای امدادی و همچنین مسیریابی وسایل حمل و نقل ارائه شده است. در طراحی مدل سعی شده است تا حد ممکن عوامل حیاتی دخیل در لجستیک امدادرسانی مورد توجه قرار گیرد. سپس مدل ارائه شده در مقیاس بزرگ و واقعی و با استفاده از داده‌های برگرفته از نظام اطلاعات مکانی، به صورت یک مطالعه‌ی موردی پیاده‌سازی شده و نتایج آن به صورت کامل ارائه شده است. برای حل این مدل در شرایط واقعی از روش جستجوی همسایگی متغیر که برای اولین بار برای یک مدل لجستیک امدادرسانی ارائه شده، بهره گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: *لجستیک امدادرسانی، خرابی شبکه‌ی حمل و نقل، مکان‌یابی- مسیریابی، جستجوی همسایگی متغیر، نظام اطلاعات جغرافیایی.*

A humanitarian logistics model to minimize losses aftermath of an earthquake in large-scale and actual size

Morteza Ahmadi*[1], Abbas Seifi[2], Alireza Gharahi[3]

Abstract

In recent decades, natural disasters imposed financial and humanitarian costs to the governments and societies. One of the most important activities which is done in every relief operation and encompass roughly 80 percent of all activities is logistics operations. Thus, a new area and subject with title of humanitarian logistics are stated in literature in recent years. Humanitarian logistics aims to minimize loss of lives by using common models in commercial logistics and considering specific situation and issues such as stochastic demand, lack of precise information aftermath of a crisis, transportation network failure, and very short and limited relief time. This study aims to utilize a mix integer linear humanitarian logistics model. Transportation network failure aftermath of an earthquake, standard relief time and online datawere obtained by the geographic information systems (GIS).These data were used in the model to locate distribution centers of relief supplies. Moreover, this study indicated vehicle routing for the response time. Then, the developed model was implemented in San Francisco city as a real life and large-scale case study by GIS's data. To solve the model, variable neighborhood search (VNS) was used. Variable neighborhood search (VNS) is used for the first time to solve a large-scale humanitarian logistics model in this study.

Keywords: *Humanitarian logistics, Transportation network failure, Location-routing, Variable neighborhood search, GIS.*

1 M.Sc graduated. industrial engineering - logistics and supply chain engineering, Faculty of industrial engineering and management systems, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran, email: mortezaahmadi@aut.ac.ir

2 Assoc. prof., Faculty of industrial engineering and management systems, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

3 M.Sc Graduated. department of industrial engineering, faculty of engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

مقدمه

بلایای طبیعی همچون زلزله، سیل، طوفان و ... تلفات مالی و انسانی زیادی را همه ساله به دولت‌ها و جوامع مختلف وارد می‌کنند. بر اساس گزارش سال ۲۰۰۹ بلایای جهان، بیش از ۷۰۰۰ بحران بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸ به وقوع پیوسته است. خسارات انسانی حاصل از این بلایا ۱/۲ میلیون دلار بوده است که هزینه‌ی آن‌ها از یک تریلیون دلار نیز افزون‌تر شده است. گفتنی است که تعداد بلایای طبیعی و تعداد افرادی که گرفتار این بلایای طبیعی شده‌اند، در سال‌های اخیر بسیار افزایش یافته است. میانگین تعداد بحران‌های سالیانه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴، ۵۵٪ بیشتر از میانگین سالیانه بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۹ بوده است [۱]. جدول ۱، پنج حادثه‌ی طبیعی را نمایش می‌دهد که بیشترین میزان تلفات انسانی آن بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ بوده است.

یکی از مسائل مهمی که در سال‌های اخیر در تمامی کشورها و از جمله ایران بدان پرداخته شده است، مسئله‌ی مدیریت بحران است. مدیریت بحران را می‌توان قانون و قاعده‌ای برای جلوگیری کردن و یا مواجه شدن با ریسک‌های احتمالی وقوع هر بحران طبیعی و غیرطبیعی تعریف کرد. در واقع مدیریت بحران مجموعه‌ای از فرایندها را قبل، حین و پس از وقوع هر بحران پیش‌بینی و برنامه‌ریزی می‌کند تا بتواند تا حد ممکن از تلفات مالی و انسانی هر بحران جلوگیری کند و یا آن‌ها را کاهش دهد. هر نظام مدیریت بحران شامل یک چرخه با چهار فاز مختلف است که عبارتند از: پیشگیری و کاهش[۱]، آمادگی[۲]، پاسخ[۳] و بهبود[۴]. محاسبات انجام شده در فاز پیشگیری با هدف جلوگیری از تبدیل شدن یک خطر به فاجعه یا بحران یا کاهش آثار مهلک آن انجام می‌شود. این فاز از مدیریت بحران با سه فاز دیگر در نیاز به برنامه‌ریزی بلندمدت و سرمایه‌گذاری بالا متفاوت است. به خاطر ماهیت ارزیابی‌های پیشگیرانه، این مرحله یکی از مهم‌ترین فازهای چرخه‌ی مدیریت در مقابل تأثیرات بحران است. در فاز آمادگی برای پاسخگویی مناسب در هنگام وقوع زلزله، برنامه‌ها و راهکارهایی پیش‌بینی و طراحی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به مواردی همچون تعیین محل استقرار مراکز توزیع، میزان نگهداری و ذخیره‌ی کالاهای امدادی و نحوه‌ی برقراری ارتباط پس از وقوع بحران اشاره کرد. در فاز پاسخ نیاز است که بلافاصله بعد از وقوع بحران، نیروهای امدادی، کالاهای امدادی و تجهیزات مورد نیاز برای امدادرسانی حادثه‌دیدگان به مناطق حادثه‌دیده اعزام و تقسیم شوند. با توجه به میزان و شدت بحران، واحدهای پزشکی، نیروهای نظامی و انتظامی، آتش‌نشان‌ها و گروه‌های جستجو به محل حادثه اعزام می‌شوند. در مرحله‌ی بعد گروه‌های امدادی مختلف کالاهای امدادی اساسی همچون غذای خشک، آب آشامیدنی، پوشاک و پتو را به محل حادثه اعزام می‌کنند. آماده کردن یک برنامه‌ی مؤثر برای پاسخگویی مناسب در این فاز موفقیت نظام مدیریت بحران را در بر خواهد داشت. هدف اصلی فاز بهبود برگرداندن شرایط عادی و بهبود وضعیت پس از بحران است. در واقع این فاز به دنبال تأمین نیازهای درجه‌ی دوم به بعد حادثه‌دیدگان است. لجستیک هسته‌ی اصلی هر عملیات امدادرسانی است. به‌ویژه لجستیک امدادرسانی توجه زیادی را در سال‌های اخیر به

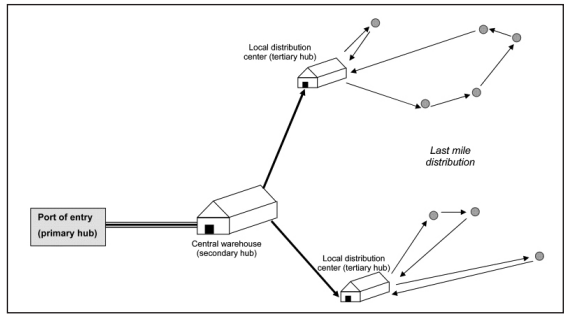
جدول ۱: پنج حادثه‌ی طبیعی با بیشترین تعداد تلفات انسانی

نوع	تعداد بلایای طبیعی	سال	کشور	تلفات انسانی	تعداد افراد حادثه‌دیده	خرابی (میلیون دلار)
زلزله	۷۵۶	۲۰۱۰	هائیتی	۲۲۲۵۷۰	۳۷۰۰۰۰۰	۸۰۰۰
		۲۰۰۴	اندونزی	۱۶۵۷۰۸	۵۳۲۸۹۸	۴۴۵۱/۶
		۲۰۰۸	چین	۸۷۴۷۶	۴۵۹۷۶۵۹۶	۸۵۰۰۰
		۲۰۰۵	پاکستان	۷۳۳۳۸	۵۱۲۸۰۰۰	۵۲۰۰
		۱۹۹۰	ایران	۴۰۰۰۰	۷۱۰۰۰۰	۸۰۰۰
گردباد	۲۵۱۶	۱۹۹۱	بنگلادش	۱۳۸۸۶۶	۱۵۴۳۸۸۴۹	۱۷۸۰
		۲۰۰۸	میانمار	۱۳۸۳۶۶	۲۴۲۰۰۰۰	۴۰۰۰
		۱۹۸۵	بنگلادش	۱۵۰۰۰	۱۸۱۰۰۰۰	۵۰
		۱۹۹۸	هندوراس	۱۴۶۰۰	۲۱۱۲۰۰۰	۳۷۹۳/۶
		۱۹۹۹	هند	۹۸۴۳	۱۲۶۲۸۳۱۲	۲۵۰۰
سیل	۳۱۲۰	۱۹۹۹	ونزوئلا	۳۰۰۰۰	۴۸۳۶۳۵	۳۱۶۰
		۱۹۸۰	چین	۶۲۰۰	۶۷۰۰۰	۱۶۰
		۱۹۹۸	چین	۳۶۵۶	۲۳۸۹۷۳۰۰۰	۳۰۰۰۰
		۱۹۹۶	چین	۲۷۷۵	۱۵۴۶۳۴۰۰۰	۱۲۶۰۰
		۲۰۰۴	هائیتی	۲۶۶۵	۳۱۲۸۳	

خود جلب کرده است. مؤسسه‌ی فریتز[5] که به منزله‌ی یک سازمان غیرانتفاعی در حوزه‌ی لجستیک امدادرسانی در شهر سان‌فرانسیسکو فعالیت می‌کند، تعریف جامع و منحصر به فرد زیر را برای لجستیک امدادرسانی ارائه کرده است که حاصل سالیان سال تجربه‌ی عملی این سازمان است [۲]:

«لجستیک امدادرسانی عبارت است از فرایند برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی و پایش جریان و ذخیره‌ی مؤثر و با هزینه‌ی مناسب کالا و مواد و همچنین اطلاعات مرتبط، از نقطه‌ی ارسال تا لحظه‌ی رسیدن آن‌ها به دست مصرف‌کنندگان برای کاهش و التیام درد افراد حادثه‌دیده. این عملیات دامنه‌ای از فعالیت‌ها همچون آمادگی، برنامه‌ریزی، تدارکات، حمل و نقل، انبارداری، رهگیری و ردیابی، و ترخیص گمرکی را شامل می‌شود». در واقع فعالیت‌های شمرده شده در تعریف بالا، همگی جزو فعالیت‌های اصلی در دو فاز آمادگی و پاسخ از چرخه‌ی مدیریت بحران هستند. میزان و حجم فعالیت‌های لجستیکی در این دو فاز به حدی است که تقریباً ۸۰ درصد از فعالیت‌های امدادرسانی را شامل می‌شود [۲]. برای کاهش تلفات انسانی در یک عملیات امدادرسانی، کالاهای امدادی باید به مقدار کافی و بلافاصله بعد از وقوع زلزله توزیع شوند. یک مشکل اساسی که معمولا بعد از وقوع زلزله ایجاد می‌شود، خرابی و ویرانی بخشی از زیرساخت‌های شبکه‌ی حمل و نقل است. هنگامی که این بحران رخ می‌دهد، ممکن است درصدی از خیابان‌ها و مسیرهای موجود در شبکه‌ی شهری قابل دسترسی نباشند. این مسئله‌ی مهم مشکلات زیادی را بر سر راه ارسال و توزیع کالاهای امدادی از انبارهای محلی به مناطق حادثه‌دیده ایجاد می‌کند که با خراب کردن درصدی از مسیرهای شبکه قابلیت مدل‌سازی دارد. همچنین، نظام اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به‌منزله‌ی ابزاری برای حصول داده‌های مبتنی بر زمان واقعی جهت انجام عملیات امدادرسانی در فاز پاسخ استفاده شود. یک موضوع مهم در لجستیک امدادرسانی بر خلاف لجستیک تجاری، زمان استاندارد امدادرسانی است. یک مدل لجستیک امدادرسانی مؤثر و کارا باید با تمرکز بر ارسال و توزیع کالاهای امدادی مانند آب، غذا و دارو در زمان استاندارد امدادرسانی، موجب کاهش تلفات انسانی شود. علاوه بر این، باید مقادیر کالاهای امدادی ارسالی به نقاط حادثه‌دیده دقیق باشد و بر اساس میزان کالای مورد نیاز هر انسان بعد از وقوع بلایای طبیعی که در استاندارد آمده است مشخص شود. هرگونه نقص و تجاوز از زمان استاندارد امدادرسانی یا میزان کالاهای امدادی مورد نیاز، برابر است با افزایش تلفات انسانی. بنابراین باید جریمه‌ی زیادی برای تقاضاهای برآورده نشده در نظر گرفته شود.

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه‌ی لجستیک امدادرسانی صورت پذیرفته است. بسیاری از پژوهشگران به طور خاص بر برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تمرکز کرده‌اند. هاله و موبرگ[6] [۳] مدلی را ارائه کرده‌اند که زنجیره‌ی تأمین امدادرسانی را برای مقابله با بحران آماده می‌کند. مدل آن‌ها یک ابزار بسیار مناسب برای انتخاب اماکن امدادرسانی ارائه می‌دهد. مدل ایمن انتخاب مکان امدادرسانی ارائه شده، نظرات آژانس‌های مدیریت بحران، انتظارات خدمت‌رسانی و علم مکان‌یابی را شامل می‌شود. پتیت و برسفورد[7] [۴] با استفاده از یافته‌های مدل‌های ارائه شده برای پاسخگویی در موارد نظامی و غیرنظامی، مدل کاملی را جهت برآورد نیازمندی‌های لجستیکی در مواقع بحران ارائه داده‌اند. بیمن و کوتلبا[8] دو مقاله با رویکرد مدیریت موجودی در لجستیک امدادرسانی ارائه کرده‌اند. در اولین مقاله، بیمن و کوتلبا [۵] سه راهبرد مدیریت موجودی را که به‌منزله‌ی فاز پاسخگویی در سودان پیاده‌سازی شده است ارائه و آزمایش کردند. از سه مدل ارائه شده، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل ریاضی ارائه شده دارای پایداری بیشتر است. در مقاله‌ی دوم، بیمن و کوتلبا [۶]، یک مدل انبارداری از قبل تعبیه شده برای پاسخگویی به یک بحران ارائه کرده‌اند. ویژگی‌های این مدل عبارتند از: تک کالایی، مستقل بودن و پیوسته بودن تقاضاها. چنگ[9] و همکاران [۷] دو مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تصمیم‌گیری در مورد توزیع منابع در حین بحران ارائه کرده‌اند. آن‌ها اثربخشی و کارایی مدل خود را با استفاده از داده‌های سیل تایوان اثبات کرده‌اند. لدری و تاسکین[10] [۸] با استفاده از مدل روزنامه‌فروش، سطح موجودی مناسب رابرای پاسخگویی تقاضا در هنگام بحران ارائه کرده‌اند. بالسیک و بیمن [۱] با مطالعه بر مسئله‌ی مکان‌یابی، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین تعداد و موقعیت مراکز توزیع و همچنین میزان کالاهای از قبل تعبیه شده در هر یک از این مراکز توزیع ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده، گونه‌ای از مدل حداکثر پوشش است که مسئله‌ی مکان‌یابی را با مسئله‌ی موجودی یکپارچه می‌کند. از ویژگی‌های مدل آن‌ها می‌توان به چند کالایی بودن، استفاده از محدودیت‌های بودجه و محدودیت ظرفیت اشاره کرد. در واقع این پژوهش از اولین پژوهش‌هایی است که به بحث مکان‌یابی مراکز توزیع برای پاسخگویی مناسب در زمان بحران می‌پردازد. جهت توسعه‌ی پارامترهای مدل در این پژوهش از داده‌های ۶۳۹ بحران بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۶ که مرکز داده‌ی مؤسسه‌ی ملی ژئوفیزیک فراهم کرده است استفاده شده است. نتایج حاصل شده تأثیر سرمایه‌گذاری بر موضوع امدادرسانی را قبل و بعد از وقوع بحران بر عملکرد نظام امدادرسانی نمایش می‌دهد. بالسیک و همکاران [۹] یک مدل توزیع برای پاسخگویی بعد از وقوع بحران ارائه کرده‌اند. در واقع تمرکز آن‌ها بر آخرین مرحله از زنجیره‌ی امدادرسانی بوده است. این مدل توزیع عبارت است از تحویل کالاهای امدادی از مراکز توزیع محلی به حادثه‌دیدگان. بدین منظور، آن‌ها یک مدل مختلط عدد صحیح دو فازی را برای توسعه‌ی یک زمان‌بندی تحویل برای هر وسیله‌ی نقلیه ارائه کرده‌اند. تابع هدف مسئله عبارت است از کاهش هزینه‌ی حمل و نقل و حداکثر کردن سود برای دریافت‌کنندگان کالاهای امدادی. در فاز اول، مدل تمامی مسیرهای ممکن برای تحویل کالاهای امدادی را تولید می‌کند. سپس با استفاده از مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، مسیرهای با کمترین زمان سفر استخراج می‌شوند. در نهایت، مسیرهایی که دارای زمان کمتری نسبت به دوره‌ی زمانی مدنظر هستند در فهرست باقی می‌مانند. سپس در فاز دوم با استفاده از خروجی فاز اول، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای تعیین مسیرهای تحویل وسایل نقلیه در دوره‌های پیش رو و همچنین میزان کالاهای امدادی که باید با



تصویر۱: زنجیره‌ی لجستیک امدادرسانی[۹]

هر وسیله‌ی نقلیه به هر نقطه‌ی تقاضا ارسال شود تعیین می‌شود. مدل آن‌ها بر روی نمونه‌های بسیار کوچکی اجرا شده است و نتایج تغییر در هر کدام از پارامترهای مسئله برای هر کدام از این نمونه‌ها ذکر گردیده است. باربارosوگلو و همکاران [۱۰] یک مدل سلسله مراتبی چند معیاره برای برنامه‌ریزی عملیات لجستیک با بالگرد ارائه کرده‌اند. سلسله‌مراتب ذکر شده در این مقاله بدین صورت است که در مراحل بالاتر تصمیمات راهکنشی (تاکتیکی) اتخاذ می‌شود و در مراحل پایین‌تر تصمیمات مسیریابی و بارگیری گرفته می‌شود. ازدمار و همکاران [۱۱] یک مدل مسیریابی وسایل حمل و نقل در مواقع بحران ارائه کرده‌اند. برای حل این مدل از یک روش ابتکاری استفاده شده است و کارایی مدل با داده‌های به دست آمده از زلزله‌ی سال ۱۹۹۰ ایزمیت ترکیه اثبات شده است. دلاتور[۱۱] و همکاران [۱۲] در مقاله‌ای مروری، به بررسی انواع مدل‌های مسیریابی مرتبط با عملیات امدادرسانی پرداخته‌اند. اصلی‌ترین بخش یک عملیات لجستیک امدادرسانی، توزیع کالاهای امدادی برای نجات جان انسان‌هاست. از طریق مصاحبه با سازمان‌های درگیر در امدادرسانی، مرور انتشارات آن‌ها و مرور پیشینه‌ی مدل‌های پژوهش در عملیات رایج در حمل و نقل کالاهای امدادی، این مقاله تحلیل استفاده از چنین مدل‌هایی را از دید دانشگاهیان و متخصصان شاغل در این حوزه فراهم می‌کند. یی و ازدمار [۱۳] یک مدل یکپارچه‌ی مکان‌یابی- توزیع برای یکپارچه کردن حمایت‌های لجستیکی و عملیات تخلیه در مرحله‌ی پاسخ به بحران ارائه کرده‌اند. مدل جریان شبکه‌ی چند کالایی عدد صحیح مختلط آن‌ها، وسایل نقلیه را کالاهایی با مقدار عدد صحیح در نظر می‌گیرد تا همانند متغیرهای صفر و یک با آن‌ها برخورد کند. مدل‌سازی ارائه شده دارای دو مرحله است: در مرحله‌ی اول رابطه‌بندی یک مسئله با موارد پیش‌گفته شکل می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد یک الگوریتم برای تولید مسیرهای حمل و نقل و دستورالعمل بارگیری و تخلیه تولید می‌شود. ازدمار و دمیر[۱۲][۱۴] یک روش خوشه‌بندی[۱۳] سلسله‌مراتبی و مسیریابی برای یکپارچه کردن مسیریابی وسایل حمل و نقل برای فعالیت‌های بعد از بحران و در مقیاس واقعی و بزرگ ارائه کرده‌اند. این روش یک الگوریتم خوشه‌بندی چند سطحی است که گره‌های تقاضا را در هر سطح برنامه‌ریزی به گروه‌های کوچک‌تری خوشه‌بندی می‌کند. در واقع مدل ارائه شده با استفاده از یک مدل جریان شبکه به صورت سلسله‌مراتبی، ابتدا خوشه‌بندی نقاط تقاضا را انجام می‌دهد و سپس مسیریابی می‌کند. لین[۱۴] و همکاران [۱۵] یک مدل لجستیک برای تحویل کالاها به صورت اولویت‌بندی شده در عملیات امدادرسانی ارائه کرده‌اند. از ویژگی‌های مدل ارائه شده‌ی آن‌ها می‌توان به چندکالایی، چند وسیله‌ای، چند دوره‌ای، پنجره زمانی نرم، و تحویل کالا به صورت بخش بخش[۱۵] اشاره کرد. مدل‌سازی صورت گرفته برای این مسئله به صورت یک برنامه‌ریزی چند هدفه‌ی عدد صحیح است. برای اینکه مدل ارائه شده به صورتی کارا حل شود، تعداد تورهای در دسترس محدود شده‌اند. در این مقاله فرض شده است که گره‌های تقاضا از لحاظ جغرافیایی پراکنده شده‌اند و همه‌ی آن‌ها باید با یک انبار تغذیه شوند. همچنین فرض شده است که میزان کالای ذخیره شده در انبار کاملاً نامحدود است و تقاضای گره‌ها نیز قبل از برنامه‌ریزی مشخص است. کالاهای امدادی اولویت‌بندی شده‌ی متفاوتی نیاز است تا شبکه‌ی حمل و نقل آن‌ها را به نقاط تقاضا ارسال کند.

پژوهش حاضر با در نظر گرفتن زمان استاندارد امدادرسانی و جریمه برای کالاهای امدادی برآورده نشده، که مهم‌ترین موضوع در کاهش تلفات انسانی است، متفاوت از سایر پژوهش‌های بررسی شده است. علاوه بر این، مدل ارائه شده در این مقاله قابلیت در نظر گرفتن خرابی زیرساخت‌های حمل و نقل شهری بلافاصله پس از وقوع زلزله را دارد و تأثیر سناریوهای مختلف زلزله را بر تصمیمات مکان‌یابی- مسیریابی نمایش می‌دهد. همچنین، برای نشان دادن قابلیت مدل ارائه شده، یک مطالعه‌ی موردی در ابعاد بزرگ بر شبکه‌ی واقعی شهر سان‌فرانسیسکو انجام شده است.

بخش‌های مختلف این مقاله چنین است: در بخش دوم، توصیف مدل و ویژگی‌های آن به همراه مدل ریاضی ارائه می‌شود. بخش سوم به توضیح الگوریتم حل مسئله اختصاص یافته است. مطالعه‌ی موردی و تشریح جزئیات آن در بخش چهارم آمده است. نتایج محاسباتی مربوط به مطالعه‌ی موردی در بخش پنجم آورده شده است و بخش ششم شامل نتیجه‌گیری خواهد بود.

توصیف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

در این بخش سعی شده است تا مدل لجستیک امدادرسانی و ویژگی‌های آن و همچنین رویکرد مدل‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی تشریح شود. لجستیک امدادرسانی شامل فعالیت‌ها و عملیات متفاوتی می‌شود که برخی از آن‌ها قبل از وقوع بحران و برخی دیگر بلافاصله بعد از وقوع بحران مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. برنامه‌ریزی لجستیک در یک بحران شامل ارسال کالاهای امدادی چندگانه و مختلف مانند دارو، آب، غذا و تجهیزات امدادرسانی از تعدادی منبع مختلف به چندین نقطه‌ی توزیع در مراکز حادثه‌دیده به وسیله‌ی یک زنجیره با تعدادی گره‌ی میانی برای انتقال است. تصویر ۱، یک زنجیره‌ی لجستیک امدادرسانی را نمایش می‌دهد. در این مطالعه حلقه‌ی آخر این زنجیره‌ی امدادرسانی در نظر گرفته شده است که لجستیک مرحله‌ی پایانی[۱۶] خوانده می‌شود. در مدل‌های لجستیک مرحله‌ی پایانی، کالاهای امدادی از مراکز توزیع محلی به نقاط حادثه دیده ارسال می‌شوند. مسئله شامل چندین تصمیم لجستیکی مهم بلافاصله پس از وقوع زلزله است که عبارتند از: مکان مراکز توزیع محلی، میزان کالاهای امدادی که باید به مناطق حادثه‌دیده ارسال شوند، مسیریابی وسایل حمل و

نقل، تعداد وسایل حمل و نقل تخصیص یافته به هر کدام از مراکز توزیع محلی، و زمان تحویل و رساندن کالاهای امدادی. در عملیات لجستیک امدادرسانی، پاسخ ابتدایی باید در ۷۲ ساعت اولیه پس از وقوع زلزله داده شود. ۱۲ ساعت ابتدایی به‌منزله‌ی زمان استاندارد امدادرسانی شناخته می‌شود که در این زمان، دولت و سازمان‌های غیردولتی باید شرایط را ارزیابی و شروع به ارسال و تحویل کالاهای امدادی از مراکز توزیع محلی به نقاط حادثه‌دیده کنند. هرگونه تجاوز از زمان استاندارد امدادرسانی باعث ایجاد درد و رنج و فقدان افراد حادثه‌دیده می‌شود.

پس از وقوع زلزله، برخی زیرساخت‌های آسیب‌پذیر حمل و نقل مانند خیابان‌ها، پل‌ها و تونل‌ها ممکن است خراب شوند. برای مطالعه‌ی تأثیرات خرابی شبکه‌ی حمل و نقل، ما احتمال بسته شدن برخی از مسیرها را با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده به وسیله‌ی نظام اطلاعات جغرافیایی در نظر گرفته‌ایم.

فرضیات مدل لجستیک امدادرسانی ارائه شده در این مقاله به شرح زیر است:

- **تعداد مراکز توزیع محلی:** در این پژوهش فرض شده است که چندین مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع وجود دارد. اما تعداد مراکز توزیعی که باید انتخاب شوند مشخص نیست و تعداد دقیق آن‌ها را مدل مشخص می‌کند.
- **محدوده‌ی زمانی:** اطلاعات مسئله در یک محدوده‌ی زمانی بلندمدت، ثابت در نظرگرفته شده و از این رو مسئله در دسته‌ی مسائل ایستا قرار می‌گیرد.
- **فضای حل:** فضای حل گسسته است به این معنی که مکان‌یابی مراکز توزی در بین یکسری نقاط بالقوه صورت می‌پذیرد.
- **نوع تحویل:** تحویل جزئی در مسئله وجود ندارد. به عبارت بهتر تقاضای هر نقطه تنها با یک وسیله‌ی حمل و نقل برآورده می‌شود.
- **ماهیت تقاضا:** تعداد نقاط حادثه‌دیده و تقاضای همه‌ی آن‌ها از قبل مشخص است ولی به یک اندازه نیست.
- **ماهیت زمان حمل:** زمان سفر میان مراکز توزیع و نقاط حادثه‌دیده و همچنین مابین خود نقاط حادثه‌دیده برای هر سناریوی رخداد زلزله به صورت ثابت درنظرگرفته شده است.
- **ماتریس فاصله:** ماتریس فاصله‌ی بین نقاط، متقارن است. به عبارت بهتر، فاصله‌ی نقطه‌ی A از B برابر فاصله‌ی نقطه‌ی B از A است.
- **ناوگان حمل ونقل:** تعدادوسایل حمل و نقل نامشخص و ناوگان حمل ونقل همگن است.
- **ظرفیت ناوگان حمل و نقل:** ظرفیت هر کدام از وسایل حمل و نقل از قبل مشخص است.
- **هزینه‌ی ثابت ناوگان:** استفاده از وسایل حمل و نقل هزینه‌ای را به سیستم تحمیل نمی‌کند.
- **ظرفیت مراکز توزیع:** مراکز توزیع همگی یکسان و دارای ظرفیت مشابهی هستند.
- **هزینه‌ی راه‌اندازی مراکز توزیع:** همه‌ی مراکز توزیع در صورت استقرار، هزینه‌ی راه‌اندازی یکسانی را به سیستم تحمیل می‌کنند.
- **زمان استاندارد امدادرسانی:** این زمان به‌منزله‌ی یک محدودیت در زمان امدادرسانی و رساندن کالاهای امدادی به مشتریان در نظر گرفته شده که میزان آن برابر با استانداردهای بین‌المللی امدادرسانی است. رساندن کالاهای امدادی که از زمان استاندارد امدادرسانی تجاوز کند در مسئله اجازه داده نشده است.
- **سناریوهای رخ دادن زلزله و خرابی شبکه‌ی مسیرها:** در این پژوهش فرض شده است که بر اثر رخداد زلزله برخی از مسیرها و زیرساخت‌های حمل و نقل شهری دچار خرابی و غیر قابل استفاده می‌شوند. تعدادی سناریوی محتمل خرابی شبکه‌ی مسیرها در مدل‌سازی و حل در نظر گرفته شده است که بر زمان سفر تأثیرگذار خواهد بود.
- **استفاده‌ی چندباره از یک وسیله‌ی حمل و نقل:** وسایل حمل و نقل با توجه به زمان استاندارد امدادرسانی، می‌توانند بیش از یک تور را طی نمایند، به شرطی که از زمان استاندارد امدادرسانی تجاوز نکنند.
- **آغاز و پایان هر تور:** هر تور از مرکز توزیع شروع می‌شود و به آن ختم می‌گردد و هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط از یک تور و یک مرکز توزیع خدمت دریافت می‌کند.

مدل‌سازی ریاضی مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی

مدل ریاضی لجستیک امدادرسانی ارائه شده در این مطالعه، یک مدل مکان‌یابی- مسیریابی چند انباره و با استفاده‌ی متعدد از وسایل حمل و نقل است. این مدل با استفاده از مدل‌های MDLRP (Multi-depot location routing problem) ارائه شده در پژوهش وو[۱۷] و همکاران [۱۶] و پرینس[۱۸] و همکاران[۱۷]و همچنین در نظر گرفتن شرایط خاص مسئله ارائه شده است. این مدل به علت در نظر گرفتن زمان استاندارد امدادرسانی، استفاده‌ی متعدد از وسایل حمل و نقل، ظرفیت وسایل حمل و نقل و هزینه‌ی جریمه‌ی تقاضای برآورده نشده در تابع هدف، با مدل‌های مذکور متفاوت است. در ادامه ابتدا مجموعه‌ها و پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی مسئله معرفی می‌شوند، سپس متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی که در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تعریف می‌شوند. در ادامه تابع هدف مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی ارائه و در پایان نیز محدودیت‌های مسئله تعریف خواهند شد.

مجموعه‌ها

نام و شرح نماد	علامت
مجموعه کالاهای امدادی	G
مجموعه وسایل حمل و نقل	V
مجموعه‌ی تورها	K
مجموعه نقاط حادثه‌دیده (نقاط تقاضا)	J
مجموعه نقاط پتانسیل مراکز توزیع	I
مجموعه‌ی تمامی نقاط شبکه	N
مجموعه سناریوهای خرابی شبکه‌ی مسیرهای شهری	S
مجموعه محدودیت‌های خطی‌سازی	W

پارامترها

نام و شرح نماد	علامت
هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی مراکز توزیع محلی	fc
ظرفیت مراکز توزیع	Q
ظرفیت وسایل حمل و نقل	q
تقاضای کالای امدادی نوع g در گره j	d_{jg}
وزن کالای امدادی نوعgبه ازای هر نفر	w_g
جمعیت حادثه‌دیده در گره‌ی j	pop_j
زمان استاندارد توزیع کالاهای امدادی به مناطق حادثه‌دیده	srt
زمان سفر بین گره‌ی i و گره‌ی j	t_{ij}
هزینه‌ی جریمه‌ی برآورده نشدن تقاضای کالای نوع g	p_g
یک عدد مثبت بسیار بزرگ	M
ضریب جریمه‌ی خطای خطی‌سازی	αw

متغیرهای تصمیم‌گیری

نام و شرح نماد	علامت
اگر یک مرکز توزیع در نقطه‌ی پتانسیل i مستقر شود یک و در غیر این صورت صفر است.	δ_i
اگر یک مرکز توزیع به تور k تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر است.	ϕ_{ik}
میزان کالای امدادی نوع g که باید به گره j ارسال شود.	μ_{gj}
میزان تقاضای برآورده نشده‌ی کالای امدادی نوع g.	γ_g
اگر از گره‌ی i به گره‌ی j در تور k سفر کنیم یک و در غیر این صورت صفر است.	X_{ijk}
اگر گره‌ی j در تور k خدمت‌دهی شود یک و در غیر این صورت صفر است.	y_{jk}
اگر وسیله‌ی حمل و نقل مورد استفاده قرار گیرد یک و در غیر این صورت صفر است.	u_v
اگر وسیله‌ی حمل و نقل v برای تور k استفاده شود یک و در غیر اینصورت صفر است.	l_{kv}
متغیر کمکی برای جلوگیری از تشکیل زیرتورها	β_{nk}
متغیرهای کمکی برای خطی‌سازی	B1, B2, B3, B4

مدل عملیاتی مکان‌یابی- مسیریابی به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط رابطه‌نویسی شده است که تابع هدف آن چنین است:

رابطه‌ی ۱:

$$\min z = \sum_{n\in N}\sum_{m\in N}\sum_{k\in K} t_{nm}x_{nmk} + \sum_{g\in G} p_g\gamma_g + fc\sum_{i\in I}\delta_i$$

محدودیت‌های مسئله هم عبارتند از:

۱: $\sum_{i\in I} \emptyset_{ik} \le 1 \ (\forall k \in K)$

۲: $\emptyset_{ik} \le \delta_i \quad (\forall i \in I, k \in K)$

۳: $\sum_{j\in J} x_{ijk} = \emptyset_{ik} \quad (\forall i \in I, k \in K)$

۴: $\sum_{j\in J} x_{jik} = \emptyset_{ik} \quad (\forall i \in I, k \in K)$

۵: $\sum_{m\in N} x_{nmk} = \sum_{m\in N} x_{mnk} \quad (\forall n \in N, k \in K)$

۶: $\sum_{n\in N} x_{njk} = \sum_{m\in N} x_{jmk} \quad (\forall n \in N, k \in K)$

۷: $\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{jik} \le 1 \quad (\forall k \in K)$

۸: $\sum_{i\in I}\sum_{e\in I}\sum_{k\in K} x_{iek} = 0$

۹: $\sum_{n\in N} x_{njk} = y_{jk} \quad (\forall j \in J, k \in K)$

۱۰: $\sum_{k\in K} y_{jk} \le 1 \quad (\forall j \in J)$

۱۱: $\sum_{v\in V} l_{kv} \le 1 \quad (\forall k \in K)$

۱۲: $\sum_{v\in V} l_{kv} \ge y_{jk} \quad (\forall j \in J, k \in K)$

۱۳: $\sum_{k\in K} l_{kv} \le |k|u_v \quad (\forall v \in V)$

۱۴: $\sum_{k\in K} l_{kv} \ge u_v \quad (\forall v \in V)$

۱۵: $\mu_{jg} = d_{jg}\sum_{k\in K} y_{jk} \quad (\forall j \in J, g \in G)$

۱۶: $d_{jg}\sum_{n\in N}\sum_{k\in K} x_{njk} \ge \mu_{jg} \quad (\forall j \in J, g \in G)$

۱۷: $\sum_{j\in J} d_{jg} - \sum_{h\in J} \mu_{hg} = \gamma_g \quad (g \in G)$

۱۸: $\beta_{jk} - \beta_{hk} + qx_{jhk} \le q - 1 \quad (\forall j \in J, h \in J, k \in K)$

۱۹: $\sum_{k\in K} l_{kv}\sum_{n\in N}\sum_{m\in N} t^s_{nm}x_{nmk} \le srt \quad (\forall v \in V, s \in S)$

$$\sum_{j\in J}\sum_{g\in G}\mu_{jg}\sum_{k\in K}\emptyset_{ik}y_{jk}\le Q \quad (\forall i\in I) \qquad :۲۰$$

$$\sum_{j\in J}y_{jk}\sum_{g\in G}\mu_{jg}\le q\,(\forall k\in K) \qquad :۲۱$$

$$\sum_{k\in K}\emptyset_{ik}l_{kv}\le |k|\lambda_{iv} \quad (\forall i\in I, v\in V) \qquad :۲۲$$

$$\sum_{i\in I}\lambda_{iv}\le 1 \quad (\forall v\in V) \qquad :۲۳$$

$$\delta_i,\emptyset_{ik},y_{jk},u_v,l_{kv},\lambda_{iv}\in\{0,1\} \qquad :۲۴$$

$$\mu_{jg},\gamma_g,\beta_{nk}\ge 0 \qquad :۲۵$$

زمان امدادرسانی، هزینه‌ی جریمه‌ی تقاضاهای برآورده نشده و هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی مراکز توزیع محلی و همچنین ارتباط بین آن‌ها در تابع هدف با رویکرد حداقل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت ۱ تضمین می‌کند که به هر تور فقط از یک مرکز توزیع محلی خدمات داده شود. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که به هر تور باید از مراکز توزیعی که انتخاب شده‌اند خدمت داده شود. محدودیت‌های ۳، ۴، ۵ آغاز هر تور از یک مرکز توزیع مشخص و بازگشت به آن را تضمین می‌کنند. محدودیت ۵ مشخص می‌کند که تعداد ورودی و خروجی به هر گره یکسان است، که در واقع نوعی محدودیت موازنه[۱۹] است. محدودیت ۶ نیز یک محدودیت موازنه است که تنها برای نقاط تقاضا استفاده می‌شود. محدودیت ۷ اطمینان می‌دهد که در هر تور، در هنگام بازگشت به مرکز توزیع، فقط یک مرکز توزیع محلی و یک نقطه‌ی تقاضا به صورت مستقیم به یکدیگر متصل شده‌اند. محدودیت ۸ تضمین می‌کند که مبدأ و مقصد در هر تور مشخص دارای یک مرکز توزیع مشخص است. محدودیت‌های ۹ و ۱۰ اطمینان می‌دهند که هر نقطه‌ی تقاضا فقط یک‌بار و تنها در یک تور خدمت داده می‌شود. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که هر تور فقط با یک وسیله‌ی حمل و نقل خدمت داده می‌شود. محدودیت ۱۲ نشان می‌دهد که هنگامی که یک نقطه‌ی تقاضا در یک تور مشخص خدمت داده شده است، حداقل یک وسیله‌ی حمل و نقل باید به آن تور اختصاص داده شود. محدودیت ۱۳ فرض استفاده‌ی چندباره از یک وسیله‌ی حمل و نقل را پوشش می‌دهد. محدودیت ۱۴ نشان می‌دهد که هنگامی که یک وسیله‌ی حمل و نقل استفاده شده است باید به یک یا بیش از یک تور تخصیص یابد. محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶میزان مورد قبول تقاضا برای یک نقطه‌ی تقاضای مشخص و همچنین برای یک کالای مشخص را تعریف می‌کنند. محدودیت ۱۷ بیانگر معادله‌ی تقاضای برآورده نشده برای هر نوع کالای امدادی است. محدودیت ۱۸ محدودیت حذف زیر تور است. محدودیت ۱۹ اطمینان می‌دهد که زمان عملیاتی هر وسیله‌ی حمل و نقل از زمان استاندارد امدادرسانی تجاوز نمی‌کند. محدودیت ۲۰ بیانگر شرط محدود بودن ظرفیت مراکز توزیع محلی است. محدودیت ۲۱ شرط ظرفیت وسایل حمل و نقل را نمایش می‌دهد. محدودیت‌های ۲۲ و ۲۳ ارتباط بین وسایل حمل و نقل و مراکز توزیع محلی را مشخص می‌سازند. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ بیانگر صفر و یک و مثبت بودن متغیرهای مسئله است.

خطی‌سازی مدل لجستیک امدادرسانی

محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۲ محدودیت‌های غیرخطی هستند. روشی که در پژوهش مهدوی [۱۸] برای تبدیل محدودیت‌های غیرخطی به خطی استفاده شده است به این شرح است که فرض می‌کند $xz\le\alpha$ که در آن x یک متغیر پیوسته، z یک متغیر صفر و یک و a یک پارامتر است. در ابتدا یک متغیر پیوسته مانند X به صورت x=xz تعریف می‌شود. محدودیت اصلی با این مجموعه از محدودیت‌ها جایگزین می‌شود:

$$X\le a$$

$$X\ge x-M(1-z)$$

$$X\le x+M(1-z)$$

هنگامیکه z=۱، سپس $X=\chi,\ X\ge\chi,\ X\le\chi$ ، را ایجاب می‌کند و در شرایط X, z=0 با در نظر گرفتن سه محدودیت فوق آزاد خواهد بود که هر مقداری را بگیرد اما با توجه به تابع هدف که حداقل‌سازی است، مقدار X صفر خواهد شد.

بر اساس روش فوق، هر محدودیت غیرخطی در مدل ما به مجموعه‌ای از محدودیت‌های خطی تبدیل می‌شود که در ادامه آورده شده است.

مجموعه محدودیت‌های ۱۹:

$$\sum_{n\in N}\sum_{m\in N}\sum_{k\in K}t_{nm}B1_{nmkv}\le srt \quad (\forall v\in V) \qquad :۱$$

$$B1_{nmkv}\ge x_{nmk}-M(1-l_{kv}) \quad (\forall n\in N, m\in N, k\in K, v\in V) \qquad :۲$$

$$B1_{nmkv}\le x_{nmk}+M(1-l_{kv}) \quad (\forall n\in N, m\in N, k\in K, v\in V) \qquad :۳$$

محدودیت‌های ۲۰:

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{g\in G}B2_{ijkg}\le Q \quad (\forall i\in I) \qquad :۱$$

$$B2_{ijkg}\ge\mu_{jg}-M(1-\emptyset_{ik})-M(1-y_{jk}) \quad (\forall i\in I, j\in J, k\in K, g\in G) \qquad :۲$$

$$B2_{ijkg}\le\mu_{jg}+M(1-\emptyset_{ik})+M(1-y_{jk}) \quad (\forall i\in I, j\in J, k\in K, g\in G) \qquad :۳$$

محدودیت‌های ۲۱:

$$\sum_{j\in J}\sum_{g\in G}B3_{jkg}\le q \quad (\forall k\in K) \qquad :۱$$

$$B3_{jkg}\ge\mu_{jg}-M(1-y_{jk}) \quad (\forall j\in J, k\in K, g\in G) \qquad :۲$$

$$B3_{jkg}\le\mu_{jg}+M(1-y_{jk}) \quad (\forall j\in J, k\in K, g\in G) \qquad :۳$$

محدودیت‌های ۲۲:

$$\sum_{k\in K}B4_{ikv}\le|k|\lambda_{iv} \quad (\forall i\in I, v\in V) \qquad :۱$$

$$B4_{ikv}\ge l_{kv}-M(1-\emptyset_{ik}) \quad (\forall i\in I, k\in K, v\in V) \qquad :۲$$

$$B4_{ikv}\le l_{kv}+M(1-\emptyset_{ik}) \quad (\forall i\in I, k\in K, v\in V) \qquad :۳$$

$$B1_{nmkv}, B4_{ikv}\in\{0,1\} \qquad :۴$$

$$B2_{ijgk}, B3_{jgk}\ge 0 \qquad :۵$$

و همچنین تابع هدف مسئله خطی‌سازی شده هم به شکل زیر تغییر می‌کند:

رابطه ۲:

$$\min z=\sum_{n\in N}\sum_{m\in N}\sum_{k\in K}t_{nm}x_{nmk}+\sum_{g\in G}p_g\gamma_g+fc\sum_{i\in I}\delta_i+\alpha_1\sum_{n\in N}\sum_{m\in N}\sum_{k\in K}\sum_{v\in V}B1_{nmkv}$$
$$\alpha_2\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{g\in G}B2_{ijkg}+\alpha_3\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{g\in G}B3_{jkg}+\alpha_4\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{v\in V}B4_{ikv}$$

در ادامه در مورد الگوریتم فرا ابتکاری که برای حل مدل لجستیک امدادرسانی در اندازه‌ی واقعی و بسیار بزرگ به کار گرفته شده است و همچنین حل مدل در اندازه‌ی کوچک برای نشان دادن اعتبار مدل ارائه شده در این بخش، توضیحات کاملی ارائه خواهد شد.

الگوریتم حل مسئله

چون مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی ارائه شده در این پژوهش در ابعاد بسیار بزرگ و واقعی، به صورت یک مطالعه‌ی موردی پیاده‌سازی شده است، بنابراین به یک الگوریتم کارا که بتواند در مدت زمان کوتاهی یک جواب نزدیک به بهینه را تولید کند نیازمندیم. با توجه به مطالعاتی که در فاز حل مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی صورت پذیرفت، الگوریتم‌های فرا ابتکاری دارای این قابلیت هستند که در مدت زمانی کوتاه، جواب قابل قبول نزدیک به بهینه‌ای تولید نمایند. پس از مطالعات مختلفی که بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری موجود در پیشینه‌ی پژوهش برای مسئله‌ی مکان‌یابی- مسیریابی صورت پذیرفت، الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر[۲۰] (VNS) انتخاب شد. این الگوریتم، که برای اولین بار هنسن و ملادینوویچ در سال ۱۹۹۷ آن را ارائه کردند، با تغییر ساختار یافته و سیستماتیک همسایگی‌ها در داخل الگوریتم جستجوی محلی، یک الگوریتم فرا ابتکاری ساده و کارا را پیشنهاد می‌کند. الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر نسبت به الگوریتم‌هایی مانند تبرید شبیه‌سازی شده، جستجوی محلی، جستجوی ممنوعه، الگوریتم مورچگان و دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری شناخته شده دارای سابقه‌ی کمتری است، اما در یک دهه‌ی اخیر مطالعات بسیاری بر این الگوریتم صورت پذیرفته است و مقالات بسیاری در این زمینه نوشته شده است. این الگوریتم در مسائل مکان‌یابی و مسیریابی وسایل حمل و نقل بسیار استفاده شده است. جواب‌های حاصل شده از این الگوریتم در این‌گونه مسائل، قابلیت رقابت خود را با دیگر روش‌های فرا ابتکاری اثبات کرده است.

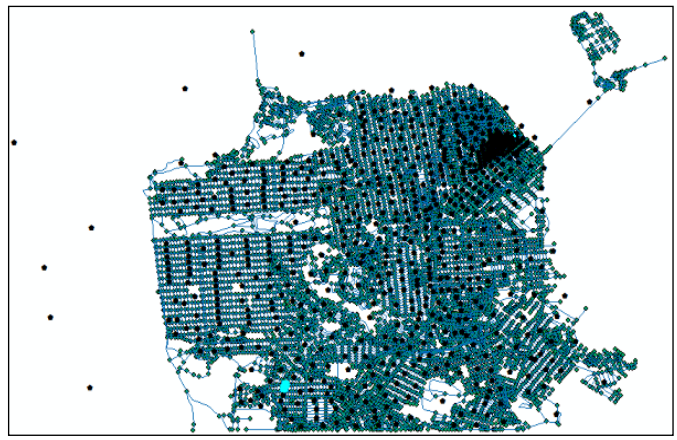
برای استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر نیاز است که در ابتدا جواب اولیه‌ی مناسبی ایجاد شود. برای این منظور از روش کلارک[۲۱] و رایت[۲۲][۱۹] برای پیدا کردن جواب اولیه‌ی مناسب استفاده شده است. پس از پیدا کردن جواب اولیه با این روش، نوبت به اجرای مراحل چهارگانهٔ یا الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر می‌رسد.

در مرحله‌ی اول که شروع[۲۳] نام دارد، نیاز است که در ابتدا انواع مختلف همسایگی‌هایی که قرار است مورد استفاده قرار گیرند مشخص شوند. ساختار همسایگی‌های مورد استفاده که با N_k نمایش داده می‌شود، شامل چندین همسایگی مختلف است که نوع این همسایگی‌ها معمولاً با توجه به نوع و شرایط خاص مسئله تعریف می‌شود. در این مرحله باید شرط توقف الگوریتم که می‌تواند بیشترین زمان مجاز CPU، بیشترین تعداد تکرار، و یا بیشترین تعداد تکرارها بین دو بهبود متوالی باشدنیز مشخص شود. برای همین امر، در این پژوهش شش عملگر[۲۴] مختلف و کارا برای مسئله‌ی مکان‌یابی- مسیریابی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:عملگر درون توری جانمایی[۲۵]،عملگر درون توری جابجایی[۲۶]، عملگر درون توری و بین توری Or-opt، عملگر درون توری و بین توری Inverse or-opt، عملگر تعویض مراکز توزیع، و عملگر اضافه کردن/ حذف کردن[۲۷] مراکز توزیع حالت درون توری[۲۸].گفتنی است که دو عملگر Or-opt و Inverse or-opt حالت بین توری[۲۹] را نیز در بر می‌گیرند. بنابراین در واقع هشت عملگر در این فاز استفاده شده است. سعی شده است با توجه به دو ویژگی اصلی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر یعنی گوناگونی فضای جستجو[۳۰] و شدت جستجو[۳۱]و با انتخاب هشت عملگر کارا تمامی فضاهای ممکن جستجو شود و از نقطه‌ی بهینه‌ی محلی رهایی یابیم. با توجه به نوع مسئله‌ی مکان‌یابی- مسیریابی، عملگرهای طراحی شده باید به دو دسته تقسیم شوند. یک دسته از عملگرها باید فقط بر مسئله‌ی مسیریابی اعمال شوند و دسته‌ی دیگر بر مسئله‌ی مکان‌یابی، که با توجه به این مطلب چهار مورد اول ذکر شده با بحث مسیریابی مرتبط هستند و دو مورد آخر به‌منزله‌ی عملگرهای مکان‌یابی طراحی شده‌اند.

این عملگرهای هشت‌گانه‌ی طراحی شده در مرحله‌ی قبل، در فاز دوم الگوریتم با نام shaking مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مرحله مهم‌ترین مرحله‌ی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر است، که به دنبال به هم ریختن[۳۲] و تعویض فضا است. پس از اعمال هر کدام از عملگرها، یک جواب 'x از یکی از همسایگی‌ها تولید می‌شود. گفتنی است که در مورد جواب‌های یافت شده به وسیله‌ی هر یک از عملگرهای فوق، سیاست رسیدن به اولین بهبود[۳۳] به جای سیاست بهترین بهبود[۳۴] به کار گرفته شده است.

در مرحله‌ی بعد، پس از داشتن یک جواب اولیه و یک جواب تولید شده در مرحله‌ی shaking، بر همان همسایگی مرحله‌ی قبل تعدادی از روش‌های جستجوی محلی[۳۵] به کار گرفته می‌شود. در واقع جواب مرحله‌ی قبل، یک جواب اولیه برای جستجوی محلی است. پس از به کار گرفتن روش‌های مختلف جستجوی محلی، بهترین جواب تولید شده، یعنی x را به دست می‌آوریم. دو عملگر بسیار معروف و کلاسیک که در الگوریتم جستجوی محلی برای مسئله‌ی مسیریابی استفاده می‌شوند، عملگرهای 2-opt و 3-opt هستند. در واقع اینها عملگرهای k-opt شناخته می‌شوند. نحوه‌ی عملکرد این دسته از عملگرها بدین صورت است که k کمان از کمان‌های موجود در یک تور برداشته می‌شود و با k کمان دیگر یا از همان تور یا از تور دیگر جایگزین می‌شود. در این مقاله از دو عملگر 2-opt و 3-opt درون توری در فاز جستجوی محلی استفاده شده است.

مرحله‌ی چهارم و آخر VNS، مرحله‌ی move or not است. چنانچه جواب به دست آمده از جستجوی محلی از جواب اولیه‌ای که هر الگوریتم ابتکاری تولید کرده است (در این مقاله الگوریتم کلارک و رایت)، یعنی x، بهتر باشد، آنگاه "x به‌منزله‌ی جواب اولیه در نظر گرفته می‌شود و الگوریتم مجدد به همسایگی اول بازمی‌گردد و تمامی مراحل تکرار می‌شود. اما در صورتی که "x از x بهتر نباشد، آنگاه به همسایگی بعدی می‌رویم و مراحل قبلی را تکرار می‌کنیم. بدین منظور بر اساس سه عبارت اصلی تابع هدف مدل ریاضی



تصویر۲: شبکه‌ی حمل و نقل شهری سان‌فرانسیسکو

لجستیک امدادرسانی، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و بر اساس آن، الگوریتم در مورد حرکت به همسایگی اول یا همسایگی بعدی تصمیم‌گیری می‌کند.

مطالعه‌ی موردی

در این بخش پیاده‌سازی کامل مدل لجستیک امدادرسانی ارائه شده در بخش دوم تشریح خواهد شد. نرم‌افزار استفاده شده برای اینکه بتوانیم کل مدل را بر یک شبکه‌ی واقعی با مسافت‌های واقعی برای مسیریابی پیاده‌سازی کنیم، نرم‌افزار ArcGIS است. برای ساختن این شبکه‌ی واقعی نیاز به داده‌های شبکه به صورت Shapefile بود. با استفاده از اطلاعات آمار سال ۲۰۰۰ ایالات متحده، شهر سان‌فرانسیسکو که دارای داده‌های کامل‌تری بود بدین منظور انتخاب شد. شبکه‌ی حمل و نقل شهری این شهر دارای ۱۵۵۰۱ مسیر یا کمان و ۹۸۰۳ نقطه‌ی تقاطع یا گره است. بر اساس این داده‌ها، شهر سان‌فرانسیسکو به ۷۳۳ منطقه‌ی ترافیکی[۳۶] (TAZ) تقسیم شده است که هر کدام از آن‌هاقسمتی از کل جمعیت شهر را شامل می‌شود.TAZها به‌مثابه‌ی نقاط حادثه‌دیده که قرار است بلافاصله پس از وقوع زلزله به آن‌ها امدادرسانی شود در نظر گرفته شده‌اند.گفتنی است که مرکز هندسی این مناطق ترافیکی به‌منزله‌ی گره‌ی تقاضا که در واقع کل تقاضای آن منطقه‌ی ترافیکی در آن مجتمع شده است، در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس پژوهش هورنر و ویدنر[۲۰] این تقسیم‌بندی منطقه‌ای یک روش استاندارد در تحلیل شبکه‌های حمل و نقل است. با استفاده از جعبه‌ابزار network analyst نرم‌افزار ArcGIS، شبکه‌ی حمل و نقل شهری برای تحلیل و بررسی ایجاد شد. تعداد کل کمان‌های شبکه‌ی جدید ایجاد شده ۱۸۸۲۳ و تعداد کل گره‌ها ۱۰۵۲۸ است که در تصویر ۲ نمایش داده شده است. نقاط سیاه‌رنگ TAZها، نقاط سبزرنگ گره‌های شبکه و خطوط آبی‌رنگ کمان‌های شبکه هستند.

در این مقاله، سعی بر این است که خرابی شبکه‌ی حمل و نقل شهری برای سناریوهای مختلف وقوع زلزله شبیه‌سازی شود و تأثیرآن‌بر مدل لجستیک امدادرسانی ارائه شده در بخش دوم نمایش داده شود. به همین منظور، یک ماتریس صفر و یک ۱۰۵۲۸ در ۱۰۵۲۸ که بیانگر ارتباط بین نقاط شبکه است، با استفاده از فایل خروجی نرم‌افزار ArcGIS در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد. سپس با استفاده از این ماتریس و همچنین ماتریس مسافت بین نقاط، درصدی از کمان‌های شبکه به صورت کاملاً تصادفی و با توجه به سناریوهای محتمل زلزله خراب شد. خروجی این مرحله یک ماتریس مسافت بین مراکز توزیع محلی و TAZها بعد از خرابی مسیرهاست. سپس هزینه‌ی سفر با اجرای الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر دایجسترا[۳۷] بر ماتریس مسافت محاسبه شد. در نهایت، برای به دست آوردن زمان سفر بین نقاط مراکز توزیع محلی و TAZها، سرعت ثابت ۵۰ مایل در ساعت برای تمامی وسایل حمل و نقل در نظر گرفته شد. سرعت متوسط بسته به سناریوهای مختلف وقوع زلزله به صورت کاهنده در نظر گرفته شده است.

انتظار می‌رود که شهر سان‌فرانسیسکو با دو گسل هیوارد[۳۸] و سن‌آندریاس[۳۹] خراب شود. ضمیمه‌ی مرتبط با زلزله‌ی سند پاسخگویی به بحران شهر سان‌فرانسیسکو [۲۱]، سه سناریوی محتمل را بر اساس گسل‌هایی که بدان‌ها اشاره شد توصیف می‌کند که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

مطالعات حمل و نقل ABAG[۴۱] میزان بسته شدن مسیرهای ارتباطی را بر اساس هر کدام از سناریوهایی که در جدول ۲ بدان‌ها اشاره شد، تخمین زده است که در جدول ۳آمده است. بر اساس این اطلاعات، چهار سناریوی خرابی شبکه با درصدهای ۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ در نظر گرفته شده است.

نتایج و تحلیل‌های محاسباتی

در ابتدا نتایج حاصل شده از اجرای مدل لجستیک امدادرسانی در اندازه‌ی کوچک در نرم‌افزار GAMS ارائه می‌شود. مدل لجستیک امدادرسانی ارائه شده در این مقاله، در نرم‌افزار GAMS کدنویسی و با استفاده از Cplex حل شده است. بدین منظور، یک شبکه‌ی حمل و نقل غیرواقعی با تعداد ۵ مرکز توزیع و ۱۳ نقطه‌ی تقاضا (نقاط حادثه‌دیده) با تقاضای یکسان ۷۰۰۰ کیلوگرم طراحی شد که تمامی پارامترهای آن به جز تعداد مراکز توزیع همانند جدول ۵ و حالت بعد از وقوع زلزله است.

جدول ۴ نتایج حاصل شده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از میان ۵ مرکز توزیع پتانسیل، با در نظر گرفتن زمان استاندارد امدادرسانی و همچنین ۲۰ درصد خرابی مسیرهای حمل و نقل که موجب می‌شود بعضی از مراکز توزیع یا نقاط حادثه‌دیده از دسترس خارج شوند، تعداد ۲ مرکز توزیع انتخاب شده است. مرکز توزیع شماره‌ی ۱، سه نقطه‌ی حادثه‌دیده را پوشش می‌دهد و برای این کار به دو وسیله‌ی حمل و نقل نیازمند است. مرکز توزیع شماره‌ی ۴، چهار نقطه‌ی حادثه‌دیده را پوشش می‌دهد و یک وسیله‌ی حمل و نقل به آن اختصاص یافته است. با توجه به اینکه سه تور امدادرسانی به مرکز توزیع شماره‌ی ۴ اختصاص یافته است، تنها به یک وسیله‌ی حمل و نقل نیاز است. این مطلب خود گواه استفاده‌ی متعدد از وسایل حمل و نقل است که در مدل‌سازی مسئله مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه در هنگام زلزله و هر بحران دیگری کمبود امکانات از جمله وسایل حمل و نقل کاملاً مشهود است، پیاده کردن این ویژگی در مدل‌سازی لجستیک امدادرسانینقش مهمی در

تسهیل عملیات امدادرسانی پس از وقوع هر بحران ایفا می‌کند.
در ادامه برای نمایش و تحلیل نتایج پیاده‌سازی مدل لجستیک امدادرسانی در ابعاد بسیار بزرگ و واقعی در شهر سان‌فرانسیسکو، در این بخش جدول‌ها و نمودارهای مختلفی که به روشنی تأثیرات را نشان می‌دهند، ارائه شده است. جدول ۵ مقدار پارامترهای مسئله را که بر اساس مقادیر کاملاً واقعی در نظر گرفته شده‌اند، نمایش می‌دهد.
یکی از مقایسه‌هایی که به روشنی می‌تواند ارزش برنامه‌ریزی برای پاسخگویی به بحران زلزله را مشخص کند، مقایسه بین حالت قبل از وقوع زلزله و بعد از وقوع آن است. در حالت بدون خرابی و عادی، فرض می‌کنیم که مسئله‌ی ما یک مسئله‌ی لجستیک تجاری باشد. در واقع نتایج این مقایسه که در جدول۶ و تصویر ۳ قابل مشاهده است، اهمیت مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی را بیش از پیش مشخص می‌سازد. گفتنی است که در حالت بعد از وقوع زلزله، ۲۰ درصد خرابی مسیرهای شبکه‌ی شهری در نظر گرفته شده است. یکی از فرضیات مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی ارائه شده در بخش دوم، استفاده‌ی چندباره از وسایل حمل و نقل بود که در جدول ۶ قابل مشاهده است. یکی از موارد مهمی که در مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی به دنبال کاهش آن هستیم، تعداد نقاطی است که تقاضای آن‌ها برآورده نشده است. همان‌طور که جدول ۶ نشان می‌دهد، لجستیک امدادرسانی در مقایسه با لجستیک تجاری نتایج بهتری دارد. اگرچه ۲۰ درصد از مسیرهای شبکه‌ی شهری در حالت لجستیک امدادرسانی دچار خرابی شده‌اند، اما به دلیل بالاتر بودن هزینه‌ی کمبود در این حالت، میزان نقاطی که تقاضای آن‌ها برآورده نشده است به مراتب کمتر است.
برای این‌که بتوان مقایسه‌ای بین حالات مختلف خرابی مسیرهای شبکه‌ی شهری انجام داد و تأثیر آن‌ها را بر متغیرهای تصمیم مسئله مشاهده کرد، برای هر کدام از سناریوهای طراحی شده‌ی خرابی شبکه (۴۵، ۳۰، ۲۰ و ۵ درصد)، جدول‌های ۷ تا ۱۰ ارائه شده‌اند. گفتنی است که هر کدام از سناریوها ۵ بار تکرار شده‌اند یعنی جمعا ۵×۵ حالت مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان تغییرپذیری جواب‌ها را نیز مشاهده کرد. همچنین به جز درصد خرابی که متغیر است، سایر پارامترها همانند حالت بعد از وقوع زلزله در جدول ۵ هستند. جدول ۷ میزان خرابی شبکه را در بدترین حالت (۴۵ درصد) نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تعداد ۵۷ مرکز توزیع محلی که به‌منزله‌ی نقاط پتانسیل در نظر گرفته شده‌اند، به طور میانگین ۳۶ مرکز توزیع انتخاب شده‌اند. یکی از دلایل این امر این است که تعداد ۱۵ مرکز توزیع به سبب خراب شدن مسیرهای متصل به آن‌ها کاملاً از شبکه حذف شده‌اند. حال آنکه همان‌طور که در سایر جدول‌ها مشاهده می‌شود با کاهش درصد خرابی مسیرهای شبکه، تعداد انبارهایی که از دسترس خارج می‌شوند کاهش می‌یابد. همین مشکل دقیقاً برای نقاط حادثه‌دیده نیز روی می‌دهد. تصویر ۴ برای هر سناریو، به تفکیک، تعداد مراکز توزیع خارج از دسترس و همچنین تعداد نقاط حادثه‌دیده‌ی خارج از دسترس را نمایش می‌دهد. یکی از

جدول۲: سناریوهای محتمل وقوع زلزله در سان-فرانسیسکو به همراه گسل مرتبط

سناریو	بزرگی زلزله	گسل
۱	۶/۹ - ۷/۱	قسمت شمالی گسل هیوارد
	۶/۵ - ۶/۹	بخش پنینسولا[۴] از گسل سن‌آندریاس
۲	۷/۲	بخش شمالی و جنوبی گسل هیوارد
	۷/۱ - ۷/۲	بخش پنینسولا و گلدن‌گیت از گسل سن‌آندریاس
۳	۷/۸ - ۷/۹	بخش کالیفرنیای شمالی از گسل سن‌آندریاس

جدول۳: میزان خرابی و بسته شدن مسیرهای ارتباطی شهر سان فرانسیسکو

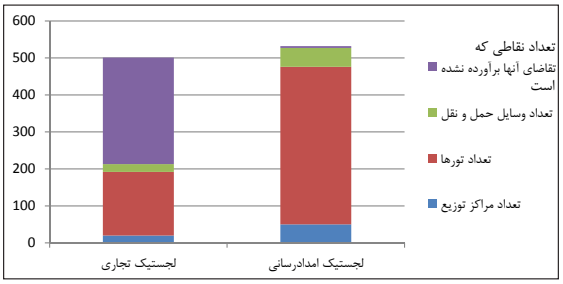
سناریو	۱	۲	۳
تعداد مسیرهای ارتباطی بسته شده	۳۳۵	۳۲۱	۴۲۹

جدول۴: نتایج حل مدل لجستیک امدادرسانی در اندازه‌ی کوچک

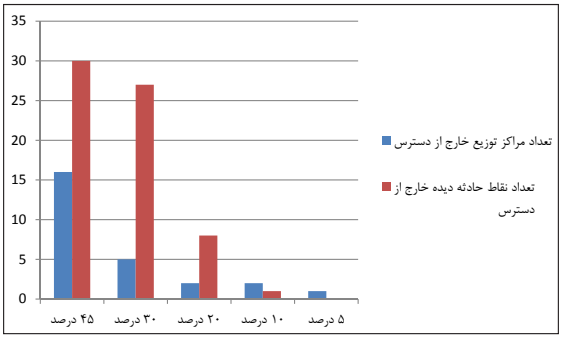
مرکز توزیع	تورها و نقاط حادثه‌دیده‌ی تخصیص‌یافته به هر تور	تعداد وسایل حمل و نقل	میزان تقاضای برآورده شده (kg)
۱	(۱، ۵، ۱)	۲	۲۱۰۰۰
	(۱، ۴، ۱۲، ۱)		
۴	(۴، ۳، ۹، ۴)	۱	۲۸۰۰۰
	(۴، ۶، ۴)		
	(۴، ۱۰، ۴)		

جدول۵: مقدار پارامترهای مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی

نوع مسئله	مدت زمان خدمت رسانی (ساعت)	جریمه‌ی کمبود (دلار)	میزان خرابی شبکه‌ی شهری (درصد)	تعداد مراکز توزیع	ظرفیت مراکز توزیع (کیلوگرم)	هزینه‌ی راه‌اندازی (دلار)	ظرفیت وسایل حمل و نقل (کیلوگرم)
بعد از وقوع زلزله	۸	۱۵۰	۲۰	۵۷	۱۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰
قبل از وقوع زلزله	۱۶	۵	۰	۵۷	۱۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰



تصویر۳: لجستیک تجاری در مقابل لجستیک امدادرسانی



تصویر۴: تعداد مراکز توزیع و تعداد نقاط حادثه‌دیده‌ی خارج از دسترس برای سناریوهای مختلف

مواردی که در جدول‌های چهارگانه‌ی ۷ تا ۱۰ باید بدان توجه کرد، بحث تعداد نقاط حادثه‌دیده‌ی برآورده نشده‌ی تقاضا و میزان تقاضا بر حسب کیلوگرم است. چون هر کدام از نقاط دارای تقاضای مشخص بر اساس میزان جمعیت آن TAZ هستند، بنابراین ممکن است تعداد نقاط کم باشند ولی میزان تقاضای آن‌ها زیادتر باشد. در واقع شاخص میزان تقاضای برآورده نشده بر حسب کیلوگرم نماینده‌ی بهتری نسبت به تعداد نقاط ارضا نشده است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، استفاده‌ی چندباره از وسایل حمل و نقل نیز در مسئله پیاده‌سازی شده است که به وضوح در جدول‌های چهارگانه قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده

لجستیک امدادرسانی حدوداً ۸۰ درصد از فعالیت‌های دو فاز آمادگی و پاسخگویی، از فازهای چهارگانه‌ی مدیریت بحران را شامل می‌شود. در این پژوهش مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی برای کاهش تلفات انسانی در هنگام وقوع زلزله مورد بررسی قرار گرفت. برای کاهش تلفات انسانی که یکی از مهم‌ترین اهداف ایجاد مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی و وجه تمایز آن با لجستیک تجاری است، باید دو مقوله‌ی زمان رساندن کالاهای امدادی به دست حادثه‌دیدگان و همچنین میزان کالاهای امدادی مورد توجه قرار گیرد. در ارتباط با زمان رساندن کالاهای امدادی، زمان استاندارد امدادرسانی که باید بعد از وقوع زلزله برای خاتمه‌ی عملیات لجستیک امدادرسانی در فاز پاسخگویی مدنظر قرار گیرد، در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. یکی دیگر از چالش‌های اساسی در هنگام وقوع زلزله و تقریبا تمامی بلایای طبیعی، خراب شدن و یا اختلال در شبکه‌ی شهری و مسیرهای ارتباطی است که

جدول۶: مقایسه‌ی نتایج حاصل شده بین لجستیک تجاری و لجستیک امدادرسانی

نوع	لجستیک تجاری	لجستیک امدادرسانی
تعداد مراکز توزیع	۲۰	۵۰
تعداد تورها	۱۷۲	۴۲۶
تعداد وسایل حمل و نقل	۲۱	۵۱
تعداد نقاطی که تقاضای آن‌ها برآورده نشده است	۲۸۸	۵

این موضوع باعث می‌شود روند امدادرسانی و به‌ویژه لجستیک امدادرسانی دچار مشکلات فراوان شود. در این مطالعه موضوع خراب شدن شبکه‌ی شهری و مسیرهای ارتباطی بعد از وقوع زلزله تحت سناریوهای مختلف در مدل‌سازی و حل مسئله مورد توجه قرار گرفته است. در تابع هدف مسئله‌ی لجستیک امدادرسانی ارائه شده، با قرار دادن جریمه برای تقاضاهای برآورده نشده سعی شده است که تا حد ممکن میزان تقاضاهای برآورده نشده کم شود. این مدل با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر با استفاده از یک مطالعه‌ی موردی واقعی و در ابعاد بسیار بزرگ حل شد که نتایج حاصل شده قابلیت مدل‌سازی ریاضی و همچنین الگوریتم فرا ابتکاری ارائه شده را به خوبی نشان می‌دهد.

اما برای مطالعات آتی، استفاده از رویکرد تحویل جزئی[۴۲] در مسئله‌ی مسیریابی و همچنین در نظر گرفتن وجوه مختلف حمل و نقل[۴۳] برای تسهیل در امر امدادرسانی، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

جدول۷: ۴۵ درصد خرابی شبکه‌ی مسیرهای شهری

زمان اجرا بر حسب ثانیه	مقدار تابع هدف	تعداد نقاط تقاضای غیر قابل دسترسی	تعداد مراکز توزیع غیر قابل استفاده	میزان تقاضاهای برآورده نشده بر حسب کیلوگرم	تعداد نقاط برآورده نشده	تعداد وسایل حمل و نقل	تعداد تورها	تعداد مراکز توزیع	سناریو
۲۵۴/۵۷۷۱	۲۷۹۰۲۰۰۰۰	۳۰	۲۰	۱۷۴۰۱۰۰	۲۳۵	۴۴	۳۱۶	۳۶	۱
۱۲۷/۲۳۸۷	۲۸۰۲۳۰۰۰۰	۲۸	۱۵	۱۷۴۱۵۰۰	۲۲۶	۴۳	۳۱۴	۳۸	۲
۱۴۸/۷۷۷۶	۲۷۲۳۴۰۰۰۰	۳۰	۱۵	۱۶۹۵۶۰۰	۲۲۳	۴۳	۳۱۹	۳۶	۳
۲۰۱/۰۱۰۱	۲۸۱۵۶۰۰۰۰	۳۱	۱۷	۱۷۵۷۱۰۰	۲۳۱	۴۴	۳۱۴	۳۶	۴
۱۴۸/۰۴۱۳	۲۷۲۳۸۰۰۰۰	۳۱	۱۵	۱۶۹۵۹۰۰	۲۲۳	۴۳	۳۱۹	۳۶	۵
۱۷۵/۹۲۸۹	۲۷۷۱۱۰۰۰۰	۳۰	۱۶	۱۷۲۶۰۰۰	۲۲۸	۴۳	۳۱۶	۳۶	میانگین
۲۵۴/۵۷۷۱	۲۸۱۵۶۰۰۰۰	۳۱	۲۰	۱۷۵۷۱۰۰	۲۳۵	۴۴	۳۱۴	۳۸	حداکثر
۱۲۷/۲۳۸۷	۲۷۲۳۴۰۰۰۰	۲۸	۱۵	۱۶۹۵۰۶۰۰	۲۲۳	۴۳	۳۱۹	۳۶	حداقل

جدول۸: ۳۰ درصد خرابی شبکه‌ی مسیرهای شهری

زمان اجرا بر حسب ثانیه	مقدار تابع هدف	تعداد نقاط تقاضای غیر قابل دسترسی	تعداد مراکز توزیع غیر قابل استفاده	میزان تقاضاهای برآورده نشده بر حسب کیلوگرم	تعداد نقاط برآورده نشده	تعداد وسایل حمل و نقل	تعداد تورها	تعداد مراکز توزیع	سناریو
۲۲۳/۹۳۵۵	۴۷۳۲۵۰۰۰	۲۸	۵	۱۵۲۱۳۰	۲۸	۵۰	۴۲۳	۴۹	۱
۳۰۰/۷۴۶۹	۴۷۰۲۸۰۰۰	۲۸	۷	۱۶۰۱۵۰	۲۵	۴۸	۴۰۰	۴۶	۲
۲۱۸/۰۵۰۵	۴۷۵۲۷۰۰۰	۲۵	۷	۱۶۰۱۵۰	۲۵	۴۸	۴۰۹	۴۷	۳
۴۰۵/۱۹۶۴	۳۵۹۸۸۰۰۰	۲۷	۳	۷۶۵۳۸	۱۴	۵۰	۴۴۲	۴۹	۴
۲۹۷/۲۸۳۸	۳۵۴۸۸۰۰۰	۲۷	۳	۷۶۵۳۸	۱۴	۴۹	۴۲۱	۴۸	۵
۲۸۹/۰۴۲۶	۴۲۶۷۱۲۰۰	۲۷	۵	۱۲۵,۱۰۱	۲۱	۴۹	۴۱۹	۴۸	میانگین
۴۰۵/۱۹۶۴	۴۷۵۲۷۰۰۰	۲۸	۷	۱۶۰۱۵۰	۲۸	۵۰	۴۴۲	۴۹	حداکثر
۲۱۸/۰۵۰۵	۳۵۴۸۸۰۰۰	۲۵	۳	۱۵۲۱۳۰	۱۴	۴۸	۴۰۰	۴۶	حداقل

جدول۹: ۲۰ درصد خرابی شبکه‌ی مسیرهای شهری

زمان اجرا بر حسب ثانیه	مقدار تابع هدف	تعداد نقاط تقاضای غیر قابل دسترسی	تعداد مراکز توزیع غیر قابل استفاده	میزان تقاضاهای برآورده نشده بر حسب کیلوگرم	تعداد نقاط برآورده نشده	تعداد وسایل حمل و نقل	تعداد تورها	تعداد مراکز توزیع	سناریو
۳۰۳/۷۰۷۶	۲۷۲۵۶۰۰۰	۷	۱	۱۸۳۳۹	۵	۵۰	۴۲۳	۴۹	۱
۱۷۲/۰۹۴۶	۲۷۷۵۶۰۰۰	۱۰	۱	۱۸۳۳۹	۵	۵۱	۴۳۲	۵۰	۲
۳۴۹/۴۶۳۳	۲۹۴۷۹۰۰۰	۸	۳	۳۳۱۶۰	۶	۵۰	۴۲۵	۴۹	۳
۴۴۹/۲۹۰۲	۲۸۹۷۹۰۰۰	۷	۳	۳۳۱۶۰	۶	۴۹	۴۲۴	۴۸	۴
۳۶۷/۸۳۷	۳۴۰۸۱۰۰۰	۹	۴	۶۳۸۳۸	۱۰	۵۰	۵۹۸	۴۹	۵
۳۲۸/۴۸۷۵	۲۹۵۱۰۲۰۰	۸	۲	۳۳۳۶۷	۶	۵۰	۴۶۰	۴۹	میانگین
۴۴۹/۲۹۰۲	۳۴۰۸۱۰۰۰	۱۰	۴	۶۳۸۳۸	۱۰	۵۱	۵۹۸	۵۰	حداکثر
۱۷۲/۰۹۴۶	۲۷۲۵۶۰۰۰	۷	۱	۱۸۳۳۹	۵	۴۹	۴۲۳	۴۸	حداقل

جدول۱۰: ۵ درصد خرابی شبکه‌ی مسیرهای شهری

زمان اجرا بر حسب ثانیه	مقدار تابع هدف	تعداد نقاط تقاضای غیر قابل دسترسی	تعداد مراکز توزیع غیر قابل استفاده	میزان تقاضاهای برآورده نشده بر حسب کیلوگرم	تعداد نقاط برآورده نشده	تعداد وسایل حمل و نقل	تعداد تورها	تعداد مراکز توزیع	سناریو
۳۵۱/۲۲۹۲	۲۴۸۲۷۰۰۰	۰	۱	۵۴۸۱/۴	۱	۴۹	۴۲۲	۴۸	۱
۲۸۹/۴۹۴۹	۲۴۰۰۵۰۰۰	۰	۱	۰	۰	۴۹	۴۲۸	۴۸	۲
۲۵۱/۳۵۷۹	۲۴۸۲۷۰۰۰	۱	۱	۵۴۸۱/۴	۱	۴۹	۴۲۲	۴۸	۳
۵۰/۵۳۳۳	۲۴۰۰۴۰۰۰	۰	۱	۰	۰	۵۰	۴۲۱	۴۸	۴
۵۲/۶۷۶۳	۲۴۸۴۵۴۰۰	۰	۰	۰	۰	۴۹	۴۲۴	۴۹	۵
۱۹۹/۰۵۸۳	۲۴۵۰۱۶۸۰	۰	۱	۲۱۹۲/۵۶	۰	۴۹	۴۲۳	۴۸	میانگین
۳۵۱/۲۲۹۲	۲۴۸۴۵۴۰۰	۱	۱	۵۴۸۱/۴	۱	۵۰	۴۲۸	۴۹	حداکثر
۵۰/۵۳۳۳	۲۴۰۰۴۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۴۹	۴۲۱	۴۸	حداقل

پی‌نوشت

1. Mitigation
2. Preparedness
3. Response
4. Recovery
5. Fritz
6. Hale and Moberg
7. Pettit and beresford
8. Beamon and Kotleba
9. Chang
10 Lodree and Taskin
11. De la torre
12. Demir
13. Clustering
14. Lin
15. Split delivery
16. Last mile logistics
17. Wu
18. Prins
19. Balance constraint
20. Variable neighborhood search
21. Clarke
22. Wright
23. Initialization
24. Operator
25. Intra routeinsertion
26. Intra route swap
27. Add /drop
28. Intra route
29. Inter route
30. Diversification
31. Intensification
32. Shaking
33. First improvement
34. Best improvement
35. Local search
36. Traffic analysis zone
37. Dijkstra
38. Hayward fault
39. San Andreas fault
40. Peninsula
41. Association of Bay Area Governments
42. Split delivery
43. Intermodal transportation

منابع

1. Balcik, B. and B.M. Beamon (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics*, 11(2), 101–121.

2. Overstreet, R.E., et al. (2011). Research in humanitarian logistics. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management,* 1(2), 114–131.

3. Hale, T. and C.R. Moberg (2005). Improving supply chain disaster preparedness: A decision process for secure site location. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management,* 35(3), 195–207.

4. Pettit, S.J. and A.K.C. Beresford (2005). Emergency relief logistics: an evaluation of military, non-military and composite response models. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 8(4), 313–331.

5. Beamon, B.M. and S.A. Kotleba (2006). Inventory management support systems for emergency humanitarian relief operations in South Sudan. *The International Journal of Logistics Management*, 17(2), 187–212.

6. Beamon, B.M. and S.A. Kotleba (2006). Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations. *International Journal of Logistics: Research and Applications,* 9(1), 1–18.

7. Chang, M.S., Y.L. Tseng, and J.W. Chen (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 737–754.

8. Lodree Jr, E.J. and S. Taskin (2007). An insurance risk management framework for disaster relief and supply chain disruption inventory planning. *Journal of the Operational Research Society*, 59(5), 674–684.

9. Balcik, B., B.M. Beamon, and K. Smilowitz (2008). Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 51–63.

10. Barbarosolu, G., L. zdamar, and A. Cevik (2002). An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research,* 140(1),

118–133.
11. zdamar, L., E. Ekinci, and B. Kkyazici (2004).Emergency logistics planning in natural disasters.*Annals of Operations Research*, 129(1), 217–245.
12. de la Torre, L.E., I.S. Dolinskaya, and K.R. Smilowitz (2012). Disaster relief routing: Integrating research and practice.*Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 88–97.
13. Yi, W. and L. zdamar (2007).A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities.*European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177–1193.
14. zdamar, L. and O. Demir (2012).A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning.*Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3), 591–602.
15. Lin, Y.–H., et al. (2011).A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster.*Socio-Economic Planning Sciences*, 45(4), 132–145.
16. Wu, T.–H., C. Low, and J.–W. Bai (2002).Heuristic solutions to multi–depot location–routing problems.*Computers & Operations Research*, 29(10), 1393–1415.
17. Prins, C., et al. (2007).Solving the capacitated location–routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation–granular tabu search heuristic.*Transportation Science*, 41(4), 470–483.
18. Mahdavi, I., et al. (2010).Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment.*Computers & Mathematics with Applications*, 60(4), 1014–1025.
19. Clarke, G. and J. Wright (1964).Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points.*Operations research*, 12(4), 568–581.
20. Horner, M. and M. Widener (2011).The effects of transportation network failure on people's accessibility to hurricane disaster relief goods: a modeling approach and application to a Florida case study.*Natural Hazards*, 59(3), 1619–1634.
21. Management, S.F.D.o.e. (2008).*City and County of San Francisco emergency response plan:Earthquake Annex* in *San Francisco Department of Emergency Management* .