چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال دهم، شماره ۳۸، تابستان ۱۳۹۹
شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص ۱۹۱ – ۱۶۱

ارائه یک مدل تصادفی جدید برای مکان‌یابی اسکان اضطراری پس از زلزله با استفاده از مدل مینیمم حداکثر زیان (نمونه موردی: شهر مشهد)

فرشید اسماعیلی کاخکی*، زهرا ناجی عظیمی، علیرضا پویا***، احمد توکلی******

چکیده

شهر مشهد به‌عنوان دومین کلان‌شهر ایران به‌واسطه وجود بافت فرسوده گسترده همواره در معرض آسیب‌های ناشی از زلزله بوده است. در این پژوهش یک مدل تلفیقی برای اسکان اضطراری زلزله‌زدگان در شهر مشهد ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر اساس ترکیب سیستم دینامیک، رابطه کوبورن و اسپنس، GIS و مدل مکان‌یابی ـ تخصیص است. در ابتدا تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده در اثر زلزله با استفاده از مدل‌سازی سیستم دینامیک تخمین زده می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از رابطه تخمین تلفات کوبورن و اسپنس و با استفاده از خروجی سیستم دینامیک، تعداد تلفات ناشی از زلزله احتمالی تخمین زده می‌شود. در مرحله سوم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مکان‌های مستعد در این زمینه انتخاب می‌شوند و در مرحله پایانی با استفاده از یک مدل مکان‌یابی ـ تخصیص مکان‌های اسکان اضطراری انتخاب شده و جمعیت نیازمند اسکان به آن‌ها تخصیص می‌یابند. این روش به‌ازای هر سناریوی محتمل زلزله در شهر مشهد اجرا می‌شود. به‌منظور تلفیق تخصیص‌های موجود به‌ازای سناریوهای مختلف از مدل Min Max Regret استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مکان اسکان اضطراری موردنیاز برای پوشش جمعیت بازمانده ۲۲۳ و کمترین تعداد ۹۳ است؛ همچنین در تخصیص نهایی تعداد ۱۱۱ مکان اسکان اضطراری انتخاب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پویایی‌شناسی سیستم‌ها؛ مسئله مکان‌یابی ـ تخصیص؛ رابطه تخمین تلفات کوبورن و اسپنس؛ زلزله؛ مدل مینیمم حداکثر زیان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷.

* دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.

** دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول).

E-mail: znajiazimi@um.ac.ir

*** استاد، دانشگاه فردوسی مشهد.

**** استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد.

۱. مقدمه

در قرن بیستم بیش از ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط مختلف کره زمین رخ داده است که بر اثر آن بیش از ۱۵۰۰۰۰۰ نفر جان خود را از دست داده‌اند که ۹۰ درصد آن‌ها عمدتاً ناشی از ریزش ساختمان‌هایی بوده است که دارای اصول مهندسی و ایمنی کافی نبوده‌اند [۱]. کشور ایران به‌عنوان بخشی از کمربند آلپ ـ هیمالیا همواره لرزه‌خیزی بالایی در طول تاریخ داشته است؛ به‌گونه‌ای که بخش‌های مختلف کشور توسط زمین‌لرزه‌های ویرانگر متعددی پیوسته تخریب شده و این پدیده تاکنون به‌عنوان مهم‌ترین بلای طبیعی کشور، تلفات و خسارات سنگینی را به بار آورده است. در بیشتر بخش‌های ایران، لرزه‌خیزی ارتباط مستقیم با تجدید فعالیت گسل‌ها داشته و بیشترین میزان لرزه‌خیزی در امتداد گسل‌های فعال روی داده است [۲].

شهر مشهد به‌عنوان دومین شهر ایران در ناحیه‌ای بین کوه‌های چین‌خورده کپه‌داغ از سمت شمال و شمال شرق و کوه‌های چین‌خورده بینالود از سمت جنوب غرب قرار گرفته است. بررسی زمین‌لرزه‌های منطقه حکایت از فعالیت‌های شدید در قرن‌های گذشته، به‌ویژه در قرن هجدهم میلادی و برقراری آرامش نسبی بعد از آن دارد [۵].

وجود گسل‌های توانمند و فعال در دو طرف دشت و در فاصله اندک از شهر مشهد نشان‌دهنده پتانسیل زیاد خطر زمین‌لرزه در این منطقه است. شهر مشهد از شرق و جنوب شرقی با یک گسل به طول حدود ۱۰۰ کیلومتری تقریباً ۲۰ کیلومتر و از جنوب و جنوب غربی با گسلی به طول حدود ۹۰ کیلومتر کمتر از ۲ کیلومتر فاصله دارد. در سال ۱۳۸۵ در مجموعه شهری مشهد ۲۷۵ ریزلرزه و زمین‌لرزه اتفاق افتاده است که از این تعداد ۳ زلزله بالای ۴/۵ ریشتر بوده است. مهم‌ترین زمین‌لرزه مشهد با قدرت ۶/۶ در مقیاس ریشتر در سال ۱۰۵۵ شمسی به وقوع پیوسته است [۳].

وجود چنین مسئله‌ای و همچنین وجود بافت‌های قدیمی در مناطق مختلف شهری که پایداری اندک در برابر مخاطرات طبیعی از مشخصه‌های اصلی این‌گونه بافت‌ها است، موجب تشدید آسیب‌پذیری مناطق مختلف شهری شده است. روند روبه‌رشد و فزاینده شهرنشینی و جمعیت شهری عاملی برای خسارات زیاد به هنگام بروز بلایای طبیعی و به‌ویژه زلزله است. گسترش شبکه‌های ارتباطی و زیرساخت‌های شهری از یک طرف و بدون‌برنامه‌بودن رشد و توسعه شهر از سوی دیگر زمینه ایجاد خسارات زیاد در زمان وقوع زلزله را فراهم می‌آورد. این در حالی است که طی دوره زمانی ۱۲۷۰–۱۳۹۰، جمعیت در شهر مشهد ۶۰ برابر(از ۴۵۰۰۰ نفر به ۲۷۰۰۰۰۰ نفر) و مساحت آن ۴۰ برابر(از ۷۵۰ هکتار به ۳۰۰۰۰ هکتار) شده است و در آن ۲۲۴۵ هکتار بافت فرسوده وجود دارد [۲۱].

با توجه به اینکه این شهر قطب گردشگری مذهبی کشور محسوب می‌شود، هر ساله بیش از ۲۰ میلیون زائر و گردشگر به آن وارد می‌شوند که باعث تراکم بیشتر جمعیتی در این شهر

می‌شود؛ بنابراین در صورت احتمال وقوع زلزله خسارات زیاد و غیرقابل‌جبرانی برجا خواهد ماند و ریسک سرمایه مالی و انسانی زیادی در میان خواهد بود و در صورت بحران، این شرایط می‌تواند فاجعه انسانی را به بار آورد. یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریت پس از بحران، جانمایی مراکز اسکان اضطراری و پوشش جمعیتی هر یک از آن‌ها است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک مدل تلفیقی جدید برای تخمین جمعیت نیازمند اسکان در هر سناریوی محتمل زلزله، مکان‌یابی اسکان اضطراری و تخصیص آسیب‌دیدگان به این مکان‌ها در شهر مشهد است. در این پژوهش هر سناریو بر اساس مشخصات گسل‌های مهم شهر مشهد، مانند بزرگی، شتاب و طول گسل، تدوین شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش مروری بر مبانی نظری موجود در حوزه مکان‌یابی و تخصیص جمعیت در شرایط اضطراری و بحرانی انجام شده و پس از جمع‌بندی این پژوهش‌ها مواردی که در این پژوهش‌ها امکان بهبود دارند، مشخص شده است:

اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۹)، برای اسکان اضطراری شهروندان شهر مشهد پس از زلزله یک مدل تخصیص قطعی ارائه کردند. در این پژوهش ۱۲ سناریوی اصلی زلزله در سطح مشهد ارزیابی و میزان تقاضا برای اسکان در هر سناریو تخمین زده شد. با استفاده از یک مدل تخصیص قطعی به‌ازای هر سناریو بهترین نحوه اسکان تعیین شد [۱۵].

آکگان و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل مکان‌یابی ارائه دادند که با توجه به مکان‌های اسکان اضطراری موجود در شهر ازمیر ترکیه، ریسک ناشی از زلزله را حداقل می‌کرد. در این پژوهش مکان‌های اسکان از قبل مشخص شده بودند و از روش سلسله‌مراتبی عیب‌یابی[1]استفاده شد. این روش قطعی بود و فقط هزینه حمل‌ونقل افراد به مراکز اسکان را حداقل می‌کرد. محدودیت مدل نیز تعداد مراکز اسکان بود که از قبل تعیین شدند [۴].

برزین‌پور و اسماعیلی (۲۰۱۴)، یک مدل تخصیص چندهدفه برای مدیریت اقدامات پس از زلزله در شهر تهران ارائه کردند. حداکثرکردن پوشش جمعیتی، حداقل‌کردن تعداد مراکز اسکان اضطراری، حداقل‌کردن تعداد مراکز توزیع اقلام، حداقل‌کردن هزینه تجهیز مکان‌های اسکان اضطراری و همچنین حداقل‌کردن هزینه کمبود از اهداف این مدل هستند. مدل در حالت قطعی و به‌ازای تعداد مشخص افراد نیازمند خدمت‌رسانی اجرا شد [۶].

بایرام و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل تخصیص برای حداقل‌کردن زمان تخلیه جمعیت به سمت مراکز اسکان اضطراری برای کلیه بحران‌ها در شهر استانبول ترکیه طراحی کردند. در این

1. Fault tree

مدل تعداد مراکز اسکان اضطراری و نیز تعداد جمعیتی که این مراکز باید پوشش دهند از پیش تعیین شده بود. محدودیت‌های این مدل عبارت‌اند از: حداکثر جریان ترافیک شهری و تعداد مراکز اسکان اضطراری که از پیش تعیین شده بودند [۷].

چانگ و همکاران (۲۰۰۷)، یک مدل تخصیص احتمالی برای اسکان آسیب‌دیدگان ناشی از سیل در شهر تایپه کشور تایوان ارائه کردند. در این مدل با توجه به مراکز اسکان موجود در شهر، مراکز جمعیتی به‌ازای احتمالات مختلف در خصوص گستره سیل به مراکز اسکان تخصیص می‌یافتند. درنهایت با استفاده از روش تقریب میانگین حالات[1]تخصیص بهینه جمعیت به مراکز اسکان سیل‌زدگان مشخص شد [۹].

چانتا و سانگسوانگ (۲۰۱۲)، یک مدل تخصیص برای انتخاب پناهگاه‌های اسکان اضطراری سیل‌زدگان در شهر بانگوک تایلند مطرح کردند که هدف آن حداقل‌کردن مسافت طی‌شده بین مراکز جمعیتی و مراکز اسکان بود. این مدل در حالت قطعی با استفاده از روش محدودیت‌های اپسیلون‌دار[2]حل شد [۱۰].

چن و همکاران (۲۰۱۳)، یک روش سلسله‌مراتبی برای انتخاب مراکز اسکان اضطراری پس از زلزله در شهر پکن استفاده کردند. در این روش در هر مرحله مراکز اسکان از نظر یک معیار مشخص ارزیابی شد تا بهترین مکان‌های اسکان انتخاب شوند. در مرحله پایانی نیز این مراکز اسکان، جمعیت آسیب‌دیده را مطابق نتایج یک مدل تخصیص قطعی پوشش دادند [۱۱].

دار و هانوکا (۲۰۱۳)، برای حداقل‌کردن ترافیک حمل‌ونقل بین مراکز اسکان اضطراری و مراکز جمعیتی در زلزله بنگلادش از یک مدل شبکه‌ای با عرضه و تقاضا در شرایط عدم‌اطمینان استفاده کردند. در این پژوهش ظرفیت مراکز اسکان محدود در نظر گرفته شده است [۱۳].

دکل و همکاران (۲۰۰۵)، برای انتخاب مکان‌های اسکان اضطراری در شهر فلوریدای آمریکا از روش انتخاب دورترین نقطه[3]استفاده کردند. در این روش یک نقطه به‌طور تصادفی انتخاب شده و سپس دورترین نقطه نسبت به آن مشخص می‌شود. این روند تکرار شده و سپس هر یک از این نقاط به همراه سایر نقاطی که به آن‌ها نزدیک‌تر هستند در یک خوشه قرار می‌گیرند؛ به‌عبارت‌دیگر هر یک از نقاطی که در مرحله نخست انتخاب شد، یک مرکز اسکان برای نقاط جمعیتی است که در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به آن قرار دارند. در این روش ظرفیت مکان‌های اسکان نامحدود در نظر گرفته شده است [۱۴].

فنگ و ون (۲۰۱۲)، برای تخصیص اقلام امدادی در هنگام زلزله در تایوان از یک مدل تخصیص دومرحله‌ای استفاده کردند. در این مدل در مرحله نخست تعداد مراکز توزیع اقلام

1. Sample average approximation
2. Epsilon-constraint approach
3. Pick-the-Farthest Algorithm

امدادرسانی مشخص می‌شد و در مرحله دوم این اقلام به نقاط تقاضا تخصیص می‌یافت. هدف مدل در مرحله دوم حداقل‌کردن وسائط نقلیه موردنیاز برای حمل این اقلام بود. محدودیت‌های مدل نیز ترافیک موجود در مسیرهای بین مراکز امدادرسانی و نقاط تقاضا و نیز تعداد وسایل نقلیه موجود بود. این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شد [۱۷].

هوانگ و همکارن (۲۰۱۲)، برای تخصیص اقلام دارویی و درمانی به مراکز جمعیتی پس از زلزله در کارولینای جنوبی از یک مدل تخصیص استفاده کردند که هدف آن حداقل‌کردن مسافت طی‌شده بود. محدودیت‌های مدل نیز تعداد مراکز امدادرسانی موجود در شهر بود. این مسئله در حالت قطعی حل شد [۱۹].

ورما و گاکلر (۲۰۱۵)، برای تعیین تعداد مراکز اسکان اضطراری پس از زلزله در کالیفرنیا یک مسئله تخصیص مطرح کردند. هدف این مسئله حداقل‌کردن هزینه حمل‌ونقل و محدودیت مدل نیز تعداد مراکز اسکان بود. برای حل این مسئله از روش تقریب میانگین نمونه استفاده شد. این روش برای حل مسائل بهینه‌سازی تصادفی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌کار می‌رود؛ یعنی ابتدا نمونه‌ای به شکل تصادفی انتخاب شده و بر اساس این نمونه تصادفی، بهترین مقدار برای تابع هدف تعیین شده و این فرایند تکرار می‌شود [۲۷].

ژائو و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل چندهدفه برای انتخاب مکان‌های اسکان اضطراری مطرح نمودند. مکان‌های اولیه که مکان‌های نهایی اسکان از میان آن‌ها انتخاب می‌شود با استفاده از GIS تولید شده‌اند که بر اساس معیارهایی نظیر نزدیکی به مراکز امدادرسانی و شریان‌های اصلی شهری برگزیده شده‌اند. حداقل‌کردن مکان‌های اسکان اضطراری و ترافیک موجود در راه‌های اصلی اهداف این مسئله هستند. این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شد [۲۸].

لو و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از یک مسئله مکان‌یابی، مکان‌های مناسب تولیدشده توسط GIS برای دفن زباله شهری را ارزیابی و بهترین مکان‌ها را انتخاب کردند. این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شد [۲۳].

هو (۲۰۱۴)، یک مدل مکان‌یابی ـ تخصیص با تقاضای تصادفی مطرح کردند که با استفاده از روش هارویتز[1] حل شده است. این روش برای حل مسائلی به‌کار می‌رود که عدم‌اطمینان موجود به شکل بازه‌ای است. هارویتز معیاری است که از طریق آن بهترین مقدار در بین بازه‌های موجود انتخاب می‌شود [۲۰].

محقر و آریایی (۲۰۱۸)، به‌منظور انتخاب بهترین مکان برای شروع فعالیت یک بانک در منطقه ۱ شهر تهران از تلفیق مدل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و حداکثر پوشش وزن‌دار استفاده کردند. در این پژوهش مکان‌های اولیه با استفاده از سیستم اطلاعاتی جغرافیایی انتخاب

1. Hurwicz

شد و درنهایت مکان‌های مناسب با حل مدل حداکثر پوشش وزن‌دار در نرم‌افزار متلب مشخص شدند [۲۴].

بزرگی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله زنجیره امداد تحت شرایط عدم‌قطعیت پس از زلزله ارائه کردند. حداقل‌کردن مجروحینی که پوشش بیمارستانی دریافت نکرده‌اند و همچنین تعداد افراد بی‌خانمانی که اسکان داده نشده‌اند، اهداف مدل پژوهش بودند. در این مدل پارامترهای تقاضا و زمان سفر، غیرقطعی در نظر گرفته شد [۸].

نیکجو و جوادیان (۲۰۱۹)، یک مدل ریاضی چندهدفه تحت شرایط عدم‌قطعیت ارائه کردند که در پی مکان‌یابی بهینه استقرار، میزان تخصیص کالا و یافتن مسیر بهینه بین تسهیلات پس از زلزله است. در این مدل شدت وقوع حادثه به‌عنوان پارامتر دارای عدم‌قطعیت در نظر گرفته شد. این مسئله به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی استوار در نظر گرفته شده است [۲۵].

گورتانی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل مکان‌یابی با عدم‌اطمینان در تقاضا ارائه کردند. مطابق فرضیه موجود در این پژوهش، اطلاعی از توزیع احتمال تقاضا وجود ندارد. مدل موجود در این مسئله طی ۲ مرحله حل شد: در مرحله نخست، مکان‌های مستعد شناسایی شده و در مرحله دوم پوشش جمعیتی هر یک از آن‌ها تعیین می‌شود. در خصوص توزیع تقاضا نیز بدترین سناریوی محتمل در نظر گرفته شده است [۱۸].

ینسی و سامانگیلو (۲۰۲۰)، یک مدل تصادفی دوهدفه برای بازیابی شرایط پس از زلزله ارائه کردند. اهداف اصلی این مدل عبارت‌اند از: تعیین مکان مراکز توزیع اقلام ضروری و همچنین موقعیت هر یک از آن‌ها نسبت به پناهگاه‌های اسکان اضطراری. در این مدل محدودیت ظرفیت، فاصله و پوشش جمعیتی در نظر گرفته شده است. سناریوهای زلزله نیز مطابق مطالعات جایکا (۲۰۰۲) در استانبول ترکیه تدوین شده است [۲۹].

ویژگی‌های مقاله‌های موردبررسی در این پژوهش در جدول ۱، ارائه شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۱. ویژگی‌های پژوهش‌های مشابه با پژوهش حاضر

پژوهشگر (سال)	تابع هدف	محدودیت‌ها
اکگان و همکاران، (۲۰۱۵)	حداقل کردن ریسک	تعداد تسهیلات
برزین‌پور و اسماعیلی، (۲۰۱۴)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده؛ حداقل‌کردن ریسک؛ حداقل‌کردن هزینه پوشش‌داده‌نشده	ظرفیت تسهیلات و بودجه
چانگ و همکاران، (۲۰۰۷)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده؛ حداقل‌کردن تعداد تسهیلات؛ حداقل‌کردن هزینه ثابت و متغیر تسهیلات	ظرفیت تسهیلات
بایرام و همکاران، (۲۰۱۵)	حداقل‌کردن زمان تخلیه آسیب‌دیدگان	ظرفیت و تعداد تسهیلات
چانتا و سانسوانگ، (۲۰۱۲)	حداقل‌کردن تقاضای پوشش داده‌نشده و همچنین حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	ظرفیت و تعداد تسهیلات و محدوده فاصله
چن و همکاران، (۲۰۱۳)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	ظرفیت تسهیلات
دار و هانوکا، (۲۰۱۳)	حداقل‌کردن هزینه ثابت و متغیر تسهیلات	ظرفیت تسهیلات
دکل و همکاران، (۲۰۰۵)	حداکثرکردن سطح رضایت آسیب‌دیدگان	محدوده فاصله
هوانگ و همکاران، (۲۰۱۲)	حداقل‌کردن هزینه پشتیبانی	تعداد تسهیلات و محدوده فاصله
فنگ و ون، (۲۰۰۵)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	تعداد راه‌های مواصلاتی بین مراکز جمعیتی و مکان‌های اسکان
ژائو و همکاران، (۲۰۱۷)	حداقل‌کردن هزینه ثابت و متغیر تسهیلات	ظرفیت تسهیلات و محدوده فاصله
ورما و گاکلر، (۲۰۱۵)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	ظرفیت و تعداد تسهیلات
هو و همکاران، (۲۰۱۴)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	ظرفیت تسهیلات
اسماعیلی و همکاران، (۲۰۱۹)	حداقل‌کردن مسافت طی‌شده	ظرفیت تسهیلات
محقر و آریایی، (۲۰۱۸)	حداقل‌کردن هزینه جابجایی بین تسهیلات؛ حداقل‌کردن میزان نارضایتی آسیب‌دیدگان	ظرفیت تسهیلات و مسیرها
بزرگی امیری و همکاران، (۲۰۱۸)	حداقل‌کردن مجموع افراد آسیب‌دیده و حداقل‌کردن کمبود کالا	ظرفیت تسهیلات و بودجه
نیکجو و جوادیان (۲۰۱۹)	حداقل‌کردن هزینه جابه‌جایی و تأسیس تسهیلات و حداکثرسازی رضایت‌مندی آسیب‌دیدگان	ظرفیت تسهیلات و حداکثر وسایل موجود برای جابه‌جایی اقلام

با مطالعه و جمع‌بندی پژوهش‌هایی که در حوزه مکان‌یابی اسکان اضطراری انجام شده است، نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. تخمین تعداد افراد متقاضی اسکان و همچنین تعیین مکان‌های اسکان اضطراری برای تخصیص این جمعیت به شکل هم‌زمان انجام نگرفته است [۵، ۶، ۱۳].

۲. سناریوهایی که در خصوص زلزله در نظر گرفته شده‌اند، عمدتاً تصادفی هستند و مبنای دقیقی برای تدوین سناریو و تخمین خسارات ناشی از آن وجود ندارد؛ به‌عبارت‌دیگر سناریوهایی که در خصوص میزان تقاضا برای اسکان اضطراری تدوین می‌شوند، کاملاً تصادفی بوده و مبتنی بر شرایط واقعی، مانند بزرگی و شتاب گسل فعال‌شده و زمان وقوع زلزله منطقه موردمطالعه نیستند [۸، ۹].

۳. استفاده هم‌زمان از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها و رابطه کوبورن و اسپنس مشاهده نمی‌شود.

۴. بهترین تخصیص موجود به‌ازای کلیه سناریوهای موجود زلزله تعیین نشده است؛ به‌عبارت‌دیگر مدلی که بتواند کلیه سناریوهای موجود در زلزله را ترکیب کند و بهترین تخصیص ممکن را پیشنهاد دهد، مورداستفاده قرار نگرفته است [۶].

در بسیاری از پژوهش‌هایی که در مبانی نظری به آن‌ها اشاره شد، مکان‌های اسکان اضطراری دارای ظرفیت محدود و فواصل بین این مکان‌ها و مراکز جمعیتی به‌صورت اقلیدسی در نظر گرفته شده است. مکان‌یابی مراکز اسکان اضطراری نیز گسسته در نظر گرفته شده‌اند. این فرضیه‌ها در این پژوهش نیز مورداستفاده قرار گرفته است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

عدم‌اطمینان فراوانی که در وقوع زلزله و خسارات متعاقب آن وجود دارد به استفاده از رویکردهای مختلفی در مواجهه با این پدیده منجر شده است که وجه اشتراک آن‌ها عدم‌قطعیت موجود در این روش‌ها است. در این پژوهش در خصوص تعداد افراد نیازمند اسکان عدم‌اطمینان وجود دارد. در ابتدا بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی مرتبط با زلزله و زمان رخداد آن (شب یا روز)، سناریوهای محتمل در خصوص زلزله مشهد تدوین می‌شود.

ویژگی‌های زمین‌شناسی که در هر سناریو در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از: بزرگی، شتاب و طول گسل. در هر سناریو با استفاده از رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس (۲۰۰۲) و مدل‌سازی سیستم دینامیک تعداد تلفات جانی زلزله تعیین شد. رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس برای محاسبه تلفات ناشی از زلزله به‌ازای هر سناریو به‌کار رفت. در شرایطی که مهم‌ترین ورودی این رابطه، یعنی تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده، توسط مدل‌سازی سیستم دینامیک تخمین زده شده است. مدل سیستم دینامیک با تمرکز بر ۲ زیرسیستم جمعیتی و

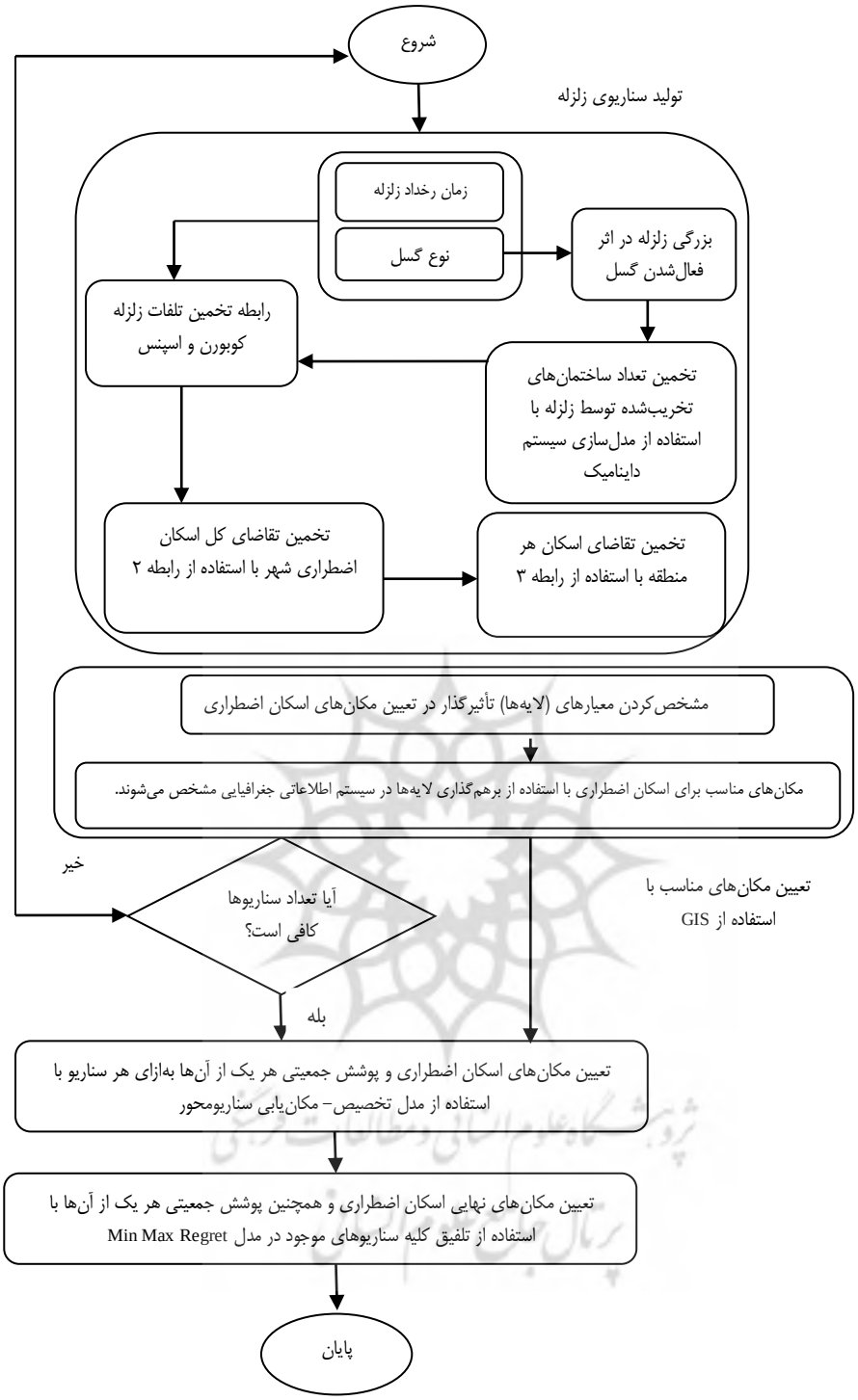
ساخت‌وساز ایجاد شده است. بر مبنای تعداد تلفات تخمین‌زده‌شده و جمعیت کل شهر، جمعیت نیازمند اسکان مربوط به هر مرکز جمعیتی مشخص شد؛ سپس مکان‌های اولیه مستعد اسکان اضطراری در شهر مشهد با استفاده از GIS انتخاب شدند. این مکان‌ها بر مبنای تلفیق لایه‌های GIS مربوط به معیارهای اصلی در انتخاب مکان‌های اسکان برگزیده شد. این معیارها عبارت‌اند از: دسترسی به شاه‌راه‌های اصلی شهر؛ نزدیکی به نقاطی که تراکم جمعیت بیشتری دارند؛ فاصله بیشتر تا بافت فرسوده شهری؛ فاصله بیشتر تا گسل‌های مهم موجود در شهر و نزدیکی به مراکز امدادی و درمانی. این لایه‌ها توسط خبرگان پژوهش تعیین شدند.

تعداد ۲۵۷ مکان در مشهد مستعد اسکان اضطراری شناخته شدند که با توجه به استاندارد ۸ متر مربعی فضای موردنیاز برای هر فرد، ظرفیت اسکان نیز مشخص شد. این مکان‌ها شامل پارک‌ها، فضای سبز و مدارس نوسازی شده است که استانداردهای احداث مکان‌های اسکان اضطراری را دارند.

از طرفی کل شهر مشهد به ۱۴۲ مرکز جمعیتی تقسیم شد که در این فرایند به مکان‌های اسکان اضطراری تعیین‌شده تخصیص می‌یابند. این ۱۴۲ مرکز جمعیتی بر مبنای تقسیمات شهری انتخاب شدند. خبرگان این پژوهش شامل ۹ نفر از متخصصان مدیریت بحران استانداری خراسان رضوی با تجربه کافی و تحصیلات لیسانس و فوق‌لیسانس در مدیریت و مهندسی عمران هستند.

برای مدل‌سازی سیستم داینامیک شهری از نرم‌افزار Vensim PLE و برای حل مدل تخصیص ـ مکان‌یابی و مدل Min Max Regret از نرم‌افزار Matlab و تابع Intlinprog استفاده شد. فرایند کلی روش پژوهش حاضر مطابق شکل ۱، است.

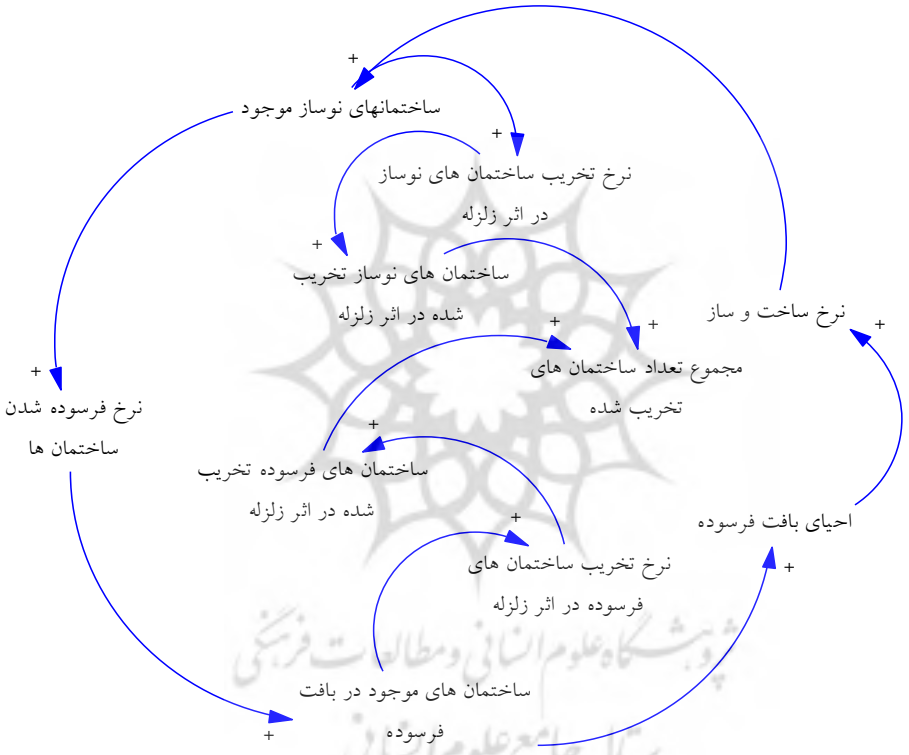
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۱. فرایند کلی روش پژوهش

مدل‌سازی پویایی شناسی سیستم‌ها در ساخت‌وساز و تخریب. برای محاسبه تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده در اثر زلزله در بازه چهار سال آینده از مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها استفاده شده است. این نوع از مدل‌سازی به سبب توانایی پیش‌بینی متغیرهای تحت‌بررسی در هر مقطع زمانی در آینده و نیز تسهیل در مشاهده رفتار متغیرهای تحت‌بررسی، توانایی انجام این-گونه محاسبه را دارد. در ادامه ابتدا نمودار علت و معلول و پس از آن نمودار انباشت و جریان مدل پویایی سیستم ارائه شده است.

نمودار علّی مدل پویایی شناسی سیستم‌ها در ساخت‌وساز و تخریب. نمودار علّی مدل پویایی سیستم ساخت‌وساز و تخریب با تأکید بر تخریب ساختمان‌ها در اثر زلزله مطابق شکل ۲، است.

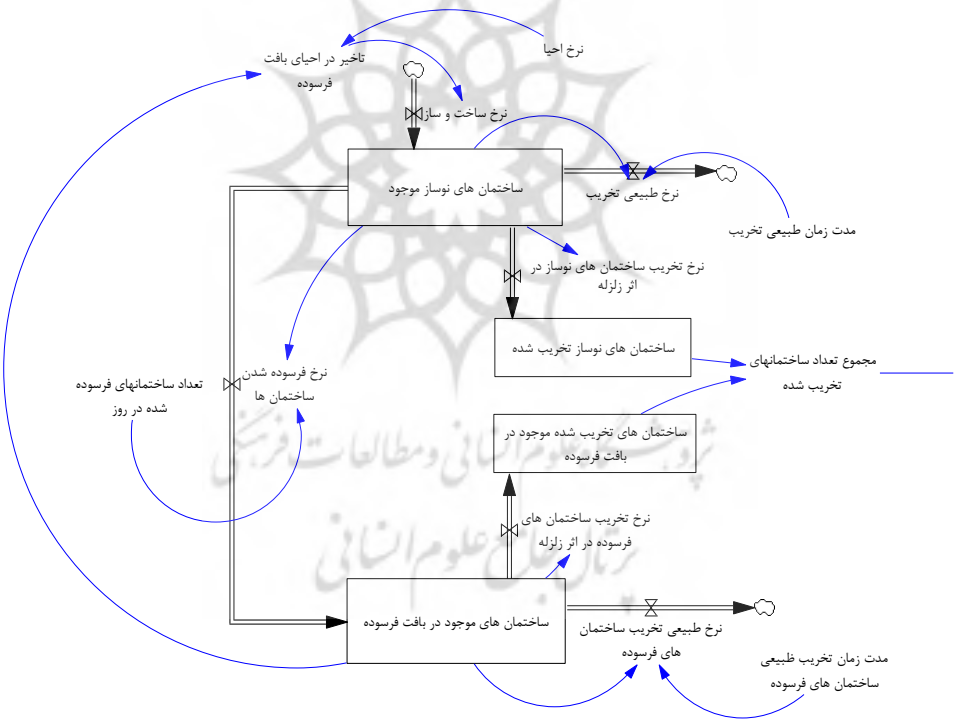


شکل ۲. حلقه علّی مدل پویایی شناسی سیستم‌ها [۱۵]

همان‌طورکه در شکل ۲، مشهود است با افزایش ساخت‌وساز تعداد بناهای نوساز افزایش یافته و به‌تبع آن تعداد بناهایی که در هر سال فرسوده می‌شوند، افزایش خواهد یافت که این امر موجب افزایش تعداد بناهای فرسوده موجود می‌شود. با افزایش تعداد بناهای فرسوده، تعداد

بناهایی که هر ساله احیا و نوسازی می‌شوند نیز افزایش یافته که همان افزایش در نرخ ساخت‌وساز است و این حلقه تقویت‌کننده‌ای است که به‌طور پیوسته مقادیر متغیرهای حالت را افزایش می‌دهد؛ از طرفی افزایش در تعداد بناهای نوساز و فرسوده موجب افزایش در تعداد بناهایی می‌شود که در اثر زلزله تخریب می‌شوند (اعم از نوساز و فرسوده).

نمودار انباشت ـ جریان مدل پویایی سیستم ساخت‌وساز و تخریب. این مدل شامل ۲ نوع ساختمان است که عبارت‌اند از: ساختمان‌های نوساز (زیر ۱۰ سال ساخت) و ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده شهری. در این زیرسیستم روند طبیعی ساخت‌وساز و همچنین تخریب ساختمان‌های موجود در این ۲ نوع ساختمان نشان داده می‌شود. در این مدل فرض شده است ساخت‌وسازی در بافت فرسوده انجام نشده است و صرفاً نرخ تخریب وجود دارد. با توجه به اینکه آخرین زلزله شدید مشهد در سال ۱۶۷۳ میلادی رخ داده است و با درنظرگرفتن دوره بازگشت ۳۵۰ساله، زلزله محتمل در بازه ۴ سال آینده در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مدل متناسب با نوع سناریوی تعریف‌شده در یک مقطع زمانی در ۴ سال آینده اجرا می‌شود (برای مثال ۱ سال، ۲ سال و ...). شکل ۳، این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مدل پویایی شناسی سیستم‌ها در تخریب و ساخت‌وساز [۱۵]

جدول ۲. روابط موجود در مدل پویایی سیستم

متغیر	رابطه
ساختمان‌های نوساز موجود	نرخ ساخت‌وساز– نرخ تخریب ساختمان‌های نوساز در اثر زلزله– نرخ طبیعی تخریب ساختمان‌های نوساز
ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده	نرخ تخریب ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده در اثر زلزله– نرخ طبیعی تخریب ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده
ساختمان‌های نوساز تخریب‌شده	نرخ تخریب ساختمان‌های نوساز در اثر زلزله– نرخ برداشت آوار ساختمان‌های نوساز
ساختمان‌های تخریب‌شده در بافت فرسوده	نرخ تخریب ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده– نرخ برداشت آوار ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده
نرخ طبیعی تخریب ساختمان‌های نوساز	ساختمان‌های نوساز موجود/ زمان طبیعی تخریب ساختمان‌های نوساز
نرخ فرسودگی ساختمان‌ها	تأخیر (تعداد ساختمان‌های فرسوده شده در روز*ساختمان‌های نوساز موجود ۰/۳۶۵)
تأخیر در احیای بافت فرسوده	نرخ احیا*ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده

مدل تخمین خسارت کوبورن و اسپنس. در پژوهش حاضر برای براورد تلفات انسانی ناشی از زلزله در شهر مشهد از رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس استفاده شده است. ازآنجاکه این روش برگرفته از ملاحظات آماری خسارات زلزله در سراسر جهان و از جمله ایران است، برای شهر مشهد نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد. ایده فوق‌الذکر به‌صورت رابطه ۱، تدوین شده است [۱۲].

$$K_s = D_5 * M_1 * M_2 * M_3 * (M_4 d + (1 - M_4 d) * M_5)$$ رابطه (۱)

در رابطه بالا:

K_s : تعداد تلفات انسانی

D_5: تعداد ساختمان‌های فروریخته

M_1: متوسط تعداد افراد در هر ساختمان

M_2: وضعیت ساختمان از نظر تعداد افراد ساکن در هنگام وقوع زلزله

M_3 : افراد گرفتار در زیر آوار پس از زلزله

$M_4 d$: نسبت افرادی که بلافاصله پس از زلزله در اثر ریزش آوار جان خود را از دست می‌هند.

M_5: نسبت افرادی که بلافاصله پس از زلزله جان خود را از دست نمی‌دهند.

تخمین تقاضای اسکان اضطراری. تعداد کل افراد متقاضی اسکان و همچنین تعداد افراد متقاضی اسکان در هر منطقه با استفاده از روابط ۲ و ۳، محاسبه می‌شود:

(۲) تعداد تلفات زلزله که خروجی رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس است –کل جمعیت = تعداد افراد متقاضی اسکان اضطراری

(۳) تعداد افراد متقاضی اسکان هر منطقه =تعداد کل جمعیت متقاضی اسکان* درصد جمعیت منطقه

پارامترهای مورداستفاده در مدل. این مدل تلفیقی در شهر مشهد اجرا شده است. مشخصات گسل‌های این شهر مطابق جدول ۳، است.

جدول ۳. مشخصات گسل‌های شهر مشهد

گسل	طول گسل	بزرگی	شتاب گسل
جنوب	بیشتر از ۱۰۰	۷/۳	۰/۶۷
کشف‌رود	۶۲	۶/۸	۰/۶۳
شاندیز	۸۵	۷/۲	۰/۴۳
بینالود	۱۰۰	۷/۴	۰/۲۱
شمال نیشابور	۸۰	۷/۴	۰/۰۷
نیشابور	۵۰	۷/۴	۰/۰۱۷
توس	۶۰	۶/۸	۰/۵۲
فریمان	بیشتر از ۱۰۰	۷/۲	۰/۶۵

نرخ تخریب ساختمان‌ها متناسب با ماکزیمم شتاب گسل در شکل ۴، نشان داده شده است:

شکل ۴. آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسکونی نسبت به حداکثر شتاب [۱۶]

پارامترهای ثابت مورداستفاده در مدل سیستم داینامیک به شرح جدول ۴، است.

جدول ۴. مقادیر ثابت مورد استفاده در مدل

متغیر	مقدار ثابت
متوسط طول عمر	۲۵۹۲۰ روز
زمان طبیعی تخریب ساختمان‌های نوساز	۱۸۲۵۰ روز
زمان طبیعی تخریب ساختمان‌های موجود در بافت فرسوده	۷۳۰۰ روز
مقدار اولیه متغیرهای انباشت جمعیت، ساختمان‌های نوساز و ساختمان‌های فرسوده متناسب با منطقه‌ای که موردبررسی قرار می‌گیرد، تغییر کرده و در اینجا آورده نشده است.	

ازآنجاکه در مدل، تعداد تلفات به‌ازای کلیه ساختمان‌های موجود در شهر محاسبه می‌شود (اعم از فرسوده و نوساز) از میانگین وزنی مقادیر شاخص‌های موجود در جدول ۴، استفاده شده است. وزن مورد استفاده نیز به شکل رابطه ۴، محاسبه می‌شود.

$$\text{وزن ساختمان‌های فرسوده} = \frac{\text{کل مساحت ساختمانهای فرسوده شهری}}{\text{کل مساحت مسکونی شهر}} \quad (۴)$$

$$\text{وزن ساختمان‌های نوساز} = \frac{\text{کل مساحت ساختمانهای نوساز شهری}}{\text{کل مساحت مسکونی شهر}} \quad (۵)$$

با توجه به مساحت بافت فرسوده و نوساز شهری در مشهد، وزن‌های بالا و پارامترهای مورداستفاده در رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس مطابق جدول‌های ۵ و ۶، است.

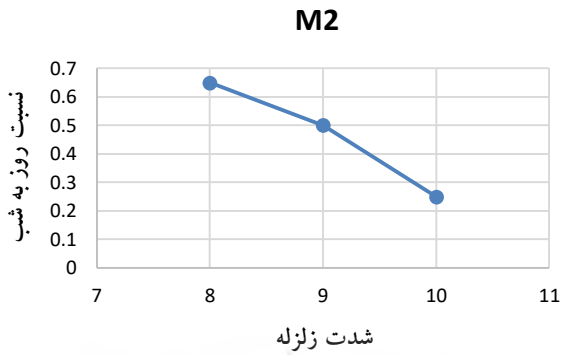
جدول ۵. مقادیر متوسط ضرائب مورد استفاده در رابطه تخمین خسارت زلزله کوبورن و اسپنس

پارامتر	وزن بافت فرسوده=۷ درصد، وزن بافت نوساز=۹۳ درصد
M_3	۱۷/۸
M_4d	۳۲/۱
M_5	۳۶/۴

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده در رابطه تخمین خسارت زلزله کوبورن و اسپنس [۲۸]

پارامتر	نوع سازه	
	ساختمان فرسوده شامل خشتی، سیمانی و تمام چوب	ساختمان نوساز شامل بتن مسلح و فولادی
M_3	۵۵	۱۵
M_4d	۶۰	۳۰
M_5	۵۵	۳۵

متغیر D_5 خروجی مدل سیستم‌داینامیک است. مجموع ساختمان‌های فروریخته و آسیب‌دیده (نوساز و فرسوده) D_5 را تشکیل خواهند داد. M_1 نیز بر اساس سالنامه‌های آماری موجود است. شب‌هنگام وقتی که همه ساکنان در خانه‌هایشان هستند، مقدار M_2 برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و در روز نیز بر مبنای نموداری که در شدت‌های مختلف زلزله در ایران تهیه شده است، می‌توان مقدار M_2 را تعیین کرد. نمودار مورداستفاده مطابق شکل ۵، است.



شکل ۵. نسبت تعداد تلفات زلزله در شدت‌های مختلف، روزهنگام به شب‌هنگام [۱۶]

اعتبارسنجی مدل سیستم داینامیک. در صورتی که مدل از ۴ سال قبل از زلزله بم تا زمان وقوع این زلزله شبیه‌سازی شود، تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده تقریباً با حالت واقعی برابر بوده که صحت مدل را تأیید می‌کند.

جدول ۷. اعتبارسنجی مدل سیستم داینامیک

تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده (نتایج مدل)	تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده در واقعیت (سازمان مدیریت بحران)
۱۴۸۵۸	حدود ۱۵۰۰۰

سناریوهای زلزله در مشهد. در این پژوهش هر سناریوی زلزله بر اساس ۵ شاخص نوع گسل فعال‌شده، طول گسل فعال‌شده، شتاب گسل فعال‌شده، بزرگی زلزله و نیز زمان وقوع آن (شب یا روز) تعیین می‌شود. منظور از بزرگی زلزله حداکثر بزرگی است که در اثر فعالیت گسل مربوطه اتفاق می‌افتد. سناریوهای مورد استفاده برای تخمین تلفات انسانی که در این پژوهش به‌کار رفته است، عبارت‌اند از:

جدول ۸. سناریوهای وقوع زلزله در مشهد

شماره سناریو	نام گسل	M_2	نرخ خرابی ساختمان‌های فرسوده بر اساس شتاب زلزله	نرخ خرابی ساختمان‌های نوساز بر اساس شتاب زلزله	بزرگی	شتاب زلزله	هنگام وقوع زلزله
۱	جنوب مشهد	۰/۷	۰/۹۱	۰/۶۵	۷/۳	۶۷۰	روز
۲	جنوب مشهد	۱	۰/۹۱	۰/۶۵	۷/۳	۶۷۰	شب
۳	کشف‌رود	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۴۲	۶/۸	۱۳۰	روز
۴	کشف‌رود	۱	۰/۷۱	۰/۴۲	۶/۸	۱۳۰	شب
۵	شاندیز	۰/۶۸	۰/۹	۰/۵۱	۷/۲	۴۳۰	روز
۶	شاندیز	۱	۰/۹	۰/۵۱	۷/۲	۴۳۰	شب
۷	بینالود	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۲۴	۷/۴	۲۱۰	روز
۸	بینالود	۱	۰/۸۱	۰/۲۴	۷/۴	۲۱۰	شب
۹	شمال نیشابور	۰/۵۹	۰/۴	۰/۱۱	۷/۳	۷۰	روز
۱۰	شمال نیشابور	۱	۰/۴	۰/۱۱	۷/۳	۷۰	شب
۱۱	طوس	۰/۹۱	۰/۹	۰/۶۱	۶/۸	۵۲۰	روز
۱۲	طوس	۱	۰/۹	۰/۶۱	۶/۸	۵۲۰	شب

مدل تخصیص ـ مکان‌یابی برای تخصیص جمعیت متقاضی اسکان به مکان‌های اسکان اضطراری. برای تخصیص جمعیت متقاضی اسکان اضطراری به مکان‌های اسکان از مدل تخصیص ـ مکان‌یابی زیر استفاده می‌شود که تعداد مکان‌های اسکان اضطراری و همچنین مجموع فواصل بین مراکز اسکان و مراکز جمعیتی پوشش داده‌شده توسط آن‌ها را نیز حداقل می‌کند. پارامترهای مورداستفاده در مدل به شرح زیر است:

J: مجموعه مکان‌های اسکان اضطراری

I: مجموعه مراکز جمعیتی

d_{ij}: فاصله مرکز جمعیتی iام تا مکان اسکان jام

cap_j : ظرفیت مکان اسکان اضطراری jام

m: تعداد مراکز جمعیتی موجود

n: تعداد مکان‌های اسکان اضطراری موجود

l: حداکثر فاصله مجاز بین مراکز جمعیتی و مکان‌های اسکان اضطراری

S: مجموعه سناریوهای ممکن

Z^S: مقدار بهینه تابع هدف به‌ازای سناریوی sام

w_i^s: میزان جمعیت متقاضی اسکان در منطقه iام به‌ازای سناریوی sام

$$Y_{ij}^{s}=\begin{cases}1 & \text{اگر مرکز جمعیتی } i\text{ام در سناریوی } s\text{ام به مکان اسکان } j\text{ام تخصیص یابد}\\ 0 & \text{در غیر اینصورت}\end{cases}$$

$$X_{j}^{s}=\begin{cases}1 & \text{اگر مکان اسکان } j\text{ام در سناریوی } s\text{ام انتخاب شود}\\ 0 & \text{در غیر اینصورت}\end{cases}$$

با توجه به تعریف‌های بالا، مدل تخصیص ـ مکان‌یابی این پژوهش به‌ازای یک سناریوی محتمل که با s نشان داده شده است، به‌صورت زیر است.

$$\min z^{s}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\frac{w_i{}^{s}d_{ij}y_{ij}{}^{s}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}w_i{}^{s}d_{ij}}+\frac{\sum_{j=1}^{n}X_j{}^{s}}{n} \qquad (۶)$$

s.t.

$$\sum_{j\in N_i}y_{ij}{}^{s}=1 \qquad \forall i\in I, N_i=\{j|d_{ij}\le l\} \qquad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{m}w_i{}^{s}y_{ij}{}^{s}\le cap_jX_j{}^{s} \qquad \forall j\in J \qquad (۸)$$

$$X_j{}^{s},y_{ij}{}^{s}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in I,\forall j\in J \qquad (۹)$$

در این مدل تابع هدف رابطه ۶، تعداد مکان‌های اسکان اضطراری انتخاب‌شده و همچنین مجموع مسافت طی‌شده بین مراکز جمعیتی و مکان‌های اسکان را به‌ازای هر سناریو حداقل می‌کند. ضرایب به‌کاررفته در تابع هدف برای هم‌مقیاس‌سازی اجزای این تابع است. محدودیت ۷، هر مرکز جمعیتی را به یک مکان اسکان اضطراری تخصیص می‌دهد. محدودیت ۸، مربوط به ظرفیت هر مکان اسکان اضطراری است. محدودیت ۹ نیز صفر و یک بودن متغیرها را نشان می‌دهد.

مدل Min Max Regret برای تلفیق تخصیص‌های موجود به‌ازای هر سناریو. مدل Min Max Regret یکی از روش‌های بهینه‌سازی استوار است. این مدل در حالتی که تعداد محدودی سناریوی شدنی با احتمال وقوع مشخص وجود داشته باشد، به‌کار می‌رود. جواب این مدل یک جواب محافظه‌کارانه است که بهترین جواب با درنظرگرفتن کلیه سناریوهای موجود است.

با توجه به اینکه در هر سناریو یک تخصیص بهینه موجود است، در این مرحله و با استفاده از مدل Min Max Regret که در حل مسائل با عدم‌اطمینان گسسته به‌کار می رود، تخصیص نهایی به‌دست می‌آید. این مدل با درنظرگرفتن کلیه تخصیص‌های بهینه مرحله قبل تخصیص

نهایی را ایجاد می کند. روند استفاده از این مدل مطابق زیر است. درصورتی‌که مقدار تابع هدف یک مسئله به‌ازای سناریو sام برابر z^s باشد و مقدار بهینه تابع هدف را در آن سناریو با z_*^s نشان دهیم، آنگاه داریم:

$$regret(x,s) = z^s - z_*^s \tag{۱۰}$$

$$f(x,s) = \max(z^s - z_*^s) \tag{۱۱}$$

$$\begin{aligned} f(x,s) &= \max\left(\frac{z^s - z_*^s}{z_*^s}\right) \\ &= \max\left(\frac{z^s}{z_*^s} - 1\right) \\ &= \max\left(\frac{z^s}{z_*^s}\right) \end{aligned} \tag{۱۲}$$

با حداقل‌کردن میزان فرصت ازدست‌رفته تابع ۱۲، به‌ازای کلیه محدودیت‌های موجود در تمامی سناریوها، تخصیص نهایی و بهینه به‌دست خواهد آمد.

اجرای مدل Min Max Regret در پژوهش حاضر. گام‌های زیر برای استفاده از این مدل در مسئله پژوهش حاضر طی می‌شود:

۱. در مدل این پژوهش، مقدار تابع هدف به‌ازای هر سناریو (z^s) تابع هدف رابطه ۶ است؛

۲. مقدار بهینه تابع هدف به‌ازای هر سناریو (z_*^s) با استفاده از حل مدل تخصیص ارائه‌شده؛

۳. مقدار فرصت ازدست‌رفته به‌ازای هر سناریو برابر با $\frac{z^s}{z_*^s}$ است.

با توجه به گام‌های بالا، تابع هدف مدل Min Max Regret در مسئله این پژوهش به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} min\, max\, regret &= min_{x\in X}\, max_{s\in S}\left(\frac{z^s}{z_*^s}\right) \\ &= min_{x\in X}\, max\left\{\frac{z1}{z1_*}, \frac{z2}{z2_*}, \dots, \frac{z11}{z11_*}, \frac{z12}{z12_*}\right\} \end{aligned} \tag{۱۳}$$

با فرض اینکه:

$$\max\left\{\frac{z1}{z1_*}, \frac{z2}{z2_*}, \dots, \frac{z11}{z11_*}, \frac{z12}{z12_*}\right\} = y \tag{۱۴}$$

آنگاه با حل مدل زیر تخصیص نهایی حاصل خواهد شد:

$$min_{x\in X} \max regret = \min y \quad (۱۵)$$

s.t.

$$y \geq \frac{z^s}{z^s{}_*} \quad \forall s \quad (۱۶)$$

$$\sum_{j\in N_i} y_{ij}{}^s = 1 \qquad \forall i \in I, N_i = \{j | d_{ij} \leq l\} \quad (۱۷)$$

$$\sum_{i=1}^{m} w_i{}^s y_{ij}{}^s \leq cap_j X_j{}^s \qquad \forall j \in J \quad (۱۸)$$

$$X_j{}^s, y_{ij}{}^s \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (۱۹)$$

تابع هدف رابطه ۱۵، حداکثر فرصت ازدست‌رفته را حداقل می‌کند و محدودیت ۱۶، نیز بیشترین فرصت ازدست‌رفته در میان سناریوهای موجود را نشان می‌دهد.

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نتایج این پژوهش شامل تعیین تعداد افراد نیازمند اسکان در هر سناریوی محتمل زلزله، تعیین مکان‌های اسکان اضطراری و همچنین تخصیص جمعیتی بازماندگان ناشی از زلزله به این مکان‌ها است.

تعیین مکان‌های مستعد برای اسکان اضطراری. برای انتخاب مکان‌های مناسب به‌منظور اسکان اضطراری در شهر مشهد ابتدا معیارهای تأثیرگذار در انتخاب این مکان‌ها شناسایی شدند که این معیارها مطابق دستورالعمل اجرایی خدمات امدادی حوادث و سوانح مصوب «سازمان هلال احمر» عبارت‌اند از:

۱. دسترسی به راه‌های مواصلاتی اصلی در شهر؛
۲. نزدیکی به نقاطی که تراکم جمعیتی بیشتری دارند؛
۳. فاصله بیشتر تا بافت فرسوده موجود در شهر؛
۴. نزدیکی به فضای سبز یا زمین‌های بایر یا سالن‌های ورزشی مستعد اسکان اضطراری؛
۵. فاصله بیشتر از گسل‌های موجود در شهر مشهد، به‌خصوص گسل جنوب مشهد که خطرناک‌ترین گسل این شهر است؛
۶. نزدیکی به مراکز درمانی و امدادرسانی شهری.

ابتدا کلیه لایه‌های GIS مربوط به این معیارها تهیه شد و سپس کلیه نقاط و فضای شهری مشهد بر اساس این معیارها رتبه‌بندی شدند. درنهایت از طریق ادغام و برهم‌گذاری این لایه‌ها تعداد ۲۵۷ نقطه شهری در مشهد که در معیارهای گفته‌شده در رتبه بالاتری قرار دارند، انتخاب شدند. این مراکز دارای مساحت متفاوت و به‌تبع آن ظرفیت اسکان متفاوتی خواهند بود. ظرفیت اسکان با توجه به استاندارد ۸ متر مربعبه‌ازای هر نفر قابل‌محاسبه است [۲۴]. پراکندگی این نقاط که خروجی نرم‌افزار GIS هستند، مطابق شکل ۶، است.

شکل ۶. مکان‌های اولیه مستعد جهت اسکان اضطراری

جدول ۹، ظرفیت هر یک از این مکان‌های اسکان اضطراری را نشان می‌دهد.

جدول ۹. ظرفیت مکان‌های اسکان اضطراری اولیه

شماره	۱	۲	۳	٤	٥		۲٥۷
مساحت (مترمربع)	۲۰۰۰۹,۲۳	۳۳۵۲۰,۶۳	۲۹۵۷۸,۱۷	۷۴۳۸۱,۵۰	۳۰۰۰۴,۹۱	.....	۶۶۷۷۱,۵۳
ظرفیت اسکان(نفر)	۲۰۰۰	۳۳۵۲	۲۹۵۷	۷۴۳۸	۳۰۰۰۰		۶۶۷۷

تخمین تقاضای اسکان به‌ازای هر سناریو. سناریوهای وقوع زلزله در این پژوهش بر مبنای ویژگی‌های گسل‌های موجود در شهر و همچنین زمان رخداد آن‌ها تولید شده است. این سناریوها مبتنی بر حداکثر فعالیت لرزه‌ای گسل‌های شهر مشهد تدوین شده است. در تمامی سناریوهای موجود ، پارامترهای تأثیرگذار بر شدت خرابی زلزله، مانند زمان وقوع آن، شتاب و بزرگی زلزله در نظر گرفته شده است. با استفاده از خروجی مدل سیستم داینامیک و مدل تخمین خسارت کوبورن و اسپنس، میزان تلفات زلزله به‌ازای هر سناریو محاسبه شده و با استفاده از رابطه ۲، تقاضای اسکان به‌ازای هر سناریو و در هر منطقه به‌دست آمده است. واحد مربوط به تلفات و تقاضای اسکان به‌ازای هر سناریو بر حسب نفر است. تعداد تلفات محاسبه‌شده در جدول ۱۰، مشاهده می‌شود.

جدول ۱۰. میزان تلفات و تقاضای اسکان اضطراری

منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا
	۱	۴۶ ۸۵۵	۹۷ ۴۲۷		۱	۱۰۰ ۹۷۵	۳۳۴ ۴۶۰		۱	۲۳۲ ۲۷۶	۱۱۶ ۵۱۱		۱	۲۰۶ ۰۰۰	۴۰ ۸۳۷
۱	۲	۶۶ ۹۳۶	۶۸ ۴۷۰	۲	۲	۱۴۴ ۲۵۰	۲۹۱ ۱۸۵	۳	۲	۲۴۰ ۰۰۱	۱۰۸ ۱۷۳	۴	۲	۲۰۲ ۹۴۴	۴۳ ۸۹۳
	۳	۴۵ ۹۹۸	۹۱ ۳۳۲		۳	۶۳ ۸۴۲	۳۷۱ ۵۹۳		۳	۱۴۷ ۶۰۳	۲۰۷ ۹۰۴		۳	۱۷۴ ۰۰۷	۷۳ ۸۳۰

منطقه							
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۷۰ ۷۶۶	۳۸ ۳۱۴	۵۸ ۰۵۱	۲۸ ۹۲۲	۴۰ ۹۰۲	۱۹ ۲۵۶	۳۲ ۶۳۷	۵۸ ۶۰۵
تقاضا	۶۳ ۹۹۰	۱۰۰ ۰۸۵	۷۹ ۹۸۴	۱۱۳ ۴۸۴	۱۰۱ ۵۲۷	۱۲۶ ۰۱۱	۱۱۲ ۳۴۶	۷۹ ۹۲۷
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۹۷ ۳۲۱	۷۸ ۶۶۳	۱۱۵ ۶۸۱	۴۱ ۸۱۴	۶۰ ۶۰۰	۲۰ ۱۰۳	۳۴ ۰۷۳	۱۲۳ ۸۳۶
تقاضا	۳۳۸ ۱۱۴	۳۵۶ ۷۷۲	۳۱۹ ۷۵۴	۳۹۳ ۶۲۱	۳۷۴ ۸۳۵	۴۱۵ ۳۳۲	۴۰۱ ۳۶۲	۳۱۱ ۵۹۹
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۲۲۷ ۰۸۲	۲۰۹ ۲۳۹	۳۰۷ ۷۰۴	۱۸۰ ۲۲۷	۲۶۱ ۱۹۸	۱۴۰ ۸۹۰	۲۳۸ ۷۹۷	۲۹۵ ۶۸۱
تقاضا	۱۲۲ ۱۱۷	۱۴۱ ۳۷۶	۳۵ ۰۹۷	۱۷۲ ۶۹۱	۸۵ ۲۹۴	۲۱۵ ۱۴۹	۱۰۹ ۴۷۳	۴۸ ۰۷۴
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۱۹۷ ۷۰۳	۱۸۹ ۱۱۴	۲۷۰ ۷۰۰	۱۷۰ ۳۵۶	۲۴۰ ۸۹۳	۱۳۶ ۸۰۳	۲۳۱ ۸۶۹	۲۶۳ ۵۹۸
تقاضا	۴۹ ۱۳۴	۱۸ ۰۱۴	۷۶ ۴۸۱	۵ ۹۴۴	۵۷ ۷۲۳	۱۱۰ ۰۳۴	۱۴ ۹۶۸	۴۶ ۸۳۷

منطقه							
سناریو	۱۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تلفات	۶۴ ۴۰۱	۶۶ ۹۶۱	۹۵ ۶۵۹	۵۰ ۳۸۱	۷۷ ۵۱۰	۵۷ ۵۳۲	۸۴ ۶۰۶	۴۳ ۶۷۹
تقاضا	۷ ۰۲۴	۳۸ ۶۴۵	۹ ۹۴۷	۵۵ ۲۲۵	۲۸ ۰۹۶	۴۸ ۰۷۴	۲۱ ۰۰۰	۶۱ ۹۲۷
منطقه	5							
سناریو	۱۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تلفات	۱۳۶ ۰۸۳	۲۰۶ ۰۹۹	۲۱۳ ۹۶۳	۱۷۵ ۲۱۵	۲۰۷ ۹۱۹	۱۸۹ ۹۱۸	۱۹۸ ۸۰۰	۱۷۲ ۵۸۱
تقاضا	۲۹۹ ۳۵۲	۷۷ ۲۵۱	۶۹ ۴۴۷	۱۰۷ ۹۰۱	۷۵ ۴۴۵	۹۳ ۳۱۰	۸۴ ۴۹۵	۱۱۰ ۵۱۵
منطقه	۶							
سناریو	۱۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تلفات	۳۲۰ ۰۱۸	۱۱۸ ۸۱۴	۱۶۹ ۷۳۴	۹۴ ۱۹۲	۱۴۴ ۹۱۱	۱۰۵ ۱۴۶	۱۵۴ ۶۲۷	۸۶ ۵۹۱
تقاضا	۲۱ ۸۰۶	۱۱۱ ۴۳۰	۶۰ ۵۱۰	۱۳۶ ۰۵۲	۸۵ ۳۳۳	۱۲۵ ۰۹۸	۷۵ ۶۱۷	۱۴۳ ۶۵۳
منطقه	۷							
سناریو	۱۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تلفات	۲۳۹ ۹۴۴	۲۶ ۵۴۲	۳۷ ۹۱۷	۱۸ ۰۲۹	۲۷ ۷۳۷	۲۱ ۵۷۱	۳۱ ۷۲۲	۱۳ ۶۴۹
تقاضا	۶ ۸۹۳	۶۷ ۸۲۶	۵۶ ۴۵۱	۷۶ ۳۳۹	۶۶ ۶۴۱	۷۲۷۹۷	۶۲ ۶۴۶	۸۰ ۷۱۹

منطقه											
سناریو	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱	۲	۳			
تلفات	۶۳ ۳۰۳	۳۱ ۲۹۳	۵۳ ۰۳۹	۸۴ ۱۸۰	۹۲ ۵۰۵	۸۳ ۸۲۵	۱۱۹ ۷۵۰	۵۶ ۷۵۱			
تقاضا	۴۲ ۳۰۳	۷۴ ۳۱۳	۵۲ ۵۶۷	۲۱ ۴۲۶	۱۳ ۱۰۱	۱۸۶ ۶۴۵	۱۵۵ ۴۸۹	۲۱۰ ۱۲۴			
منطقه						۱۰					
سناریو	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱	۲	۳			
تلفات	۲۵۰ ۱۱۷	۱۳۹ ۲۷۹	۲۳۶ ۰۶۵	۲۳۳ ۹۹۵	۲۲۰ ۰۰۸	۷۱ ۲۱۹	۱۰۱ ۷۴۲	۴۷ ۵۱۷			
تقاضا	۳۳ ۵۶۷	۱۴۳ ۵۶۵	۴۷ ۵۱۳	۴۹ ۵۶۷	۶۳ ۴۴۸	۱۹۴ ۰۱۳	۱۶۳ ۴۹۰	۲۱۷ ۷۱۵			
منطقه						۱۱					
سناریو	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱	۲	۳			
تلفات	۱۲۵ ۴۹۵	۶۵ ۷۶۸	۱۱۱ ۴۷۱	۱۵۰ ۵۳۸	۱۶۵ ۴۲۶	۴۱ ۰۷۰	۵۸ ۶۷۱	۲۴ ۶۳۷			
تقاضا	۱۰۴ ۷۴۹	۱۶۴ ۴۷۶	۱۱۸ ۷۷۳	۷۹ ۷۰۶	۶۴ ۸۱۸	۱۵۱ ۲۸۵	۱۳۳ ۶۸۴	۱۶۷ ۷۱۸			
منطقه						۱۲					
سناریو	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱	۲	۳			
تلفات	۱۹ ۷۸۲	۸ ۲۸۲	۱۴ ۰۳۷	۳۲ ۸۹۰	۳۶ ۱۴۳	۱۳ ۷۲۹	۱۹ ۶۱۳	۹ ۹۳۹			
تقاضا	۷۴ ۵۸۶	۸۶ ۰۸۶	۸۰ ۳۳۱	۶۱ ۴۷۸	۵۸ ۲۲۵	۲۶ ۳۱۲	۲۰ ۴۲۸	۳۰ ۱۰۲			

منطقه										
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۸۷۳۱۰	۶۷۹۹۷	۹۹۹۹۶	۷۴۲۷۲۷	۶۱۹۲۳	۲۵۷۱۰	۴۳۵۷۷	۱۰۳۸۳۵
تقاضا	۱۸۳۶۲۲	۲۰۰۳۷۱	۱۷۲۶۲۱	۲۲۲۲۸۶	۲۰۵۶۳۹	۲۳۷۰۴۴	۲۲۱۵۴۹	۱۶۹۲۹۱
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۷۳۱۰۳	۵۷۳۳۱	۸۴۳۱۱	۳۴۹۸۴	۵۰۷۰۲	۲۰۳۶۹	۳۴۵۲۴	۸۸۰۴۹
تقاضا	۱۹۲۱۲۹	۲۰۷۹۰۱	۱۸۰۹۲۱	۲۳۰۲۴۸	۲۱۴۵۳۰	۲۴۴۸۶۳	۲۳۰۷۰۸	۱۷۷۱۸۳
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۳۷۹۰۳	۳۱۲۹۸	۴۶۰۲۷	۱۴۹۴۲	۲۱۶۵۵	۵۵۸۶	۹۹۲۶	۵۰۰۹۸
تقاضا	۱۵۴۴۲۵	۱۶۱۰۵۷	۱۴۶۳۲۸	۱۷۷۴۱۳	۱۷۰۷۰۰	۱۸۶۴۹۹	۱۸۲۴۲۹	۱۴۲۲۵۷
منطقه								
سناریو	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تلفات	۱۵۲۹۰	۱۱۵۴۶	۱۶۹۸۰	۸۲۱۹	۱۱۹۱۱	۵۵۹۰	۹۴۷۵	۱۷۱۶۹
تقاضا	۲۴۷۵۱	۲۸۴۷۷	۲۳۰۶۱	۳۱۸۲۲	۲۸۱۳۰	۳۴۴۵۱	۳۰۵۶۶	۲۲۸۷۲

منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا	منطقه	سناریو	تلفات	تقاضا
	۱۲	۱۱۴۱۰۴	۱۶۰۳۸۶		۱۲	۹۶۷۵۷	۱۶۸۴۵۷		۱۲	۵۵۰۵۲	۱۳۷۳۰۳		۱۲	۱۸۸۶۷	۲۱۱۷۴

مکان‌یابی ـ تخصیص سناریومحور. در این مرحله با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده مکان‌یابی و تخصیص بهینه به‌ازای هر سناریو مشخص شده است. این مدل ریاضی در نرم‌افزار MATLAB 2017 کدنویسی شده و به‌ازای هر یک از سناریوهای ارائه‌شده در جدول ۸ اجرا شد. شایان ذکر است که به‌ازای هر تعداد سناریوی دیگر که در این پژوهش در نظر گرفته نشده است نیز می‌توان از مدل ذکرشده استفاده کرد. نتایج در جدول ۱۱، مشاهده می‌شود.

جدول ۱۱. تخصیص بهینه به‌ازای هر سناریو

منطقه	۱						
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	...	۱۲
تقاضای اسکان اضطراری	۹۷ ۴۲۷	۶۸ ۴۷۰	۹۱ ۳۲۲	۶۳ ۹۹۰	۱۰۰ ۰۸۵		۷ ۰۲۴
مراکز اسکان اضطراری	۶۳, ۶۴, ۶۵, ۲۵۰, ۲۵۶	۶۳, ۶۴, ۶۵, ۷۰, ۲۵۰, ۲۵۶	۶۳, ۶۴, ۶۵, ۲۵۰, ۲۵۶	۶۳, ۶۴, ۶۵, ۷۰, ۲۵۰, ۲۵۶	۶۳, ۶۴, ۶۵, ۲۵۶		۶۳, ۶۴, ۶۵, ۲۵۰, ۲۵۶
	. . .						
منطقه	۱۲						
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	...	۱۲
تقاضای اسکان اضطراری	۲۶ ۳۱۲	۲۰ ۴۲۸	۳۰ ۱۰۲	۲۴ ۷۵۱	۲۸ ۴۷۷		۲۱ ۱۷۴
مراکز اسکان اضطراری	۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲	۴۳, ۴۴, ۴۵, ۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲	۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱	۴۳, ۴۴, ۴۵, ۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲	۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲		۴۳, ۴۴, ۴۵, ۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲

تعیین مکان‌های نهایی اسکان اضطراری و تخصیص جمعیت به آن‌ها به‌ازای کلیه سناریوها. با توجه به اینکه به‌ازای هر یک از سناریوهای وقوع زلزله، تخصیص بهینه مراکز جمعیتی به مکان‌های اسکان اضطراری به‌دست آمده است، به تعداد سناریوهای وقوع زلزله تخصیص وجود خواهد داشت. در ادامه کلیه سناریوهای موجود تلفیق می‌شود و بر مبنای

حداقل‌کردن حداکثر فرصت ازدست‌رفته، تخصیص نهایی حاصل خواهد شد. این تخصیص با درنظرگرفتن تمامی سناریوهای محتمل وقوع زلزله، بهترین سناریو است. جدول ۱۲، برخی از این نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲. تخصیص نهایی جمعیت بازمانده از زلزله

مرکز جمعیتی	۱	۲	۳	.....	۱۴۰	۱۴۱	۱۴۲
مرکز اسکان اضطراری	۶۳	۲۵۰	۲۵۱		۱۵	۵۱	۵۰

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به‌منظور تعیین اسکان اضطراری بهینه پس از زلزله در شهر مشهد از یک مدل تلفیقی جدید استفاده شده است؛ به‌عبارت‌دیگر با استفاده از نتایج این پژوهش پس از وقوع هر سناریوی محتمل زلزله، تعداد افراد نیازمند اسکان در هر منطقه و مکان اسکانی که این افراد را پوشش می‌دهند، تعیین شده است. این مدل تلفیقی در ۳ مرحله انجام می‌شود. در مرحله نخست با استفاده از تلفیق رابطه تخمین خسارت کوبورن و اسپنس و مدل‌سازی سیستم داینامیک تعداد تلفات زلزله به‌ازای هر سناریو محاسبه می‌شود که با درنظرگرفتن کل جمعیت، تقاضای اسکان اضطراری قابل‌محاسبه است. در مرحله دوم با استفاده از برهم‌گذاری لایه‌ها در GIS مکان‌های اسکان اضطراری در سطح شهر مشهد شناسایی می‌شوند و در مرحله پایانی با استفاده از یک مدل مکان‌یابی ـ تخصیص، جمعیت نیازمند اسکان به مکان‌های اسکان تخصیص می‌یابند؛ به طوری‌که مجموع مسافت طی‌شده و تعداد مکان‌های اسکان اضطراری حداقل شوند. در این پژوهش ۱۲ سناریو در خصوص زلزله محتمل شهر مشهد در نظر گرفته شد که با توجه به مشخصات این مدل تلفیقی به‌ازای هر سناریوی محتمل دیگر نیز قابلیت اجرا دارد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که سناریوهای شماره ۲ و ۱۲، خطرناک‌ترین و مهلک‌ترین سناریوهای ممکن در خصوص وقوع زلزله در شهر مشهد هستند؛ به‌عبارت‌دیگر فعالیت دو گسل جنوب مشهد و طوس بیشترین تلفات انسانی را در بر دارد. از طرفی فعالیت گسل شمال نیشابور نسبت به تمامی سناریوهای ممکن کمترین تلفات انسانی را در پی خواهد داشت. نکته دیگر ارتباط مستقیم بین حجم بافت فرسوده و میزان تلفات انسانی است. برای مثال، مناطق ۳، ۴ و ۶ که بیشترین حجم بافت فرسوده را به خود اختصاص داده‌اند، بیشترین میزان تلفات انسانی را نیز خواهند داشت. مناطق ۸ و ۱۱ که کمترین میزان بافت فرسوده را دارند، کمترین میزان تلفات انسانی را دارند. از طرفی در تمامی سناریوهای موردبررسی وقوع، زلزله در شب نسبت به روز به میزان زیادی حجم تلفات را افزایش می‌داد که با توجه به اقامت بیشتر افراد در منازل مسکونی

در شب هنگام قابل انتظار است. نکته حائزاهمیت دیگر نحوه گسترش شهر مشهد است؛ چراکه گسل جنوب مشهد یکی از فعال‌ترین و خطرناک‌ترین گسل‌های موجود است؛ بنابراین در توسعه حریم شهر باید به این امر توجه شود. سایر پیشنهادهای کاربردی مرتبط با نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

– فراهم‌کردن امکانات حداقلی در مکان‌های اسکان اضطراری تعیین‌شده تا در صورت وقوع حادثه در زمان صرفه‌جویی شود؛

– تهیه اطلس اسکان اضطراری توسط شهرداری مشهد که شامل مکان‌های اسکان اضطراری و نحوه تخصیص جمعیت آسیب‌دیده هر منطقه به این مکان‌ها باشد. این اطلس در اختیار عموم شهروندان قرار گیرد تا در هنگام حادثه، مردم هر منطقه نسبت به مکان اسکان خود آگاه باشند.

– با توجه به قرارگرفتن بیشتر مکان‌های اسکان اضطراری تعیین‌شده در شرق شهر مشهد، ضرورت پیش‌بینی راه‌های مواصلاتی امن و با ظرفیت بالا به این بخش از شهر بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

با درنظرگرفتن شرایط حاکم بر این پژوهش می‌توان پیشنهادهای زیر را برای انجام پژوهش‌های آتی در این زمینه ارائه داد:

– در مدل‌سازی سیستم‌دینامیک شهری این پژوهش از زیرسیستم ساخت‌وساز شهری استفاده شده است؛ می‌توان با اضافه‌کردن زیرسیستم‌های دیگری نظیر امداد و نجات و اقدامات درمانی که در هنگام وقوع زلزله بر میزان تلفات تأثیر دارند بر جامعیت مدل افزود؛

– بررسی تأثیر اقدامات پیشگیرانه نظیر مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و کاهش اعطای مجوز تراکم بر کاهش میزان تلفات ناشی از زلزله؛

– اضافه‌کردن مدل‌های مسیریابی به مدل تخصیص ـ مکان‌یابی تصادفی به‌منظور تعیین مسیرهای بهینه برای تخصیص جمعیت آسیب‌دیده به مکان‌های اسکان اضطراری؛

– تقسیم‌بندی مکان‌های اسکان اضطراری مطابق نیاز آسیب‌دیدگان.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

1. Absalan, A., & Kongi, A. (2015). The Research Report of Crisis Management System In the Smart City Mashhad. IT Organizations Mashhad Municipality (In Persian).
2. Ahadnejad, M. (2014). The Modeling of the City Vulnerability with AHP and GIS in Zanjan. *Geography and Development Iranian Journal, 19,* 13-49 (In Persian).
3. Akbari, M., Abbaszadeh, Gh., & Amini, A., (2014). The Vulnerability of Mashhad Based on Global Experiments. *Journal of Sustainable Development, 3,* 7-23 (In Persian).
4. Aüüün, .. Gümşş baaa, F. & Tansel, B. (2015). Risk based facility location by using fault tree analysis in disaster management. *Omega, 52,* 168–179.
5. Barbarian, M., Gharashi, M. (1990). The Deep Research on Seismic Hazard in Mashhad Fault. *Geological Survey of Iran, Report, 72* (In Persian).
6. Barzinpour, F. & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *Int. J. Adv. Manuf. Technol. 70 (5–8),* 1291–1302.
7. Bayram, V. Tansel, B.Ç. & Yaman, H. (2015). Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning, Transp. *Res. Part B: Methodol, 72,* 146–163.
8. Bozorgi-Amiri, A., & Mansoori, S., & Pishvaee, M.S., (2017). Multi-objective Chain Network Design for Responding to Earthquake Under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective, 25,* 9-36 (In Persian)
9. Chang, M.S., Tseng, Y.L., & Chen, J.W. (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty, Transp. *Res. Part E: Logist. Transp. Rev. 43(6),* 737–754.
10. Chanta, S., & Sangsawang, O. (2012). Shelter-site selection during flood disaster, Lect. *Notes Manag. Sci., 4,* 282–288.
11. Chen, Z., X. Chen, Q. Li, J. Chen, (2013). The temporal hierarchy of shelters: a hierarchical location model for earthquake-shelter planning, Int. J. Geogr. Inf. Sci. 27 (8) 1612–1630
12. Coburn, A. & Spence, R. (2002*). Earthquake Protection.* 2nd edition, John Wiley and Sons, West Sussex, England.
13. Das, R., & Hanaoka, S. (2013). Robust network design with supply and demand uncertainties in humanitarian logistics, J. East. Asia Soc. *Transp. Stud., 10(0),* 954–969.
14. Dekle, J., Lavieri, M.S., Martin, E., Emir-Farinas, H., & Francis, R.L. (2005). A Florida county locates disaster recovery centers. *Interfaces, 35(2),* 133–139.
15. Esmaeili Kakhki, F., & Naji-Azimi, Z., & Pooya, A., & Tavakoli, A. (2019). A New Approach for Emergency Location after Earthquake in Mashhad. Journal of Geographical Space (In Persian).
16. Earthquake Research and environmental Centre of Tehran and the international cooperation agency of Japan (Jaika), micro-size quake of Tehran, final report, 2002.
17. Feng, C.M. & Wen, C.C. (2005). A bi-level programming model for allocating private and emergency vehicle flows in seismic disaster areas, in: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5(5), 1408–1423, 2005.

18. Gourtani, A., Nguyen, T. & Xu, H. (2020). A distributionally robust optimization approach for two-stage facility location problems. *EURO J Comput Optim.* , 8, 141-172.
19. Hong, J.D., Xie, Y., & Jeong, K.Y. (2012). Development and evaluation of an integrated emergency response facility location model. *J. Ind. Eng. Manag., 5(1),* 4.
20. Hu, F., Yang, S., & Xu, W. (2014). A non-dominated sorting genetic algorithm for the location and districting planning of earthquake shelters. *Int. J. Geogr. Inf. Sci., 28(7),* 1482–1501.
21. Khakpoor, B., Hayati, S., Kazemi, M., & Rabbani, Gh. (2014). The City Vulnerability Assessment with Fuzzy AHP. *Journal of Environmental Control, 22,* 21-38 (In Persian).
22. Kedchaikulrat, L. & Lohatepanont, M. (2015). Multi-objective location selection model for Thai red cross's relief warehouses. *in: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 10.*
23. Lin, Y.H. Batta, R., Rogerson, P.A., Blatt, A. Flanigan, M. (2012). Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake. *Socio-Econ. Plan. Sci., 46(2),* 112–123.
24. Mohaghar, A., Ariaei., S., (2018)., Location Problem with GIS and Weighted Maximum Coverage Problem. *Journal of Industrial Management Perspective, 26,* 9-32 (In Persian)
25. Nikjoo, N., & Javadian, N. (2019). A Multi-Objective Robust Optimization Logistics Model in Times of Crisis under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective, 32,* 121-147.
26. Ramezankhani, A. & Najafiyazdi, M. (2008). A System Dynamics Approach on Post-Disaster Management: A Case Study of Bam Earthquake. System dynamics conference, Tehran, Iran, 2008.
27. Verma, A., & Gaukler, G.M. (2015). Pre-positioning disaster response facilities at safe locations: an evaluation of deterministic and stochastic modeling approaches, Comput. *Oper. Res., 62,* 197–209
28. Ye, F., Zhao, Q. M., & Xi, M. (2015). Dessouky, Chinese national emergency warehouse location research based on VNS algorithm, Electron. *Notes Discret. Math., 47,* 61–68.
29. Zeren D. Yenice., Samanlioglu, F. (2020). A Multi-Objective Stochastic Model for an Earthquake Relief Network, Journal of Advanced Transportation.,, 41,70-141.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

A New Stochastic Model for Emergency Location Problem with Minimax Regret Model (Case Study: Mashhad)

Farshid Esmaeeli Kakhaki*, Zahra Naji-Azimi, Ali Reza Pooya***, Ahmad Tavakoli******

Abstract

The recent increase in the number of natural disasters, earthquake in particular, underlines the need to investigate the problem of emergency location. In this study, a new hybrid approach is presented for emergency location-allocation problem which incorporates GIS, system dynamics, Coburn and Spence model, and stochastic programming. In the proposed approach, first, the candidate places are identified based on a number of indices using GIS. Since the emergency location demand is considered as an uncertain parameter depending on different scenarios of the earthquake, in the next step, a combination of system dynamics and the casualty estimation model proposed by Coburn and Spence is used to estimate the demand. Then, proposing a stochastic location-allocation model, the demand is assigned to the candidate places determined by GIS. Finally, the minimax regret model is used to identify the final locations.

Keywords: System Dynamics; Location-Allocation Problem; Coburn and Spence Equation; Minimax Regret Model.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Received: Dec. 31, 2018, Accepted: May 16, 2020.
* Ph.D, Ferdowsi University of Mashhad.
** Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad (Corresponding Author).
E-mail: znajiazimi@um.ac.ir
*** Professor, Ferdowsi University of Mashhad.
**** Assistant professor, Ferdowsi University of Mashhad.