

تحلیل مکانی خطر وقوع زلزله در استان تهران و پهنه‌بندی آن با بهره‌گیری از تلفیق روش‌های فازی و AHP

گیتی خوش‌آموز^{۱*}، محمد غیبی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 ۲. رئیس گروه نقشه و اطلاعات مکانی، معاونت آمار و اطلاعات، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

چکیده

زلزله یکی از بحران‌های طبیعی است که بروز آن آسیب‌های زیادی به جای می‌گذارد. یکی از اقدامات برای کاهش این آسیب‌ها، تحلیل مکانی و پهنه‌بندی خطر وقوع زلزله است تا براساس نتایج آن بتوان در راستای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری کارا تر اقدام نمود. اهمیت این موضوع به خصوص در استان تهران به دلیل دربرداشتن پایتخت کشور و انباشت سرمایه بیشتر احساس می‌شود. لذا در این تحقیق، استان تهران به عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. برای دستیابی به این هدف نقشه معیارهای فاصله از گسل، تراکم گسل، شدت زلزله‌های پیشین، فاصله از مراکز زلزله‌های پیشین، عمق آن‌ها و وضعیت توپوگرافی (شیب منطقه) تهیه و درجه عضویت فازی به آن‌ها تعلق گرفت و پس از تعیین وزن هر معیار با استفاده از روش AHP، با بهره‌گیری از عملگر جمع فازی با یکدیگر همپوشانی داده شدند. محدوده استان به پهنه‌های با خطر نسبی کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی و برای هر شهرستان میزان درصد مساحت هر پهنه مشخص گردید. نتیجه نهایی حاکی از آن است که حدود ۷۰ درصد از مساحت شهرستان شمیرانات و حدود ۵۰ درصد از مساحت شهرستان‌های تهران، فیروزکوه و دماوند در پهنه با خطر بالای زلزله واقع می‌شوند.

کلید واژه‌ها: پهنه‌بندی خطر زلزله، سیستم اطلاعات مکانی، فازی، AHP، تصمیم‌گیری چند معیاره.

مقدمه

زلزله یکی از بحران‌های طبیعی و غیر قابل پیش‌بینی است که موجب به هم زدن شرایط طبیعی، زندگی روزانه و آسایش افراد جامعه می‌شود. زیرساخت‌ها و زیستگاه‌ها را تخریب و به خصوص در مناطق شهری بر روی جمعیت‌های زیاد تأثیر نامطلوب می‌گذارد و با توجه به وسعت تأثیر، تکرار رویداد و غیر قابل پیش‌بینی بودن باعث خسارات زیست محیطی و اقتصادی و اجتماعی بسیار می‌شود (پاشاپور و همکاران، ۱۳۹۶؛ Raduan et al. 2018؛ Ateş and Mutlu, 2019؛ Li et al., 2021). هم‌چنین اثرات مخرب بهداشتی و ساختمانی بر جای گذاشته و هزینه‌های هنگفتی برای دولت‌ها به همراه دارد (Nyimbili et al. 2018; Kamranzad et al., 2020).

برای کاهش و تسکین آسیب‌ها و خسارات زلزله مانند هر بحران دیگری نیاز به مدیریت بحران می‌باشد. مدیریت بحران مراتب مختلفی شامل پیش از وقوع بحران، در حین بحران و پس از وقوع آن دارد. اهمیت مرتبه پیش از وقوع بحران یا در واقع پیشگیری به مراتب بیشتر و مؤثرتر است (امیر احمدی و آب باریکی، ۱۳۹۳؛ Ganapathy, 2011) و می‌تواند اثرات مخرب آن را به شدت کاهش دهد (Raduan et al. 2018).

تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر و انجام برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری مبتنی بر آن یکی از اقدامات اساسی پیش از وقوع بحران است (Erden and Kararman, 2012; Nyimbili et al, 2018). می‌توان گفت پهنه‌بندی خطر زلزله اولین و مهمترین گام به سمت ارزیابی خطر لرزه و تدبیری برای کاهش خطرات آن به خصوص در مناطق پرجمعیت است (Ganapathy, 2011) و به برنامه‌ریزی بهتر توسعه زیر ساخت، شاخص‌های تسکین و پیشرفت در توسعه سیستم اخطاردهی کمک می‌نماید (Sekac et al., 2016). براساس نقشه پتانسیل خطر می‌توان چیدمان کاربری و آمایش سرزمین را انجام داد. به عنوان مثال انباشت سرمایه‌ها و استقرار جمعیت نباید در مناطق پرخطر زلزله صورت بگیرد (Kamranzad et al., 2020).

ادبیات تحقیق

در تحقیقات پیشین، پهنه‌بندی خطر زلزله در کشورهای مختلف به خصوص کشورهای لرزه‌خیزی چون ترکیه، چین، اندونزی و ایران با در نظر گرفتن معیارهای مختلف انجام شده است.

Pal et al. (۲۰۰۸) برای پهنه‌بندی خطر زلزله سیکیم هیمالیا با استفاده از GIS، ۸ لایه زمین‌شناسی، کلاس خاک، شیب، لغزش زمین، نوع سنگ و تعداد فرکانس موج تشبیه کننده حداکثر شتاب زمین تهیه نمود و این لایه‌ها با استفاده از روش AHP با هم تلفیق شدند.

Ganapathy (۲۰۱۱) برای تهیه نقشه ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای سطح اول در شهر چنای هند با راهکار GIS مبنای نقشه معیارهای حداکثر شتاب زمین، سرعت موج برشی، زمین‌شناسی، عمق سنگ بستر، عمق نوسان سطح آب را به دست آورد و با بهره‌گیری از روش AHP تلفیق نمود.

شهابی و همکاران (۱۳۹۰) در راستای پهنه‌بندی خطر زمین لرزه با روش تحلیل چند معیاره فزایی، معیارهای تعداد گسل، فاصله از خطوط گسل، جهت گسل، کانون وقوع زلزله، بزرگی زلزله، عمق، تراکم و ساختار لیتولوژیکی را برای

پهنه‌بندی خطر زلزله در استان کردستان به کار برد. برای این منظور داده‌های خطواره‌ها، بزرگی، تراکم و عمق زلزله‌های پیشین و ساختار لیتولوژیکی را جمع‌آوری نمود.

Erden and Kararman (۲۰۱۲) در جهت تحلیل پارامترهای زلزله برای تولید نقشه‌های خطر زلزله با تلفیق AHP و GIS و Nyimbili et al (۲۰۱۸) در راستای تلفیق GIS، AHP و TOPSIS برای تحلیل خطر زلزله، از عواملی چون شیب، فاصله تا کانون زلزله، طبقه‌بندی خاک، روانگرایی و مکانیزم گسلش برای پهنه‌بندی خطر زلزله در منطقه‌ای از ترکیه بهره گرفتند و از روش AHP برای وزن‌دهی به این معیارها استفاده نمودند.

Raduan et al. (۲۰۱۸) به منظور بهره‌گیری از GIS برای تهیه نقشه خطر زلزله در صباح مالزی، نرخ رویدادهای زلزله و بزرگی آن‌ها و حداکثر شتاب زمین را در نظر گرفت. نتایج تحلیل وی آشکار کرد که ۹۹/۹ درصد محدوده مطالعاتی در منطقه در خطر زلزله خواهد بود در حالی که محدوده‌های بدون خطر زلزله فقط برابر با ۰/۱ درصد مساحت می‌باشند.

امیر احمدی و آب باریکی (۱۳۹۳) برای ریز پهنه‌بندی خطر زلزله در سبزواری لایه‌های مدل رقومی ارتفاعی، شیب، فاصله از گسل، تراکم ساختمانی و جمعیت شهر، لایه کاربری اراضی، فاصله از کانون‌های زلزله‌های تاریخی، واحد ژئومورفولوژی و لایه لیتولوژی بهره گرفتند. برای وزن‌دهی به این معیارها روش AHP استفاده و در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر در پنج گروه خطر نسبی بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تهیه گردید.

Sekac et al (۲۰۱۶) ارزیابی GIS مبنای ریز پهنه‌بندی خطر زلزله را در دو استان گینه نو با معیارهای بزرگی و عمق زلزله، حداکثر شتاب زمین و روانگرایی خاک انجام داد. سه معیار اول از طریق روش‌های درونیایی به دست آمدند. به عنوان مثال نقشه عمق با درونیایی عمق زلزله‌های پیشین به دست آمد. هر چقدر عمق زلزله کمتر باشد، میزان خطر آن بیشتر است. برای تهیه نقشه روانگرایی خاک ۶ پارامتر ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی که انواع سنگ، آب در دسترس، زهکشی خاک، بافت خاک، شیب و ساختار گسل را شامل می‌شوند با هم تلفیق نمودند. نقشه‌های به دست آمده در بازه ۱ تا ۵ طبقه‌بندی مجدد و با تلفیق آن‌ها سطوح خطر زلزله محاسبه و مشخص شدند.

همکاران (۱۳۹۵) برای پهنه‌بندی زلزله خیزی پیش از بحران در استان خوزستان، ۷ معیار فاصله از خطوط گسل اصلی و فرعی، تراکم زلزله‌ها، زمین‌شناسی، سطوح هم عمق زلزله، سطوح هم شدت و زلزله‌های با شدت بیش از ۴ ریشتر را مد نظر قرار دادند و از روش AHP فازی برای ترکیب این معیارها استفاده نمودند.

همکاران (۱۳۹۶) در راستای پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی در کلانشهر تبریز، ۱۲ معیار فاصله از خطوط گسل، واحدهای زمین‌شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از نقاط زمین لغزش، تراکم جمعیت، کاربری اراضی، فاصله از مراکز خطر، دسترسی به شبکه‌های ارتباطی، قابلیت جابه‌جایی در شرایط بحرانی و فاصله از نقاط شهری و روستایی را در قالب دو بخش طبیعی و انسانی در نظر گرفته و نقشه خطر پذیری زلزله کلانشهر تبریز را ایجاد نمودند.

Ateş and Mutlu (۲۰۱۹) از ترکیب روش‌های AHP و TOPSIS و با بهره‌گیری از GIS برای ایجاد نقشه خطر زلزله در منطقه گلیاکا شهر دوزجه ترکیه بهره گرفتند. ۵ معیار توپوگرافی، فاصله تا کانون زلزله، طبقه‌بندی خاک، روانگرایی و

مکانیزم گسلس برای این منظور در نظر گرفته شدند. از روش AHP برای تعیین اوزان معیارها و ورودی به روش TOPSIS استفاده شد.

Kamranzad et al. (۲۰۲۰) به ارزیابی خطر زلزله در شهر تهران پرداخت. ابتدا اجزای ریسک شامل خطر، در معرض بودن و آسیب پذیری را براساس داده‌های مکانی موجود مانند لرزه، زمین شناسی، گسل‌های فعال، توزیع جمعیت، کاربری زمین، بافت شهری، ارتفاع ساختمان‌ها، نوع سازه و قدمت و مجاورت به زیرساخت‌های بحرانی ارزیابی نمود. در واقع ریسک زلزله را با سه عنصر خطر، در معرض بودن و آسیب‌پذیری کمی نمود. از حداکثر شتاب زمین برای تهیه نقشه خطر بهره گرفت و نقشه‌های در معرض بودن براساس تراکم جمعیت و آسیب‌پذیری فیزیکی با ترکیبی از لایه‌های کاربری زمین، بافت شهری، ارتفاع ساختمان، نوع سازه فراهم شدند و در نهایت هر سه جزء در یک چارچوب مکانی تلفیق و نقشه ریسک زمین لرزه شهر تهران به دست آمد.

Kargaranbafghi et al. (۲۰۲۰) تحلیل خطر زلزله‌ای شهر زرنند را با تلفیق GIS و AHP، براساس عمق زلزله‌ها، فاصله تا مراکز زلزله، بزرگی زلزله‌ها، سنگ‌شناسی و فاصله از گسل انجام داد.

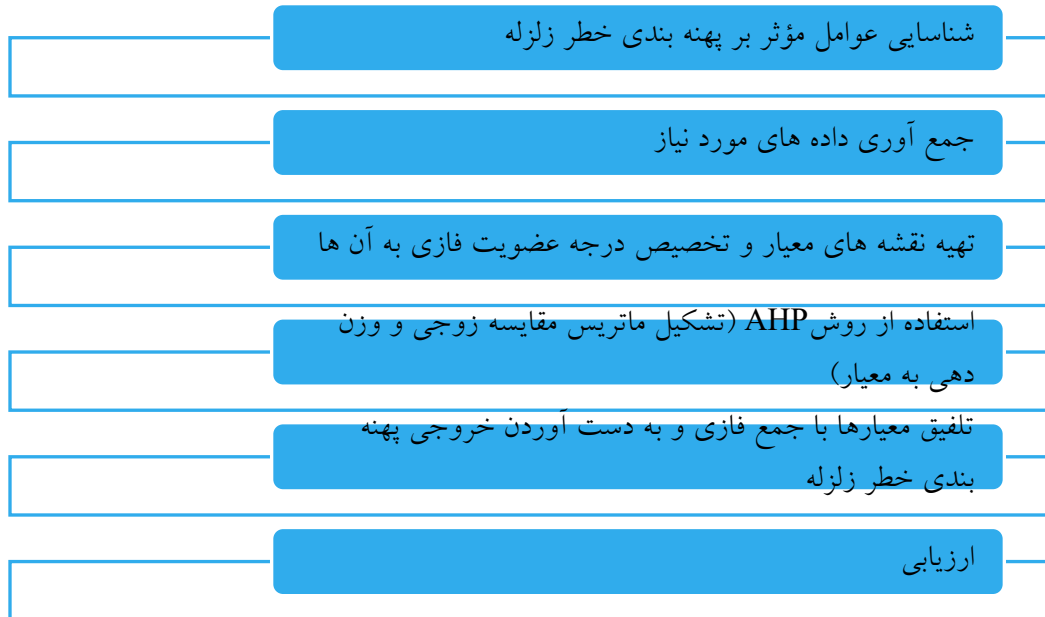
Li et al. (۲۰۲۱) مدل پیش‌بینی میزان تلفات انسانی براساس یادگیری ماشین را در مناطق آسیب دیده از زلزله در چین ارائه نمود و برای تقسیم‌بندی منطقه مطالعاتی به درجات مختلف مناطق خطر، از داده خطوط گسل و جمعیت بهره گرفت. Al-Dogom et al. (۲۰۲۱) تحلیل چند معیاره مکانی را برای ارزیابی خطر زلزله در فجیره امارات به کار گرفت. بدین منظور از روش‌های AHP و یادگیری ماشین بهره گرفت. ۵ لایه موضوعی حداکثر شتاب زمین، طبقه‌بندی خاک، فاصله از گسل، درصد شیب و زمین‌شناسی در منطقه‌بندی خطر زلزله در تحقیق آن‌ها در نظر گرفته شد.

در مطالعات تحلیل مخاطرات (زلزله و حرکات توده‌ای) طرح تهیه و تدوین برنامه آمایش استان تهران در سال ۱۳۸۸، پهنه‌بندی خطر زلزله براساس دو معیار فاصله از گسل و فاصله از کانون‌های زمین لرزه انجام شده است (علیمحمدی، ۱۳۸۸).

به طور خلاصه تحقیقات مختلفی در زمینه پهنه‌بندی خطر زلزله انجام شده است. اما نوآوری تحقیق پیش‌رو تلفیق دو روش AHP و فازی برای پهنه‌بندی خطر زلزله در استان تهران می‌باشد و براساس دانش نویسندگان تاکنون چنین تحقیقی انجام نپذیرفته است.

۳. روش انجام تحقیق

نمودار مراحل انجام تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ - نمودار مراحل انجام تحقیق (منبع: نویسندگان)

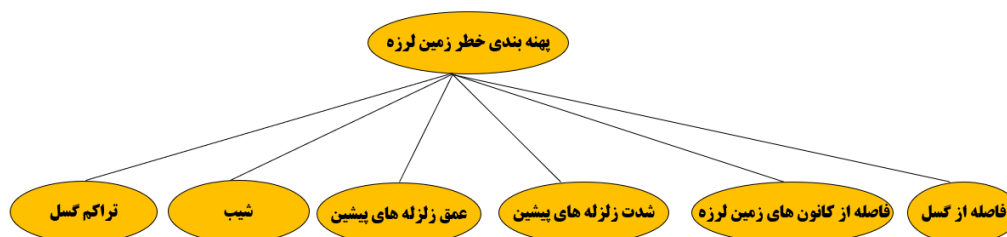
پهنه‌بندی خطر زلزله یک مسأله چند معیاره است یعنی معیارها و عوامل مختلفی در آن دخیل هستند. لذا برای انجام آن می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بهره برد (Ateş and Mutlu, 2019). تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی شامل مجموعه‌ای از گزینه‌های تعریف شده مکانی است که از بین آن‌ها یک یا چند گزینه با توجه به مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی انتخاب می‌شوند (Erden and Kararman, 2012). لذا اولین گام در ارزیابی پتانسیل خطر لرزه‌ای یک منطقه، شناسایی معیارهای مؤثر در آن، سپس جمع‌آوری داده‌های مرتبط برای استخراج این معیارهاست. براساس تحقیقات پیشین معیارهای در نظر گرفته شده در این تحقیق، فاصله از گسل‌ها و تراکم آن‌ها، بزرگی زلزله‌های پیشین، فاصله از مراکز زلزله‌های پیشین و عمق آن‌ها و شیب منطقه می‌باشد. با توجه به اینکه مهمترین عامل وقوع زلزله، گسل‌ها می‌باشند، لذا شناسایی و بررسی موقعیت آن‌ها می‌تواند برای تشخیص مناطق پرخطر مورد استفاده قرار گیرد (علیمحمدی، ۱۳۸۸). فاصله از گسل به دلیل مجاورت نزدیک بین گسل و زلزله و اینکه اکثر زلزله‌ها بر روی گسل متمرکز شده‌اند، اهمیت ویژه‌ای دارد. هرچقدر گسل‌ها دورتر باشند، اثر زلزله کاهش می‌یابد (شهابی و همکاران، ۱۳۹۰). بزرگی زلزله عامل مهمی است زیرا تأثیر زلزله در منطقه بستگی به بزرگی یا شدت آن دارد. فاصله از مرکز زلزله و عمق زلزله نیز دارای اهمیت هستند. هر چقدر فاصله از مرکز بیشتر باشد، اثر زلزله کاهش می‌یابد و هرچقدر وقوع زلزله در عمق کمتر باشد، شدتش بیشتر خواهد بود و وسعت و گستردگی تخریب ناشی از آن بیشتر می‌گردد. اما عمق بیشتر قدرت تخریب زلزله را کاهش

می‌دهد (مودت و همکاران، ۱۳۹۵؛ Sekac et al., 2016). هم‌چنین همیشه این احتمال وجود دارد که اگر در مکانی در گذشته زلزله بزرگی اتفاق افتاده باشد، مستعد زلزله‌های بزرگ در آینده نیز هست (Sekac et al., 2016). پس بررسی موقعیت زلزله‌های پیشین نیز به پهنه‌بندی خطر زلزله کمک می‌نماید (علیمحمدی، ۱۳۸۸). اثر زلزله با افزایش فاصله از کانون زمین لرزه کاهش می‌یابد. علاوه بر این اثر توپوگرافی عامل مهمی در خطرات زلزله است و افزایش ارتفاع و درجه شیب باعث تقویت اثر زلزله می‌گردد.

پس از شناسایی معیارهای موثر بر پهنه‌بندی زلزله، برای تهیه نقشه هر معیار باید داده مناسب جمع‌آوری گردد. براین اساس نیاز به جمع‌آوری داده‌های موقعیت زلزله‌های پیشین و خصوصیات آن‌ها از جمله شدت، عمق، بزرگی می‌باشد. هم‌چنین داده گسل و مدل رقومی ارتفاعی مورد نیاز است. سه نقشه معیار شدت، عمق و بزرگی زلزله با استفاده از روش درون‌یابی وزن دار معکوس فاصله از خصوصیات زلزله‌های پیشین منتج می‌شوند. فاصله از مراکز زلزله‌های پیشین و فاصله از خطوط گسل به کمک فاصله اقلیدسی به دست می‌آیند و تراکم خطوط گسل با بهره‌گیری از تابع محاسبه تراکم نرم افزار GIS قابل دستیابی است. نقشه معیار شیب نیز از مدل ارتفاعی رقومی استخراج می‌شود.

برای وزن‌دهی به نقشه معیارهای فوق، از روش AHP بهره گرفته شد و ماتریس مقایسه زوجی براساس تحقیقات پیشین تشکیل و وزن هر معیار محاسبه می‌گردد.

AHP یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و پر کاربرد است که در اواسط ۱۹۷۰ توسط ساعتی معرفی و از آن پس در انواع کاربردها شامل مکان‌یابی، برنامه‌ریزی، پهنه‌بندی و ... مورد استفاده واقع شد. این روش به تصمیم‌گیران برای مرتب کردن معیار و گزینه‌های مسأله تصمیم در یک مدل تصمیم سلسله مراتبی کمک می‌کند (Erden and Kararman, 2012; Kargaranbafghi et al. 2020). درخت سلسله مراتبی یک نمایش گرافیکی از مسأله است که در بالاترین سطح آن هدف کلی مسأله و در سطوح بعدی معیارها و گزینه‌ها قرار دارند (مودت و همکاران، ۱۳۹۵). شکل ۲، درخت سلسله مراتب این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - درخت سلسله مراتب تحلیل فضایی و پهنه‌بندی خطر زمین لرزه (منبع: نویسندگان)

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی براساس مقیاس ۹ کمیته همه معیارها در ارتباط با هم و به صورت دودویی بررسی و مقایسه می‌شوند. مقیاس نه کمیته شامل ۹، ۸، ۷، ...، ۱/۷، ۱/۸، ۱/۹ است که ۹ بیانگر حداکثر ارجحیت می‌باشد. ۷ بیانگر ترجیح خیلی قوی است، ۵ بیانگر ترجیح قوی و تا ۱ که بیانگر هیچ ترجیحی نیست،

کاهش می‌یابد. مقایسه زوجی در ماتریس مربعی مرتب می‌شود که عناصر قطری ۱ هستند (Dogom et al., 2021). سپس با نرمال نمودن ردیف‌های ماتریس، ضرایب اهمیت و امتیاز هر معیار مشخص می‌گردد. در هر سطح سلسله مراتب، فرآیند کنترلی برای مقایسات زوجی انجام می‌شود. اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، این نرخ سطح قابل قبول سازگاری در مقایسات زوجی را نشان می‌دهد. اگر بزرگتر از ۰/۱ باشد، مقادیر نسبی بیانگر قضاوت‌های ناسازگار است که کاربر باید مجدد مقادیر اصلی را در ماتریس مقایسه زوجی باز ارزیابی نماید و فرآیند را تکرار کند (al, 2020). شاخص سازگاری با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

که در آن λ_{\max} بزرگترین مقدار ویژه و n تعداد معیار است. نرخ سازگاری از تقسیم شاخص سازگاری بر عدد حقیقی RI یا (شاخص تصادفی) با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

RI، تخمینی از میانگین شاخص سازگاری به دست آمده از مجموعه‌ای بزرگ از ماتریس‌های تصادفی تولید شده به اندازه n است (Erden and Kararman, 2012).

در GIS رستر مبنا هر سلول منفرد یک گزینه و کاندیدی برای ارزیابی می‌باشد. لذا به دلیل تعداد زیاد سلول‌ها، مقایسه زوجی گزینه‌ها غیر عملی است و از جمع وزن‌دار بهره گرفته می‌شود (Erden and Kararman, 2012). اما برای اینکه بتوان لایه‌های مختلف را با هم تلفیق نمود، باید مقادیر تمام لایه‌ها در یک بازه مشخص قرار داشته باشند که در این تحقیق مقادیر ۱ تا ۵ مدنظر قرار گرفت. توجه به این نکته ضروری است که در برخی معیارها با افزایش مقدار، خطر زلزله بالاتر می‌رود و در برخی معیارها به صورت بالعکس می‌باشد. جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که کدامیک از معیارها به صورت مستقیم و کدامیک به صورت معکوس تأثیر می‌گذارند.

جدول ۱ - معیارهای مستقیم و معکوس (منبع: نویسندگان)

معیارهای مستقیم (افزایش معیار، خطر پذیری بیشتر)	معیارهای معکوس (افزایش معیار، خطر پذیری کمتر)
شیب	فاصله از گسل
تراکم گسل	فاصله از مراکز زلزله‌های پیشین
شدت یا بزرگی زلزله‌های پیشین	عمق زلزله‌های پیشین

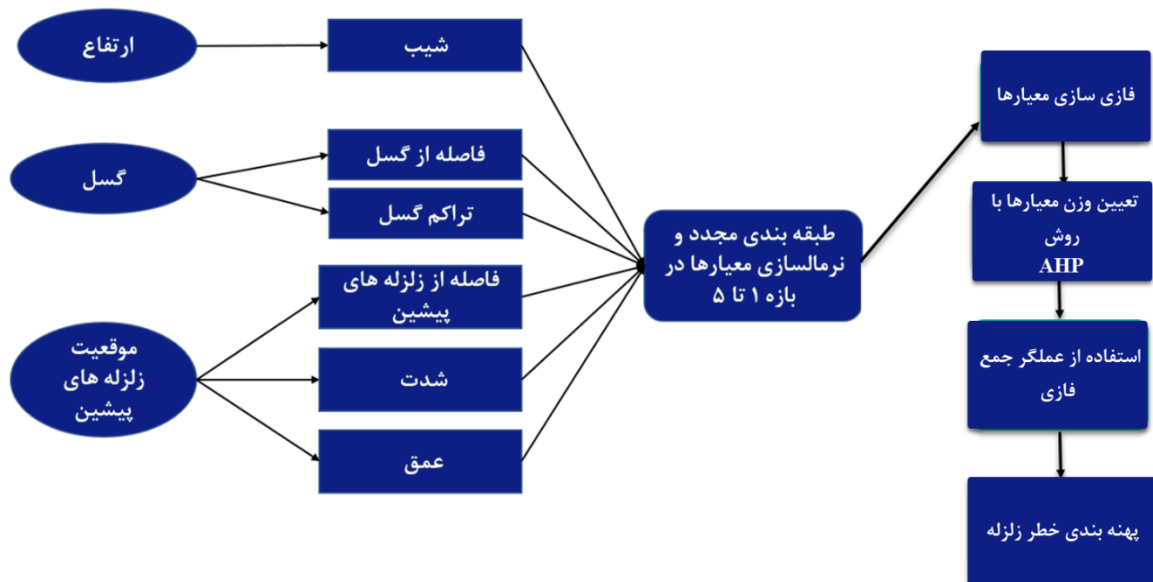
در واقع هر کدام از نقشه‌های معیار طبقه‌بندی مجدد شدند و عدد ۵ برای خطر بیشتر زلزله و ۱ برای خطر کمتر زلزله اختصاص داده شد. سپس هر نقشه معیار نرمال شده، با استفاده از تابع عضویت خطی، دارای درجه عضویت فازی شد.

در منطق فازی، درجه عضویت یک معیار در بازه صفر (عدم عضویت) تا یک (عضویت کامل) مشخص می‌گردد. برای تعیین درجه عضویت از یک تابع عضویت استفاده می‌شود که این تابع می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد (بهشتی‌فر و

همکاران، ۱۳۸۹). در این تحقیق از تابع عضویت خطی بهره گرفته شد. پس از بهره‌گیری از تابع عضویت فازی مقداری بین ۰ تا ۱ به هر پیکسل اختصاص گردید که مقدار نزدیکتر به ۱، بیانگر خطر زلزله بالاتر است. پس از فازی سازی معیارها، هر معیار در وزن به دست آمده از روش AHP ضرب شده و نتایج حاصل با استفاده از عملگر جمع فازی با هم تلفیق شدند تا نقشه خطر پذیری زلزله به دست آید. عملگر جمع فازی با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود (بهشتی فر و همکاران، ۱۳۸۹).

$$\mu_{Combination} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)$$

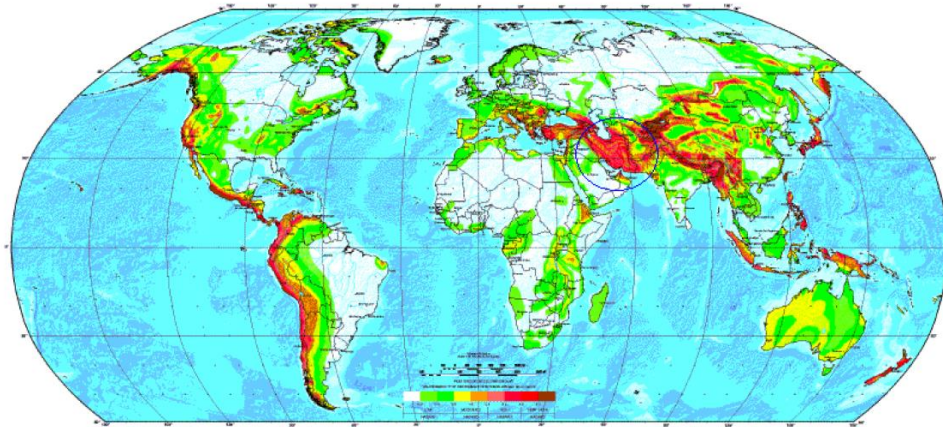
نقشه حاصل استان را در ۳ سه دسته خطرپذیری کم، متوسط و بالا پهنه‌بندی می‌نماید. نمودار کل مراحل در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳ - نمودار مراحل ایجاد نقشه‌های معیار، فازی سازی و تلفیق آن‌ها (منبع: نویسندگان)

پیاده‌سازی

منطقه مطالعاتی در این تحقیق استان تهران در نظر گرفته شده است. زیرا از طرفی کل کشور بر روی کمربند لرزه خیز آلپ-همیالیا واقع شده و وجود گسل‌های متعدد، فرآیندهای فعال زمین‌شناسی و صفحه‌ای زلزله را به عنوان یک خطر بالقوه در ایران مطرح ساخته است (شهابی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پاشاپور و همکاران، ۱۳۹۶) (شکل ۴).

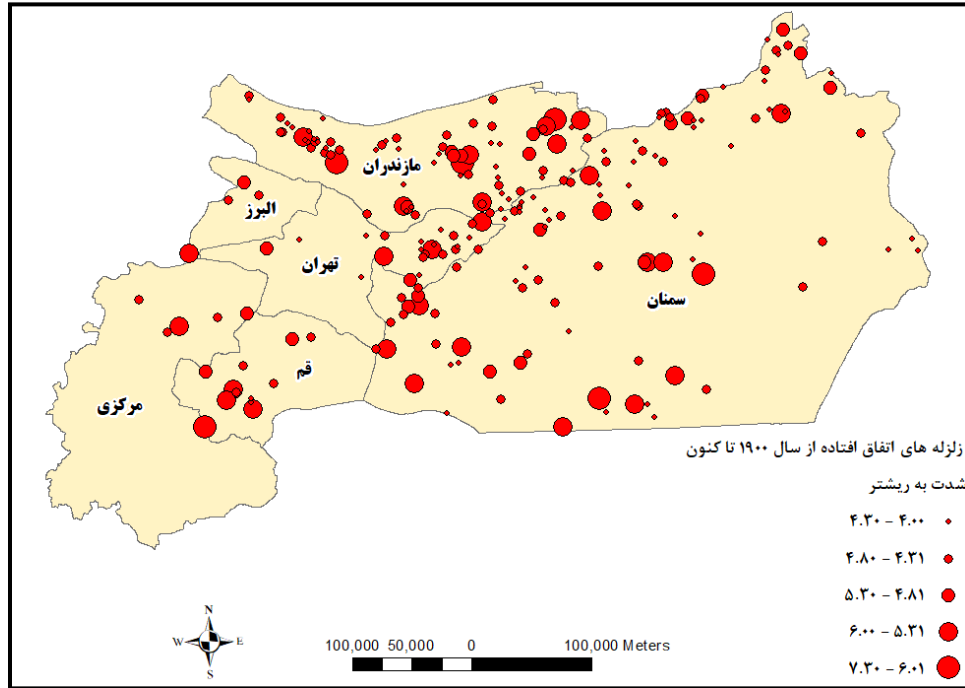


شکل ۴ - موقعیت ایران به عنوان یک کشور زلزله خیز (ناحیه قرمز داخل دایره) واقع بر کمربند فعال و لرزه خیز آلپ، هیمالیا (منبع: علیمحمدی، ۱۳۸۸).

از طرف دیگر تأثیر مخرب زلزله در استان تهران به دلیل دربرداشتن شهر تهران به عنوان پایتخت کشور و هم‌چنین دارا بودن جمعیت بالا بسیار زیاد خواهد بود (Kamranzad et al., 2020؛ علیمحمدی، ۱۳۸۸). در طی ۶۵ سال، جمعیت استان تهران از ۱/۵ میلیون تا حدود ۱۵ میلیون نفر افزایش یافته است (Kamranzad et al., 2020). استان تهران دارای گسل‌های پر تعداد می‌باشد که اکثراً بصورت نوارهای شرقی- غربی در شمال و جنوب استان واقع شده‌اند. منشأ اکثریت زلزله‌های به وقوع پیوسته در استان، نوار گسلی هم جهت رشته کوه‌های البرز در نیمه شمالی بوده است. اگرچه اکثر گسل‌های مهمی که در گستره تهران وجود دارند لرزه‌زا بوده و انتظار لرزه‌زایی مجدد آن‌ها وجود دارد. این عامل با توجه به تراکم و نوع گسل‌های موجود در استان و با در نظر گرفتن دوره بازگشت زلزله در استان حاکی از محتمل بودن وقوع آن است. بررسی توزیع شهرستان‌ها در طبقات مختلف فاصله از گسل‌ها نیز نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مراکز جمعیتی استان در نواحی نزدیک به گسل‌ها استقرار یافته‌اند (علیمحمدی، ۱۳۸۸).

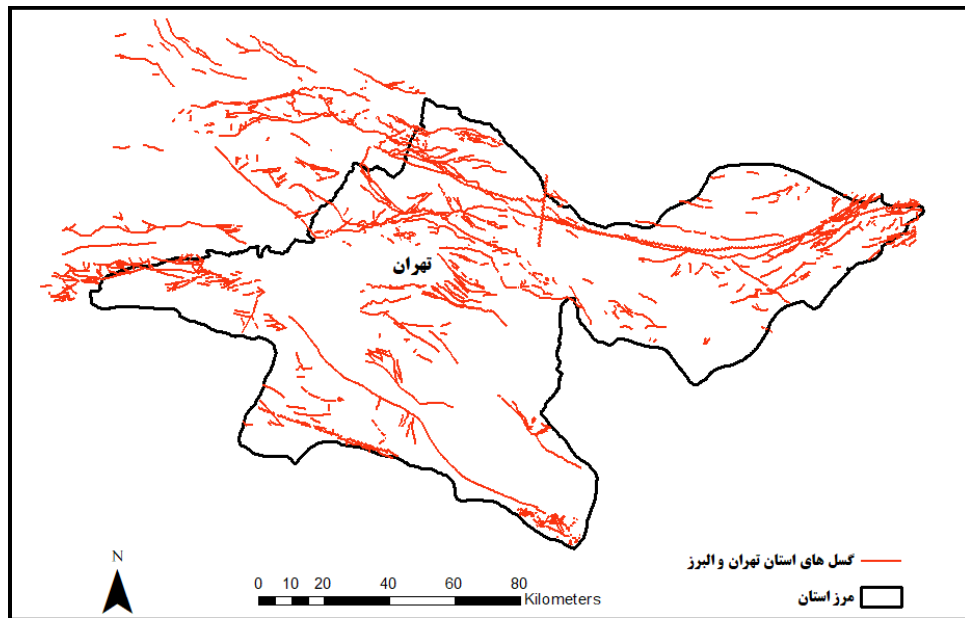
داده استفاده شده در این تحقیق شامل موقعیت زلزله‌های پیشین، خطوط گسل و مدل رقومی ارتفاعی می‌باشد. زلزله‌های پیشین براساس نوع و دقت اطلاعات به دو دسته زلزله‌های تاریخی و دستگاهی تقسیم‌بندی می‌شوند. اطلاعات زلزله‌های تاریخی دقیق نیست و شامل رویدادهای لرزه‌ای می‌باشند که از سالیان قبل تا آغاز قرن بیستم به وقوع پیوسته‌اند و با استفاده از مدارک، شواهد و مطالعات مختلف، اسناد تاریخی، سفرنامه‌ها می‌توان راجع به آن‌ها اطلاعات کسب نمود. صحت بزرگی، موقعیت و زمان تخمینی آن‌ها بستگی به نوع و دقت شواهد مورد استفاده دارد. به دلیل اینکه اطلاعات راجع به زلزله‌های تاریخی غیر دقیق و جمع‌آوری آن مشکل است، در این تحقیق در نظر گرفته نشدند. با شروع قرن بیستم با نصب دستگاه‌های لرزه نگار، تعیین بزرگی، زمان و موقعیت مکانی زلزله‌ها با دقت بسیار بالا امکان‌پذیر شد (علیمحمدی، ۱۳۸۸؛ Lay and Wallace 1995). امروزه اندکی پس از وقوع زمین‌لرزه، اطلاعات کاملی از مشخصات آن شامل موقعیت، عمق، زمان وقوع، شدت و سایر ویژگی‌های آن را می‌توان در صفحات اینترنتی مراکز زلزله نگاری معتبر مشاهده نمود (علیمحمدی، ۱۳۸۸). در تحقیق پیش‌رو اطلاعات زلزله‌های پیشین از سایت <https://earthquake.usgs.gov> سازمان

زمین‌شناسی آمریکا استخراج گردیدند. به دلیل اینکه زلزله‌های به وقوع پیوسته در استان‌های مجاور استان تهران هم تأثیر گذارند، کلیه زلزله‌های دستگاهی بالای ۴ ریشتر به وقوع پیوسته از سال ۱۹۰۰ به بعد جمع‌آوری شدند که تعداد آن‌ها برابر با ۲۲۲ مورد می‌باشد. شکل ۵ موقعیت و بزرگی این زلزله‌ها را نمایش می‌دهد. خصوصیات توصیفی هر داده زلزله مانند موقعیت، تاریخ وقوع، بزرگی و عمق آن در جدول خصوصیت توصیفی متناسب به آن وجود دارد.



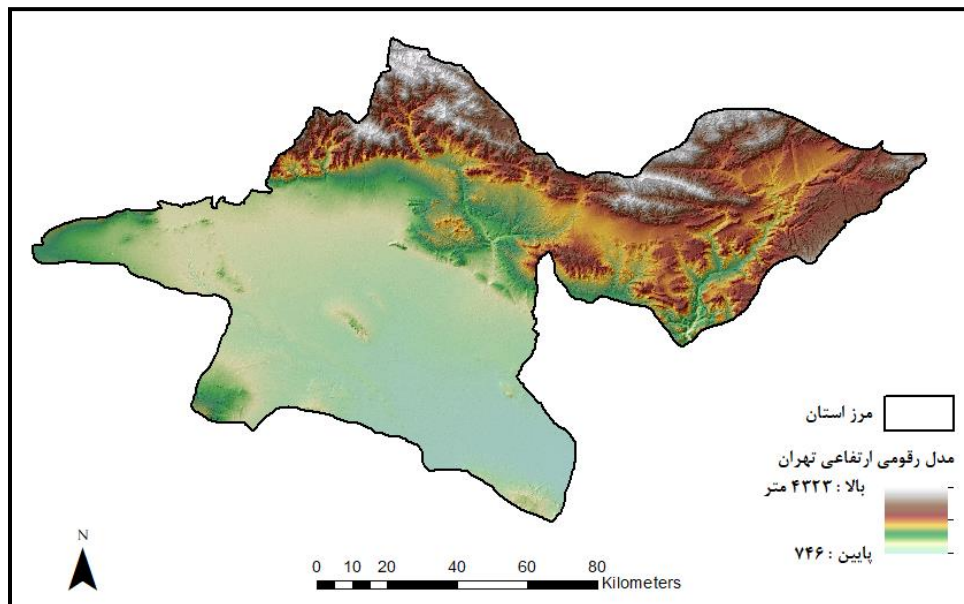
شکل ۵ - موقعیت زلزله‌های دستگاهی بالای ۴ ریشتر به وقوع پیوسته در استان تهران و استان‌های همجوار (منبع: نویسندگان)

داده‌های گسل استان تهران و اطراف آن نیز جمع‌آوری شدند (شکل ۶).



شکل ۶ - گسل‌های استان تهران و اطراف آن (منبع: نویسندگان)

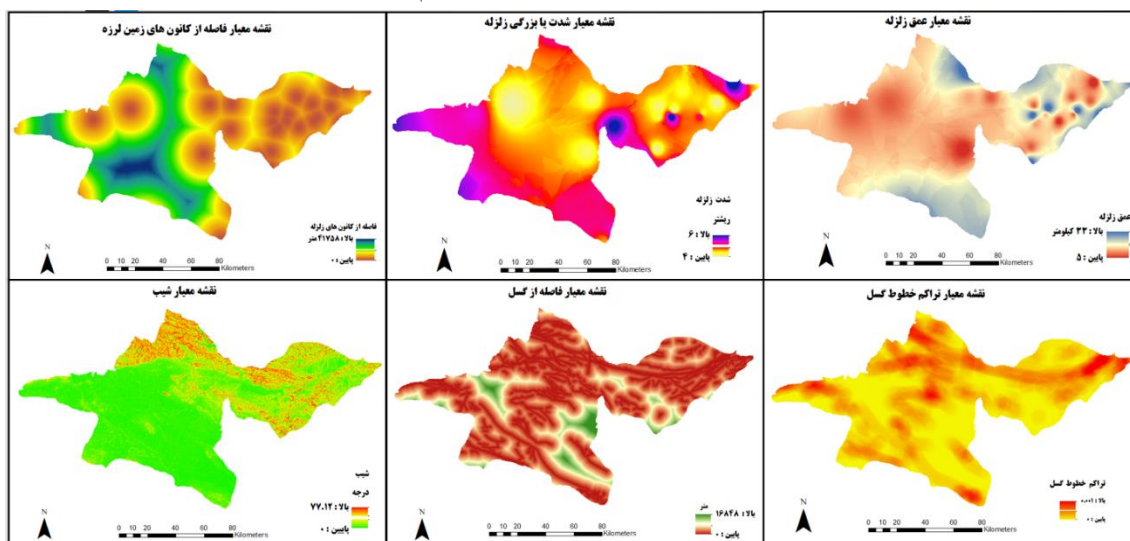
مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM استان تهران در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷ - مدل رقومی ارتفاعی استان تهران (منبع: نویسندگان)

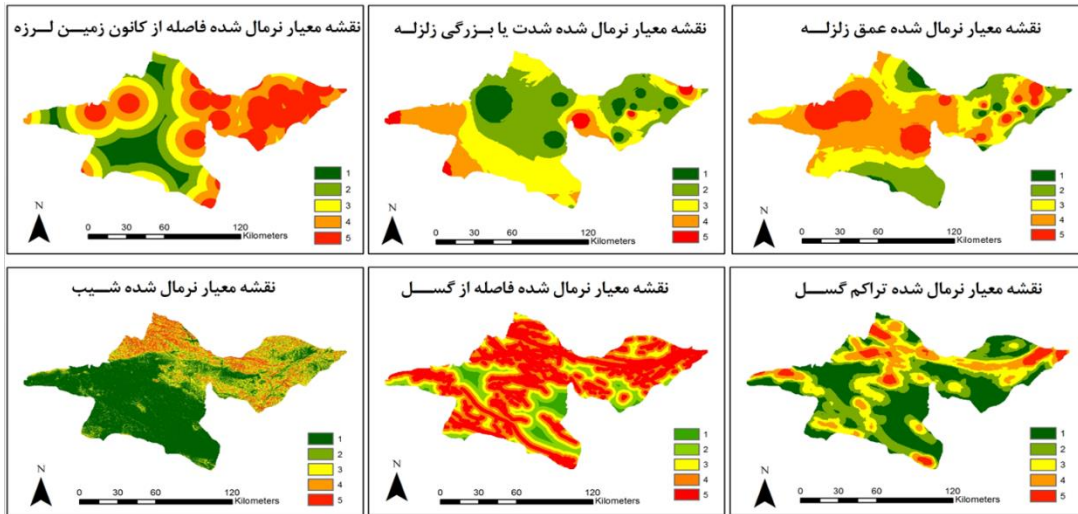
ایجاد نقشه‌های معیار و تلفیق آن‌ها

با انجام تحلیل‌های مورد نیاز بر روی هر یک از داده‌های فوق ارائه شده در شکل ۳، ۶ نقشه معیار فاصله از کانون‌های زمین لرزه، شدت یا بزرگی زلزله، عمق زلزله، شیب، فاصله از گسل و تراکم خطوط گسل تهیه شدند (شکل ۸).



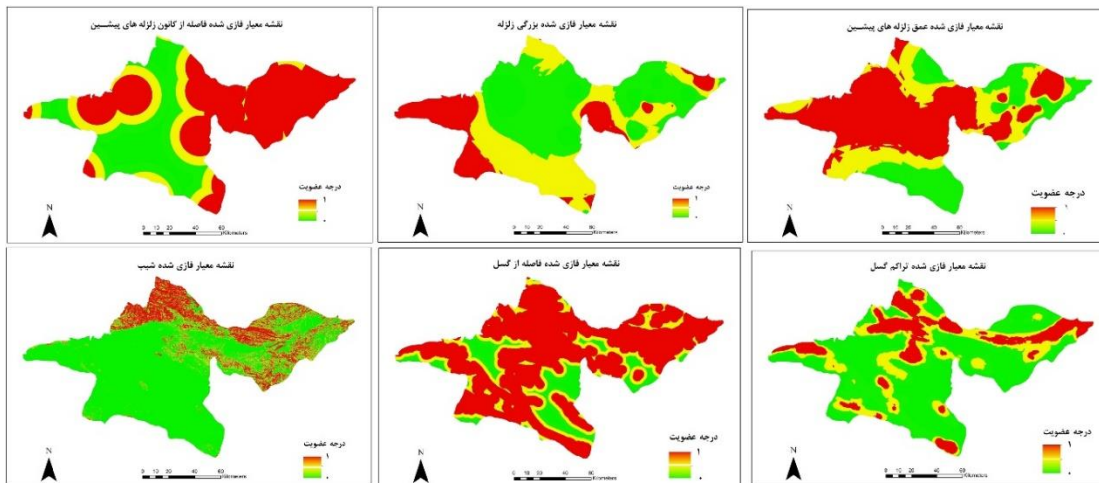
شکل ۸ - نقشه‌های معیار مورد نیاز برای پهنه‌بندی خطر زلزله (منبع: نویسندگان)

سپس این نقشه‌های معیار با توجه به مستقیم یا معکوس بودن مطابق با جدول ۱، در بازه ۱ تا ۵ نرمال گردیدند (شکل ۹).



شکل ۹ - نقشه‌های معیار نرمال شده برای پهنه‌بندی خطر زلزله (منبع: نویسندگان)

در گام بعدی هر کدام از نقشه معیارهای ایجاد شده با تابع عضویت خطی، فازی سازی شدند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰ - فازی‌سازی نقشه‌های معیار برای پهنه‌بندی خطر زلزله (منبع: نویسندگان)

سپس ماتریس مقایسه زوجی براساس تحقیقات پیشین مطابق جدول زیر تشکیل گردید.

جدول ۱ - ماتریس مقایسه زوجی بین ۶ معیار مؤثر در پهنه‌بندی خطر زلزله (منبع: نویسندگان)

معیار	شدت زلزله	تراکم خطوط گسل	فاصله از مرکز زلزله	شیب	فاصله از گسل	عمق زلزله
شدت زلزله	۱	۰/۳۳۳	۳	۹	۰/۳۳۳	۷
تراکم خطوط گسل	۳	۱	۵	۶	۱	۹
فاصله از مرکز زلزله	۰/۳۳۳	۰/۲	۱	۶	۰/۲	۵
شیب	۰/۱۱۱	۰/۱۷	۰/۱۷	۱	۰/۱۷	۰/۳۳۳

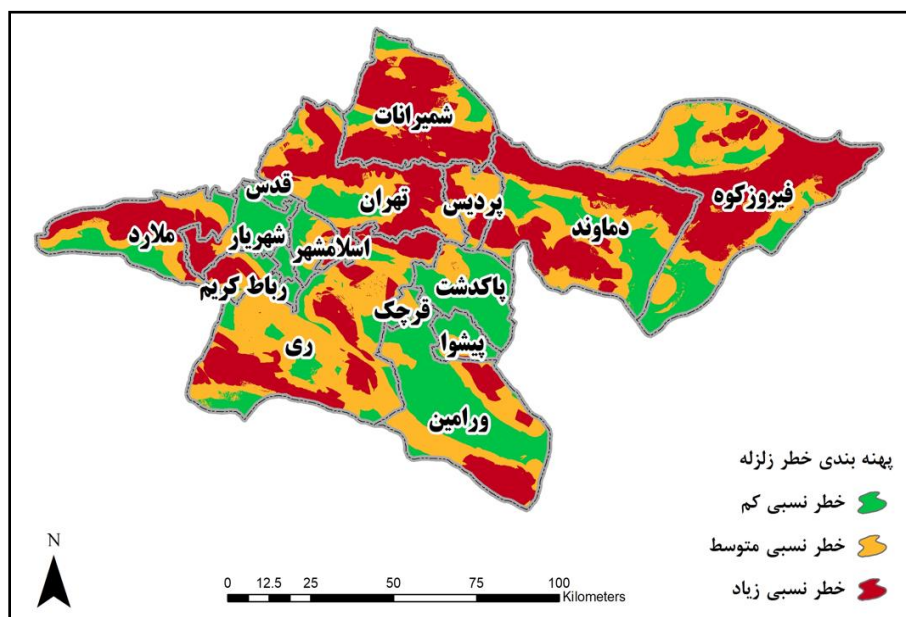
فاصله از گسل	۳	۱	۵	۶	۱	۹
عمق زلزله	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۲	۳	۰/۱۱۱	۱

براساس جدول ۲، وزن معیارها به صورت جدول ۳ محاسبه گردید.

جدول ۳ - محاسبه وزن معیارها (منبع: نویسندگان)

وزن	معیار
۰/۱۸۱	شدت زلزله
۰/۰۳۲	شیب
۰/۱۰۱	فاصله از مرکز زلزله
۰/۳۲۲	فاصله از گسل
۰/۰۴۰	عمق زلزله
۰/۳۲۲	تراکم گسل

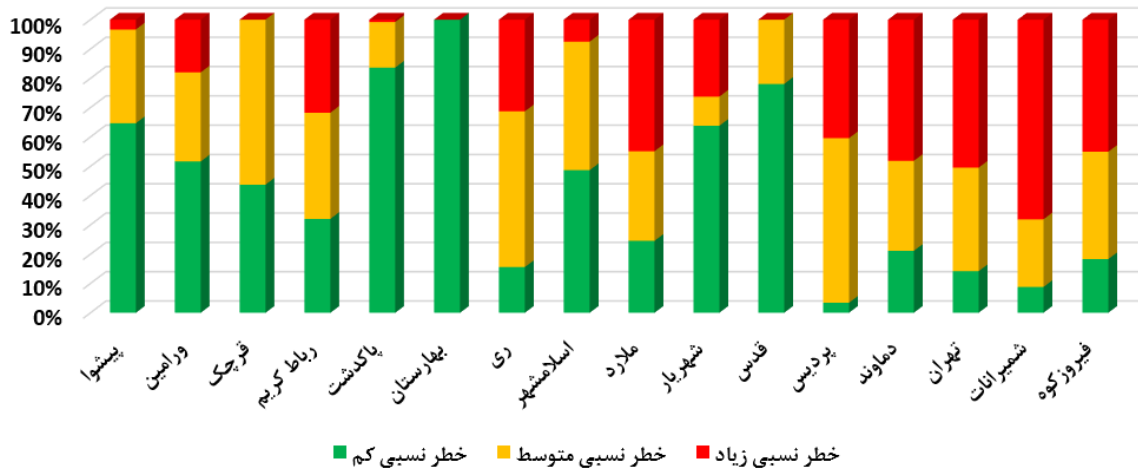
نرخ ناسازگاری CR نیز برابر با ۰/۰۹ به دست آمد که بیانگر سازگاری قابل قبول بین قضاوت‌ها است. با حاصلضرب وزن هر معیار در نقشه معیار آن و جمع فازی آن‌ها با یکدیگر نقشه شکل ۱۱ حاصل می‌شود.



شکل ۱۱ - نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زلزله در استان تهران با استفاده از روش پیشنهاد شده در این تحقیق (منبع: نویسندگان)

نمودار درصد مساحتی از هر شهرستان که در هر کدام از پهنه‌های خطرپذیری کم‌تر، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

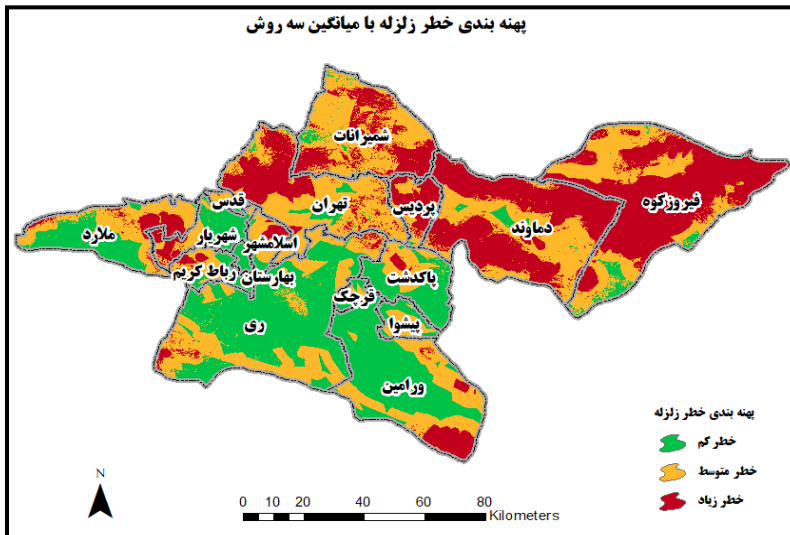
درصد مساحت پهنه بندی خطر زمین لرزه استان تهران با استفاده از جمع وزن دار فازی



شکل ۱۱ - درصد مساحت پهنه‌بندی خطر زمین لرزه هر یک از شهرستان‌های استان با استفاده از جمع وزن دار فازی (منبع: نویسندگان).

۵. ارزیابی و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی نتایج سه سناریو در نظر گرفته شد: ۱- جمع نقشه‌های معیار نرمال شده بدون وزن دهی، ۲- در نظر گرفتن تنها دو معیار فاصله از کانون‌های زلزله و فاصله از گسل و ۳- در نظر گرفتن سه معیار فاصله از کانون‌های زلزله، فاصله از گسل و شیب. سپس با میانگین‌گیری از نقشه‌های حاصل از این سه سناریو، شکل ۱۲ برای مقایسه و ارزیابی منتج شد.



شکل ۱۲ - نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله قابل استفاده برای مقایسه و ارزیابی شکل ۱۰ (منبع: نویسندگان)

جداول ۴ و ۵ به ترتیب درصد مساحت پهنه‌بندی خطر زلزله به تفکیک شهرستان را با روش جمع وزن دار فازی و ارزیابی نشان می‌دهد.

جدول ۴ - درصد مساحت پهنه بندی خطر زلزله به تفکیک شهرستان با روش جمع وزن دار فازی (منبع: نویسندگان)

ردیف	نام شهرستان	خطر کم	خطر متوسط	خطر زیاد
۱	شمیرانات	۹	۲۳	۶۸
۲	اسلامشهر	۴۹	۴۴	۷
۳	شهریار	۶۴	۱۰	۲۶
۴	بهارستان	۱۰۰	۰	۰
۵	فیروزکوه	۱۸	۳۷	۴۵
۶	پاکدشت	۸۴	۱۵	۱
۷	قدس	۷۸	۲۲	۰
۸	پردیس	۳	۵۶	۴۱
۹	قرچک	۴۴	۵۶	۰
۱۰	پیشوا	۶۵	۳۲	۳
۱۱	ملارد	۲۴	۳۱	۴۵
۱۲	تهران	۱۴	۳۵	۵۱
۱۳	ری	۱۶	۵۳	۳۱
۱۴	رباط کریم	۳۲	۳۶	۳۲
۱۵	دماوند	۲۱	۳۱	۴۸
۱۶	ورامین	۵۲	۳۰	۱۸

جدول ۵ - درصد مساحت پهنه بندی خطر زلزله به تفکیک شهرستان با روش ارزیابی (منبع: نویسندگان)

ردیف	نام شهرستان	خطر کم	خطر متوسط	خطر زیاد
۱	شمیرانات	۱۴	۴۰	۴۶
۲	اسلامشهر	۳۶	۵۱	۱۳
۳	شهریار	۵۰	۲۷	۲۳
۴	بهارستان	۱۰۰	۰	۰
۵	فیروزکوه	۹	۲۳	۶۸
۶	پاکدشت	۶۵	۳۰	۵
۷	قدس	۳۸	۵۸	۴
۸	پردیس	۳	۳۷	۶۰
۹	قرچک	۷۶	۲۴	۰
۱۰	پیشوا	۵۶	۴۳	۱
۱۱	ملارد	۳۶	۴۳	۲۱
۱۲	تهران	۱۲	۵۳	۳۵

۳	۳۳	۶۴	ری	۱۳
۱۶	۴۵	۳۹	رباط کریم	۱۴
۶۳	۳۱	۶	دماوند	۱۵
۱۰	۲۳	۶۷	ورامین	۱۶

مقایسه جداول ۴ و ۵ نشان داد که بیشترین درصد مساحت شهرستان‌های شمیرانات، فیروزکوه و دماوند با استفاده از هر دو روش در دسته خطر زیاد و بیشترین درصد مساحت شهرستان‌های شهریار، بهارستان، پاکدشت، پیشوا و ورامین با استفاده از هر دو روش در دسته کم خطر نسبی قرار گرفتند. بیشترین درصد از مساحت شهرستان شمیرانات با استفاده از روش پیشنهادی این تحقیق و هم‌چنین روش ارزیابی به ترتیب با ۶۸ و ۴۶ درصد در پهنه خطر زیاد واقع شد. بیشترین درصد از مساحت شهرستان فیروزکوه معادل با ۴۵ درصد براساس روش پیشنهادی این تحقیق و ۶۸ درصد براساس روش ارزیابی در پهنه پر خطر برآورد شد. طبق روش پیشنهادی این تحقیق حدود ۵۰ درصد از مساحت شهرستان دماوند و با روش ارزیابی، بیش از ۶۰ درصد از مساحت شهرستان دماوند در پهنه خطر بالای زلزله قرار دارد.

بیشترین درصد از مساحت شهرستان شهریار با هر دو روش ارائه شده این تحقیق و روش ارزیابی به ترتیب با ۶۴ و ۵۰ درصد در پهنه کم خطر نسبی، قرار می‌گیرند. ۱۰۰ درصد مساحت شهرستان بهارستان در هر دو روش در دسته کم خطر واقع شد. البته منظور کم خطر بودن نسبی (نسبت به سایر شهرستان‌های استان تهران است). بیش از ۵۰ درصد از مساحت شهرستان ورامین، حدود ۶۰ درصد از مساحت شهرستان پیشوا، و بیش از ۶۰ درصد از مساحت شهرستان پاکدشت با هر دو روش در پهنه خطر نسبی کم واقع شدند.

آنچه در این تحقیق بر روی آن تمرکز شده است بررسی مؤلفه خطر زلزله در استان تهران به وسیله تهیه نقشه پهنه‌بندی آن می‌باشد تا به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. لذا عوامل مرتبط با مؤلفه‌های در معرض بودن مانند میزان و تراکم جمعیت یا عوامل مرتبط با بحث آسیب‌پذیری یعنی مقاومت سازه‌ها و ساختمان‌ها، قدمت و سن بنا، نوع بافت در این تحقیق در نظر گرفته نشد و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، نقشه این دو مؤلفه نیز تهیه گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند بدین وسیله از حمایت‌های جناب آقای دکتر ازوجی رئیس محترم و جناب آقای افشین معاون محترم آمار و اطلاعات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان تهران سپاسگزاری نمایند.

منابع

Erden, T., and Karaman, H. (2012). Analysis of earthquake parameters to generate hazard maps by integrating AHP and GIS for Küçükçekmece region. *Natural Hazards and Earth*

System Sciences, 12(2), 475-483.

<https://nhess.copernicus.org/articles/12/475/2012/>

Nyimbili, P.H., Erden, T. and Karaman, H. Integration of GIS, AHP, and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Nat Hazards* 92, 1523–1546 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3262-7>.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-018-3262-7>

Al-Dogom, D., Al-Ruzouq, R., Kalantar, B., Schuckman, K., Al-Mansoori, S., Mukherjee, S., and Ueda, N. (2021). Geospatial Multicriteria Analysis for Earthquake Risk Assessment: Case Study of Fujairah City in the UAE. *Journal of Sensors*.
<https://doi.org/10.1155/2021/6638316>.

<https://www.hindawi.com/journals/js/2021/6638316/>

Raduan, R., Daud, M. E., & Kaamin, M. (2018). Applications GIS for earthquake threat mapping in Sabah. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 250, p. 07001). EDP Sciences.

https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/109/mateconf_sepka-ised2018_07001/mateconf_sepka-ised2018_07001.html

Ateş, A., & Mutlu, A. H. (2019). Earthquake Hazard Mapping and Analysis by Integrating GIS, AHP, and TOPSIS for Gölyaka Region in Duzce, Turkey.
<https://depot.ceon.pl/handle/123456789/17079>

Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M. (2020). Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 430.

<https://www.mdpi.com/2220-9964/9/7/430>

Pal, I., Nath, S. K., Shukla, K., Pal, D. K., Raj, A., Thingbaijam, K. K. S., & Bansal, B. K. (2008). Earthquake hazard zonation of Sikkim Himalaya using a GIS platform. *Natural hazards*, 45(3), 333-377.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-007-9173-7>

Li, B., Gong, A., Zeng, T., Bao, W., Xu, C., & Huang, Z. (2021). A Zoning Earthquake Casualty Prediction Model Based on Machine Learning. *Remote Sensing*, 14(1), 30.

<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/1/30>

Ganapathy, G. P. (2011). First level seismic microzonation map of Chennai city—a GIS approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2), 549-559.

<https://nhess.copernicus.org/articles/11/549/2011/>

Sekac, T., Jana, S. K., Pal, I., & Pal, D. K. (2016). GIS-based evaluation in earthquake hazard micro-zonation-a case study of Madang and Morobe Province, Papua New Guinea. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(8), 236817.

<https://ijaers.com/detail/gis-based-evaluation-in-earthquake-hazard-micro-zonation-a-case-study-of-madang-and-morobe-province-papua-new-guinea-2/>

Kargaranbafghi, F., Ravari, M. K., & Shahid, M. R. (2020). Seismic hazard analysis of Zarand city using ahp-gis. *Italian journal of engineering geology and environment*, (1), 5-16.

https://rosa.uniroma1.it/rosa02/engineering_geology_environment/article/view/1015

شهبابی، قلیزاده و نیری، (۱۳۹۰). پهنه بندی خطر زمین لرزه با روش تحلیل چند معیاره‌ی فضایی. جغرافیا و توسعه. (۲۱)،

۸۰-۶۵

- مودت، نظرپور، حیدری‌نیا، (۱۳۹۵). پهنه بندی زلزله خیزی پیش از بحران با استفاده از تکنیک FAHP مطالعه موردی استان خوزستان. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی. <https://civilica.com/doc/1309252>
- امیر احمدی و آب باریکی، (۱۳۹۳). ریزپهنه بندی خطر زلزله شهر سبزوار با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS. جغرافیا و توسعه. (۳۵)، ۱۳۳-۱۵۲.
- علیمحمدی، (۱۳۸۸). مطالعات منابع طبیعی و محیط زیست تحلیل مخاطرات (زلزله و حرکات توده‌ای). طرح تهیه و تدوین برنامه آمایش استان.
- پاشاپور و همکاران، (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: کلانشهر تبریز)، فصلنامه آمایش محیط، (۴۵) ۱۲، ۶۹-۴۹.
- بهشتی فر، سارا، مسگری، محمدسعدی، ولدان زوج، محمدجواد، و کریمی، محمد، (۱۳۸۹). استفاده از منطق فازی در محیط GIS به منظور مکان یابی نیروگاه های گازی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری (دانشکده فنی) (۴) ۴۴، ۵۸۳-۵۹۵.

Spatial Analysis of Earthquake Hazard in Tehran Province and Its Zoning by Utilizing Fuzzy and AHP Methods

Giti KhoshAmooz^{1*}, Mohammed Gheibi²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Mapping, Faculty of Technical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Head of Map and Spatial Information Department, Deputy of Statistics and Information, Management and Planning Organization of Tehran Province, Iran

Abstract

Earthquake is a natural disaster which causes many problems. One action can be taken to reduce these problems is to use spatial analysis for the purpose of zoning its hazard and based on its results, planning and decision making can be done efficiently and effectively. The importance of this issue is more in Tehran province because of containing the capital of our country and the accumulation of assets. Therefore, in this research, Tehran province was considered as the case study. In the next step, some criteria maps such as distance to fault lines, their density, the magnificence and depth of previous earthquakes, distance to them and topographic situation of our study area were produced. Then a linear fuzzy membership function was applied for each criterion. The AHP method was used to determine weight of them and finally they were overlaid with the help of the fuzzy sum method. Tehran province was classified into three classes of low, moderate and high hazard and for each county, the percentage area of each category was determined. It shows that 70 percent of Shemirant and about 50 percent of Tehran, Firozkoh and Damavand counties were located in areas with high hazard.

Keywords: Multi criteria decision making, fuzzy, AHP, Earthquake hazard zoning, Geospatial Information System.