ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زلزله در استان بوشهر

مهیار مجیدی نیک * :دانشجوی دکتری اقیانوس‌شناسی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران.
سعدی بیگلری: کارشناسی ارشد GIS، دانشکده سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران ، ایران.
تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۱/۱

چکیده

بحران‌های طبیعی همچون زلزله قادر به تحمیل خسارات جبران‌ناپذیری به انسان و محیط‌زیست هستند. زمین‌لرزه ازجمله بلایای طبیعی به شمار می‌رود که هرساله خسارت جانی و مالی بسیاری را به همراه دارد. امروزه با پیشرفت علم و فنّاوری، زمینه‌های مناسبی برای شناخت و کاهش این خطرات طبیعی فراهم شده است. ازاین‌رو ارزیابی ریسک به‌منظور مدیریت مناسب و کاهش خسارات، حیاتی است. ارزیابی ریسک با فرایند برآورد احتمال وقوع یک رویداد و اهمیت یا شدت اثرات زیان‌آور آن مشخص می‌شود. پژوهش حاضر باهدف ارزیابی آسیب‌پذیری استان بوشهر در برابر خطر زمین‌لرزه صورت پذیرفته است. در این راستا با ترکیب مدل‌های منطق فازی و سلسله مراتبی با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی میزان آسیب‌پذیری استان بوشهر در برابر خطر زمین‌لرزه، تحلیل و استخراج شده است. شاخص‌های مؤثر در آسیب‌پذیری زلزله عبارتند از: فاصله از گسل، کانون زلزله، بزرگای زلزله، عمق زلزله، شیب زمین و سنگ‌شناسی. نتایج تحقیق حاکی از آن است ۲۳ درصد گستره استان بوشهر که بیشتر در امتداد گسل‌ها قراردادند در محدوده خطر با آسیب‌پذیری خیلی زیاد مواجه هستند.
کلمات کلیدی: زلزله، ارزیابی خطر، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی، استان بوشهر

Earthquake Risk Assessment of Bushehr Province

Mahyar Majidy Nik *[1], Sadi Biglari[2]

Abstract:

Natural disasters such as earthquakes can cause irreparable damage to humans and the environment. Earthquakes are considered as natural disasters that cause many human and financial losses every year. Today, with the advancement of science and technology, suitable grounds have been provided for recognizing and reducing these natural hazards. Therefore, risk assessment is critical for proper management and reduction of losses. Risk assessment is determined by the process of estimating the probability of an event occurring, and the importance or severity of its adverse effects. The aim of this study was to assess the vulnerability of Bushehr province to earthquake risk. In this regard, by combining fuzzy and hierarchical logic models using GIS software, the vulnerability of Bushehr province to earthquake risk has been analyzed and extracted. Effective indicators in earthquake vulnerability are: distance from the fault, earthquake epicenter, earthquake magnitude, earthquake depth, land slope and lithology. The results show that 23% of Bushehr province, which is mostly located along faults, are very vulnerable in the danger zone.

Key words: Earthquake, Risk Assessment, Hierarchical Analysis, Fuzzy Logic, Bushehr Province

[1]PhD Student in Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran
[2]MSc. of Remote Sensing and Geographical Information System, Shahid Beheshti University, Iran

مقدمه

مخاطرات طبیعی توانایی آن را دارند که در نبود سیستم‌های تقلیل مخاطرات به سوانحی هولناک بدل شوند [۱۴]. از طرفی دیگر، یکی از موضوع‌هایی که بیشتر شهرهای جهان با آن دست به گریبان هستند، حوادث طبیعی بوده [۱] و برنامه‌ریزی برای مقابله و پیشگیری از این مخاطرات و آثار زیان‌بار آنها در زمره اهداف بلندمدت هر جامعه‌ای به‌حساب می‌آید [۱۳]. در دنیا و در ۲۵ سال اخیر حوادث طبیعی سه میلیون نفر تلفات داشته و در حدود ۲۳ میلیارد دلار خسارت وارد ساخته است. در این میان زمین‌لرزه و سیلاب از شایع‌ترین حوادث طبیعی در دنیا است.

خطر زلزله، به مجموعه شرایط ژئوفیزیکی طبیعی که در اثر جابه‌جایی، حرکت و لغزش زمین که صرف‌نظر از فعالیت انسان به وجود می‌آیند اشاره دارد [۷]. بر اساس گزارش سازمان ملل، در سال ۲۰۰۳ میلادی، کشور ایران در بین کشورهای جهان رتبه نخست را در تعداد زلزله‌ای با شدت بالای ۵ ریشتر و یکی از بالاترین رتبه‌ها را در زمینه آسیب‌پذیری از زلزله و تعداد افراد کشته شده در اثر این سانحه، داشته است [۲].

کشور ایران بر روی کمربند زلزله آلپاید قرار داشته، که حدوداً ۲۱ درصد از کل زلزله‌های جهان در این محدوده جغرافیایی به وقوع می‌پیوندد [۱۹]. عامل فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ایران بازشدگی دریای سرخ (۱.۵ تا ۲ سانتی‌متر در سال) و حرکت صفحه آفریقا - عربستان در راستای شمال و یا شمال شمال خاوری و همچنین حرکت صفحه هند در راستای شمال یا شمال شمال باختری است. مطالعات GPSانجام‌شده نیز نشان دهنده کوتاه شدگی فلات ایران بین دو فلات عربستان و اوراسیا (۲۰ میلی‌متر در سال) است [۶].

جهت کاهش تلفات جانی و اقتصادی و تبعات اجتماعی ضروری است که بر اساس دانش کنونی و آخرین فناوری‌های قابل اعتماد از خطر وقوع زمین‌لرزه در نقاط مختلف، شناختی دقیق به دست آورد. گام اول و مهم در تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای، راهبرد کاهش استقرار جمعیت در مناطق پرخطر است [۱۲]. نکته قابل تامل، وضعیت نگران کننده شهرها و کلان‌شهرهایی است که بر روی خطوط گسل یا در مجاورت آنها ساخته شده‌اند و در معرض خطر زمین‌لرزه قرار دارند. هرچند پیش‌بینی دقیق این مخاطره‌ی بزرگ طبیعی به‌صورت ۱۰۰ درصد ممکن نیست، ولی تعیین احتمالی مکان رخداد این پدیده امکان‌پذیر است.

یکی از عمده‌ترین فعالیت‌ها در راستای کاهش خطرات ناشی از زمین‌لرزه و افزایش ایمنی عمومی، مطالعه‌های پهنه‌بندی لرزه‌ای مناطق شهری و روستایی است که بایستی در مقیاس مناسب و مطلوب صورت پذیرد. پهنه‌بندی لرزه‌ای در تعیین کاربری شهری، خطوط انتقال نیرو، راه‌های ارتباطی حمل‌ونقل، طراحی و اجرای سازه‌ها، مدیریت بحران در حین وقوع زمین‌لرزه و نظایر آن مورداستفاده قرار می‌گیرد. در دهه‌های اخیر پژوهشگران زیادی از تلفیق مدل‌های چند معیار (MCDM)با تکنیک سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه، بهره جسته‌اند.

کریمی کردآبادی و همکاران [۱۱] در پژوهش خود با استفاده از مدل ترکیبی FUZZY- AHPو با به کارگیری نرم افزارهای Arc GISو Expert Choiceبه پهنه بندی خطر زلزله و تأثیر آن در امنیت شهری منطقه یک شهر تهران پرداخته‌اند. متغیرها و شاخص‌های به کار گرفته شده جهت ارزیابی و پهنه بندی خطر زلزله در منطقه یک کلانشهر تهران شامل: کاربری اراضی، فاصله از مراکز خدمات شهری، زمین شناسی، فاصله از گسل‌ها، فاصله از جاده، ناپایداری مصالح و فاصله از مناطق پرتراکم جمعیت است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که منطقه یک کلانشهر تهران به شدت درخطر زلزله خیزی قرار دارد و مناطق دارای خطر خیلی زیاد و زیاد در حدود ۵۰ درصد مساحت منطقه یک را دربر می‌گیرند.

جلالیان و همکاران [۱۰] با استفاده از مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی و روش تحلیل چند معیاری فضایی و با به کارگیری پنج شاخص گسل، جنس زمین، شیب، زمین لغزش و تراکم جمعیت به پهنه‌بندی آسیب پذیری زلزله در بخش چورزق شهرستان طارم اقدام نمودند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از شهرستان طارم و سکونتگاه‌های

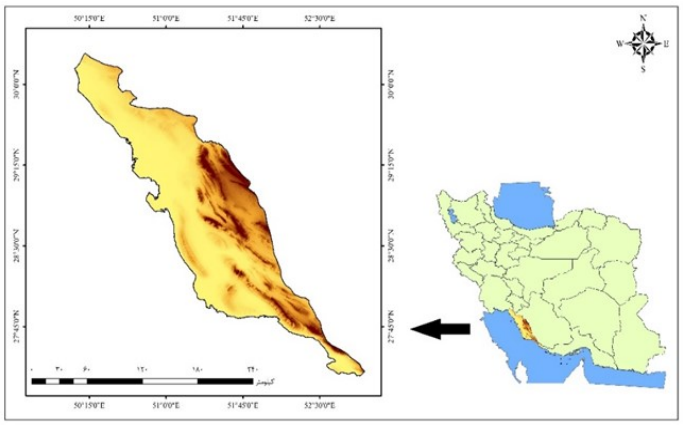
روستایی منطقه در پهنه‌های با خطر بالا (۴۵.۷۱) و خیلی بالا (۱۴.۷۱) قرار گرفته است. امینی ورکی و همکاران [۳] در پژوهشی به شناسایی دیدگاه‌های حاکم بر آسیب پذیری شهرها در برابر مخاطرات محیطی و استخراج مولفه‌های تاثیر گذار در آن با استفاده از روش کیو پرداختند و با تجمیع دیدگاه‌های مختلف، مولفه‌های تاثیرگذار در آسیب پذیری شهرها شناسایی و تعیین شد. یافته‌های پژوهش بر پایه تحلیل عاملی کیو بیانگر سه دیدگاه در زمینه آسیب پذیری شهری در ایران است.

قنبری و همکاران [۸] در مقاله خود به شناسایی و پهنه‌بندی محدوده شهر تبریز ازنظر میزان آسیبپذیری در مقابل خطر زمین لرزه پرداختند. سپس با استفاده از توابع تحلیلی نرم افزار *GIS* و مدل‌های وزن‌دهی معیار، تحلیل سلسله مراتبی و شاخص همپوشانی نقشه نهایی پهنه‌بندی آسیب پذیری شهر در مقابل زلزله تهیه گردید. شریفی کیا و همکاران در تحقیقی به تحلیل آسیب‌پذیری ناشی از مخاطرات زمینی در ناحیه پر مخاطره و پر جاذبه ولشت پرداختند. یافته تحقیق آنها موید آسیب‌پذیر بودن کلیه مساکن و جمعیت ساکن در آن با درجه آسیب پذیری متفاوت بود. ساسان پور و همکاران [۱۸] در مقاله‌ای افزایش شدت میزان و نحوه آسیب‌پذیری مناطق و واحدهای شهری از زلزله را در اثر عوامل انسان ساخت در منطقه پنج کلانشهر تهران ارزیابی نمودند.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

در طرح حاضر به بررسی و پایش مخاطرات زلزله استان بوشهر پرداخته شده است. استان بوشهر در جنوب غربی ایران با مساحتی برابر ۲۳۰۷۲.۰۴ کیلومترمربع به صورت نواری باریک بین خلیج فارس کوهپایه‌های زاگرس قرار گرفته است. گستره جغرافیایی استان بین ۲۷ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۰درجه و ۶ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی در امتداد شمال غربی- جنوب شرقی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و قرارگیری استان بوشهر

بر اساس آخرین نقشه تقسیمات کشور [۱۶] استان بوشهر از شمال به استان خوزستان و قسمتی از استان کهکیلویه و بویر احمد؛ از جنوب به خلیج فارس و قسمتی از استان هرمزگان؛ از مشرق به استان فارس و از مغرب به خلیج فارس محدود است. استان بوشهر حدود ۱.۴ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده و از نظر وسعت نوزدهمین استان کشور محسوب می شود. مطابق نتایج آخرین سرشماری در سال ۱۳۹۵ و با منفک شدن شهرستان عسلویه از شهرستان کنگان، در مجموع استان بوشهر برخوردار از ۱۰ شهرستان، ۲۵ بخش، ۴۸ دهستان است. همچنین سکونتگاه های انسانی در استان بوشهر شامل ۳۷ شهر و ۶۱۴ پارچه آبادی دارای سکنه است. جدول (۱) وسعت استان بوشهر در مقایسه با کشور و منطقه را نشان می دهد، لازم به ذکر است که منطقه ۵ آمایشی کشور متشکل از استان های بوشهر، فارس و کهکیلویه و بویر احمد است.

جدول ۱. وسعت استان بوشهر در مقایسه با کشور و منطقه (۱۶)

شرح	استان بوشهر (کیلومتر مربع)	منطقه ۵ (کیلومتر مربع)	کشور (کیلومتر مربع)
وسعت	۲۳۰۷۲	۱۶۱۱۲۵	۱۶۱۹۸۹۸
نسبت به کشور (درصد)	۱.۴۱	۹.۹۴	۱۰۰

بزرگترین شهرستان استان، دشتستان است که مساحتی برابر با ۶۳۲۷.۳۹ کیلومتر مربع را در بر گرفته و شهرستان کنگان نیز با ۴۶۴.۰۳ کیلومتر مربع به عنوان کوچکترین شهرستان محسوب می‌شود.

جدول ۲. تقسیمات استان بوشهر تا سطح دهستان درسال ۱۳۹۴ [۱۶]

شهرستان	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد بخش	تعداد شهر	تعداد دهستان
بوشهر	۱۳۱۵.۲۵	۲	۴	۲
تنگستان	۱۹۴۹.۵۲	۲	۳	۴
دشتستان	۶۳۲۷.۳۹	۶	۹	۱۲
دشتی	۵۰۲۵.۷۱	۳	۴	۷
دیر	۲۲۲۹.۵۲	۳	۵	۶
دیلم	۱۷۰۹.۷۵	۲	۲	۴
کنگان	۴۶۴.۰۳	۱	۳	۲
گناوه	۱۸۶۲.۱۳	۲	۲	۲
جم	۱۴۴۳.۷۸	۲	۳	۵
عسلویه	۷۴۴.۹۲	۲	۲	۴
کل استان	۲۳۰۷۲.۰۴	۲۵	۳۷	۴۸

تئوری و محاسبات

این پژوهش از بعد ماهیت، کاربردی و از منظر شیوه تحقیق ترکیبی از روش‌های اسنادی، توصیفی و مبتنی بر مدل‌های کمی است. در اینجا از ترکیب دو مدل ریاضی بسیار مهم و پرکاربرد یعنی منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی *(AHP)*به منظور پهنه‌بندی خطر زلزله استفاده شده است. *AHP*روشی برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم گیری و انتخاب بهترین گزینه برای زمانی است که تصمیم‌گیرنده دارای معیارهای متعدد است. این مدل یک سنتز ریاضی و شیوه‌ی جبری تصمیم‌گیری با مقیاس نسبی است. در این روش با استفاده از شبکه سیستمی، شاخص‌های مختلف و ضوابط و معیارهای چندگانه با ساختارهای چند سطحی اولویت‌دار برای رتبه‌بندی با تعیین اهمیت گزینه‌های مختلف، یک فرآیند تصمیم‌گیری پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل *AHP* ترکیب معیارهای کیفی همراه با معیارهای کمی را به‌طور همزمان امکان‌پذیر می‌سازد. این امر به تصمیم گیرنده این امکان را می‌دهد که فارغ از هرگونه نفوذ و مزاحمت خارجی تنها روی مقایسه دو معیار یا گزینه تمرکز کند. در *AHP*ترجیح بین جایگزین‌ها به وسیله ساختارهای مقایسه زوجی تعیین می‌شوند. در یک مقایسه دوجانبه، تصمیم‌گیرنده دو گزینه را با در نظر گرفتن یک معیار و یک اولویت را نشان می‌دهد [۱۵]. به‌طورکلی فرایند *AHP*دارای چهار مرحله است. این مراحل عبارتند از:

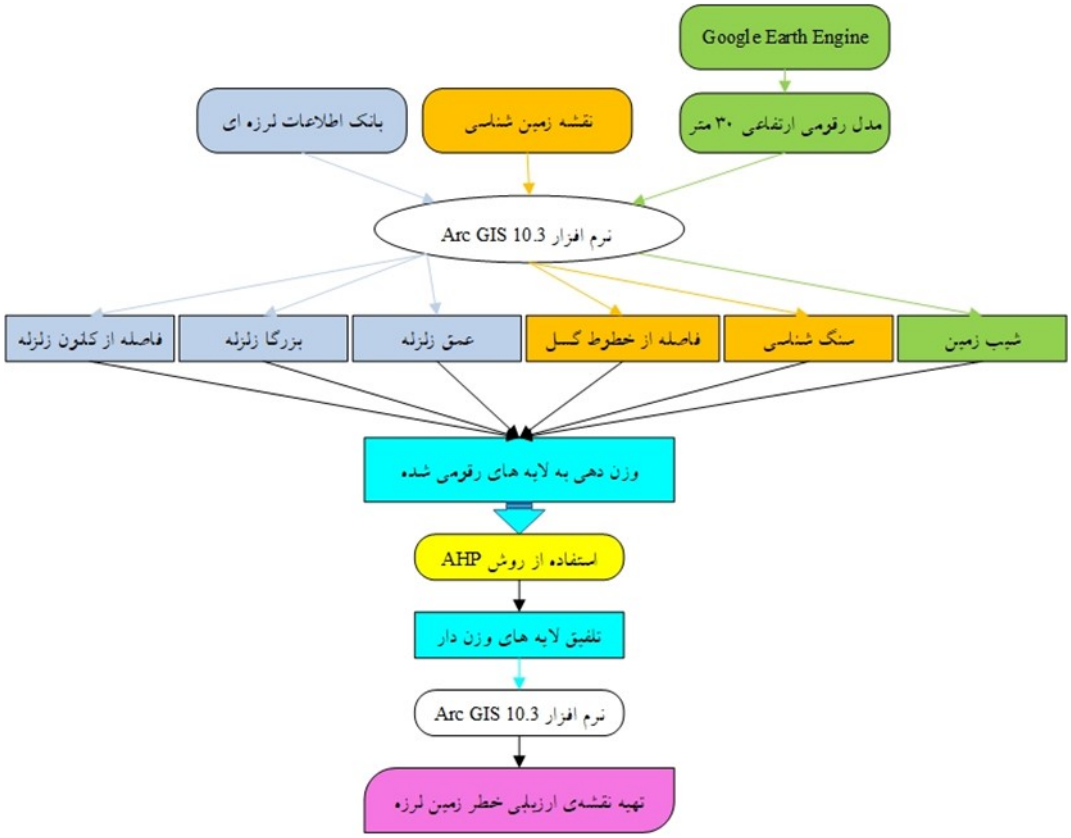
۱. وزن دادن به سنجه‌ها؛
۲. وزن دادن به جایگزین‌ها؛
۳. به دست آوردن وزن‌های مرکب؛
۴. آزمایش سازگاری.

برای ارزیابی سازگاری داوری‌های تحلیل‌گر، باید «شاخص سازگاری»محاسبه شود درصورتی‌که عدد شاخص از ۰.۱ کمتر باشد می‌توان حاصل کار را خوب و وزن‌ها را قابل اعتماد دانست [۱۵].

در پژوهش حاضر جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه استان بوشهر داده‌های مورد نیاز شامل معیارهای خطوط گسل، کانون زلزله، عمق زلزله، بزرگای زلزله، شیب زمین و سنگ‌شناسی استخراج گردیده است. در این راستا جهت تهیه نقشه خطوط گسل از نقشه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و جهت تهیه نقشه‌های کانون زلزله، عمق زلزله و بزرگای زلزله از بولتن موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده گردید. نقشه شیب زمین از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر با پوشش جهانی با استفاده از سامانه تحت وب *Google Earth Engine*به دست آمده است.

اطلاعات مذکور از زمین‌لرزه‌ها در محیط نرم‌افزار *Arc GIS 10.3*به فایل وکتوری تبدیل و سپس با استفاده از روش درون‌یابی *(IDW)*نقشه بزرگی و عمق زمین‌لرزه‌ها تهیه شد. همچنین برای تهیه نقشه‌های فاصله از کانون زلزله و فاصله از گسل، در محیط نرم‌افزار *Arc GIS 10.3*از تابع *Distance* استفاده شده است. لایه سنگ‌شناسی نیز بر اساس مقاومت در مقابل زلزله طبقه‌بندی و مورد استفاده قرار گرفته است.

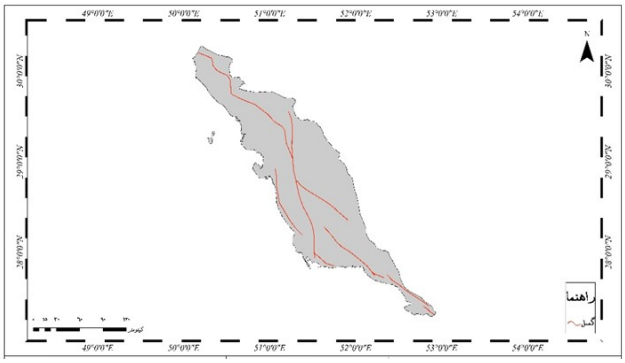
تمامی لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار *Arc GIS 10.3* رقومی شده و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، وزن هر معیار و رده‌های آن معیار تعیین گردیده است. درنهایت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دار در محیط نرم‌افزار *Arc GIS 10.3* و با استفاده از روش *Raster Calculator* صورت پذیرفت. در شکل (۲) روندنمای اجرای مراحل اجرای کار نمایش داده شده است.



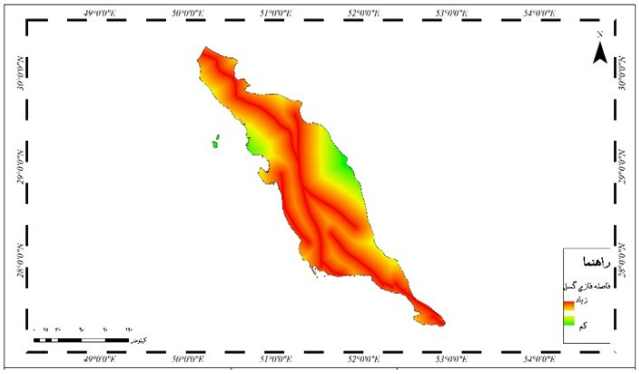
شکل ۲. نحوه بکارگیری تحلیل سلسله مراتبی

اولین گام در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه ایجاد پایگاه داده و گردآوری داده‌های مورد نیاز است. در این پژوهش ۶ عامل مؤثر درخطر زمین‌لرزه از جمله: فاصله از گسل، فاصله از کانون، بزرگی زمین‌لرزه، عمق زمین‌لرزه، شیب زمین و سنگ‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه توصیف اجمالی از نقش و تاثیر عوامل مذکور در تشدید و تضعیف زلزله اشاره شده است.

فاصله از گسل: گسل‌ها به‌عنوان چشمه‌های لرزه‌ای ازجمله اصلی‌ترین عوامل در جابه‌جایی‌های صفحه‌ای و خروج نیرو محسوب می‌شوند. بنابراین، فاصله از گسل‌ها می‌تواند به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل در زمینه‌ی زلزله باشد. در این پژوهش پس از تعیین موقعیت گسل‌ها (شکل ۳)، نقشه فازی فاصله از گسل‌ها تهیه گردیده (شکل ۴)؛ به طوری که آسیب‌پذیری با فاصله از گسل رابطه عکس داشته و هر چه فاصله از گسل بیشتر باشد میزان آسیب‌پذیری کمتر است.

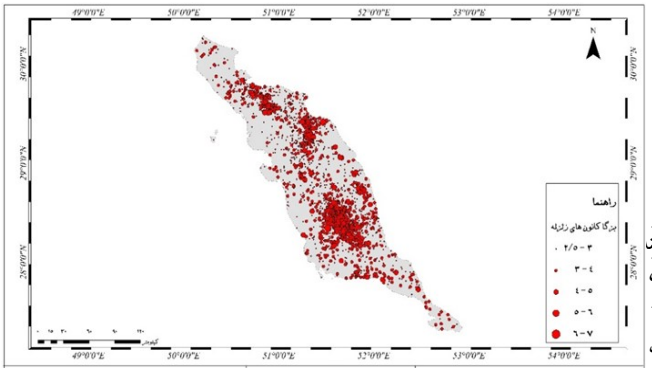


شکل ۳. موقعیت گسل‌های استان بوشهر

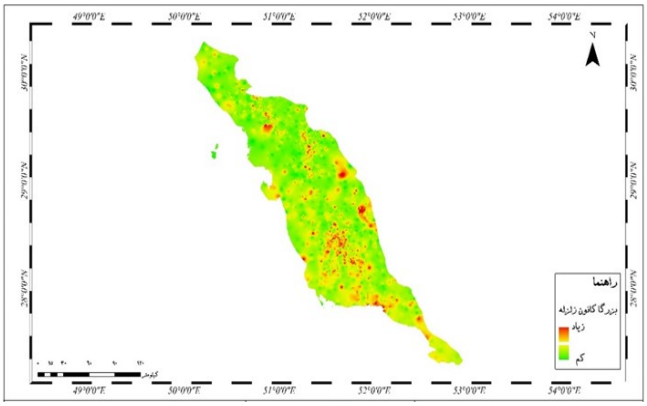


شکل ۴. فاصله فازی از گسل‌های استان بوشهر

بزرگا زمین‌لرزه: از عوامل بسیار مهم در ارزیابی خطر زمین‌لرزه، بزرگی زمین‌لرزه بوده که بر اساس دامنه‌ی امواج ثبت شده در دستگاه‌های لرزه‌نگار تعیین می‌شود. بطور کلی با افزایش بزرگی زمین‌لرزه خطر ناشی از زمین‌لرزه افزایش یافته و میزان آسیب‌پذیری بالاتر می‌رود. پس از تهیه‌ی اطلاعات لرزه‌ای منطقه موردمطالعه، با استفاده از نرم‌افزار *Arc GIS 10.3* و استفاده از روش *IDW*، نقشه فازی شده بزرگی زمین‌لرزه استان بوشهر مطابق با شکل‌های ۵ و ۶ تهیه گردیده است.

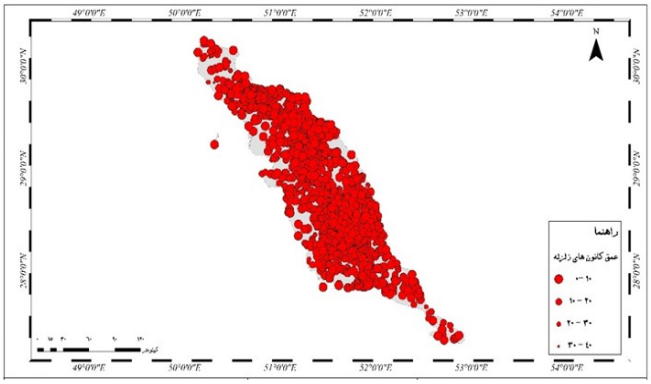


شکل ۵. بزرگا کانون‌های زلزله استان بوشهر

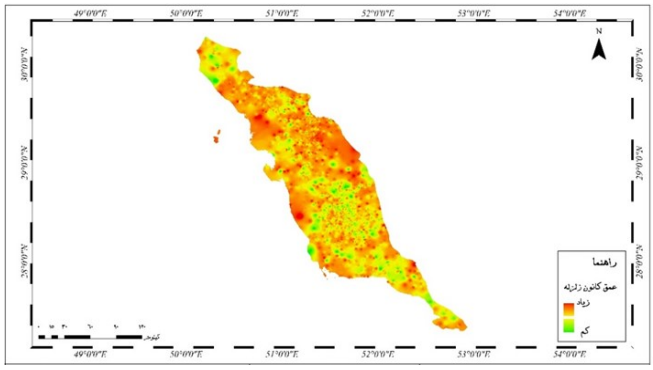


شکل ۶. فازی بزرگا کانون‌های زلزله استان بوشهر

عمق زلزله: عمق زلزله با انرژی آزاد شده ناشی از زلزله در سطح زمین رابطه عکس دارند. هرچقدر زمین‌لرزه در اعماق بیشتر رخ دهد، انرژی رسیده به سطح زمین در همان منطقه لرزه‌خیز، کمتر و درنتیجه خطر ناشی از بروز آن و خسارات ایجاد شده نیز کمتر خواهد بود. نقشه عمق زلزله به همراه نقشه فازی عمق زلزله به کمک نرم‌افزار *Arc GIS 10.3*، با روش *IDW* در استان بوشهر تهیه و مورد استفاده قرار گرفته است (اشکال ۷ و ۸).

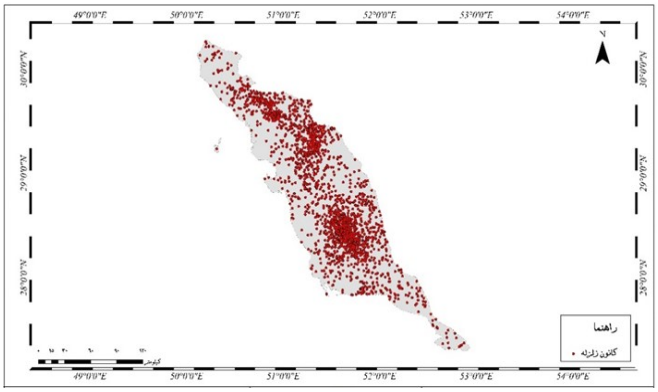


شکل ۷. عمق کانون‌های زلزله استان بوشهر

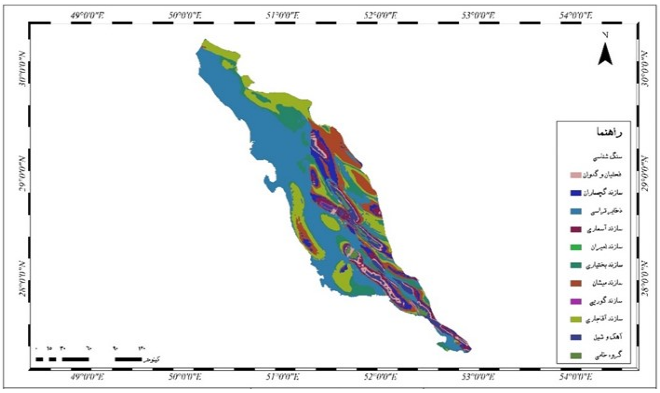


شکل ۸. فازی عمق کانون‌های زلزله استان بوشهر

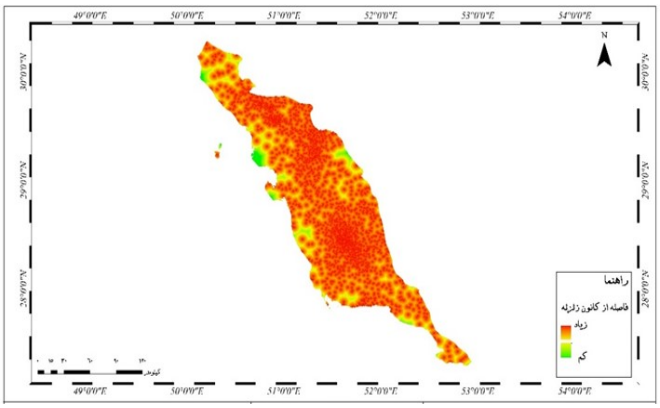
فاصله از کانون زمین‌لرزه: نقطه‌ای را که امواج از آن منتشر می‌شوند، کانون زلزله می‌گویند. شدت یک زلزله در نقاط مختلف متفاوت است و در درجه اول به مقدار انرژی آزاد شده در سنگ بستگی داشته، که در موقع شکستگی یا گسستگی ایجاد می‌شود و از طرف دیگر رابطه مستقیم با مقاومت سنگ دارد. همچنین هر چقدر از مرکز زلزله دور شویم، از شدت آن کاسته شده و میزان آسیب‌پذیری کمتر است. در اشکال ۹ و ۱۰ به ترتیب موقعیت کانون زلزله‌های ثبت شده بالای ۲.۵ ریشتر رخداده در استان بوشهر و نقشه فازی فاصله از کانون‌های زلزله این استان نشان داده شده است.



شکل ۹. کانون‌های زلزله استان بوشهر



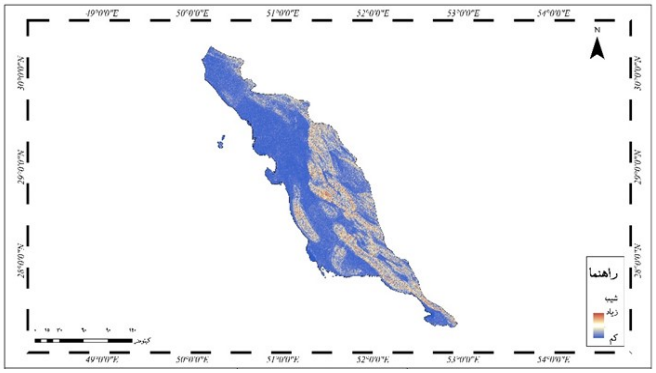
شکل ۱۱. سنگ‌شناسی استان بوشهر



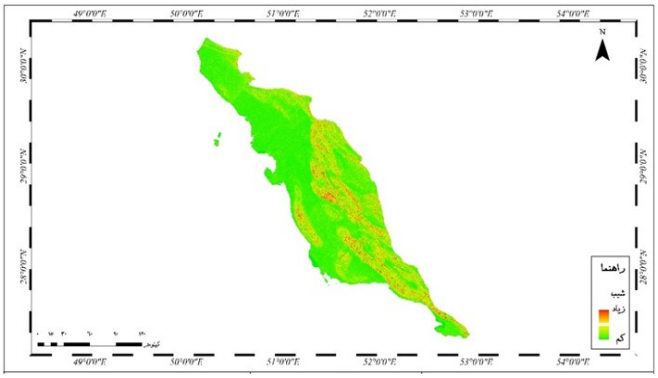
شکل ۱۰. فاصله فازی از کانون‌های زلزله استان بوشهر

سنگ‌شناسی: تنوع سنگ‌شناسی در سازندهای سنگی مناطق از دیدگاه لرزه‌خیزی بسیار حائز اهمیت است. وجود کنگلومرا و ماسه سنگ سازند بختیاری و سنگ‌های کربناته‌ی سازندهای آسماری، تاربور، فهلیان و داریان با داشتن رفتاری شکننده و گسترش سازند شیلی گورپی، رازک، پابده و غیره با دارا بودن رفتاری شکل‌پذیر به ترتیب در افزایش و کاهش اثرات تخریبی زمین‌لرزه‌ها نقش اساسی دارند. شکل‌پذیری در سازند گورپی، رازک و پابده که با استهلاک انرژی زمین‌لرزه همراه است؛ شدت خطر ناشی از وقوع احتمالی زمین‌لرزه را کاهش می‌دهد. ولی سازندهای سخت همچون بختیاری، آسماری، تاربور، فهلیان و داریان به دلیل شکنندگی خود خسارت زیادی را به بار خواهند آورد. در شکل ۱۱ نقشه‌ی سنگ‌شناسی گستره استان بوشهر نمایش داده شده است.

شیب زمین: شیب زمین نقش اساسی درحرکت قائم و افقی لایه‌های زمین پس از آزادسازی امواج حاصل از زلزله دارد. چنانچه هر چه شیب بیشتر باشد حرکت لایه‌های زمین بیشتر بوده و میزان آسیب‌پذیری بالاتر است. به طور کلی شیب با میزان آسیب‌پذیری حاصل از زلزله رابطه مستقیم دارد و از عوامل تشدید کننده شدت زلزله است. شیب زمین با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر به کمک نرم‌افزار *Arc GIS 10.3* مطابق با شکل ۱۲ محاسبه و نقشه فازی شیب (شکل۱۳) برای استان بوشهر حاصل گردیده است.



شکل ۱۲. شیب زمین استان بوشهر

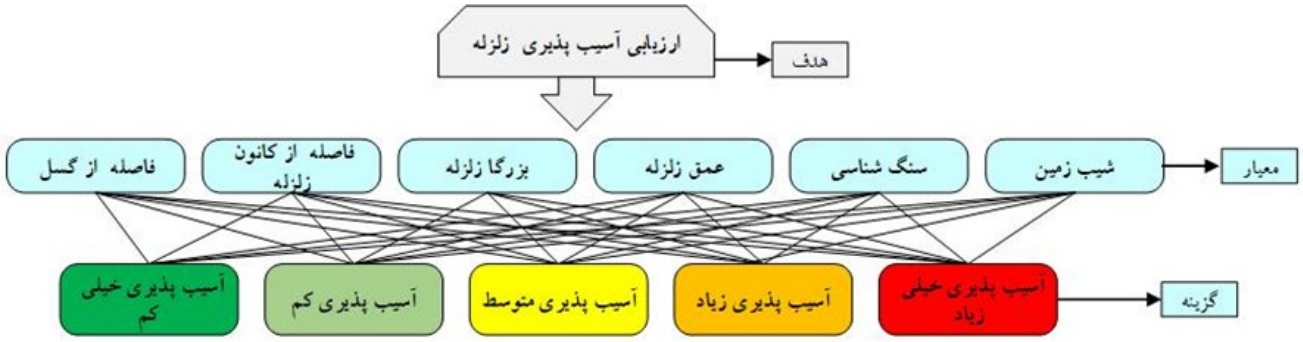


شکل ۱۳. فازی شیب زمین استان بوشهر

ارزیابی خطر زمین‌لرزه از اقدام‌های مفید جهت کاستن از شدت خسارت ناشی از زمین‌لرزه به‌حساب می‌آید، زیرا بدین‌وسیله می‌توان استفاده از مناطق پرخطر را محدود ساخت و از احداث برخی بناها، شریان‌های حیاتی، خطوط انتقال نیرو و ... در این محدوده‌ها جلوگیری به عمل آورد. مدل تحلیل سلسله مراتبی برای اولین بار به‌وسیله توماس ال ساعتی در دهه‌ی ۱۹۸۰ ابداع شد [۱۷]. اساس روش تصمیم‌گیری بر مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شده است [۹]. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شامل سه عنصر هدف، تعدادی معیار و گزینه است. برای رسیدن به هدف به تعدادی معیار مؤثر امتیاز داده می‌شود و وزن نسبی و وزن نهایی معیارها مشخص می‌گردد [۹]. مراحل اصلی تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی خطر زمین‌لرزه استان بوشهر شامل ساختن سلسله مراتب، تعیین ضریب اهمیت معیارها، تهیه‌ی ماتریس مقایسه‌ی زوجی، تعیین وزن معیارها و رده‌های معیارها و محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری می‌باشد.

ساختار سلسله مراتبی

ساختار سلسله مراتبی مربوط به موضوع حاضر در شکل زیر ارائه شده است. در این شکل سلسله مراتب ۳ سطحی شامل هدف، معیار و گزینه نمایش داده شده است. تبدیل موضوع مورد بررسی به یک ساختار سلسله مراتبی، مهم‌ترین قسمت تحلیل سلسله مراتبی محسوب می‌شود؛ زیرا در این قسمت با تجزیه مسائل مشکل و پیچیده، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مسائل پیچیده را از طریق تجزیه آن به عناصر جزئی که به‌صورت سلسله مراتب به هم مرتبط بوده و ارتباط هدف اصلی مسئله با پایین‌ترین سطح سلسله مراتبی مشخص است به شکل ساده‌تر در می‌آورد [۹].



شکل ۱۴. ساختار سلسله مراتب جهت ارزیابی خطر زمین‌لرزه در استان بوشهر

تعیین ضریب اهمیت معیارها

بعد از تجزیه مسئله به سلسله مراتب، عناصر سطوح مختلف به‌صورت دوتایی با هم مقایسه شده و سپس بر اساس میزان اهمیت، دو معیار ارزش‌گذاری گردیده است. واژه‌ی غربال کردن که به وسیله ساعتی ارائه شده و بر اساس ارزیابی میزان اهمیت دو معیار استفاده می‌شود [۱۶].

جدول ۳. مقیاس قضاوت شفاهی برای مقایسه زوجی [۱۶]

اهمیت پارامترها نسبت به یکدیگر	مقدار عددی
اهمیت مساوی	۱
اهمیت به نسبت بیشتر	۳
اهمیت بیش‌تر	۵
خیلی مهم‌تر	۷
بسیار مهم‌تر	۹
اهمیت بین فواصل	۸ ،۶ ،۴ ،۲

تهیه ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی

در این مرحله با استفاده از روش مقایسه‌ی زوجی برای انجام مقایسه، ماتریسی به ابعاد ۶×۶ ایجاد شده و معیارهای مختلف دوبه‌دو باهم مقایسه گردیده و مقادیر مربوط بر اساس غربال ساعتی اختصاص یافته است. همان‌گونه که در جدول زیر اشاره شده است؛ دو عامل فاصله از گسل و بزرگی زمین‌لرزه به ترتیب با داشتن وزن‌های ۰/۲۵ و ۰/۲۵مهم‌ترین معیارهای تأثیرگذار درخطر زمین‌لرزه در منطقه بشمار آمده است.

جدول ۴. وزن‌دهی به معیارهای موثر در خطر زمین لرزه

معیارها	فاصله از گسل	بزگا زلزله	عمق زلزله	فاصله از کانون زلزله	سنگ‌شناسی	شیب زمین	وزن
فاصله از گسل	۱	۱	۹.۳	۷.۵	۹.۳	۹	۰.۲۵
بزگا زلزله	۱	۱	۹.۳	۷.۵	۹.۳	۹	۰.۲۵
عمق زلزله	۳.۹	۳.۹	۱	۷.۳	۷.۵	۷	۰.۱۵
فاصله از کانون زلزله	۵.۷	۵.۷	۳.۷	۱	۵.۳	۵	۰.۱۵
سنگ‌شناسی	۳.۹	۳.۹	۵.۷	۳.۵	۱	۳	۰.۱۵
شیب زمین	۱.۹	۱.۹	۱.۷	۱.۵	۱.۳	۱	۰.۰۵

سازگاری قضاوت‌ها

در راستای محاسبه نرخ ناسازگاری، ابتدا باید ماتریس مقایسه زوجی (A)در بردار وزن (W)ضرب گردد تا تخمین مناسبی از λ_{max} به دست آید، به عبارتی $A*W=\lambda_{max}$ حاصل گردد. با تقسیم مقدار $W\lambda_{max}$ بر Wمربوطه مقدار λ_{max} محاسبه شده و سپس مقدار شاخص ناسازگاری نیز از طریق رابطه زیر محاسبه گردیده است [۹].

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

نرخ ناسازگاری نیز از طریق رابطه زیر قابل دسترسی است:

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

که مقدار RI نیز از جدول (۴) استخراج گردیده است.

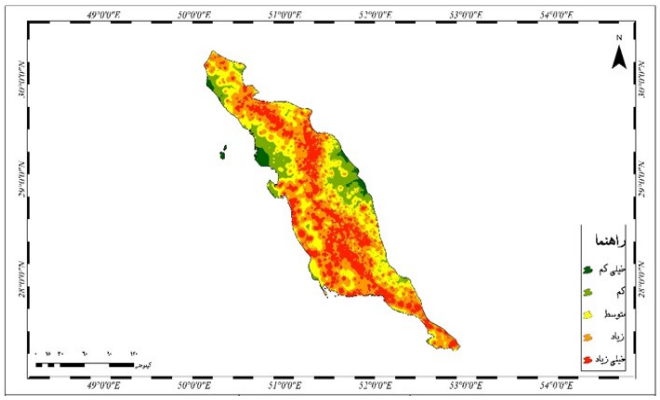
جدول ۵. مقادیر RIماتریس های تصادفی

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	...
RI	۰	۰	۰.۵۸	۰.۹	۱.۱۲	۱.۲۴	۱.۳۲	...

اگر نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰.۱ باشد، سازگاری سیستم قابل‌قبول است و اگر بیش‌تر از ۰.۱ باشد بهتر است تصمیم‌گیرنده در قضاوت‌های خود تجدیدنظر کند [۵]. به‌طورکلی نرخ ناسازگاری معیاری است جهت تشخیص معنی‌داری ماتریس‌های مقایسه زوجی که مقدار آن باید کمتر از ۰.۱باشد. نرخ ناسازگاری برای ماتریس‌های عوامل مؤثر درخطر زمین‌لرزه استان بوشهر برابر با ۰.۰۶ است.

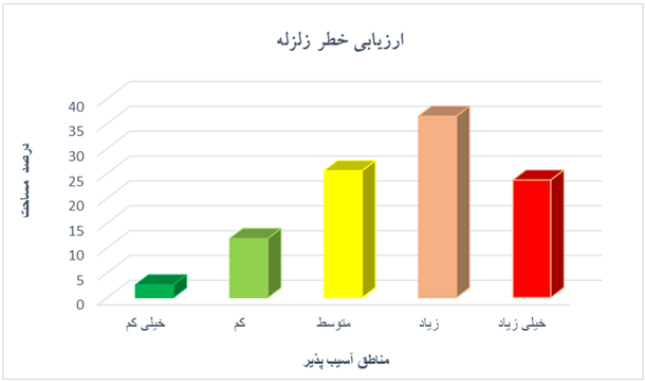
بحث و نتایج

پس از تأیید معنی‌داری ماتریس‌های عوامل مؤثر درخطر زمین‌لرزه، وزن نهایی معیارها جهت تهیه نقشه ارزیابی منطقه به لایه‌های متناظر اعمال شده است. جهت اعمال صحیح وزن‌های به‌دست‌آمده در محیط *Arc GIS 10.3* از روش *Raster Calculator* بهره گرفته شده و در نهایت نقشه ارزیابی خطر زلزله استان بوشهر تهیه گردیده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. ارزیابی خطر زمین لرزه استان بوشهر

با استفاده از روش *AHP* فازی خطر زمین‌لرزه استان بوشهر در ۵ رده خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با مساحت ۲، ۱۱، ۲۵، ۳۶ و ۲۳ درصد طبقه‌بندی شد (جدول ۶). با توجه به شکل شماره ۱۵ می‌توان مشاهده نمود که مناطق با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در امتداد خط گسل استان قرار دارند. به طور کلی شهرهای بنگ، کاکی، بردخون و وحدتیه شکل (۱۶) در منطقه با آسیب‌پذیری خیلی بالا قرار گرفته‌اند. بنابراین اقدامات پیش از وقوع زلزله و ایمنی سازی ساختمان‌ها به خصوص در مناطق روستایی این شهرها، نسبت سایر شهرهای استان می‌بایست بیشتر مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۶. ارزیابی خطر زلزله در استان بوشهر

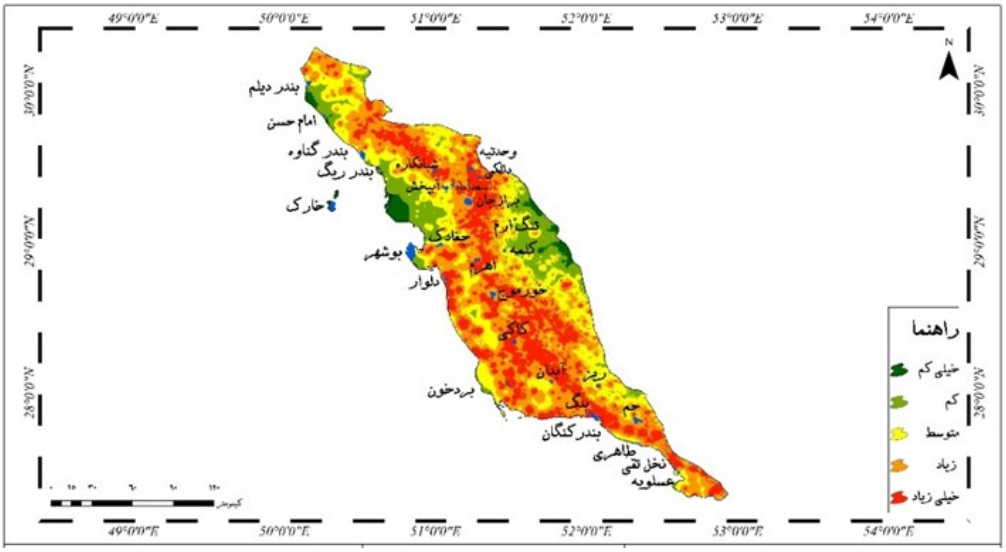
شکل ۱۵. ارزیابی خطر زمین لرزه استان بوشهر

مناطق آسیب‌پذیر	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت
خیلی کم	۵۸۲.۵۸۵۳	۲.۵۴۳۶
کم	۲۷۱۳.۴۳۸۸	۱۱.۸۴۷۱
متوسط	۵۸۴۰.۴۰۴۰	۲۵.۴۹۹۷
زیاد	۸۳۵۴.۶۷۳۹	۳۶.۴۷۷۲
خیلی زیاد	۵۴۱۲.۶۹	۲۳.۶۳۲۲

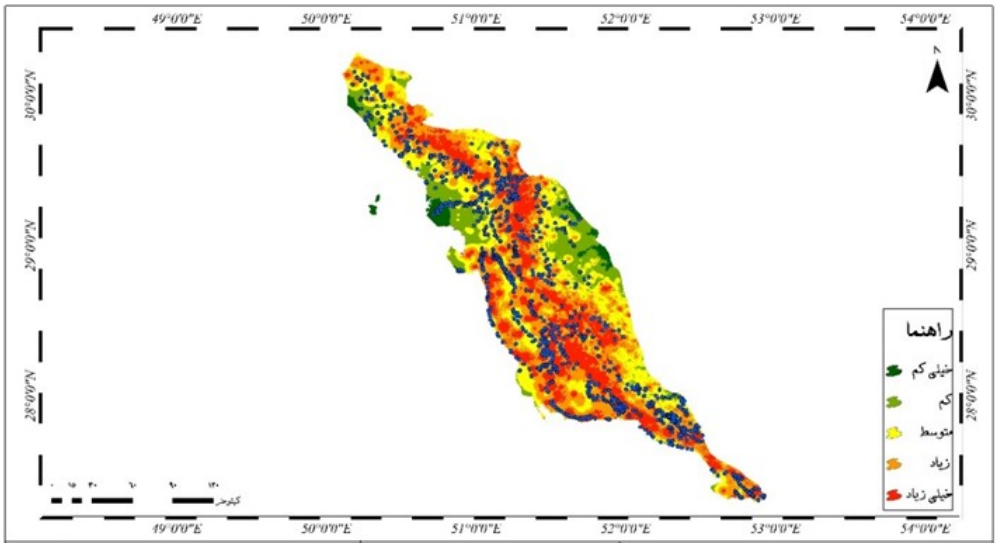
تلفیق تکنیک سنجش‌ازدور و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی *(AHP)* این امکان را فراهم ساخته تا با استفاده از توابع تجزیه و تحلیل معیارها و رتبه‌بندی تحلیل‌ها، مناسب‌ترین گزینه جهت ارزیابی خطر زمین‌لرزه انتخاب گردد. منطقه مورد بررسی بر اساس عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه در قالب لایه‌های مختلف اطلاعاتی ارزیابی گردیده و در نهایت ارزیابی خطر از خیلی کم تا خیلی زیاد مشخص شده است.

نقشه ارزیابی خطر زلزله استان بوشهر بر اساس لحاظ نمودن عواملی همچون گسل، کانون‌های زلزله، شدت و بزرگا کانون زلزله، عمق کانونی، سنگ شناسی و شیب تهیه گردیده است. با توجه به نتایج بدست آمده، ۲.۵۴ درصد در محدوده خیلی کم؛ ۱۱.۸۴ درصد در محدوده کم؛ ۲۵.۴۹ درصد در محدوده متوسط؛ ۳۶.۴۷ درصد در محدوده زیاد؛ ۲۳.۶۳درصد در محدوده خیلی زیاد خطر زلزله قرار دارند.

بر اساس نقشه ارزیابی حاصل شده و دیدگاه پهنه‌بندی خطر، می‌توان این استان را در محدوده خطر زیاد و متوسط زلزله عنوان نمود. همچنین با توجه وقایع تاریخی و زلزله‌های ثبت شده، احتمال وقوع زمین لرزه در این استان بسیار محتمل بوده؛ لذا می‌بایست اقدامات و تمهیدات لازم جهت مقاوم نمودن تاسیسات، بناها و زیرساخت‌ها پیش از وقوع زلزله صورت پذیرد.

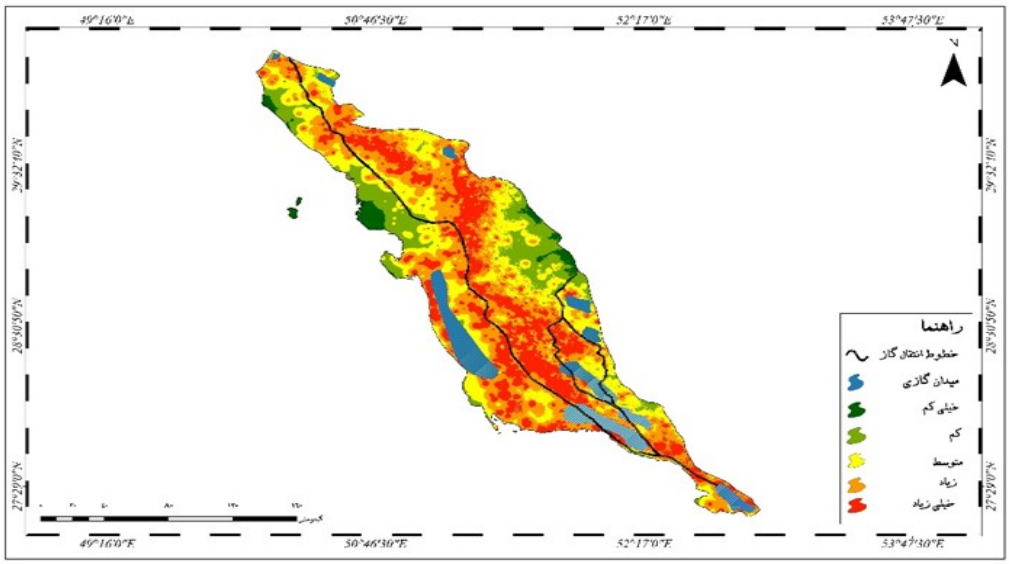


شکل ۱۷. نقشه خطر ارزیابی زلزله شهرهای استان بوشهر

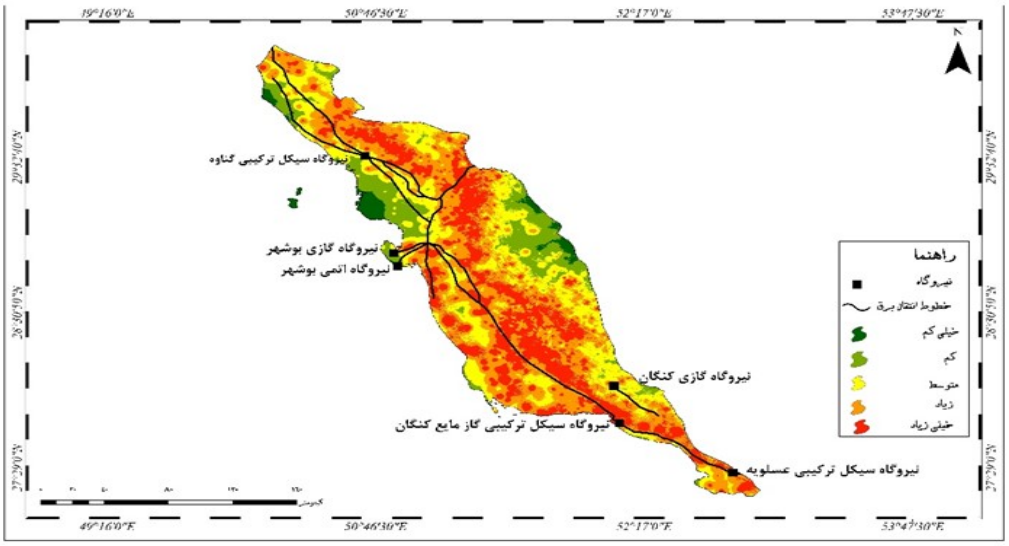


شکل ۱۸. نقشه ارزیابی خطر زلزله روستاهای استان بوشهر

با توجه به نقشه بدست آمده ارزیابی خطر زلزله استان بوشهر و موقعیت قرارگیری شهرهای این استان، می‌توان اینگونه بیان نمود که شهرهای همچون کاکی، دالکی، وحدتیه، دلوار، بنگ و شبانکاره در منطقه خطر خیلی زیاد و بر روی گسل فعال این استان قرار گرفته‌اند. از طرفی تنها بخش‌های محدودی از سطح استان (۲.۵۴درصد) دارای خطر خیلی کم در کل استان بوده و قسمت‌های شرقی خلیج بوشهر و جزیره خارک با تراکم جمعیت نسبتاً پائین در پهنه‌بندی خطر خیلی کم قرار گرفته است. همچنین روستاهای واقع در مجاورت و حوالی شهرهای فوق الذکر نیز در مناطق خطر خیلی زیاد و خطر زیاد قرار داشته و با توجه به بافت قدیمی و غیراستاندارد خانه‌های این مناطق، در صورت وقوع زلزله‌های بیش از ۴ ریشتر احتمال تخریب و آسیب به این مناطق بسیار محتمل است.



شکل ۱۹. نقشه ارزیابی خطر زلزله خطوط انتقال و میادین انرژی در استان بوشهر



شکل ۲۰. نقشه ارزیابی خطر زلزله نیروگاه‌های تولید و خطوط انتقال برق در استان بوشهر

نتیجه‌گیری

داشتن شناخت دقیق از ویژگی‌های هر حوزه‌ی مطالعاتی، تصمیم گیری و برنامه‌ریزی برای پایش مخاطرات طبیعی، استفاده از قابلیت‌های طبیعی منطقه، مکان‌یابی بهینه، ارزیابی خطر و در نهایت مدیریت و تصمیم گیری در آن حوزه را امکان‌پذیر می‌سازد. نقشه‌ی ارزیابی خطر زلزله در منطقه‌ی استان بوشهر که در محدوده‌ی خطرپذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارد، پیش زمینه‌ای در شناخت عوامل مؤثر در وقو ع زمین لرزه، رخداد آن و مدیریت خطر در زمان بحرانهای مربوط به زلزله استان است. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی خطر زلزله استان بوشهر با استفاده از مدل ترکیبی AHPفازی است. استفاده از روش AHPفازی امکان تجزیه و تحلیل چند پارامتر مکانی را بر اساس وزن آنها برای ایجاد نقشه آسیب پذیری فراهم می‌سازد.

در ایران تحقیقات اندکی در زمینه آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با تأکید بر سطح استان صورت گرفته است و بیشتر تحقیقات به صورت محلی، در سطح یک شهر یا منطقه کوچکی از یک استان بوده است. بعضاً عواقب زلزله بیشتر از یک شهر و حتی در بعضی مواقع بالاتر از سطح استان است. در این تحقیق ارزیابی خطر زلزله استان بوشهر خارج از مرزهای سیاسی استان (استان‌های همجوار) مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع خطر زلزله در استان‌های همجوار هم ارزیابی شد و با استفاده از مرز سیاسی استان لایه نهایی برش داده شد. به طور کلی در این تحقیق برای اولین بار در داخل کشور استان بوشهر به طور کامل و فراتر از یک شهر یا منطقه کوچکی از لحاظ خطر زلزله ارزیابی شده است.

خطر آسیب‌پذیری زلزله استان بوشهر را در ۵ رده خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم با استفاده از ۶ پارامتر فاصله از گسل، فاصله از کانون زلزله، بزرگی زمین‌لرزه، عمق زمین‌لرزه، شیب زمین و سنگ‌شناسی با به‌کارگیری روش *AHP* فازی به کمک تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مکانی در سامانه تحت وب *GEE* و *GIS* ارزیابی گردید. اولویت بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی *(AHP)* نشان داد که لایه ی فاصله از گسل و بزرگی زمین‌لرزه به ترتیب با داشتن وزن‌های ۰.۲۵ و ۰.۲۵ مهم‌ترین معیارهای تأثیرگذار درخطر زمین‌لرزه در منطقه بشمار آمده است بیشترین تأثیر را بر وقو ع زلزله در منطقه دارند و شیب زمین با ۰.۰۵ درصد کمترین تأثیر را داشته است؛ نتایج حاکی از آن بود که ۵۴۱۲.۶۹ کیلومتر مربع از منطقه در آسیب‌پذیری خیلی زیاد؛ ۸۳۵۴.۶۷ کیلومتر مربع در آسیب‌پذیری زیادم؛ ۵۸۴۰.۴۰ کیلومتر مربع در آسیب‌پذیری متوسط؛ ۲۷۱۳.۴۳ کیلومتر مربع در آسیب‌پذیری کم؛ ۵۸۲.۵۸ کیلومتر مربع در آسیب‌پذیری خیلی کم قرار دارد.

توانایی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و استفاده از مدل‌های پیشرفته و بعضاً پیچیده ریاضی و آماری و نیز ترکیب آنها با اطلاعات فضایی، چشم انداز روشن و نسبتاً دقیقی از شرایط مکانی حاکم را نمایش می‌دهد. در این میان مدل ترکیبی *Fuzzy – AHP* به خوبی و با دقت نسبتاً بالایی، نقشه‌ای از آسیب‌پذیری استان را ارائه می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد با توجه به توانمندی این شیوه به نظر می‌رسد بکارگیری روش‌های ترکیبی دیگر همچون فازی-تاپسیس، فازی شبکه های عصبی و ..... و مقایسه و راستی آزمایی و صحت‌سنجی هر یک از مدل‌های فوق در جهت حصول به یک مدل کاملاً موفق در کنار سایر پیشنهادها ، می‌تواند به عنوان ایدهای نسبتاً نو ارائه شود.

منابع

1. Alexander, D. E. (2002). Principles of emergency planning and management. Oxford University Press on Demand.
2. Alimohammadi Sarab, A., Karami, J., Amini, J., safarrad, T. (2012). An Evaluation of the RADIUS Model in Assessing the Damages Caused by Earthquake via GIS (case study Region1 Tehran). Journal of Urban - Regional Studies and Research, 3 (11), 23-40. (In Persian)
3. Amini Varaki, S., Modiri, M., Shamsayi Zafarghandi, F., Ghanbari nasab, A. (2015). Perspectives of the city's vulnerability to environmental hazards and its effective components by using the Q-Method. Journal of Emergency Management, 3(Special Issue of Passive Defense Week 93), 5-18. (In Persian)
4. Arman, M., Salehi Sadaghiyani, J., Mojdehi, S., Nazarli, A. (2012). Measuring pair wised comparisons matrix inconsistency ratio in fuzzy hierarchical structure. Industrial Management Studies, 10(27), 94-117. (In Persian)
5. Dey, P. K., & Ramcharan, E. K. (2008). Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados. Journal of Environmental management, 88(4), 1384-1395.
6. Fattahi, M., Rostami Mehraban, S., Talebian, M., Bahroudi, A., Hollingsworth, J., Walker, R. (2012). An investigation into the activity of the North Neyshabour fault, eastern Iran. Journal of the Earth and Space Physics, 37(4), 179-193. (In Persian)
7. Foroughi, M. (2011). Analysis of Settlements and Roads Relating with Active Faults in Chaharmahal & Bakhtiari Province (The roads and settlements seismic conditions in Chaharmahal & Bakhtiari, Journal of Rescue and Relief, 2(4), 21. (In Persian)

8. Ghanbari, A., Salaki Maleki, M., Ghasemi, M. (2013). Zoning of Cities Level of Vulnerability toEarthquake Danger (Case Study: Tabriz. Journal of Geography and Environmental Hazards, 2(1), 21-36. (In Persian(
9. Ghodsipour, H. (2019). Analytical Hierarchy Process. Tehran: Amirkabir University of Technology Press. (In Persian)
10. Jalalian, H., Dadgar, H. (2015). Rural Settlements Vulnerability Zoning for the Earthquake Risk Using AHP Model in GIS Software, a Case of Chavarzagh District in Tarom Township (Iran), Geography and Environmental Planning, 26(3), 29. (In Persian)
11. Karimi, M., & Najafi, E. (2013). Flood risk evaluation and zoning using with AHP-FUZZY combined model with emphasis on urban safety (Case Study: Region1 of Tehran metropolitan). Journal of Geography and Environmental Hazards, 9(2). (In Persian)
12. Kolat, C., Ulusay, R., Lutfi Suzen, M. (2012). Developmentof geotechnical micro zonation model forYenisehir (Bursa, Turkey) located at a seismically activeregion Original. Engineering Geology, 24: 36-53.
13. Mahdavi, D., Hezarian, E. (2018). Evaluation and analysis of physical vulnerability of rural settlements against earthquake disaster (Case Study: Rural of Yazd county). Physical Sacial Planning, 4(4), 27-45. (In Persian)
14. Maleki, S., Amanpour, S., Safaeepour, M., Pormosavi, S., Mavedat, E. (2017). Evaluation of Urban physical Resilience spectrum the against earthquake using the model planning (A Case Study of Ilam). Physical Sacial Planning, 4(1), 9-20. (In Persian)
15. Özdağoğlu,Güzin & Özdağoğlu, Aşkın (2007), Comparison of AHP And Fuzzy Ahp for The Multicriteria Decision Making Processes with Linguistic Evaluations, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Yıl: 6 Sayı:11Bahar 2007/1 s. 65-85.
16. Planning and Budget Organization, Management and Planning Organization of Bushehr Province, Land Management Studies. (In Persian)
17. Saaty, T (1980) The analytical hierarchical process: planning, priority setting resource allocation. New york, Mc Graw-Hill.
18. Sasanpour, F., Mosavand,J. (2010). Impact of human-made factors on exacerbate the consequences of natural hazards in metropolitan environments, by fuzzy logic and GIS application, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 16, 29. (In Persian)
19. Seidaiy, E., Gharah Nejad, H., Firouzi, F. (2011). An analysis of the vulnerability of rural dwellings (Case study: rural dwelling in Baft city), 20(77), 68. (In Persian)