

Original Article



Seismic Hazard Assessment Using Arithmetic-Weighted Overlay Method Based on Earthquake Potential Index (EPI), Southwest of Iran

Sasan Motaghed^{1*}, Amin Nakhlian¹, Lotfollah Emadali¹, Nasrolla Eftekhari², Heshmatalla Mahmoudian³

Affiliation

1. Dep. of Civil Engineering,
Faculty of Engineering,
Behbahan Khatam Al Anbia
University of Technology,
Behbahan, Iran

2. Faculty of Technology and
Mining, Yasouj University,
Choram, Iran

3. Center of Monitoring
Assessment and Prediction
of Natural Disasters
(MAP), Behbahan Khatam
Al Anbia University of
Technology, Behbahan,
Iran

ABSTRACT

Introduction: In the arithmetic-weighted overlay method based on the earthquake potential index (EPI) to evaluate the seismic hazard of each region, historical earthquake data, spatial distribution and magnitude of past earthquakes, active tectonics (fault type and length), Fault density per earth surface, distance to active fault, distance to earthquake epicenters, slope, and topographical changes should be considered and corresponding layers are be created using GIS. This non-ergodic method solves the problems of attenuation relations and expression of inputs and outputs of hazard. Especially the method is very useful in preparing seismic hazard maps of large geographical areas with a rich history of seismic events. In This paper, the seismic hazard analysis for the southwestern region of Iran was conducted within a 400 km square centered on Behbahan city (located at longitude 50.2417° and latitude 30. 5985 ° N) using the arithmetic-weighted overlay method based on EPI .

Methodology: The arithmetic-weight overlay method is based on the superposition of ranked spatial, geological and seismological information of the region with pre-determined weights. Earthquake potential index (EPI) is calculated using the following equation:

$$EPI_{(i,j)} = 0.1 \times DEM + 0.1 \times Slope_{(i,j)} + 0.15 \times Den_F_{(i,j)} + 0.15 \times Den_Ev_{(i,j)} + 0.2 \times ML_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_F_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_epi_ev_{(i,j)} \quad (1)$$

whrer, EPI is earthquake potential index, DEM is digital elevation model, Slope denotes the slope angle in degrees, Den_F is density of active faults, Den_Ev is density of earthquake foci, ML is earthquake magnitude, Dis_F is distance to active fault, Dis_epiv is distance to the epicenter of the earthquake, and i, j are the coordinates of the cell (longitude and latitude). Identifying areas with seismic potential and assessing seismic hazard requires considering the contribution of all parameters and their combination according to their relative importance. After preparing the necessary maps, according to the seismicity of the region (distribution of earthquake foci, seismic sources and active faults), tectonic features (layer age, tectonics), topography of the region (digital elevation model) and slope, EPI is determined. The studied area (a square measuring 400 km centered in Behbahan) ranges from a steep northeast slope with an altitude of 4418 meters to a gentle southwest slope (Persian Gulf area) with an altitude of -125 meters.

Results and Discussion: Arithmetic-weighted overlay method was performed according to the earthquake potential index (EPI) in southwest Iran and the results were presented in the form of maps and tables. According to the results, parts of the eastern and northern cities of Khuzestan province and the southwestern cities of Chahar Mahal Bakhtiari, Kohgiluyeh Boyer Ahmad and Isfahan and the northern cities of Bushehr province are located in high EPI areas. The cities of Gachsaran, Behbahan, Omidiyeh, Behmai, Ramhormoz, Bagh Malek, Haftgol, Getund, Ardal, Kohrang, Farsan and Kabar are in the high risk area. In the studied area, the EPI ranges from 1.55 to 6.75. The estimated average value of EPI is 4.415 and the standard deviation is 1.94. These values indicate relatively large changes in the average seismicity in the region. The EPI values were estimated for all the cities of Khuzestan province and the EPIs were compared with the seismicity values of standard no. 2800. The results of the comparison are the concordance of the results in most cities and the greater seismic hazard by the 2800 standard in the cases of differences, which shows the reliability of the standard no. 2800 values.

Conclusion: Arithmetic-weighted overlay method according to the earthquake potential index (EPI), is a new global method that can be used to assess non-ergodic seismic hazard. Based on the EPI results, the values of the 4th edition of the 2800 standard are sufficient for the seismic design of buildings.

Keywords: Geographic information system (GIS), Non-ergodic seismic hazard analysis, Digital elevation model (DEM).

Citation:

Motaghed, S., Nakhlian, A., Emadali, L., Eftekhari, N., Mahmoudian, H., Seismic Hazard Assessment Using Arithmetic-Weighted Overlay Method Based on Earthquake Potential Index (EPI), Southwest of Iran, Iran J Remote Sens GIS. 17(1):23-40.

* Corresponding Author: motaghed@bkatu.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/GISJ.2023.229646.1133>

Received: 2022.11.27
Accepted: 2023.11.27





ارزیابی خطر زلزله به روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی بر حسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI)، جنوب غرب ایران

ساسان معتقد^{۱*}، امین نخلیان^۱، لطف‌الله عمادعلی^۱، نصراله افتخاری^۲، حشمت‌الله محمودیان^۳

سمت

۱. گروه عمران، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
۲. دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران
۳. مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

چکیده

مقدمه: در روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI) برای ارزیابی خطر لرزه‌ای هر منطقه، داده‌های تاریخی زلزله، توزیع زمین مکانی و بزرگای زمین‌لرزه‌های گذشته، زمین‌ساخت فعال (نوع و طول گسل)، تراکم گسل در واحد سطح، فاصله مکان تا گسل فعال، فاصله تا کانون زلزله، شیب و تغییرات توپوگرافی باید در نظر گرفته شود و لایه‌های مربوط با استفاده از GIS ایجاد شوند. این روش غیرارگودیک مشکلات روابط کاهندگی و بیان ورودی‌ها و خروجی‌های تحلیل خطر را حل می‌کند و در تهیه نقشه خطر زلزله مناطق وسیع جغرافیایی با پیشینه لرزه‌خیزی غنی، دقت بسیار مناسبی دارد. در این مطالعه، خطر زلزله در منطقه جنوب غرب ایران، در مربعی به ضلع ۴۰۰ کیلومتر و با مرکزیت شهر بهبهان (طول عرض ۵۰/۲۴۱۷°E و عرض ۳۰/۵۹۸۵°N) به روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی، برحسب شاخص پتانسیل زلزله ارزیابی شده است.

روش‌شناسی: روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی بر مبنای برهم‌نهی اطلاعات رتبه‌بندی‌شده مکانی، زمین‌شناسی و لرزه‌شناسی منطقه با وزن‌های از قبل تعیین‌شده قرار دارد. شاخص پتانسیل زلزله با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EPI_{(i,j)} = 0.1 \times DEM + 0.1 \times Slope_{(i,j)} + 0.15 \times Den_F_{(i,j)} + 0.15 \times Den_Ev_{(i,j)} + 0.2 \times ML_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_F_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_epi_ev_{(i,j)} \quad (1)$$

در این معادله، EPI شاخص پتانسیل زلزله، DEM مدل رقومی ارتفاعی، Slope زاویه شیب برحسب درجه، Den_F چگالی گسل‌های فعال، Den_Ev تراکم کانون‌های زلزله، ML بزرگی زلزله، Dis_F فاصله تا گسل فعال، Dis_epi_ev فاصله تا کانون زلزله و i و j مختصات سلول (طول و عرض جغرافیایی) هستند. شناسایی مناطق دارای پتانسیل لرزه‌خیزی و ارزیابی خطرهای لرزه‌ای نیازمند در نظر گرفتن سهم تمامی پارامترها و ترکیب آنها، مطابق با اهمیت نسبی آنهاست. پس از تهیه نقشه‌های لازم، با توجه به لرزه‌خیزی منطقه (توزیع کانون‌های زلزله، منابع لرزه‌زا و گسل‌های فعال)، ویژگی‌های زمین‌ساختی (سن لایه، زمین‌ساخت)، توپوگرافی منطقه (مدل رقومی ارتفاعی) و شیب، EPI تعیین می‌شود. منطقه مورد مطالعه (مربعی به ابعاد ۴۰۰ کیلومتر و با مرکزیت بهبهان) از شیب تند شمال شرق با ارتفاع ۴۴۱۸، به شیب ملایم جنوب غرب (محدوده خلیج فارس) به ارتفاع ۱۲۵- می‌رسد.

نتایج و بحث: روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI) در جنوب غرب ایران انجام و نتایج به صورت نقشه و جدول ارائه شد. براساس نتایج، بخش‌هایی از شهرهای شرقی و شمالی استان خوزستان و شهرهای جنوب غرب استان چهارمحال بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و اصفهان و شهرهای شمالی استان بوشهر در مناطق EPI بالا و شهرهای گجساران، بهبهان، امیدیه، بهمئی، رامهرمز، باغ ملک، هفت گل، گتوند، اردل، کوهرنگ، فارس و کبار در منطقه خطر بالا قرار می‌گیرند. در منطقه مورد مطالعه، شاخص پتانسیل زلزله در محدوده ۱/۵۵ تا ۶/۷۵ متغیر است. میانگین برآورد شده مقدار EPI برابر با ۴/۴۱۵ و انحراف معیار برابر با ۱/۹۴ است. این مقادیر نشان‌دهنده تغییرات نسبتاً زیاد لرزه‌خیزی متوسط در منطقه است. همچنین جدول مقادیر EPI درمورد تمامی شهرهای استان خوزستان تخمین زده شد و شاخص پتانسیل زلزله هر شهرستان، براساس EPI، با شاخص لرزه‌خیزی استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه شد. نتایج مقایسه در اغلب شهرها هم‌خوانی دارد و بیشتر بودن خطر بیان شده از طریق استاندارد ۲۸۰۰ در موارد اختلافی بیان می‌کند که مقادیر استاندارد در جهت اطمینان قرار دارد.

نتیجه‌گیری: روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی، برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI)، روش جهانی جدیدی است که می‌توان آن را در ارزیابی خطر زلزله به روش غیرارگودیک به کار برد. براساس نتایج این روش، مقادیر ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ کفایت لازم برای طرح لرزه‌ای ساختمان‌ها را دارد.

واژه‌های کلیدی: سامانه اطلاعات مکانی (GIS)، تحلیل خطر غیرارگودیک زلزله، مدل رقومی ارتفاعی (DEM).

استناد: معتقد، س.، نخلیان، ا.،

عمادعلی، ل.، افتخاری، ن.، محمودیان، ح.، ارزیابی خطر زلزله به روش هم‌پوشانی حسابی-وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI)، جنوب غرب ایران، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴: ۲۳-۴۰.



۱- مقدمه

نقشه خطر زلزله، با ارائه معیاری برای شدت زمین (مثلاً بیشینه شتاب زمین) در هر مکان، این امکان را فراهم می‌سازد که در طراحی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های بزرگ، نیروهای زلزله به‌درستی مدل‌سازی شود. امروز شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تعیین معیار شدت زلزله روش‌های تحلیل تعیینی خطر زلزله^۱ و تحلیل خطر احتمالی زلزله^۲ است (Motaghd et al., 2023a). نتایج این روش‌ها معمولاً به روابط انتخاب‌شده برای پیش‌بینی حرکت زمین (روابط کاهندگی) وابسته است (Motaghd et al., 2018; Motaghd et al., 2023b). در ارزیابی خطر زلزله با استفاده از تکنیک‌های مرسوم، اشکالاتی وجود دارد. نخست اینکه اغلب مدل‌های کاهندگی مورد استفاده تغییراتی متقارن برای معیار شدت زلزله، در هر دو طرف منبع لرزه‌ای، متناسب با معکوس فاصله تا ساختمانی مشخص، ارائه می‌دهند. این در حالی است که داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از زمین‌لرزه‌ها از قاعده تغییرات خطی- متقارن پیروی نمی‌کنند. دوم، با اینکه محتوای فرکانسی و تأثیرات زمین‌شناسی در مدل‌های کاهندگی مدرن گنجانده شده، این مدل‌ها همچنان در توضیح تفاوت‌های بین مقادیر شتاب مورد انتظار و ثبت‌شده موفق نیستند (Matkan et al., 2016; Moradi Tayebi et al., 2020). این مسئله تا حد زیادی از ارگودیک بودن این روابط ناشی می‌شود. سوم، تعریف نشدن همه منابع لرزه‌ای (مثلاً گسل‌های پنهان) قطعاً در برآورد خطر لرزه‌ای تأثیر منفی خواهد گذاشت. چهارم اینکه رفتار دینامیکی خاک، در هر دو رویکرد احتمالی و قطعی در ارزیابی خطر لرزه‌ای، به‌خوبی توصیف نشده است و درنهایت، این روش‌ها برای ارائه نقشه خطر به نرم‌افزارهای اضافه نیاز دارند.

از سوی دیگر تحلیل خطر زلزله را می‌توان برای ساختمانی مشخص، یا در مقیاس بزرگ‌تر برای منطقه، کشور و حتی در مقیاس جهانی انجام داد. برای نمونه، برجسته^۳ (۲۰۲۱) خطر زلزله ساختمانی را در مورد چند

سد ساخته‌شده در ایذه تحلیل کرد. همچنین از مطالعات منطقه‌ای و کشوری، می‌توان مطالعات موسوی^۴ و همکاران (۲۰۲۰)، جعفری^۵ و همکاران (۲۰۲۱)، خداوردیان^۶ و همکاران (۲۰۱۶) و طالبی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) را نام برد که به ترتیب، خطر لرزه‌ای شهرستان ایذه، استان خوزستان، شمال غرب ایران و کل پهنه ایران، و گیاردینی^۸ و همکاران (۲۰۱۸) نیز خطر خاورمیانه را تحلیل کرده‌اند. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که با بزرگ‌تر شدن منطقه، لزوم استفاده از ابزار جغرافیایی (مانند GIS)، برای بیان ورودی‌ها و ارائه خروجی‌ها، افزایش می‌یابد (Ahmad et al., 2017).

بر این اساس، روش‌هایی برای محاسبه نقشه‌های خطر مبتنی بر GIS^۹ مطرح شده است (Amini et al., 2012; Jena et al., 2020; Karimzadeh et al., 2014). سبر^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۱) سیستم جامع اطلاعات زمین (SEIS)^{۱۱} را توسعه دادند و آن را، در منطقه خاورمیانه، با موفقیت به کار بردند. این مدل بر مطالعه رخدادهای مرزی صفحات مبتنی بر مدل رقومی ارتفاعی (قدرت تفکیک^{۱۲} ۱۰۰۰ متر) و ایجاد نقشه‌های زمین‌شناختی و زمین‌ساختی، با استفاده از GIS متمرکز است. در این مدل، برای ارزیابی خطرهای لرزه‌ای و پایش فعالیت‌های نئوتکتونیک، به اطلاعات مکانی و زمانی درباره خطوط زمین‌ساختی نیاز است. شیب توپوگرافی را می‌توان به‌منزله پروکسی مورد اعتماد، برای تخمین شرایط ویژه ساختمانی V_{S30}، استفاده کرد (متوسط زمانی سرعت موج برشی تا عمق سی متر است) (Ehsani and Arian, 2015).

1. Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)
2. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)
3. Barjasteh
4. Mousavi
5. Jafari
6. Khodaverdian
7. Talebi
8. Giardini
9. Geo-Spatial Information System
10. Seber
11. Solid Earth Information System
12. Resolution

بهبهان (طول $50^{\circ}24'17''$ E و عرض $30^{\circ}59'85''$ N)، به روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله ارزیابی شده است. به این منظور، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۳، بهبود اندکی در روش ایجاد شده و ضریب هم‌پوشانی پارامترهای دخیل بیان شده است. همچنین نقشه‌های مورد نیاز روش، شامل مدل رقومی ارتفاعی منطقه، شیب زمین، بزرگای زلزله‌های به‌وقوع‌پیوسته، تراکم گسل، تراکم کانون زلزله‌های گذشته، فاصله از گسل و فاصله از کانون زلزله‌های گذشته، و در نهایت، نقشه شاخص پتانسیل زلزله برای منطقه تولید و ارائه شده است.

۲- روش شناسی

روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی بر مبنای برهم‌نهی اطلاعات رتبه‌بندی‌شده مکانی، زمین‌شناختی و لرزه‌شناختی منطقه با وزن‌های از قبل تعیین‌شده قرار دارد. شاخص پتانسیل زلزله با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ahmad et al., 2017):

$$EPI_{(i,j)} = 0.1 \times DEM + 0.1 \times Slope_{(i,j)} + 0.15 \times Den_F_{(i,j)} + 0.15 \times Den_Ev_{(i,j)} + 0.2 \times ML_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_F_{(i,j)} + 0.15 \times Dis_epi_ev_{(i,j)} \quad (1)$$

در این رابطه، EPI شاخص پتانسیل زلزله، DEM مدل رقومی ارتفاعی، Slope زاویه شیب برحسب درجه، Den_F چگالی گسل‌های فعال، Den_Ev تراکم کانون‌های زلزله، ML بزرگی زلزله، Dis_F فاصله تا گسل فعال، Dis_epi_ev فاصله تا کانون زلزله، و i و j مختصات سلول (طول و عرض جغرافیایی) هستند و ضرایب هر یک از این پارامترها وزن آن پارامتر در محاسبه شاخص EPI را نشان می‌دهد. وزن پارامترها براساس مطالعات احمد و همکاران (۲۰۱۷) انتخاب شده است. این محققان، برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر در ارزیابی خطر لرزه‌ای، از رتبه‌بندی عددی مبتنی بر AHP بهره برده‌اند.

در منطقه زاگرس، شیب‌های توپوگرافی تند و دامنه ارتفاعات مطابقت خوبی با لرزه‌خیزی نشان می‌دهند (Farzipour-Saein et al., 2013). احمد^۱ و همکاران (۲۰۱۷) استفاده از GIS در مدل‌سازی فرایندهای زمین‌ساختی و زمین‌شناسی را مورد بحث قرار دادند و روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI)^۲ را مطرح کردند. این روش در تحلیل خطر زلزله کشور سوریه استفاده شده است.

در روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله، برای ارزیابی خطر لرزه‌ای هر منطقه داده‌های تاریخی زلزله، توزیع زمین مکانی و بزرگای زمین‌لرزه‌های گذشته، زمین‌ساخت فعال (نوع و طول گسل)، تراکم گسل در واحد سطح، فاصله مکان تا گسل فعال، فاصله تا کانون زلزله، شیب، و تغییرات توپوگرافی باید در نظر گرفته و لایه‌های مورد نظر با استفاده از GIS ایجاد شوند. این روش غیرارگودیک مشکلات روابط کاهندگی و بیان ورودی‌ها و خروجی‌های تحلیل خطر را حل می‌کند و در تهیه نقشه خطر زلزله در مناطق وسیع جغرافیایی، با پیشینه لرزه‌خیزی غنی، دقت بسیار مناسبی دارد. در مقایسه با روش‌های دیگر تحلیل خطر زلزله، در مدل EPI، پارامترهای مدل بازگشت گوتنبرگ- ریشتر، احتمال رخداد و حداکثر بزرگای زلزله با نقشه‌های تراکم کانون‌های زلزله و بزرگای زلزله توصیف می‌شوند. فاصله‌های تا گسل‌های فعال و کانون‌های اصلی جایگزین خروجی مدل‌های کاهندگی می‌گردند؛ با این مزیت که رخدادهای واقعی منطقه را نمایندگی می‌کنند. از معایب این مدل می‌توان به این اشاره کرد که به دلیل استفاده نکردن از فرض ارگودیک، ممکن است کم بودن داده‌ها به اریبی نتایج منجر شود. نقشه رقومی ارتفاعی بستر اجرای سایر نقشه‌هاست و در کنار نقشه شیب زمین، برای بیان تأثیرات ساختگاه نیز استفاده می‌شود. مناطق دارای لرزه‌خیزی بالا معمولاً با تراکم بالای گسل‌ها توصیف می‌شوند.

در این مطالعه، خطر زلزله در منطقه جنوب غرب ایران، در مربعی به ضلع ۴۰۰ کیلومتر و به مرکزیت شهر

1. Ahmad
2. Earthquake Potential Index
3. Analytical Hierarchy Process

برشی کم مشخص می‌شوند. وجود گسل فعال در منطقه‌ای می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل بالای وقوع زلزله باشد. با افزایش فاصله از گسل فعال و کانون زلزله، شتابی که وارد می‌شود کمتر خواهد بود؛ بنابراین اثر زلزله نیز کمتر خواهد شد. فاصله تا کانون زلزله و کلاس‌های گسل فعال به ترتیب نزولی وزن‌دهی می‌شوند. در سطح دوم، عناصر هر پارامتر از ۱ تا ۱۰ به روش AHP اختصاص یافته است (شکل ۱).

۳- مدل‌سازی و تحلیل

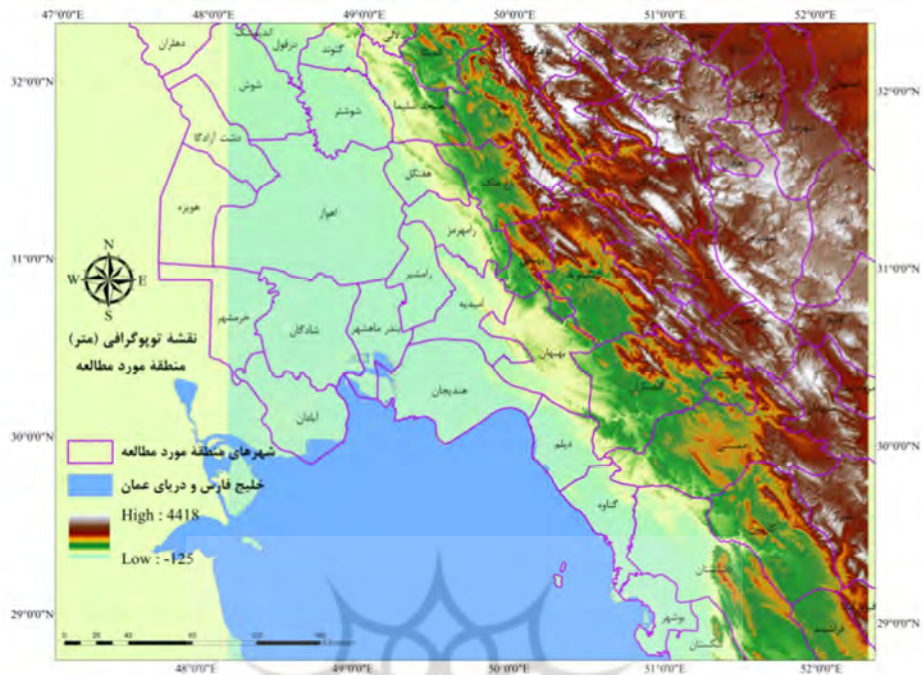
به منظور ایجاد مدل توضیح‌داده‌شده، باید مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌های شیب زمین، بزرگا، تراکم توزیع گسل‌ها در واحد سطح، تراکم توزیع کانون‌های زلزله در واحد سطح، فاصله از گسل‌های فعال و فاصله از کانون‌های زلزله تهیه شود. برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی ایران با قدرت تفکیک سی متر، از شیت‌های DEM ماهواره‌ای SRTM30m مربوط به منطقه مورد مطالعه استفاده شده است (<https://dwtkns.com/srtm30m/>). شیت‌های DEM پوشش‌دهنده منطقه، در نرم‌افزار ArcGIS، با یکدیگر یکپارچه شده و به اندازه منطقه مورد مطالعه برش داده شده است. با در نظر گرفتن قدرت تفکیک سی متری DEM مورد استفاده، نقشه‌های توپوگرافی و شیب زمین، به ترتیب، در شکل‌های ۲ و ۳ تولید شده است.

در روش EPI، تحلیل مبتنی بر فرایند سلسله‌مراتبی در دو سطح انجام می‌شود (Ghahremani et al., 2012; Sadin et al., 2017). در سطح نخست، با توجه به میزان اهمیت هر پارامتر، به آن وزنی در بازه [۰-۱] اختصاص می‌یابد؛ وزن بیشتر نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر است (Ahmad et al., 2017). این مقادیر وزنی همان مقادیر استفاده‌شده به منزله ضرایب در رابطه (۱) است. برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل لرزه‌خیزی و ارزیابی خطرهای لرزه‌ای، باید سهم تمامی پارامترها و ترکیب آنها را مطابق با اهمیت نسبی شان در نظر گرفت. طرح رتبه‌بندی با استفاده از همه عوامل برای تعیین مقدار عددی توسعه یافته است. در این طرح، مقدار وزن براساس اهمیت عوامل تعیین شده است. بیشترین وزن به توزیع بزرگای زلزله اختصاص یافت. عوامل مهم بعدی عبارت‌اند از تراکم گسل فعال، تراکم کانون زلزله، فاصله تا گسل فعال و فاصله تا کانون زلزله. شیب‌های تند، به احتمال بسیار، از نظر لرزه‌خیزی فعال‌ترند و در نتیجه، بیشتر مستعد زلزله و رانش زمین‌اند. با کمک نقشه رقومی ارتفاعی منطقه، می‌توان به اطلاعاتی درباره زمین‌شناسی سطحی و تغییرات سنگ‌شناختی دست یافت. مناطق مرتفع معمولاً از سنگ تشکیل شده؛ در حالی که مناطق کم‌ارتفاع، حوضه رسوبی و رسوبات دارای مواد نرم‌اند که با سرعت موج

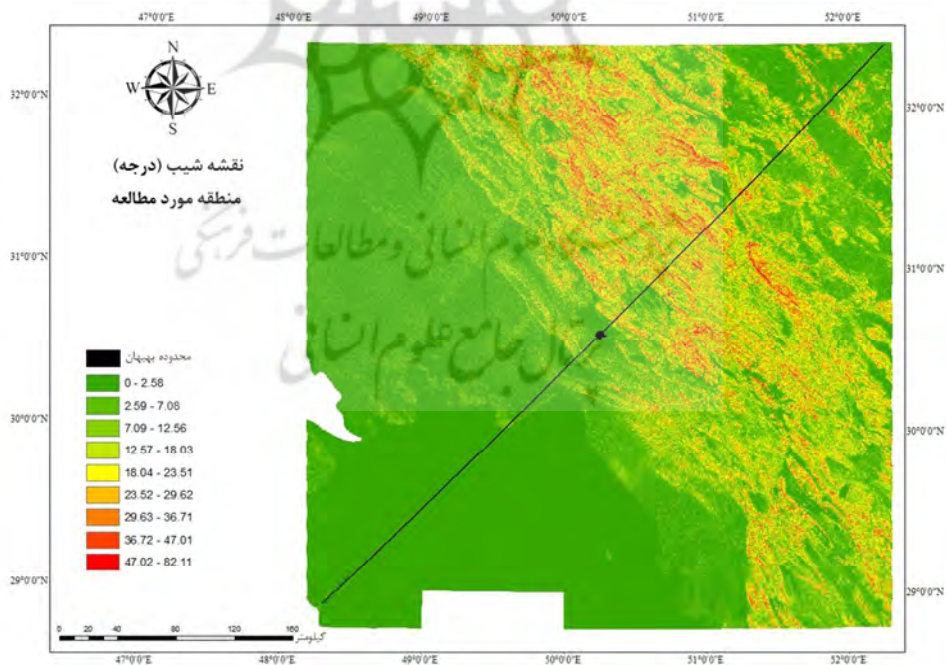
ریز پهنه بندی

سطح اول	DEM (0.1)	شیب زمین (0.1)	بزرگا Mw (0.2)	تراکم گسل در واحد سطح (0.15)	تراکم کانون لرزه در واحد سطح (0.15)	فاصله از گسل‌های فعال (0.15)	فاصله از کانون‌های زلزله (0.15)	
	[-125 , 0]	[0 , 1.7]	[2.9, 3.064]	[0,0.00484]	[0,0.001875]	[20 , 22]	[22 , 23.8]	(1)
	[0 , 125]	[1.7 , 4.64]	[3.064,3.264]	[.00484,.01448]	[.001875,.005]	[18 , 20]	[21.2 , 22]	(2)
	[125 , 305]	[4.64 , 8.38]	[3.264,3.464]	[.01448,.02339]	[.005,.00875]	[16 , 18]	[20.4 , 21.2]	(3)
	[305 , 434]	[8.38 , 12.75]	[3.464,3.682]	[.02339,.03109]	[.00875,.0125]	[14 , 16]	19.6 , 21.4)	(4)
سطح دوم	[434 , 585]	[12.75,17.42]	[3.682,3.919]	[.03109,.03685]	[.0125,.0175]	[12 , 14]	18.8 , 19.6)	(5)
	[585 , 757]	[17.42,22.47]	[3.919,4.192]	[.03685,.04347]	[.0175,.02375]	[10 , 12]	[18 , 18.8]	(6)
	[757 , 970]	[22.47,28.13]	[4.192,4.519]	[.04347,.04714]	[0.02375,0.03]	[8 , 10]	[17.2 , 18]	(7)
	[970 , 1770]	[28.13,35.10]	[4.519,4.938]	[.04714,.06119]	[0.03,0.03875]	[6 , 8]	[16.5 , 17.2]	(8)
	[1770 , 3048]	[35.10,45.37]	[4.938,5.538]	[.06119,0.0776]	[.03875,.0525]	[4 , 6]	[16 , 16.5]	(9)
	[3048 , 4418]	[45.37,82.11]	[5.538,6.502]	[0.0776 , 1.1116]	[.0525,0.06812]	[2 , 4]	[15.75 , 16]	(10)

شکل ۱. مدل پیشنهادی مبتنی بر AHP برای ریزپهنه‌بندی زلزله (اصلاح‌شده از EPI)



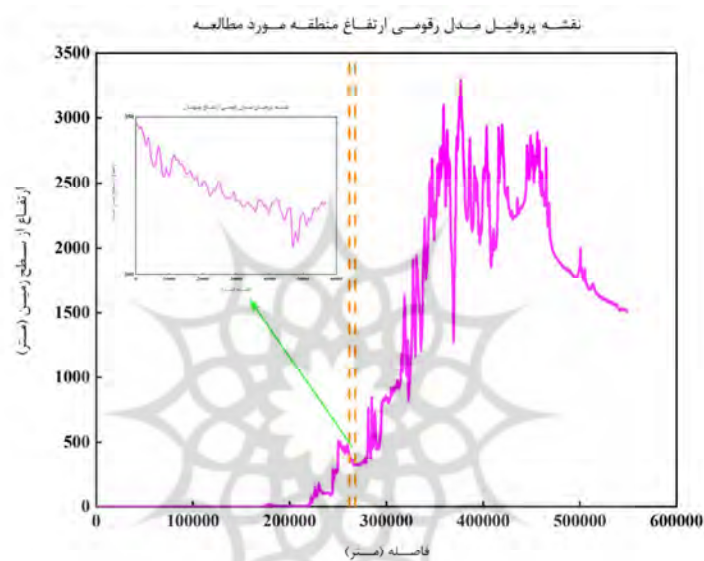
شکل ۲. نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه؛ مرزهای مشخص شده نشان‌دهنده مرز شهرستان‌های واقع در محدوده چهارصد کیلومتری براساس نقشه تقسیمات کشوری است



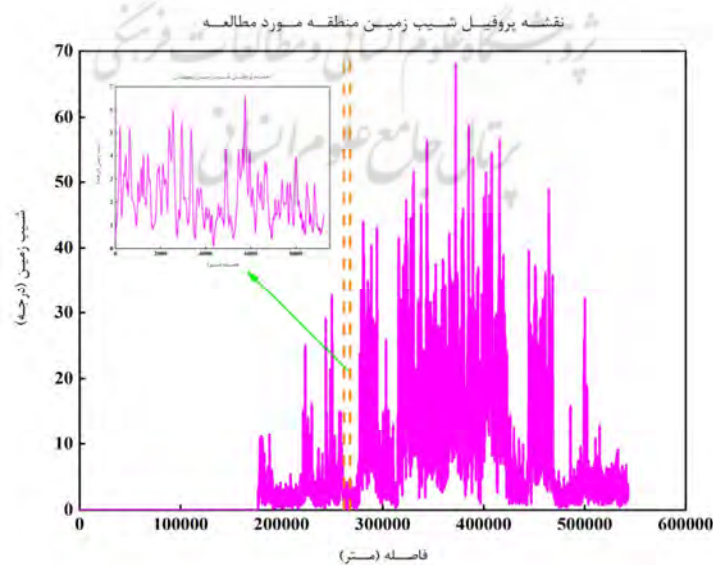
شکل ۳. نقشه زاویه شیب زمین در منطقه مورد مطالعه
(خط مشکی بیانگر راستای پروفیل طولی مدل رقومی ارتفاعی ترسیم‌شده در شکل های ۴ و ۵ است)

حرکت صفحات تکتونیکی در منطقه است که با خط مشکی در شکل ۲ مشخص شده است. مقادیر فاصله در شکل ۴ از مبدأ نقطه‌ای در جنوب غرب، با مختصات (۴۸/۳۰۱۱، ۲۸/۹۰۶۷) و در امتداد خط نشان داده شده در شکل ۴ اندازه‌گیری شده است. شکل ۵ تغییرات شیب زمین در جهت جنوب غرب به شمال شرقی (جهت حرکت صفحات در منطقه) را نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه (مربعی به ابعاد ۴۰۰ کیلومتر و با مرکزیت بهبهان)، از شیب تند شمال شرق با ارتفاع ۴۴۱۸، به شیب ملایم جنوب غرب (محدوده خلیج فارس) با ارتفاع ۱۲۵- می‌رسد. نقشه پروفایل مدل رقومی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ آمده است. در این شکل، جهت تغییرات ارتفاعی زمین از جنوب غرب به شمال شرق است. این جهت همان جهت



شکل ۴. پروفیل طولی مدل رقومی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه در امتداد مشخص شده در شکل ۳

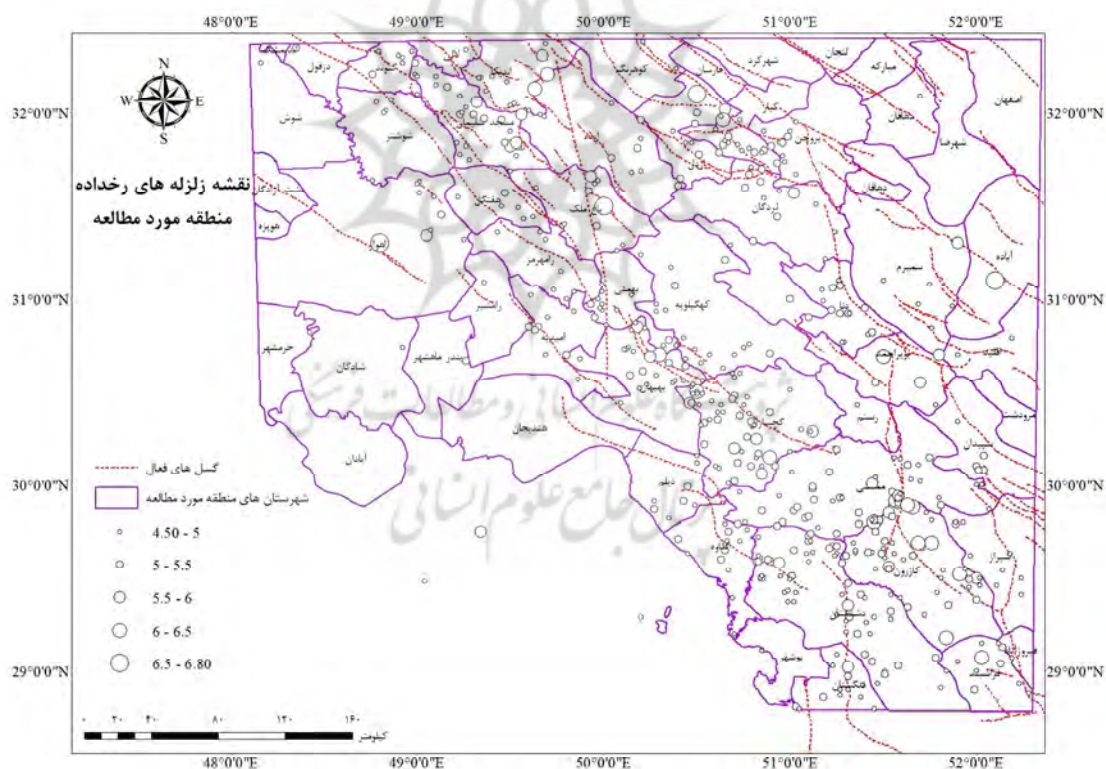


شکل ۵. پروفیل طولی زاویه شیب زمین محدوده مورد مطالعه، در راستای امتداد جنوب غرب- شمال شرق مشخص شده در شکل ۳

نشان می‌دهد. بیشترین تراکم زلزله‌های به‌وقوع‌پیوسته در بخش میانی منطقه مورد مطالعه، با جهت شمال‌غرب به جنوب‌شرق بوده است.

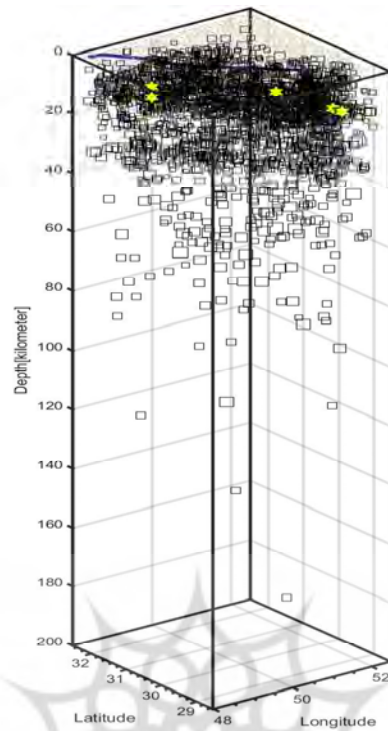
برای ایجاد نقشه فاصله تا کانون زلزله، به مرکز هر زلزله، دایره‌ای با شعاع متناسب با بزرگای زلزله (M_w) ترسیم شده و در این نقشه، نواحی متأثر از زلزله‌های گذشته نشان داده شده است (شکل ۸). برای تهیه نقشه فاصله تا گسل، با کمک لایه گسل و براساس روابط مقیاس بزرگای ولز و کپراسمیت^۲ (۱۹۹۴)، محدوده‌هایی با پهنای دو تا بیست کیلومتر ایجاد شد تا نقشه فاصله تا گسل حاصل شود. شکل ۹ منطقه متأثر از گسل‌ها را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، از کاتالوگ موسوی-بفرویی و ماهانی^۱ (۲۰۲۰) استفاده شده است. این کاتالوگ خوشه‌زدایی شده اما اطلاعات آن تا سال ۲۰۱۸ است و شامل زلزله‌های تاریخی نیز می‌شود. برای تکمیل کاتالوگ تا سال ۲۰۲۲، از کاتالوگ USGS (۲۰۲۲) استفاده شد. پس از گردآوری کاتالوگ زلزله، ابتدا داده‌های خام زلزله‌های رخ داده در منطقه تهیه شد و سپس با کمک نرم‌افزار Zmap، داده‌ها طبق روش پنجره زمانی-مکانی گاردنر نوپوف (حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها) پردازش شدند (Wiemer, 2001; Reyes & Wiemer, 2019). در انتها نیز داده‌ها، پس از خوشه‌زدایی، در GIS فراخوانی شدند (شکل ۶). شکل ۷ تصویر سه‌بعدی مختصات جغرافیایی و عمق زلزله‌ها را

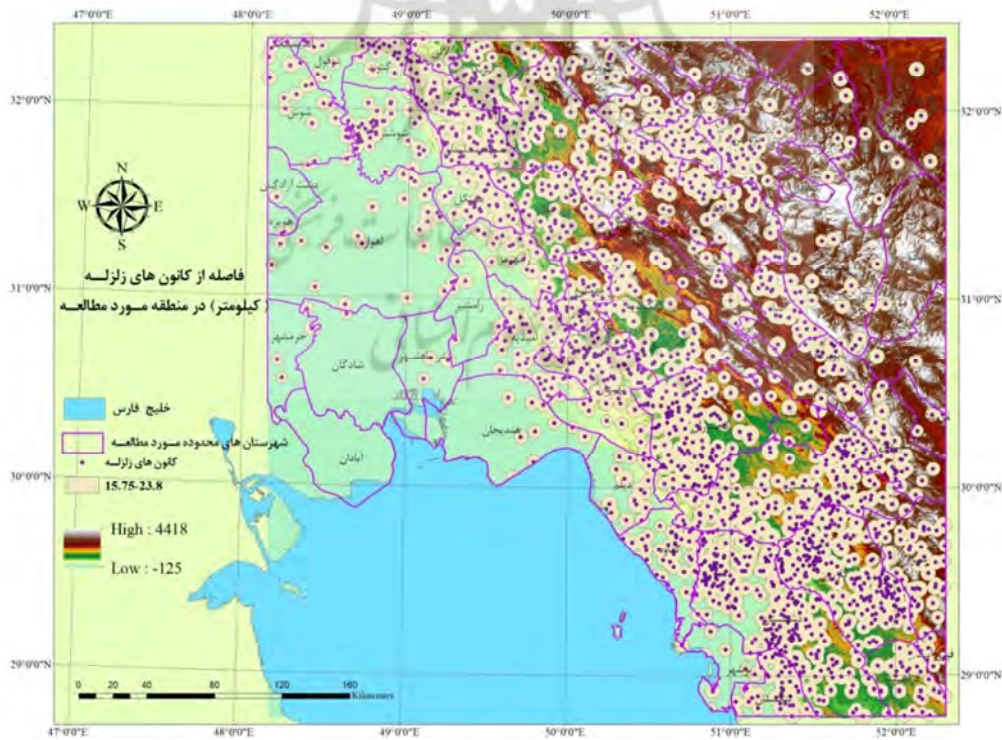


شکل ۶. توزیع جغرافیایی زلزله‌های منطقه

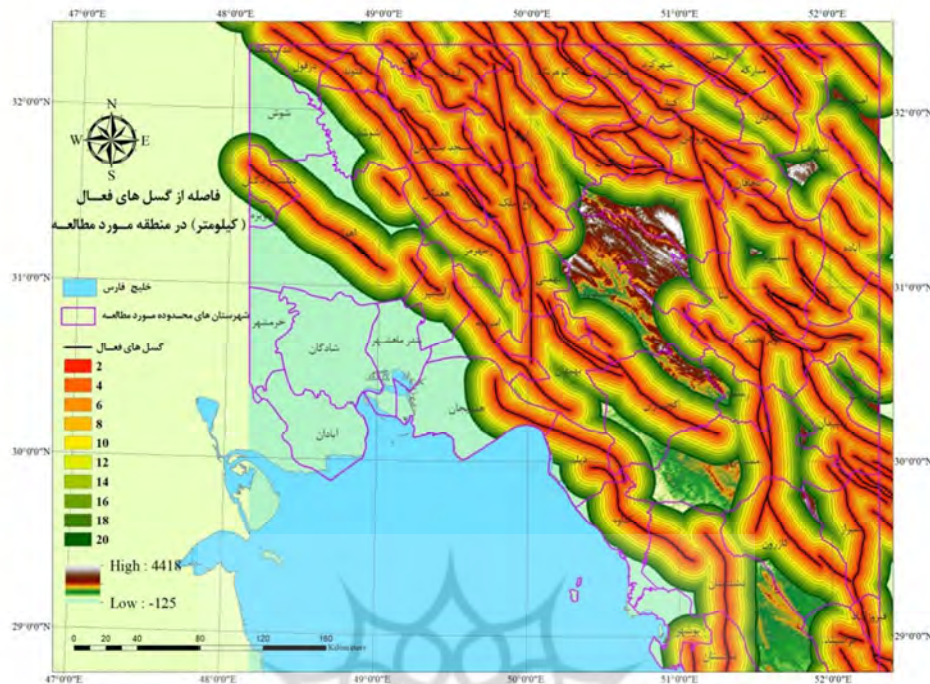
1. Mousavi-Bafrouei & Mahani
2. Wells & Coppersmith



شکل ۷. توزیع زلزله‌های رخ داده و عمق آنها در محدوده مورد مطالعه



شکل ۸. نقشه فاصله از کانون‌های زلزله‌های گذشته در منطقه مورد مطالعه



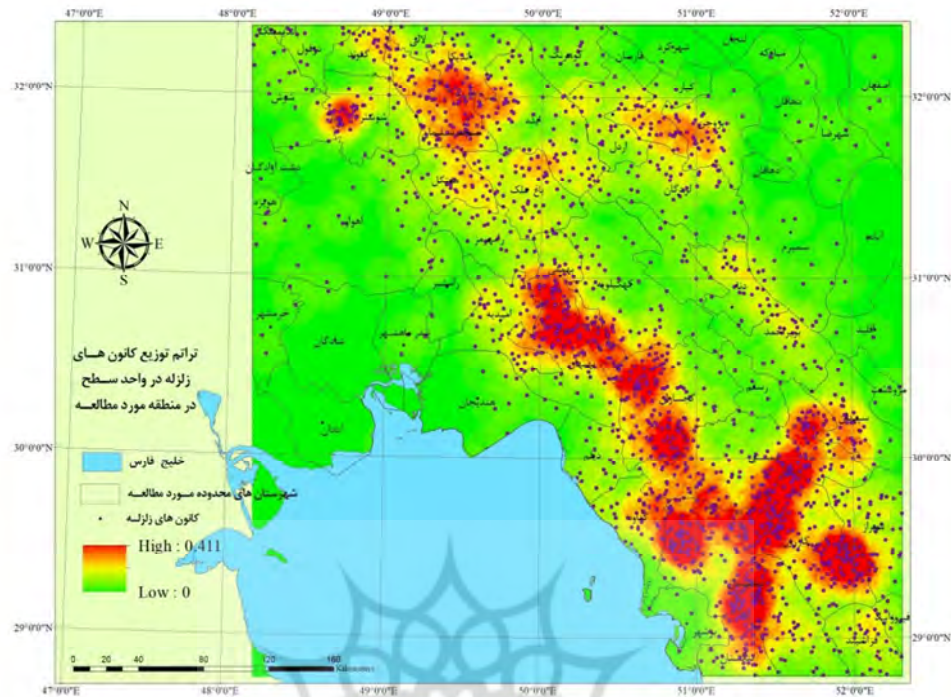
شکل ۹. نقشه فاصله از گسل های فعال منطقه مورد مطالعه

پس از تهیه نقشه‌های لازم با توجه به لرزه‌خیزی منطقه (توزیع کانون‌های زلزله، منابع لرزه‌زا و گسل‌های فعال)، ویژگی‌های زمین‌ساختی (سن لایه، زمین‌ساخت)، توپوگرافی منطقه (مدل رقومی ارتفاعی) و شیب، براساس نمودار جریان شکل ۱۲، EPI تعیین شد.

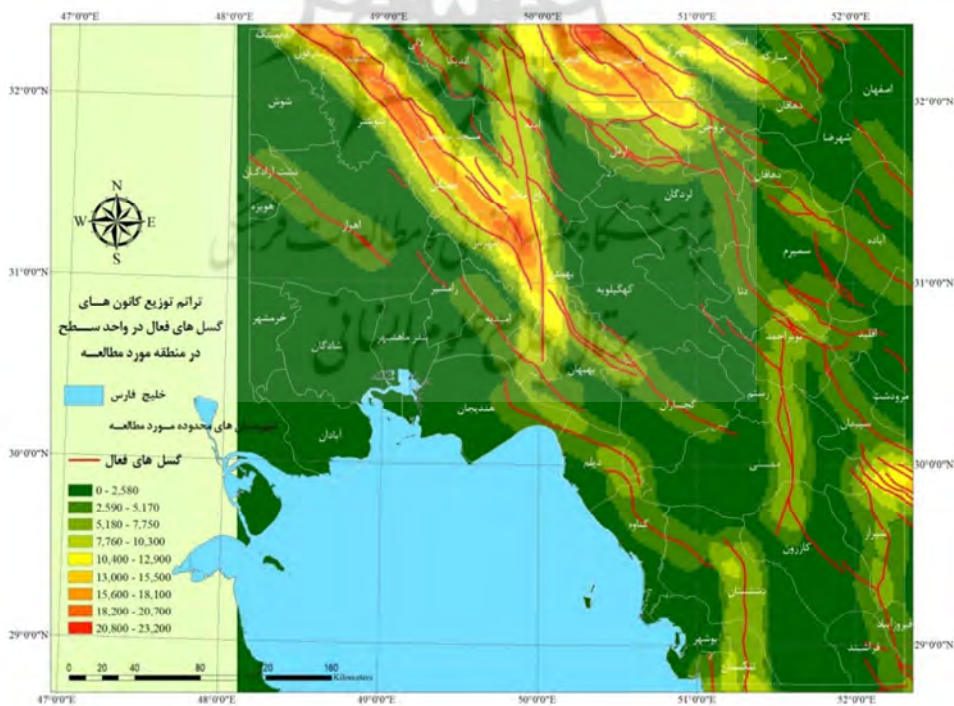
۴- نتایج و بحث

برای به دست آوردن شاخص پتانسیل زلزله (EPI)، لایه‌های ورودی در وزن‌های مورد نظر ضرب و در یکدیگر اثر داده می‌شوند. شاخص پتانسیل زلزله در محدوده ۱ تا ۸/۹ متغیر است که می‌توان آن را به چندین طبقه پتانسیل زلزله دسته‌بندی کرد (Ahmad et al., 2017). با استفاده از روش طبقه‌بندی فاصله‌ای یکسان، نقشه‌ای که در مورد شاخص پتانسیل زلزله به دست آمد در این چهار دسته قرار گرفت:

به منظور ایجاد نقشه تراکم کانون‌های زلزله، منطقه مورد مطالعه به پیکسل‌هایی مربعی به ابعاد ۴۰ کیلومتر تقسیم شد. سپس تعداد زلزله‌های رخ داده در سطح هر مربع (۴۰×۴۰ کیلومترمربع) به مساحت آن (۱۶۰۰ کیلومترمربع) تقسیم شد تا لایه تراکم کانون زلزله در واحد سطح، برای کل منطقه مورد مطالعه، ایجاد شود. نقشه تراکم کانون‌ها، در منطقه مورد مطالعه، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به همین صورت، برای تولید نقشه تراکم گسل‌ها، منطقه مورد مطالعه به پیکسل‌های مربعی با ابعاد ۴۰ کیلومتر تقسیم شد و نسبت مجموع طول گسل‌های موجود در سطح هر پیکسل به مساحت پیکسل نیز به دست آمد و با توجه به این موارد، لایه تراکم گسل در واحد سطح، برای کل منطقه مورد مطالعه، تهیه شد (شکل ۱۱). گسل‌های فعال منطقه براساس نقشه گسل‌های فعال ایران انتخاب شده است (Hessami et al., 2003).



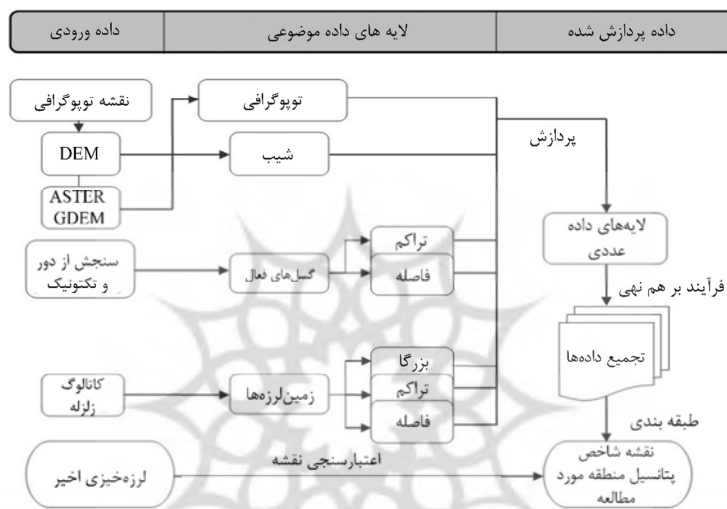
شکل ۱۰. نقشه توزیع کانون های زلزله در واحد سطح، در محدوده مورد مطالعه



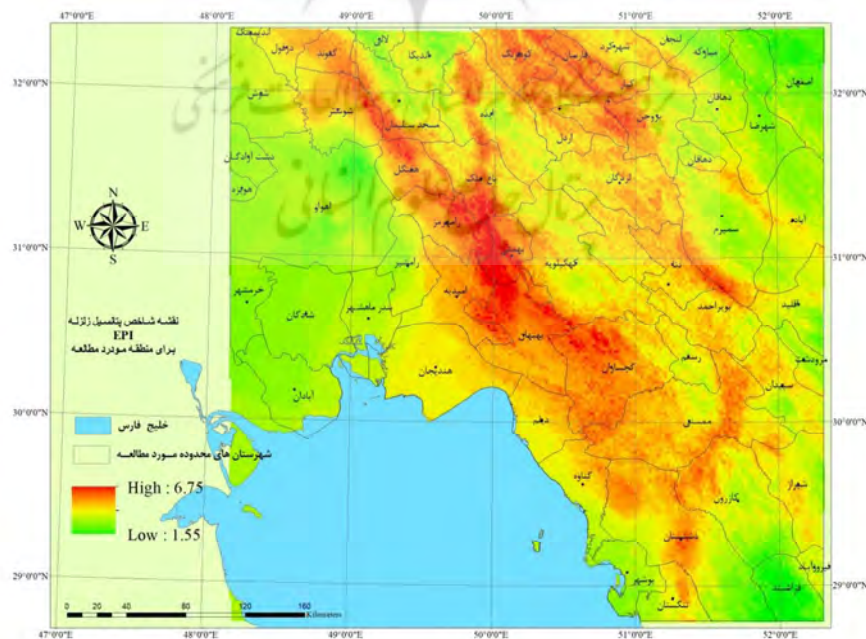
شکل ۱۱. نقشه تراکم توزیع گسل ها در واحد سطح، در منطقه مورد مطالعه

نقشه EPI به دست آمده شامل ۶۰۳۷۲ پیکسل می‌شود. میانگین برآورد شده مقدار EPI برابر با ۴/۴۱۵ و انحراف معیار برابر با ۱/۹۴ است. نقشه حاصل در مورد پتانسیل زلزله (شکل ۱۳) و نقشه میانگین شاخص پتانسیل زلزله برمبنای شهر (شکل ۱۴) نشان‌دهنده مناطقی با پتانسیل نسبی وقوع زلزله است. شکل ۱۵ نقشه مناطقی دارای پتانسیل طبقه‌بندی شده در سطوح چهارگانه (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم) را نشان می‌دهد.

- مناطق دارای پتانسیل خیلی زیاد زلزله ($6/9 < EPI \leq 8/9$)
 - مناطق دارای پتانسیل زیاد زلزله ($5 < EPI \leq 6/9$)
 - مناطق دارای پتانسیل متوسط زلزله ($3 < EPI \leq 5$)
 - مناطق دارای پتانسیل کم زلزله ($1 < EPI \leq 3$)
- مرزهای طبقات برطبق تغییرات و فاصله مساوی گرادین‌ها، با استفاده از توزیع فراوانی EPI، ترسیم شدند.



شکل ۱۲. فلوجارت مدل EPI (Ahmad et al., 2017; 2023)



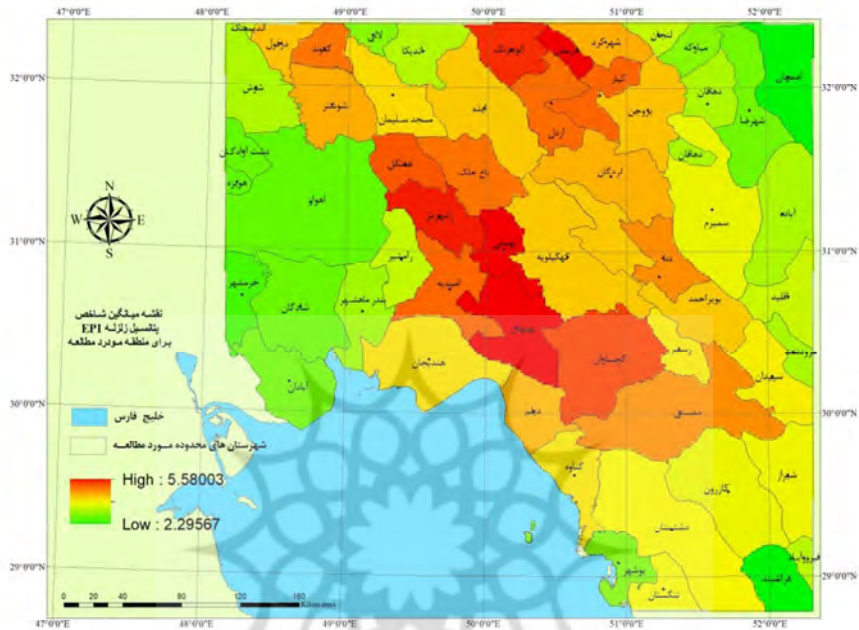
شکل ۱۳. نقشه شاخص خطر زلزله (EPI)

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

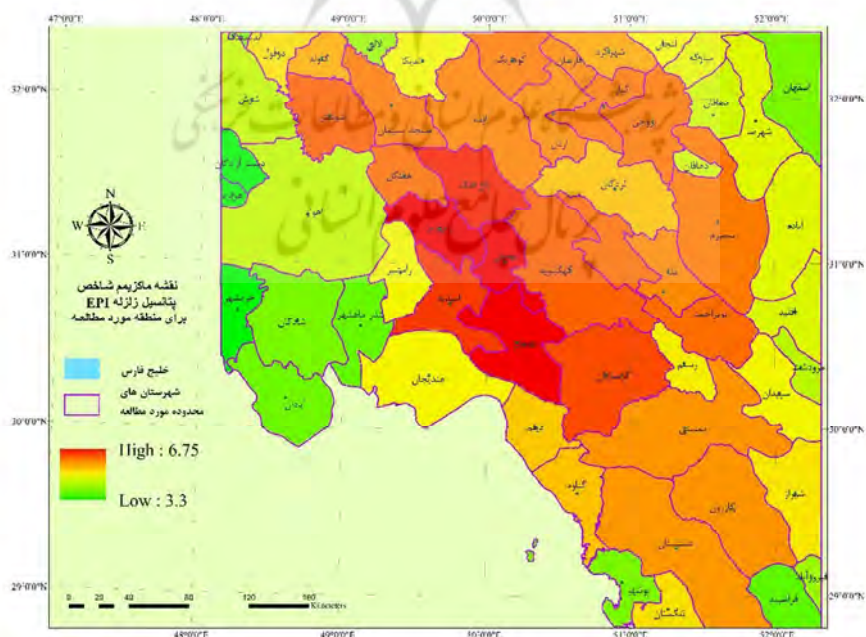
سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

بر اساس شکل ۱۳، بخش‌هایی از شهرهای شرقی و شمالی استان خوزستان و شهرهای جنوب غرب استان چهارمحال بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و اصفهان و شهرهای شمالی استان بوشهر در مناطق با EPI بالا قرار می‌گیرند.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب، میانگین و بیشینه رده‌بندی EPI را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، تقسیمات سیاسی شهرستان‌ها نیز مشخص شده است. لازم است توضیح دهیم که در استانداردها، مقررات و آیین‌نامه‌های ساختمانی معمولاً میانگین یا



شکل ۱۴. نقشه میانگین شاخص خطر زلزله (EPI)



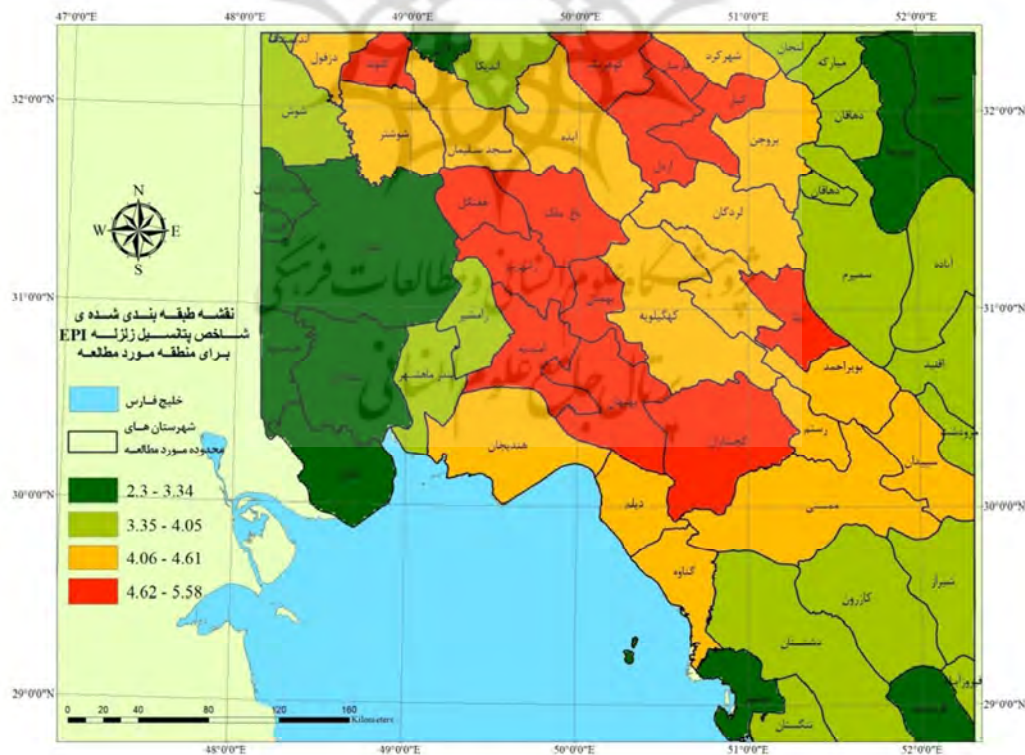
شکل ۱۵. نقشه بیشینه شاخص خطر زلزله (EPI)

نظر گرفتن احتمالات بسیار اندک، چه بسا به افزایش هزینه ساخت منجر شود. به منظور اطلاع بیشتر، برخی از این سناریوها احتمال وقوع کمتر از ۸-۱۰ دارند و وقوع آنها ممکن است بسیار دور از ذهن باشد.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، رده‌بندی شامل کلاس‌های بسیاری است و بیشتر جنبه نمایشی دارد. برای ایجاد زمینه کاربردهای عملی مهندسی و تسهیل در تصمیم‌گیری، باید دسته‌بندی دقیق‌تری براساس روش پیشنهادی احمد و همکاران (۲۰۱۷) انجام شود. شکل ۱۶ نقشه رده‌بندی مبتنی بر چهار کلاس را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، شهرهای گچساران، بهبهان، امیدیه، بهمئی، رامهرمز، باغ ملک، هفت‌گل، گتوند، اردل، کوهرنگ، فارسان و کبار در منطقه در معرض خطر بالا قرار می‌گیرند.

چندک‌هایی، مانند میانگین به‌علاوه یک انحراف معیار یا میانگین به‌علاوه دو انحراف معیار، مورد توجه قرار می‌گیرد؛ بنابراین، این شکل‌ها تصمیم‌گیری درباره خطر منطقه‌ای را ساده‌تر می‌کند. بر این اساس، شهرهای فارسان، کوهرنگ، رامهرمز، بهبهان و بهمئی در معرض بیشترین خطرند و شهرهای کبار، اردل، گتوند، هفت‌گل، امیدیه و گچساران، از این لحاظ، در رده بعدی قرار می‌گیرند.

شکل ۱۵ را می‌توان، بر سناریوهای تحلیل خطر تعیینی زلزله، منطبق دانست. در سناریوهای تعیینی، معمولاً بدترین حالت ممکن بررسی می‌شود. استفاده از این نقشه در مورد ساختمان‌ها و تأسیسات ضروری و دارای اهمیت بسیار زیاد (براساس استاندارد ۲۸۰۰)، در شرایط خاصی، ممکن است توجیه‌پذیر باشد اما رواج استفاده از آن، با در



شکل ۱۶. نقشه طبقه‌بندی شاخص خطر زلزله (EPI)

EPI با سطح خطر استاندارد ۲۸۰۰ نیز در جدول مشاهده می‌شود. طبق مقایسه رتبه خطر EPI با استاندارد، مقادیر بیان شده ازسوی استاندارد ۲۸۰۰ در اغلب شهرها سطح خطر بالاتری را نشان می‌دهد. بر این اساس، می‌توان مقادیری را که این استاندارد در اختیار گذاشته است، مورد اطمینان دانست.

به این ترتیب، در محدوده مورد مطالعه، مناطق فعال دارای مقدار EPI بالا مشخص شده‌اند. جدول ۱ مقدار EPI برای تمامی شهرستان‌های محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شهرستان بهمنی دارای بیشترین مقدار EPI، برابر با ۵/۷۵ است. مقایسه مقادیر

جدول ۱. مقایسه شاخص برآورد شده پتانسیل زلزله (EPI) و خطر زلزله بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰، در شهرستان‌های محدوده مورد مطالعه

شهرستان	موقعیت جغرافیایی (درجه)		EPI		خطر زلزله	
	طول	عرض	میانگین	انحراف معیار	EPI	استاندارد ۲۸۰۰
بهمنی	۵۰/۱۲۳ °E	۳۱/۰۱۲ °N	۵/۷۵	۰/۹۳	زیاد	زیاد
بویراحمد	۵۱/۲۳۰ °E	۳۰/۸۴۱ °N	۴/۲۵	۰/۷۶	متوسط	زیاد
دنا	۵۱/۲۵۹ °E	۳۰/۹۶۰ °N	۴/۵۵	۰/۶۹	متوسط	زیاد
کهگیلویه	۵۰/۵۷۹ °E	۳۰/۹۶۹ °N	۴/۱۰	۰/۲۶	متوسط	زیاد
گچساران	۵۰/۸۲۸ °E	۳۰/۳۳۴ °N	۵/۱۵	۰/۷۵	زیاد	زیاد
آبادان	۴۸/۶۱۱ °E	۳۰/۱۸۱ °N	۳/۱۰	۰/۲۶	کم	کم
امیدیه	۴۹/۷۳۹ °E	۳۰/۷۶۲ °N	۴/۹۵	۰/۰۵	زیاد	زیاد
اندیکا	۴۹/۵۲۹ °E	۳۲/۲۲۴ °N	۳/۳۰	۰/۶۰	متوسط	زیاد
اندیمشک	۴۸/۲۴۴ °E	۳۲/۳۴۱ °N	۳/۷۵	۰/۳۶	متوسط	زیاد
اهواز	۴۸/۷۳۸ °E	۳۱/۲۸۶ °N	۳/۳۵	۱/۰۴	متوسط	متوسط
ایذه	۴۹/۹۷۲ °E	۳۱/۸۷۳ °N	۳/۴۰	۰/۸۰	متوسط	زیاد
باغ ملک	۴۹/۹۰۳ °E	۳۱/۴۸۳ °N	۵/۲۰	۰/۶۸	زیاد	زیاد
بندر ماهشهر	۴۹/۱۲۱ °E	۳۰/۶۲۰ °N	۳/۴۵	۰/۶۶	متوسط	کم
بهمنان	۵۰/۲۱۳ °E	۳۰/۵۲۸ °N	۴/۹۰	۰/۹۰	زیاد	زیاد
خرمشهر	۴۸/۲۶۳ °E	۳۰/۷۰۶ °N	۲/۹۵	۰/۷۶	کم	کم
دزفول	۴۸/۵۰۳ °E	۳۲/۲۵۴ °N	۴/۴۵	۰/۰۴	متوسط	زیاد
دشت آزادگان	۴۸/۲۵۱ °E	۳۱/۵۸۸ °N	۳/۱۵	۰/۲۷	کم	متوسط
رامشیر	۴۹/۳۹۴ °E	۳۰/۹۴۳ °N	۳/۳۰	۰/۹۴	متوسط	متوسط
رامهرمز	۴۹/۶۶۱ °E	۳۱/۲۱۱ °N	۵/۲۰	۱/۲۷	زیاد	زیاد
شادگان	۴۸/۶۸۱ °E	۳۰/۶۴۲ °N	۳/۲۵	۰/۷۵	متوسط	کم
شوش	۴۸/۳۲۸ °E	۳۱/۹۷۸ °N	۳/۵۵	۰/۶۷	متوسط	متوسط
شوشتر	۴۸/۸۷۷ °E	۳۱/۸۸۴ °N	۴/۵۰	۱/۳۸	متوسط	زیاد
لالی	۴۹/۱۶۷ °E	۳۲/۳۱۶ °N	۳/۱۵	۰/۴۶	کم	زیاد
مسجد سلیمان	۴۹/۳۱۲ °E	۳۱/۹۴۸ °N	۳/۶۰	۰/۴۸	متوسط	زیاد
هفت گل	۴۹/۴۰۶ °E	۳۱/۵۳۳ °N	۵/۰۰	۱/۱۴	زیاد	زیاد
هندیجان	۴۹/۵۹۸ °E	۳۰/۳۲۶ °N	۴/۱۰	۱/۰۶	متوسط	متوسط
هویزه	۴۸/۲۰۷ °E	۳۱/۳۹۹ °N	۳/۱۵	۰/۳۰	کم	متوسط
گتوند	۴۸/۸۱۵ °E	۳۲/۲۲۸ °N	۵/۰۵	۰/۵۷	زیاد	زیاد
اصفهان	۵۲/۱۶۳ °E	۳۲/۰۷۰ °N	۲/۸۵	۰/۵۲	کم	متوسط
دهاقان	۵۱/۵۸۲ °E	۳۱/۹۰۲ °N	۴/۰۰	۱/۰۲	متوسط	زیاد
سمیرم	۵۱/۶۱۱ °E	۳۱/۲۵۶ °N	۳/۲۰	۰/۷۳	کم	زیاد
شهرضا	۵۱/۸۸۰ °E	۳۱/۸۶۳ °N	۳/۰۵	۰/۲۶	کم	زیاد

ادامه جدول ۱

شهرستان	موقعیت جغرافیایی (درجه)		EPI		خطر زلزله	
	طول	عرض	میانگین	انحراف معیار	EPI	استاندارد ۲۸۰۰
لنجان	۵۱/۲۲۷ ° E	۳۲/۳۳۰ ° N	۳/۷۰	۱/۱۲	متوسط	
مبارکه	۵۱/۴۸۹ ° E	۳۲/۲۵۲ ° N	۲/۸۵	۰/۳۶	کم	زیاد
آباده	۵۲/۱۱۴ ° E	۳۱/۲۲۶ ° N	۴/۱۰	۱/۱۲	متوسط	زیاد
اقلید	۵۲/۱۴۷ ° E	۳۰/۷۱۵ ° N	۳۰/۵۰	۱/۲۵	متوسط	زیاد
رستم	۵۱/۳۷۰ ° E	۳۰/۳۹۹ ° N	۳/۹۵	۰/۴۶	متوسط	
سپیدان	۵۲/۰۲۸ ° E	۳۰/۲۲۴ ° N	۴/۰۰	۰/۴۶	متوسط	زیاد
شیراز	۵۲/۱۳۲ ° E	۲۹/۶۱۸ ° N	۴/۲۰	۰/۷۲	متوسط	
فراشبند	۵۲/۰۵۶ ° E	۲۸/۹۷۴ ° N	۲/۱۰	۰/۶۶	کم	زیاد
فیروزآباد	۵۲/۲۳۶ ° E	۲۹/۱۰۷ ° N	۳/۴۵	۰/۲۵	متوسط	زیاد
کازرون	۵۱/۷۱۳ ° E	۲۹/۵۲۰ ° N	۳/۴۵	۰/۳۲	متوسط	زیاد
مرودشت	۵۲/۱۸۰ ° E	۳۰/۳۷۶ ° N	۳/۱۰	۰/۲۴	کم	زیاد
ممسنی	۵۱/۳۷۵ ° E	۳۰/۰۱۱ ° N	۴/۰۵	۰/۸۷	متوسط	
اردل	۵۰/۴۵۷ ° E	۳۱/۹۰۹ ° N	۴/۴۵	۰/۹۲	متوسط	بسیار زیاد
بروجن	۵۱/۱۵۲ ° E	۳۱/۸۶۵ ° N	۳/۸۰	۱/۰۴	متوسط	زیاد
شهرکرد	۵۰/۸۴۴ ° E	۳۲/۲۸۶ ° N	۳/۸۵	۰/۵۷	متوسط	زیاد
فارسان	۵۰/۵۶۳ ° E	۳۲/۲۲۷ ° N	۴/۸۵	۰/۹۰	زیاد	خیلی زیاد
کوهرنگ	۵۰/۱۶۲ ° E	۳۲/۲۳۹ ° N	۵/۸۰	۰/۶۵	زیاد	خیلی زیاد
کیار	۵۰/۸۰۶ ° E	۳۱/۹۵۴ ° N	۵/۲۵	۰/۹۰	زیاد	
لردگان	۵۰/۸۸۷ ° E	۳۱/۴۶۲ ° N	۳/۹۵	۰/۹۳	متوسط	زیاد
بوشهر	۵۰/۹۳۹ ° E	۲۹/۰۸۱ ° N	۳/۳۵	۰/۳۵	متوسط	زیاد
تنگستان	۵۱/۲۵۶ ° E	۲۸/۹۲۴ ° N	۴/۰۵	۰/۵۴	متوسط	زیاد
دشتستان	۵۱/۳۱۴ ° E	۲۹/۲۸۵ ° N	۵/۱۵	۰/۷۳	زیاد	
دیلم	۵۰/۳۴۲ ° E	۳۰/۰۱۷ ° N	۴/۲۰	۰/۵۴	متوسط	زیاد
گناوه	۵۰/۶۲۹ ° E	۲۹/۶۲۱ ° N	۴/۳۵	۰/۶۵	متوسط	زیاد

۵- نتیجه گیری

با حفظ پارامترهای اصلی روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی، روش با تحلیل احتمالی زلزله ترکیب و با استفاده از شیوه AHP وزن بین‌پارامتری و رتبه‌بندی درون پارامتری اصلاح شده است. طبق نتایج، این روش می‌تواند منطقه‌ای وسیع را پوشش دهد و درمورد داده‌های با وضوح پایین اعمال شود. از معایب این روش این است که در صورت کمبود داده‌ها برای تعیین پارامترها، وزن‌دهی و رتبه‌بندی، دقت آن بسیار پایین خواهد بود.

روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI) در جنوب غرب ایران انجام و نتایج

روش هم‌پوشانی حسابی- وزنی، برحسب شاخص پتانسیل زلزله (EPI)، روش جهانی جدیدی است که می‌توان آن را در ارزیابی خطر زلزله به روش غیرارگودیک به کار برد. این روش گامی در راستای تغییر کاربرد شیوه‌ها، از تکنیک‌های معمول تحلیل خطر زلزله (احتمالی و قطعی) به سمت سیستم‌های مبتنی بر اطلاعات مکانی و سنجش از دور، محسوب می‌شود. بدیهی است که در این روش، دقت اطلاعات، طرح وزن‌دهی بین‌پارامتری و رتبه‌بندی درون پارامتری مورد استفاده نقش اصلی را ایفا می‌کند. در این مقاله،

- Framework for Integrating Geoprocessing Services (Case Study: Landslide Susceptibility Mapping)**, Iranian Remote Sensing & GIS, 4(3).
- Barjasteh, A., 2021, **Seismotectonics of Saydoon Dam Sites in the Izeh Fault Zone, SW of Iran**, Advance Researches in Civil Engineering, 3(1), 61-69, <https://doi.org/10.30469/arce.2021.130148>.
- Ehsani, J. & Arian, M., 2015, **Quantitative Analysis of Relative Tectonic Activity in the Jarahi-Hendijan Basin Area, Zagros, Iran**, Geosciences Journal, 19(4), PP. 751-765, <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0016-3>.
- Farzipour-Saein, A., Nilfouroushan, F. & Koyi, H., 2013, **The Effect of Basement Step/Topography on the Geometry of the Zagros Fold and Thrust Belt (SW Iran): An Analog Modeling Approach**, International Journal of Earth Sciences, 102(8), PP. 2117-2135, <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0921-5>.
- Ghahremani, N., Khashei A. & Dakhili, R., 2012, **Evolution AHP, LNRF and FAHP Methods to Landslide Hazard Zoning (Case Study: Alangdareh Basin)**, Iranian Remote Sensing & GIS, 4(1).
- Giardini, D., Danciu, L., Erdik, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu Tümsa, M.B., Akkar, S., ... & Zare, M., 2018, **Seismic Hazard Map of the Middle East**, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), PP. 3567-3570, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0347-3>.
- Hessami, K., Jamali, F. & Tabassi, H., 2003, **Major Active Faults of Iran, Scale 1: 2,500,000**, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Jafari, M., Nazarpour, A., Charchi, A. & Salehi, R., 2021, **Utilization of Analytical Hierarchy Process (AHP) Method in Identifying Seismic Risk, Case Study: Khuzestan Province**, Advanced Applied Geology, 11(4), PP. 925-941, <https://doi.org/10.22055/aag.2021.35063.2165>.
- Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Al-Amri, A. & Sofyan, H., 2020, **Seismic Hazard and Risk Assessment: A Review of State-of-the-Art Traditional and GIS Models**, Arabian Journal of Geosciences, 13(2), PP. 1-21, <https://doi.org/10.1007/s12517-019-5012-x>.
- به صورت نقشه و جدول ارائه شد. در منطقه مورد مطالعه، شاخص پتانسیل زلزله بین محدوده ۱/۵۵ تا ۶/۷۵ متغیر است. میانگین برآورد شده EPI برابر با ۴/۴۱۵ و انحراف معیار برابر با ۱/۹۴ است. این مقادیر گویای لرزه‌خیزی متوسط در منطقه، با تغییرات نسبتاً زیاد است. جدول مقادیر EPI نیز برای تمامی شهرهای استان خوزستان تخمین زده شد و شاخص پتانسیل زلزله هر شهرستان براساس EPI، با شاخص لرزه‌خیزی استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه شد. این مقایسه بیانگر هم‌خوانی نتایج در اغلب شهرها و بیشتر بودن خطر بیان شده از سوی استاندارد ۲۸۰۰ در موارد اختلافی است که نشان از مورد اطمینان بودن مقادیر استاندارد دارد.
- #### ۶- سپاسگزاری
- این پژوهش با حمایت شرکت پالایش گاز بیدبلند انجام شده است. تمامی پردازش‌ها با استفاده از امکانات مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی (MAP Center) دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء به‌بهان انجام شده است که در اینجا، نهایت سپاس خود را از دست‌اندرکاران اعلام می‌کنیم. ضمناً تمامی نقشه‌های تهیه‌شده در وبگاه مرکز، به آدرس khrisk.ir در دسترس است.
- #### ۷- منابع
- Ahmad, R.A., Singh, R.P. & Adris, A., 2017, **Seismic Hazard Assessment of Syria Using Seismicity, DEM, Slope, Active Faults and GIS**, Remote Sensing Applications: Society and Environment, 6, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.04.003>.
- Ahmed, T., Rehman, K., Shafique, M. & Ali, W., 2023, **GIS-Based Earthquake Potential Analysis in Northwest Himalayan, Pakistan**, Environmental Earth Sciences, 82(4), P. 113, <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10798-2>.
- Amini Tareh, M., Alesheikh, A.A. & Poorazizi, M.E., 2012, **Designing and Developing a Standards-Based Interoperable**

- Karimzadeh, S., Miyajima, M., Hassanzadeh, R., Amiraslazadeh, R. & Kamel, B., 2014, **A GIS-Based Seismic Hazard, Building Vulnerability and Human Loss Assessment for the Earthquake Scenario in Tabriz**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66, PP. 263-280, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.026>.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H. & Rahimian, M., 2016, **Using a Physics-Based Earthquake Simulator to Evaluate Seismic Hazard in NW Iran**, Geophysical Journal International, 206(1), PP. 379-394, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw157>.
- Matkan, A.A., Mansouri, B., Mirbagheri, B. & Karbalaeei, F., 2016, **Detection of earthquake Damaged Buildings in Satellite Images Using Texture Analysis and Very High Resolution (VHR) A Case Study of the 2010 Earthquake in Port-au-Prince**, Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, 7(3), PP. 17-32.
- Moradi Tayebi, F., Motaghed, S. & Dastanian, R., 2020, **Evaluation Chaotic Behavior and Time Series Prediction of Tehran Earthquakes**, MCEJ, 20(3), PP. 147-160, <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-15687-fa.html>.
- Motaghed, S., Yazdani, A., Nicknam, A. & Khanzadi, M., 2018, **Sobol Sensitivity Generalization for Engineering and Science Applications**, Journal of Modeling in Engineering, 16(54), PP. 217-226, <https://doi.org/10.22075/jme.2017.12259.1221>.
- Motaghed, S., Khazaei, M., Eftekhari, N. & Mohammadi, M., 2023a, **A Non-Extensive Approach to Probabilistic Seismic Hazard Analysis**, Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(3), PP. 1117-1124, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1117-2023>.
- Motaghed, S., Eftekhari, N., Khazaei, M. & Yousefi Dadras, E., 2023b, **Selection and Ranking the Ground Motion Prediction Equations for Tehran Region**, Journal of Structural and Construction Engineering, 10(11), PP. 48-62, <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393094.3088>.
- Mousavi-Bafrouei, S.H. & Mahani, A.B., 2020, **A Comprehensive Earthquake Catalogue for the Iranian Plateau, (400 BC to December 31, 2018)**, Journal of Seismology, 24(3), PP. 709-724, <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>.
- Mousavi, S.S., Samani, B. & Monshedi Mahadori, M., 2020, **Seismic Hazard Analysis for Izeh City, Khuzestan Province**, Journal of Tectonics, 3(12), PP. 58-71, DOI: 10.22077/jt.2020.1560.
- Reyes, C. & Wiemer, S., 2019, **ZMAP7, A Refreshed Software Package to Analyze Seismicity**, Geophysical Research Abstracts, 21.
- Sadin, H., Mirzaali, M. & Kosari Safa, M., 2017, **Analysis of Earthquake Risks and Damages in Rural Areas Using AHP and GIS Techniques (Case Study: Rural Abarshiveh Damavand)**, Emergency Management, 6(1), PP. 93-104, <https://doi.org/20.1001.1.23453915.1396.6.1.7.9>.
- Seber, D., Sandvol, E., Sandvol, C., Brindisi, C. & Barazangi, M., 2001, **Crustal Model for the Middle East and North Africa Region: Implications for the Isostatic Compensation Mechanism**, Geophysical Journal International, 147(3), PP. 630-638, <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01572.x>.
- Talebi, M., Zare, M., Farsangi, E.N., Soghrat, M.R., Maleki, V. & Esmaeili, S., 2021, **Development of Risk-Targeted Seismic Hazard Maps for the Iranian Plateau**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 141, P. 106506.
- USGS (The United States Geological Survey): "Search Earthquake Catalog", 2022, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>, last access: February, 2022.
- Wells, D.L. & Coppersmith, K.J., 1994, **New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement**, Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), PP. 974-1002, <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
- Wiemer, S., 2001, **A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP**, Seismological Research Letters, 72(3), PP. 373-382.