

Utilization of analytical hierarchy process (AHP) method in identifying seismic risk, case study: Khuzestan Province

Mohammad Amin Jafari¹, Ahad Nazarpour^{2*}, Abbas Charchi³, Rasool Mombani Salehi⁴

1- Master Graduate, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3- Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Masters Student, School of Geology, College of Science, Shahroud University of Technology Central Campus, Shahroud, Iran

Keywords: Zoning map, Earthquake risk, Geographic Information System, Analytic Hierarchy Process (AHP), Khuzestan Province

1-Introduction

Considering that Khuzestan Province is a part of Zagros seismicity province, identifying high seismic risk areas in this region is very important (Talebi and Nezam Mahalleh, 2013). Earthquake natural hazards are one of the phenomena that have put many cities at risk. Therefore, the number of victims in the world is increasing. The occurrence of severe earthquakes has prompted humans to think about developing infrastructure plans to reduce faults and damage caused by them (Lyu et al., 2020). Because Iran is located in the Alpine-Himalayan seismic belt and is one of the youngest and most mountainous parts, or sporadic seismic activity, very large earthquakes with a period of return Long and large seismic fissures are characterized along numerous Quaternary faults (Smith, 2003). Khuzestan Province, being located in the southwest of Iran and also located in the Zagros region, has seismic potential, which will be discussed in this study. The purpose of this study is to identify high risk areas in the future development of Khuzestan Province by using seven layers of information, hierarchical analysis and GIS decision support system.

Table 1. Nine-point intensity of importance scale and its description (Satty, 1990).

Intensity of importance	Definition
9	Extreme importance
8	Very strong to stream
7	Very strong importance
6	Strongly to very strong
5	Strong importance
4	Moderately to strong
3	Moderate importance
2	Equally to moderately
1	Equal importance

* Corresponding author: ahad.nazarpour@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.35063.2165

Received 2020-09-16

Accepted 2021-01-16

2- Material and methods

Analytical hierarchy process (AHP) is one of the most important techniques among multiple criteria decision making techniques. This technique investigates complicated problems on the basis of their interactions and resolves them by converting them into simple forms (Saaty, 2016). The relative “priority or weight” given to each element in the hierarchy is determined by comparing pairwise the contribution of each element at a lower level in terms of the criteria (or elements) with which a causal relationship exists (Jafari et al., 2020). The pairwise judgment starts from the second level and finishes in the lowest level, alternatives. In each level the criteria are compared pairwise according to their level of influence and based on the specified criteria in the higher level. The DM uses a standardized comparison scale of nine levels that is shown in Table 1 (Saaty, 1990). In this study, the layer’s digital elevation models DEM, land slope, density of faults, density of earthquakes of the last 20 years, distance from faults (buffer), distance from earthquakes of the last 20 years (buffer) and interpolation (IDW) layer Earthquakes of the last 20 years in Khuzestan province were used to identify the seismic hazard and according to AHP method and table 2 layers were prepared for integration in GIS environment.

Table 2. Matrix comparison of layers and weights calculated by AHP method.

Layers	Faults density	Faults buffer	Earthquakes density	Earthquakes buffer	Earthquakes (IDW)	Slope	DEM	Weighs
Faults density	1	3	4	5	6	8	9	39.84%
Faults buffer	0.333	1	3	4	5	6	8	24.67%
Earthquakes density	0.25	0.333	1	3	4	5	6	15.04%
Earthquakes buffer	0.2	0.25	0.333	1	3	4	5	9.31%
Earthquakes (IDW)	0.167	0.2	0.25	0.333	1	3	4	5.68%
Slope	0.125	0.167	0.2	0.25	0.333	1	2	3.19%
DEM	0.111	0.125	0.167	0.2	0.25	0.33	1	2.27%

3- Results and discussion

The results of this study (Fig. 1) that the northeastern and northern parts of Khuzestan Province have the highest earthquake risk that the cities of Masjed Soleyman, Indika and Izeh have high earthquake potential, Dezful, Shushtar and Gutvand have earthquake potential. A few cities such as Ahvaz, Abadan and Dasht-e - Azadegan plain have low seismic potential. The earthquakes of the last 10 years in Khuzestan Province also showed good overlap with high risk points. According to the results of this study, it is suggested that in order to reduce the damage after the earthquake, issues such as the location of temporary housing, location of emergency drinking water supply tanks, as well as retrofitting of buildings and infrastructure should be considered by the relevant authorities.

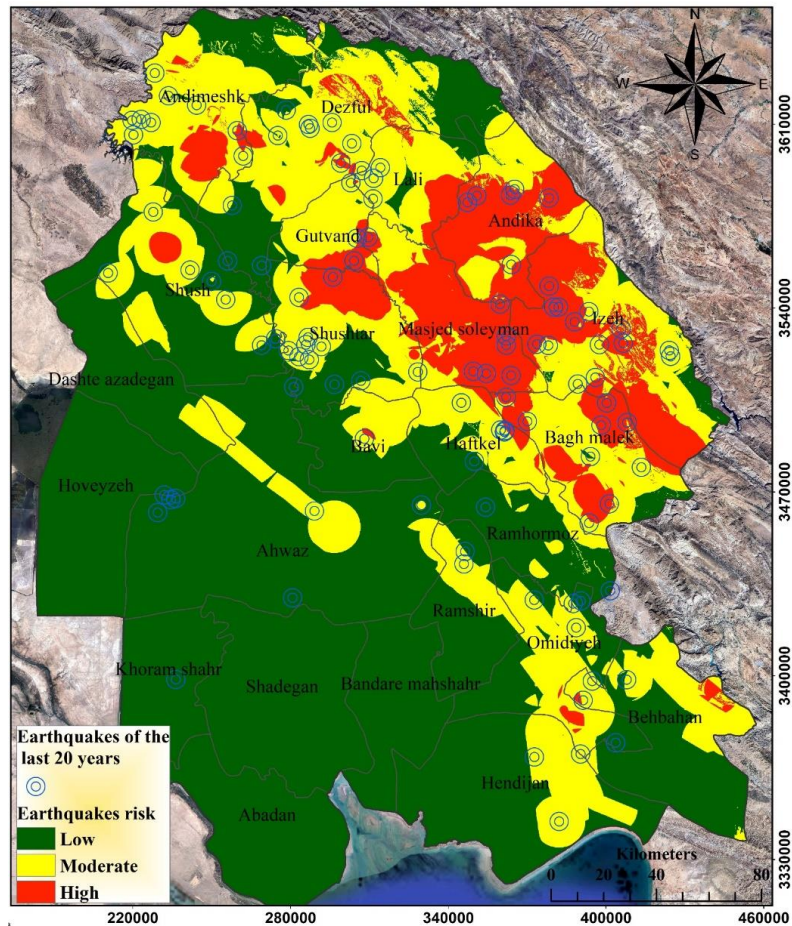


Fig. 1. Earthquake risk zoning map in Khuzestan Province.

References

- Jafari, M.A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2019. Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone. *Advanced Applied Geology* 10, 314-327.
- Lyu, H.M., Shen, S.L., Yang, J., Zhou, A.N. 2020. Risk assessment of earthquake-triggered geohazards surrounding Wenchuan, China. *Natural Hazards Review* 21, 05020007.
- Saaty, T.L., 1990. *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Saaty, T.L., 2016. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In *Multiple criteria decision analysis*, Springer, New York, NY, pp. 363-419.
- Smith, K., 2003. *Natural hazards*. Translated by Ebrahim Moghimi and Shapur Goodarzinejad, Tehran, Samat Publications.
- Talebi, A., Nezam Mahalleh, M., 2013. Earthquake hazard estimation and seismic zoning of Khorasan Razavi and North Khorasan provinces by probabilistic method, 2nd International Conference on Environmental Hazards, Tehran, Kharazmi University.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jafari1, M.A., Nazarpour, A., Charchi, A., Mombani Salehi, R., 2022. Utilization of analytical hierarchy process (AHP) method in identifying seismic risk, case study: Khuzestan Province. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 925-941.

DOI: 10.22055/AAG.2021.35063.2165

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16264.html?lang=en

بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی در شناسایی خطر لرزه‌ای، مطالعه‌ی موردی: استان

خوزستان

محمدامین جعفری

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

احد نظریور*

گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

عباس چرچی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

رسول مومبنی صالحی

دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

*ahad.nazarpour@gmail.com

چکیده

ایران یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای دنیا محسوب می‌شود و شهرهای آن بر اثر این پدیده طبیعی آسیب‌های فراوانی دیده‌اند. استان خوزستان با توجه به شرایط زمین‌ساختی و وجود گسل‌های اصلی و فرعی در اطراف آن و ثبت زمین‌لرزه‌ها در این منطقه در بازه‌های زمانی مختلف از این قاعده مستثنی نیست. در پژوهش حاضر سعی شده تا پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای استان خوزستان با توجه به قرار گرفتن بخشی از آن در ایالت لرزه‌خیزی زاگرس، مورد شناسایی قرار گیرد. در راستای دستیابی به این هدف از داده‌های زمین‌شناسی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه پشتیبان تصمیم جی‌آی‌اس بهره گرفته شد. که لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این مطالعه عبارت‌اند از: مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب زمین، چگالی گسل‌ها، چگالی زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر، فاصله از گسل‌ها، فاصله از زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر و لایه‌ی درون‌یابی شده بزرگی زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر استان خوزستان. نتایج این پژوهش نشان داد، قسمت‌های شمال‌شرقی و شمال استان خوزستان از بالاترین خطر زمین‌لرزه‌ای برخوردار هستند که شهرهایی مانند مسجدسلیمان، اندیکا و ایذه دارای پتانسیل لرزه‌ای بالا، شهرهایی مانند دزفول، لالی و گتوند دارای پتانسیل لرزه‌ای متوسط و شهرهایی مانند اهواز، آبادان و دشت آزادگان دارای پتانسیل لرزه‌ای بسیار کمند. زمین‌لرزه‌های ۱۰ سال اخیر استان خوزستان نیز همپوشانی مناسبی با نقاط با ریسک بالا از خود نشان داد. علت بالا بودن خطر زلزله در این مناطق را می‌توان به وجود گسل‌های فراوان، فعالیت‌های انسانی زیاد نظیر سدسازی، استخراج از سفره‌های آب‌های زیرزمینی در مناطقی که گسل فعال دارند و آزادشدگی انرژی لرزشی گسل‌های فعال دانست.

کلمات کلیدی: نقشه پهنه‌بندی، خطر زلزله، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل سلسله مراتبی، استان خوزستان

مقدمه

بازگشت طولانی و شکاف‌های بزرگ لرزه‌ای در امتداد گسل‌های متعدد کواترنری مشخص می‌شود (Smith, 2003). این مسئله عموماً با گسترده‌ترین دخالت‌های سنجیده انسانی در محیط‌های طبیعی از جمله ساخت و سازهای بی‌رویه در حریم گسل‌ها، نبود ضوابط و استانداردهای ساخت و ساز یا زلزله شدت یابد و بر اثر وقوع آن، بحران‌های زیادی در جوامع انسانی ایجاد شود؛ بنابراین مدیریت سنجیده مخاطرات به‌منظور کاهش هرچه بیشتر تأثیرات سوء آن‌ها بر جامعه ضروری است (Rundle et al., 2020).

مخاطرات محیطی طبیعی نظیر زلزله از پدیده‌هایی است که بسیاری از شهرها را در معرض ریسک ناشی از آن قرار داده است؛ بنابراین شمار قربانیان ناشی از آن در جهان در حال افزایش است. وقوع زلزله‌های شدید بشر را بر آن داشته است در فکر تدوین برنامه‌ای زیربنایی برای کاهش خطرات و آسیب‌های ناشی از آن باشد (Lyu et al., 2020). از آنجایی که ایران در کمربند زلزله‌خیز آلپ-همالیا قرار دارد و یکی از بخش‌های جوان و در حال کوه‌زایی به شمار می‌رود، با فعالیت‌های لرزه‌ای پراکنده، زلزله‌های بسیار بزرگ با دوره

* رها شدن بُرش‌های (Slabs) باقی‌مانده از پوسته اقیانوسی به درون گوشته. شواهد روی زمین نشان می‌دهند که فرورانش احتمالی پوسته اقیانوسی در شمال خاوری خطراندگی انجام گرفته و لذا، این نظر نمی‌تواند دلیلی بر توان لرزه‌خیزی امروز زاگرس باشد.

مدل‌سازی ارزیابی خطر زمین‌لرزه فرآیند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده‌های مکانی مختلف (ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و غیره) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که هدف نهایی آن، شناسایی مناطق لرزه‌خیز می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، می‌بایست داده‌های مکانی مختلف جمع‌آوری، آنالیز و تلفیق شوند. مدل‌سازی خطر لرزه‌خیزی بر اساس روش‌های دانش محور در شروع عملیات اکتشافی در مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی مناسب بوده ولی در آن کار تکتونیکی کم صورت گرفته، مناسب هستند. زیرا به تصمیم‌گیرنده این اجازه را می‌دهد که یک درک کلی از هدف نهایی را داشته باشد (Najafi et al., 2014). تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) فرآیند انتخاب مناسب‌ترین جایگزین‌ها در حضور معیارهای چندگانه می‌باشد. در این روش‌ها، مدل‌های مفهومی به عنوان ملاکی برای انتخاب و شناسایی معیارهای اکتشافی (در این جا لرزه‌خیزی) و الگوهای شاهد، تولید نقشه‌های پیش‌گو، تخصیص وزن به نقشه‌ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه‌های شاهد به منظور پیش‌بینی مناطق لرزه‌خیز استفاده می‌شود (Carranza, 2009). برای تهیه نقشه لرزه‌خیزی در محیط ArcGIS دو دسته کلی وجود دارد. دسته اول با عنوان روش‌های متکی بر داده‌ها شناخته می‌شوند که متغیرهای این مدل با در نظر گرفتن شواهد موجود در منطقه مطالعاتی تعیین می‌شوند که در این دسته می‌توان به روش‌هایی چون تحلیل تصمیم‌گیری درختی و رگرسیون لجستیک اشاره کرد (Jafari et al., 2020). در دسته دوم که به روش‌های متکی بر دانش موسوم هستند، متغیرهای مدل با توجه به هدف مورد نظر، منطقه مورد مطالعه و عوامل تأثیرگذار دیگر توسط کارشناس برآورد می‌شود. روش‌های چون منطق فازی و همپوشانی چند کلاسه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جز این دسته‌اند (Zhang et al., 2017). در این پژوهش از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بدین منظور برای استفاده از روش نام برده از هفت لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب زمین، چگالی گسل‌ها، چگالی زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر، فاصله از گسل‌ها، فاصله از زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر و لایه‌ی درون‌یابی شده بزرگی

زمین‌لرزه‌ها همواره جزء مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله تعداد بسیار زیادی از مردم جهان گرفتار آثار نامطلوب آن می‌شوند. برای کاهش تلفات جانی و اقتصادی و تبعات اجتماعی آن‌ها ضروری است که بر اساس دانش کنونی و آخرین فناوری‌های قابل اعتماد از خطر وقوع زمین‌لرزه در نقاط مختلف، شناختی دقیق به دست آورد. قدم اول و مهم در تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای، راهبرد کاهش استقرار جمعیت در مناطق پرخطر است (Falcon, 1969). زمانی وضعیت خطرناک می‌شود که شهرها و کلان‌شهرها بر روی خطوط گسل یا در مجاورت آن‌ها ساخته شده‌اند و در معرض خطر زلزله قرار دارند. هرچند پیش‌بینی دقیق این مخاطره‌ی بزرگ طبیعی به صورت ۱۰۰ درصد قطعی ممکن نیست، ولی تعیین احتمالی مکان رخداد یک زلزله امکان‌پذیر است (Chan et al., 2019). گسترش علوم زمینی و تلفیق آن با ریاضیات، موجب شناخت دقیق‌تر شرایط محیطی و در نتیجه آگاهی بیشتر از مقاومت محیط طبیعی در برابر زمین‌لرزه می‌شود (Mousavi et al., 2015).

پراکندگی جغرافیایی زمین‌لرزه‌ها به گونه‌ای است که گاهی بر روی شکستگی‌های شناخته شده و یا شکستگی‌های کهن باز پویا قرار می‌گیرند، ولی بسیاری از زمین‌لرزه‌ها را نمی‌توان به شکستگی‌های شناخته شده و یا روند گسل‌های سطحی ربط داد. لذا، باید پذیرفت که رابطه میان زمین‌لرزه و زمین‌ساخت بسیار پیچیده است که این موضوع می‌تواند نتیجه کمبود اطلاعات زمین‌شناختی و لرزه‌زمین‌ساختی باشد. درباره‌ی بالا بودن توان لرزه‌خیزی زاگرس می‌توان به چهار مورد زیر اشاره کرد (Berberian, 1995):

* گسترش گنبد‌های نمکی و عدم تطابق کانون زمین‌لرزه‌ها با گسل‌های مشخص، گنبد‌های نمکی و حرکت آن‌ها در زمین‌لرزه‌های زاگرس سبب ایجاد زمین‌لرزه می‌شود.

* تنش‌های فشارشی وارد بر زاگرس، بر پی‌سنگ ناحیه اثرگذار است. همین تنش‌ها موجب دگرشکلی پی‌سنگ و رسوبات فوقانی ورقه عربستان و فراوانی زمین‌لرزه‌های زاگرس می‌شود. فراوانی نسبی زمین‌لرزه‌ها در ناحیه بندرعباس-لار، که نتیجه فشارهای اضافی وارده از بخش خاوری ورقه عربستان است می‌تواند دلیلی بر این نظر باشد.

* فراوانی زمین‌لرزه‌های زاگرس می‌تواند مدیون حرکت گسل‌های شمالی-جنوبی پرکامبرین باشند. ولی، این گونه گسل‌ها به طور عموم، در سطح، دارای حرکت‌های نرمال و یا امتداد لغزند در حالی که سازو کار زمین‌لرزه‌های ژرف زاگرس، گویای حرکت‌هایی از نوع رورانده است (Mirzaei et al., 1997).

در کلان‌شهر تهران پرداخته‌اند. ایشان در این پژوهش، با مبنا قرار دادن گسل مشاء و طراحی سناریوی زلزله به ارزیابی تلفات انسانی و شناسایی مناطقی که بیشترین پتانسیل لرزه‌خیزی را نشان می‌دهند پرداخته است. Dou و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی مدل‌های آماری چندگانه مبتنی بر GIS و داده‌کاوی برای حساسیت به زمین‌لرزه و باران با استفاده از LiDAR DEM به تجزیه و تحلیل لرزه‌خیزی در توکیو پرداخته است. Jena و Pradhan (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله با استفاده از رویکرد مبتنی بر GIS به ارزیابی خطر لرزه‌خیزی پرداخته است.

در مطالعات داخلی Rahimi Shahid and Rahimi (۲۰۱۷) در مقاله‌ای به پهنه بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم) پرداخته‌اند. Ebrahim Moghadam and Abasnegad (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی و پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش استان کرمان با مدل های فازی و AHP پرداخته‌اند.

Abdolkhani (۲۰۱۳) در پژوهشی به مطالعه پهنه‌بندی رخداد خطر زلزله با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (AHP-FUZZY)؛ مطالعه موردی: استان خوزستان پرداخت. Salehi (۲۰۱۷)، در پایان‌نامه خود ارزیابی طیفی خطر زلزله برای شهرهای مهم استان خوزستان را بررسی کرد. Hamidavifard (۲۰۱۹)، لرزه زمین ساخت ساختارهای فعال شهر اهواز و مناطق اطراف بر اساس مطالعات نوزمین ساخت را در پایان‌نامه خود مورد بررسی قرار داد. در پژوهشی Eskandari و همکاران (۲۰۰۸)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان خوزستان به روش احتمالاتی را مورد بررسی قرار دادند و نشان داد با استفاده از این روش، شهرستان‌های استان خوزستان در چه وضعیتی قرار دارند. Talebi و Nazem Mahalleh (۲۰۱۳)، به برآورد خطر زمین‌لرزه و پهنه‌بندی لرزه‌ای استان خراسان رضوی و شمالی به روش احتمالاتی در گستره خراسان جنوبی پرداختند و شهرهای با پتانسیل بالا را مشخص نمودند. Mousavi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به ارزیابی خطر زمین‌لرزه در حوزه‌ی شهری ایزده با استفاده از مدل چندمعیاری WLC و AHP در محیط GIS پرداخته است. Eydivandi و همکاران (۲۰۱۹) در

زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر استان خوزستان استفاده شده است. همچنین روش‌های مذکور در شناسایی مناطق لرزه‌خیزی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در ارتباط با موضوع شناخت لرزه‌خیزی در سطح جهان و کشور، تا کنون پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. در حوزه‌ی استان خوزستان مطالعاتی در مورد شهرها و گسل‌های استان صورت گرفته است اما در مورد کل استان خوزستان پژوهش‌های کمی انجام شده است. استان خوزستان با قرار گرفتن در جنوب‌غربی ایران و همچنین مستقر بودن در بخش زاگرس دارای پتانسیل لرزه‌خیزی می‌باشد که در این مطالعه به آن پرداخته خواهد شد. هدف از این پژوهش آن است که با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه‌ی پشتیبان تصمیم جی‌آی‌اس (GIS)، پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای استان خوزستان انجام شود و نواحی با خطر بالا تا کم خطر را در توسعه‌ی آینده‌ی استان خوزستان مشخص نماید.

پیشینه پژوهش

درباره تحلیل مخاطرات، آثار و خسارات‌های ناشی از آن، مطالعات متعددی انجام گرفته است. تا آنجا که دهه ۱۹۹۰ میلادی را دهه بین‌المللی بررسی و کاهش مصیبت حوادث طبیعی نام‌گذاری نمودند و هدف از این دهه را بررسی روش‌های کاهش زیان‌های جانی، مالی و جلوگیری از تنش‌های اقتصادی و اجتماعی ناشی از مخاطرات طبیعی اعلام کردند (Smith, 2013). آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (۲۰۰۰)، در پژوهشی به پیش‌بینی اثر وقوع یک زلزله احتمالی در کلان‌شهر تهران پرداخت و به این نتیجه رسید که حدود ۲۸۳ هزار نفر در اثر وقوع این زمین‌لرزه کشته خواهند شد. همچنین مجموع خسارات ناشی از زلزله (مجموع هزینه‌های واکنش اضطراری و بازسازی) رقمی معادل ۱۹۲۶ میلیون دلار برآورد شده است. Kundak (۲۰۰۴)، به بررسی و ارزیابی تأثیر یک زلزله ۷/۷ ریشتری در استانبول ترکیه پرداخته و نتایج وی گویای آن است که مجموع خسارات برآورد شده بر اثر این زلزله، حدود ۳۰ میلیارد دلار است که حدود ۲۰ میلیارد دلار آن به علت تخریب واحدهای مسکونی و سازه‌ای خواهد بود. Cavallo و Becerra (۲۰۱۰) به تحلیل و ارزیابی ابعاد و خسارات ناشی از زلزله ژانویه ۲۰۱۰ هایتی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق ایشان حاکی از وقوع زلزله و مرگ و میر بیش از ۲۵۰ هزار نفر از ساکنان هایتی است (Cavallo and Becerra, 2010). همچنین، Hashemi و Alesheikh (۲۰۱۱)، نیز به ارزیابی خسارت‌های زمین‌لرزه با استفاده از مطالعات مبتنی بر GIS

مقاله‌ای به شناسایی ارزیابی خطر زلزله زرين شهر با استفاده از GIS پرداخته است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (زمین‌شناسی ناحیه-ای)

لرزه زمین‌ساخت زاگرس

از نظر نو زمین‌ساختی، زاگرس چین‌خورده، در اثر حرکت رو به شمال صفحه عربی و برخورد آن با صفحه ایران، در راستای شمال خاوری-جنوب باختری فشرده می‌شود. به همین دلیل، در حال حاضر زاگرس تحت تأثیر دگر شکلی، ناشی از فشارهای زمین‌ساختی با روند NNE-SSW، فرجام همگرایی و برخورد قاره‌ای، قرار دارد (Stocklin, 1974).

روند دگرشکلی‌ها هم‌راستای ساختارها و شکستگی‌های آلپی، (NW-SE) و پیش از آلپی (N-S)، هستند. از این رو، عملکرد مشترک این دو، بر روی هم، باعث برآیند نوزمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی و در نتیجه لرزه‌خیزی کنونی زاگرس می‌شود که عموم بزرگی کمتر از ۷ دارند و به ندرت بزرگی زمین‌لرزه‌ها از آن بالاتر و معمولاً کم‌ژرفا هستند (Berberian and King, 1981). مقاطع

توزیع زمین‌لرزه‌ها در عمق نشان می‌دهد که اگر چه ژرفای برخی زمین‌لرزه‌ها تا حدود ۶۰ کیلومتر می‌رسد، ولی بیشتر آنها در ژرفای حدود ۳۰ کیلومتر متمرکزند. به گونه‌ای که مجموعه کانون‌های زمین‌لرزه به تقریب در درون منشوری در ازای حدود ۱۵۰۰ و پهنای حدود ۱۵۰ و ژرفای ۶۰ کیلومتر، روند شمال باختری-جنوب خاوری، قرار دارند. شیب صفحه زیرین منشور حدود ۱۰ تا ۲۰ درجه به سوی شمال خاور است. بدین‌سان دیده می‌شود که، بیشتر زمین‌لرزه‌های زاگرس در زیر رسوبات چین‌خورده رخ داده و زمین‌لرزه‌های ژرف‌تر و مربوط به زیر پوسته قاره‌ای به تقریب وجود ندارند (Agard et al., 2005). گفتنی است که بیشتر

زمین‌لرزه‌های زاگرس بدون گسلش سطحی هستند. این امر می‌تواند به دلیل وجود لایه‌های نمکی سری هرمرز در مرز پی‌سنگ و پوشش رسوبی رویی باشد که ضمن تعدیل انرژی‌ها از رسیدن همه آنها به سطح زمین جلوگیری می‌کند. افزون بر این، وجود رسوبات گچی-انیدریتی وابسته به سازندهای دالان (پرمین)، دشتک و کنگان (تریاس)، هیت و گوتنیا (ژوراسیک بالا)، به ویژه سازند تخییری گچساران (میوسن)، از عوامل مؤثر در کاهش انرژی و جلوگیری از گسلش سطحی هستند. بنابراین، برای داشتن گسلش سطحی به یکی از دو عامل، زمین‌لرزه‌های کم‌ژرفا و یا زمین‌لرزه با بزرگی بیشتر از ۷ نیاز است (Mohajjel and Fergusson, 2014). اگرچه

همه پهنه زاگرس چین‌خورده، در یک رژیم لرزه زمین‌ساختی پیوسته قرار دارد، ولی مطالعه پراکندگی کانون زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که تمرکز کانون‌ها در همه جا یکسان نیست و در بعضی نواحی، ویژگی لرزه‌زمین‌ساختی از اهمیت بیشتری برخوردار است. به باور Berberian (1976) پهنه‌ها و یا نواحی لرزه‌خیز زیر را می‌توان در زاگرس چین‌خورده شناسایی کرد.

«زون لرزه‌خیز بندرعباس-جیرفت» این زون از بندرعباس آغاز می‌شود و تا نزدیکی جیرفت، در ایران مرکزی، ادامه می‌یابد. در این ناحیه زمین‌لرزه‌ها از نوع متوسط تا ژرفانند (۳۴ تا ۱۵۰ کیلومتر) و بزرگی آنها از ۳/۵ تا ۷ در تغییر است. نیاز به یادآوری است که این روند با هیچ یک از خطواره‌های سطحی همپوشانی ندارد، ولی ممکن است نشانگر بلندی عمان (Oman High) باشد.

«زون لرزه‌خیز گهگم-حاجی‌آباد» این زون از بندرعباس آغاز می‌شود و پس از گذر از زاگرس چین‌خورده و زاگرس رورانده در ناحیه حاجی‌آباد به راندگی اصلی زاگرس می‌رسد. ژرفای زمین‌لرزه‌های این زون از نوع متوسط (۳۴ تا ۱۰۰ کیلومتر) و بزرگی آنها از ۳/۵ تا ۶ است. این زون لرزه‌خیز با هیچ یک از گسل‌های سطحی شناخته شده منطبق نیست.

در «شمال خاوری داراب و یا جنوب خاوری نیریز» کانون‌هایی پراکنده در راندگی اصلی زاگرس وجود دارند، ولی از این ناحیه تا شمال خط کازرون، در زاگرس مرتفع، در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۶ هیچ کانون زمین‌لرزه‌ای ثبت نشده و لذا این ناحیه را زون نبود لرزه‌ای نیریز نامیده‌اند.

در «جنوب خاوری گسل کازرون» چندین زون لرزه‌خیز وجود دارند که عمده‌ترین آن‌ها عبارتند از: لار، بستک، قیر و طاهری.

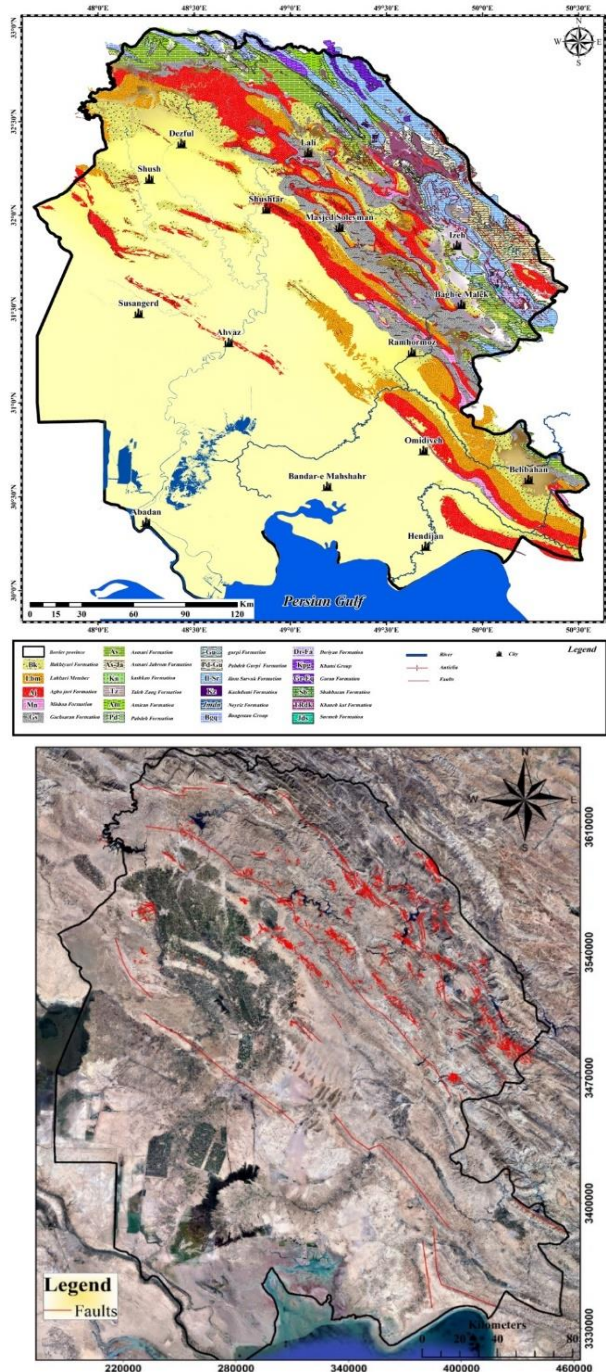
در «شمال خاوری گسل کازرون» زون‌های لرزه‌خیز عمده عبارتند از میشان و گچساران.

«زون لرزه‌خیز صحنه-کنگاور» در محل به‌هم پیوستن زاگرس رورانده و پهنه سنندج-سیرجان و در بخش شمال باختری زاگرس قرار دارد. در این زون که از پهنه رورانده تا ایران مرکزی ادامه دارد، زمین‌لرزه‌ها بزرگ و ویرانگر بوده‌اند.

رشته کوه زاگرس که در اثر برخورد حاشیه قاره‌های ایران و عربستان در طی کرتاسه پسین و تکامل پس از آن شکل گرفته، تنش فشارشی بالایی را تحمل می‌کند (Alavi, 2004). با توجه به حرکت رو به شمال صفحه عربی و برخورد آن با صفحه ایران، فشارش ایجاد شده در راستای شمال خاوری-جنوب باختری است. دگرشکلی‌ها، هم‌راستای ساختارها و شکستگی‌های آلپی و پیش آلپی هستند. از این رو عملکرد مشترک این دو دگرشکلی بر روی

داده است که گسل‌های فشاری با امتداد شمال باختر-جنوب خاور نوع چیره گسل‌های موجود در ناحیه هستند. بر پایه مطالعات لرزه زمین ساخت و نقشه زمین شناسی استان خوزستان (شکل ۱)، فعال ترین گسل‌های استان، خوزستان عبارتند از مافارون، اندکان، مرده فل، لهبری، دزفول، رامهرمز، شمال بهبهان، آغاچری، مارون، رگه سفید و اهواز.

هم باعث برآیند نوزمین ساختی و لرزه زمین ساختی و در نتیجه لرزه خیزی کنونی زاگرس است. ویژگی های زمین ساختی رشته-کوه زاگرس و دشت خوزستان سبب فعالیت تعداد زیادی گسل شده که منشأ لرزه های زمین در این منطقه هستند (Alavi, 1994). مطالعه گسل های استان خوزستان نشان



شکل ۱- نقشه زمین شناسی و موقعیت گسل های استان خوزستان بر روی تصویر ماهواره ای.

Fig. 1. Geological map and location of faults in Khuzestan Province on satellite image.

مواد و روش‌ها

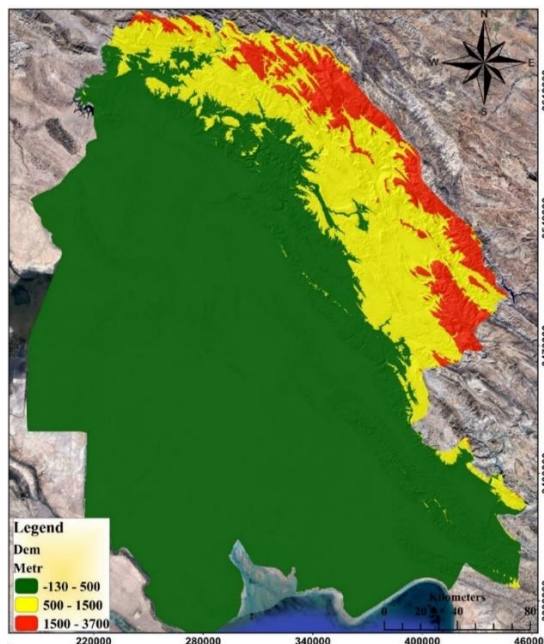
در این پژوهش برای به دست آوردن میزان ریسک و پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای استان خوزستان از مدل‌سازی رستری در محیط نرم‌افزاری و توابع سلسله‌مراتبی برای بدست آوردن نقشه پهنه‌بندی اقدام شده است. با توجه به ماهیت موضوع، روش تحقیق به صورت استنادی، است. داده‌های «توصیفی-تحلیلی» تجربی، مشاهدات میدانی و مورد نیاز جمع‌آوری شدند. در این پژوهش لایه‌های مورد بررسی برای شناسایی خطر لرزه‌ای استان خوزستان توسط کارشناسان و متخصصان علوم زمین (تکتونیک و لرزه‌شناسی) مورد بررسی قرار گرفت و اولویت و وزن تمامی لایه‌ها توسط آن‌ها مشخص شد و نهایتاً در نرم‌افزار GIS تلفیق لایه‌ها صورت گرفت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه انجام شد.

دلیل انتخاب معیار و زیرمعیارها

الف) تاثیر توپوگرافی بر زمین لرزه

اثرات توپوگرافی می‌تواند طبیعت لرزش زمین را در طول زمین-لرزه تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه خوشبختانه اثر توپوگرافی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای زمین در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و در دستور کار راهنما و آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای گنجانده شده، ولی همچنان ابعادی از تأثیر این عامل پیچیده بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه،

نیاز به مطالعه و بررسی دقیق‌تر دارد تا کمتر شاهد خسارات پیش‌بینی نشده ناشی از عامل توپوگرافی در زلزله‌ها و یا هرگونه حرکات لرزه‌ای زمین باشیم. در یک حرکت لرزه‌ای، توپوگرافی محیط اطراف سبب گیر افتادن و انعکاس امواج لرزه‌ای در بین عوارض توپوگرافی می‌شود و این پدیده موجب تشدید بیشتر حرکت لرزه‌ای در بین نامنظمی‌های توپوگرافی می‌شود. اگرچه عامل توپوگرافی محیط اطراف کمتر مورد توجه قرار گرفته، اما تأثیر آن در تشدید پاسخ لرزه‌ای زمین قابل توجه است. مقایسه نتایج نشان داد که میزان تشدید پاسخ لرزه‌ای برای یک عارضه‌ی توپوگرافی، زمانی که ناهموازی بین منبع و این عارضه‌ی توپوگرافی وجود نداشته باشد، بسیار متفاوت است در مقایسه با حالتی که بین منبع لرزه‌زا و عارضه‌ی توپوگرافی، ناهموازی‌های دیگری هم وجود داشته باشد. گیر افتادن امواج لرزه‌ای بین سطوح عوارض توپوگرافی، موجب انعکاس‌های بیشتر این امواج در امتداد شیب‌های این عوارض می‌شود و این پدیده سبب تشدید بیشتر حرکت لرزه‌ای در چنین ساختگاه‌هایی می‌شود (Matsuoka, 1995). لایه‌ی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) استان خوزستان مطابق شکل ۲ تهیه شد و به سه کلاس کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد.



شکل ۲- نقشه مدل ارتفاعی دیجیتالی منطقه مورد مطالعه (درجه).

Fig. 2. Digital elevation model (DEM) map of the study area (degree).

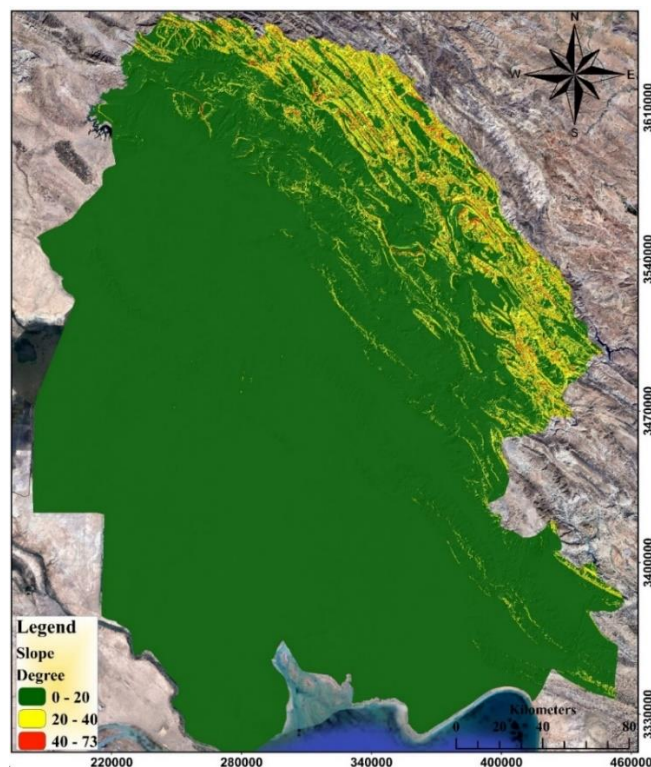
ب) تاثیر شیب زمین بر زلزله

خسارت‌های مربوط به شکست پی تحت شرایط لرزه‌ای، به دلیل اینکه تمام بناها در نهایت از طریق پی روی خاک قرار می‌گیرد بسیار متداول می‌باشد. در شرایطی که با گسترش روز افزون ساخت و ساز مواجه‌ایم و این نکته که بسیاری از مناطق کوهستانی هستند در مواردی نیاز به احداث سازه‌ها و شریان‌ها در نزدیکی شیب زمین یا

روی شیب می‌باشد، که این مسئله اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. به همین جهت تخمین ظرفیت باربری پی‌های سطحی روی شیب زمین در لحظه وقوع زلزله، موضوع بسیاری از تحقیقات دهه اخیر در حوزه مکانیک خاک و پی بوده است. حال با توجه به لرزه‌خیزی و کوهستانی بودن کشور ایران و حاکم بودن نیروی جانبی لرزه‌ای ناشی از زلزله در طراحی سازه‌ها و احتمال قرارگیری سازه‌ها روی شیب، مطالعه پاسخ دینامیکی پی‌ها تحت اثر نیروی زلزله در

وقوع زلزله‌های شدید را در شعاع تا ۵۰ کیلومتری را بررسی می‌کند. همه ما می‌دانیم که مناطق بلند بالا (فعال یا غیر فعال لرزه‌ای) باید به دلیل فعالیت‌های لرزه‌ای گذشته، که ممکن است در آینده تکرار شود، تشکیل شده باشد. با استفاده از نقشه شیب زمین اطلاعات ASER ساخته شده است که نشان می‌دهد تنوع شیب در منطقه مناطق اطراف آن است. محاسبات دامنه‌های توپوگرافی در منطقه کوهستانی با استفاده از GIS و نرم افزارهای پردازش تصویر رایج است. نقشه شیب زمین با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتالی با وضوح ۳۰ × ۳۰ Aster (DEM) تهیه شده است. در مدل پیدایش، شیب زمین به و به سه کلاس کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد (Jenks, 1967) (شکل ۳).

این حالت، از مسائل مهم طراحی مقاوم در برابر زلزله و مسایل اندرکنشی خاک و سازه است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر اثر تغییر پارامترهای مختلف خاک زیر پی، زلزله و روسازه و چگونگی تأثیر این پارامترها باعث طرح راهکاری مناسب برای طراحی بهینه پی، بهسازی و افزایش ظرفیت باربری خاک خواهد شد (Jiriaei, Sharahi and Mousavi Orimi, 2015) زمین لرزه‌ها ممکن است در همه جا در جریان یا مناطق بالای توپوگرافی اتفاق بیفتند، اما ما همگی موافقیم که مناطق کوه‌های تپه‌ای دارای پتانسیل بیشتری برای وقوع زلزله هستند، به خصوص اگر منطقه فعالیت لرزه‌ای داشته باشد. در منطقه خاورمیانه، توپوگرافی تندتر اغلب نشان دهنده فعالیت لرزه‌ای منطقه است. مدل پیدایش، احتمال



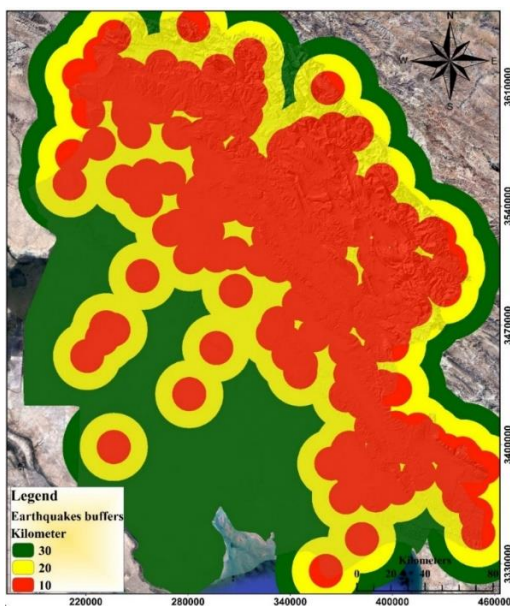
شکل ۳- نقشه شیب زمین (درجه) استان خوزستان.

Fig. 3. Land slope map (degree) of Khuzestan Province.

۷ تا ۶ در مناطق شهری بسیار فاجعه بار هستند. با توجه به وضعیت خاص کشور ایران از نظر زمین‌ساختی می‌توان ادعا کرد که همه‌ی گسل‌های موجود در کشور زلزله‌زا هستند. به طوری که، همه ساله شاهد خسارات و تلفات مالی و جانی، به خصوص در نواحی روستایی هستیم. در مدل پیشنهادی، نقشه‌های تراکم زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر استان خوزستان بر اساس کیلومتر مطابق شکل ۴، فاصله از زمین‌لرزه‌ها (بافر) ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتر مطابق شکل ۵ و نقشه درونیابی بزرگی زمین‌لرزه‌ها با مقیاس ریشتر و روش IDW تهیه شد (شکل ۶). سپس این لایه‌ها به سه کلاس کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند.

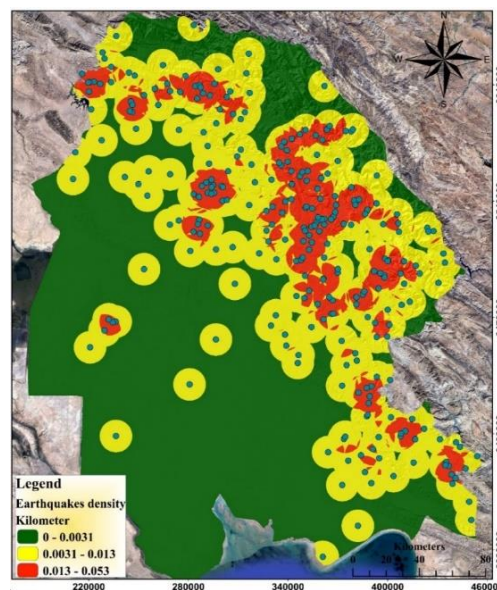
ج) توزیع مرکز زلزله

فعالیت لرزه‌ای و همچنین توزیع تراکم مرکز زلزله در هر واحد را نشان می‌دهد. تراکم مرکز زلزله احتمال وقوع زلزله شدید در آینده را نشان می‌دهد (Yueh et al., 2002). فاصله تا مرکز زلزله‌های مهم همچنین یک عامل کلیدی برای ارزیابی خطر در یک منطقه خاص است. ما تصور می‌کنیم که زمین‌لرزه قدرت خود را تا در مرکز شعاع ۵۰ کیلومتری از دست می‌دهد. وقوع زلزله‌هایی با بزرگی کمتر از ۵ در مقیاس ریشتر برای ساختمان‌ها خطری در بر ندارد و حتی ساختمان‌های سست روستایی هم کمتر دچار آسیب می‌شوند؛ در حالی که زلزله‌هایی با بزرگی ۶ تا ۵ در مناطق روستایی و بزرگی



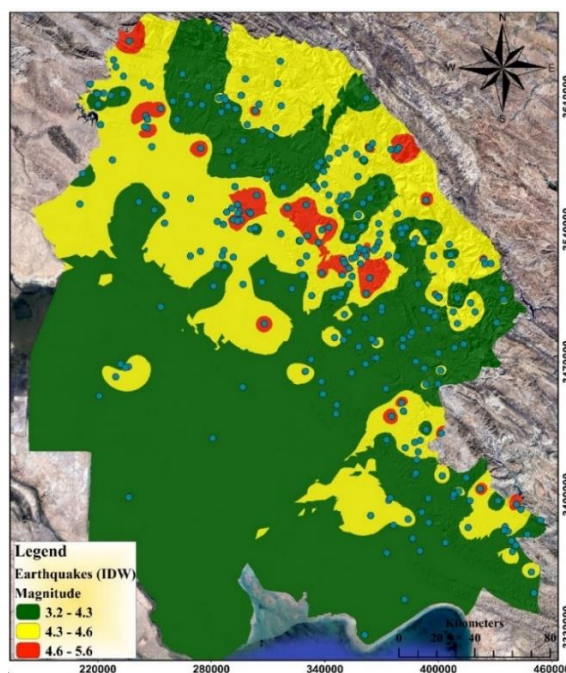
شکل ۵- نقشه فاصله از زمین لرزه‌های ۲۰ سال اخیر (کیلومتر) منطقه مورد مطالعه.

Fig. 5. Distance (buffer) map of earthquakes of the last 20 years (km) of the study area.



شکل ۴- نقشه چگالی زمین لرزه‌های ۲۰ سال اخیر (کیلومتر) منطقه مورد مطالعه.

Fig. 4. Earthquake density map of the last 20 years (km) of the study area.



شکل ۶- نقشه درونیابی شده زمین لرزه‌های ۲۰ سال اخیر (ریشر) منطقه مورد مطالعه.

Fig. 6. Interpolation (IDW) map of earthquakes of the last 20 years (Richter) of the study area.

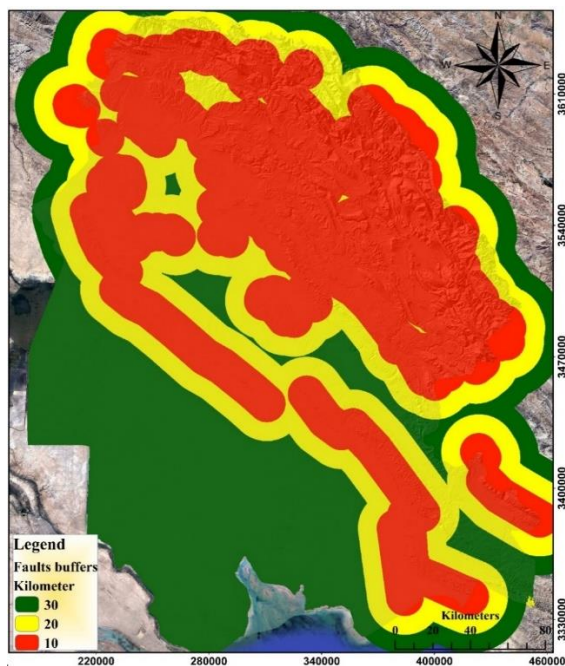
در واحد سطح و فاصله تا گسل‌های اصلی فعال با استفاده از GIS محاسبه می‌شود.

عامل طول گسل در تحلیل وقوع زمین لرزه به این صورت عمل می‌کند که هر چه طول گسل بیشتر باشد، خطر رخداد زمین لرزه‌های بزرگ در آن بیشتر است (Singh et al., 2001). گسل‌های شمال تا شمال شرق حوزه با درازای بیش از ۱۵ کیلومتر در زمره

د) تأثیر گسل‌ها بر زمین لرزه‌ها

معمولاً شکستگی‌ها و گسل‌های فعال به طور گسترده برای مطالعه زمین لرزه‌ها استفاده می‌شود چرا که عامل هر زمین لرزه‌ای می‌تواند یک گسل باشد که جابه‌جایی آن سبب پدید آمدن زمین لرزه می‌شود (Sahoo et al., 2000). توزیع تراکم گسل‌ها

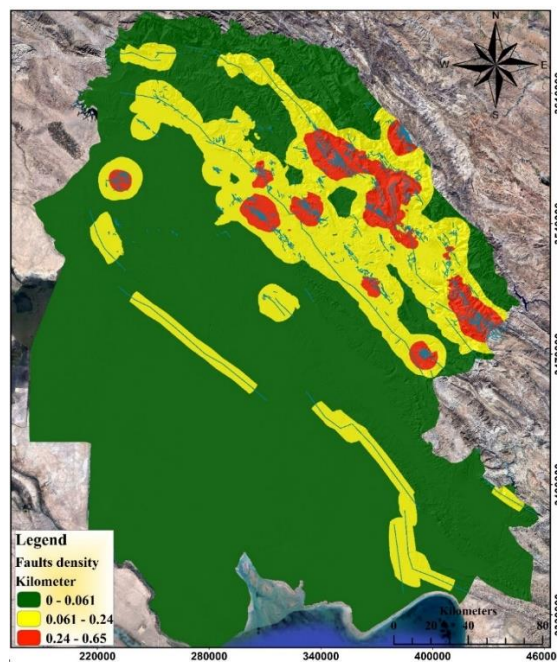
این مطالعه از نقشه تراکم گسل‌ها بر اساس کیلومتر (شکل ۷) و همچنین نقشه فاصله از گسل‌ها (بافر) ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتری (شکل ۸) برای مدل‌سازی لرزه‌خیزی استان خوزستان استفاده شده است. کلاس‌بندی لایه تراکم گسل‌ها به ترتیب به سه کلاس و از تراکم کم به زیاد (یک تا سه) انجام شد. همچنین کلاس‌بندی لایه فاصله از گسل‌ها (بافر) به ترتیب از فاصله کم به زیاد به سه کلاس تقسیم‌بندی شد یعنی هرچه فاصله بافر بیشتر شود به آن کلاس کم‌تری تعلق خواهد گرفت.



شکل ۸- نقشه فاصله از گسل‌های (کیلومتر) منطقه مورد مطالعه.

Fig. 8. Distance (buffer) map of faults (km) of the study area.

گسل‌های اصلی هستند، بنابراین مناطق شمال تا شمال شرق حوزه‌ی مناطق با خطر بالا هستند. عامل فاصله از گسل در وقوع زمین‌لرزه: بین گسل و زلزله رابطه‌ی نزدیکی برقرار است و قسمت اعظم زلزله‌ها بر روی گسل‌ها متمرکزند. تجربیات زلزله‌های گذشته و اخیر نشان می‌دهد که جنبش زمین در نزدیک گسل با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل حرکات زمین شدیداً تحت تأثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین قرار دارد. به همین منظور در



شکل ۷- نقشه چگالی گسل‌های (کیلومتر) منطقه مورد مطالعه.

Fig. 7. Fault density map (km) of the study area.

نتایج و بحث

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند شامل سه گام اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای لایه‌ها و زیرلایه‌ها و تلفیق نهایی بر اساس وزن‌های رتبه‌ای اختصاص داده شده می‌باشد (Asadi et al., 2016). یک ساختار سلسله مراتبی به صورت کلی دارای سه سطح مختلف می‌باشد که سطح نخست مربوط به هدف مطالعه، سطح میانی مربوط به لایه‌ها و زیرلایه‌ها و سطح نهایی مربوط به جایگزین‌ها می‌باشد (Pazand and Hezarkhani, 2015). با استفاده از روش AHP، پارامترهای مربوط به سطح میانی (لایه‌ها و زیرلایه‌ها) به صورت مقایسه زوجی و با استفاده از جدول استاندارد پیشنهاد داده شده توسط Saaty (۱۹۹۰) (جدول ۱) از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و با توجه به نوع هدف اکتشافی رتبه‌بندی می‌شوند. ماتریس مقایسه زوجی برای n لایه مختلف به صورت (رابطه ۱) تعریف می‌شود:

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از روش‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) می‌باشد که طی آن به لایه‌ها و زیرلایه‌های مختلف براساس قضاوت کارشناسانه و به صورت مقایسات زوجی، اوزان مناسب اختصاص می‌یابد (Satty, 2016). بر مبنای این روش، تمامی لایه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی بر اساس میزان اهمیتشان نسبت به سایر لایه‌ها در نوع خاصی از کانه‌زایی، لرزه‌خیزی و ... وزن‌دهی می‌شوند و در نهایت تلفیق نهایی لایه‌ها صورت می‌گیرد (Ghezlbash et al., 2018). تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولین بار توسط Saaty (۱۹۹۰) پیشنهاد شد و به صورت یک فرآیند سلسله مراتبی، بر اساس مقایسه زوجی اهمیت لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Saaty, 1990). این

(۱) شود (Saaty, 1990). در نهایت مقادیر وزنی مناسب لایه‌ها و زیرلایه‌ها طبق (رابطه ۲) محاسبه می‌گردد که در آن W بردار وزنی و بالاترین مقدار ویژه ماتریس می‌باشد.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}, a_{ij} > 0; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ii} = 1 \forall i.$$

$$AW = \lambda_{\max} \cdot W \quad (2)$$

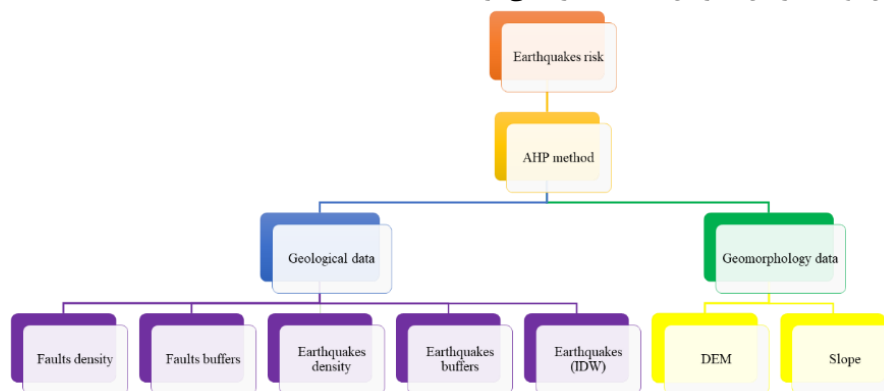
جدول ۱- مقیاس پایه‌ای برای مقایسات زوجی با استفاده از روش AHP (Saaty, 1990).

Table 1. Nine-point intensity of importance scale and its description (Saaty, 1990).

Intensity of importance	Definition
9	Extreme importance
8	Very strong to stream
7	Very strong importance
6	Strongly to very strong
5	Strong importance
4	Moderately to strong
3	Moderate importance
2	Equally to moderately
1	Equal importance

اساس نظرات متخصصین علوم زمین و با استفاده از جدول شاخص وزن‌دهی (Saaty, 1994) به صورت مقایسه زوجی وزن‌دهی شدند و در نهایت با استفاده از روش AHP، مقدار اوزان مناسب برای هر یک از معیارها طبق جدول ۲ محاسبه گردید. طبق این روش، بیشترین وزن با مقدار ۳۹/۸۴٪ به لایه چگالی گسل‌ها اختصاص داده شده است. پس از آن به ترتیب لایه‌های فاصله تا گسل‌ها با ۲۴/۶۷٪، چگالی زمین‌لرزه‌ها با ۱۵/۰۴٪، فاصله از زمین‌لرزه‌ها با ۹/۳۱٪، درون‌یابی بزرگی زمین‌لرزه‌های ۲۰٪ سال اخیر ۵/۶۸٪، شیب زمین با ۳/۱۹٪ و در نهایت مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با وزن ۲/۲۷٪ به عنوان معیارهای مهم در این روش انتخاب شد. در این روش لایه‌های اطلاعاتی مختلف با یکدیگر تلفیق شده و در نهایت نقشه لرزه‌خیزی استان خوزستان مطابق (شکل ۹) تولید شد.

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) دارای سه بخش اصلی می‌باشد (Saaty, 2016): (۱) تعیین لایه‌ها برای استفاده در مدل-سازی، (۲) تعیین وزن لایه‌ها و زیرلایه‌ها با استفاده از روش AHP، (۳) تلفیق نهایی لایه‌ها با استفاده از اوزان محاسبه شده توسط روش AHP. پس از تعیین معیارهای مدل‌سازی مختلف، که شامل لایه-های چگالی گسل‌ها، فاصله تا گسل‌ها، شیب زمین، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، چگالی زمین‌لرزه‌ها، فاصله تا زمین‌لرزه‌ها و درون-یابی بزرگی زمین‌لرزه‌های منطقه می‌باشد، در ابتدا یک ماتریس مقایسه زوجی برای هفت لایه اصلی نام برده شده تشکیل شد (شکل ۹). علت انتخاب این هفت لایه برای پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای استان خوزستان این است که این لایه‌ها طبق نظر کارشناسان، از جمله مهم‌ترین معیارها برای بررسی خطر لرزه‌ای بشمار می‌روند و از طرفی این لایه‌ها قابل دسترس بودند. در این ماتریس، هفت معیار اصلی بر



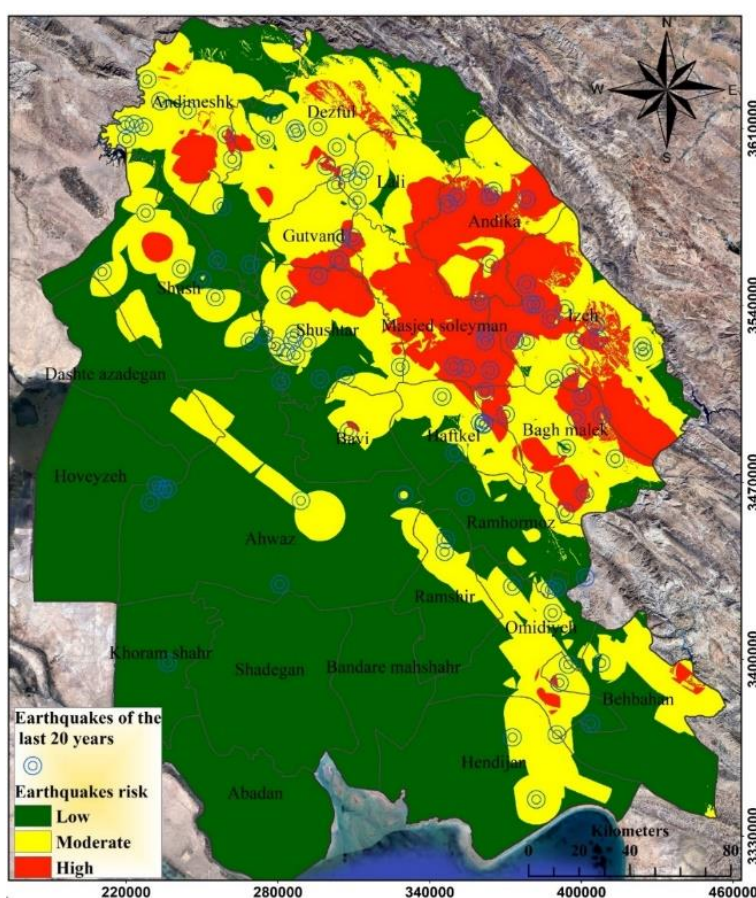
شکل ۹- درخت سلسله مراتبی برای تولید نقشه خطر زلزله در استان خوزستان.

Fig. 9. Hierarchical tree for producing earthquake hazard map in Khuzestan province.

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی لایه‌های اکتشافی و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

Table 2. Matrix comparison of layers and weights calculated by AHP method.

Layers	Faults density	Faults buffer	Earthquakes density	Earthquakes buffer	Earthquakes (IDW)	Slope	DEM	Weighs
Faults density	1	3	4	5	6	8	9	39.84%
Faults buffer	0.333	1	3	4	5	6	8	24.67%
Earthquakes density	0.25	0.333	1	3	4	5	6	15.04%
Earthquakes buffer	0.2	0.25	0.333	1	3	4	5	9.31%
Earthquakes (IDW)	0.167	0.2	0.25	0.333	1	3	4	5.68%
Slope	0.125	0.167	0.2	0.25	0.333	1	2	3.19%
DEM	0.111	0.125	0.167	0.2	0.25	0.333	1	2.27%



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان خوزستان.

Fig. 10. Earthquake risk zoning map in Khuzestan Province.

نتیجه‌گیری

نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای استان خوزستان، این استان را به سه طبقه حساس نسبی تقسیم می‌کند (جدول ۳). شهرهای با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا، متوسط و پایین. شهرستان‌های واقع شده در شرق و شمال شرق استان خوزستان بیشترین پتانسیل را برای وقوع زمین‌لرزه از خود نشان دادند. شهرهایی مثل مسجد سلیمان، ایذه، اندیکا و ... در معرض جدی خطر وقوع زلزله بشمار می‌روند.

شهرستان‌هایی مثل دزفول، لالی، شوش و ... پتانسیل متوسطی برای وقوع زمین‌لرزه از خود نشان دادند اما نباید چنین تصور کرد که از انجام پروژه‌های عمرانی برای مقابله با زمین‌لرزه در این شهرها غافل شد. شهرستان‌هایی مثل اهواز، آبادان، شادگان و ... پتانسیل لرزه‌خیزی بسیار پایینی را از خود نشان دادند. می‌توان علت پتانسیل بالای شرق و شمال شرقی استان خوزستان را چنین استنباط کرد که اکثر گسل‌های فعال و به‌طور کلی تراکم گسل‌های استان خوزستان

موقعیت زمین‌لرزه‌های رخ داده در ۱۰ سال اخیر استان خوزستان استفاده شد. موقعیت زمین‌لرزه‌ها نشان داد بیشتر زمین‌لرزه‌ها در قسمت‌های شرق و شمال‌شرقی استان خوزستان رخ داده است. همچنین موقعیت تمام زمین‌لرزه‌های ۱۰ سال اخیر استان خوزستان همپوشانی بالایی با مناطق با ریسک لرزه‌ای بالا از خود نشان داد و از طرفی (طبق شکل ۱۰) نشان داد حدود ۱۹٪ از زمین‌لرزه‌های رخ داده در ۱۰ سال اخیر استان خوزستان بر روی نقاط بدون پتانسیل، ۴۲٪ بر روی مناطق با پتانسیل متوسط و ۳۹٪ زمین‌لرزه‌ها بر روی مناطق با خطر بالا رخ داده‌اند.

در بخش شرقی و شمال‌شرقی این استان بیشتر بوده و همانگونه که مشخص است گسل‌ها مهم‌ترین چشمه‌های لرزشی زمین بشمار می‌روند که در نتیجه فشار وارده بر پوسته زمین ایجاد می‌شوند و میزان لرزه‌خیزی زمین نیز تا حدود زیادی از تعداد و میزان فعال بودن گسل‌ها تأثیر می‌پذیرد. دلیل دیگر این امر را می‌توان به فعالیت‌های انسانی نظیر سدسازی و استخراج از سفره‌های آب زیرزمینی در مناطقی که گسل فعال دارند دانست که می‌تواند موجب تحریک رخداد زمین‌لرزه شود. در این باره افزایش لرزه‌خیزی سال‌های اخیر در منطقه دزفول، شوشتر و اندیمشک را می‌توان تا حدودی متأثر از این فعالیت‌ها دانست. در پایان برای صحت‌سنجی این پژوهش از

جدول ۳- رده‌بندی شهرهای استان خوزستان از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لرزه.

Table 3. Classification of cities in Khuzestan Province in terms of earthquake potential.

Low earthquake potential	Moderate earthquake potential	High earthquake potential
Ahwaz, Ramhormoz, Dashte -e-Azadegan, Mahshahr, Hoveyzeh, Shadegan, Khoramshahr, Abadan and Ramshir	Gutvand, Dezful, Lali, Haftkel, Shush, Behbahan, Hendijan and Omidiyeh	Masjed soleyman, Andika, Andimeshk Shushtar, Izeh and Bagh malek

منابع

- Abdolkhani, Z., 2013. Earthquake hazard zoning study using fuzzy multi-criteria decision making (AHP FUZZY) methods; Case study: Khuzestan province. M.Sc. Azad Islamic University of Yazd.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94, 401-419.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1-20.
- Asadi, H.H., Sansoleimani, A., Fatehi, M., Carranza, E.J.M., 2016. An AHP-TOPSIS predictive model for district-scale mapping of porphyry Cu-Au potential: a case study from Salafchegan area (central Iran). *Natural Resources Research* 25, 417-429.
- Berberian, M., 1976. Contribution to the Seismotectonics of Iran.
- Berberian, M., 1995. Master "blind" thrust faults hidden under the zagros folds: active basement tectonic and surface morphotectonics. *Tectono-physics* 241, 193-224.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Cavallo, P., Becrerra, A., 2010. Estimating the Direct Economic Damages of the Earthquake in Haiti. *Economic Journal* 120, 298-312.
- Chan, C.S., Nozu, K., Cheung, T.O.L., 2019. Tourism and natural disaster management process: perception of tourism stakeholders in the case of Kumamoto earthquake in Japan. *Current Issues in Tourism*, 1-22.
- Dou, J., Yunus, A. P., Tien Bui, D., Sahana, M., Chen, C.W., Zhu, Z., Thai Pham, B., 2019. Evaluating GIS-based multiple statistical models and data mining for earthquake and rainfall-induced landslide susceptibility using the LiDAR DEM. *Remote Sensing* 11, p.638.
- Ebrahim Moghdam, F., Abasnegad, A. 2017. Landslide risk assessment and zoning with fuzzy and AHP models, 10(37), 25-44.
- Eskandari, M., Rezaei, M.R., Qitanchi, M.R., 2008. Earthquake Hazard Zoning in Khuzestan Province by Probabilistic Method. *Iranian Geophysical Conference Conference*, Volume 13.
- Eydivandi, A., Khosravi, Q., 2019. Zarrinshahr Earthquake Risk Assessment Using Geographic Information System (GIS). *Geography and Environmental Planning* 30, 55-74.

- Falcon, N. L., 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros Range. Geological Society of London, Special Publications, pp. 9-21.
- Hamidavifard, M., 2019. Tectonic earthquake Active structures of Ahvaz city and surrounding areas based on new tectonic studies. M.Sc. Tehran Payame Noor University.
- Hashemi, M., Alesheikh, A.A., 2011. A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, 1607-1617.
- Jafari, M.A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2020. Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone. Advanced Applied Geology 10, 314-327.
- Jena, R., Pradhan, B., 2019. Earthquake Vulnerability Assessment using Expert-based Approach in GIS. In 2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), pp. 53-56.
- Jenks, G.F., 1967. The data model concept in statistical mapping. International Yearbook of Cartography 7, 186-190.
- Jiriaei Sharahi, M., Mousavi Orimi, M., 2015. Determination of seismic load coefficient of surface foundations under inclined load using Kutter equation. Quarterly Journal of Earthquake Science and Engineering 2, 37-49.
- Kundak, S., 2004. Economic Loss Estimation for Earthquake Hazard in Istanbul. The European Congress of the European Regional Science Association, Porto, Portugal.
- Lyu, H.M., Shen, S.L., Yang, J., Zhou, A.N., 2020. Risk assessment of earthquake-triggered geohazards surrounding Wenchuan, China. Natural Hazards Review 21, 05020007.
- Matsuoka, M., 1995. GIS-based integrated seismic hazard mapping for a large metropolitan area. In Proc. Fifth International Conference on Seismic Zonation 2, 1334-1341.
- Mirzaei, N, Gao, M., Chen, Y., Wang, J., 1997. A uniform catalog of earthquakes for seismic hazard assessment in Iran, Acta Seismology Sinica 10, 713-726.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to cenozoic tectonics of the Zagros orogen in northwestern Iran, Tarbiat Modares University, Geology Review, 56, 263-287.
- Mousavi, S.M., Abedini, M., Esmeali, O.A., 2015. Evaluation Seismic hazard in Izeh urban catchment with using models, Multi-criteria: WLC and AHP in GIS.
- Najafi, A., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., 2014. Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 33, 142-154.
- Pazand, K., Hezarkhani, A., 2015. Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahrud area (NW, Iran). Earth Science Informatics 8, 207-220.
- Rahimi Shahid, M., Rahimi, N., 2017. Earthquake hazard zoning using Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS techniques (Case study: central part of the Semirrom city). New Findings in Applied Geology, 11(22), 109-118.
- Rundle, J.B., Luginbuhl, M., Khapikova, P., Turcotte, D.L., Donnellan, A., McKim, G., 2020. Nowcasting great global earthquake and tsunami sources. Pure and Applied Geophysics 177, 359-368.
- Saaty, T.L., 1990. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS publications.
- Saaty, T.L., 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process. Interfaces 24, 19-43.
- Saaty, T.L., 2016. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Multiple criteria decision analysis, Springer. New York, NY, pp. 363-419.
- Sahoo, P.K., Kumar, S., Singh, R.P., 2000. Neotectonic study of Ganga and Yamuna tear faults, NW Himalaya, using remote sensing and GIS. International Journal of Remote Sensing 21, 499-518.
- Salehi, Y., 2017. Spectral assessment of earthquake risk for important cities of Khuzestan province. M.Sc. Persian Gulf University.
- Singh, R.P., Bhoi, S., Sahoo, A. K., Raj, U., Ravindranath, S., 2001. Surface manifestations after the Gujarat earthquake. Current Science 81, 164-166.
- Smith, K., 2003. Natural hazards. Translated by Ebrahim Moghimi and Shapur Goodarzinejad, Tehran, Samat Publications.
- Smith, K., 2013. Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster. Routledge.

- Stocklin, J., 1974. Possible Ancient Continental Margins in Iran, In the Geology of Continental Margin, Edited by C.A.Burk and C.L.Dark. Springer, New York, 837-887.
- Talebi, A., Nezam Mahalleh, M., 2013. Earthquake hazard estimation and seismic zoning of Khorasan Razavi and North Khorasan provinces by probabilistic method, 2nd International Conference on Environmental Hazards, Tehran, Kharazmi University.
- Yueh, F.Y., Sharma, R.C., Singh, J.P., Zhang, H., Spencer, W.A., 2002. Evaluation of the potential of laser-induced breakdown spectroscopy for detection of trace element in liquid. Journal of the Air & Waste Management Association 52, 1307-1315.
- Zhang, N., Zhou, K., Du, X., 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. Journal of African Earth Sciences 128, 84-96.

