

## استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه استان کرمان

پیام اخلاص پور<sup>۱</sup>، احمد عباس‌نژاد<sup>۲</sup> و مجید نعمتی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

نویسنده مسئول: \*nematimajid\_1974@uk.ac.ir

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۳۱

### چکیده

استان کرمان یکی از لرزه‌خیزترین گستره‌های ایران بوده که در گذشته، رخداد زمین‌لرزه‌های ویرانگر، سبب آسیب‌های جانی و مالی فراوان در آن گردیده است. از این رو، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در این گستره ضروری به‌شمار می‌آید. این پژوهش نیز برای تهیه نقشه کاربردی پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. نخست، معیارهای گسل‌های جنبی در استان، زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگامی، زمین‌ریخت‌شناسی، استحکام ساختگاه و زمین‌ساخت جنبی و هم‌چنین زیرمعیارهای آن‌ها که در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه دخیل بوده‌اند، بررسی و ارزیابی شده و به لایه‌های اطلاعاتی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تبدیل گردیدند. اهمیت زیر معیارهایی چون درازا، سازوکار و جنبش گسل و هم‌چنین بزرگا و ژرفای زمین‌لرزه‌ها که برای نخستین بار، در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در نظر گرفته شده، سبب افزایش دقت نقشه‌ها می‌گردد. سپس، وزن‌دهی لایه‌های اطلاعاتی به کمک روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) با به‌کارگیری سیستم تصمیم‌گیری گروهی و به‌کارگیری نرم‌افزارهای لازم صورت گرفت. در پایان، لایه‌های اطلاعاتی به‌دست آمده برپایه روش AHP تلفیق شده و گستره‌های گوناگون استان از دیدگاه خطر زمین‌لرزه، در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه استان کرمان به گستره‌هایی با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد (نوار شمال، شمال باختری کرمان و گسل‌های جیرفت و سبزه‌واران)، گستره‌هایی با خطر متوسط (جنوب خاوری و شمال باختری کرمان) تا گستره‌های کم‌خطر (باختر استان، لوت و جازموریان) دسته‌بندی شدند. نقشه‌های به‌دست آمده با پژوهش‌های پیشین و اطلاعات زمین‌لرزه‌شناسی مقایسه گردید که نشان‌دهنده دقت بالای نقشه به‌دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: جنبش، زمین‌لرزه، زمین‌ساخت، سازوکار، گسل و نقشه پهنه‌بندی

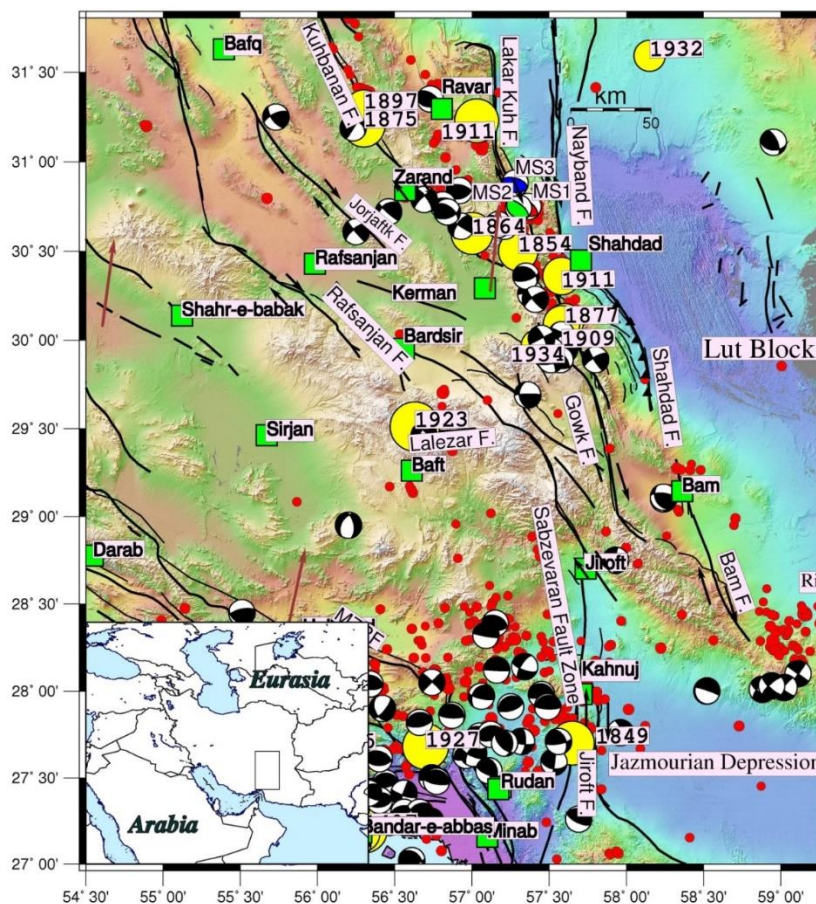
### ۱- پیشگفتار

۲۸۰۰) در گستره‌های گوناگون شهری برای تامین امنیت مالی و جانی جوامع ساکن در گستره‌های لرزه‌خیز، به‌کار می‌رود. در سال‌های گذشته زمین‌لرزه‌های ویرانگر بسیاری در استان کرمان رخ داده که پیامدهای جبران‌ناپذیری با خود به‌همراه داشته‌اند (زمین‌لرزه‌های ۲۰۰۳ بم، ۲۰۰۵ زرنند و ۲۰۱۷ هجدک؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ نعمتی و قیطانچی، ۲۰۱۱ و نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰) (شکل ۱). از این رو، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه، دست‌کم برای این استان از ضروریات به‌شمار می‌آید. در تعیین خطرپذیری یک گستره از دیدگاه رخداد زمین‌لرزه، عوامل بسیاری دخیل می‌باشند، از این رو، به‌کارگیری روش‌های چندمعیاره بهترین گزینه برای تهیه این گونه نقشه‌ها می‌باشد. فرایند

خطر زمین‌لرزه از محلی به محل دیگر متغییر بوده و نقشه پهنه‌بندی ابزار نشان دادن این تغییرپذیری است. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه نشان‌دهنده برآورد احتمال رخداد زمین‌لرزه در گستره‌های گوناگون برپایه شواهد و اطلاعات موجود می‌باشد. این نقشه اطلاعات ممکن را برای کمک به طراحی ساختمان‌ها، پل‌ها، بزرگراه‌ها و شریان‌های حیاتی (خطوط لوله‌کشی آب، گاز و انتقال نیرو و...) که در طراحی آن‌ها ایستادگی و مقاومت در برابر زمین‌لرزه از ارکان مهم به‌شمار می‌رود، فراهم می‌آورد (مانند ایران‌نژادی و همکاران، ۱۳۹۶). نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه هم‌چنین برای تعیین و به‌روز رسانی قوانین و مقررات ساختمانی (مانند آئین‌نامه

به یالسین (۲۰۰۸) اشاره نمود. در این پژوهش، در پهنه‌بندی و تهیه نقشه گستره‌های مستعد زمین‌لغزش در گستره آردسن ترکیه به این نتیجه رسیدند که پهنه‌بندی با به‌کارگیری مدل AHP بیش‌ترین هم‌خوانی را با واقعیت‌های موجود از دیدگاه میزان خطر در گستره مورد مطالعه دارد. هم‌چنین، علی‌جانی و همکاران (۱۳۸۶) در پهنه‌بندی خطر در دامنه شمالی شاه‌جهان (شیروان) با به‌کارگیری GIS و مدل AHP با لحاظ نمودن سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و شیب، به پهنه‌بندی خطر اقدام نموده‌اند. در این نوشتار کوشش شده است تا با روش سلسله‌مراتبی که یک روش نسبتاً جدید است، خطر زمین‌لرزه در گستره استان کرمان بررسی شود تا با تطبیق نتایج با واقعیات (زمین‌لرزه‌های روی داده پیش و هم‌چنین پس از انجام این پژوهش) هم‌میزان درستی کار با این روش برآورد شده و هم خطر زمین‌لرزه در یک استان لرزه‌خیز و دارای گسل‌های جنب، بررسی شده باشد.

تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از جامع‌ترین فرآیندهای طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مسائل را به‌گونه سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند. هم‌چنین، امکان در نظر گرفتن معیارهای گوناگون کمی و کیفی را در مسأله فراهم می‌آورد. این فرآیند، گزینه‌های گوناگون را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. هم‌چنین، برپایه مقایسه دوتایی بنا نهاده شده قضاوت و پردازش را آسان می‌نماید. اگرچه، میزان سازگاری و ناسازگاری که یک تصمیم‌نشان می‌دهد، از مزایای این تکنیک در تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد. در ایران، این روش که بیش‌تر برای سیل و زمین‌لغزش کار شده است، در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه نیز استفاده شده است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۴ و رحیمی و رحیمی، ۱۳۹۶). از پیشینه پژوهش در پهنه‌بندی خطر با به‌کارگیری GIS و روش AHP می‌توان



شکل ۱. نقشه لرزه‌زمین‌ساختی استان کرمان و پیرامون. نشان‌گرهای زرد، قرمز و سیاه، به‌شماره زمین‌لرزه‌های تاریخی (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲) و دستگاهی (پس از ۲۰۰۶ از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) و سازوکار آن‌ها (GCMT, Global Centroid Moment Tensor, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>, Catalog) را نمایش می‌دهند. MS1, MS2, MS3 به زمین‌لرزه‌های سه‌گانه سال ۲۰۱۷ هجری اشاره دارند.

## ۲- داده‌ها و روش کار

برای ارزیابی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان با روش تحلیل سلسله مراتبی در آغاز، معیارها و زیر معیارهای دخیل در خطرپذیری یک گستره در برابر رخداد زمین‌لرزه تعیین گردیده و براین پایه، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردیدند (نمودار ۱). معیارهای وابسته با بهره‌گیری از نظر کارشناسان زمین‌لرزه و اطلاعات لرزه‌ای و زمین‌شناسی برای استان کرمان در نظر گرفته شدند. پس از تعیین معیارها و زیر معیارهای دخیل در ارزیابی خطر زمین‌لرزه با توجه به مزایای تصمیم‌گیری گروهی در روش تحلیل سلسله مراتبی، به تهیه پرسش‌نامه ارزیابی خطر زمین‌لرزه برپایه ویژگی‌ها و اصول تحلیل سلسله مراتبی اقدام گردید. برپایه امتیازات داده شده در پرسشنامه‌ها، ضرائب و وزن‌های لایه‌های اطلاعاتی با به‌کارگیری نرم‌افزار Expert Choice برآورد گردید. در پایان، لایه‌ها به فرمت رستری تبدیل شده، یک مرحله فازی‌سازی برای یکسان کردن آن‌ها اعمال گردیده و سپس ضرائب یا وزن‌های به‌دست آمده به لایه‌های اطلاعاتی داده شدند. در پایان، تمامی لایه‌ها برای به‌دست آوردن نقشه پایانی پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان در محیط نرم‌افزار Arc GIS، هم‌آمیخت و هم‌پوشانی گردیدند. داده‌های لرزه‌ای از مرکز لرزه‌شناسی جهانی<sup>۱</sup> برای بازه زمانی سال‌های ۱۹۲۳ تا ۲۰۰۶ و داده‌های لرزه‌ای موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳، همچنین از کتاب آمبراسیز و ملویل، (۱۹۸۲) برای بازه زمانی سال‌های ۱۸۵۴ تا ۱۹۲۳، گردآوری شده‌اند. مختصات رو کانون زمین‌لرزه‌ها از درجه- اعشار به سیستم مختصات متریک، تبدیل شده و بزرگای زمین‌لرزه‌ها نیز پس از گردآوری از پایگاه‌های اطلاعاتی با به‌کارگیری پیوند یغمایی (۱۳۷۱) (پیوند ۱) به واحد یکسانی تبدیل شدند.

$$M_S = 1.4m_b - 2.3$$

## پیوند ۱

با توجه به نمودار جریان‌ی ۱، پنج معیار مشخصات گسل‌های اصلی، رو کانون زمین‌لرزه، استحکام ساختگاه، زمین‌ریخت‌شناسی و اندازه جنبش زمین‌ساختی، به‌عنوان معیارهای اصلی پهنه‌بندی خطر در نظر گرفته شدند.

## ۲-۱- معیارهای پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه

پنج معیار پهنه‌بندی در این بررسی در نظر گرفته شد. معیارهای گسل، زمین‌لرزه، استحکام رسوبات، زمین‌ریخت‌شناسی گستره و زمین‌ساخت از معیارهای مهم تاثیرگذار در بررسی خطر زمین‌لرزه به‌شمار می‌روند. کوشش بر این بوده است که برای هر کدام دسته‌بندی‌هایی اعمال شود که درست‌ترین و منطقی‌ترین دسته‌بندی بوده و همچنین بیش‌ترین بازه را در هر معیار شامل شود. همچنین دسته‌بندی‌ها در معیارهای مختلف نباید هم‌پوشانی داشته باشند. به‌عنوان مثال زیر معیار سازوکار می‌توانست در هر دو معیار زمین‌لرزه و گسل وجود داشته باشد. زیرمعیارها نیز بایستی به‌گونه‌ای دسته‌بندی شوند که کل بازه پوشش داده شود و همچنین هیچ دسته‌ای خالی از داده نباشد.

## ۲-۱-۱- معیار گسل

یکی از جنبه‌های با اهمیت بررسی‌های لرزه‌خیزی و برآورد خطر زمین‌لرزه در هر محل، شناسایی گسل‌های جنب‌است (عباس‌نژاد و داستان‌پور، ۱۳۷۷). از آن‌جایی که همه زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده بیستم استان کرمان در ارتباط با گسل‌ها رخ داده‌اند، بایستی گسل‌ها را به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه‌ها در نظر بگیریم (شکل ۲ آ و ب). بنابراین، نخست نقشه گسل‌های استان تهیه شد. همچنین، علاوه بر در نظر گرفتن محل گسل، پارامترهای دیگر مانند درازا، سازوکار و میزان جنبش آن گسل در گذشته نیز در نظر گرفته شدند. این یک فرض در همه بررسی‌های خطر زمین‌لرزه به‌کار برده می‌شود که، هرچه درازای قطعه گسل بلندتر باشد، انرژی آزادشده آن گسل و همچنین محدوده با خطر لرزه‌خیزی پیرامون آن گسل نیز افزایش می‌یابد (مانند ایران‌نژادی و همکاران، ۱۳۹۶). درمورد سازوکار گسل، داده‌های زمین‌لرزه‌های گذشته نشان داده است که سازوکار گسل‌ها از جنبه لرزه‌خیزی که ایجاد می‌کنند، یکسان نیست. همین‌گونه، گسل‌های استان در این پژوهش از جنبه میزان جنبش به ۴ گروه (شکل ۲ ب) با توان جنبش، جنب‌ا، خیلی جنب‌ا و نبود لرزه‌ای دسته‌بندی شدند که به‌گونه زیر در نظر گرفته شدند:

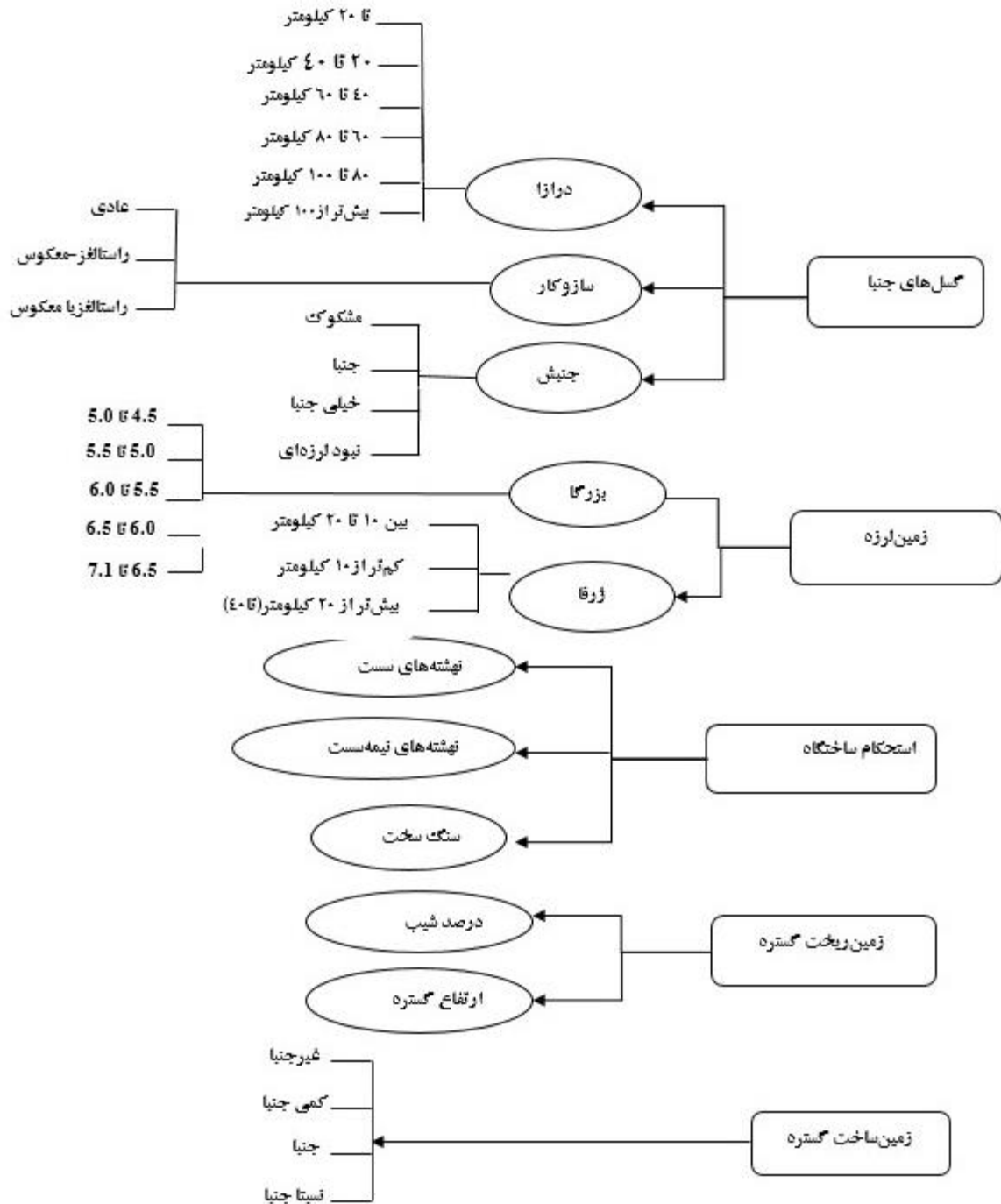
<sup>۱</sup> ISC (International Seismological Center)

۳- خیلی جنبا: نهشته‌های دوران چهارم را قطع کرده، میزبان رخداد زمین‌لرزه قوی بوده و در زون جنبای زمین‌ساختی جای دارند.

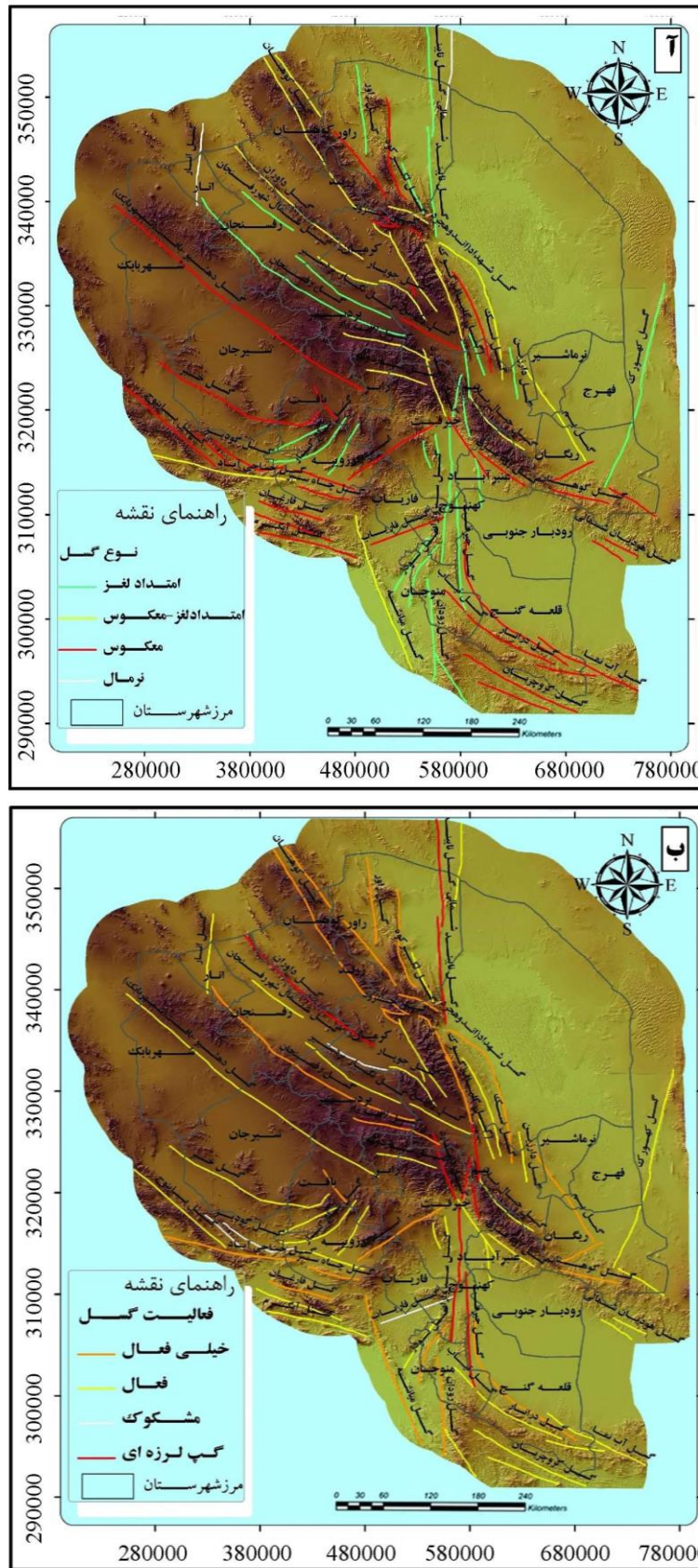
۴- نبود لرزه‌ای: نهشته‌های دوران چهارم را قطع کرده، بخشی از یک سیستم بزرگ و جنبا و لرزه‌خیز هستند که انرژی لرزه‌ای آن‌ها رها نشده است.

۱- با توان جنبش (مشکوک): میزبان رخداد زمین‌لرزه بزرگ (بیش از ۵/۵) نبوده، نهشته‌های دوران چهارم را قطع نکرده و در زون زمین‌ساختی جنبا نیز جای نگرفته‌اند.

۲- جنبا (فعال): نهشته‌های دوران چهارم را قطع کرده، میزبان رخداد زمین‌لرزه بزرگ بوده و گپ لرزه‌ای نیز نمی‌باشند (اگرچه، در زون جنبای زمین‌ساختی جای گرفته‌اند).



نمودار ۱. معیارها، زیرمعیارها و دسته‌بندی‌های به‌کاربرده شده برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه



شکل ۲. آ) نقشه معیار گسل و نوع گسل در استان کرمان و ب) نقشه زیرمعیار جنبش گسل‌های نشان داده شده در شکل آ.



بوده‌اند، که احتمالاً وابسته به عملکرد خطواره عمان بوده و زمین‌لرزه‌های دیگر گستره‌ها (گستره شبکه‌های a, b, c) دارای ژرفایی کم و بیشینه تا ۲۰ کیلومتر می‌باشند. از این رو، گستره‌های استان از دیدگاه ژرفای زمین‌لرزه به زیر ۲۰ کیلومتر و بالای ۲۰ کیلومتر (تا ۴۰ کیلومتر) دسته‌بندی شده‌اند.

#### ۲-۱-۳- معیار استحکام ساختگاه

معیار دیگری که در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه اهمیت دارد، استحکام ساختگاه است. پس از رخداد زمین‌لرزه، یکی از عواملی که بر شدت و میزان تخریب تاثیر می‌گذارد، استحکام نهشته‌ها است. هرچه جنس ساختگاه سست‌تر باشد سرعت عبور موج در آن، کم‌تر و دامنه آن به دلیل تشدید ناشی از تنوع دانه‌بندی نهشته‌ها بیشتر شده، در نتیجه شدت بیش‌تری ایجاد می‌کند.

به بیان دیگر، در شرایط یکسان، شتاب زمین‌لرزه در سطح مواد سست بیش‌تر از سنگ‌های سخت است. لایه اطلاعاتی استحکام ساختگاه نیز بر پایه اطلاعات حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی و هم‌چنین شواهد زمین‌ریخت‌شناسی استان تهیه گردید. این لایه را در سطح استان در تقسیم‌بندی به‌گونه‌ای نهشته‌های سست، مواد نیمه‌سست و سنگ سخت نشان داده است (شکل ۴). همه نهشته‌های جوان که بیش‌تر در سطح دشت‌ها گسترش دارند، در گروه اول جای داده شدند. همه سنگ‌های سخت که بیش‌تر در کوهستان‌ها دیده می‌شوند، در گروه سوم جای داده شده و کنگلومراهای سست پلیوکواترنر که نه هنوز مانند سنگ‌های سخت، سفت شده و نه مانند نهشته‌های جوان فاقد سیمان می‌باشند، در گروه دوم جای داده شدند.

#### ۲-۱-۴- زمین‌ساخت جنباً در گستره

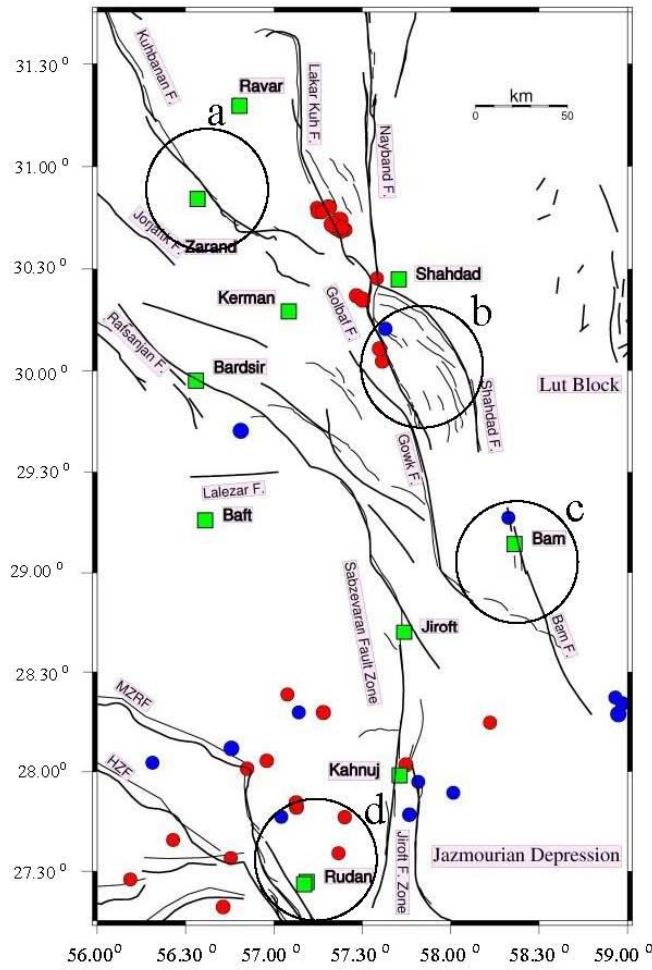
لایه زمین‌ساخت جنباً در گستره، با در نظر گرفتن گواهی‌های زمین‌ساختی، وجود چین‌ها و ساختارهای جنباً و هم‌چنین، شواهد لرزه‌ای و داده‌های حاصل از مطالعات پیشین تهیه گردید. استان کرمان بر پایه پارامتر زمین‌ساخت جنباً به چهار واحد جنباً، نسبتاً جنباً، ناجنباً و کمی جنباً دسته‌بندی شد (شکل ۵). این دسته‌بندی بر پایه شرایط زیر می‌باشد:

لایه اطلاعاتی گسل‌های جنباً در استان با تکیه بر گواهی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، عکس‌های هوایی، نقشه تپه‌سایه‌ای استان، پژوهش‌های انجام شده پیشین و گواهی‌های لرزه‌ای تهیه شده و اطلاعات آن تکمیل گردید. شماری از گسل‌های استان نیز از نقشه‌های زمین‌شناسی (با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰) و کارهای انجام شده قبلی استخراج شده‌اند.

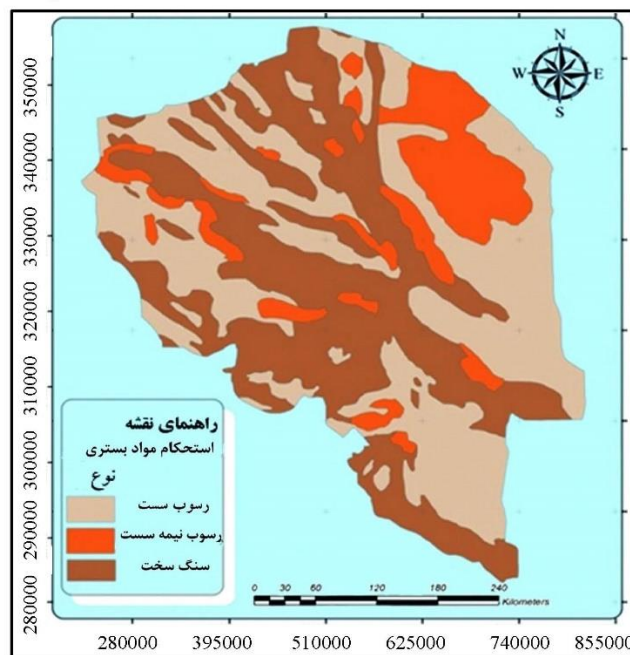
#### ۲-۱-۲- معیار زمین‌لرزه‌ها

رخداد زمین‌لرزه در یک محل نشان از خطر لرزه‌خیزی آن محل داشته و نشان‌دهنده احتمال تکرار زمین‌لرزه و آزاد شدن انرژی در همان محل می‌باشد. رو مرکز زمین‌لرزه‌ها و دو پارامتری که در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تاثیر دارند یعنی بزرگای و ژرفای آن‌ها در این مرحله بررسی می‌گردد. این نکته بدیهی است که هرچه زمین‌لرزه بزرگ‌تر باشد، بیشینه شدت آن نیز بیش‌تر بوده و گستره بزرگ‌تری را دربر می‌گیرد. هم‌چنین، هرچه زمین‌لرزه‌های یک گستره ژرفای کم‌تری داشته باشند (زمین‌لرزه ۲۰۱۷ همدک، سویج و همکاران، ۲۰۱۹)، شدت ویرانی بیش‌تر بوده و ژرف بودن زمین‌لرزه‌ها در یک گستره از ویرانی آن‌ها می‌کاهد (زمین‌لرزه‌های مرز قاره‌ای مانند زمین‌لرزه‌ها ۲۰۱۳ سراوان؛ رهنما و نعمتی، ۱۳۹۴).

تنها زمین‌لرزه‌های با بزرگای Ms بیش از ۴/۵ که تاثیر بیش‌تری در لرزه‌خیزی یک گستره دارند، در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به‌کار رفته‌اند (شکل ۳). برای به‌دست آوردن داده‌های ژرفای زمین‌لرزه‌ها نیز، با توجه به این که ژرفای اعلام شده از سوی پایگاه‌های اطلاعاتی یاد شده از دقت کافی برخوردار نبودند (به‌دلیل نداشتن ایستگاه لرزه‌نگاری کافی در استان)، از بررسی‌های پیشین در استان که با استقرار شبکه‌های محلی لرزه‌نگاری ژرفای زمین‌لرزه‌ها را بررسی کرده بودند، بهره گرفته شد. شکل ۳ موقعیت شبکه‌های موقت لرزه‌نگاری کار شده در روی استان کرمان را نمایش می‌دهد که خوش‌بختانه تقریباً در بیش‌تر گستره‌های استان، این شبکه‌ها زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴/۰ را پوشش می‌دهند. بر این پایه، بیش‌تر زمین‌لرزه‌های پهنه جنوبی استان (گستره شبکه d و پیرامون) دارای ژرفایی بیش از ۲۰ کیلومتر تا ۴۰ کیلومتر



شکل ۳. نقشه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در استان کرمان و موقعیت شبکه‌های محلی لرزه‌نگاری بر روی نقشه استان کرمان: a- نعمتی و قیطانچی، (۲۰۱۱)، b- فاطمی و همکاران، (۱۳۷۷)، c- تاتار و همکاران، (۲۰۰۵) و d- یمینی فرد و همکاران، (۲۰۰۷).



شکل ۴. نقشه استحکام ساختگاه استان کرمان.

## ۲-۱-۵- گستره‌های جنباً

در این مطالعه گستره‌هایی از استان در مجموعه گستره‌های جنباً جای داده شده‌اند که دست‌کم یکی از ویژگی‌های زیر را داشته باشند (شکل ۵):

- کوهستان‌های فرازیافته (بلندا بیش از ۳۰۰۰ متر) باشند چون دلیل اصلی ارتفاع‌یافتگی زیاد آن‌ها می‌تواند پیامد زمین‌ساخت جنباً باشد؛ اگرچه همیشه این‌گونه نیست.

- مرز میان کوه و دشت گسلی و بارز: راست و بارز بودن مرز کوه و دشت به‌عنوان یکی دیگر از ویژگی‌های گستره‌های جنباً از دیدگاه زمین‌ساختی در نظر گرفته شده است.

- وجود پرتگاه (دیواره) گسلی آشکار: وجود افراز گسلی بارز در نهشته‌های دوران چهارم زمین‌شناسی به‌عنوان نشانه دیگر جنباً بودن یک گستره فرض شد.

- چین‌های جوان: این‌گونه چین‌ها که در آن‌ها نهشته‌های دوران چهارم نیز کمابیش چین خورده‌اند، نشانه‌ای از جنباً بودن یک گستره هستند.

- رخداد زمین‌لرزه: رخداد زمین‌لرزه بزرگ در یک گستره نیز نشانه جنباً بودن آن گستره از دیدگاه زمین‌ساختی است.

**گستره‌های نسبتاً جنباً:** محدوده‌هایی از استان در گروه نسبتاً جنباً جای داده شدند که یکی از ویژگی‌های زیر را دارا باشند:

الف) کوهستان با مرز تدریجی

ب) دارای گسل‌های بدون نشانه‌های سطحی بارز از دیدگاه جابه‌جائی

پ) زمین‌لرزه‌خیزی متوسط (رخداد زمین‌لرزه‌های با بزرگای متوسط)

**گستره‌های ناجنباً:** سطوح هموار با ریخت‌شناسی کوهپایه‌ای و گنبد بیابانی و لرزه‌خیزی ناچیز در این گروه جای داده شده‌اند.

**گستره‌های کمی جنباً:** گستره‌هایی که با هیچ‌کدام از گروه‌ها هم‌خوانی ندارند، در این گروه جای داده شدند.

## ۲-۱-۶- زمین‌ریخت‌شناسی گستره

یکی دیگر از عوامل در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه ریخت‌شناسی گستره است. برپایه داده‌ها، بیش‌تر زمین‌لرزه‌های استان در گستره‌های مرتفع استان رخ داده‌اند (مانند زمین‌لرزه ۲۰۰۵ زرنده، نعمتی و قیطانچی،

۲۰۱۱). بنابراین، این پارامتر را نیز می‌توان در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به کار برد. داده‌ها و نقشه‌های وابسته به این لایه از نقشه مدل ارتفاعی رقومی یا DEM استان استخراج گردید. نقشه ۶ آ درصد شیب در استان به نمایش گذارده شده است.

نقشه مدل ارتفاعی رقومی نوعی فایل رستری (فایل تشکیل شده از پیکسل) است که مقادیر پیکسلی آن ارتفاع می‌باشند. در حقیقت مدل DEM نقشه رقومی ارتفاعی است که پستی و بلندی زمین را توسط یک شبکه سلولی نمایش می‌دهد. هر سلول (پیکسل) از این شبکه با یک کد رقمی که نشان‌دهنده ارتفاع واقعی آن نقطه می‌باشد، مشخص می‌گردد. در این مدل هر خط یا سطح تراز زمین با یک رنگ خاص نمایش داده می‌شود. این مدل DEM به‌عنوان مبنای کار پردازش‌ها برای تهیه لایه‌های شیب و ارتفاع استان کرمان به‌کارگیری شد. لایه درصد شیب استان کرمان در شکل ۶ آ و لایه مدل ارتفاعی رقومی استان کرمان در شکل ۶ ب نمایش داده شده‌اند.

پس از تعیین معیارها و زیر معیارهای دخیل در ارزیابی خطر زمین‌لرزه با توجه به مزایای تصمیم‌گیری گروهی در روش AHP، به تهیه پرسش‌نامه ارزیابی خطر زمین‌لرزه برپایه ویژگی‌ها و اصول تحلیل سلسله‌مراتبی اقدام گردید.

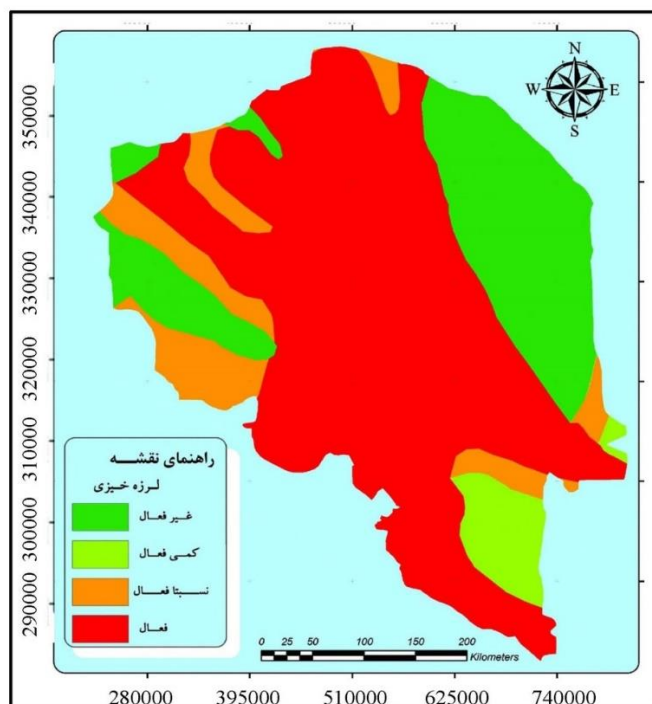
## ۲-۲- پرسش‌نامه ارزیابی خطر زمین‌لرزه

طراحی این پرسش‌نامه به‌گونه‌ای بود که با در بر گرفتن همه داده‌های لازم برای انجام تحلیل سلسله‌مراتبی و مقایسات دوتایی وابسته، داده‌های لازم و کافی وابسته به اهداف پژوهش و چگونگی امتیازدهی مقایسات و ماتریس‌های دویبه‌دویی را در اختیار تصمیم‌گیرنده‌ها قرار بدهد. با توجه به اهمیت و تخصصی بودن این پژوهش، همه پرسش‌نامه‌ها توسط اساتید دانشگاهی متخصص در زمین‌لرزه و هم‌چنین آشنا با سازوکار زمین‌لرزه‌های استان کرمان و عوامل وابسته به آن تکمیل گردید. تخصیص امتیازات بر پایه جدول ۱ بوده که از هم‌آمیخت جدول مشیری (۱۳۸۰) و قدسی‌پور (۱۳۸۵)، هم‌چنین با در نظر گرفتن جوانب وابسته به ارزیابی خطر زمین‌لرزه، تهیه گردید. در پایان، وزن‌ها، بر پایه پاسخ‌های درج شده در پرسش‌نامه‌ها، تعیین شده و با به‌کارگیری نرم‌افزار Expert choice، به تخصیص وزن به معیارها و زیرمعیارها و مقایسات دوتایی ماتریس‌ها مبادرت نموده و وزن‌های

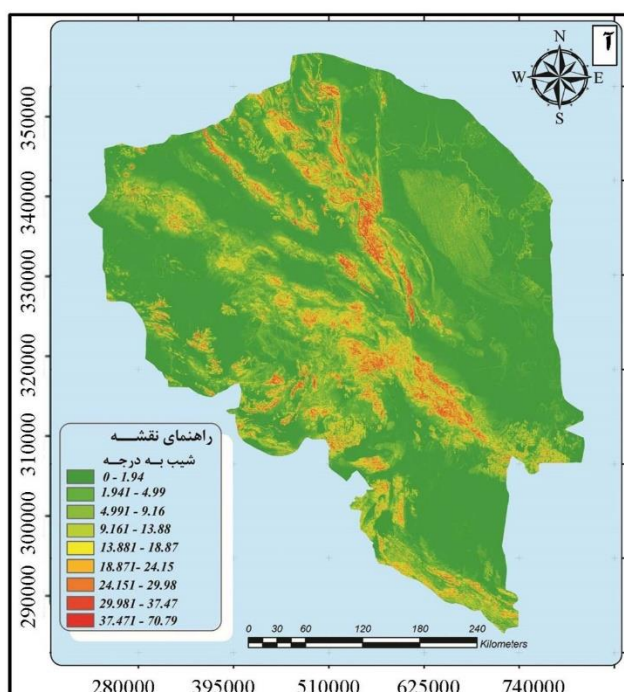
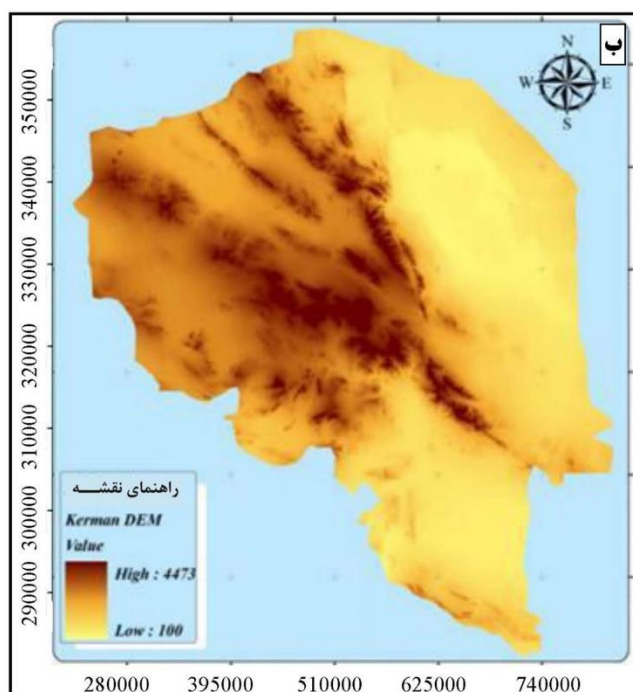


تجدید نظر شود. در این پژوهش، ناسازگاری میان معیارها ۰/۰۳ و ناسازگاری کلی میان تمامی زیر معیارها نیز ۰/۰۶ بوده که با توجه به این که هر دو کم‌تر از ۰/۱ هستند، بنابراین سازگاری قضاوت‌های انجام شده قابل قبول می‌باشد.

پایانی به کمک این نرم‌افزار به دست آمدند. داده‌های وابسته به وزن لایه‌ها پی‌آمد تصمیم‌گیری گروهی، در شکل ۷ آ و ب نشان داده شده‌اند. یکی از برتری‌های روش AHP امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام شده برای معیارها و زیر معیارهای تعیین شده می‌باشد. اگر ناسازگاری بیش از ۰/۱ باشد قابل قبول نبوده و بهتر است در تصمیم‌گیری



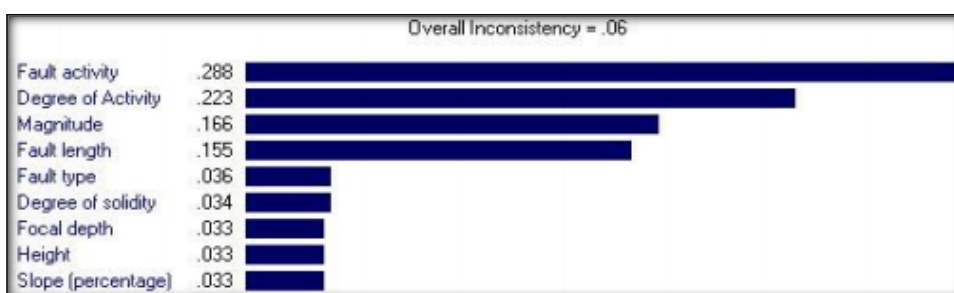
شکل ۵. نقشه زمین‌ساخت جنبا در استان کرمان



شکل ۶. آ) نقشه درصد شیب گسترده‌های استان و ب) نقشه مدل رقمی ارتفاعی استان. ممیزهای بیش از دو رقم در شکل آ فاقد معنا است.

جدول ۱. راهنمای پرسش‌نامه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با روش سلسله مراتبی

ارزش	توضیح	وضعیت سنجش پارامترها نسبت به هم
امتیاز ۹	تجربه، گواهی‌های و قضاوت نشان می‌دهد که یکی از عوامل یا معیارها به‌گونه‌ای بی‌نهایت بارز و گویا بر دیگری ترجیح دارد (غالب بودن یک صفت در یکی از عوامل در مقایسه با دیگری صددرصد است)	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B کاملاً مقدم یا کاملاً بهتر باشد
امتیاز ۷	گواهی‌های حاکی از این است که یکی از عوامل بدون تردید بر دیگری برتری دارد	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B با اهمیت یا موثر بودن خیلی قوی باشد
امتیاز ۵	تجربه و قضاوت به‌گونه‌ای جدی یکی را بر دیگری برتری می‌دهد	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B با اهمیت یا موثر بودن قوی باشد
امتیاز ۳	تجربه و قضاوت بگونه‌ای ملایم و ضمنی به‌نفع یکی نسبت به دیگری است	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B کمی مرجح یا کمی مهم‌تر باشد
امتیاز ۱	دو عامل در صفت مورد نظر مساوی هستند	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B با اهمیت یا ترجیح یکسان باشد
امتیازهای ۲، ۴، ۶، ۸		ترجیحات میان فواصل بالا با ارزش‌های ۸ و ۶ و ۴ و ۲ مشخص شود
امتیازهای ۷/۱، ۹/۱، ۳/۱ و ۵/۱۰	برای این موارد ویژگی معکوس بودن را به‌کارگیری می‌کنیم	اگر پارامتر A نسبت به پارامتر B دارای اهمیت و برتری (کمی، خیلی، خیلی زیاد یا کاملاً) کم‌تر باشد

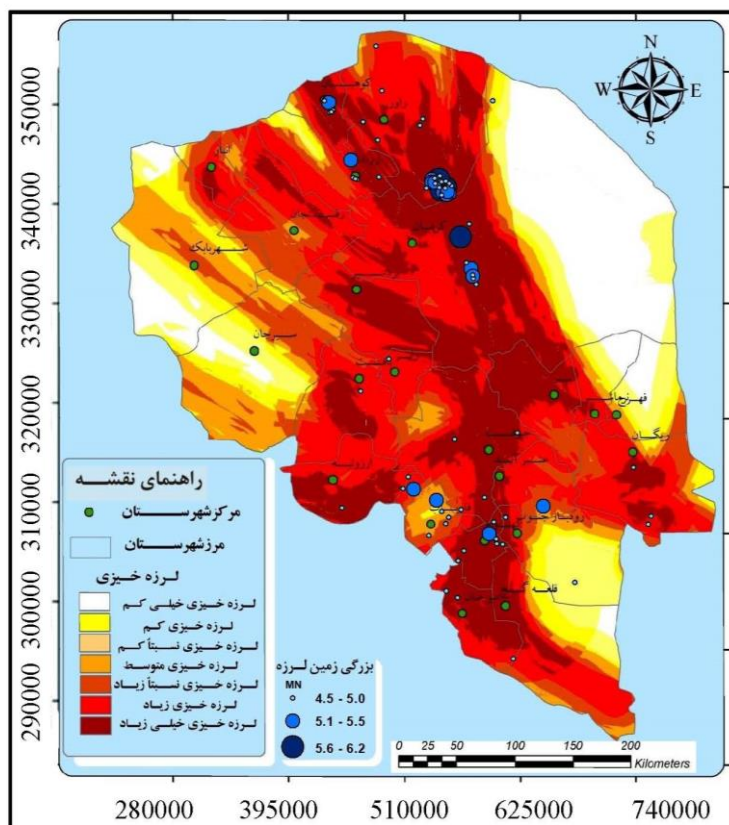


شکل ۷. آ) ضرایب وابسته به معیارها در روش AHP و ب) ضرایب وابسته به زیرمعیارها در روش AHP.

### ۳- نتایج

(نشان‌گرهای آبی) و پس (نشان‌گرهای قرمز) از انجام این پژوهش در گستره بررسی شده روی داده‌اند، نمایش می‌دهد. شمار ۱۰ زمین‌لرزه از سال ۲۰۰۶ تا پیش از انجام این پژوهش در گستره استان روی داده‌اند. شمار ۲۶ زمین‌لرزه نیز پس از انجام این پژوهش تاکنون در گستره استان روی داده‌اند. تقریباً همگی زمین‌لرزه‌های یاد شده در گستره خطرپذیری بالا در نقشه جای دارند.

از هم‌آمیخت لایه‌های اطلاعاتی ۹ گانه که اسامی آن‌ها در نمودار جریان‌ی ۱ مشخص شده و با در نظر گرفتن ضرائب اعلام شده در شکل‌های ۷، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان تهیه گردید (شکل ۸ آ). نقشه ۱ و ۸ زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴/۰ را در استان نمایش می‌دهند. نقشه ۳ نیز زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵/۰ را که پیش



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه استان کرمان با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی. ب) زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵/۰ که پیش (نشان‌گرهای آبی) و پس (نشان‌گرهای قرمز) از انجام این پژوهش در گستره بررسی شده روی داده‌اند. بازه زمانی داده‌های نقشه ب که از شبکه لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برگرفته شده‌اند، از سال ۲۰۰۶ تاکنون می‌باشد.

#### ۴- بحث

گستره با لرزه‌خیزی زیاد تا خیلی زیاد که بر پایه نقشه ناهنجاری به‌دست آمده است، شامل نواری از گسل‌های لرزه‌خیز می‌باشد. این زونی که در شمال خاوری شهر کرمان در نقشه نشان داده نشده است، از پرخطرترین گستره‌ها در استان از دیدگاه لرزه‌خیزی به‌شمار می‌آید. شهرهای زیادی مانند بم، زرنده، کهنوج، ارزوئیه، کوهبنان، قلعه‌گنج، ریگان، بردسیر، راور، عنبرآباد، نماشیر، منوجان و رودبار در این گستره جای دارند. شهرهای بافت، رابر، رفسنجان، شهرباک، فاریاب و فهرج در گستره با خطر متوسط و تنها شهر سیرجان در گستره کم‌خطر جای گرفته است. دشت سیرجان به‌عنوان بخشی از زون سنندج - سیرجان، به‌دلیل شرایط زمین‌ساختی غیرجنبا و نبود گسل جنبا در آن جزء امن‌ترین مناطق هستند. چاله جازموریان نیز به‌دلیل ژرفای زیاد زمین‌لرزه‌های مرز قاره‌ای مکران در این گستره از خطر کمتری برخوردار است. چه‌بسا زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان با بزرگای ۷/۸ (ره‌نماراد و

در این پژوهش کوشش شده است که روشی برای این تحلیل‌گزینش شود که عوامل علمی و تجربی لازم را دربر داشته باشد. برپایه این پژوهش، از ۵ عامل گسل‌های جنبا، زمین‌لرزه‌های گذشته، نوع رسوبات، زمین‌ریخت‌شناسی و زمین‌ساخت، نخستین عامل با ضریب تاثیر بالا، بیشترین اهمیت را دارا می‌باشد. پس از آن، عوامل زمین‌ساخت، زمین‌لرزه‌های گذشته، رسوبات و زمین‌ساخت، به‌ترتیب بیشترین تاثیر را داشته‌اند. درباره عامل گسل باید گفت که، به‌ترتیب سه زیرمعیار جنبش، درازا و سازوکار گسل بیشترین اهمیت را داشته‌اند. در زیرمعیارها نیز، به‌ترتیب بزرگا و ژرفای زمین‌لرزه‌ها بیشترین تاثیر را دارا بوده‌اند. محدوده‌های با لرزه‌خیزی نسبتاً زیاد تا خیلی زیاد نزدیک به نیمی از پهنه استان را شامل شده که شهرهای زیادی در این محدوده قرار می‌گیرند. محدوده با لرزه‌خیزی کم، کمتر از نیمی از استان را پوشش می‌دهند که شامل چاله جازموریان و باختر استان نیز هستند.

نعمتی، ۱۳۹۴) به دلیل ژرفای زیاد در این منطقه خسارات زیادی به بار نیاورد. در نگاهی دقیق‌تر، گستره ابارق به‌سوی جنوب خاوری تا جنوب ریگان نیز به دلیل رخداد زمین‌لرزه‌های فراوان، از زون‌های پرخطر می‌باشد. جنوب اوروزئی که گستره تاثیر راندگی اصلی زاگرس بوده و گسل‌های جنبای بی‌شمار در آن جای دارند، هم‌چنین زمین‌لرزه‌های ویران‌گر فراوانی در آن اتفاق افتاده، گستره پرخطر به‌شمار می‌آید. در محدوده خبر و گسل دشتاب نیز خطر لرزه‌خیزی بالا است. کوهستان داوران هم بیش‌تر به شکل نوار باریکی در گستره پرخطر جای دارد که به علت وجود گسل جنبای داوران، قابل قبول به نظر می‌رسد. تقریباً به موازات کوهستان داوران و در شمال آن، در محدوده پیرامون گسل کوه‌بنان هم منطقه به شدت لرزه‌خیزی به چشم می‌خورد. گره زمین‌ساختی خاور شهر کرمان که در آن‌جا سامانه‌های گسلی سیرچ-گلباف، شهداد، گسل‌های نای‌بند، کوه‌بنان و لکرکوه به هم رسیده و شمار زیادی گسل جنبای نیز در آن گستره وجود دارد، خود را به‌عنوان یک زون پرخطر نشان می‌دهد.

##### ۵- نتیجه‌گیری

گستره استان را به‌طور خلاصه می‌توان به سه بخش پرخطر، خطر متوسط و کم‌خطر دسته‌بندی نمود. شهرهای پرجمعیت و کم‌جمعیت زیادی در دو گروه نخست، جای می‌گیرند. از نتایج جالب توجه این پژوهش می‌توان به این نکته اشاره نمود که گستره زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۷ هجری (شمال خاوری شهر کرمان) که پس از انجام این پژوهش رخ داده‌اند، در نقشه خطر، در گستره با خطر زیاد جای گرفته و چندین زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۵/۰ پس از انجام این پژوهش در این گستره روی داده است. تعداد ۵ زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۵/۰ نیز پس از انجام این پژوهش، تنها در گستره گسل گلباف (خطرپذیری بالا) روی داده است. مراکز شهرستان‌های استان بر پایه میزان لرزه‌خیزی در نقشه پهنه‌بندی حاصله در سه گروه جای می‌گیرند:

الف) پرخطر: بم، زرنده، کهنوج، جیرفت، اوروزئی، کوه‌بنان، قلعه‌گنج، ریگان، بردسیر، راور، کرمان، انار، عنبرآباد، نرماشیر، منوجان و رودبار.

ب) با خطر متوسط: بافت، رابر، رفسنجان، شهر بابک، فاریاب و فهرج.

ج) کم خطر: سیرجان  
برپایه این نقشه و تا اکنون، امن‌ترین گستره‌های استان عبارتند از:

۱- گستره لوت: دشت لوت به دلیل نبود زمین‌لرزه و یا گسل جنبای و هم‌چنین جای گرفتن در گستره غیرجنبای زمین‌ساختی از امن‌ترین گستره‌های استان به‌شمار می‌آید.  
۲- چاله سیرجان: این زون از جنوب خاوری سیرجان آغاز شده و در راستای شمال باختری به سوی جنوب یزد و باتلاق گاوخونی در اصفهان پیش می‌رود.

۳- چاله جازموریان: نبود گسل جنبای، نبود نشانه‌های زمین‌ساخت جنبای و نبود زمین‌لرزه‌های بزرگ در این گستره باعث شده که این گستره در نقشه پهنه‌بندی به‌عنوان گستره‌ای نسبتاً امن تعیین شود. اگرچه، از آن‌جا که صفحه اقیانوسی عمان در زیر این گستره در حال فرورانش است (نعمتی، ۲۰۱۸)، زمین‌لرزه‌هایی چون زمین‌لرزه ۱۳۹۲/۰۱/۲۷ Mw ۷/۸ سراوان امکان بروز زمین‌لرزه‌های بزرگ و ژرف در این گستره وجود دارد.

##### منابع

ایران‌نژاد پاریزی، ا.، نعمتی، م.، جعفری، و. و سیفی، ن (۱۳۹۶) مقایسه روش‌های ارزیابی خطر زمین‌لرزه، مطالعه موردی گستره دشت‌بیاض. فصل‌نامه علمی- پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست، سال دهم، شماره ۱۴، ص ۳۱-۴۵.

عباس‌نژاد، ا. و داستان‌پور، م (۱۳۷۸) زمین‌لرزه و زمین‌لرزه خیزی استان کرمان، انتشارات خدمات فرهنگی کرمان، ۲۵۵ ص.

حیدری‌آقاگل، م.، خطیب، م.، هیهات، م.، منصوری، ه (۱۳۹۴) پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (منطقه مورد مطالعه: استان خراسان جنوبی).

رحیمی، م. و رحیمی، ن (۱۳۹۶) پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم. نشریه ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۲۲، ص ۱۱۸-۱۰۹.

رهنماد، ج. و نعمتی، م (۱۳۹۳) بررسی زمین‌لرزه فروردین سال ۱۳۹۲ سراوان استان سیستان و بلوچستان. فصل‌نامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی زمین‌پویا، ویژه‌نامه (سال‌روز زمین‌لرزه سراوان)، دوره ۱، شماره ۴، ص ۶۳-۷۸.

- Yalcin, A (2008) GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (turkey); comparisons of result and confirmations, *Journal of Catena*, 72: 1-12.
- علی‌جانی، ب.، قهرودی، م.، و امیراحمدی، ا. (۱۳۸۶) پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی شاه جهان با به‌کارگیری GIS (مطالعه موردی: حوضه اسطرخی شیروان). فصل‌نامه تحقیقاتی جغرافیایی، شماره ۸۴، ص ۱۱۶-۱۳۱.
- فاطمی، ج.، عکاشه، ب.، سلطانیان، س. و حمیدی، گ (۱۳۷۷) زمین‌لرزه ۲۹ آبان‌ماه ۱۳۶۸ گلباف کرمان و پس‌لرزه‌های آن، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۲۱، ص ۱۵-۱۱.
- قدسی‌پور، ح (۱۳۸۵) فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ پنجم، ۱۰۰ ص.
- مشیری، ا. (۱۳۸۰) مدل تعدیل شده AHP برای نظرسنجی و تصمیم‌گیری‌های گروهی، *نشریه دانش مدیریت*، شماره ۵۲، ص ۶۳ تا ۹۲.
- یغمائی، م. ع (۱۳۷۱) طرح مطالعه لرزه‌خیزی استان کرمان، *جلد اول، وزارت معادن و فلزات، شرکت توسعه علوم زمین*.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P (1982) A history of Persian earthquakes. Cambridge University Press 219P.
- Jackson, J., et al (2006) Seismotectonic, rupture process, and earthquake hazard aspects of the 2003 December 26 Bam, Iran, earthquake. *Geophys. J. Int.*, 166: 1270-1292.
- Nemati, M. and Gheitanchi, M. R (2011) Analysis of 2005 Dahuieh (Zarand) aftershock sequences in Kerman province, southeast Iran. *Journal of the Earth & Space Physics*, 37 (1): 1-9.
- Nemati, M (2018) Seismotectonic and seismicity of Makran, a bimodal subduction zone, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 196: 139-161.
- Nemati, M., Jafari Hajati, F., Rashidi, A. and Hassan-Zadeh, R (2020) Seismology of the 2017 Hojedk earthquakes ( $M_N$  6.0- 6.1), Kerman province, SE Iran. *Tectonophysics*, 780, 228398.
- Savidge, E., Nissen, E., Nemati, M., Karas' ozen, E., Hollingsworth, J., Talebian M., Bergman, E., Ghods, A., Ghorashi, M., Kosari, E., Rashidi A. and Rashidi, A (2019) The December 2017 Hojedk (Iran) earthquake triplet- sequential rupture of shallow reverse faults in a strike-slip restraining bend. *Geophys. J. Int.*, 217(2): 909-925.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Moradi A. S. and Paul, A (2005) The 2003 December 26 Bam earthquake (Iran), Mw 6.6, aftershock sequence. *Geophys. J. Int.*, 163: 90-105.
- Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Farahbod, A. M., Paul, A. and Mokhtari, M (2007) The diffuse transition between the Zagros continental collision and the Makran oceanic subduction (Iran): microearthquake seismicity and crustal structure. *Geophys. J. Int.*, 170: 182-194.



## Using GIS and AHP method in Earthquake hazard zoning in Kerman Province

P. Ekhlas Pour<sup>1</sup>, A. Abbasnejad<sup>2</sup> and M. Nemati<sup>3\*</sup>

1- M. Sc., student. Dept., of Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science and Earthquake Center of Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

\* nematimajid\_1974@uk.ac.ir

Received: 2021/8/22 Accepted: 2022/2/5

### Abstract

The Kerman province is considered one of the most seismically active zones of Iran, which its frequent past earthquakes have inflicted thousands of deaths and many economic losses. Therefore, the seismic hazard zoning of this province is an essential issue. So, this research was conducted for preparing seismic hazard zoning map in Kerman Province using GIS. Several criteria such as active faults, historical and instrumental earthquakes, geomorphology, basement material, active tectonics and also their sub-criteria, which are effective in seismic hazard zoning, have been selected and evaluated. Then, data layers were weighted using AHP method by group decision making via Arc GIS and Expert choice software. Finally, the data layers were overlapped in ArcGIS based on AHP method. Different zones of the province which have been categorized of earthquake hazard, from the maximum (northeast of Kerman and Jiroft-Sabzevaran area), moderate (southeast and northwest of Kerman) to the minimum (Lut and Jazmurian) potential hazards were distinguished in the hazard zoning map. Final map was compared with past researches and seismic data which represent high accuracy of final map.

**Keywords:** Activity, Earthquake, Tectonic, Mechanism, Fault, Hazard zoning map