

ارزیابی خطر لرزه‌ای به روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و شاخص فعالیت نسبی زمین ساختی، جنوب خاوری ایران

شهرزاد عامری - دانشجوی دکترا گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی. علی سلگی * - دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی. علی سربی - استادیار، گروه زمین شناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی. علیرضا فرخ نیا - استادیار، گروه زمین شناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

چکیده

ارزیابی خطر زمین لرزه همواره نیازمند شناخت دقیق رفتار گسل‌ها می‌باشد. گستره جنوب خاوری کشور با دارا بودن مجموعه‌ای پیچیده از گسل‌های فعال و لرزه‌زا، همواره شاهد رویداد زمین لرزه‌های مهیب در اعصار گذشته بوده است. به همین رو در این مطالعه، ضمن محاسبه تعدادی از شاخص‌های ریخت زمین ساختی مهم در منطقه مطالعاتی، با استفاده از دو روش شاخص زمین ساخت فعال و تحلیل سلسله مراتبی، به بررسی و شناخت میزان فعالیت زمین ساختی گسل‌های منطقه پرداخته شده است. نتایج این تحقیق منجر به شناسایی مناطق با بالاترین میزان خطر رخداد زمین لرزه گردید. در مقایسه دو روش یاد شده با پارامترهای زمین ساخت فعال و شواهد صحرائی، به روشنی می‌توان برتری روش تحلیل سلسله مراتبی نسبت به شاخص زمین ساخت فعال را مشاهده نمود. براساس نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی، چهار پهنه زمین ساختی مهم در این بررسی تعیین گردید. از این میان، دو دسته حوضه با فعالیت زمین ساختی بسیار بالا شناسایی شد که یکی در شمال خاوری منطقه در راستای گسل‌هایی چون گوک و کوهبنان و دیگری در جنوب باختری محدوده و در جوار گسل‌هایی مانند ساردوئی، لاله‌زار و رفسنجان قرار دارند. به علاوه حوضه‌های با فعالیت زمین ساختی بالا نیز در راستای گسل‌های مهم اما با سابقه لرزه‌خیزی کمتر مثل گسل‌های ناینند، ماهان - جوپار، راین و دلفارد قرار گرفته‌اند. قرارگیری مراکز جمعیتی در حوضه‌های با فعالیت زمین ساختی بسیار بالا تا بالا و همجواری با گسل‌های فعال و شناخته شده منطقه، لزوم توجه بیشتر به ساخت و ساز در این محدوده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: زمین ساخت فعال، شاخص‌های ریخت زمین ساختی، تحلیل سلسله مراتبی، لرزه‌خیزی، باختر بلوک لوت.

مقدمه

سرزمین ایران از اعصار گذشته تا به امروز، همواره شاهد وقوع زمین لرزه‌هایی مخرب و ویرانگر بوده و هست. این رویدادهای زمین ساختی سبب متأثر شدن و در برخی موارد حتی شکل‌گیری سیستم زهکشی یک منطقه می‌گردد. از همین جهت می‌توان با بررسی شاخص‌های مورفولوژیکی، به میزان فعالیت منطقه پی برد. حساسیت الگوی زهکشی به فرآیندهای زمین ساخت فعال مانند گسلش، چین خوردگی، بالا آمدگی و کج شدگی که منجر به ایجاد نمودهای ریخت شناختی می‌شود، ابزار مفیدی برای برآورد فعالیت نسبی زمین ساختی، فراهم می‌آورد (کاکس^۱، ۱۹۹۴: ۵۸۱-۵۷۱). مطالعه زمین ساخت فعال، به ویژه در مناطق با فعالیت بالا در هولوسن و پلیستوسن پسین، برای ارزیابی خطر لرزه‌ای بسیار حائز اهمیت است (کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲). منطقه مورد مطالعه سابقه طولانی از زمین لرزه‌های مخرب داشته که انواع تاریخی آن به حدود سال ۱۸۵۰ میلادی بر می‌گردد. از جمله مهم‌ترین آن‌ها که خسارات قابل ملاحظه‌ای ایجاد کرده‌اند، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: زمین لرزه‌های شهداد (۱۸۵۴)، چترود (۱۸۶۴)، کوهبنان (۱۸۷۵)، چترود (۱۸۹۷) (امبرسیس^۳، ۱۹۷۵: ۷-۱۶؛ بربریان^۴، ۲۰۰۵: ۳۵-۹۹). در ۳۵ سال گذشته نیز تعداد زیادی زمین لرزه ثبت دستگاهی در این محدوده رخ داده است برای مثال: زمین لرزه‌های گوک با بزرگای $M_w = 6/6$ و $M_w = 7/2$ (۱۹۸۱)، فندقه با بزرگای $M_w = 6/6$ (۱۹۹۸) و داهوئیه با بزرگای $M_w = 6/4$ (۲۰۰۵). وقوع چنین زمین لرزه‌های متعدد تاریخی و دستگاهی باعث شده که این منطقه به عنوان یکی از لرزه‌خیزترین مناطق ایران شناخته شود که هر لحظه احتمال وقوع زمین لرزه‌ای ویرانگر در آن وجود دارد (شاه پسندزاده و حیدری، ۱۳۷۵). وقوع زمین لرزه روی گسل‌هایی که سابقاً شناخته شده نبودند (مثل زمین لرزه ۱۳۸۲ بم) و لزوم توجه به مناطقی در این محدوده که علی‌رغم احاطه شدن توسط گسل‌های فعال هنوز زمین لرزه مخربی را تجربه نکرده‌اند (مثل شهر کرمان که با نبود کامل سوابق تاریخی زمین لرزه تا ۱۵۰ سال قبل همراه است (واکر و همکاران^۵، ۲۰۱۰: ۱۰۶۰-۱۰۴۶)) از جمله دلایلی هستند که ما را بر آن داشت تا از تحلیل ریخت زمین ساختی و مقایسه آن با شواهد صحرائی و داده‌های لرزه‌ای موجود در منطقه، به عنوان ابزاری برای شناخت ساختارها، میزان فعالیت آن‌ها و یافتن مناطق پر خطر از دید لرزه‌ای و تخمین‌های نزدیک به واقعیت به منظور تحلیل خطر زمین لرزه، استفاده نماییم.

مطالعات بسیاری با استفاده از شاخص‌های زمین ریخت شناسی برای شناسایی تأثیر نسبی فعالیت زمین ساختی و ارزیابی خطر لرزه‌ای در سراسر دنیا انجام شده است به عنوان نمونه شمال باختری ایران (صابر و همکاران^۶، ۲۰۱۸: ۲۳۶-۲۱۹)، هند (شارما و همکاران^۷، ۲۰۱۷: ۱۲۰-۱۰۸)، جنوب خاوری اسپانیا (پرز-پنا و همکاران^۸، ۲۰۱۰: ۳۱۷-۳۳۲)، شمال باختری فرانسه (فونت و همکاران^۹، ۲۰۱۰: ۱۷۲-۱۸۰) و جنوب باختری سیرانوادا در اسپانیا (الحمودنی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۸: ۱۵۰-۱۷۳). این دست از مطالعات که مناطق دگر شکلی دارای پتانسیل فعالیت زمین ساختی را با روش کم هزینه و سریعی ارزیابی می‌کنند، به ویژه در شرایطی کارایی دارند که: ۱- رژیم زمین ساختی کنونی با ایجاد گسل‌های فعال باعث فرسایش و رسوبگذاری فعال شده و نمود سطحی آن گسل‌ها را پنهان می‌کند. ۲- برونزد گسل‌های فعال نادر بوده و ممکن است

۱. Cox

۲. Keller and Pinter

۳. Ambraseys

۴. Berberian

۵. Walker et al

۶. Saber et al

۷. Sharma et al

۸. Perez-Pena et al

۹. Font et al

۱۰. El Hamdouni et al

گسل‌های فعال روی نقشه‌ها به تصویر کشیده نشوند. ۳- هیچ سیستم پیشرفته‌ای برای نظارت و ارزیابی رژیم‌های زمین ساختی فعلی وجود ندارد (آرگریو و همکاران^۱، ۲۰۱۵: ۲۷۴-۲۶۲).

از مهمترین مطالعات لرزه زمین ساختی و ساختاری انجام شده در محدوده مورد مطالعه می‌توان به مواردی چون واکر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۰۴۶-۱۰۶۰؛ واکر^۲، ۲۰۰۶: ۶۶۸-۶۵۴؛ واکر و جکسون^۳، ۲۰۰۴: ۲۴-۱؛ رشیدی و همکاران^۴، ۲۰۱۸: ۴۶۲-۴۴۰، اشاره کرد. مطالعات ریخت زمین ساختی صورت گرفته در محدوده مطالعاتی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود. گروه اول مربوط به مطالعه گسل‌های مسبب زلزله در گستره‌ی استان کرمان می‌باشد مثلاً برای گسل لکرکوه: کسمایی و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۷-۹۸؛ جمیل و همکاران، ۱۳۹۰، طالبیان و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۴۷-۲۵۴، گسل گوک: حسینی استاد و همکاران، ۱۳۹۵، گسل رفسنجان: رشیدی، ۱۳۹۷: ۵۳-۷۰، گسل کوهبنان: رادفر و پورکرمانی، ۱۳۸۴: ۱۸۳-۱۶۶. گروه دوم بجای تمرکز بر روی یک گسل، محدوده وسیع‌تری را بررسی و سپس به تحلیل نقش گسل‌ها در میزان فعالیت حوضه‌های مختلف پرداخته‌اند، نعمتی و میلان، ۱۳۹۷: ۳۳-۴۵، نعمتی و عباسزاد، ۱۴۰۰: ۱-۱۸، عامری^۵ و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۳-۳۸، نمونه‌هایی از این دست مطالعات هستند.

در هیچ یک از مقالاتی که پیش‌تر از هر دو روش AHP و Iat همزمان استفاده شده (علیپور و همکاران^۶، ۲۰۱۱: ۱۴-۱؛ بقا و همکاران^۷، ۲۰۱۴: ۸۷-۶۶؛ آرگریو و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۶۲-۲۷۴) اولاً هدف مقایسه دقت دو روش AHP و Iat در تحلیل شاخص‌های ریخت سنجی به منظور ارزیابی خطر لرزه‌ای نبوده؛ ثانیاً در این مقاله، AHP با روشی متفاوت، که توسط بهرامی و همکاران (۱۳۹۳: ۲۲۲-۱۹۹) معرفی شده، محاسبه شده است. در این مطالعه با استفاده از هفت شاخص ریخت شناختی و با تعیین شاخص فعالیت نسبی زمین ساختی (Iat^۸) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP^۹)، فعالیت نسبی زمین ساختی در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. سرانجام، این یافته‌ها را جهت مقایسه دقت خروجی دو روش AHP و Iat در تحلیل نهایی شاخص‌های ریخت سنجی و به منظور ارزیابی خطر لرزه‌ای، بحث می‌کنیم.

زمین شناسی و زمین ساخت منطقه

محدوده مورد مطالعه با وسعت ۵۰۰۳۷ کیلومتر مربع بوده (شکل ۱ب)، در محدوده ای با طول جغرافیایی از ۱۵° ۲۲' ۵۵" تا ۱۷° ۳۱' ۵۸" خاوری و عرض جغرافیایی از ۴° ۵۰' ۲۸" تا ۳۰° ۹' ۳۱" شمالی واقع شده است. سعی شد چارچوب محدوده مورد مطالعه به نحوی انتخاب شود که از تمام حوضه‌های آبریز اصلی که در نزدیکی شهر کرمان قرار دارند استفاده شود. که این شامل ۴ حوضه (ابرقو سیرجان، جازموریان، کویر لوت و کویر درانجیر) از ۵ حوضه آبریز اصلی در استان کرمان می‌باشد (نقشه حوضه‌های اصلی آبریز استان کرمان).

براساس تقسیم بندی آقانباتی (۱۳۸۵: ۱۸ و ۵۹)، منطقه مورد مطالعه که در جنوب خاوری ایران و باختر بلوک لوت واقع

^۱. Argyriou et al

^۲. Walker

^۳. Walker and Jackson

^۴. Rashidi et al

^۵. Ameri et al

^۶. Alipoor et al

^۷. Bagha et al

^۸ Index of relative active tectonics

^۹ Analytical Hierarchy Process

شده (شکل الف)، بخشی از خرد قاره ایران مرکزی است که با زمین درزه‌های افیولیتی سیستان، نائین، بافت، گسل درونه و افیولیت‌های کاشمر-سبزوار احاطه شده و توسط گسل‌های امتداد لغز راست‌بر طویلی که به سمت باختر خمیدگی دارند به بلوک لوت، فرازمین شتری، فرونشست طبس، فرازمین کلرد، بلوک پشت بادام، فروافتادگی بیاضه-برد سیر و بلوک یزد تقسیم می‌شود. در این محدوده واحدهای زمین شناختی متنوعی با محدوده سنی کامبرین زیرین تا اواخر سنوزوئیک دیده می‌شود. بررسی این ردیف‌های رسوبی و تغییرات جانبی آن‌ها نشان می‌دهد که منطقه در این دوره طولانی متأثر از بسیاری رخدادهای زمین ساختی بوده است (سبزه‌ئی و همکاران، ۱۹۹۹).

براساس تقسیم بندی فیزیوگرافیک-زمین ساختی حوضه های رسوبی ایران (آرین^۱، ۲۰۱۳: ۱۷۷-۱۶۹)، محدوده مورد مطالعه از ۷ بخش مختلف تشکیل شده (شکل ب)، که به جز کمر بند روراندن سنندج - سیرجان، پی سنگ بقیه از پوسته قاره ای خرد قاره ایران مرکزی تشکیل شده است. بخش عمده منطقه مطالعاتی متشکل از حوضه پیشانی قهقرایی ناین-کرمان بوده که در شمال کمان ماگمایی ارومیه-دختر و به موازات آن امتداد یافته است. این حوضه که روی یک محیط پشت کمائی قهقرایی (برای نیمه جنوب خاوری کمان ماگمایی ارومیه-دختر) را پوشانده، از نوژن شکل می‌گیرد (آرین، ۲۰۱۳: ۱۷۷-۱۶۹).

ویژگی اصلی محدوده مورد مطالعه حضور گسل‌های امتداد لغز است. از جمله مشهودترین ویژگی‌های این گسل‌ها حضور افشانه‌های دم اسبی در پایانه‌های گسلی، خم‌رهایی و خم‌گرفتار به همراه ساختارهای مرتبط با آن‌ها است. این فرآیندهای در حال انجام، عامل ایجاد نمودهای ریخت زمین شناختی مثل قطع شدگی مخروط افکنه‌ها، رودخانه‌ها، ایجاد دره‌های ژرف و بسیاری از زمین لرزه‌های این منطقه هستند. مهمترین گسل‌های منطقه مورد مطالعه (شکل ج) عبارتند از:

۱- سیستم گسلی سبزواران: گسلی با روند شمالی-جنوبی، از نوع امتداد لغز با مؤلفه معکوس بوده که از چندین قطعه به صورت انشالانی، تشکیل شده است. علی‌رغم وجود شواهدی دال بر فعالیت بالای زمین ساختی و نرخ لغزش بالا، هیچ زمین لرزه مخرب شناخته شده‌ای در طول آن رخ نداده است. در پایانه شمالی این گسل، انشعابات گسلی با سابقه فعالیت لرزه‌ای وجود دارد که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به گسل ساردوئی، لاله زار و دلفارد اشاره کرد (ریگارد و همکاران^۲، ۲۰۰۵: ۱۷۷-۲۰۳).

۲- سیستم گسلی گوک: گسل امتداد لغز راستگرد با روند شمال شمال باختری و طولی حدود ۲۰۰ کیلومتر که متشکل از چندین قطعه گسل با الگوی انشالانی است. این گسل بخشی از سامانه گسلی سبزواران-گوک-نابیند بوده (واکر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۰۶۰-۱۰۴۶) و در حاشیه باختری دشت لوت واقع شده است (بربریان و همکاران^۳، ۲۰۰۱: ۳۷۱-۳۹۸). این گسل یکی از فعال‌ترین گسل‌های ایران بوده که از سال ۱۸۷۷ با زمین لرزه همراه است ($M_w = 7.1$; ۱۳۶۰) (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱: ۳۷۱-۳۹۸).

۳- سیستم گسلی نابیند: گسلی شمال-جنوبی با طولی حدود ۳۰۰ کیلومتر و از نوع امتداد لغز راستگرد بوده که در طول حاشیه باختری بلوک لوت کشیده شده است. پنج قطعه گسلی انشالان از نوع پله به راست در طول این سیستم گسلی شناسایی شده است (فروتان و همکاران^۴، ۲۰۱۴: ۳۵۶۰-۳۵۱۷). علی‌رغم وجود نشانه‌های بارز ریخت زمین شناختی در بخش عمده ای از طول این سیستم گسلی، گسل نابیند در طی هزاره‌های گذشته فاقد زمین لرزه قابل توجه، بوده است (مثلاً امبرسیس و ملویل^۵، ۱۹۸۲).

۱. Arian

۲. Regard et al

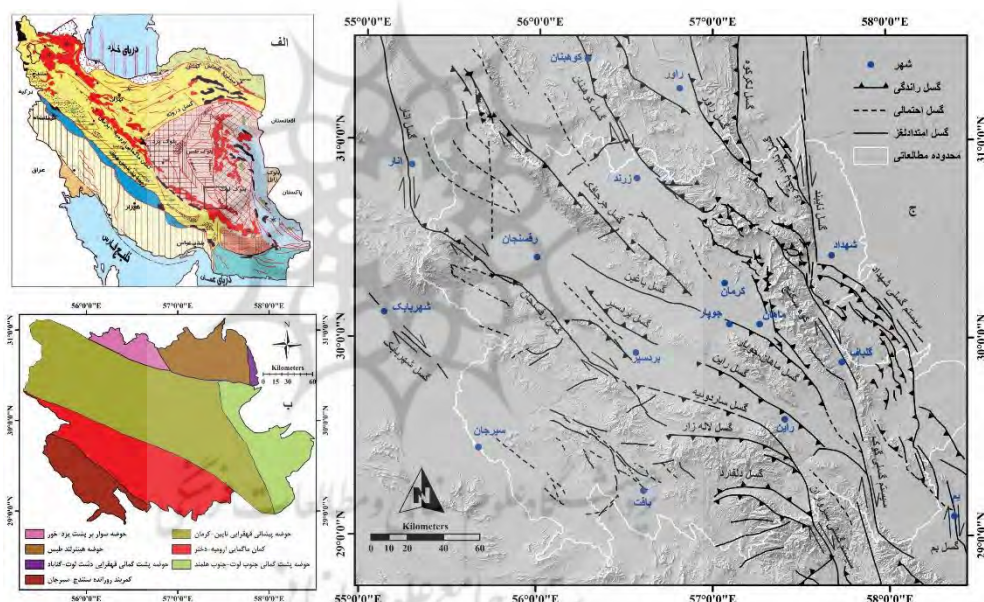
۳. Berberian et al

۴. Foroutan et al

۵. Ambraseys and Melville

۴- سیستم گسلی کوهبنان: گسل کوهبنان گسلی فعال به طول ۳۰۰ کیلومتر و روند شمال باختری-جنوب خاوری است. این گسل امتداد لغز راستگرد از چندین قطعه انشلاق تشکیل شده و شواهد نشان می‌دهند که در طول زمان حرکت روی گسل کوهبنان از معکوس به امتداد لغز تغییر یافته است (مثلاً بربریان^۱، ۲۰۱۴). با وجود ثبت زمین لرزه‌های بسیار بر روی این گسل (مثلاً $M_w = 6/0$: ۱۸۷۵، امبرسیس و ملویل، ۱۹۸۲)، بربریان (۲۰۰۵) معتقد است هنوز بزرگترین رخداد زمین لرزه‌ای در خوشه کنونی اتفاق نیفتاده است. از جمله ویژگی گسل کوهبنان وجود انشعابات گسلی در پایانه جنوبی آن است که سابقه لرزه‌ای دارند (مثل: داهوئی، چترو، بازرگان، ده بالا، خاور کرمان).

۵- گسل جرجافک: گسلی با طول حدود ۲۰۰ کیلومتر و روند کلی NW-SE که از ۵ قطعه انشلاق به شدت فعال تشکیل شده است. علی‌رغم وجود شواهد واضح از فعالیت این گسل که سن فعالیت این گسل را کوتاه‌تر پسین نشان می‌دهند (رشیدی و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۴۰-۴۶۲)، هیچگونه داده لرزه‌ای دستگامی و تاریخی در آن طول ثبت نشده است (بربریان، ۲۰۱۴: آقانباتی، ۱۳۸۵: ۱۸؛ واکر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۰۴۶-۱۰۶۰). سازوکار این گسل را عمدتاً شیب لغز معکوس با مؤلفه امتداد لغزی راستگرد دانسته‌اند (واکر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۰۴۶-۱۰۶۰؛ آلن^۲، ۲۰۱۱: ۵۵۵-۵۷۴).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه روی: (الف) نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران (آقانباتی ۱۳۸۵: ۱۸) کادر سیاه رنگ و (ب) تقسیم بندی فیزیوگرافیک- زمین ساختی حوضه های رسوبی منطقه براساس آراین، ۲۰۱۳. ج) گسل‌ها و شهرهای مهم در محدوده مطالعاتی.

روش تحقیق

زمین ریخت شناسی ابزاری ارزشمند در بررسی زمین ساخت فعال است که در آن توصیف اشکال و ناهمواری‌های سطح زمین با روابطی از اندازه، ارتفاع و شیب آن‌ها شناخته می‌شوند. فرایند مدلسازی هیدرولوژی در منطقه مطالعاتی به منظور به دست آوردن لایه شبکه زهکشی، محدوده حوضه‌ها و لایه تقسیم آب‌ها، توسط افزونه ArcHydro در نرم افزار Arc GIS صورت گرفته است. نتایج حاصل از محاسبه هفت شاخص ریخت سنجی (طول- شیب آبراهه (SL)، انتگرال

^۱. Berberian

^۲. Allen

فرازسنجی (Hi)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، تقارن توپوگرافی عرضی حوضه (T)، شکل حوضه (Bs)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)، پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf) برای ۵۱ حوضه محدوده مورد مطالعه، به سه رده فعالیت زمین‌ساختی زیاد، متوسط و کم تقسیم شده و برای هر کدام نقشه‌ای ترسیم شد. روش ارزیابی این شاخص‌های ریخت‌سنجی به صورت خلاصه در جدول (۱) نشان داده شده است. سپس شاخص Iat به دست آمده از میانگین‌گیری (S/n) رده‌های مختلف شاخص‌های ریخت‌شناسی، خود به چهار رده از لحاظ میزان فعالیت تقسیم گردید (الحمدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۳-۱۵۰). در ادامه کار، ابتدا با رسم نمودار شاخص‌ها نسبت به یکدیگر در Excel ضریب تعیین، مشخص و سپس با جذر گرفتن از آن ضریب همبستگی محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم افزار Expert Choice مقادیر نرخ سازگاری و ضرایب تأثیر هر شاخص محاسبه و خروجی نهایی مدل AHP در نرم افزار ArcGIS، جهت تعیین میزان فعالیت نسبی زمین ساخت در منطقه مورد مطالعه، بررسی شد. نهایتاً داده‌های لرزه‌ای به منظور بررسی رابطه متقابل لرزه‌خیزی با فعالیت زمین ساختی و نیز با همراهی شواهد صحرایی و ساختاری، در ارزیابی کیفیت تحلیل زمین ساختی Iat و AHP، استفاده شدند. نمودار گردش ارزیابی فعالیت نسبی زمین ساختی در شکل ۲ نشان آمده است.

جدول ۱: روش ارزیابی شاخص‌های ریخت‌سنجی

*همه رده‌بندی‌ها طبق الحمدونی و همکاران (۲۰۰۸)، بوده به استثناء SL و T که بر اساس موسوی و آریان (۲۰۱۵: ۷۹۴-۷۷۶) می‌باشند.

شاخص	فرمول	اجزا	رده‌بندی
شکل حوضه	$Bs = Bl/Bw$ (رامیرز-هرا، ^۱ ؛ کانن، ^۲ ؛ ۱۹۷۶)	$Bw =$ عرض حوضه در عریض‌ترین بخش آن $Bl =$ طول حوضه از نقطه خروجی تا دورترین فاصله از آن	۱: $Bs \geq 4$ ۲: $3 \leq Bs < 4$ ۳: $Bs < 3$
پیچ و خم پیشانی کوهستان	$Smf = Lmf / Ls$ (بول و مک فادن، ^۳ ؛ بول، ^۴ ؛ ۲۰۰۷)	$Ls =$ طول خط مستقیم پیشانی کوهستان $Lmf =$ طول پیشانی کوهستان در طول اتصال کوهستان و دشت	۱: $Smf < 1/1$ ۲: $1/5 \leq Smf < 1/1$ ۳: $Smf \geq 1/5$
عدم تقارن حوضه زهکشی	$Af = 100(Ar/At)$ (کلر و پینتر، ^۵ ؛ هیر و گرندر، ^۶ ؛ ۱۹۸۵)	$Ar =$ مساحت حوضه در سمت راست آبراهه $At =$ مساحت کل حوضه زهکشی	۱: $ Af-50 \geq 15$ ۲: $7 \leq Af-50 < 15$ ۳: $ Af-50 < 7$
تقارن توپوگرافی عرضی حوضه	$T = Da/Dd$ (کاکس، ^۷ ؛ ۱۹۹۴)	$Da =$ فاصله از خط میانی حوضه زهکشی تا خط میانی کمریند مآندری فعال $Dd =$ فاصله از خط میانی تا خط تقسیم حوضه	۱: $T \geq 0.4$ ۲: $0.2 \leq T < 0.4$ ۳: $T < 0.2$
انتگرال فراسنجی	$Hi = (Hiave - Himin) / (Himax - Himin)$ (پایک و ویلسون، ^۶ ؛ مایر، ^۷ ؛ ۱۹۷۱؛ ۱۹۹۰؛ کلر و پینتر، ^۵ ؛ ۲۰۰۲)	$Hiave =$ ارتفاع میانگین $Himin =$ ارتفاع کمینه $Himax =$ ارتفاع بیشینه	۱: $Hi \geq 0.5$ ۲: $0.4 \leq Hi < 0.5$ ۳: $Hi < 0.4$
نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن	$Vf = 2Vfw / \{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)\}$ (بول و مک فادن، ^۳ ؛ بول، ^۴ ؛ ۲۰۰۷)	Erd و $Eld =$ به ترتیب ارتفاع دیواره‌های سمت راست و چپ $Vfw =$ عرض دره $Esc =$ ارتفاع کف دره	۱: $Vf \leq 0.5$ ۲: $0.5 \leq Vf < 1$ ۳: $Vf \geq 1$

^۱ Mosavi and Arian

^۲ Ramírez-Herrera

^۳ Cannon

^۴ Bull

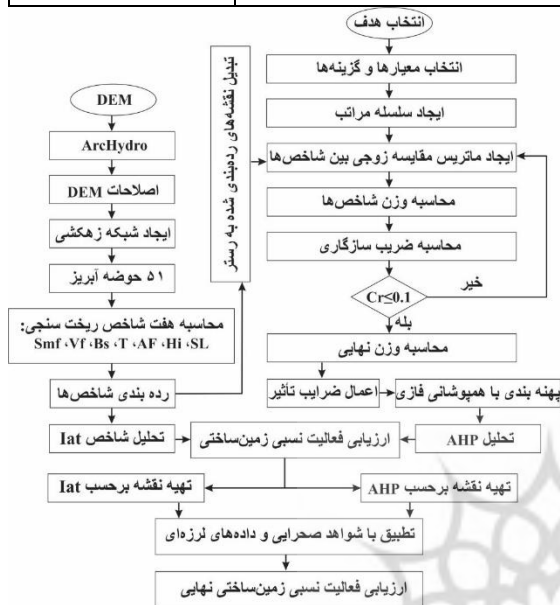
^۵ Hare and Gardner

^۶ Pike and Wilson

^۷ Mayer

$SL \geq 1000$: ۱ $500 \leq SL < 1000$: ۲ $SL < 500$: ۳	$\Delta h =$ اختلاف ارتفاع محدوده $\Delta l =$ طول محدوده $l =$ طول کانال رود از بالادست تا نقطه‌ای که برای آن شاخص محاسبه می‌شود	$SL = (\Delta h / \Delta l) l$ (هک، ^۱ ۱۹۷۳)	طول- شیب آبراهه
--	---	---	-----------------

شکل ۲: نمودار گردش ارزیابی فعالیت نسبی زمین ساختی به روش AHP و Iat



روش محاسبه فعالیت نسبی زمین ساختی

در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از متغیرهای ریخت زمین ساختی، فعالیت نسبی زمین ساختی در گستره باختری بلوک لوت مورد ارزیابی قرار گیرد. از میانگین‌گیری رده‌های مختلف شاخص‌های ریخت زمین ساختی، Iat به دست می‌آید که برای ارزیابی توزیع فعالیت نسبی زمین ساختی در منطقه مطالعاتی، مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌توان آن را از دید فعالیت زمین ساختی به چهار رده تقسیم کرد (الحمودنی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۵۰-۱۷۳): رده ۱، خیلی فعال ($1/5 < Iat \leq 2$)، رده ۲، فعال ($1 < Iat \leq 1/5$)، رده ۳، متوسط ($2 < Iat < 2/5$) و رده ۴، پائین ($2/5 \leq Iat$). در

منطقه مطالعاتی با میانگین‌گیری از رده‌های بدست آمده از ۷ شاخص ریخت زمین ساختی (Bs, Vf, Smf, SL, Hi, Af, T)، شاخص فعالیت نسبی زمین ساختی (Iat) هر حوضه محاسبه (جدول ۳) و نقشه پهنه بندی زمین ساختی فعال نسبی به عنوان مدل زمین ساخت فعال برای حوضه‌های زهکشی منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۱۰).

روش محاسبه‌ی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از معروف‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند منظوره بوده که از طریق تبدیل مسائل پیچیده به رویکردهای ساده‌تر، فرآیند تصمیم‌گیری را تسهیل کرده و شامل سه مرحله می‌باشد: ایجاد یک سلسله مراتب، محاسبه وزن، بررسی سازگاری سیستم. اساس این روش تصمیم‌گیری بر پایه مقایسه‌های زوجی بوده و تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتبی تصمیم گرفته، سپس یک سری مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود. این مقایسه‌ها وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های دیگر مورد ارزیابی در تصمیم نشان می‌دهد. در نهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسه‌های زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم‌بهنه حاصل آید (ساتی^۲، ۱۹۷۷: ۲۸۱-۲۳۱). برتری روش مقایسه زوجی، که در این مطالعه استفاده شده است، نسبت به دیگر روش‌های تعیین وزن در این است که تحلیلگر می‌تواند با محاسبه ضریب سازگاری (Cr)، سازگاری وزن‌ها را بررسی کند. این موضوع در دیگر روش‌های اندازه‌گیری که اختصاص وزن مستقیماً به قضاوت شخصی تحلیلگر بستگی دارد، مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

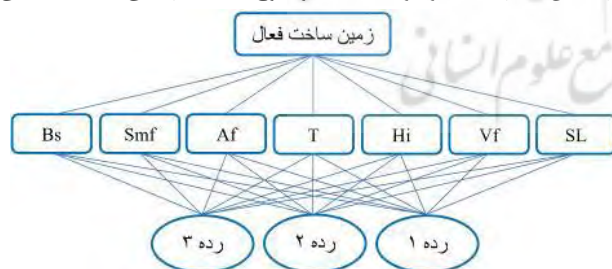
روش AHP این امکان را فراهم می‌آورد تا بجای اتکای صرف به میانگین هر شاخص در روش Iat، وزن و اهمیت هر شاخص در مقایسه با شاخص‌های دیگر، در تعیین میزان فعالیت زمین ساختی محدوده مورد مطالعه اساس کار قرار گیرد.

^۱. Hack

^۲. Saaty

در ارزیابی فعالیت زمین ساختی به روش AHP، شاخص‌های زمین ریختی (Smf، Vf، Hi، T، Bs، Af) عناصر اصلی و لایه‌های اساسی هستند (شکل ۳). در این راستا به منظور اجرای تحلیل در این سیستم، نقشه‌های حاصل از رده‌بندی شاخص‌ها را در قالب لایه‌های رستری و ارزش‌گذاری شده در محیط GIS تهیه و به منظور شناسایی اولویت‌ها و ادغام نمودن نقشه‌ها، شاخص‌های زمین ریختی با توجه به ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (R) اولویت بندی شد. از جذر گرفتن مقادیر ضرایب تعیین، که از نمودار شاخص‌ها نسبت به یکدیگر استخراج گردیده (شکل ۴) و بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده می‌باشد، مقادیر ضرایب همبستگی شاخص‌ها محاسبه شد (جدول ۲). سپس با استفاده از نرم افزار Expert Choice ضرایب تأثیر هر کدام محاسبه گردید. همچنین به منظور بررسی میزان سازگاری نتایج حاصله، ضریب سازگاری (Cr) نیز محاسبه شد. مقادیر ضریب سازگاری $Cr \leq 0.1$ نشان دهنده سطح منطقی از سازگاری در مقایسه زوجی که به معنی ناسازگاری قابل قبول، است (ساتی و وارگاس^۱، ۱۹۹۱).

در مرحله بعد در محیط نرم افزار ArcGIS ضرایب تأثیر با دستور Raster Calculator اعمال و رستر خروجی به دست آمد و در نهایت با دستور Fuzzy Overlay، که امکان تجزیه و تحلیل احتمال یک پدیده متعلق به مجموعه‌های متعدد را در یک تحلیل همپوشانی چند معیاره فراهم می‌کند، حوضه‌های گستره مورد بررسی فازی قرار گرفتند. لازم به ذکر است جهت تلفیق نقشه‌ها براساس میزان اهمیت از عملگر گامای فازی استفاده شد. این عملگر حاصل ضرب جبری، جمع فازی و ضرب فازی بوده که هر دو بخش به توان گاما (عددی بین صفر تا یک) رسیده‌اند. به علت ساختار تابع گاما امکان در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای تمامی گاما میسر می‌شود زیرا در حالتی که گاما برابر با یک باشد، خروجی برابر با همان جمع فازی است و در حالتی که گاما برابر صفر باشد، خروجی برابر با همان ضرب فازی است. در نتیجه با انتخاب صحیح مقدار گاما، می‌توان پارامترهای کاهش و افزایشی را همزمان در نظر گرفته، به مقادیری در خروجی‌ها رسید که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش افزایشی و حساسیت بالای عملگر ضرب فازی و گرایش کاهش و دقت پایین عملگر جمع جبری فازی باشند (صفاری، ۱۳۹۰: ۹۱). گامای فازی که در واقع روابط بین معیارهای ورودی چندگانه را برقرار می‌کند، در مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نیاز به مقادیری بزرگتر از ضرب فازی و در عین حال کوچکتر از جمع فازی باشد. به همین دلیل امیری (۱۳۸۶، ص: ۶۰) اعتقاد دارد که این عملگر زمانی استفاده می‌شود که برخی شواهد اثر کاهش و برخی اثر افزایشی داشته باشند. عبادی نژاد و همکاران (۱۳۸۶، ص: ۴۳) معتقدند در مقایسه با خروجی‌های حاصل از بکارگیری سایر عملگرها، از آنجاکه مقدار عملگر گاما براساس تجربیات موجود درباره موضوع تحت بررسی یا کارشناسی



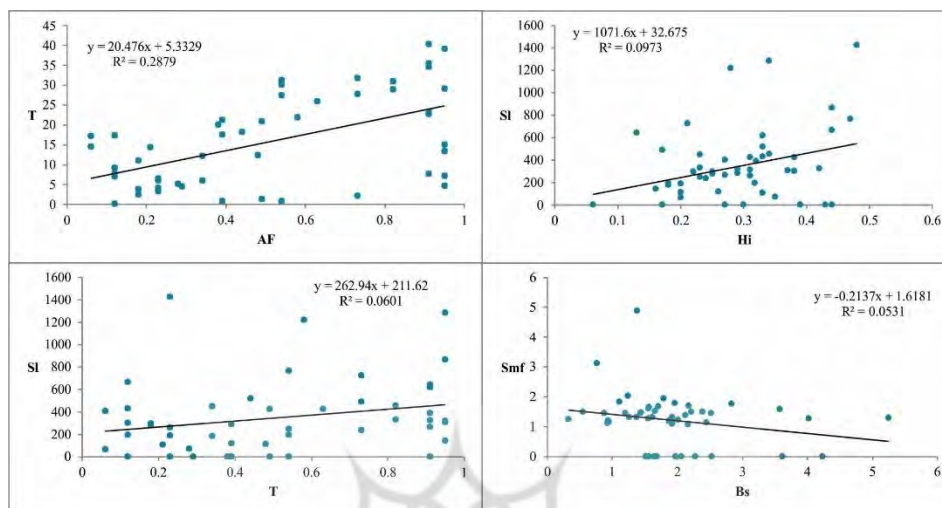
مبتنی بر نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده شده و یا از طریق آزمون‌های سعی و خطا در همخوانی با شواهد واقعی تعیین می‌شود، به استفاده از خروجی‌های آن می‌توان مناسب‌ترین مقادیر را در تطبیق با واقعیت، تعیین نمود. علل ذکر شده از جمله دلایل انتخاب گامای فازی بین دیگر عملگرها برای

بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش هستند. طبقه بندی نهایی بر اساس فاصله هندسی، از روش‌های کلاس‌بندی در نرم افزار ArcGIS که بیشترین هماهنگی را با شرایط منطقه داشته، برای رده بندی فعالیت استفاده شد.

شکل ۳: ساختار سلسله مراتب برای ارزیابی زمین ساخت فعال. در این فرآیند زمین ساخت فعال، هدف نهایی، شاخص‌های Bs، Smf، Af، T، Hi، Vf و SL معیارها و رده بندی این شاخص‌ها، گزینه‌های این نمودار سلسله مراتبی را تشکیل می‌دهند.

داده‌ها

اطلاعات پایه استفاده شده عبارتند از مدل رقومی ارتفاع (DEM^۱) با دقت ۳۰ متر از سازمان زمین شناسی آمریکا، چهار نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و حدوداً بیست و چهار نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در منطقه مورد



مطالعه داده‌های لرزه‌های زمین لرزه‌های $M_w \geq 4/0$ ، برای زمین لرزه‌های از قرن چهارم قبل از میلاد تا سال ۲۰۱۲ از کاتالوگ موسوی بافرویی و همکاران^۲ (۲۰۱۴: ۱-۲۵) و برای زمین لرزه‌های بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ از مرکز لرزه‌نگاری بین‌المللی (ISC^۳) و پژوهشگاه بین‌المللی زمین لرزه‌شناسی و مهندسی زمین لرزه (IIEES)، استفاده شد. شکل ۴: نمونه‌ای از رابطه خطی و مقدار ضریب تعیین بین شاخص‌ها (SL-T, Smf-Bs, T-Af, SL-Hi) در حوضه‌های گسترده مورد بررسی (برگرفته از روش بهرامی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۲۲-۱۹۹).

R								Weight
	Bs	Smf	AF	T	Hi	VF	SI	
Bs		0.230	0.026	0.152	0.085	0.304	0.008	0.015
Smf			0.267	0.035	0.128	0.141	0.042	0.012
AF				0.537	0.028	0.184	0.203	0.025
T					0.063	0.017	0.245	0.021
Hi						0.162	0.312	0.104
VF							0.002	0.116
SI								0.708

جدول ۲: مقادیر ضرایب همبستگی و وزن نهایی برای شاخص‌های گسترده مورد بررسی.

بحث و یافته‌ها

نتایج ارزیابی شاخص‌های ریخت سنجی

شاخص شکل حوضه

^۱ Digital Elevation Model

^۱ Mousavi-Bafrouei et al

^۲ International Seismological Centre

حوضه‌های زهکشی به نسبت جوان در نواحی زمین ساختی فعال تمایل به طولیل شدگی در جهت عمود بر شیب توپوگرافی کوه دارند. ضمن ادامه‌ی روند تکامل یا با کاهش فعالیت زمین ساختی، شکل کشیده حوضه به تدریج به شکل دایره‌ای تبدیل می‌شود (بول و مک فادن^۱، ۱۹۷۷: ۱۱۵-۱۳۸). مقادیر این شاخص در محدوده مطالعاتی و برای ۵۱ حوضه محاسبه (جدول ۳) و نتایج به سه دسته طبقه‌بندی شد. سپس نقشه توزیع شاخص شکل حوضه BS در منطقه مورد مطالعه رسم گردید (شکل ۵الف). مقادیر به دست آمده بین ۰/۳۳ تا ۵/۲۵ می‌باشند. اندازه‌گیری‌های شاخص BS برای اغلب حوضه‌ها (۴۶ حوضه) مقادیر پایین را نشان می‌دهد که مشخصه حوضه‌های مدور، با فعالیت زمین ساختی کم می‌باشند. سه حوضه ۱۲، ۱۵، و ۲۸ در رده ۲ و دو حوضه‌ی ۱ و ۴۷ در رده ۱ قرار گرفتند یعنی حوضه‌های با کشیدگی زیاد و فعالیت زمین ساختی نسبتاً شدیدتر (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان

این شاخص نشانگر توازن میان نیروهای فرسایشی، با تمایل ایجاد یک جبهه کوهستانی نامنظم، فعالیت‌های زمین ساختی، با تمایل ایجاد پیشانی مستقیم، می‌باشد (بول و مک فادن، ۱۹۷۷: ۱۱۵-۱۳۸؛ کلر^۲، ۱۹۸۶: ۱۳۶-۱۴۷). مقادیر Smf محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه پس از تقسیم بندی به سه رده (جدول ۳)، در قالب نقشه توزیع پراکندگی در شکل ۵ب آورده شده است. تنها ۲ حوضه‌ی ۷ و ۱۷ در رده ۱ (فعال) قرار گرفتند که با توجه به حضور گسل‌های مهمی چون نایبند، گوک و شه‌داد، دور از انتظار نبود. مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص Smf برای ۲۸ حوضه فعالیت متوسط را نشان می‌دهد. هر ۱۰ حوضه جای گرفته در رده ۳ (فعالیت کم) عمدتاً در جنوب باختر منطقه مطالعاتی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است ۱۱ حوضه شرایط مناسب برای بررسی این شاخص را نداشتند. به‌طور کلی نتایج به دست آمده نشان از تمرکز مناطق با فعالیت زمین ساختی بالا در شمال خاور گستره است، این در حالی است که کل گستره مورد بررسی دارای مقادیر متوسط تا پائین از لحاظ محاسبه این شاخص می‌باشند (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی

طول آبراهه و زهکشی‌های فرعی در دو سوی آبراهه اصلی می‌توانند برای ارزیابی بالآآمدگی فعال مورد استفاده قرار گیرند. براساس نتایج حاصل از طبقه بندی شاخص Af به سه رده (جدول ۳)، نقشه توزیع این شاخص در منطقه مورد مطالعه رسم شد (شکل ۵ج). اکثر حوضه‌ها (۲۴ عدد) دارای کج‌شدگی زیاد بوده (رده ۱)، که با توجه به تمرکز این حوضه‌ها در خاور و جنوب باختر منطقه و حضور راندگی‌ها، چین خوردگی‌ها و مناطق فشارشی، می‌توان زمین ساخت فعال را عامل کج‌شدگی و عدم تقارن آن‌ها دانست. ۱۱ حوضه در رده ۲ و ۱۶ حوضه در رده ۳ قرار می‌گیرند. کمترین مقدار به دست آمده برای فاکتور عدم تقارن ۰/۳ بوده که مربوط به حوضه ۳۳ می‌باشد؛ بیشترین مقدار ۴۰/۴ است و متعلق به حوضه ۳۴ (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی حوضه

کج‌شدگی سیستم آبراهه‌ها نشان دهنده کج‌شدگی زمین بوده و بررسی تغییرات مقدار آن در بخش‌های مختلف یک ناحیه، اختلاف در میزان بالآآمدگی را نشان می‌دهد. برای یک حوضه متقارن $T=0$ و با افزایش عدم تقارن، T افزایش یافته و مقدار آن به ۱ نزدیک می‌شود. مقادیر این شاخص به سه رده تقسیم و نتایج به دست آمده بر پایه الگوی بردارهای کج‌شدگی در حوضه‌های زهکشی مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. نهایتاً نقشه توزیع شاخص کج‌شدگی (T) در حوضه

³. Bull and McFadden

². Keller

زهکشی منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۵د). این نقشه نشان می‌دهد که اغلب حوضه‌ها (۲۷ عدد) دارای کج‌شدگی زیاد بوده و در رده ۱ قرار می‌گیرند. همچنین ۱۴ حوضه در رده ۲ و ۱۰ حوضه در رده ۳ قرار گرفته‌اند. مقدار به دست آمده برای فاکتور T ۰/۰۶ بوده که مربوط به حوضه‌های ۲۹ و ۳۲ می‌باشد؛ و بیشترین مقدار، ۰/۹۵، متعلق به حوضه‌های ۲، ۲۶، ۲۷، ۳۱، ۳۸ و ۴۲ است (عامری و همکاران، ۲۰۲۲). مقادیر محاسبه شده شاخص تقارن توپوگرافی عرضی با مقادیر محاسبه شده شاخص AF همخوانی مناسبی دارد.

شاخص انتگرال فراز سنجی

این شاخص که پراکندگی ارتفاع یک منطقه مشخص از یک محدوده را توصیف می‌کند (استراهلر^۱، ۱۹۵۲؛ ۱۱۱۷-۱۱۴۲)، به صورت مساحت زیر منحنی فرازسنجی، که شامل رسم نسبت ارتفاعی در برابر نسبت مساحت است، تعریف شده و بنابراین حجمی از یک حوضه را که فرسایش نیافته، نشان می‌دهد (الحمودنی و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۱۵۰-۱۷۳). مقادیر بالای این شاخص نشان دهنده نواحی فعال و جوان و مقادیر پایین آن با نواحی قدیمی که فرآیند فرسایش بر آن‌ها حاکم است، مرتبطاند (الحمودنی و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۱۵۰-۱۷۳). منحنی‌های فراز سنجی (شکل ۶الف) و نقشه توزیع شاخص انتگرال فراز سنجی (شکل ۶ب)، با توجه به نتایج حاصل از تقسیم این شاخص به سه رده، در منطقه مورد مطالعه رسم گردید. بر طبق محاسبات انجام شده برای این شاخص، با توجه به مقدار متوسط انتگرال فرازسنجی ۷ حوضه (۲، ۹، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۴۸، ۵۰) و منحنی فراز سنجی S شکل آن‌ها، می‌توان گفت این حوضه‌ها در مرحله بلوغ چرخه فرسایشی دیویس^۲ (۱۸۹۹؛ ۱۷۳-۱۵۰) قرار گرفته‌اند، ۴۴ حوضه دیگر با مقادیر پایین انتگرال فرازسنجی و منحنی فراز سنجی مقعر، ویژگی‌های حالت پیری در چرخه دیویس (۱۸۹۹؛ ۱۷۳-۱۵۰) را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که هیچ حوضه‌ای در رده ۱، قرار نگرفت (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن

این نسبت نشان دهنده رابطه میان میزان فعالیت زمین ساختی و تشکیل دره در منطقه بوده که برای ایجاد تمایز بین دره‌های V شکل و U شکل طراحی شده است. هرچه ریخت شناسی دره به شکل U نزدیک شود مقدار Vf افزایش یافته که نشان دهنده تعریض و تسطیح دره توسط آب‌های جاری و نرخ بالآمدگی زمینساختی کم است (کلر و پینتر، ۱۹۹۶). با توجه به تعدد دره‌های واجد شرایط در هر حوضه، شاخص Vf برای هر یک از دره‌های موجود در هر حوضه، به‌طور جداگانه محاسبه و سپس به روش حسابی میانگین‌گیری شد. مقادیر این شاخص به سه دسته طبقه بندی شدند. تعدادی از مقاطع عرضی رسم شده برای دره‌های منطقه جهت محاسبه شاخص Vf و مقادیر Vf محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه که در جدول ۳ و شکل ۷ آورده شده، بین ۰/۱۱ - ۰/۸۲ می‌باشند. بر طبق محاسبات انجام شده برای شاخص Vf، ۲۲ حوضه در رده ۱ که نشان دهنده دره‌های عمیق V شکل به همراه جریان‌های فعالی است که در حال حفر کف دره‌اند و معمولاً با بالآمدگی زمین ساختی همراه هستند، ۱۴ حوضه در رده ۲ قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است ۱۵ حوضه فاقد شرایط مناسب برای بررسی این شاخص بودند (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

شاخص طول-شیب آبراهه

شاخص برای ارزیابی رابطه بین فعالیت احتمالی زمین ساختی، مقاومت سنگ و توپوگرافی در امتداد حوضه زهکشی استفاده می‌شود (کلر و پینتر، ۲۰۰۲). در مناطقی که دارای لیتولوژی نرم هستند مقادیر این شاخص پائین و نقاط با مقادیر بالای

¹. Strahler

². Davis

SL، دارای لیتولوژی سخت است. در مناطقی که عکس این شرایط حاکم باشد، می‌توان آن را متأثر از ساختارهای زمین ساختی فعال دانست. نتایج اندازه‌گیری مقادیر این شاخص به سه رده تقسیم شدند. با توجه به میزان عددی شاخص SL و تقسیم بندی آن (جدول ۳) نقشه مقادیر شاخص طول-شیب آبراهه و توزیع مقاومت زمین شناسی (شکل ۸الف)، خطوط تراز (شکل ۸ب) و نقشه توزیع این شاخص (شکل ۹) برای منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید. همچنین مقطع طولی آبراهه‌های حوضه زهکشی منطقه مورد مطالعه که نشان دهنده تغییرات SL در مقابل مقاومت سنگ می‌باشد، رسم شد (شکل ۸ج). سه حوضه ۷، ۱۶ و ۳۱ در رده ۱، ۷ حوضه در رده ۲، ۳۲ حوضه در رده ۳ و ۹ حوضه فاقد شرایط مناسب برای بررسی این شاخص بودند (عامری و همکاران، ۲۰۲۲).

نتایج محاسبه فعالیت نسبی زمین ساختی

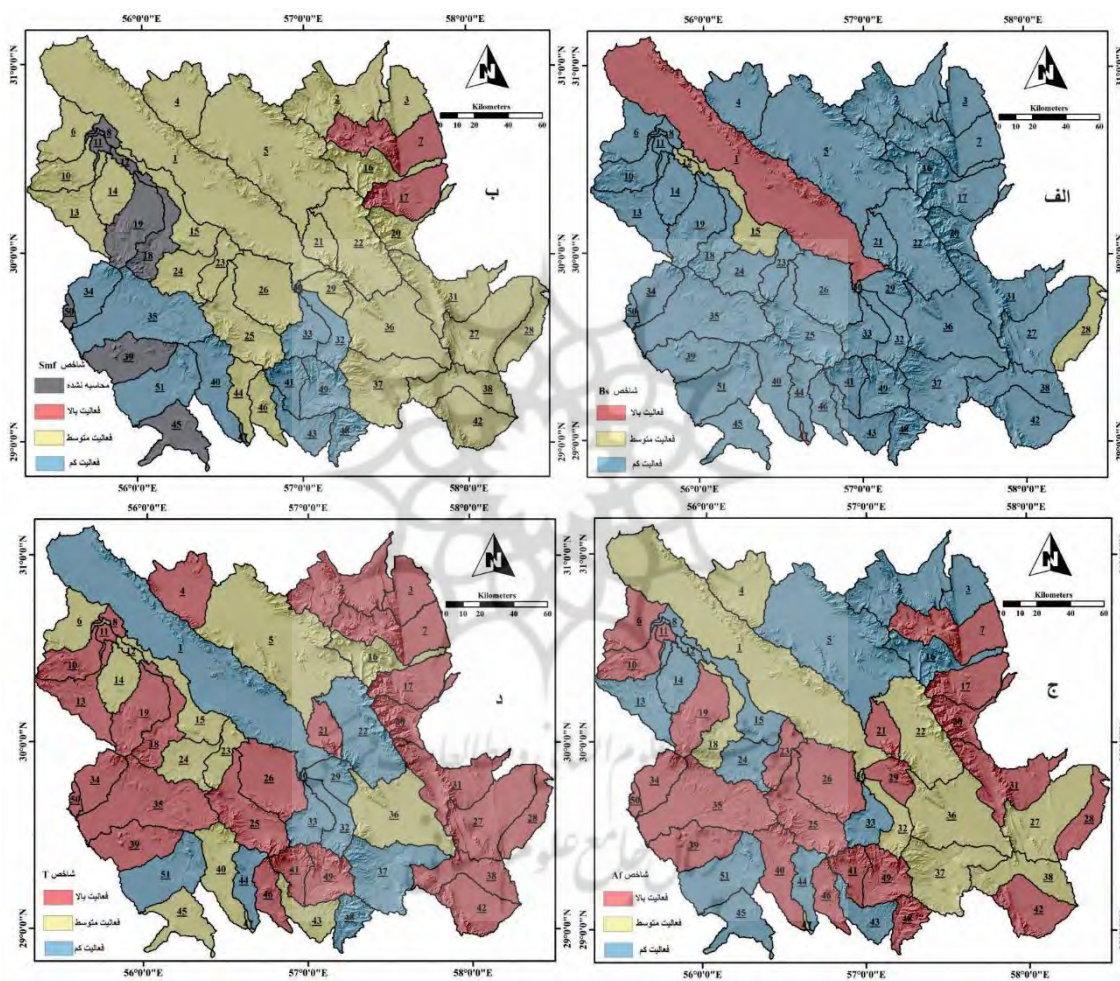
براساس شاخص‌های ریخت زمین ساختی، منطقه مطالعاتی از لحاظ نرخ فعالیت زمین ساختی، به سه رده تقسیم شد که رده ۲ با مساحت ۳۷۴۱/۵ کیلومتر مربع، ۵/۹٪، رده ۳ با مساحت ۲۶۷۶۴/۸ کیلومتر مربع، ۵۴/۹٪ و رده ۴ با مساحت ۱۹۵۳۰/۲ کیلومتر مربع، ۳۹/۲٪ از کل منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است که هیچ یک از حوضه‌ها در رده ۱ قرار نگرفته‌اند (عامری و همکاران، ۲۰۲۲). در مقایسه نتایج Iat با ساختارهای اصلی منطقه و رومرکز زمین لرزه‌ها (شکل ۱۰) تناقضاتی به چشم می‌خورد. برای مثال علی‌رغم حضور زمین لرزه‌های متعدد و گسل‌های فعالی چون راور در حوضه ۲، این حوضه در رده فعالیت متوسط قرار گرفته است. همچنین حوضه ۵ علی‌رغم حضور گسل‌های کوهبنان و جرفافک به همراه تجمع فراوانی از رومرکز زمین لرزه‌ها، در رده فعالیت پایین جای گرفته است. در تحلیل این عدم همخوانی می‌توان گفت از آنجا که شاخص Iat براساس وزن‌دهی به شاخص‌ها صورت نگرفته، در محاسبه آن کلیه شاخص‌ها با نسبت اهمیت برابر لحاظ شده‌اند. بر این اساس با توجه به اینکه برخی شاخص‌ها به طور مستقیم و دیگری به طور غیر مستقیم با فعالیت زمین ساختی منطقه مرتبط هستند، منطقی به نظر می‌رسد که بعضی از شاخص‌ها دارای وزن بیشتری نسبت به شاخص دیگر باشند. احتمالاً همین مسئله عامل وجود برخی تناقضات در تحلیل نهایی توسط روش Iat است به همین دلیل در بخش بعدی سعی شده تا با استفاده از روش AHP و مقایسه آن با نتایج Iat، بهترین تحلیل زمین ساختی حاصل شود.

لازم به ذکر است که در بحث محاسبه شاخص‌های ریخت زمین ساختی و Iat، هدف ارزیابی فعالیت نسبی زمین ساختی است نه بررسی کمیت و کیفیت لرزه‌خیزی. یعنی بالا بودن یک شاخص یا حتی مجموع آن‌ها (Iat)، به معنای فعال بودن یک حوضه از دیدگاه زمین ساختی است و این الزاماً نشان‌دهنده لرزه‌خیز بودن آن حوضه نمی‌باشد. در توضیح این مسئله می‌توان به کار آلن و همکاران^۱ (۱۹۶۵) اشاره کرد که پس از مطالعه گسل‌های منطقه کالیفرنیا جنوبی^۲ به این نتیجه رسیدند که بیشتر و شاید تمامی زمین لرزه‌های تاریخی بزرگی که با گسلش سطحی همراه بوده‌اند و نیز زمین لرزه‌های دستگاهی تا بزرگای ۶٫۰، بر روی گسل‌های بزرگ با سابقه جابجایی‌های گسترده کواترنر، رخ داده‌اند و نمایانگر مناطق فعال، هم از منظر زمین ساختی و هم لرزه‌ای، هستند. آن‌ها همچنین متوجه شدند که تکانه‌های کوچک‌تر به طور تصادفی در منطقه پخش شده و بیشتر آن‌ها به وضوح با هیچ گسل سطحی قابل نقشه برداری مرتبط نیستند؛ شاید بتوان آن‌ها را از نوع مناطقی دانست که هرچند به لحاظ زمین ساختی غیرفعال بوده ولی فعالیت لرزه‌ای، هرچند ناچیز، نشان می‌دهند. آن‌ها معتقدند مناطقی که از نظر لرزه‌ای غیرفعال بوده و عموماً فاقد ساختارهای فعال و گسل‌های کواترنر هستند، به عبارت دیگر از منظر زمین ساختی هم غیرفعال‌اند، احتمالاً بلوک‌های پایدار می‌باشند. دسته‌ی آخر مناطقی هستند که طبق ارزیابی

^۱ . Allen et al

^۲ . Southern California

فعالیت نسبی زمین ساختی و ساختارهای موجود، فعال بوده و گسلش کواترنر گسترده‌ای را نشان می‌دهند ولی به لحاظ لرزه‌ای فعالیت بسیار کمی داشته یا فاقد سابقه لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی‌اند. علت این شرایط یا گپ لرزه‌ای^۱ است که امکان دارد شرایطی موقتی بوده و این مکان‌ها کاندیدهای احتمالی برای رخداد زمین لرزه‌های بزرگ آینده باشند؛ و یا اینکه این مناطق با دگرشکلی‌های شکل پذیر^۲ از نوع غیرلرزه‌ای^۳ همراه می‌باشند. می‌توان جهت اطمینان از تجمع کرنش در چنین مناطقی از مطالعات تکمیلی و کنترل ژئودتیکی کافی بهره برد (آن و همکاران، ۱۹۶۵: ۷۵۳).

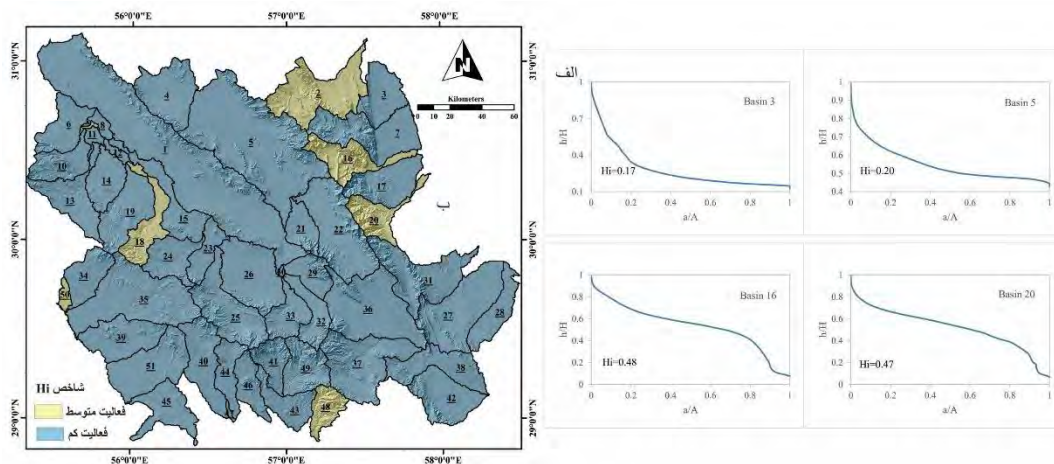


شکل ۵: نحوه توزیع رده‌های شاخص: الف) Bs، ب) Smf، ج) AF و د) T در محدوده مورد مطالعه

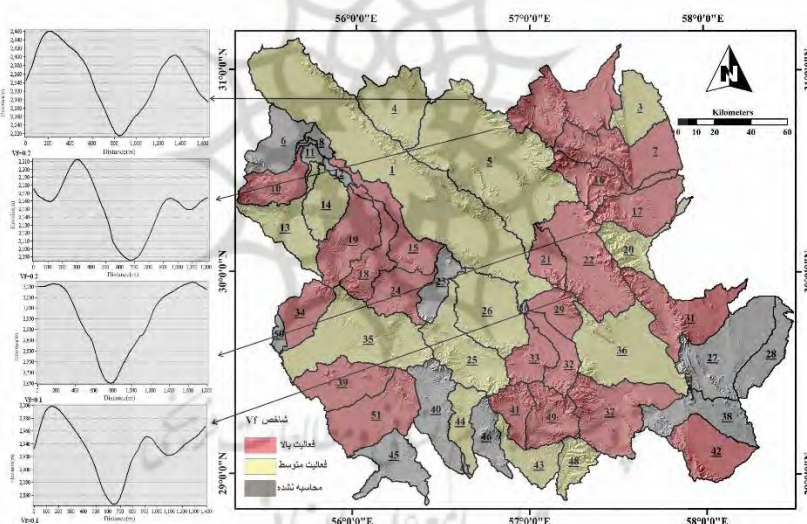
۳ . seismic gap

۱ . ductile

۲ . aseismic



شکل ۶: الف) تعدادی از منحنی‌های فراز سنجی رسم شده برای حوضه‌های ۳، ۵، ۱۶، ۲۰. ب) نحوه توزیع رده‌های شاخص Hi در منطقه مطالعاتی.



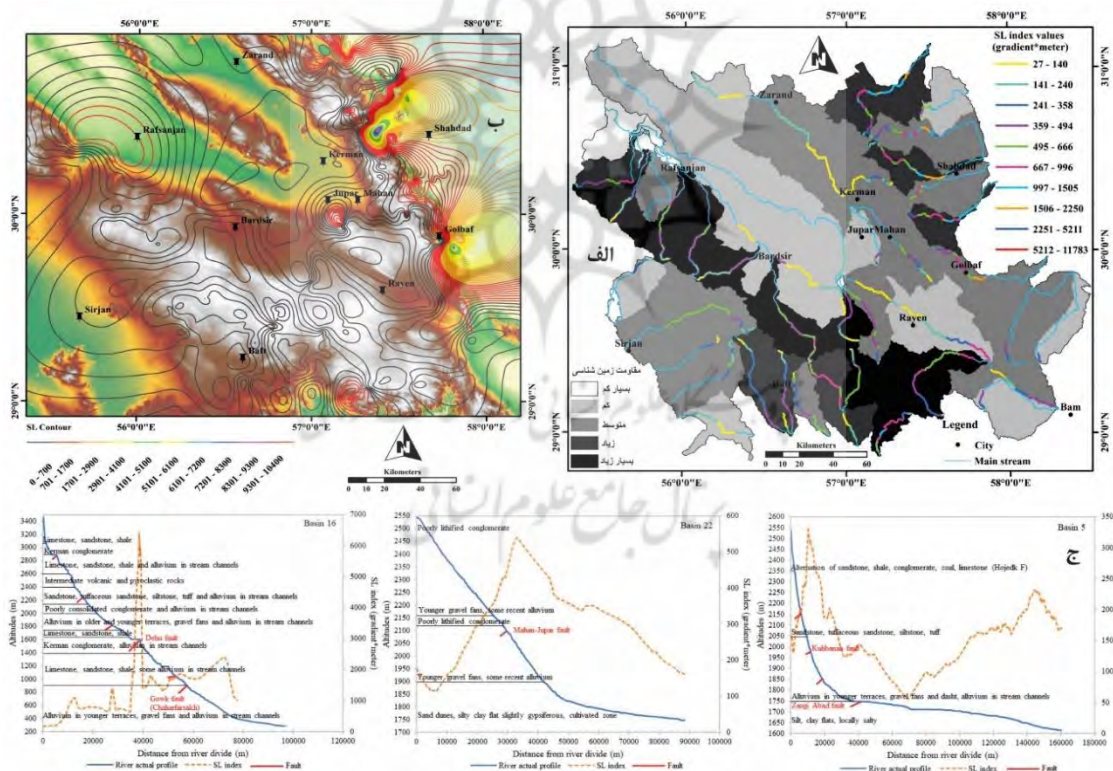
شکل ۷: نحوه توزیع رده‌های شاخص VF به همراه تعدادی از مقاطع عرضی رسم شده برای دره‌های در منطقه مطالعاتی

نتایج تحلیل سلسله مراتبی

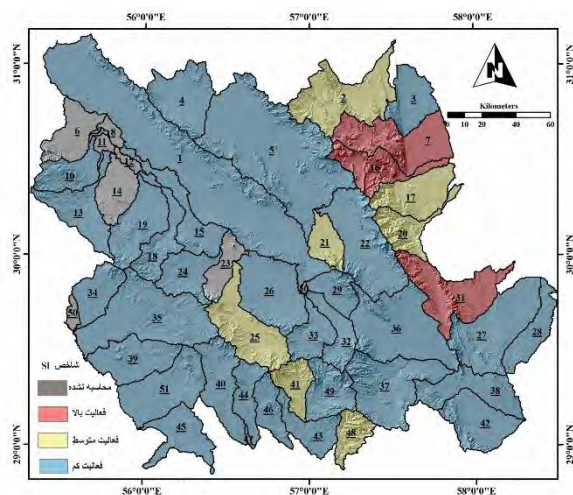
همانطور که در بخش روش محاسبه‌ی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی توضیح داده شد، فاکتورها و ضرایب مربوط به AHP جهت ارزیابی نهایی محاسبه شد. Cr به دست آمده در این تحقیق ۰/۰۷ بود، که گویای سازگاری مناسب فاکتورهای انتخاب شده در ماتریس مقایسه زوجی است. با توجه به قابل قبول بودن ارزش CR، وزن‌های نهایی اختصاص داده شده به هر یک از شاخص‌ها عبارتند از: Bs (۰/۰۱۵)، Smf (۰/۰۲۵)، AF (۰/۰۲۱)، T (۰/۱۰۴)، Vf (۰/۱۱۶)، SL (۰/۷۰۸) (جدول ۲). بر مبنای نتایج این روش، یافته‌ها به چهار شامل رده ۱ خیلی فعال ($AHP \leq 0.057$)، رده ۲ فعال ($0.057 < AHP < 0.198$)، رده ۳ فعالیت متوسط ($0.198 \leq AHP < 0.546$) و رده ۴ فعالیت کم ($AHP \geq 0.546$) تقسیم شده‌اند. نهایتاً فعالیت نسبی زمین ساختی همپوشانی شده با اعمال ضرایب تهیه شد (شکل ۱۱). بر این اساس رده ۱ (فعالیت زمین ساختی خیلی بالا) شامل حوضه‌های ۲، ۷، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۱، ۳۵، ۴۱ و ۴۸ با مساحت ۱۰۲۲۸ کیلومتر مربع، ۲۱٪، رده ۲ (فعالیت زمین ساختی بالا) شامل حوضه‌های ۳، ۱۰، ۱۷، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۳۲، ۳۶، ۳۷، ۴۴، ۴۹ و ۵۱ با

مساحت ۱۱۹۴۷ کیلومتر مربع، ۲۴٪، رده ۳ (فعالیت زمین ساختی متوسط) شامل حوضه‌های ۱، ۴، ۵، ۱۳، ۱۵، ۲۶، ۳۳، ۳۴ و ۴۳ با مساحت ۱۵۷۲۸ کیلومتر مربع، ۳۱٪ و در نهایت رده ۴ (فعالیت زمین ساختی پائین) شامل حوضه‌های ۶، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۸، ۱۹، ۲۳، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۲، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۰ با مساحت ۱۲۱۳۴ کیلومتر مربع، ۲۴٪ از کل منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده اند (شکل ۱۱).

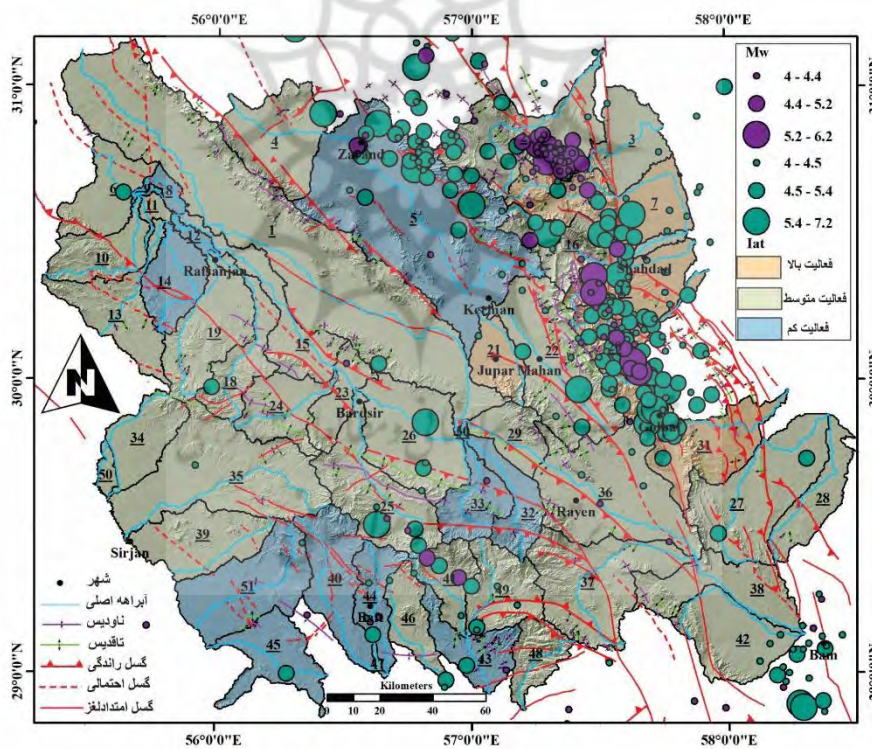
حوضه‌های با فعالیت زمین ساختی خیلی بالا که عمدتاً در قسمت شمال خاوری و جنوب باختری واقع شده‌اند، همگی در امتداد گسل‌های گوک، کوهبنان، راور، رفسنجان و پایانه‌های شمالی گسل سبزواران مثل ساردوئیه و لاله‌زار قرار گرفتند که سابقه لرزه‌خیزی شناخته شده‌ای دارند. به علاوه توزیع زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاهی در محدوده مورد مطالعه (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که تمرکز فعالیت لرزه‌ای در این حوضه‌ها بیشتر از سایر قسمت‌ها بوده و کاملاً با نتایج به دست آمده در این مقاله مطابقت دارد. همچنین حوضه‌های با فعالیت زمین ساختی بالا عمدتاً در راستای گسل‌هایی مانند نایبند، ماهان-جوپار، راین، دلفارد، رفسنجان و کوهبنان واقع شده‌اند. از آنجا که حوضه‌های رده ۱ و ۲ بیشترین مساحت محدوده مطالعاتی را تشکیل داده و با توجه به حضور شهرهایی چون کرمان، ماهان، جوپار، راین، بردسیر، گلباف، زرنده، بافت و شهداد در این منطقه، انجام مطالعات تکمیلی در این محدوده الزامی می‌باشد.



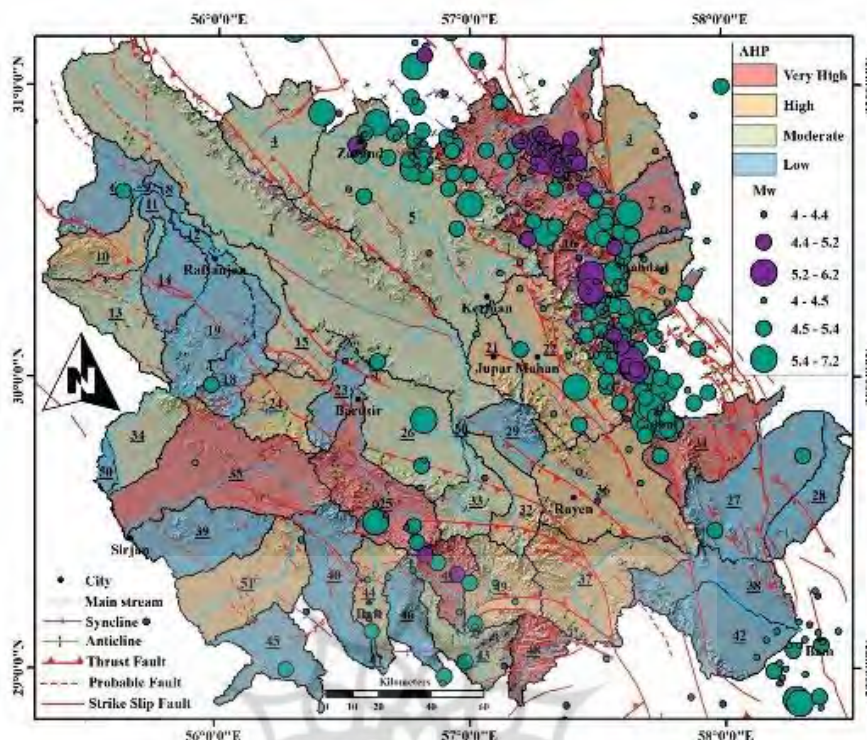
شکل ۸: الف) مقادیر شاخص SL در طول شبکه زهکشی بر پایه نقشه توزیع مقاومت زمین شناسی در حوضه مورد مطالعه. ب) خطوط تراز تهیه شده از شاخص SL در حوضه زهکشی منطقه مورد مطالعه. ج) مقطع طولی آبراه‌های حوضه زهکشی منطقه مورد مطالعه.



شکل ۹: نحوه توزیع رده‌های شاخص SL در محدوده مورد مطالعه



شکل ۱۰: نقشه نهایی فعالیت نسبی زمین ساختی با استفاده از شاخص فعالیت نسبی زمین ساختی (Iat)، به همراه ساختارهای زمین شناسی (گسل‌ها و چین خوردگی‌ها) و رومرکز زمین لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۱: نقشه نهایی فعالیت نسبی زمین ساختی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به همراه ساختارهای زمین شناسی (گسل‌ها و چین خوردگی‌ها) و رومرکز زمین لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه

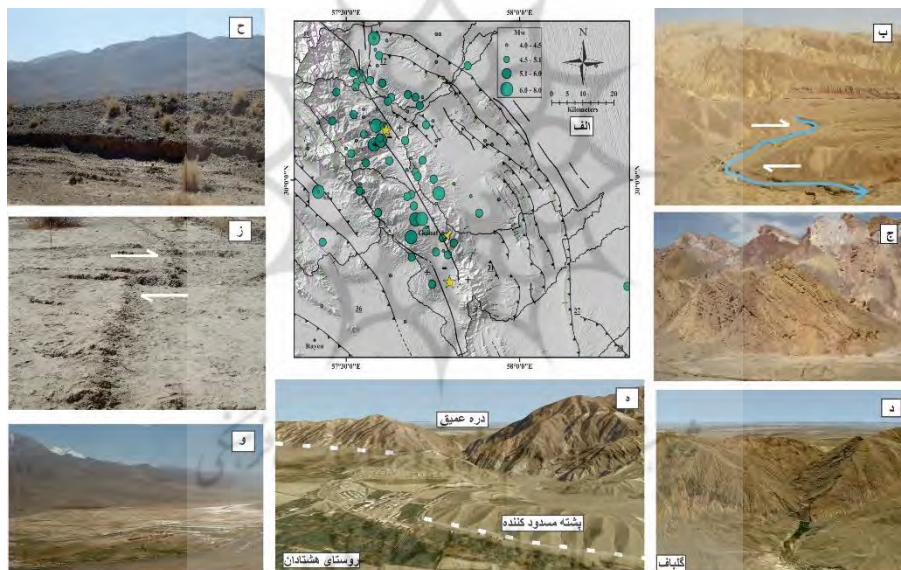
مقایسه نتایج حاصل از دو روش AHP و Iat

در این بخش کیفیت نتایج حاصله از دو روش AHP و Iat، به کمک شواهد صحرایی، داده‌های لرزه‌ای و مقایسه با مطالعات پیشین در این محدوده بررسی می‌شود. در تحلیل صورت گرفته به روش Iat، ۴۳/۲٪ رومرکز زمین لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۴ در حوضه‌های فعال، ۳۹/۲٪ در حوضه‌های با فعالیت متوسط و ۱۷/۶٪ در حوضه‌های با فعالیت کم قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰). در حالیکه این ارقام برای نتایج حاصل از روش AHP بدین صورت است که حوضه‌های بسیار فعال تا فعال ۸۱/۸٪، حوضه‌های با فعالیت متوسط ۱۳/۸٪ و حوضه‌های با فعالیت کم ۴/۴٪ (شکل ۱۱). یعنی حوضه‌های فعال در روش AHP، بیشتر بوده و انطباق مناسب‌تری با داده‌های لرزه‌ای دارند.

بر اساس مطالعات صحرایی حوضه‌هایی که در روش AHP به رده‌های فعال تر صعود کرده بودند همگی شواهد ریخت زمین ساختی فعال نشان می‌دهند؛ به ویژه حوضه‌هایی که تحت تأثیر فعالیت گسل‌هایی چون کوهبنان، گوک، نایبند، لکرکوه و سبزواران قرار دارند. به عنوان مثال حوضه ۲۰ و ۳۱، این دو حوضه که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند، از رده فعال در روش Iat به رده بسیار فعال در روش AHP تغییر کردند. بارزترین ساختار حاضر در این دو حوضه، سه قطعه از گسل گوک بوده که با رخداد زمین لرزه (شکل ۱۲ الف)، گسیختگی‌های سطحی همزمان با زمین لرزه (شکل ۱۲ ز)، ایجاد حوضه‌های جدایشی-کششی حاصل از پله به راست قطعات راستگرد گسل گوک (شکل ۱۲ و)، افزایش گسلی (شکل ۱۲ ج)، جابجایی راستگرد آبراهه‌ها (شکل ۱۲ ب)، دره‌های عمیق (شکل ۱۲ د و ه) و کج شدگی و خردشدگی لایه‌ها (شکل ۱۲ ج) همراه می‌باشد. از دیگر ساختارهای این دو حوضه می‌توان به حضور گسل شهادت و چین خوردگی‌های فراوان اشاره کرد. فراوانی رومرکز زمین لرزه‌های با بزرگای $Mw > 5$ در این دو حوضه، گویای لرزه‌خیزی بالای آن است. از انواع بزرگ و مخرب این زمین لرزه‌ها می‌توان به زمین لرزه‌های سال ۱۹۴۸ با بزرگای $Mw = 6/1$ ، ۱۹۸۱ با بزرگای $Mw = 6/6$ و $Mw = 7/2$ ، ۱۹۹۸ با بزرگای $Mw = 6/6$ اشاره کرد (شکل ۱۲ الف).

مطالعات لرزه زمین ساختی و ساختاری انجام شده پیشین در محدوده مورد مطالعه که شواهدی از فعالیت زمین ساختی در منطقه ارائه کرده‌اند نیز کاملاً با نتایج به دست آمده همسو می‌باشند. به عنوان نمونه می‌توان به قرارگیری رومرکز سه زمین لرزه آذر ماه ۱۳۹۶ هجری با بزرگای ۶/۱، ۵/۹ و ۶/۰ (نعمتی و همکاران^۱، ۲۰۲۰) در حوضه ۲، که از رده متوسط در روش Iat به رده بسیار فعال در روش AHP تغییر کرده اشاره نمود. به علاوه گزارش شواهد فعالیت زمین ساختی مرتبط با این زمین لرزه‌ها مانند گسیختگی سطحی به طول ۶ کیلومتر در رسوبات مخروط افکنه ای، زون دگرریختی با بیشینه پهنای حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر، همچنین بالا آمدگی حداقل یک متر، بریدگی آبرفتهای کوتاه‌تر به وسیله راندگی پایانه گسل لکرکوه و دگرریختی در فرادیواره راندگی به صورت درزه‌های کششی (طالبیان و همکاران، ۱۳۹۷). لازم بذکر است این حوضه در محل تلاقی گسل‌های نایبند، لکرکوه، کوهبنان و گوک واقع شده و عارضه شاخص توپوگرافی آن ارتفاعات میان کوه خاور هجدک می‌باشد.

به طور کلی، با توجه به همخوانی بهتر نتایج حاصله از روش AHP با کارهای محاسباتی، مشاهدات صحرایی، پیشینه لرزه‌ای، ساختارهای فعال و مطالعات پیشین در این محدوده، می‌توان گفت که این روش با ارائه تجزیه و تحلیل‌های زمین ریخت سنجی منطقی‌تر، امکان ارزیابی سریع‌تر و دقیق‌تر مناطق فعال زمین ساختی و خطرات احتمالی لرزه‌ای را فراهم می‌کند.



شکل ۱۲: الف) تصویری از گسل‌ها، چین‌ها و رومرکز زمین لرزه‌های حوضه ۲۰ و ۳۱، ب) جابجایی راستگرد آبراهه حاصل عملکرد گسل گوک، ج) نمونه ای از کج شدگی و خردشدگی لایه‌ها تحت تأثیر گسل گلباف، د) نمونه‌ای از دره‌های عمیق مجاور گلباف که مکان آن توسط سنجاق زرد رنگ در بخش الف نشان داده شده است، ه) پشته مسدود کننده و دره عمیق مجاور هشتادان. گسل گلباف با خط چین سفید مشخص شده است، و) نمونه‌ای از حوضه‌های جدایشی-کششی که با ستاره‌های زرد رنگ در بخش الف مشخص شده‌اند، ز) کرت‌های کشاورزی در بالایای فندق‌کع که توسط گسیختگی همزمان با زمین لرزه ۱۹۹۸ دچار بریدگی راست بر شده‌اند، ح) افزاز گسل گوک.

جدول ۳: مقادیر و رده‌بندی شاخص‌ها به همراه نتایج حاصل از تحلیل شاخص فعالیت نسبی زمین ساختی (Iat) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) حوضه‌ها در گستره مورد پژوهش

Basin	Bs	Class	Smf	class	AF-50	Class	T	Class	Hi	Class	VF	Class	SI	Class	Iat	AHP
1	5.25	1	1.29	2	9.31	2	0.12	3	0.18	3	0.51	2	197.08	3	3	3
2	1.43	3	1.45	2	4.76	3	0.95	1	0.44	2	0.37	1	863.98	2	3	1
3	0.93	3	1.11	2	2.21	3	0.73	1	0.17	3	0.54	2	488.47	3	3	2
4	0.95	3	1.16	2	-12.37	2	0.48	1	0.2	3	0.82	2	112.71	3	3	3
5	1.87	3	1.17	2	-3.46	3	0.23	2	0.2	3	0.53	2	188	3	4	3
6	0.55	3	1.49	2	-20.06	1	0.38	2	0.17	3	-	-	-	-	3	4
7	2.16	3	1.06	1	21.92	1	0.58	1	0.28	3	0.27	1	1213.3	1	2	1
8	1.97	3	-	-	-1.37	3	0.49	1	0.06	3	-	-	-	-	4	4
9	2.27	3	-	-	-4.21	3	0.23	2	0.43	2	-	-	-	-	4	4
10	1.92	3	1.30	2	-20.91	1	0.49	1	0.31	3	0.23	1	420.77	3	3	2
11	1.65	3	-	-	30.19	1	0.54	1	0.39	3	-	-	-	-	3	4
12	3.61	2	-	-	-0.85	3	0.39	2	0.39	3	-	-	-	-	4	4
13	0.94	3	1.20	2	-0.84	3	0.54	1	0.317	3	0.56	2	192.8	3	3	3
14	1.66	3	1.50	2	-4.62	3	0.29	2	0.27	3	0.72	2	-	-	4	4
15	3.57	2	1.57	2	-5.19	3	0.28	2	0.35	3	0.46	1	68.634	3	3	3
16	2.45	3	1.13	2	6.63	3	0.23	2	0.48	2	0.28	1	1419.4	1	3	1
17	1.92	3	1.08	1	27.91	1	0.73	1	0.21	3	0.14	1	723.83	2	2	2
18	2.53	3	-	-	7.77	2	0.91	1	0.42	2	0.44	1	323.99	3	3	4
19	1.69	3	-	-	29	1	0.82	1	0.34	3	0.38	1	452.56	3	3	4
20	1.93	3	1.20	2	27.57	1	0.54	1	0.47	2	0.54	2	765	2	2	1
21	1.89	3	1.21	2	-34.61	1	0.91	1	0.13	3	0.44	1	640.58	2	2	2
22	2.12	3	1.38	2	-11.15	2	0.18	3	0.25	3	0.43	1	293.38	3	3	2
23	0.33	3	1.24	2	-17.65	1	0.39	2	0.17	3	-	-	-	-	3	4
24	1.26	3	1.31	2	-6.019	3	0.23	2	0.31	3	0.31	1	260.24	3	3	2
25	2.21	3	1.48	2	-18.33	1	0.44	1	0.33	3	0.63	2	517.28	2	3	1
26	1.44	3	1.47	2	-15.12	1	0.95	1	0.16	3	0.7	2	141.62	3	3	3
27	1.62	3	1.30	2	13.43	2	0.95	1	0.29	3	-	-	320.25	3	3	4
28	4.02	2	1.25	2	31.31	1	0.54	1	0.23	3	-	-	249.59	3	3	4
29	1.55	3	1.59	2	17.26	1	0.06	3	0.2	3	0.43	1	67.347	3	3	4
30	1.51	3	-	-	7.7	2	0.12	3	0.3	3	-	-	-	-	4	4
31	2.01	3	1.21	2	29.218	1	0.95	1	0.34	3	0.16	1	1279.3	1	2	1
32	2.17	3	1.69	3	14.66	2	0.06	3	0.27	3	0.41	1	402.83	3	4	2
33	1.11	3	1.81	3	-0.3	3	0.12	3	0.38	3	0.35	1	297.89	3	4	3
34	1.96	3	1.77	3	-40.4	1	0.91	1	0.27	3	0.46	1	264.11	3	3	3
35	1.79	3	1.93	3	22.73	1	0.91	1	0.32	3	0.78	2	385.52	3	3	1
36	1.37	3	1.30	2	-12.23	2	0.34	2	0.23	3	0.62	2	449.12	3	3	2
37	0.88	3	1.455	2	-7.11	2	0.12	3	0.33	3	0.26	1	428.72	3	3	2
38	1.55	3	1.25	2	-7.28	2	0.95	1	0.37	3	-	-	308.23	3	3	4

Basin	Bs	Class	Smf	class	AF-50	Class	T	Class	Hi	Class	VF	Class	SI	Class	Iat	AHP
39	1.51	3	-	-	31.87	1	0.73	1	0.24	3	0.31	1	234.66	3	3	4
40	2.83	3	1.76	3	-21.38	1	0.39	2	0.29	3	-	-	285.3	3	4	4
41	1.56	3	1.64	3	-23.31	1	0.91	1	0.33	3	0.32	1	619.35	2	3	1
42	1.2	3	1.44	2	39.18	1	0.95	1	0.31	3	0.25	1	314.08	3	3	4
43	0.76	3	3.12	3	0.93	3	0.39	2	0.26	3	0.58	2	120.79	3	4	3
44	2.39	3	1.48	2	2.49	3	0.18	3	0.22	3	0.64	2	293.29	3	4	2
45	1.56	3	-	-	6.03	3	0.34	2	0.18	3	-	-	179.8	3	4	4
46	2.52	3	1.45	2	-30.96	1	0.82	1	0.23	3	-	-	329.07	3	3	4
47	4.23	1	-	-	14.37	2	0.21	2	0.33	3	-	-	107.59	3	3	4
48	1.38	3	4.87	3	17.48	1	0.12	3	0.44	2	0.6	2	666.73	2	3	1
49	1.24	3	2.01	3	-26.03	1	0.63	1	0.38	3	0.11	1	424.94	3	3	2
50	2.06	3	-	-	-35.52	1	0.91	1	0.44	2	-	-	-	-	3	4
51	1.71	3	1.67	3	3.86	3	0.18	3	0.25	3	0.43	1	274.87	3	4	2

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای افزایش دقت نتایج به دست آمده از محاسبات ریخت‌سنجی، جهت تحلیل فعالیت زمین‌ساختی محدوده‌ای واقع در باختر بلوک لوت، که از لرزه‌خیزترین مناطق ایران است، استفاده شد. برخلاف مطالعات پیشین، در این مقاله برای تحلیل AHP بجای دخالت نظرسنجی یا قضاوت‌های فردی و تجربی، داده‌های به دست آمده از رابطه خطی بین شاخص‌ها، مورد استفاده قرار گرفت؛ که با توجه به نتایج حاصله و در مقایسه با کارهای انجام شده قبلی، مشخصاً قابل اعتمادتر می‌باشند. بر این اساس، ادغام نتایج مورفومتری و روش AHP در مقایسه با بررسی‌های صحرائی، تصاویر ماهواره‌ای و ساختارهای فعال، مطابقت بالایی داشته و نشان داد که منطقه مورد مطالعه، به ویژه در خاور و جنوب باختری، از لحاظ زمین‌ساختی فعال است. اگرچه محققین پیشین، فعالیت لرزه‌ای منطقه را بالا توصیف نموده‌اند اما تا پیش از این توصیف کمی از میزان این فعالیت در دسترس نبود. به علاوه در دیگر مطالعات، مقایسه میان مناطق مختلف این پهنه از ایران صورت نگرفته بود تا بتوان به واسطه آن میزان اثر زمین ساخت فعال بر حوضه‌های زهکشی را بررسی نمود. در این پژوهش با استفاده از تحلیل نهایی به روش AHP، حوضه‌های با فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا (حوضه‌های ۲، ۷، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۱، ۳۵، ۴۱ و ۴۸) تا بالا (حوضه‌های ۳، ۱۰، ۱۷، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۳۲، ۳۶، ۳۷، ۴۴، ۴۹ و ۵۱) مشخص و با بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌ای و شواهد صحرائی محتمل‌ترین گسل‌های مسبب ایجاد فعالیت در آن حوضه‌ها (یعنی گسل‌هایی چون گوک، کوهبنان، راور، راین، رفسنجان، ماهان-جوپار و پایانه‌های شمالی گسل سبزواران مثل دلفارد، ساردوئی و لاله‌زار) شناسایی شدند. تراکم حضور گسل‌های فعال، رومرکز زمین لرزه‌ها و قرارگیری اکثر شهرهای مهم محدوده مورد مطالعه در داخل یا مجاورت حوضه‌هایی با رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط تا خیلی بالا، لزوم توجه و انجام مطالعات تکمیلی در این منطقه را نشان می‌دهد. از آنجاکه ممکن است یک حوضه با فعالیت بالای زمین‌ساختی، با گپ لرزه‌ای یا با فعالیت از نوع غیرلرزه‌ای همراه باشد، همواره مطالعات مکمل از جمله ژئودتیکی، جهت بررسی تجمع کرنش، در این مناطق توصیه شده است.

به‌طور کلی یافته‌های این بررسی با اثبات اینکه تحلیل مناسب پارامترهای زمین ریخت‌سنجی می‌تواند در شناسایی مناطق دارای پتانسیل ایجاد خطر لرزه‌ای مفید باشد، تأیید کرد که این روش کم هزینه و سریع می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه و پیچیده، در مکان‌های وسیع یا امکان دسترسی دشوار بوده و در نتیجه ابزار مفیدی برای برنامه‌ریزان منطقه‌ای و تصمیم‌گیرندگان درگیر ارزیابی خطر لرزه‌ای و کاهش خطر بلایا باشد.

منابع

- آقائباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین شناسی ایران، چاپ دوم، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- امیری، ف.، ۱۳۸۶. مکان‌یابی پست‌های فشار قوی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- بهرامی، ش.، اکبری، ا.، و معتمدی راد، م.، ۱۳۹۳. تحلیل ژئومتری حوضه‌های زهکشی با استفاده از شواهد ژئومورفولوژی تکتونیک (مطالعه موردی: چهار حوضه زهکشی صدخرو، کلاته سادات، فاروبرومان و گلیان). فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، سال چهاردهم، شماره ۴۸، صص. ۱۹۹-۲۲۲.
- جمیل، م.، مریدی فریمانی، ع. ا.، و محمدی آرا، س.، ۱۳۹۰. بررسی مورفوتکتونیکی گسل لکرکوه، ایران مرکزی، دومین همایش علوم زمین و نکوداشت استاد پیشگام علم زمین‌شناسی ایران دکتر عبدالکریم قریب، آشتیان.
- حسینی استاد، ن.، رادفر، ش.، و شفییعی بافتی، ش.، ۱۳۹۵. بررسی تکتونیک فعال منطقه سیرچ کرمان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- رادفر، ش.، و پورکرمانی، م.، ۱۳۸۴. ریخت زمین ساخت گسل کوهبنان، فصلنامه علوم زمین، زمستان ۱۳۸۴، سال پانزدهم، شماره ۵۸، صص ۱۶۶-۱۸۳.
- رشیدی، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی خطر زمین لرزه گسلش در منطقه کرمان رفسنجان (جنوب خاور ایران). زمین‌ساخت، دوره ۲، شماره ۸، صص ۵۳-۷۰.
- سبزه‌ئی، م.، نوازی، م.، عزیزیان، ح.، شهرکی، ع.، سیفوری، س.، قمیشی، آ.، حسینی، س.ز.، ضبیحی، م.ر.، و حدادان، م.، ۱۹۹۹. نقشه زمین شناسی کرمان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شاه پسندزاده، م.، و حیدری، م.، ۱۳۷۵. بررسی مقدماتی لرزه‌خیزی، لرزه زمین ساخت و خطر رویداد زمین لرزه - گسلش در پهنه استان کرمان، مؤسسه بین المللی زمین لرزه شناسی و مهندسی زمین لرزه، ۲۱ صفحه.
- صفاری، ا.، موسیوند، ج.، افتخاری، م.، ۱۳۹۰. تحلیل توسعه کاربری‌های شهری در مناطق لغزشی با استفاده از تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مطالعه موردی: حوضه رود - دره فرحزاد، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۹، شماره ۲۲، صص ۱۰۷-۸۵.
- طالبیان، م.، قرشی، م.، و کوثری، ا.، ۱۳۹۷. زمین ریخت شناسی و ساز و کار گسلش زمین‌لرزه‌های ۱۰ و ۲۱ آذرماه ۱۳۹۶ هجری کرمان، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و هشتم، شماره ۱۱۰، صص ۲۴۷-۲۵۴.
- عبادی نژاد، ع.، یمانی، م.، مقصودی، م.، شادفر، ص.، ۱۳۸۶. ارزیابی عملگرهای فازی در تعیین توانمندی زمین لغزش (مطالعه موردی حوزه آبریز شیرود)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال اول، شماره ۲، صص ۳۹-۴۴.
- کسمایی، ب.، عباسی، م.ر.، و الماسیان، م.، ۱۳۸۹. بررسی ساختارهای مرتبط با گسل لکرکوه با توجه به شواهد مورفولوژی، فصلنامه زمین، سال پنجم، شماره ۳، صص ۸۷-۹۸.
- نعمتی، م.، و عباسنژاد، ا.، ۱۴۰۰. زمین ریخت شناسی و زمین ساخت جنب‌وابسته به گسل‌های استان کرمان، فصلنامه زمین ساخت، سال چهارم، شماره ۱۷، صص ۱-۱۸.
- نعمتی، م.، و میلان، ف.، ۱۳۹۷. شاخص‌های زمین ریخت شناسی، زمین ساخت جنب‌وابسته و لرزه‌خیزی حوضه‌های لوت و جازموریان استان کرمان. فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست سال دوازدهم، شماره ۲۴، صص ۳۳-۴۵.

- نقشه حوضه‌های اصلی آبریز استان کرمان، نقشه شماره: ۲۸-۱، نقشه ۱:۲۲۵۰۰۰۰، تحلیل موقعیت طبیعی و محیط زیست، برنامه آمایش استان کرمان، معاونت برنامه‌ریزی، استانداری کرمان، وزارت کشور.
- Alipoor, R., Poorkermani, M., Zare, M., El Hamdouni, R. (2011). Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran). *Geomorphology*, 128, pp.1–14. doi:10.1016/j.geomorph.2010.10.014
- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H., Jones, S. J. (2011). Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia–Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 184, pp.555–574. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04874.x.
- Allen, C. R., Amand, P. St., Richter, C. F., Nordquist, J. M. (1965). Relationship between seismicity and geologic structure in the Southern California region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55 (4), pp.753–797. <https://doi.org/10.1785/BSSA0550040753>
- Ambraseys, N.N. & Melville, C.P. (1982). *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge University Press, London, 219 p.
- Ambraseys, N.N. (1975). *Studies in historical seismicity and tectonics*. *Geodynamics Today*, Royal Society, London, pp.7–16.
- Ameri, S., Solgi, A., Sorbi, A., & Farrokhnia, A. (2022). Identification of faults with seismic hazard potential based on morphotectonic analysis, Kerman city (Southeastern Iran). *Earth Sciences Research Journal*, 26(1), pp.23–38. doi:10.15446/esrj.v26n1.83186.
- Argyrou, Athanasios V., Teeuw, R., Hard M., Rust, Derek, Sarrafis, Apostolos. (2015). GIS multi-criteria decision analysis for assessment and mapping of neotectonic landscape deformation: A case study from Crete, *Geomorphology*, do : 10.1016/j.geomorph.2015.10.018.
- Arian, M. (2013). Physiographic-Tectonic Zoning of Iran's Sedimentary Basins. *Open Journal of Geology*, 3, pp.169-177. <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2013.33020>
- Bagha, N., Arian, M., Ghorashi, M., Pourkermani, M., El Hamdouni, R., Solgi, A. (2014). in the Tehran basin, central Alborz, northern Iran. *Geomorphology, Evaluation of relative tectonic activity*. doi:10.1016/j.geomorph.2013.12.041.
- Berberian, M. (2005). The 2003 Bam Urban Earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block, southeast Iran. *Earthquake Spectra*, 21, pp.35-99.
- Berberian, M. (2014). Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian plateau; a historical, social, and physical approach (*Developments in Earth Surface Processes 17*). Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 776 p.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Fielding, E., Parsons, B.E., Priestly, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J., Baker, E. (2001). The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw6.6) in Kerman, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts, and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophysical Journal International*, 146 (2), pp.371–398.
- Bull, W. B. & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: Doehring, D. O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium*. State University of New York, Binghamton, pp.115–138.
- Bull, W. B. (2007). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology California*. Blackwell, Malden.
- Cannon, P.J. (1976). Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin. *Okla. Geol. Notes*, 36 (1), pp.3–16.
- Cox, R. T. (1994). Analysis of Drainage Basin Symmetry as a Rapid Technique to Identify Areas of Possible Quaternary Tilt Block Tectonics: An Example from the Mississippi Embayment. *Geological Society American Bulletin*, 106, pp.571-581.

- Davis, W. M. (1899). *The Geographical Cycle*. *The Geographical Journal*, 14 (5), pp.481-504. doi: 10.2307/1774538.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96, pp. 150-173. doi:10.1016/j.geomorph.2007.08.004
- Font, M., Amorese, D., Lagarde, J.L. (2010). DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate the effects of tectonics: the Normandy intraplate area (NW France). *Geomorphology*, 119, pp.172–180.
- Foroutan, M., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Murray, A. S., Le Dortz, K. M., Shokri, A., Arnold, M., Aumaitre, G., Bourlès, D., Keddadouche, K., Solaymani Azad, S. & Bolourchi, M. J. (2014). Late Pleistocene- Holocene right slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lut block, Iran. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (4), pp.3517-3560. doi:10.1002/2013JB010746.
- Hack, J. T. (1973). *Stream-profiles analysis and stream-gradient index*. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1, pp.421–429.
- Hare, P. W. & Gardner, T. W. (1985). *Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica*. In: Morisawa, M., Hack, J. T. (Eds.), *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin, Boston, pp.123–134.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Second Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA, 338 p.
- Keller, E. A. (1986). *Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes*. In: Wallace, R. E. (Ed.), *Active Tectonics, Studies in Geophysics*. National Academy Press, Washington DC, pp.136–147.
- Mayer, L. (1990). *Introduction to Quantitative Geomorphology*. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Mosavi, E. and Arian, M. (2015). Neotectonics of Kashaf Rud River, NE Iran by Modified Index of Active Tectonics (MIAT). *International Journal of Geosciences*, 6, pp.776-794. doi: 10.4236/ijg.2015.67063.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N. and Shabani, E. (2014). A decluttered earthquake catalog for the Iranian Plateau. *Annals of geophysics*, 57 (6), pp.1-25. doi:10.4401/ag-6395S0653.
- Nemati, M., Jafari Hajatib, F., Rashidi, A., Hassanzadeh, R. (2020). Seismology of the 2017 Hojedk earthquakes (MN 6.0–6.1), Kerman province, SE Iran, *Tectonophysics*, 780 (2020) 228398. doi:10.1016/j.tecto.2020.228398
- Perez-Pena, J.V., Azor, A., Azanon J.M., Keller, E.A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 119, pp.74–87.
- Pike, R. J. & Wilson, S. E. (1971). Elevation–relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82, pp.1079–1084.
- Ramírez-Herrera, M. T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp.317–332.
- Rashidi, A., Khatib, M.M., Raeesi, M., Mousavi, S.M., Jamour, Y. (2018). Geometric kinematic characteristics of the main faults in the W-SW of the Lut Block (SE Iran). *Journal of African Earth Sciences*, doi:10.1016/j.jafrearsci.2017.12.027.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.-C., Bourlès, D., Bonnet, S., Abbassi, M. R., Braucher, R., Mercier, J., Shabanian, E., Soleymani, Sh. & Feghhi, Kh. (2005). Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros–Makran transfer zone: Role of the Minab–Zendan

fault system in accommodating Arabia–Eurasia convergence in southeast Iran. Geophysical Journal International, 162(1), pp.177–203.

- Saaty, T. L. & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, Projection, and Forecasting*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 251 p.
- Saaty, T. L. (1977). *A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15, pp.231-281.*
- Saber, R., Çaglayan, A., Isik, V. (2018). *Relative Tectonic Activity Assessment and Kinematic Analysis of the North Bozghush Fault Zone, NW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, doi:10.1016/j.jseaes.2018.06.023.*
- Sharma, G., Champati ray, P.K., Mohanty, S. (2017). *Morphotectonic analysis and GNSS observations for assessment of relative tectonic activity in the Alaknanda basin of Garhwal Himalaya, India. Geomorphology, doi: 10.1016/j.geomorph.2017.11.002.*
- Strahler, A. N. (1952). *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63, pp.1117–1142.*
- Walker, R. T. & Jackson, J. A. (2004). *Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. Tectonics, 23, TC5010. doi:10.1029/2003TC001529.*
- Walker, R.T. (2006). *A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. Journal of Structural Geology, 28, pp.654-668. doi:10.1029/2005TC001871*
- Walker, R.T.; Talebian, M.; Saiffori, S.; Sloan, R. A.; Rasheedi, A.; MacBean, N. & Ghassemi, A. (2010). *Active faulting, earthquakes, and restraining bend development near Kerman city in southeastern Iran. Journal of Structural Geology, 32, pp.1046-1060. doi: 10.1016/j.jsg.2010.06.012.*