ارزیابی زمین‌ساخت جنبا در گستره بوئین‌زهرا-آوج (جنوب قزوین)

معصومه اعلایی، مریم ده‌بزرگی*؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین،
محمدرضا قاسمی؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور،
پژوهشکدهٔ علوم زمین
رضا نوزعیم؛ دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکدهٔ زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹٤/۱۱/۲۰ پذیرش ۹۵/۰۸/۱۰

چکیده

گسترهٔ بررسی شده در جنوب البرز مرکزی و لبهٔ شمال‌باختری ایران مرکزی در بین گسل‌های لرزه‌خیز ایپک با راستای تقریبی خاوری- باختری و گسل آوج با راستای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری واقع شده است و محل رخداد زمین‌لرزه‌های مهم تاریخی و دستگاهی متعددی است. در این پژوهش به‌منظور تعیین میزان فعالیت نوزمین‌ساختی، زمین‌ساخت فعال منطقه ارزیابی شده است و تحلیل خطراحتمالی گستره نیز انجام شده است. بنابراین برای بررسی فعالیت زمین‌ساختی اخیر منطقهٔ بررسی شده، از ٦ شاخص زمین‌ریختی گرادیان طولی رود (SL)، سینوسی پیشانی کوهستان (Smf)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، انتگرال فرازسنجی (Hi) و نسبت شکل حوضه زهکشی (Bs) استفاده شده است. درنهایت، پس از محاسبه شاخص زمین‌ساخت فعال (Iat)، گستره به ٤ ردهٔ فعالیت زمین‌ساختی بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم در محیط ArcGIS10.1 پهنه‌بندی شده است. به‌منظور پهنه‌بندی شتاب گستره از داده‌های لرزه‌ای، نرم‌افزار Kijko، نرم‌افزار PSHA و روابط کاهندگی استفاده شده است که در نتیجه آن‌ها کمینه و بیشینه شتاب برای عمر مفید سازه ۷۵ سال به‌ترتیب ۰/۳۳g و ۰/g٤٥ و برای ٤۷۵ سال ۰/٤٦g و ۰/٦۰g برآورد شده است. مقادیر به‌دست آمده از شاخص‌های زمین‌ریختی و نیز پهنه‌بندی شتاب منطقه نشان‌دهندهٔ فعالیت زمین‌ساختی زیاد در نزدیکی گسل‌های ایپک، حسن‌آباد، سلطانیه و آوج است. نتایج به دست آمده هم‌خوانی بسیار زیادی با شواهد صحرایی و زمین‌ریخت‌های به‌دست آمده از برداشت‌های میدانی ارائه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌ساخت فعال، شاخص‌های زمین‌ریختی، زمین‌لرزه، تحلیل‌خطراحتمالی، البرز مرکزی، ایران مرکزی

*نویسنده مسئول M_Dehbozorgi@khu.ac.ir

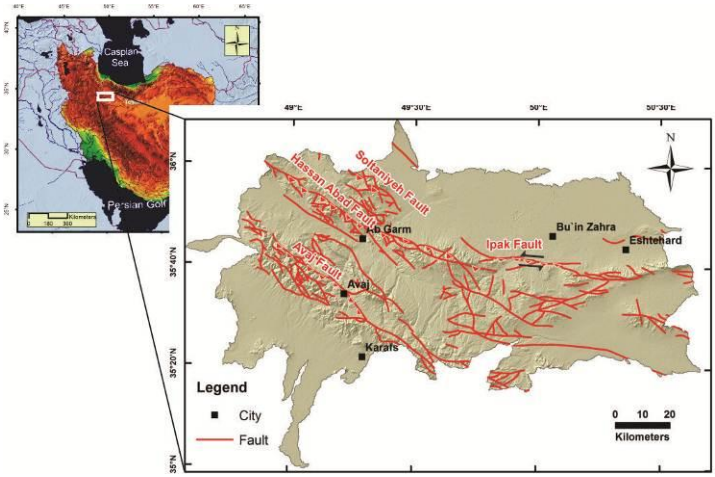
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

مقدمه

کشور ایران در کمربند چین‌خوردگی آلپ-هیمالیا بین دو صفحه اوراسیا در شمال و صفحهٔ عربی در جنوب واقع شده است و متأثر از حرکت رو به شمال صفحهٔ عربی در حال کوتاه‌شدگی است که باعث شده بیش‌تر بخش‌های آن از لحاظ زمین‌ساختی فعال و پویا باشند [۱]، [۲]. منطقهٔ بررسی شده که بخشی از آن در البرز و بخشی دیگر در ایران مرکزی واقع شده است نیز تحت تأثیر همین تنش‌ها است و زمین‌ساخت کلی آن کاملاً از این کوهزاد تبعیت می‌کند (شکل ۱). فعالیت زمین‌ساختی در البرز به‌دلیل حرکات رو به شمال ایران‌مرکزی و نیز رو به شمال‌باختر حوضهٔ کاسپین‌جنوبی انجام می‌شود [۳]، [٤]. پهنهٔ ساختاری ایران مرکزی نیز که در قسمت میانی فلات ایران در منطقهٔ برخوردی صفحه عربی و اوراسیا قرار گرفته است یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مناطق ساختاری در ایران است. ریخت‌زمین‌ساخت یا زمین‌ریخت‌شناسی زمین‌ساختی به بررسی فرایندهای پویای مؤثر در شکل‌دهی زمین وچشم‌اندازهای موجود در آن می‌پردازد. در سال‌های اخیر مطالعه زمین‌ساخت‌فعال به طور چشمگیر به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در تشخیص شکل‌های زمین‌ساختی فعال و تهیه نقشه‌های خطرلرزه‌ای به‌ویژه در مناطقی که در زمان هولوسن و پلیستوسن فعالیت زیادی نشان داده‌اند و هم‌چنین شناخت تاریخچهٔ چشم اندازهای کنونی سطح زمین کارساز بوده است [٥]. با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک می‌توان ویژگی‌های زمین‌ساختی یک ناحیه، از جمله سطح فعالیت زمین‌ساختی آن را ارزیابی کرد. از جمله گسل‌های مهمی که در گسترهٔ بررسی شده دیده می‌شود می‌توان به پهنهٔ گسلی سلطانیه، گسل ایپک، گسل آوج و گسل حسن‌آباد اشاره کرد. گسل سلطانیه واقع در شمال باختر منطقه، با راستای شمال‌باختر- جنوب خاور و با شیب به‌سمت جنوب باختر دارای عملکرد معکوس با مؤلفهٔ راستالغز راست‌بر است که احتمال می‌رود زمین‌لرزه ۱۸۰۳ میلادی سلطانیه با بزرگای بیش از۵/۳ بر اثر جنبش این گسله روی‌داده باشد. گسل جنبا و فشاری ایپک مسبب زمین‌لرزهٔ اول سپتامبر ۱۹٦۲ میلادی با بزرگای Ms= 7.2 و شدت Io= IX یعنی همان زمین لرزهٔ بوئین زهرا به همراه یک متر جابه‌جایی افقی بوده است [٦]. گسل راندگی آوج جداکننده دو پهنهٔ ساختاری ایران مرکزی و

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

سنندج- سیرجان است [۷] و گسل حسن‌آباد که آخرین جنبش آن مربوط به زمین‌لرزه بوئین زهرا (۱۳٤۱) است دارای حرکت عمده فشارشی با مؤلفهٔ راستالغز است [۸]. با توجه به‌وجود گسل‌های یاد شده که زمین‌لرزه‌های مهمی بر آن‌ها ثبت شده است و چندین گسل فرعی دیگر در گسترهٔ بررسی شده، و وجود چندین شهر در حال توسعه پی بردن به سطح فعالیت زمین‌ساختی اخیر منطقه و نیز کمینه و بیشینهٔ شتاب برای عمر مفید سازه اهمیت دارد.



شکل ۱. موقعیت زمین‌ساختی منطقه بررسی شده

مواد و روش‌ها

در این پژوهش سعی بر آن شده است تا با اندازه‌گیری ٦ شاخص زمین‌ریختی در سرتاسر منطقهٔ بررسی، سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی تعیین شود و هم‌چنین پهنه‌بندی شتاب گستره نیز انجام شود. بدین‌منظور ابتدا برای ارزیابی ریخت‌زمین‌ساختی منطقه، با استفاده از برنامه Arc Hydro در محیط GIS10.1، پس از طی مراحل پر کردن چاله‌های مدل ارتفاعی رقومی[1] () و تعیین جهت جریان[2] ()، حوضه‌های زهکشی و آبراهه های گسترهٔ بررسی شده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) آن با به‌کارگیری روش ترسیم آبراهه‌ها[3] () استخراج شده است.

1. fill sinks
2. flow direction
3. stream definition

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

سپس مرزهای تعیین شده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه بررسی و تلفیق شده و در محدودهٔ زیرحوضه‌ها، پارامترهای فیزیوگرافیک مورد نیاز استخراج شدند. براین اساس، گسترهٔ بررسی شده به ۱۳٤ حوضه تقسیم و شاخص‌های زمین‌ریختی مذکور، به تفکیک در هر یک از حوضه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند[۹] (شکل۲).

در روی‌کردی دیگر با استفاده از داده‌های کاتالوگ زمین‌لرزه‌های دستگاهی و تاریخی ایران برای گسترهٔ بررسی شده با بهره‌گیری از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS10.1) و نرم‌افزار Kijko، پارامترهای لرزه‌خیزی (λ و β) و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار PSHA و روابط کاهندگی، کمینه و بیشینهٔ شتاب برای عمر مفید سازه ۷۵ و ٤۷۵ سال برآورد شده است [۱۰]. در نتیجه با تلفیق داده‌های به‌دست آمده از تحلیل خطراحتمالی، نقشهٔ پهنه‌بندی شتاب گسترهٔ با کمک نرم‌افزار Arc Gis10.1 تهیه شده‌است (شکل۱۰ و ۱۱).

شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی

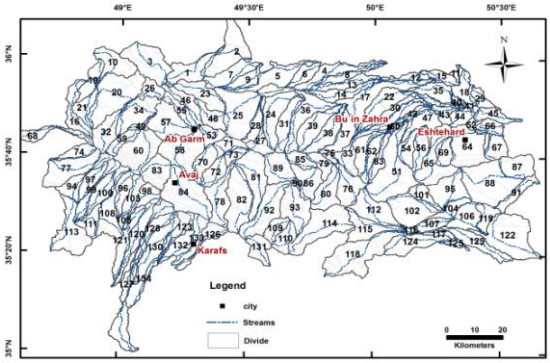
شاخص‌های ژئومورفیک، در ارزیابی سریع مناطق وسیع زمین، از نظر میزان تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی به‌کار گرفته می‌شوند. برخی از شاخص‌های ژئومورفیک که در پژوهش‌های مربوط به ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی بیش‌ترین کاربرد را دارند عبارتند از: شاخص گرادیان طولی رود، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال فرازسنجی، نسبت شکل حوضهٔ زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان. در این پژوهش سعی بر آن شده است تا با ارزیابی شاخص زمین‌ساخت فعال ()[1] در سرتاسر گسترهٔ بررسی شده و تلفیق آن با داده‌های برداشت شده از عملیات صحرایی، سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی برای گستره ارائه شود.

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)

شاخص گرادیان طولی رود (SL) برای یک محدوده و مسیر مشخص شبکهٔ زهکشی بر اساس رابطهٔ (۱) محاسبه و مشخص می‌شود [۱۱]:

[1] Iat

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



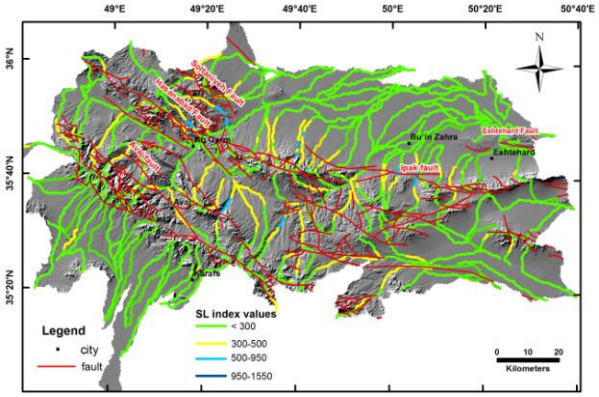
شکل ۲. نقشهٔ توزیع مکانی ۱۳٤ حوضه در گسترهٔ بررسی شده

$$SL= (\Delta H/\Delta Lr)\ Lsc \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، SL شاخص گرادیان طولی رود، ΔH ارتفاع تراز توپوگرافی، ΔLr فاصله کنتورهای توپوگرافی است که عبارت (ΔH/ΔLr) شیب کانال را بیان می‌کند. Lsc نیز طول کانال از نقطهٔ شروع شده تا جایی است که شاخص ارزیابی می‌شود. در این شاخص به‌طور غیرمستقیم میزان بالاآمدگی زمین در هر زیرحوضه مشخص می‌شود و ارتباط نزدیکی با قدرت رود دارد. به‌منظور محاسبه شاخص SL برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۱۳٤زیرحوضه گسترهٔبررسی شده، لایه آبراهه‌ها در محیط ArcGIS 10.1 افزوده شده و مقادیر Lsc و (ΔH/ΔLr) اندازه‌گیری گردیده‌اند. آن‌گاه بر اساس میزان شاخص SL به هر قطعه آبراهه که شامل فاصله بین نقطه میانی دو خط‌تراز مجاور با ارتفاع معین (جایی که شاخص شروع به ارزیابی شده) تا مرتفع‌ترین نقطه کانال است، یک رنگ مشخص اختصاص یافته است [۱۲]. به‌گونه‌ای که آبراهه‌هایی که مقدار شاخص SL آن‌ها کم‌تر از ۳۰۰ است به‌رنگ سبز نشان داده شده‌اند که فعالیت زمین‌ساختی خیلی‌کم را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقادیر SL آن‌ها بین ۵۰۰-۳۰۰ است به‌رنگ زرد نشان داده شده‌اند که فعالیت زمین‌ساختی کم را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقادیر SL آن‌ها بین ۹۵۰-۵۰۰ است به‌رنگ آبی روشن نشان داده شده‌اند که فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقدارSL آن‌ها بیش‌تر از ۹۵۰ است به‌رنگ آبی تیره نشان داده‌شده که فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالا را نشان می‌دهند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

در نهایت، لایه آبراهه ها با مقادیر معین شاخص SL، بر مدل ارتفاع رقومی قرار داده شده و نقشهٔ شاخص SL گسترهٔ بررسی شده تهیه شده است (شکل ۳). بیش‌ترین مقادیر شاخص SL با گسل‌های ایپک، حسن‌آباد و آوج سازگاری دارد.



شکل۳. نقشه شاخص (SL) بر مدل ارتفاعی رقومی گسترهٔ بررسی شده

شاخص سینوسی پیشانی کوهستان (Smf)

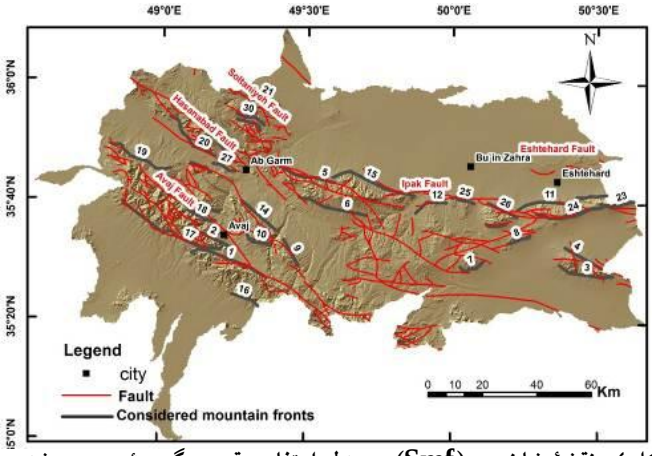
شاخص سینوسی پیشانی کوهستان از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید [۱۳]:

$$Smf = Lmf/Ls \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، Smf شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، Lmf طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست مشخص شیب و Ls طول خط مستقیم پیشانی کوهستان را نشان می‌دهند. پیشانی‌های کوهستانی که با بالاآمدگی زمین‌ساختی فعال همراه هستند، مستقیم بوده‌اند و مقادیر کم Smf را ارائه می‌دهند. اگر میزان بالاآمدگی کاهش یافته یا متوقف شده باشد، در نتیجه فرایندهای فرسایشی، پیشانی کوهستان را به‌طور قهقرایی حفر خواهند کرد و Smf افزایش پیدا خواهد کرد. در این پژوهش با استفاده از تصاویر SRTM و مدل ارتفاعی رقومی منطقه، شاخص زمین‌ریختی مذکور، برای ۳۱ پیشانی کوهستان موجود در منطقهٔ بررسی شده محاسبه شده است (شکل٤) و در نهایت به سه ردهٔ زمین‌ساختی ۳، ۲، و ۱ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $Smf < 1.10$ ردهٔ یک، $1.10 \leq Smf < 1.5$ردهٔ دو و $Smf \geq 1.50$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

ردهٔ سه ۳ فعالیت زمین‌ساختی را به‌دست می‌دهند (جدول۲). با توجه به نتایج به‌دست آمده به‌جز پیشانی‌های شماره ۳، ٤، ٦، ۷، ۸ و ۱۵ که در رده ۲ زمین‌ساختی قرار گرفته‌اند باقی پیشانی‌ها در رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی هستند و بیش‌ترین مقادیر شاخص با گسل‌های ایپک، حسن‌آباد، سلطانیه و آوج سازگاری دارد.



شکل٤. نقشهٔ شاخص (Smf) بر مدل ارتفاع رقومی گسترهٔ بررسی شده

شاخص نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)

شاخص نسبت عرض کف بستر به ارتفاع دره (Vf) از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود:

$$Vf = Vfw/ [(Ald-Asc) + (Ard-Asc) /2)] \quad (۳)$$

در این رابطه، Vf نسبت عرض به ارتفاع دره، Vfw پهنای دره، Ald، Ard، Asc به‌ترتیب، ارتفاع خط تقسیم آب در قسمت راست و چپ دره و کف دره هستند.

هنگام محاسبه Vf، این پارامتر در یک فاصله معین از پیشانی کوهستان برای هر دره بررسی می‌شود. در این پژوهش فاصله ۱– ۰/۵کیلومتر از پیشانی کوهستان، برای هر دره اصلی در نظر گرفته شده است. این شاخص، دره‌های"U" شکل با مقادیر Vf نسبتاً زیاد را از دره‌های"V" شکل با مقادیر کم Vf تفکیک می‌کند. در این بررسی، به‌منظور محاسبه Vf، برش عرضی دره در هر یک از زیرحوضه‌ها ترسیم شده و با استفاده از این برش‌ها و نیز مدل

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

ارتفاعی رقومی منطقه، مقادیر Vfw, Ald, Asc, Ard در هر کدام از زیرحوضه‌ها به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شده است. آن‌گاه شاخص زمین‌ریختی فوق، طبق تقسیم‌بندی $Vf > 1$، $1 \geq Vf > 0.5$ و $Vf \leq 0.5$ به‌ترتیب به سه ردهٔ زمین‌ساختی ۳، ۲ و ۱ تقسیم شده است (جدول ۱). بیش‌ترین مقادیر شاخص با گسل‌های سلطانیه، آوج و حسن‌آباد سازگاری دارد.

جدول ۱. رده‌بندی شاخص VF

رده‌بندی Vf	شماره زیرحوضه
۱	۱،۲۶،۳۳،۶۵،۶۶،۹۵،۱۰۲،۱۰۷،۱۲۱،۱۲۵،۱۳۲
۲	۲۰،۳۰،۳۱،۳۲،۳۵،۳۶،۳۸،۵۵،۵۹،۶۳،۶۴،۶۸،۶۹،۷۱،۷۲،۷۳،۷۶،۸۲،۹۳،۹۶،۹۸
۳	۲۳،۲۴،۲۷،۳۷،۶۱،۸۶،۹۷،۱۱۸

شاخص عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (Af)

در مناطقی که شبکه زهکشی در حضور تغییر شکل‌های زمین‌ساختی توسعه پیدا می‌کند، اغلب دارای شکل هندسی و الگوی متمایزیاست. عامل تقارن نداشتن، برای توصیف و درک ارتباط کج شدگی زمین‌ساختی در نواحی‌ای با مقیاس حوضه زهکشی و بزرگ‌تر ارتباط داده شده است و رابطهٔ (٤) محاسبه می‌شود [١٤]:

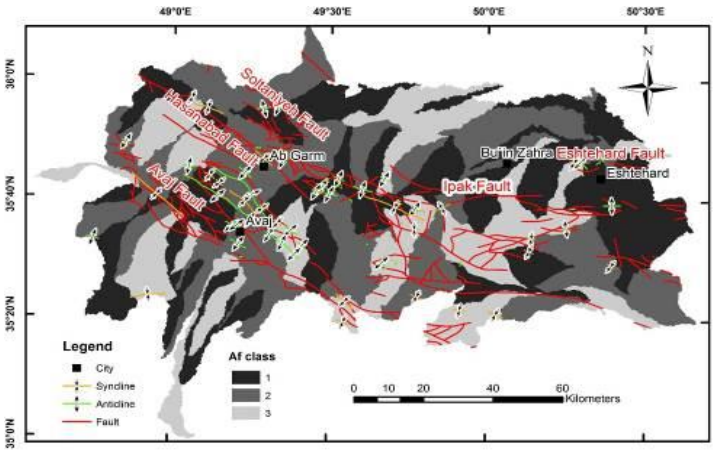
$$Af = 100\ (A_r/A_t) \qquad (٤)$$

در این رابطه، Ar مساحت قسمت راست حوضه در جهت پایین رود نسبت به رود اصلی و At مساحت کل حوضه زهکشیاست. برای شبکه رودی که تشکیل شده و تداوم جریان در حالت ثابتی وجود دارد، Af باید برابر ۵۰ باشد. Af به خم‌شدگی عمود بر امتداد رود اصلی در حوضهٔ زهکشی حساس است. مقادیر بیش‌تر یا کم‌تر از ۵۰ ممکن است حاکی از کج‌شدگی حوضه زهکشی باشد. اگر خم‌شدگی در جهت عکس باشد، شاخه‌های بزرگ‌تر رود بر دامن‌های سمت راست رود اصلی حوضه قرار می‌گیرند و Af کم‌تر از ۵۰ است. در این پژوهش، مقادیر (Ar) و (At) در محیط Arc GIS 10.1 اندازه‌گیری شده و شاخص Af در ۱۳٤ زیرحوضه در منطقهٔ بررسی شده، محاسبه شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

طبق تقسیم‌بندی $Af \geq 65$ or $Af \leq 35$ و $57 < Af < 65$ or $43 > Af > 35$، $43 \leq Af \leq 57$ به‌ترتیب به سه ردهٔ زمین‌ساختی ۳، ۲، و ۱ تقسیم شده است .

در پایان نقشه میزان کج‌شدگی در قسمت‌های مختلف گسترهٔ بررسی شده، با ثبت مقادیر شاخص (Af) و ساختارهای اصلی برای گستره ترسیم شده است. نتایج حاصل از بررسی این شاخص نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر کج‌شدگی حوضه‌ها با گسل‌های ایپک و حسن‌آباد، آوج و سلطانیه هم‌خوانی دارد (شکل ۵).



شکل ۵. نقشهٔ عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) در گسترهٔ بررسی شده

منحنی فرازسنجی و انتگرال فرازسنجی(Hi)

منحنی‌های فرازسنجی، توزیع سطوح ارتفاعی منطقه‌ای از زمین، یک حوضه آبخیز تا تمام سطح سیاره زمین را می‌توانند ارزیابی و توصیف کنند. منحنی فرازسنجی حوضه با ترسیم ارتفاع کل (ارتفاع نسبی) در مقابل مساحت کل (مساحت نسبی) حوضه ترسیم می‌شود.

مساحت کل حوضه (A) برابر مجموع کل سطوح بین خطوط میزان مجاور یک‌دیگر در حوضه زهکشی است. سطح (a) مساحتی از حوضه را دربرمی‌گیرد که بالای ارتفاع (h) قرار داشته باشد. مقدار مساحت نسبی (a/A) معمولا بین یک تا صفر (در پایین‌ترین تا بالاترین) نقطهٔ حوضه تغییر می‌کند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای توصیف شکل منحنی فرازسنجی یک حوضه زهکشی مشخص، محاسبه انتگرال فرازسنجی آن حوضه است. انتگرال فرازسنجی حوضه به‌وسیلهٔ مساحت زیر منحنی فرازسنجی مشخص می‌شود. شاخص فرازسنجی از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود [۱۵]، [۱٦]:

$$Hi = (\text{average elevation} - \text{min. elev.}) / (\text{max. elev.} - \text{min. elev.}) \quad (۵)$$

ارتفاع بیشینه و کمینه و متوسط به‌طور مستقیم از نقشه توپوگرافی به‌دست می‌آید. مقادیر بالای انتگرال فرازسنجی ($0.5 <$) دلالت بر وجود توپوگرافی بالا نسبت به میانگین حوضه زهکشی، مانند سطوح بالا آمده و فلاتی که به‌وسیلهٔ رودها بریده شده‌اند و مقادیر کم تا متوسط انتگرال فرازسنجی ($0.4 >$) حاکی از برش شبکه زهکشی در یک سطح هموارتر است. امروزه از روش فرازسنجی در ارزیابی‌های زمین‌ساختی در مقیاس قاره‌ها و جهانی استفاده می‌شود.

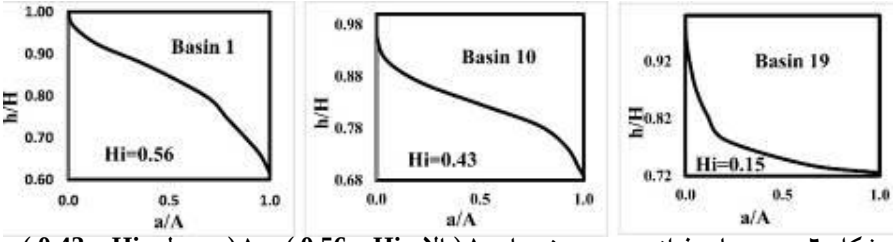
در این مطالعه با توجه به تحدب و تقعر منحنی‌های فرازسنجی، هر کدام از حوضه‌ها به طور مجزا به سه رده زمین‌ساختی ۳، ۲، و ۱ تقسیم شده‌اند، به طوری که منحنی‌های فرازسنجی محدب با مقادیر ($Hi \geq 0.5$) رده ۱، منحنی‌های فرازسنجی محدب – مقعر با مقادیر ($0.5 > Hi \geq 0.4$) رده ۲ و منحنی‌های فرازسنجی مقعر با مقادیر ($Hi < 0.4$) رده ۳ سطح فعالیت زمین‌ساختی را ارائه می‌دهند [۱۲]. کمترین مقدار انتگرال در حوضه شماره ۱۹ با منحنی فرازسنجی مقعر و بیشترین مقدار آن در حوضه شماره ۱ منحنی فرازسنجی محدب به دست آمده است (شکل ٦). نتایج به دست آمده از ترسیم منحنی‌های فرازسنجی نشان‌دهنده آن است که مقادیر بالای این شاخص منطبق با گسل‌های سلطانیه، آوج، حسن آباد و گسل‌های فرعی در جنوب زون گسلی ایپک است.

شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs)

شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) از رابطهٔ (٦) محاسبه می‌شود [۱۷]، [۱۸]:

$$Bs = Bl/Bw \quad (٦)$$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



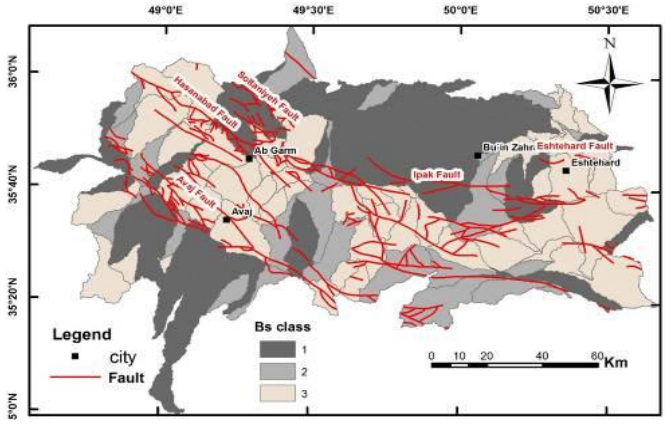
شکل ٦. منحنی‌های فرازسنجی حوضه‌های ۱ (بالا، Hi = 0.56)، ۱۰ (متوسط، Hi = 0.43) و ۱۹ (پایین، Hi = 0.15). (A): مساحت کل حوضه، (a) مساحتی از حوضه در بالای ارتفاع (h).

در رابطهٔ (٦)، Bl طول حوضه که همان طول مسیر آبراهه اصلی از نقطه خروج تا دورترین قله روی خط تقسیم آب است و Bw عرض حوضه است که در عریض‌ترین بخش آن، عمود بر طول حوضه اندازه‌گیری می‌شود. در نواحی فعال از نظر زمین‌ساختی، حوضه‌های زهکشی موجود تمایل به کشیدگی از خود نشان می‌دهند و با مقادیر زیاد Bs همراهند، در حالی‌که در مناطقی با فعالیت زمین‌ساختی کم‌تر، حوضه‌های زهکشی به سوی دایره‌واری پیش می‌روند و مقادیر Bs پایینی ارائه می‌دهند [۱۹]. در این پژوهش با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه و رودخانه اصلی هر زیرحوضه، شاخص ژئومورفیکی بالا، در هر یک از زیرحوضه‌ها به‌تفکیک اندازه‌گیری شده و در نهایت به سه ردهٔ زمین‌ساختی ۳، ۲، و ۱ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $Bs \geq 4$ ردهٔ یک، $4 > Bs \geq 3$ ردهٔ دو و $Bs < 3$ ردهٔ سه فعالیت زمین‌ساختی را به‌دست می‌دهند. شاخص Bs در ۱۳٤ زیرحوضه در منطقهٔ بررسی شده محاسبه شده است و نتایج به‌دست آمده حاکی از این است که کشیده‌ترین حوضه‌ها با مقادیر زیاد Bs، همراهی خوبی با گسل‌های ایپک و آوج ارائه می‌دهند (شکل ۷).

شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat)

در بسیاری از بررسی‌های ژئومورفیکی، تعیین فعالیت زمین‌ساختی نسبی بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری شده در امتداد یک پیشانی کوهستان و یا یک حوضه رودخانه‌ای، انجام شده است [۲۰]. و به جز شاخص گرادیان طولی رود (SL)، سایر شاخص‌های ژئومورفیکی از نظر فضایی در سرتاسر یک منطقه تجزیه و تحلیل نشده‌اند. در این پژوهش، شاخص‌های گرادیان

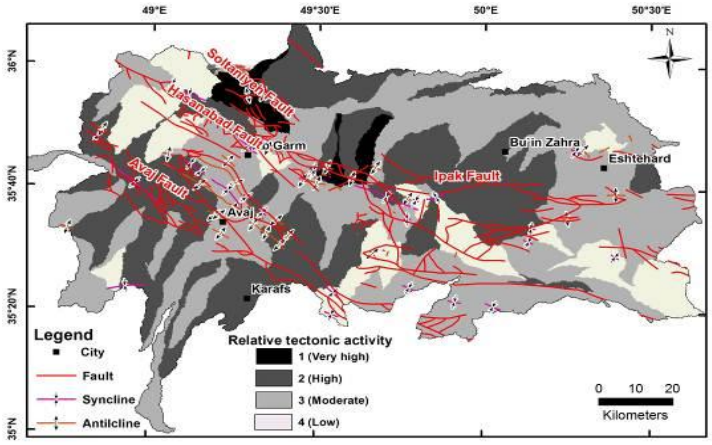
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



شکل۷. نقشهٔ شکل حوضه زهکشی (Bs) در گسترهٔ بررسی شده

طولی رود، تقارن نداشتن حوضهٔ زهکشی، انتگرال فرازسنجی، نسبت شکل حوضه‌زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان به تفکیک در هر یک از ۱۳٤ زیرحوضه محاسبه شده و چنان‌که در بالا به تفصیل شرح داده شد، به ۳ ردهٔ زمین‌ساختی تقسیم شده‌اند. آن‌گاه در هر زیرحوضه به‌طور مجزا میانگین مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفیکی (S/n) اندازه‌گیری شده و سپس به ٤ رده که در حقیقت همان رده‌های شاخص زمین‌ساخت فعال (Iat) گسترهٔ بررسی شده است، طبقه‌بندی شده‌اند (جدول۲). ردهٔ یک سطح فعالیت زمین‌ساختی، شامل مقادیر $1.5>S/n\geq1$ بوده است و نشان‌گر فعالیت نسبی خیلی زیاد است. ردهٔ دو بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی نسبی زیاد با مقادیر $2>S/n\geq1.5$، ردهٔ سه نشان‌دهندهٔ فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط با مقادیر $2.5>S/n\geq2$ و ردهٔ چهار با مقادیر $S/n\geq2.5$ فعالیت زمین‌ساختی نسبی کم را ارائه می‌کند [۱۲]. در نهایت، نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساخت‌نسبی، برای گسترهٔ ترسیم شده و گسترهٔ بررسی شده به چهار بخش خیلی‌فعال، فعال، فعالیت متوسط و فعالیت کم تقسیم شده است (شکل ۸)، به‌طوری‌که بخش خیلی فعال ٪ ۳، بخش فعال ٪ ۳٦، بخش با فعالیت متوسط ٪ ۵۰ و بخش با فعالیت کم ٪ ۱۱ از کل گسترهٔ بررسی شده را تشکیل می‌دهند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



شکل ۸. نقشه شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) بر روی مدل ارتفاع رقومی گستره مورد مطالعه

جدول۲) مقادیر شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) در گستره مورد مطالعه

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
1	2	2	1	1	-	1	1.40	1
2	3	2	3	1	1	2	2.00	2
3	3	3	2	-	-	3	2.75	4
4	3	3	3	-	-	1	2.50	3
5	3	1	3	-	-	1	2.00	2
6	2	3	3	-	-	2	2.50	3
7	3	1	3	1	-	1	1.80	2
8	3	1	3	-	-	1	2.00	2
9	3	1	3	-	-	1	2.00	2
10	3	1	2	-	-	3	2.25	3
11	3	2	3	-	-	3	2.75	4
12	3	1	3	-	-	1	2.00	2
13	3	3	2	-	-	1	2.25	3

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
14	3	3	2	-	-	1	2.25	3
15	3	1	3	-	-	2	2.25	3
16	2	2	3	-	-	1	2.00	2
17	3	2	3	-	-	1	2.25	3
18	3	1	3	-	-	3	2.50	3
19	3	1	3	-	-	2	2.25	3
20	3	3	3	1	-	3	2.60	4
21	2	2	3	1	2	2	2.00	2
22	3	2	3	-	-	1	2.25	3
23	2	1	2	1	-	1	1.40	1
24	2	2	3	1	3	1	2.00	2
25	3	2	3	1	2	3	2.33	3
26	3	1	2	1	-	3	2.00	2
27	2	1	1	1	1	2	1.33	1
28	3	1	3	1	3	1	2.00	2
29	3	1	3	-	–	3	2.50	3
30	3	1	3	2	–	1	2.00	2
31	2	1	3	-	2	1	1.50	1
32	2	2	2	1	2	2	1.83	2
33	3	2	3	1	2	1	2.00	2
34	3	3	3	1	3	3	2.67	4
35	3	2	3	-	–	1	2.25	3
36	2	3	3	2	2	1	2.17	3
37	3	1	3	2	2	1	2.00	2
38	2	1	3	2	3	1	2.00	2
39	2	2	3	2	2	1	2.00	2
40	3	1	3	-	-	3	2.50	3
41	3	1	3	-	-	2	2.25	3

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
42	3	3	3	-	-	1	2.50	3
43	3	1	3	-	-	3	2.50	3
44	3	2	3	-	-	3	2.75	4
45	3	3	3	-	-	1	2.50	3
46	2	2	2	-	-	1	1.75	2
47	3	1	3	-	-	3	2.50	3
48	3	2	3	1	-	3	2.40	3
49	3	3	3	-	-	1	2.50	3
50	3	1	3	-	-	2	2.25	3
51	2	3	2	1	-	2	2.00	2
52	3	2	3	-	-	3	2.75	4
53	3	2	3	-	-	3	2.75	4
54	3	1	3	1	-	2	2.00	2
55	3	2	3	-	-	1	2.25	3
56	3	1	3	1	2	1	1.83	2
57	3	2	3	1	-	3	2.40	3
58	3	2	3	1	-	3	2.40	3
59	3	2	2	-	-	1	2.00	2
60	2	1	3	1	2	3	2.00	2
61	3	1	3	1	-	1	1.80	2
62	2	1	3	1	3	1	1.83	2
63	2	1	3	1	2	1	1.67	2
64	3	1	3	1	2	3	2.17	3
65	3	3	3	1	2	1	2.17	3
66	3	1	3	-	1	3	2.20	3
67	3	1	3	1	1	3	2.00	2
68	3	3	3	-	2	1	2.40	3
69	3	1	3	1	-	3	2.20	3

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
70	2	1	3	1	2	2	1.83	2
71	3	1	3	-	2	3	2.40	3
72	2	3	3	1	2	3	2.33	3
73	3	1	3	2	-	3	2.40	3
74	3	1	3	1	2	1	1.83	2
75	3	1	3	-	-	3	2.50	3
76	3	3	2	-	-	3	2.75	4
77	3	2	3	1	2	3	2.33	3
78	2	3	1	1	-	2	1.80	2
79	3	3	3	-	-	3	3.00	4
80	2	2	1	-	-	3	2.00	2
81	3	2	3	2	-	2	2.40	3
82	3	1	2	1	-	1	1.60	2
83	2	1	3	1	2	3	2.00	2
84	3	2	3	1	-	3	2.40	3
85	2	1	2	-	-	3	2.00	2
86	3	3	2	2	-	3	2.60	3
87	3	1	3	1	3	3	2.33	3
88	3	1	3	1	-	3	2.75	4
89	3	1	3	2	-	3	2.40	3
90	3	2	2	-	-	3	2.50	3
91	3	1	3	2	3	1	2.17	3
92	2	2	2	-	-	2	2.00	2
93	3	3	2	-	-	3	2.75	4
94	3	1	3	1	2	2	2.00	2
95	3	2	3	1	-	3	2.40	3
96	3	1	3	1	1	1	1.67	2
97	3	2	3	1	2	1	2.00	2

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
98	3	2	2	1	3	1	2.00	2
99	3	2	3	1	2	1	2.00	2
100	3	3	3	1	-	1	2.20	3
101	3	2	3	2	-	3	2.60	4
102	3	1	3	2	-	3	2.40	3
103	3	3	3	1	1	2	2.17	3
104	3	2	3	-	-	3	2.75	4
105	3	1	2	-	-	3	2.25	3
106	3	2	3	2	-	3	2.60	4
107	3	2	2	-	-	2	2.25	3
108	3	3	3	1	1	1	2.00	2
109	3	2	3	-	-	3	2.75	4
110	2	3	2	-	-	3	2.50	3
111	3	3	3	-	-	3	3.00	4
112	3	3	3	2	-	3	2.80	4
113	3	1	3	-	-	3	2.50	3
114	2	2	3	-	-	2	2.25	3
115	3	1	3	-	-	2	2.25	3
116	3	1	3	-	-	1	2.00	2
117	3	1	2	-	-	1	1.75	2
118	2	3	3	-	-	2	2.50	3

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

شماره زیر-حوضه	رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود	رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه	رده-بندی شاخص فرازسنجی	رده‌بندی شاخص پیشانی کوهستان	رده‌بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع	رده‌بندی شاخص شکل حوضه زهکشی	مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی	رده‌بندی شاخص زمین-ساخت فعال نسبی
119	3	1	3	2	3	3	2.50	3
120	3	2	3	-	-	1	2.25	3
121	3	1	3	-	-	1	2.00	2
122	3	2	3	2	3	3	2.67	4
123	3	2	2	-	-	1	2.00	2
124	3	2	3	-	–	2	2.50	3
125	3	3	2	-	-	2	2.50	3
126	3	2	2	1	1	2	1.83	2
127	3	3	3	-	-	1	2.50	3
128	3	1	3	-	-	1	2.00	2
129	3	3	3	-	-	1	2.50	3
130	3	3	3	-	-	1	2.50	3
131	3	3	2	-	-	3	2.75	4
132	3	1	3	1	-	2	2.00	2
133	3	2	3	1	1	1	1.83	2
134	3	1	3	-	-	1	2.00	2

پهنه‌بندی شتاب گستره

به‌منظور تحلیل خطر احتمالی گستره، داده‌های لرزه‌ای در وسعتی به شعاع ۱۰۰ کیلومتری از شهر آبگرم جمع‌آوری شده است که نه تنها محدودهٔ پژوهش‌های ریخت زمین‌ساختی را

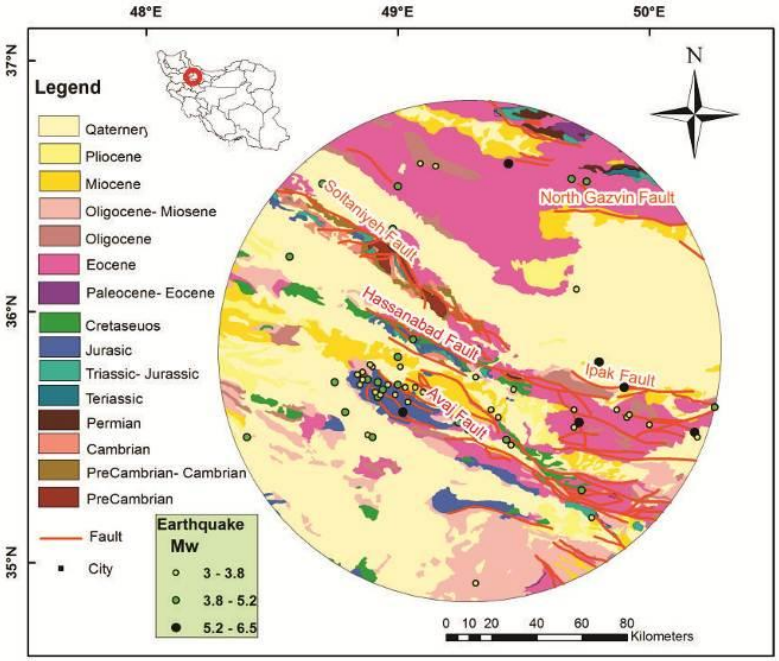
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

پوشش می‌دهد، بلکه گسل‌های اطراف منطقه را نیز با هدف دقیق‌تر کردن نتایج پژوهش‌های لرزه زمین‌ساختی شامل می‌شود (شکل۹). بدین‌منظور، از زمین‌لرزه‌های دستگاهی روی داده در گسترهٔ بررسی شده که از کاتالوگ پژوهشگاه زلزله‌شناسی ایران (IIEES) استخراج شده است (جدول۳) و هم‌چنین از زمین‌لرزه‌های تاریخی گستره (جدول٤) [٥] استفاده شده است. از جمله زمین‌لرزه‌های ویران‌گری که در این گستره به‌وقوع پیوسته زمین‌لرزه روستای کله‌در در ۲۰ اکتبر ۱۸۷٦ با بزرگای ۵/۷، زمین‌لرزه اول سپتامبر ۱۹٦۲ میلادی بوئین‌زهرا با بزرگای ۷/۲ و زمین‌لرزه ۱۰ دسامبر ۱۱۱۹ میلادی قزوین با بزرگای٦/٥ هستند.

برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک پهنه مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوهٔ توزیع زلزله‌ها و بزرگای آن‌ها ارائه شده است. یکی از معتبرترین آن‌ها، رابطهٔ گوتنبرگ- ریشتر است [۲۱]. عدم‌قطعیت‌های موجود در بزرگای ثبت شده مربوط به داده‌های تاریخی و داده‌های دستگاهی یک‌سان نیست، از این رو، برای ترکیب نظام‌مند این داده‌ها با لحاظ تفاوت در عدم قطعیت‌های مربوطه، می‌توان از روش پیشنهادی کیکو و سلوول [۲۲] استفاده کرده و با بهره‌گیری از روش بیشینه تمایل پارامترهای لرزه‌خیزی (حداکثر بزرگی قابل انتظار Mmax، آهنگ فعالیت سالیانه λ و پارامتر β) را برآورد کرد. بنابراین فهرست زمین‌لرزه‌ها در گستره شعاعی ۱۰۰ کیلومتری جمع‌آوری و پردازش شده، سپس با استفاده از روش کیکو و سلوول پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شده است. (جدول ۵). یکی از عناصر مهم در ارزیابی خطر لرزه، روابط کاهندگیاست که تغییرات حداکثر جنبش نیرومند زمین (شتاب) را با تغییر فاصله و بزرگا بیان می‌کند. در این گستره پس از بررسی روابط و مدل‌های کاهندگی موجود از سه رابطهٔ Ambraseys، Alborz-Lut 95 H وJoyner & Boore که به‌صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار PSHA وجود دارند با استفاده از روش درخت منطقی و وزن‌دهی یک‌سان استفاده شده است. با استفاده از روابط مزبور و نیز نرم‌افزار PSHA، شتاب کمینه و بیشینه در دو بازه زمانی عمر مفید سازه ۷۵ و ٤۷۵ سال بر روی سنگ بستر به‌دست آمده است (جدول ٦). این مقادیر بیان‌گر خطرپذیری زیاد این مناطق بوده است که لزوم توجه و اهمیت به اقدامات پیش‌گیرانه در برابر زمین‌لرزه را تشدید می‌کند. در نهایت، نقشهٔ پهنه‌بندی شتاب برای کل

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

گسترهٔ بررسی شده برای بازهٔ زمانی عمر مفید سازه ۷۵ (شکل ۱۰) و بازهٔ زمانی عمر مفید سازه ٤۷۵ (شکل۱۱) به‌کمک نرم افزار ArcGIS10.1 ارائه شده است.



شکل۹. نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه به‌همراه زمین‌لرزه‌های گستره

جدول ۳. زمین‌لرزه‌های تاریخی رخ‌داده در گسترهٔ بررسی شده

ID	y	m	d	Lat.	Lon.	Mw	Reference
1	3rd Mil BC	---	---	35.6	49.9	------	AMB
2	1119	12	10	35.7	49.9	6.5	AMB
3	1803	---	---	36.4	48.8	------	AMB
4	1876	10	20	35.8	49.8	5.8	AMB

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

جدول٤: زمین‌لرزه‌های دستگاهی رخ‌داده در گستره موردمطالعه پس از حذف پس‌لرزه و پیش‌لرزه

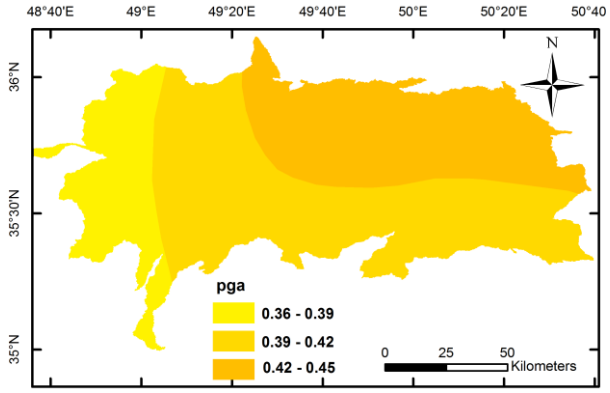
ID	Y	M	D	Lat.	Lon.	Mw	Reference
1	1927	6	15	35.5	48.4	4.7	ISC[1]
2	1927	10	31	36.5	49	4.7	ISC
3	1948	6	17	36.59	49.44	5.8	ISC
4	1962	9	4	35.56	49.72	6.5	ISC
5	1964	11	3	35.52	50.18	5.4	ISC
6	1967	8	25	35.56	49.24	4.9	ISC
7	1975	4	11	35.62	50.26	4.9	ISC
8	1984	9	9	35.53	49.28	4.8	ISC
9	1991	12	18	36.53	49.69	4.8	ISC
10	1996	7	27	36.22	48.57	4.1	ISC
11	1998	4	18	35.51	48.88	3.7	ISC
12	1998	9	24	36.51	48.7	4.5	ISC
13	2001	8	20	36.33	48.98	4.3	ISC
14	2002	4	19	36.52	49.75	5.2	ISC
15	2002	6	22	35.6	49.02	6.5	ISC
16	2002	11	18	36.59	49.09	3.1	ISC
17	2002	11	25	36.43	48.8	3.2	ISC
18	2004	3	19	35.6	48.79	4.3	IIEES[2]
19	2004	8	21	35.49	49.43	4.5	IIEES
20	2004	11	8	35.73	48.88	4.8	IIEES
21	2005	7	19	35.58	49.91	3.4	IIEES
22	2005	7	24	35.72	48.75	4.1	IIEES
23	2006	1	5	35.66	48.92	4.1	IIEES
24	2006	3	19	35.67	48.99	3.3	IIEES
25	2006	6	28	35.71	49	4.1	IIEES
26	2006	8	30	36.09	49.71	3.1	IIEES
27	2006	10	25	35.73	48.86	3.3	IIEES
28	2006	11	15	35.18	49.77	3.3	IIEES
29	2006	12	8	35.71	48.96	3	IIEES
30	2007	3	28	35.61	49.37	3.7	IIEES

1. International Seismological Centre
2. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

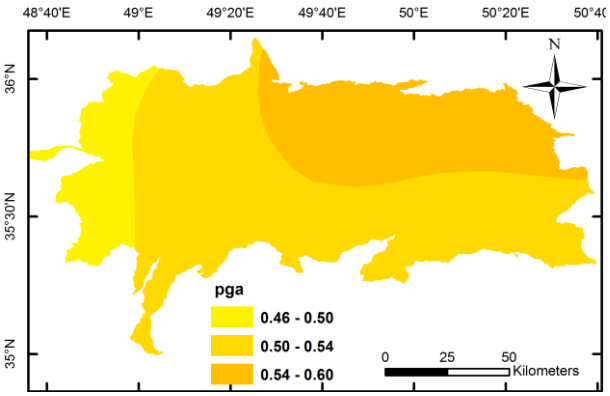
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

31	2007	4	15	35.67	48.93	3.2	IIEES
32	2007	5	22	35.69	49.46	3.6	IIEES
33	2007	12	19	35.72	48.92	4.2	IIEES
34	2008	3	27	35.68	49.1	3.7	IIEES
35	2008	9	26	35.5	48.9	4.5	IIEES
36	2009	1	1	35.68	48.91	3.6	IIEES
37	2009	6	5	35.78	48.9	3.2	IIEES
38	2009	8	4	34.92	49.31	3.3	IIEES
39	2009	8	15	36.58	49.15	3.2	IIEES
40	2009	11	2	35.71	48.85	3	IIEES
41	2010	1	10	35.69	48.94	4.2	IIEES
42	2010	3	29	35.58	49.4	3.6	IIEES
43	2010	4	28	35.89	49.06	4.4	IIEES
44	2010	11	4	35.61	49.87	3.1	IIEES
45	2011	2	8	35.5	50.19	3	IIEES
46	2011	2	28	35.7	49.03	3.4	IIEES
47	2011	6	14	35.55	50	3.7	IIEES
48	2011	7	22	35.64	49.04	3.2	IIEES
49	2011	9	22	35.7	49.07	3.2	IIEES
50	2011	12	28	35.59	49.92	3.8	IIEES
51	2012	1	13	35.82	49	4.2	IIEES
52	2012	3	18	35.47	49.45	3.2	IIEES
53	2012	5	11	35.79	48.89	3.3	IIEES
54	2012	11	25	35.61	49.7	3.7	IIEES
55	2013	1	8	35.78	49.01	3.3	IIEES
56	2013	2	22	35.74	49.31	3.1	IIEES
57	2013	4	7	35.54	49.7	3.5	IIEES
58	2013	9	23	35.75	48.84	3.2	IIEES
59	2013	10	16	35.29	49.73	4.8	-----

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



شکل ۱۰. پهنه‌بندی شتاب برای ۷۵ سال



شکل ۱۱. پهنه‌بندی شتاب برای ٤۷٥ سال

جدول ٥. پارامترهای لرزه‌خیزی سرچشمه‌های گسترهٔ بررسی شده

Source no.	λ	β	Mmax	Mmin
۱	۰/۰٦	۱/۰۱	۷/۰۳	٤/۷۰
۲	۰/٦۲	۱/۰۱	٤/۹٦	۳
۳	۰/۳۰	۱/۱۲	٦/٦۹	۲/۹
٤	٤/٤۸	۱/۲۲	٦/۸۳	۲/۹

جدول ٦. شتاب محاسبه شده در دو بازهٔ زمانی ۷٥ و ٤۷٥ سال

عمر مفید سازه(سال)	شتاب کمینه	شتاب بیشینه
۷٥	۰/۳۳g	۰/٤٥g
٤۷٥	۰/٤٦g	۰/٦g

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

بحث

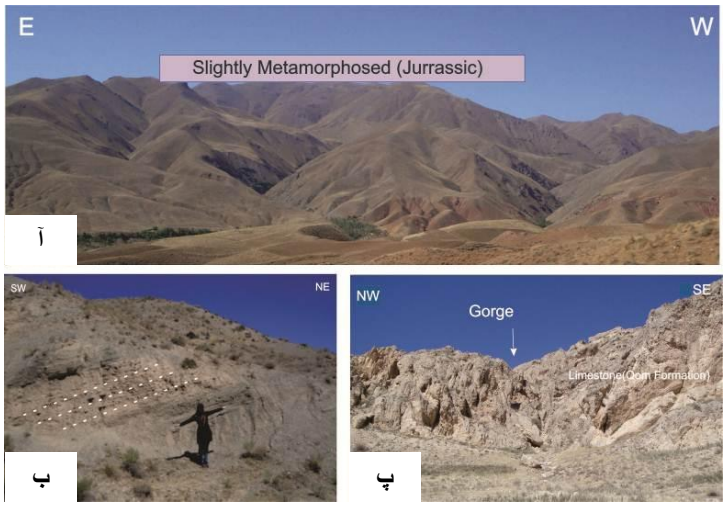
گسل سلطانیه یکی از گسل‌های مهم در منطقهٔ بررسی شده است که در بخش شمال باختری منطقه واقع شده است. این گسل با راستای شمال‌باختر- جنوب خاور و با شیب به سمت جنوب‌باختر دارای عملکرد معکوس با مؤلفهٔ راستالغز راست‌گرد است. با توجه به رده‌بندی Iat، حوضه‌های ۱ و ۲۳ واقع در امتداد پایانه جنوب‌خاوری و در محل هم‌پوشانی (Stepover) این گسل با بخش شمال‌باختری گسل معکوس حسن‌آباد بیش‌ترین مقدار یعنی ردهٔ ۱ زمین‌ساخت فعال را دارا هستند. احتمال می‌رود زمین لرزه ۱۸۰۳ میلادی سلطانیه با بزرگای بیش از۵/۳ بر اثر جنبش این گسلی روی داده باشد. از این رو، با توجه به احتمال ارتباط زمین‌لرزه مذکور با این گسل و هم‌چنین مقدار زیاد Iat روی آن، می‌توان گفت که گسل سلطانیه یکی از گسل‌های فعال کنونی است که می‌تواند مستعد زمین‌لرزه‌های بزرگ در آینده باشد و باید در پژوهش‌های لرزه‌زمین‌ساختی بیش‌تر مورد توجه و بررسی قرار گیرد. هم‌چنین، مقدار شاخص Iat در حوضه‌های ۳۱ و ۲۷ نیز که در هم‌پوشانی (Stepover) ایجاد شده است بین بخش جنوب‌خاوری گسل حسن‌آباد و انتهای باختری گسل معکوس ایپک واقع شده‌اند نیز ردهٔ ۱ را ارائه می‌دهد و نشان‌گر فعالیت زمین‌ساختی بالای منطقه پلکانی در بخش هم‌پوشانی گسل‌های مزبور در این قسمت از منطقهٔ بررسی شده است، شواهد زمین‌ریخت‌های به‌دست آمده از پژوهش‌های صحرایی نظیر دره‌های عمیق v شکل و پادگانه‌های سنگ‌بستری که حاصل حفر شدن سنگ بستر (Bedrock) به‌وسیلهٔ رودخانه است دلیل بر این ادعاست (شکل۱۲). پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه نیز در این بخش مقادیر زیادی را نشان داده که به‌نظر می‌رسد ناشی از فعالیت زیاد دو پهنهٔ گسلی حسن‌آباد و ایپک باشد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی Iat می‌توان فعالیت زمین‌ساختی نسبی بالا (رده ۲) را بر گسل معکوس ایپک و بخش‌هایی از حسن‌آباد مشاهده کرد. گسل معکوس ایپک با مؤلفهٔ کوچک راستالغز چپ‌گرد [۲۳] به طول ۱۰۰ کیلومتر [۲٤] با امتداد باختری- خاوری است که از فاصلهٔ تقریبی ۱۰ کیلومتری جنوب بوئین‌زهرا می‌گذرد [۲۵]. مقادیر زیاد شاخص گرادیان رودخانه (Sl)، پیشانی‌های کوهستان مستقیم و خطی و هم‌چنین کج‌شدگی شدید حوضه‌های رودخانه‌ای به‌سمت باختر و شمال‌باختر در اثر عملکرد گسل ایپک همگی حاکی از فعالیت زمین‌ساختی زیاددر پیرامون

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

گسل مزبور است که با پهنه‌بندی شتاب گستره نیز هم خوانی دارد. زمین لرزهٔ ۱ سپتامبر ۱۹٦۲ بوئین زهرا با بزرگای ۷/۲ مربوط به جنبش این گسل است. یکی دیگر از گسل‌های دارای اهمیت در منطقهٔ بررسی شده پهنهٔ گسلی راندگی آوج است که در باختر و جنوب‌باختر گستره با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری قرار گرفته است، تقریباً همهٔ حوضه‌های واقع بر این پهنه گسلی فعالیت نسبی زمین‌ساختی بالا (رده ۲) ارائه می‌دهد. زمین‌لرزه اول تیرماه ۱۳۸۱ چنگوره با بزرگای ٦/۵ در اثر عملکرد همین پهنه گسلی رخ داده و چندین روستا را ویران کرده است. شواهد صحرایی از جمله دره‌های **V** شکل عمیق، تنگ‌دره‌ها و کج‌شدگی واحدهای کواترنر همگی حاکی از فعالیت زمین‌ساختی اخیر در امتداد این گسل را تأیید می‌کنند (شکل۱۳). نقشهٔ پهنه‌بندی Iat این قسمت از منطقه و وجود زمین‌لرزه‌های متعدد در پیرامون پهنه گسلی آوج حاکی از فعالیت زمین‌ساختی بالا است که با پهنه‌بندی شتاب گستره نیز هم‌خوانی دارد (شکل۱۰و۱۱). شواهد صحرایی به‌دست آمده از حوضه‌های اطراف شهر کرفس در بخش جنوب‌باختر منطقه، بریدگی و کج شدگی مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های کواترنری را مشخص می‌کد که بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی اخیر در این بخش از گستره است (شکل۱٤).

شکل۱۲. پادگانه‌های سنگ بستری که حاصل حفر شدن سنگ بستر (Bedrock) به‌وسیلهٔ رودخانه است واقع در محل هم‌پوشانی گسل‌های ایپک و حسن‌آباد

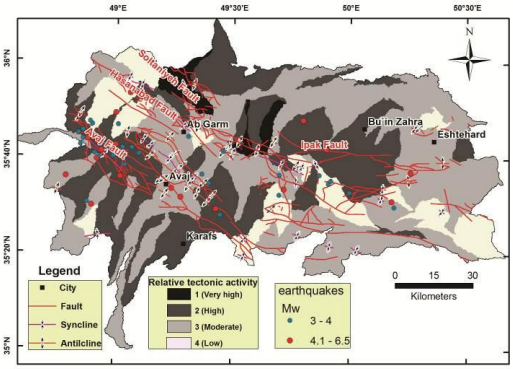
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



شکل۱۳. دره‌های v شکل آ) کج شدگی واحدهای کواترنری ب) و تنگ‌دره پ) در امتداد گسل آوج واقع در شمال‌باختر شهر آوج

شکل۱٤. بریدگی و کج شدگی نهشته‌های بادزن‌های آبرفتی و پادگانه های کواترنری در اطراف شهر کرفس واقع در جنوب‌باختر منطقه

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]



شکل۱۵. نقشهٔ پراکندگی زمین‌لرزه‌ها بر پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال منطقه

نتیجه‌گیری

با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال (Iat) و توزیع زمین‌لرزه‌ها (شکل۱۵)، حوضه‌هایی که دارای فعالیت نسبی زمین‌ساختی بالا و بسیاربالا هستند امتداد گسل‌های اصلی منطقه نظیر گسل سلطانیه، آوج، حسن‌آباد و ایپک را پوشش می‌دهند که با شواهد صحرایی مطابقت دارند، این حوضه‌ها عموماً دارای زمین لرزه‌هایی با بزرگی بیش‌تر از ٤ ریشتر را شامل می‌شوند. این در حالی است که حوضه‌های دارای زمین‌لرزه‌های با بزرگی کم‌تر از ٤ و دوره‌های بازگشت کوتاه کم‌ترین سطح فعالیت تکتونیکی نسبی را ارائه داده‌اند زیرا در این بخش‌های گستره، انرژی ذخیره شده ناشی از تنش‌های اعمالی بر منطقه در طی رخداد زمین‌لرزه‌های متعدد آزاد شده است. با توجه به‌وجود زمین‌لرزه‌های موجود در گستره و پهنه‌بندی شتاب که خطرپذیری بالای منطقه را به لحاظ لرزه‌ای مشخص می‌کند، می‌توان ادعا کرد که حتی حوضه‌هایی که به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی (Iat) دارای رده ٤ (فعالیت کم) هستند به‌ویژه آن حوضه‌هایی که در بین گسل‌های فعال قرار گرفته ولی فعالیت زمین‌ساختی کم دارند باید از لحاظ لرزه‌ای مورد توجه و اهمیت قرار گیرند چرا که این مناطق نه‌تنها در حال حاضر دارای زمین‌لرزه‌های متعددی هستند بلکه می‌توانند محل رخداد زمین‌لرزه‌های مخرب بعدی باشند. همهٔ شواهد ریخت‌زمین‌ساختی به‌همراه پهنه‌بندی شتاب گستره حاکی از فعالیت زمین‌ساختی بالا در این منطقه است که لازم است توجه و مطالعه بیش‌تر صورت گیرد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

تشکر و قدردانی

این پژوهش در راستای پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه خوارزمی انجام گرفته است، از این رو، از گروه زمین‌شناسی این دانشگاه برای فراهم آوردن امکانات لازم برای برداشت‌های صحرایی تشکر می‌کنیم. هم‌چنین از آقای مهندس سید احمد هاشمی، کارشناس پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی برای همکاری سپاسگزاریم.

منابع

1. Allen M. B., Armstrong H. A., "Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling", Palaeoecology, 265 (2008) 52-58
2. Berberian M., King G. C. P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences, 18 (1981) 210-265.
3. Vernant Ph., Nilforoushan F., Che´ry J. Bayer R. Djamour Y., Massona F., Nankalib H., Ritz J. F., Sedighi M., Tavakoli F., "Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using", Earth and Planetary Science Letters, 223 (2004) 177-185.
4. Ritz J. F., Nazari H., Salamati R., Shafeii A., Solaymani S., Vernant P., "Active transtension inside Central Alborz: a new insight into the Northern Iran–Southern Caspian geodynamics", Geology, 34 (2006) 477-480.
5. Keller E. A., Pinter N., "Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.) Prentice Hall", New Jersey (2002).
6. Ambraseys N. N., Melville C. P., "A History of Persian Earthquakes", Cambridge University Press, New York, 46 (1982) 219.
۷. بلورچی م.، "نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ آوج"، سازمان زمین‌شناسی واکتشافات معدنی کشور (۱۳۵٦).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

8. Jackson J., McKenzie D., "Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan", Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 77(1984) 185-264.

۹. اعلایی م.، "تحلیل نوزمین‌ساختی گستره بوئین‌زهرا-آوج"، جنوب قزوین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکدهٔ علوم‌زمین دانشگاه خوارزمی (۱۳۹٤).

۱۰. اعلایی م.، ده‌بزرگی م.، هاشمی ا.، نوزعیم ر.، "تحلیل خطر زمین‌لرزه به‌روش احتمالی به شعاع صد کیلومتری شهر آبگرم استان قزوین"، سی و سومین گردهمایی علوم زمین (۱۳۹۳).

11. Hack J. T., "Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge", U.S. Geological Survey Professional, 1265(1982) 1-49.

12. El Hamdouni R., Irigaray C., Fernandez T., Chacón J., Keller E. A., "Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain)", Geomorphology, 96(2007) 150-173.

13. Bull W. B., "Tectonic geomorphology of mountains: a newapproach to paleoseismology", Blackwell, Malden (2007).

14. Hare P. W., Gardner T. W., "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 (1985) 123-134.

15. Mayer L., "Introduction to Quantitative Geomorphology". Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ (1990).

16. Pike R. J., Wilson S. E., "Elevation–relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area–altitude analysis ", Geological Society of America Bulletin 82(1971) 1079-1084.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]

17. Cannon P. J., "Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin". Oklahoma Geology Notes 36 (1) (1976) 3-16.

18. Ramírez-Herrera M. T., "Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt". Earth Surface Processes and Landforms 23 (1998) 317-332.

19. Bull W. B., McFadden L. D., "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 (1977) 115-138.

20. Molin P., Pazzaglia F. J., Dramis F., "Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy", American Journal of Science 304 (2004) 559-589.

21. Gutenberg B., Richter C. F., "Frequency of earthquakes in California, Bull", Seism. Soc. Am., 34 (1944) 185-188.

22. Kijko A., Sellevoll M. A., "Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files", Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity, BSSA, 82 (1) (1992)120-134.

23. Berberian M., "An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; A seismo-tectonic review of the Contry", In Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II). Geological Survey of Iran, 518 (1976).

24. Berberian M., "Preliminary report on the structural analysis of lpak active fault", Geol.Surv. lran, Int. Rep (1971).

25. Ambraseys N. N., "On the regional conditions and damage during the Buyin Zara (Iran) earthquake of Ist September 1962", Final report to the UNESCON, S Paris (1962).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.1.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.123]