

ارزیابی زمین‌ساخت جنباً در گستره بوئین‌زهره-آوج (جنوب قزوین)

معصومه اعلائی، مریم ده‌بزرگی*؛

دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین،

محمدرضا قاسمی؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور،

پژوهشکده علوم زمین

رضا نوزعیم؛ دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۴/۱۱/۲۰ پذیرش ۹۵/۰۸/۱۰

چکیده

گستره بررسی شده در جنوب البرز مرکزی و لبه شمال‌باختری ایران مرکزی در بین گسل‌های لرزه‌خیز ایک 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 به منظور تعیین میزان فعالیت نوزمین‌ساختی، زمین‌ساخت فعال منطقه ارزیابی شده است و تحلیل خطر احتمالی گستره نیز انجام شده است. بنابراین برای بررسی فعالیت زمین‌ساختی اخیر منطقه بررسی شده، از ۶ شاخص زمین‌ریختی گرادیان طولی رود (SL)، سینوسی پیشانی کوهستان (Smf)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، انتگرال فراسنجی (Hi) و نسبت شکل حوضه زهکشی (Bs) استفاده شده است. در نهایت، پس از محاسبه شاخص زمین‌ساخت فعال (Iat)، گستره به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم در محیط ArcGIS10.1 پهنه‌بندی شده است. به منظور 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 به ترتیب $0.33g$ و $0.45g$ و برای ۴۷۵ سال $0.46g$ و $0.76g$ برآورد شده است. مقادیر به دست آمده از شاخص‌های زمین‌ریختی و نیز پهنه‌بندی شتاب منطقه نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی زیاد در نزدیکی گسل‌های ایک، حسن‌آباد، سلطانیه و آوج است. نتایج به دست آمده هم‌خوانی بسیار زیادی با شواهد صحرایی و زمین‌ریخت‌های به دست آمده از برداشت‌های میدانی ارائه می‌دهند.

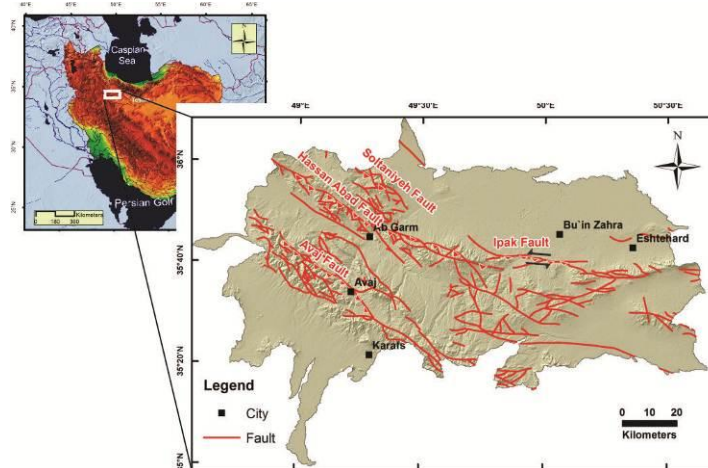
واژه‌های کلیدی: زمین‌ساخت فعال، شاخص‌های زمین‌ریختی، زمین‌لرزه، تحلیل خطر احتمالی، البرز مرکزی، ایران مرکزی

*نویسنده مسئول M_Dehbozorgi@khu.ac.ir

مقدمه

کشور ایران در کمربند چین‌خوردگی آلپ-همیالیا بین دو صفحه اوراسیا در شمال و صفحه‌عربی در جنوب واقع شده است و متأثر از حرکت رو به شمال صفحه‌عربی در حال کوتاه‌شدگی است که باعث شده بیش‌تر بخش‌های آن از لحاظ زمین‌ساختی فعال و پویا باشند [۱]، [۲]. منطقه 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 به دلیل حرکات رو به شمال ایران مرکزی و نیز رو به شمال‌باختر حوضه کاسپین جنوبی انجام می‌شود [۳]، [۴]. پهنه ساختاری ایران مرکزی نیز که در قسمت میانی فلات ایران در منطقه برخوردی صفحه‌عربی 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 و چشم‌اندازهای 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 تاریخچه چشم‌اندازهای کنونی سطح زمین کارساز بوده است [۵]. 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 گستره بررسی شده دیده می‌شود می‌توان به پهنه گسلی سلطانیه، گسل ایپک، گسل آوج و گسل حسن‌آباد اشاره کرد. گسل سلطانیه واقع در شمال‌باختر منطقه، با راستای شمال‌باختر- جنوب‌خاور و با شیب به سمت جنوب باختر دارای عملکرد معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌بر است که احتمال می‌رود زمین‌لرزه ۱۸۰۳ میلادی سلطانیه با بزرگای بیش از ۵/۳ بر اثر جنبش این گسله روی داده باشد. گسل جنب‌ا و فشاری ایپک مسبب زمین‌لرزه اول سپتامبر ۱۹۶۲ میلادی با بزرگای $M_s = 7.2$ و شدت $I_0 = IX$ یعنی همان زمین‌لرزه بوئین زهرا به همراه یک متر جابه‌جایی افقی بوده است [۶]. گسل راندگی آوج جداکننده دو پهنه ساختاری ایران مرکزی و

سنندج- سیرجان است [۷] و گسل حسن‌آباد که آخرین جنبش آن مربوط به زمین‌لرزه بوئین‌زهره (۱۳۴۱) است دارای حرکت عمده فشارشی با مؤلفه راستالغز است [۸]. با توجه به وجود گسل‌های یاد شده که زمین‌لرزه‌های مهمی بر آن‌ها ثبت شده است و چندین گسل فرعی دیگر در گستره بررسی شده، و وجود چندین شهر در حال توسعه پی بردن به سطح فعالیت زمین‌ساختی اخیر منطقه و نیز کمینه و بیشینه 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 ۶ شاخص زمین‌ریختی در سرتاسر منطقه بررسی، سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی تعیین شود و هم‌چنین پهنه‌بندی شتاب گستره نیز انجام شود. بدین منظور 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^۱ و تعیین جهت جریان^۲، حوضه‌های زهکشی و آبراهه‌های گستره بررسی شده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) آن با به‌کارگیری روش ترسیم آبراهه‌ها^۳ استخراج شده است.

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

سپس مرزهای تعیین شده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه بررسی و تلفیق شده و در محدوده زیرحوضه‌ها، پارامترهای فیزیوگرافیک مورد نیاز استخراج شدند. براین اساس، گستره بررسی شده به ۱۳۴ حوضه تقسیم و شاخص‌های زمین‌ریختی مذکور، به تفکیک در هر یک از حوضه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند [۹] (شکل ۲).

در روی‌کردی دیگر با استفاده از داده‌های کاتالوگ زمین‌لرزه‌های دستگاهی و تاریخی ایران برای گستره 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 بیشینه شتاب برای عمر مفید سازه ۷۵ و ۴۷۵ سال برآورد شده است [۱۰]. در نتیجه با تلفیق داده‌های به‌دست آمده از تحلیل خطر احتمالی، نقشه پهنه‌بندی شتاب گستره با کمک نرم‌افزار Arc Gis10.1 تهیه شده‌است (شکل ۱۰ و ۱۱).

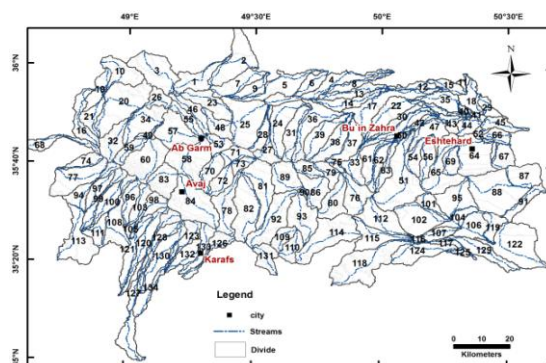
شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی

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 فراسنجی، نسبت شکل حوضه 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 (۱) در سرتاسر گستره بررسی شده و تلفیق آن با داده‌های برداشت شده از عملیات صحرائی، سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی برای گستره ارائه شود.

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)

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

¹ Iat

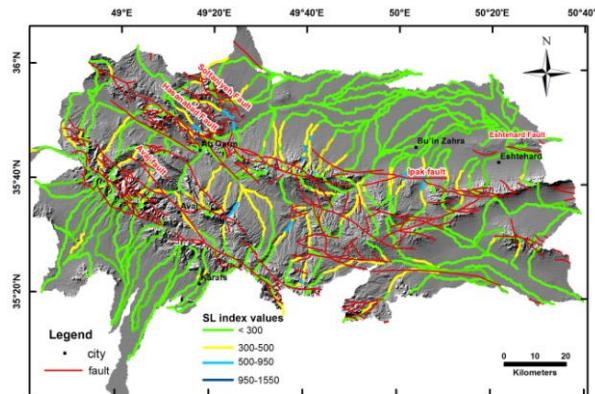


شکل ۲. نقشه توزیع مکانی ۱۳۴ حوضه در گستره بررسی شده

$$SL = (\Delta H / \Delta Lr) Lsc \quad (1)$$

در رابطه (۱)، SL شاخص گرادیان طولی رود، ΔH ارتفاع تراز توپوگرافی، ΔLr فاصله کنتورهای توپوگرافی است که عبارت $(\Delta H / \Delta Lr)$ شیب کانال را بیان می‌کند. Lsc نیز طول کانال از نقطه شروع شده تا جایی است که شاخص ارزیابی می‌شود. در این شاخص به‌طور غیرمستقیم میزان بالآمدگی زمین در هر زیرحوضه مشخص می‌شود و ارتباط نزدیکی با قدرت رود دارد. به‌منظور محاسبه شاخص SL برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۱۳۴ زیرحوضه گستره بررسی شده، لایه آبراهه‌ها در محیط ArcGIS 10.1 افزوده شده و مقادیر Lsc و $(\Delta H / \Delta Lr)$ 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 خیلی کم را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقادیر SL آن‌ها بین ۳۰۰-۵۰۰ است به‌رنگ زرد نشان داده شده‌اند که فعالیت زمین‌ساختی کم را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقادیر SL آن‌ها بین ۵۰۰-۹۵۰ است به‌رنگ آبی روشن نشان داده شده‌اند که فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهند و آبراهه‌هایی که مقدار SL آن‌ها بیش‌تر از ۹۵۰ است به‌رنگ آبی تیره نشان داده شده که فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالا را نشان می‌دهند.

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



شکل ۳. نقشه شاخص (SL) بر مدل ارتفاعی رقومی گستره بررسی شده

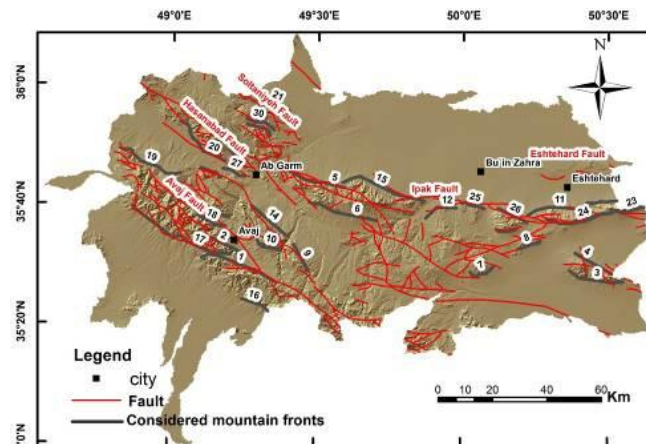
شاخص سینوسی پیشانی کوهستان (Smf)

شاخص سینوسی پیشانی کوهستان از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۳]:

$$Smf = Lmf / Ls \quad (2)$$

در رابطه (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 بالآمدگی زمین‌ساختی فعال همراه هستند، مستقیم بوده‌اند و مقادیر کم Smf را ارائه می‌دهند. اگر میزان بالآمدگی 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 منطقه بررسی شده محاسبه شده است (شکل ۴) و در نهایت به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، ۳ و ۱ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $Smf < 1.10$ رده یک، $1.10 \leq Smf < 1.5$ رده دو و $Smf \geq 1.50$

رده سه ۳ فعالیت زمین‌ساختی را به دست می‌دهند (جدول ۲). با توجه به نتایج به دست آمده به جز پیشانی‌های شماره ۳، ۴، ۶، 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.



شکل ۴. نقشه شاخص (Smf) بر مدل ارتفاع رقومی گستره بررسی شده

شاخص نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)

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

$$Vf = Vfw / [(Ald-Asc) + (Ard-Asc) / 2] \quad (3)$$

در این رابطه، Vf نسبت عرض به ارتفاع دره، Vfw پهنای دره، Asc، Ard، Ald به ترتیب، 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 ۱-۰/۵ کیلومتر 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، به منظور محاسبه Vf، برش عرضی دره در هر یک از زیرحوضه‌ها ترسیم شده و با استفاده از این برش‌ها و نیز مدل

ارتفاعی رقومی منطقه، مقادیر V_{fw} , A_{ld} , A_{sc} , A_{rd} در هر کدام از زیرحوضه‌ها به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شده است. آن‌گاه شاخص زمین‌ریختی فوق، طبق تقسیم‌بندی $V_f > 1$ ، $0.5 < V_f \leq 0.5$ و $V_f \geq 0.5$ به‌ترتیب به سه رده 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 حوضه 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 رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۴]:

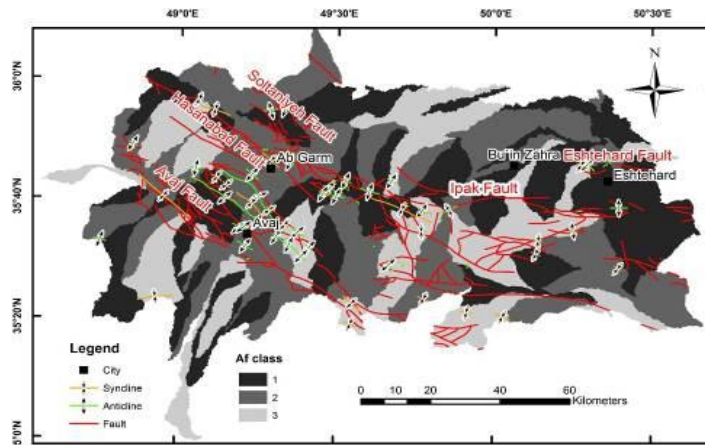
$$A_f = 100 (A_r/A_t) \quad (۴)$$

در این رابطه، A_r مساحت قسمت راست حوضه در جهت پایین رود نسبت به رود اصلی و A_t مساحت کل حوضه زهکشیاست. برای شبکه رودی که تشکیل شده و تداوم جریان در حالت ثابتی وجود دارد، A_f باید برابر ۵۰ باشد. A_f به خم‌شدگی عمود بر امتداد رود اصلی در حوضه 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 A_f کم‌تر از ۵۰ است. در این پژوهش، مقادیر (A_r) و (A_t) در محیط Arc GIS 10.1 اندازه‌گیری شده و شاخص A_f در ۱۳۴ زیرحوضه در منطقه بررسی شده، محاسبه شده است.

طبق تقسیم‌بندی $57 \leq Af \leq 65$ or $Af < 65$ or $Af > 35$ و $Af \geq 65$ or $Af \leq 35$

به ترتیب به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، و ۳ تقسیم شده است.

در پایان نقشه میزان کج‌شدگی در قسمت‌های مختلف گستره 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. نقشه عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) در گستره بررسی شده

منحنی فرازونجی و انتگرال فرازونجی (Hi)

منحنی‌های فرازونجی، توزیع سطوح ارتفاعی منطقه‌ای از زمین، یک حوضه آبخیز تا تمام سطح سیاره زمین را می‌توانند ارزیابی و توصیف کنند. منحنی فرازونجی 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) معمولاً بین یک تا صفر (در پایین‌ترین تا بالاترین نقطه حوضه تغییر می‌کند).

یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای توصیف شکل منحنی فراسنجی یک حوضه زهکشی مشخص، محاسبه انتگرال فراسنجی آن حوضه است. انتگرال فراسنجی حوضه به وسیله مساحت زیر منحنی فراسنجی مشخص می‌شود. شاخص فراسنجی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۵]، [۱۶]:

$$Hi = (\text{average elevation} - \text{min. elev.}) / (\text{max. elev.} - \text{min. elev.}) \quad (5)$$

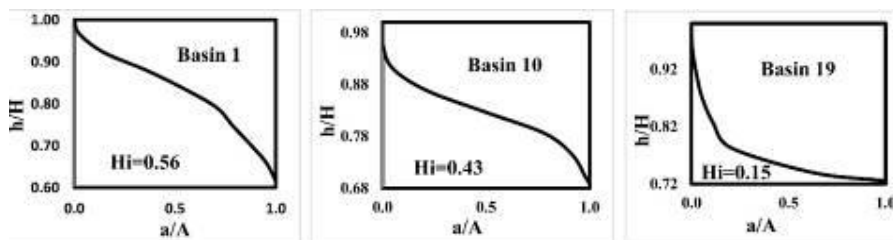
ارتفاع بیشینه و کمینه و متوسط به‌طور مستقیم از نقشه توپوگرافی به‌دست می‌آید. مقادیر بالای انتگرال فراسنجی (> 0.5) دلالت بر وجود توپوگرافی بالا نسبت به میانگین حوضه زهکشی، مانند سطوح بالا آمده و فلاتی که به‌وسیله رودها بریده شده‌اند و مقادیر کم تا متوسط انتگرال فراسنجی (< 0.4) حاکی از برش شبکه زهکشی در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

در این مطالعه با توجه به تحذب و تفرع منحنی‌های فراسنجی، هر کدام از حوضه‌ها به‌طور مجزا به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، و ۳ تقسیم شده‌اند، به طوری که منحنی‌های فراسنجی محدب با مقادیر $(Hi \geq 0.5)$ رده ۱، منحنی‌های فراسنجی محدب - مقعر با مقادیر $(0.5 > Hi \geq 0.4)$ رده ۲ و منحنی‌های فراسنجی مقعر با مقادیر $(Hi < 0.4)$ رده ۳ سطح فعالیت زمین‌ساختی را ارائه می‌دهند [۱۲]. کمترین مقدار انتگرال در حوضه شماره ۱۹ با منحنی فراسنجی مقعر و بیشترین مقدار آن در حوضه شماره ۱ منحنی فراسنجی محدب به دست آمده است (شکل ۶). نتایج به دست آمده از ترسیم منحنی‌های فراسنجی نشان‌دهنده آن است که مقادیر بالای این شاخص منطبق با گسل‌های سلطانی، آوج، حسن آباد و گسل‌های فرعی در جنوب زون گسلی ایپک است.

شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs)

شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۷]، [۱۸]:

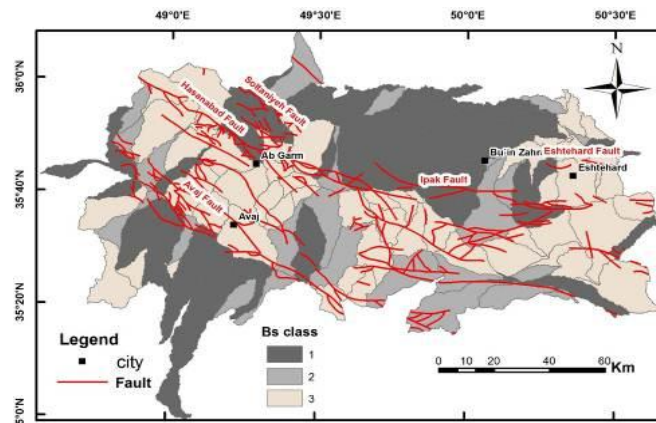
$$Bs = B_l/B_w \quad (6)$$



شکل ۶. منحنی‌های فراسنجی حوضه‌های ۱ (بالا، $H_i = 0.56$)، ۱۰ (متوسط، $H_i = 0.43$) و ۱۹ (پایین، $H_i = 0.15$). (A): مساحت کل حوضه، (a): مساحتی از حوضه در بالای ارتفاع (h). در رابطه (۶)، BI 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 حالی که 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 رودخانه اصلی هر زیرحوضه، شاخص ژئومورفیکی بالا، در هر یک از زیرحوضه‌ها به تفکیک اندازه‌گیری شده و در نهایت به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، ۳ و ۴ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $Bs \geq 4$ رده یک، $3 \leq Bs < 4$ رده دو و $Bs < 3$ رده سه فعالیت زمین‌ساختی را به دست می‌دهند. شاخص Bs در ۱۳۴ زیرحوضه در منطقه بررسی شده محاسبه شده است و نتایج به دست آمده حاکی از این است که کشیده‌ترین حوضه‌ها با مقادیر زیاد Bs، همراهی خوبی با گسل‌های ایپک و آوج ارائه می‌دهند (شکل ۷).

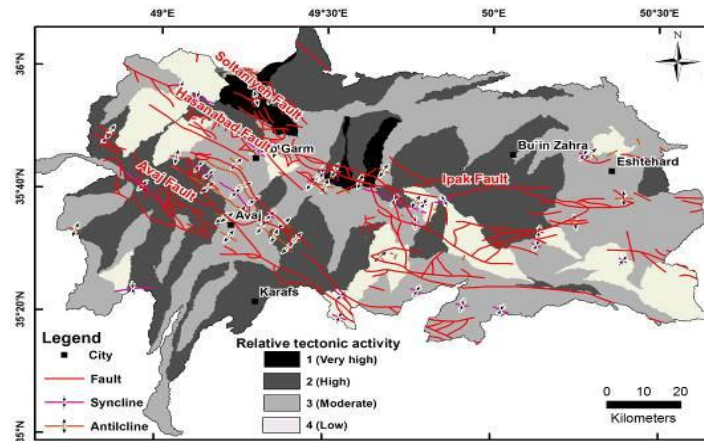
شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)

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



شکل ۷. نقشه شکل حوضه زهکشی (Bs) در گستره بررسی شده

طولی رود، تقارن نداشتن حوضه زهکشی، انتگرال فراسنجی، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان به تفکیک در هر یک از ۱۳۴ زیرحوضه محاسبه شده و چنان‌که در بالا به تفصیل شرح داده شد، به ۳ رده زمین‌ساختی تقسیم شده‌اند. آن‌گاه در هر زیرحوضه به‌طور مجزا میانگین مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفیکی (S/n) اندازه‌گیری شده و سپس به ۴ رده که در حقیقت همان رده‌های شاخص زمین‌ساخت فعال (I_{at}) گستره بررسی شده است، طبقه‌بندی شده‌اند (جدول ۲). رده یک سطح فعالیت زمین‌ساختی، شامل مقادیر $1.5 > S/n \geq 1$ بوده است و نشان‌گر فعالیت نسبی خیلی زیاد است. رده دو بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی نسبی زیاد با مقادیر $2 > S/n \geq 1.5$ ، رده سه نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط با مقادیر $2.5 > S/n \geq 2$ و رده چهار با مقادیر $S/n \geq 2.5$ فعالیت زمین‌ساختی نسبی کم را ارائه می‌کند [۱۲]. در نهایت، نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی، برای گستره ترسیم شده و گستره بررسی شده به چهار بخش خیلی فعال، فعال، فعالیت متوسط و فعالیت کم تقسیم شده است (شکل ۸)، به طوری‌که بخش خیلی فعال ۳٪، بخش فعال ۳۶٪، بخش با فعالیت متوسط ۵۰٪ و بخش با فعالیت کم ۱۱٪ از کل گستره بررسی شده را تشکیل می‌دهند.



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

جدول ۲) مقادیر شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) در گستره مورد مطالعه

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

| شماره | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص کج شدگی | رده بندی شاخص فراسنجی | رده بندی شاخص پیشانی کوهستان | رده بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع | رده بندی شاخص شکل حوضه زهکشی | مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی | رده بندی 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 |

| شماره | رده بندی شاخص گرادیان طولی رود | رده بندی شاخص کج شدگی حوضه | رده بندی شاخص فراسنده جی | رده بندی شاخص پیشانی کوهستان | رده بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع | رده بندی شاخص شکل حوضه زهکشی | مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی | رده بندی 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 |

| شماره | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص کج شدگی حوضه | رده بندی شاخص فراسنجی | رده بندی شاخص پیشانی کوهستان | رده بندی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع | رده بندی شاخص شکل حوضه زهکشی | مقدار شاخص زمین-ساخت فعال نسبی | رده بندی 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 |

| شماره | رده‌بندی شاخص گرادیان طولی رود | رده‌بندی شاخص کج‌شدگی حوضه | رده-بندی شاخص فراسنجی | 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 |

| شماره | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص | رده بندی شاخص | مقدار شاخص | رده بندی شاخص |
|----------|------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| زیر-حوضه | گرادیان طولی رود | کج شدگی حوضه | فرازسنجی | پیشانی کوهستان | نسبت پهنای کف دره به ارتفاع | شکل حوضه زهکشی | زمین-ساخت فعال نسبی | 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 |

پهنه بندی شتاب گستره

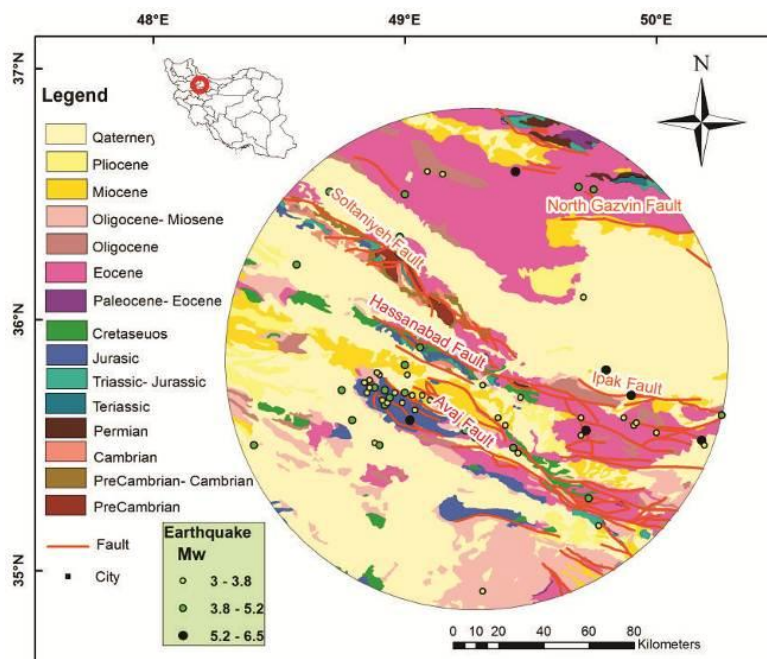
به منظور تحلیل خطر احتمالی گستره، داده‌های لرزه‌ای در وسعتی به شعاع ۱۰۰ کیلومتری

از شهر آبگرم جمع‌آوری شده است که نه تنها محدوده پژوهش‌های ریخت زمین‌ساختی را

پوشش می‌دهد، بلکه گسل‌های اطراف منطقه را نیز با هدف دقیق‌تر کردن نتایج پژوهش‌های لرزه زمین‌ساختی شامل می‌شود (شکل ۹). بدین‌منظور، از زمین‌لرزه‌های دستگاهی روی داده در گستره بررسی شده که از کاتالوگ پژوهشگاه زلزله‌شناسی ایران (IIEES) استخراج شده است (جدول ۳) و هم‌چنین از زمین‌لرزه‌های تاریخی گستره (جدول ۴) [۵] استفاده شده است. از جمله زمین‌لرزه‌های ویران‌گری که در این گستره به‌وقوع پیوسته زمین‌لرزه روستای کله‌در در ۲۰ اکتبر ۱۸۷۶ با بزرگای ۵/۷، زمین‌لرزه اول سپتامبر ۱۹۶۲ میلادی بوئین‌زهره با بزرگای ۷/۲ و زمین‌لرزه ۱۰ دسامبر ۱۱۱۹ میلادی قزوین با بزرگای ۶/۵ هستند.

برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک پهنه مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوه توزیع زلزله‌ها و بزرگای آن‌ها ارائه شده است. یکی از معتبرترین آن‌ها، رابطه 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 M_{max} ، 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 رابطه $Alborz-Lut$ 95 H, Ambraseys و Joyner & 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 ۴۷۵ سال بر روی سنگ بستر به‌دست آمده است (جدول ۶). 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، نقشه پهنه‌بندی شتاب برای کل

گستره بررسی شده برای بازه زمانی عمر مفید سازه ۷۵ (شکل ۱۰) و بازه زمانی عمر مفید سازه ۴۷۵ (شکل ۱۱) به کمک نرم افزار ArcGIS10.1 ارائه شده است.



شکل ۹. نقشه زمین‌شناسی منطقه به همراه زمین‌لرزه‌های گستره

جدول ۳. زمین‌لرزه‌های تاریخی رخ داده در گستره بررسی شده

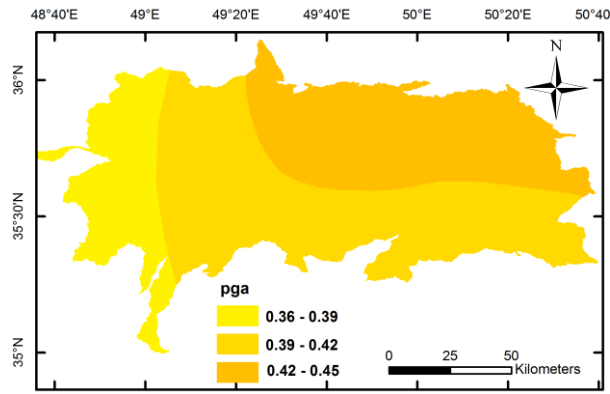
| ID | y | m | d | Lat. | Lon. | Mw | Reference |
|----|------------|-----|-----|------|------|-------|-----------|
| 1 | 3rd Mil BC | --- | --- | 35.6 | 49.9 | ----- | AMB |
| 2 | 1119 | 12 | 10 | 35.7 | 49.9 | 6.5 | AMB |
| 3 | 1803 | --- | --- | 36.4 | 48.8 | ----- | AMB |
| 4 | 1876 | 10 | 20 | 35.8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

جدول ۴: زمین‌لرزه‌های دستگاهی رخ داده در گستره مورد مطالعه پس از حذف پس‌لرزه و پیش‌لرزه

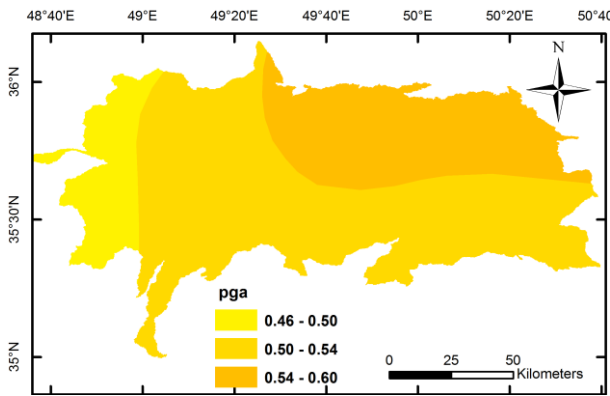
| ID | Y | M | D | Lat. | Lon. | Mw | Reference |
|----|------|----|----|-------|-------|-----|--------------------|
| 1 | 1927 | 6 | 15 | 35.5 | 48.4 | 4.7 | ISC ¹ |
| 2 | 1927 | 10 | 31 | 36.5 | 49 | 4.7 | ISC |
| 3 | 1948 | 6 | 17 | 36.59 | 49.44 | 5.8 | ISC |
| 4 | 1962 | 9 | 4 | 35.56 | 49.72 | 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 | IIIES ² |
| 19 | 2004 | 8 | 21 | 35.49 | 49.43 | 4.5 | IIIES |
| 20 | 2004 | 11 | 8 | 35.73 | 48.88 | 4.8 | IIIES |
| 21 | 2005 | 7 | 19 | 35.58 | 49.91 | 3.4 | IIIES |
| 22 | 2005 | 7 | 24 | 35.72 | 48.75 | 4.1 | IIIES |
| 23 | 2006 | 1 | 5 | 35.66 | 48.92 | 4.1 | IIIES |
| 24 | 2006 | 3 | 19 | 35.67 | 48.99 | 3.3 | IIIES |
| 25 | 2006 | 6 | 28 | 35.71 | 49 | 4.1 | IIIES |
| 26 | 2006 | 8 | 30 | 36.09 | 49.71 | 3.1 | IIIES |
| 27 | 2006 | 10 | 25 | 35.73 | 48.86 | 3.3 | IIIES |
| 28 | 2006 | 11 | 15 | 35.18 | 49.77 | 3.3 | IIIES |
| 29 | 2006 | 12 | 8 | 35.71 | 48.96 | 3 | IIIES |
| 30 | 2007 | 3 | 28 | 35.61 | 49.37 | 3.7 | IIIES |

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

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



شکل ۱۰. پهنه‌بندی شتاب برای ۷۵ سال



شکل ۱۱. پهنه‌بندی شتاب برای ۴۷۵ سال

جدول ۵. پارامترهای لرزه‌خیزی سرچشمه‌های گستره بررسی شده

| Source no. | λ | β | Mmax | Mmin |
|------------|-----------|---------|------|------|
| ۱ | ۰/۰۶ | ۱/۰۱ | ۷/۰۳ | ۴/۷۰ |
| ۲ | ۰/۶۲ | ۱/۰۱ | ۴/۹۶ | ۳ |
| ۳ | ۰/۳۰ | ۱/۱۲ | ۶/۶۹ | ۲/۹ |
| ۴ | ۴/۴۸ | ۱/۲۲ | ۶/۸۳ | ۲/۹ |

جدول ۶. شتاب محاسبه شده در دو بازه زمانی ۷۵ و ۴۷۵ سال

| عمر مفید سازه (سال) | شتاب کمینه | شتاب بیشینه |
|---------------------|------------|-------------|
| ۷۵ | ۰/۳۳g | ۰/۴۵g |
| ۴۷۵ | ۰/۴۶g | ۰/۶g |

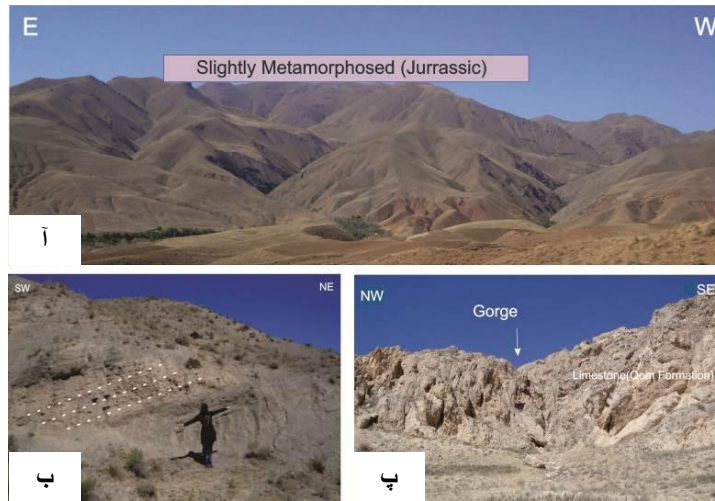
بحث

گسل سلطانیه یکی از گسل‌های مهم در منطقه بررسی شده است که در بخش شمال باختری منطقه واقع شده است. این گسل با راستای شمال‌باختر- جنوب‌خاور و با شیب به سمت جنوب‌باختر دارای عملکرد معکوس با مؤلفه 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 رده ۱ زمین‌ساخت فعال را دارا هستند. احتمال می‌رود زمین لرزه ۱۸۰۳ میلادی سلطانیه با بزرگای بیش از ۵/۳ 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 رده ۱ را ارائه می‌دهد و نشان‌گر فعالیت زمین‌ساختی بالای منطقه پلکانی در بخش هم‌پوشانی گسل‌های مزبور در این قسمت از منطقه بررسی شده است، شواهد زمین‌ریخت‌های به‌دست آمده از پژوهش‌های صحرایی نظیر دره‌های عمیق ۷ شکل و پادگانه‌های سنگ‌بستری که حاصل حفر شدن سنگ بستر (Bedrock) به‌وسیله رودخانه است دلیل بر این ادعاست (شکل ۱۲). پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه نیز در این بخش مقادیر زیادی را نشان داده که به‌نظر می‌رسد ناشی از فعالیت زیاد دو پهنه 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 مؤلفه کوچک راستالغز چپ‌گرد [۲۳] به طول ۱۰۰ کیلومتر [۲۴] با امتداد باختری- خاوری است که از فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری جنوب بوئین‌زهر می‌گذرد [۲۵]. مقادیر زیاد شاخص گرادیان رودخانه (SI)، 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 زیاد در پیرامون

گسل مزبور است که با پهنه‌بندی شتاب گستره نیز هم خوانی دارد. زمین لرزه ۱ سپتامبر ۱۹۶۲ بوئین زهره با بزرگای ۷/۲ مربوط به جنبش این گسل است. یکی دیگر از گسل‌های دارای اهمیت در منطقه بررسی شده پهنه گسلی راندگی آوج است که در باختر و جنوب‌باختر گستره با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری قرار گرفته است، تقریباً همه حوضه‌های واقع بر این پهنه گسلی فعالیت نسبی زمین‌ساختی بالا (رده ۲) ارائه می‌دهد. زمین‌لرزه اول تیرماه ۱۳۸۱ چنگوره با بزرگای ۶/۵ در اثر عملکرد همین پهنه گسلی رخ داده و چندین روستا را ویران کرده است. شواهد صحرایی از جمله دره‌های ۷ شکل عمیق، تنگ‌دره‌ها و کج‌شدگی واحدهای کواترنر همگی حاکی از فعالیت زمین‌ساختی اخیر در امتداد این گسل را تأیید می‌کنند (شکل ۱۳). نقشه 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 (شکل ۱۰ و ۱۱). شواهد صحرایی به‌دست آمده از حوضه‌های اطراف شهر کرفس در بخش جنوب‌باختر منطقه، بریدگی و کج‌شدگی مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های کواترنری را مشخص می‌کند که بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی اخیر در این بخش از گستره است (شکل ۱۴).



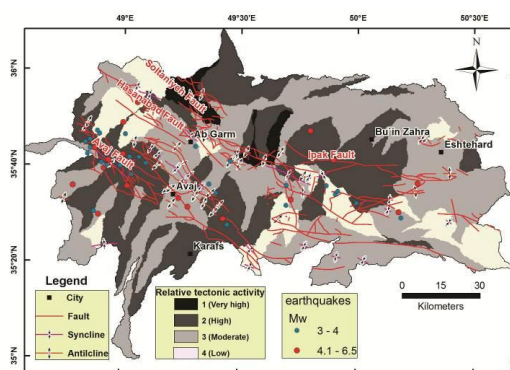
شکل ۱۲. پادگانه‌های سنگ بستری که حاصل حفر شدن سنگ بستر (Bedrock) به‌وسیله رودخانه است واقع در محل هم‌پوشانی گسل‌های ایپک و حسن‌آباد



شکل ۱۳. دره‌های ۷ شکل آ) کج شدگی واحدهای کواترنری ب) و تنگ‌دره پ) در امتداد گسل اوج واقع در شمال‌باختر شهر اوج



شکل ۱۴. بریدگی و کج شدگی نهشته‌های بادزن‌های آبرفتی و پادگانه‌های کواترنری در اطراف شهر کرفس واقع در جنوب‌باختر منطقه



شکل ۱۵. نقشه پراکندگی زمین‌لرزه‌ها بر پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال منطقه

نتیجه‌گیری

با توجه به نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال (Iat) و توزیع زمین‌لرزه‌ها (شکل ۱۵)، حوضه‌هایی که دارای فعالیت نسبی زمین‌ساختی بالا و بسیار بالا 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 زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیش‌تر از ۴ ریشتر را شامل می‌شوند. این در حالی است که حوضه‌های دارای زمین‌لرزه‌های با بزرگی کم‌تر از ۴ 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 به وجود 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 ۴ (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. همه شواهد ریخت‌زمین‌ساختی به‌همراه پهنه‌بندی شتاب گستره حاکی از فعالیت زمین‌ساختی بالا در این منطقه است که لازم است توجه و مطالعه بیش‌تر صورت گیرد.

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 صحرائی 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., Chéry 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.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ آوج"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۶).

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 بوئین‌زهره-آوج"، جنوب قزوین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده علوم زمین دانشگاه خوارزمی (۱۳۹۴).
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 new approach 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.

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 Ipak active fault", *Geol.Surv. Iran, 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 UNESCO, S Paris* (1962).