

## مناطق با پتانسیل فعالیت زمین‌ساختی بالا در ناحیه تهران - قزوین بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی

نوشین بقاء\*؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، رباط کریم، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۰

### چکیده

غالب مطالعات و پژوهش‌ها، مرتبط با فرایندهای زمین‌ساختی، بر دگرشکلی‌ها و حوادث لرزه‌ای و خطرات ناشی از این رخدادها در مناطق و نواحی مختلف متمرکز است. اما، همچنان که مسلم است، در بسیاری از مناطق شاهد آسیب‌های ناشی از فعالیت زمین‌ساختی، بدون رخدادهای لرزه‌ای، هستیم. بنابراین، برای مطالعه جامع و ارزیابی دقیق‌تر فعالیت‌های زمین‌ساختی، امروزه، به مطالعات ریخت‌زمین‌ساختی در کنار سایر مطالعات توجه می‌شود. در این پژوهش، با محاسبه شاخص‌های ریخت‌سنجی متعدد در لبه جنوبی البرز مرکزی، در محدوده تهران - قزوین، و ارزیابی این شاخص‌ها با توجه به شرایط زمین‌ساختی و آب‌وهوایی، مناطقی با فعالیت‌های زمین‌ساختی نسبی بالاتر تعیین شد. این نواحی می‌توانند مناطقی با میزان پتانسیل خطر بالا در آینده به شمار آیند. در این مطالعه، مدل ارتفاعی رقومی ناحیه مورد مطالعه، بر اساس نقشه‌های توپوگرافی متعدد و تصاویر ماهواره‌ای Aster ۳۰\*۳۰، در سیستم اطلاعات جغرافیایی، ساخته شده است. شاخص‌های ریخت‌سنجی متعدد در ۱۲۳ زیرحوضه تعیین شده محاسبه و ارزیابی شدند. با توجه به تفاوت میزان ارجحیت این شاخص‌ها در ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی نسبی یک ناحیه، برای پهنه‌بندی محدوده مورد نظر به مناطقی با میزان فعالیت زمین‌ساختی مختلف، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به کار رفت. قطعه مرکزی گسل شمال تهران، زون گسلی طالقان شرقی، زیرحوضه‌های متناظر با بخشی‌هایی از گسل‌های ایبک و اشتهارد، و بخش‌های محدودی از گسل شمال قزوین رده بالا و نسبتاً بالای فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: پتانسیل خطر، تحلیل سلسله‌مراتبی، شاخص‌های ریخت‌سنجی، فعالیت زمین‌ساختی، منطقه قزوین.

### مقدمه

کمربند چین‌خورده - رانده البرز در شمال صفحه ایران مرکزی در یک راستای عمومی خاوری - باختری امتداد یافته است. الگوی ساختاری چیره این رشته‌کوه از نوع گسل‌های رانده (همراه حرکات امتدادلغز، به‌ویژه در جنبش‌های زمین‌ساختی کواترنری) (Alavi 1991) و چین‌های ملایم و ناهماهنگ است. پژوهش‌های لرزه‌زمین‌ساختی موجود در گستره البرز نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساخت بالا در این زون گسلی است (Berberian & yeatz 2001). زمین‌ریخت‌شناسی ابزاری مفید در بررسی زمین‌ساخت پویا در هولوسن و اواخر پلیوستوسن است (Keller & Pinter 2002). ریخت‌سنجی با اندازه‌گیری شاخص‌های متعدد از عوارض ریخت‌شناسی امکان مقایسه نسبی فعالیت‌های زمین‌ساختی ناحیه را فراهم می‌کند (Keller & Pinter 1996; Burbank & Anderson 2001). محاسبه این شاخص‌ها و تعیین شاخص نهایی (Iat) از آن‌ها رده‌بندی فعالیت‌های زمین‌ساختی نسبی را نشان می‌دهد (El Hamdouni et al 2008). این مطالعات پیش ازین در نواحی متعددی از دنیا انجام شده است (Rockwell et al 2008; Silva 1994; Wells et al 1988; 1985).

ابتدا با مطالعه اولیه نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای محدوده اولیه در نرم‌افزار ARC GIS تعیین شد. مطالعه دقیق مشخصات ریخت‌زمین‌ساختی یک ناحیه نیازمند ساخت مدل ارتفاعی رقومی (DEM) آن محدوده بر اساس نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰) است. بنابراین، بعد از مطالعه اولیه نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰) (۲۰۰ نقشه توپوگرافی) در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ARC GIS)، به علت وجود برخی خطاها در تصاویر رقومی این

اطلاعات، به اصلاح این نقشه‌ها اقدام شد و در این زمینه از تصاویر و اطلاعات ماهواره‌ای متعدد استفاده شد. مدل ارتفاعی رقومی اولیه بر اساس اطلاعات نقشه‌های رقومی توپوگرافی (اطلاعاتی همانند خطوط تراز و نقاط ارتفاعی و آبراهه‌ها) در سامانه اطلاعات جغرافیایی ساخته شد. برای اطمینان بیشتر از مدل ارتفاعی رقومی فوق، مدل ارتفاعی رقومی حاصل از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای Aster 30\*30 از سایت USGS تهیه شد. بر اساس سه رود اصلی کرج و شور و خررود، موقعیت حوضه آبریز اصلی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰) و اطلاعات ماهواره‌ای مشخص شد. مدل ارتفاعی رقومی حوضه آبریز اصلی در نرم‌افزار Arc Hydro پردازش و محدوده مورد مطالعه به ۱۵۰ زیرحوضه تقسیم شد. با توجه به هدف این پژوهش، زیرحوضه‌ها بر اساس سایر اطلاعات (همانند نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای و شبکه آبراهه‌ها) دوباره بازبینی و ۱۲۳ زیرحوضه مناسب برای مطالعات ریخت‌سنجی تعیین شدند.

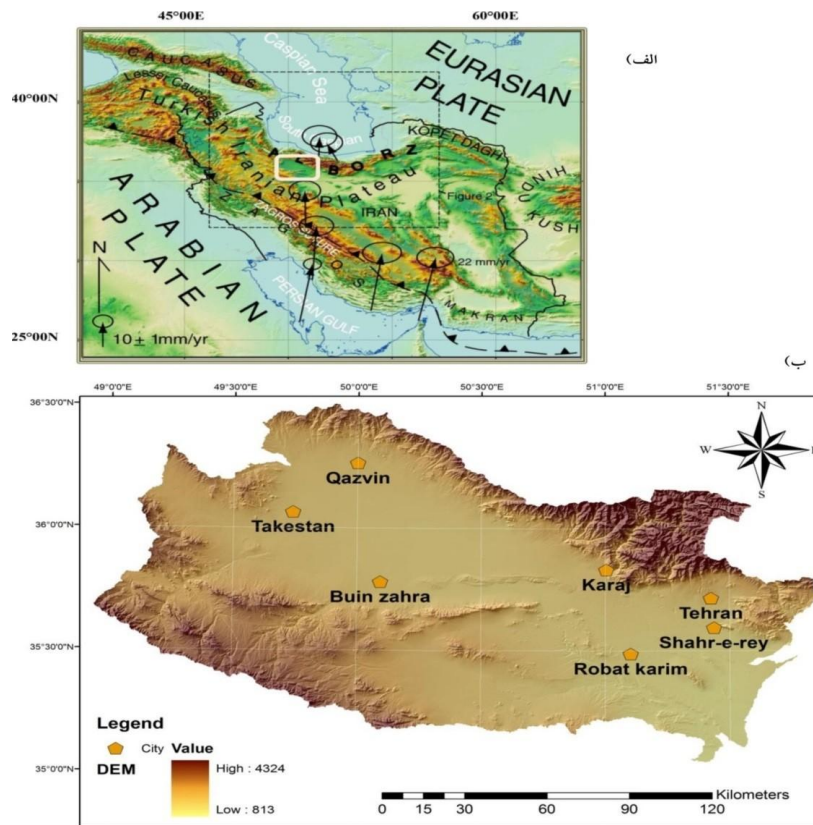
در هر ۱۲۳ زیرحوضه ۶ شاخص ریخت‌سنجی مهم شامل شاخص طول - شیب رودخانه (SL)، شاخص انتگرال هیپسومتریک (Hi)، شاخص شکل حوضه (Bs)، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، شاخص سینوسیته پیشانی کوهستانی (Smf)، شاخص نسبت پهنای کف دره به درازای آن (Vf) محاسبه و ارزیابی شد. پس از محاسبه شاخص‌ها، مقادیر به دست آمده به سه رده طبقه‌بندی شدند (EL Hamdouni et al 2008). در مطالعات قبلی، بر اساس میانگین حاصل از رده‌های شاخص‌های هر زیرحوضه، یک شاخص (Iat) به منزله رده فعالیت زمین‌ساختی آن زیرحوضه تعیین می‌شد (EL Hamdouni et al 2008).

از آنجا که میزان ارجحیت هر شاخص در تعیین رده‌بندی نهایی فعالیت زمین‌ساخت نسبی می‌تواند متفاوت باشد، در این تحقیق از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای تعیین رده‌بندی فعالیت زمین‌ساخت نسبی استفاده شد (Saaty 1977; Saaty & Vargas 1991). در فرایند سلسله‌مراتبی، میزان ارجحیت بین عناصر (شاخص‌های ریخت‌سنجی) از ۱ تا ۹ تغییر می‌کند. در این روش، میزان‌های ارجحیت ۱ و ۳ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده اهمیت یا مطلوبیت یکسان، کمی مطلوب‌تر (کمی مهم‌تر)، و قوی هستند. همچنین میزان‌های ۲ و ۴ نشان‌دهنده میزان مطلوبیت آن شاخص بین فواصل فوق‌اند (Saaty 1997). در این مطالعه، با استفاده از ماتریس‌های مقایسه زوجی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) گروهی (آرام ۱۳۹۱) و غیرگروهی (Bagha et al 2014)، طبقه‌بندی از فعالیت زمین‌ساختی ناحیه بسیار وسیع حوضه آبریز تهران - قزوین (۲۶/۲۵۱۶۰ km) ارائه کرده‌ایم.

## موقعیت زمین‌شناسی

رشته‌کوه البرز در شمال ایران تحت تأثیر همگرایی شمالی - جنوبی صفحه ایران مرکزی (اواخر تریاری) (Berberian 1983) و حرکت حوضه خزر جنوبی به سمت شمال غرب (پلیوستوسن) (Ritz et al 2006) گسترش یافته است. ناحیه مورد مطالعه بخشی از لبه جنوبی و بخش داخلی دامنه البرز مرکزی را شامل می‌شود که در بردارنده گسل‌های مهمی، همانند گسل اصلی مشا و گسل شمال تهران و پایانه شرقی گسل طالقان، است. این منطقه حاوی نهشته‌های پرکامبرین تا کواترنری است و در بخش اعظم جنوب ناحیه، به‌ویژه در محدوده شهر تهران، آبرفت‌های کواترنری و رسوبات هولوسن دیده می‌شود. تغییرات مؤلفه‌های همگرایی، به‌ویژه طی پلیوسن - عهد حاضر (Allen et al 2003)، عامل ایجاد تنوع در روند و سازوکار حرکتی ساختارهای منطقه است؛ طوری که فعالیت‌های زمین‌ساختی کواترنری در راستای گسل‌های شاخص در این منطقه، به‌ویژه در امتداد گسل مشا، به علت چرخش ساعت‌گرد حوضه خزر جنوبی (پلیوستوسن)، به صورت امتدادلغز چپ‌گرد مشخص است (Ritz et al 2006) که فعالیت‌های لرزه‌ای اخیر هم مؤید آن است (Jackson et al 2002). همچنین مطالعات ژئودتیکی نشان می‌دهد بخش عمده حرکات امتدادلغز چپ‌گرد روی گسل اصلی دامنه جنوبی البرز مرکزی (گسل مشا) متمرکز شده که نرخ لغزش ۷ mm/yr را در بیشتر از یک دوره ۵My برای جابه‌جایی پلیوسن - کواترنری گسل مشا پیشنهاد کرده‌اند (Vernant et al 2004 a)؛ طوری که ۳۵-۳۰ کیلومتر از جابه‌جایی امتدادلغز در ناحیه البرز مرکزی به واسطه جنبش‌های اخیر گسل مشا (شمال شرق تهران) رخ داده است (Allen et al 2003). همچنین، تحولات ساختاری طی میوسن تا عهد حاضر عامل دگرشکلی‌های فشاری در البرز

مرکزی به صورت چین‌ها و گسل‌های رانده‌شده است (Allen et al 2003). راندگی رسوبات اتوسن روی آبرفت‌های عهد حاضر در امتداد گسل مرزی شاخص البرز مرکزی در شمال ناحیه تهران دیده می‌شود. بنابراین، حرکات کواترنری در ناحیه مورد مطالعه عمدتاً به صورت راندگی با مؤلفه امتدادلغز در شمال ناحیه تهران (گسل شمال تهران، لبه جنوبی البرز مرکزی) (Ritz et al 2006; Nazari & Ritz 2008; Nazari et al 2007; Guest et al 2006)، بخش غربی گسل مشا در جنوب پایانه شرقی زون گسلی طالقان (Guest et al 2006)، و جابه‌جایی‌های امتدادلغز چپ‌گرد در بخش شرقی گسل مشا (با مؤلفه کوچک نرمال) (سلیمانی ۲۰۰۳ و Ritz et al 2003; Abbassi et al 2006) و بخش‌های داخلی دامنه البرز مرکزی (Ritz et al 2006) وجود دارد.



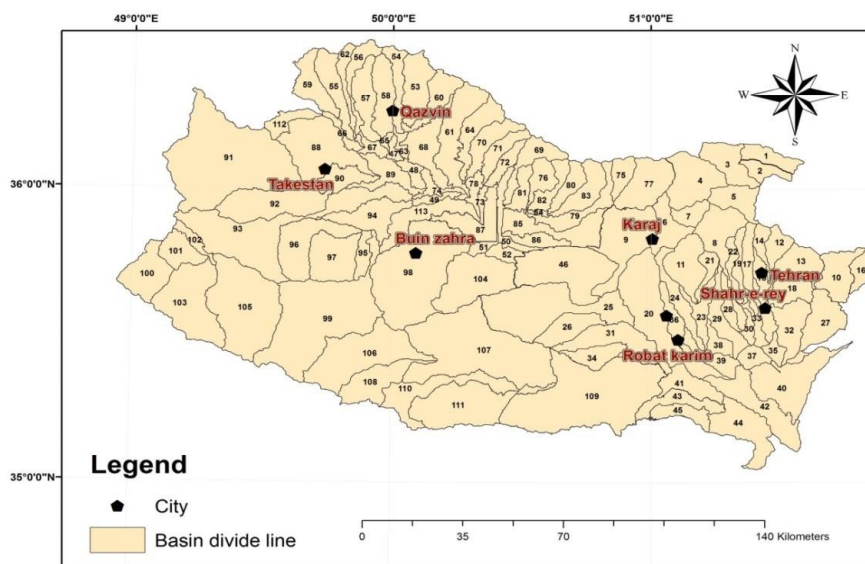
شکل ۱. الف) مدل ارتفاعی رقومی بخشی از خاورمیانه؛ ب) ناحیه مورد مطالعه

### ارزیابی شاخص‌های ریخت‌سنجی

در گذشته این مطالعات صرفاً روی پیشانی‌های کوهستانی و فقط با استفاده از دو شاخص ریخت‌سنجی انجام می‌شده است (Smf,  $V_f$ ) (Bull & Macfadden 1977; Rockwell et al 1985; Azor et al 2002; Molin et al 2004). در این پژوهش همه شاخص‌های مرتبط با تغییرات کانال رود و حوضه‌های آبریز بررسی شد و با استفاده از یک شاخص منفرد (lat)، که نتیجه محاسبات مربوط به ۶ شاخص مورفومتری است، فعالیت زمین‌ساخت نسبی ناحیه ارزیابی شد (El Hamdouni et al 2008).

از آنجا که مطالعات مرتبط با ریخت‌شناسی حوضه‌های آبریز و مشخصه‌های فیزیوگرافیک آبراه‌هاست، ابتدا، مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ناحیه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای Aster ۳۰\*۳۰ در سامانه اطلاعات جغرافیایی ساخته شد. سپس توسط نرم‌افزار Arc Hydro محدوده مورد مطالعه ابتدا به ۱۵۰ زیرحوضه و سپس به ۱۲۳ زیرحوضه مناسب برای مطالعات ریخت‌سنجی تقسیم شد (شکل ۲). چندین شاخص زمین‌ریختی برای هر زیرحوضه ناحیه محاسبه و بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده از هر شاخص به ۳ رده تقسیم شد.

مطالعات قبلی، پس از محاسبه هر شاخص ریخت‌سنجی، با میانگین‌گیری از نتایج هر ۶ شاخص، یک شاخص منفرد (Iat) به‌منزله سطح فعالیت زمین‌ساختی به هر زیرحوضه ارائه شده است (EL Hamdouni et al 2008). با در نظر گرفتن تأثیر و میزان ارجحیت متفاوت شاخص‌ها در رده‌بندی فعالیت زمین‌ساختی، پردازش اطلاعات حاصل از رده‌بندی هر ۶ شاخص در همه زیرحوضه‌ها (۱۲۳ زیرحوضه) توسط روش تحلیل سلسله‌مراتبی در سیستم اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شد.



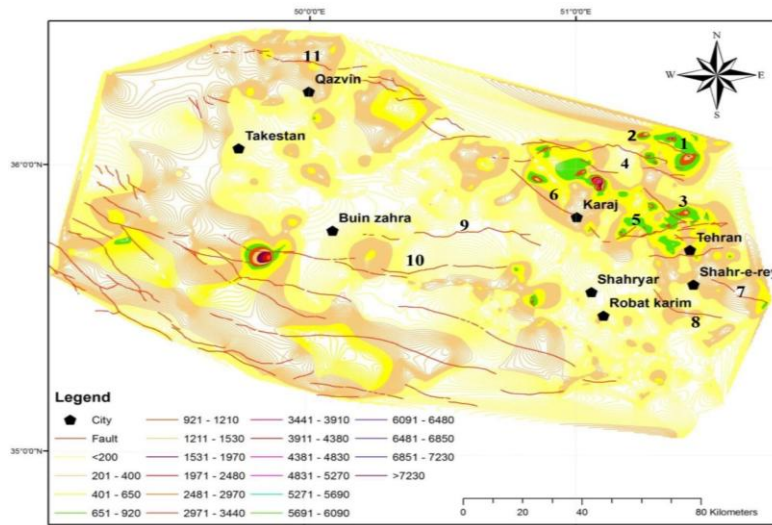
شکل ۲. ۱۱۳ زیرحوضه زهکشی استخراج‌شده در ناحیه مورد بررسی

### شاخص طول - شیب رودخانه (SL)

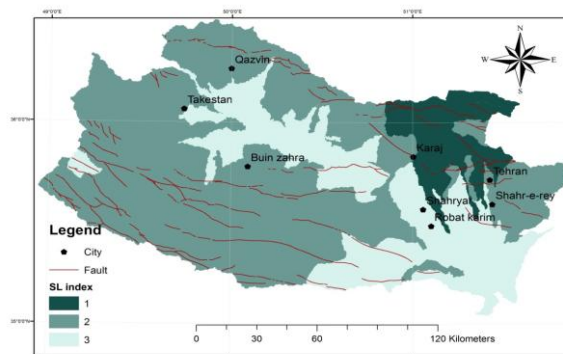
تغییرات در شیب کانال رود، که عامل تغییر در شیب سطح آب است، از جنس سنگ‌ها و فعالیت‌های زمین‌ساختی متأثر است (Keller & Pinter 2002). شاخص SL نمایانگر موازنه بین فرایندهای فرسایشی، همانند جریان‌های رودخانه‌ای و جنبش‌های زمین‌ساختی، است (Hack 1957, 1973, 1982) که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Hack 1973):

$$SL = (\Delta h / \Delta l)L$$

در رابطه ۱، L طول کانال رود از بالادست تا نقطه‌ای که برای آن شاخص محاسبه می‌شود و  $\Delta h / \Delta l$  شیب بخشی از کانال رود است. میزان بالای این شاخص معرف افزایش سطح بالآمدگی در منطقه است. بنابراین، مؤلفه‌های حرکتی با جابه‌جایی‌های افقی، همانند گسل‌های امتدادلغز، تأثیر چندانی در این شاخص ندارند (Keller & Pinter 2002). این شاخص در راستای آبراهه‌های هر زیرحوضه، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی، در سیستم اطلاعات جغرافیایی محاسبه شد. نتایج حاصل از بررسی بیش از ۱۰۰۰۰ محل در امتداد آبراهه‌های ناحیه به ۳ رده تقسیم شدند: رده ۱. میزان آنومالی بالا؛ رده ۲. آنومالی متوسط؛ رده ۳. منطبق با آنومالی پایین. رده ۱ با آنومالی بالا منطبق با ناویدیس آرانگه است واقع در شمال حوضه مورد مطالعه (شکل‌های ۳ و ۴).



شکل ۳. منحنی میزان‌های شاخص SL (خطوط قرمز نمایانگر گسل‌های اصلی ناحیه‌اند؛ شامل ۱. گسل کندوان، ۲. قطعه شرقی گسل طالقان، ۳. قطعه مرکزی گسل مشا، ۴. قطعه غربی گسل مشا، ۵. قطعه مرکزی گسل شمال تهران، ۶. قطعه غربی گسل شمال تهران، ۷. گسل پارچین، ۸. گسل کهریزک، ۹. گسل اشتها، ۱۰. گسل ایبک، ۱۱. گسل شمال قزوین)، علامت ستاره در نقشه محدوده بالاترین میزان شاخص SL را در ناحیه نشان می‌دهد که منطبق با ناودیس آرانگه است.



شکل ۴. توزیع رده‌های شاخص SL در ناحیه

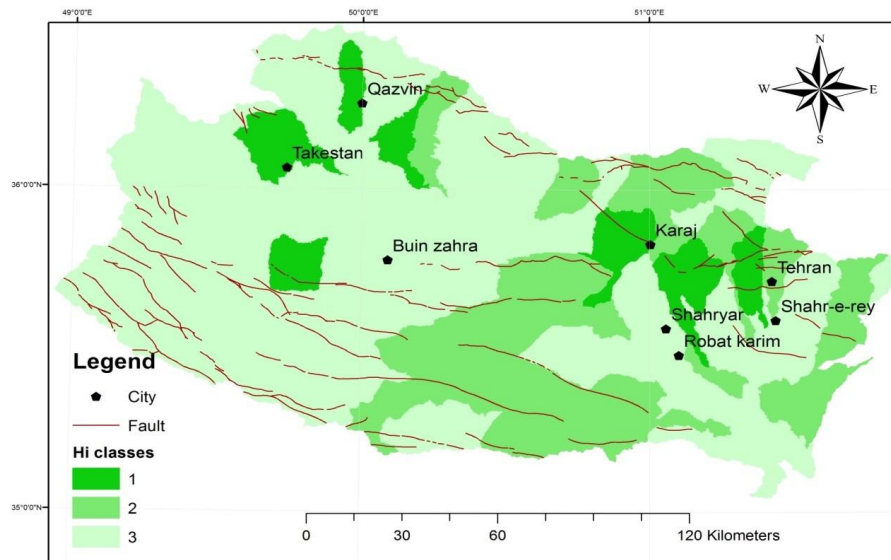
### انتگرال هیپسومتریک (Hi)

انتگرال هیپسومتریک بیانگر چگونگی توزیع ارتفاع در یک حوضه زهکشی است (Strahler 1952). این میزان با رابطه ساده ۲ محاسبه می‌شود (Pike & Wilson 1971; Mayer 1990; Keller & Pinter 2002).

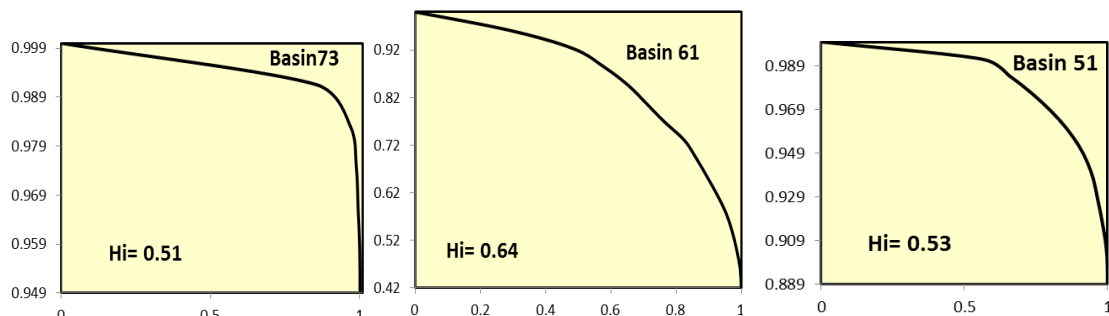
رابطه ۲

$$Hi = \frac{\text{average elevation} - \text{minimum elevation}}{\text{maximum elevation} - \text{minimum elevation}}$$
 همچنین مساحت زیر نمودار منحنی هیپسومتری معرف دقیق‌تری از این شاخص است (Strahler 1952; Keller & Pinter 2002). در اینجا با رسم منحنی از روی مدل ارتفاعی رقمی و محاسبه مساحت زیر آن این شاخص بررسی شد. مقادیر بالای انتگرال هیپسومتری دلالت بر این دارد که اکثر توپوگرافی منطقه نسبت به ارتفاع میانگین بلندتر است که نشان‌دهنده نواحی جوان و فعال زمین‌ساختی است (Keller & Pinter 2002; Bull 2007). حوضه‌های واقع در پیشانی کوهستانی جلویی دامنه (منطبق با گسل مشا و گسل شمال تهران) رده ۱ انتگرال هیپسومتری را نشان می‌دهند

(شکل ۵ و ۶) (Bull 2007). همچنین شکل ۵ بر بالا بودن میزان این شاخص در زیرحوضه‌های منطبق با بخش‌های محدودی از گسل قزوین، محدوده تاکستان، و بخش غربی گسل ایپک دلالت دارد.



شکل ۵. توزیع رده‌های شاخص Hi در ناحیه



شکل ۶. نمودار مربوط به شاخص Hi

### عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)

تغییر شکل‌های مربوط به فرایندهای زمین‌ساختی باعث ایجاد تغییراتی در الگو و هندسه شبکه زهکشی یک حوضه آبریز می‌شوند؛ طوری که مناطق آرام زمین‌ساختی، با در نظر گرفتن فاکتورهای تأثیرگذار لیتولوژی، عمدتاً هندسه و الگوی متقارن دارند. اما حضور دگرشکلی‌های مرتبط با فرایندهای زمین‌ساختی الگوی متقارن اولیه را تغییر می‌دهند و باعث کج‌شدگی در حوضه می‌شوند (Hare & Gardner 1985; Keller & Pinter 2002). فاکتور عدم تقارن با رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$Af = 100 (A_f/A_t)$$

رابطه ۳

در رابطه ۳،  $A_f$  مساحت سمت راست زیرحوضه (نگاه در جهت پایین آبراهه) و  $A_t$  مساحت کل زیرحوضه است. توزیع میزان Af متوسط و بالا در ناحیه مرتبط با گسل‌های اصلی ناحیه (گسل مشاء، گسل طالقان، گسل شمال تهران) مشاهده شد که بر تأثیر مؤلفه حرکتی این گسل‌ها بر عدم تقارن حوضه‌های زهکشی دلالت می‌کند. شکل ۷ پراکنندگی این شاخص را در ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

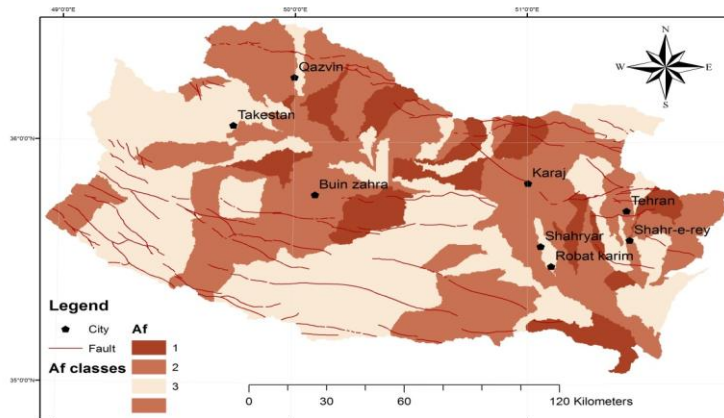
## شاخص شکل حوضه (Bs)

شاخص شکل حوضه با رابطه ۴ بیان می شود (cannon 1976; Ramirez-Herrera 1998):

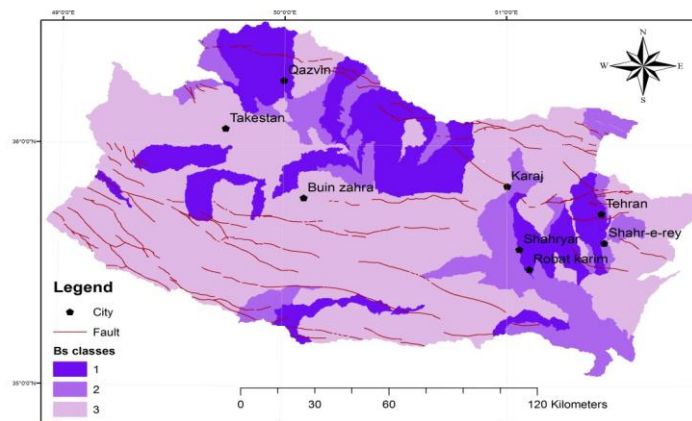
$$B_s = B_l / B_w$$

رابطه ۴

در رابطه ۴،  $B_l$  طول حوضه فاصله پایین ترین ارتفاع حوضه تا دورترین نقطه از آن، و  $B_w$  عرض حوضه، که در عریض ترین بخش آن اندازه گیری می شود، است. میزان بالای این شاخص بیانگر حوضه های کشیده است که اکثراً در نواحی جوان تر حوضه و غالباً مرتبط با پیشانی های کوهستانی جلویی، به علت بالآمدگی سریع مرتبط با این ساختارها، دیده می شود (Bull 2007). حوضه های منطبق با لبه جنوبی البرز مرکزی، به ویژه بخش هایی از قطعه مرکزی گسل شمال تهران، و همچنین برخی از زیرحوضه های منطبق با گسل شمال قزوین نمایانگر میزان بالای این شاخص اند (شکل ۸).



شکل ۷. توزیع رده های شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی



شکل ۸. توزیع رده های شاخص شکل حوضه

## نسبت پهناي کف دره به درازای آن (Vf)

نسبت پهناي کف دره به درازای آن ( $V_f$ ) معرف رابطه میزان فعالیت زمین ساختی در منطقه و تشکیل دره هاست که با رابطه ۵ تعریف می شود:

$$V_f = 2 V_{f_w} / (A_{ld} + A_{rd} - 2A_{sc})$$

رابطه ۵

در رابطه ۵،  $V_{f_w}$  عرض کف دره و  $A_{ld}$  و  $A_{rd}$  و  $A_{sc}$  به ترتیب ارتفاع سمت چپ و راست دره در محل اندازه گیری (نگاه به سمت پایین دره) و ارتفاع کف دره اند. دره های  $V$  شکل و باریک مرتبط با پیشانی های کوهستانی فعال دیده

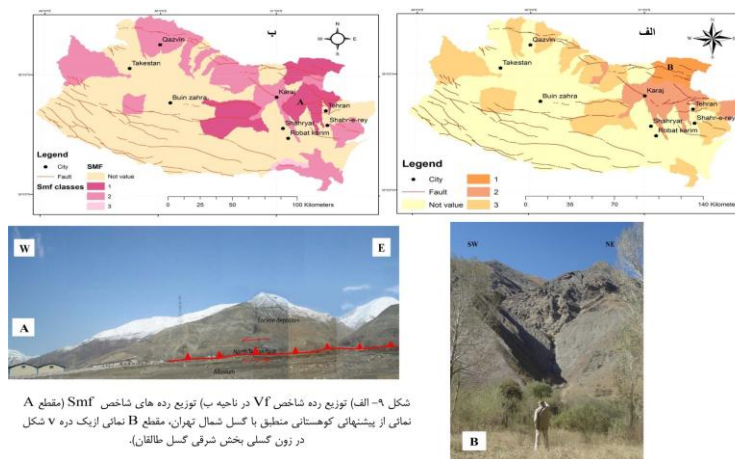
می‌شوند و معرف بالآمدگی سریع و برش بستر رود در امتداد مسیر آن‌اند. با کاهش فعالیت زمین‌ساختی عوامل فرسایشی موجب افزایش پهنای کف دره و تشکیل دره‌های U شکل می‌شود (Keller & Piter 2002). در این مطالعه دره‌هایی در راستای عمود بر پیشانی‌های اصلی در فاصله ۰/۵ تا ۱ کیلومتر بالاتر از پیشانی گسل (Siva et al 2003; Bull 2007) بسته به اندازه حوضه و موقعیت آن از روی مدل ارتفاع رقومی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۷). میزان پایین شاخص Vf معرف سطح بالآمدگی بیشتر است (Keller & Pinter 2002). محاسبات نشان‌دهنده نتایج پایین‌تر این شاخص در شمال ناحیه مورد مطالعه‌اند (شکل ۹ الف).

### شاخص سینوسیته پیشانی کوهستانی (Smf)

یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی و مقایسه سطح فعالیت زمین‌ساختی در یک ناحیه طبق رابطه ۶ تعریف شده است (Bull & Macfaden 1977; Bull 2007).

$$\text{Smf} = L_{mf}/L_s \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه ۶،  $L_{mf}$  طول پیشانی کوه در دامنه آن، یعنی جایی که شیب بین کوه و حوضه پیشانی تغییر می‌کند، و  $L_s$  طول مستقیم پیشانی کوه است. این رابطه تعادل بین نیروهای فرسایشی متمایل به تولید پیشانی‌های سینوسی و نیروهای زمین‌ساختی متمایل به ایجاد یک پیشانی مستقیم همراه با یک گسل فعال را نشان می‌دهد (Bull & Mcffaden 1977; Keller 1986). میزان پایین این شاخص (غالباً کمتر از ۱) بیانگر برخاستگی سریع پیشانی‌های کوهستانی است (Bull 2007)، در حالی که در محدوده‌هایی با کاهش میزان نرخ بالآمدگی منجر به تولید خلیج در راستای پیشانی کوهستانی می‌شود. در منطقه مورد مطالعه پیشانی‌های گسلی از روی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ در سیستم اطلاعاتی جغرافیایی ارزیابی شد (شکل ۸). نتایج نشان‌دهنده ۳ رده پیشانی کوهستانی در محدوده است، شامل رده ۱ ( $1 < \text{Smf}$ )، رده ۲ ( $1.1 \leq \text{Smf} < 1.5$ )، رده ۳ ( $\text{Smf} \geq 1.5$ ) (El Hamdouni et al 2008). همچنان که در شکل ۹ دیده می‌شود، حوضه‌های منطبق با گسل شمال تهران، به‌ویژه قطعه مرکزی، بخش شرقی گسل طالقان و گسل اشتهارد و بخش شرقی گسل ایپک رده ۱ از شاخص سینوسیته پیشانی کوهستانی را نشان می‌دهند (شکل ۹ ب).



شکل ۹- الف) توزیع رده شاخص Vf در ناحیه ب) توزیع رده های شاخص Smf (مقطع A نمایی از پیشانی کوهستانی منطبق با گسل شمال تهران، مقطع B نمایی از یک دره V شکل در زون گسلی بخش شرقی گسل طالقان).

### بحث

میزان ارجحیت هر شاخص در تعیین رده‌بندی نهایی فعالیت زمین‌ساخت نسبی می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین، در این مطالعه سطح فعالیت زمین‌ساخت نسبی بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) (Saaty 1977; Saaty & Vargas) (روش گروهی و غیرگروهی بر اساس ویژگی‌های زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی و آب‌وهوایی) برای یک ناحیه بسیار وسیع از لبه البرز مرکزی (محدوده تهران - قزوین) استفاده شد. در فرایند سلسله‌مراتبی، میزان ارجحیت بین عناصر (شاخص‌های ریخت‌سنجی) از ۱ تا ۹ تغییر می‌کند. در این روش، میزان‌های ارجحیت ۱ و ۳ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده

اهمیت یا مطلوبیت یکسان، کمی مطلوب‌تر (کمی مهم‌تر)، و قوی است. همچنین، میزان‌های ۲ و ۴ بیانگر میزان اهمیت شاخص بین فواصل فوق هستند (Saaty 1997).

همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع رده‌های فعالیت زمین‌ساختی نسبی (رده ۱ تا ۴) ارائه‌شده در دو مدل توسط روش تحلیل سلسله‌مراتبی ارائه‌شده در این مطالعه، تقریباً، محدوده‌هایی متناظر را نشان می‌دهند. از میان دو مدل نهایی ارائه‌شده (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، مدل به‌دست‌آمده توسط روش تحلیل سلسله‌مراتبی که در آن شرایط تأثیرگذار زمین‌ساختی و غیرزمین‌ساختی در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱) مدلی مناسب‌تر برای حوضه مورد مطالعه است؛ هرچند مدل‌های دیگر نیز، تقریباً، الگوی همانندی از نظر توزیع رده‌های فعالیت زمین‌ساختی را در ناحیه نشان می‌دهند. بر اساس دو مدل نهایی (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) ارائه‌شده در این مطالعه، محدوده مورد مطالعه به چهار رده فعالیت زمین‌ساختی تقسیم شد. در ادامه به نواحی منطبق با رده‌های فعالیت زمین‌ساختی مختلف اشاره می‌شود.

### رده ۱ و ۲ (فعالیت زمین‌ساختی نسبی خیلی بالا تا بالا)

محدوده‌های منطبق با لبه جنوبی البرز مرکزی غالباً رده ۱ از فعالیت زمین‌ساختی نسبی را نشان می‌دهند؛ به‌ویژه قطعه مرکزی گسل شمال تهران در کوهپایه تهران (شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱). این بخش بیشترین میزان بالاآمدگی در ناحیه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که سازگار با سینوسیته پیشانی کوهستانی مستقیم (Smf) است (شکل ۹). همچنین شواهد ساختاری، ریخت‌زمین‌ساختی، و به‌ویژه ترموکرونولوژی بر فعالیت کواترنر گسل شمال تهران دلالت دارد. وجود پرتگاه‌های گسلی شاخص جابه‌جایی‌های عمودی در امتداد گسل و وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد در سال‌های اخیر با این سیستم گسلی در شمال تهران منطبق است (Nazari et al 2007, 2008). در مدل‌های ارائه‌شده در بالا، محدوده‌های بین گسل امام‌زاده داوود و گسل شمال تهران رده‌های ۱ و ۲ از فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند. بنا بر شکل‌های ۱۰ و ۱۱ محدوده‌های منطبق با قطعه مرکزی گسل شمال تهران در مجاورت منطقه شهری کرج فعالیت زمین‌ساختی بالایی را نشان می‌دهند. این محدوده منطبق با رخداد زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۶ است. همچنین زون گسلی طالقان شرقی در شمال غرب حوضه منطبق با رده بالای (به‌طور غالب ۲) فعالیت زمین‌ساختی است. همچنین محدوده‌هایی از گسل شمال قزوین، به‌ویژه در مجاورت شهر قزوین، هم رده ۲ از فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند.

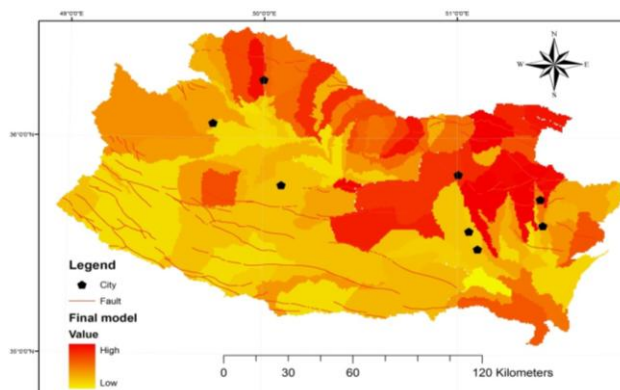
مطالعات ساختاری، ریخت‌زمین‌ساختی، و ترموکرونولوژی نشان می‌دهند بیشترین میزان جابه‌جایی عمودی مرتبط با گسل‌های لبه جنوبی البرز مرکزی، همچون گسل شمال تهران (رده ۱ و ۲) و زون گسلی طالقان خاوری (۳۵۰ متر) (Nazari & Ritz 2008; Ritz et al 2006) در شمال باختری، با دره‌های عمیقاً بریده‌شده منطبق است (شکل ۹ ب). پرتگاه‌های گسلی شاخصی در قطعه مرکزی گسل شمال تهران در کوهپایه تهران، که نهشته‌های پلیستوسن بالایی - هولوسن را متأثر کرده است (Nazari et al 2007) (شکل ۱۲)، و در زون گسلی طالقان همراه گسیختگی سطحی اخیر (پلیوسن - هولوسن) (Ritz et al 2006) مشاهده شده است. هرچند اطلاعات کامل کواترنر در منطقه موجود نیست، بررسی‌های ترموکرونولوژی نشان‌دهنده بیشترین میزان بالاآمدگی در لبه جنوبی البرز مرکزی، به‌ویژه در رژیم زمین‌ساختی اخیر، است (Ballato et al 2013).

### رده ۳ (فعالیت متوسط زمین‌ساختی نسبی)

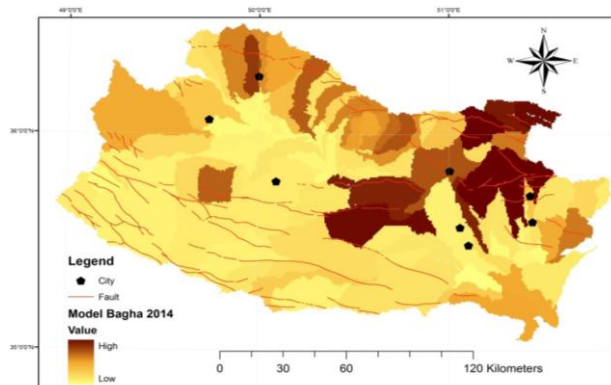
بخش‌های وسیعی از حوضه مورد مطالعه رده فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط را نشان می‌دهند. این محدوده‌ها غالباً در بخش‌های شرقی، غربی، جنوب شرقی، و جنوبی حوضه مشاهده می‌شوند که بر میزان بالاآمدگی کمتر نسبت به نواحی با رده‌های فعالیت زمین‌ساختی ۱ و ۲ دلالت دارند. بخش‌های شمال دشت قزوین غالباً رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهند که در محدوده شهر قزوین به‌طور نسبی این میزان بیشتر می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این محدوده با گسل شمال قزوین منطبق است. بخش‌های جنوبی دشت قزوین و جنوب غرب ناحیه نواحی با میزان فعالیت به‌طور نسبی پایین را نشان می‌دهند (شکل ۱۰ و ۱۱).

### رده ۴ (فعالیت پایین زمین ساخت نسبی)

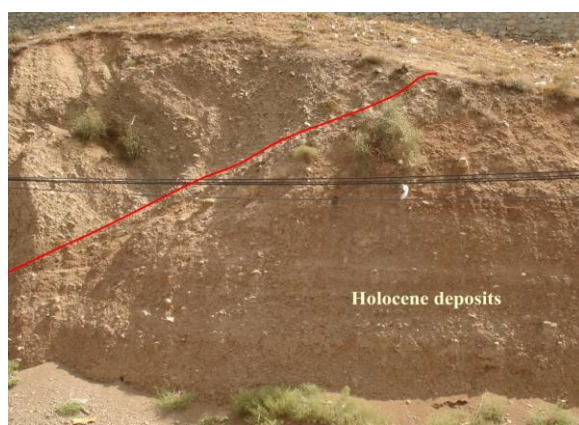
دشت‌های وسیع و کم‌ارتفاع جنوب تهران ناحیه غالباً رده پایین فعالیت زمین ساخت نسبی را نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) که با پیشانی‌های کوهستانی سینوسی و دره‌های پهن و لاشکل سازگارند. بخش‌های جنوبی دشت قزوین و جنوب غرب ناحیه نواحی با میزان فعالیت به طور نسبی پایین را نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). بر اساس نقشه شکل‌های ۱۰ و ۱۱، شهرهایی مانند رباط کریم و اسلام‌شهر در بخش‌هایی با میزان فعالیت زمین ساخت نسبی پایین واقع شده‌اند.



شکل ۱۰. توزیع رده‌های فعالیت زمین ساخت نسبی بر اساس مدل نهایی (به روش تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی)



شکل ۱۱. توزیع رده‌های فعالیت زمین ساخت نسبی به روش تحلیل فرایند سلسله‌مراتبی با توجه به شرایط تأثیرگذار زمین ساختی و غیرزمین ساختی



شکل ۱۲. نهشته‌های هولوسن که توسط فعالیت‌های اخیر سیستم گسل شمال تهران در منطقه کن متأثر شده است.

## نتیجه

مطالعات ریخت‌سنجی امکان مقایسه نسبی فعالیت زمین‌ساخت اخیر را بر اساس نرخ‌های بالآمدگی متفاوت تحت‌تأثیر توزیع دگرریختی و عملکرد مؤلفه‌های حرکتی در امتداد ساختارها فراهم می‌کند. در این بررسی ۶ شاخص مهم ریخت‌سنجی - شاخص طول - شیب رودخانه (SL)، انتگرال فرازنسجی (Hi)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن ( $V_f$ )، پیچ‌وخم پیشانی کوهستانی (Smf) - برای ناحیه بسیار وسیع تهران - قزوین محاسبه و ارزیابی شدند.

مطالعه عوارض ریخت‌زمین‌ساختی، محاسبات شاخص‌های ریخت‌سنجی، و رده‌های فعالیت زمین‌ساخت نسبی با ساختارهای شاخص ناحیه توافق خوبی دارند. بررسی‌ها رده‌های مختلف فعالیت زمین‌ساخت نسبی را در ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهند. این رده‌های زمین‌ساختی با نوع سازوکار جنبشی ساختارها و دگرشکلی اخیر در ناحیه منطبق‌اند؛ چنان که اکثر حوضه‌های واقع در بخش شمال تهران، به‌ویژه قطعه مرکزی از لبه جنوبی البرز مرکزی، میزان بالایی از فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند. شواهد نشان‌دهنده رده‌های ۱ و ۲ از فعالیت زمین‌ساختی برای محدوده‌های بین گسل امام‌زاده داوود و گسل شمال تهران است. زون گسلی طالقان شرقی و بخش غربی گسل مشا در شمال غرب حوضه با رده بالای (به طور غالب ۲) فعالیت زمین‌ساختی منطبق است. همچنین نتایج و نقشه‌های حاصل از محاسبات و بررسی‌های ریخت‌سنجی در این پژوهش دلالت بر این دارد که زیرحوضه‌های منطبق با گسل‌های ایپک و اشتهارد و بخش‌های محدودی از گسل شمال قزوین رده بالا و نسبتاً بالای فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند.

## منابع

آرام، ز. (۱۳۹۱). «بررسی تکتونیک فعال ناحیه کرمانشاه، غرب ایران»، رساله دوره دکتری تخصصی تکتونیک، دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

سلیمانی، ف.، فقهی، خ.، شبانین، ا.، عباسی، م.، ریتس، ژ. (۱۳۸۱). بررسی‌های دیرینه‌لرزه‌شناسی مقدماتی بر روی گسل مشا در دره مشا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

- Abbassi, M. & Farbod, Y. (2009). faulting and folding in quaternary deposits of Tehran piedmont (Iran). *Journal of Asian earth sciences* 34, pp. 522-531.
- Abbassi, M., SHabaniyan, E., Farbod, Y., Feghhi, Kh., Tabassi, H. (2003 b). the state of contemporary stress in southern flank of Central Alborz (in Persian). *International institute of earthquake engineering and seismology*, 118.
- Alavi, M. (1991). sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *geological society of America Bulletin* 103, pp. 983-992.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., Ghorashi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, Northern Iran. *journal of structural geology* 25 (5), pp. 659-672.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., Kamalian, M. (2005). microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics* 395, pp. 193-208.
- Azor, A., Keller, E. A., Yeats, R. S. (2002). Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain-Oak Ridge Ventura basin, Southern California. *Geological Society of America Bulletin* 114, pp. 745-753.
- Bagha, N., Arian, M., Ghorashi, M., Pourkermani, M., E. L. Hamdouni, R., Solgi, A. (2014). Evaluation of relative tectonic activity in the Tehran basin, central Alborz, northern Iran, *geomorphology* (213), pp. 66-87.
- Berberian, M. (1983). The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian journal of Earth science* 20, pp. 163-183.
- Berberian, M. & Yeatz, R. S. (2001). contribution of archeological data to studies of earthquake history in the Iranian plateau. *journal of structural geology* 23, pp. 563-584.
- 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 Paleogeomorphology California*. Blackwell, Malden.
- Burbank, D. & Anderson, R. (2001). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Oxford.
- Cannon, P. J. (1976). Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin. *Oklahoma Geology Notes* 36 (1), pp. 3–16.
- 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.
- Guest, B., Axen, G. J., Lam, P. S., Hassanzadeh, J. (2006). Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation. *Geosphere* 2 (1), pp. 35–52.
- Guest, B., Guest, A., Axen, G. (2007). Late tertiary tectonic evolution of northern Iran: a case for simple crustal folding, global and planetary change 58, pp. 435–453.
- Hack, J. T. (1957). Studies of longitudinal stream-profiles in Virginia and Maryland: U.S. Geological Survey Professional Paper 294B, pp. 45–97.
- Hack, J. T. (1973). Stream-profiles analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey* 1, pp. 421–429.
- Hack, J. T. (1982). Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge. U.S. Geological Survey Professional Paper 1265, p. 49.
- 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.
- Jackson, J.A., Priestley, K., Allen, M., Berberian, M. (2002). Active tectonics of the south Caspian basin, *Geophysical journal International* 148, pp. 214–242.
- 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.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (1996). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall, New Jersey.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Second Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Mayer, L. (1990). *Introduction to Quantitative Geomorphology*. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Molin, P., Pazzaglia, F. J., Dramis, F. (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, Sila Massif, Calabria, southern Italy. *American Journal of Science* 304, pp. 559–589.
- Nazari, H., Ritz, J., Salamati, R., Solaymani, S., Balescu, S., Michelot, J., Ghassemi, A., Talebian, M., Lamothe, M., Massault, M. (2007). Paleoseismological analysis in Central Alborz. 50<sup>th</sup> anniversary earthquake conference commemorating the 1957 Gobi-Altay earthquake, Mongolia.
- Nazari, H. & Ritz, J. F. (2008). Neotectonic in central Alborz. *Geosciences* 17, pp. 75–92.
- Nazari, H. & Ritz, J-F. (2009). Morphological and a paleoseismological analysis along the Taleghan fault (central Alborz, Iran). *Geophysical journal international* 174, pp. 1028–1041.
- 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.
- Ritz, J-F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., Vernant, P. (2006). Active transtension inside central Alborz: a new insight in to northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology* 34, pp. 477–480.
- Rockwell, T. K., Keller, E. A., Johnson, D. L. (1985). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin Publishers, Boston, pp. 183–207.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15, pp. 231–281.
- Saaty, T. L. & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, Projection and Forecasting*. Kluwer Academic

- Publishers, Dordrecht, Netherlands, 251.
- Silva, P. G. (1994). Evolución geodinámica de la depresión del Guadalentín desde el Mioceno superior hasta la Actualidad: Neotectónica y geomorfología. Ph.D. Dissertation, Complutense University, Madrid.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., Bardajm, T. (2003). Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity. *Geomorphology* 250, pp. 203–226.
- Solaymani, SH., Ritz, J. F., Abbassi, M. R. (2011). Left lateral active deformation along Mosha- North Tehran fault system (Iran); Morphotectonics and paleosiesmological investigations. *Tectonophysics* 497, pp. 1-14.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63, pp. 1117–1142.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J. (2004 a). contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *geophysical journal international* 157, pp. 381-398.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J., Sedighi, M., Tavakoli, F. (2004 b) deciphering oblique shorting of Central Alborz in Iran using geodetic data. *Earth and planetary science letters* 223, pp. 177-185.
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, T. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B., Wesling, J. R. (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology* 1, pp. 239–265.