



Morphotectonic Analysis of Sabalan Caldera and its Impact on Related River Basins and Alluvial Fans in the Northern Slopes

Aghil Madadi^{1*}, Mohammad Nouhi¹

¹Department of Physical Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohagheghe Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 27 April 2019

Accepted 30 October 2019

Available online 20 January 2020

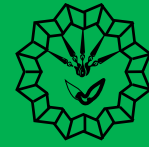
Keywords:

Tectonic Geomorphology,
Morphotectonic Indices,
Sabalan Caldera, Alluvial Fan.

Citation: Madadi, A., Nouhi, M. (2020). Morphotectonic Analysis of Sabalan Caldera and its Impact on Related River Basins and Alluvial Fans in the Northern Slopes. *Geography and Sustainability of Environment*, 9 (4), 1-16.
doi: [10.22126/GES.2020.3271.1870](https://doi.org/10.22126/GES.2020.3271.1870)

ABSTRACT

One of the most interesting landforms in the Sabalan massif landscape is the 12 Kilometers caldera-shaped circular fault. The fault has affected landforms, including catchments and associated alluvial fans. The purpose of this study was to analyze the role of Sabalan Caldera in the evolution of river basins and associated alluvial fans in the northern slopes. Morphotectonic indices including Stream Gradient Index (SL), Mountain-Front Sinuosity (SMF), Valley-Floor Width to Height Ratio (VF) and Transverse Topographic Symmetry Factor (T) were used in the present study. Besides, Topographic maps 1:25000, Geological maps 1:100000, Digital Elevation Model (DEM) with resolution of 20 meters, Landsat satellite image with resolution of 30 meters, Geographic Information System (GIS), Excel, Arch Hydro10 and Envi 4.8 as research tools, have been used to provide the quantitative and qualitative analyses of morphotectonic indices. Moreover, field observations and geomorphologic evidence have been used to verify greater confidence in the results. The findings from the calculation of morphotectonic indices and field observations, also geomorphologic evidence showed that the caldera range are still tectonically active. Moreover, the drainage network map obtained from the digital elevation model, revealed that the caldera collapse has changed the pattern of the drainage networks from the radial to the central state and then to the dendritic state. Likewise, this process has increased not only the area of the catchments but also the power flow of the rivers. As a result, the rivers using a loose formation of Lahar have incised fan systems and left behind the abandoned terraces and old fans.



تحلیل مورفوتکتونیک کالدرای سبلان و تأثیر آن بر حوضه‌ها و مخروط‌افکنه‌های مربوط به آن‌ها در دامنه‌های شمالی

عقیل مددی^{۱*}، محمد نوحی^۱

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

یکی از لندفرم‌های بسیار جالب در چشم‌انداز توده سبلان، گسل دایره‌ای شکل کالدرای به قطر ۱۲ کیلومتر است. این گسل، اشکال ژئومورفولوژیکی از جمله حوضه‌های آبریز و مخروط‌افکنه‌های مربوط به آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. هدف نوشتار پیش رو تجزیه و تحلیل نقش کالدرای سبلان در تحوّل حوضه‌های رودخانه‌ای و مخروط‌افکنه‌های مربوط به آن‌ها در دامنه‌های شمالی بوده است. چنین تحلیلی می‌تواند، رابطه بین ساختار زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی را در این منطقه تاحدودی روشن سازد. در پژوهش حاضر از شاخص‌های مورفوتکتونیک، شامل شیب طولی رود (SL)، سینوزیته جبهه کوهستان (SMF)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (VF) و شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T) استفاده شده است. نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل رقمی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۲۰ متر، تصویر ماهواره‌ای لندست با قدرت تفکیک ۳۰ متر، جی.آی.اس، اکسل، آرک هیدرو ۱۰ و انوی ۴/۸ به‌منزله ابزارهای پژوهش، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای اطمینان بیشتر از مشاهدات میدانی و شواهد ژئومورفولوژیکی، بهره گرفته شده است. نتایج شاخص‌های مورفوتکتونیک نشان داد که محدوده کالدرای از نظر تکتونیک هنوز فعال است؛ همچنین، نقشه شبکه‌های آبراهه‌ای مستخرج از مدل رقمی ارتفاعی نشان داد که شکست کالدرای نقش قابل‌توجهی در تحوّل حوضه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها داشته است. به این صورت که این رخداد، موجب تغییر الگوی شبکه‌های زهکشی از حالت شعاعی به حالت مرکزی و سپس، حالت درختی شده و به‌تبع آن، مساحت حوضه‌ها و قدرت جریان رودخانه‌ها افزایش یافته است. در نتیجه، رودخانه‌ها با استفاده از نهشته‌های سست و نرم روانه‌های لاهار، مخروط‌افکنه‌ها را به‌شدت حفر کرده‌اند و تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های قدیمی را بر جای گذاشته‌اند.

مشخصات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت ۷ اردیبهشت ۱۳۹۸

پذیرش ۸ آبان ۱۳۹۸

دسترسی آنلاین ۳۰ دی ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

تکتونیک ژئومورفولوژی، شاخص‌های مورفوتکتونیک، کالدرای سبلان، مخروط‌افکنه.

استناد: مددی، عقیل؛ نوحی، محمد (۱۳۹۸). تحلیل مورفوتکتونیک کالدرای سبلان و تأثیر آن بر حوضه‌ها و مخروط‌افکنه‌های مربوط به آن‌ها در دامنه‌های شمالی. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۹ (۴)، ۱-۱۶.

doi: [10.22126/GES.2020.3271.1870](https://doi.org/10.22126/GES.2020.3271.1870)

مقدمه

تکتونیک ژئومورفولوژی به عنوان مطالعهٔ لندفرم‌های ایجاد شده به وسیلهٔ فرایندهای تکتونیکی یا کاربرد اصول ژئومورفولوژی برای حل مسائل تکتونیکی تعریف می‌شود (کلر و پینتر^۱، ۱۹۹۶: ۶). ساختار زمین‌شناسی نقش مهمی در ایجاد میدان گسترده‌ای از اشکال ناهمواری ایفا می‌کند؛ حتی در مناطقی که عامل‌های بیرونی به مثابهٔ عامل غالب در چشم‌انداز در نظر گرفته می‌شوند. در بررسی‌های مورفوتکتونیک، تحلیل شبکه‌های زهکشی، ابزار قدرتمندی برای نشان دادن فعالیت تکتونیکی اخیر و بالآمدگی است؛ زیرا کانال رودخانه‌ها به تغییرات پارامترهایی که شکل و شیب آن‌ها را کنترل می‌کنند، بسیار حساس هستند (کلارک^۲ و همکاران، ۲۰۰۴).

رودخانه‌ها به برقراری نیم‌رخ تعادلی در مدت‌زمان کمابیش کوتاه (۱۰^۳ - ۱۰^۶ سال) گرایش دارند؛ بنابراین، بی‌نظمی در شبکه‌های رودخانه‌ای، اگر دلایل سنگ‌شناسی و اقلیمی نداشته باشند، مربوط به فعالیت‌های تکتونیکی اخیر است (آزانون^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). مخروط‌افکنه‌ها، اشکال تراکمی مربوط به دورهٔ کواترنری و عهد حاضر هستند که بررسی آن‌ها می‌تواند، اطلاعات بسیار مفیدی از فعالیت‌های نئوتکتونیکی و مورفوتکتونیکی منطقه‌ای را که در آن شکل گرفته‌اند، در اختیار پژوهشگران قرار دهند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱). تکتونیک با تغییر سطح اساس، موجب تغییر فرایندهای فعال در سطح مخروط‌افکنه‌ها شده و روند تکاملی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (خیام و مختاری، ۱۳۸۲؛ تقیان، ۱۳۹۴). مخروط‌افکنه‌ها، مانند آرشیو یا بایگانی حساسی، تحوّل حوضه‌های پای‌کوهی و حواشی آن‌ها را در خود ثبت می‌کنند (بلیر و مک‌فرسون^۴، ۲۰۰۹).

کالدرها، فرورفتگی‌هایی در مناطق یا مراکز آتش‌فشانی هستند که بر اثر انفجارهای وسیع و فرورفتگی‌های تکتونیکی پس از فوران به وجود می‌آیند (هاگت^۵، ۲۰۰۵: ۸۸). از دلایل فرونشینی کالدرها می‌توان به تراکم ماگمای سیلیسی با چگالی پایین در آشیانهٔ کم‌عمق اشاره کرد. کف کالدرها به مرور زمان با حرکت گسل‌ها وسیع‌تر می‌شوند و لغزش‌های دامنه‌ای و فوران‌های بعدی، توپوگرافی آن‌ها را پنهان می‌کنند (لیپمن^۶ و همکاران، ۲۰۱۵). در مورد اهمیت و ضرورت مطالعهٔ کالدرها، می‌توان گفت که محل و دینامیک آن‌ها می‌تواند، تحوّل آتش‌فشان‌های آینده را در منطقه کنترل کند؛ افزون بر این، فوران آتش‌فشان از محل کالدرها حوادث مخربی در تاریخ زمین برجای گذاشته است (برونینگ و گودموندسون^۷، ۲۰۱۵).

شاخص‌های مورفوتکتونیکی در ارزیابی فعالیت‌های نئوتکتونیکی ابزار مفیدی هستند؛ زیرا با استفاده از آن‌ها می‌توان مناطقی را که در گذشته فعالیت‌های سریع یا کند تکتونیکی را تجربه کرده‌اند، به راحتی شناسایی کرد (رامیرز-هررا^۸، ۱۹۹۵).

این شاخص‌ها، به طور معمول در محیط نرم‌افزار جی.آی.اس^۹ و با استفاده از نقشهٔ مدل رقومی ارتفاعی^{۱۰}

- 1- Keller & Pinter
- 2- Clark
- 3- Azañón
- 4- Blair & McPherson
- 5- Huggett
- 6- Lipman
- 7- Browning & Gudmundsson
- 8- Ramirez-Herrera
- 9- Geographic Information System (GIS)
- 10- Digital Elevation Model (DEM)

محاسبه می‌شوند. شاخص‌های یادشده به لحاظ دقت و کارایی بالا و نیز سهولت محاسبه، به صورت گسترده در مناطق مختلف جهان و به وسیله پژوهشگران مختلف، به منظور آشکارسازی تکتونیک فعال به کار گرفته شده‌اند.

از پیشگامان استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توان به هک^۱ (۱۹۷۳) که شاخص گرادیان طولی رود را برای اولین بار به کار برد و بال و مک فادن^۲ (۱۹۷۷) که شاخص سینوزیته جبهه کوهستان و شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن را برای اولین بار مطرح و از آن استفاده کردند، اشاره کرد. پژوهشگران دیگری از جمله فیگوروا و نات^۳ (۲۰۱۰) در کوه‌های جنوبی سیرا نوادا (کالیفرنیا)؛ پرزپنا^۴ و همکاران (۲۰۱۰) در سیرا نوادا (جنوب شرقی اسپانیا)؛ جان^۵ و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه ویشاو (هندوستان)؛ مندی و سورن^۶ (۲۰۱۶) در حوضه رودخانه‌ای چل؛ النی^۷ و همکاران (۲۰۱۵) در قلعه قیوچاتس یونان؛ توپال و اوزکول^۸ (۲۰۱۸) در جنوب غرب ترکیه از شاخص‌های مورفوتکتونیک در مطالعه فعالیت‌های نوزمین‌ساختی استفاده کرده‌اند. در ایران، مددی و همکاران (۱۳۸۳) در دامنه شمال غربی تالش؛ بیاتی خطیبی (۱۳۸۸) در حوضه آبریز قرقوچای؛ مقصودی و عمادالدین (۱۳۹۰) در مطالعه گسل درونه؛ بهرامی و همکاران (۱۳۹۱) در حاشیه طاق‌دیس دانه خشک؛ رجبی و هاشمیان (۱۳۹۶) در ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غربی ارتفاعات سبلان؛ کمالی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه گسل دورود؛ همتی و همکاران (۱۳۹۶) در محدوده گسل بنا روان؛ شیران و همکاران (۱۳۹۷)، در مطالعه قلعه شاهرخ (یک زیرحوضه در بالادست حوضه زاینده‌رود)؛ مختاری و همکاران (۱۳۹۷) در محدوده حوضه‌های آبریز تبرکن و گز از شاخص‌های مورفوتکتونیک استفاده کرده‌اند و به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند.

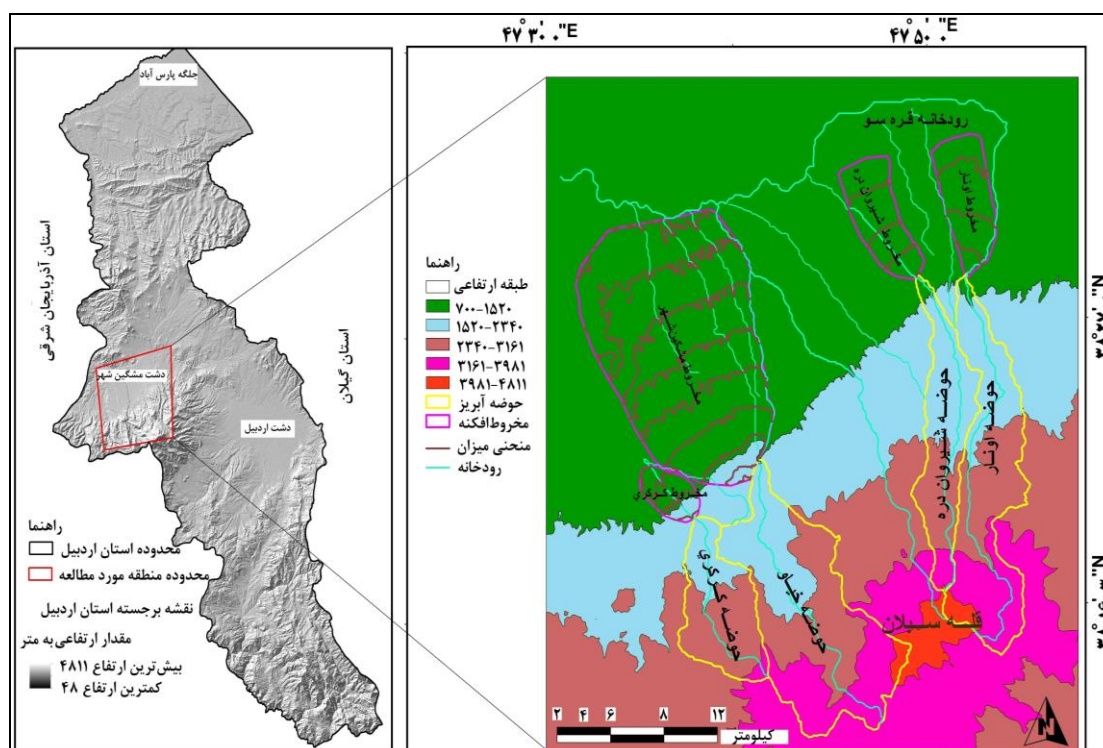
در بیشتر این مطالعات، تأکید، بیشتر روی شاخص‌های مورفوتکتونیک بوده و با توجه به معیار شاخص‌ها به کم و کیف تکتونیک فعال مبادرت کرده‌اند؛ در صورتی که در پژوهش حاضر، افزون بر شاخص‌های مورفوتکتونیک به مورفولوژی مخروط‌افکنه (برش رأس، نقطه تقاطع، بیشینه رسوبی فعال و کانال بریده‌شده) به مثابه شاخص مهمی در آشکارسازی تکتونیک فعال توجه ویژه شده است. با اینکه مطالعات زیادی در مورد قلعه سبلان انجام شده است، ولی فرونشینی کالدرای و تأثیرات مورفوتکتونیک آن در تحول مورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز، کمتر شناخته شده است. تمرکز بیشتر مطالعات در این منطقه، بر زمین‌شناسی و ژئوترمال بوده است (دیدون و ژمن^۹، ۱۹۷۶؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۱؛ یان و لینگ^{۱۰}، ۲۰۱۷؛ گری زنجانی و همکاران، ۱۳۹۷). در زمینه ژئومورفولوژی نیز تنها دو پژوهش صورت گرفته است (خیام، ۱۳۷۲ و دلال‌اوغلی، ۱۳۸۱: ۵۰)؛ ولی شاخص‌های مورفوتکتونیک در آن‌ها به کار گرفته نشده است. هدف از نوشتار پیش رو، تجزیه و تحلیل نقش کالدرای سبلان در تحول حوضه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک بوده است.

- 1- Hack
- 2- Bull & Mcfaden
- 3- Figueroa & Knott
- 4- Pérez-Peña
- 5- Jaan
- 6- Mandi & Soren
- 7- Eleni
- 8- Topal & Özkul
- 9- Didon & Gemain
- 10- Yan & Ling

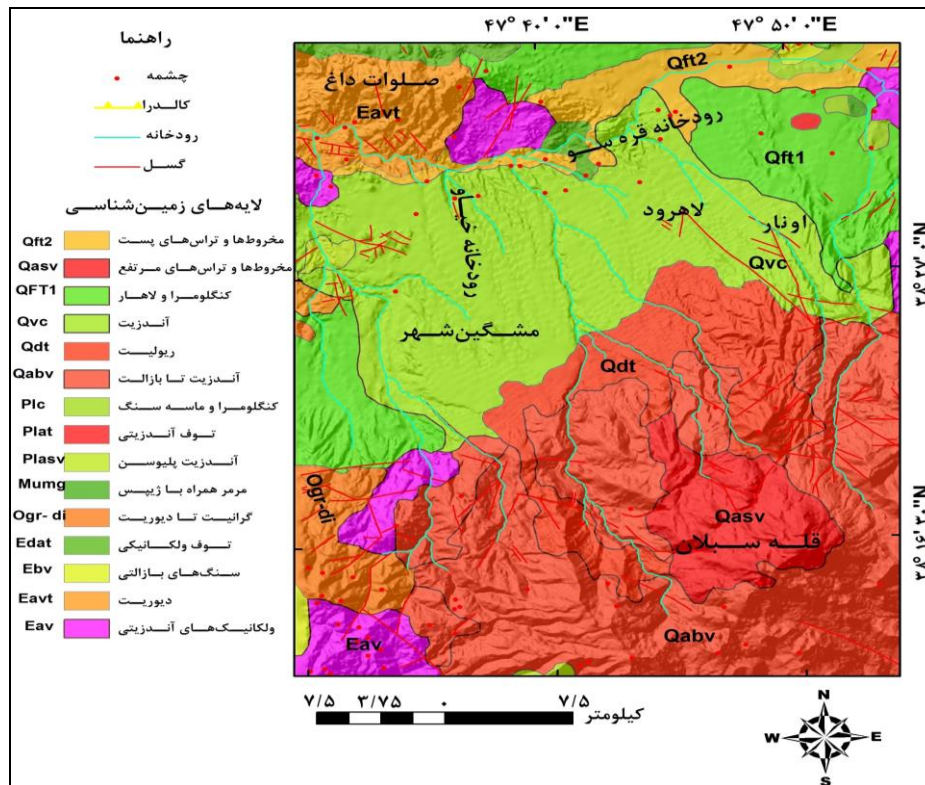
معرفی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه از نظر موقعیت جغرافیایی در استان اردبیل و دامنه‌های شمالی توده سبلان، بین طول جغرافیایی ۲۷° ۴۷' تا ۵۹' ۴۷° و عرض جغرافیایی ۱۵' ۳۸° تا ۳۵' ۳۸° قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه از شمال به رودخانه قره سو، از جنوب به قلّه سبلان، از غرب به رودخانه مشگین چای و از شرق به رودخانه اونار محدود می‌شود و از دو واحد ژئومورفولوژیکی توده سبلان و دشت مشگین شهر تشکیل شده است که با گسل سراسری از هم جدا می‌شوند. کوهستان سبلان به خاطر ارتفاع زیاد و نیز قرار گرفتن در عرض جغرافیایی بالاتر، در دوره کواترنری تحت تسلط دوره‌های یخچالی و بین یخچالی بوده است. آثار این فرایندها، امروزه به صورت مورن‌ها و سنگ‌های سرگردان در کوهستان سبلان و دشت مشگین شهر مشاهده می‌شوند. از نظر توپوگرافی درّه‌ها و قلّه‌های مهمی در منطقه وجود دارند که از بین آن‌ها می‌توان به درّه قوتورسویی، شیروان درّه، درّه موئیل، قلّه کسرا، قلّه هرم و قلّه سبلان اشاره کرد. از نظر اقلیم کنونی، کوهستان سبلان آب‌وهوای سرد کوهستانی و دشت مشگین شهر آب‌وهوای نیمه‌خشک دارند (دلایل‌اوغلی، ۱۳۸۱: ۳۷).

مساحت منطقه، ۱۸۴۳ کیلومتر مربع است. بیشترین ارتفاع منطقه، ۴۸۱۱ متر و کمترین ارتفاع آن، ۷۰۰ متر که به ترتیب مربوط به قلّه سبلان و بستر رودخانه قره‌سو هستند. چهار رودخانه اصلی منطقه (خیاو، اونار، شیروان درّه و کرکری) به صورت موازی هم و از لحاظ تبعیت از شیب منطقه، به صورت عمود بر جبهه کوهستان از جنوب به شمال جریان دارند که پس از عبور از دشت مشگین شهر به رودخانه قره‌سو می‌ریزند. قره‌سو پس از پیوستن به رودخانه ارس، به دریای خزر می‌ریزد. بخش اعظم زمین‌شناسی منطقه (شکل ۲)، با آتش‌فشان سبلان، کنترل می‌شود، به گونه‌ای که مسائلی همچون تکتونیک و ژئومورفولوژی با آتش‌فشان سبلان پیوستگی کامل دارد. فعالیت آتش‌فشانی سبلان از دوره ائوسن شروع شده و تا اواخر پلیستوسن ادامه می‌یابد (سحابی، ۱۳۷۸).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

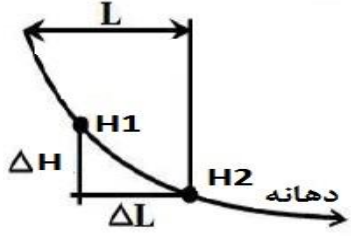
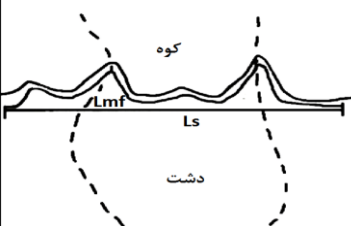
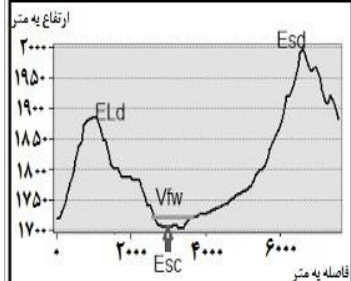
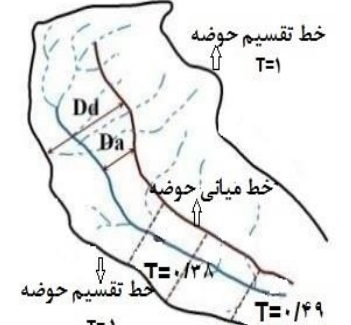
بسیاری از زمین‌شناسان، حرکت همگرای صفحات عربستان و اوراسیا را باعث فوران آتشفشانی سبلان می‌دانند که از میان آن‌ها می‌توان به دیدون و ژمن (۱۹۷۶) اشاره کرد. از وقایع مهم در تاریخ فعالیت آتشفشان سبلان، فروریختن دهانه به قطر تقریبی دوازده کیلومتر است. هرچند که زمان دقیق آن مشخص نیست، ولی شاید، پس از پلیوسن و در آغاز پلیستوسن به وقوع پیوسته باشد. پس از آن، فوران جدیدتری از گدازه به صورت گنبدی تراکی آندزیتی و تراکی داسیتی از درون کالدرای صورت گرفته و قلّه‌های امروزی سبلان را شکل داده است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۱).

از رویدادهای بسیار مهمی که پس از پیدایش کالدرای سبلان عمل کرده و مورفولوژی آن را تغییر داده، پیدایش دره‌های فرونشستی از جمله دره موئیل (خیابو)، قوتورسویی (اونار) و شیروان‌دره است. این دره‌ها با جریان عظیم پیروکلاستیک ناشی از فوران کالدرای پر شده و سطح همواری را تا دشت مشگین‌شهر تشکیل می‌دهند که پس از آن، به‌شدت با رودخانه‌های منطقه بریده شده‌اند (خیام، ۱۳۷۲؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۱).

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از خطوط منحنی میزان، نقاط ارتفاعی و شبکه‌های زهکشی موجود منطقه، مدل رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک بیست متر به‌عنوان نقشه پایه تهیه شد؛ سپس با این نقشه و در محیط نرم‌افزار آرک هیدرو ۱۰، حوضه‌های آبریز منطقه تعیین حدود شدند. برای تعیین مرز مخروط‌افکنه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. میزان فعالیت تکتونیکی محدوده کالدرای با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی، جدول ۱ تعیین شد؛ افزون بر آن، پیمایش‌ها و مطالعات میدانی به‌منظور بررسی صحت و سقم نتایج حاصل از شاخص‌ها صورت گرفت.

جدول ۱. شاخص‌های مورفوتکتونیکی بررسی شده در منطقه مورد مطالعه

محدوده تغییرات شاخص‌ها	روش اندازه‌گیری شاخص‌ها	شاخص‌های مورفوتکتونیکی
$SL \geq 500$ بسیار فعال $300 < SL < 500$ نیمه‌فعال $SL < 300$ آرام (جایاپا ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲)		$SL = (\Delta H / \Delta L) L$ SL - شاخص شیب طولی رود $\Delta H / \Delta L$ - شیب قطعه رودخانه L - فاصله از وسط قطعه تا خط تقسیم H - ارتفاع
۱ تا ۱/۵ بسیار فعال ۱/۵ تا ۳ نیمه‌فعال ۳ تا ۱۰ آرام (بال، ۲۰۰۷: ۱۲۴)		$S_{mf} = L_{mf} / L_s$ S_{mf} - شاخص سینوزیت جبهه کوهستان L_{mf} - طول جبهه کوهستان در کوهپایه L_s - طول مستقیم جبهه کوهستان
$V_f > 1$ بسیار فعال $2 > V_f > 1$ نیمه‌فعال $V_f < 2$ آرام (بال، ۲۰۰۷: ۱۲۴)		$V_f = V_{fw} / [(E_{id} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]$ V_f - شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن V_{fw} - پهنای کف دره E_{id} - ارتفاع خط تقسیم در سمت راست E_{rd} - ارتفاع خط تقسیم در سمت چپ E_{sc} - ارتفاع کف دره
$T = 1$ عدم تقارن $T = 0$ دارای تقارن (کوکس ^۲ ، ۱۹۹۴، نقل از لون ^۳ ، ۲۰۱۷)		$T = D_a / D_d$ T - شاخص تقارن توپوگرافی عرضی D_a - فاصله خط میانی تا کمر بند ماندری D_d - فاصله خط میانی حوضه تا خط تقسیم

نتایج

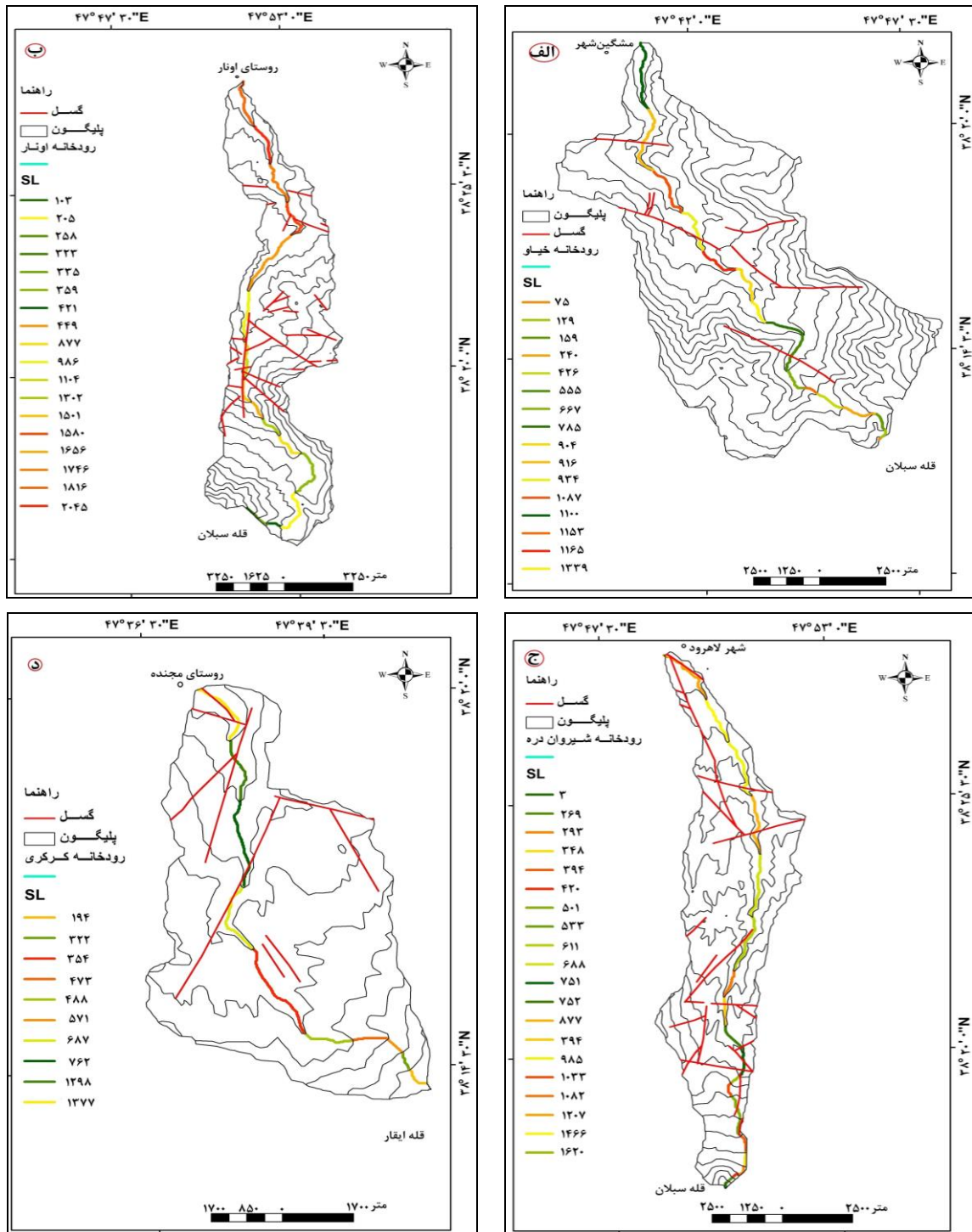
شاخص شیب طولی رود (SL)

شاخص شیب طولی رود (SL)، برای چهار حوضه رودخانه‌ای خیابو، اونار، شیروان‌دره و کرکری براساس فرمول موجود در جدول ۱، محاسبه و نتایج آن در قالب نقشه ارائه شد (شکل ۳ الف، ب، ج و د). با توجه به نقشه‌های ترسیمی، هر چهار حوضه در قسمت‌های میانی و بالادست از مقدار SL بیش از ۵۰۰ برخوردار هستند و این مقدار با توجه به معیار مطرح‌شده در جدول ۱، نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بسیار بالا است. هرچه به پایین دست حوضه‌ها به جز حوضه کرکری نزدیک می‌شویم، از مقدار SL کاسته شده و به کمتر از ۳۰۰ می‌رسد که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی کم در این محدوده است.

1- Jayappa

2- Cox

3- Lone



شکل ۳. مقدار شاخص SL در حوضه‌های آبریز؛ الف: خیاو؛ ب: اونار؛ ج: شیروان دره و د: کرکری

شاخص سینوزیتة جبهه کوهستان (S_{mf})

مقدار این شاخص در چهار حوضه آبریز منطقه براساس معیار مطرح‌شده در جدول ۱ و در محیط نرم‌افزار جی.آی.اس. محاسبه و نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شد. براساس داده‌های این جدول، شاخص سینوزیتة جبهه کوهستان، محدوده بین ۱/۰۵ تا ۱/۶۳ را به خود اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی نیمه‌فعال تا بسیارفعال در محدوده کالدراست.

جدول ۲. مقادیر شاخص S_{mf} در بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه

نام محل	$L_{mf}(Km)$	$L_s (Km)$	S_{mf}	حالت تکتونیکی
اقچه کند	۱/۱۹	۰/۷۷	۱/۵۴	نیمه‌فعال
النی	۱/۴۷	۱/۳۹	۱/۰۵	بسیارفعال
اونار	۳/۲۷	۲/۸۲	۱/۵	نیمه‌فعال
اندزق	۱/۹۴	۱/۵	۱/۲۹	بسیارفعال
بالوقیه	۱/۳۴	۰/۸۲	۱/۶۳	نیمه‌فعال
خیاو	۲/۱	۱/۷۶	۱/۱۹	بسیارفعال
شیروان‌دره	۱/۸۸	۱/۵۶	۱/۲	بسیارفعال
قوری‌تخته	۳/۰۴	۲/۷۴	۱/۱	بسیارفعال
کرکری	۲/۴۳	۲/۰۴	۱/۱۹	بسیارفعال
مجنده	۲/۸۷	۲/۵۱	۱/۱۴	بسیارفعال
موئیل	۱/۴۳	۱/۲۸	۱/۱۱	بسیارفعال

شاخص نسبت پهنای کف درّه به ارتفاع آن (V_f)

مقدار شاخص V_f در چهار حوضه آبریز منطقه براساس فرمول مطرح‌شده در جدول ۱ محاسبه و نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شد. بر این اساس، حوضه‌های خیاو و کرکری از فعالیت تکتونیکی بسیار فعال و حوضه‌های اونار و شیروان‌دره از فعالیت تکتونیکی نیمه‌فعال برخوردار هستند.

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)

برای محاسبه شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)، هر حوضه به ده قسمت (مقطع) تقسیم و شاخص T در قسمت‌های مربوط براساس جدول ۱ محاسبه شد؛ سپس، نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شد. بر این اساس، تمام حوضه‌ها در وضعیت تکتونیکی بسیارفعال قرار دارند.

مورفولوژی مخروط‌افکنه‌های منطقه

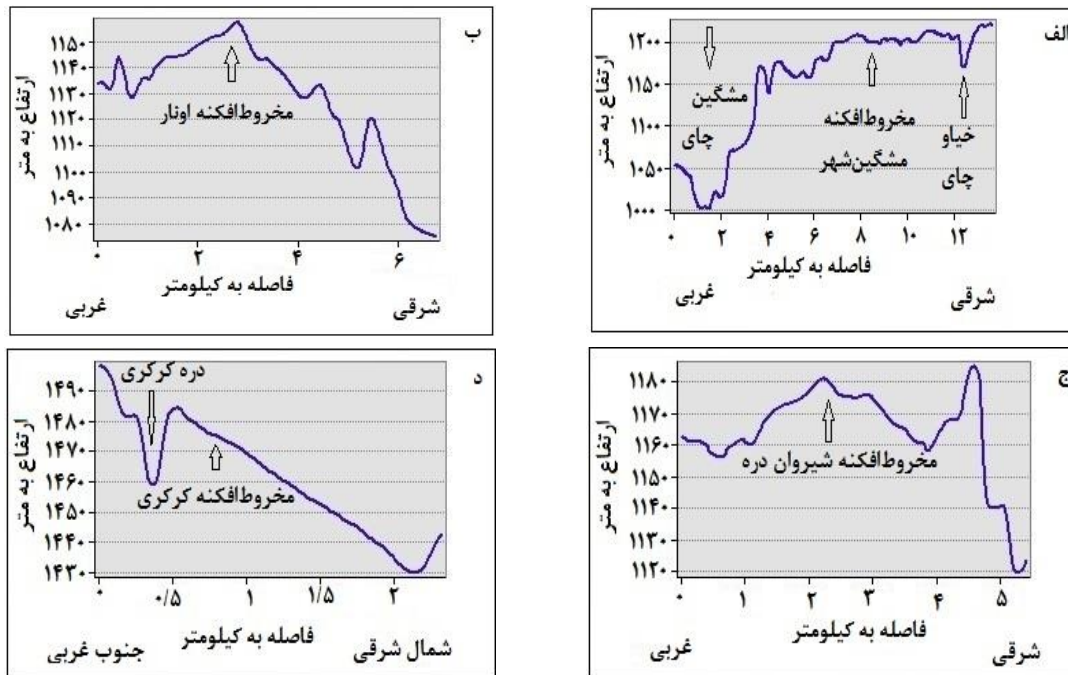
مخروط‌افکنه‌های منطقه که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است، به‌صورت به‌هم‌پیوسته در چاله زمین‌ساختی مشگین‌شهر قرار دارند. این لندفرم‌های کواترنری به‌شدت با رودخانه‌های تغذیه‌کننده بریده‌شده‌اند (شکل ۴). به‌همین دلیل، در حال حاضر، مخروط‌افکنه‌های جدید در قاعده مخروط‌افکنه‌های قدیمی شکل می‌گیرند. این شرایط نشان‌دهنده فرسایش در رأس مخروط‌افکنه‌ها (نبود فضای رسوب‌گذاری) و رسوب‌گذاری در بخش انتهایی (وجود فضای رسوب‌گذاری) آن‌ها است (شکل ۵).

جدول ۳. مقادیر شاخص V_f در چهار حوضه آبریز اصلی منطقه مورد مطالعه

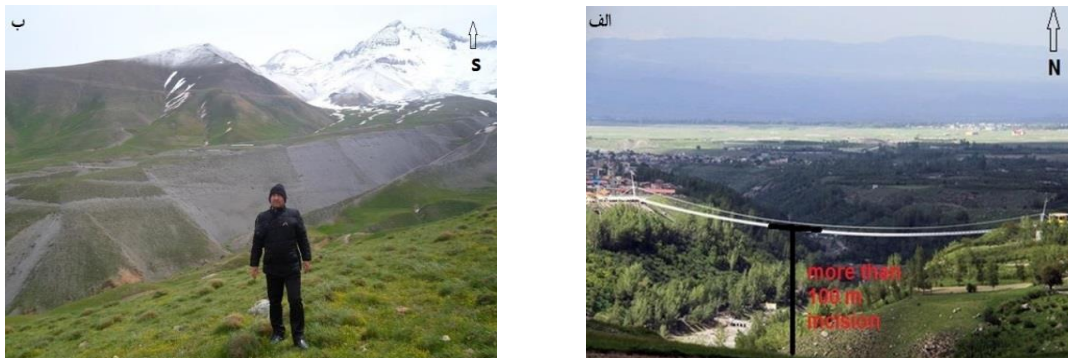
نام حوضه آبریز	$V_{fv}(m)$	$E_{sc}(m)$	$E_{rd}(m)$	$E_{ld}(m)$	V_f	حالت تکتونیکی
خیاو	۲۱۵	۱۵۹۰	۱۹۸۱/۷۷	۱۸۲۶/۰۸	۰/۸۱	بسیارفعال
اونار	۹۹	۱۴۳۷	۱۴۶۶	۱۵۵۴	۱/۳۵	نیمه‌فعال
شیروان‌دره	۸۵	۱۴۷۸	۱۵۲۵	۱۵۱۶	۲	نیمه‌فعال
کرکری	۱۶۰	۱۷۷۱	۲۱۲۱	۱۸۹۳	۰/۷۴	بسیارفعال

جدول ۴. مقدار شاخص T در چهار حوضه آبریز اصلی منطقه مورد مطالعه

نام حوضه	Dd				Da				حالت تکتونیکی
	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
خیاو	۰/۲	۴/۶	۲/۰۲	۱/۵۹	۰/۲۲	۴/۶۵	۲/۰۲	۱/۵۶	بسیارفعال
اونار	۰/۶۳	۲/۹۲	۱/۵۷	۰/۶۰	۰/۶۳	۲/۹۲	۱/۵۷	۰/۶۰	بسیارفعال
شیروان‌دره	۰/۴۳	۱/۹۸	۱/۰۸	۰/۵۳	۰/۴۳	۱/۹۸	۱/۰۸	۰/۵۳	بسیارفعال
کرکری	۰/۷۶	۲/۸۹	۱/۷۰	۰/۷۶	۰/۸۹	۲/۸۹	۱/۸۰	۰/۷۴	بسیارفعال



شکل ۴. پروفیل‌های عرضی مخروط‌افکنه‌ها؛ الف: مشگین‌شهر؛ ب: اونا؛ ج: شیروان‌دره و د: کرکری



شکل ۵. برش سیستم مخروط‌افکنه - حوضه؛ الف: مخروط‌افکنه مشگین‌شهر؛ ب: حوضه خیابو

بحث

هدف نوشتار پیش رو، تجزیه و تحلیل مورفوتکتونیک کالدرای سبلان با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک و مطالعه میدانی و تأثیر آن بر تحوّل و تکامل مخروط‌افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز مربوط به آن‌ها در دامنه‌های شمالی توده سبلان بوده است. یکی از شاخص‌های مهم مورفوتکتونیک که می‌تواند در آشکارسازی تکتونیک فعال بهتر عمل کند، شاخص شیب طولی رود است؛ زیرا رودخانه‌ها به فعالیت تکتونیک حساس هستند و به آن واکنش سریع نشان می‌دهند. به همین دلیل، این شاخص در بیشتر مطالعات مربوط به مورفوتکتونیک رودخانه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابر نظر جایا پا و همکاران (۲۰۱۲)، اگر مقدار این شاخص ≤ 500 باشد، نشان‌دهنده تکتونیک فعال است. این شاخص برای چهار حوضه آبریز اصلی منطقه محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص SI در محدوده کالدرای سبلان، بیش از ۵۰۰ است.

به نظر کلارک و همکاران (۲۰۰۴) بی‌نظمی (آنومالی) در شبکه‌های رودخانه‌ای، اگر دلایل سنگ‌شناسی و اقلیمی نداشته باشد، مربوط به فعالیت‌های تکتونیک اخیر است. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در مورد سنگ‌شناسی و اقلیم منطقه، مشخص شد که حوضه‌های آبریز مورد بحث از شرایط محیطی یکسان

برخورد دارند؛ بنابراین، اختلاف در مقدار شاخص شیب طولی رود به تکتونیک فعال مربوط می‌شود. شکست کالدرا و ایجاد گسل‌های فرعی متعدّد از آن در بستر رودخانه‌ها، موجب افزایش مقدار شاخص شیب طولی رودخانه شده است.

براساس نظر پرزینا و همکاران (۲۰۱۰) در جبهه‌های کوهستانی فعال، بالآمدگی بر فرایندهای فرسایشی غلبه می‌یابد و جبهه‌های کوهستانی خطّی با سینوزیته پایین را به‌وجود می‌آورد، در صورتی که در جبهه‌های کوهستانی غیر فعال، فرایندهای فرسایشی بر بالآمدگی غلبه پیدا می‌کند و جبهه‌های کوهستانی بی‌قاعده با سینوزیته بالا را به‌وجود می‌آورند؛ همچنین به‌نظر بال (۲۰۰۷) به‌کارگیری شاخص‌های سینوزیته جبهه کوهستان و نسبت پهنای کف درّه به ارتفاع آن، به‌طور هم‌زمان، می‌توانند در آشکارسازی تکتونیک فعال بهتر عمل کنند. براساس مطالعات بال (۲۰۰۷)، محدوده تغییرات این شاخص به‌صورت ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۳ و ۳ تا ۱۰ است که به‌ترتیب نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بسیاربالا، نیمه‌فعال و غیرفعال است. نتایج حاصل از محاسبه این شاخص نشان داد که در خیلی از بخش‌ها در محدوده کالدرا، مقدار این شاخص، پایین و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بسیاربالا است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شاخص سینوزیته جبهه کوهستان و شواهد ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناختی، مانند پرتگاه‌های جوان، چشمه‌های متعدّد و برش رأس مخروط‌افکنه‌ها، چنین استنباط می‌شود که شکست کالدرا، موجب ایجاد دو جبهه کوهستانی در مجموعه چشم‌انداز سبلان شده است. جبهه داخلی کوهستان که گسل کالدرا از آن عبور می‌کند (شکل ۲) از نظر تکتونیکی فعال است؛ زیرا پرتگاه‌های جوان و سینوزیته پایین در این قسمت قرار دارد و جبهه خارجی کوهستان که مخروط‌افکنه مشگین‌شهر در آن واقع شده، (شکل ۲) از نظر تکتونیکی غیرفعال است؛ زیرا مخروط‌افکنه‌های به‌هم‌پیوسته (باهادا) در این بخش، به‌شدت، با رودخانه‌ها، بریده شده و به‌شکل خلیجی درآمده‌اند؛ درحالی‌که فعال بودن گسل جبهه داخلی کوهستان سبلان موجب ایجاد پرتگاه‌هایی در این قسمت شده و این پرتگاه‌ها، با توجه به مطالعات میدانی، رفته‌رفته بارزتر^۱ نیز می‌شوند. گسل یادشده، به‌طور دقیق در محل چشمه آب‌معدنی معروف شابیل قرار دارد و آب این چشمه نیز از شکاف این گسل خارج می‌شود. بال (۲۰۰۷) اظهار می‌دارد که گسل‌های غیرفعال پیشین می‌توانند به‌وسیله رودخانه‌ها بریده‌شده و عقب‌نشینی کنند و جلوه گذشته خود را از دست بدهند و مخروط‌افکنه‌های بریده‌شده و تبدیل‌شده به تراس‌های متروک و قدیمی را برجای گذارند؛ درحالی‌که گسل‌های دیگر می‌توانند با فعالیت خود، پرتگاه‌های تند و تیز به‌وجود آورند. مسلم است که در حالت اول، مقدار سینوزیته جبهه کوهستان افزایش یافته و در حالت دوم، مقدار سینوزیته جبهه کوهستان کاهش خواهد یافت.

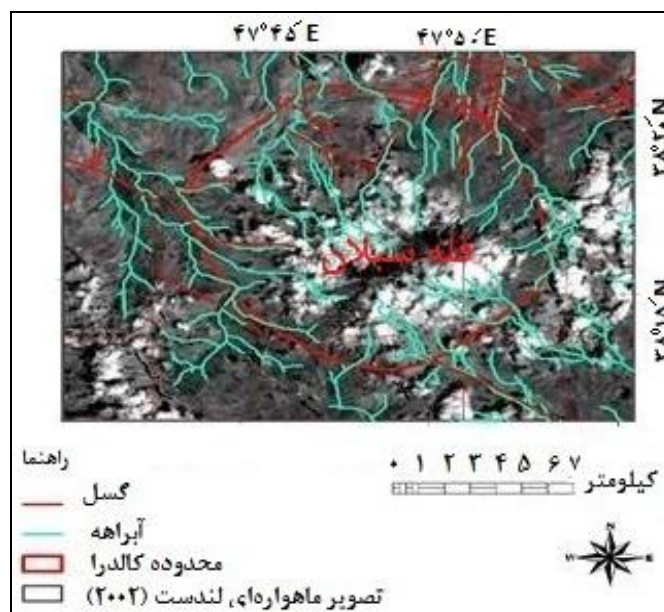
یکی دیگر از شاخص‌های حسّاس به بالآمدگی‌های اخیر و درحال انجام، شاخص نسبت پهنای کف درّه به ارتفاع آن است که به‌اختصار (VF) نامیده می‌شود. به‌باور پرزینا و همکاران (۲۰۱۰)، پهنای کف درّه با افزایش اندازه حوضه و سنگ‌شناسی سست و نرم افزایش می‌یابد و با میزان بالآمدگی کاهش می‌یابد. ارتفاع درّه با گذشت زمان و پس از بالآمدگی کاهش می‌یابد، اما به‌اندازه افزایش پهنای کف درّه سریع نیست. این شاخص به تکتونیک فعال ناشی از پایین‌افتادن سطح اساس در دوره کواترنری حسّاس است؛ زیرا باریک شدن کف درّه، خیلی سریع با برش رودخانه اتفاق می‌افتد (بال، ۲۰۰۷: ۱۲۴). بال و مک‌فادن (۱۹۹۷)، به تفاوت معنی‌داری با اطمینان ۹۹٪ در نسبت شاخص (VF) بین مناطق فعال و غیرفعال تکتونیکی دست یافتند (بال، ۲۰۰۷: ۱۲۵). محدوده تغییرات شاخص یادشده به‌صورت $VF < 1$ ، $1 < VF < 2$ و $2 < VF$ است که به‌ترتیب

نشان‌دهنده تکتونیک بسیارفعال، نیمه‌فعال و آرام است. نتایج این شاخص که در چهار حوضه آبریز اصلی صورت گرفت، نشان داد که حوضه خیابو و کرکری به ترتیب با مقدار V_f ۰/۸۱ و ۰/۷۴ از فعالیت تکتونیک بسیاربالا و حوضه اونار و شیروان دره به ترتیب با مقدار V_f ۱/۳۵ و ۲ از فعالیت تکتونیک نیمه‌فعال برخوردار هستند. ویژگی سنگ‌شناسی حوضه‌های اونار و شیروان دره که از سنگ‌های نامقاوم توف تشکیل شده‌اند، در این نتیجه تأثیر داشته است.

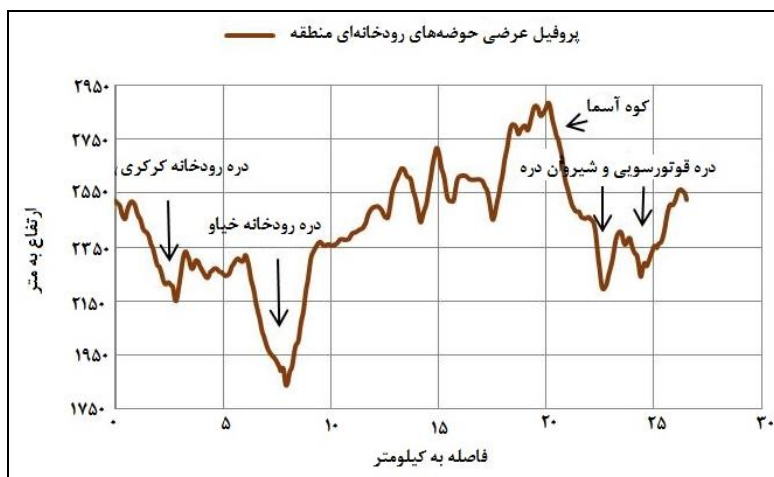
یکی دیگر از شاخص‌های مورفوتکتونیک که برای ارزیابی عدم تقارن حوضه به کار می‌رود و وضعیت تکتونیک مناطق خاص را نمایان می‌سازد، عامل تقارن توپوگرافی معکوس (T) است. مقدار این شاخص در حوضه‌های متقارن، برابر صفر است و با افزایش عدم تقارن به یک نزدیک می‌شود (لون، ۲۰۱۷). مقدار این شاخص در تمام حوضه‌ها به عدد یک نزدیک است. به نظر لون (۲۰۱۷) این شاخص، نشان‌دهنده احتمال فعالیت تکتونیک است و به تنهایی نمی‌تواند، تأییدکننده آن باشد؛ ولی با توجه به نتایج سایر شاخص‌ها که فعالیت تکتونیک را نشان می‌دهند، می‌توان حوضه‌های آبریز منطقه را با معیار این شاخص، از نظر تکتونیک، فعال قلمداد کرد.

فعالیت‌های تکتونیک، تأثیر زیادی بر شبکه‌های زهکشی گذاشته است که بررسی آن‌ها خالی از لطف نیست. آبراهه‌ها در محدوده کالدرای به‌ویژه در بخش شرقی و غربی بی‌نظمی‌های زیادی از خود نشان می‌دهند (شکل ۶). همان‌طور که از شکل پیداست. آبراهه‌ها ابتدا از الگوی شعاعی به الگوی مرکزی و سپس به حالت درختی تبدیل شده‌اند. درواقع با شکست کالدرای، شبکه‌های رودخانه‌ای از نو سازمان‌دهی شده‌اند. بسیاری از آبراهه‌ها با رودخانه‌های قوتورسویی که در شرق قلّه سبلان و در جهت جنوب به شمال جریان دارد و خیابو چای که در غرب (دره موئیل) و موازی با رودخانه قوتورسویی حرکت می‌کند، به اسارت درآمده‌اند. در عوض، بسیاری از آبراهه‌ها که پیش از کالدرای به طرف شرق (سرعین و سردابه) و غرب (کرکری) حرکت می‌کردند، پس از شکست کالدرای بی‌سر شدند و بخشی از مساحت حوضه آبریز خود را به نفع رودخانه‌های قوتورسویی و خیابو از دست دادند.

یکی دیگر از شواهد مهم ژئومورفولوژیکی به منظور تعیین وضعیت تکتونیک منطقه خاص، برش رأس مخروط‌افکنه‌ها است. دلایل متعدّد و گاه متضادی برای برش رأس مخروط‌افکنه ذکر شده است. برخی از پژوهشگران مانند بال (۲۰۰۷: ۱۲۶؛ ۲۰۰۹: ۳۴) دلیل آن را به آرامش تکتونیک نسبت می‌دهند؛ درمقابل، خیام و مختاری (۱۳۸۲)؛ رامشت و همکاران (۱۳۸۸) و بهرامی و همکاران (۱۳۹۱) آن را ناشی از تکتونیک فعال می‌دانند. با توجه به بررسی‌هایی که در این مورد صورت گرفت، مشخص شد که اگر حرکات تکتونیک در رأس مخروط‌افکنه صورت گیرد، برش رأس مخروط‌افکنه و خلیجی‌شدن جبهه کوهستان اتفاق می‌افتد؛ ولی اگر حرکات تکتونیک (بالاآمدگی کوهستان) در ناحیه منبع و دور از رأس مخروط‌افکنه رخ دهد، مخروط‌افکنه‌ها در نزدیکی جبهه کوهستان و بدون برش شکل می‌گیرند. براساس بازدیدهای میدانی مکرر از سطوح مخروط‌افکنه‌های منطقه و نیز ترسیم نیم‌رخ‌های متعدّد عرضی، مشخص شد که رأس همه مخروط‌افکنه‌های منطقه به‌شدت به‌وسیله شبکه رودخانه‌ای بریده شده‌اند (شکل ۷) و پیرو آن، نقطه تقاطع به پایین دست مخروط‌افکنه‌ها، منتقل شده است. دلیل برش رأس مخروط‌افکنه‌ها به فعالیت تکتونیک کالدرای کوهستان سبلان نسبت داده می‌شود. به این صورت که شکست کالدرای موجب ایجاد دو جبهه داخلی کوهستان (فعال) و خارجی (غیرفعال) شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، مخروط‌افکنه‌های بریده‌شده در جبهه خارجی کوهستان قرار دارند که از نظر تکتونیک غیرفعال است.



شکل ۶. بی‌نظمی شبکه‌های زهکشی بر اثر شکست کالدرا



شکل ۷. سینوزیته جبهه خارجی توده سبلان

در مطالعات میدانی، هیچ‌گونه خط گسل یا سطوح مثلثی‌شکلی که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی باشند، در این بخش مشاهده نشد. همه گسل‌ها در این بخش به‌وسیله روانه‌های لاهار پوشیده شده‌اند که می‌تواند، گواه یا شاهد خوبی بر آرامش تکتونیکی باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به مشاهدات میدانی، شواهد ژئومورفولوژیکی و نتایج حاصل از شاخص‌های مورفوتکتونیکی مشخص شد که رخداد شکست کالدرا، موجب ایجاد دو جبهه کوهستانی در چشم‌انداز توده سبلان شده است. یکی جبهه داخلی کوهستان (فعال از نظر تکتونیکی) و دیگری جبهه خارجی کوهستان (غیرفعال از نظر تکتونیکی) هست. از دلایل و نشانه‌های غیرفعال بودن جبهه خارجی کوهستان سبلان، می‌توان به برش رأس مخروط‌افکنه‌ها، خلیجی شدن جبهه کوهستان و انتقال نقطه تقاطع به پای مخروط‌افکنه‌ها اشاره کرد. از دلایل و نشانه‌های فعال بودن جبهه داخلی کوهستان سبلان، می‌توان به پرتگاه‌ها، تندآب‌ها و چشمه‌های متعدد معدنی اشاره کرد؛ همچنین، نتایج حاصل از محاسبه شاخص شیب طولی رود (SL) نشان داد که مقدار این

شاخص در محدوده کالدرای بیش از ۵۰۰ است که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک است. به همین ترتیب، نتایج حاصل از محاسبه شاخص سینوزیته جبهه کوهستان (SMF) در محدوده کالدرای نشان داد که در خیلی از بخش‌ها، مقدار این شاخص، پایین و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک بالا است. افزون بر این، نتایج حاصل از شاخص (VF) نشان داد که حوضه خیابو و کرکری به ترتیب با مقدار V_f ، ۰/۸۱ و ۰/۷۴ از فعالیت تکتونیک بالا و حوضه اونار و شیروان دره به ترتیب با مقدار V_f ، ۱/۳۵ و ۲ از فعالیت تکتونیک نیمه‌فعال برخوردار هستند. مقدار شاخص T نیز در تمام حوضه‌ها به عدد ۱ نزدیک و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک در جبهه داخلی کوهستان سبلان است.

منابع

- بهرامی، شهرام؛ مقصودی، مهران؛ بهرامی، کاظم (۱۳۹۱). ارزیابی نقش تکتونیک در میزان برش رأس مخروط‌افکنه‌های واقع در حاشیه طاق‌دیس دانه خشک. *جغرافیا و توسعه*، ۱۰ (۲۸)، ۲۳-۴۰.
- بیاتی خطیبی، مریم (۱۳۸۸). تشخیص فعالیت‌های نئوتکتونیک در حوضه آبریز قرنق‌چای با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مورفوتکتونیک. *فضای جغرافیایی*، ۹ (۲۵)، ۲۳-۵۰.
- تقیان، علیرضا (۱۳۹۴). بررسی نقش تکتونیک در مورفولوژی، تقطیع و تحول مخروط‌افکنه موغار (شمال اردستان). *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۰ (۱)، ۱۱۹-۱۳۴.
- خیام، مقصود (۱۳۷۲). کوششی بر طرح وضع ساختمانی و مورفولوژی آتش‌فشانی فلات آذربایجان با تأکید بر توده ولکانیکی سبلان. *نشریه دانشکده ادبیات و علوم انسانی*، ۳۳ (۱۴۶-۱۴۷)، ۳۲-۵۰.
- خیام، مقصود؛ مختاری، داود (۱۳۸۲). ارزیابی عملکرد فعالیت‌های تکتونیک بر اساس مورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها (مخروط‌افکنه‌های دامنه شمالی میشو داغ). *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳ (۴۴)، ۱-۱۰.
- دلال اوغلی، علی (۱۳۸۱). پژوهش در سیستم‌های مورفوزن مؤثر در دامنه شمالی سبلان و شکل‌گیری دشت انباشتی مشگین‌شهر. رساله دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.
- رامشت، محمدحسین؛ شاه‌زیدی، سمیه سادات؛ سیف، عبدال...؛ انتظار، مژگان (۱۳۸۸). تأثیر تکتونیک جنب‌بر مورفولوژی مخروط‌افکنه درختگان در منطقه شهداد کرمان. *جغرافیا و توسعه*، ۷ (۱۶)، ۲۹-۴۶.
- رجبی، معصومه؛ هاشمیان، میرابراهیم (۱۳۹۶). ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب ارتفاعات سبلان با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۲ (۱)، ۷۶-۹۳.
- سحابی، فریدون (۱۳۷۸). بررسی آتش‌فشان سبلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین‌گرمایی مشگین‌شهر. استان اردبیل. *علوم زمین*، ۸ (۳۱-۳۲)، ۱-۱۵.
- شیران، مهناز؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ ادب، حامد؛ امیراحمدی، ابوالقاسم (۱۳۹۷). تحلیلی بر آنومالی‌های مورفوتکتونیک و ارتباط آن با تغییر ساختارهای تکتونیک پهنه زاگرس مرتفع و کمربند سنج - سیرجان در منطقه نمونه قلعه شاهرخ. *جغرافیا و توسعه*، ۱۶ (۵۲)، ۴۳-۶۸.
- کمالی، زهرا؛ هیهات، محمودرضا؛ نظری، حمید؛ خطیب، محمد مهدی (۱۳۹۷). بررسی گسل دورود (جنوب باختر ایران) بر پایه مطالعات ریخت‌زمین‌شناختی و ژئومورفولوژیک مخروط‌افکنه‌ها. *جغرافیا و توسعه*، ۱۶ (۵۳)، ۵۱-۶۸.
- گرزی زنجانی، سعید؛ موسوی، زهرا؛ رضاییان، مهناز (۱۳۹۷). مطالعه تغییرات سطحی آتش‌فشان سبلان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری. *مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، (صص. ۱۰۰۸-۱۰۱۱).
- تهران: مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- مختاری، داود؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ محمودی، شبنم؛ مرادی، عباس (۱۳۹۷). کاربرد شاخص‌های مورفومتری

تکتونیکي جنبا در برآورد وضعيت تکتونیکي گسل های مکران در محدوده حوضه های آبریز تبرکن و گز. *جغرافیای طبیعی*، ۱۱ (۳۹)، ۱-۱۷.

مددی، عقیل؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ رجایی، عبدالحمید (۱۳۸۳). تحلیل فعالیت های نئوتکتونیک با استفاده از روش های ژئومرفولوژی در دامنه شمال غربی تالش (باغروداغ). *پژوهش های جغرافیایی*، ۳۶ (۴۸)، ۱۲۳-۱۳۸.

مقصودی، مهران؛ عمادالدین، سمیه (۱۳۹۰). تحلیل شواهد مورفوتکتونیکي گسل درونه در محدوده حوضه آبریز شش طراز و مخروط افکنه های پایین دست آن. *جغرافیا و توسعه ناحیه ای*، ۹ (۱۶)، ۱۰۷-۱۲۳.

مقصودی، مهران؛ ابراهیم خانی، نرگس؛ یمانی، مقصود (۱۳۹۱). تأثیر نئوتکتونیک بر مخروط افکنه رود حاجی عرب (دشت قزوین) با بررسی داده های مورفومتری و رسوب شناسی. *انجمن جغرافیای ایران*، ۱۰ (۳۳)، ۸۷-۱۰۷.

همتی، فریبا؛ مختاری، داود؛ روستایی، شهرام؛ زمان چمنی، بهزاد (۱۳۹۶). ارزیابی فعالیت های نئوتکتونیکي محدوده گسل بناروان براساس شاخصه های ریخت سنجی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۶ (۲۳)، ۸۵-۱۰۷.

References

- Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M. & Rodríguez-Peces, M. J. (2012). Active tectonics in the central and eastern Betic Cordillera through morphotectonic analysis: the case of Sierra Nevada and Sierra Alhamilla. *Journal of Iberian Geology*, 38 (1), 225-238. https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2012.v38.n1.39214.
- Bahrami, S., Maghsoudi, M. & Bahrami, K. (2012). Evaluation of the role of tectonics on the incision rate of alluvial fans located in the Danekhosh anticline margins. *Geography and Development*, 10 (2), 23-40. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2012.319>. (In Persian)
- Bayati Khatibi, M. (2009). Detection of neotectonic activity in the Gharanghochai catchment using geomorphic and morphotectonic indices. *Geographical Space*, 9 (25), 23-50. (In Persian)
- Blair, T. C. & McPherson, J. G. (2009). Processes and forms of alluvial fans. In: A.J. parsons, A. D. Abrahams. *Geomorphology of Desert Environment*, (pp. 413-467). Dordrecht: Springer. Doi 10.1007/978-1-4020-5719-9-14.
- Browning, J. & Gudmundsson, A. (2015). Caldera faults capture and deflect inclined sheets: an alternative mechanism of ring dike formation. *Bulletin of Volcanology*, 77 (1), 1-33.
- Bull, W. B. & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California. In: Doehring, D. O. *Geomorphology in Arid Regions*, (pp. 115-138). New York: Binghamton.
- Bull, W. B. (2007). *Tectonic geomorphology of Mountains: A New Approach to Pale Seismology*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Bull, W. B. (2009). *Tectonically Active Landscapes*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Clark, M. K., Schoenbohm, L. M., Royden, L. H., Whipple, K. X., Burchfiel, B. C. Zhang, X. & Chen, L. (2004) Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23 (1), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2002TC001402>.
- Dallal oghli, A. (2003). *The study of the effective morphogenesis systems in the northern slope of Sabalan Mountain and the formation of the accumulative Plain of meshkinshahr*. Doctoral dissertation, Tabriz University. (In Persian)
- Didon, J. & Gemain, Y. M. (1976). *Le Sabalan, volcan plio-quatenaire de l'Azerbaidjan oriental (Iran)*. Doctoral dissertation, Universite Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Eleni, K., Hariklia, S., George, B., Antonarakou, A. & Evangelos, K. (2015). Morphotectonic analysis, structural evolution/pattern of a contractional ridge: giouchtas Mt., Central Crete, Greece. *Journal of Earth System Science*, 124 (3), PP. 587-602.
- Figueroa, A. M. & Knott, J. R. (2010). Tectonic geomorphology of the Southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for Uplift and Basin Formation. *Geomorphology*, 123 (1-2), 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.009>.
- Gorzi Zanjani, S., Mousavi, Z. & Rezaian, M. (2019). Study of Surface Variations of Sabalan Volcano Using Radar Interferometry Technique. *Proceedings of the 18th Iranian Geophysical Conference*, (pp. 1011-1008). Tehran: International Institute of Seismology and

- Earthquake Engineering. (In Persian)
- Hack, J. T. (1973). *Stream-profile analysis and stream-gradient index*. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR: *Journal of Research of the us Geological Survey*, 1 (4), 421-429.
- Hemmati, F., Mokhtari, D., rostai, S. & Zaman chamani, B. (2018). Evaluation of neotectonic activities of the Benarwan fault zone based on morphometric indices. *Geography and Environmental Hazards*, 6 (23), 85-107. DOI: 10.22067/geo.v6i2.59240. (In Persian)
- Huggett, R. (2005). *Fundamentals of Geomorphology*. London and New York: Routledge.
- Jaan, O., Lone, S., Malik, R., Lone, A., Wasim, M. & Un-Nissa, A. (2015). Morphotectonic and morphometric analysis of Vishav basin left bank tributary of jhelum river sw Kashmir Valley India. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 6 (2), 17-26.
- Jayappa, K. S., Markose, V. J. & Nagaraju, M. (2012). Identification of geomorphic signature of neotectonic activity using dem in the precambrian terrain of western Ghats, India. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1 (8), 215-220. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-215-2012.
- Kamali, Z., Hayat, M. R., Nazari, H. & Khatib, M. M. (2019). Investigation of Doroud Fault (southwestern Iran) based on geological and geomorphological studies of alluvial fans. *Geography and Development*, 16 (53), 51-68. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2018.4150>. (In Persian)
- Keller, E. A. & Pinter, N. (1996). *Active tectonics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Khayyam, M. & Mokhtari, D. (2003). Evaluation of tectonic activities based on morphology of alluvial fans (Misho north slope alluvial fans). *Geographical Research*, 3 (44), 1-10. (In Persian)
- Khayyam, M. (1996). An attempt on the structure situation and volcanic morphology of the Azerbaijani plateau with emphasis on Sabalan volcanic mass. *Journal of the Faculty of Literatures & Humanities*, 33 (147-146), 32-50. (In Persian)
- Lipman, P. W., Zimmerer, M. J. & McIntosh, W. C. (2015). An ignimbrite caldera from the bottom up: Exhumed floor and fill of the resurgent Bonanza caldera, Southern Rocky Mountain volcanic field, Colorado. *Geosphere*, 11 (6), 1902-1947.
- Lone, A. (2017). Morphometric and Morphotectonic Analysis of Ferozpur Drainage Basin Left Bank Tributary of River Jhelum of Kashmir Valley, NW Himalayas, India. *Geography & Natural Disasters*, 7 (208). DOI: 10.4172/2167-0587.1000208.
- Lü, Y. & Chen, L. (2017). Upper crustal P-wave velocity structure beneath two volcanic areas in northern Iran. *Science China Earth Sciences*, 60 (4), 786-795.
- Madadi, A., Rezaei Moghaddam, M. H. & Rajaii, A. (2004). Neotectonic activity analysis using geomorphological methods in northwest Talesh (Baghrodagh) slopes. *Geographical Research*, 36 (48), 123-138. (In Persian)
- Maghsoudi, M., & Emadaddin, S. (2011). Morphotectonic evidence analysis of the Daroneh Fault in the Shushtaraz catchment area and its downstream alluvial fans. *Geography and Regional Development*, 9 (16), 107-123. <https://doi.org/10.22067/geography.v9i16.11031>. (In Persian)
- Maghsoudi, M., Ebrahimkhani, N. & Yamani, M. (2012). Neotectonic impact on the alluvial fan of the Haji Arab River (Qazvin plain) by investigating morphometric and sedimentological data. *Journal of the Iranian Geographical Society*, 10 (33), 87-107. (In Persian)
- Mandi, S. & Soren, K. (2016). Morphotectonic analysis of the Chel river basin, northern west Bengal, India. *Journal of Humanities and Social Science*, 21 (6), 1-6.
- Mokhtari, D., Rezaei Moghaddam, M. H., Mahmoudi, S. & Moradi, A. (2019). Application of Tectonic Morphometric Indices in Estimation of Tectonic Status of Makran Fault in Tabrken and Gaz Basins. *Journal of Natural Geography*, 11 (39), 1-17. (In Persian)
- Mousavi, Z., Darvishzadeh, A., Ghalamghash, J. & Vosoughi, M. (2011). Discussion on Stratigraphy Questions at Sabalan Volcano and Sabalan Geothermal Exploration Project, Meshkinshahr, Iran. *GRC Transactions*, 35 (2011), 931-934.
- Pérez-Peña, J. V., Azor, A., Azañón, J. M. & Keller, E. A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (betic cordillera, se Spain): insights from geomorphic indexes and drainage pattern

- analysis. *Geomorphology*, 119 (1-2), 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.2.020>.
- Rajabi, M. & Hashemian, M. A. (2018). Evaluation of tectonic activities of southwestern Sabalan catchments using geomorphological features. *Geographical Research*, 32 (1), 93-76. (In Persian)
- Ramírez-Herrera, M. T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. *The Journal of the British Geomorphological Group*, 23 (4), 317-332. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199804\)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V).
- Ramshat, M. H., Shah Zaidi, S. S., Seif, A. & Entezari, M. (2009). Influence of tectonic activity on morphology of Derakhtankhan alluvial fans in the Shahdad Kerman. *Geography and Development*, 7 (16), 46-29. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2009.1174>. (In Persian)
- Sahabi, F. (1999). Sabalan volcanic complex with special reference to the hydrothermal sources in Meshkinshahr area, NW Iran, Geosciences. *Geological survey of Iran*, 8 (31-32), 1-14. (In Persian)
- Shiran, M., Zanganeh Asadi, M. A., Adab, H. & Amir Ahmadi, A. (2019). An analysis of morphotectonic anomalies and their relationship with the alteration of high Zagros broad tectonic structures and Sanandaj-Sirjan Belt in the Shahrokh castle sample area. *Geography & Development*, 16 (52), 43-68. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2018.4109>. (In Persian)
- Taghian, A. (2015). Investigation of the role of tectonics in morphology, segmentation and evolution of Moghar alluvial fan (North Ardestan). *Geographical Researches*, 30 (1), 119-134. (In Persian)
- Topal, S. & Özkul, M. (2018). Determination of relative tectonic activity of the Honaz fault (SW Turkey) using geomorphic indices. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (6), 1200-1208.