

مورفوتکتونیک و نئوتکتونیک در گستره کاشان، سامانه گسلی قم- زفره

منصوره توکلی‌زاده^۱، دکتر محمود الماسیان^۲، کریم روشن‌بخت^۳

چکیده

در این نوشتار با بررسی برخی عوارض جوان زمین، فعالیت‌های نئوتکتونیک و اثرات ثبت شده از این فعالیت‌ها در راستای سامانه گسلی قم- زفره، سعی شده تا نشانه‌ها و شواهدی پیرامون نرخ (Rate)، نوع و آرایش تغییر شکل‌های تکتونیک به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار گیرد. به کمک این بررسی‌ها نشان داده شده که این سامانه گسلی از یک سازوکار راست‌الغز راست‌گرد همراه با یک مؤلفه معکوس برخوردار است. همچنین با بررسی نتایج به دست آمده از محاسبه چندین شاخص مورفوتکتونیک و تلفیق آن‌ها با سایر اطلاعات، میزان فعالیت تکتونیک در چند حوضه انتخابی در راستای پهنه گسلی قم- زفره تعیین شده است.

کلید واژه‌ها: تکتونیک فعال، نئوتکتونیک، سامانه گسلی قم- زفره، شاخص مورفوتکتونیک

Morphotectonics and Neotectonics in the Kashan Area, Qom-Zefreh Fault System

Mansourch Tavakolizadeh, Dr.Mahmoud Almasian, Karim Rowshanbakht

Abstract

In this paper some geological young features, neotectonical activities and traces of their effects along the Ghom-Zefreh Fault are investigated to find some evidences of qualitative and quantitative rate and type of the tectonical deformations. Investigations imply a strike slip dextral with a reverse component for this fault system. Using the results of calculating some morphotectonical index in combinations with other data types, tectonical activity rate is determined in some selected basins.

Keywords: Active tectonic, Neotectonic, Ghom-Zefreh fault system, Morphotectonic index.

^۱ - گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، m.tavakolizade@gmail.com

^۲ - گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، m_almasian@hotmail.com

^۳ - مهندسین مشاور پارس رای آب، Rowshanbakht@gmail.com

مقدمه:

سامانه گسلی قم- زفره به عنوان یک سرچشمه لرزه‌ای، تاکنون باعث رویداد زمین‌لرزه‌های ویران‌گری در ناحیه شده است. از دلایل فعالیت جوان گسل قم- زفره، می‌توان به وجود چشمه‌های تراورتن، زون‌های هیدروترمال و دگرسانی در نفوذی‌های اطراف گسل اشاره کرد. بنابراین شناخت وضعیت تکتونیکی منطقه در گذشته و آینده لازم به نظر می‌رسد. بررسی‌های زمین ریخت شناسی می‌تواند برای شناسایی مناطق پویا از نظر زمین ساختی و مناطقی که در گذشته دارای فعالیت بیشتری بوده‌اند به کار رود (Keller & Pinter, 2002).

زمین‌شناسی و زمین ساخت عمومی

ناحیه کاشان در مجموع از دو فرازمین شامل کوهستان‌های شرقی دشت و رشته کوه غربی و در میان آن‌ها یک فروزمین (دشت مرکزی کاشان) تشکیل شده است. گسل‌های مهم و اصلی این ناحیه در حد فاصل کوهستان‌ها و دشت قرار دارند (شکل ۱). سامانه گسلی قم - زفره با روند کلی شمال غرب- جنوب شرق، مرز بین پهنه ساختاری ارومیه- دختر و پهنه ایران مرکزی را تشکیل می‌دهد. به‌طور کلی گستره کاشان از نظر تکتونیکی وضعیت پیچیده‌ای داشته و محور اصلی تغییر شکل عوارض ناهمواری‌ها، شمال غربی- جنوب شرقی است. بنابراین نیروهای مولد این دگرشکلی‌ها می‌بایست جهت شمال‌شرقی- جنوب‌غربی داشته باشند. سنگ‌های گستره کاشان در برابر حرکات زمین‌ساختی از شکل پذیری زیادی برخوردار بوده‌اند. بازتاب این حرکات به صورت چین‌خوردگی‌های مشخص و گسل‌های متعدد در امتداد روندهای ساختمانی است. چین‌های منطقه اغلب از نوع کشیده (Drag fold) است و به‌واسطه حرکت انجام‌گرفته در سطح گسل‌ها و وضعیت جای‌گیری واحدهای سنگی در این مناطق پدیدار شده‌اند. بیرون زدگی‌ها نیز از همین روند پیروی می‌کنند. از دیدگاه چینه شناسی واحدهای رخنمون‌یافته در این ناحیه شامل واحدهای سنی از پالئوزوئیک تا عهد حاضر می‌باشند.

سامانه گسلی قم- زفره به‌عنوان ساختار اصلی و چیره در منطقه، با درازائی حدود ۲۲۰ کیلومتر از جنوب غربی قم شروع و پس از عبور از جنوب غرب کاشان، دشت کاشان را از ارتفاعات جنوبی آن جدا می‌سازد و به سوی شهر نطنز ادامه یافته و در نهایت به منطقه زفره می‌رسد. سامانه گسلی قم - زفره در مطالعات پیشین بر مبنای شیب و سازوکار گسل، به سه قطعه گسلی راوند (با طول ۶۰ کیلومتر)، کاشان (با طول ۹۰ کیلومتر) و زفره (با طول ۷۰ کیلومتر) تقسیم شده که نسبت به یکدیگر حالت پلکانی دارند (جمالی و همکاران، ۱۳۸۶). این پهنه گسلی برای نخستین بار توسط نبوی (۱۳۵۵)، به عنوان یک گسل امتدادلغز راست‌گرد و در امتداد گسل شمال تبریز معرفی شده است. بخشی از این سامانه گسلی که از حوالی نطنز تا جنوب زفره ادامه دارد توسط عمیدی (Amidi, 1975)، مطالعه و تحت عنوان گسل زفره معرفی گردیده است. ناجی (Nadji, 1972)، اولین کسی بود که به فعالیت‌های جوان گسل قم- زفره در جنوب فین اشاره کرد. جدیدترین فعالیت این گسل در پایان ترشیاری بوده است. فعالیت مهم گسل قم- زفره را به علت قطع کردن نفوذی‌های آتشفشانی ائوسن و جوان‌تر می‌توان پس از زمان ائوسن در نظر گرفت.

روش مطالعه

در ناحیه کاشان (جنوب غربی قم تا شمال زفره)، آثار حرکات جوان و فعال در راستای جبهه کوهستان، در امتداد سامانه گسلی قم- زفره به‌صورت جابجایی واحدهای رسوبی کواترنر پسین و هولوسن و همچنین جابجایی عوارض مرفولوژیکی نظیر رودخانه‌ها و بادزن‌های آبرفتی برجامانده است. در این منطقه می‌توان با مقایسه و تطبیق کلیه شواهد مورفوتکتونیکی کیفی و کمی و تلفیق با سایر مطالعات، تصویری از وضعیت تکتونیکی گذشته و آینده منطقه به‌ویژه در امتداد گسل قم- زفره، به دست آورد. تحلیل این مسائل نشانه‌ها و شواهدی پیرامون نرخ، نوع و آرایش تغییر شکل‌های تکتونیکی را ارائه می‌دهد. بررسی‌های اولیه و کیفی

جنبش زمین‌ساختی در بخش‌های مختلف این گسل می‌باشد. بررسی‌های متعددی جهت تعیین میزان جابجایی در امتداد گسل صورت گرفته است.

بررسی‌های انجام شده با استفاده از GPS، توسط ورنانت و همکاران (Vernant et. al, 2004)، جهت تعیین جابجایی‌های صفحه اوراسیا در محدوده کاشان (۵۱/۲۵۵ طول شرقی و ۳۴/۱۵۰ عرض شمالی)، نشان‌دهنده جابجایی ۹/۸۹ میلی‌متر در سال به سمت شرق و ۱۰/۷۱ میلی‌متر در سال در جهت شمال است. محجل و پروهان (۱۳۸۴)، با بررسی مجموعه سنگ‌های به‌تله‌افتاده در قطعه گسلی نطنز، جابجایی حدود ۲۰ کیلومتر برای این قطعه گسلی برشی شده در نظر گرفته‌اند.

عمیدی (Amidi, 1975)، نشان داده که در طول گسل زفره آهک‌های کرتاسه حدود ۲ کیلومتر جابجایی راست‌گرد را نشان می‌دهند.

در جنوب آبادی زنجابر، در امتداد مسیر گسل، بخش‌هایی از آهک‌های سازند قم با پهنایی بین ۱۰ تا ۵۰ متر در قطعه گسلی مشاهده می‌شوند که برش راست‌گرد را برای آن روشن می‌سازد. در مسیر جاده اردستان-اصفهان، در ۳ کیلومتری جنوب غرب آبادی جنبه، پهنه حرکتی این گسل در همبری آهک‌های کرتاسه و سنگ‌های آذرآوری ائوسن با پهنای حدود ۲۰ متر حرکت امتدادلغز راست‌گرد را مشخص می‌سازند.

جمالی و همکاران (۱۳۸۶)، حداقل نرخ لغزش افقی را در شمال غرب روستای هنجن، حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند. جابجایی‌های امتدادلغز راست‌گرد مشاهده شده در آبرفت‌های جوان ناحیه نطنز نیز بیانگر آن است که نرخ متوسط لغزش افقی در طول این بخش از گسل ۲ میلی‌متر در سال می‌باشد.

در جنوب شرقی روستای جزه، آثار جابجایی‌های برشی و راست‌گرد گسل قم-زفره با اشکال بادامی و ابعاد قابل توجه در نهشته‌های الیگومیوسن مشاهده می‌شود (شکل ۲).

زمین‌ریخت‌شناسی در طول پهنه گسلی قم-زفره اطلاعات جامعی را در مورد وضعیت کلی تکتونیک منطقه به دست می‌دهد. جهت مطالعه دقیق‌تر درخصوص میزان جابجایی و نرخ فعالیت تکتونیکی منطقه، نتایج به دست آمده از تلفیق چندین شاخص مورفوتکتونیکی و تفسیر شرایط ریخت‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. به این منظور در کنار مطالعات کیفی، شاخص‌های مورفوتکتونیکی سینوسیستی جبهه کوهستان (Smf)، نسبت پهنای دره به عمق (Vf)، گرادیان رودخانه (SL) و مقطع طولی رودخانه و تغییرات سنگ‌شناسی آن، در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود، محاسبه شده و براساس تغییرات آن‌ها درجه فعالیت تکتونیکی برای هر منطقه تعیین شده است. همچنین با تفسیر برخی شواهد ریخت‌شناسی میزان جابجایی‌های افقی و قائم برای گسل تعیین شده است. در این بررسی‌ها از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان و آران، عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرائی کمک گرفته شده است.

جابجایی‌های افقی و قائم

مؤلفه‌های برشی و فشاری ناشی از حرکت رو به شمال صفحه عربستان در این بخش از کمربند ارومیه-دختر از یکدیگر تفکیک شده، به صورت دو مؤلفه برشی و فشاری عمل نموده و سبب ایجاد حرکات امتدادلغز در طول گسل قم-زفره و تشکیل چین‌خوردگی و گسلش معکوس بر روی روندهای هم‌راستا با این گسل شده است. هم‌راستا بودن گسل قم-زفره با محور تاقدیس‌های جنبای کوه چرخه در ناحیه نطنز بر این موضوع دلالت دارد (جمالی و همکاران، ۱۳۸۶). سامانه گسلی قم-زفره در منطقه باعث به‌هم‌ریختگی عوارض ریخت‌شناختی، جابجایی افقی و گاهی قائم نهشته‌های رسوبی، رودخانه‌ها و مخروط افکنه‌ها گردیده و آثار فعالیت آن را می‌توان در قالب جابجایی واحدهای رسوبی قدیمی و جوان مشاهده نمود. مقدار جابجایی متفاوت عوارض زمین‌شناسی و زمین‌ریختی در راستای گسل قم-زفره مبین تغییر میزان

نشانه‌های تکتونیک فعال و جوان

در این ناحیه بررسی‌های ژئومورفولوژیکی ساخت‌های جوان همچون افزای‌های گسلی، مورفولوژی جبهه کوهستان در راستای گسل قم- زفره، شکل مقطع طولی و عرضی دره‌های متقاطع نسبت به جبهه‌های کوهستان (Mountain front)، شکل مقاطع طولی مخروط افکنه‌ها، آبراهه‌های قطع شده، جابجاشدگی نهشته‌های کواترنر توسط گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها (Foldings) یا کج‌شدگی (Tilting) نهشته‌های جوان، شیب بستر رودخانه‌ها در مقطع طولی و وضعیت نهشتگی رسوبات جوان و مخروط افکنه‌ها، وجود چشمه‌های گسلی در منطقه و به ویژه در راستای گسل‌ها، همچنین رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگر تاریخی و معاصر در گستره و ... همگی در نگاه اول مبنی بر فعالیت تکتونیک منطقه به ویژه در محدوده گسل کاشان می‌باشد. با بررسی‌های بیشتر و محاسبه شاخص‌های کمی می‌توان در مورد نحوه و میزان فعالیت گسل و یا منطقه اظهار نظر نمود. وجود مخروط افکنه‌های نزدیک به جبهه کوهستان به ویژه در امتداد گسل کاشان مبنی بر فعال بودن جبهه کوهستان و عدم تقارن شکل این مخروط افکنه‌ها (افزایش سطح شرقی نسبت به غربی در آن‌ها) راست‌گرد بودن گسل قم- زفره در این بخش را نشان می‌دهد. در راستای گسل قم- زفره، شواهد زیادی نیز مبنی بر بریدگی و جابجایی آبراهه‌ها و مخروط افکنه‌های منتهی به دشت‌ها وجود دارد که جابجایی‌های امتدادلغز راست‌گرد و مورب لغز معکوس را برای حرکت‌های جوان گسل قم- زفره نشان می‌دهد (شکل‌های ۴، ۵ و ۶). البته چند سانتی‌متر حرکت قائم در امتداد یک قطعه گسلی نیز می‌تواند آبراهه‌های کوچک را به طرفین منحرف کرده و ایجاد نوعی انفصال دروغین (False offset) نماید (قرار گرفتن کانال پایین‌دست یک آبراهه در نزدیک کانال بالادست آبراهه‌های دیگر، شکل ۶). انفصال در مسیر آبراهه‌ها، مخروط افکنه‌ها و حتی خمیدگی رودها در محل تقاطع با خط اثر گسل نشان می‌دهد، در راستای گسل قم- زفره

همچنین شواهد ریخت زمین ساختی فراوانی شامل بریدگی و جابجایی آبراهه‌ها و مخروط افکنه‌های منتهی به دشت‌ها وجود دارند که جابجایی‌های امتدادلغز راست‌گرد و مورب لغز معکوس را برای گسل قم- زفره نشان می‌دهند.

یکی از بارزترین عوارض ریخت‌شناختی در طول گسل کاشان، جابجایی باذن آبرفتی در مجاورت روستای گبرآباد است. این باذن بوضوح حدود ۶۰۰ متر جابجایی راست‌گرد را نشان می‌دهد (شکل ۳). با در نظر گرفتن سن پلیستوسن پایینی (۷۸۰۰۰۰ سال) تا پلیستوسن بالایی (۱۳۰۰۰۰ سال) برای این باذن آبرفتی حداقل نرخ لغزش افقی در طول این بخش از گسل کاشان بین ۰/۷ تا ۴/۶ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود که میانگین آن ۲/۶ میلی‌متر در سال می‌باشد. جمالی و همکاران (۱۳۸۶)، میانگین حداقل نرخ لغزش افقی را در طول این بخش از گسل قم- زفره بین ۲/۵ تا ۳ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند.

جمالی و همکاران (۱۳۸۶)، نرخ جابجایی قائم بر روی گسل معکوس در عمق را حدود ۰/۳ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند (شکل ۴). افزای گسلی (Fault scarp) گسل راوند را می‌توان از حوالی روستای سن‌سن تا ۱۴ کیلومتری شمال کاشان و به طول تقریبی ۲۰ کیلومتر مشاهده نمود (Hessami & Jamali, 1997). ارتفاع نسبی این افزای‌های گسلی از شرق به غرب به صورت پلکانی افزایش می‌یابد، به طوری که افزای سن‌سن به عنوان کم‌ارتفاع‌ترین و جوان‌ترین افزای بر حاشیه باذن‌های آبرفتی منطبق بوده و ارتفاع آن حداکثر به ۱/۵ متر می‌رسد. به سمت جنوب شرق، در گستره غرب راوند (روستای خزاق)، گسل راوند با افزای به ارتفاع تقریبی ۱ تا ۲ متر در نهشته‌های جوان آبرفتی حاشیه دشت قابل شناسایی است. با این وجود بازدیدهای صحرایی تنها بر فرایش بلوک غربی نسبت به بلوک شرقی دلالت داشته و تاکنون هیچ‌گونه آثاری از جابجایی افقی عوارض مورفولوژیکی مشاهده نگردیده است.

شکلی نامنظم و حرکات تکتونیکی قائم و جوان جهت ایجاد جبهه کوهستان مستقیم می‌باشد. جبهه‌های کوهستانی که با فرایش فعال همراهند تقریباً شکلی مستقیم داشته و در صورت کاهش نرخ فرایش، فرایندهای فرسایشی وارد عمل شده و جبهه کوهستانی نامنظم و سینوسی شکل پدید می‌آید که با گذشت زمان این حرکت نامنظمتر می‌گردد. اگر نرخ فرایش فعال کاهش یابد، فرایندهای فرسایشی جبهه کوهستان نامنظم‌تری را ایجاد کرده و مقدار S_{mf} افزایش می‌یابد و بالعکس. مقادیر عددی نزدیک به ۱ برای شاخص S_{mf} ، بیان‌گر مناطق دارای حرکات تکتونیکی فعال و جبهه‌های کوهستان دارای نرخ فرایش زیاد می‌باشند (Keller & Pinter, 2002). این شاخص به صورت $S_{mf} = L_{mf}/L_s$ تعریف می‌گردد که در آن S_{mf} سینوسی جبهه کوهستان، L_{mf} طول جبهه کوهستان در محل حد بین کوهستان و کوهپایه و L_s طول مستقیم جبهه کوهستان است. در این مطالعات، شاخص سینوسی جبهه کوهستان در امتداد دو قطعه از سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است. بخش مورد مطالعه در قطعه گسلی راوند از حوالی سن‌سن تا فین کوچک و بخش مورد مطالعه در قطعه گسلی کاشان از حوالی معدن دره تا تتماع در نظر گرفته شده است. برای قطعه گسلی راوند:

$$S_{mf} = 67655.33/36751.28 = 1.84$$

و برای قطعه گسلی کاشان:

$$S_{mf} = 53499.73/34463.48 = 1.55$$

با در نظر گرفتن معیارهای کلر و پیتر (Keller & Pinter, 2002) جهت رده‌بندی درجه فعالیت تکتونیکی در امتداد دو بخش مورد نظر از سامانه گسلی قم- زفره و با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات کیفی و کمی، قطعه گسلی راوند در رده دوم (جبهه کوهستانی با فعالیت کمتر که هنوز آثاری از تکتونیک فعال در آن مشاهده می‌شود) و قطعه گسلی کاشان در رده اول (جبهه کوهستان فعال)، قرار می‌گیرد. بنابراین این نتیجه به دست می‌آید که شاخص S_{mf} در قطعه گسلی کاشان نسبت به

مقدار جابجایی‌ها در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد. معمولاً در جبهه‌های کوهستان فعال (Active mountain fronts) که دارای گسلی شیب‌لغز در محل کوهپایه می‌باشند، عمل حفر قائم رودهای متقاطع با روند گسل، در قسمت آبرفت‌های کوهپایه‌ای شدید بوده و در ضمن، رسوب‌گذاری جوان نیز در قسمت بالادست صورت می‌گیرد. مورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها یکی از نشانه‌های مورد مطالعه در بررسی اثرات حرکات تکتونیکی فعال می‌باشد. مخروط‌افکنه‌های نوع تکتونیکی اغلب دارای ژرفای زیادی بوده و شکل مقاطع طولی آن‌ها قاشقی شکل است و بیان‌گر وجود فرایش فعال در جبهه‌های کوهستانی محل تشکیل آن‌ها می‌باشند.

تجربه نشان‌گر این نکته بوده که هرچه نرخ فرایش فعال (Active uplift rate) جبهه کوهستان نسبت به نرخ حفر قائم رودخانه و نیز نرخ رسوب‌گذاری مخروط‌افکنه بیشتر باشد، عمل نهستگی در مناطق نزدیک به رأس مخروط صورت گرفته (نهستگی رأسی) و جوان‌ترین رسوبات مخروط‌افکنه در این بخش از مخروط نهشته می‌شوند. اگر نرخ فرایش فعال جبهه کوهستان نسبت به نرخ حفر قائم رودخانه در کوهستان، کمتر و یا مساوی آن مقدار باشد (شکل ۷)، در این حالت در محل رأس مخروط‌افکنه عمل حفر رخ می‌دهد و محل نهستگی رسوبات جوان به طرف پایین‌تر مخروط‌افکنه (قاعده مخروط) منتقل می‌گردد (Keller & Pinter, 2002).

نمودار فاصله به ارتفاع برای یکی از بادزن‌های آبرفتی شکل ۵ (بادزن آبرفتی جنوب شرقی شکل ۵، واقع در شمال غربی نصف راه قمصر)، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ ترسیم شده است. این نمودار، شبیه به نمودار a در شکل ۷ بوده و دارای خصوصیات مخروط‌افکنه‌ها در مناطق فعال تکتونیکی است.

شاخص پیچ و خم جبهه کوهستان (S_{mf})

این شاخص نشان‌گر توازن میان قدرت رودها و فرایندهای فرسایشی برای ایجاد یک جبهه کوهستان با

راوند بوده و محاسبه مقادیر شاخص V_f کمتر از ۱/۵ برای این دره‌ها مبین فعالیت بیشتر این قطعه گسلی است (جدول ۱).

شاخص گرادیان شیب رودخانه (SL)

در این مطالعات جهت تطابق بهتر و ایجاد تصور دقیق‌تری از وضعیت تکتونیکی منطقه، در طول ۴ رودخانه در حوضه‌های باروتق، جزه، قمصر و قهرود، علاوه بر شاخص SL، نیم‌رخ طولی رودخانه و درصد شیب در طول آن‌ها محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است. شاخص شیب رودخانه به تغییرات قدرت رودخانه و شیب کانال حساس بوده و از آن برای ارزیابی روابط بین جنبش زمین‌ساختی، جنس سنگ و توپوگرافی استفاده می‌شود. (Keller & Pinter, 2002). رودخانه‌هایی که از نظر زمین‌ساختی دچار آشفتگی نشده باشند، دارای نیم‌رخ طولی مقعر با تغییرات ملایم بوده و در رودخانه‌های متعادل شیب رودخانه در تمام مسیر رود ثابت باقی می‌ماند (Hack, 1973). آشفتگی در نیم‌رخ رودخانه به ویژه زمانی که با اختلافات سنگ‌شناسی مطابقت نداشته باشد، می‌تواند به‌عنوان پاسخ رودخانه به زمین‌ساخت فعال محسوب شود. مقادیر عددی شاخص گرادیان رودخانه زمانی که سنگ‌های بستر رودخانه مقاوم باشند و یا در مناطقی که حرکات تکتونیکی فعال در تغییر شکل قائم پسته زمین مؤثر باشند، زیاد بوده و بنابراین مقادیر زیاد SL در سنگ‌های دارای مقاومت کم و یا در سنگ‌های از لحاظ مقاومتی یکسان، می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان باشد (Keller 2002, Keller & Pinter, & Pinter). مقادیر عددی کوچک این شاخص نیز یا مبین وجود سنگ‌های رسوبی نرم و فراوان بوده و یا در اثر خردشدگی زیاد سنگ‌های منطقه بر اثر حرکات افقی گسل‌های امتدادلغز به وجود آمده است. این شاخص به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L$ که در آن شاخص گرادیان رودخانه و $\Delta H / \Delta L$ گرادیان محلی رودخانه و L طول کانال رودخانه از خط تقسیم آبراهه تا مرکز بخشی که

قطعه گسلی راوند کمتر بوده و این بخش از فعالیت تکتونیکی بیشتری برخوردار می‌باشد.

شاخص نسبت پهنای دره به عمق (V_f)

با به دست آوردن مقادیر عددی شاخص V_f برای قسمت‌های نزدیک‌تر دره به جبهه کوهستان می‌توان در مورد فعال بودن جبهه کوهستان (تشکیل دره‌های V شکل در پاسخ به حرکات قائم و جوان) و یا عدم فعالیت و ثبات پوسته در جبهه کوهستان (حاکم بودن فرسایش جانبی با مقادیر عددی V_f بزرگ) قضاوت نمود (Keller & Pinter, 2002). در گستره مورد مطالعه شاخص V_f برای هشت دره نزدیک به جبهه کوهستان در امتداد سامانه گسلی قم- زفره، محاسبه شده است. این شاخص به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$V_f = 2 \times V_{fw} / ((E_{Id} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc}))$$

آن V_{fw} : عرض بستر دره، E_{Id} : ارتفاع دیواره سمت چپ دره، E_{rd} : ارتفاع دیواره سمت راست دره و E_{sc} ارتفاع بستر دره می‌باشد (طرف چپ و راست دره با نگاه به پایین رود (Down stream) تعیین می‌شود). دو مقطع AA' و BB' به ترتیب در راستای بخشی از گسل راوند و فین بر روی نقشه‌های توپوگرافی ترسیم شده (شکل ۸) و نمودارهای شماتیک حاصل از آن‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. مقادیر V_{fw} ، E_{Id} ، E_{rd} و E_{sc} از نمودارهای مذکور قرائت شده و شاخص V_f برای این دو بخش از سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده است. در این محدوده‌ها شاخص V_f بین ۱/۲ تا ۷/۲ تغییر می‌کند. برای قطعه راوند، مقادیر شاخص V_f به دست آمده برای دره‌های دوم، سوم و چهارم، بیشتر از ۳/۵ بوده و برای اولین دره، ۱/۸ می‌باشد. میانگین شاخص V_f برای این ۴ دره ۳/۴۵ است. در قطعه کاشان شاخص V_f محاسبه شده برای سه دره اول، سوم و چهارم، همگی کمتر از ۱/۵ و برای دره دوم، ۷/۲ می‌باشد. میانگین شاخص V_f برای دره‌های متقاطع با مقطع BB'، ۲/۸ می‌باشد. پس با محاسبه شاخص V_f نیز می‌توان نتیجه گرفت که فعالیت تکتونیکی قطعه گسلی کاشان بیشتر از

گرادیان آن محاسبه شده است.

در نیمرخ طولی رودخانه، چنانچه H برابر با ارتفاع و L برابر با درازای افقی آبراهه از خط تقسیم حوضه آبریز باشد، آن گاه: $H=C-K \ln(L)$ که در رابطه فوق، C برابر با یک مقدار ثابت و K برابر با شیب خط می باشد (Hack, 1973). مشتق این معادله با تأکید بر L ، شیب حقیقی رودخانه را به دست می دهد.

$S=dH/d, L=d(K \ln(L))/d, L=K/L$ شیب نمودار Hack برابر است با $S.L$. شاخص گرادیان (K) یا شیب نیمرخ ایده آل از طریق رابطه $K=(H_i - H_j)/(L_j - L_i)$ به دست می آید که در آن I و J دو نقطه در امتداد رودخانه هستند. برای رودخانه های متعادل، نمودار نیمه لگاریتمی نیمرخ طولی، یک خط تقریباً مستقیم خواهد بود. از شاخص شیب رودخانه به منظور مقایسه میان چندین حوضه و یا شناسایی ناهنجاری ها در امتداد یک حوضه استفاده می شود. چنانچه یک رودخانه از ناحیه ای با جنبش زمین ساختی زیاد مانند یک پهنه گسلی عبور نماید، نمودار Hack آن محدب خواهد بود و این تحدب با حرکات ساختارهای پویا مطابق است.

در گستره مورد مطالعه شاخص SL برای چهار رودخانه متقاطع با سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده است. بدین منظور هر رودخانه به بخش های (Segments) مجزایی تقسیم شده است (شکل ۱۰). این بخش ها به گونه ای انتخاب شده که قسمتی از هر رودخانه دشت و قسمتی از آن نیز ارتفاعات را دربرمی گیرد تا بتوان تغییرات مقادیر شاخص SL را با گذر از جبهه کوهستان و وارد شدن به دشت، بررسی نمود. چهار حوضه مورد نظر از شمال به جنوب منطقه به ترتیب عبارتند از: حوضه بارونق، جزه، قمصر و قهرود. بررسی ها نشان می دهد میزان آشفتگی در نیمرخ رودخانه حوضه های بارونق، قهرود، قمصر و جزه به ترتیب افزایش یافته است. این آشفتگی به ویژه زمانی که با اختلافات سنگ شناسی مطابقت نداشته باشد، می تواند به عنوان

پاسخ رودخانه به زمین ساخت فعال شده محسوب شود. تاکنون محاسبه شاخص های S_{mf} و V_f نیز روند افزایشی مشابهی را در نرخ فعالیت تکتونیکی چهار حوضه مورد نظر نشان داده است. جهت حصول اطمینان و بررسی دقیق تر این آشفتگی ها در طول نیمرخ طولی رودخانه ها در بررسی های سنگ شناسی در کنار سایر شواهد مورفوتکتونیکی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مقایسه تحدب این نمودارها با یکدیگر می توان از مشتق دوم معادله مربوط به خط برازش این منحنی ها استفاده کرد. تحدب این نمودارها به ترتیب در حوضه های قهرود، قمصر، بارونق و جزه کاهش می یابد (شکل های ۱۱ و ۱۲). تحدب بیشتر منحنی در حوضه قهرود مشاهده شده که مبین فعالیت تکتونیکی شدیدتر و تحدب کمتر این منحنی در حوضه جزه مبین فعالیت تکتونیکی کمتر می باشد. میانگین شاخص SL به دست آمده برای حوضه های بارونق، جزه، قمصر و قهرود به ترتیب عبارت است از: ۸۷۶/۳۶، ۴۶۲/۰۲، ۱۱۰۴/۸۶، ۹۲۶/۳ که این مقادیر به ترتیب در حوضه های جزه، بارونق، قهرود و قمصر افزایش یافته است. شواهد موجود نشان دهنده وجود سنگ هایی تقریباً سست در امتداد مسیر این رودخانه (در طول بخش هایی که شاخص SL برای آن ها محاسبه شده است) می باشد. بیشترین مقدار شاخص SL در این حوضه مربوط به بخش ۱ است. علی رغم وجود سنگ های سست در این محدوده و مقاومت فرسایشی کم آن ها، تأثیر پهنه گسلی راوند در این قطعه باعث افزایش گرادیان شیب رودخانه شده است. کمترین مقدار شاخص SL در این حوضه مربوط به قطعه شماره ۵ می باشد. احتمالاً تأثیر گسل ها و خردشدگی ناشی از آن ها باعث ایجاد منطقه ای با مقاومت مکانیکی کمتر و در نتیجه حساس تر نسبت به فرایند فرسایش شده و عامل سنگ شناسی این منطقه (شیل و آهک شیلی، کنگلومرا)، نیز بر دلایل کاهش مقدار SL می افزاید.

مقدار SL نیز همراه بوده است. بدین معنی که در بخش‌هایی از رودخانه که مقدار درصد شیب در نوسان است، شاخص SL نسبت به بخش‌هایی که نمودار درصد شیب از آشفستگی کمتری برخوردار است، افزایش می‌یابد. نمودار درصد شیب به فاصله در حوضه جزء نسبت به سایر نمودارها از آشفستگی کمتری برخوردار است. در نمودارهای درصد شیب به فاصله، تغییرات درصد شیب رودخانه درآبرفت‌ها (دشت) را می‌توان به وجود عوامل محلی مانند آبراه‌های فرعی و یا تغییر مسیر آبراه و عواملی از این قبیل نسبت داد.

در این محل‌ها معمولاً مقدار SL نیز افزایش یافته است. به طور کلی مناطق و جبهه‌های کوهستان دارای مقادیر عددی کم برای شاخص‌های Smf و Vf و مقادیر عددی زیاد برای شاخص SL، مناطقی فعال از لحاظ تکتونیک بوده و این موضوع حاکی از وجود فرایش فعال در آن‌هاست.

بحث و نتیجه‌گیری

تغییر نرخ تنش وارده در اثر دگر شکلی پیش‌رونده و تغییرات چینه‌سنگی در طول گسل قم- زفره باعث تغییر ویژگی‌های گسل، نظیر تغییر در سازوکار، امتداد صفحه گسلی و شیب آن و همچنین میزان جابجایی شده است. در امتداد این سیستم گسلی، در مناطق مختلف، رژیم برپایی متفاوتی حاکم بوده و پاسخ زمین‌منظرها به فرایش فعال در هر منطقه متفاوت می‌باشد. به‌طور کلی گسل قم- زفره نیز مانند سایر گسل‌های ناحیه دارای ساز و کار چیره راست‌الغز راست‌گرد به همراه مولفه معکوس است. ولی در هر حال همواره جابجایی افقی در طول گسل قم- زفره به جابجایی قائم غلبه دارد. درجه فعالیت تکتونیک در حوضه جزء نسبت به دیگر حوضه‌ها کمتر می‌باشد. از نظر درجه فعالیت تکتونیک حوضه بارونق بعد از جزء رده‌بندی شده و فرایش فعال در آن نسبت به حوضه جزء بیشتر است. دو حوضه قمصر و قهرود نیز تقریباً در یک رده قرار گرفته و درجه فعالیت تکتونیک در آن‌ها نسبت

در حوضه جزء بیش‌ترین مقدار SL مربوط به قطعه ۷ می‌باشد که دلیل آن تأثیر سنگ بستر آذرین و مقاومت مکانیکی بیشتر آن نسبت به عمل حفر رودخانه است.

در قطعات ۵ و ۶، به دلیل گسترش لیتولوژی شیل، آهک و کنگلومرا و همچنین تأثیر گسل‌های محلی و خردشدگی ناشی از آن‌ها، مقدار SL کاهش یافته است. با وجود تأثیر گسل کاشان در قطعه شماره ۴، شاخص SL در آن افزایش قابل توجهی نداشته و چینی حالتی مبین فعالیت کمتر این حوضه نسبت به سایر حوضه‌هاست. در سایر حوضه‌ها می‌توان مقادیر شاخص SL بیشتری را در قطعاتی که گسل قم- زفره در آن‌ها تأثیر داشته، مشاهده نمود. در شکل ۱۲، بیش‌ترین مقادیر شاخص SL محاسبه شده متعلق به حوضه قمصر می‌باشد. در این حوضه بیش‌ترین مقدار SL در قطعه ۵ محاسبه شده است که می‌تواند در نتیجه تأثیر لیتولوژی سنگ‌های سخت ائوسن (سنگ آذرین ائوسن) و یا ناشی از تأثیر گسل‌های محلی باشد. در حوضه قهرود نیز مقادیر شاخص SL محاسبه شده نشان دهنده حاکمیت تکتونیک فعال در منطقه است. جهت نمایش بهتر تغییرات ناشی از پهنه‌های گسلی در مقدار شیب رودخانه، نمودار درصد شیب رودخانه به فاصله برای ۴ رودخانه مورد نظر رسم شده است. طول رودخانه برای هر ۴ حوضه ثابت در نظر گرفته شده است. مقادیر شاخص SL محاسبه شده در هر بخش نیز جهت تطابق بهتر در بالای هر نمودار نمایش داده شده است (شکل ۱۲ و ۱۳). آشفستگی نمودار و تغییرات شدید درصد شیب اغلب در محل پهنه‌های گسلی و یا بخش‌هایی که دست‌خوش تغییر لیتولوژی قابل توجهی شده‌اند، مشاهده می‌شود. در نمودارهای فاصله به درصد شیب (شکل ۱۳)، تغییرات درصد شیب را می‌توان به‌طور مشخصی در محل گسل‌ها و همبری‌های سنگ‌شناسی مشاهده نمود. در این نمودارها مقادیر شاخص SL محاسبه شده در بخش‌های مختلف نیز نمایش داده شده است. می‌توان این‌گونه برداشت کرد که تغییرات درصد شیب در طول رودخانه معمولاً با افزایش

de la Region Natanz-Nain- Surk (Iran Central), p. 316, Thesis, Grenoble.

– Bull, W. B., (1978). Geomorphic tectonic classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California. U.S. Geological Survey Contract Report 14-08-001-G-394. Menlo Park, CA: Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering.

– Hack, J. T., (1973). Stream profile analysis and stream-gradient index, J. Res. U.S. Geol. Surv., 1(4), 421–429.

– Hessami, K. T. and F. Jamali H., (1997). An Investigation of some historical earthquakes and paleoseismic sources in Iran. In historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus, D. Giardini and S. Balasarian (eds.), Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, p 189-199.

– Keller, E.A. and Pinter, N. (2002). Active Tectonics: Earthquake, Uplift and Landscape, Prentice Hall Publication, London.

– Leopold, L. B., and T. Maddock Jr., (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 252, 57 pp.

– Nadji, M., (1972). Geologie und hydrogeologie de gebietes von Kashan/Iran. Geol. Mitt., 11, 275-362.

– Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ghafory-Ashtiany, M., Bayer, R., Tavakoli, E., and Chéry, J. (2004). “Present-Day Crustal Deformation and Plate Kinematics in Middle East Constrained by GPS Measurements in Iran and Northern Oman”, Geophysical J. International, 157, 381–398.

به دو حوضه دیگر بیشتر است.

منابع

– آفاقی، آ.، سالک، م.، شرکت ملی نفت ایران، نقشه زمین‌شناسی شمال مرکز ایران، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰.

– احمدی کمیجانی، ن.، (۱۳۸۱). بررسی ریخت زمین ساخت و نوزمین ساخت در گستره جنوبی شهر کاشان، پایان نامه کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.

– پروهان، ن.، (۱۳۸۱)، تحلیل دگرریختی گسل قم-زفره (محدوده کاشان- اردستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

– جمالی، ف.، حسامی آذر، خ.، طبسی، ه.، (۱۳۸۶)، زمین ساخت جنبا در ناحیه نظرن، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ژورنال زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال هشتم، شماره دوم، صفحات ۵۱ تا ۵۸.

– جمالی، ف.، حسامی. خ.، قرشی. م.، (در دست چاپ)، گسلش جنبا و قطعه‌بندی پهنه گسلی قم-زفره در گستره میان زفره تا شمال کاشان، نشریه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.

– رادفر، ج.، نقشه زمین‌شناسی کاشان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.

– محجل، م.، پروهان، ن.، (۱۳۸۴)، هندسه و سینماتیک سامانه گسل قم-زفره و اهمیت آن در زمین ساخت ترافشاری، فصلنامه علوم زمین، سال دوازدهم، شماره ۵۶، صفحات ۷۲ تا ۸۳.

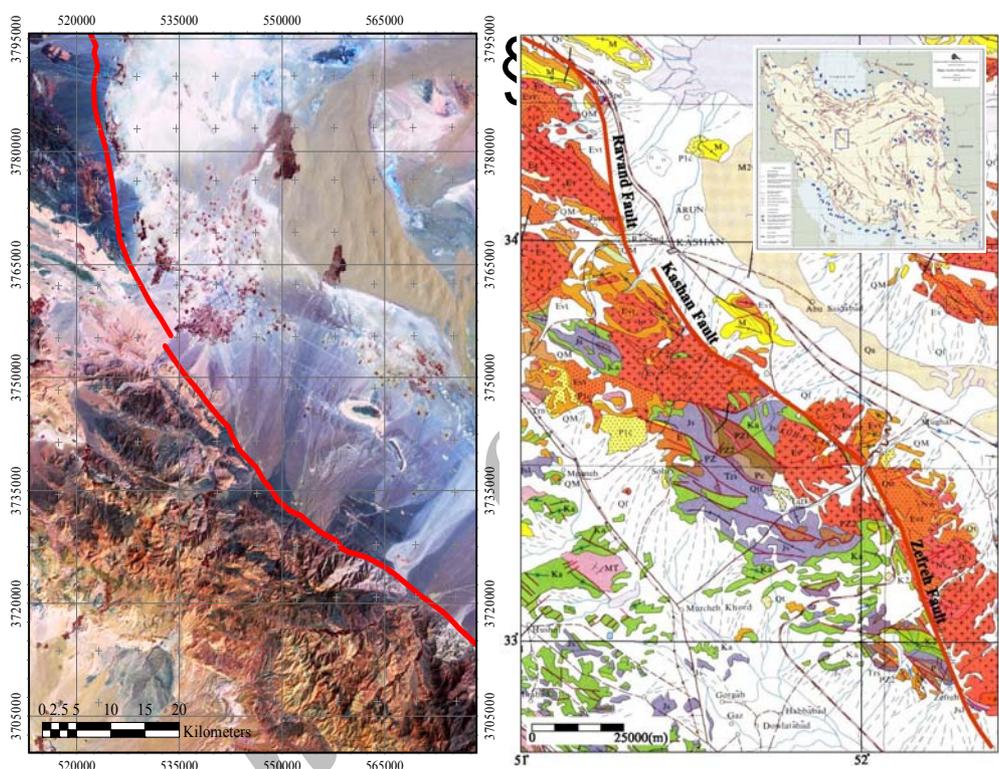
– مهندسین مشاور زمین آب پی، (۱۳۸۴)، مطالعات برآورد خطر زمین لرزه-گسلش در گستره چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان.

– نبوی، م.ح.، (۱۳۵۵)، دیباچه ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور.

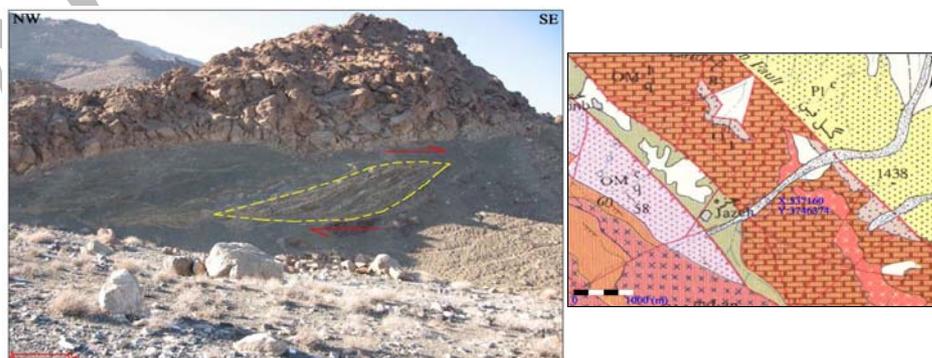
– Amidi, S.M., (1975). Contribution a Letude Stratigraphique Petrologique et Petrochimique des Roches Magmatiques

	1	2	3	4
V fw	100	100	70	150
E id	1240	1230	1200	1221
E rd	1250	1200	1220	1241
E sc	1189	1189	1190	1199
V f	1.8	3.8	3.5	4.7
	1	2	3	4
V fw	100	330	80	100
E id	1500	1510	1510	1530
E rd	1510	1510	1530	1570
E sc	1424	1464	1464	1484
V f	1.2	7.2	1.4	1.5

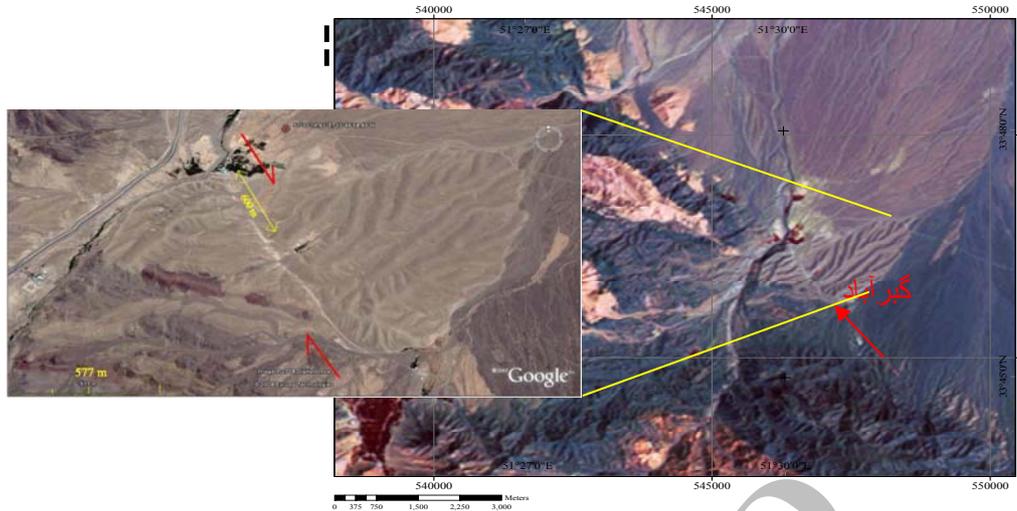
جدول ۱- پارامترهای به دست آمده و مقادیر شاخص Vf محاسبه شده در ۴ دره متقاطع با گسل راوند (جدول بالا) و کاشان (جدول پایین).



شکل ۱- قطعات گسلی راوند، کاشان و زفره در پهنه گسلی قم- زفره بر روی نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰,۰۰۰ شمال مرکزی ایران (سمت راست) و تصویر ماهواره ای Landsat ETM (سمت چپ).



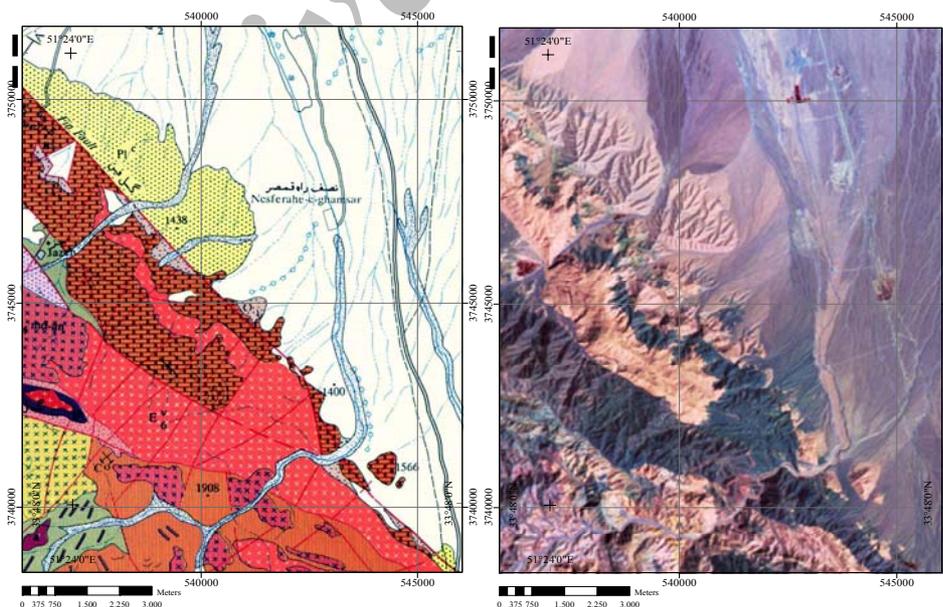
شکل ۲- پهنه برشی حاصل از جابجایی راست گرد گسل قم- زفره در نهشته های الیگومیوسن جنوب شرقی جزه به همراه موقعیت منطقه در نقشه زمین شناسی.



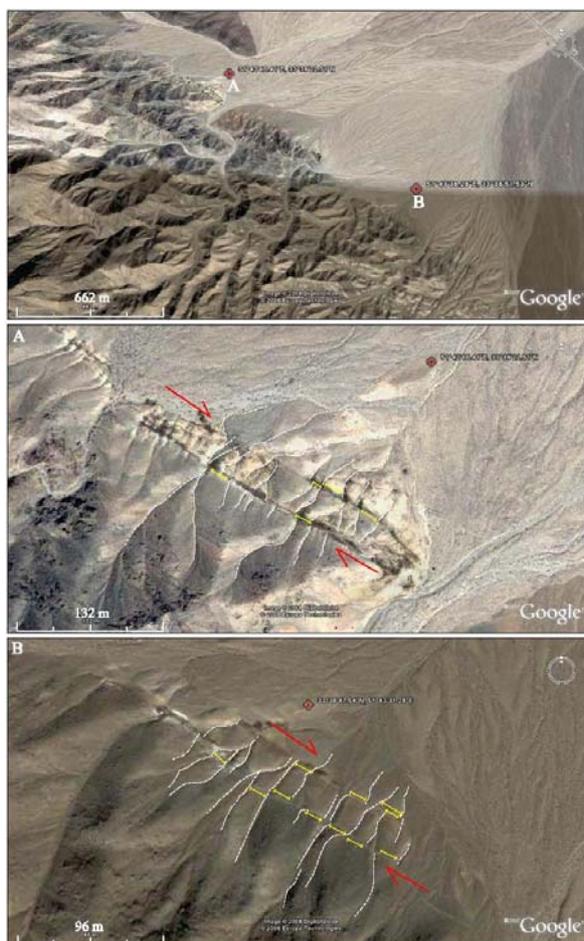
شکل ۳- تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده از Google earth از بادزن آبرفتی واقع در گستره گیرآباد و مجاور جاده کاشان - قمصر. راستای گسل کاشان با فلش قرمز رنگ و میزان جابجایی راستگرد در راستای گسل با رنگ زرد در شکل نشان داده شده است.



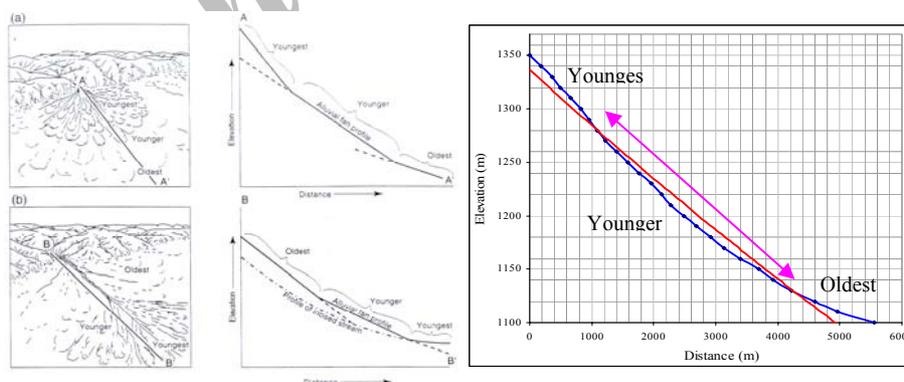
شکل ۴- مقطعی از پهنه گسلی قم- زفره در شمال غرب روستای هنجن و جابجایی قائم رسوبات جوان (عکس از جمالی).



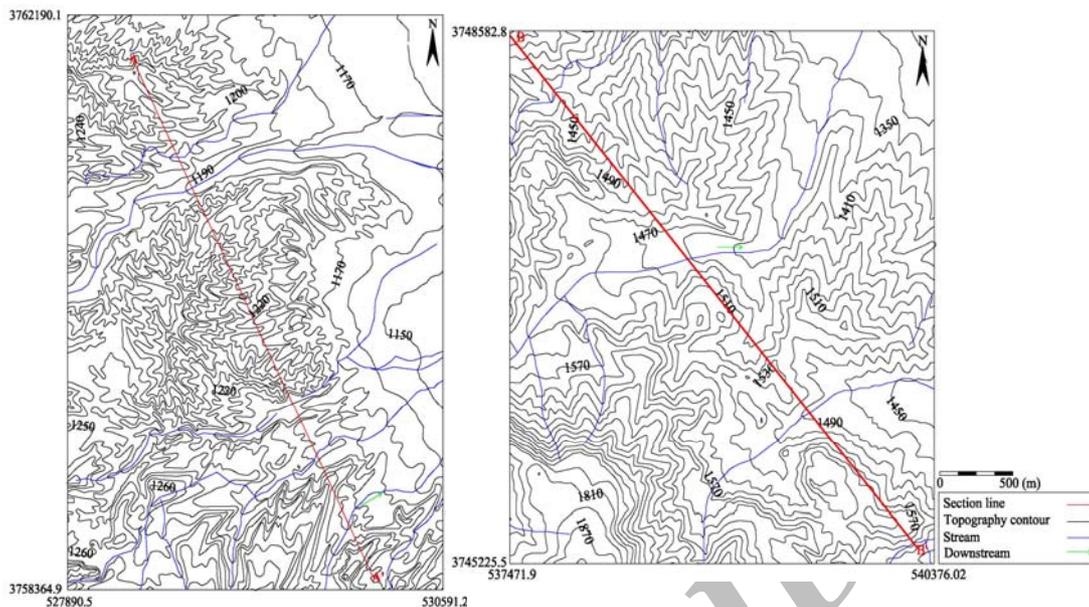
شکل ۵- نقشه زمین‌شناسی از شمال غرب گسل کاشان (شکل سمت چپ) و تصویر ماهواره‌ای همان شکل (شکل سمت راست). جابجایی و انحراف آبراه‌ها، مخروط‌افکنه‌های نزدیک به جبهه کوهستان و عدم تقارن آن‌ها در راستای گسل کاشان در تصویر مشخص می‌باشد.



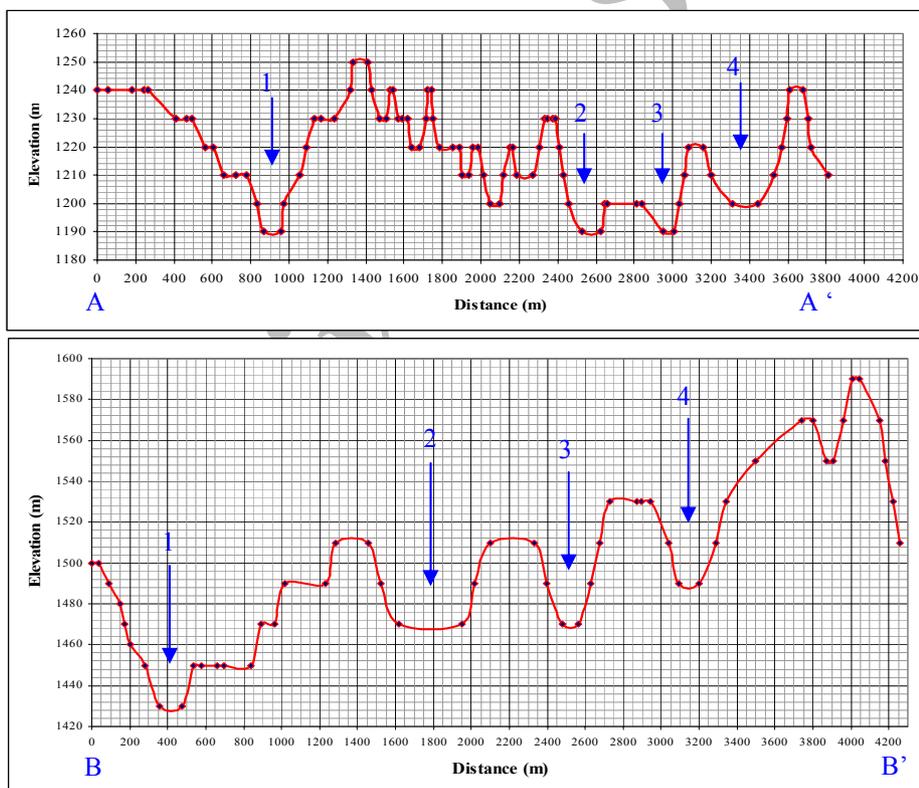
شکل ۶- تصاویر ماهواره ای دریافت شده از Google Earth در شمال غرب روستای هنجن در دو منطقه A و B. جابجایی راست‌گرد آبراهه‌ها در راستای دو شاخه گسلی در دو محل A و B در شکل مشخص می‌باشد. در امتداد برخی آبراهه‌ها به ویژه در تصویر B، می‌توان پدیده انفصال دروغین را مشاهده کرد.



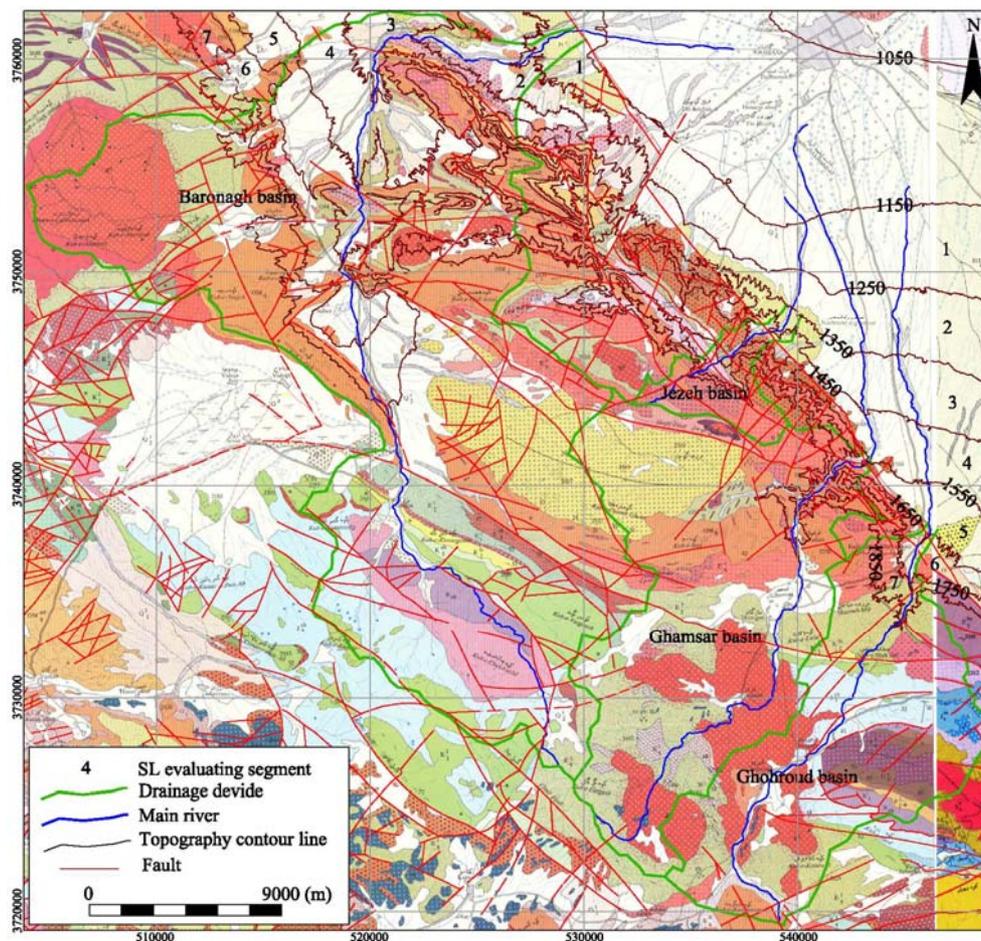
شکل ۷- مورفولوژی بادزن آبرفتی، در شکل a بخش‌های مختلف بادزن آبرفتی نزدیک به جبهه کوهستان بوده که نشان‌دهنده فرایش فعال می‌باشد. در شکل b جوان‌ترین بخش بادزن آبرفتی دور از جبهه کوهستان قرار داشته که نشان دهنده فرسایش سریع‌تر کوهستان نسبت به عمل فرایش می‌باشد (Bull, 1978). نمودار فاصله به ارتفاع برای بادزن آبرفتی در شمال غربی نصف راه قمصر (شکل سمت راست) جوان‌ترین بخش بادزن آبرفتی، نزدیک به جبهه کوهستان قرار داشته و طول بخش جوان مخروط‌افکنه نسبت به جوان‌ترین و قدیمی‌ترین بخش، بیش‌تر است که یکی از نشانه‌های فرایش فعال در منطقه می‌باشد.



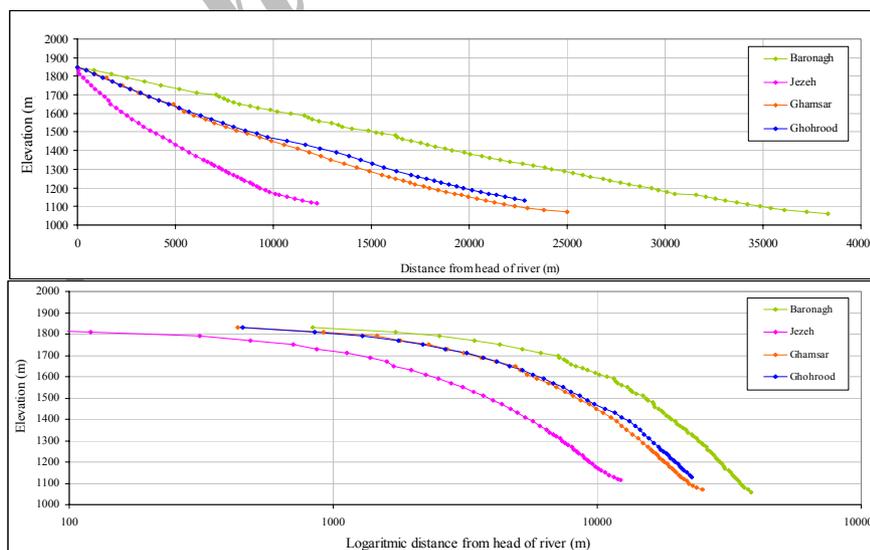
شکل ۸- مقطع AA' و BB' در نقشه توپوگرافی بخشی از جبهه کوهستان در راستای گسل کاشان و راوند



شکل ۹- نمودارهای فاصله به ارتفاع مقطع AA' و BB' در امتداد بخشی از جبهه کوهستان در راستای گسل کاشان و راوند.



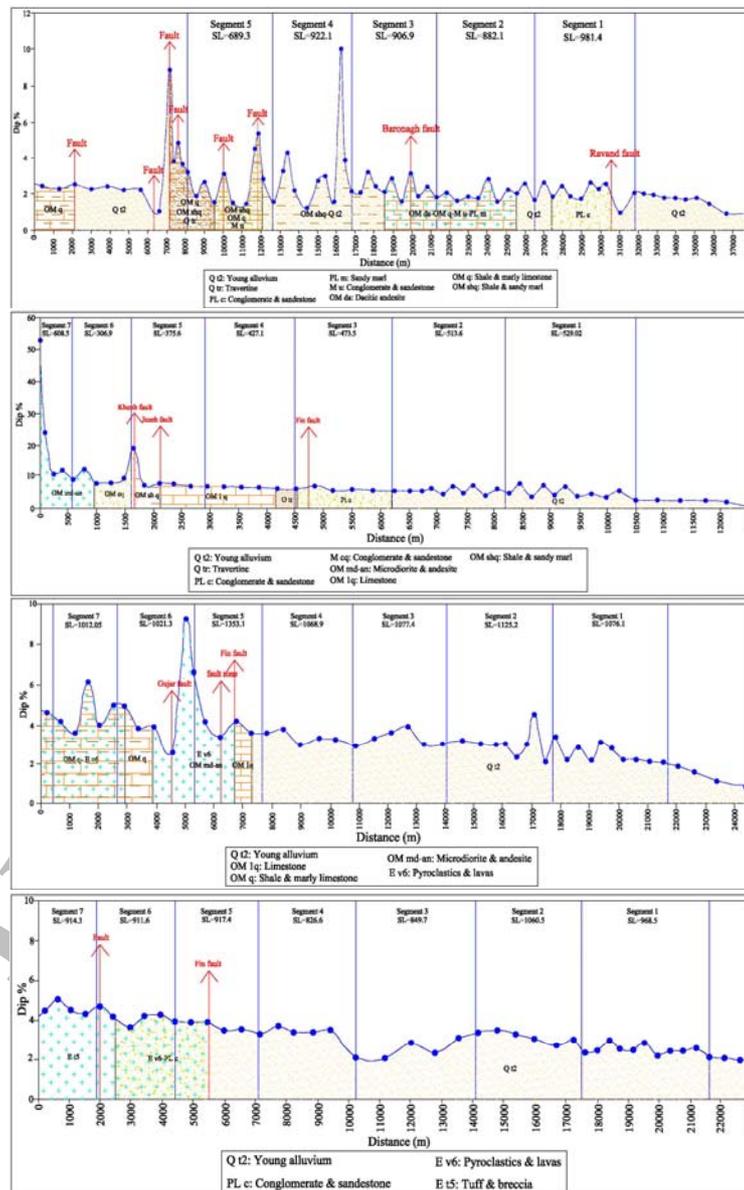
شکل ۱۰- نقشه موقعیت رودخانه‌های مورد نظر در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود و بخش‌های در نظر گرفته شده برای هر رودخانه جهت محاسبه شاخص SL در شکل نشان داده شده است. نقشه گسل‌ها و نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه جهت تطابق مقادیر به دست آمده شاخص SL با گسل‌ها و جنس سنگ‌ها در زمینه نقشه نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار فاصله به ارتفاع (شکل بالا) و نمودار نیمه لگاریتمی فاصله به ارتفاع برای ۴ رودخانه مورد مطالعه در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود (شکل پایین).

Basin	SL Index	SL Index	SL Index	SL Index	SL Index	SL Index	SL Index	Legend
	in 7 Segment	in 6 Segment	in 5 Segment	in 4 Segment	in 3 Segment	in 2 Segment	in 1 Segment	
Baronagh			689.3	922.1	906.9	882.1	981.4	Ghom-Zefreh F. Fault Alluvium Conglomerate
Jezeb	608.5	306.9	375.6	427.1	473.5	513.6	529.02	Carbonate
Ghamsar	1012.05	1021.3	1353.1	1068.9	1077.4	1125.2	1076.1	Shale and marl
Ghohroud	914.3	911.6	917.4	862.6	849.7	1060.5	968.5	Igneous

شکل ۱۲- مقادیر شاخص SL محاسبه شده برای ۴ رودخانه در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود همراه با تغییرات سنگ‌شناسی در هر قطعه و محل گسل‌ها.



شکل ۱۳- نمودارهای درصد شیب به فاصله برای ۴ رودخانه در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود، همراه با تغییرات سنگ‌شناسی در هر قطعه و محل گسل‌ها.