

## حرکات تکتونیکی فعال و جوان در گستره کاشان، سامانه گسلی قم- زفره

محمود الماسیان

گروه زمین شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

کریم روشن بخت

مهندسین مشاور پارس رای آب، تهران، ایران

منصوره توکلی زاده\*

گروه زمین شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

// : // :

## چکیده

**مقدمه:** سامانه گسلی قم- زفره به عنوان مهمترین ساختار اصلی و چیره در منطقه، وضعیت زمین شناسی و ساختاری منطقه را به شدت تحت تأثیر قرار داده و مطالعه و بررسی پیرامون این گسل فعال تأثیر به سزایی را در شناخت وضعیت تکتونیکی منطقه خواهد داشت.

**هدف:** در این نوشتار با بررسی برخی عوارض جوان زمین، فعالیت های نئوتکتونیکی و اثرات ثبت شده از این فعالیت ها در راستای سامانه گسلی قم- زفره، سعی شده تا نشانه ها و شواهدی پیرامون نرخ (Rate)، نوع و آرایش تغییر شکل های تکتونیکی شناسایی و به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار گیرند.

**روش بررسی:** با بررسی مقادیر شاخص های مورفوتکتونیکی ( $S_{mf}$ ،  $V_f$  و  $SL$ )<sup>۱</sup>، همراه با مقطع طولی رودخانه و تغییرات سنگ شناسی آن و تلفیق آن ها با سایر اطلاعات، میزان فعالیت تکتونیکی در حوضه های انتخابی بارونق، جزه، قمصر و قهرود محاسبه شده است.

**نتایج:** به کمک این بررسی ها نشان داده شده که این سامانه گسلی از یک سازوکار راستالغز راست گرد

\* m.tavakolizade@gmail.com :

<sup>1</sup>- Mountain front sinuosity index<sup>2</sup>-valley floor width to height ratio index<sup>3</sup>-stream-gradient index

همراه با یک مؤلفه معکوس برخوردار است. نرخ لغزش افقی در بخش مطالعه شده از گسل قم- زفره، به طور میانگین ۲/۶ میلی متر در سال برآورد شده است. درجه فعالیت تکتونیکی در حوضه جزه نسبت به دیگر حوضه‌ها کمتر و در دو حوضه قمصر و قهرود نیز تقریباً در یک رده و نسبت به دو حوضه دیگر بیشتر است.

**نتیجه‌گیری:** بررسی‌های مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی ابزار بسیار مناسبی جهت بررسی و مقایسه وضعیت تکتونیکی منطقه به صورت کمی و کیفی بوده و نتایج حاصل از آن‌ها به صورت کاربردی قابل استفاده خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** تکتونیک فعال، نئوتکتونیک، سامانه گسلی قم- زفره، شاخص مورفوتکتونیکی

#### مقدمه

سامانه گسلی قم- زفره به عنوان یک سرچشمه لرزه‌ای، تاکنون باعث رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگری در ناحیه شده است. از شواهد 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 زمین‌ریخت‌شناسی می‌تواند برای شناسایی مناطق پویا از نظر زمین‌ساختی و مناطقی که در گذشته دارای فعالیت بیشتری بوده‌اند به کار رود.<sup>(۱)</sup>

#### زمین‌شناسی و زمین‌ساخت عمومی

گستره 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. بازتاب حرکات زمین‌ساختی در این گستره، به صورت چین‌خوردگی‌های مشخص و گسل‌های متعدد در امتداد روندهای ساختمانی است.

از دیدگاه چینه‌شناسی واحدهای رخنمون یافته در ناحیه شامل واحدهای 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 نظنز 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.<sup>(۳)</sup> این پهنه گسلی برای نخستین بار توسط نبوی،<sup>(۴)</sup> به عنوان یک گسل امتدادلغز راست‌گرد و در امتداد گسل شمال تبریز معرفی شده است.



به این منظور در کنار مطالعات کیفی، شاخص‌های مورفوتکتونیکی سینوسیتی جبهه کوهستان (Smf)، نسبت پهنای دره به عمق (Vf)، گرادیان رودخانه (SL) همراه با مقطع طولی رودخانه و تغییرات سنگ‌شناسی آن، در حوضه‌های باروتق، جزه، قمصر و قهرود، بررسی شده و براساس تغییرات آن‌ها درجه فعالیت تکتونیکی برای هر منطقه تعیین شده است.

همچنین با تفسیر برخی شواهد ریخت‌شناسی میزان جابه‌جایی افقی و قائم برای گسل تعیین شده است. در این بررسی‌ها از نقشه‌های توپوگرافی رومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان و آران، عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی کمک گرفته شده است.

## نتایج و بحث

### جابه‌جایی‌های افقی و قائم

سامانه گسلی قم- زفره در منطقه باعث به هم‌ریختگی عوارض ریخت‌شناختی، جابه‌جایی افقی و گاهی قائم نهشته‌های رسوبی، رودخانه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها گردیده و آثار فعالیت آن را می‌توان در قالب جابه‌جایی واحدهای رسوبی قدیمی و جوان مشاهده نمود. مقدار جابه‌جایی متفاوت عوارض زمین‌شناسی و زمین‌ریختی در راستای گسل قم زفره مبین تغییر میزان جنبش زمین‌ساختی در بخش‌های مختلف این گسل می‌باشد. بررسی‌های متعددی جهت تعیین میزان جابه‌جایی در امتداد گسل صورت گرفته است.

بررسی‌های انجام شده با استفاده از GPS، توسط ورنانت و همکاران<sup>(۱۰)</sup> برای تعیین جابه‌جایی‌های صفحه اوراسیا در محدوده کاشان (۵۱/۲۵۵ طول شرقی و ۳۴/۱۵۰ عرض شمالی)، نشان‌دهنده جابه‌جایی ۹/۸۹ میلی‌متر در سال به سمت شرق و ۱۰/۷۱ میلی‌متر در سال در جهت شمال است.

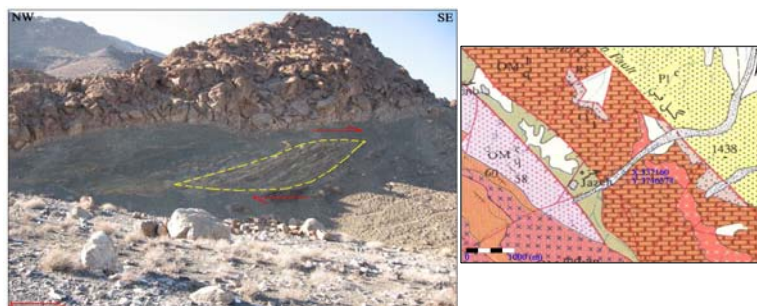
محجل و پروهان<sup>(۱۱)</sup> با بررسی مجموعه سنگ‌های به تله افتاده در قطعه گسلی نطنز، جابه‌جایی حدود ۲۰ کیلومتر برای این قطعه گسلی برشی شده در نظر گرفته‌اند.

عمیدی<sup>(۵)</sup> نشان داده که در طول گسل زفره آهک‌های کرتاسه حدود ۲ کیلومتر جابه‌جایی 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 می‌شود 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<sup>(۳)</sup> حداقل نرخ لغزش افقی را در شمال غرب روستای هنجن، حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند. جابه‌جایی‌های 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.

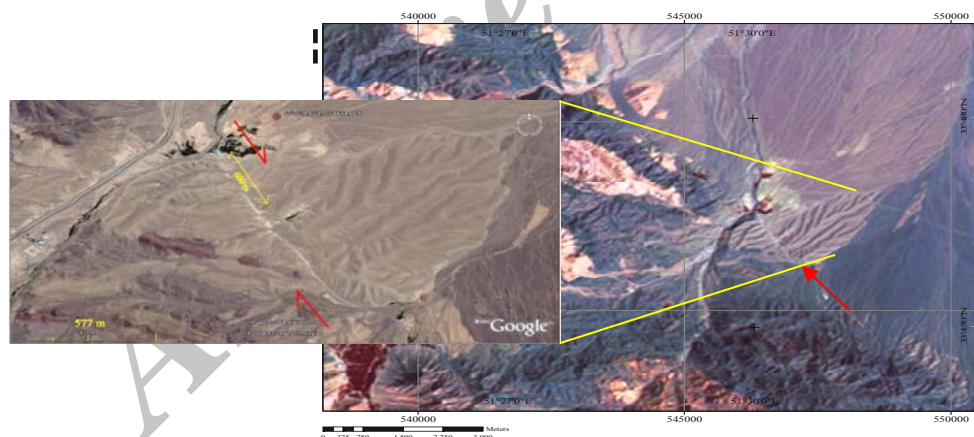
در جنوب شرقی روستای جزه، آثار جابه‌جایی‌های برشی و راست‌گرد گسل قم- زفره با اشکال بادامی و ابعاد قابل توجه در نهشته‌های الیگومیوسن مشاهده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- پهنه برشی حاصل از جابه‌جایی راست‌گرد گسل قم- زفره در نهشته‌های الیگومیوسن جنوب شرقی جزه (دید به سمت شمال شرقی) به همراه موقعیت منطقه در نقشه زمین‌شناسی کاشان<sup>(۱۱)</sup>

در این گستره شواهد ریخت‌زمین‌ساختی فراوانی شامل بریدگی و جابه‌جایی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌های منتهی به دشت‌ها وجود دارند که جابه‌جایی‌های امتدادلغز راست‌گرد و مورب لغز معکوس را برای گسل قم- زفره نشان می‌دهند.

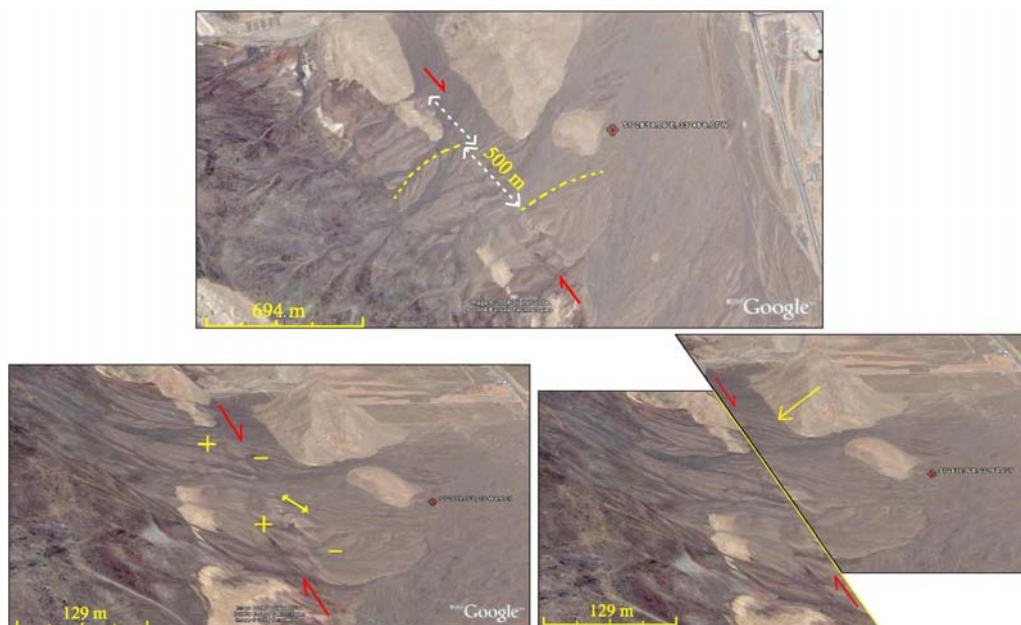
یکی از بارزترین عوارض ریخت‌شناختی در طول گسل کاشان، جابه‌جایی بادزن آبرفتی در مجاورت روستای گبرآباد است. این بادزن به‌وضوح حدود ۶۰۰ متر جابه‌جایی راست‌گرد را نشان می‌دهد (شکل ۳). با در نظر گرفتن سن پلیستوسن پایینی تا پلیستوسن بالایی برای این بادزن آبرفتی حداقل نرخ لغزش افقی در طول این بخش از گسل کاشان بین ۰/۷ تا ۴/۶ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود که میانگین آن ۲/۶ میلی‌متر در سال می‌باشد.



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

جمالی و همکاران،<sup>(۳)</sup> میانگین حداقل نرخ لغزش افقی را در طول این بخش از گسل قم - زفره بین ۲/۵ تا ۳ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند. کمی بالاتر از بادزن آبرفتی مذکور (به سمت شمال غربی)، بادزن‌های آبرفتی جوان‌تری مشاهده می‌شود که جابه‌جایی‌های افقی و قائم ناشی از حرکت راستالغز و معکوس گسل قم- زفره در آن‌ها به خوبی نمایان است.

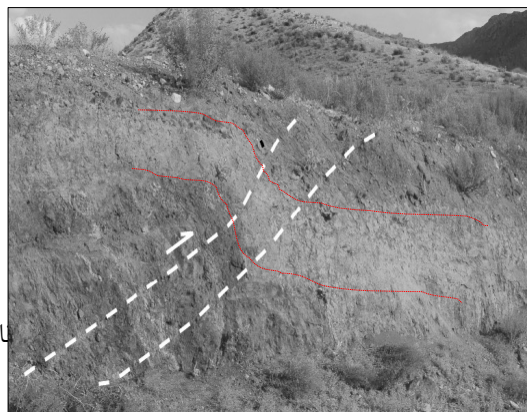
جابه‌جایی‌های مشاهده شده در این محل از یک سو گواهی است بر جنبه بودن گسل قم- زفره و از سوی دیگر نشانگر آن است که این پهنه گسلی با یک مؤلفه معکوس همراه گردیده است. شاهد بارز تکتونیک فعال در این محل، جابه‌جایی افقی در دو مخروط افکنه مجاور یکدیگر می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴- تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده از Google Earth در شمال غرب روستای گبرآباد. جابه‌جایی افقی و قائم ناشی از حرکت راست‌گرد و معکوس شاخه گسلی در بادزن‌های آبرفتی در شکل مشخص می‌باشد. علامت + در شکل نشان دهنده بالآمدگی و علامت - نشان دهنده افتادگی در بادزن آبرفتی است. اثر آبراهه‌ها و شیارهای سطحی را می‌توان در دو نیمه جابه‌جا شده بادزن‌های آبرفتی در تصویر بازسازی شده (سمت راست پایین) ردگیری نمود.

در این جابه‌جایی، بادزن آبرفتی بالایی، حدود ۵۰۰ متر در راستای گسل حرکت کرده و در مقابل نیمه دیگر بادزن آبرفتی پایینی قرار گرفته است. برای تجسم بهتر، می‌توان تصویر را بازسازی کرده و هندسه این بادزن‌های آبرفتی را قبل از ایجاد گسل مشاهده نمود. تطابق دقیق آبراهه‌ها و سایر زمین‌ریخت‌ها در محدوده چنین فرضیه‌ای را تأیید می‌نماید (شکل ۴).

با قبول چنین فرضیه‌ای و با در نظر گرفتن سن قاعده پلیستوسن بالایی برای این بادزن‌های آبرفتی (۱۳۰۰۰۰ سال)، نرخ لغزش افقی در این بخش از گسل قم- زفره، حدود ۳/۸ میلی‌متر در سال برآورد می‌گردد. جمالی و همکاران،<sup>(۳)</sup> نرخ جابه‌جایی قائم بر روی گسل معکوس در عمق را حدود ۰/۳ میلی‌متر در سال برآورد نموده‌اند (شکل ۵).



شکل ۵- مقطعی از پهنه گسلی  
لائم رسوبات جوان، دید به سمت شمال

افراز گسلی<sup>۱</sup> گسل راوند را می‌توان از حوالی روستای سن سن تا ۱۴ کیلومتری شمال کاشان و به طول تقریبی ۲۰ کیلومتر مشاهده نمود.<sup>(۸)</sup> ارتفاع نسبی این افرازه‌های گسلی از شرق به غرب به صورت پلکانی افزایش می‌یابد، به طوری که افراز سن سن به عنوان کم‌ارتفاع‌ترین و جوان‌ترین افراز بر حاشیه بادزن‌های 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 افزایش به ارتفاع تقریبی ۱ تا ۲ متر در نهشته‌های جوان آبرفتی حاشیه دشت قابل شناسایی است. با این وجود بازدیدهای صحرائی تنها بر فرایش بلوک غربی نسبت به بلوک شرقی دلالت داشته و تاکنون هیچ‌گونه آثاری از جابه‌جایی افقی عوارض مرفولوژیکی مشاهده نگردیده است.

#### نشانه‌های تکتونیکی فعال و جوان

در این ناحیه بررسی‌های ژئومورفولوژیکی ساخت‌های جوان همچون افرازه‌های گسلی، مورفولوژی جبهه کوهستان در راستای گسل قم- زفره، شکل مقطع طولی و عرضی دره‌های متقاطع نسبت به جبهه‌های کوهستان<sup>۲</sup>، شکل مقاطع طولی مخروط‌افکنه‌ها، آبراهه‌های قطع شده، جابه‌جاشدگی نهشته‌های کواترنر توسط گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها<sup>۳</sup> یا خمیدگی<sup>۴</sup> نهشته‌های جوان، شیب بستر رودخانه‌ها در مقطع طولی و وضعیت نهشتگی رسوبات جوان و مخروط‌افکنه‌ها، وجود چشمه‌های گسلی در منطقه و به‌ویژه در راستای گسل‌ها، همچنین رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگر تاریخی و معاصر در گستره و ... همگی در نگاه اول مبنی بر فعالیت تکتونیکی 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 مخروط‌افکنه‌های نزدیک به جبهه کوهستان به ویژه در امتداد گسل کاشان مبنی بر فعال بودن جبهه کوهستان و عدم تقارن شکل این مخروط‌افکنه‌ها (افزایش سطح شرقی نسبت به غربی در آن‌ها) راست‌گرد بودن گسل قم- زفره را در این بخش نشان می‌دهد.

<sup>1</sup>Fault scarp

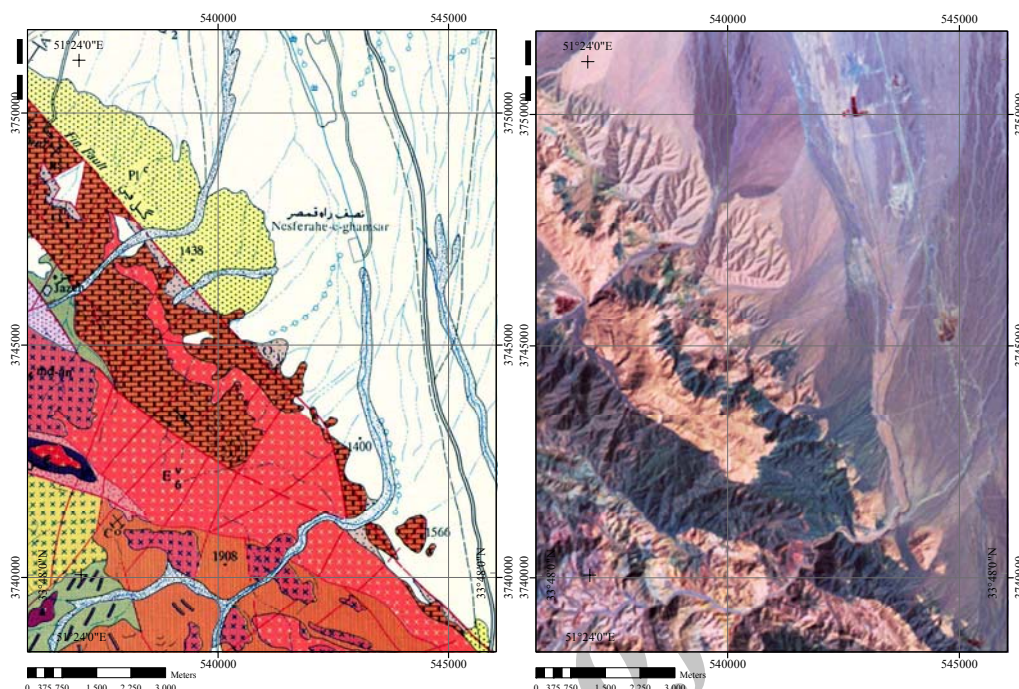
<sup>2</sup>Mountain front

<sup>3</sup>Foldings

<sup>4</sup>Tilting



در راستای گسل قم- زفره، شواهد زیادی نیز مبنی بر بریدگی و جابه‌جایی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌های منتهی به دشت‌ها وجود دارد که جابه‌جایی‌های امتدادلغز راست‌گرد و مورب لغز معکوس را برای حرکتهای جوان گسل قم- زفره نشان می‌دهد (شکل‌های ۴ و ۶).



شکل ۶- نقشه زمین‌شناسی از شمال غرب گسل کاشان<sup>(۱۱)</sup> (شکل سمت چپ) و تصویر ماهواره‌ای برگرفته از Google Earth از همان شکل (شکل سمت راست). جابه‌جایی و انحراف آبراهه‌ها، مخروط‌افکنه‌های نزدیک به جبهه کوهستان و عدم تقارن آن‌ها در راستای گسل کاشان در تصویر مشخص می‌باشد.

البته چند سانتی‌متر حرکت قائم در امتداد یک قطعه گسلی نیز می‌تواند آبراهه‌های کوچک را به طرفین منحرف کرده و ایجاد نوعی انفصال دروغین<sup>۱</sup> نماید (قرار گرفتن کانال پایین دست یک آبراهه در نزدیک کانال بالادست آبراهه‌های دیگر، شکل ۷).

انفصال در مسیر آبراهه‌ها، مخروط‌افکنه‌ها و حتی خمیدگی رودها در محل تقاطع با خط اثر گسل نشان می‌دهد در راستای گسل قم- زفره مقدار جابه‌جایی‌ها در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد.

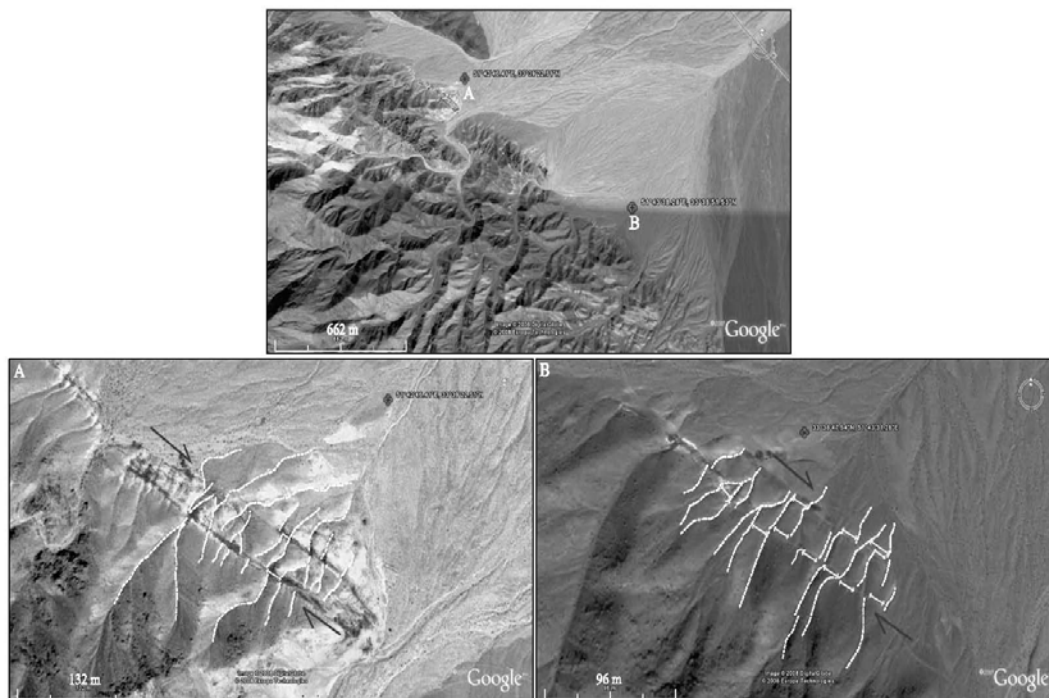
نمودار فاصله نسبت به ارتفاع برای یکی از بادزن‌های آبرفتی شکل ۶ (بادزن آبرفتی جنوب شرقی شکل ۶، واقع در شمال غربی روستای نصف راه قمصر)، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ ترسیم شده است. این نمودار شبیه به نمودار a در شکل ۸ بوده و دارای خصوصیات مخروط‌افکنه‌ها در مناطق فعال تکتونیکی است.

#### شاخص پیچ و خم جبهه کوهستان (smf)

این شاخص نشانگر توازن میان قدرت رودها و فرایندهای فرسایشی برای ایجاد یک جبهه کوهستان با شکلی نامنظم و حرکات تکتونیکی قائم و جوان جهت ایجاد جبهه کوهستان مستقیم می‌باشد. جبهه‌های کوهستانی که با فرایش فعال همراهند تقریباً شکلی مستقیم دارند.

<sup>1</sup>Is offset





شکل ۷- تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده از Google Earth در شمال غرب روستای هنجن در دو منطقه A و B. جابه‌جایی 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.

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 مناطقی دارای حرکات تکتونیکی فعال و جبهه‌های کوهستان دارای نرخ فرایش زیاد می‌باشند.<sup>(۹)</sup>

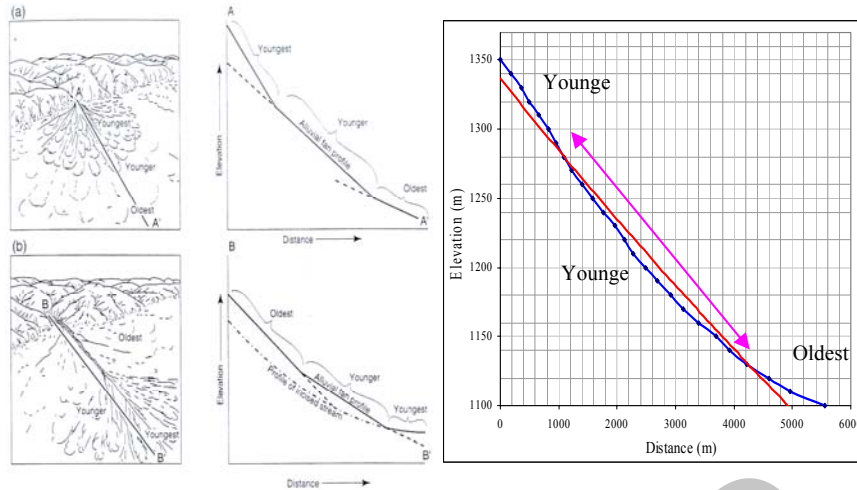
این شاخص به صورت  $S_{mf} = L_{mf}/L_s$  تعریف می‌گردد که در آن  $S_{mf}$  سینوسیتهی جبهه کوهستان،  $L_{mf}$  طول جبهه کوهستان در محل حد بین کوهستان و کوهپایه و  $L_s$  طول مستقیم جبهه کوهستان است. در این مطالعات شاخص سینوسیتهی جبهه کوهستان در امتداد دو قطعه از سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

بخش مورد مطالعه در قطعه گسلی راوند از حوالی سن سن تا فین کوچک و بخش مورد مطالعه در قطعه

گسلی کاشان از حوالی معدن دره تا تماغ در نظر گرفته شده است. برای قطعه گسلی راوند:

$$S_{mf} = 67655.33/36751.28 = 1.84 \quad \text{و} \quad S_{mf} = 53499.73/34463.48 = 1.55 \quad \text{کاشان:}$$

می‌باشد. با در نظر گرفتن معیارهای کلر و پیتر،<sup>(۱)</sup> برای 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 قطعه گسلی راوند کمتر بوده و این بخش از فعالیت تکتونیکی بیشتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۸- 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 نشان‌دهنده فرسایش سریع‌تر کوهستان نسبت به عمل فرایش می‌باشد.<sup>(۱۲)</sup> 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.

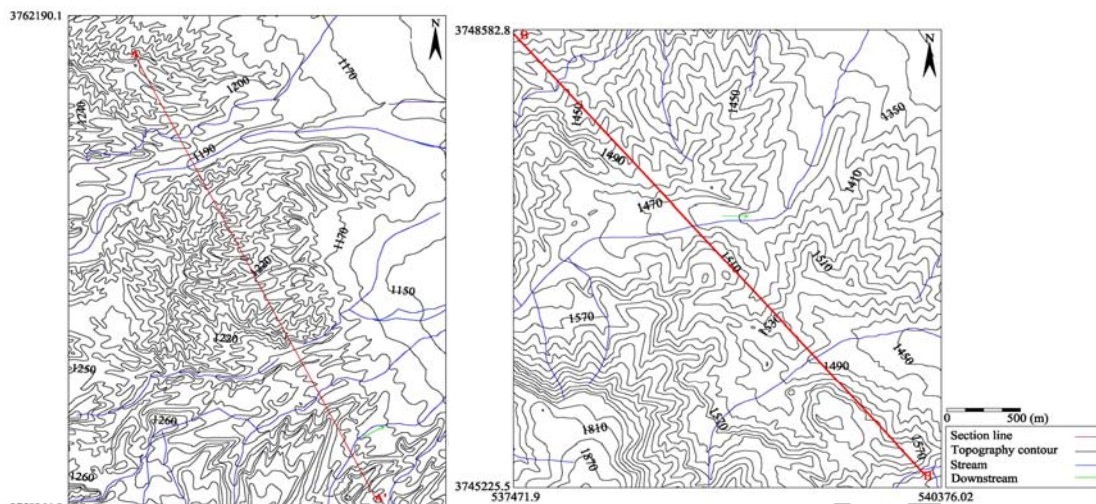
#### شاخص نسبت پهنای دره به عمق (Vf)

این شاخص به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:  $Vf = 2 \times Vfw / ((E_{Id} - E_{Sc}) + (E_{rd} - E_{sc}))$  که در آن  $Vfw$ : 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<sup>۱</sup> تعیین می‌شود). دو مقطع  $AA'$  و  $BB'$  به ترتیب در راستای بخشی از گسل راوند و فین بر روی نقشه‌های توپوگرافی ترسیم شده (شکل ۹) و نمودارهای شماتیک حاصل از آن‌ها در شکل ۱۰ ارائه شده است.

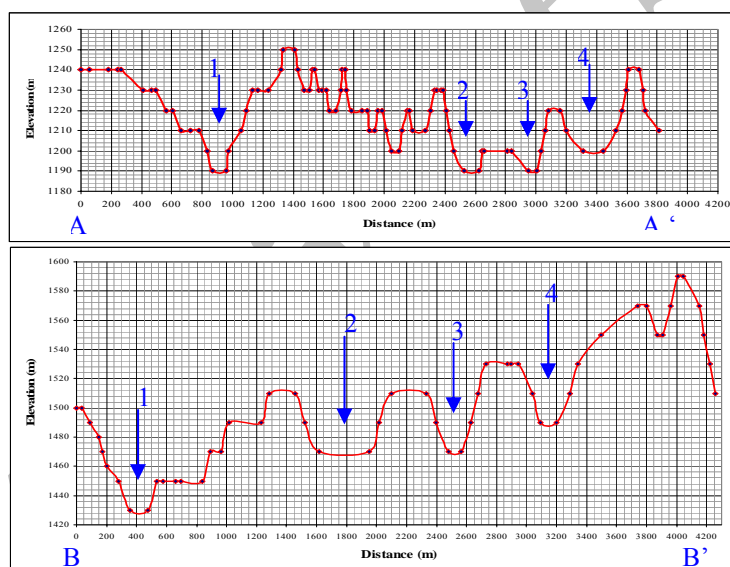
مقادیر  $Vfw$ ،  $E_{Id}$ ،  $E_{rd}$  و  $E_{Sc}$  از نمودارهای مذکور قرائت شده و شاخص  $Vf$  برای این دو بخش از سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده است. در این محدوده‌ها شاخص  $Vf$  بین  $1/2$  تا  $7/2$  تغییر می‌کند. برای قطعه راوند، مقادیر شاخص  $Vf$  به دست آمده برای دره‌های دوم، سوم و چهارم، بیشتر از  $3/5$  بوده و برای اولین دره،  $1/8$  می‌باشد.

میانگین شاخص  $Vf$  برای این ۴ دره  $3/45$  است. در قطعه کاشان شاخص  $Vf$  محاسبه شده برای سه دره اول، سوم و چهارم، همگی کمتر از  $1/5$  و برای دره دوم،  $7/2$  می‌باشد. میانگین شاخص  $Vf$  برای دره‌های متقاطع با مقطع  $BB'$ ،  $2/8$  می‌باشد. پس با محاسبه شاخص  $Vf$  نیز می‌توان نتیجه گرفت که فعالیت تکتونیکی قطعه گسلی کاشان بیشتر از راوند بوده و محاسبه مقادیر شاخص  $Vf$  کمتر از  $1/5$  برای این دره‌ها مبین فعالیت بیشتر این قطعه گسلی است (جدول ۱).

<sup>1</sup>Down stream



شکل ۹- مقطع AA' و BB' در نقشه توپوگرافی بخشی از جبهه کوهستان در راستای گسل کاشان و راوند.



شکل ۱۰- نمودارهای فاصله به ارتفاع مقطع AA' و BB' در امتداد بخشی از جبهه کوهستان در راستای گسل کاشان و راوند.

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)

	۱	۲	۳	۴
V fw	۱۰۰	۱۰۰	۷۰	۱۵۰
E id	۱۲۴۰	۱۲۳۰	۱۲۰۰	۱۲۲۱
E rd	۱۲۵۰	۱۲۰۰	۱۲۲۰	۱۲۴۱
E sc	۱۱۸۹	۱۱۸۹	۱۱۹۰	۱۱۹۹
V f	۱,۸	۳,۸	۳,۵	۴,۷

	۱	۲	۳	۴
V fw	۱۰۰	۳۳۰	۸۰	۱۰۰۰
E id	۱۵۰۰	۱۵۱۰	۱۵۱۰	۱۵۳۰
E rd	۱۵۱۰	۱۵۱۰	۱۵۳۰	۱۵۷۰
E sc	۱۴۲۴	۱۴۶۴	۱۴۶۴	۱۴۸۴
V f	۱,۲	۷,۲	۱,۴	۱,۵

#### شاخص گرادیان شیب رودخانه (SL)

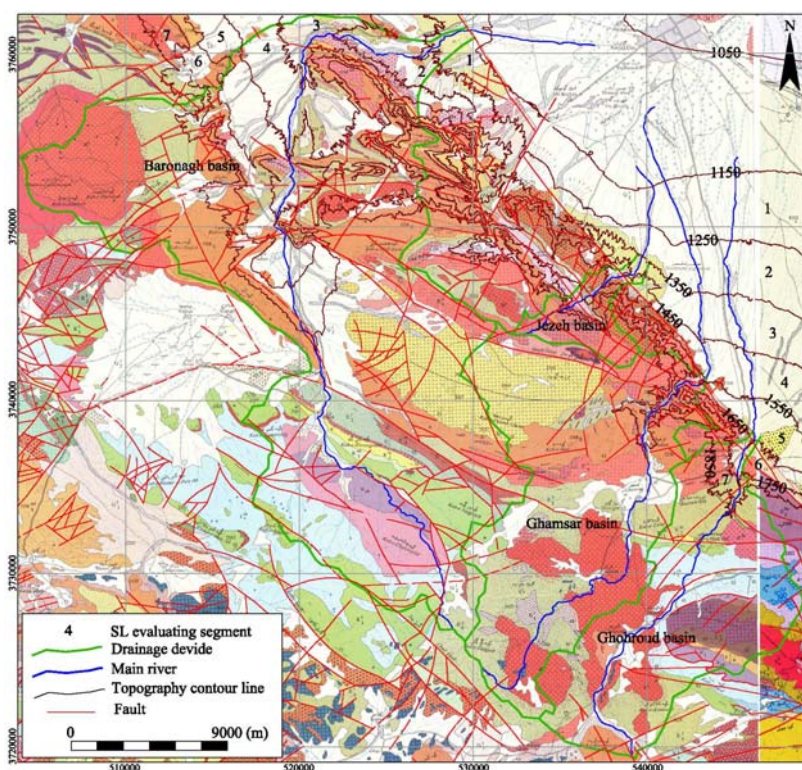
در این مطالعات برای تطابق بهتر و ایجاد تصور دقیق تری از وضعیت تکتونیکی منطقه، در طول ۴ رودخانه در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود، علاوه بر شاخص SL، نیمرخ طولی رودخانه و درصد شیب در طول آن‌ها محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است. شاخص شیب رودخانه به تغییرات قدرت رودخانه و شیب کانال حساس بوده و از آن برای ارزیابی روابط بین جنبش زمین‌ساختی، جنس سنگ و توپوگرافی استفاده می‌شود.<sup>(۱)</sup> 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.<sup>(۲)</sup> مقادیر عددی شاخص گرادیان رودخانه زمانی که سنگ‌های بستر رودخانه مقاوم باشند و یا در مناطقی که حرکات تکتونیکی فعال در تغییر شکل قائم پوسته 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.<sup>(۱)</sup>

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 SL شاخص گرادیان رودخانه و  $\Delta H / \Delta L$  گرادیان محلی رودخانه و L طول کانال رودخانه از خط تقسیم آبراهه تا مرکز بخشی که گرادیان آن محاسبه شده است.

در گستره مورد مطالعه شاخص SL برای چهار رودخانه متقاطع با سامانه گسلی قم- زفره محاسبه شده است. بدین منظور هر رودخانه به بخش‌های<sup>۱</sup> مجزایی تقسیم شده است (شکل ۱۱).

<sup>۱</sup> Segments

این بخش‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که قسمتی از هر رودخانه دشت و قسمتی از آن نیز ارتفاعات را دربر می‌گیرد تا بتوان تغییرات مقادیر شاخص SL را با گذر از جبهه کوهستان و وارد شدن به دشت، بررسی نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان آشفستگی در نیمرخ رودخانه حوضه‌های بارونق، قهرود، قمصر و جزه به ترتیب افزایش یافته است. این آشفستگی به ویژه زمانی که با اختلافات سنگ‌شناسی مطابقت نداشته باشد، می‌تواند به عنوان پاسخ رودخانه به زمین‌ساخت فعال شده محسوب شود.



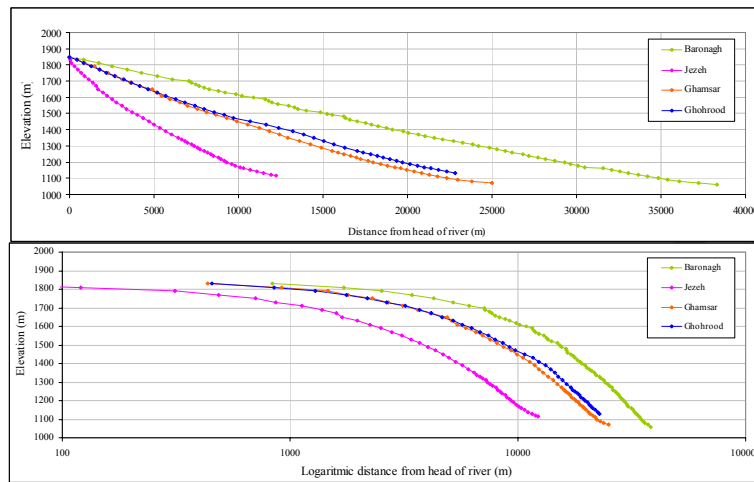
شکل ۱۱- نقشه موقعیت رودخانه‌های مورد نظر در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود و بخش‌های در نظر گرفته شده برای هر رودخانه جهت محاسبه شاخص SL در شکل نشان داده شده است. نقشه گسل‌ها و نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه جهت تطابق مقادیر به دست آمده شاخص SL با گسل‌ها و جنس سنگ‌ها در زمینه نقشه نشان داده شده است (۱۱)

تاکنون محاسبه شاخص‌های  $S_{mf}$  و  $V_f$  نیز روند افزایشی مشابهی را در نرخ فعالیت تکتونیکی چهار حوضه مورد نظر نشان داده است. جهت حصول اطمینان و بررسی دقیق‌تر این آشفستگی‌ها در طول نیمرخ طولی رودخانه‌ها در بررسی‌های سنگ‌شناسی در کنار سایر شواهد مورفوتکتونیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مقایسه تحذب این نمودارها با یکدیگر می‌توان از مشتق دوم معادله مربوط به خط برازش این منحنی‌ها استفاده کرد. تحذب این نمودارها به ترتیب در حوضه‌های قهرود، قمصر، بارونق و جزه کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). تحذب بیشتر منحنی در حوضه قهرود مشاهده شده که مبین فعالیت تکتونیکی شدیدتر و تحذب کمتر این منحنی در حوضه جزه مبین فعالیت تکتونیکی کمتر می‌باشد. میانگین شاخص SL به دست آمده برای حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود به ترتیب عبارت است از:  $۸۷۶/۳۶$ ،  $۶۶۲/۰۲$ ،  $۱۱۰۴/۸۶$ ،  $۹۲۶/۳$ ، که این مقادیر به ترتیب در حوضه‌های جزه، بارونق، قهرود و قمصر افزایش یافته است. شواهد موجود نشان دهنده وجود سنگ‌هایی



تقریباً سست در امتداد مسیر این رودخانه (در طول بخش‌هایی که شاخص SL برای آن‌ها محاسبه شده است) می‌باشد. بیشترین مقدار شاخص SL در این حوضه مربوط به بخش ۱ است. علی‌رغم وجود سنگ‌های سست در این محدوده و مقاومت فرسایشی کم آن‌ها، تأثیر زون گسلی راوند در این قطعه باعث افزایش گرا دیان شیب رودخانه شده است.

شکل ۱۲- الف- نمودار فاصله به ارتفاع و ب- نمودار نیمه‌لگاریتمی فاصله به ارتفاع برای ۴ رودخانه مورد مطالعه در حوضه‌های بارونق، جزه، قمصر و قهرود



الف-

ب-

Basin	SL Index in 7 Segment	SL Index in 6 Segment	SL Index in 5 Segment	SL Index in 4 Segment	SL Index in 3 Segment	SL Index in 2 Segment	SL Index in 1 Segment
Baronagh			689.3	922.1	906.9	882.1	981.4
Jezeh	608.5	306.9	375.6	427.1	473.5	513.6	529.02
Ghamsar	1012.05	1021.3	1353.1	1068.9	1077.4	1125.2	1076.1
Ghohroud	914.3	911.6	917.4	862.6	849.7	1060.5	968.5

شکل ۱۳- 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.

کمترین مقدار شاخص SL در این حوضه مربوط به قطعه شماره ۵ می‌باشد. احتمالاً تأثیر گسل‌ها و خردشدگی ناشی از آن‌ها باعث ایجاد منطقه‌ای با مقاومت مکانیکی کمتر و در نتیجه حساس‌تر نسبت به فرایند فرسایش شده و عامل سنگ‌شناسی این منطقه (شیل و آهک شیلی، کنگلومرا)، نیز بر دلایل کاهش مقدار SL می‌افزاید. در حوضه جزه 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.

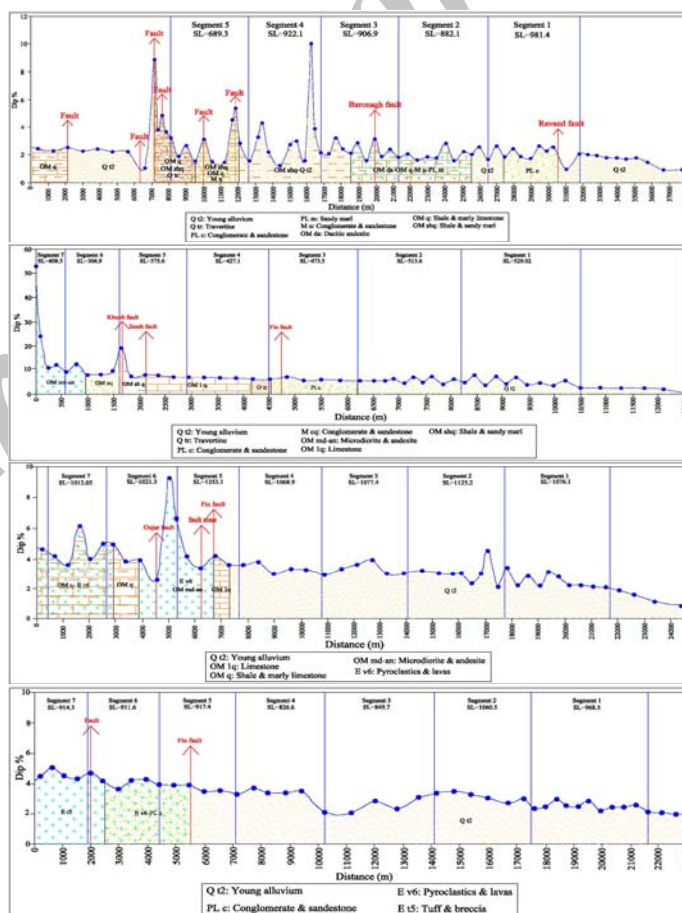


در شکل ۱۳، بیشترین مقادیر شاخص SL محاسبه شده متعلق به حوضه قمصر می‌باشد. در این حوضه بیشترین مقدار SL در قطعه ۵ محاسبه شده است که می‌تواند در نتیجه تأثیر لیتولوژی سنگ‌های سخت ائوسن (سنگ آذرین ائوسن) و یا ناشی از تأثیر گسل‌های محلی باشد. در حوضه قهرود نیز مقادیر شاخص SL محاسبه شده نشان دهنده حاکمیت تکتونیک فعال در منطقه است.

در نمودارهای فاصله به درصد شیب (شکل ۱۴)، تغییرات درصد شیب را می‌توان به طور مشخص در محل گسل‌ها و همبری‌های سنگ‌شناسی مشاهده نمود.

تغییرات درصد شیب در طول رودخانه معمولاً با افزایش 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 آشفته‌گی کمتری برخوردار است، افزایش می‌یابد. نمودار درصد شیب به فاصله در حوضه جزه نسبت به سایر نمودارها از آشفته‌گی کمتری برخوردار است.

مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آشفته‌گی نمودار و تغییرات شدید درصد شیب اغلب در محل پهنه‌های گسلی و یا بخش‌هایی که دست‌خوش تغییر لیتولوژی قابل توجهی شده‌اند، مشاهده می‌شود. به طور کلی مناطق و جبهه‌های کوهستان دارای مقادیر عددی کم برای شاخص‌های  $V_f$  و  $S_{mf}$  و مقادیر عددی زیاد برای شاخص SL، مناطقی فعال از لحاظ تکتونیک بوده و این موضوع حاکی از وجود فرایض فعال در آن‌هاست.



شکل ۱۴- 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.

## نتیجه گیری

تغییر نرخ تنش وارده در اثر دگرشکلی پیشرونده و تغییرات چینه‌سنگی در طول گسل قم- زفره باعث تغییر ویژگی‌های گسل نظیر سازوکار، امتداد صفحه گسلی و شیب آن و همچنین میزان جابه‌جایی شده است. در امتداد این سیستم گسلی، در مناطق مختلف، رژیم برپایی متفاوتی حاکم بوده و پاسخ زمین منظرها 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 جابه‌جایی افقی در طول گسل قم- زفره به جابه‌جایی قائم غلبه دارد. درجه فعالیت تکتونیکی در حوضه جزه نسبت به دیگر حوضه‌ها کمتر می‌باشد. از نظر درجه فعالیت تکتونیکی حوضه بارونق بعد از جزه رده‌بندی شده و فرایش فعال در آن نسبت به حوضه جزه بیشتر است. دو حوضه قمصر و قهرود نیز تقریباً در یک رده قرار گرفته و درجه فعالیت تکتونیکی در آن‌ها نسبت به دو حوضه دیگر بیشتر است.

## References:

1. Keller, E.A., and Pinter, N., *Active Tectonics: Earthquake, Uplift and Landscape*, Prentice Hall Publication, London (2002).
2. Afaghi, A., and Salek, M., *Geological Map of Iran Central North*, Scale 1:1000,000, NIOC, National Iranian Oil Company (1977).
3. Jamali H, F., Hessami A, K., and Ghoreishi, M., *Geosciences Magazine*, Geological Survey, Iran.
4. Nabavi, M.H., *Introduction of Iran Geology*, Geological Survey of Iran (1976).
5. Amidi, S.M., *Msc Thesis: Contribution a Letude Stratigraphique Petrologique et Petrochimique desoches Magmatiques de la Region Natanz-Nain- Surk (Iran Central)*, Grenoble (1975).
6. Nadji, M., *Geol. Mitt.*, **11**, 275 (1972).
7. Hack, J.T., *J. Res. U.S. Geol. Surv.*, **1(4)**, 421 (1973).
8. Hessami, K.T. and Jamali, H.F., *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 (1997).
9. Ahmadi, K.N., *M.Sc. Thesis: Consideration of Morphotectonic and Neotectonic in the South Kashan Area*, Geological Survey, Iran (2002).
10. Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ghafory-Ashtiany, M., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., *Geophysical J. International*, **157**, 381 (2004).
11. Radfar, J., *Map of Kashan Geology*, Scale:100,000, Geological Survey, Iran (1993).
12. Bull, W. B., *U.S. Geological Survey Contract Report 14-08-001-G-394*, Menlo Park, CA: Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering (1978).