

## معرفی شاخص های تکتونیکی نوین و موثر در استحصال آب باران

پیام ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، محسن محسنی ساروی<sup>۲</sup>، جمیله سلیمی کوچی<sup>۳</sup>

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

۲- استاد دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

Ebrahimi1393@ut.ac.ir



### چکیده

هر چند لندفرمها در بسیاری از مناطق دارای فعالیت های تکتونیکی می تواند حاصل ترکیب پیچیده ای از تأثیرات عوامل مختلف دینامیک درونی و بیرونی باشد، شاخص های ژئومرفیک در بررسی فعالیت های تکتونیکی، اعم از پالئوتکتونیک و نئوتکتونیک می تواند به عنوان ابزاری مفید و کارآمد استفاده شود، زیرا با استفاده از آنها می توان تغییرات سطوح استحصال آب باران را در سطح حوزه آبخیز، به آسانی شناسایی نمود. با مطالعه و بررسی لندفرم های توپوگرافی و الگوی سیستم های شبکه ی زهکشی با استفاده از شاخص های ژئومرفیک و با در نظر گرفتن ساختمان زمین شناسی هر منطقه، می توان سطوح و شیب موثر در جمع آوری آب باران را مشخص نمود. شواهد ژئومرفولوژیک، هم چون شاخص نسبت پهنای کف دره به عمق دره، شاخص نسبت، شاخص گرادیان طول رودخانه، شاخص عدم تقارن آبراهه ها در حوضه ی آبریز، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی، شاخص سینوسیته جبهه کوهستان، شاخص انتگرال هیپسومتری و شاخص وسعت منطقه، میزان سطوح موثر را به نمایش می گذارند. از این رو معرفی این شاخص های ژئومرفیک، اهمیت ویژه ای دارد که در بسیاری از پژوهش ها نادیده گرفته می شود. این پژوهش با معرفی شاخص های سایر محققان گامی نوین در محاسبات میزان دبی و شدت رواناب حاصل از آب باران در اختیار پژوهشگران قرار می دهد. کلید واژه ها: لندفرم، استحصال باران، شاخص، حوزه آبخیز، حرکات تکتونیک.

### Introducing new and effective tectonic indicators in rainwater harvesting

#### Abstract

Although Landforms in many areas with tectonic activities can be affected by complex combination of various factors internal and external dynamics, geomorphic indices are useful instruments in study of tectonic activities, such as paleotectonic and Neotectonic. Using these indicators can be easily identified changes in the levels of rain water harvesting in the watershed. With studying landforms and drainage network using geomorphic indicators and geologic structure in each region, it is possible to identify effective slopes and areas in rain harvesting. Geomorphologic evidence, such as valley floor width to valley height ratio (VF), stream-length gradient (SL), basin

asymmetry factor (AF), transverse Topography symmetry Factor, mountain front sinuosity index (SMF), hypsometric integral index (HI) and the area index, display the effective areas. Hence, introduction of these geomorphic indices has special important that ignored in many studies. This study by introducing exist indicators is a new step in computing the discharge and runoff intensity of rainwater and is available to researchers.

Keywords : Landform, Rain Water Harvesting, Index, Watershed, Tectonic movement.



## مقدمه

علم بررسی تکتونیک ژئومورفولوژی یکی از رشته‌های نو ظهور در علوم طبیعی است که با توجه به آن می‌توان اطلاعات بسیاری را در زمینه جمع‌آوری آب باران و در مجموع جنبه هیدرولوژی حوزه‌آبخیز به دست آورد. با استفاده از خصوصیات زمین‌شناسی و تکتونیک می‌توان نرخ بالا آمدگی پوسته زمین، میزان فرسایش، گسل‌ها، سطوح جمع‌آوری آب باران و شیب و سرعت نفوذ آب را تخمین زد. نتایجی که از این بررسی‌ها به دست می‌آید در زمینه مدیریت منابع طبیعی و مخاطرات محیطی نقش به‌سزایی داشته و در مناطقی که جمعیت بالایی دارند امکان‌سنجی استحصال آب باران را محیا می‌سازد (Dehbozorgi et al. 2010). علاوه بر آن با رویکرد میان رشته‌ای توانایی استفاده از علوم مختلف نظیر مساحی، زلزله‌شناسی، چینه‌شناسی و هیدرولوژی را دارد (Keller, 1986). الگوی زهکشی در حوزه‌آبخیز بسیار متأثر از تکتونیک منطقه می‌باشد. این الگو آب حاصل از باران را به سمت خروجی زهکشی می‌نماید و مکان‌هایی را که مناسب استحصال آب باران باشد را مشخص می‌نماید. اما آنچه که اهمیت می‌یابد این موضوع است که مکان‌یابی استحصال آب باران تا چه میزان در طی زمان دستخوش تغییرات می‌گردد (Hildebrand et al. 2001). آیا این تغییرات در حجم و شدت استحصال آب باران موثر است یا خیر گامی فراتر از پژوهش‌های حاضر است که از دیدگاهی نوین و با ادغام دو ویژگی زمین‌شناسی و هیدرولوژی و ارتباط میان این دو اطلاعات مناسبی را در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران قرار می‌دهد. در طول زمان الگوی زهکشی حوزه‌آبخیز تغییراتی در خود داشته است که با استفاده از برخی شاخص‌های اندازه‌گیری این تغییرات در طول سالیان گذشته به شدت تغییرات در سال‌های آتی پی برد (Mahmood and Gloaguen, 2011). تکتونیک صفحه‌ای یکی از عواملی است که با ایجاد تغییرات در ساختار زمین میزان نفوذ و خرد شدگی سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مناطقی که دارای تکتونیک فعال هستند فرآیندهایی نظیر گسل، چین خوردگی، تغییرات در تقارن حوضه و زهکشی آن و نیز تغییر شکل رودخانه بسیار موثر می‌باشد. اما میزان این تغییرات نیاز به شاخص‌های دارد که به‌عنوان ابزار تمایز از آن‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به تحقیقات (Keller and Pinter, 2002; Lawrence et al. 1981; Mahmood et al. 2009; Mahmood et al. 2008) هشت شاخص تکتونیکی در تعیین الگوی زهکشی حوزه‌آبخیز پرداخته‌ایم که با استفاده از آن می‌توان تغییرات سطح و شیب را در سطح حوزه‌آبخیز مشخص نمود و میزان آب باران استحصال شده را تخمین زد.



## مواد و روش‌ها

### ۱- انتخاب متغیرها

با توجه به بررسی های گذشته میدانی و پژوهش های انجام شده در این بخش متغیرهایی که بیشترین ارتباط را با وضعیت الگوی زهکشی دارند به شرح زیر انتخاب شدند (Molnar, et al. 2010; Pedrera et al. 2009; Pavlis and Das, 2000; Guillermo et al. 2004; Gloaguen et al. 2007; Keller et al. 1996; Hamdouni et al. 2008):

- ۱- شاخص نسبت پهنای کف دره به عمق دره
- ۲- شاخص نسبت
- ۳- شاخص گرادیان طول رودخانه
- ۴- شاخص عدم تقارن آبراهه ها در حوضه ی آبریز
- ۵- شاخص تقارن توپوگرافی عرضی
- ۶- شاخص سینوسیته جبهه کوهستان
- ۷- شاخص انتگرال هیپسومتری
- ۸- شاخص وسعت منطقه

## ۲- روش های مورد استفاده

۱-۲- نتایج به دست آمده از شاخص ها

فعالیت گسل ها و اثرات حاصله را می توان از طریق بررسی شواهد تاریخی، زمین شناسی، ژئومرفولوژی، زلزله شناسی، ژئودزی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تعیین کرد. با توجه به این که امکان انجام مطالعات ژئودزی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و لرزه شناسی هزینه بالایی دارد، از داده ها و امکانات و شواهد ژئومرفیک موجود که نشان دهنده ی تکتونیک فعال هستند، استفاده می شود (Gansser, 1964; Hack, 1973). در همین راستا می توان از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ که قابل دسترس هستند به راحتی استفاده نمود. برای محاسبه ی شاخص های ژئومرفیک (T, AF, V, SL, VF) لازم است. بنابراین ابتدا لایه های رقومی مورد نیاز از روی نقشه های پایه مثل نقشه های توپوگرافی و زمین شناسی تهیه و در محیط نرم افزار ArcGIS ویرگی- های مورفومتری محاسبه می گردد و نقشه ها و نیمرخ های مورد نیاز تهیه می شوند. نهایتاً تجزیه و تحلیل داده ها بر اساس داده های کمی به دست آمده از شاخص های ژئومرفیک انجام شده و میزان فعالیت تکتونیک و تأثیرات حاصله مشخص و در آخر نتایج حاصل از داده های ژئومرفیک با شواهد ژئولوژیکی مقایسه می شوند. شاخص های مورد استفاده به شرح زیر تعریف می گردند:

۱-۲-۱- شاخص نسبت پهنای کف دره به عمق دره (VF)

$$Vf = 2vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]$$

VF: نسبت پهنای کف دره به عمق دره

VFW: پهنای کف دره یا عرض بستر به متر

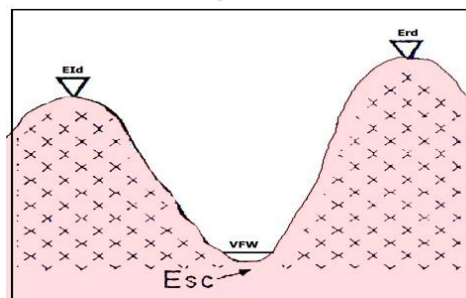
Eld: ارتفاع دیواره سمت چپ دره یا ارتفاع خط الرأس سمت چپ رودخانه

Erd: ارتفاع دیواره سمت راست دره یا ارتفاع خط الرأس سمت راست رودخانه

Esc: ارتفاع متوسط کف دره از سطح دریا

شاخص نسبت پهنای کف دره عبارت است از نسبت دو برابر عرض کف دره به اختلاف ارتفاع دیواره ی دو سمت آن و ارتفاع کف دره. این شاخص منعکس کننده ی اختلاف بین دره های V شکل و U شکل است؛ یعنی هر

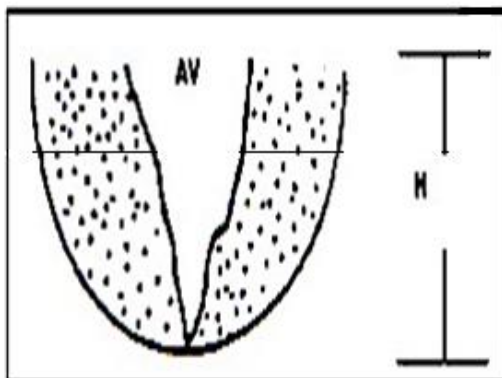
چه مورفولوژی دره به شکل V نزدیک تر شود، مقدار VF به صفر نزدیک شده و حاصل رابطه‌ی بالا به عدد صفر نزدیک می‌شود. این نشان‌دهنده‌ی عمل تخریب و فرسایش آب‌های جاری در پاسخ به فرآیندهای تکنونیک‌ی فعال است و هرچه مورفولوژی دره به شکل U نزدیک تر شود، مقدار vf افزایش می‌یابد و حاصل رابطه‌ی بالا بزرگ‌تر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تعریض و تسطیح دره توسط آب‌های جاری و کم شدن شدت فرآیندهای تکنونیک‌ی و پایداری دره است. به عبارت دیگر مقدار کم vf نشان‌دهنده‌ی فعال بودن منطقه از نظر تکتونیک و V شکل بودن دره است و مقادیر زیاد این شاخص نشان‌دهنده‌ی عدم فعالیت و کم بودن فعالیت تکتونیک‌ی در منطقه است و رودخانه‌ها در این مناطق بستر خود را به‌صورت جانبی توسعه داده و دره‌های U شکل را ایجاد نموده‌اند.



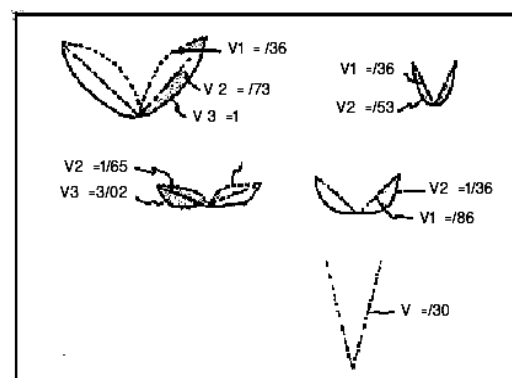
شکل ۱- پهنای کف دره به عمق دره

۲-۱-۲- شاخص نسبت (V)

عبارت است از نسبت مساحت دره به مساحت نیم دایره‌ای به شعاع معادل عمق دره‌ی ایجاد شده. این شاخص با استفاده از رابطه‌ی  $V = A_v / A_c$  محاسبه شده است. در این رابطه  $A_v$  مساحت دره در مقطع عرضی به متر مربع،  $A_c$  مساحت نیم دایره به شعاع H به متر مربع و H ارتفاع دره به متر است. این شاخص از مقایسه-ی مساحت مقطع عرضی دره واقعی با مساحت نیم دایره‌ای فرضی که دارای شعاعی برابر با بلندی مرز آبریز دو زهکشی هم‌جوار است، به دست می‌آید. در این شاخص هر چه مقدار عددی شاخص V از عدد یک کوچک‌تر باشد، بیانگر دره‌هایی به شکل V بوده و میزان فعالیت در چنین دره‌هایی بیشتر خواهد بود. می‌توان گفت هر چه قدمت دره بیشتر باشد، میزان تحدب شیب‌های طرفین دره کمتر و دهانه‌ی دره بازتر می‌شود.



شکل ۳- بلندی مرز آبریز



شکل ۲- نسبت دره به مساحت نیم دایره

۲-۱-۳- شاخص گرادیان طول رودخانه (SL)

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L$$

$\Delta H$ : اختلاف ارتفاع در یک مقطع مشخص

$\Delta L$ : فاصله افقی در آن مقطع مشخص

$L$ : طول رودخانه از نقطه مرکزی مقطع اندازه گیری شده تا سرچشمه رودخانه

$SL$ : شاخص گرادیان طول رودخانه

۲-۱-۴- شاخص عدم تقارن آبراهه ها در حوضه آبریز ( $AF$ )

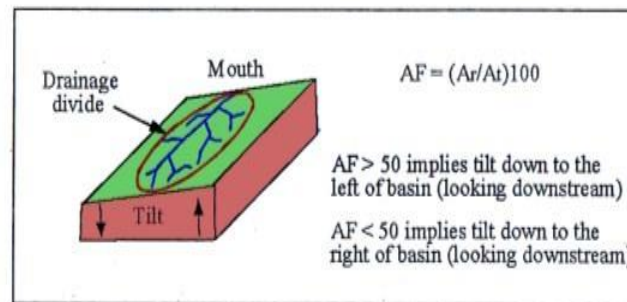
این شاخص که به صورت زیر تعریف می گردد، شاخصی برای تشخیص وجود کج شدگی ناشی از فعالیت های تکنیکی در حوضه های زهکشی است.

$$Af = (Ar / At) \times 100$$

$AF$ : عدم تقارن زهکشی

$Ar$ : مساحت حوضه در برگرفته های زهکش های فرعی در ساحل سمت راست آبراهه اصلی (کیلومتر مربع)

$At$ : مساحت حوضه در برگرفته های فرعی در ساحل سمت چپ و راست آبراهه اصلی (کیلومتر مربع)



شکل ۲- عدم تقارن زهکشی در حوزه آبخیز

۲-۱-۵- شاخص تقارن توپوگرافی عرضی ( $T$ )

$$T = Da / Dd$$

$T$ : تقارن توپوگرافی عرضی؛ برای حوضه کاملاً متقارن  $T=0$  است. با افزایش عدم تقارن، شاخص  $T$  افزایش می یابد و در نهایت به یک نزدیک می شود.

$Da$ : فاصله نوار مئاندري از خط میانی حوزه آبخیز

$Dd$ : فاصله خط میانی حوزه آبریز از خط مرز حوضه (خط تقسیم آب)

۲-۱-۶- شاخص سینوسیته جبهه کوهستان ( $smf$ )

پیچ و خم جبهه کوهستان با رابطه زیر تعریف می شود:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$$

$Smf$ : شاخص سینوسی جبهه کوهستان

$Lmf$ : طول جبهه کوهستان در امتداد پای کوه (خط کنیک)

$Ls$ : طول خط مستقیم در جبهه کوهستان

شاخص Smf برای مناطق بسیار فعال تکتونیکی بین ۱ تا ۱/۹، برای مناطق با فعالیت متوسط بین ۱/۴ تا ۳ و برای جبهه کوهستان غیرفعال تکتونیکی از حدود ۱/۱ تا بیشتر از ۵ است.

۲-۱-۷- شاخص انتگرال هیپسومتری (HI)

$$HI = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$$

Hmean: ارتفاع متوسط حوضه به متر

Hmin: ارتفاع کمینه حوضه به متر

Hmax: ارتفاع بیشینه حوضه به متر

مقادیر زیاد انتگرال بیانگر توپوگرافی جوان، پستی و بلندی های فراوان به همراه فرآیند (حفر قائم) در دره رودخانه ها و مقادیر عددی متوسط تا کم به ترتیب بیانگر توپوگرافی بالغ و پیر است. این مقادیر بین صفر و یک قرار دارد.

۲-۱-۸- شاخص وسعت منطقه (Af and Ad)

ارتباطی میان وسعت حوضه زهکشی (Ad) و وسعت مخروط افکنه (Af) برقرار شده است که از دو معادله ی زیر پیروی می کند.

$$(۱) Af = 3.34 \times Ad^{0.55}$$

$$(۲) Af = .59 \times Ad^{0.8}$$

بحث اصلی در این پژوهش، با بررسی و ارزیابی اثرات تکتونیک بر شبکه ی آبها و مخروط افکنه ها به وسیله تعدادی از شاخص های مورفومتریک، به تشخیص پدیده ی تکتونیک فعال پرداخته شده است. هر چه قدمت دره بیشتر باشد، میزان تحذب شیب های طرفین دره کمتر و دهانه ی دره بازتر می شود و به عبارت دیگر در دره های جوان تر تحذب شیب های طرفین دره بیش تر و دهانه ی دره بستر خواهد بود. در این پژوهش میزان Vf و نسبت V هفت مقطع از دره ی اصلی محاسبه می شود. برای محاسبه شاخص SL ابتدا با استفاده از نقشه ی توپوگرافی منطقه، نیم رخ طولی رودخانه ها ترسیم می شود. شاخص SL به تغییرات شیب بسیار حساس است. این حساسیت برآورد میزان روابط موجود میان فعالیت های تکتونیکی، مقاومت سنگ و توپوگرافی را میسازد. این شاخص در مناطقی که بستر رودخانه در سنگ های سخت قرار دارد، افزایش می یابد. میزان SL در مناطق فعال تکتونیکی زیاد است. هم چنین شاخص SL به سنگ شناسی بسیار حساس است. مقدار زیاد SL در سنگ های با مقاومت کم و یا در سنگ هایی که از لحاظ مقاومت یکسان هستند، می تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان باشد.

مقادیر عددی کوچک این شاخص ( $SL < 1000$ ) در منطقه را می توان به دو صورت تفسیر کرد:

۱- وجود سنگ های رسوبی نرم و فراوان ۲- خرد شدگی زیاد سنگ های منطقه بر اثر که باعث ایجاد منطقه ای با مقاومت مکانیکی کمتر و در نتیجه حساس تر نسبت به فرآیند فرسایش صورت می گیرد.

بی نظمی مقادیر کم شاخص SL ممکن است بیانگر فعالیت تکتونیکی باشد. به عنوان مثال، در امتداد دره-هایی که گسل ایجاد کرده اند، تصور می شود که شاخص ها مقدار کمی دارند، زیرا سنگ های دره ها اغلب در اثر حرکات گسل، خرد و متلاشی شده اند و جریان رودها از میان این سنگ های خرد و متلاشی شده ی دره ها، باید شیب کمتری داشته باشند.

بر اساس شاخص  $Af$ ، رودخانه‌های در حال تعادل که تداوم جریان در حالت ثابتی وجود دارد،  $Af$  برابر با پنجاه بوده که بیانگر وجود تقارن میان زهکش‌های فرعی و آبراهه‌ی اصلی است. در نتیجه نبودن کج شدگی بر اثر بالآمدگی خواهد بود. مقادیر بیش از پنجاه، نشان‌دهنده‌ی بالآمدگی در ساحل راست و کمتر از پنجاه، بیانگر بالآمدگی در ساحل چپ آبراهه‌ی اصلی است.

برای به دست آوردن توپوگرافی عرضی ابتدا خط میانی حوضه (خط تقارن) ترسیم شده و سپس با توجه به وضعیت قرارگیری خطوط مئاندری و میانی حوضه نسبت به یکدیگر و این که خطوط مئاندری و میانی حوضه در میان حوضه تقریباً بر هم منطبق هستند، دو محل از شمال و دو محل از جنوب حوضه برای محاسبه  $T$  انتخاب می‌شود.

شاخص  $S_{mf}$  از شاخص‌های دیگری است که برای ارزیابی تکتونیک فعال از آن استفاده می‌شود و مقدار آن برای مناطق بسیار فعال تکتونیک بین ۱ تا ۱/۹، مناطق با فعالیت متوسط بین ۱/۴ تا ۳ و برای جبهه‌ی کوهستان غیرفعال از حدود ۱/۱ تا بیشتر از ۵ است.

شاخص وسعت مخروط‌افکنه در معادله (الف) مشخص‌کننده مخروط‌افکنه‌هایی است که در جبهه کوهستان فعال و در نتیجه نرخ فرایش زیاد به وجود آمده‌اند. معادله (ب) بیان‌گر مخروط‌افکنه‌هایی است که در مناطق با آرامش تکتونیک نسبتاً بیش‌تر تشکیل شده‌اند.



## نتایج و بحث

با استفاده از شاخص‌های معرفی شده می‌توان مناطقی را که از نظر تکتونیک جوان و فعال هستند را کمی نمود. این مناطق به دلیل فعالیت‌های تکتونیک آب باران حاصل را که در سطح حوضه گرفته می‌شود از نظر حجم و شدت نفوذ تحت تاثیر قرار می‌دهند. با استفاده از هشت شاخص مذکور می‌توان آبراهه‌های جا به جا شده، پرتگاه‌های گسلی جوان، مخروط‌افکنه تقطیع شده و آبراهه‌های جوان شکل گرفته را در محاسبات سطوح آبخیز باران لحاظ نمود (Perez-Pena et al. 2009; Prevot et al. 1980). یکی از تغییراتی که می‌توان از طریق شاخصی نظیر سینوسی جبهه کوهستان به طورت کمی محاسبه نمود تغییرات ناگهانی سنگ‌شناسی می‌باشد که می‌توان از طریق تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا و هزینه کمتر مشخص نمود. این تغییرات به نوبه خود میزان حجم آب باران نفوذ یافته به مخازن آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می‌دهند در صورتی که در محاسبات محل انفصال این صفحات در نظر گرفته نمی‌شود و در اصطلاح آب دزدی صورت می‌گیرد (Molnar and Tapponnier, 1975; Ramirez-Herrera, 1998). درصد سطوح چند وجهی جبهه کوهستان نیز شاخص دیگری است که بر اساس گسل خوردگی اشکال متفاوتی را به خود می‌گیرد شیب‌های متفاوتی را در روی زمین ظاهر می‌سازد. چرا که در محل تلاقی این بخش‌ها جنس یک لایه سست و دیگری در بیشتر موارد سخت بوده است. این تفاوت لایه نیز میزان نفوذپذیری را تحت تاثیر خویش قرار می‌دهد. شاخص عدم تقارن حوضه از نظر صرفه اقتصادی انجام پروژه-های سطوح آبخیز موثر بوده و سطحی را که در طول زمان به سطح موثر در نفوذ اضافه می‌نماید را مشخص می‌نماید.



## نتیجه گیری

مقادیر کمی که از شاخص های ژئومرفیک به دست می آید تغییرات در نیمرخ طولی رودخانه، جوان شدگی رودخانه و ایجاد پادگانه در دشت سیلابی، دیواره قائم مسلط بر رودخانه اصلی، طول آبراهه ها و تعادل آن ها، میزان تغییرات عمق و بستر رودخانه، دره ها و تشکیل یا عدم تشکی کوهپایه ها و در نهایت سطوح موثر در تولید رواناب حاصل از آب باران را بیان می کند. از آن جا که مهمترین بخش جمع آوری آب باران سطوح جمع آوری کننده آن است لذا انتظار می رود در محاسبات حوزه آبخیز و در سطحی فراتر عرصه منابع طبیعی فعالیت های تکتونیکی مشخص گردند. این فعالیت ها پروژه های سطوح آبخیز باران را تحت تاثیر قرار می دهند و با تغییراتی که ایجاد می کنند این سطوح کاهش یا افزایش می یابند. در مناطقی که فعالیت های تکتونیکی جوان هستند ظهور یا عدم حضور چشمه های آب پیوسته از تعدادشان کاسته و یا بر آن ها افزوده می گردد. چرا که در این بخش ها مسیر آب تحت تاثیر گسل ها و چین خوردگی ها قرار می گیرند و ممکن است در اثر عدم حضور آب مناطق ساکن در آن بخش را خالی از سکنه کند (Hare and Gardner, 1985; Mayer, 1990; Rockwell et al. 1985). لذا پیشنهاد می شود با بکارگیری این شاخص ها ابتدا مقادیر فعالیت اندازه گیری شوند و سپس سطوحی را که در آینده دستخوش تغییرات می گردند را در محاسبات خویش لحاظ نمایند.



## References

- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A.A., Motamedi, H., Hosseiniasl, A., (2010). Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. *Geomorphology* 121, 329 -341.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chac\_on, J., Keller, E.A., (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology* 96, 150 -173.
- Gansser, A., 1964. *Geology of the Himalayas*. Interscience, New York.
- Gloaguen, R., Marpu, P.R., Niemeier, I., (2007). Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Processes in Geophysics* 14, 131 -138.
- Guillermo, R.A., Gerardo, M.E.P., Piccoloa, M.C., Pierini, J., (2004). Fractal analysis of tidal channels in the Bahia Blanca Estuary (Argentina). *Geomorphology* 57, 263 -274.
- Hack, J.T., (1973). Stream-profiles analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey* 1, 421 -429.
- Hare, P.H., Gardner, T.W., (1985). Geomorphologic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), *Tectonic Geomorphology*. Allen and Unwin, Boston, pp. 75 -104.
- Hildebrand, P.R., Noble, S.R., Searle, M.P., Waters, D.J., Parrish, R.R., (2001). Old origin for an active mountain range: geology and geochronology of the eastern Hindu Kush, Pakistan. *GSA Bulletin* 113, 625 - 639.
- Keller, E.A., Pinter, N. (Eds.), (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, p. 362.
- Keller, E.A., Chac\_on, J., Sanz de Galdeano, C., (1996). Geomorfologia tectónica y riesgo sísmico en Sierra Nevada. In: Chac\_on, J., Ros\_u\_a, J.L. (Eds.), *I Conferencia Internacional de Sierra Nevada. Conservación y Desarrollo Sostenible*, vol. 1. Universidad de Granada, Spain, pp. 201 -218.



Keller, E.A., (1986). Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes. In: Wallace, R.E. (Ed.), Active Tectonics, Studies in Geophysics. National Academy Press, Washington, DC, pp. 136 -147.

Lawrence, R.D., Khan, S.H., DeJong, K.A., Farah, A., Yeats, R.S., (1981). Thrust and strike-slip fault interaction along the Chaman fault zone, Pakistan. In: McClay, K.R., Price, N.J. (Eds.), Thrust and Nappe Tectonics, vol. 9. Spec. Publs. Geol. Soc. Lond, pp. 363 -370.

Mahmood, S.A., Gloaguen, R., (2011). Fractal measures of drainage network to investigate surface deformation from remote sensing data: a paradigm from HinduKush (NE-Afghanistan). Journal of Mountain Science 8, 641 -654.

Mahmood, S.A., Shahzad, F., Gloaguen, R., (2009). Remote sensing analysis of quaternary deformation using river networks in Hindu Kush region. In: IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa.

Mahmood, S.A., Shahzad, F., Gloaguen, R., (2008). Remote sensing analysis of quaternary deformation in the Hindu Kush-Pamir region. In: 33rd International Geological Congress 2008. Oslo, Norway.

Mayer, L., (1990). Introduction to Quantitative Geomorphology. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.

Mohadjer, S., Bendic, R., Ischuk, S., Kuzikov, S., Kostuk, A., Saydullaev, U., Lodi, S., Kakar, D.M., Wasy, A., Khan, M.A., Molnar, P., Bilham, R., Zubovich, A.V., (2010). Partitioning of India- Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements. Geophysical Research Letters 37 (L04305), 1-6.

Molnar, P., Tapponnier, P., (1975). Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. Science 189 (4201), 419-426.

Pavlis, T., Das, S., (2000). The PamireHindu Kush Seismic zone as a strain marker for flow in the upper mantle. Tectonics 19, 103-115.

Pedrerera, A., P\_erez-Pe~na, J.V., Galindo-Zald\_ivar, J., Aza~n\_on, J.M., Azor, A., (2009). Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). Geomorphology 105, 218-231.

Perez-Pena, J.V., Azanon, J.M., Azor, A., Delgado, J., Gonzalez, F.Lodeiro, (2009). Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. Earth Surface Processes and Landforms 34, 16-25.

Prevot, R., Hatzfield, D., Roecker, S.W., Molnar, P., (1980). Shallow earthquakes and active tectonics in eastern Afghanistan. Journal of Geophysical Research 85 (B3), 1347-1357.

Ram\_irez-Herrera, M.T., (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. Earth Surface Processes and Landforms 23, 317-332.

Rockwell, T.K., Keller, E.A., Johnson, D.L., (1985). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA, pp. 183-207.