

مخاطرات هیدرومورفوتکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه بدخشان افغانستان

خدیجه محمدی*

دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران

ابراهیم مقیمی

استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، دانشگاه تهران

مهدی زارع

استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی

مجتبی یمانی

استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، دانشگاه تهران

مسعود مجرب

دکتری مهندسی اکتشاف دانشکده فنی دانشگاه تهران، شرکت بنیان زمین پایدار

(تاریخ ارسال مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۱۱ - تاریخ پذیرش مقاله ۱۴۰۰/۱۲/۱۰)

چکیده

فعالیت‌های تکتونیک (زمین‌لرزه) از مهم‌ترین علل تغییرات لندفرمی محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی شواهد هیدرومورفولوژیک، هیدرومورفوتکتونیک، لرزه‌خیزی و مخاطرات مربوط به آنها در منطقه بدخشان در شمال شرق افغانستان است. زون بدخشان یکی از ساختارهای مهم لرزه‌خیز افغانستان است. زلزله‌های بزرگ و کوچک در مقیاس تاریخی و دستگامی در پهنه زمین‌شناسی در این منطقه رخ داده و به‌صورت پیچیده زمین بدخشان را قطعه‌قطعه کرده است. در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک و کاتالوگ لرزه‌خیزی با هدف مخاطره‌شناسی و تکتونیک فعال بررسی شد. در ابتدا از تصاویر ماهواره‌اندست ۸ و کوئیک‌برد و نرم‌افزارهای گلوبال مپر، GIS و تصاویر SRTM با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر استفاده شد. برای محاسبه مورفوتکتونیک از شاخص‌های ژئومورفیک T و Hi استفاده شد. سپس کاتالوگ لرزه‌خیزی با به‌روزرسانی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۱ و آمار EMME تهیه شد. در نهایت نقشه مخاطرات لرزه‌خیزی طبقه‌بندی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که براساس شواهد بصری، شبکه زهکشی مستطیلی و هم‌راستا با جهت گسل‌هاست. روندهای ۱۴۰/۰۴۰ و ۱۸۰ درجه فراوان‌ترین روند آبراهه‌ها هستند. از نظر مورفوتکتونیک، نواحی شرق، جنوب و شمال منطقه با توجه به لندفرم‌های کوهستانی تا ارتفاع ۷۴۰۰ متر و شواهد اشکال مثلثی در خط مینا، موازی با خطوط گسل است. بیشترین فعالیت تکتونیک و کج‌شدگی نیز به‌سمت غرب است. ۵۴/۴۸ درصد مساحت منطقه در طبقه ۶۰۰۰-۴۰۰۰ متر قرار دارد. بیشترین فراوانی گسل‌های فرعی و گسل‌های اصلی (اندراپ، بدخشان، چمن، دروازه) نیز در این طبقه جای گرفته است. روند اصلی تنش (S1) با سازوکار شیب‌لغز از نوع نرمال و دارای امتداد جنوب به شمال است. دو روند ساختاری ۰۶۰ و ۰۷۰ درجه، دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌گرد و راست‌گرد است و نیروی واردشده از سوی جنوب را به مناطق شرقی و غربی منتقل می‌کند. روندهای شرقی-غربی دارای سازوکار شیب‌لغز محض از نوع معکوس است. نقشه فراوانی آبراهه‌ها یک زون خردشده در شرق بدخشان را نشان می‌دهد که مورفولوژی و سیستم هیدرولیکی منطقه را به‌شدت تحت کنترل خود دارد و نشان‌دهنده ارتباط مستقیم لرزه‌خیزی، مورفولوژی و هیدروژئوژی است. براساس این داده‌ها، نوآوری پژوهش این است که کج‌شدگی و نامتقارن بودن حوضه‌های آبریز و تراکم کانون زلزله‌های با بزرگای چهار و بیشتر، دو روند شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی خلاف جهت سه گسل اصلی را نشان می‌دهد و احتمال وجود دو گسل جدید یا ناشناخته را تأیید می‌کند. از نتایج دیگر این پژوهش می‌توان به تعیین نقاط مستعد پرخاطر و وجود گسل‌های جدید برای راهبردهای توسعه شهری و عمرانی از نظر لرزه‌خیزی و مورفوتکتونیک در آینده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: افغانستان، بدخشان، لرزه‌خیزی، مخاطرات، هیدرومورفوتکتونیک.

مقدمه

هیدرومورفوتکتونیک، فرایندهای جریانی و رودخانه‌ای است که از عوامل برون‌زا در پیدایش و تحول برخی ناهمواری‌ها به‌شمار می‌رود. این فرایندها از مهم‌ترین عوامل در تغییر و تحول ناهمواری‌های پوسته بدخشان به‌شمار می‌آید که در چارچوب سه عمل حفر، حمل و رسوب مواد، اشکال و لندفرم‌های هیدروژئومورفیک گوناگون بسیاری را در منطقه پدید آورده است [۱۲]. هیدروژئومورفولوژی عبارت است از فرم‌های شکل زمین که از فرایندهای آبی به‌عنوان عوامل تغییر شکل‌دهنده آنها و رابطه آن دو با هم تأثیر می‌پذیرد. زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک نیز درباره شکل هندسی و مشخصات ظاهری ساختمان‌های مختلف زمین (لایه‌ها، چین‌ها و گسل‌ها) و عوامل پدیدآورنده آنها بحث می‌کند [۴]. برای شناسایی مناطق فعال از روش‌های مختلف لرزه‌شناسی، تاریخی، باستان‌شناسی، ژئودزی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی استفاده می‌شود که هر کدام شامل دوره زمانی خاصی است و روش‌های مخصوص به خود را دارد [۲]. ژئومورفولوژیست‌ها برای ارزیابی مناطق فعال تکتونیک و لرزه‌خیزی، از روش‌های اندازه‌گیری کمی پدیده‌های ژئومورفیک از راه محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک، مشاهده غیرمستقیم پدیده‌ها و مقایسه لندفرم‌ها بهره می‌برند [۳]. کامرانی و همکاران براساس دیدگاه ساختمانی گسل‌ها، شاخص فعالیت‌های تکتونیک و تحول لندفرم‌های سطح زمین در حوضه‌های آبریز کوهستان کرکس روی سامانه گسلی قم- زفره نتیجه گرفتند که در این ناحیه به‌دلیل تغییرات زیاد مورفوتکتونیک ناشی از فعالیت گسل‌های اصلی، میزان نسبی بالآمدگی تکتونیک حوضه زیاد است [۷]. اسدی و زارع با بررسی و شناخت ویژگی‌های دیرینه‌لرزه‌شناختی و توان لرزه‌زایی گسل‌های دره نور (البرز مرکزی) و با استفاده از نشانه‌های ژئومورفولوژی، اشکال تحت تأثیر زلزله را نشان دادند [۲]. مابقی و حسین‌زاده با استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی حوضه رودخانه درونگر، با توجه به محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک نشان دادند که این حوضه جزو مناطق فعال از نظر تکتونیک است [۳]. گورابی و یمانی با بررسی گسل نایین در منطقه غرب ایران مرکزی نشان دادند که این گسل دارای فعالیت اخیر زیرسطحی بوده و گسلی به‌هم‌پیوسته است [۱۶]. نتایج تحقیقی در دشت لوت نشان داد که حوضه زهکشی، گسل‌ها را بریده است و رودخانه‌ها سیستم تکتونیک را قطع کرده‌اند. سینوسی بودن آبراهه‌ها به‌دلیل اثر مورفوتکتونیک است. قلمرو حوضه‌های مهم زهکشی به خطوط تکتونیک محدود شده است، بنابراین لوت واحدی هیدرومورفوتکتونیک است [۲۲]. پژوهش‌های پیشین در دیگر نقاط جهان با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک روی حوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها از کارایی آنها در شناسایی مناطق

فعال تکتونیکی حکایت دارد [۱۳]. شرودر و همکاران با بررسی نیروهای زمین‌ساختی و پیامدهای آن در امتداد رودخانه شیوه در منطقه مرکزی بدخشان- هندوکش- پامیر و با استفاده از سنجش از دور و برداشت میدانی با توجه به زمین‌ساخت و آب‌وهوای بدخشان، بالآمدگی را $4/5$ سانتی‌متر محاسبه کردند [۲۷]. بدخشان از استان‌های زلزله‌خیز است که به‌دلیل قرارگیری پهنه ساختاری برخورد قاره به قاره اوراسیا، هندوکش و پامیر مرتفع، دارای گسل‌های متعددی است [۹]. دانش ژئومورفولوژی که هدف از آن، شناخت فرم اراضی و علل ایجاد آنهاست، در بدخشان نیز به‌کار گرفته شد تا از وضعیت شبکه آبراهه‌ها، شیب رودخانه‌ها، شکل حوضه‌ها و جبهه کوهستان‌ها در زمینه فعالیت تکتونیکی منطقه اطلاعاتی حاصل شود.

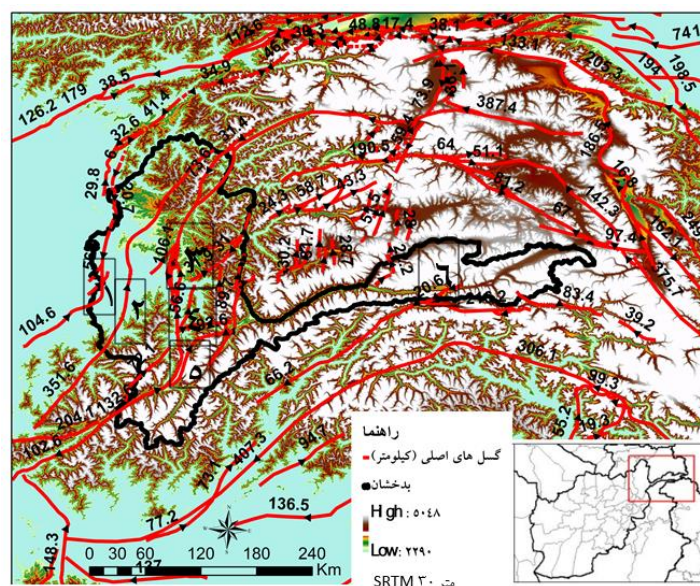
منطقه پژوهش

بدخشان از استان‌های شمال شرقی افغانستان است که در منطقه کوهستانی هندوکش [۲۴] و پامیر [۱۹] در طول جغرافیایی 70° درجه و 4 دقیقه و 36 ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی 36° درجه و 50 دقیقه و 16 ثانیه شمالی واقع است (شکل ۱). این منطقه از سطح دریا 1800 متر ارتفاع دارد و مرکز آن شهر فیض‌آباد است [۱۸]. این استان در 470 کیلومتری کابل واقع است. مساحت بدخشان بیش از 47 هزار و 403 کیلومتر مربع است. حجم رسوبات کواترنری کم و اغلب محدود به بستر رودخانه‌هاست. ارتفاعات اغلب از مجموعه سنگ‌های آهکی، دولومیتی و در برخی موارد مجموعه سنگ‌های با درجه دگرگونی زیاد چون گنیس تشکیل شده است. در منابع مختلف زون‌های تکتونیکی مختلف برای افغانستان در نظر گرفته شده است، ولی آنچه نظر نویسنده را جلب کرد و بیشترین ارجاع را داشت عبارت است از: ۱. زون‌های بند امیر؛ ۲. سوخاب؛ ۳. بدخشان غربی؛ ۴. بدخشان؛ ۵. بدخشان؛ ۶. نورستان [۱۱].

روش تحقیق

استخراج آبراهه‌ها و بررسی روند آنها با استفاده از نرم‌افزارهای گلوبال میپر و ArcGIS و نیز مدل ارتفاعی رقومی (SRTM) با دقت $12/5$ متر از ماهواره Aleos Palsar صورت گرفت. همچنین حوزه‌های منطقه، به دوازده حوضه بزرگ و مهم تقسیم و از هر بخش، لایه آبراهه جداگانه تهیه شد. در نهایت با استفاده از اکستنشن Polar Plots، نمودار آبراهه مربوط به هر بخش ترسیم شد. افزون‌بر آن، با هدف یافتن جهت آبراهه‌ها، یک نمودار گلسرخی کلی از همه آبراهه‌ها نیز تهیه شد. از تصاویر ماهواره‌ای جدید به‌همراه روش غیراتوماتیک یا همان روش بصری برای صحت‌سنجی استفاده شد و با استفاده از روش Linear بارزسازی آبراهه‌ها انجام گرفت. در ادامه خروجی مناسب تهیه و به‌منظور

رقومی سازی خطوطاره‌ها به روش بصری، از نرم‌افزار گلوبال میپ استفاده شد. در این برنامه به کمک ابزار رقومی‌سازی Digitizer، خطوطاره‌ها رقومی شده و با فرمت Shapefile ذخیره شدند. پس از آن به کمک نرم‌افزار Dips، نمودار گلسرخی خطوطاره‌ها ترسیم شد [۲۸]. در محیط‌های نرم‌افزاری ARCMAP و گلوبال میپ، ترسیم آبراهه‌ها، دسته‌بندی زیرحوضه‌ها، اندازه‌گیری شاخص‌های کج‌شدگی و تقارن حوضه‌ها انجام گرفت [۱۴]. در تعیین شاخص نسبی زمین‌ساخت فعال، شاخص‌های مورد نظر محاسبه شد و پهنه‌بندی مناطق با ارتفاع زیاد و فراوانی و تراکم گسل‌ها و کانون زلزله‌ها براساس کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه صورت گرفت. شایان ذکر است که تعدادی از این شاخص‌ها عمومیت داشتند و در همه زیرحوضه‌ها قابل اندازه‌گیری و تحلیل آماری بودند (مانند شاخص انتگرال هیپسومتری و حجم به سطح حوضه)؛ اما برخی از شاخص‌ها قابل اندازه‌گیری نبودند یا شرایط ورود به تحلیل‌های آماری را نداشتند. در نهایت با هدف تعیین گسل‌های اصلی و فرعی و کانون زلزله‌ها و ارتفاعات منطقه کاتالوگ لرزه‌خیزی توسط کاتالوگ EMME با به‌روزرسانی (۲۰۱۱-۲۰۲۱) در نرم‌افزار GIS 10.2 انجام گرفت [۳۰]. منحنی‌های هیپسومتری با ترسیم ارتفاع کل در مقابل مساحت کل حوضه ترسیم می‌شوند. با تقسیم مساحت و ارتفاع منحنی هیپسومتری بر مساحت کل حوضه و حداکثر ارتفاع حوضه، می‌توان آن را به‌صورت بی‌بعد نشان داد [۸].



شکل ۱. منطقه پژوهش، شش زون تکتونیکی که در مستطیل‌ها بین گسل‌های اصلی شماره‌گذاری شده است و گسل اصلی و فرعی منطقه

$$X=A/a) X$$

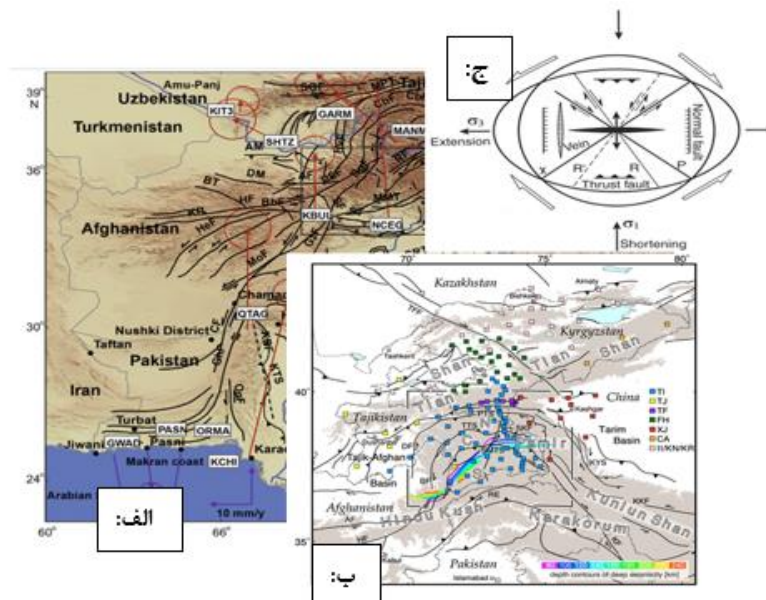
(۱)

بحث و یافته‌ها

سیستم مورفوتکتونیک شمال شرق افغانستان (منطقه بدخشان)

اظهار نظر در مورد تکتونیک ناحیه‌ای کوچک نظیر منطقه تحت مطالعه، بیش از هر چیز نیازمند شناخت جایگاه تکتونیک و موقعیت لرزه‌زمین‌ساختی آن در کمربندهای لرزه‌خیز جهان است. با توجه به شکل ۲، فشار تکتونیک و حرکت رو به شمال صفحه هندوستان، سبب گره‌خوردگی تکتونیک در این منطقه از افغانستان شده است [۲۱]. براساس بردارهای تنش، به‌طور کلی، روند اصلی تنش (σ_1) حاکم بر این منطقه دارای امتداد جنوب به شمال است. جهت‌گیری ساختارهای تکتونیک نظیر گسل‌ها و چین‌ها نسبت به راستای تنش، تفسیر آنها را ممکن می‌سازد. از دیدگاه تکتونیک، گسل‌های موازی با روند تنش اصلی، دارای سازوکار شیب‌لغز نرمال و گسل‌های عمود بر روند تنش دارای سازوکار شیب‌لغز معکوس‌اند. روندهای دیگر با تغییر زاویه بین موازی تا قائم نسبت به تنش، دارای مؤلفه امتدادلغز خواهند بود، به‌نحوی که از زاویه صفر (موازی) تا ۴۵ درجه، از مؤلفه شیب‌لغز نرمال کاسته شده و به مؤلفه امتدادلغز (بسته به جهت‌گیری آن، چپ‌گرد یا راست‌گرد) اضافه می‌شود. پس از آن، یعنی از زاویه ۴۵ تا ۹۰ درجه، مجدداً از مؤلفه امتدادلغز کاسته می‌شود و مؤلفه شیب‌لغز نرمال جای خود را به مؤلفه معکوس می‌دهد. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد همه بردارهای تنش روی صفحه هند و پامیر و هندوکش نشان می‌دهد که جهت بردارها به‌طرف شمال و شمال غرب است و طول بردارها گویای این موضوع است که این تنش‌ها و فشارها مدت طولانی به این روند جابه‌جایی و فشار ادامه می‌دهند. بردار NCEG یکی از بلندترین بردارهاست که دقیقاً جهت و میزان و زمان طولانی فشار صفحه هند را به‌صورت عمود به منطقه بدخشان نشان می‌دهد که این بردار تنش از مهم‌ترین منابع فشار در منطقه پامیر و بدخشان است و چین‌خوردگی و چولگی ایجاد می‌کند. جهت بردارهای NCEG, QTAG, KBUL, KCHI نشان‌دهنده این است که افغانستان به‌ویژه در شرق و جنوب شرق و شمال شرق، تحت تأثیر تکتونیک فعال بر اثر فشار صفحه هند در حال بالآمدگی است. براساس این پژوهش هیدرومورفودینامیک‌های متفاوت در منطقه از شرق به غرب متأثر از نیروی فشاری و درونی اوراسیا، گویای روند تکتونیک مذکور است. شیب منطقه نیز گواهی بر صحت این موضوع است. در نمودار بیضوی تنش شکل ۵، ساختارهای همراه با این سیستم نشان داده شده‌اند. جهت تنش اصلی حاکم بر منطقه یا همان σ_1 در این منطقه، جنوب به شمال است و از این‌رو با ساختارهای منطقه

بدخشان همخوان است. روندهای برشی ریدل (R) و آنتی-ریدل (R') در این منطقه دارای امتدادهای ۱۲۰ و ۶۰ هستند. مورد اول دارای سازوکار راست‌گرد و مورد دوم دارای سازوکار چپ‌گرد (منطبق بر امتداد و سازوکار گسل چمن) است. نظیر آنچه در بخش آبراهه‌ها صورت گرفته، به منظور بررسی تغییرات روند احتمالی در خطواره‌های گسلی، مناطق دوازده‌گانه پیشین ملاک بررسی واقع شده است (شکل ۳). روند ۱۲۰ درجه در تک‌تک مناطق دیده می‌شود. روند تنش حاکم بر این منطقه برابر با بردار تنش منطقه دارای امتداد جنوب به شمال است. از این رو دو روند ساختاری یادشده، دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌گرد و راست‌گرد خواهند بود تا بتوانند نیروی واردشده از سوی جنوب را بر مناطق شرقی و غربی منطبق کنند. همه روندهای ساختاری با امتداد شمالی - جنوبی دارای سازوکار شیب‌لغز محض از نوع نرمال‌اند.



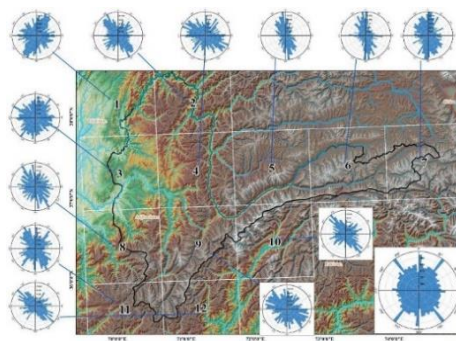
شکل ۲. الف) چارچوب تکتونیکی منطقه (هندوکش - هیمالیا - پامیر) بردارهای (قرمز) تنش در افغانستان را نشان می‌دهد [۱۷] ب) نقشه ساختارهای اصلی نئوتکتونیکی که به صورت خطوط سیاه ترسیم شده‌اند عبارت‌اند از AF = گسل اندروپ، BF = گسل بدخشان، CF = گسل چمن، DF = گسل دروازه، HF = گسل هرات، PTS = زون رانشی پامیر [۲۵] ج) بیضوی تنش و ساختارهای فشارشی (σ₁)، کششی (σ₃) و امتدادلغز در ارتباط با آن.

فرایند هیدرومورفولوژیک بدخشان

در پیدایش و تحول لندفرم‌ها، افزون‌بر نیروها و فرایندهای درونی بدخشان، عوامل نیروهای بیرونی مانند فرایندهای آغازین (هوازدگی)، فرایندهای یخچالی و جنب یخچالی، فرایندهای جریانی و رودخانه‌ای، حرکات دامنه‌ای و فرایندهای بادی، نقش غالب را ایفا می‌کنند. بیشتر این فرایندهای بیرونی با دخالت آب به حالت‌های گوناگون وارد عمل شده و بیشتر به پدیدار شدن اشکال و لندفرم‌های هیدرومورفودینامیسم منجر می‌شوند. البته در این پژوهش فرایندهای رودخانه‌ای مورد توجه خاص قرار گرفته است.

آبراهه‌های هیدروولوژیک منطقه

منطقه پژوهش به دوازده حوضه آبریز طبق شکل‌های ۳ و ۴ تقسیم شده است. از آنجا که حوزه اصلی بدخشان وسیع‌تر از مرز سیاسی منطقه است، روند عمومی سیستم آبراهه‌ها به تفصیل در نمودار ۱ ارائه شده است. روندهای ۴۰ و ۱۴۰ و ۱۸۰ فراوان‌ترین روند آبراهه‌های منطقه‌اند. با توجه به راستای تنش که جنوب به شمال است، آبراهه‌های دارای روند ۱۸۰ درجه با سیستم تنش کششی ایجاد شده‌اند و در جدول ۱ روندهای اصلی و فرعی در دو ستون نمایش داده شده است. در عوض هر دو روند ۴۰ و ۱۴۰ درجه با زاویه ۸۰ درجه نسبت به یکدیگر، یک سیستم مزدوج را تشکیل داده‌اند. با توجه به نقشه گسل‌های بدخشان در کتاب زمین‌شناسی افغانستان، این آبراهه‌ها بر اثر سیستم امتدادلغز کششی با راستای شرقی- غربی تشکیل شده‌اند.



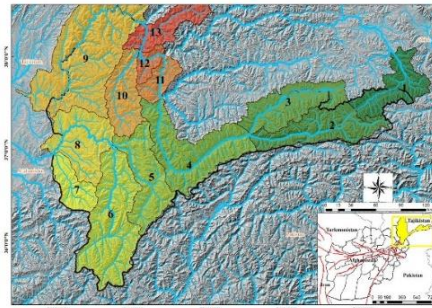
شکل ۳. نمودار گل‌سرخ آبراهه‌ها

جدول ۱. آمار روند آبراهه‌ها

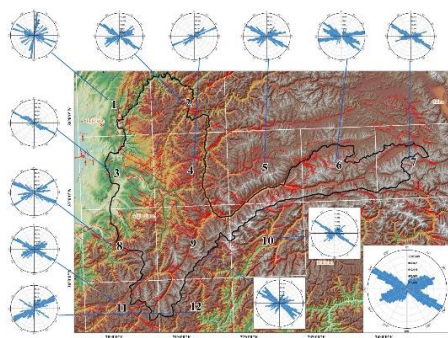
شماره	سایر روندها	روندهای اصلی	شماره	سایر روندها	روندهای اصلی
۱	۱۵۰	۰۱۰	۷	۱۳۰	۰۳۰
۲	۰۹۰	۱۵۰	۸	۴۵۰	۱۳۰
۳	۱۰۰	۱۴۰	۹	۱۲۰	۰۴۵
۴	۷۰	۱۴۰	۱۰	۰۹۰	۱۲۰
۵	۴۵	۱۵۰	۱۱	۱۵۰	۱۷۰
۶	۳۰	۱۴۰	۱۲	۱۶۰	۱۸۰



شکل ۵. تشکیل اشکال مثلثی به دلیل وجود گسل نرمال در شهرستان اشکاشم بدخشان (Google earth)



شکل ۴. حوضه‌های آبریز منطقه



شکل ۶. نمودار گلسرخی خطواره‌های گسلی

جدول ۲. آمار روند خطواره‌های گسلی

شماره	روند اصلی	سایر روندها	شماره	روند اصلی	سایر روندها
۱	۰۱۰	۱۱۰	۷	۱۲۰	۰۷۰
۲	۱۲۰	۰۶۰	۸	۱۲۰	۰۶۰
۳	۱۲۰	-	۹	۱۲۰	۰۷۰
۴	۰۷۰	-	۱۰	۱۲۰	۰۶۰
۵	۱۲۰	۰۷۰	۱۱	۱۲۰	۰۶۰
۶	۰۸۰	۱۳۰	۱۲	۰۶۰	۱۲۰

روند ۱۲۰ درجه که به صورت یکی در میان (جدول ۲) با روند ۶۰ و ۷۰ درجه مشخص شده در تک تک مناطق دیده می‌شود. مشخص است که روند تنش حاکم بر این منطقه برابر اطلاعات بردار تنش (شکل ۲) دارای امتداد جنوب به شمال است. از این رو دو روند ساختاری یادشده، دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌گرد و راست‌گرد خواهند بود تا بتوانند نیروی واردشده از سوی جنوب را به مناطق شرقی و غربی منتقل کنند. همه روندهای ساختاری با امتداد شمالی-جنوبی دارای سازوکار شیب‌لغز محض از نوع نرمال‌اند. همچنین روندهای شرقی-غربی دارای سازوکار شیب‌لغز محض از نوع معکوس‌اند. نقشه فراوانی آبراهه‌های منطقه، منطبق بر خطوط به شدت خردشده و دارای فراوانی زمین‌لرزه‌های زیاد است. یک زون خردشده دیگر نیز در شرق بدخشان قرار دارد. به طور کلی، زون‌های خردشده، مورفولوژی و سیستم هیدرولیکی منطقه را

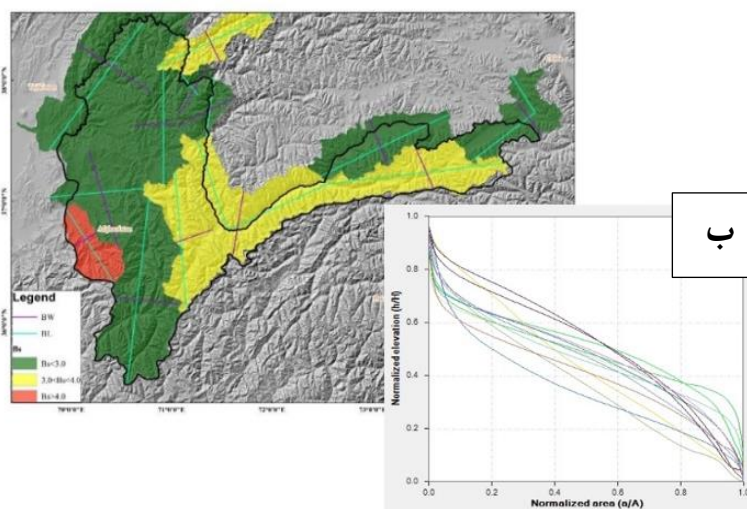
به شدت تحت کنترل خود دارند. این مهم نشان‌دهنده ارتباط مستقیم لرزه‌خیزی، مورفولوژی و هیدرولوژی در این پهنه از افغانستان است. روند آبراهه‌ها تابعی از شیب زمین، لیتولوژی و تکتونیک است. تفکیک این سه از یکدیگر چندان ساده نیست و گاهی حتی ناممکن است؛ اما بررسی شبکه وسیعی از آبراهه‌ها در مناطق مختلف تا حد زیادی الگوی جهت‌گیری آنها را مشخص می‌کند. روند عمومی سیستم آبراهه‌ها به تفصیل در (شکل‌های ۳ و ۴) ارائه شده است. اما به طور کلی روندهای ۴۰ و ۱۴۰ و ۱۸۰ درجه فراوان‌ترین روند آبراهه‌های منطقه‌اند. با توجه به راستای تنش که جنوب به شمال است و همچنین ژئومورفولوژی منطقه و کشش و فشاری که در جنوب و شرق منطقه وجود دارد، آبراهه‌های دارای روند ۱۸۰ درجه با سیستم تنش کششی ایجاد شده‌اند. در عوض هر دو روند ۴۰ و ۱۴۰ درجه با زاویه ۸۰ درجه نسبت به یکدیگر، طبق جدول (Attribute) گسل‌ها و ساختار زمین‌شناسی منطقه، سیستم مزدوجی را تشکیل داده‌اند و بر این اساس، این آبراهه‌ها بر اثر سیستم امتدادلغز کششی با راستای شرقی غربی تشکیل شده‌اند. افزون بر تکتونیک و بالآمدگی در منطقه بدخشان به دلیل یخچالی بودن منطقه و وجود رودهای پرآب، کف‌کنی توسط رودخانه‌ها نیز به شدت انجام می‌گیرد که فرسایش سریع‌تر توسط رودخانه را در پی دارد و ایجاد خط‌القعرها، موجب می‌شود که مرتفع شدن ارتفاعات به وضوح افزایش یابد. شدت تراکم آبراهه‌ها در هر منطقه تابع عوامل مختلفی مانند تغییرات لیتولوژی، شیب و تکتونیک فعال است. بررسی میزان تراکم شبکه آبراهه‌ها در هر منطقه در کنار دیگر عوامل مورفوتکتونیک، می‌تواند تا حدی به شناخت مناطق با پتانسیل فعالیت زیاد کمک کند [۱۷]. همان‌طور که پیداست تراکم آبراهه‌ها، ارتباط تعریف‌شده‌ای با فراوانی گسل‌ها دارد. بدین صورت که در مناطقی که گسل‌ها متقاطع‌اند، فراوانی آبراهه‌ها بیشتر شده است. یکی از دلایل این موضوع، خردشدگی واحدهای سنگی و تسهیل فرسایش و ایجاد آبراهه است.

اشکال حوضه‌ها و خطوط شبکه آبراهه‌های حوضه‌های آبریز اصلی در منطقه بدخشان

اشکال حوضه‌ها (شکل ۳)، خطوط شبکه آبراهه‌ای، حوضه‌های آبریز اصلی و خطوط گسلی در شکل‌های ۲ و ۴ نشان داده شده است. از نقشه مذکور برمی‌آید که در شکل حوضه و خطوط شبکه زهکشی بخش‌های مختلف، اختلاف‌های بارزی وجود دارد. همچنین به جهت کلی یا روند چنین پدیده‌هایی نیز گرین گفته می‌شود. بر این اساس، منحنی هیپسومتری برای همه حوضه‌های آبریز موجود در گستره تحت بررسی (دوازده عدد) محاسبه شده و در شکل ۷ ب نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ الف حوضه‌ها از جنوب شرق به شمال غرب با اعداد

نامگذاری شده‌اند. می‌توان به صورت توصیفی، موارد زیر را در خصوص این حوضه‌ها عنوان داشت: الف) هیچ یک از حوضه‌های منطقه پژوهش در رده مسن و پیر قرار نمی‌گیرند. ب) حوضه ۸ در رده میانسالی قرار می‌گیرد؛ ج) حوضه ۷ در رده بسیار جوان جای می‌گیرد؛ د) حوضه‌های دیگر در رده جوان تر قرار می‌گیرند.

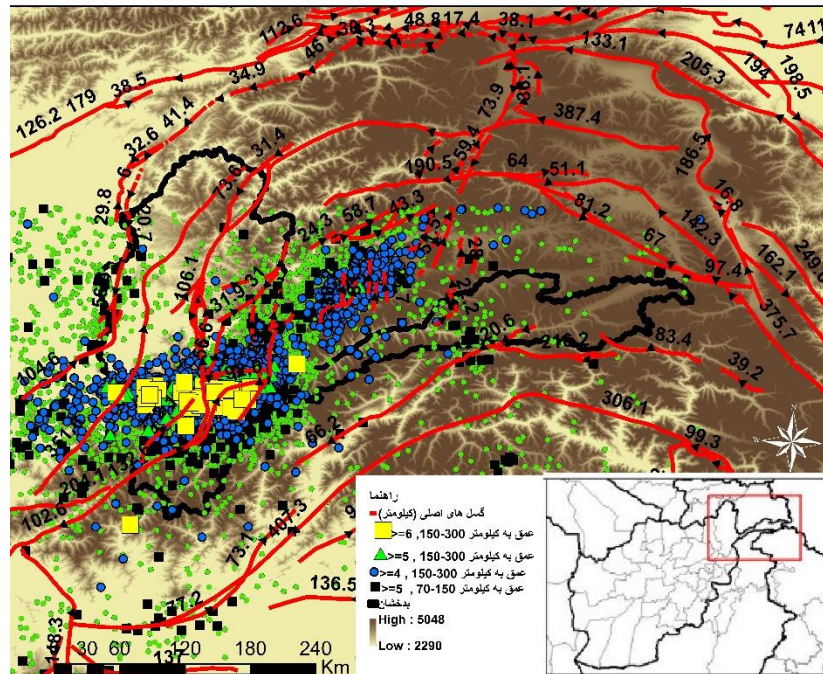
الف



شکل ۷. الف) نقشه هم‌پتانسیل از نظر فعالیت‌های تکتونیکی برای دوازده حوضه زهکشی در طول بدخشان ب) هیپسومتری منطقه

پتانسیل لرزه‌خیزی

مطابق شکل ۶، تاریخچه مکتوب زمین‌لرزه‌های تاریخی [۱۰] افغانستان از ۷۳۴ میلادی تا به امروز کاتالوگی با بیش از ۱۳۰۰ زمین‌لرزه در افغانستان را شرح می‌دهد [۳۰] که بیشتر در منطقه بدخشان رخ داده‌اند [۱۶]. با توجه به کاتالوگ EMME(1900-2011)، با به‌روزرسانی ۲۰۱۱-۲۰۲۱، پتانسیل لرزه‌خیزی منطقه در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق شکل، لرزه‌خیزی منطقه روندی شمال شرقی- جنوب غربی دارد و بیشترین فراوانی مربوط به زلزله‌هایی با بزرگی ۴ ریشتر به بالا است [۲۹].

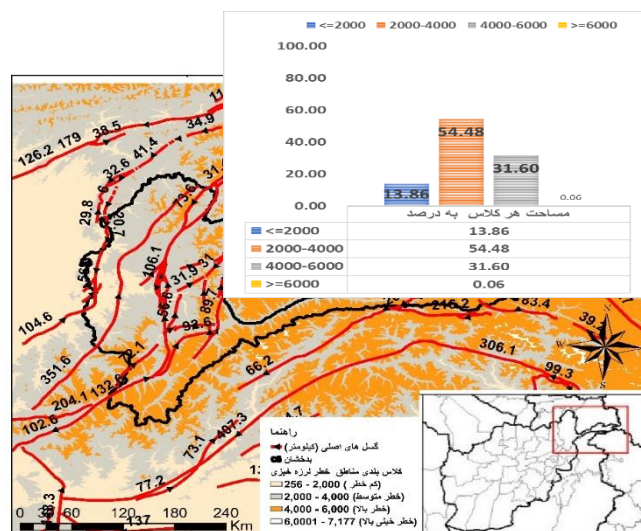


شکل ۸. کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه براساس داده‌های EMME با به‌روزرسانی (۲۰۲۱-۲۰۱۱) [۲۳، ۲۹]

تحلیل مخاطرات منطقه

پهنه‌بندی خطر یکی از روش‌هایی است که به کمک آن می‌توان مناطق بحرانی را مشخص کرد [۶] شمال شرق افغانستان (بدخشان) با توپوگرافی اغلب کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، بیشتر شرایط طبیعی برای ایجاد گستره وسیعی از مخاطرات طبیعی را داراست [۱۸]. با توجه به شکل ۸، بدخشان از نظر موقعیت تکامل تکتونیک، فعال و جوان بوده و روی خطوط گسل اصلی بزرگ تکتونیک واقع شده است [۳۲]. این پهنه سرزمینی افغانستان با خطر زیاد زمین‌لرزه‌ای و با تعداد فراوانی زلزله روبه‌روست. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، هرچه از شرق (دالان پامیر) به‌طرف غرب منطقه پیش برویم از ارتفاع توپوگرافی و پراکندگی زلزله‌ها کاسته می‌شود. بنابراین نواحی شرقی و جنوبی و شمال شرق بدخشان در طبقه بیشترین ارتفاع و بیشترین لرزه‌خیزی قرار دارد. نواحی مرکزی دارای خطر متوسط و غرب منطقه با کاهش ارتفاعات و فراوانی زون گسلی

از این نظر در طبقه کم خطر قرار می‌گیرد. ناگفته نماند که در غرب منطقه به دلیل فرسایش، بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها دیده می‌شود [۶].



شکل ۹. طبقه‌بندی خطر مستعد لرزه‌خیزی با توجه به گسل‌های اصلی و ارتفاعات و کانون زلزله‌های ثبت‌شده

در شکل ۹ طبقه‌بندی خطر در مرحله اول مدل رقومی ارتفاعی SRTM30 با قدرت تفکیک ۳۰ متر، سپس گسل‌های اصلی با خطوط قرمز پررنگ و در مرحله آخر خردگسل‌ها با رنگ سبز در نرم‌افزار GIS پیاده‌سازی و براساس مدل رقومی طبقه‌بندی شد. هرچه از رنگ قرمز تیره‌تر به سمت شرق به سمت غرب حرکت کنیم از ارتفاعات کاسته می‌شود. خردگسل‌ها و بیشترین فراوانی گسل‌های اصلی در مناطق شرقی و شمالی در ارتفاعات بالا قرار گرفت. بدین صورت طبقه‌بندی خطر محدوده تحت بررسی انجام گرفت.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که هیدروژئومورفولوژی و مورفولوژی شبکه زهکشی منطقه تا حد زیادی متأثر از خطوط گسلی و به صورت مستطیلی و در پهنه‌های کوچکی به صورت درختی است. همچنین با استفاده از شاخص‌های بررسی روند آبراهه‌ها در منطقه نشان می‌دهد که روندهای ۱۸۰ درجه در رابطه با ساختارهای گسلی کششی ایجاد شده‌اند، در صورتی که روندهای ۴۰ و

۱۴۰ درجه در ارتباط با سیستم مزدوج گسل‌ها با ساختار امتدادلغز پدید آمده‌اند. تراکم آبراهه‌ها در این ناحیه در رابطه با گسل‌ها قابل تفسیر و بررسی است و هر جا که گسل‌ها حالت متقاطع دارند، فراوانی آبراهه‌ها بیشتر است که این موضوع، ناشی از خردشدگی واحدهای سنگی گوناگون و تسهیل ایجاد آبراهه‌ها در امتداد این عوارض است. بر مبنای بردارهای تنش، روند تنش حاکم بر منطقه، شمالی-جنوبی است؛ از این رو گسل‌های ناحیه در جهت انطباق بر جهت‌های نیروی فشاری از سمت شرق به غرب، سازوکار امتدادلغز چپگرد و راستگرد دارند. همچنین گسل‌های شیب‌لغز از نوع نرمال در ناحیه در امتداد جهت‌های تنش ایجاد شده است. البته در روندهای غربی-شرقی گسل‌های معکوس نیز وجود دارد. منطبق بر اطلاعات خطواره‌های استخراج‌شده، منطقه به شدت خرد شده است که این موضوع، سبب تراکم زیاد خطواره‌های گسلی شده است. ارتباط این خطواره‌های گسلی با عوامل زمین‌ساختی، زمانی مشخص می‌شود که بدانیم هر جا فراوانی زمین‌لرزه‌ها بیشتر باشد، تراکم خطواره‌ها نیز بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده پتانسیل زیاد منطقه به لحاظ لرزه‌خیزی است که لزوم توجه به ساختارهای گسلی را در رابطه با مکان‌یابی سازه‌های مهم انسانی نشان می‌دهد. در مقایسه با پژوهش‌های گذشته که به بررسی نیروهای زمین‌ساختی و پیامدهای آن در امتداد رودخانه شیوه (نام رودخانه‌ای در بدخشان) در منطقه مرکزی بدخشان-هندوکش-پامیر پرداخته بودند، نتیجه گرفته شد که لرزه‌خیزی در این منطقه الگوی مشخصی را نشان می‌دهد. بی‌گمان با ادامه این حرکات زمین‌ساختی، بر میزان خطواره‌های مرتبط با فرایندهای گسلی در ناحیه افزوده خواهد شد. با توجه به نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر طبیعی در منطقه، به ترتیب نواحی شرقی و جنوبی و شمال شرق بدخشان در طبقه بیشترین مخاطره و بیشترین لرزه‌خیزی قرار دارند، نواحی مرکزی دارای خطر لرزه‌خیزی کمتر نسبت به منطقه قبل است. غرب منطقه علی‌رغم فراوانی خطوط گسلی در مقایسه با دو منطقه قبل، در طبقه کم‌خطرتری قرار می‌گیرد. نتایج حاصل، گویای راهبرد سیاست استفاده از زمین برای توسعه و فعالیت‌های شهری و زیرساخت‌های حیاتی و حساس و با نسبت خطر کمتر خواهد بود.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری است و در گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است که بدین وسیله از گروه جغرافیای دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

منابع

- [۱]. احمدآبادی، علی؛ کرم، امیر؛ و پوربشیر، محسن. (۲۰۱۵). «تحلیل هیدروژئومورفولوژی واحدهای پاسخ هیدرولوژی (HRU) در حوضه آبخیز قره‌سو اردبیل»، ژئومورفولوژی کاربردی/ایران، دوره ۳، شماره ۵، ص ۷۳-۵۹.
- [۲]. اسدی، زارع (۱۳۹۴). «برآورد توان لرزه‌زایی گسل‌ها و ارزیابی بزرگای زمین‌لرزه‌های پیش از تاریخ از داده‌های زمین‌لغزش: مطالعه موردی در دره نور (البرز مرکزی)»، علوم زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۵، ص ۶۷-۷۸.
- [۳]. اعظم مابقی، سعیده؛ و حسن‌زاده، سیدرضا (۲۰۱۷). «تجزیه و تحلیل تکتونیک-ژئومورفولوژی حوضه رودخانه درونگر»، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۵، شماره ۴۹، ص ۱۸۸-۱۶۳.
- [۴]. تقوی مقدم، ابراهیم؛ بهرامی، شهرام؛ و زنگنه اسدی، محمدعلی (۲۰۱۷). «کارایی شاخص‌های ژئومورفومتری شبکه زهکشی جهت ارزیابی تکتونیک فعال در حوضه‌های باغرود، بوژان، زاوین و سررود در شمال شرق کشور»، آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۷، شماره ۲۵، ص ۱۲۰-۱۰۳.
- [۵]. ده‌بزرگی، مریم؛ و مؤمنی طارم‌سری، محمد (۱۳۹۵). «فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنه گسلی قم-زفره، ایران مرکزی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۵، شماره ۲ (پیاپی ۱۸)، ص ۱۲۹-۱۱۰.
- [۶]. محمدی، خدیجه (۱۳۹۵)، «پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی شهر کابل»، رساله کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- [۷]. مقیمی، ابراهیم؛ جعفریگلو، منصور؛ یمانی، مجتبی، زمان‌زاده، سیدمحمد؛ و کامرانی دلیر، حمید (۲۰۱۹). «تطبيق لندفرمی و ارزیابی پتانسیل فعالیت‌های تکتونیک و لرزه‌خیزی بخش شمالی زون گسلی قم-زفره»، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره ۵۱، شماره ۲، ص ۲۴۳-۲۲۳.
- [۸]. یمانی، علیزاده (۲۰۱۶). «بررسی فعالیت‌های نوزمین‌ساخت حوضه آبخیز کرج از طریق شاخص‌های ژئومورفیک»، جغرافیای طبیعی، دوره ۹، شماره ۳۱، ص ۱۸-۱.
- [9]. Ahmad, Shabir; Alam, Akhtar; Ahmad, Bashir; Afzal, Ahmad; Bhat, M.I.; Bhat, M. Sultan; Farooq, Ahmad Hakim; & ectonics and Natural Hazards Research Group (2018). "Tectono-geomorphic indices of the Erin basin", NE Kashmir valley, India." *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: pp: 16-30.
- [10]. Ambraseys, Nicholas; & Bilham, Roger (2003). "Earthquakes in Afghanistan", *Seismological Research Letters*, 74(2), pp: 107-123.

- [11]. Chirico, Peter; Stamm, Robert; Moran, Thomas; & Chairhorsky, Alexander (2011). "Summary of the north Takhar placer gold area of interest", Summaries of Important Areas in Mineral Investment and Production Opportunities of Nonfuel Minerals in Afghanistan.
- [12]. Donadio, Carlo; Brescia, Massimo; Riccardo, Alessia; Angora, Giuseppe; Delli Veneri, Michele; & Giuseppe Riccio (2021). "A novel approach to the classification of terrestrial drainage networks based on deep learning and preliminary results on solar system bodies", *Scientific Reports*, 11(1), pp: 1-13.
- [13]. Efe, Recep; Ekinçi, Deniz; & Cürebal, İsa (2008). "Erosion analysis of Findikli Creek catchment (NW of Turkey) using GIS based on RUSLE (3d) method", *Fresenius Environmental Bulletin*, 17(5), pp:568-576
- [14]. El Hamdouni, Rachid.; Irigaray, C.; Fernández, Tomas.; Chacón, Jose.; & Keller, Edward (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), pp: 150-173.
- [15]. Field, John Jacob (1994). *Surficial processes, channel change, and geological methods of flood-hazard assessment on fluvially dominated alluvial fans in Arizona*. Diss. The University of Arizona.
- [16]. Gourabi, Abolghasem.; & Yamani, Mojtaba (2011). "Active faulting and quaternary landforms deformation related to the main fault", *American Journal of Environmental Sciences*, 7(5), 441.
- [17]. Gutenberg, Beno, & Charles Francis Richter (1942). "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration", *Bulletin of the Seismological society of America* 32(3), pp: 163-191.
- [18]. https://www.academia.edu/33283514/Institutional_Deliveries_in_Badakhshan_Province_of_Afghanistan
- [19]. https://www.academia.edu/35118452/Badakhshan_A_Socio_Economic_and_Demographic_Profile_With_the_financial_and_technical_assistance_of_UNFPA ahim. 2009. Comparative Study of changing Drainage Basins System with Tectonic Forms, Case Study: Lut Block, Iran. *American Journal of Applied Science* 6(6), pp:1270- 1276.
- [20]. Mahmood, Syed Amer; & Gloaguen, Richard (2012). "Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis", *Geoscience Frontiers* 3(4), pp: 407-428.
- [21]. Mahmood, Syed Amer; Shahazd, Faisal; & Gloaguen; Richard (2008). "Monitoring landscape response to tectonic forcings in Central Badakhshan-Hindukush-Pamir region using remote sensing data, Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas. IEEE.
- [22]. Moghimi, Ebrahim (2009). "Comparative Study of changing Drainage Basins System with Tectonic Forms, Case Study: Lut Block, Iran", *American Journal of Applied Science*, 6(6), pp:1270- 1276.
- [23]. Montanari, A.; Young, G.; Savenije, H.H.G.; Hughes, D.; Wagener, T.; Ren, L.L.; Koutsoyiannis, D.; Cudennec, C.; Toth, E.; Grimaldi, S.; Blöschl, G.; Sivapalan, M.; Beven, K.; Gupta, H.; Hipsey, M.; Schaeffli, B.; Arheimer, B.;

- Boegh, E.; Schymanski, S.J.; Di Baldassarre, G.; Yu, B.; Hubert, P.; Huang, Y.; Schumann, A.; Post, D.A.; Srinivasan, V.; Harman, C.; Thompson, S.; Rogger, M.; Viglione, A.; McMillan, H.; Characklis, G.; Pang, Z.; & Belyaev, V. (2013). "Panta Rhei—everything flows: change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022", *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), pp: 1256-1275.
- [24]. Nawaz, Mudassar; Rustam Khan, Muhammad; Farooq, Muhammad, Nazir, Jabir; Khan, Sarfraz; & Bin Nisar; Umair (2019). "Fault seal evaluation of lower sands of Lower Goru Formation by using seismic and well data: A case study of Jherruck block, Lower Indus Basin, Pakistan", *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 52(2), p: 14.
- [25]. Schurr, Bernd; Ratschbacher, Lothar; Sippl, Christian; Gloaguen, Richard; Yuan, Xiaohui; & Mechie, James (2014). "Seismotectonics of the Pamir", *Tectonics*, 33(8), pp: 1501-1518.
- [26]. Sharma, Mahak; Divyadarshini, Ananya, & Singh, Vimal (2019). "Morphotectonic evolution of the Siwalik hills between the Yamuna and the markanda river exits, NW Himalaya", *Journal of the Geological Society of India*, 94(5), pp: 453-463.
- [27]. Shroder, John.; & Weihs, Brandon; (2010). "Geomorphology of the Lake Shewa landslide dam", Badakhshan, Afghanistan, using remote sensing data. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 92(4), pp: 469-483.
- [28]. Tapponnier, Paul; Mattauer, Maurice; Proust, François; & Cassaigneau, Christian (1981). "Mesozoic ophiolites, sutures, and large-scale tectonic movements in Afghanistan", *Earth and Planetary Science Letters* 52(2), pp: 355-371.
- [29]. USGS, M6.2 - Hindu Kush region, Afghanistan, United States Geological Survey, Catalog (1900-2011), 2011.
- [30]. USGS. "M5.6 - central Afghanistan", United States Geological Survey.
- [31]. Vita-Finzi, Claudio (1986). *Recent earth movements: an introduction to neotectonics*, Academic Press.
- [32]. Wheeler, Russell L.; Bufe, Charles G.; Johnson, Margo L.; & Dart, Richard L. (2005). *Seismotectonic map of Afghanistan, with annotated bibliography*, Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.