



## ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه توپراقی

موسی عابدینی<sup>۱\*</sup>، سجاد جوادی علی بابالو<sup>۲</sup>، رئوف مصطفی‌زاده<sup>۳</sup>، امیرحسام پاسبان<sup>۴</sup>

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانش‌آموخته‌ی گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

## چکیده

فرسایش خاک یک فرایند ژئومورفیک غالب است که امنیت غذایی را در بخش‌های وسیعی از کره زمین را تهدید می‌کند. ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه در هیدرولوژی، فرسایش خاک و تولید رسوب نقش مهمی دارد و می‌تواند شاخصی از وضعیت فرسایش و رسوبگذاری حوضه باشد. بنابراین هدف از این پژوهش ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه توپراقی است که با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت استخراج خصوصیات ژئومورفیک حوضه انجام شد. بدین منظور مقادیر فرسایش و رسوب با استفاده از مدل پسیاک اصلاح شده (MPSIAC)، محاسبه شد. هم‌چنین به منظور استخراج خصوصیات فیزیوگرافی و ژئومورفیک (شامل: رطوبت توپوگرافی TWI، قدرت جریان SPI، شیب SLOPE، انحناء دامنه، انحناء پروفیل و انحناء پلان) زیرحوضه‌ها، از مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۳۰ متر و نیز سایر لایه‌های مورد استفاده در مدل MPSIAC شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و نیز نقشه‌های موضوعی: خاکشناسی، پوشش گیاهی و تصاویر ماهواره‌ای، آمار ایستگاه‌های هواشناسی، باران‌سنجی مناطق مجاور حوضه آبریز استفاده شد. نتایج نشان داد که که ارتباط میان مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه معنی‌دار است. علاوه بر این، مقدار فرسایش و رسوب با مقادیر شیب نیز دارای رابطه‌ی معکوس و معنی‌دار هستند. هم‌چنین میان شیب و نیز شاخص قدرت آبراهه رابطه‌ی مثبت و معنی‌دار از نظر آماری وجود دارد. شاخص‌های مرتبط با انحناء دارای تغییرات اندکی در منطقه مورد مطالعه هستند. اما به دلیل توپوگرافی متنوع منطقه، مقادیر شیب دارای تغییرات قابل توجهی در میان زیرحوضه‌ها است.

**کلمات کلیدی:** شاخص پوشش گیاهی، شاخص‌های ژئومورفیک، رطوبت توپوگرافی (TWI)، قدرت جریان (SPI)، تولید رسوب، کوزه توپراقی، شمال غرب ایران.

## ۱- مقدمه

آب و خاک، پایه و اساس حیات بشر به شمار می‌آیند. امروزه فرسایش خاک این منابع بارزش و در نتیجه حیات بشر را تهدید می‌کند؛ بنابراین ارزیابی فرسایش خاک و کنترل آن امری ضروری می‌باشد (عابدینی و طولابی، ۱۳۹۲: ۹۳).

امروزه با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان، اهمیت مطالعات فرسایش خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل بخش توسعه پایدار کشاورزی و تولید غذا و عوارض زیست محیطی آن، بیشتر آشکار می‌باشد (عابدینی، ۱۴۰۰: ۹۳). فرسایش خاک به دلیل اثرات زیست محیطی و اقتصادی آن یک معضل جدی جهانی است که بسیاری از اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کرمی و خطیبی، ۱۳۹۸: ۱۱۶). فرسایش به عنوان منبع اولیه رسوباتی است که رودها را آلوده ساخته و باعث پر شدن سدها می‌شوند به همین دلیل هر جا صحبت از رسوبات می‌شود پدیده فرسایش نیز در کنار آن مطرح شده و در اصل این پدیده فرایندی پیوسته می‌باشند (فرج‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۰). شناخت عوامل موثر در تولید رسوب نقش مهمی را در تعیین مقدار رسوب یک حوضه و درک پدیده فرسایش و عواقب آن به همراه دارد و می‌تواند در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های یک آبریز استفاده شود (شایان و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۸). تاکنون مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک ارائه شده است، از میان این مدل‌ها می‌توان به مدل MPSIAC که درصد اعتبار بیش‌تری دارد اشاره کرد. مدل MPSIAC در اکثر حوضه‌های آبریز کشور کارایی دارد (خیام و همکاران، ۱۳۹۲: ۶). نتیجه تعامل عوامل محیطی یک حوضه، به صورت ویژگی‌های ژئومورفیک قابل مشاهده و اندازه‌گیری است و شاخصی از فرایند فرسایش و رسوبگذاری حوضه محسوب می‌شود که پایه و اساس بررسی‌های منابع طبیعی حوضه‌های آبخیز به شمار می‌رود (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۰۷). ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه‌های آبخیز، به مجموعه عوامل فیزیکی گفته می‌شود که مقادیر آن‌ها برای هر حوضه به نسبت ثابت است و وضع ظاهری حوضه آبخیز را نشان می‌دهد (آبدیده و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۴-۳۵). هدف اصلی به کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک و اندازه‌گیری پارامترهای مورفومتریک، مطالعه اشکال و ناهمواری‌های سطح زمین به صورت کمی و عددی است. ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه‌های آبخیز در سه گروه خطی، پستی و بلندی و سطحی طبقه‌بندی می‌شود (معتمدی و آذری، ۱۳۹۶: ۸۳). علاوه بر این، ویژگی‌های ژئومورفیک به ویژگی‌های توپوگرافی اولیه، ثانویه و ترکیبی نیز تفکیک می‌شود. ویژگی‌های توپوگرافی اولیه شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب حوضه و ویژگی‌های توپوگرافی ثانویه که از ویژگی‌های اولیه مشتق شده‌اند، شامل پروفیل انحنا و پلان انحنا است (مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳: ۵۸). ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های آبخیز بخش مهمی از مطالعات ژئومورفیک، فرسایش و رسوب است و اثر تعیین‌کننده‌ای بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی دارد. در دهه‌های اخیر با سهولت دسترسی به مدل‌های

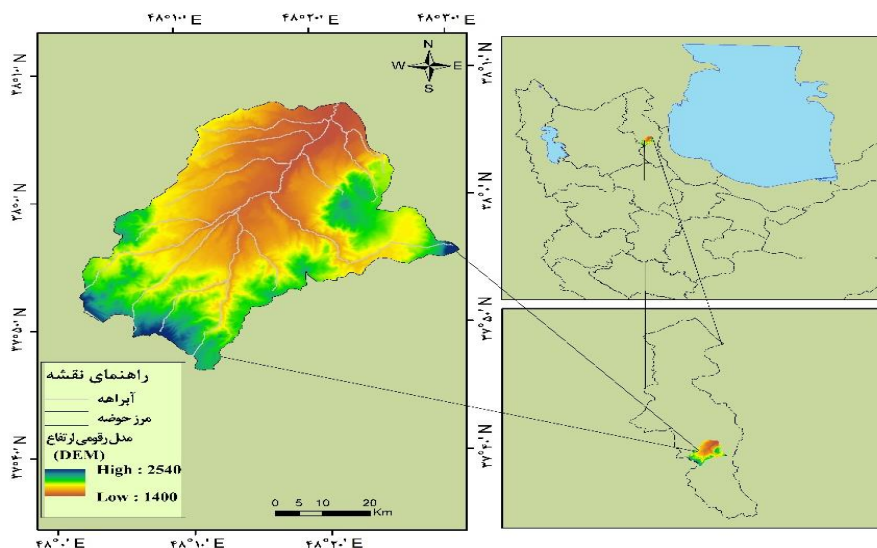
رقومی ارتفاع و تصاویر سنجش از دور محاسبه ویژگی‌های حوضه آبخیز تسهیل شده است (Soni, 2017: 2089). پوشش گیاهی یکی از عوامل مهم در کاهش فرسایش خاک به واسطه ربایش قطرات باران توسط تاج پوشش و کاهش انرژی جنبشی آن شده که موجب حفاظت خاک می‌شود. هم‌چنین یک خاک پوشیده از گیاهان متراکم، حداکثر مقاومت را در برابر جریان آبی دارد بنابراین در زمینی که گیاهان متراکم داشته باشد، حتی با وجود بارندگی‌های شدید و شیب‌های تند امکان تولید فرسایش وجود نخواهد داشت و یا در صورت وجود بسیار کم خواهد بود (مقدمی‌راد و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۲۱). تاکنون در زمینه ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب مطالعاتی پژوهشگران زیادی در دنیا به مطالعه پرداخته‌اند. عابدینی و یعقوب نژاداصل (۱۳۹۶) به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه آبریز رودخانه بالیخلو (سد یامچی) با استفاده از مدل فازی پرداختند. آن‌ها برای این منظور از مدل فازی و شاخص‌های تراکم شبکه زهکش، بیش‌ترین میزان بارندگی روزانه، خاک، کاربری زمین، زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع، انحناء پروفیل و انحنای پلانی متریک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حدود ۴۲/۱۶ درصد پهنه‌های با خطر فرسایش بسیار زیاد تا زیاد قرار گرفته است. این پهنه‌ها در واحدهای توپوگرافی دشت‌ها، کوه‌پایه‌ها، کوهستان‌های نسبتاً مرتفع و مرتفع واقع شده‌اند. هم‌چنین حدود ۲۶/۹۳ درصد در پهنه با خطر فرسایش متوسط قرار دارد و ۳۰/۸۸ درصد نیز در پهنه‌های با خطر فرسایش کم و بسیار کم قرار گرفته است. معتمدی و آذری (۱۳۹۶) در پژوهشی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک با رسوب آبریز حوضه‌های منتخب خراسان رضوی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار رسوب تولیدی با ضریب فرم حوضه و متوسط بارندگی سالانه، همبستگی مثبت داشته و در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. هم‌چنین پارامترهای مربوط به شکل حوضه شامل ضریب فرم حوضه، کشیدگی و شاخص شکل به‌ترتیب با ضریب همبستگی ۷۶/۸، ۷۶/۵، و ۷۲ درصد در کنار بارندگی سالانه با ضریب ۷۳/۹ درصد، بیش‌ترین همبستگی را با مقدار رسوب حوضه‌ها داشته‌اند. شهبازی و همکاران (۱۳۹۹) با هدف مقایسه برخی از آستانه‌های فرسایش خندقی در دو منطقه صحنه و قصرشیرین در استان کرمانشاه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت‌هایی در مشخصات مهم مورفومتری در آستانه توپوگرافی خندق‌های مورد بررسی در دو منطقه مورد مطالعه به‌دلیل شرایط متفاوت در نوع سازند زمین‌شناسی، توپوگرافی و پوشش گیاهی وجود دارد. لوکا و همکاران (۲۰۰۷) ارتباط بین رطوبت توپوگرافی و خصوصیات توپوگرافی را بررسی و اثبات کردند که توپوگرافی کنترل‌کننده‌ی توزیع مکانی رطوبت خاک، پوشش گیاهی، شوری خاک و بافت خاک است. گین و همکاران (۲۰۰۹) برای محاسبه شاخص رطوبت توپوگرافی از چهار نوع حوضه مصنوعی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که خطای شاخص رطوبت توپوگرافی به‌طور کلی پایین است. هم‌چنین یک روش

کاربردی جدیدی را در یک حوضه کشاورزی دیگر (۶۰ کیلومترمربع) در ننجینگ شمال شرقی چین مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که توزیع شاخص رطوبت توپوگرافی با این روش شرایط بهتری از زمین‌های محلی را نشان می‌دهد.

دلایا و پانده (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص مورفومتری در حوضه آبریز پارخا، هیمالیای مرکزی را براساس نظرسنجی از هندوستان به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ ارزیابی کرده‌اند. شاخص‌های توزیع (زبری سطح زمین) نسبت بین برجستگی مطلق و برجستگی نسبی است، در نتیجه دامنه آن یک نتیجه ترکیبی از عوامل مختلف ژئومورفیک است. ضریب همبستگی بین شاخص‌های توزیع و فاکتورهای مذکور نشان می‌دهد که برجستگی نسبی، برجستگی مطلق، شیب متوسط و تراکم زهکشی تأثیر مثبتی بر رشد و توسعه درجه‌بندی متفاوت در حوضه آبریز پارخا دارد. گاجبیه‌آو همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با استفاده از پارامترهای ژئومورفولوژیکی در فرسایش و رسوب حوضه آبریز شاکار پرداخته‌اند. با توجه به برنامه‌ریزی‌های انجام شده برای توسعه یک شاخص ژئومورفولوژیکی در رودخانه شاکار در حوضه نرمادا هند، هدف از مطالعه‌ی ایشان توسعه شاخص‌های ژئومورفولوژیکی با استفاده از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی پارامترهای مورفومتری حاصل از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، که توسط محققان میدانی و مدل‌سازی در ارزیابی فرسایش خاک است. شاخص ژئومورفولوژیکی برای منطقه مورد مطالعه از ۳/۶۴ به ۲۱/۶۳ تغییر یافت. جیچ‌آو همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک در کنار روش‌های تفسیر عکس‌های هوایی و سنجش از دور، در مطالعه زمین‌های مهندسی برای شناسایی تغییرات چشم‌اندازهای جغرافیایی و تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات اقلیمی بر شکل‌گیری سیستم‌های تپه‌ای و رودخانه‌ای در حوضه Sorbas (جنوب شرق اسپانیا) پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و تفسیر عکس‌های هوایی در شناسایی محدوده مهندسی و زیستگاه‌های زیست‌محیطی در ارتباط با توسعه‌ی مناطق کوهستانی یک نقشه محدوده‌ی جغرافیایی برای پیش‌بینی خطرات مربوط به زمین و روش‌ها و محدودیت‌های ساخت و ساز به‌دست آمده است. حوضه آبریز کوزه‌توپراقی دارای تنوعی از کاربری اراضی، ناهمواری‌های ژئومورفولوژیکی و عوارض زمینی است. علاوه بر این، بروز فرسایش خاک در اثر عوامل انسانی و نیز بهره‌برداری مفرط از اراضی از مشکلات اصلی این منطقه است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۷). بنابراین هدف از این پژوهش ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه‌توپراقی است.

## ۲- مواد و روش

حوضه آبریز کوزه‌توپراقی به ترتیب با مساحت و محیط  $۸۰۵/۷۰$  کیلومتر مربع و  $۱۴۸/۹۸$  کیلومتر در قسمت جنوبی استان اردبیل و در مختصات جغرافیایی  $۴۸^{\circ}۲۲'۰۱''$  طول شرقی و  $۳۸^{\circ}۰۷'۲۸''$  عرض شمالی واقع شده است. ضریب فشردگی برای حوضه آبریز کوزه‌توپراقی  $۱/۴۷$  است که نشان‌دهنده‌ی کشیده بودن حوضه است. پایین‌ترین و بالاترین ارتفاع حوضه به ترتیب برابر با  $۱۴۰۰$  و  $۲۵۴۰$  متر نسبت به سطح دریا است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کوزه‌توپراقی در سطح ایران و استان اردبیل ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کوزه‌توپراقی در سطح ایران و استان اردبیل

Fig (1): Geographical location of Koozeh Topraghi watershed in Iran and Ardabil province

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل MPSIAC، مقدار فرسایش و رسوب محاسبه شد. بدین ترتیب، در مدل مذکور عوامل ۹ گانه مهم و موثر (زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب و هوا، جریان‌های سطحی، پستی و بلندی، پوشش زمین، کاربری اراضی، شدت فرسایش سطحی، شدت فرسایش رودخانه‌ای) در فرسایش خاک و تولید رسوب ارزیابی می‌شود و در جدول ۱ عوامل موثر در مدل MPSIAC و نحوه امتیازدهی به آن ارائه شده است. در مدل MPSIAC با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، برای هر عامل فرسایش، یک لایه اطلاعاتی تهیه شد و برای هر پیکسل مجموع امتیازها محاسبه می‌شود که این امتیاز براساس توصیه و جدول روش MPSIAC تعیین می‌شود (Johnson and Gabhart, 1994: 6).

در این پژوهش، نقشه‌های توپوگرافی رقومی سازمان نقشه‌برداری در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی و معادن کشور منتشر شده است، نقشه‌های موضوعی از منطقه شامل نقشه‌های خاک‌شناسی، پوشش گیاهی و تصاویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. آمار ایستگاه‌های هواشناسی، باران‌سنجی مناطق مجاور حوضه آبریز، ارتفاع حوضه آبریز، ارتفاع رواناب سالانه و دبی اوج ویژه از دیگر داده‌های مورد نیاز برای مدل MPSIAC است که در تحقیق حاضر استفاده شده است.

جدول (۱): عوامل موثر در مدل MPSIAC و نحوه امتیازدهی به آن (خیام، ۱۳۹۲: ۷)

**Table (1):** Effective factors in MPSIAC model and how to score it (Khayyam, 2013: 7)

ردیف	تشریح شاخص عوامل	نحوه محاسبه امتیاز در مدل MPSIAC	شرح پارامترها
۱	زمین‌شناسی سطحی	$X_1=Y_1$	$X_1$ = حساسیت سنگ‌ها به فرسایش (۰-۱۰)
۲	خاک‌شناسی	$X_2=16/67K$	K عامل فرسایش‌پذیری خاک در معادله جهانی فرسایش
۳	آب و هوا	$X_3=0/2P_2$	$X_3$ بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت دو سال برحسب mm
۴	رواناب	$X_4=0/006R+10QP$	R ارتفاع رواناب سالانه و QP دبی ویژه
۵	توپوگرافی	$X_5=0/33S$	S شیب متوسط حوضه (درصد)
۶	پوشش گیاهی	$X_6=0/2P_b$	$P_b$ درصد اراضی لخت
۷	کاربری اراضی	$X_7=20-0/2P_c$	$X_7$ درصد تاج پوشش گیاهی
۸	فرسایش سطحی	$X_8=0/25SSF$	$X_8$ مجموع امتیازات مدل BLM
۹	فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب	$X_9=1/67SSF_g$	$X_9$ امتیاز عامل هفتم در مدل BLM

#### ۱-۲- محاسبه عوامل ۹ گانه مدل MPSIAC

بر اساس واحدهای سنگی حوضه عامل زمین‌شناسی استخراج شد. پس از رقومی‌سازی واحدهای سنگی، امتیاز حساسیت به فرسایش هر واحد سنگی بین صفر تا ۱۰ لحاظ شد. برای تعیین این ضرایب از امتیازدهی مربوط به مناطق خشک و نیمه‌خشک و هم‌چنین نوع سنگ و وضعیت سختی و هواپدگی استفاده شد (محمودآباد و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۱۵). در خصوص عامل خاک حوضه کوزه‌توپراقی، اطلاعات مورد نیاز همراه با نوع خاک‌های منطقه که شامل چهار نوع خاک (رسی لومی، شنی رسی لومی، شنی لومی، لومی) در حوضه است، به دست آمد که در محیط ArcGIS، نقشه بافت خاک این حوضه تهیه شد. برای محاسبه عامل آب و هوا، داده‌های بارش سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۲ تهیه شد سپس بر اساس روابط مربوطه مقدار این عامل محاسبه شد. برای تعیین امتیاز رواناب و تاثیر آن در تولید رسوب با توجه به نقشه گروه هیدرولوژی خاک، مساحت تحت اشغال هر گروه مشخص و متوسط مقدار آن از طریق میانگین وزنی محاسبه شد.

شیب، پستی و بلندی و ارتفاع، جهت اندازه دامنه‌ها و سایر پارامترهای فیزیکی حوضه آبریز از موارد اساسی هستند که برای توپوگرافی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در روش MPSIAC، امتیازات آن بین صفر تا ۲۰ در نظر گرفته شد. جهت استخراج پارامتر شیب، ابتدا نقشه توپوگرافی از منطقه تهیه شد و سپس در محیط GIS، به نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) تبدیل شد و نقشه شیب منطقه به‌دست آمد.

عامل پوشش زمین، خود یکی از پارامترهای اساسی در مدل MPSIAC، برای برآورد رسوب و فرسایش است. برای این عامل درجه رسوب‌دهی بین ۱۰- تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. امتیاز عامل پوشش زمین، درصدی از اراضی لخت و بدون پوشش است که با توجه به نقشه و گزارش پوشش گیاهی منطقه و بازدیدهای صحرایی، مساحت تحت اشغال هر گروه مشخص و مقدار متوسط آن از طریق میانگین وزنی محاسبه شد.

برای عامل کاربری اراضی در پژوهش حاضر، نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز کوزه‌توپراقی با استفاده از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای سال ۲۰۱۸ استفاده شده است. پس از انجام تصحیحات رادیومتریک در محیط ENVI، اقدام به کلاس‌بندی شده است. بر این اساس، حوضه آبریز مورد مطالعه در هشت طبقه اصلی مناطق مسکونی، اراضی جنگلی، مراتع ضعیف، مراتع خوب، کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، دریاچه و اراضی بایر طبقه‌بندی شده است.

برای تعیین ضریب عامل وضعیت فرسایش در حوضه آبریز ۷ عامل دخالت داده شده که عبارت‌اند از فرسایش سطحی، لاشبرگ سطحی، پوشش گیاهی، آثار تخریب خاک و گیاه، فرسایش شیاری و ابعاد آن، جریان‌های سطحی و رسوبات آن، اشکال فرسایش خندقی و درصد آن محاسبه شد.

امتیاز مربوط به عامل فرسایش خندقی بین صفر تا ۲۵ در نظر گرفته می‌شود. نتیجه با توجه به بازدیدهای صحرایی از حوضه‌های آبریز و مساحت تحت اشغال آن‌ها از طریق میانگین وزنی محاسبه می‌شود.

تلفیق لایه‌های ۹ گانه مدل MPSIAC و تهیه نقشه رسوب: لایه مربوط به درجه رسوب‌دهی، در مدل MPSIAC از تلفیق عوامل ۹ گانه تهیه شد. پس از تلفیق نقشه‌ها و مطالعات زمین‌شناسی، کاربری اراضی و تهیه نقشه واحد کاری، هر یک از عوامل موثر در فرسایش در واحدهای کاری مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با میانگین‌گیری به صورت وزنی، امتیاز هر یک از عوامل در منطقه و زیرحوضه‌ها محاسبه شد. در ادامه برای هر واحد کاری درجه رسوب‌دهی از حاصل جمع نمرات عوامل ۹ گانه (R) محاسبه شد و برای هر یک از زیرحوضه‌ها میزان فرسایش و تولید رسوب برحسب مترمکعب در هر کیلومتر مربع محاسبه شد. در جدول ۲، کلاس رسوب‌دهی و فرسایش خاک در مدل MPSIAC ارائه شده است.

جدول (۲)، کلاس رسوب‌دهی و فرسایش خاک در مدل MPSIAC (دیوسالار، ۱۳۹۲: ۱۰۷).

**Table (2):** Class of sedimentation and soil erosion in MPSIAC model (Divasalar, 2013: 107).

نمرات نشان‌دهنده‌ی	تولید رسوب سالانه		شدت رسوب‌دهی	کلاس رسوب‌دهی و فرسایش
	تن در کیلومتر مربع	متر مکعب در کیلومتر مربع		
شدت رسوب‌دهی >۱۰۰	>۲۱۴۳/۵	>۱۴۲۹	خیلی زیاد	V
۱۰۰-۷۵	۲۱۴۳/۷۳۴-۵	۱۴۲۹-۴۷۶	زیاد	IV
۷۵-۵۰	۳۵۷-۷۱۴	۴۷۶-۲۳۸	متوسط	III
۵۰-۲۵	۱۴۲-۳۵۷/۵	۲۳۸-۹۵	کم	II
۲۵-۰	<۱۴۲/۵	<۹۵	خیلی کم یا جزئی	I

#### ۲-۲- متغیرهای ژئومورفیک

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): نظریه شاخص رطوبت توپوگرافی اولین بار به وسیله بون و کرکی (۱۹۷۹) در مدل بارش-رواناب TOPMODEL معرفی شد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند (پیروزی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶: ۲). TWI در مقایسه با ویژگی‌های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص قدرت جریان، در بسیاری از موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی دقیق، استفاده می‌شود که نمونه‌هایی از این کاربردها شامل، استفاده از نقشه TWI به عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به خصوص در اراضی تپه ماهوری، ترکیب TWI و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب)، با یکدیگر به عنوان ورودی برای تهیه نقشه رقمی خاک برای پیش‌بینی توزیع مکانی نوع و ویژگی‌های خاک، در مقیاسی بهتر است (Qin et al, 2009: 33). شاخص رطوبت توپوگرافی به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه شده است (Moore et al, 1991: 13).

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad (1)$$

در رابطه ذکر شده  $A_s$  سطح ویژه حوضه بر حسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)،  $\beta$  درجه شیب است. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (برحسب  $A_s$ ) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (برحسب  $\tan \beta$  به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند.

شاخص قدرت جریان (SPI): قدرت جریان، میزان زمان مصرف انرژی است و به طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به عنوان اندازه‌گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می‌شود. هم‌چنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع شده را محاسبه می‌کند و ممکن است برای ارزیابی چشم‌انداز فرسایش بیش از سایر



رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و انحراف جریان می‌شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می‌کند (شارما؛ ۲۰۱۰: ۲۰۳). شاخص قدرت جریان به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود (Sharma, 2010: 203).

$$SPI = A_s \tan B \quad (2)$$

در رابطه ذکر شده  $\tan B$  و  $A_s$  هستند به ترتیب منطقه خالص حوضه و شیب محلی هستند.

در این پژوهش از شاخص‌های ژئومورفیک برای بررسی ویژگی‌های فرمی سطح زمین استفاده شد.

انحناء دامنه (Curvatur): انحنای شکل یا انحنای شیب حوضه زهکشی را در جایی نشان می‌دهد که به نمایش فرایندهای فرسایش و رواناب کمک می‌کند. مقادیر انحنای نمایه، مورفولوژی توپوگرافی را نشان می‌دهد که دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است انحنای مثبت به صورت یک مقعر رو به بالا و انحنای منفی نشانگر محدب رو به پایین است هم‌چنین مقدار صفر نشان دهنده سطوح صاف است (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷: ۱۰۶). از این رو شاخص انحناء شکل با استفاده از DEM با ابعاد  $20 \times 20$  در محیط ArcMap تهیه گردید و در نهایت سه لایه شامل curvature, profile Curvatur, Plan curvature ایجاد گردید و به صورت رابطه ۳ ارائه می‌شود.

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3)$$

انحناء پروفیل (Profile Curvator): انحناء پروفیل معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و بنابراین انحناء پروفیل نشان دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. به طوری که مقدار منفی این انحناء سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد (Paik, 2000: 9). شاخص انحناء پروفیل به صورت رابطه‌ی ۴ ارائه شده است.

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2e^2))^{1.5} \quad (4)$$

انحناء پلان (Plan Curvator): انحناء پلان، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی است بنابراین نشان دهنده‌ی واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده‌ی خط الراس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷: ۱۰۶). شاخص انحناء پلان به صورت رابطه‌ی ۵ ارائه شده است.

$$n \times g(b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad (5)$$

در کلیه این روابط  $g$  قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع و  $n$  ابعاد پنجره متحرک است. شاخص پوشش گیاهی (NDVI): شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) پر کاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فن آوری سنجش از دور به دست می آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه‌ی ۶ است (آرمین و همکاران، ۱۳۹۹: ۴۶).

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (6)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می دهد. مقادیر NDVI بین -۱ و +۱ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون قرمز (IR) (باند ۴ لندست) در مقایسه با بخش طیفی مرئی قرمز (R)، (باند ۳ لندست) انعکاس بیش تری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی مانند مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین ۰/۱+ و ۰/۱- را نشان می دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) برای محاسبه داده های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست توده سطح زمین دارد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹: ۱۰). بدین ترتیب، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده NDVI برای حوضه مورد مطالعه تهیه شد.

شیب (Slope): شیب در یک محیط شبکه سلولی GIS، در یک ماتریس ۳×۳، برای سلول میانی محاسبه می شود و دلیل آن هم این است که شیب در طبیعت مربوط به خیز زمین و اثر سلول های مجاور مربوط می شود. شیب متوسط حوضه، میانگین مقدار شیب همه سلول های تشکیل دهنده حوضه است (حصاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۵؛ مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۴۵). نقشه شیب منطقه مورد مطالعه در محیط نرم افزار ArcGIS، از روی نقشه‌ی DEM به دست آمد.

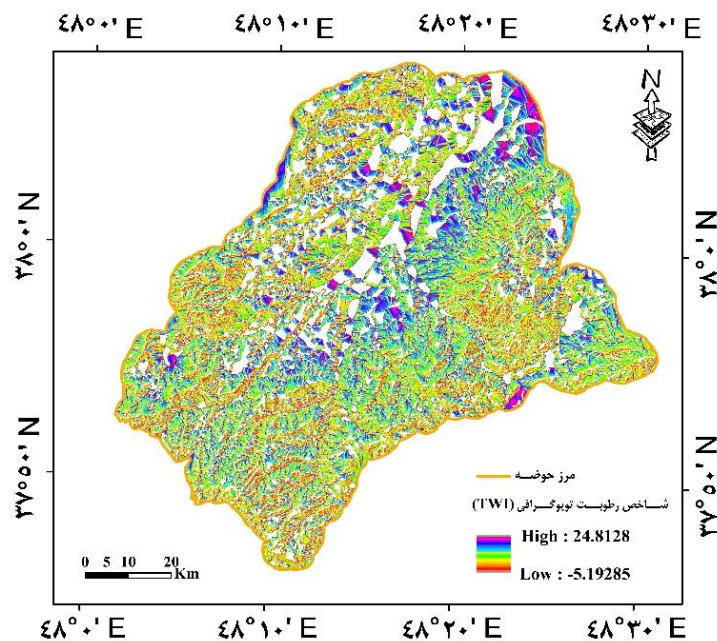
### ۳-۲- ارتباط میان شاخص های استخراج شده با مقادیر فرسایش و رسوب

در این بخش رابطه میان فرسایش و رسوب و شاخص های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با استفاده از همبستگی پیرسون و نمودار جعبه ای در محیط برنامه نویسی R ترسیم و مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار جعبه ای در ساده ترین شکل آن، دارای پنج نمونه آماری حداقل، چارک پایین، میانه، چارک فوقانی و حداکثر در یک نمایشگر

بصری را نشان می‌دهد. این نمودار یک مستطیل است که نیمی از وسط نمونه را محصور می‌کند و انتهای آن در هر چهار گوش است.

### ۳- یافته‌ها و بحث

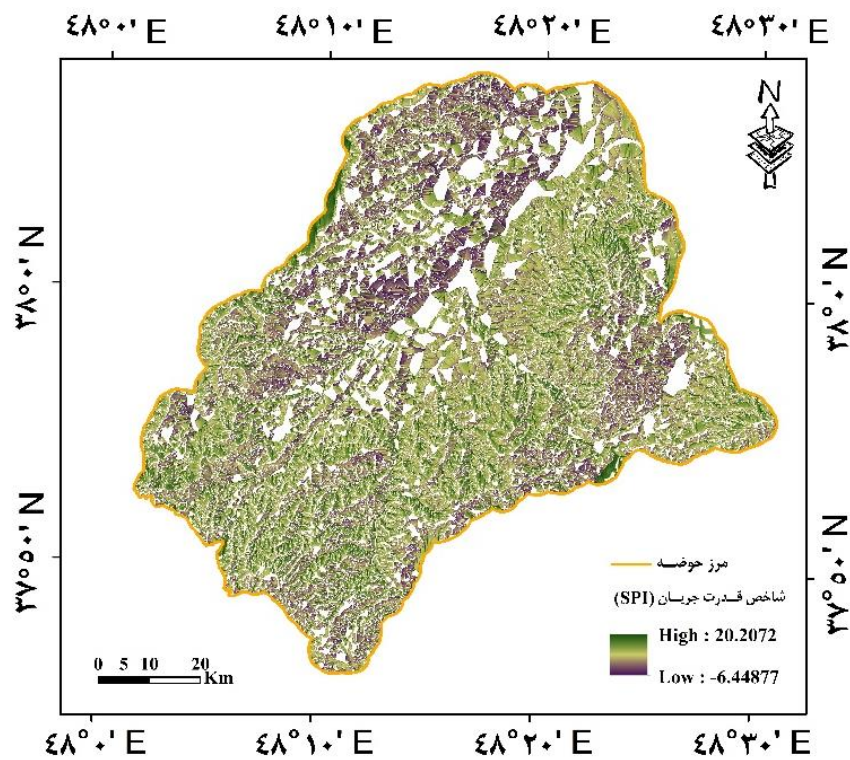
شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی، برای توصیف شرایط رطوبتی، در مقیاس حوضه است. بدین ترتیب، مناطق اشباع سطحی و توزیع پراکندگی رطوبت خاک در حوضه‌ها را با فرض برابر بودن شیب آب زیرزمینی و شیب سطحی زمین، تخمین می‌زند. توزیع همگن از شرایط خاک برای محاسبه رطوبت توپوگرافی خاک صورت گرفت. توزیع فضایی شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه آبریز کوزه توپراقی در شکل ۲ ارائه شده است. مقدار این شاخص در محدوده ۵/۱۹- تا ۲۴/۸۱ است. شکل ۲، نشان می‌دهد که مقدار بالای این شاخص، بیش‌تر در قسمت بالادست حوضه به سمت مرکز حوضه و هم‌چنین قسمت شرقی حوضه (سطح هموار و صاف) یافت می‌شود، در حالی که مقادیر کم در قسمت غرب و جنوب غربی و بخشی از جنوب شرقی حوضه آبریز (مناطق شیب‌دار و ناپایدار)، معمول است. به عبارتی مناطقی که در آن‌ها مقدار بالای این شاخص نشان داده می‌شود حائز اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش، روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا است.



شکل (۲): نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، در حوضه آبریز کوزه توپراقی

Figure (2): Topographic Moisture Index (TWI) map in the Koozeh Topraghi watershed

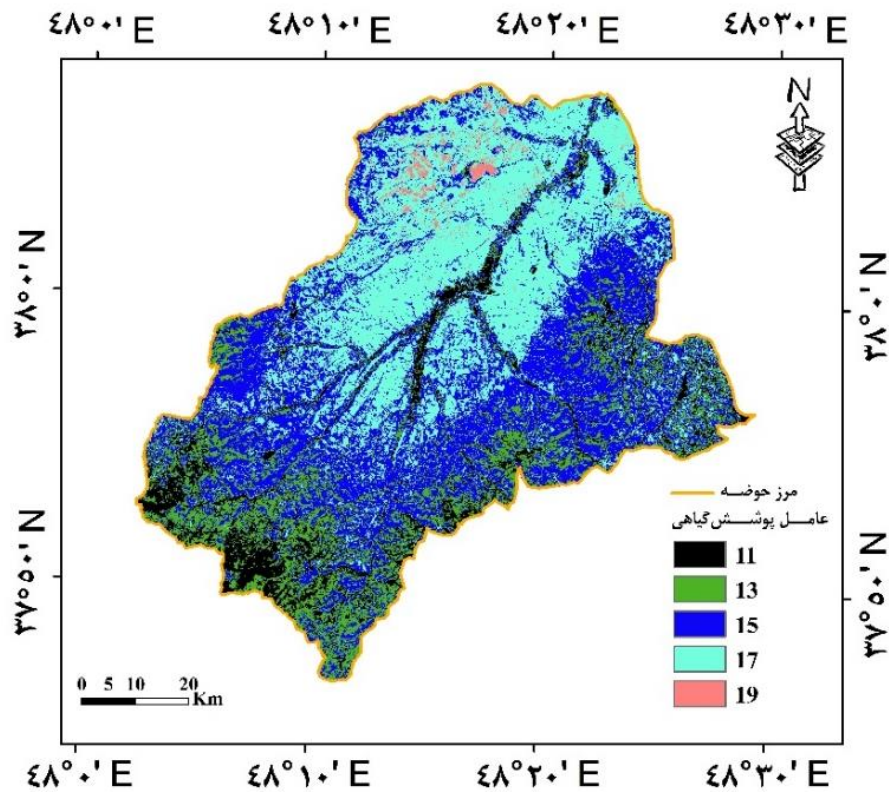
شاخص قدرت جریان (SPI): شاخص قدرت جریان (SPI)، برای کمی کردن اثر توپوگرافی به فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده می شود. این فرایند قدرت فرسایندهی آب را اندازه گیری می کند و مانند شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) خطوط جریان یکسان را پیش بینی می کند. مقادیر SPI در حوضه آبریز کوزه توپراقی در محدوده ۶/۴۴- تا ۲۰/۲۰ است. به دلیل این که شاخص قدرت جریان به طور مستقیم با پتانسیل فرسایش سازگاری دارد، در مناطقی که شدت زیاد SPI حاکم است، فرسایش زیاد دیده می شود، در حالی که مقدار کم تر این شاخص، نشان دهنده سطح پتانسیل رسوب است. شکل ۳، نشان می دهد که مقادیر بالای شاخص قدرت جریان SPI، بیش تر در قسمت شمال شرقی، جنوب و جنوب شرقی حوضه قابل مشاهده است.



شکل (۳): شاخص قدرت جریان (SPI)، در حوضه آبریز کوزه توپراقی  
Figure (3): Current strength index (SPI), in the Koozeh Topraghi watershed

شاخص پوشش گیاهی (NDVI): شاخص پوشش گیاهی به عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می شود. در این پژوهش، شاخص پوشش گیاهی عادی به عنوان اندازه گیری تراکم و همچنین پراکندگی پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. تصویر شاخص پوشش گیاهی عادی

برای سال ۲۰۱۸ از داده‌های ماهواره لندست ۸ OLI به‌دست آمد. از این رو مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در حوضه آبریز کوزه‌توپراقی در دامنه بین ۱۱ تا ۱۹ است. شکل ۴، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، حوضه آبریز کوزه‌توپراقی را نشان می‌دهد.

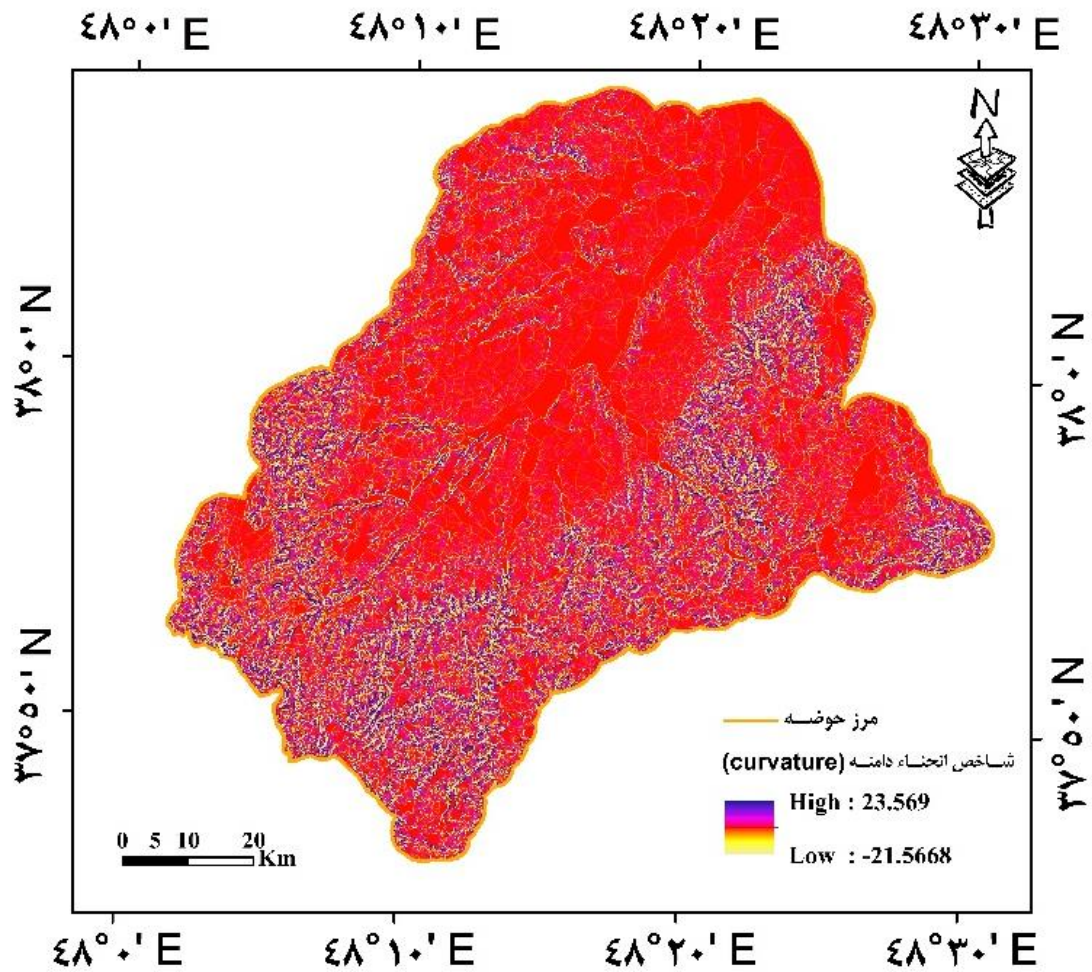


شکل (۴): شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، منطقه کوزه‌توپراقی

Figure (4): Vegetation index (NDVI), Koozeh Topraghi area

### ۳-۱- شاخص‌های ژئومورفومتری

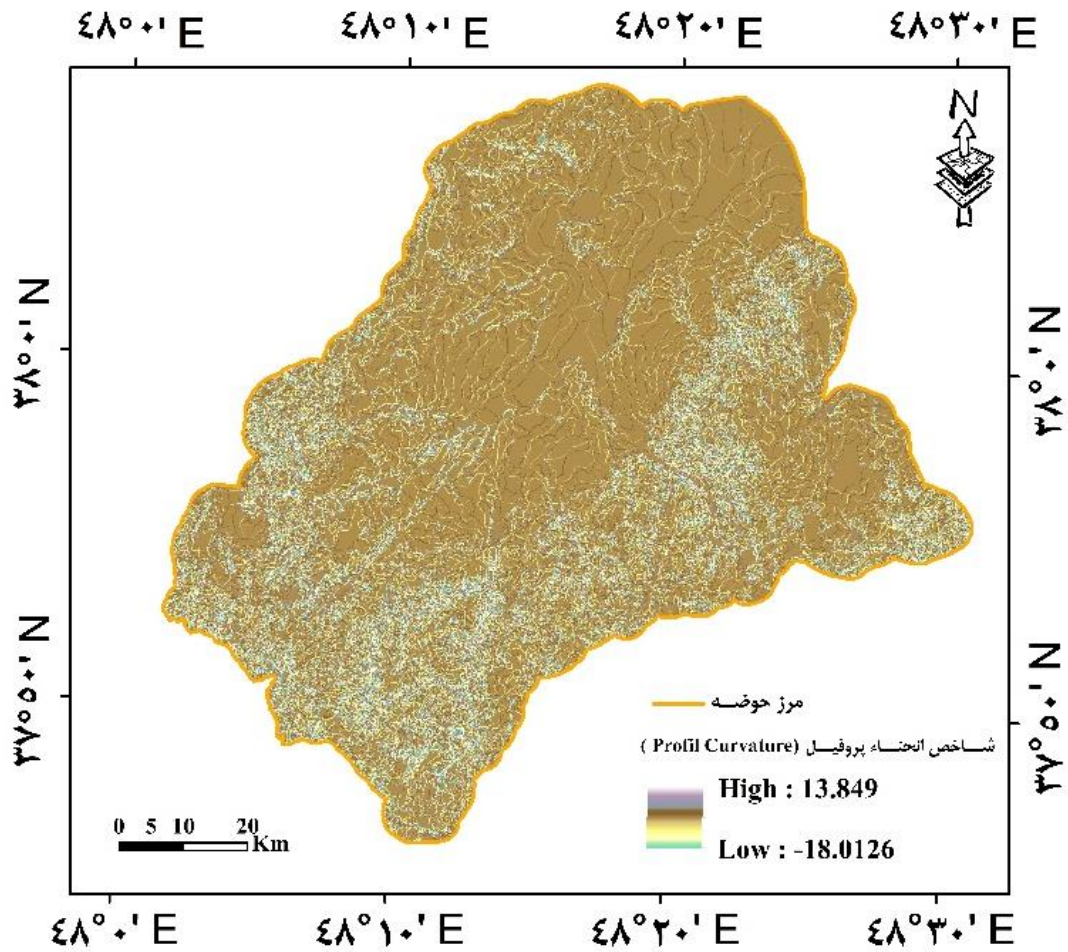
شاخص انحنا دامنه (Curvature): انحنا نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف سطح از صاف بودن است و یا به‌عبارتی دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. از شاخص انحنا برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین می‌توان استفاده نمود. از این رو شاخص انحنا دامنه برای حوضه آبریز کوزه‌توپراقی تهیه شد که در شکل ۵، ارائه شده است.



شکل (۵): نقشه شاخص انحناء دامنه (Curvature) برای حوضه آبریز کوزه توپراقی

Figure (5): Curvature Indicator Map for Koozeh Topraghi Water Basin Watershed

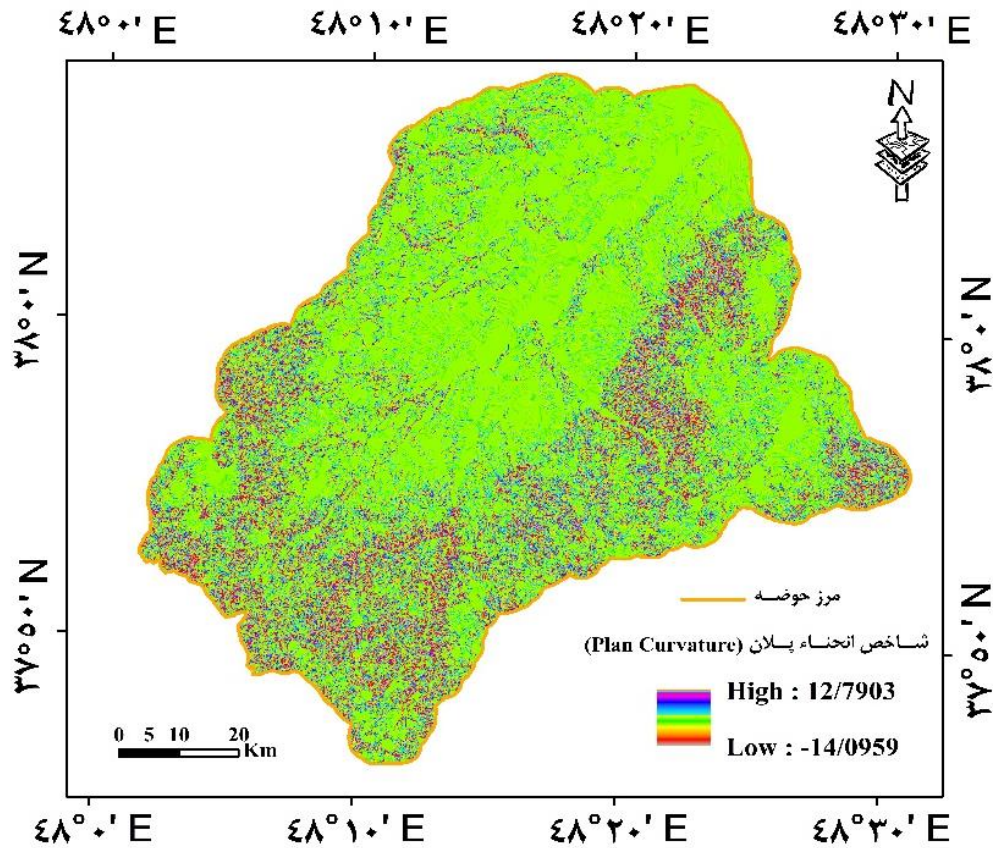
شاخص انحناء پروفیل (Profil Curvature): انحناء پروفیل معرف اندازه‌ی تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحناء معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. شکل ۶، شاخص انحناء پروفیل حوضه آبریز کوزه توپراقی را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نقشه شاخص انحناء پروفیل (Profile Curvature) حوضه آبریز کوزه‌توپراقی

Figure (6): Profile Curvature Index Map in the Koozeh Topraghi Watershed

شاخص انحناء پلان (Plan Curvature): این شاخص نشان‌دهنده‌ی واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط‌الراس‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شکل ۷، شاخص انحناء پلان حوضه آبریز کوزه‌توپراقی را نشان می‌دهد.

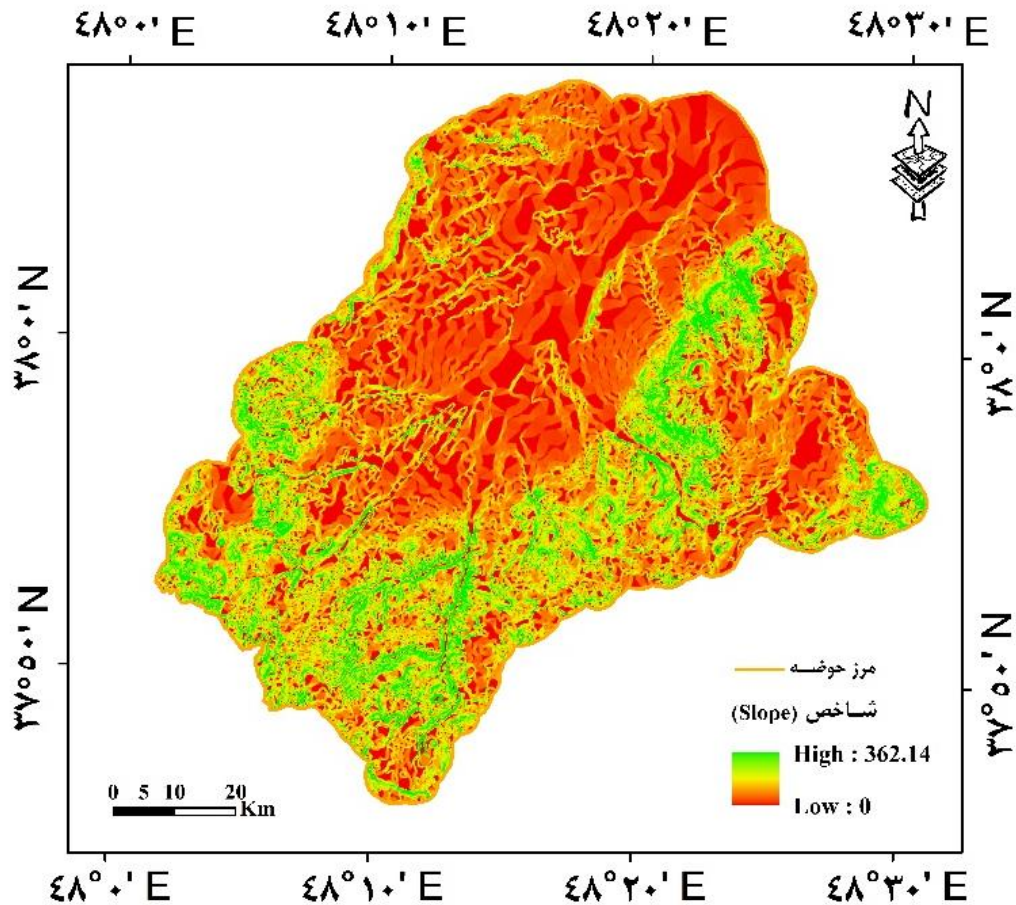


شکل (۷): نقشه شاخص انحنا پلان (Plan Curvature) در حوضه آبریز کوزه توپراقی

Figure (7): Plan Curvature index map in the Koozeh Toopraghi watershed

شاخص Slope: شاخص slope یکی دیگر از شاخص‌های شکل زمین است که برای حوضه مورد مطالعه این شاخص به دست آمده و مطابق شکل ۸، نشان داده شده است که بیشترین مقدار شیب را در مناطق پایین دست حوضه آبریز نشان می‌دهد. و مناطق با شیب کم بیش‌تر در قسمت‌های بالادست حوضه و نزدیک به کاربری‌های دیم و مناطق مسکونی احداث شده است.





شکل (۸): نقشه شاخص شیب (Slope)، در حوضه آبریز کوزه توپراقی

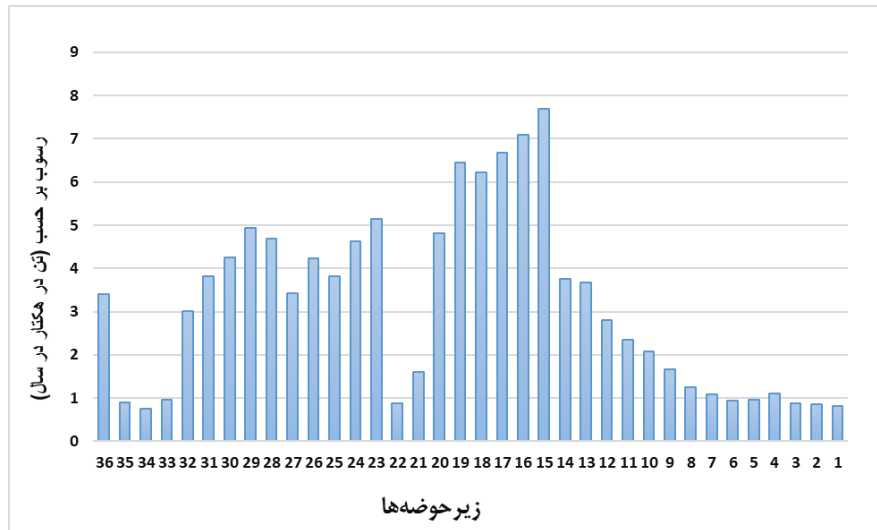
Figure (8): Slope index map, in the Koozeh Topraghi watershed

بعد از برآورد فرسایش و رسوب حوضه کوزه توپراقی، برای شاخص‌های تعیین‌شده در این تحقیق نقشه تهیه شده و میانگین هر یک از شاخص‌ها به صورت جداگانه برای هر ۳۶ حوضه مورد مطالعه به دست آمد. شاخص پوشش گیاهی که مقادیر آن بین -۱ و +۱ متغیر است و همچنین شاخص متغیرهای توپوگرافی و ژئومورفومتری که میانگین آن‌ها استخراج شده و به صورت جدول ۳، ارائه شده است. همچنین نتایج ارزیابی رسوب بر اساس مقیاس زیرحوضه‌ها نیز در شکل ۹ ارائه شده است.

جدول (۳): میانگین به دست آمده برای شاخص‌های مورد مطالعه در زیرحوضه‌های آبریز کوزه توپراقی

**Table (3):** Mean obtained for the studied indices in the sub-basins of Koozeh Topraghi watershed

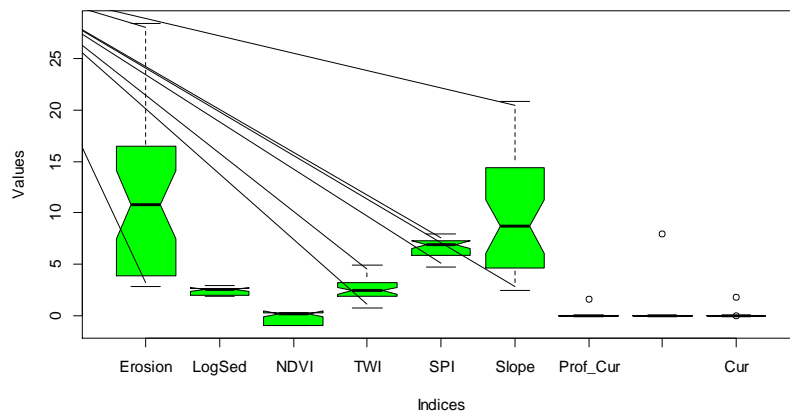
Curvature	Plan Curvature	Profi Culvature	Slope	Spi	Twi	NDVI	زیرحوضه‌ها
0	0	0	19/26	7/28	1/57	-1	1
0	0	1/59	10/48	6/58	2/12	-1	2
0	0	0	13/75	6/52	1/47	-1	3
0	0	0	20/32	6/6	0/77	0/28	4
0	0	0	17/56	7/78	2/34	0/26	5
0	0	0	15/73	7/61	2/35	-1	6
0	-4/72	0	5/69	7/13	3/97	0/21	7
0	0	0	10/13	7/57	3/16	0/24	8
0	0	0	11/27	7/26	2/91	0/21	9
0	0	0	16/15	7/41	2/12	-1	10
0	0	0	15/73	7/91	2/89	0/23	11
0	0	0	8/11	7/24	3/44	-1	12
1/76	0	0	4/12	6/84	3/8	0/2	13
0	0	0	2/79	5/81	3/46	0/18	14
0	0	0	7/2	5/3	1/4	0/16	15
0	0	0	9/23	5/81	1/5	-1	16
0	0	0	3/61	5/43	2/45	0/16	17
0	0	0	4/09	5/78	2/68	0/15	18
0	7/93	0	6/74	6/22	2/35	-1	19
0	0	0	7/87	6/19	2/04	-1	20
0	0	0	14/82	6/76	1/6	-1	21
0	0	0	14/07	7/04	2/02	-1	22
0	0	0	10/94	7/61	3/34	0/18	23
0	0	0	5/86	7/19	3/98	0/17	24
0	0	0	3/39	4/68	1/77	0/18	25
0	0	0	4/6	5/99	2/97	0/15	26
0	0	0	5/54	6/37	3/25	0/23	27
0	0	0	4/2	5/11	2/15	0/16	28
0	0	0	12/81	7/2	2/84	0/2	29
0	0	0	5/43	6/97	3/52	0/23	30
0	0	0	4/66	5/27	2/17	0/17	31
0	0	0	3/62	5/73	2/7	0/24	32
0	0	0	10/11	7/16	2/69	0/23	33
0	0	0	19/05	7/44	1/73	-1	34
-0/05	0	0	20/84	7/59	1/68	-1	35
0	0	0	2/44	7/23	4/88	0/19	36



شکل (۹): نتایج ارزیابی رسوب بر اساس مقیاس زیرحوضه‌ها

Figure (9): Results of sediment assessment based on the sub-basin scale

نمودار جعبه‌ای تغییر در مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری و مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه در شکل ۱۰، ارائه شده است.

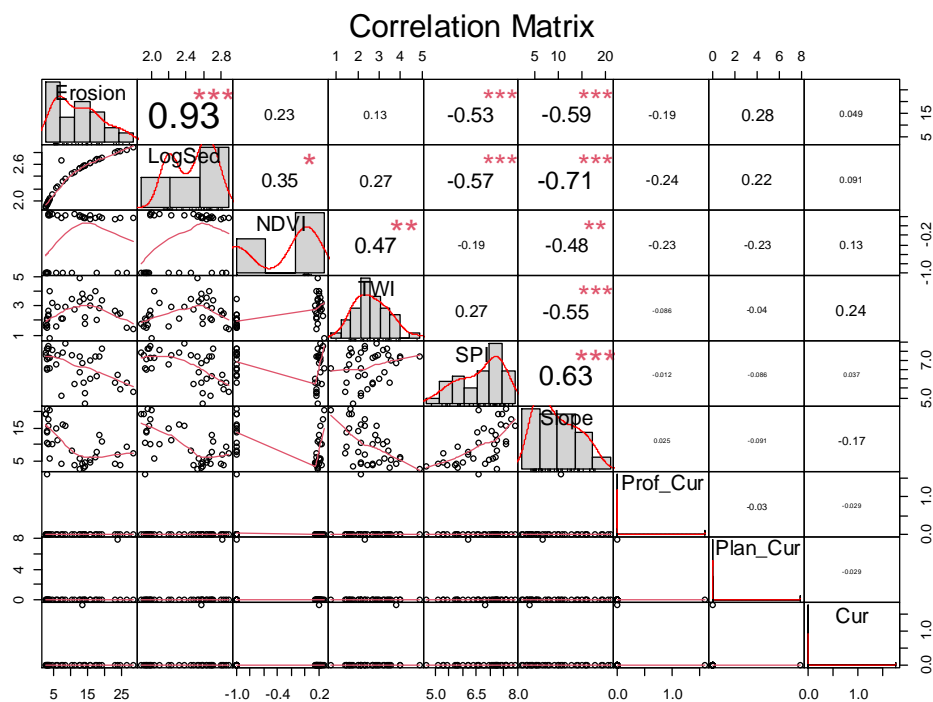


شکل (۱۰): نمودار جعبه‌ای تغییر در مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری و مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Figure (10): Box diagram of changes in vegetation index values and morphometry and erosion and sedimentation rates in the studied sub-basins

بر اساس نمودار جعبه‌ای می‌توان گفت که شاخص‌های مرتبط با انحناء دارای تغییرات اندکی در منطقه مورد مطالعه هستند. اما به دلیل توپوگرافی متنوع منطقه، مقادیر شیب دارای تغییرات قابل توجهی در میان

زیرحوضه‌ها است. تغییرات مقادیر فرسایش خاک را نیز می‌توان ناشی از تفاوت در عامل توپوگرافی و شیب جستجو نمود. در شکل ۱۱، همبستگی میان مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه و نیز مقادیر فرسایش و رسوب محاسباتی ارائه شده است.



شکل (۱۱): نمودار همبستگی مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری و مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

**Figure (11):** Correlation diagram of values of vegetation indices and morphometry and values of erosion and sediment in the studied sub-basins

بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار همبستگی، می‌توان گفت که ارتباط میان مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه معنی‌دار است. علاوه بر این، مقدار فرسایش و رسوب با مقادیر شیب نیز دارای رابطه معکوس و معنی‌دار هستند. همچنین میان شیب و نیز شاخص قدرت آبراهه رابطه مثبت و معنی‌دار از نظر آماری وجود دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه‌توپراقی پرداخته شد. برای این منظور جهت برآورد فرسایش و رسوب حوضه مورد مطالعه از مدل تجربی

پسیاک اصلاح شده (MPSIAC) استفاده شد که در این مدل عوامل ۹ گانه تاثیر گذار شامل (زمین شناسی سطحی، خاکشناسی، آب و هوا، رواناب، توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، فرسایش سطحی، فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب) که در فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه‌های آبریز بسیار حائز اهمیت هستند در محیط ArcGIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در مرحله بعد شاخص‌های ژئومورفیک مورد استفاده در این پژوهش که شامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، قدرت جریان (SPI)، شیب (SLOPE)، انحناء دامنه، انحناء پروفیل، انحناء پلان و هم‌چنین شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد پردازش قرار گرفتند و در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که ارتباط میان مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه معنی‌دار است. علاوه بر این، مقدار فرسایش و رسوب با مقادیر شیب نیز دارای رابطه‌ی معکوس و معنی‌دار هستند. هم‌چنین میان شیب و نیز شاخص قدرت آبراهه رابطه‌ی مثبت و معنی‌دار از نظر آماری وجود دارد. شاخص‌های مرتبط با انحناء دارای تغییرات اندکی در منطقه مورد مطالعه هستند. اما به دلیل توپوگرافی متنوع منطقه، مقادیر شیب دارای تغییرات قابل توجهی در میان زیرحوضه‌ها است. تغییرات مقادیر فرسایش خاک را نیز می‌توان ناشی از تفاوت در عامل توپوگرافی و شیب جستجو نمود. نتایج این تحقیق مشابه نتایجی است که سایر محققین به آن پرداخته‌اند (یوسفی‌مهرن، ۱۳۹۹: ۳۰)، با هدف بررسی کارایی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی در تهیه‌ی نقشه‌ی فرسایش و ارائه روش‌های کنترل فرسایش پرداختند. ایشان دو نوع طبقه‌بندی شامل فرسایش متوسط و زیاد برای منطقه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که مقدار متوسط فرسایش براساس روش MPSIAC در حوضه موردنظر  $81/4$  تن در هکتار در سال و نسبت تحویل رسوب  $3/74$  و متوسط رسوب حوضه برابر  $58/3$  تن در هکتار در سال برآورد شد. این مقادیر بیانگر این است که فرسایش و رسوب‌زائی متوسط در کل حوضه و مقدار زیاد در بعضی زیرحوضه‌ها مشهود است. در پژوهشی دیگر (شارما، ۲۰۱۰: ۲۰۱)، با هدف تلفیق شاخص‌های شکل زمینی و پوشش گیاهی مناطق خطر فرسایش را در خرچند کشور هند مورد بررسی قرار داد. ایشان با استفاده از شاخص‌های LS-NDVI-SPI-TWI برای سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۸۸ تهیه نموده و پس از تهیه نقشه فرسایش، مقادیر به‌دست آمده را با نتایج مدل RUSLE مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که هم‌خوانی مناسبی (۷۵ درصد) بین نتایج وجود دارد. در مجموع می‌توان گفت که شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی را می‌توان به‌عنوان عوامل مؤثر در بروز فرسایش، در برآورد و مدل‌سازی فرسایش دخالت داد. قابل ذکر است که این عوامل ممکن است در مناطق مختلف متفاوت باشد، لذا تحقیق در خصوص تعیین عوامل مؤثر در اقلیم و شرایط توپوگرافی متنوع می‌تواند در جمع‌بندی‌های نهایی کمک نماید. بر اساس نتایج می‌توان گفت که عاملی مانند پوشش گیاهی را می‌توان به‌عنوان نماینده عوامل انسانی در نظر گرفت و بقیه شاخص‌های ژئومورفیک بیان‌کننده‌ی شرایط فیزیکی و طبیعی منطقه در بروز و یا تشدید فرسایش و تولید رسوب خواهد بود.

#### ۵-منابع

- Abdideh, M., Ghorashi, M., Rangzan, K. & Arian, M. (2011). Relative evaluation of active tectonics using morphometric analysis, a case study of Dez river basin, southwest of Iran, *Journal of Earth Sciences*, 20(80), 33-46.
- Abedini, M. (1400). Quantitative investigation of gully erosion and sedimentation using rain erosion indices, linear regression morphometry in Harzandchai watershed, destruction and restoration of natural lands, second year, number 3, pp. 100-111.
- Abedini, M., & Yaghoubjadaseh, N. (2017). Evaluation and zoning of soil erosion risk in Balikhloo river basin (Yamchi dam) using fuzzy model, *Quantitative Geomorphological Research*, 6(1), 137-155.
- Abedini, M., & Toulabi, S. (2016). Modeling of soil erosion and sediment production with three models WEPP, EPM and Fournier in GIS environment (case study: Solachai-Ardebil watershed), *Geographical Research*, 125, 105-93.
- Arkhi, P., & Niazi, Y. (2010). Application of RS and GIS for estimating soil erosion and sediment load using RUSLE model in the upstream basin of Ilam Dam, *Soil and Water Conservation Research*, 17(2), 1-27.
- Babolimovakher, H., Taghian, A., R. & Shirani, K., (2018). Evaluation of landslide susceptibility zoning map using a combination of reliability factor and logistic regression using geomorphic indicators, *Quantitative Geomorphological Research*, 7(3), 91-116.
- Divasalar, A., Zabihi, A., Shabani, M., Ebrahimi, Sh., & Hamidian, S. (2012). Estimation of sediment volume and investigation of environmental factors affecting it using MPSIAC model, in GIS environment, case study (Sulqan watershed of Qom). *Journal of Watershed Management*, 4(7), 101-113.
- Farajzadeh Asl, M., Hedaei, A.A., Molashahi, M., Rajabi Rostamabadi, N. (2016). Analysis and comparison of suspended sediment in the Caspian and Central Iran watersheds, *Hydrogeomorphology*, 11, 82-59.
- Ghorbani, A., Hezbavi, Z., Mostafa Zadeh, R., & Alaei, N. (2020). Analysis of the relationship between land features and soil erosion of Koozeh Tapraghi watershed, Ardabil province, *Geography and environmental hazards*, 9(4), 65-91.
- Hesari, B., Bonabi, A., & Jahangir, A. (2018). The effect of spatial resolution of digital elevation model (DEM) on the identification of physiographic characteristics of the basin (Case study: Shahrchay watershed), *Iran Watershed Science and Engineering Journal*, 13(45), 12-22.
- Karmi, F., Khatibi Bayat, M. (2018). Modeling soil erosion and prioritizing sediment production in the Sattar Khan Ahar dam basin using MUSLE and SWAT models, *Hydrogeomorphology*, 18(5), 115-137.

- Khayam, M., Ganmi jabber, M., & Samadzadeh, R. (2013). Comparison of the efficiency of EPM and MPSIAC models in estimating erosion and sediment production of Saezchi-Chay Namin watershed. *Bi-Quarterly Journal of Applied Geomorphology of Iran*, 1(1), 1-15.
- Mahmoudabadi, M., Charkhabi, A., Refahi, H., & Georgian, M. (2005). Erosion risk zoning in Isfahan Golabad watershed using MPSIAC model and GIS, *Agricultural Sciences of Iran*, 36(2), 511-520.
- Moghaddamirad, M., Moayeri, M., H., Abdi, A., & Ghorbani, H. (2018). The effect of vegetation density on runoff and soil erosion between furrow erosion in the forest road excavation trench (Case study: Koohmian-Azadshahr forest), *Soil and Water Conservation Research*, 25(2), 219-233.
- Mokarram, M., & Neghaban, S. (2014). Landfill Classification Using Topographic Position Index (TPI) (Case Study: South Darab County), *Geographical Information Quarterly*, 23(92), 57-65.
- Mostafazadeh, R., Haji, Kh., Esmali Ouri, A., & Nazarnejad, H., (2017). Prioritization of critical sub-basins in terms of erosion and sediment using the Erosion Response Model (WERM) and morphometric analysis (Case study: Basin Rozechai watershed, West Azerbaijan province), *Journal of Watershed Management*, 8(16), 142-156.
- Motamedi, R., & Azari, M. (2018). The relationship between geomorphic features and watershed sediment (Case study: selected sub-basins of Khorasan Razavi), *Environmental Erosion Research*, 28(4), 82-101.
- Ranjbar, M., & Iranmanesh, F. (2007). Investigation of factors affecting geomorphological features and the spread of erosion using RS and GIS (Case study of Cheragh Weiss basin in Kurdistan), *Land Geography*, 14(14), 107-118.
- Shahbazi, Kh., Khosroshahi, M., Heshmati, M., & Qeytouri, M., (2020). Comparison of the role of geological formation and topographic factors in ditches erosion thresholds, *Journal of Watershed Management*, 11(21), 259-268.
- Shayan, S., Zare, G., Yamani, M., Sharifikia, M., & Soltanpour, M., (2013). Analysis of statistical changes in discharge and sediment of the catchment and its application in environmental planning, *Applied Geomorphology of Iran*, 1(2), 50-37.
- Yousefi Moberhan, A. (2020). Efficiency of GIS in preparing erosion map and providing erosion control methods, *application of GIS and remote sensing in planning*, 11(1), 30-43.
- Deolia, R., & Pande, A. (2014). Spatial Distribution of Dissection Index (Erosion Intensity) versus Geomorphological Environment in Parkha Watershed, central Himalaya. *Indian Journal of Geography and Environment*, 14, 10-22.
- Gajbhiye, S., Sharma, SK., & Tignath, S. (2015). Development of a Geomorphological Erosion Index for Shakkar Watershed. *Journal Geological Society of Index*, 86(3), 361-370.
- Geach, M.R., Stoke, M., & Hart, A. (2017). The application of Geomorfic Indices in terrain

- analysis for ground engineering practice. *Engineering Geology*, 217, 122-140.
- Luca, C., & Farrell, R.E. (2007). Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. *Canada Journal of Soil Science*, 1(87), 291-300.
- Lucà, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GISbased gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy, *Geomorphology*, 134, 297-308.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- Pike, R. J. (2000). Geomorphology - Diversity in quantitative surface analysis, *Progress in Physical Geography*, 24, 1-20.
- Qin, Ch.Z., Zhu, A.X., Pei, T., Li, B.L., Scholten, T., Behrens, T., & Zhou, Ch.h. (2009). An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient, *Precision Agriculture*, 12(1), 32-43.
- Sharma, A. (2010). Integrating Terrain and Vegetation Indices for Identifying Potential soil Erosion Risk Area, *Geo-Spatial Information Science*, 13(13), 201-209.
- Soni, S. (2017). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique, *Applied Water Science*, 7(5), 2089-2102.