

بررسی ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و میزان تولید رسوب (مطالعه موردی: حوضه قرنقو در استان آذربایجان شرقی)

صیاد اصغری سراسکانرود* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی.
احسان قلعه - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

چکیده

تجزیه و تحلیل منطقه‌ای بار رسوب رودخانه‌ها بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک و ارتباط آن به خصوصیات حوضه‌های آبخیز در برآورد میزان فرسایش و رسوب از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا هدف از مطالعه حاضر مدل‌سازی رابطه‌ی بین میزان بار رسوب معلق با ویژگی‌های ژئومورفیکی حوضه رودخانه قرنقو است. این تحقیق با هدف استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای استخراج خصوصیات ژئومورفیک حوضه و ارتباط آن با رسوبدهی در ۱۹ زیرحوضه رودخانه قرنقو انجام گرفت. به منظور تعیین ارتباط بین خصوصیات ژئومورفیک با رسوب هر زیرحوضه از تحلیل رگرسیون چند متغیره گام به گام استفاده شد. نتیجه بررسی ارتباط بین خصوصیات ژئومورفیک با رسوب زیرحوضه‌ها نشان داد که مقدار رسوب تولیدی با حجم جریان و ضریب فرم حوضه، همبستگی مثبت داشته و در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین جهت شناسایی عوامل تاثیرگذار بر میزان رسوب حوضه از بین متغیرهای موجود از روش تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوضه به ترتیب ۵۰، ۲۰/۹، ۱۳/۶ و ۷/۵ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کند. در مجموع چهار عامل استخراج شده نهایی توانسته‌اند ۹۲/۲ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کنند.

واژگان کلیدی: رگرسیون گام به گام، تحلیل مولفه‌های اصلی، ویژگی‌های ژئومورفیک، حوضه قرنقو.

مقدمه

فرسایش خاک به وسیله آب، جدی‌ترین شکل تخریب زمین در بسیاری از نقاط جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است که در آن میزان تشکیل خاک معمولاً کمتر از میزان فرسایش خاک می‌باشد که علت این فرسایش سریع خاک، تاثیر سوء استفاده‌های انسانی و استفاده نادرست از خاک‌ها می‌باشد (لیسکوفسکی و کندرسی^۱، ۲۰۱۴، ۲۹۰). به همین دلیل استراتژی‌های کنترل فرسایش خاک مانند کشاورزی ارگانیک، مالچ، اصلاح ارگانیک یا ترویج رها کردن زمین برای جلوگیری از بروز فرسایش زیاد در زمین‌های کشاورزی ضروری است (نوآرا و همکاران^۲، ۲۰۱۶، ۳۳۲). تقریباً ۴۰ درصد از سطح زمین در جهان به عنوان مناطق خشک یا نیمه خشک شناخته شده است. در این مناطق، خاک‌هایی با پوشش گیاهی کم و یا بدون پوشش در معرض بارش باران قرار دارند که با گذشت زمان کوتاه و شدت زیاد مشخص می‌شوند (رایس و هرت^۳، ۲۰۰۸، ۲۸۵). حدود دو سوم سطح زمین ایران (حدود یک میلیون کیلومتر مربع) می‌تواند از خشک به نیمه خشک طبقه‌بندی شود. چرای بیش از حد، تغییر کاربری زمین و شیوه‌های کشت نادرست اغلب عوامل اصلی تخریب شدید زمین و فرسایش خاک در بسیاری از حوزه‌های آبریز در این مناطق می‌باشد (حشمتی، ۲۰۱۰، ۴). فرسایش خندقی آشکارترین شکل فرسایش آب و مهم‌ترین منبع رسوب در حوضه‌های خشک و نیمه خشک در ایران است و قابل مشاهده‌ترین و گسترده‌ترین عامل تخریب خاک در این حوضه است. مشاهدات فرسایش خاک و بار رسوب برای رودخانه‌ها در بسیاری از نقاط جهان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه بسیار کم است (هنگ و سوتسوجی^۴، ۲۰۱۴، ۲۴۵). آگاهی از فرآیند فرسایش خاک و انتقال رسوب به عنوان عامل تاثیرگذار در کاهش حاصل‌خیزی و هدررفت خاک، پرشدن مخازن سدها، گرفتگی و انسداد مجاری آبیاری، گل‌آلود کردن آب رودخانه‌ها و کاهش کیفیت آب از دیرباز مورد توجه کارشناسان علوم زمین بوده است. شناخت عوامل موثر در تولید رسوب نقش مهمی در تعیین مقدار رسوبدهی یک حوضه و درک پدیده فرسایش و عواقب آن را به همراه دارد و می‌تواند در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های یک آبخیز مورد استفاده قرار گیرد (شایان و همکاران^۵، ۲۰۱۳، ۴۲). عوامل مختلفی در جابجایی و انتقال مواد رسوبی رودخانه‌ها تاثیرگذار می‌باشد که شناخت نقش هریک در کمیت و نحوه انتقال رسوب از گام‌های اساسی در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها محسوب می‌شود. شرایط محیطی حوضه مثل آب و هوا، خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و اشکال مختلف دخالت‌های انسانی می‌تواند بر منبع رسوب، انتقال، ذخیره‌سازی، زمان ترسیب و همچنین ارتباط بین منبع رسوب با خروجی حوضه موثر باشد (فراپرس^۶، ۲۰۱۳، ۳۷). خصوصیات فیزیوگرافی حوضه به مجموعه ویژگی‌هایی گفته می‌شود که مقادیر آن‌ها برای هر حوضه در طول زمان نسبتاً ثابت بوده و نشان دهنده وضع ظاهری و مرفولوژیک حوضه آبخیز است. آگاهی از خصوصیات فیزیوگرافی یک حوضه همراه با داشتن اطلاعاتی از شرایط آب و هوایی منطقه می‌تواند تصویر نسبتاً دقیقی از عملکرد کمی و کیفی سیستم هیدرولوژی آن حوضه ارائه دهد. مهم‌ترین خصوصیات فیزیوگرافی یک حوضه عبارتند از مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، شیب، شکل، ارتفاع، پستی و بلندی، مستطیل معادل و زمان (زیگلر و همکاران^۷، ۲۰۱۴، ۲۰۲۵). ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های آبخیز بخش مهمی از مطالعات ژئومورفیک، فرسایش و رسوب می‌باشد و اثر تعیین‌کننده‌ای در ویژگی‌های هیدرولوژیکی دارد. در دهه‌های اخیر به دلیل سهولت دسترسی به مدل‌های رقومی ارتفاع^۷، تصاویر سنجنش از

^۱ Lieskovský & Kenderessy^۲ Novara et al^۳ Ries & Hirt^۴ Heng & Suetsugi^۵ Fryirs^۶ Ziegler et al^۷ Digital Elevation Model (DEM)

دور^۱ و داده‌های خاک به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های رسوب، محاسبه ویژگی‌های حوزه‌آبخیز تسهیل شده است (سانی^۲، 2017، ۲۰۹۵). تاکنون مطالعات متعددی در خصوص نقش عوامل ژئومورفیک و فیزیوگرافی بر رفتار هیدرولوژیک حوضه و به‌ویژه میزان رسوبدهی انجام شده است. از جمله معظمی و فیض‌نیا (۱۳۸۶، ۴) در مطالعه رودخانه جراحی استان خوزستان به مدلسازی میزان رسوب این رودخانه با استفاده روش رگرسیونی چند متغیره پرداختند. نتایج این پژوهش کارایی مطلوب و مناسب روش رگرسیونی چندمتغیر را نشان داد. غلامی و همکاران (۱۳۸۷، ۲۶۶) در مدل‌سازی رسوب ناشی از رگبارها با استفاده از متغیرهای باران و روان‌آب در حوضه آبخیز چهل‌گری استان کردستان مشاهده کردند که مدل‌های رگرسیونی دو متغیره در مقایسه با چند متغیره از کارایی بالاتری برخوردار است. در خارج از کشور نیز ژانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۵، ۲۲) به بررسی ارتباط میان ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه با میزان رسوب در فلات لسی چین پرداختند. در این پژوهش از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای بررسی ارتباط بین ۲۹ ویژگی ژئومورفیک حوضه با میزان رسوب استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای شکل حوضه، ضریب پیچانرودی رودخانه، طول آبراهه اصلی حوضه، مشخصات ارتفاعی، وضعیت بارندگی و شیب به ترتیب بیشترین تاثیر را روی رسوبدهی حوضه دارند. آرس و همکاران^۴ (۲۰۱۶، ۲۲۴۰) فاکتورهای کنترل غلظت رسوب را برای منطقه پامپاس آرژانتین مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه ۲۵ رخداد بارندگی طی ۴ سال در منطقه‌ای به وسعت ۵۶۰ هکتار بررسی شد. در این پژوهش روش رگرسیونی چندگانه برای مدلسازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته خطی قادر به توضیح ۸۵٪ از تغییرات غلظت رسوب است. لامب و تونیولو^۵ (۲۰۱۶، ۵) به کمی‌سازی بار معلق ۳ رودخانه در منطقه شمالی آلاسکا پرداختند. پایش منطقه مورد مطالعه برای ۳ سال به طول انجامید و نمونه برداری بار معلق در اعماق مختلف رودخانه انجام شد و بین میزان بار معلق و پارامترهای حوضه مدلسازی به روش رگرسیونی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که در هر سه رودخانه پارامترهای بارندگی و شکل حوضه تاثیر زیادی در میزان بارر معلق حوضه داشتند.

در مجموع مطالعات مختلف نشان می‌دهد که عوامل موثر در رسوبدهی حوضه بسته به پارامترهای مورد بررسی و شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی حوضه متفاوت می‌باشد. با توجه به اهمیت رسوبدهی حوضه‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک، بررسی روابط بین خصوصیات حوضه با رسوبدهی سالانه نقش مهمی در کنترل رسوب دارد که نیازمند تحقیقات منطقه‌ای می‌باشد. لذا هدف از این پژوهش مطالعه و بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی و وضعیت تغییرات هندسی رودخانه قرنقو در نتیجه فرسایش و رسوبگذاری می‌باشد. از آخرین قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی در استخراج خصوصیات ژئومورفیک حوضه آبخیز و تعیین ارتباط آنها با رسوبدهی در ۱۹ زیر حوضه منتخب در حوضه قرنقو استفاده شده است. بدین منظور از رگرسیون گام به گام جهت تعیین موثرترین پارامترها و تعیین مناسب‌ترین رابطه‌ی آماری بین رسوبدهی معلق و پارامترهای حوضه آبخیز استفاده می‌گردد.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده حوضه آبریز قرنقو بین طول شرقی ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه قرار دارد. رودخانه قرنقو یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه قزل‌اوزن است که از دامنه کوه سهند با حداکثر ارتفاع ۳۷۰۷ متر از سطح دریا واقع در شهرستان هشترود در استان آذربایجان شرقی سرچشمه گرفته و در

^۱ Remote Sensing (RS)

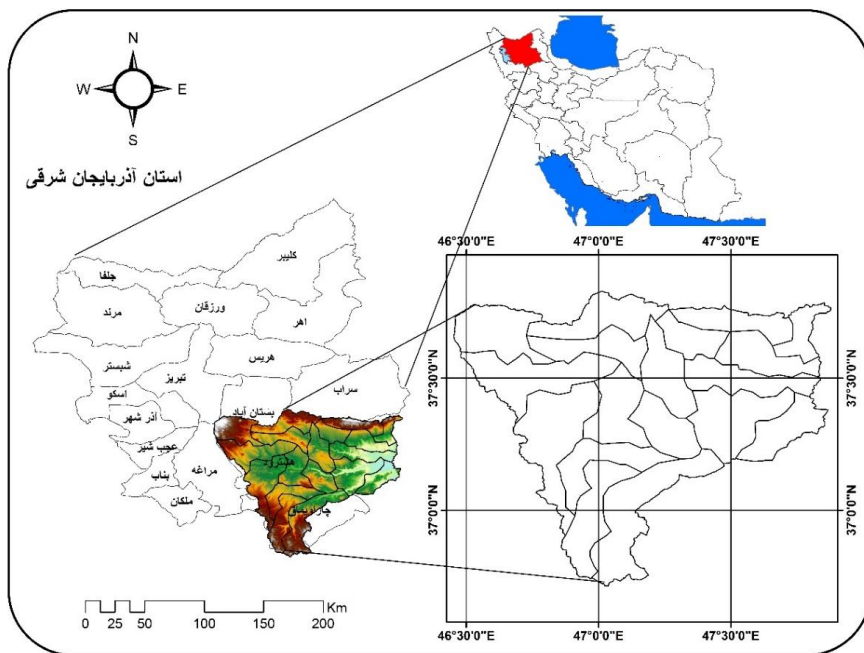
^۲ Soni

^۳ Zhang et al

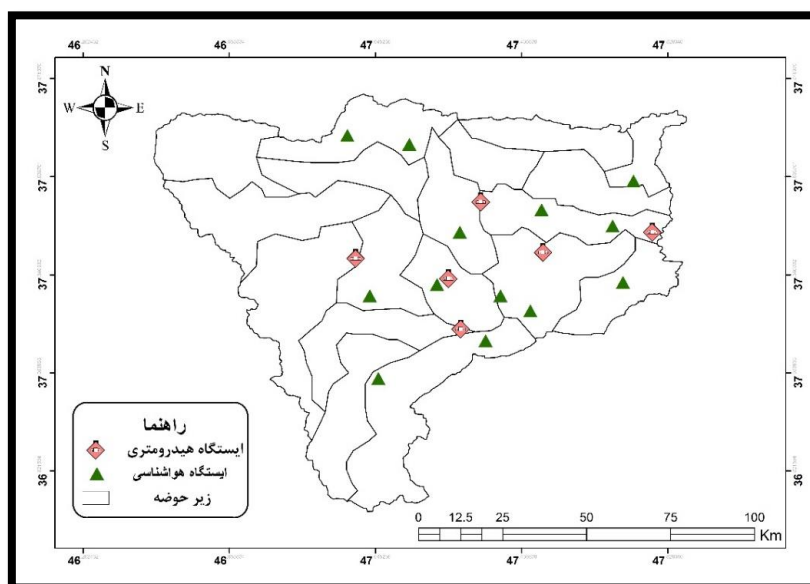
^۴ Ares et al

^۵ Lamb & Toniolo

مسیر حرکت خود با جمع‌آوری سرشاخه‌های کلکان، سراسکنندچای، شورچای بالا و پایین، قلعه جوق، شهرچای و آیدوغموش رودخانه اصلی قرنقو را تشکیل می‌دهد که این رودخانه نیز پس از طی مسافتی و جمع‌آوری جریانات سطحی آبراهه‌های اطراف در نزدیکی شهر میانه با قطع ترانزیتی تهران - تبریز به رودخانه قزل‌اوزن ملحق شده و سپس از طریق رودخانه سفیدرود وارد دریای خزر می‌شود. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را در کشور و استان آذربایجان شرقی و جدول (۱) مختصات جغرافیایی زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و زیر حوضه های رودخانه قرنقو



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی در حوضه آبریز

جدول ۱: مختصات جغرافیایی زیرحوضه‌ها

زیر حوضه‌ها	طول	عرض	زیر حوضه‌ها	طول	عرض
کلکان محل تلاقی با قرنقو	۴۷	۳۷/۲۵	قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن	۴۷/۴۷	۳۷/۲۴

۳۷/۲۴	۴۶/۵۸	قرنقو قبل از تلاقی با کلکان چای	۳۷/۲۴	۴۷/۰۳	قرنقو بعد از تلاقی کلکان چای
۳۷/۲۳	۴۷/۰۴	قرنقو بعد از تلاقی با شور چای	۳۷/۲۳	۴۷/۰۲	شور چای محل تلاقی با قرنقو
۳۷/۲۳	۴۷/۱۱	قرنقو بعد از تلاقی با شور چای	۳۷/۲۳	۴۷/۰۶	سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو
پایین					
۳۷/۲۲	۴۷/۳۰	قرنقو بعد از تلاقی مسیل قلعه جوق	۳۷/۲۲	۴۷/۰۹	قرنقو بعد از سراسکند چای
۳۷/۲۸	۴۷/۴۰	شهرچای قبل از تلاقی با قوری	۳۷/۲۲	۴۷/۱۰	شور چای پایین محل تلاقی با قرنقو
چای					
۳۷/۲۳	۴۷/۴۳	قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای	۳۷/۲۲	۴۷/۲۸	قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو
۳۷/۲۵	۴۶/۵۳	قرنقو سد سهند (گورچینلو)	۳۷/۲۴	۴۷/۳۹	قرنقو ایستگاه تونل هفتم
۳۷/۳۹	۴۶/۴۷	کلکان (سد کلکان)	۳۷/۲۴	۴۷/۴۲	شهر چای محل تلاقی با قرنقو
			۳۷/۲۳	۴۷/۴۳	ایدوغموش محل تلاقی با قرنقو

تهیه داده‌های هواشناسی و هیدرومتری

برای انتخاب زیرحوضه‌های مناسب، آمار دبی و رسوب معلق ایستگاه‌های هیدرومتری و بارندگی روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی از اداره هواشناسی و سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، برای حوضه‌های مورد مطالعه اخذ گردید. در انتخاب ایستگاه‌ها، اولویت با آمار بلند مدت و کامل نمونه‌برداری‌های رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری بوده و ایستگاه‌های باران‌سنجی نیز بر این اساس منطبق گردید. دوره زمانی مشترک مورد استفاده در این تحقیق یک دوره ۳۳ ساله از سال آبی ۶۰ تا سال آبی ۹۳ را شامل می‌شود که در انتخاب این پایه زمانی مشترک معیارهای کامل بودن، طول کافی داده‌ها و استفاده از آخرین داده‌های در دسترس مدنظر قرار گرفت. به منظور بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته، تست نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های شاپیرو-ویلک^۱ و کولموگروف-اسمیرنوف^۲ در نرم‌افزار SPSS 22 انجام شد.

در این پژوهش به منظور استخراج ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع منطقه استفاده گردید. بدین منظور مدل رقومی ارتفاع از سایت سازمان زمین‌شناسی امریکا^۳، مربوط به سنجنده Aster با دقت ۳۰ متر اخذ شد و به افزونه Arc Hydro در نرم‌افزار Arc GIS 10.5 وارد گردید. سپس تصحیحات و پیش‌پرازش‌های سطح‌زمین از قبیل حذف چاله‌های هیدرولوژیکی انجام گردید و الگوی زهکشی زمین تعیین شد. تشریح بخشی از پارامترهای ژئومورفیک ثانویه مورد استفاده در تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: پارامترهای ژئومورفیک ثانویه مورد استفاده در تحقیق (منبع: معتمدی و آذری، ۱۳۹۶).

ویژگی ژئومورفیک	علامت اختصار	رابطه
رتبه آبراهه‌های حوضه	μ	---
تعداد آبراهه	$N\mu$	---
میانگین نسبت انشعاب	ARb	$BR = \left(\frac{N_1}{N_2} + \frac{N_2}{N_3} + \dots + \frac{N_{n-1}}{N_n} \right) \left(\frac{1}{n-1} \right)$
مجموع طول آبراهه	$\sum X$	X: طول آبراهه

¹ Shapiro-Wilk

² Kolmogorov -Smirnov

³ United States Geological Survey (USGS)

$D_d = \frac{\sum X}{A}$	Dd	تراکم زهکشی
$F_s = \frac{N_\mu}{A}$	Fs	فراوانی آبراهه
$R_t = D_d \cdot F_s$	Dt	بافت زهکشی
$F_f = \frac{Area}{L^2}$	Ff	ضریب فرم حوضه
$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	Rc	ضریب گردی
$E = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L}$	Er	ضریب کشیدگی
$S_w = \frac{1}{Ff}$	SW	شاخص شکل حوضه
$L_r = \frac{L^2}{4Area}$	Lr	نسبت لمنیسکیت
$B_F = E_{max} - E_{min}$	Bf	پستی و بلندی حوضه
$Rr = \frac{BF}{L_{SMAX}}$	Rr	نسبت پستی و بلندی
$Rn = B_F \cdot Dd$	Rn	عدد ناهمواری
$DI = \frac{BF}{E_{max}}$	DI	شاخص انشعاب

رگرسیون چندمتغیره گام به گام

در این پژوهش از رگرسیون چندمتغیره گام به گام به عنوان یک تکنیک کاهش دهنده عوامل، جهت انجام تحلیل رگرسیون مورد استفاده قرار گرفت این روش اثر چندین متغیر مستقل روی یک متغیر وابسته را بررسی می‌کند. در رگرسیون چندمتغیره گام به گام، متغیر مستقلی که تاثیر محسوس تری در ارتباط با متغیر وابسته ندارد از تحلیل حذف و به معادله وارد نمی‌گردد. شکل کلی رابطه رگرسیون گام به گام به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$Y = a + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n + e \quad \text{رابطه ۲:}$$

در رابطه ۲، Y ، متغیر وابسته (رسوب معلق سالانه)، a : عدد ثابت مدل و X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل هستند که خصوصیات و پارامترهای ژئومورفیک حوضه می‌باشند. همچنین B_1, B_2, \dots, B_n ضریب مربوط به هر یک از متغیرهای مستقل و e : نشان دهنده خطای مدل رگرسیون است (زارع چاهوکی، ۲۰۱۱، ۱۴۳). یکی از شرایط استفاده از رگرسیون چندمتغیره گام به گام در تجزیه و تحلیل داده‌ها، عدم وجود هم‌خطی چندگانه^۱ بین متغیرهای مستقل می‌باشد که در این پژوهش با استفاده از عامل تورم واریانس^۲ بررسی گردید (فغفوری و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۹۶). در این پژوهش ۳۰ ویژگی ژئومورفیک برای تعداد ۲۲ زیرحوضه مورد مطالعه به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد و ضمن شناسایی مهمترین ویژگی‌های ژئومورفیک موثر در میزان رسوب زیرحوضه‌ها، رابطه پیش‌بینی مقدار رسوب سالانه توسط موثرترین پارامترها تعیین گردید.

تحلیل مولفه‌های اصلی

¹ Multicollinearity

² Variance in flation (VIF)

از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور تعیین مؤثرترین ویژگی‌های رسوبات و همچنین گروه‌بندی آنها استفاده شد. در روش تحلیل مؤلفه اصلی، متغیرهایی که دارای همبستگی بالایی بوده و در یک فضای چند بعدی توزیع شده‌اند، به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌شوند که هر یک از آنها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی می‌باشند. مؤلفه‌های غیرهمبسته به دست آمده مؤلفه‌های اصلی (PC) نامیده می‌شوند. قبل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از ضریب KMO به منظور اطمینان از تناسب داده‌ها برای انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. این ضریب در دامنه ۰-۱ در نوسان بوده و در صورتی که مقدار آن کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی مناسب نخواهند بود و اگر مقادیر این ضریب بین ۰/۵-۰/۶۹ باشد، تناسب داده‌ها متوسط و اگر مقدار این ضریب بیش از ۰/۷ باشد، داده‌ها برای انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی کاملاً مناسب خواهند بود (شویکلو، ۱۳۹۶، ۳۶۲).

بحث و یافته‌ها

رسوبدهی زیرحوضه‌ها

میانگین رسوب سالانه زیرحوضه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ مقدار رسوب سالانه از ۶۳۵۰۰ تن در سال در زیرحوضه کلکان (سد کلکان) تا ۴۶۳۶۷۶۲ تن در سال در زیرحوضه قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن متغیر است. در جدول ۳ نیز میانگین رسوب سالانه برای زیرحوضه‌ها ارائه شده است.

جدول ۳: میزان رسوب و برخی از مشخصات زیرحوضه‌های منتخب

نام زیرحوضه	مساحت (km ²)	محیط (km)	شیب متوسط (%)	میانگین بارندگی سالیانه (mm)	میانگین رسوب سالانه (ton/year)
کلکان محل تلاقی با قرنقو	۶۱۰/۵	۱۷۰/۸	۱۴/۳	۲۷۹/۵	۴۶۵۳۷۵/۳
قرنقو بعد از تلاقی کلکان چای	۱۵۳۶/۲	۲۰۲	۱۵/۷	۳۱۵/۳	۱۰۷۵۱۷۶/۷
شور چای محل تلاقی با قرنقو	۵۵۵/۸	۱۳۴/۳	۱۱	۳۲۰/۹	۴۲۷۳۷۴/۶
سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو	۳۱۲/۳	۱۰۵/۴	۹	۳۳۷/۵	۲۵۳۳۹۶/۲
قرنقو بعد از سراسکند چای	۲۴۶۰/۲	۲۸۱/۲	۱۳/۸	۳۲۰/۴	۱۶۴۸۴۵۲/۴
شور چای پایین محل تلاقی با قرنقو	۵۴۷/۲	۱۵۰/۳	۱۲/۲	۳۳۴/۸	۴۲۱۳۶۹/۴
قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو	۱۵۰/۶	۶۱/۶	۱۷/۸	۳۳۷/۵	۱۳۰۶۷۵/۱
قرنقو ایستگاه تونل هفتم	۳۶۴۱/۶	۳۹۳/۲	۱۴/۷	۳۲۴	۳۸۱۱۸۰۹
شهر چای محل تلاقی با قرنقو	۲۱۲۹/۳	۲۸۲/۱	۱۶/۱	۳۴۰/۴	۱۱۰۲۸۶۰
ایدوغموش محل تلاقی با قرنقو	۱۸۲۸/۵	۳۱۶/۶	۱۸/۳	۳۲۹/۸	۱۴۰۷۹۳۲
قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن	۷۶۸۹/۷	۵۴۶/۱	۱۵/۹	۳۲۹/۸	۴۶۳۶۷۶۲/۶
قرنقو قبل از تلاقی با کلکان چای	۸۶۴/۸	۱۶۵/۷	۱۷/۲	۳۳۲۴/۲	۶۳۸۳۲۰/۷
قرنقو بعد از تلاقی با شور چای	۲۱۰۶/۳	۲۵۶/۴	۱۴/۴	۳۱۶/۸	۱۳۹۴۰۲۷/۳
قرنقو بعد از تلاقی با شور چای پایین	۳۰۲۰/۵	۳۱۸/۳	۱۳/۵	۲۹۰/۱	۱۹۸۵۸۱۵/۸
قرنقو بعد از تلاقی مسیل قلعه جوق	۳۵۱۵	۳۶۴/۴	۱۴/۵	۳۰۱/۳	۲۲۷۸۷۲۶/۲
شهرچای قبل از تلاقی با قوری چای	۱۸۷۵/۴	۲۳۸/۸	۱۶	۳۰۸/۵	۷۸۰۹۰۴/۶

۳۶۰۱۲۳۴	۳۲۸/۱	۱۵/۲	۴۷۲/۱	۵۸۲۰/۴	قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای
۶۰۵۶۶۵	۳۱۲/۹	۱۷/۵	۱۴۶/۸	۸۲۱/۵	قرنقو سد سه‌پند (گورچینلو)
۶۳۵۰۰	۳۰۱/۷	۲۱/۳	۷۵/۲	۲۰۲/۸	کلقان (سد کلقان)

ویژگی‌های ژئومورفیک زیرحوضه‌ها

مساحت حوزه‌آبخیز یکی از پارامترهای مهم در رسوبدهی حوضه محسوب می‌شود که در این پژوهش دامنه مساحت از ۱۵۰٫۶ کیلومتر مربع برای زیرحوضه قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو تا ۷۶۸۹٫۷ کیلومتر مربع برای زیرحوضه قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن متغیر می‌باشد. همچنین زیرحوضه قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن با ۵۴۶٫۱ کیلومتر بیشترین و زیرحوضه قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو با ۶۱٫۶ کیلومتر کمترین محیط را دارد (جدول ۳). شیب حوضه در زیرحوضه‌های مختلف از ۹ تا ۲۱٫۳ درصد متفاوت است و کمترین آن در دو زیرحوضه سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو و شور چای محل تلاقی با قرنقو و بیشترین مقدار شیب در زیرحوضه کلقان (سد کلقان) مشاهده می‌شود. در کنار عوامل ژئومورفیک به منظور بررسی نقش عوامل اقلیمی، متوسط بارندگی سالانه برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه محاسبه گردید که در جدول ۳ ارایه شده است. در ارتباط با نحوه محاسبه متوسط بارش زیرحوضه‌ها از روش میانبایی استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای هر سه مدل درون‌یابی نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر ME و $RMSE$ روش کریجینگ از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است که از بین حالت‌های مختلف روش کریجینگ نیز مدل گوسی دارای بیشترین دقت می‌باشد.

بر این اساس بیشترین بارندگی در زیرحوضه سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو و قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو به میزان ۳۳۷٫۵ میلی‌متر و کمترین بارش در زیرحوضه کلقان محل تلاقی با قرنقو به میزان ۲۷۹٫۵ میلی‌متر می‌باشد. عامل ارتفاع حوضه با تاثیر روی مقدار و نوع بارندگی، میزان تبخیر و تعرق و وضعیت پوشش گیاهی حوضه بر ضریب رواناب و در نتیجه میزان رسوبدهی تاثیرگذار می‌باشد. ارتفاع زیرحوضه‌های منتخب از ۱۰۶۰ تا ۳۷۰۷ متر از سطح دریا متغیر است (جدول ۴). طول حوضه عبارت از طول خطی که نقطه خروجی حوضه را با یک خط مستقیم به دورترین نقطه مرز حوضه وصل می‌کند (مهدوی، ۲۰۱۱، ۱۱۰). برای بیان شکل حوضه و مقایسه حوضه‌های مختلف با یکدیگر از پارامترهای مختلفی نظیر ضریب فرم حوضه، شاخص شکل، ضریب فشردگی، ضریب کشیدگی، ضریب گردی، نسبت لمنیسکیت استفاده گردید. نتایج حاصل از محاسبه این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس جدول ۴ ضریب فرم حوضه آبخیز از ۰٫۱۰۶ تا ۰٫۳۸۳ متغیر است و بیشتر زیرحوضه‌ها کشیده می‌باشند. همچنین ضریب فشردگی برای تمامی زیرحوضه‌ها در محدوده ۱٫۴ تا ۲ می‌باشد. شاخص شکل حوضه نیز نتیجه مشابه را نشان می‌دهد. بالاترین میزان شاخص شکل با توجه به جدول ۴ در زیرحوضه آیدوغموش محل تلاقی با قرنقو مشاهده می‌گردد. نسبت لمنیسکیت به عنوان معیاری برای توصیف میزان تشابه شکل حوضه به دایره تعریف شده است (چورلی و همکاران^۱، 1957، ۱۴۰) که برای توصیف شکل حوضه بکار می‌رود. بیشترین مقدار نسبت لمنیسکیت با توجه به شکل و طول جریان برای حوضه آیدوغموش محل تلاقی با قرنقو ۲٫۳۵۷ و کمترین مقدار برای زیرحوضه قرنقو بعد از تلاقی با شور چای پایین ۰٫۶۵۲۶ بدست آمده است. شاخص انشعاب نسبت بین تخریب واقعی توسط رودخانه و پتانسیل آن از سطح پایه را نشان می‌دهد (پال و همکاران^۲، 2012، ۲۱۱). کم بودن مقدار شاخص انشعاب نشان دهنده پایین بودن میزان تخریب است. جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر شاخص انشعاب از ۰٫۲۲۹۹ تا ۰٫۷۱ متغیر می‌باشد. کمترین میزان تخریب مربوط به زیرحوضه شور چای محل تلاقی با قرنقو و بیشترین آن مربوط به زیرحوضه قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای است.

^۱ Chorely et al

^۲ Pal et al

جدول ۴: پارامترهای ارتفاعی و شکل زیرحوضه‌های مورد مطالعه

زیرحوضه	ارتفاع حداقل (m)	ارتفاع متوسط (m)	ارتفاع حداکثر (m)	طول حوضه (Km)	ضریب فرم حوضه	شاخص شکل حوضه	ضریب فشردگی	ضریب کشیدگی	ضریب گردی	نسبت لمنیسکیت
کلکان محل تلاقی با قرنقو	۱۵۴۰	۱۹۷۲/۵	۳۷۰۰	۵/۳۴	۰/۱۲۴۹	۸/۰۰۶۴	۱/۹۴	۲/۷۸	۰/۲۶۲۹	۲/۰۰۰۸
قرنقو بعد از تلاقی کلکان چای	۱۵۳۰	۱۹۷۰/۷	۳۷۰۷	۲۴/۰۶	۰/۲۶۹۴	۳/۷۱۱۹	۱/۴۴	۶/۴۷	۰/۴۷۳۱	۰/۹۲۷۶
شور چای محل تلاقی با قرنقو	۱۵۲۰	۱۸۲۷/۸	۱۹۷۴	۱۶/۶۹	۰/۱۵۱۸	۶/۵۸۷۶	۱/۶	۲/۹۲	۰/۳۸۱۷۲	۱/۶۴۶۳
سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو	۱۵۳۰	۱۸۲۱/۶	۲۱۶۰	۸/۵۷	۰/۲۲۲	۴/۵۰۴۵	۱/۶۷	۲/۶۵	۰/۳۵۳۲	۱/۱۲۵۷
قرنقو بعد از سراسکند چای	۱۴۸۰	۱۹۱۱/۱	۳۷۰۷	۳/۲۹	۰/۳۳۸۱	۲/۹۵۷۷	۱/۵۹	۹/۱۸	۰/۳۹۰۹	۰/۷۳۹۳
شور چای پایین محل تلاقی با قرنقو	۱۵۲۰	۱۹۲۶	۲۸۳۴	۱۷/۹۳	۰/۱۲۶	۷/۹۳۶۵	۱/۸	۲/۶۴	۰/۳۰۴۳	۱/۹۸۴۱
قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو	۱۲۲۰	۱۷۸۳/۳	۱۹۹۹	۳۴/۲۹	۰/۱۸۵	۵/۴۰۵۴	۱/۴۱	۱/۶۸	۰/۴۹۸۷	۱/۳۴۸۳
قرنقو ایستگاه تونل هفتم	۱۱۰۰	۱۸۷۷/۵	۳۷۰۷	۹/۴۲	۰/۱۸۸۲	۵/۳۱۳۴	۱/۸۲	۸/۳۳	۰/۲۹۵۹	۱/۳۲۸۳
شهر چای محل تلاقی با قرنقو	۱۰۹۰	۱۸۲۷/۹	۳۳۰۲	۲۶/۴۹	۰/۱۹۱۳	۵/۲۲۷۳	۱/۷۱	۶/۴۲	۰/۳۳۶۲	۱/۳۰۶۷
ایدوغموش محل تلاقی با قرنقو	۱۰۷۰	۱۹۲۹/۱	۲۹۹۰	۳۷/۵۷	۰/۱۰۶	۹/۴۳۳۹	۲/۷	۴/۴۳	۰/۲۲۹۲	۲/۳۵۷
قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن	۱۰۶۰	۱۸۶۷/۸	۳۷۰۷	۳/۰۵	۰/۳۲۲۱	۳/۱۰۴۶	۱/۷۴	۱۵/۸۴	۰/۳۲۴	۰/۷۷۶
قرنقو قبل از تلاقی با کلکان چای	۱۵۴۵	۱۹۹۵/۴	۳۷۰۷	۱۸/۷۹	۰/۱۹۱۵	۵/۲۲۱۹	۱/۵۸	۴/۰۹	۰/۳۹۵۸	۱/۳۰۵۴
قرنقو بعد از تلاقی با شور چای	۱۵۱۰	۱۹۳۰/۲	۳۷۰۷	۱۳/۷۰	۰/۳۴۲۶	۲/۹۱۸۸	۱/۵۶	۸/۵۵	۰/۴۰۲۶	۰/۷۲۹۵
قرنقو بعد از تلاقی با شور چای پایین	۱۴۸۰	۱۹۱۹/۲	۳۷۰۷	۱۳/۱۴	۰/۳۸۳	۲/۶۱۰۹	۱/۶۲	۱۰/۸۲	۰/۳۷۴۶	۰/۶۵۲۶
قرنقو بعد از تلاقی مسیل قلعه جوق	۱۱۹۰	۱۸۹۷/۷	۳۷۰۷	۱۴/۳۹	۰/۲۲۷۱	۴/۴۰۳۳	۱/۷۲	۸/۹۹	۰/۳۳۲۶	۱/۱۰۰۶
شهر چای قبل از تلاقی با قوری چای	۱۱۲۰	۱۸۲۶/۷	۳۳۰۲	۲۱/۹۰	۰/۲۲۲۹	۴/۴۸۶۳	۱/۵۴	۶/۱۷	۰/۴۱۳۲	۱/۲۴۳۹
قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای	۱۰۷۵	۱۸۵۳/۵	۳۷۰۷	۲۹/۱۴	۰/۲۶۸۶	۳/۷۲۳	۱/۷۳	۱۲/۵۸	۰/۳۲۸۱	۰/۹۳۰۷

۱/۰۶۲۹	۰/۴۷۹	۴/۴۲	۱/۴۳	۴/۲۵۳۵	۰/۲۳۵۱	۲۹/۲۰	۳۷۰۷	۲۰۱۴/۱	۱۵۶۵	قرنقو سد سه‌هند (گورچینلو)
۱/۱۳۹۲	۰/۴۵۰۶	۲/۱۲	۱/۴۸	۴/۵۵۷۸	۰/۲۱۹۴	۲۰/۸۲	۳۷۰۰	۲۲۹۹/۱	۱۸۳۵	کلکان (سد کلکان)

یکی دیگر از مهمترین پارامترهای ژئومورفیک تراکم زهکشی است که به عنوان شاخصی برای بیان وضعیت آبراهه‌های حوضه، بارندگی و ظرفیت نفوذپذیری، تکامل توپوگرافی و فرسایش حوضه می‌باشد. با توجه به جدول ۵ کمترین تراکم زهکشی در زیرحوضه قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن و بیشترین تراکم زهکشی در زیرحوضه قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو مشاهده می‌گردد. نسبت انشعاب^۱ نسبت تعداد آبراهه یک رتبه، به تعداد آبراهه با رتبه بالاتر می‌باشد (استرالرا^۲، 1964، ۱۲). نسبت انشعاب درون یک حوضه با افزایش رده کاهش می‌یابد، مقدار میانگین این نسبت برای حوضه‌های مسطح و حوضه‌های کوهستانی متفاوت است (سینگ^۳، 1998، ۱۶۰). بالاترین میانگین نسبت انشعاب در حوضه قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای و قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن و کمترین مقدار آن در زیرحوضه شور چای محل تلاقی با قرنقو و سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو مشاهده می‌شود. عدد ناهمواری نشان دهنده پیچیدگی ساختاری حوضه است. مقادیر بالای عدد ناهمواری نشان دهنده نقاط مستعد برای فرسایش است. بیشترین مقدار آن در مناطق مرکزی حوضه مشاهده می‌شود که همان مناطق تقریباً مسطح است.

جدول ۵: پارامترهای ژئومورفیک پستی و بلندی زیرحوضه‌های مورد مطالعه

عرض	طول	ناهمواری	مجموع	عدد	تراکم	نسبت	نسبت	زیرحوضه
مستطیل	مستطیل	حوضه	طول آبراهه	ناهمواری	زهکشی	انشعاب	پستی و بلندی	
معادل	معادل	(m)	(km)		(km/km ²)			
۷/۸۷	۷۷/۵۳	۲۱۶۰	۶۹/۹	۲۴۷/۱۰۴	۰/۱۱۴۴	۰/۵۸۳۷	۳۰/۹	کلکان محل تلاقی با قرنقو
۱۸/۶۶	۸۲/۳۴	۲۱۷۷	۷۵/۵	۱۰۶/۸۹۰۷	۰/۰۴۹۱	۰/۵۸۷۲	۲۸/۸۳	قرنقو بعد از تلاقی کلکان چای
۹/۶۷	۵۷/۴۸	۴۵۴	۶۰/۵	۴۹/۳۹۵۲	۰/۱۰۸۸	۰/۲۲۹۹	۷/۵	شور چای محل تلاقی با قرنقو
۶/۸	۴۵/۹	۶۳۰	۳۷/۵	۷۵/۶	۰/۱۲	۰/۲۹۱۶	۱۶/۸	سراسکند چای محل تلاقی با قرنقو
۲۰/۴۸	۱۲۰/۱	۲۲۲۷	۸۵/۳	۷۷/۰۵۴۲	۰/۰۳۴۶	۰/۶۰۰۷	۲۶/۱	قرنقو بعد از سراسکند چای
۸/۱۷	۶۶/۹۸	۱۳۱۴	۶۵/۹	۱۵۸/۲۰۵۶	۰/۱۲۰۴	۰/۴۶۳۶	۱۹/۹۳	شور چای پایین محل تلاقی با قرنقو
۶/۱	۲۴/۷	۷۷۹	۲۸/۵	۱۴۷/۳۸۶۸	۰/۱۸۹۲	۰/۳۸۹۶	۲۷/۳۳	قلعه جوق محل تلاقی با قرنقو
۲۰/۷	۱۷۵/۹	۲۶۰۷	۱۳۹/۱	۹۹/۳۲۶۷	۰/۰۳۸۱	۰/۷۰۳۲	۱۸/۷۴	قرنقو ایستگاه تونل هفتم
۱۷/۱۹	۱۲۳/۹	۲۲۱۲	۱۰۵/۵	۱۰۹/۴۹۴	۰/۰۴۹۵	۰/۶۶۹۸	۲۰/۹۶	شهر چای محل تلاقی با قرنقو
۱۲/۵۵	۱۴۵/۸	۱۹۲۰	۱۳۱/۳	۱۳۷/۸۵۶	۰/۰۷۱۸	۰/۶۴۲۱	۱۴/۶۲	ایدوغموش محل تلاقی با قرنقو
۳۱/۸۹	۲۴۱/۲	۲۶۴۷	۱۵۴/۵	۵۲/۹۴	۰/۰۲	۰/۷۱۴	۱۷/۱۳	قرنقو در محل تلاقی با قزل اوزن

^۱ Bifurcation Ratio^۲ Strahler^۳ Singh

۱۲/۲۵	۷۰/۶	۲۱۶۲	۶۷/۲	۱۶۷/۹۸۷۴	۰/۰۷۷۷	۰/۵۸۳۲	۳۲/۱۷	قرنقو قبل از تلاقی با کلکان چای
۱۹/۳۵	۱۰۸/۹	۲۱۹۷	۷۸/۴	۸۱/۷۲۸۴	۰/۰۳۷۲	۰/۵۹۲۶	۲۸/۰۲	قرنقو بعد از تلاقی با شور چای
۲۲/۰۳	۱۳۷/۱	۲۲۲۷	۸۸/۸	۶۵/۲۵۱۱	۰/۰۲۹۳	۰/۶۰۰۷	۲۵/۰۷	قرنقو بعد از تلاقی با شور چای پایین
۲۱/۹۳	۱۶۰/۳	۲۵۱۷	۱۲۴/۴	۸۸/۸۵۰۱	۰/۰۳۵۳	۰/۶۷۸۹	۲۰/۲۳	قرنقو بعد از تلاقی مسیل قلعه جوق
۱۸/۶۱	۱۰۰/۸	۲۱۸۲	۹۶/۶	۱۱۲/۳۷۳	۰/۰۵۱۵	۰/۶۶۰۸	۲۲/۵۸	شهرچای قبل از تلاقی با قوری چای
۲۷/۹۷	۲۰۸/۱	۲۶۳۲	۱۴۷/۲	۶۶/۳۲۶۴	۰/۰۲۵۲	۰/۷۱	۱۷/۸۸	قرنقو بعد از تلاقی با شهر چای
۱۳/۷۵	۵۹/۶۵	۲۱۴۲	۵۹/۱	۲۴۲/۶۸۸۶	۰/۱۱۳۳	۰/۵۷۷۸	۳۶/۲۴	قرنقو سد سه‌پند (گورچینلو)
۶/۵۳	۳۱/۰۷	۱۸۶۵	۳۰/۴	۲۷۹/۵۶۳۵	۰/۱۴۹۹	۰/۵۰۴	۶۱/۳۴	کلکان (سد کلکان)

نتایج تحلیل رگرسیون

در این پژوهش وزن رسوب حوضه به عنوان متغیر وابسته و سایر پارامترها به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. با توجه به ماتریس همبستگی متغیرها (جدول ۶) مشاهده می‌شود که متغیرهای حجم جریان، مساحت، محیط، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل، تراکم زهکشی، شاخص انشعاب، ارتفاع حداقل، ضریب کشیدگی و ناهمواری حوضه نسبت به سایر متغیرها همبستگی بالاتری با میزان تولید رسوب حوضه دارند.

جدول ۶: همبستگی بین متغیرهای ژئومورفیک موثر بر رسوب معلق در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

متغیرهای مستقل	همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری
حجم جریان	۰/۹۷۰**	۰/۰۰۰
مساحت	۰/۹۵۹**	۰/۰۰۰
محیط	۰/۹۵۴**	۰/۰۰۰
طول مستطیل معادل	۰/۹۵۲**	۰/۰۰۰
ضریب کشیدگی	۰/۹۰۱**	۰/۰۰۰
عرض مستطیل معادل	۰/۸۸۶**	۰/۰۰۰
زمان تمرکز	۰/۸۷۶**	۰/۰۰۰
تراکم زهکشی	-۰/۷۴۴**	۰/۰۰۰
شاخص انشعاب	۰/۶۶۴**	۰/۰۰۲
ناهمواری حوضه	۰/۶۵۸**	۰/۰۰۲
ارتفاع حداقل	۰/۶۳۲*	۰/۰۰۴
سرعت جریان	۰/۶۱۶*	۰/۰۰۵
دبی	-۰/۶۱۲*	۰/۰۰۵
عدد ناهمواری	۰/۵۳۱*	۰/۰۱۹

۰/۰۴۶	۰/۴۶۴*	ارتفاع حداکثر
۰/۰۷۴	۰/۴۱۹	ضریب فرم حوضه
۰/۰۸۸	-۰/۴۰۲	ضریب گردی
۰/۱۲۰	-۰/۳۶۹	نسبت پستی بلندی
۰/۱۲۲	-۰/۳۶۸	نسبت لمنیسکیت
۰/۱۳۰	-۰/۳۶۰	شاخص شکل حوضه
۰/۲۸۸	-۰/۲۵۷	ارتفاع متوسط
۰/۳۹۶	۰/۲۰۷	ضریب فشردگی
۰/۷۱۶	۰/۰۸۹	بارندگی
۰/۹۲۰	-۰/۰۲۵	شیب

جدول ۷ آماره‌های مربوط به رگرسیون چند متغیره گام به گام را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۸ در مدل ۱ متغیر حجم جریان حوضه وارد شده و ضریب تعیین (R^2) به مقدار ۰/۹۴۰ رسیده است. در مدل ۲ نیز با ورود متغیر ضریب فرم حوضه به معادله، ضریب تعیین به ۰/۹۵۹ رسیده است. ضریب تعیین تعدیل شده در مدل دوم (جدول ۸) دلالت بر این دارد که دو متغیر حجم جریان و ضریب فرم حوضه، ۹۵ درصد از رسوبدهی زیرحوضه‌ها را کنترل می‌کنند. با توجه به اینکه بهترین مدل رگرسیونی مدلی است که ضریب تعیین (R^2) بیشتر و خطای استاندارد (SE) کمتر داشته باشد، لذا مدل دوم مدل نهایی برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در ارتباط با سطح معنی‌داری F و سطح معنی‌داری sig باید خاطر نشان کرد که با یکدیگر رابطه معکوس دارند. به عبارت دیگر هرچه قدر میزان سطح معنی‌داری F افزایش یابد، سطح معنی‌داری sig کاهش می‌یابد و بالعکس. جدول ۸ ضرایب رابطه رگرسیون و آزمون معنی‌داری را نشان می‌دهد. برای آزمون معنی‌دار بودن هر یک از ضرایب رابطه رگرسیون، از آزمون t استفاده گردید. معنی‌دار بودن ضریب در معادله رگرسیونی به این معنا است که متغیر مستقل مربوطه می‌تواند به طور معنی‌داری قسمتی از تغییرات در متغیر وابسته را بیان کند. با توجه به سطح معناداری آزمون t در مدل ۲، با اطمینان ۹۵ درصد، این ضرایب مخالف صفر و برابر با مقادیر برآورد شده است. مقادیر VIF برای متغیرها که کمتر از ۱۰ می‌باشد بیانگر عدم وجود هم‌خطی بین متغیرهای ژئومورفیک می‌باشد لذا متغیرها برای تعیین ضریب رگرسیونی مناسب می‌باشند. با توجه به جدول ۸ معادله نهایی برای میزان تولید رسوب در زیرحوضه‌های منتخب به صورت مدل ۲ می‌باشد.

بر اساس مدل‌های حاصل از تحلیل همبستگی رسوب، مقدار رسوب تولیدی با متغیرهای حجم جریان و ضریب فرم حوضه، همبستگی مثبت داشته و در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۷). با توجه به جدول ۷، متغیر مساحت با ضریب همبستگی ۹۳/۵ درصد بعد از دو پارامتر حجم جریان و ضریب فرم حوضه بیشترین همبستگی را با میزان رسوبدهی حوضه دارد همچنین پارامتر محیط حوضه که تابعی از ضریب فرم حوضه می‌باشد با مقدار ضریب همبستگی ۹۲ درصد در مرتبه بعدی نسبت به پارامترهای فوق قرار دارد.

جدول ۷: ضرایب همبستگی روابط رگرسیونی

مدل	ضریب همبستگی چندگانه (R)	ضریب تعیین (R^2)	ضریب تعیین تعدیل شده	اشتباه معیار (SE)	سطح معنی‌داری F	سطح معنی‌داری sig
۱	۰/۹۷۰	۰/۹۴۰	۰/۹۳۷	۳/۳۲۷	۲۶۸/۳۷۲	۰/۰۰۰
۲	۰/۹۷۹	۰/۹۵۹	۰/۹۵۴	۲/۸۳۰	۱۸۹/۱۰۸	۰/۰۰۰

جدول ۸: آزمون معنی‌داری ضرایب روابط رگرسیونی

مدل	متغیر مستقل	بتا	T	سطح معنی‌داری	مقدار ثابت	معادله رگرسیون خطی
۱	مقدار ثابت	---	-۱/۵۸۶	۰/۱۳۱	-۱۹۶۸۴۵/۴۰۴	$Y = -۱۹۶۸۴۵/۴۰۴ X_1 - ۰/۹۷۰$
	حجم جریان	۰/۹۷۰	۱۶,۳۸۲	۰/۰۰۰	---	
۲	مقدار ثابت	---	۱۴/۲۳۷	۰/۰۰۰	۲۸۹۶۰۸/۵۲۴	$Y = ۲۸۹۶۰۸/۵۲۴ X_1 - ۱/۰۶۱$
	حجم جریان	۱/۰۶۱	۱۷/۵۷۶	۰/۰۰۰	---	$(X_2) ۰/۱۶۵$
	ضریب فرم حوضه	۰/۱۶۵	-۲/۷۳۶	۰/۰۱۵	---	

نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی

به منظور اطمینان از تناسب داده‌ها برای انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از ضریب KMO استفاده شد. این ضریب در دامنه ۰-۱ در نوسان بوده و در صورتی که مقدار آن کمتر از ۰,۵ باشد، داده‌ها برای انجام تحلیل مولفه‌های اصلی مناسب نخواهند بود و اگر مقادیر این ضریب بین ۰,۵-۰,۶۹ باشد، تناسب داده‌ها متوسط و اگر مقدار این ضریب بیش از ۰,۷ باشد، داده‌ها برای انجام تجزیه به مولفه‌های اصلی کاملاً مناسب خواهند بود. با توجه به جدول (۹) مقدار $KMO = ۰/۸$ بوده در نتیجه داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهند بود. همچنین نتایج آزمون کرویت بارتلت نیز معنی‌دار است، به این مفهوم که فرض مخالف تأیید می‌شود یعنی بین متغیرها همبستگی معنی‌داری وجود دارد. معنی‌دار بودن مربع کای نیز بیانگر کمینه شرایط لازم برای اجرای تحلیل عاملی است.

جدول (۹): آماره KMO و نتایج آزمون کرویت بارتلت

آزمون کرویت بارتلت و KMO		
سنجش کفایت داده‌ها با استفاده از Kaiser-Meyer-Olki		0/800
آزمون کرویت بارتلت	Approx. Chi-Square	405/017
	df	45
	Sig	0/000

در جدول (۱۰) مقدار واریانس استخراج شده هر متغیر مشخص شده است. اشتراکات تعیین می‌کنند چه مقدار از واریانس هر متغیر به وسیله عوامل نهایی یعنی عامل‌هایی که مقدار ویژه بیشتر از ۱ دارند، تبیین می‌شود. این مقدار واریانس، واریانسی است که توسط عامل‌های نهایی تبیین شده است. هرچقدر میزان واریانس استخراج شده هر متغیر نزدیکتر به ۱ باشد، نشان می‌دهد که عامل‌های استخراج شده مناسب‌تر است. حداقل میزان واریانس استخراج شده برای هر متغیر را ۰/۵ یا ۵۰ درصد در نظر می‌گیرند.

جدول ۱۰: میزان واریانس استخراج شده متغیرها

Extraction	Initial	متغیر	Extraction	Initial	متغیر
۰/۹۷۷	۱	ارتفاع حداقل	۰/۸۸۱	۱	مساحت
۰/۸۷۳	۱	ارتفاع میانگین	۰/۹۶۴	۱	محیط
۰/۹۵۴	۱	ارتفاع حداکثر	۰/۹۸۳	۱	طول
۰/۹۵۲	۱	ناهمواری حوضه	۰/۹۰۲	۱	ضریب فرم حوضه
۰/۹۲۶	۱	شیب	۰/۹۷۸	۱	شاخص شکل حوضه
۰/۹۵۶	۱	طول مستطیل معادل	۰/۸۲۵	۱	ضریب فشردگی
۰/۹۸۷	۱	عرض مستطیل معادل	۰/۸۷۰	۱	ضریب گردی
۰/۹۲۲	۱	تراکم زهکشی	۰/۹۶۰	۱	ضریب کشیدگی
۰/۹۷۷	۱	نسبت پستی بلندی	۰/۵۴۱	۱	بارندگی
۰/۹۱۹	۱	عدد ناهمواری	۰/۸۷۴	۱	حجم جریان
۰/۹۳۷	۱	شاخص انشعاب	۰/۸۰۸	۱	دبی
۰/۹۷۸	۱	نسبت لمنیسکیت	۰/۹۴۸	۱	سرعت جریان
---	---	---	۰/۹۷۷	۱	زمان تمرکز

جهت تعیین تعداد عامل‌ها از مقدار ویژه استفاده می‌شود. حداقل مقدار ویژه برای انتخاب عامل‌های نهایی مقدار ۱ است و عامل‌هایی که مقدار ویژه بیشتر از ۱ داشته باشند جزء عامل‌های نهایی محسوب می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوضه مقدار ویژه بیشتر از ۱ دارند و تعداد عامل‌های استخراج شده ۴ عامل است.

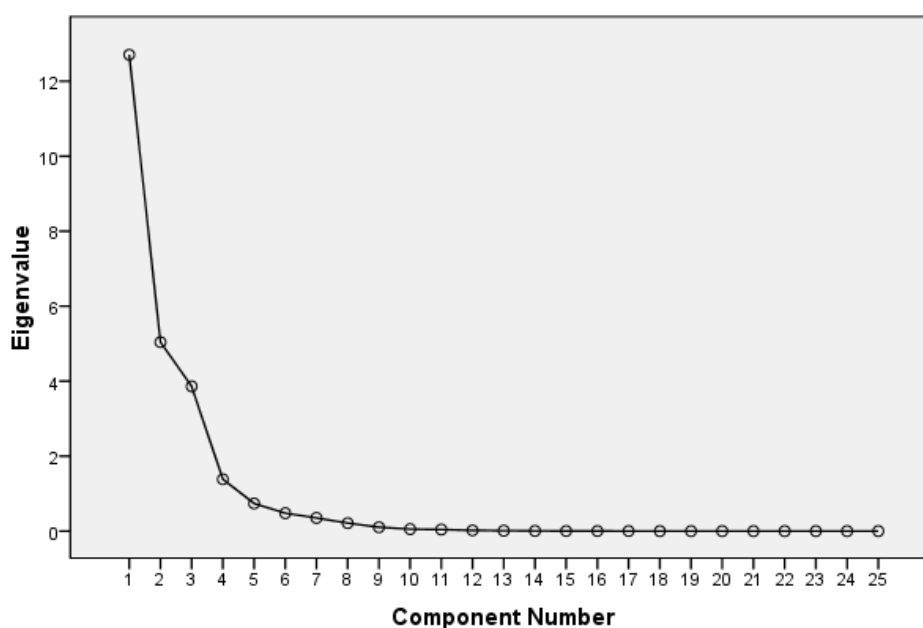
درصد واریانس تبیین شده توسط هر عامل در جدول (۱۱) نشان می‌دهد که عامل اول (مساحت) توانسته است ۵۰ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کند. این مقدار برای عامل دوم (محیط)، عامل سوم (طول) و عامل چهارم (ضریب فرم حوضه) به ترتیب ۲۰/۹، ۱۳/۶ و ۷/۵ درصد است. در مجموع چهار عامل استخراج شده نهایی توانسته‌اند ۹۲/۲ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کنند.

جدول ۱۱: درصد واریانس تجمعی و مقادیر ویژه عامل‌های مختلف

مقادیر ویژه اولیه			
مؤلفه‌ها	کلی	درصد واریانس	درصد تجمعی
مساحت	۱۲/۷۰۸	۵۰/۰۸۰	۵۰/۰۸۰
محیط	۵/۰۴۰	۲۰/۹۶۰	۷۱/۰۴۰
طول	۳/۸۶۰	۱۳/۶۲۴	۸۴/۶۶۵
ضریب فرم حوضه	۱/۳۸۲	۷/۵۴۹	۹۲/۲۱۴

نمودار واریزه‌ای به صورت بصری تعداد عامل‌های استخراج شده را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مقدار ویژه ۱ در محور عمودی می‌توان تعداد عامل‌های نهایی را مشخص کرد. نتایج نمودار واریزه‌ای با نتایج جدول قبل یکسان بوده با این تفاوت که نمودار به صورت بصری نتایج را ارائه می‌دهد. وجود شیب تند بین عامل‌ها می‌تواند مبنایی تکمیلی جهت گزینش عامل‌های نهایی باشد. همان طور که نمودار نشان می‌دهد بین عامل سوم و چهارم شیب تندی وجود دارد و بعد از عامل چهارم شیب مقدار ویژه به طور محسوسی کاهش می‌یابد.

Scree Plot



شکل ۲: نمودار واریزه‌ای (Scree Plot) جهت انتخاب تعداد عامل‌های نهایی

جدول (۱۲) مربوط به بارهای عاملی بعد از چرخش است. این جدول که جدول عناصر چرخش یافته نام دارد، جدول اصلی در ارتباط با متغیرهایی است که متعلق به هر عامل هستند. بارهای عاملی، همبستگی‌های متغیرها با عامل‌هاست. چنانچه این همبستگی‌ها بیشتر از ۰/۶۰ باشند (بدون توجه به علامت منفی یا مثبت)، به عنوان بارهای عاملی بالا و چنانچه بیشتر از ۰/۳۰ باشند به عنوان بارهای عاملی نسبتاً بالا در نظر گرفته می‌شوند. بارهای کمتر از ۰/۳۰ را می‌توان نادیده نگرفت. میزان بار عاملی هر متغیر در این جدول گزارش شده است. در وضعیت عادی، هر متغیر با تمامی عامل‌ها همبستگی دارد و بار عاملی هر متغیر با تمامی عامل‌ها در جدول ارائه می‌شود اما با توجه به دستوری که هنگام اجرای دستور تحلیل عاملی به برنامه دادیم، مقادیر بار عاملی کمتر از ۰/۳۰ در خروجی نشان داده نشده است و تنها مقادیر بارهای عاملی قابل قبول (۰/۳۰ و بیشتر) نمایش داده شده‌اند.

مقادیر بارهای عاملی قابل قبول برای هر متغیر بایستی بیشتر از ۰/۷ باشد که مقدار مناسب و بالایی به شمار می‌آید و نشان از این دارد که نتیجه تحلیل عاملی مطلوب بوده و عامل‌های مناسبی استخراج شده‌اند.

جدول ۱۲: سهم متغیرها یا بار عاملی در هر عامل قبل از عمل چرخش

	مولفه‌ها			
	۱	۲	۳	۴
محیط	۰/۹۷۷	---	---	---
طول مستطیل معادل	۰/۹۷۴	---	---	---
طول	۰/۹۶۳	---	---	---
زمان تمرکز	۰/۹۳۹	---	---	---
عرض مستطیل معادل	۰/۹۱۶	۰/۳۷۵	---	---
مساحت	۰/۹۰۶	---	---	---
ضریب کشیدگی	۰/۸۹۰	۰/۳۹۴	---	---
تراکم زهکشی	-۰/۸۹۰	---	---	---
حجم جریان	۰/۸۹۰	---	---	---
شاخص انشعاب	۰/۸۶۱	---	۰/۴۰۸	---
دبی	-۰/۸۶۰	---	---	---
ناهمواری حوضه	۰/۸۲۶	---	۰/۳۶۸	۰/۳۴۸
سرعت جریان	۰/۸۱۵	---	۰/۵۳۰	---
ارتفاع حداقل	-۰/۶۸۴	---	---	۰/۶۲۳
ارتفاع حداکثر	۰/۶۲۲	---	۰/۳۸۵	۰/۶۰۵
نسبت لمنیسکیت	---	-۰/۹۴۶	---	---
شاخص شکل حوضه	---	-۰/۹۴۶	---	---
ضریب فشردگی	۰/۳۵۰	-۰/۸۴۳	---	---
ضریب فرم حوضه	۰/۳۸۴	۰/۸۳۷	---	---
ضریب گردی	-۰/۴۹۲	۰/۷۴۰	۰/۳۲۴	---
شیب	---	---	۰/۹۶۹	---
نسبت پستی بلندی	-۰/۳۵۱	---	۰/۶۹۶	۰/۵۲۰
عدد ناهمواری	-۰/۴۶۶	---	۰/۶۶۷	۰/۴۲۴
بارندگی	---	---	---	-۰/۸۴۱
ارتفاع میانگین	---	---	۰/۵۶۷	۰/۶۷۹

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی ارتباط بین پارامترهای ژئومورفیک زیرحوضه‌های منتخب حوضه قرنقو با رسوب سالانه انجام شد. بدین منظور از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل مدل رقومی ارتفاع برای استخراج پارامترهای مختلف ژئومورفیک استفاده گردید. بدین منظور ۲۵ متغیر ژئومورفیک برای ۱۹ زیرحوضه، حوضه قرنقو با استفاده از مدل رقومی

ارتفاع محاسبه گردید. میزان رسوبدهی سالانه زیرحوضه‌ها با استفاده از آمار هیدرومتری محاسبه شد و ارتباط بین پارامترهای ژئومورفیک با رسوب سالانه با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره گام به گام تعیین شد. نتایج تحقیق دلالت بر این دارد که پارامترهای ژئومورفیکی همبستگی بالایی با میزان رسوب سالانه دارند و می‌توانند در پیش‌بینی رسوب استفاده شوند اما به هیچ عنوان قابل تعمیم به سایر حوضه‌ها نمی‌باشد چون شرایط مورفولوژیکی و هیدروژئومورفولوژیکی حوضه‌های مختلف با همدیگر متفاوت است، پس سهم هر کدام از عوامل در حوضه‌های دیگر از شدت و ضعف برخوردار خواهد بود و قابل تعمیم به حوضه‌های دیگر نیست و برای هر حوضه‌ای باید مستقلاً کار شود. در این میان پارامترهای حجم جریان، مساحت، محیط، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل، تراکم زهکشی، شاخص انشعاب، ارتفاع حداقل، ضریب کشیدگی و ناهمواری حوضه نسبت به سایر متغیرها همبستگی بالاتری با میزان تولید رسوب حوضه‌ها داشته‌اند. از میان این متغیرها دو متغیر حجم جریان و ضریب فرم حوضه در مدل نهایی رگرسیون گام به گام استفاده گردید و به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده رسوب انتخاب شده‌اند. این دو متغیر به تنهایی قادرند ۹۵ درصد از رسوب سالانه را پیش‌بینی کنند. به منظور اطمینان از تناسب داده‌ها برای انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از ضریب $KMO=0/8$ مقدار (۹) استفاده شد. با توجه به جدول (۹) مقدار $KMO=0/8$ بوده در نتیجه داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهند بود. جهت تعیین تعداد عامل‌ها از مقدار ویژه استفاده می‌شود. حداقل مقدار ویژه برای انتخاب عامل‌های نهایی مقدار ۱ است و عامل‌هایی که مقدار ویژه بیشتر از ۱ داشته باشند جزء عامل‌های نهایی محسوب می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوضه مقدار ویژه بیشتر از ۱ دارند و تعداد عامل‌های استخراج شده ۴ عامل است. درصد واریانس تبیین شده توسط هر عامل در جدول (۱۱) نشان می‌دهد که عامل اول (مساحت) توانسته است ۵۰ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کند. این مقدار برای عامل دوم (محیط)، عامل سوم (طول) و عامل چهارم (ضریب فرم حوضه) به ترتیب ۲۰/۹، ۱۳/۶ و ۷/۵ درصد است. در مجموع چهار عامل استخراج شده نهایی توانسته‌اند ۹۲/۲ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کنند.

در پژوهشی مشابه (فغفوری و همکاران، ۱۳۹۶) در حوضه سیدآباد کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از روش تجزیه و تحلیل عاملی (روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی) از بین ۱۵ متغیر موثر بر تولید رسوب، شش متغیر ضریب رواناب، درصد پوشش گیاهی، درصد شن، حساسیت سنگ به فرسایش، بافت خاک و نوع کاربری که ۸۲/۰۰۹ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه می‌کردند، انتخاب کردند. نتایج مدل رگرسیون چند متغیره تقریباً با روش تحلیل عاملی یکسان بود و نتایج حاصل از مدل اسکالوگرام نیز حاکی از تأیید این مطلب بوده است. در نهایت با توجه به ضرایب رگرسیونی به دست آمده، به ترتیب متغیرهای حجم رواناب (۰/۰۲)، حساسیت سنگ به فرسایش (۰/۰۰۱)، درصد ضریب رواناب (۰/۰۰۰۰۵) و درصد شن (۰/۰۰۰۰۲) از عوامل موثر بر فرسایش و رسوب حوضه تشخیص داده شدند.

در پژوهش ژانگ (۲۰۱۵)، نقش بارندگی در میزان رسوب حوضه و ارتباط بالای آن با رسوبدهی حوضه بیان شده است که همسو با پژوهش حاضر می‌باشد. همبستگی بالای بارندگی با رسوب می‌تواند به شرایط اقلیمی و همچنین وضعیت پوشش گیاهی زیرحوضه‌های تحقیق مرتبط باشد. در زیرحوضه‌های مورد مطالعه به دلیل کمبود پوشش گیاهی و وجود خاک فرسایش‌پذیر شرایط برای تولید رسوب مهیا می‌باشد و با وقوع بارش، فرسایش و انتقال رسوبات انجام می‌شود که در این مناطق با بارش‌های شدید و با تداوم کم صورت می‌گیرد. به همین خاطر بخش اعظم رسوبات در مواقع سیلابی از زیرحوضه‌ها خارج می‌شود. همچنین پژوهش سانی (۲۰۱۷)، در حوضه آبریز چاکرار^۱ در هند نشان داد که فاکتورهای فرم حوضه، نسبت گردی و نسبت طول شاخه اصلی از پارامترهای موثر بر فرسایش و تولید رسوب هستند.

^۱ Chakrar

منابع:

- شویکلو, امیررضا, ۱۳۹۶, آنالیز و تفسیر داده‌های حسی با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی, مجله علوم و صنایع غذایی, شماره ۸۰, دوره ۱۵, صص ۳۶۱-۳۷۷.
- فغفوری, زهرا; آرمان, نسیم; فرجی, محمد; خورسندی, زهره, ۱۳۹۶, تعیین عوامل موثر بر رسوب‌دهی با استفاده از روش‌های آماری مطالعه موردی: حوضه سیدآباد, نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز, شماره ۲, صص ۲۰۴-۱۹۰.
- معتمدی, راضیه; آذری, محمود, ۱۳۹۶, ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک با رسوب آبخیز (مطالعه موردی: زیرحوضه‌های منتخب خراسان رضوی), مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی, ۴(۲۸), صص ۱۰۱-۸۲.
- معظمی, محمد; فیض‌نیا, سادات, ۱۳۸۶, آنالیز ناحیه‌ای رسوب معلق (مطالعه موردی رودخانه جراحی), چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران, مدیریت حوضه‌های آبخیز, ص ۱۳.
- غلامی, لیلا; صادقی, حکیدرضا; خالدی درویشان, عبدالولحد; تلوری, عبدالرسول, ۱۳۸۷, مدل‌سازی رسوب ناشی از رگبارها با استفاده از متغیرهای باران و رواناب, مجله علوم و صنایع کشاورزی, ۲۲(۲), صص ۲۶۳-۲۷۱.
- *Ares M.G., Varni M., Chagas C., 2016: Suspended sediment concentration controlling factors: an analysis for the Argentine Pampas region. Hydrological Science Journal 61 (12): 2237-2248.*
- *Chorley, R.J., Malm, D.E. and Pogorzelski, H.A., 1957. A new standard for estimating drainage basin shape. American Journal of Science, 255(2), pp.138-141.*
- *Fryirs, K., 2013. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. Earth Surface Processes and Landforms, 38(1), pp.30-46.*
- *Heng S, Suetsugi T. 2014. Comparison of regionalization approaches in parameterizing sediment rating curve in ungauged catchments for subsequent instantaneous sediment yield prediction. Journal of Hydrology 512: 240-253.*
- *Heshmati M. 2010. Assessment of land degradation in relation to human-induced causes in ago-ecological zones in the Merckctchment, Iran. Ph.D. thesis in University Putra Malaysia.*
- *Lamb E., Toniolo H., 2016: Initial Quantification of Suspended Sediment Loads for Three Alaska North Slope Rivers. Water 419 (8): 2-11.*
- *Lieskovský J, Kenderessy P. 2014. Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: A case study in vráble (Slovakia) using WATEM/SEDEM. Land Degradation & Development 25(3): 288-296.*
- *Mahdavi, M. 2011. Applied Hydrology. 9th edition. Tehran University press. 342 p.*
- *Novara A, Keesstra S, Cerdà A, Pereira P, GristinaL. 2016. Understanding the role of soil erosion on CO2-c loss using 13c isotopic signatures in a bandoned Mediterranean agricultural land. Science of The Total Environment 550: 330-336.*
- *Pal, B., Samanta, S. and Pal, D.K., 2012. Morphometric and hydrological analysis and mapping for Watut watershed using remote sensing and GIS techniques. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2(1), p.357.*
- *Ries JB, Hirt U. 2008. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the central Ebro Basin/Spain. Catena 72: 282-296.*
- *Shayan, S., Zare, GH.R., Yamani, M., Sharifi Kia, M., Sultanpour, M. 2013, Analysis of the trend of statistics changes in the discharge and sediment of the Mend watershed and its application in environmental planning, Journal of Applied Geomorphology. 1(2): 50-37.*
- *Singh, S., 1992. Quantitative geomorphology of the drainage basin (pp. 81-7233). Scientific Publishers, Jodhpur, India.*

- *Soni, S., 2017. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. Applied Water Science, 7(5), pp.2089-2102.*
- *Strahler, A.N., 1964. Quantitative Geomorphology of Basin and Channel Networks: Handbook of Applied Hydrology.*
- *Zare Chahuki, M.A. 2010. Data analysis in natural resources research using SPSS software. first edition. Jahad University press. 309 P.*
- *Zhang, H.Y., Shi, Z.H., Fang, N.F. and Guo, M.H., 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. Geomorphology, 234, pp.19-27.*
- *Ziegler AD., Benner G., Tantasirin C., 2014: Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: hysteresis, variability, and uncertainty. Journal of Hydrology 519: 2020–2039.*