نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هفتم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۲ / مقاله علمی- پژوهشی: صفحات ۱۹۵ تا ۲۰۸

بررسی ارتباط بین غلظت رسوب معلق و ویژگی‌های آبخیز رودخانه کن تهران، با استفاده از رگرسیون مؤلفه‌های اصلی

سعیده جلالی، کاظم نصرتی* و زینب فتحی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۳۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۹)

چکیده

ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه‌های آبخیز دارای روابط متقابل و همبستگی بوده و مقیاس زمانی و مکانی در قالب فصل و زیرحوضه‌ها بر غلظت رسوب معلق تأثیرگذار است. از اهداف این مطالعه بررسی ارتباط بین غلظت رسوب معلق و ویژگی‌های آبخیز رودخانه کن با استفاده از رگرسیون مؤلفه‌های اصلی و شناخت تأثیر فصل و زیرحوضه‌ها بر غلظت رسوب معلق بود. بدین‌منظور غلظت رسوب معلق در طی چهار رخداد بارشی در سه فصل و در زیرحوضه‌ها اندازه‌گیری و محاسبه شد. شانزده ویژگی فیزیوگرافی و کاربری اراضی در زیرحوضه‌ها تعیین شد و با استفاده از تجزیه مؤلفه های اصلی (PCA)، عامل یا فاکتورهای اصلی شناسایی و امتیاز هر یک از فاکتورها برای هر ویژگی محاسبه شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که غلظت رسوب معلق از نظر مقیاس مکانی معنادار بوده و فصل بهار بیشترین میزان رسوب‌زایی را داشته است. آنالیز مازاد داده (Redundancy analysis) و تحلیل کانونیک توابع تشخیص (Discriminant function canonical analysis) بر خصوصیاتی که در عامل اول (PC1) مشارکت دارند، نشان داد که به‌ترتیب خصوصیات درصد سازند فرسایش‌پذیر، سازند به‌نسبت فرسایش‌پذیر، درصد فعالیت احداث آزاد راه (تسطیح دامنه ها) و طول آبراهه مهم‌ترین ویژگی‌های زیرحوضه‌ها در تولید و غلظت رسوب معلق منطقه مطالعاتی هستند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه مؤلفه‌های اصلی، غلظت رسوب معلق، رگرسیون چند متغیره

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: k_nosrati@sbu.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک فرایند ژئومورفیک غالبی است که در سطح وسیعی از کرهٔ زمین رخ می‌دهد (۹). شرایط محیطی حوضه، مثل آب و هوا، نوع خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و اشکال مختلف دخالت‌های انسانی، بر فرایند فرسایش و تولید رسوب مؤثر است (۱۲). آگاهی دقیق از میزان اهمیت هرکدام از عوامل فیزیوگرافی حوضه در فرایند فرسایش و رسوب برای جلوگیری از تخریب هرچه بیشتر حوضه‌های آبخیز امری ضروری است. تاکنون روش‌ها و مدل‌های مختلفی جهت تعیین و برآورد میزان فرسایش و رسوب به‌کار گرفته شده است. بدیهی است در این میان آنچه که باعث تعیین مهم‌ترین عامل فرسایش و رسوب شود اهمیت بسزایی خواهد داشت (۷ و ۹). پایش رسوبات معلق روشی مناسب برای شناخت منابع رسوب در زیرحوضه‌ها برای تخمین بار رسوبات کل در خروجی حوضه به‌عنوان وسیله‌ای برای نشان‌دادن سهم نسبی از منابع مکانی فرسایش است. تجزیه مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های رایج برای کاهش تعداد متغیرهای ورودی مدل به تعداد کم متغیر مهم است. در این روش تعداد زیادی از متغیرها را می‌توان به چند عامل کاهش داد و به این طریق خلاصه‌ای از عوامل اصلی را تهیه کرد (۱۸). تا کنون مطالعات متعددی در سراسر دنیا انجام شده که به بررسی ابعاد مختلف اجزای ژئومورفیک رودخانه از جمله، اثر نیروهای هیدرولیکی (۶ و ۱۴) و تغییرات توپوگرافیکی (۲ و ۱۳) پرداخته اند اما در کمتر آنها به پایش و اندازه‌گیری غلظت رسوب و تغییرات مکانی و زمانی و وارتباط آنها با ویژگی‌های حوضه‌های آبخیز پرداخته شده است. ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های آبخیز، بخش مهمی از مطالعات ژئومورفیک، فرسایش و رسوب است و اثر تعیین‌کننده‌ای بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی دارد (۸ و ۱۱). پژوهشگران در بررسی تغییرات ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانهٔ گاروال در یکی از ایالات هند به این نتیجه رسیدند دو شاخص طول رودخانه و شیب مهم‌ترین اثر را در فرایند رسوب‌زایی دارد (۱۲). بررسی و اندازه‌گیری رسوبات در سه زیرحوضه که فرم دشت سیلابی، فعالیت معدن‌کاری و پوشش گیاهی از ویژگی های قابل توجه این سه زیرحوضه بود نشان داد، بیشترین میزان رسوب حاصل فعالیت‌های معدن‌کاری بوده و دو زیرحوضهٔ دیگر ۱۳ درصد کمتر رسوب تولید کردند (۱۵). در یک پژوهش که در فلات لسی چین انجام شد، برای بررسی عوامل ژئومورفولوژیکی مؤثر در فرسایش خاک و رسوب از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، روابط رگرسیونی و آزمون آنالیز واریانس یک طرفه استفاده شد. روابط زوجی بین ویژگی‌های ژئومورفیکی حوضه آبخیز شامل مساحت، محیط، شیب، شکل، تراکم گالی، کشیدگی با داده‌های میانگین رسوب، رسوب کل، رسوب سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۱ و ۲۰۱۱-۲۰۰۰ بررسی شد. نتایج نشان داد رابطه قوی و معنی‌داری بین ویژگی‌های ژئومورفیکی حوضه و میزان رسوب سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۱ وجود دارد (۷). نتایج بررسی تأثیر عوامل ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی در تولید رسوب معلق با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که سنگ‌های رسوبی عامل اصلی در تولید رسوب معلق است (۵). نتایج مطالعه مدل‌سازی رابطه بین میزان بار رسوب معلق با ویژگی‌های ژئومورفیکی حوضه رودخانه قرنقو 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، برای شناسایی عوامل تأثیرگذار بر میزان رسوب حوضه از بین متغیرهای موجود از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوضه به‌ترتیب ۵۰، ۲۰/۹، ۱۳/۶ و ۷/۵ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کند (۳). نتایج بررسی عوامل اصلی در تولید رسوب در حوضه کایوگا، اوهایو نشان داد، بارش بالاترین عامل در رسوب حوضه را دارد (۱).

بررسی‌های صحرایی انجام شده در حوضه آبخیز کن نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از منطقه تحت پوشش اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای قرار داشته ورواناب‌های ناشی از بارندگی که اغلب از ارتفاعات بالادست و

پرشیب این منطقه سرچشمه می‌گیرند، توسط آبراهه‌های متعددی زهکشی شده و بار رسوبی قابل توجهی را تولید می‌کند که ضمن عبور از مناطق کم شیب، اراضی شهری و تأسیسات، مناطق مسکونی پایین‌دست خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از مسائل مهم در حوضهٔ آبخیز کن، عملیات راه سازی و احداث آزاد راه تهران– شمال و وجود معادن شن و ماسه در بالادست حوضه است. بدین‌ترتیب علاوه بر عوامل طبیعی که خود توان بالایی در ایجاد فرسایش و تولید رسوب دارد عوامل آنتروپوژنیک یا انسانی نیز موجب تشدید آن شده است که علاوه بر اثرات اثرات محلی مانند از بین رفتن مواد آلی خاک، کاهش تولیدات کشاورزی دارای اثرات برون محلی مانند پرشدن سدها، تخریب جاده و مناطق مسکونی و آلودگی منابع آب به‌صورت بار رسوب معلق یا گل‌آلودگی در این حوضهٔ آبخیز شده است. باتوجه به اینکه بخشی از آب دریاچه مصنوعی چیتگر تهران از رودخانه کن تأمین می‌شود و عدم گل‌آلودگی آن یکی از شاخص‌های مهم هنگام آبگیری است، بنابراین، شناخت عوامل مؤثر در تولید بار رسوب معلق و تأثیر مقیاس زمانی و مکانی بر غلظت رسوب معلق می‌تواند در ارائه راهکارهای کاهش گل‌آلودگی مفید باشد. بنابراین، اهداف این مطالعه بررسی ارتباط بین غلظت رسوب معلق و ویژگی‌های آبخیز رودخانه کن با استفاده از رگرسیون مؤلفه‌های اصلی و شناخت تأثیر فصل و زیرحوضه‌ها بر غلظت رسوب معلق بود. شکل ۱، تصویری از گل‌آلودگی در خروجی حوضه آبخیز کن را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

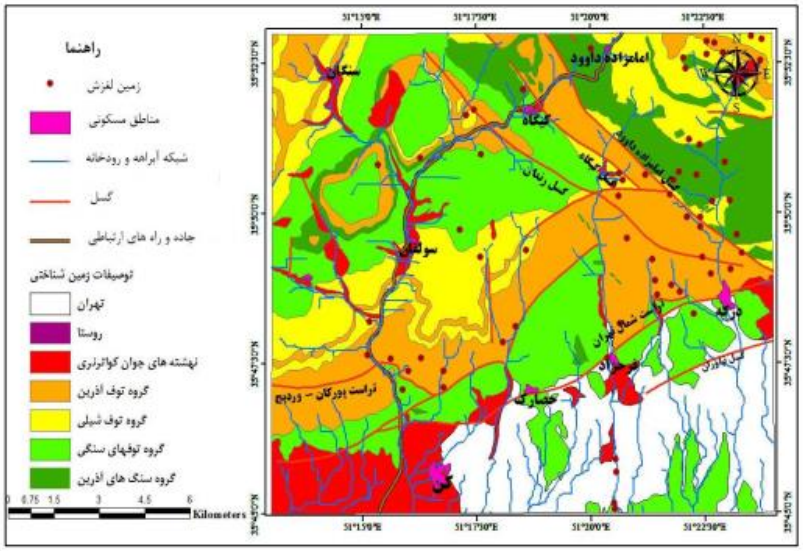
ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کن با مساحتی معادل ۲۱۵ کیلومتر مربع و در بالادست منطقه ۲۲ تهران قرار دارد. این حوضه حد فاصل ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه ۵۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است. سازند کرج بخش شیل آسارا، شیل زیرین، توف بالایی و میانی بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی حوضهٔ آبخیز کن را نشان می‌دهد. رودخانه کن یک رودخانه دائمی بوده که از به‌هم پیوستن رودخانه‌های کشار، تالون، سولقان، پایین‌دست سولقان و امامزاده داوود تشکیل و تعدادی آبراهه‌های فصلی نیز به آن افزوده می‌شود. این حوضه از شمال، شمال غرب و شمال شرق به حوضه آبریز رودخانه کرج، از جنوب غرب به حوضه آبریز چیتگر و از شرق به حوضه آبریز فرحزاد و حصارک محدود می‌شود (شکل ۳). مرتفع‌ترین نقطه ۳۸۲۲ متر در زیرحوضه امامزاده داوود (ع) و پست‌ترین نقطه با ۱۳۲۷ متردر زیرحوضه کن در شهر تهران قرار دارد. کمینه و بیشینه شیب به‌ترتیب ۰ و بیشتر از ۵۰ درصد است. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۴۱۴/۱۳ میلی‌متر است و دبی متوسط رودخانه کن بالغ بر ۲/۲ متر مکعب در ثانیه و حجم سالانه آن نیز حدود ۷۰ میلیون متر مکعب است. کاربری اراضی از تنوع کمتری برخوردار بوده و شامل مرتع (غنی، متوسط و فقیر)، باغات، سکونتگاه و صخره است و بیشترین مساحت کاربری مربوط به کاربری مراتع متوسط است.

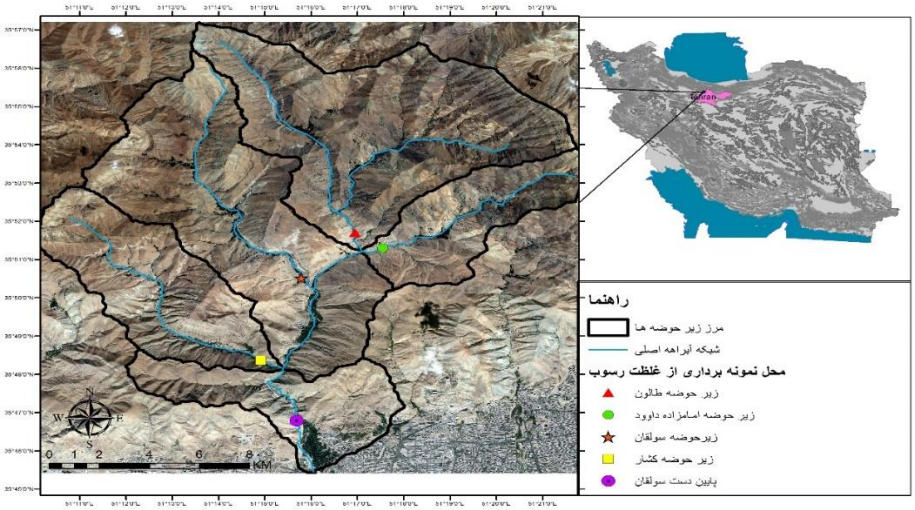
نمونه‌برداری و تعیین غلظت رسوب معلق بر اساس مقیاس مکانی و زمانی

به‌منظور نمونه‌برداری از غلظت رسوب معلق، در طی بازه زمانی در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ و در چهار رخداد بارشی (اسفند سال ۹۵ و فروردین، اردیبهشت و دی ماه ۹۶)، از خروجی زیرحوضه‌ها و خروجی اصلی حوضه آبخیز (شکل۳)، نمونه‌های رسوب معلق، برداشت شد. بدین‌صورت که در حین بارش و گل‌آلوده شدن رودخانه با استفاده از یک ظرف بیست لیتری هر ۱۵ دقیقه یک بار به مدت ۲ ساعت از خروجی‌های تعیین شده از آب رودخانه برداشت صورت گرفت. نمونه‌های برداشت شده در آن دو ساعت، به‌طور کامل

شکل ۱. تصویری از بار رسوب معلق یا گل‌آلودگی در خروجی آبخیز رودخانه کن (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز کن، تهیه شده بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران (۲۰) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۳. نقشه منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری رسوب معلق (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مخلوط شد تا یک نمونه همگن به‌دست آید. یک نمونه ۱/۵ لیتر از نمونه همگن برداشت و بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه رواناب را از صافی گذرانده و مقدار بار رسوب جمع شده را درون آون به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا خشک شود، سپس آن را وزن کرده و تقسیم بر حجم کل نمونه رواناب (۱/۵ لیتر) حاوی رسوب کرده، بدین‌ترتیب غلظت رسوب هر زیر حوضه در مقیاس های زمانی و مکانی محاسبه شد (۱ و ۱۷). جدول ۱ میزان میانگین غلظت رسوب معلق و ویژگی‌های مورد استفاده در زیرحوضه‌های آبخیز را نشان می‌دهد.

بررسی تأثیر مقیاس زمانی و مکانی (فصل و زیرحوضه) بر غلظت رسوب معلق

برای بررسی معنی‌داری تفاوت غلظت نمونه‌ها در مقیاس زمانی و مکانی از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. همچنین، پس از مشخص‌شدن وجود نابرابری در میانگین‌های درون‌گروهی، برای یافتن ریشه نابرابری و تشخیص اینکه کدام گروه یا گروه‌ها با گروه‌های دیگر تفاوت چشمگیری یا اختلاف آماری دارند، از پس آزمون یا (Post Hoc) استفاده شد.

تحلیل رگرسیون مؤلفه‌های اصلی

ابتدا با استفاده از آزمون کلوگروف- اسمیرنوف، نکویی برازش داده‌ها به توزیع نرمال انجام شد. سپس، به‌منظور بررسی تناسب و کفایت داده‌ها برای تحلیل عامل‌ها از آماره‌های KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) و بارتلت (Bartlett's test) استفاده شد. سپس در گام بعدی، به‌منظور تعیین ارتباط بین غلظت رسوب معلق و ویژگی‌های زیرحوضه‌های آبخیز کن از رگرسیون مؤلفه‌های اصلی استفاده شد (۱۱). شانزده متغیر اصلی شامل ویژگی‌های فیزیوگرافی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی در زیرحوضه‌ها مورد تجزیه قرار گرفتند. عامل‌هایی که دارای مقادیر ویژه بیش از یک بودند تعیین و بر اساس بار عاملی محاسبه شده بر اساس روش واریماکس (Varimax) و مقدار اشتراک آنها، ویژگی های هر عامل تعیین شد. روش ورود داده‌ها، انتخاب رو به جلو (forward) بوده و در مرحله آخر امتیاز هر یک از عوامل محاسبه و با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره ارتباط بین بار رسوب معلق و امتیازهای عامل‌ها تعیین شد. با استفاده از روش گام‌به‌گام متغیرهای مستقلی که تأثیر چندانی در متغیر وابسته نداشته باشند حذف می‌شوند، به‌طوری که در پایان مناسب‌ترین مدل ارائه می‌شود و همچنین برای اعتبارسنجی مدل رگرسیون ارائه شده، از روش حداقل مربعات استفاده شد.

مدل‌سازی بار رسوب معلق بر اساس ویژگی زیرحوضه‌ها

ابتدا تحلیل توابع تشخیص و تحلیل مازاد داده (Redundancy analysis) روی عوامل دارای مقادیر ویژه بیش از یک، صورت گرفت و عواملی که دارای بیشترین مقدار تأثیرپذیری واریانس و همچنین بیشترین ضریب در معادله به‌دست آمده بود، به‌عنوان عامل مؤثر بر بار رسوب معلق انتخاب شد. سپس دوباره روی ویژگی‌های حوضه‌ها که بیشترین وزنه (بار عاملی) را در آن عامل داشتند، تحلیل توابع تشخیص و تحلیل مازاد داده صورت گرفته و عواملی که بیشترین ضریب را در توابع به‌دست آمده داشتند، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در بار رسوب معلق انتخاب شدند. تمام محاسبات آماری توسط نرم افزار SPSS IBM نسخه ۱۹ انجام شد (۷ و ۱۴).

نتایج

نتایج بررسی غلظت رسوب بر اساس عامل زمان و مکان

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، بالاترین میانگین غلظت رسوب از لحاظ مکانی، مربوط به دو زیرحوضه پایین‌دست وکشار به‌ترتیب با میزان ۸/۶۳ و ۳/۲۱ (گرم برلیتر) است. همچنین، بررسی غلظت رسوب در سه فصل زمستان، بهار و پاییز نشان می‌دهد که از لحاظ زمانی در فصل بهار هر سه زیرحوضه دارای بالاترین غلظت رسوب معلق بودند. اطلاعات

جدول ۱. میانگین غلظت رسوب معلق و ویژگی های مورد استفاده در زیرحوضه‌های آبخیز کن

متغیرها	زیرحوضه طالون	زیرحوضه امامزاده داوود	زیرحوضه کشار	زیرحوضه سولقان	پایین‌دست سولقان
درصد سازند فرسایش‌پذیر	۱/۲۴	۰/۷۱	۵/۹۶	۳/۱۹	۳۶/۶۵
درصد سازند نسبتاً فرسایش‌پذیر	۵۲/۳۵	۳۱/۹۶	۵۲/۵۸	۵۹/۹۷	۲۲۶/۲۲
درصد سازند مقاوم در برابر فرسایش	۱۰/۴۱	۹/۵۵	۷/۴۵	۹/۲۵	۳۶/۶۶
درصد سازند نسبتاً مقاوم در برابر فرسایش	۳۵/۹۴	۵۷/۷۵	۳۳/۹۲	۲۷/۵۸	۲۰۰/۱۶
درصد کاربری مرتع متوسط	۸۸/۰۹	۹۰/۴	۸۳/۵۱	۹۰/۷۳	۳۹۰/۷۱
درصد کاربری مرتع خوب	۱/۹۷	۰	۳/۶۷	۰/۳۴	۵/۹۸
درصد صخره	۷/۵۷	۴/۸۸	۵/۲۸	۳/۸۹	۲۴/۴۹
درصد باغ	۱/۴۳	۳/۹۵	۵/۳۵	۳/۲۲	۳۲/۳
درصد کاربری مسکونی	۰/۳۳	۰/۶۳	۱/۳۱	۰/۶۴	۵/۹
درصد فعالیت معدن کاوی	۰/۱۵	۰	۰/۴۶	۰/۱۵	۰/۷۶
درصد فعالیت احداث راه	۰/۱۶	۰	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۵۹
مساحت کیلومترمربع (km^2)	۶۷/۴۵	۲۳/۷۷	۶۵/۵	۳۴/۷۷	۲۱۶
ارتفاع متوسط متر (m)	۲۶۳۷	۲۵۷۲	۲۳۰۵	۲۲۷۰	۲۳۷۲
شیب متوسط به درصد	۵۸/۳۶	۵۶/۱۳	۵۰/۸۴	۴۷/۷۸	۵۲/۱۷
طول آبراهه اصلی کیلومتر (km)	۲۰/۵۹	۹/۱۷	۲۰/۳۴	۱۱/۳۹	۶۷/۶۶
تراکم زهکشی کیلومتردر کیلومتر مربع (km/km^2)	۲/۸۸	۲/۹۴	۳/۳۷	۳/۶۹	۳/۳۱

مربوط به اندازه‌گیری‌ها در جدول ۲ ارائه داده شده است.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه برای غلظت رسوب در مقیاس‌های مکانی و زمانی را نشان می‌دهد. در این جدول مجموع مربعات، میانگین مربعات، درجه آزادی و آماره F ارائه شده است. باتوجه به مقدار معنی‌داری این آزمون که برابر با ۰/۰۵ است، فرض صفر رد می‌شود و نتیجه می‌گیریم که تفاوت میانگین غلظت رسوب معلق در چهار زیرحوضه مورد مطالعه معنی‌دار است. یعنی تفاوت‌های مکانی یا به‌عبارتی دیگر عامل مکان در میانگین غلظت رسوب مؤثر است. اما از نظر زمانی مقدار معنی‌داری این آزمون بیشتر از ۰/۰۵ است (۰/۴۹۷)، بنابراین فرض صفر رد نمی‌شود و نتیجه می‌گیریم که تفاوت میانگین غلظت رسوب معلق در سه فصل مختلف معنی‌دار نیست. یعنی عامل فصل در غلظت رسوب تأثیرگذار نیست.

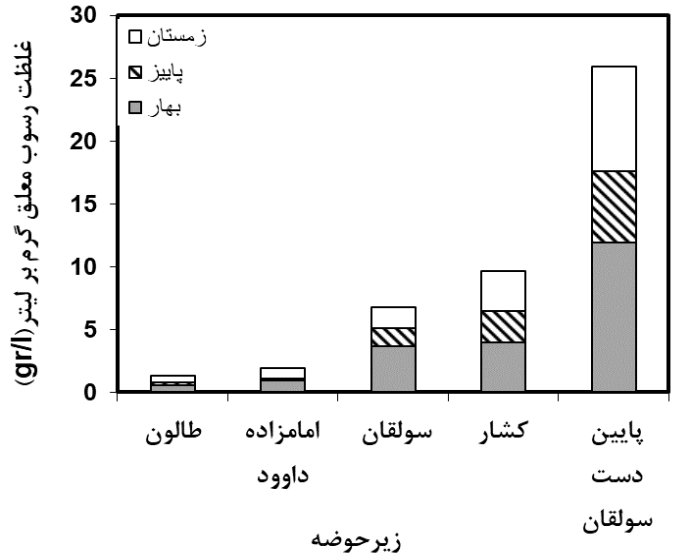
شکل ۴، تفاوت درون‌گروهی میانگین غلظت رسوب معلق در مقیاس‌های مکانی را نمایش می‌دهد که بر اساس نتایج تفاوت درون گروهی با استفاده از پس آزمون یا Post Hoc زیرحوضه‌های طالون، سولقان و امامزاده داوود و زیرحوضه کشار در یک گروه و حوضه پایین‌دست سولقان یا همان خروجی اصلی حوضه در گروه دیگر قرار گرفته است. به عبارت دیگر رسوب معلق هر یک از زیرحوضه‌ها با حوضه اصلی دارای تفاوت معنی‌دار است. با توجه به عدم معنی‌داری میانگین غلظت رسوب در فصول مختلف در

جدول۲. مشخصات نمونه‌برداری غلظت رسوب معلق در بازه‌های زمانی و مکانی

تاریخ/ زیرحوضه	میانگین گرم بر لیتر (gr/l)	۱۳۹۶/۹/۱۴	۱۳۹۶/۲/۱۳	۱۳۹۵/۱۲/۱۹
زیرحوضه طالون	۰/۴۳	۰/۱۹	/۵۸	۰/۵۴
زیرحوضه امامزاده داوود	۰/۶۳	۰/۱۲	۰/۹۴	۰/۸۵
زیرحوضه سولقان	۲/۲۶	۱/۴۶	۳/۶۲	۱/۷
زیرحوضه کشار	۳/۲۱	۲/۵۲	۳/۹۵	۳/۱۶
زیرحوضه پایین دست سولقان	۸/۶۳	۵/۷۲	۱۱/۹	۸/۲۸

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس یک طرفه برای غلظت رسوب در مقیاس های مکانی و زمانی

مقیاس مکانی (زیرحوضه)	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	معنی‌داری
بین گروه	۱۵/۹۱	۳	۵/۳۰	۹/۸۱	۰/۰۰۵
با گروه	۴/۳۳	۸	۰/۵۴		
جمع	۲۰/۲۴	۱۱			
مقیاس زمانی (فصل)	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آمارهF	معنی‌داری
بین گروه	۲/۹۱	۲	۱/۴۵	۰/۷۶	۰/۴۹۷
با گروه	۱۷/۳۳	۹	۱/۹۳		
جمع	۲۰/۲۳	۱۱			



شکل ۴. تغییرات غلظت رسوب معلق در مقیاس های زمانی و مکانی

مرحله تحلیل واریانس، نتایج تفاوت درون‌گروهی با استفاده از پس‌آزمون یا Post Hoc نشان داد که بین فصل‌ها (مقایسه دوگانه)، تفاوت معنی‌داری مشاهده نمی‌شود و هنگام مقایسه دوتایی فصل‌ها مقادیر معنی‌داری بیشتر از ۰/۰۵ است.

نتایج آزمون‌های آماری برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون چندمتغیره

تحلیل‌های آماری اولیه متغیرهای مورد مطالعه در قالب توزیع فراوانی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آزمون فرض نرمال‌بودن متغیرها پذیرفته شد (α >۰/۰۵). آزمون لیون نشان می‌دهد که فرض صفر مبنی بر برابری واریانس مورد پذیرش است، زیرا مقدار معنی داری۰/۱۷۱ و ۰/۱۳۱ بزرگتر از ۰/۰۵ است آماره‌های KMO و بارتلت به‌ترتیب با مقدار ۰/۷۵ و ۰/۰۱ کفایت و تناسب داده‌ها را برای انجام تجزیه مؤلفه‌های اصلی نشان داد. یعنی داده‌های مربوط به ۱۶ ویژگی‌های فیزیوگرافی در ۵ زیرحوضه کن، دارای توزیع نرمال هستند و امکان اجرای تجزیه مؤلفه‌های اصلی و تحلیل رگرسیون در ارتباط با آنها وجود دارد. ویژگی‌های مورد بررسی در هر زیرحوضه در جدول ۴، طور خلاصه به نمایش درآمده است.

تحلیل عامل‌ها بر ۱۶ ویژگی‌های مورد استفاده در زیرحوضه‌ها نشان داد که ۲ عامل اول محاسبه شده دارای مقادیر ویژه بیش از ۱ (شکل ۵) بوده و بنابراین، برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی استفاده شدند. نمودار مقادیر ویژه (شکل ۵) برای مشاهده شهودی تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز مورد استفاده پژوهشگران قرار می‌گیرد. تعداد مؤلفه‌هایی که مقدار ویژه بالاتر از ۱ دارند، تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز خواهد بود. هنگام استفاده از این نمودار محلی که خط حاصل شکستگی پیدا می‌نماید و به‌صورت یک خط به‌نسبت صاف تبدیل می‌شود را به‌عنوان شمارش تعداد عامل‌ها در نظر می‌گیرند.

دو فاکتور انتخابی در مجموع ۹۶/۰۴ درصد واریانس مشاهده شده در داده‌ها را تأیید می‌کند (جدول ۵). بررسی مشارکت (Communalities) ویژگی‌های مورد استفاده در زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد که عامل‌های محاسبه شده بیش از ۹۰ درصد واریانس در تمامی ویژگی‌ها به جز مرتع خوب و بیش از ۸۰ درصد واریانس در میزان درصد معدن‌کاری را تأیید می‌کند (جدول ۵). در مجموع تمامی خصوصیات در هر دو عامل مورد بررسی قرار گرفتند.

اولین عامل، بار مثبت قوی (با بار عاملی بیش از ۰/۷۵) برای خصوصیات درصد سازند فرسایش پذیر، نسبتاً فرسایش‌پذیر، سازند مقاوم، درصد مرتع متوسط، خوب، رخنمون سنگی، کاربری باغ، مسکونی، درصد فعالیت احداث آزادراه (تسطیح دامنه‌ها)، مساحت و طول آبراهه دارد. این عامل میزان ۷۷/۵ درصد واریانس کل را شامل شده است. عامل دوم با میزان ۱۸/۵ درصد واریانس کل، دارای بار عامل مثبت و قوی با تراکم آبراهه و دارای بار عامل منفی قوی ارتفاع و درصد شیب است.

نتایج مدل‌سازی بار رسوب معلق بر اساس ویژگی زیرحوضه‌ها

پس از تعیین عامل‌ها امتیاز (Score) هر یک از عوامل محاسبه و با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره ارتباط بین بار رسوب معلق و امتیازهای عامل‌ها تعیین شد. اطلاعات مربوط به نتایج متغیرهای پیش بینی کننده در جدول ۶، ارائه شده است.

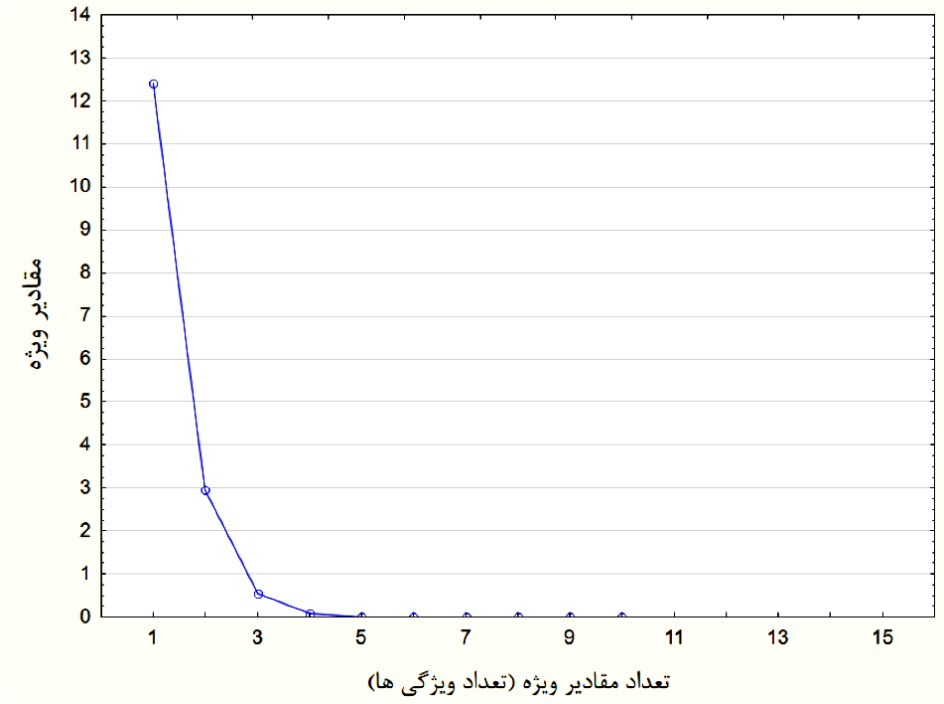
رابطه (۱) نتیجه حاصل از اجرای رگرسیون چند متغیره بین غلظت رسوب معلق و تجزیه مؤلفه‌های اصلی، یا (PCs) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مشخص شد که تنها فاکتور یا عامل اول (PC1) به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده وارد مدل شده است و این مدل قادر است تا ۹۷ درصد تغییرات رسوب معلق را تأیید کند. همبستگی جزیی (Partial Correlation) با مقدار ۰/۹۸ نیز نشان می‌دهد که عامل اول حداکثر سهم را در پیش‌بینی رسوب معلق دارد.

$$SS=5.6–9.0\ PC1 \qquad (۱)$$

که SS میانگین غلظت رسوب معلق، و PC1 عامل اول حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی به روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی است. آنالیز مازاد داده و تحلیل توابع تشخیص ۲ عامل مورد بررسی نشان داد که ضرایب کانونیک توابع تشخیص بیش از

جدول ۴. نتایج آزمون‌های آماری اولیه برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی

نوع آزمون	سطح معنی‌داری	مقدار آماره
آزمون کملوگروف- اسمیرنوف	۰/۵۷۰	۰/۸۶۰
آزمون لیون	۰/۱۳۱	۱/۱۷۱
آزمون KMO	۰/۰۰۰	۰/۷۵
آزمون بارتلت	۰/۰۰۰	۰/۰۱



شکل ۵. نمودار مقادیر ویژه منتج از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در حوضه آبخیز کن

۸۹ درصد واریانس را تأیید می‌نمایند. ضرایب حاصل از این آنالیزها در جدول ۶ و رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$Y1= 1.368\ (PC1)\ -0.179\ (PC2) \qquad (۲)$$

رابطه دوم، ضریب همبستگی کانونی یا رابطهٔ خطی بین متغیرهای عامل اول و دوم را نشان می‌دهد. همبستگی کانونی برای عامل اول (PC1) حدود ۷/۵ برابر ضریب عامل دوم (PC2) است (رابطه ۲). یعنی عامل سازند فرسایش‌پذیر به‌عنوان عامل متغیر پیش‌بینی‌کننده، ۷/۵ برابر عامل سازند به‌نسبت فرسایش‌پذیر در غلظت رسوب معلق به‌عنوان عامل ملاک مؤثر است.

نتایج به‌دست آمده از تحلیل توابع تشخیص تأیید می‌نماید که تغییرات و اهمیت عامل اول بیش از عامل دوم است و بدین ترتیب ویژگی‌های زیرحوضه‌ها که در عامل اول شناسایی شدند، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی وضعیت فرسایش و تولید رسوب معلق هستند. بنابراین، آنالیز مازاد داده و همبستگی توابع تشخیص بر خصوصیاتی که در عامل اول (PC1) مشارکت دارند انجام شد و نشان داد که به‌ترتیب خصوصیات درصد سازند فرسایش‌پذیر، سازند به‌نسبت

جدول ۵. نتایج تجزیه مؤلفه های اصلی و بار عامل‌ها بر اساس روش واریماکس

ویژگی های زیرحوضه‌ها	عامل دوم	عامل اول	مشارکت
درصد سازند فرسایش‌پذیر	۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۹۹
درصد سازند به‌نسبت فرسایش‌پذیر	۰/۱۵	۰/۹۸	۰/۹۸
درصد سازند مقاوم	۰/۰۱	-۰/۹۶	۰/۹۶
درصد سازند به‌نسبت مقاوم	-۰/۰۳	۰/۹۵	۰/۹۵
درصد مرتع متوسط	۰/۰۷	۰/۹۷	۰/۹۷
درصد مرتع خوب	۰/۱۳	۰/۸۸	۰/۸۸
درصد رخنمون سنگی	-۰/۰۵	۰/۹۷	۰/۹۷
درصد کاربری باغ	۰/۱۳	۰/۹۳	۰/۹۱
درصد کاربری مسکونی	۰/۱۶	۰/۹۴	۰/۹۳
درصد معدن کاوی	۰/۳۳	۰/۸۸	۰/۸۸
درصد فعالیت احداث آزاد راه (تسطیح دامنه ها)	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۹۸
مساحت کیلومتر مربع (km^2)	۰/۰۴	۰/۹۶	۰/۹۵
ارتفاع متوسط متر (m)	-۰/۹۸	-۰/۱۴	۰/۹۹
درصد شیب متوسط	-۰/۹۹	-۰/۰۳	۰/۹۹
طول آبراهه اصلی کیلومتر (km)	۰ /۰۴	۱	۰/۹۹
تراکم زهکشی کیلومتردر کیلومتر مربع (km/km^2)	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۹۷
مقدار ویژه	۲/۹۷	۱۲/۴۰	
درصد واریانس	۱۸/۵۶	۷۷/۴۸	
درصد واریانس تجمعی	۹۶/۰۴	۷۷/۴۸	

جدول ۶. بهترین نتایج متغیرهای پیش بینی‌کننده غلظت رسوب با استفاده از رگرسیون چند متغیره

مجموع مربعات باقیمانده	سطع معناداری	همبستگی	همبستگی جزیی	مقدار p	مقدار T		پیش‌بینی‌کننده	متغیروابسته
۱/۰۸۵	<۰/۰۱	۰/۹۷		۰/۰۲	۲/۶	۵/۶		غلظت رسوب معلق
			-۰/۹۸	۰/۰۱	-۸/۸	—/۹	عامل اول	
			۰/۳۲	۰/۶۷	۰/۵	۰/۵	عامل دوم	

فرسایش پذیر، درصد فعالیت احداث آزادراه (تسطیح دامنه‌ها) و طول آبراهه مهم‌ترین ویژگی‌های زیرحوضه‌ها در تولید و غلظت رسوب معلق حوضه آبخیز کن هستند (۳).

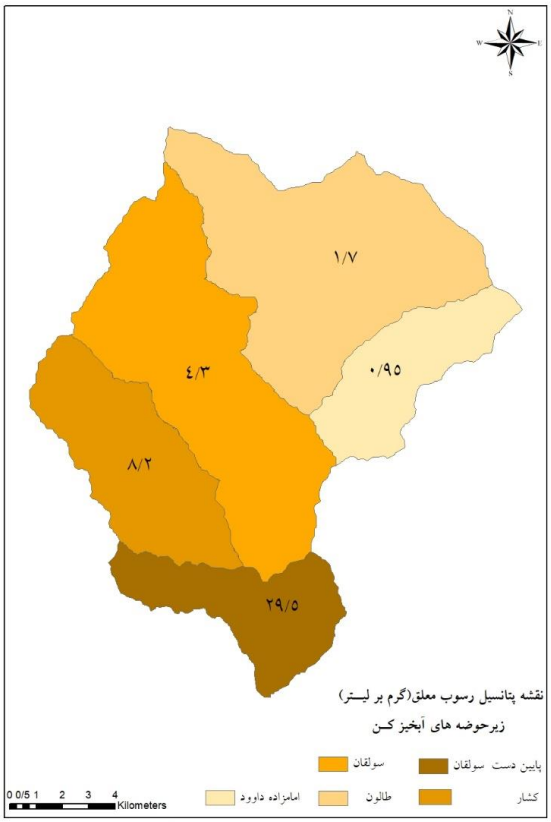
$$Y2= 1.35 (EL) + 1.216 (FEL) + 0.793 (HW) - 0.445 (SL) \quad (۳)$$

در این رابطه EL درصد سازند فرسایش‌پذیر، FEL درصد سازند به‌نسبت فرسایش‌پذیر، HW درصد فعالیت احداث آزاد راه و تسطیح دامنه‌ها و SL طول آبراهه است. همبستگی کانونی برای درصد سازند فرسایش‌پذیر به‌ترتیب حدود یک، ۱/۷ و ۳ برابر ضریب درصد سازند به‌نسبت فرسایش‌پذیر، درصد فعالیت احداث آزادراه (تسطیح دامنه‌ها) و طول آبراهه است (رابطه ۳). برای درک بهتر رابطه فوق، با در نظرگرفتن ضرایب به‌دست آمده از رابطه خطی بین مؤلفه‌های اصلی و ضریب هر کدام، در تولید و تهیه نقشه رسوب پتانسیل استفاده شد. به این صورت که با جایگذاری مقادیر پیش‌بینی‌کننده هر مؤلفه در ضرایب به‌دست آمده از مدل، میزان غلظت رسوب تخمین زده شد و نقشه پتانسیل رسوب معلق تهیه شد (شکل ۶).

بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین ظرفیت تولید رسوب مربوط به زیرحوضه پایین دست سولقان و کمترین مربوط به زیرحوضه امامزاده داوود است. پایین‌دست سولقان، نزدیک به ۵۰ برابر امامزاده داوود ظرفیت تولید رسوب دارد، این نسبت در زیرحوضه کشار، سولقان و طالون به‌ترتیب حدود ۵، ۱۰ و ۲۵ برابر است (شکل ۶).

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه هدررفت خاک و تولید رسوب به یک بحران جهانی تبدیل شده است. آگاهی از فرآیند زمانی و مکانی این معظل، برای مدیریت منابع خاک و آب یک نیاز فوری و ضروری است. با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری غلظت رسوب در دورهٔ زمانی ۹۵ و ۹۶ زیرحوضه‌های پایین‌دست سولقان و کشار به ترتیب با میزان ۸/۶۳ و ۳/۲۱ (گرم در لیتر) دارای بالاترین غلظت رسوب معلق از نظر مکانی بوده و همچنین از نظر زمانی درفصل بهار نیز بیشترین غلظت رسوب را به خود اختصاص داده‌اند. نتیجهٔ به‌دست‌آمده با یافته نصرتی و جلالی(۱۶)، مبنی بر بالاترین درصد تولید رسوب سهم کاربری مرتع در فصل بهار در حوضه آبخیز زیارت مطابقت دارد. نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه برای غلظت رسوب در مقیاس‌های مکانی و زمانی نشان داد، تفاوت‌های مکانی یا به عبارتی دیگر عامل مکان در میانگین غلظت رسوب موثر است. اما از نظر زمانی مقدار میانگین‌ها دارای اختلاف معنی‌دار نیست. تحلیل عامل‌ها این امکان را ایجاد نمود تا در منطقه مطالعاتی ۱۶ خصوصیت زیرحوضه‌ها در گروه‌های کمتری گروه‌بندی شوند. هر یک از عامل‌ها به یک یا چند فرآیند فرسایش خاک مربوط است که بر اساس نوع کاربری اراضی موجب فرسایش و تولید رسوب می‌شوند و خود دارای تغییرات مکانی هستند. عامل‌های مرتبط با فرسایش‌پذیری سازندها و فعالیت‌های آنتروپوژنیک بهترین شاخص‌ها برای بررسی وضعیت تولید رسوب و گل‌آلودگی رودخانه کن هستند. بر اساس نتایج رابطهٔ به دست آمده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تعیین رابطهٔ بین عوامل اصلی، در محیط جی‌ای‌اس، نقشه پتانسیل رسوب زیرحوضه‌ها تولید شد. بر این اساس، پایین دست سولقان، نزدیک به ۵۰ برابر امامزاده داوود ظرفیت تولید رسوب این نسبت در زیرحوضه کشار، سولقان و طالون به ترتیب حدود ۵، ۱۰ و ۲۵ برابر است. نتیجه مطالعه نصرتی و همکاران (۱۵) که در همین حوضه با تکنیک منشأیابی و با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی و شاخص‌های هوازدگی، سهم زیرحوضه‌ها را در تولید رسوب بررسی کردند، نشان می‌دهد زیرحوضه کشار با ۴۸ درصد، وپایین دست، سولقان با ۳۵ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب دارند که نشان از اهمیت بالای این دو زیرحوضه در میزان تولید رسوب است. مطالعهٔ دیگر نصرتی و همکاران (۸) که با استفاده از مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) نرخ فرسایش خاک را ۷ تن در هکتار در سال برآورد کردند، حاکی از نرخ بالای فرسایش و تخریب خاک در این حوضه است که عوامل توپوگرافی و فقر پوشش گیاهی از فاکتورهای کلیدی در این مهم می‌باشد. واحدهای سنگی حوضه آبخیز کن به چهار گروه



شکل ۶. نقشه پتانسیل رسوب به‌دست‌آمده از نتایج رگرسیون مؤلفه‌های اصلی

از مقاومت زیاد در برابر فرسایش تا فرسایش‌پذیر طبقه‌بندی شده‌اند که در این پژوهش به عنوان عوامل اصلی در رسوب معلق شناخته شدند. نتایج به دست آمده با مطالعات غفاری و همکاران (۱۰) مطابقت دارد، آنها با استفاده از مدل اصلاح‌شده پسیاک، میزان رسوب دهی ویژه کل حوضه را، ۷۸/۷۲ تن در هکتار در سال و رسوب‌دهی کل حوضه کن را ۵۰۵۴۹ تن در سال به دست آوردند که رقم قابل توجهی است و از دلایل آن می‌توان به حساسیت سازندهای منطقه به فرسایش، نوع خاک، شیب زیاد و عدم کاربری مناسب اراضی اشاره کرد. به‌گونه‌ای که مناطق با شدت فرسایش زیاد، منطبق بر سازندهای حساس و شیب های تند و زیاد است.

تشکر و قدردانی

هزینه مالی این پژوهش با پشتیبانی مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) تحت قرارداد طرح پژوهشی شماره ۹۹۰۱۹۴۸۸ انجام شده است. بدینوسیله از این سازمان تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

منابع مورد استفاده

1. Ampomah, R., H. Hosseiny, L. Zhang, V. Smith and K. Sample-Lord. 2020. A Regression-Based Prediction Model of Suspended Sediment Yield in the Cuyahoga River in Ohio Using Historical Satellite Images and Precipitation Data. *Water* (12)3: 881-892.

2. Ares, M. G., M. Varni and C. Chagas. 2016. Suspended sediment concentration controlling factors: an analysis for the Argentine Pampas region. *Hydrological Sciences Journal* (61)12: 2237-2248.
3. Asghari, S. and E. ghaleh. 2020. Investigation of the relationship between geomorphic characteristics and sediment yield (Case Study: Gharanghoo Basin in East Azarbaijan Province). *Quantitative Geomorphological Research* (8)3: 146-164.
4. Bugosh, N. and E. Epp. 2019. Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine *Catena* (174): 383-398.
5. Bywater-Reyes, S., C. Segura and K. D. Bladon. 2017. Geology and geomorphology control suspended sediment yield and modulate increases following timber harvest in temperate headwater streams. *Journal of Hydrology* (548): 754-769.
6. Cavalli, M., S. Trevisani, F. Comiti and L. Marchi. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* (188): 31-41.
7. Cheng, N. N., H. M. He, S. Y. Yang, Y. J. Lu and Z. W. Jing. 2017. Impacts of topography on sediment discharge in Loess Plateau, China. *Quaternary International* (440): 119-129.
8. Derakhshan Babaei, F., K. Nosrati, F. Ahmadi-Mirghaed and M. Egli. 2021. The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. *Catena* (204): 1021-1035.
9. Fryirs, K. 2013. Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms* (38): 30-46.
10. Ghafari, G., H. Ahmadi, O. Bahmani and A. A. Nazari Samani .2014. Zoning Sensitive Areas to Erosion in the Kan Basin by Using Geographic Information System (GIS). *Geographical Researches* (28): 153-166. (In Farsi).
11. Grauso, S., F. Pasanisi, C. Tebano, M. Grillini and A. Peloso. 2018. Investigating the Sediment Yield Predictability in Some Italian Rivers by Means of Hydro-Geomorphometric Variables. *Geosciences 8*(7): 249-260.
12. Joshi, L. M., B. S. Kotlia and A. K. Singh .2019. Geomorphic characteristics of landscape development and formation of lakes in the zone of Munsiari Thrust, Garhwal Himalaya, Uttarakhand, India. *Quaternary International* (507): 233-248.
13. Larsen, I., D. Montgomery and O. Korup .2010. Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience* (3): 247-251.
14. Lewin, J., P. Ashworth and R. Strick. 2016. Spillage sedimentation on large river floodplains. *Earth Surface Processes and Landforms* (42): 290-305.
15. Nosrati, K., Z. Fathi and A. Collins. 2019. Fingerprinting sub-basin spatial suspended sediment sources by combining geochemical tracers and weathering indices. *Environmental Science and Pollution Research* (26): 28401-28414.
16. Nosrati, K. and S. Jalali. 2017. Investigating suspended sediment yield in Ziarat Drainage Basin, Gorgan in different seasons using sediment fingerprinting technique. *Iranian journal of Ecohydrology* 4(3): 887-895.
17. Nosrati, K. 2011. Applied Methods in Scientific Research. Jahad Daneshghahi Press, center of Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (In Farsi).
18. Zhong, X. and D. Enke (2016) Forecasting daily stock market return using dimensionality reduction. *Expert Systems with Applications* (67): 119-129.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 27, No. 2, Summer 2023, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Investigating the Relationship between Suspended Sediment Concentration and Watershed Characteristic of the Kan River in Tehran Using Principal Component Regression

S. Jalali, K. Nosrati* and Z. Fathi[1]

(Received: April 21-2022 ; Accepted: January 29-2023)

Abstract

The geomorphic characteristics of the watersheds are interrelated and the temporal and spatial scale in the form of season and sub-basins affect the concentration of suspended sediment. One of the objectives of this study was to investigate the relationship between suspended sediment concentration and watershed characteristics of Kan River using principal components regression and to recognize the effect of seasons and sub-basins on sediment concentration. The concentration of suspended sediment during four rainfall-runoff events in three seasons and in sub-basins was measured and calculated. The sixteen physiographic and land use characteristics were determined in the sub-basins and the main factors were identified and the scores of each factor for each feature were calculated using principal component analysis (PCA). The results of variance analysis showed that the concentration of suspended sediment was significant in terms of time scale and spring had the highest rate of sedimentation. Redundancy analysis and canonical analysis on the properties that participate in the first factor (PC1) showed the characteristics of the percentage of erodible formation, relatively erodible formation, and percentage of free construction activity, respectively. Road (slope leveling) and stream length are the most essential attributes of sub-basins in the production and concentration of suspended sediment in the study area.

Keywords: Principal component analysis, Suspended sediment concentration, Multivariate regression

1. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*: Corresponding author, Email: k_nosrati@sbu.ac.ir