

برآورد بار رسوب معلق و ارزیابی همگنی و ناهمگنی دبی و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسلیان، مازندران)

اکبر نوروزی^۱، مهدی پژوهش^{۲*}، خدایار عبدالهی^۲، ابادر اسمعیلی عوری^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲، تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰۸/۱۳)

چکیده

از آنجا که بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور ایران ایستگاه رسوب‌سنجی ندارند، بین اندازه‌گیری‌ها و برآوردهای انجام‌شده اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. به همین دلیل، ارزیابی استفاده از مدل‌های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلق انتقال رودخانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی همگنی و ناهمگنی، روند تغییرات میزان دبی جریان و رسوب و مقایسه مناسب کارایی روش‌های برآورد بار رسوب معلق با استفاده از منحنی سنج در منطقه مطالعه شده است. با استفاده از نرم‌افزار ProUCL از طریق آزمون من-کندال و پتیت به ترتیب به تغییرات روند و ارزیابی همگنی و ناهمگنی سری زمانی دبی آب و رسوب پرداخته شد. برای برآورد رسوب‌دهی معلق منحنی سنج یک‌خطی، دوخطی و حد وسط دسته‌ها بررسی شده و بهترین روش از میان روش‌های یادشده از طریق معیار R^2 ، NSE، RMSE و SD ارزیابی و انتخاب شد. نتایج نشان داد روش حد وسط دسته‌ها با بیشترین کارایی به عنوان روش مناسب برای این منطقه است. همچنین، نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات دبی جریان و رسوب با استفاده از آزمون من-کندال با سطح ۵ درصد معناداری نشان داد روند به صورت نزولی بوده و نشان‌دهنده تطابق تغییرات دبی و رسوب در این منطقه است. در ارزیابی آزمون پتیت مشخص شد که سری زمانی گسسته در دبی رسوب ناهمگن و در دبی آب همگن است؛ بنابراین داشتن دانشی در ارتباط با همگنی و ناهمگنی دبی جریان و رسوب می‌تواند برای اقدامات حفاظتی و تعدیل آثار زیست‌محیطی مؤثر باشد.

کلیدواژگان: آزمون پتیت، آزمون من-کندال، رسوب‌دهی معلق، منحنی سنج رسوب، ناهمگنی رسوب.

مقدمه

فرسایش خاک یک فرایند پیچیده و مرکب است که از عملکرد زیرفرایندهای مرتبط با تخریب، جداسازی، حمل ذرات خاک و رسوب بر اثر عوامل فرساینده نشئت می‌گیرد [۱ و ۲]. بنابراین، در ارتباط با فرسایش خاک عوامل دخیل در هر زیرفرایند، میزان و الگوی فرسایش را تغییر می‌دهند و در ارتباط با رفتار تولید رسوب بر میزان خروجی کل حوضه تأثیر می‌گذارند. فرسایش خاک به عوامل متعددی از جمله اقلیم، خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی بستگی دارد و سبب مشکلاتی همچون دخالت در کاهش نفوذ و آسیب به خاک، رسوب‌گذاری در مخازن و کاهش عمر مفید مخازن در حوضه آبخیز می‌شود. عموماً فرسایش خاک به صورت بخشی تا محلی است [۳-۷]. به طوری که تحت تأثیر فرایندهای مختلف محیطی قرار می‌گیرند که ناشی از همگنی و ناهمگنی مکانی باشد. همگنی و ناهمگنی مکانی فرسایش و رسوب در یک حوضه آبخیز، نتیجه فرایندهای مختلفی از جمله نوع برهم‌کنش آب و خاک، خصوصیات فیزیکی و ناهمگنی محیطی است. این عوامل سبب می‌شوند که چگونگی توزیع مکانی فرسایش و رسوب تحت تأثیر قرار گیرند و ساختارهای مکانی متفاوتی را از خود نشان دهند. بنابراین، آگاهی از همگنی و ناهمگنی فرسایش و رسوب به منظور درک عمیق‌تر مباحث مختلف فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز، اهمیت دارند. با توجه به این اهمیت، شناخت ناریب الگوهای همگنی و ناهمگنی مکانی فرسایش و رسوب با استفاده از راهبردهای قابل اطمینان ضروری است [۸]. مدل‌های هیدرولیکی انتقال رسوب نیاز مبرمی به موجود بودن ویژگی‌های فیزیکی و توپوگرافی حاکم بر رودخانه و رژیم جریان آب دارند، به طوری که اگر اطلاعات یادشده در دسترس نباشد، قادر به پیش‌بینی دقیق بار معلق رودخانه نیستند و به دلیل سادگی و نیاز کمتر به اطلاعات، مدل‌های هیدرولوژیکی منحنی سنجه برای این امر مناسب‌اند. از آنجا که اطلاعات دبی آب در بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشورمان موجود است، اما بیشتر ایستگاه‌های مورد بحث ایستگاه رسوب‌سنجی ندارند، استفاده از مدل‌های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلق انتقال رودخانه‌ها اجتناب‌ناپذیر به نظر

می‌رسد.

به این منظور، تحقیق حاضر در وهله اول از روش‌های برآورد رسوب‌دهی معلق با استفاده از منحنی سنجه خطی یا معادله همبستگی دبی- رسوب را بررسی می‌کند که به موجب آن، روش‌های منحنی سنجه یک‌خطی، دوخطی و حد وسط دسته‌ها بررسی و ارزیابی شدند و میزان رسوب معلق برآوردی به صورت برون‌یابی یا منحنی سنجه محاسبه شد. فرگوسن^۱ (۱۹۸۷) در تحقیقات خود نشان داده است که روش منحنی سنجه لگاریتمی و استفاده از منحنی تداوم جریان، بار معلق را حدود ۵۰ درصد کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند که یکی از دلایل اصلی آن را می‌توان به خطای حاصل از تبدیل لگاریتمی داده‌ها اشاره کرد [۹]. هو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق خود با عنوان «تغییرات زمانی و مکانی منحنی سنجه رسوب در حوضه چانگچیان رودخانه یانگ‌تسه»، غلظت رسوب معلق در سه بازه از رودخانه شامل بالادست، میانه و پایین‌دست حوضه را در دوره‌های متفاوت زمانی از سال ۱۹۵۵ تا ۲۰۰۷ محاسبه کرده و تغییرات زمانی و مکانی منحنی سنجه رسوب را نسبت به تأثیر فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های آبخیز تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تعرض‌ها و فعالیت‌های انسانی به طبیعت تأثیر زیادی روی پارامترهای منحنی سنجه رسوب دارد [۱۰]. رستمی (۲۰۱۱) در تحقیق خود روی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود روش تلفیق منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها و دبی متوسط روزانه را به عنوان روش مناسب برآورد بار معلق پیشنهاد داد [۱۱]. پیش‌تر نیز کیا و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه درباره حوضه آبخیز بابل‌رود با استفاده از داده‌های روزانه دبی جریان و غلظت رسوب ایستگاه قرآن تالار که دارای طول آماری ۲۳ ساله از سال آبی ۱۳۵۶-۱۳۵۷ تا ۱۳۷۸-۱۳۷۹ بوده است را با استفاده از روش‌های منحنی سنجه یک‌خطی، چندخطی و مدل منحنی ماهانه، سالانه و فصلی و مدل حد واسط دسته‌ها و روش فائو رسوب معلق حوضه برآورد کردند. آنان به این نتیجه رسید که منحنی سنجه رسوب بدون تفکیک کردن داده‌ها همواره با مقداری خطا همراه است [۱۲]. سبحانی (۲۰۱۰) نیز روش‌های آماری برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها را در حوضه آبخیز حبله‌رود بررسی و ارزیابی کرد و در نهایت، به این نتیجه

1. Ferguson

2. Hu

ProUCL تجزیه و تحلیل آماری شده و به منظور ارزیابی این روند از آزمون من-کندال بهره گرفته شد. روش‌های آماری مختلفی برای بررسی روند استفاده می‌شود، اما آزمون من-کندال معمول‌ترین روش شناخته شده است [۱۸]. این روش در مورد سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کند، مناسب است و همچنین، در مقابل داده‌های مفقود زیاد حساس نیست و با انعطاف عمل می‌کند [۱۹]. از زمان ورود روش‌های آماری برای بررسی تغییرات در علوم فرسایش و رسوب، شفاف‌سازی تغییرات رسوب‌دهی در سری‌های زمانی با تعیین روند انجام می‌شود. روند در واقع تغییرات منظم و یکنواخت سری زمانی است که در آن مقدار میانگین متحرک افزایش یا کاهش می‌یابد. برخی محققان نظیر خالچه و همکاران (۲۰۰۴) در این خصوص تأکید دارند که پیش‌بینی فرایندهای مرتبط با آبخیز، بازسازی داده‌ها و واسنجی مدل‌ها می‌تواند به خوبی کاربرد داشته باشد. ارتباط بین آنها نیز می‌تواند کمک شایانی به افزایش استراتژی‌ها تجزیه و تحلیل داده‌ها کند [۲۰]. والینگ^۲ در سال ۲۰۰۸ اشاره می‌کند که تغییرات رسوب‌دهی در بیشتر رودخانه‌ها در ارتباط با تغییرات زیست‌محیطی پیش روی آنهاست، به گونه‌ای که افزایش بار رسوبی بعضی از قسمت‌های رودخانه می‌تواند ناشی از اخلال و آشفته‌گی حوضه آبخیز بالادست باشد و کاهش رسوب‌دهی ناشی از احداث سد و اجرای برنامه‌های موفق حفاظت خاک و کنترل رسوب باشد [۲۱].

میرعباسی و دین‌پژوه (۲۰۱۰) با استفاده از آزمون من-کندال جریان رودخانه‌های شمال غرب ایران را در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد جریان رودخانه‌های شمال غرب ایران در مقیاس سالانه در همه ایستگاه‌ها روند نزولی دارد [۲۲]. لی^۳ و همکاران (۲۰۱۰) به شناسایی تغییرات در سری زمان تخلیه آب و رسوب ژوجیانگ (رود مروارید) چین پرداختند. آنها در مطالعه خود آزمون روند تدریجی (آزمون من-کندال) و آزمون تغییر ناگهانی (آزمایش پتیت)، در سری بارهای سالانه دبی آب و رسوب از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۴ در ۹ ایستگاه در کانال‌های اصلی و شاخه‌های اصلی کار را استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هر دو آزمون

رسید که روش آماری حد وسط داده‌ها و دوخطی در بین روش‌های آماری آزمایش شده کمترین میزان مربعات خطا را داشته و بهترین قابلیت پیشگویی در برآورد رسوب معلق در حوضه آبخیز یادشده را دارد. به دلیل روش‌های متعدد برآورد رسوب معلق، بررسی این روش‌ها در هر منطقه‌ای به سبب متفاوت بودن شرایط و مشخصات مناطق با یکدیگر ضروری است [۱۳]. ذرتی‌پور (۲۰۱۵) در بررسی مقایسه‌ای بین چند روش برآورد بار معلق در حوضه طالقان به این نتیجه رسید که این حوضه جزء حوضه‌های با رسوب‌دهی زیاد قلمداد می‌شود و نیز روش برآوردی بار معلق دسته‌ها مناسب‌ترین روش در برآورد بار معلق حوضه یادشده است [۱۴]. آسلمان^۱ (۲۰۰۰) از مقایسه سه روش تک‌خطی، چندخطی و حد وسط دسته‌ها و روش‌های اصلاحی در رودخانه راین به این نتیجه رسید که استفاده از روش‌های اصلاحی میزان خطا را کاهش می‌دهد. به علاوه، نتایج ایشان نشان می‌دهد روش منحنی سنجه حد وسط را می‌توان به عنوان دقیق‌ترین روش اعلام کرد [۱۵]. جانگ و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تخمین غلظت رسوب معلق از داده‌های دبی رودخانه برای بهبود شکاف اطلاعات با تغییرپذیری بلندمدت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که منحنی غلظت رسوب معلق کمترین خطا و دقت زیاد را در قدرت تفکیک ماهانه دارد. اما برای قدرت تفکیک بیشتر و تغییرپذیری، دستیابی به داده‌های موقت به مقادیر منحنی سنجه مورد نیاز است تا به این صورت، شکاف اطلاعات را با استفاده از اجرای رویکردهای مدل‌سازی و تلاش برای ارزیابی مجموعه در مطالعات متنوع طولانی‌مدت پر کند [۱۶]. تحقیقات مختلفی روی مدل منحنی سنجه رسوب به عنوان یک مدل چندمنظوره صورت گرفته است. در برخی موارد میزان بار رسوب را بیشتر تخمین زده و در برخی موارد میزان بار رسوب کمتر تخمین زده شده است. مهم‌ترین محدودیت مدل منحنی سنجه رسوب دقت کم آن و برآورد کمتر میزان رسوب معلق در بسیاری از مطالعات است [۱۷].

علاوه بر برآورد رسوب معلق در منطقه مطالعه شده در تحقیق حاضر به منظور بررسی روند تغییرات دبی و رسوب در ایستگاه هیدرومتری نیز مجموع داده‌های دبی و رسوب مربوط به سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۴ با استفاده از نرم‌افزار

2. Walling
3. Li

1. Asselman

این نتیجه رسیدند که با کاهش ۱/۵۳ میلی‌متر در بارندگی، میزان دبی به منفی ۱/۵۳ متر مکعب بر ثانیه نزول کرده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی باشد که با تأثیر روی بارندگی سبب کاهش میزان دبی در منطقه مورد مطالعه شده است [۲۸]. مرفی^۷ و همکاران (۲۰۲۰) طی تحقیقی به تغییر رسوب معلق در آبراهه و رودخانه‌های آمریکا در ارتباط با روند تغییرات کاربری اراضی، هیدرولوژی و اقلیم به این نتیجه رسیدند که در ۸۳ درصد از مناطق با تغییر در مدیریت اراضی تغییر در میزان رسوب سهم بیشتری نسبت میزان رژیم آبراهه‌ها داشته است. اما بیش از ۵۰ درصد مناطق با تغییر در رژیم آبراهه سهم ۵ درصد تغییر در میزان رسوب را داشته است و در ۱۱ منطقه تغییرات در رژیم آبراهه‌ها بیش از نیمی از تغییرات در رسوب را نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد تغییر در آبراهه‌ها در بسیاری از مناطق به عنوان یک فاکتور اصلی تغییر در میزان رسوب نیست، اما اغلب فاکتور تأثیرگذار مهمی است. همبستگی بین روند رسوب و تغییرات هم‌زمان در کاربری اراضی / پوشش، هیدرولوژی و اقلیم اغلب در مکان‌هایی با حوضه‌های آبخیز زهکشی شده با کاربری‌های اراضی همگن و تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی (به طور مثال، اراضی کشاورزی و شهری) در مقایسه با اراضی با کاربری مختلط یا توسعه‌نیافته قوی‌تر بود [۲۹].

تحقیق حاضر به ارزیابی روند تغییرات دبی و رسوب و میزان همگنی و ناهمگنی دبی جریان و رسوب می‌پردازد. همچنین، به مقایسه کارایی روش‌های برآورد بار رسوب معلق با استفاده از منحنی سنجۀ یک‌خطی، دوخطی و حد وسط دسته‌ها می‌پردازد. اگرچه پژوهش‌های متعددی در مورد برآورد بار رسوب معلق انجام شده؛ اما با توجه به بررسی پیشینه تحقیق به ندرت تحقیقی در ارتباط با تغییر روند دبی آب و رسوب با آزمون من-کندال و آزمون پتیت در ارتباط با همگنی و ناهمگنی در منطقه مطالعه شده صورت گرفته است.

مواد و روش

منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز کسلیان به مساحت ۳۴۲/۶۶ کیلومتر مربع، در استان مازندران در محدوده طول جغرافیایی ۵۳ درجه ۱۸

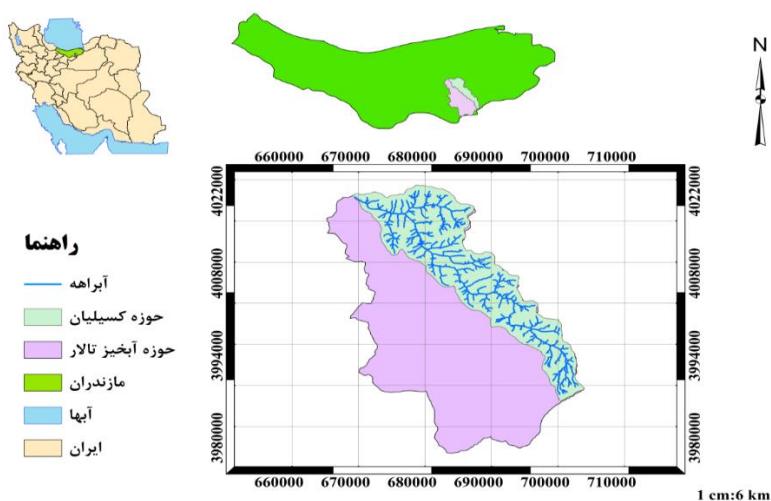
من-کندال و پتیت نشان می‌دهد دبی آب در تمام ایستگاه‌های حوضه ژوجیانگ هیچ روند درخور توجهی یا تغییر ناگهانی نشان نداد. همچنین، دبی آب سالانه بیشتر تحت تأثیر تغییرپذیری بارش است [۲۳]. ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۸) تغییرات ناگهانی در سری زمانی دبی آب و رسوب را برای حوضه آبخیز سوشی (رودخانه مروارید) با استفاده از آزمون من-کندال و پتیت در چین بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد تغییرات طولانی‌مدتی در دبی آب سالیانه بیشتر توسط تغییرات در بارش کنترل می‌شود و روند کاهشی بار رسوب در همه ایستگاه‌های هیدرومتری نیز بیشتر تحت تأثیر ساخت‌وساز مخزن سد است [۲۴]. معماریان و همکاران (۲۰۱۲) روند دبی آب و بار رسوب سه ایستگاه هیدرومتری را طی سه دهه توسعه در حوضه آبخیز لانگات مالزی با استفاده از آزمون من-کندال و پتیت تجزیه و تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده روند افزایشی دبی آب در زیرحوضه هلو لانگات^۲ و بار رسوب در زیرحوضه سمن‌یه^۳ بود. این روند افزایشی با تغییرات سریع در کاربری زمین توجیه می‌شد. روند افزایشی سری هیدرولوژی در زیرحوضه هلو لانگات با روند افزایشی الگوی بارش نیز تطبیق داده شد [۲۵]. شایان و همکاران (۲۰۱۳) نیز روند تغییرات آماری دبی آب و رسوب حوضه آبریز مند را از طریق سری زمانی بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد تحلیل روند دبی بر اساس مدل سری زمانی، بیانگر روند کاهشی دبی در حوضه مطالعه‌شده از سال ۲۰۰۵ است. علت اصلی کاهش دبی در سطح حوضه آبریز مند به کاهش میزان بارش‌ها و همچنین، دخالت انسانی با ایجاد سد روی رودخانه‌ها نسبت داده شد [۲۶]. جیو^۴ و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی آنالیز روند و تغییر نقطه‌ای دبی رسوب و جریان در رودخانه کوانگژو چین طی ۶۰ سال اخیر به این نتیجه رسیدند که فعالیت‌های انسانی سهم بسیار بیشتری در میزان رسوب نسبت به بارندگی دارد [۲۷]. آکتر^۵ و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی روند بارندگی و دبی جریان در منطقه سورما واقع در شمال شرق بنگلادش با رویکرد درک آثار تغییر اقلیم از طریق آزمون من-کندال به

1. Zhang
2. Hulu Langat
3. Semenyih
4. Guo
5. Akter
6. Surma

7. Murphy

نظام بارندگی آن شبه‌مدیترانه‌ای خزری است. آبراهه اصلی این آبخیز یکی از سرشاخه‌های رودخانه تالار است که رودخانه کسلیان نامیده می‌شود (شکل ۱). آمار و اطلاعات اقلیمی حوضه مانند بارندگی روزانه از باران‌سنج‌های معمولی دمای ماهانه از ایستگاه‌های تبخیرسنجی و آمار جریان و غلظت رسوب معلق ایستگاه رسوب‌سنجی خروجی حوضه از سال ۱۳۸۲-۱۳۹۴، از شرکت منابع آب ایران که زیرمجموعه وزارت نیرو است، جمع‌آوری و بررسی شد.

دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۵۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. بیشترین و کمترین ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۱۵۸ و ۲۱۹ متر است. میانگین شیب متوسط حوضه ۰/۳۱ متر در متر و طول و شیب بزرگ‌ترین آبراهه حوضه به ترتیب ۴۷/۳ کیلومتر و ۰/۰۵ متر در متر است. اقلیم منطقه مطالعه شده در اقلیم‌نمای دومارتن گسترده، نیمه‌مرطوب سرد و میانگین بارندگی سالانه آن ۷۹۱ میلی‌متر است و



شکل ۱. منطقه مطالعه شده

است. در این مطالعه به منظور اینکه تعداد داده‌ها از لحاظ آماری کافی بوده و خطای کمتری در ارزیابی تهیه منحنی سنج رسوب داشته باشد، از دبی متوسط روزانه استفاده شد. این روش توسط عرب خدری، ۲۰۰۹ و میرزایی و همکاران، ۲۰۰۵ تأیید شده است و از لحاظ منطقی نیز استفاده مستقیم از داده‌های اندازه‌گیری شده جریان به صورت روزانه نسبت به داده‌های ماهانه و یا منحنی تداوم جریان ارجحیت دارد [۳۰-۳۱]. در این تحقیق سه نوع منحنی سنج رسوب به شرح زیر استفاده شد:

منحنی سنج رسوب یک‌خطی: در این روش به طور معمول داده‌های غلظت یا دبی رسوب و دبی جریان متناظر آنها به یک محور مختصات تمام‌لگاریتمی منتقل شده و بهترین خط برازش با استفاده از روش حداقل مربعات از میان نقاط عبور داده می‌شود. بنابراین، در این روش بدون توجه به چگونگی پراکنش نقاط فقط یک خط از بین نقاط عبور داده می‌شود. معادله ۱ به شکل زیر است:

روش برآورد رسوب‌دهی معلق

معمولاً به دلیل کم بودن تعداد اندازه‌گیری غلظت، امکان محاسبه رسوب‌دهی معلق به روش مستقیم مقدور نیست و باید از روش‌های غیرمستقیم استفاده شود. از آنجا که فراوانی دسترسی به اندازه‌گیری‌های دبی بیشتر است، در این مطالعه از روش‌های برون‌یابی استفاده شده است. در روش برون‌یابی به طور معمول غلظت رسوب و جریان هم‌زمان به صورت لحظه‌ای در ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و بین غلظت یا دبی رسوب و دبی جریان آب، رابطه همبستگی برقرار می‌شود و سپس، بر اساس معادله ۱ و با استفاده از آمار دبی جریان، رسوب‌دهی معلق برای دوره زمانی مورد نظر بررسی می‌شود. در این تحقیق از یک ماژول در اکسل برای محاسبه منحنی سنج رسوب استفاده شده است. محققان مختلف، روش‌های متفاوتی را برای برآورد رسوب‌دهی معلق ارائه کرده و به کار برده‌اند که فرق آنها در اصلاحات انجام گرفته روی منحنی سنج رسوب و یا در چگونگی استفاده از آمار دبی جریان متفاوت

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (SSC_o - SSC_e)^2}{\sum_i (SSC_o - SSC_m)^2} \quad (۴)$$

که در این روابط n: تعداد داده‌ها، SSC_o مقدار مشاهده‌ای رسوب (تن در روز)، SSC_i مقدار رسوب برآوردی (تن در روز)، SSC_m متوسط مقادیر مشاهده‌ای رسوب است.

ارزیابی روند دبی آب و رسوب

به منظور بررسی روند تغییرات دبی و رسوب در منطقه مطالعه شده مجموع داده‌های دبی و رسوب مربوط به سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۴ با استفاده از نرم‌افزار ProUCL تجزیه و تحلیل آماری شد. در این تحقیق از آزمون ناپارامتری تغییر روند من-کندال (۱۹۴۵) استفاده شد [۳۳]. از برتری‌های این آزمون نسبت به سایر آزمون‌های تعیین روند، استفاده از مرتبه داده‌ها در سری زمانی بدون در نظر داشتن مقدار متغیرها و استفاده از مقادیر حدی موجود در داده‌های سری زمانی است که به دلیل وجود چنین خاصیتی، می‌توان از این آزمون برای داده‌های دارای چولگی نیز استفاده کرد. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و نبود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک و رد فرض صفر دال بر وجود روند در سری داده‌ها است. مراحل محاسبه این آزمون به شرح زیر است. - اعمال تابع علامت^۴ و استخراج پارامتر S برای محاسبه تک تک مشاهدات با همدیگر (رابطه ۵)

$$\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j + X_k) \quad (۵)$$

که در آن n تعداد مشاهدات سری X_j و X_k داده‌های زام و k ام است و تابع علامت به صورت رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} +1 & \text{if } (X_j - X_k) s > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_k) s = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_k) s < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

محاسبه واریانس موقعی که n کوچک‌تر از ۱۰ باشد (رابطه ۷) و موقعی که n بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، به صورت رابطه ۸ است:

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (۷)$$

$$Q_s = a Q_w^b \quad (۱)$$

که در آن، Q_s دبی رسوب و Q_w دبی جریان a و b به ترتیب ضریب و نمای معادله هستند.

عبور دادن بیش از یک خط از بین نقاط: اگر وضعیت پراکنش نقاط اجازه دهد، می‌توان به جای یک خط، دو یا سه خط از بین نقاط عبور داد. بنابراین، در این حالت بیش از یک معادله برای منحنی سنجی رسوب وجود خواهد داشت. در این مطالعه دو خط برازش شده و نتایج آن با همدیگر مقایسه شد.

روش حد وسط دسته‌ها: در این روش که آن را جانسون (۱۹۹۶) پیشنهاد کرده است؛ دبی‌های جریان با یک نمونه معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته، دبی رسوب متوسط اندازه‌گیری شده همان دسته تعیین می‌شود و در آخر منحنی سنجی رسوب با استفاده از آنها به روش حداقل مربعات به دست می‌آید [۳۲].

معیارهای ارزیابی روش‌ها

به منظور ارزیابی منحنی سنجی رسوب با استفاده از روش یک‌خطی، دوخطی و روش حد واسط دسته‌ها در تخمین رسوب معلق، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا^۱، معیار نش-ساتکلیف^۲، ضریب تعیین^۳ و انحراف معیار در روابط ۲-۴ استفاده شد. در ارزیابی کارایی مدل‌ها هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد، صحت پیش‌بینی مدل بیشتر می‌شود و مدل دقت بیشتری دارد. ضریب تعیین نشان‌دهنده همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده است و مقدار بهینه این شاخص آماری یک است. مقدار ضریب نش-ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. هر چه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کارایی بیشتری دارد. روشی بهتر است که کمترین خطا را دارد، یعنی هرچه میزان خطا کمتر باشد، آن روش بهتر است.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SSC_o - SSC_i)^2} \quad (۲)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (SSC_o - SSC_e)^2}{\sum_{i=1}^n SSC_e^2} \quad (۳)$$

1. Root Mean Squer Error (RMSE)
2. Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE)
3. Coefficient of Determination (R^2)

در رابطه یادشده t طول دوره آماری و n تعداد داده در سری آماری است. تابع $sgn(\cdot)$ نیز به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

مقدار k از رابطه ۱۲ محاسبه شده و در رابطه ۱۳ جایگزین شده و آماره P به دست می‌آید:

$$k = \max[U_{t,n}] \quad (12)$$

$$P = 2 \times e^{\frac{6k^2}{n^3+n^2}} \quad (13)$$

یافته‌ها

به‌منظور پیش‌بینی بار معلق روزانه از دبی جریان متناظر با رسوب به‌عنوان متغیرهای مستقل و دبی رسوب متناظر با آن به‌صورت متغیر وابسته در معادله منحنی سنجه رسوب استفاده شد. شکل ۲ با استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب رودخانه میزان رسوب سالانه حوضه آبخیز کسلیان با استفاده از روش یک‌خطی نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست‌آمده از منحنی سنجه یک‌خطی همبستگی بین دبی آب و رسوب ۸۴/۷ درصد است. این امر نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دبی آب و رسوب است. شکل ۳ نمودار دوخطی با استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب را نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از شکل ۳ نشان می‌دهد از نظر برازش رابطه نسبتاً خوبی بین دبی آب و رسوب در منحنی سنجه دوخطی در دبی‌های پایین تا ۰/۹۶ مترمکعب در ثانیه با ۳/۹۴۹ تن در روز همبستگی ۷۴ درصد را به خود اختصاص داده است. از طرف دیگر، در دبی‌های بیش از ۰/۹۶ این همبستگی به ۵۳/۷ درصد رسیده است و نشان‌دهنده ضعیف بودن همبستگی در دبی بالا در روش منحنی سنجه دوخطی نسبت به دبی‌های پایین است. شکل ۴ نمودار حد واسط دسته‌ها با استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل یادشده مشاهده می‌شود همبستگی بین دبی آب و رسوب ۸۹/۴ درصد است که همبستگی زیاد بین دبی آب و رسوب از نظر روش حد واسط دسته‌ها را نشان می‌دهد. در این نمودار به خلاف نمودارهای یادشده، دبی‌های بالا تأثیر قوی‌تری روی دبی رسوب داشته است. جدول ۱ نتایج برآورد تولید رسوب معلق با استفاده از روش‌های مختلف برون‌یابی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مورد نظر مشاهده می‌شود، میزان رسوب معلق ویژه با استفاده از روش برون‌یابی برای روش‌های یک‌خطی، دوخطی و حد واسط دسته‌ها به ترتیب ۰/۴۱۲، ۰/۶۹۵ و ۰/۴۶۷ تن در سال

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n-1) \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t-5)}{18} \quad (8)$$

n تعداد گره‌هایی که داده مشابه دارند و i فراوانی داده‌هایی که ارزش یکسانی دارند.

- استخراج آماره Z براساس رابطه ۹ است:

$$Z = \begin{cases} X = \frac{s-1}{\text{var}(s)} & \text{if } s > 0 \\ X = \frac{s-1}{\text{var}(s)} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (9)$$

(د) در یک آزمون دو دامنه‌ای برای بررسی روند داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه ۱۰ برقرار باشد:

$$|Z| \leq \frac{\alpha}{Z} \quad (10)$$

که در آن، α سطح معنادار است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود $\frac{Z}{\alpha}$ آمار و توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری α است که با توجه به دو دامنه بودن آزمون $\alpha/2$ استفاده شده است، در صورتی که آمار Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود.

ارزیابی تحلیل نقطه تغییر دبی آب و رسوب

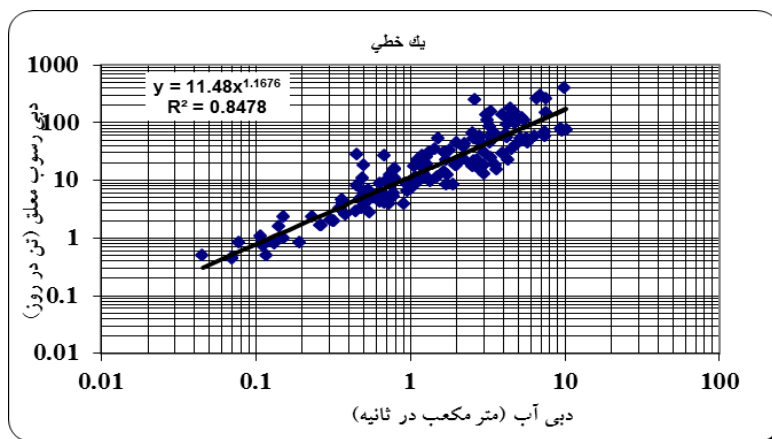
آزمون پتیت یکی از آزمون‌های ناپارامتری برای تعیین تغییر ناگهانی یک سری زمانی است و به فرض نرمال بودن سری زمانی نیاز ندارد [۳۴]. در صورتی که شکستگی و ناپیوستگی در مقدار میانگین سری زمانی وجود داشته باشد، مطابق فرض یک این آزمون، سری زمانی ناهمگن است و در غیر این صورت، سری زمانی همگن تشخیص داده می‌شود. در این آزمون، ابتدا مقادیر Y_i در سری زمانی براساس مقدارشان مرتب می‌شوند و رتبه‌های T_i برای مقادیر متناظر Y_i مشخص شوند. سپس، با استفاده از روابط ۱۱-۱۳ مقدار آماره x_k محاسبه شده و با مقادیر بحرانی ارائه‌شده توسط پتیت (۱۹۷۹) مقایسه می‌شوند. در صورت عبور آماره از مقادیر بحرانی، زمان مربوط به داده بیشینه x_k معادل زمان بروز ناهمگنی خواهد بود [۳۵].

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (11)$$

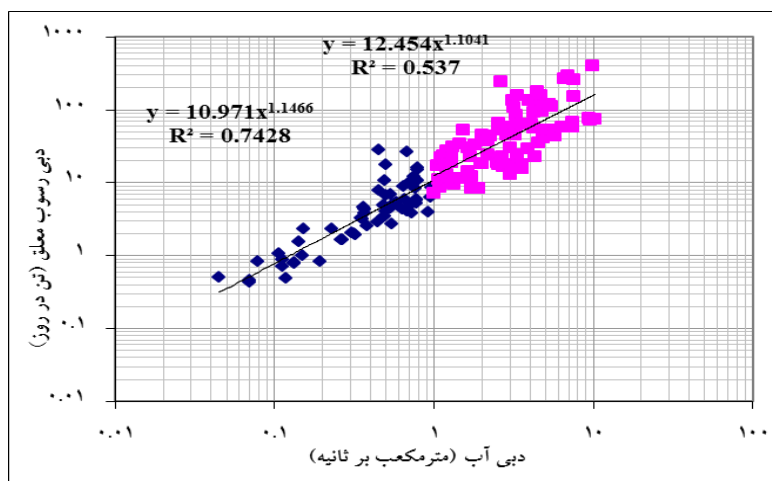
در هکتار به دست آمد. جدول ۲، نتایج مقایسه روش‌ها با استفاده از معیارهای کارایی، میانگین مربعات خطا، انحراف معیار و نش-ساتکلیف را نمایش می‌دهد که روش یک‌خطی به دلیل میانگین مربعات خطای بالا همچنین انحراف معیار بالا به ترتیب دقت کم و درصد خطای بالا (صحت پایین) دارد؛ اما از لحاظ کارایی با $(R^2=0/87; NSE=0/56)$ عملکرد خوبی را بعد از روش حد واسط داشته است. از طرف دیگر، روش دوخطی با اینکه درصد خطای کمتر و دقت زیادی نسبت به روش یک‌خطی دارد، اما از نظر کارایی پاسخ مناسبی نداشته است. به منظور برآورد بار رسوب معلق خروجی حوضه آبخیز کسلیان در ایستگاه شیرگاه طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۹۴ منحنی سنجه حد وسط با بیشترین ضریب تعیین رابطه ۱۴ به دست آمد:

$$Q_s = 14.864Q_w^{1.0833} \quad (14)$$

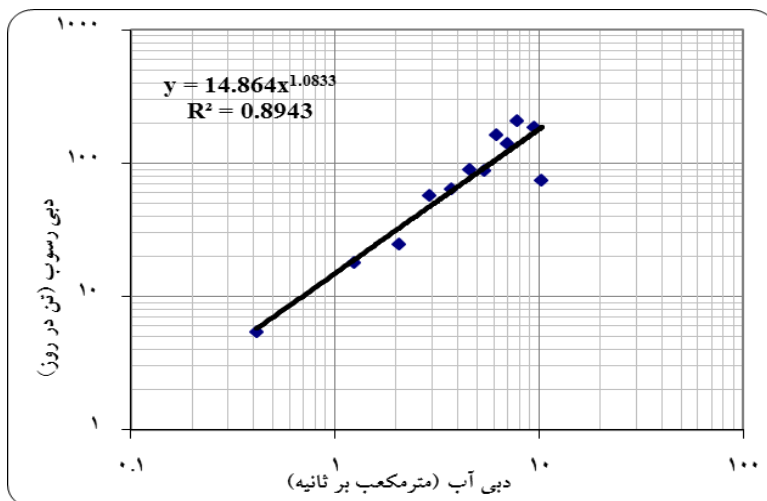
شکل‌های ۵ و ۶ روند تغییرات دبی و رسوب در منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد تغییرات روند دبی و رسوب منفی است و داده‌ها یک روند نزولی دارند. شکل ۷ تغییرات ناگهانی در سری گسسته دبی رسوب و دبی آب با سطح معناداری ۵ درصد نمایش می‌دهد که نتایج بیانگر آن است که تغییرات ناگهانی سری زمانی گسسته دبی رسوب (شکل ۷ الف) در سطح ۵ درصد معنادار است که نقطه تغییر آن سال ۱۳۸۹ است که میانگین رسوب از ۷۲/۸۹۶ تن در روز به میزان ۳۴/۸۹۷ تن در روز، بعد از سال ۱۳۸۹ کاهش یافته است. اما نتایج حاصل تغییرات ناگهانی سری زمانی گسسته دبی آب (شکل ۷ ب) در سطح ۵ درصد معنادار نبوده است. از آنجا که شکستگی و ناپیوستگی در سری زمانی رسوب رخ داده است، نشان‌دهنده ناهمگنی آن است. این ناهمگنی در سال ۱۳۸۹ به بعد با سطح ۵ درصد معناداری به صورت نزولی اتفاق افتاده است.



شکل ۲. نمودار یک‌خطی با استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب



شکل ۳. نمودار دوخطی با استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب



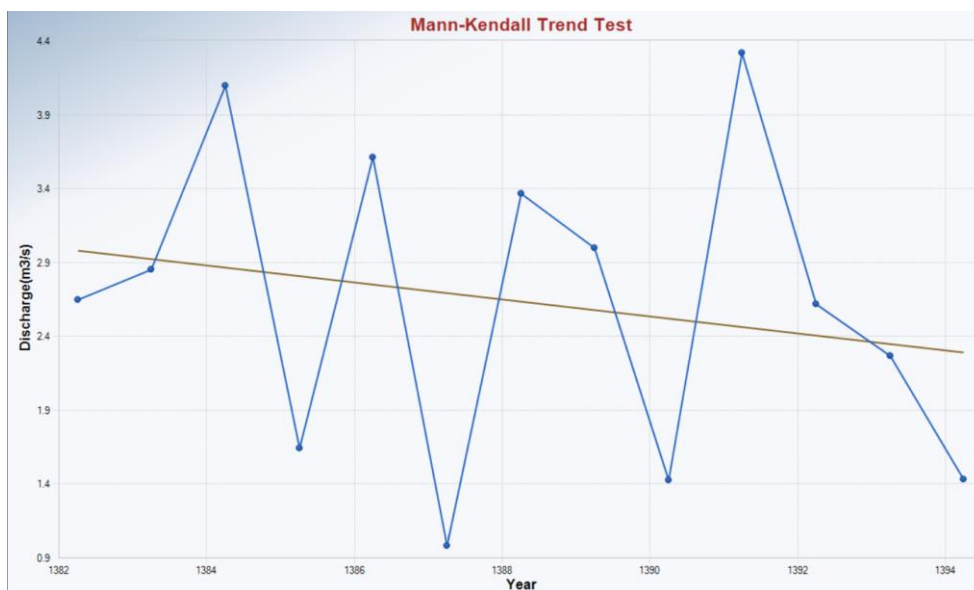
شکل ۴. نمودار حد واسط دسته‌ها استفاده از معادله همبستگی دبی و رسوب

جدول ۱. نتایج برآورد تولید رسوب معلق با استفاده از روش‌های مختلف برون‌یابی

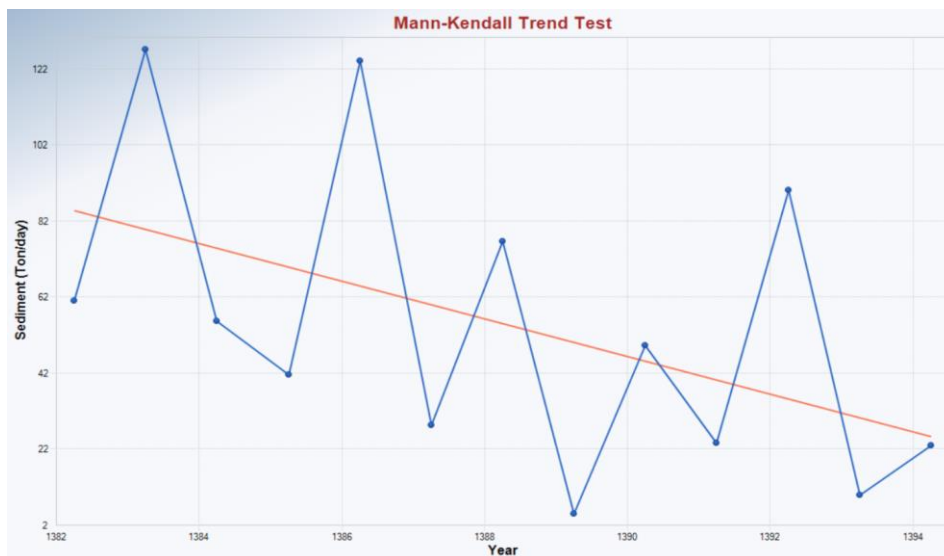
حد وسط	دوخطی	یک خطی	دبی جریان انواع منحنی سنجه
۱۶۰۲۹/۱۷	۲۳۸۲۹/۰۵	۱۴۱۴۰/۸۱	دبی متوسط روزانه جریان
۰/۴۶۷	۰/۶۹۵	۰/۴۱۲	رسوب ویژه (تن در سال در هکتار)

جدول ۲. نتایج مقایسه روش‌ها با استفاده از معیارهای کارایی، میانگین مربعات خطا، انحراف معیار و نش-ساتکلیف

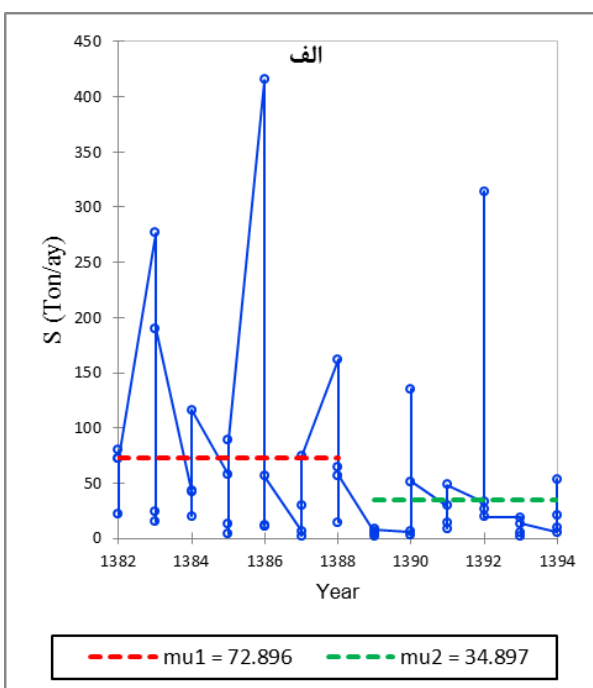
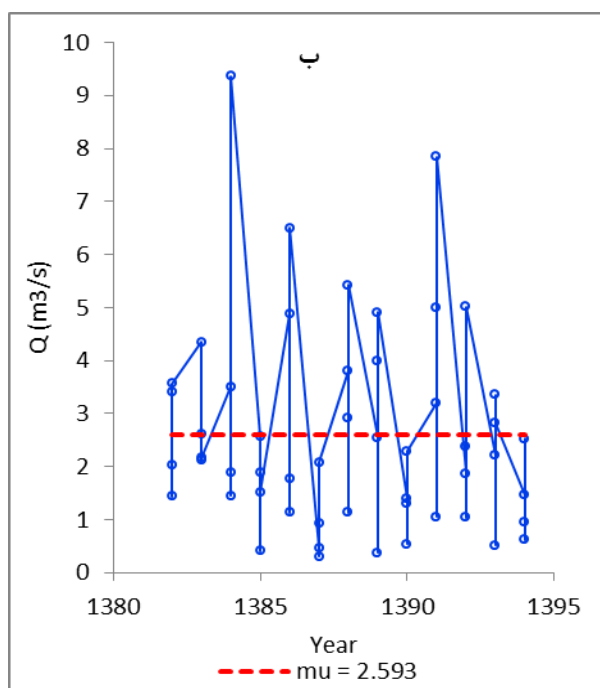
	R ²	NSE	RMSE	SD
یک خطی	۰/۸۷	۰/۵۶	۴۳/۳۸	۴۲/۱۵
دوخطی	۰-۰/۹۶	۰/۷۴	۵/۸۰	۴/۵۹
	> ۰/۹۶	۰/۵۴	۷/۹۸	۴۱/۹۴
حد واسط دسته‌ها	۰/۸۹	۱	۰	۳/۰۷



شکل ۵. نمودار روند تغییرات دبی آب از سال ۱۳۸۲-۱۳۹۴



شکل ۶. نمودار روند تغییرات دبی رسوب از سال ۱۳۸۲-۱۳۹۴



شکل ۷. تغییرات ناگهانی در سری گسسته دبی رسوب و دبی آب با سطح معناداری ۵ درصد

همبستگی آنها با مقادیر به دست آمده از این مطالعه به علت تفاوت در تعداد سال‌های آماری استفاده شده است [۳۶-۳۷]. روش یک‌خطی در بیشتر حالت‌ها میزان رسوب را کمتر برآورد کرده است و نتایج آن صحت ندارد، ولی از نظر کارایی و همبستگی قابل قبول است. برآوردهای روش دوخطی نیز کم و بیش نظیر یک‌خطی است. دلیل آن را می‌توان در برآورد کمتر این روش‌ها به پراکندگی نقاط و

بحث و نتیجه‌گیری

روابط مختلفی از روش حد واسط دسته‌ها توسط محققانی همچون اسدی و همکاران (۲۰۱۲) و گرامی و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه مطالعه شده صورت گرفته که معادله و ضریب تعیین آنها به ترتیب $Q_s = 18.32Q_w^{1.918}$ با 0.87 و $Q_s = 6.765Q_w^{2.0199}$ با 0.98 تعیین شده است. در ضمن، اختلاف عددی مشاهده شده در میزان ضریب

و میرعباسی و دین‌پژوه (۲۰۱۰) همسو بود [۴۳ و ۲۲]. کاهش دبی را می‌توان به کاهش نزولات جوی به‌خصوص برف در ارتفاعات مربوطه دانست. همچنین، با افزایش دما مقدار درخور توجهی از بارش برف به باران تبدیل می‌شود و به موازات آن، ذوب برف زودتر می‌شود و در نتیجه، الگوی جریان در زمان تغییر پیدا می‌کند [۴۴-۴۵]. همچنین، افزایش سطح زیر کشت متناسب با تغییرات کاربری اراضی، افت سفره‌های آب زیرزمینی، عملیات بیومکانیکی و اقدامات آبخیزداری از مواردی هستند که بر روند کاهشی دبی و رسوب اثرگذار بوده‌اند [۴۶].

نزولی شدن میزان متوسط رسوب در منطقه مطالعه شده بعد از سال ۱۳۸۹ می‌تواند ناشی از اقدامات حفاظت آب و خاک و ساخت سدها و مخازن روی رودخانه باشد. نتایج تحقیق گوپتا و چاکراپانی^۳ (۲۰۰۷)، با شناسایی سه عامل زمین‌شناسی حوضه، بارش و ساخت سدها و مخازن به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در جریان آب و رسوب معلق نشان داد کاهش چشمگیر دبی رسوب معلق در رودخانه‌ها ناشی از ساخت سدها و مخازن آب بوده است [۴۷]. همچنین، می‌توان گفت که روند کاهشی در سری زمانی رسوب معلق حوضه مرتبط با فعالیت‌های آبخیزداری باشد که به‌طور غیررسمی در منطقه صورت گرفته و اجرای هم‌زمان عملیات بیولوژیک و مکانیکی بیومکانیکی در زیرحوضه‌های بالادست سبب کاهش شیب رودخانه و به تبع آن، افزایش زمان تمرکز و ذخیره آب، افزایش زمان تماس آب با بستر آبراهه، کاهش حجم و دبی پیک سیلاب و در نتیجه، توانسته در کاهش فرسایش آبی و رسوب‌دهی حوضه مؤثر باشد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات والینگ و فانج^۴، ۲۰۰۳ و سبحانی و همکاران، ۲۰۱۷ مطابقت دارد [۴۸-۴۹]. از طرف دیگر، می‌توان بیان کرد که هر چه متغیرهای مؤثر در تولید رسوب ایستگاه‌ها مشابه باشند، همگنی آن حوضه افزایش می‌یابد و در ارزیابی برآورد رسوب معلق نتایج مناسبی را به دنبال دارد. به طوری که ترامبلی^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی منطقه‌ای رسوب معلق با استفاده از متغیرهای فیزیکی حوضه‌ها به

خطای ناشی از لگاریتم‌گیری مربوط است. با توجه به تجربه به‌دست‌آمده، عدم استفاده از این روش‌ها به‌ویژه یک‌خطی توصیه می‌شود. این امر با نتایج پژوهش‌های توماس^۱ (۱۹۸۸) و والینگ^۲ (۱۹۸۸) همخوانی دارد [۳۸-۳۹]. روش حد واسط دسته‌ها با انحراف معیار و میانگین مربعات خطای کم در بین روش‌های موجود به عنوان بهترین روش برآورد رسوب معلق شناخته می‌شود. با توجه به کمتر بودن انحراف معیار و میانگین مربعات خطا در روش حد واسط دسته‌ها می‌توان گفت که برآورد رسوب بار معلق در این روش به ترتیب دقت زیاد و خطای کمتر دارد. همچنین، این روش از لحاظ کارایی با $(R^2=0/89; NSE=1)$ عملکرد خوبی در بین روش‌های موجود داشته است. با توجه به نتایج نشان داده شده، مهم‌ترین عامل مؤثر در برآورد رسوب‌دهی و میزان خطا، نوع منحنی سنجه است و روش حد واسط دسته‌ها در بیشتر حالت‌های به‌ویژه در صورت استفاده از دبی‌های بالا، جواب صحیح و دقیق داده و به عنوان روش مناسب قابل توصیه است [۴۰-۴۱]. همچنین، با توجه به عدم اندازه‌گیری در دبی‌های طغیانی، استفاده از روش منحنی سنجه رسوب حتی در مقیاس ماهانه می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد، ولی با توجه به شرایط اندازه‌گیری بار معلق در رودخانه‌های ایران، روش منحنی سنجه رسوب را تنها راه برای تولید دبی رسوب ماهانه در حال حاضر می‌توان دانست. این تحقیق با نتایج پژوهش حبیب‌نژاد و همکاران (۲۰۱۰) همخوانی دارد [۴۲].

با توجه به اینکه تغییرپذیری رژیم آبدهی و رسوب‌دهی بالادست حوضه آبخیز در بلندمدت خروجی حوضه آبخیز را تحت تأثیر قرار می‌دهد، روند دبی و رسوب در سطح ۵ درصد با شیب نزولی معنادار صورت گرفته است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده هم‌زمانی روند کاهشی رسوب در خروجی حوضه در منطقه مطالعه شده مطابق با روند کاهش دبی باشد. بررسی آماری سری زمانی گسسته دبی آب با استفاده از آزمون روند من-کندال در منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد تغییرات تدریجی دبی آب طی دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۹۴ در سطح ۵ درصد معنادار نیست. ولی تغییر کاهشی آن طی دوره ادامه داشته است. نتایج این پژوهش با تحقیقات فتحیان و همکاران (۲۰۱۴)

3. Gupta and Chakrapani
4. Walling and Fang
5. Trambly

1. Thomas
2. Walling

حفاظت خاک، طراحی حجم سدها، ساخت پل‌ها و تأسیسات آبی و آبیاری و نیز فرسایش خاک از موضوعات مهم در هرگونه مسائل تغییرات هیدرواقليمی است که نمایش متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و اقلیمی را در زمان‌های گذشته و آینده را فراهم می‌کند. از آنجا که میزان دبی محاسبه‌شده از طریق رژیم بارانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت می‌گیرد، به دلیل تغییرپذیری بیشتر باران ممکن است سبب تغییرپذیری بیشتر رسوب معلق و به دنبال آن، ناهمگنی بیشتر رسوب در رودخانه‌هایی با رژیم بارانی شود. به این منظور، پیشنهاد می‌شود از آنجا که منطقه مطالعه‌شده یک منطقه کوهستانی است رژیم بارش به صورت برفی-بارانی با رژیم بارانی مقایسه شود و درصد خطای آن نسبت به یکدیگر ارزیابی شود.

منابع

- [1]. Nearing MA, Xie Y, Liu B, Ye Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*. 2017;5(2):77-84.
- [2]. Martínez-Hernández C, Rodrigo-Comino J, Romero-Díaz A. Impact of lithology and soil properties on abandoned dryland terraces during the early stages of soil erosion by water in south-east Spain. *Hydrological Processes*. 2017;31(17):3095-109.
- [3]. Wei W, Chen L, Yang L, Fu B, Sun R. Spatial scale effects of water erosion dynamics: Complexities, variabilities, and uncertainties. *Chinese Geographical Science*. 2012;22(2):127-43.
- [4]. Niu XY, Yan-Hua W, Hao Y, Jia-Wen Z, Jun Z, Mei-Na X, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake Watershed, China. *Pedosphere*. 2015; 25: 103-111.
- [5]. Liu Y. Landscape connectivity in soil erosion research: concepts, implication, quantification. *Geographical Research*. 2016;1:195-202.
- [6]. Verstraeten G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology*. 2006;81(1-2):128-140.
- [7]. Trimble SW, Crosson P. US soil erosion rates-myth and reality. *Science*. 2000;289(5477):248-50.

نتایج مشابهی دست یافتند [۵۰]. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان داد استفاده از یک مدل واحد برای تخمین رسوب معلق حوضه‌ها با خصوصیات فیزیکی متفاوت مانند مساحت، شیب رودخانه و همچنین، متغیرهای هیدرولوژیکی مانند دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره بازگشت دو ساله، برآورد غیرمعمولی از میزان رسوب معلق در حوضه مورد نظر خواهد داشت. این نتیجه گویای تغییرپذیری زیاد رسوب‌دهی ماهانه در ایستگاه‌های منتخب و نشان‌دهنده پیچیدگی فرایندهای انتقال رسوب در آبراهه‌ها است. همچنین، طی تحقیقی بویکس^۱ و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی اندازه‌گیری میزان فرسایش از طریق پلات‌های میدانی برای درک منابع تغییر فرسایش پرداختند [۵۱]. نتایج پژوهش آنها نشان داد عملکرد سیستماتیک برهم‌کنش مقیاس و ارتباط بازخوردها بین فرایندهای غالب در توسعه ناهمگنی مکانی و تکامل سیستم حوضه آبخیز درون و کل سطوح مقیاس مختلف تأثیر می‌گذارد. بنابراین، می‌توان استنباط کرد که ناهمگنی فرسایش خاک می‌تواند به‌عنوان بخش مهمی در حوضه آبخیز باشد، به طوری که آنالیز خصوصیات مکانی فرسایش خاک و شناسایی مناطق کلیدی برای کنترل فرسایش از اساس و پایه‌های حفاظت آب و خاک است. همگن بودن دبی جریان در منطقه مطالعه‌شده می‌تواند ناشی از تغییرپذیری کمتر میزان دبی جریان و خصوصیات آماری هیدرولوژیکی داده‌های همگن باشد. نتایج این تحقیق با تحقیق بائوژا و گورپاچوا^۲ همسو است [۵۲]. تغییرات بسیار کم و نامحسوس در دبی جریان ناشی از جلوگیری از کاهش افت منابع آبی، نبود خشک‌سالی هیدرولوژیک حداقل طی این دو دهه اخیر باشد، به طوری که این امر سبب بهبود شرایط آب زیرزمینی و سطح ایستابی منطقه می‌شود. نتایج این تحقیق با پژوهش سبحانی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد [۴۹]. از طرف دیگر، تغییراتی در نمودار یا منحنی دبی جریان می‌توانست ناشی از تأثیر فاکتورهای انسانی و تغییر اقلیم روی ساختار رواناب رودخانه‌ها و یا نوسان‌های چرخه‌ای رواناب در حوضه آبخیز باشد. بنابراین، تجزیه و تحلیل روند، همگنی و ناهمگنی دبی آب و رسوب به منظور به‌کارگیری برنامه‌های

1. Boix

2. Bauzha and Gorbachova

- [8]. Kim J, Ivanov V, Fatichi S. Environmental stochasticity controls soil erosion variability. *Scientific Report Nature*. 2016; 6:220-65.
- [9]. Ferguson RI. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth surface processes and landforms*. 1987;12(1):95-104.
- [10]. Hu B, Wang H, Yang Z, Sun X. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International*. 2011;230(1-2):34-43.
- [11]. Rostami M. A method presentation for improving river sediment load estimation. 3rd Iranian Hydraulic Conference. 2011. [Persian]
- [12]. Kiai E, Emadi A. Comparison of statistical methods for long-term suspended sediment yield estimation (Case Study: Babolrood River). *Journal of Watershed Management Research*. 2013; 4 (8): 15-27. [Persian]
- [13]. Sebahani H. Application and comparison of statistical methods for estimating suspended sediment load (A Case study: Hableh Rud watershed). Master thesis. 2010. [Persian]
- [14]. Zoratipour A, Mahdavi MO, Sigaroudi SK, Salajegheh A, Almaali NS. Assessment of the effect of classification on the improved estimation of suspended sediment load using hydrological methods (case study: Taleghan basin). *Iranian Journal of Natural Resources*. 2009;61(4):809-19.
- [15]. Asselman NE. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*. 2000; 234(3-4):228-48.
- [16]. Jung BM, Fernandes EH, Möller OO, García-Rodríguez F. Estimating suspended sediment concentrations from River Discharge data for reconstructing gaps of information of long-term variability studies. *Water*. 2020;12(9):23-82.
- [17]. Benisi Ghadim H, Salarijazi M, Ahmadianfar I, Heydari M, Zhang T. Developing a sediment rating curve model using the curve slope. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020; 29(2):1151-1159. doi:10.15244/pjoes/103470.
- [18]. Nourani V, Nezamdoost N, Samadi M, Daneshvar Vousoughi F. Wavelet-based trend analysis of hydrological processes at different timescales. *Journal of Water and Climate Change*. 2015;6(3):414-35.
- [19]. Partal T, Kahya E. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*. 2006; 20(9):2011-26.
- [20]. Kallache M, Rust H, Kropp J. Trend assessment of correlated Data. Potsdam Institute for Climate Impact Research. 2004.
- [21]. Walling D. The changing sediment loads of the world's rivers *Land Reclamation*. 2008; 39: 3-20.
- [22]. Mirabbasi Najafabadi R, Dinpashoh Y. Trend analysis of streamflow across the north west of Iran in recent three decades. *Journal of Water and Soil*, 2010; 24(4): 757-768. [Persian]
- [23]. Li Z, Zheng FL, Liu WZ, Flanagan DC. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961- 2007. *Quaternary International*. 2010; 226(1): 92-100.
- [24]. Zhang S, Lu XX, Higgitt DL, Chen CT, Han J, Sun H. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*. 2008;60(3-4):365-80.
- [25]. Memarian H, Balasundram SK, Talib JB, Sood AM, Abbaspour KC. Trend analysis of water discharge and sediment load during the past three decades of development in the Langat basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*. 2012;57(6):1207-22.
- [26]. Shayan S, Zare GH, Yamani M, Sharifikiya M, Soltanpor M. Trend analysis Statistical changes discharge and sediment Mand Catchment and its application in environmental planning. *Journal of Applied Geomorphology Iran*. 2013; 1(2): 37-50. [Persian]
- [27]. Guo LP, Yu Q, Gao P, Nie XF, Liao KT, Chen XL, Hu JM, Mu XM. Trend and change-point analysis of streamflow and sediment discharge of the Gongshui River in China during the last 60 years. *Water*. 2018;10(9):1273.
- [28]. Akter S, Howladar MF, Ahmed Z, Chowdhury TR. The rainfall and discharge trends of Surma River area in North-eastern part of Bangladesh: an approach for understanding the impacts of climatic change. *Environmental Systems Research*. 2019;8(1):1-2.
- [29]. Murphy JC. Changing suspended sediment in United States rivers and streams: linking sediment trends to changes in land use/cover, hydrology and climate. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020 2(1);24-35.
- [30]. Arabkhedri M. Sampling designs and estimation methods for sediment load prediction in two rivers in Iran and Malaysia. PhD Thesis, University Putra Malaysia. 2009; 236 p. [Persian]

- [31]. Mirzaee M, Arabkhedri RM, Feiznia S, and Ahmadi H. A comparison of methods of estimation of suspended sediment in rivers. *Iranian Journal of Natural Resources*. 2005;58 (1): 301-313. [Persian]
- [32]. Jansson MB. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*. 1996;183(3-4):227-41.
- [33]. Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945; 1:245-59.
- [34]. Pettit AN. Anon-parametric approach to the change-point detection. *Appl. Stat*. 1979;28:126-35.
- [35]. Ahmadi F, Nazeri Tahroudi M, Mirabbasi R, Khalili K, Jhahharia D. (2018). Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. *Meteorological Applications*. 2016; 25(2), 314-321.[Persian]
- [36]. Asadi F, Fazlola R, Emadi E. Extraction and selection of a suitable relationship for suspended sediment estimating in river (Case Study: Talar River). 11th National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman, Iran. 2012. [Persian]
- [37]. Gerami Loshabi Z, Arabkhedri M, Asadi H, Bayat R. The influence of rainfall erosivity temporal variation on suspended sediment load seasonality (Case Study: Kasiliyan Basin). *Journal of Watershed Management Research*. 2016; 7(14): 167-176. [Persian]
- [38]. Thomas RB. Monitoring baseline suspended sediment in forested basins: the effects of sampling on suspended sediment rating curves. *Hydrological Sciences Journal*. 1988;33(5):499-514.
- [39]. Walling DE. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. In *Symposium on Sediment Budgets*, Porto Alegre, Brazil, 1988.
- [40]. Arabkhedri, M. S. Hakimkhani, and D. Nikkami et al. Comparison of some statistical methods in estimation of suspended load in a watershed with snowy-rainy hydrological regime. Final report of research plan, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 2003.
- [41]. Arabkhedri M, Hakimkhani S, Varvani J. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 2004; 11 (3): 123-132. [Persian]
- [42]. Habibnejad M, Fatahi R, Jalilvand H, Solaimani K. Evaluation of the effect of watershed characteristics on suspended sediment load using multiple regressions: Case Study of Neka River and Gorgan Bay, *African Journal of Agricultural Research*. 2010; 5(12): 1373-1379.
- [43]. Fathian F, Morid S, Kahya E. Identification of trends in hydrological and climatic variables in Urmia Lake basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2015; 119(3-4):443-64.
- [44]. Burn DH, Elnur MA. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*. 2002; 255(1-4):107-22.
- [45]. Bagherpoor M, Seyedian S M, Fathabadi AH, Mohamadi A. Study of Mann-Kendall test performance in detecting the series of autocorrelation. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 2017; 36: 11-22. [Persian]
- [46]. Mardian M, Sheikh VB, Najafinejad A, Varvani J. Trend analysis of sediment yields in relation with annual precipitation and discharge in the main tributaries of the Tireh river, Lorestan province, Iran. *Technical Note, Iran-Water Resources Research*. 2013; 9(2):84-87. [Persian]
- [47]. Gupta H, Chakrapani GJ. Temporal and spatial variations in water flow and sediment load in the Narmada river. *Current science*. 2007:679-84.
- [48]. Walling DE, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and planetary change*. 2003;39(1-2):111-26.
- [49]. Sobhani M, Tajbakhsh SM, Memarian H. Statistical trend analysis of suspended sediment load in association with watershed management practices (Case Study: Bar Watershed, Neyshabur, Iran). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 2017; 12(37):69-84. [Persian]
- [50]. Trambly Y, Ouarda TB, St-Hilaire A, Poulin J. Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. *Journal of Hydrology*. 2010;380(3-4):305-17.
- [51]. Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V, Albaladejo J. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*. 2006; 78(3-4):267-85.
- [52]. Bauzha T, Gorbachova L. Estimation of the homogeneity of the average annual runoff of the rivers and streams of the Zaccarpatska station. *International Conference on water, climate and environment*. 2012.