



The effect of drought on the amount of sediment estimated by sediment rating curve

(Case Study: Chamriz hydrometric stations, Kor river, Doroudzan dam watershed)

Abbas Rahdan¹| Samad Mohseni Haftcheshmeh^{2*}| Hossein Yousefi Sahzabi³

1. Ph.D. student, Department of Arid and Mountainous Reclamation, Faculty of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: abasrahdan1372@gmail.com
2. Ph.D. student, Arid and Mountainous Zones Restoration Group, Faculty of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: sa.mohseni@ut.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Iran. Email: hosseinyosefi@ut.ac.ir

Article History

Received January 01, 2024

Revised January 22, 2024

Accepted March 08, 2024

Abstract

One of the effects of droughts on the catchment area is the impact on sediment production. The purpose of this study was to investigate the effect of drought on the amount of sediment production estimated by the sediment gauge curve located at the Chamriz hydrometric station. In this study, using the long-term data of the Chamriz hydrometric station located upstream of the Darudzen dam, the rate of changes in the produced sediment discharge in each year was calculated using different methods of the sediment curve. The evaluation of the measuring curve construction methods was done with three Index, RMSE, MAE and ME, and the evaluation results showed that based on the RMSE, MAE and ME Index, non-parametric correction methods, single-line method and FAO have the most efficiency. In this study, two drought indices, SPI and RDI, were calculated by using the meteorological data of the station in question and compared and analyzed with the average sediment discharge produced in each year. Finally, by examining the situation of sediment production in many years with drought and drought, we can conclude that on average, after the occurrence of drought, with the occurrence of drought, the amount of sediment production has increased by 3.4 times, if In the second case, the amount of sediment production has increased by 1.7 times on average. It can be concluded that a detailed examination of the effect of drought indicators on sediment control and water resource management can be an effective start to reduce the effects of drought.

Keywords

Drought, sediment production, drought index, sediment rating curve, model evaluation



بررسی تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب برآوردی به روش منحنی سنجۀ رسوب (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری چمریز، رودخانه کر، حوضه آبخیز سد درودزن)

عباس راهدان^۱ | صمد محسنی هفت چشمه^{۲*} | حسین یوسفی سهزایی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: abasrahdan1372@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: sa.mohseni@ut.ac.ir

۳. دانشیار، دانشکده علوم و فناوری میان رشته ای، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: hosseinyosefi@ut.ac.ir

تاریخ‌های مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

چکیده

یکی از اثراتی که خشکسالی بر حوضه آبخیز می‌گذارد، تأثیر بر میزان تولید رسوب است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب برآوردی به روش منحنی سنجۀ رسوب واقع در ایستگاه هیدرومتری چمریز است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های طولانی مدت ایستگاه هیدرومتری چمریز واقع در بالادست سد درودزن، میزان تغییرات دبی رسوب تولیدی در هر سال به روش‌های مختلف منحنی سنجۀ رسوب محاسبه شد. ارزیابی روش‌های ساخت منحنی سنجۀ رسوب با شاخص MAE ، $RMSE$ و ME صورت پذیرفت که نتایج ارزیابی نشان داد به ترتیب بر اساس شاخص‌های MAE ، $RMSE$ و ME روش‌های اصلاح غیرپارامتری، روش تک خطی و فائو دارای بیشترین کارایی هستند. سپس، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه مورد نظر، دو شاخص خشکسالی SPI و RDI محاسبه و با میانگین دبی رسوب تولیدی در هر سال مقایسه و آنالیز شدند. در نهایت، با بررسی وضعیت تولید رسوب در سال‌های متمادی با وضعیت خشکسالی و ترسالی می‌توان نتیجه گرفت که به طور میانگین بعد از وقوع خشکسالی، با وقوع ترسالی میزان تولید رسوب $3/4$ برابر افزایش یافته است، در صورتی که در حالت دوم میزان تولید رسوب به طور میانگین $1/7$ برابر افزایش یافته است. از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که بررسی دقیق تأثیر شاخص‌های خشکسالی در کنترل رسوب و مدیریت منابع آب می‌تواند شروعی مؤثر برای کاهش اثرات خشکسالی باشد.

کلیدواژگان

خشکسالی، تولید رسوب، شاخص خشکسالی، منحنی سنجۀ رسوب، ارزیابی مدل.

مقدمه

خشکسالی به عنوان یکی از پدیده‌های محیطی شناخته شده و در واقع بخش جدایی ناپذیری از تغییرات اقلیمی است که می‌تواند در هر منطقه جغرافیایی حادث شود و تأثیرات عمده‌ای بر آن منطقه بگذارد. از آنجا که کشور ما در سال‌های اخیر با خشکسالی مواجه بوده است، تحقیقات در خصوص پایش هم‌زمان و دقیق شرایط پویای خشکسالی به منظور کاهش اثرات مخرب این بلایای اقلیمی حائز اهمیت است. در مطالعات پایش خشکسالی، به بیانی ارزیابی ساده از سه ویژگی خشکسالی یعنی شدت، تداوم، گستردگی مکانی و همچنین مقایسه خشکسالی از منطقه‌ای به منطقه دیگر در زمان‌های مختلف به کاربرد نمایه‌های خشکسالی نیاز است. نمایه‌های مختلفی جهت پایش خشکسالی توسط محققان ارائه شده است [۱ و ۲]. با توجه به اینکه شاخص‌ها اطلاعات مناسبی برای طراحی، مدیریت و اجرای طرح‌های آبی به دست می‌دهند، تاکنون شاخص‌های متعددی معرفی و به کار گرفته شده است. مقالات زیادی رامی‌توان یافت که به تشریح انواع این شاخص‌ها پرداخته‌اند [۴، ۱].

در میان انواع شاخص‌های مختلفی که تاکنون برای شناسایی و تحلیل خشکسالی هواشناسی معرفی شده‌اند، دو شاخص بیشتر از بقیه مورد قبول بوده و به کار گرفته شده‌اند. این دو شاخص عبارت‌اند از: شاخص شدت خشکسالی پالمر (SPDI) ۱ و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ۲ [۵، ۲ و ۶]. شاخص خشکسالی پالمر در اصل برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی پیشنهاد شد. در این شاخص از بارندگی، تبخیر-تعرق و شرایط رطوبتی خاک به عنوان عوامل کلیدی استفاده می‌شود. تعیین اثرات خشکسالی یا ترسالی در یک منطقه، یکی از نیازهای اساسی برنامه‌ریزی‌های محیطی و اقتصادی، به ویژه برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب است. یکی از تأثیرات مهم دوره‌ای یاد شده، تأثیر بر میزان بار معلق رودخانه‌ها و میزان دبی رسوب است که در مباحث مهندسی رودخانه و منابع آب دارای اهمیت خاصی است [۷]. از طرفی، خشکسالی‌ها به عنوان یکی از مشکلات اساسی در مناطق خشک و نیمه خشک، تأثیر قابل توجهی بر میزان تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز و سیستم‌های آبریز دارند. بررسی تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب و مدیریت منابع آب در این شرایط می‌تواند به حفظ منابع آب، کنترل سیلاب‌ها و کاهش خطرات مرتبط با رسوب آبریزی کمک کند [۸]. یک روش معمول برای برآورد میزان رسوب در بازه زمانی خشکسالی، استفاده از منحنی سنج رسوب ۳ است. این روش از تاریخچه داده‌های رسوب و دبی جاری در یک حوضه آبخیز برای تخمین میزان رسوب در بازه زمانی خشکسالی استفاده می‌کند [۹ و ۱۰]. منحنی سنج رسوب روابطی بین شدت رسوب و دبی جاری را نشان می‌دهد. با بررسی داده‌های رسوب و دبی در بازه‌های مختلف زمانی، می‌توان منحنی سنج رسوب را ایجاد کرد و با استفاده از آن، میزان رسوب در بازه خشکسالی را برآورد کرد. با توجه به اینکه خشکسالی‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رسوب داشته باشند، بررسی تأثیر این پدیده بر میزان تولید رسوب با استفاده از منحنی سنج رسوب می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب و کنترل رسوب آبریزی مفید واقع شود [۱۱]. از طرفی، اهمیت شناخت بالای اراضی، امری است که باید با ترویج و توسعه کاربری اراضی بهینه برای نگهداشت و افزایش حاصل خیزی منابع خاک صورت پذیرد. پیامد شناخت متقابل از منابع آب و خاک، افزایش رفاه مردم و نبود وابستگی اقتصادی کشورها را به دنبال دارد [۱۲]. در این میان، تشدید فرسایش خاک و فرسایش رسوبات، به عنوان دو محرک تنش‌زا، مهم‌ترین تهدید برای این منابع به حساب می‌آیند. بر این اساس، در پژوهش‌های

1. Palmer's Drought Severity Index
2. Standardised Precipitation Index
3. Sediment Rating Curve

رسوب دهی آبخیزها به مطالعه غلظت رسوب معلق (SSC) توجه خاصی شده است، زیرا بار معلق شاخصی از رسوب دهی آبخیز است و علاوه بر این، بر اثر شست و شوی اراضی حاصل خیز بالا دست شکل می‌گیرد [۱۳].

اسفندیاری و قراچورلو (۲۰۲۳) در تحقیقی بر اساس داده‌های نمونه دبی جریان و رسوب متناظر با آن در ۱۹ ایستگاه هیدرومتری واقع در سطح حوضه طی دوره آماری ۱۴ ساله به تهیه منحنی رسوب ماهانه پرداختند. تعمیم منطقه‌ای این روابط برای کل حوضه نشان داد اختلاف فصلی مشهود است و بالاترین و پایین‌ترین ضریب تعیین به ترتیب به ماه‌های اردیبهشت و مرداد تعلق یافت. همچنین، وقوع بیشترین انتقال رسوب در فصل بهار و کمترین آن در فصل تابستان مشهود بوده و اشاره به نوع رژیم بارش رواناب حاکم بر حوضه قره سو داشت [۱۴]. نتایج بررسی منحنی سنجۀ رسوب مربوط به دوران خشکسالی و ترسالی در حوضه آبخیز فارس نشان داد مقادیر ضرایب کارایی محاسبه شده بیانگر دقت زیاد معادلۀ سنجۀ رسوب داشت که این موضوع استفاده از معادلۀ سنجۀ رسوب به عنوان روشی مناسب برای برآورد غلظت رسوب معلق رودخانه‌ها را تأیید می‌کند [۱۵]. نیر آقاییگی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی تحت عنوان «ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر رسوب معلق در تعدادی از حوضه‌های آبخیز استان اردبیل» به بررسی مقدار رسوب معلق طی دهه آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) با استفاده از منحنی سنجۀ رسوب پرداختند. نتایج پژوهش یاد شده نشان داد تغییر در پارامترهای اقلیمی به طور متوسط به کاهش ۴۷ درصدی بار معلق رسوب در ایستگاه‌های مطالعاتی منجر شده است. نتایج پژوهش یاد شده نشان دهنده تأثیر قابل توجه تغییر اقلیم بر حوضه‌های آبخیز استان اردبیل است و با توجه به اثرات زیست محیطی تغییر اقلیم لازم است راهکارهایی برای مدیریت مناسب حوضه‌های آبخیز اتخاذ شود [۱۶]. در بررسی اثر دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر میزان رسوب ویژه در حوضه آبخیز کرخه، نتایج نشان داد در تمام ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد مطالعه میزان بار رسوب در دوره‌های خشک کاهش و در دوره‌های ترافزایش قابل توجهی داشته است؛ به این صورت که در سال‌های مرطوب، به طور میانگین میزان رسوب ویژه ۱/۵۷ برابر سال‌های خشک است که این میزان بین ۵ تا ۹ برابر تغییر می‌کند. همچنین در این سال‌ها رسوب ویژه ۱/۱۲ برابر رسوب ویژه درازمدت است، در حالی که در سال‌های خشک نسبت متوسط رسوب ویژه ۰/۷۴ حالت درازمدت است [۱۷]. آذرخشی و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی اثر تغییرات بارش و کاربری اراضی بر تولید رسوب در حوضه آبخیز صنوبر-تربت حیدریه به این نتیجه رسیدند که افزایش وقوع خشکسالی‌ها و در نتیجه، کاهش آبدهی رودخانه و تبدیل اراضی به مرتع به کاهش میزان رسوبات معلق حوضه آبخیز صنوبر منجر شده است [۱۸]. در مطالعه‌ای توسط Azim و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر تغییر اقلیم روی تولید رسوب در حوضه آبخیز ناران در پاکستان، به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی بر میزان تولید رسوب تأثیر داشته و طبق پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده، میزان تولید رسوب در آینده افزایش خواهد یافت [۱۹].

بررسی‌های علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها در سال ۱۸۴۵ میلادی در رودخانه می‌سی‌سی‌پی انجام شد. پس از آن در سال ۱۸۶۳، در رودخانه‌های سن و مارن فرانسه و در سال ۱۹۳۹ در رودخانه نیل صورت پذیرفت و به تدریج در سرتاسر جهان توسعه یافت. رسوب خارج شده از آبخیزها به وسیله فرایندهای برخورد، انتقال و شست و شوی مواد خاکی توسط بارندگی و رواناب ایجاد می‌شود. برآورد بار رسوبی در طیف وسیعی از بررسی‌ها مانند طراحی مخازن و سدها، انتقال رسوب و آلودگی‌ها در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، طراحی کانال‌های پایدار سدها، محافظت از ماهی‌ها و جانداران زنده، تعیین اثرات مدیریت آبخیزها و ارزیابی تأثیرات محیطی مورد نیاز است. رسوبات معلق یکی از فاکتورهای مهم تصمیم‌گیری جهت سلامت اکوسیستم آبی و تعیین عمر مفید سدها است. کمبود داده‌های

بلندمدت اندازه‌گیری شده از رسوب و تحقیقات ناکافی در این زمینه دسترسی به داده‌های قابل اطمینان را محدود ساخته و بنابراین مجبور به استفاده از روش‌های تخمینی هستیم. موضوع کیفیت و کمیت آب برای جانداران موجود در آن و همچنین، برای نگهداشت و حفاظت از منابع آب ضروری است [۲۱]. هیدرولوژیست‌ها در صورت کمبود داده‌های غلظت رسوب معلق، از منحنی‌های سنجه رسوب برای پیش‌بینی و برآورد غلظت رسوب معلق جریان‌ها استفاده می‌کنند [۲۲].

عبدالمجید محمدی و همکاران شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI را در یک دوره آماری ۱۴ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۸۸) در ایستگاه سینوپتیک یزد جهت تحلیل‌های آماری و محاسبه سال‌های مرطوب و خشک مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مقایسه این دو شاخص نشان داد این دو شاخص همبستگی معناداری با هم دارند و مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال‌ها بر اساس هر دو شاخص به ترتیب سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ بودند [۲۳]. Asadi Zarch و همکاران (۲۰۱۱) شاخص خشکسالی RDI را به عنوان شاخص جدیدی برای تشخیص و تعیین خشکسالی و شدت، تداوم و وسعت آن در مناطق خشک ایران معرفی کردند. آن‌ها گفتند که خشکسالی یک پدیده متناوب طبیعی است که همراه با کمبود منابع آب در دسترس در یک منطقه وسیع جغرافیایی و در یک دوره زمانی قابل ملاحظه است [۲۴].

به تازگی شاخص جدیدی به نام RDI (Reconnaissance Drought Index) ارائه شده است که خشکسالی را بر اساس دو متغیر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل تخمین می‌زند. RDI در سه مرحله محاسبه می‌شود که شامل مقدار ابتدایی، RDI نرمالیزه شده و RDI استاندارد شده است. RDI استاندارد شده را می‌توان مستقیم با SPI مقایسه کرد که به طور گسترده در جهان استفاده می‌شود. SPI از بارندگی به عنوان تنها عامل تخمین خشکسالی استفاده می‌کند، اما کمبود آب فقط نمی‌تواند بر اساس ورودی (مانند بارندگی) یا خروجی (مانند مصرف آب) تخمین زده شود. بر اساس این منطق شاخص جدید RDI پیشنهاد شده است که از داده‌های هر دو عامل مؤثر P و PET استفاده می‌کند. شاخص جدید ساده، جهانی و جامع‌تر از SPI است و اساس علمی درست‌تری دارد [۲۵].

دلیل استفاده از دو شاخص SPI و RDI در این پژوهش این است که شاخص SPI به رغم سادگی و فراگیر بودن آن نمی‌تواند بدون آزمون دیگر شاخص‌ها برای شرایط مختلف آب و هوایی به عنوان شاخصی ملی پذیرفته شود. شاخص RDI با همان ساختار SPI به علت بهره‌گیری از تبخیر و تعرق پتانسیل در ساختار خود برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی و هیدرولوژیکی از قابلیت‌های ویژه‌ای برخوردار است. تفاوت معناداری میان دو شاخص در ارزیابی و پایش خشکسالی وجود ندارد، ولی شاخص RDI در مورد خشکسالی‌های بسیار شدید از حساسیت بیشتری برخوردار است. به نظر می‌رسد که در ارتباط با خشکسالی کشاورزی، در صورت موجود بودن آمار درازمدت، شاخص RDI موفق‌تر از SPI عمل می‌کند.

تغییرپذیری SPI باعث می‌شود در مقیاس‌های کوتاه مدت برای اهداف کشاورزی و در مقیاس‌های بلندمدت برای اهداف جریان‌های رودخانه‌ای، هیدرولوژی مثل منابع آب زیرزمینی، سطح دریاچه‌ها و منابع سطحی استفاده شود. به این دلیل شاخص یاد شده کاربرد گسترده‌تری در مطالعات خشکسالی و پذیرش جهانی نیز دارد. شاخص RDI با توجه به اینکه بر مبنای بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود، نسبت به شاخص SPI که تنها بر مبنای بارندگی محاسبه می‌شود، به متغیرها و تغییرات آب و هوایی حساسیت بیشتری دارد. از این رو، شاخص RDI مقایسه منطقی از وضعیت خشکسالی را در مناطق با آب و هوای متفاوت نشان می‌دهد [۲۶].

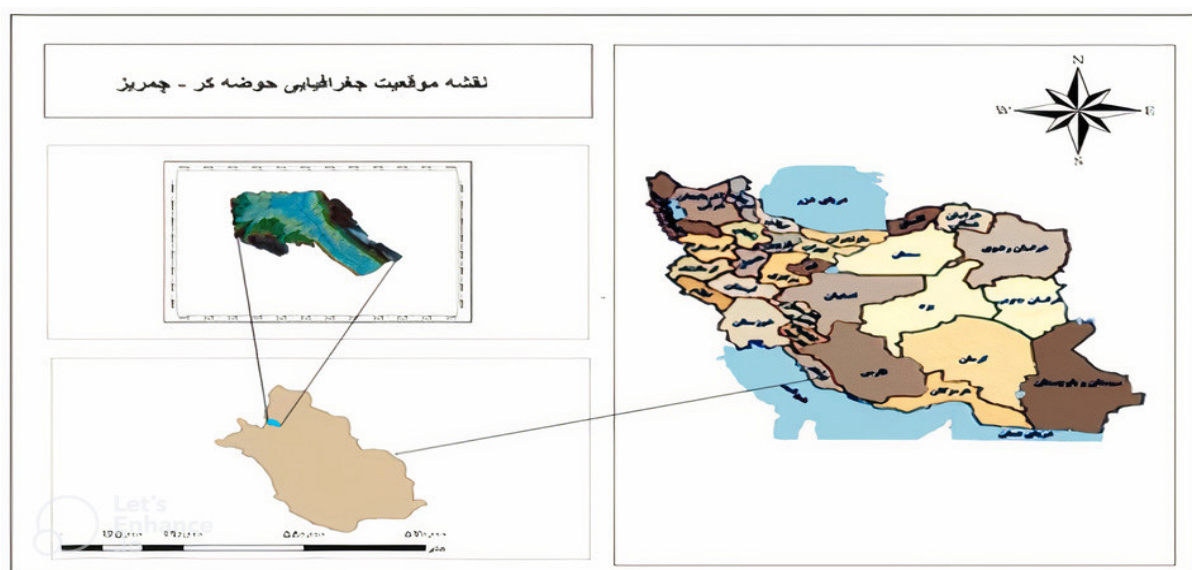
هدف از این مطالعه، بررسی هم‌زمان و به کارگیری مشترک روش‌های برآورد منحنی سنجه رسوب و روش‌های اصلاحی در رسم این منحنی است که در نهایت با ارزیابی این روش‌ها، دقت و کارایی هر روش در برآورد منحنی

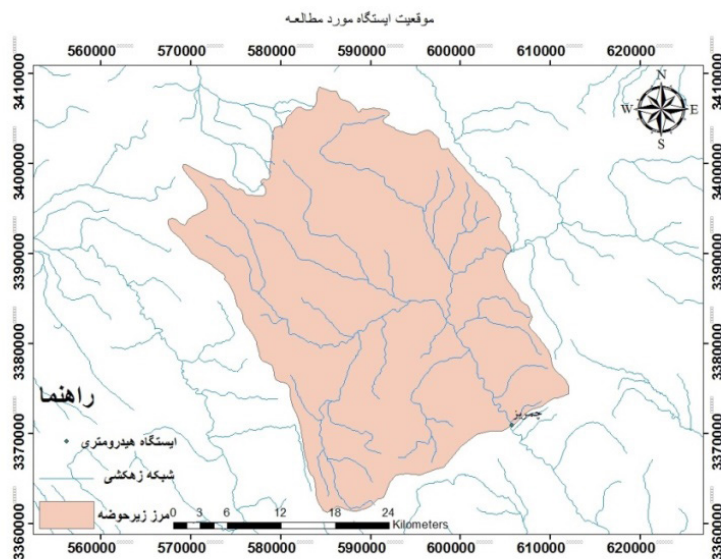
سنج رسوب مشخص شده و ارائه می شود. همچنین در این تحقیق همبستگی بین رسوب تولیدی و شاخص های خشکسالی مد نظر بررسی می شود و میزان رسوب تولیدی در طبقات مختلف خشکسالی با استفاده از دو شاخص یاد شده به دست می آید که نوآوری انجام شده در این تحقیق است. در مطالعات قبلی هر یک از این دو مقوله جداگانه بررسی شده است که در این مطالعه به بررسی همبستگی بین رسوب تولیدی و شاخص های خشکسالی پرداخته می شود.

مواد و روش ها

منطقه مطالعاتی

ایستگاه چمریز، واقع در استان فارس بوده و دارای مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۰۶ دقیقه و ۰۳ ثانیه شرقی و ۳۰ درجه و ۲۸ دقیقه و ۰ ثانیه شمالی است. این ایستگاه در حوضه آبخیز دریاچه سد درودزن قرار دارد که این حوضه دارای مساحت ۲۰۹۳۹ هکتار است. این حوضه اساساً از زیر حوضه های حوضه آبخیز دریاچه طشک بختگان است. برآورد رسوب و بررسی روند تغییرات آن در این ایستگاه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، زیرا این ایستگاه در فاصله ۴۰ کیلومتری بالادست سد درودزن در شهرستان مرودشت قرار گرفته که از لحاظ میزان رسوبات انتقالی به این سد، به دلیل تغذیه کننده اصلی آن، اهمیت آن را دوچندان می کند. میانگین بارندگی حوضه آبخیز سد درودزن ۴۷۰ میلی متر در سال و میانگین دمای سالیانه آن نیز ۱۷ درجه سانتی گراد است. طبق مطالعه نگهبان و همکاران (۱۳۹۴)، گسترش سازندهای زمین شناسی حساس به فرسایش از جمله سازندهای آهکی و تأثیر فعالیت های نوزمین ساختی در سیستم آبراهه این حوضه به شدت موجب فرسایش و رسوب دهی در حوضه می شود. متوسط فرسایش زایی باران در حوضه به طور سالانه، ۶۳۸۳/۵۰۲ تن در هکتار برآورد شده و نشان دهنده بالا بودن فرسایش خاک است. میانگین اسیدیتته خاکهای حوضه ۱۶/۶ از نظر زراعی برای رویش گیاهان مطلوب است [۲۷].

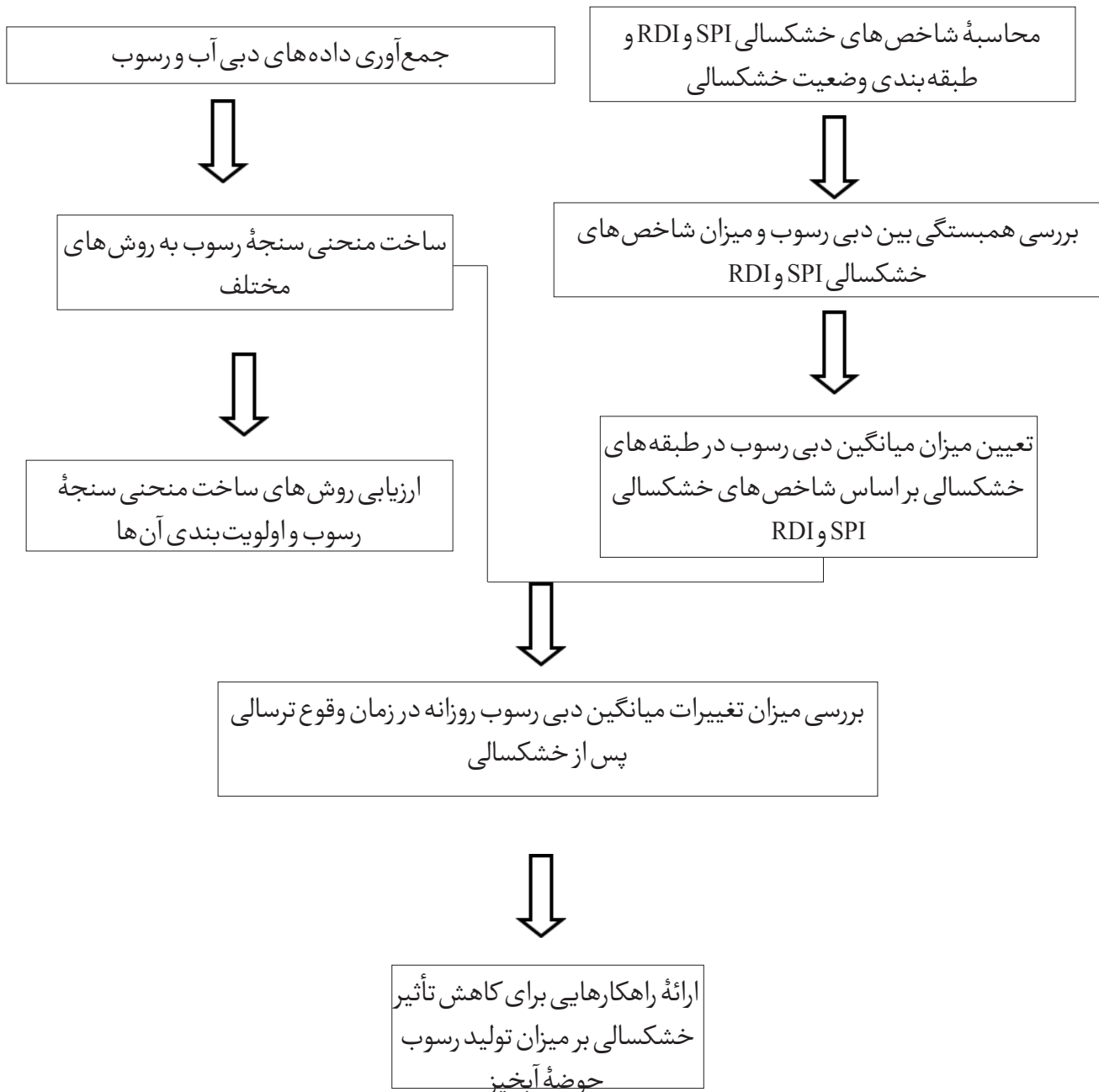




شکل ۲. موقعیت جغرافیایی و شبکه زهکشی زیرحوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه

به منظور به کارگیری انواع روش رسم منحنی سنج رسوب و سپس اعمال روش های اصلاحی روی آن و در نهایت ارزیابی کارایی و صحت هر یک از مدل های ارائه شده، داده های ایستگاه هیدرومتری چمریز واقع بر رودخانه کر، جمع آوری و با استفاده از نرم افزار Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس با استفاده از داده های هواشناسی منطقه مطالعه شده و به کارگیری شاخص های خشکسالی SPI و RDI، وضعیت و شدت خشکسالی در دوره های زمانی مختلف تعیین و رابطه آن با میانگین رسوب روزانه در هر سال بررسی می شود. در نهایت سال هایی که به صورت متمادی به ترتیب دارای وضعیت خشکسالی و ترسالی بوده اند از نظر تولید رسوب با هم مقایسه و نحوه تغییرات دبی رسوب تعیین می شود.

در شکل ۳ مراحل انجام تحقیق به صورت فلوچارت آورده شده است.



شکل ۳. نمودار جریان روش کار (نگارنده، ۱۴۰۳)

منحنی سنجۀ رسوب

به رسم رابطه بین دبی آب و دبی رسوب، منحنی سنجۀ رسوب، منحنی سنجۀ رسوب، منحنی سنجۀ رسوب می شود. داده های دبی رسوب به همراه دبی آب در ایستگاه های هیدرومتری اندازه گیری می شود که به دلیل نبود دستگاه ثبات مناسب برای دبی رسوب، این داده ها اصولاً به صورت جمع آوری پراکنده بوده و در بسیاری از ایستگاه ها وجود ندارد یا بسیار کم است و داده های موجود نیز اصولاً در دبی های سیلابی که بیشترین میزان بار رسوب را حمل می کند، برداشت نشده اند. در این حالت از روش های غیرمستقیم برآورد بار معلق که شامل روش های درون یابی و برون یابی داده های غلظت است، استفاده می شود. روش های برآورد رسوب از نظر نوع منحنی سنجۀ رسوب و استفاده از دبی جریان، به منحنی سنجۀ یک خطی، چندخطی، حد وسط دسته ها طبقه بندی می شوند که تمامی آن ها از رابطه اداره احیای اراضی آمریکا (USBR) پیروی می کنند [۲۸].

$$Q_s = \alpha Q_w^\beta \quad (1)$$

که در آن: Q_s دبی رسوب (بر حسب میلی گرم در لیتر یا تن در روز)، Q_w دبی جریان آب (بر حسب مترمکعب بر ثانیه)، a و b ضرایب معادله هستند.

این رابطه به دلیل وجود اریب، در بیشتر مواقع نتوانسته غلظت رسوب در دبی های مختلف جریان را به خوبی نشان دهد، اریب در واقع باعث شده تا مقدار باقی مانده ها (اختلاف بین مقادیر مشاهده ای با مقادیر برآوردی) توزیع نرمالی نداشته باشد و مقدار آن بیشتر از صفر شود [۲۹]. اریب منحنی سنجه از دو عامل منشأ می گیرد. عامل اول به علت تغییر شکل معادله از حالت لگاریتمی به حالت طبیعی مدل رگرسیون خطی است که در اصل مربوط به ذات منحنی سنجه است. عامل دوم اریب، ناشی از عمل برون یابی برای برآورد رسوب دبی های بالاست (Iadanza & Napolitano, 2006) [۳۰] که در ارتباط با کمیت و کیفیت داده ها بوده و باعث می شود رسوب برآوردی خطای زیادی داشته باشد [۳۱]. دو اریب ناشی از عوامل بالا معمولاً به کم تخمینی مقدار رسوب انتقالی منجر می شوند که با پراکندگی نقاط نمونه ارتباط مستقیم دارد؛ بنابراین برای به دست آوردن برآوردهای ناریب، فاکتورهای اصلاحی (CF) به شکل زیر در معادله منحنی سنجه رسوب به کار گرفته می شوند (رابطه ۱):

$$Q_s = CF \times \alpha Q_w^\beta \quad (2)$$

که در آن: CF ضریب اصلاحی، Q_s دبی رسوب (بر حسب میلی گرم در لیتر یا تن در روز)، Q_w دبی جریان آب (بر حسب مترمکعب بر ثانیه)، a و b ضرایب معادله هستند.

انواع ضرایب اصلاحی

روش فائو (FAO)

روش فائو توسط جونز و همکاران (۱۹۸۱) به منظور تعدیل ارقام و نزدیک کردن مقادیر محاسباتی به مقادیر مشاهده ای برای مناطق خشک و نیمه خشک مطرح شده است [۳۲]. در این روش ضریب α' به عنوان فاکتور اصلاحی، جایگزین عرض از مبدأ α در رابطه USBR می شود [۳۳] این فاکتور اصلاحی به صورت رابطه ۲ به دست می آید:

$$\alpha' = \frac{\overline{Q_s}}{Q_w^b} \quad (2)$$

فاکتور اصلاحی پارامتری QMLE

در این روش با استفاده از واریانس خطای رگرسیون در محاسبه دبی رسوب برآوردی با استفاده از فرمول ارائه شده در روش رسم منحنی سنجه رسوب ساده (یک خطی)، ضریبی به صورت روابط ۳ و ۴ محاسبه شده که در نهایت با ضرب این ضریب در α اولیه، عرض از مبدأ اصلاح شده به روش پارامتری محاسبه می شود [۳۴].

$$CF_1 = EXP[2.65S^2] \quad (3)$$

$$S^2 = \frac{\sum(\log_{10} Q_{soi} - \log_{10} Q_{sei})^2}{(n - 2)} \quad (4)$$

که در آن: n : تعداد نمونه ها، مقدار مشاهداتی و مقدار برآوردی است.

فاکتور اصلاحی غیر پارامتری اسمیرینگ

این ضریب نیز به صورت زیر از تفریق لگاریتم مقدار مشاهده‌ای غلظت رسوب و لگاریتم مقدار برآوردی غلظت رسوب و جای گذاری در فرمول CF_2 محاسبه شده و در نهایت با ضرب در α اولیه، مدل اصلاح شده منحنی سنج رسوب به دست می‌آید [۳۳].

$$CF_2 = \frac{1}{n} \sum 10^{\varepsilon_i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= (\log_{10} Q_{soi} \\ &- \log_{10} Q_{sei}) \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن: n تعداد نمونه‌ها، مقدار مشاهداتی و مقدار برآوردی است.

شاخص‌های خشکسالی

شاخص RDI¹

این شاخص برای اولین بار برای مناطق مدیترانه‌ای ارائه شد. این شاخص شدت و مدت خشکسالی را مشخص می‌کند و برای پیش بینی خشکسالی استفاده می‌شود. در شاخص خشکسالی RDI به پارامتر تبخیر نیز توجه شده و به طور جداگانه‌ای برای هر حوضه آبخیز استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت این شاخص آن است که هم به میزان آب و هم به عوامل اقلیمی توجه می‌کند. این شاخص متأثر از دو پارامتر بارندگی (P) و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) است. این شاخص به این صورت محاسبه می‌شود که ابتدا با استفاده از رابطه ۷ برای هر سال (i) از دوره آماری مطالعه شده، مقداری با عنوان $a_0^{(i)}$ محاسبه می‌شود [۲].

$$\begin{aligned} a_0^{(i)} &= \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, i = 1, 2, \dots, N, j \\ &= 1, 2, \dots, 12 \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن: بارندگی، PET تبخیر-تعرق پتانسیل ماه زام از سال ام و N تعداد سال‌های آماری است. مقدار از ۱ تا متغیر است [۲]. چنانچه بارندگی و تبخیر-تعرق به صورت سالانه محاسبه شوند، نیازی به جمع کردن مقادیر ماهانه در این فرمول نخواهد بود. گام بعدی، تعیین شاخصی تحت عنوان RDI نرمال (RDI_n) برای هر سال با استفاده از مقادیر $a_0^{(i)}$ است که از رابطه ۸ به دست می‌آید:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_0^{(i)}}{\bar{a}_0} - 1 \quad (8)$$

که در این رابطه میانگین حسابی مقادیر در سال‌های مورد مطالعه است که برابر با نسبت خشکسالی ارائه شده از سوی سازمان فائو است [۱].

مرحله سوم که برای محاسبه شاخص استاندارد شده RDI (RDI_S) است که با فرض اینکه مقادیر از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کنند، مقادیر برای سال‌های مختلف از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$RDI_s^{(i)} = \frac{y_i - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (9)$$

$$y_i = Lna_n^{(i)} \quad (10)$$

که در آن \bar{y} و $\hat{\sigma}_y$ به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر است.

شاخص SPI

این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط مکی و همکارانش به منظور تعیین و پایش خشکسالی پیشنهاد شد. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار محاسبه می شود (رابطه ۱۰) و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص، عنصر بارندگی است. این شاخص می تواند در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شود [۳۵]. هدف از ارائه SPI، ارائه یک شاخص عددی است که بتواند ریزش های جوی مناطق با اقلیم های مختلف را با هم مورد مقایسه قرار دهد.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S} \quad (10)$$

که در آن: مقدار بارش در دوره زمانی مورد مطالعه، میانگین درازمدت بارش برای دوره زمانی مد نظر و S انحراف از معیار مقادیر بارش است [۶]. طبقه بندی شاخص های خشکسالی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص SPI و RDI و میانگین دبی رسوب برآوردی در هر طبقه خشکسالی [۳۶]

مقدار شاخص RDI و SPI	طبقه بندی خشکسالی
۲ و بیشتر از آن	به شدت مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب
۱ تا ۱/۴۹	نسبتاً مرطوب
۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	متوسط (نرمال)
۱- تا ۱/۴۹-	نسبتاً خشک
۱/۵- تا ۱/۹۹-	خیلی خشک
۲- و کمتر از آن	به شدت خشک

ارزیابی مدل ها (Validation)

به منظور بررسی صحت و کارایی مدل های ارائه شده برای منحنی سنج رسوب، با استفاده از شاخص های RMSE، MAE و ME این ارزیابی انجام می شود.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |(P_i - O_i)|}{n} \quad (8)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

که در روابط یادشده، مقادیر شبیه‌سازی شده، O مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده‌ها است. شاخص RMSE و MAE از صفر تا بی‌نهایت متغیر است که هر چه به صفر نزدیک‌تر شود، نشان‌دهنده کارایی مناسب‌تر مدل مورد ارزیابی است. روش ME دارای دامنه منفی بی‌نهایت تا مثبت یک بوده که هر چه به یک نزدیک‌تر شود، نشان‌دهنده تناسب مدل و اگر صفر شود، در مقادیر میانگین پاسخ‌گو است و در میل به بی‌نهایت نشان‌دهنده عدم کارایی مناسب مدل است. شاخص MAE در ارزیابی مقادیر متوسط مدل و برای توزیع یکنواخت خطا مناسب است. شاخص RMSE نیز برای خطاهای بزرگ بهتر جواب می‌دهد و وقتی واریانس داده‌ها زیاد باشد، این شاخص افزایش می‌یابد که این شاخص برای شرایطی که میانگین کم اهمیت باشد، مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

روش‌های ساخت مدل منحنی سنجه رسوب

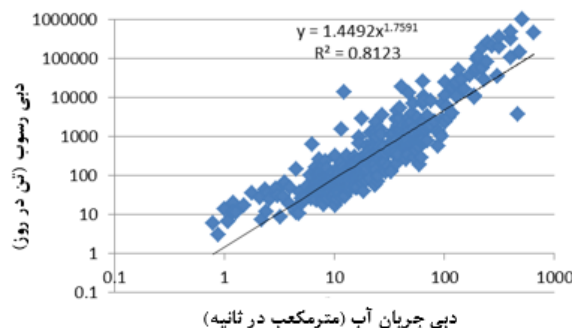
داده‌های دبی آب و دبی رسوب ۴۵ ساله (۱۳۴۷ تا ۱۳۹۹) جمع‌آوری شده که فقط تعداد ۴۴۶ داده رسوب در این دوره زمانی موجود است. داده‌های موجود نیز اصولاً در دبی‌های سیلابی که بیشترین میزان بار رسوب را حمل می‌کند، برداشت نشده‌اند. روش‌های ایجاد منحنی سنجه رسوب معرفی شده به ترتیب روی داده‌های موجود اعمال شده و به تفکیک، مدل‌های زیر ارائه شدند.

روش ساده (یک خطی):

با استفاده از داده‌های موجود و اعمال روش ساده، معادله ۱۱ به دست می‌آید:

$$Q_s = 1.4492Q_w^{1.7591} \quad (11)$$

در شکل ۴ منحنی سنجه به روش ساده نشان داده شده است.



شکل ۴. منحنی سنجه به روش ساده

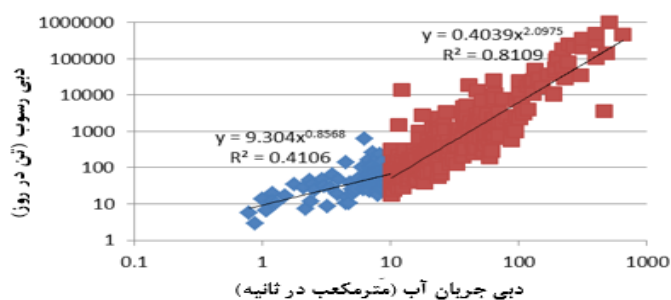
روش دوخطی:

این روش نشان دهنده این است که رفتار دبی رسوب در دبی های کم و زیاد با هم متفاوت است و اهمیت آماربرداری در دبی های زیاد را نشان می دهد. با استفاده از داده های موجود و روش دوخطی، برای دبی های کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه (رابطه ۱۲) و بیشتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه (رابطه ۱۳) استخراج شد:

$$Q_s = 9.304Q_w^{0.8568} \quad (12)$$

$$Q_s = 0.4039Q_w^{2.0975} \quad (13)$$

در شکل ۵، منحنی سنج رسوب به روش دوخطی نشان داده شده است.



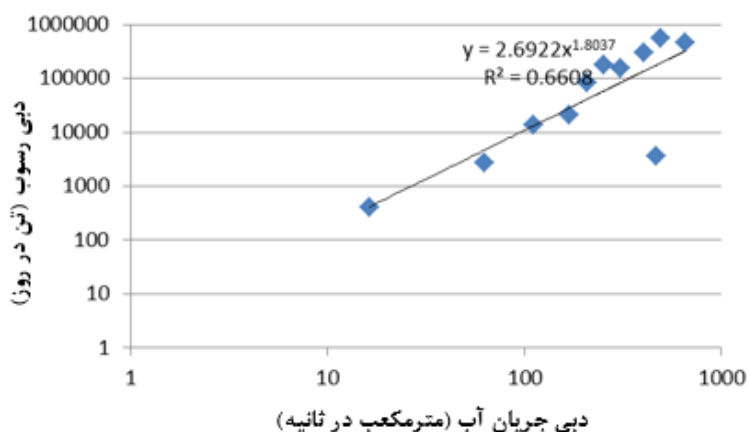
شکل ۵. منحنی سنج رسوب به روش دوخطی

روش حد وسط دسته ها:

در این روش دبی آب به ۱۱ دسته، دسته بندی شده و منحنی سنج رسوب برای این ۱۱ دسته رسم شده است (شکل ۵). معادله استخراج شده از روش حد وسط دسته ها برای این دسته به شرح زیر است:

$$Q_s = 2.6922Q_w^{1.8037} \quad (14)$$

در شکل ۶، منحنی سنج رسوب به روش حد وسط دسته ها نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی سنج رسوب به روش حد وسط دسته ها

مدل‌های ارائه شده با استفاده از روش‌های اصلاحی منحنی سنج رسوب

معادله استخراج شده از روش‌های اصلاحی شامل روش فائو (رابطه ۱۵)، روش ضریب اصلاح پارامتری (رابطه ۱۶) و روش ضریب اصلاح غیرپارامتری (رابطه ۱۷) به شرح زیر هستند.

$$Q_s = 17.74945Q_w^{1.7591} \quad (15)$$

$$Q_s = 2.335441Q_w^{1.7591} \quad (16)$$

$$Q_s = 2.810818Q_w^{1.7591} \quad (17)$$

در جدول ۲ نتایج شاخص‌های خشکسالی و برآورد دبی رسوب توسط منحنی سنج به روش ضریب اصلاح غیرپارامتری (CF_2) ارائه شده است. در این جدول برای دوره آماری از سال ۱۳۴۷ تا ۱۳۹۹ مقادیر شاخص SPI، RDIs و متوسط دبی رسوب روزانه محاسبه شدند.

جدول ۲. نتایج شاخص‌های خشکسالی و متوسط دبی رسوب روزانه در هر سال در دوره آماری ۱۳۴۷-۱۳۹۹

سال آبی	SPI	RDIs	متوسط دبی رسوب روزانه (تن در روز)	سال آبی	SPI	RDIs	متوسط دبی رسوب روزانه (تن در روز)
۴۷	۰/۱۶۴۳۶۷	۰/۱۰۱۰۵	۴۵۰/۰۵۳۲	۷۴	۱/۴۰۲۱۷۱	۱/۱۲۷۹۹۹	۱۸۴۸/۶۱۸
۴۸	۱/۲۹۶۴۲۹	۰/۴۲۵۷۳۲	۹۵۲/۲۵۶۳	۷۵	۰/۹۶۳۶۵۳	۰/۹۱۰۹۳۳	۱۶۰۰/۵۷۹
۴۹	۱/۵۶۳۵۸-	-۲/۱۱۱۶۳	۲۵۶/۱۶۵۲	۷۶	-۰/۸۳۷۰۷	-۰/۵۳۴۴۷	۳۶۸/۴۸۵۴
۵۰	۱/۵۷۴۱۶-	-۱/۹۷۳۵۷	۱۵۶/۷۱۶۳	۷۷	۱/۱۱۹۱۵۶	۰/۹۰۳۶۲۹	۱۴۹۰/۲۶۹
۵۱	۱/۵۷۳۲۲۵	۱/۰۵۸۹۹۲	۱۱۸۱/۳۸۵	۷۸	-۰/۰۹۶۸۸	۰/۰۴۱۴۷۸	۶۶۸/۶۰۷۳
۵۲	۰/۷۰۳۳۴-	-۰/۸۲۴۸۱	۴۲۵/۸۶۴۴	۷۹	-۱/۳۹۶۸۸	-۱/۳۱۲۷۲	۱۸۵/۶۸۴۱
۵۳	۰/۲۴۵۲۲۸	۰/۰۰۶۵۶۴	۷۳۶/۷۹۱۵	۸۰	-۰/۷۴۶۸۸	-۰/۵۶۲۳۲	۱۴۸/۷۷۶۷
۵۴	۱/۱۵۰۲۵۶	۰/۷۹۹۸۲۴	۱۰۹۶/۴۰۷	۸۱	۱/۲۳۱۱۱۸	۰/۷۰۹۸۵	۱۷۵۷/۵۱۶
۵۵	۰/۸۷۳۴۶۱	۰/۴۶۱۸۰۲	۱۹۸۹/۵۰۳	۸۲	-۰/۲۹۵۹۲	-۰/۰۹۰۰۷	۸۶۰/۸۸۲۳
۵۶	۰/۶۱۳۱۵	-۰/۵۷۱۴۴	۵۱۵/۷۵۵۱	۸۳	۱/۰۲۸۹۶۴	۰/۷۱۳۵۴۵	۱۸۰۹/۳۷۴
۵۷	۱/۳۲۱۳۱	۰/۷۱۸۷۱۸	۲۰۲۵/۶۵۳	۸۴	۰/۶۱۸۴۳۶	۰/۵۹۲۴۰۳	۱۱۲۲/۹۱۴
۵۸	۰/۳۷۵۸۵۱	۰/۲۶۲۰۶۳	۷۴۴/۹۱۹۳	۸۵	۰/۰۳۳۷۴۴	۰/۰۹۰۲۵۷	۷۵۵/۲۴۷۲
۵۹	۱/۱۲۸۴۸۶	۱/۸۳۳۹۱۲	۲۵۲۵/۹۹۸	۸۶	۰/۴۱۰۰۶۲	۰/۵۲۷۴۶۵	۹۶۴/۳۳۵۸
۶۰	۰/۰۳۶۸۵۴	۰/۰۷۰۷۰۵	۹۲۷/۷۴۱۱	۸۷	-۲/۱۰۹۰۹	-۲/۶۸۰۵۱	۴۹۰/۳۸۰۴
۶۱	۰/۱۰۵۲۷۶	۰/۰۷۰۷۰۵	۱۰۴۲/۵۴۲	۸۸	-۱/۲۷۲۴۸	-۱/۱۷۹۱	۱۰۵/۲۸۰۵
۶۲	-۰/۰۹۳۷۷	-۰/۰۳۳	۵۸۳/۴۱۱۲	۸۹	-۰/۷۰۶۴۵	-۰/۵۷۲۴۶	۱۳۴/۱۴۸
۶۳	-۰/۸۶۸۱۷	-۰/۶۷۵۱۱	۲۷۹/۹۱۳۷	۹۰	-۰/۵۰۴۳	-۰/۴۱۱۹۹	۳۰۳/۷۷۷۲
۶۴	-۱/۰۸۵۸۸	-۰/۸۵۰۴۸	۳۵۷/۸۹۴۸	۹۱	۰/۰۹۵۹۴۵	۰/۱۰۵۵۹۳	۵۱۷/۹۵۱۷
۶۵	-۰/۲۱۱۹۵	-۰/۰۴۸۱۱	۴۴۱/۳۷۴۸	۹۲	-۰/۱۲۱۷۶	۰/۰۰۳۰۶۴	۳۷۱/۴۹۹۳
۶۶	۰/۴۷۲۲۶۳	۰/۳۰۹۸۱۳	۱۱۹۳/۶۴۷	۹۳	-۱/۰۹۸۳۲	-۰/۸۵۹۴۸	۲۶۱/۴۰۳۴
۶۷	۰/۱۶۳۱۲۳	۰/۱۸۵۴۶۲	۹۰۵/۸۹۱۷	۹۴	۰/۰۶۴۳۷	۰/۱۴۷۴۶	۷۶۴/۴۹۶۱

۳۴۷/۷۵۸۲	۰/۰۰۵۷۰۲	-۰/۱۴۵۳۷	۹۵	۳۹۴/۱۶۸	-۰/۹۹۳۱۸	۱/۱۲۰۰۹-	۶۸
۲۹۳/۸۵۳۶	-۰/۹۷۶۸۴	-۱/۰۶۷۳۶	۹۶	۹۲۴/۹۷۸	۰/۲۹۲۰۳۴	۰/۴۵۰۴۹۲	۶۹
۳۲۵/۵۴۷۷	-۲/۷۳۶۹	-۲/۲۵۴۶	۹۷	۷۰۸/۲۱۸۳	-۰/۰۵۱۴۳	-۰/۱۸۷۰۷	۷۰
۲۳۴/۳۷۶	-۰/۶۲۷۵۱	-۰/۸۲۰۶	۹۸	۲۳۴۲/۸۰۷	۱/۳۰۲۹۵۱	۱/۲۱۳۰۷۹	۷۱
۲۵۷/۱۲۶۵	-۰/۸۵۷۴۰	-۱/۱۴۷۱	۹۹	۳۲۳۲/۸۸۷	۱/۷۱۸۰۵۸	۲/۱۸۵۹۰۷	۷۲
				۴۳۳/۲۷۸۷	-۱/۱۵۹۵۲	-۱/۴۳۷۳۱	۷۳

ارزیابی نتایج

بعد از ارزیابی مدل های ارائه شده منحنی سنجه رسوب توسط سه شاخص RMSE، MAE و ME نتایج در جدول ۳ ارائه شده است که نشان دهنده تفاوت در عملکرد هر سه شاخص برای ارزیابی مدل ها است که در نهایت با بررسی و به کارگیری هر سه شاخص، میزان صحت و کارایی مدل های ارائه شده برآورد می شود.

جدول ۳. ارزیابی مدل های مختلف رسم منحنی سنجه رسوب

ME	MAE	RMSE	نوع منحنی سنجه رسوب
۰/۴۹۵۶۰۶	۳۸/۷۳۰۸۲	۲۰۹/۰۳۹۱	ساده (یک خطی)
-۰/۰۰۱۶۱	۷۱۶/۶۲۳	۱/۵۰۷۴۵۳	چندخطی (مقادیر دبی کم)
۰/۶۳۱۸۰۹	۴۶/۱۶۹۷	۲۲۲/۰۹۱۵	چندخطی (مقادیر دبی زیاد)
۰/۲۶۲۸۱۷	۳۶۶۹۹/۵۸	۱/۶۸۶۸۲۱	حد وسط دسته ها
۰/۸۷۱۴۶۹	۸۹۹۷/۲۴	۳۰۷۱/۰۸۱	اصلاح به روش فائو
۰/۲۱۸۳۳۸	۳۸۴۸۳/۷۶	۱/۱۶۷۸۵۹	اصلاح به روش پارامتری (CF_1)
۰/۲۷۷۵۴	۳۶۶۰۷/۱۸	۰/۴۱۱۴۴۲	اصلاح به روش غیرپارامتری (CF_2)

این ارزیابی با استفاده از برآورد مجدد مدل ها، روی ۹۰ درصد داده های موجود اولیه و سپس بررسی کارایی به صورت تعیین مقادیر برآوردی رسوب برای ۱۰ درصد جدا شده از داده ها و در نهایت ارزیابی با استفاده از شاخص های معرفی شده انجام شده است. به دلیل کاربرد نسبتاً متفاوت شاخص های ارزیابی یاد شده، نمی توان تنها با بررسی یک مورد، میزان کارایی و صحت یک مدل را نشان داد، به همین دلیل هر سه شاخص با هم بررسی می شوند. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، شاخص RMSE در ارزیابی سه روش ساده، چندخطی (مقادیر دبی زیاد) و روش اصلاح فائو، مقادیر بالایی را نشان می دهد که مبین بالا بودن میزان زیاد پراکندگی داده ها است که در مورد روش چندخطی (مقادیر دبی زیاد) می توان دلیل آن را به دلیل تفاوت رفتار رسوب در دبی های بالا دانست که کاملاً باعث پراکندگی و تغییر شیب منحنی سنجه رسوب در این مقادیر شده است، اما با توجه به دو شاخص MAE و ME در ارزیابی روش چندخطی (مقادیر دبی زیاد)، می توان این موضوع را مشاهده کرد که دو شاخص، این روش را نسبت به دیگر روش ها بسیار کارا و با صحت بیشتر نشان می دهد، به طوری که میزان ME این روش در رده دوم کارایی بعد از روش اصلاح فائو قرار دارد و میزان شاخص MAE نیز در رده دوم بعد از روش ساده قرار گرفته است. روش اصلاح غیرپارامتری (CF_2) از نظر شاخص RMSE بیشترین کارایی را دارد که نشان دهنده پراکندگی کم داده های مشاهده ای و برآوردی در این روش است. از نظر شاخص RMSE، روش اصلاح پارامتری (CF_1) و روش حد وسط

دسته‌ها نیز دارای صحت کارایی مناسبی نسبت به بقیه روش‌ها هستند. با توجه به شاخص MAE، به ترتیب روش ساده (یک خطی)، روش چند خطی (مقادیر دبی زیاد) و سپس روش چند خطی (مقادیر دبی کم) دارای صحت و کارایی بهتری نسبت به روش‌های دیگر هستند. از نظر شاخص ME نیز، روش اصلاح فائو، چند خطی (مقادیر دبی زیاد) و روش ساده (یک خطی) در برآورد منحنی سنجه رسوب دارای صحت و کارایی مناسبی هستند و تنها روش چند خطی (مقادیر دبی کم) دارای کمترین دقت نسبت به بقیه روش‌ها است که با توجه به نزدیکی شاخص ME در این روش، نشان دهنده کاربرد مناسب این روش در مقادیر میانگین است. در نهایت با اولویت بندی مدل‌های ارائه شده بر اساس کاربرد و صحت بهتر با توجه به هر سه شاخص، میزان کاربردی بودن هر مدل مشخص می‌شود (جدول ۴).

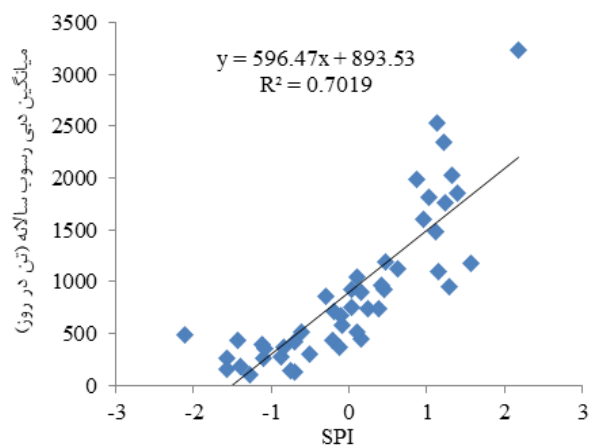
جدول ۴. اولویت بندی مدل‌های منحنی سنجه رسوب

اولویت بندی	بر اساس شاخص RMSE	بر اساس شاخص MAE	بر اساس شاخص ME
۱	اصلاح به روش غیرپارامتری (CF_2)	ساده (یک خطی)	اصلاح به روش فائو
۲	اصلاح به روش پارامتری (CF_1)	چند خطی (مقادیر دبی زیاد)	چند خطی (مقادیر دبی زیاد)
۳	چند خطی (مقادیر دبی کم)	چند خطی (مقادیر دبی کم)	ساده (یک خطی)
۴	حد وسط دسته‌ها	اصلاح به روش فائو	اصلاح به روش غیرپارامتری (CF_2)
۵	ساده (یک خطی)	اصلاح به روش غیرپارامتری (CF_2)	حد وسط دسته‌ها
۶	چند خطی (مقادیر دبی زیاد)	حد وسط دسته‌ها	اصلاح به روش پارامتری (CF_1)
۷	اصلاح به روش فائو	اصلاح به روش پارامتری (CF_1)	چند خطی (مقادیر دبی کم)

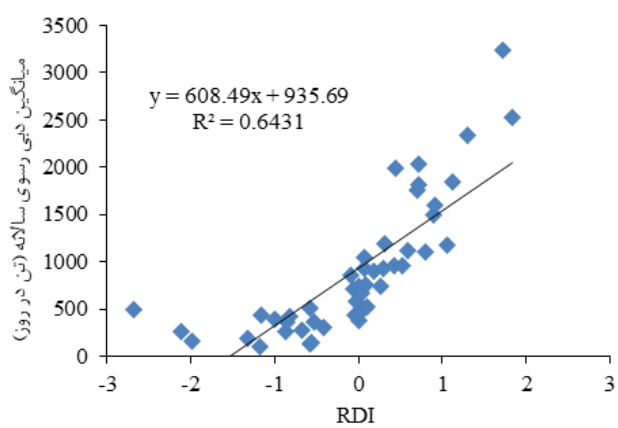
بنابراین، با انتخاب بهترین روش منحنی سنجه رسوب برای منطقه مورد مطالعه و با استفاده از منحنی دبی کلاسه، می‌توان رسوب کل سالانه را محاسبه و سپس با ضرب در مساحت حوضه، بار رسوب کل حوضه را برآورد کرد.

تجزیه و تحلیل وضعیت خشکسالی و تأثیر آن بر تولید رسوب

شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۵، نشان دهنده رابطه و همبستگی بین دبی رسوب و میزان شاخص خشکسالی SPI و RDI است که دبی رسوب به هر دو شاخص در ۱ سطح ۱ درصد همبستگی مثبت دارد که به این معناست که با افزایش شاخص خشکسالی SPI و RDI (به سمت ترسالی)، میزان دبی رسوب افزایش یافته که نشان دهنده تأثیر مثبت شرایط آب و هوایی بر تولید رسوب یک حوضه است که با نتایج نظری Nazari samani و همکاران (۲۰۱۳)، Azim و همکاران (۲۰۱۶)، غفاری و همکاران (۱۳۹۳) و آذرخشی و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد.



شکل ۷. رابطه بین دبی رسوب و شاخص SPI



شکل ۸. رابطه بین دبی رسوب و شاخص RDI

جدول ۵. جدول همبستگی دبی رسوب و شاخص های خشکسالی SPI و RDI

RDI	SPI	دبی رسوب		
**۰/۸۰۲	**۰/۸۳۸	۱	همبستگی پیرسون	دبی رسوب
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		Sig. (2-tailed)	
۴۷	۴۷	۴۷	N	
**۰/۹۵۴	۱	**۰/۸۳۸	همبستگی پیرسون	SPI
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	Sig. (2-tailed)	
۴۷	۴۷	۴۷	N	
۱	**۰/۹۵۴	**۰/۸۰۲	همبستگی پیرسون	
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Sig. (2-tailed)	
۴۷	۴۷	۴۷	N	RDI

Correlation is significant at the .** level (2-tailed).

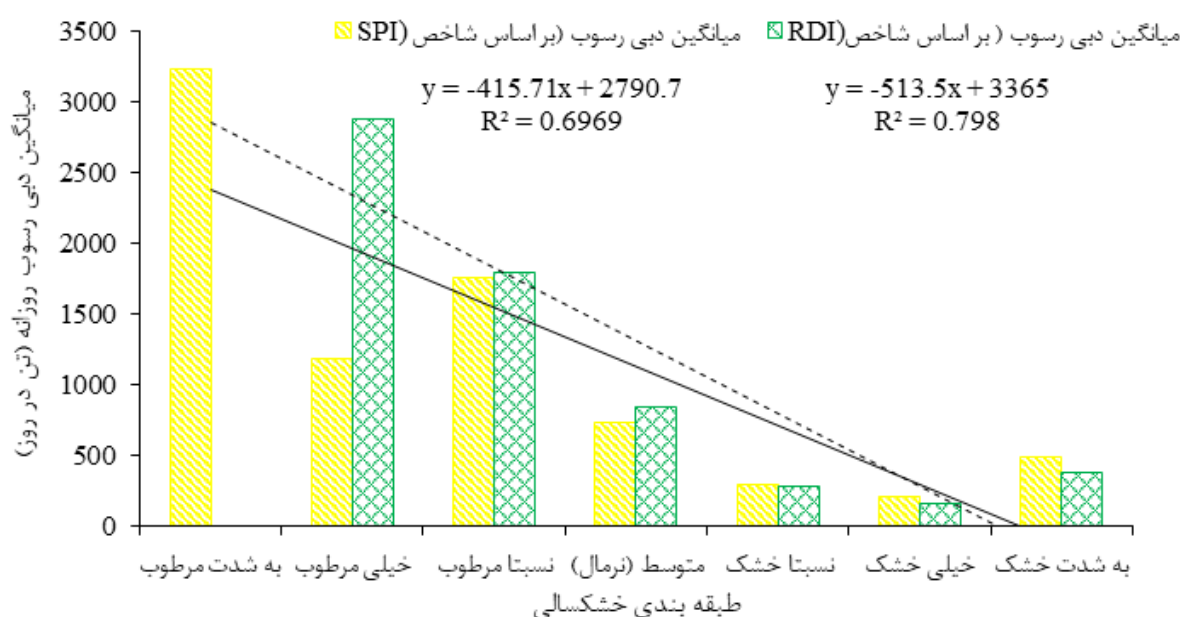
طبق جدول های ۶ و ۷ و شکل ۸، میانگین دبی رسوب طبق طبقات خشکسالی از به شدت مرطوب به سمت به شدت خشک، روند کاهشی دارد که نشان دهنده تأثیر شرایط آب و هوایی بر میزان تولید رسوب حوضه آبخیز است.

جدول ۶. میزان میانگین دبی رسوب در طبقه های مختلف خشکسالی (بر اساس شاخص SPI)

انحراف معیار	تعداد (سال)	میانگین دبی رسوب (تن در روز)	طبقه خشکسالی (شاخص SPI)
.	۱	۳۲۳۲/۸۹۰۰	به شدت مرطوب
.	۱	۱۱۸۱/۳۸۰۰	خیلی مرطوب
۵۲۱/۱۵۶۳۵	۹	۱۷۶۰/۹۹۰۰	نسبتاً مرطوب
۴۲۵/۱۴۱۳۳	۲۷	۷۲۹/۱۷۸۹	نرمال
۱۲۷/۹۱۴۶۷	۶	۲۸۹/۶۱۶۷	نسبتاً خشک
۷۶/۶۸۵۷۳	۲	۲۱۰/۹۴۵۰	خیلی خشک
.	۱	۴۹۰/۳۸۰۰	به شدت خشک
۷۱۱/۵۷۹۶۷	۴۷	۹۰۶/۴۰۳۸	جمع

جدول ۷. میزان میانگین دبی رسوب در طبقه های مختلف خشکسالی (بر اساس شاخص RDI)

طبقه خشکسالی (شاخص RDI)	میانگین دبی رسوب (تن در روز)	تعداد	انحراف معیار
خیلی مرطوب	۲۲۰۷/۱۳۵۰	۲	۱۴۵۰/۶۳۶۶۳
نسبتاً مرطوب	۱۶۰۸/۸۴۳۳	۳	۵۷۵/۴۶۶۰۴
نرمال	۸۹۵/۱۲۸۶	۳۵	۶۱۵/۰۷۹۱۲
نسبتاً خشک	۲۷۹/۶۰۲۵	۴	۱۵۹/۱۱۴۴۸
خیلی خشک	۲۶۵/۱۷۰۰	۱	.
به شدت خشک	۳۲۳/۵۵۰۰	۲	۲۳۵/۹۳۳۲۵
جمع	۹۰۶/۴۰۳۸	۴۷	۷۱۱/۵۷۹۶۷

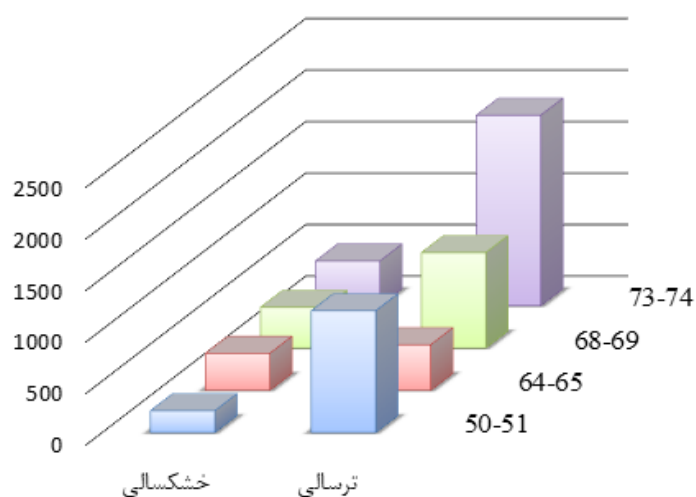


شکل ۹. روند تغییرات دبی میانگین دبی رسوب در طبقه های مختلف خشکسالی (بر اساس شاخص RDI و SPI)

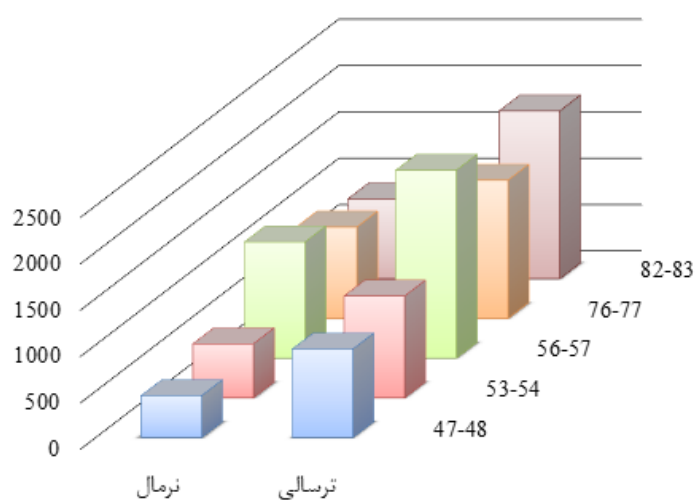
در نهایت با بررسی وضعیت تولید رسوب در سال های متمادی با وضعیت خشکسالی و ترسالی، طبق جدول ۸ و شکل ۹، می توان نتیجه گرفت که در سالی که خشکسالی اتفاق افتاده، به دلیل تأثیر خشکسالی بر وضعیت پوشش گیاهی، رطوبت خاک و عوامل دیگر، در سال های پس از وقوع خشکسالی، نسبت به سال هایی که خشکسالی در طبقه نرمال بوده و پس از آن ترسالی اتفاق افتاده است، میزان دبی رسوب افزایش قابل توجهی داشته است، به طوری که در حالت اول، به طور میانگین بعد از وقوع خشکسالی، با وقوع ترسالی میزان تولید رسوب از ۳۲۱ تن در روز به ۱۰۹۹ تن در روز (۳/۴ برابر) افزایش یافته است، در صورتی که در حالت دوم، پس از وقوع حالت نرمال خشکسالی و پس از آن وقوع ترسالی، میزان تولید رسوب به طور میانگین از ۸۶۸ تن در روز به ۱۴۷۴ تن در روز (۱/۷ برابر) افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر خشکسالی بر شرایط منطقه و وضعیت تولید رسوب حوضه آبخیز است.

جدول ۸. میزان تغییرات میانگین دبی رسوب روزانه در زمان وقوع ترسالی پس از خشکسالی در ۴ دوره زمانی متفاوت

سال آبی	SPI	RDI	متوسط دبی رسوب روزانه (تن در روز)
۴۹	-۱/۵۶۳۵۸	-۲/۱۱۱۶۳	۲۶۵/۱۶۵۲
۵۰	۱/۵۷۴۱۶-	-۱/۹۷۳۵۷	۱۵۶/۷۱۶۳
۵۱	-۱/۵۷۳۲۲۵	۱/۰۵۸۹۹۲	۱۱۸۱/۳۸۵
۶۴	-۱/۰۸۵۸۸	-۰/۸۵۰۴۸	۳۵۷/۸۹۸۹
۶۵	-۰/۲۱	-۰/۰۴۸۱۱	۴۴۱/۳۷۴۸
۶۸	-۱/۱۲۰۰۹	-۰/۹۹۳۱۸	۳۹۴/۱۶۸
۶۹	۰/۴۵۰۴۹۲	۰/۲۹۲۰۳۴	۹۲۴/۹۷۸
۷۳	-۱/۴۳۷۳۱	-۱/۱۵۹۵۲	۴۳۳/۲۷۸۷
۷۴	۱/۴۰۲۱۷۱	۱/۱۲۷۹۹۹	۱۸۴۸/۶۱۸



شکل ۱۰. میزان تغییرات دبی رسوب در دو سال متوالی خشک و مرطوب (۴ دوره زمانی متفاوت)



شکل ۱۱. میزان تغییرات دبی رسوب در دو سال متوالی نرمال و مرطوب (۵ دوره زمانی متفاوت)

نتیجه‌گیری

تحلیل تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب با استفاده از روش منحنی سنجۀ رسوب، می‌تواند در ارزیابی اثرات این پدیده بر منابع آب، مدیریت فرسایش خاک و کنترل رسوب آبریزی مفید واقع شود. این روش در برنامه‌ریزی منابع آب و حفاظت از حوضهٔ آبخیز و سیستم‌های هیدرولوژیکی در شرایط خشکسالی دستیابی به تصمیم‌های بهتری را ممکن می‌سازد. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب برآوردی به روش منحنی سنجۀ رسوب در ایستگاه هیدرومتری چمریز واقع در حوضهٔ آبخیز سد درودزن است. در این پژوهش از داده‌های دبی آب و دبی رسوب ۴۵ ساله (۱۳۴۷ تا ۱۳۹۸) جمع‌آوری شده که فقط تعداد ۴۴۶ داده رسوب در این دورهٔ زمانی موجود بود، استفاده شد. در این تحقیق ارزیابی مدل‌های ارائه شده منحنی سنجۀ رسوب توسط سه شاخص CF_2 ، MAE ، $RMSE$ و ME صورت گرفت. نتایج مربوط به ارزیابی مدل نشان داد از نظر شاخص $REME$ روش اصلاح غیر پارامتری (CF_2) دارای بیشترین کارایی است. همچنین از نظر شاخص‌های MAE و ME به ترتیب روش ساده تک خطی و روش اصلاح فائو دارای کارایی نسبتاً بالایی هستند. شاخص $RMSE$ در ارزیابی سه روش ساده، چند خطی (مقادیر دبی زیاد) و روش اصلاح فائو، مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که مبین بالا بودن میزان زیاد پراکندگی داده‌ها است که در مورد روش چند خطی (مقادیر دبی زیاد) می‌توان دلیل آن را به دلیل تفاوت رفتار رسوب در دبی‌های بالا دانست که کاملاً باعث پراکندگی و تغییر شیب منحنی سنجۀ رسوب در این مقادیر شده است.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل خشکسالی و تأثیر آن بر تولید رسوب نشان داده که همبستگی مثبتی بین دبی رسوب و میزان شاخص خشکسالی SPI و RDI در سطح یک درصد وجود دارد. که بیانگر این است که با افزایش شاخص خشکسالی SPI و RDI (به سمت ترسالی)، میزان دبی رسوب افزایش یافته دلیل آن می‌تواند تأثیر مثبت شرایط آب و هوایی بر تولید رسوب یک حوضه باشد. از طرفی میانگین دبی رسوب در طبقه بندی خشکسالی، از به شدت مرطوب به سمت به شدت خشک، روند کاهشی داشت که نشان دهندهٔ تأثیر شرایط آب و هوایی بر میزان تولید رسوب حوضهٔ آبخیز است.

در نهایت برای کاهش تأثیر خشکسالی بر میزان تولید رسوب و استفادهٔ بهینه از آب، می‌توان راهکارهای زیر پیشنهاد کرد:

۱. مدیریت آب به عنوان یک منبع محدود: برنامه‌ریزی مناسب برای استفاده از آب و کنترل مصرف آب در دوره‌های خشکسالی می‌تواند به حفظ منابع آب و کاهش رسوب آبریزی کمک کند.
۲. مدیریت فرسایش خاک: استفاده از روش‌های مدیریت خاک مانند راه اندازی سیستم‌های فشار آب کم و روش‌های بهسازی خاک می‌تواند از فرسایش خاک و جابه‌جایی رسوبات جلوگیری کند.
۳. حفظ و بازسازی رطوبت خاک: استفاده از روش‌های نگهداری رطوبت خاک مانند استفاده از آبیاری مکانیزه، کشت مستقیم و تراشه بازی خاک و استفاده از آبیاری نقطه‌ای می‌تواند به کاهش رسوب آبریزی در شرایط خشکسالی کمک کند.
۴. جایگزینی کشاورزی با نژادهای مناسب: استفاده از نژادها و گیاهانی که مقاومت به خشکسالی و تبخیر و تعرق پایینی دارند، می‌تواند تأثیر خشکسالی بر تولید رسوب را کاهش دهد.
۵. برنامه‌ریزی منابع آب: تعدادی از روش‌های برنامه‌ریزی منابع آب شامل قرار دادن منابع آب به سیستم‌های بازیافت، استفاده از سدها و تأمین آب پایدار ممکن است به بهینه‌سازی مدیریت آب و کاهش تولید رسوب کمک کند.

بنابراین بررسی دقیق تر و مدیریت هوشمند تأثیر شاخص های خشکسالی SPI و RDI در کنترل رسوب و مدیریت منابع آب می تواند شروعی مؤثر برای کاهش اثرات خشکسالی باشد.

منابع

- [1] Tsakiris G, Tsigkas D. Assessment of drought consequences in agriculture using RDI. In the proceeding of 5th national conference of agricultural engineering, Larissa. 2007. 18-20 oct. 353-360.
- [2] Tsakiris G, Vangelis H. Estabilishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 2005; 9/10:3-11.
- [3] Hayes M. Drought indices. National drought mitigation center. 2004. <http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm>.
- [4] Richard R, Heim J. A review of twentieth- century drought indices used in the united states. *American meteorological society*. 2002: 1149-1166.
- [5] Guttman N, Wallis J, Hosking J. Spatial compatibility of the palmer drought severity index. *Water resources bulletin*. 1992; 28 (6): 1111-1119.
- [6] Mckee T, Doesken N, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales. Reprints 9th conference on applied climatology. 1995; 15-20 Jan. Dallas, 233-236.
- [7] Ndayiragije J. M, & Li F. Effectiveness of drought indices in the assessment of different types of droughts, managing and mitigating their effects. *Climate*. 2022; 10(9), 125.
- [8] Nazari-pouya H, Sepehri M, Atapourfard A, Ghermezcheshme B, Santos C. A. G, Khoshbakht M, & Anh D. T. Evaluating Sediment Yield Response to Watershed Management Practices (WMP) by Employing the Concept of Sediment Connectivity. *Sustainability*. 2023; 15(3), 2346. [Persian].
- [9] Kidane M, Bezie A, Kesete N, & Tolessa T. The impact of land use and land cover (LULC) dynamics on soil erosion and sediment yield in Ethiopia. *Heliyon*. 2019; 5(12).
- [10] Pronoos Sedighi M, Ramezani Y, Nazeri Tahroudi M, & Taghian M. Joint frequency analysis of river flow rate and suspended sediment load using conditional density of copula functions. *Acta Geophysica*. 2023; 71(1): 489-501. [Persian].
- [11] Ayele G, Kuriqi T, Jemberrie A, Saia M. A, Seka S. M, Teshale A. M, & Melesse A. M. Sediment yield and reservoir sedimentation in highly dynamic watersheds: the case of Koga Reservoir, Ethiopia. *Water*. 2021; 13(23), 3374.
- [12] Andreeva O. V, Kust G. S, & Lobkovsky V. A. Sustainable land management and land degradation neutrality. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 92(3): 285-296.
- [13] Sadeghi S.H.R, Mizuyama T, Miyata S, Gomi T, Kosugi K, Fukushima T, Mizugaki S, and Onda Y. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*. 2008. 144: 198-211. [Persian].
- [14] Esfandiari F, & Qarah Chorlo M. Regional estimation of sedimentation using monthly sediment gauge curve (case study: Qarasu warershed area). *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*. 69, 33-53. [Persian].
- [15] Forozan Borujeni R., Hadian M., Talebi A, Yazdi J, and Hadian Jezi M. Investigating the sediment gauge curve related to drought and drought periods (case study of Farsan watershed). The 17th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering (Watershed Management and Sustainable Food Security). 2020, Faculty of Natural Resources, Jiroft University. [Persian].
- [16] Aghabeigi N, Esmali Ouri A, Mostafazadeh R, and Golshan M. Assessment of the effects of climate change on

- suspended sediment amounts in a number of watersheds in Ardabil province. *Journal of Geography and Planning*. 2020; 24(73): 47-66. [Persian].
- [17] Ghafari G. and Mahdavi M. The effect of periods of drought and drought on the amount of specific sediment (case study: Karkheh watershed). *Iranian Scientific-Research Journal of Watershed Sciences and Engineering*. 2014; 27(8): 49-54. [Persian].
- [18] Azarakhshi M, Mosaedi A, Bashiri M, and Ojaklou Shahabi R. The effect of changes in precipitation and land use on sediment production (case study: Samobar-Torbet Heydarieh watershed). *Scientific-Research Journal of Watershed Sciences and Engineering of Iran*. 2016; 37(11): 25-33. [Persian].
- [19] Azim F, Shakir A. S, & Kanwal A. Impact of climate change on sediment yield for Naran watershed, Pakistan. *International Journal of Sediment Research*. 2016; 31(3), 212-219.
- [20] Walling D. E, Webb B. W, and Wood J. C. Some sampling considerations in the design of effective strategy for monitoring sediment associated transport, IAHS. 1992. 210.
- [21] Soler M, Latron J, and Gallart F. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous, Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology*. 2007.
- [22] Horowitz A. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: A matter of temporal resolution. Peachtree Business Center. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*. 2002. 3p.
- [23] Mohammadi A. Vajdari Moghadam M. Investigation of RDI and SPI drought indices in a case study, 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan, Isfahan University of Technology. 2011.
- [24] Asadi Zarch M.A, Mobin M.H, Malekinezhad H, Dastorani, M. T. Drought monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Recourses Management*. 2011. 25: 3485-3504. [Persian].
- [25] Topçu E, & Seçkin N. Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI): A case study of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan and Asi basins of Turkey. *Journal of Engineering Research*. 2022; 10(2B): 124-141.
- [26] Zarei A. R, Shabani A, & Moghimi M. M. Accuracy assessment of the SPEI, RDI and SPI drought indices in regions of Iran with different climate conditions. *Pure and Applied Geophysics*. 2021. 178, 1387-1403. [Persian].
- [27] Neghban S. and Heydari A. Investigating the characteristics of new tectonics, erosion and sedimentation in the Kar-Chamriz watershed using quantitative indicators. *Natural Geography Quarterly*. 2016; 8(29): 91-106. [Persian].
- [28] Saghafian B, ghermezcheshmeh B, and Samiee M. Regional analysis of sediment in southwest watersheds of Iran. *Iran Water Resources Management Co (WRMC)*. 2008. 125p. [Persian].
- [29] Kao Sh, Lee T, and Milliman J.D. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *TAO*. 2005; 16: (3): 653-675.
- [30] Iadanza C, & Napolitano, F. Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. 311212-1227.
- [31] Jones M. J, & FAO. Estimating soil erosion in Africa. *FAO Soils Bulletin*. 1981. 43.
- [32] Arabkhedri M, Hakimkhani Sh, and Varvani J. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric Stations). *Gorgan, J. Agric. Sci. and Natur. Resour*. 2004; 11 (3): 123-130. [Persian].
- [33] Ferguson R.. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surface Processes and Land*

- Forms. 1987, 12: 95-104.
- [34] Duan N. Smearing estimate, a nonparametric retransformation method. J. Amer. Statistical Association. 1983;78(383): 605-610.
- [35] Steinemann A. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2003; 39(5): 1217-1233.
- [36] Oksal N. G. S, & Beden N. Drought analysis based on SPI and RDI drought indices in the Burdur Basin. Turkish Journal of Engineering. 2024; 8(1): 127-138.