# بهینه‌یابی برآورد میزان رسوب معلق در مناطق خشک
# مطالعه موردی: حوضه فخرآباد مهریز (یزد)

مهدی حیات زاده[۱]، محمد رضا اختصاصی[۲]، حسین ملکی‌نژاد[۲]، علی فتح زاده[۱] و حمیدرضا عظیم‌زاده[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۲۲)

## چکیده

**فرسایش خاک، بی‌شک یکی از مهمترین مسائل و مشکلات موجود در عرصه‌های طبیعی کشور است و آثار مخربی در اکوسیستم‌های مختلف به جای می‌گذارد. با توجه به اینکه محاسبهٔ مقادیر رسوب از طریق ایستگاه‌های رسوب سنجی و اندازه‌گیری‌های مستقیم فرسایش فرایندی هزینه بر و مشکل است، یافتن روش‌هایی برای برآورد دقیق میزان رسوب‌دهی حوضه‌های آبخیز به‌ویژه در مناطق خشک و فراخشک به‌دلیل شرایط حساس اکولوژیکی ضروری می‌نماید. یکی از روش‌هایی که تا به امروز در این مناطق نسبت به سایر روش‌های برآورد رسوب بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است روش‌های رگرسیونی سنجه رسوب می‌باشد. لذا در این تحقیق مقادیر رسوب مشاهداتی ۴۸ واقعه (دبی و رسوب متناظر) در یک دوره ۲۳ ساله حوضه فخرآباد- مهریز با مقادیر برآوردی از روش‌های سنجه چند خطی، حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها با ضریب اصلاحی QMLE، SMEARING و ضریب اصلاحی FAO و همچنین با نتایج حاصل از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) مورد مقایسه قرار گرفته و صحت هر یک از این روش‌ها مورد آزمون قرار گرفت. بررسی حاصل از آزمون‌های مجذور میانگین مربع خطاها (RMSE)، ضریب تبیین ($R^2$) و معیار ناش (ME) کارایی بالاتر روش شبکه عصبی (ANN) را نسبت به سایر روش‌های مذکور نشان دادند. نتایج آزمون‌های مذکور برای روش شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان روش بهینه به ترتیب ۲۰۳/۳، ۰/۸۶ و ۰/۶۶ را نشان دادند. نتایج حاصل مبین این است که در استفاده از هر روشی برای برآورد رسوب معلق جریان در مناطق خشک و فراخشک به‌دلیل ماهیت داده‌های مشاهداتی و همچنین رژیم خاص جریان‌ها که اغلب به‌صورت موقت و فصلی می‌باشند باید جانب احتیاط را رعایت نمود. در عین حال بررسی نتایج این تحقیق گویای انعطاف‌پذیری بالاتر مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی است که آنها را به ابزار مناسبی جهت مدل‌سازی در شرایطی که با فقر داده مواجه هستیم مبدل می‌سازد.**

**واژه‌های کلیدی: منحنی سنجه رسوب، مدل‌سازی، ضرائب اصلاحی، شبکه عصبی مصنوعی**

۱. گروه آبخیزداری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی ، دانشگاه اردکان
۲. گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
۳. گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

## مقدمه

فرسایش، انتقال رسوب، رسوب‌گذاری و کیفیت آب از مسائل بسیار مهم در مدیریت حوضه‌های آبخیز می‌باشند. این مسائل را می‌توان با برقراری و توسعه برنامه‌های اندازه‌گیری مقدار رسوب انتقالی در رودخانه‌ها مورد بررسی قرارداد (۲۹). از طرف دیگر رسوب معلق رودخانه تا حد زیادی پیام آور وضعیت بالا دست است. گروه‌های زیادی نیاز به این داده‌ها دارند و از این اطلاعات می‌توان رابطه بین فرایندهای فرسایش حوضه و رسوب معلق را مطالعه کرد (۲۲). بنابراین بخش رسوب معلق در ارتباط نزدیک با تحقیقات فرسایش خاک قرار دارد و از اطلاعات آن می‌توان برای ارزیابی، اصلاح و بهبود مدل‌های برآورد رسوب و کمک به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مورد تأثیر کاربری اراضی و استراتژی‌های کنترل آلودگی استفاده کرد (۳۱). همچنین محاسبات حجم مرده مخازن ناشی از پرشدن مواد رسوبی و طراحی حوضچه‌های رسوب، عملیات رسوب‌زدایی و غیره همگی بر پایه اطلاعات رسوب شناسی حوضه استوارند (۶). لذا با توجه به اصول برداشت مصالح رودخانه‌ای و لزوم اطلاع از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان رودخانه در طراحی سازه‌های رودخانه‌ای، ضرورت بررسی و مطالعه روش‌های مختلف برآورد بار رسوب رودخانه‌ها به روشنی تبیین می‌شود.

با توجه به اهمیت و حساسیت امر مهار آب‌های سطحی خصوصاً در کشور ما که اکثر رودخانه‌های مناطق مختلف فصلی بوده و کمبود آبی که در پهنه وسیعی از کشور به‌ویژه در مناطق خشک وجود دارد، مدل‌سازی رفتار رودها برای برنامه‌ریزی‌های بلند مدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل آنها ضروری است. بنابراین لازمه توسعه برنامه‌های مهار آب‌های سطحی دست‌یابی دقیق به رفتارهای جریان و میزان رسوبات آن است.

اندازه‌گیری رسوب معلق رودخانه‌ها در ایران به‌صورت برنامه‌ای منظم از سال‌های دهه ۴۰ شمسی آغاز شد و هم اکنون حدود ۵۰۰ ایستگاه رسوب سنجی در سطح کشور وجود دارد. در بیشتر حالات، دستگاه‌ها به‌طور ممتد داده‌های دبی را اندازه‌گیری نمی‌کنند. داده‌های غلظت نیز به‌علت هزینه زیاد نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی با فراوانی کمتری اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین محققان برای به‌دست آوردن غلظت یا بار معلق دراز مدت به روش‌های برآورد متوسل می‌شوند (۹).

تاکنون روابط گوناگون و پیچیده‌ای به‌منظور پیش‌بینی میزان انتقال رسوبات معلق رودخانه‌ها همچون روابط مبتنی بر سرعت و تنش برشی بحرانی، ارائه شده است، لیکن روابط ارائه شده به‌دلیل عدم شناخت دقیق و نیز پیچیدگی سازوکار جابجایی رسوبات در بسیاری از موارد با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده تطابق نداشته و در مواقعی نیز میزان مقادیر محاسبه شده از روابط گوناگون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داراست. از سوی دیگر پرهزینه بودن آزمایشات مربوط به نمونه‌برداری رسوبات معلق رودخانه‌ها و همچنین عدم واسنجی روابط محاسباتی و پیچیدگی این روابط، محققان مختلف برقراری روابط مختلف رگرسیون خطی یا غیرخطی بین دبی جریان و بار معلق رودخانه را پیشنهاد و سالیان متمادی مورد استفاده قرار داده‌اند (۱۴، ۲۰، ۲۶).

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده بار معلق رسوب و به کمک معادله سنجه رسوب می‌توان مقدار رسوب انتقالی را برآورد کرد. همچنین برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا همراه می‌باشد که این نقیصه را می‌توان تا حدودی با به‌کارگیری ضرائب اصلاحی مرتفع نمود (۱۷).

لمک (۵) بیان می‌دارد که ساده‌ترین شکل معادلات رگرسیونی که مستلزم تغییر شکل لگاریتمی داده‌های غلظت و دبی می‌باشد به شکل $C=aQ^b$ بوده که در آن C غلظت رسوب معلق در رواناب و Q دبی جریان آب و a و b پارامترهای رگرسیونی می‌باشند. در معادله فوق ضریب a شاخصی از شدت فرسایش است و مقادیر بالای ضریب نشان‌دهنده فرسایش بالای تشکیلات زمین‌شناسی حوضه آبخیز است که به آسانی منتقل می‌شوند. ضریب b توان فرسایندگی رودخانه است که با کمی افزایش در دبی، قدرت فرسایندگی به‌شدت افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر تمایل زیادی نسبت به بررسی امکان

استفاده از سیستم‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌وجود آمده است. سیستم شبکه‌های عصبی مصنوعی با تکیه بر داده‌ها و قابلیت انعطاف‌پذیری بالا با برقراری اوزان مختلف به ارتباطات عصبی در جریان فرآیند یادگیری قادر است جوابگوی مسائل مبهم و پیچیده باشد به‌خصوص مسائلی که به سادگی با روابط ریاضی قابل بیان نیستند. از این لحاظ، شبکه عصبی مصنوعی از جمله مدل‌های شبیه‌سازی است که می‌تواند با دقت مناسبی واقعیات موجود را به تصویر بکشد و پیش‌بینی آن به واقعیت نزدیک‌تر باشد (۱۰).

در این راستا سیگی زوگلو اقدام به برآورد بار معلق در رودخانه‌ای در انگلستان با استفاده از روش ANN و منحنی‌های سنجه نمود (۱۹). نتایج او نشان داد که مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به ارائه اطلاعاتی حتی در مورد ساختار وقایع مانند پدیده پسماند (Hysteresis) در رابطه دبی و رسوب نیز تأثیر شرایط پیشین است. سیگی زوگلو و آلپ نیز به مقایسه روش رگرسیونی و شبکه‌های عصبی در برآورد بار رسوب رودخانه جونیاتا در ایالات متحده پرداخته و افزایش دقت و سرعت شبکه‌های عصبی مصنوعی را در مقابل روش رگرسیونی عامل ارجحیت آن معرفی نمودند (۲۱).

آگاروال و همکاران با تفکیک داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه، هفتگی، ده روزه و ماهانه با استفاده از آمار جریان رسوب به مقایسه آمار واقعی با آمار برآورد شده پرداخته و به این طریق شبکه‌های طراحی شده را ارزیابی نمودند (۱۶). ژو و همکاران ضمن معرفی روش مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی جهت جریان رسوب معلق به کارایی برآورد بار رسوب جریان در رودخانه‌ای در چین پرداخته و مزیت شبکه طراحی شده اقلیمی نسبت به شبکه طراحی شده با آمار جریان روزانه با اعمال تاخیر سه روزه را تایید نمودند (۳۲).

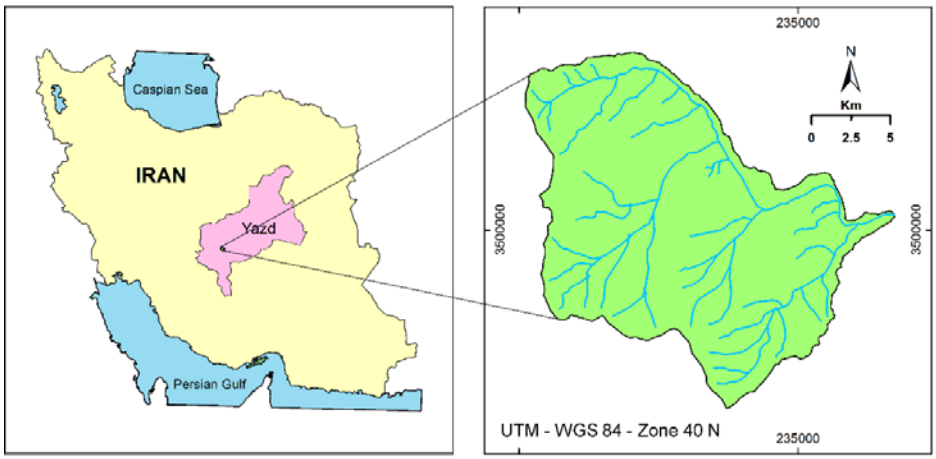
نتایج تخمین بار رسوبی رودخانه گرگانرود توسط مساعدی و نجفی نشان داد که خطای مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به‌طور متوسط نصف خطای مدل‌های منحنی سنجه رسوب می‌باشند (۸). همچنین نتایج جلالی و همکاران با برآورد بار معلق رودخانه نکارود با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و منحنی سنجه، نشان‌دهنده برتری نسبی شبکه عصبی نسبت به منحنی سنجه رسوب بود (۳). فیض نیا و همکاران با برآورد بار معلق روزانه در حوضه آبخیز زرد رامهرمز خوزستان با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و رگرسیون نشان دادند که مدل شبکه عصبی دقت بالاتری را در برآورد بار معلق روزانه دارد (۷). یوسفی و برزگر روش منحنی سنجه را با شبکهٔ عصبی مصنوعی به‌منظور برآورد رسوبات معلق در لرستان مورد مقایسه قرار دادند نتایج نشان داد از بین انواع مختلف منحنی سنجه و ضرایب اصلاحی استفاده شده، ترکیب منحنی سنجهٔ ماهانه و ضریب اصلاحی MUVE دقت مناسب‌تری داشته همچنین نتایج این مطالعه حاکی از مناسب بودن شبکهٔ عصبی پیش‌خور پس‌انتشار خطا در قیاس با منحنی سنجهٔ رسوب بود (۱۴).

هدف از این پژوهش انتخاب یک روش بهینه در برآورد دبی رسوب در مناطق خشک از طریق مقایسه عملکرد چند روش رگرسیونی با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در حوضه مورد مطالعه است. تا ضمن پیش‌بینی میزان رسوب حوضه توسط مدل‌ها و مقایسه مقادیر برآورد شده با مقادیر مشاهده شده مزیت نسبی آنها تبیین گردد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز فخرآباد یکی از زیرحوضه‌های دشت یزد – اردکان در دامنه شرقی رشته کوه شیرکوه بین طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی قرار دارد. این حوضه در کمربند کوهستانی خشک با تابستان‌های نسبتا ملایم و زمستان‌های کوتاه و سرد قرار گرفته است. خروجی این حوضه در دشت ابراهیم آباد مهریز بوده که آب ناشی از باران و ذوب برف حوضه توسط رودهای فصلی به این دشت وارد می‌شود. در




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز فخرآباد در استان یزد و ایران**

این حوضه معروف‌ترین روستاهای استان از جمله ده بالا، طزرجان، بنادک سادات و فخرآباد قرار دارد. متوسط ارتفاع آن ۲۷۲۰ متر و شیب متوسط حوضه حدود ۱۸ درصد می‌باشد. مساحت حوضه حدود ۲۰۷ کیلومترمربع و متوسط بارش سالانه حوضه ۲۰۵ میلی‌متر می‌باشد (۲۷).

## شبکه عصبی مصنوعی

مدل‌های شبکه عصبی در مورد فرآیندهایی که تعریف دقیق و درک خاصی از آنها وجود ندارد، بسیار مؤثر عمل می‌کنند. خصوصیت دیگر این مدل‌ها که آنها را نسبت به سایر روش‌ها و الگوریتم‌ها متمایز می‌نماید حساسیت کمتر آنها نسبت به‌وجود خطا در ورودی‌ها است. علت این امر پردازش گسترده اطلاعات توزیعی می‌باشد (۲).

در این سیستم فعالیت‌های پیچیده با ساختاری به‌شدت موازی انجام می‌شود و به جای اینکه تمام بار فعالیت بر دوش یک واحد محاسباتی سریع قرار گیرد، تعداد زیادی واحدهای محاسباتی ساده به‌صورت مشترک انجام آن را برعهده دارند. این تقسیم کار، پیامد مثبت دیگری نیز در پی دارد و آن این است که چون تعداد زیادی نرون در یک زمان درگیر فعالیت هستند، سهم هر یک از نرون‌ها چندان دارای اهمیت نیست. بنابراین وجود خطا در یکی از آنها و نتیجه آن تأثیر چندانی برروی سایر واحدهای محاسباتی نخواهد داشت (۱۵). به‌منظور پیش‌بینی، مدل‌های پس انتشار خطا BPNN ( Back-Propagation Neural Network) شامل یک لایه ورودی، تعدادی لایه میانی و یک لایه خروجی هستند که تعداد نرون در هر لایه مخفی از طریق سعی و خطا تعیین می‌گردد. نرون‌ها برای محاسبه خروجی خود، ورودی دریافتی را از یک تابع آستانه عبور می‌دهند. این توابع به انواع مختلف نظیر توابع باینری، سیگموئیدی، تانژانت هیپربولیک، خطی و گوسی تقسیم می‌شوند. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی همانند شبکه پرسپترون چندلایه، MLP، شبکه تابع پایه شعاعی RBF، شبکه Hopfield و ... وجود دارند که با توجه به کاربرد گسترده شبکه پرسپترون چندلایه در مهندسی آب در پژوهش حاضر نیز از این مدل استفاده شده است.

در این مقاله به‌منظور تخمین دبی رسوب رودخانه فخرآباد از داده‌های دبی رسوب و دبی جریان متناظر، دبی متوسط جریان روز قبل واقعه، متوسط بارش روز واقعه و متوسط بارش روز قبل واقعه حوضه فخرآباد به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده گردید. پارامترهای دبی جریان در مواقع نمونه‌برداری رسوب بین سال‌های ۱۳۶۸- ۱۳۹۰ به‌عنوان ورودی و پارامتر دبی رسوب متناظر به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. برای آموزش شبکه عصبی ابتدا ۸۵ درصد از داده‌ها که معرف تمامی شرایط ممکن باشد انتخاب شده و ۱۵ درصد آن جهت آزمون

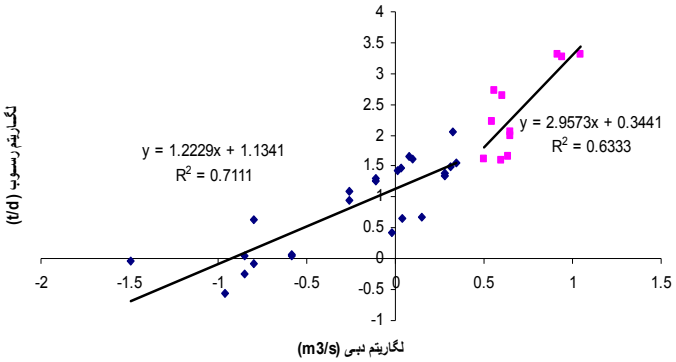
عملکرد شبکه تحت آموزش به‌کار برده شد. نکته مهم در انتخاب داده‌های آزمون آن است که گستره وسیع از انواع داده‌ها را در بر می‌گیرد. به این منظور در گزینش داده‌های آزمون سعی شده اولاً مقادیر حداکثر و حداقل را در برنگیرد و ضمناً سعی شده سری داده‌های آزمون و آموزش به لحاظ پارامترهای میانگین و انحراف معیار به هم نزدیک باشند. قبل از آموزش شبکه، نرمال کردن داده‌ها از مهم‌ترین نکات به‌شمار می‌آید. چرا که اصولاً وارد کردن داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای جلوگیری از بروز چنین شرایطی و همچنین به لحاظ یکسان کردن ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل نرمال‌سازی از طریق لگاریتم‌گیری از داده‌ها صورت پذیرفت. به این منظور از ۴۸ داده استفاده شده که ۳۸ نمونه برای آموزش و ۱۰ نمونه برای آزمون شبکه بوده، در لایه مخفی از تعداد نرون‌های متفاوتی استفاده شده و تعداد بهینه آن برای به حداقل رساندن خطا تعیین گردیده است. در ابتدا با تعداد نرون کمتری آموزش شبکه را آغاز کرده و به تدریج تعداد نرون‌ها افزایش داده می‌شود. این افزایش تا زمانی ادامه می‌یابد که تغییری در وضعیت شبکه حاصل نشود. البته می‌توان تعداد تکرار را نیز تا حدی که مقدار خطا ثابت می‌گردد، افزایش داد.

لازم به‌ذکر است که به‌منظور آزمون روش‌های مختلف در شرایط مشابه همان داده‌هایی که به‌منظور تست در روش شبکه عصبی انتخاب شده بود بدون اینکه در ابتدا به مدل‌های رگرسیونی وارد شود، جهت آزمون این مدل‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفت.

## سنجه رسوب

منحنی سنجه رسوب منحنی است که بین پارامترهای دبی آب و دبی رسوب رسم می‌شود و یکی از راه‌های برآورد رسوبات معلق است. سنجه رسوب در واقع رابطه بین دبی آب و دبی رسوب می‌باشد. در مواقعی که فقط دبی آب موجود است می‌توانیم دبی رسوب را پیش‌بینی کنیم. این معادله در کاغذ لگاریتمی رسم می‌شود و معادله خط آن به‌صورت توانی می‌باشد. در این معادله پس از به‌دست آوردن معادله خط منحنی سنجه رسوب، اگر فقط داده‌های دبی آن موجود باشد معادله قرار می‌دهیم و بدین‌ترتیب می‌توان مقدار رسوب را به‌دست آورد. در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری کشور دستگاه‌های خودکاری که بتوان به‌طور همزمان دبی آب و دبی رسوب را برداشت کند وجود ندارد معمولاً از منحنی سنجه رسوب استفاده می‌کنند. از دلایل دیگر استفاده از این روش می‌تواند آن باشد که معمولاً در مواقع سیلاب اندازه‌گیری دبی رسوب کار دشواری است. به‌علت عدم وجود داده‌های غلظت رسوب پیوسته و تقریباً مداوم، هیدرولوژیست‌ها از منحنی‌های سنجه (انتقال رسوب) برای تخمین و یا پیش‌بینی غلظت رسوب معلق با استفاده از محاسبه داده‌های دبی جریان استفاده می‌کنند (۱۳). در این تحقیق به بررسی ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب که جزء برآوردگرهای رگرسیونی‌اند، پرداخته می‌شود. برآورد کننده‌های رگرسیونی (منحنی‌های سنجه) در اغلب موارد به‌صورت لگاریتمی به کار برده می‌شوند زیرا توزیع مناسب غلظت و جریان توزیع لوگ نرمال دو متغیره می‌باشد. بنابراین از جمله روش‌های متداول در تخمین دبی بار رسوب معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری، ایجاد ارتباطی بین داده‌های دبی رسوب با داده‌های دبی متناظر آنها می‌باشد که از برازش منحنی بین مقادیر دبی جریان و رسوب معلق متناظر آن به‌دست می‌آید. البته در این تحقیق جهت برقراری شرایط مشابه روش‌های دیگر در مرحله نخست از متغیرهای مستقل مذکور در روش شبکه عصبی استفاه گردید. پس از تجزیه عاملی از روش Stepwise تنها متغیرهای دبی متناظر و دبی متوسط روز قبل به‌عنوان متغیرهای تأثیر گذار انتخاب گردید. همچنین به‌منظور افزایش دقت برآورد رسوب به روش منحنی سنجه، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که یکی از بهترین آنها دسته‌بندی داده‌ها به‌صورت‌های مختلف می‌باشد. دسته‌بندی داده‌ها می‌تواند به‌صورت دسته‌بندی سالانه، فصلی، ماهانه، حد وسط دسته‌ها، دبی کلاسه، دوره مشابه هیدرولوژیکی، دوره کم آبی و پرآبی مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیق حاضر در گام نخست از روش منحنی سنجه چند




**شکل (۲) منحنی سنجه دو خطی**

خطی، حد وسط دسته‌ها بدون ضریب اصلاحی و در گام بعدی معادله حد وسط دسته ها با ضرائب اصلاحی تلفیق گردید و به‌طور کلی پنج روش سنجه رسوب مورد بررسی و آزمون قرار گرفت.

## منحنی سنجه چندخطی

براساس توصیه اداره احیای اراضی (USBR) بر مبنای دسته‌بندی گذر حجمی‌رودخانه‌ها و چنانچه وضعیت پخشیدگی داده‌ها اقتضا کند به جای یک خط رگرسیون می‌توان دو یا چند خط از میان داده‌های اندازه‌گیری شده عبور داد (شکل ۲). خط بهترین برازش نیز بر مبنای روش حداقل مربعات می‌باشد یعنی از دو رابطه رگرسیونی یا بیشتر برای محاسبه بار معلق دراز مدت با توجه به چگونگی کاربردهای مختلف گذر حجمی استفاده می‌شود خطوط برازش داده شده بایستی از ضریب همبستگی قابل قبولی برخوردار باشند (۱۱).

## منحنی سنجه حدوسط دسته‌ها

معمولاً بیشتر اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب در رودخانه‌ها مربوط به حالت‌های آرام رودخانه و شرایط دبی پائین می‌باشد و در شرایط طغیان و مواقع سیلابی نمونه‌برداری کمتر صورت می‌گیرد. جانسن (۲۳) روشی را در نظر گرفت که به دبی‌های بالا ارزش بیشتری داده شود که در این روش دبی‌های جریان با یک نمو معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته دبی رسوب متوسط اندازه‌گیری شده همان دسته تعیین می‌شود و نهایتاً منحنی سنجه رسوب با استفاده از آنها به‌دست می‌آید.

## اریب منحنی سنجه

اریب یا انحراف موقعی پیش می‌آید که مقدار باقیمانده‌ها، یعنی اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر محاسباتی، توزیع نرمالی نداشته باشد و مقدار آن بیشتر از صفر شود (۲۵). نتایج تحقیقات نشان داده است که این اریب در بیشتر مواقع منجر به کم تخمینی مقدار رسوب انتقالی دوره‌های طولانی مدت می‌شود با توجه به اینکه هدف اصلی از توسعه روابط دبی رسوب افزایش دقت آنها در برآورد رسوب جریان‌های سیلابی است، لذا بایستی مشکل کم تخمینی را به‌نحو مطلوبی کاهش داد (۱).

در کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب دو نوع اریب به مدل رگرسیون خطی وارد می‌شود. اریب نوع اول مربوط به نوع روشی است که برای به‌دست آوردن معادله رگرسیون به‌کار می‌رود و اریب نوع دوم به‌علت تغییر حالت از لگاریتمی به حالت طبیعی ناشی می‌گردد. اریب نوع اول را می‌توان تا حدودی با کاربرد روش مناسب مثل حداقل مربعات که تا حدودی نااریب می‌باشد، کاهش داد ولی در مورد اریب نوع دوم بایستی یک سری تصحیحات مثل اضافه کردن متغیرهای مستقل اضافی به معادله انجام داد (۱۲). به‌طور کلی فاکتورهای اصلاحی خود را به دو شکل ضریب افزاینده و ضریب کاهنده نشان می‌دهند. با

توجه به اینکه کم‌تخمینی مهمترین مشکل معادله سنجه رسوب است، اکثر محققین نیز در فکر ارائه و توسعه فاکتورهای اصلاحی افزاینده بزرگتر از عدد واحد بوده‌اند (۲۸).

### ضریب اصلاحی FAO

جونز و همکاران به‌جای استفاده از معادله توانی سنجه رسوب که از نقطه های با مختصات log Qs و log Qw عبور می‌کند از معادله خطی موازی که از میانگین نقاط Qw و Qs متناظر با آن می‌گذرد استفاده می‌کنند (۲۴). این روش به نام روش فائو مطرح شده است و در عمل به‌عنوان ضریبی محاسبه شده و در منحنی سنجه رسوب یک خطی اعمال می‌گردد. سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای تعدیل ارقام و نزدیک کردن مقادیر برآوردی به مقادیر α مشاهداتی برای مناطق خشک و نیمه خشک رابطه زیر را ارائه داده است. در روش فائو ضریب معادله سنجه رسوب جایگزین ضریب a می‌شود.

$$\alpha = \frac{\overline{Qs}}{\overline{Q}_w^b} \qquad (۱)$$

$$Qs = \alpha Q_w^b \qquad (۲)$$

در روابط فوق Qs میانگین بار رسوبی نمونه های مشاهده‌ای (تن در روز) و $\overline{Q}_w^b$ میانگین جریان آب رودخانه در هنگام نمونه‌برداری (مترمکعب بر ثانیه) است.

### فاکتور اصلاحی QMLE

روش تخمینگر شبه بیشینه درست نمایی برای اصلاح اثر تبدیل لگاریتمی با فرض توزیع نرمال خطاهای باقیمانده به‌کار گرفته شده است و بیشتر در مورد اریب منفی ذاتی منحنی سنجه به‌کار برده می‌شود. این روش از یک ضریب تصحیح بر اساس رابطه زیر استفاده می‌کند که به روش پارامتری $CF_1$ نیز گزارش شده است (۱۸).

$$CF_{QMLE} = e^{\left(۲/۵۶۱s^۲\right)} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) e تابع نمایی (برابر ۲/۷۱۸) و $S^۲$ اشتباه استاندارد معادله رگرسیون در لگاریتم با مبنای ۱۰ که از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$S^۲ = \frac{\Sigma(\log co - \log ce)^۲}{n - ۲} \qquad (۴)$$

در رابطه(۴) co غلظت رسوب مشاهده‌ای (تن در روز)، ce غلظت رسوب برآوردی (تن در روز) و n تعداد نمونه‌های مشاهده‌ای است (۲۸).

### فاکتور اصلاحی Smearing

دون ضریب Smearing را ارائه داد که به ضریب اصلاحی غیرپارامتری $CF_۲$ نیز معروف است. این ضریب با رد توزیع نرمال باقیمانده خطاها (εi) به شکل زیر ارائه شده است (۳۰).

$$CF_{Smearing} = \frac{۱}{n}\sum_{i=۱}^{n} ۱۰^{\varepsilon i} \qquad (۵)$$

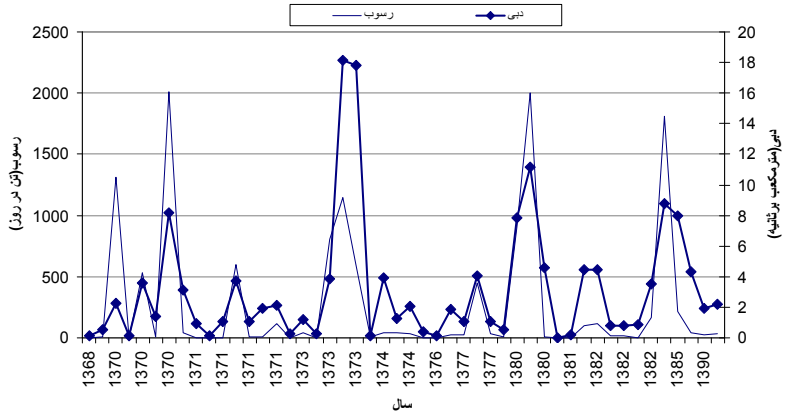
$$\varepsilon i = \log(Co) - \log(Ce)\varepsilon \qquad (۶)$$

در این روابط εi خطای برآورد و بقیه فاکتورها مشابه روش قبل هستند (۳۰).

## نتایج

در تحقیق حاضر به‌منظور پیش‌بینی بار معلق روزانه، صرفاً از داده‌های نرمال شده دبی جریان روز قبل از واقعه و دبی جریان متناظر با رسوب به‌عنوان متغیرهای مستقل و دبی رسوب متناظر با آن به‌صورت متغیر وابسته در معادله سنجه چند خطی و دسته‌بندی شده استفاده گردید. همچنین از داده‌های دبی و رسوب متناظر، دبی جریان روز قبل از واقعه و متوسط بارش همان روز و بارش روز قبل جهت آموزش شبکه‌ها در مدل شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به‌ذکر است که تعداد ۱۰ داده که قبل از ورود به مدل‌های مختلف به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند جهت تست روش‌های مختلف از ابتدا کنار گذاشته شده و درنهایت کارایی مدل‌های مختلف براساس این داده‌ها سنجیده شد. شکل (۳) نمودار نوسانات دبی جریان و دبی رسوب معلق در دوره زمانی یاد شده را نشان می‌دهد.

معادله رگرسیونی حاصل از دسته‌بندی داده‌ها در روش




**شکل ۳. مقادیر مشاهداتی دبی جریان و دبی رسوب متناظر با آن در دوره ۲۳ ساله**

**جدول ۱. مقادیر متوسط رسوب معلق برآوردی (تن در روز)**

| ANN | Mc-Semering | Mc-Fao | Mc-Qmle | Mc | Multiline | Observed |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۶۷/۳۷ | ۲/۹۴ | ۱۷/۸۱ | ۱/۳۳ | ۳/۰۰ | ۴/۱۰ | ۳/۳۰ |
| ۴۴۷/۹۰ | ۱۶۰/۶۲ | ۷۴۴/۶۱ | ۷۲/۵۷ | ۱۶۴/۱۸ | ۱۰۱/۲۸ | ۵۹۷/۸۰ |
| ۸۷۸/۲۱ | ۳۵۹/۲۸ | ۸۰۷/۸۴ | ۱۶۲/۳۲ | ۳۶۷/۲۵ | ۱۰۱/۰۷ | ۸۰۶/۲۳ |
| ۱۷۹/۳۱ | ۵/۷۴ | ۵۸/۸۶ | ۲/۶۰ | ۵/۸۷ | ۱۰/۴۹ | ۱/۳۱ |
| ۱۷۹/۸۹ | ۱/۴۳ | ۳/۸۱ | ۰/۶۴ | ۱/۴۶ | ۱/۲۲ | ۲/۳۵ |
| ۲۸۷/۰۲ | ۸/۴۲ | ۸۵/۷۹ | ۳/۸۰ | ۸/۶۱ | ۱۴/۱۶ | ۲/۶۳ |
| ۳۴۲/۷۳ | ۲۹۰/۴۹ | ۱۰۷۳/۷۷ | ۱۳۱/۲۴ | ۲۹۶/۹۳ | ۱۸۷/۴۲ | ۱۲/۲۷ |
| ۲۸۰/۲۱ | ۳۸/۱۷ | ۲۴۳/۷۸ | ۱۷/۲۴ | ۳۹/۰۲ | ۳۲/۶۲ | ۷/۲۵ |
| ۲۷۱/۰۳ | ۱۱۱۱/۹۸ | ۲۷۶۲/۸۵ | ۵۰۲/۳۷ | ۱۱۳۶/۶۶ | ۹۸۷/۵۳ | ۲۱۷/۶۰ |
| ۱۰۷۱/۳۷ | ۳۰۵۶/۰۳ | ۲۷۱۲/۳۳ | ۱۳۸۰/۶۶ | ۳۱۲۳/۸۴ | ۷۸۶/۳۴ | ۹۰۳/۸۹ |

سنجه حد وسط دسته‌ها در این تحقیق به‌صورت لگاریتمی بوده و مطابق رابطه (۷) می‌باشد.

$$Qs = ۱/۲x_۱ + ۳/۱۲x_۲ - ۰/۹۷ \quad (۷)$$

که در رابطه ۷: $x_۱$ مقادیرلگاریتمی دبی جریان روز قبل و $x_۲$ مقادیر لگاریتمی دبی جریان متناظر Qs مقادیر لگاریتمی دبی رسوب می‌باشد.

پس از محاسبه ضرائب اصلاحی از روابط (۲، ۳ و ۵) این ضرائب در معادله حد وسط دسته‌ها (رابطه ۷) به شکل زیر اعمال گردید و به‌طور کلی پنج مدل سنجه مجزا در این تحقیق تفکیک شده و نتایج آنها با هم مقایسه گردید.

$$Qs = CF.\ aQ_w{}^b \quad (۸)$$

متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده از روش‌های مختلف سنجه رسوب با مقادیر شبیه‌سازی شده از روش شبکه عصبی مصنوعی و همچنین با متوسط مقادیر دبی رسوب معلق مشاهده‌ای داده‌های تست در جدول (۱) مورد مقایسه قرار گرفته است.

برای ارزیابی میزان کارائی هر یک از معادلات از یک سری معیارها استفاده می‌شود که بر اساس این معیارها می‌توان معادله بهینه را تعیین کرد. در این تحقیق چهار معیار ارزیابی به‌کار گرفته شده است که شامل آزمون‌های مجذور میانگین مربع خطاها (Rmse)، ضریب کارایی ($R^۲$)، شاخص صحت (P) و آزمون خطا (ei) می‌باشد.

**جدول ۲. نتایج معیارهای ارزیابی روش‌های استفاده شده در حوضه مورد مطالعه**

| Methods | Rmse | $R^2$ | ME |
|---|---|---|---|
| Multiline | ۳۷۱/۷۴ | ۰/۱۸ | -۰/۱۳ |
| Mediocrity of classes | ۷۸۹/۶۶ | ۰/۴۴ | -۴/۱۱ |
| MC-Qmle | ۳۱۸/۳۰ | ۰/۴۴ | ۰/۱۷ |
| MC-Fao | ۱۰۴۷/۰۷ | ۰/۴۴ | -۷/۹۹ |
| MC-Smearing | ۷۶۸/۱۸ | ۰/۴۴ | -۳/۸۴ |
| ANN | ۲۰۳/۲۹ | ۰/۸۶ | ۰/۶۶ |

$$Rmse = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(ssc_o - ssc_e)^2}{N}\right]^{0.5} \quad (۹)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(ssce - ssco)^2}{\sum ssce^2} \quad (۱۰)$$

ضریب ناش و ساتکلیف از منفی بی نهایت تا یک تغییر می کند و هر چه به یک نزدیکتر باشد برآورد دقیق‌تر است.

$$ME = 1 - [\frac{\sum_{i=1}^{n}(SSCo - SSCe)^2}{\sum_{i=1}^{n}(SSCo - SSCm)^2}] \quad (۱۱)$$

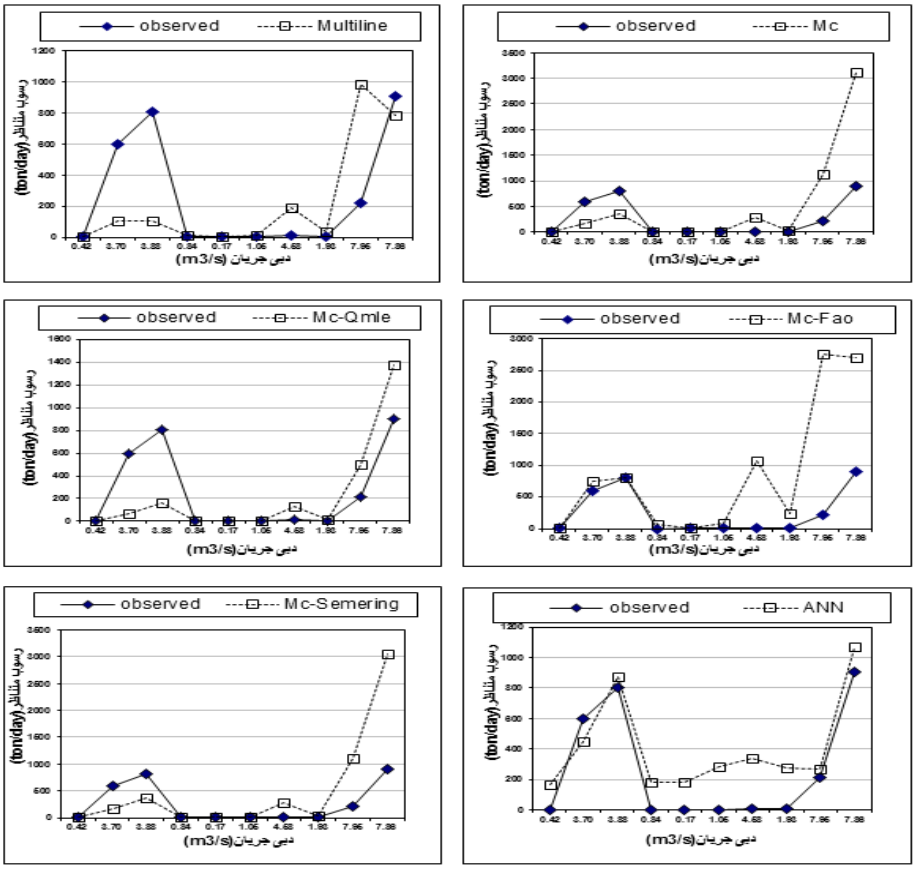
که در این روابط SSCO غلظت رسوب مشاهده‌ای (تن در روز)، SSCe غلظت رسوب برآوردی (تن در روز) و N تعداد نمونه‌های مشاهده‌ای و SSCm متوسط مقادیر مشاهده‌ای رسوب می‌باشد. در شکل (۳) برآوردهای روش‌های مختلف در بازه داده‌های تست را با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری مورد مقایسه قرار داده است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که با به‌کارگیری شبکه عصبی از نوع پرسپترون چندلایه و تابع تحریک از نوع تانژانت سیگموید، می‌توان با دقت نسبتاً بالایی میزان دبی بار معلق رسوب را پیش‌بینی نمود و دقت نتایج به‌دست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی به‌مراتب از دقت روش‌های منحنی سنجه بالاتر است (جدول ۲).

همچنین نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی مصنوعی در برآورد مقادیر دبی رسوب حالت بیش تخمینی را دارد و دقت برآوردها در این روش برای دبی‌های بالاتر بهتر می‌باشد (شکل ۴). که با نتایج دهقانی و همکاران مطابقت دارد (۴).

مقایسه نتایج روش‌های آماری و نتایج شبکه‌های عصبی جدول(۲) خطای کمتر مدل‌های شبکه عصبی را در برآورد رسوب لحظه‌ای روزانه را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری و بحث

اجرای برنامه‌های حفاظت خاک، محاسبه و طراحی حجم سدها، ساخت پل‌ها و تاسیسات آبی و آبیاری و نیز فرسایش خاک و اثرات نامطلوب ناشی از آن و نقش مخرب رسوبات ایجاب می‌کند که میزان تولید رسوب سالانه در هر یک از حوضه‌های آبخیز ارزیابی و محاسبه گردد. در اکثر حوضه‌های آبخیز کشور ما به‌ویژه در مناطق خشک به‌دلیل عدم وجود و یا کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری و در نتیجه عدم وجود آمار مورد لزوم، از روش‌های تخمینی برای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب استفاده می‌شود. پر واضح است که کارایی این روش‌ها وابستگی تنگاتنگی به صحت داده‌های برداشت شده دارد. در این راستا ابتدا قبل از هر آنالیز آماری بایستی به صحت سنجی داده‌های رسوب برداشت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری این مناطق پرداخت. لذا از دلائل عمده عدم کارایی مناسب روش‌های مختلف برآورد رسوب در مناطق خشک را می‌توان از عدم قطعیت داده‌های رسوب دانست. همواره تصور بر این است که تجهیزات اندازه‌گیری با ریزنگری بالا قابل اعتماد می باشند ولی باید توجه داشت که در هر سیستم اندازه‌گیری حتی دقیق‌ترین آنها همواره خطا و همچنین شک و تردید در نتایج اندازه گیری وجود دارد و رسیدن به عدد واقعی




**شکل ۴. مقادیر رسوب معلق برآوردی از روش‌های مختلف**

میسر نیست، این شک و تردید را عدم قطعیت می‌نامند که در خصوص کیفیت اندازه‌گیری اطلاعاتی به‌دست می‌دهد. در تحقیق حاضر نیز با بررسی صحت داده‌ها تعداد سه عدد از داده‌ها در دوره آماری مذکور به‌دلیل اشتباه در ثبت داده‌های اولیه، از بین داده‌های مربوطه حذف گردیدند تا بخشی از این عدم قطعیت مرتفع گردد.

علت تفاوت بین عملکرد بهتر شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با روش‌های آماری را می‌توان در قابلیت تخمین و پیش‌بینی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تقریب غیر خطی با حجم کم داده‌ها جستجو نمود. این در حالی است که عملکرد و دقت روش‌های رگرسیونی به‌شدت از حجم نمونه تبعیت می‌کند و حجم کم نمونه‌ها می‌تواند عامل محدودیت مدل‌های آماری گردد. لیکن در مدل‌های طراحی شده شبکه عصبی مصنوعی کمی تعداد نمونه‌ها محدودیت چشمگیری ایجاد نکرده است.

در حال حاضر از روش منحنی سنجه رسوب به‌علت سادگی و نیاز به تعداد نمونه کمتر، به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. روش معمول برآورد رسوب معلق منحنی تداوم جریان منحنی سنجه می‌باشد، اما طبق تحقیقات مشخص شده که این روش مقدار بار معلق را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند، به همین علت محققین و سازمان‌های مختلف، روش‌ها و ضرایب اصلاحی متفاوتی را پیشنهاد کرده‌اند. محققی عامل اصلی برآورد کمتر را تعداد زیاد نمونه‌های رسوبی در دبی‌های پایه ذکر کرده و روش همبستگی حد وسط دسته ها را پیشنهاد کرده است که در این روش ارزش بیشتری به دبی‌های بالا داده می‌شود و در ضمن چون در این روش تعداد نمونه‌ها به حداقل رسیده است، خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی که به پراکنش و تعداد نقاط بستگی دارد

نیز تا حدود زیادی کاهش می‌یابد (۲۳). نتایج تحقیق حاضر حاکی از بیش تخمینی نسبی در داده‌های دبی جریان بالا و کم تخمینی در دبی‌های خیلی پایین در روش‌های سنجه رسوب می‌باشد و نشان از ارزش‌دهی بیشتر این روش به دبی‌های بالا می‌باشد. حال آنکه در این تحقیق نقصان در روش سنجه حد وسط دسته‌ها با به‌کار بردن ضرائب اصلاحی تغییر چندانی نداشت (جدول ۲) که شاید بتوان آن را به نوع رژیم جریان حاصل از باران یا ذوب برف و همچنین رابطه پیچیده جریان و رسوب در مناطق خشک نسبت داد.

در عین حال با بررسی و مطابقت روش‌های مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۳) در می‌یابیم که هیچکدام از روش‌های رگرسیونی هم‌روند با مقادیر مشاهداتی نبوده و در دبی‌های بالا برآوردهایی خیلی بالاتر از مقادیر واقعی را دارند. لذا به دنبال یافته‌های تحقیق حاضر نتیجه می‌گیریم که در شبیه‌سازی داده‌های رسوب برای دوره‌های طولانی مدت در مناطق خشک به‌دلیل رابطه پیچیده جریان و رسوب آن، لازم است تا جانب احتیاط را رعایت نمود. حتی در استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی که در این تحقیق به‌عنوان روش بهینه در این مناطق شناخته شده است بهتر است که دوره شبیه‌سازی کوتاه‌تر و متناسب با دوره داده‌های مشاهداتی منطقه باشد تا برآوردهایی نزدیک به واقعیت داشته باشیم. لذا به‌دلیل واریانس قابل توجه داده‌های هیدرومتری و رسوب سنجی در رودخانه‌های فصلی مناطق خشک و همچنین پیچیده‌تر بودن فرآیندهای هیدرولوژیک در این مناطق، نیاز به مدل‌سازی قوی‌تر و محکم‌تر و دقیق‌تر فرآیندهای رواناب و رسوب می‌باشد.

## منابع مورد استفاده


۱. الوانکار، ر.، ف. نظری. ۱۳۸۴. ارزیابی برآورد رسوب از روش‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز ایران مطالعه موردی: حوضه آبریز میناب. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۶۶۰-۶۵۳.

۲. البرزی، م.، ۱۳۸۶. *آشنائی با شبکه های عصبی*، ترجمه کتاب آر بیل و تی جکسون. چاپ سوم، فصل دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران. ۱۳۸ص.

۳. جلالی، م.، ک. سلیمانی. ح. مجددی و ا. امیدوار. ۱۳۸۶. برآورد بار معلق رسوب ایستگاه هیدرومتری آبلو- نکارود با استفاده از منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، کرج، ص ۱۱۲۴-۱۱۱۵.

۴. دهقانی، ا.، م. زنگانه، ا. مساعدی، ن. کوهستانی. ۱۳۸۸. مقایسه تخمین بار معلق به دو روش منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی (رودخانه دوغ استان گلستان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد شانزدهم، ویژه نامه ۱- الف.

۵. ذرتی پور، ا. ۱۳۸۶. مقایسه چند روش آماری برآورد بار معلق رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه طالقان). پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران.

۶. علیزاده، ا. ۱۳۷۶. *اصول هیدرولوژی کاربردی*. انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم، چاپ دوم، ص ۶۲۰.

۷. فیض نیا، س.، ح. محمد عسگری و م. معظمی. ۱۳۸۶. بررسی کارایی روش شبکه عصبی مصنوعی در تخمین رسوب معلق روزانه (حوضه آبخیز زرد رامهرمز، استان خوزستان)، فصلنامه منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۶۰(۴): ۱۲۱۰-۱۱۹۹.

۸. مساعدی، ا.، س. هاشمی نجفی. ۱۳۸۴. مقایسه کارایی شبکه عصبی مصنوعی در تهیه منحنی سنجه رسوب، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب. مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور. تهران. ۵ صفحه.

۹. میرمعینی، آ. ۱۳۸۶. بررسی صحت و دقت منحنی سنجه رسوب چند متغیره در برآورد بار رسوب (رودخانه گرگانرود- قزاقلی).

پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه گرگان، ۱۶۰ص.

۱۰.محمدی، ی.، پ. فتحی و ع. نجفی نژاد و ن. نورا. ۱۳۸۷. تخمین دبی متوسط ماهانه با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: آبخیز قشلاق سنندج)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۵(۴): ۲۶۸-۲۵۸.

۱۱.میر ابوالقاسمی، ه و س. مرید. ۱۳۷۴. بررسی روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه مجله آب و توسعه شماره ۱۰.

۱۲.وروانی، ج.، ع. نجفی نژاد و آ. میرمعینی کرهرودی. ۱۳۸۷. اصلاح منحنی سنجه رسوب با استفاده از روش حداقل واریانس ناااریب. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۵(۱): ۱۶۱-۱۵۰.

۱۳.یوسفوند، ف.، ح. گلمایی. ض. احمدی و ع. وحیدی مجد. ۱۳۸۳. مقایسه روش‌های مختلف برآورد بار معلق رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه قره سو،کرمانشاه). پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر صفحات۲(۴): ۶۵-۵۲.

۱۴.یوسفی، م.، ف. برزگر. ۱۳۹۴. تعیین مناسب‌ترین روش منحنی سنجه و مقایسهٔ آن با شبکهٔ عصبی مصنوعی به‌منظور برآورد رسوبات معلق (مطالعهٔ موردی: استان لرستان). نشریه مرتع و آبخیزداری ۶۸(۲): ۴۲۶-۴۱۳.

15. Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. J. Hydrol. 234: 228-248.
16. Agarwal, A., S. K. Mishra, R. Sobha and J. K. Singh. 2006.Simulation of runoff and sediment yield using artificial neural networks. J. Biosystems Engineering. 94: 597-613.
17. Arabkhedri, M. 2005. Investigation of suspended load in Iran's watershed basin. Iranian J. Water Resour. Res. 1: 2: 51-60.
18. Arabkhedri, M., Sh. Hakimkhani, J. Varvani. 2004. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric Stations), J. of Agri. Sci. & Natur. Resour.13: 123-131.
19. Cigizoglu, H. K and M. Alp. 2006.Generalized regression neural network in modeling river sediment yield. J. Advance in Engineering Software. 37: 63-68.
20. Crowder, D. W., M. Demissie and M. Markus. 2007 The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load–discharge relationships. J. Hydrol. 336: 250-268.
21. Cigizoglu, H. K. 2002. Suspended sediment estimation for rivers using artificial neural networks and sediment rating curves. Turkish J. Eng. Env. Sci. 26: 27-36.
22. Hicks, D. M., B. Gomez & N. A. Trustrum. 2000. Erosion Thresholds and Suspended Sediment Yields, Waipaoa River Basin, New Zealand, Water Resour. Res. 36(4): 1129-1142.
23. Jansson, M. B. 1996. Estimating sediment rating curves of the Reventazon River at Palomo using logged mean loads within discharge classes, J. of Hydrology, 183(4): 227-241.
24. Jones, K. R., O. Berney, D. P. Carr and E. C. Barret. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development, FAO Irrigation and Drainage Paper, 37(1): 244-271.
25. Kao, Sh. J., T. Y. Lee and J. D. Milliman. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. TAO. 16:(3):653-675.
26. McBean, E. A. and S. Al-Nassri. 1988. Uncertainty in suspended sediment transport curves. J. Hydr. Eng. ASCE 114(1): 63-74.
27. Mazidi, A. 2007. Analysis of short-term rainfall and its impact on flooding in Fakhrabad basin, Research Initiative of Yazd University.
28. Ndomba, P. M., F. W. Mtalo and A. Killingtveit. 2008. Developing an excellent sediment rating curve from one hydrological year sampling programme data: approach. Journal of Urban and Environmental, Engineering, 2(1): 21-27.
29. Olive, L. J and W. A. Reiger. 1992. Stream Suspended Sediment Transport Monitoring – Why, How and What IS Being Measured? IAHS Public, No: 210
30. Syvitski, J. P., M. D. Morehead, D. B. Bahr & T. Mulder. 2000. Estimating Fluvial Sediment Transport: the Rating Curve Parameters, 36(9): 2747-2760.
31. Walling, D. E. 1994. Measuring Sediment Yield From River Basins, in: R. Lal (Edd.), Soil Erosion Research Methods, Soil and Water Conservation Society. Pub 1,2nd edition, 39- 83.
32. Zhou, Y., X. X. Lu, Y. Huang and Y. M. Zhu.2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the upper Yangtze catchment, China.Geomorphology 84: 111-125.

J. Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)
Vol. 21, No. 1, Spring 2017, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran.

# Determination of the Optimal Method to Estimate the Suspended Sediment Load in Arid Regions (Case Study:Fakhrabad basin in Mehriz -Yazd)

**M. Hayatzadeh[1], M. R. Ekhtesasi[2], H. Malekinezhad[2], A. Fathzadeh[1] and H. R. Azimzadeh[3]**

(Received: Feb. 4-2016 ; Accepted: July 27-2016)

**Abstract**

Soil erosion is undoubtedly one of the most important problems in natural areas of Iran and has destructive effects on different ecosystems. Considering that calculation of the sediment rate in sediment stations and direct measurements of erosion process is costly and difficult, it is critical to find ways to accurately estimate the amount of sediment yield in catchments especially in arid and hyper arid areas because of their high ecological sensitivity. One of the most commonly used methods in these areas is the sediment rating regression method. Therefore, in this study sediment observed data for 48 events (the corresponding discharge and sediment) in a 23-year period from Fkhrabad basin (Mehriz) were compared to the estimated data obtained from Multi-line rating method, extent middle class, middle class rating curve with correction factor QMLE, SMEARING correction coefficient FAO and Artificial Neural networks (ANNs). Finally, the accuracy of these methods were assessed using different evaluation criteria such as Root Mean Square Error (RMSE), coefficient of determination (R2) and the standard Nash (ME). Results showed that ANN outperformed the other methods with the RMSE, R2 and ME of 203.3, 0.86 and 0.66, respectively. The results suggest that these methods should be used cautiously in estimating the suspended sediment load in arid and hyper arid regions due to the nature of the observed data and temporal and seasonal flow systems in these regions. It was also indicated that the artificial neural network models have higher flexibility than other methods which makes them to be useful tools for modeling in poor data conditions.

**Keywords**: Artificial neural Networks, Correction coefficients, Modeling, Sediment rating curve

1. Dept. of Watershed Management, Faculty of Agric. and Natural Resour., Ardakan Univ., Ardakan, Iran.
2. Dept. of Watershed Management, Faculty of Natural Resour. and Desert Studies, Yazd Univ., Yazd, Iran.
3. Dept. of Environmental Sci., Faculty of Natural Resour. and Desert Studies, Yazd Univ., Yazd, Iran.
*: Corresponding Author, Email: mhayatzadeh@gmail.com