

## کارآیی روش‌های مختلف تفکیک داده در افزایش دقت و صحت منحنی سنج رسوب؛ مطالعه موردی بخشی از حوزه آبخیز سفید رود

جبارهادی قورقی<sup>۱</sup>، محمود حبیب نژاد<sup>۲</sup>، قربان وهاب‌زاده<sup>۳</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۰۲

### چکیده

با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های هیدرومتری در کشور و عدم تداوم نمونه‌برداری و اندازه‌گیری رسوب در بسیاری از ایستگاه‌های موجود، از طرفی آمار دقیقی از میزان بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌های کشور در دست نیست و از طرف دیگر با توجه به اختلاف شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی و توپوگرافی در کشور، تهیه و یا واسنجی منحنی سنج رسوب برای مناطق مختلف، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو تحقیق حاضر با هدف تهیه و تدقیق منحنی سنج رسوب معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه‌های تلوار و چم شور در حوضه سفیدرود واقع در استان کردستان انجام شد. برای این منظور ضمن استفاده از معادله سنج رسوب به عنوان معادله مبنا، داده‌ها با دخالت دادن برخی عوامل موثر در انتقال رسوب شامل عوامل هیدرولوژیکی و اقلیمی، تفکیک گردید. سپس داده‌های تفکیک شده در فرآیند مدل‌سازی وارد شده و در نهایت برای انتخاب مدل بهینه ۱۲ شاخص آماری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ایستگاه‌های حسن‌خان و شادی‌آباد روشی که در آن تقسیم‌بندی داده‌ها به صورت سال پر آب، سال کم آب و فصول هیدرواقلیمی انجام گرفته بوده و در ایستگاه دهگلان روشی که در آن تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس فصول هیدرواقلیمی و دسته‌بندی دبی جریان انجام گرفته بود به عنوان روش‌های بهینه انتخاب گردیدند. مدل‌های کلی و بهینه در هر سه ایستگاه مورد بررسی به طور متوسط به ترتیب ۷۳/۳ و ۳۴/۲ درصد رسوب معلق را کمتر از مقدار واقعی برآورد کردند. با استناد به نتایج می‌توان دریافت که تفکیک داده‌ها برای شرایط مختلف بارش و جریان، همگنی لازم را در داده‌ها برای ایجاد منحنی سنج رسوب با دقت و صحت بالاتر ایجاد می‌کند. همچنین نتایج تایید کرد که تأخیر طبیعی ایجاد شده در شرایط بارش و جریان توأم با پیچیدگی‌های اثر دما و پوشش گیاهی موجب می‌شوند که در نظر گرفتن فصول هیدرواقلیمی منطقه اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش دقت و صحت منحنی سنج رسوب نسبت به فصول اصلی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: بار معلق، حوزه آبخیز سفیدرود، فصول هیدرواقلیمی، منحنی سنج رسوب.

<sup>۱۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

<sup>۳</sup> استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس

## مقدمه

رسوبات معلق رودخانه به عنوان مهمترین پیامد فرسایش خاک و انتقال این مواد به آبراهه‌ها محسوب می‌شود. تقریباً تمام اطلاعات درباره تولید رسوب در سطح جهان مربوط به تولید رسوب معلق است (هادلی و همکاران، ۱۹۷۹). غلظت رسوب متغیر بسیار مهمی است که نقش عمده‌ای در ارزیابی کیفیت منابع آب دارد (خانچو و همکاران، ۲۰۱۰). رسوب انتقال یافته توسط رودخانه‌ها به مخازن، ظرفیت ذخیره آن‌ها را کاهش داده و بر کیفیت آب قابل استفاده شده برای نیروگاه‌های برق، آبیاری و کاربردهای صنعتی و خانگی تأثیرگذار است (کومار و رستوگی، ۱۹۸۷). برآورد رسوب معلق حوضه‌های دارای آمار و اطلاعات به آسانی امکان‌پذیر است ولی برای حوضه‌های فاقد آمار، روش‌های دیگری را می‌طلبند (دراپر و اسمیت، ۱۹۸۱). تعداد کم ایستگاه‌های رسوب‌سنجی در کشور و عدم دقت کافی و تعداد کم نمونه‌برداری‌ها جزء مشکلات همیشگی این مطالعات بوده است (صادقی و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین عرب‌خداری (۲۰۰۵) کمبود تحقیقات در زمینه رسوب و فقدان اندازه‌گیری‌های درازمدت از فرسایش مانع دستیابی به اعداد قابل اعتماد در این زمینه می‌داند.

آچیت و اوپلون (۲۰۰۷) در بررسی انتقال رسوب معلق در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک وادی عبدالجزایر، نشان دادند که با استفاده از روابط رگرسیونی مقادیر پیش‌بینی شده، ۲۵-۲۰ درصد بیشتر از مقادیر واقعی بوده است ضمن اینکه برآورد دقیق‌تر مقادیر رسوب از طریق سری‌های زمانی نیاز به دوره‌های طولانی مدت دارد. صادقی و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه تهیه، ارزیابی و تفسیر منحنی‌های سنجه رسوب برای یک منطقه جنگل‌کاری شده در ژاپن به بررسی اختلاف میان روش‌های تابع تحلیل خطی و غیرخطی منحنی سنجه رسوب به منظور بررسی و هماهنگی و ارتباط مقدار دبی انتقال یافته و مقدار رسوب معلق بر اساس داده‌های دو ساله نشان دادند که معادله رگرسیون توانی سنجه رسوب (منحنی سنجه) به وسیله تبدیل ریشه چهارم داده‌های جریان دبی و مقدار تجمع رسوب به نسبت طبقه‌بندی مکانی و مقدار داده‌ها به خوبی عمل کرده‌اند و استفاده از این مدل برای برآورد رسوب و جریان دبی رودخانه‌ها در مناطق کوچک موفق ارزیابی نمودند. همچنین نتایج اثبات

کرد که ارتباط بین تجمع رسوب و جریان دبی بستگی و مقدار رواناب تولید شده به عواملی مانند تغییرپذیری رسوب، شرایط فیزیکی منطقه و پراکنش چرخه هیدرولوژیک و خصوصیات خاک منطقه جنگل‌کاری شده بستگی داشته است. عرب‌خداری و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه کاربرد روش نمونه‌برداری خوشه تطبیقی در یک دوره پنج ساله بر اساس داده‌های روزانه برای برآورد مجموع بار رسوب معلق بر روی رودخانه گرگان رود نشان دادند که این روش می‌تواند به عنوان یک روش قابل اعتماد در مقایسه با داده‌های منحنی سنجه رسوب برای برآورد میزان بار رسوب در حوزه‌هایی که با آمار کم و یا ناقص بکار برده شود. همچنین نتایج حاصله از روش نمونه‌برداری خوشه تطبیقی و انتخاب داده‌ها در یک بازه زمانی مشخص با تکرار هفته‌ای دو بار می‌تواند برآورد دقیق‌تری از میزان رسوب به نسبت منحنی‌های سنجه رسوب ارائه دهد. حکیم‌خانی و عرب‌خداری (۲۰۰۶) با استفاده از تحلیل رگرسیونی و در نظر گرفتن ترکیبات مختلف داده‌ها روابطی را برای برآورد تولید رسوب معلق در حوضه دریاچه ارومیه ارائه داد. در این معادلات متغیرهای حاصل ضرب دبی متوسط سالانه و مساحت، مجموع درصد اراضی رو به شمال و غرب و مجموع درصد واحدهای کواترنری و سنگ‌های حساس به فرسایش بیش از ۹۴ درصد تغییرات تولید رسوب معلق را تبیین می‌کنند.

صادقی (۲۰۰۷) در تحقیق خود در حوضه‌های امامه و زرین درخت به این نتیجه رسید که توانایی مفهوم رگرسیون در تهیه دو معادله جداگانه برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده آب‌نگار بوده. ذرتی پور و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی تأثیر طبقه‌بندی رسوب بر بهبود روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها در حوزه آبخیز طالقان به این نتیجه رسیدند که استفاده از کلاسه‌بندی فصلی داده‌های رسوب و تجزیه هیدروگراف خروجی حوزه برای افزایش دقت منحنی سنجه رسوب و برآورد بار معلق رودخانه است. بردستانی و همکاران (۲۰۱۰) بر روی رودخانه شاپور، دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) در رودخانه دوغ استان گلستان، فیض‌نیا و همکاران (۲۰۰۷) حوزه آبخیز زرد رامهرمز، استان خوزستان، به مقایسه روش شبکه عصبی مصنوعی و روش منحنی سنجه رسوب بدون دسته‌بندی داده‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی مصنوعی با

برای مناطق مختلف، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. نکته مهم دیگر ارائه روش‌های جدید تفکیک داده است به نحوی که حتی برای تعداد داده‌های کم امکان کاربرد داشته و منجر به افزایش دقت منحنی‌های سنجه شوند. با توجه به موارد ذکر شده تحقیق حاضر درصدد ارائه روش‌های بهتر تفکیک داده و در نهایت تهیه و تدقیق منحنی سنجه رسوب معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر رودخانه‌های تلوار و چم‌شور در سرشاخه‌های حوضه سفیدرود واقع در استان کردستان انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در سرشاخه‌های حوزه آبخیز سفیدرود در استان کردستان است که شامل هفت ایستگاه فعال در این بخش از حوضه می‌باشد. تعداد سه ایستگاه به دلیل دارا بودن آمار کامل‌تر و عدم مطالعه رسوب در این منطقه مورد مطالعه واقع شد. میانگین ارتفاع، میانگین بارندگی سالانه، میانگین درجه حرارت سالانه و اقلیم در حوزه‌های آبخیز بالادست ایستگاه‌های مورد بررسی به ترتیب ۲۲۸۰ متر، ۵۰۰ میلیمتر، ۹/۷ درجه سانتیگراد و نیمه‌خشک سرد می‌باشد (مطالعات تفصیلی اجرایی حوزه‌های آبخیز مختلف در حوضه سفیدرود، اداره کل منابع طبیعی استان کردستان). مشخصات و موقعیت هر یک از ایستگاه‌ها به شرح جدول (۱) و شکل (۱) می‌باشد.

اطمینان بیشتر می‌تواند نسبت به روش منحنی سنجه بدون دسته‌بندی داده‌ها برای تخمین بار معلق رسوب مورد استفاده قرار گیرد.

برای بهینه‌سازی رابطه دبی آب و دبی رسوب با استفاده از منحنی سنجه حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۴) در سدهای مخزنی کرج و دز، پیری و همکاران (۲۰۰۵)، مساعدی و همکاران (۲۰۰۶) در رودخانه گرگان‌رود گلستان، از تفکیک داده‌ها به روش‌های مختلف استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند مدلی که براساس تمام داده‌های اندازه‌گیری شده و بدون تفکیک داده‌ها در نظر گرفته شده و در آن فقط از یک معادله به عنوان معادله سنجه رسوب استفاده شده است، در بین مدل‌های مورد مطالعه دارای بیشترین میزان خطا در برآورد رسوب معلق است.

جمع‌بندی سوابق تحقیق نشان می‌دهد با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن نمونه‌برداری و اندازه‌گیری رسوب، پژوهشگران زیادی با استفاده از روش‌های مختلف سعی در افزایش دقت روش‌های تخمین رسوب داشته‌اند. در داخل کشور نیز این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا از طرفی حجم رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها بالاست و از طرف دیگر به دلیل تعداد کم ایستگاه‌های هیدرومتری و عدم تداوم آماربرداری در بسیاری از ایستگاه‌های موجود، آمار دقیقی از میزان رسوب در دست نیست. علاوه بر این با توجه به اختلاف شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی و خاک در مناطق مختلف کشور، تهیه و یا واسنجی منحنی سنجه رسوب

جدول (۱): موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت بالادست (کیلومتر)	طول دوره آماری	تعداد سال‌های آماری
دهگلان	تلوار	۴۷°۲۴'۴۰"	۳۵°۱۶'۴۵"	۲۳۸	۱۳۶۳-۱۳۸۶	۲۳
حسن خان	تلوار	۴۷°۴۱'۲۳"	۳۵°۲۶'۱۸"	۲۴۸۱	۱۳۶۵-۱۳۸۶	۲۱
شادی آباد	چم‌شور	۴۷°۴۶'۳۲"	۳۵°۲۸'۴۱"	۱۹۳۷	۱۳۶۷-۱۳۸۶	۱۹

شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی در نقشه، سر شاخه‌ی حوزه آبخیز سفیدرود در استان کردستان

### روش مطالعه

رابطه اصلی مورد استفاده برای تهیه منحنی سنجه رسوب، معادله انتقال رسوب برای کل داده‌ها به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$Q_s = aQ_w^b \quad (1)$$

در این معادله  $Q_s$  دبی رسوب بر حسب تن در روز،  $Q_w$  دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و  $a$  و  $b$  ضرایب منطقه‌ای برای معادله انتقال رسوب می‌باشند (والینگ و وب، ۱۹۸۱). داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های سه ایستگاه هیدرومتری دهگلان، حسن‌خان (رودخانه تلوار) و شادی‌آباد (رودخانه چمشور) با آمار ثبت شده غلظت رسوب و دبی متناظر روزانه ۲۳-۱۹ ساله استفاده شده است. تجزیه و تحلیل داده‌ها، پس از بررسی آزمون نرمالیتی به روش کلموگراف-اسمیرنف، مبتنی بر داده‌های دسته‌بندی شده رسوب با استفاده نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ انجام شد.

با دخالت دادن عوامل موثر دیگر در انتقال رسوب از قبیل وضعیت هیدروگراف جریان (آب پایه و سیلابی) و

همچنین مقدار دبی جریان (دسته‌بندی دبی) و زمان نمونه‌برداری یا اندازه‌گیری دبی (سال، فصل و ماه‌های مختلف)، داده‌ها تفکیک گردید. به این منظور از یک روش کلی، مدل‌های مستقل و روش‌های که از ترکیب مختلف روش‌های مستقل به دست می‌آیند (روش‌های ترکیبی) استفاده گردید. در این روش‌ها، معادله به کار گرفته شده همان معادله انتقال رسوب یعنی معادله (۱) است. مبنای روش‌های تفکیک داده در مدل‌های  $M_1$  تا  $M_5$  مساعدی و همکاران (۲۰۰۶) و در مدل‌های  $M_1$  و  $M_8$  حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۴) بوده و سپس براساس شرایط خاص اقلیمی منطقه روش‌های دیگری برای تفکیک داده‌ها مورد آزمون قرار گرفته و در ادامه ترکیب روش‌های مختلف با همدیگر انجام شده و نتایج آن‌ها ارزیابی شده است.

### الف- روش کلی:

برآورد دبی رسوب براساس تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده بدون تقسیم‌بندی آن‌ها که در آن فقط یک رابطه رگرسیونی بین مقادیر دبی رسوب و دبی جریان برقرار می‌شود.

## ب- روش‌های مستقل

**روش M<sub>1</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های سال.

**روش M<sub>2</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس وضعیت هیدروگراف جریان (جریان پایه، شاخه صعودی و نزولی) که در آن ابتدا هیدروگراف دبی متوسط روزانه برای تمامی داده‌های موجود در کل دوره آماری رسم گردید و سپس وضعیت هیدروگراف جریان در زمان اندازه‌گیری دبی رسوب تعیین شد. با توجه به تعریف سیل از لحظه افزایش سریع جریان تا لحظه کاهش مجدد آن، جریان به عنوان سیل در نظر گرفته شد. همچنین بین خاتمه هر سیل تا شروع سیل بعدی جریان در رودخانه به عنوان جریان پایه در نظر گرفته شد.

**روش M<sub>3</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های پر جریان و کم جریان که در این روش ماه‌هایی که دبی میانگین آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با دبی میانگین سالانه باشد به عنوان ماه‌های پر آب و ماه‌هایی که دبی میانگین آن‌ها کوچک‌تر از دبی میانگین سالانه باشد به عنوان ماه‌های کم آب در نظر گرفته شدند.

**روش M<sub>4</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس کلاسه‌بندی دبی جریان، این مدل خود به دو روش انجام شد. روش اول: داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه به سه دسته تقسیم شدند. روزهای با دبی کمتر از متوسط دبی روزانه در همان سال، روزهای با دبی بزرگ‌تر یا مساوی با متوسط دبی روزانه همان سال و کوچک‌تر از دو برابر آن و روزهای با دبی بزرگ‌تر یا مساوی با دو برابر متوسط دبی روزانه همان سال. روش دوم: جزو روش‌های ترکیبی بوده که در آن تفکیک داده‌ها از ترکیب دو یا چند روش انجام می‌شود اما در این روش‌ها تعداد داده معمولاً کمتر از حد لازم برای مدل‌سازی و بدست آوردن معادله سنج رسوب شده و برای رفع این مشکل، داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه به دو دسته دبی جریان بیشتر یا مساوی با دبی میانگین ماهانه و دبی جریان کمتر از دبی میانگین ماهانه تقسیم شدند.

**روش M<sub>5</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس جریان‌های پایه و سیلابی که در این مدل داده‌ها براساس وضعیت هیدروگراف جریان به جریان پایه و جریان سیلابی (شاخه صعودی و نزولی) تفکیک گردید.

**روش M<sub>6</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس سال‌های پر جریان و کم جریان که در آن سال‌هایی که میانگین دبی آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با دبی میانگین سالانه (کل سال‌های آماری) باشد به عنوان سال پر آب و سال‌های که میانگین دبی آن‌ها کوچک‌تر از دبی میانگین سالانه (کل سال‌های آماری) باشد به عنوان سال کم آب در نظر گرفته شد.

**روش M<sub>7</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های پر باران و کم باران که در این روش براساس آمار بارندگی ماهانه، ماه‌هایی که میانگین بارندگی آن‌ها بیشتر از میانگین بارندگی ماهانه همان سال بوده به عنوان ماه‌های پر باران و ماه‌های که میانگین بارندگی آن‌ها کم‌تر از میانگین بارندگی ماهانه همان سال بوده به عنوان ماه‌های کم باران انتخاب شدند.

**روش M<sub>8</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس فصول اصلی سال که در این مدل داده‌ها بر اساس فصول اصلی سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) تفکیک گردید.

**روش M<sub>9</sub>:** تفکیک داده‌ها براساس فصول تغییر یافته سال (فصول هیدرواقليمی) که در آن داده‌ها براساس تغییراتی که در ماه‌های آخر هر فصل داده شده، تفکیک شدند. بدین صورت که آخرین ماه هر فصل با فصل بعدی در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر ماه اسفند با فصل بهار (اسفند، فروردین و اردیبهشت)، ماه خرداد با فصل تابستان (خرداد، تیر و مرداد)، ماه شهریور با فصل پاییز (شهریور، مهر و آبان) و ماه آذر با فصل زمستان (آذر، دی و بهمن) در نظر گرفته شده و منحنی سنج رسوب آن‌ها رسم و معادله آن‌ها بدست آمد.

## ج- روش‌های ترکیبی

ترکیب M<sub>2,3</sub>: تفکیک داده‌ها براساس وضعیت هیدروگراف جریان و ماه‌های پر جریان و کم جریان.

ترکیب M<sub>4,3</sub>: تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های پر جریان و کم جریان و کلاسه‌بندی مقادیر دبی جریان/

ترکیب M<sub>4,7</sub>: تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های پر باران و کم باران و دسته‌بندی دبی جریان.

ترکیب M<sub>6,7</sub>: تفکیک داده‌ها براساس سال‌های پر جریان و کم جریان و ماه‌های پر باران و کم باران براساس سال‌های پر جریان و کم جریان و دسته‌بندی دبی جریان.

شاخص میانگین توان دوم خطا (رابطه ۲)، هر چه مقادیر برآورد شده دبی رسوب به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر باشد، مجموع مربعات خطا کاهش می‌یابد، در نتیجه میانگین توان دوم خطا که از تقسیم مجموع مربعات خطا به درجه آزادی به دست می‌آید، کمتر می‌شود.

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (\log Q_{sio} - \log Q_{sic})^2 \quad (2)$$

$$MS_E = \frac{\sum SS_{Ei}}{N} \quad (3)$$

$$RE_{en} = \left| (Q_i - P_i) / Q_i \right| \times 100 \quad (4)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

$$d = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \right) \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(X_p - X_o)_i| \quad (7)$$

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - x_{ave})^2} \quad (8)$$

در رابطه (۲)  $SS_E$  مجموع مربعات خطا،  $Q_{sio}$  دبی بار معلق اندازه‌گیری شده برحسب تن در روز و  $Q_{sic}$  دبی بارمعلق برآورد شده بر حسب تن در روز و در رابطه (۳)  $MS_E$  میانگین مربعات خطا،  $SS_{Ei}$  مجموع مربعات خطا در هر زیر مدل و  $N$  تعداد کل داده‌ها در هر بخش از مدل می‌باشند. یکی دیگر از شاخص‌ها برای انتخاب مدل بهینه، شاخص کفایت یا کارایی مدل (رابطه ۵) است که کفایت و دقت مدل‌های رگرسیونی به دست آمده را در برآورد داده‌های رسوب نشان می‌دهد. در این روابط  $Q_i$  مقادیر مشاهده شده،  $P_i$  مقادیر تخمینی و  $\bar{Q}$  متوسط مقادیر مشاهده شده می‌باشند. دامنه  $E$  بین یک (مناسب) تا  $-\infty$  است و اگر مقدار  $E$  برابر با یک باشد، تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقدار صفر نشان می‌دهد که مدل نسبت به استفاده از مقادیر متوسط داده‌های مشاهداتی بهتر یا بدتر پیشگویی نمی‌کند و مقدار منفی بیانگر این است که مدل تغییرات بیشتری از آنچه با واقعیت مشاهده شده ایجاد می‌کند (مدل دقت چندانی ندارد).  $d$  شاخص توافق می‌باشد که دامنه آن بین

ترکیب  $M_{4.6-7}$ : تفکیک داده‌ها براساس سال‌های پرجریان و کم‌جریان و ماه‌های پر باران و کم باران و دسته‌بندی دبی جریان.

ترکیب  $M_{6.8}$ : تفکیک داده‌ها براساس سال‌های پرجریان و کم‌جریان و فصول اصلی سال. در این مدل برآورد دبی رسوب، داده‌ها را براساس سال پر آب، سال کم آب (که سال‌های دبی متوسط سالانه آن‌ها بیشتر از دبی میانگین سالانه (کل سال‌های آماری) و یا مساوی آن باشد، به عنوان سال پر آب و سال‌های که میانگین دبی سالانه آن‌ها کم‌تر از دبی میانگین سالانه باشد، به عنوان سال کم آب در نظر گرفته شدند) و فصول اصلی (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) صورت گرفته و منحنی سنج رسوب آن‌ها رسم و معادله آن‌ها بدست می‌آید.

ترکیب  $M_{4.8}$ : تفکیک داده‌ها براساس فصول اصلی سال و دسته‌بندی دبی جریان، این مدل داده‌ها براساس فصول اصلی (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) دسته‌بندی دبی به دو دسته (دسته یک دبی جریان بیشتر یا مساوی از میانگین ماهانه و دسته دو دبی جریان کمتر از دبی میانگین ماهانه) تفکیک شده و منحنی سنج رسوب آن‌ها رسم و معادله آن‌ها بدست می‌آید.

ترکیب  $M_{6.9}$ : تفکیک داده‌ها براساس سال‌های پرجریان و کم‌جریان و فصول تغییر یافته سال، مدل برآورد دبی رسوب، داده‌ها را براساس سال پر آب، سال کم آب و فصول تغییر تفکیک شده و منحنی سنج رسوب آن‌ها رسم و معادله آن‌ها بدست می‌آید.

ترکیب  $M_{4.9}$ : تفکیک داده‌ها براساس فصول تغییر یافته سال و دسته‌بندی دبی جریان، در این مدل برآورد دبی رسوب و دسته‌بندی دبی به دو دسته (دسته یک دبی جریان بیشتر یا مساوی با میانگین ماهانه و دسته دو دبی جریان کمتر از دبی میانگین ماهانه) و فصول تغییر تفکیک شده و منحنی سنج رسوب آن‌ها رسم و معادله آن‌ها بدست می‌آید.

### شاخص‌های انتخاب مدل‌های بهینه

به منظور انتخاب مدل بهینه در هر ایستگاه از برآیند شاخص‌های مختلف شامل (میانگین مربعات خطا، میانگین مربعات باقیمانده، ضریب تبیین، اشتباه استاندارد، ضریب کارایی، شاخص توافق، ضریب عملکرد، متوسط خطای مطلق و خطای نسبی تخمین) استفاده شد. براساس

شاخص توافق (d)، ضریب عملکرد (cp) و متوسط خطای مطلق (MAE) مناسب (نسبت به سایر مدل‌ها) بوده و به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در این ایستگاه‌ها مدل کلی که هیچ‌گونه تفکیک داده در آن صورت نگرفته بود، به دلیل دارا بودن بالاترین مقدار میانگین مربعات خطا (MS)، اشتباه معیار (SE) و میانگین مربعات باقی مانده و خطای نسبی تخمین (ERen)، بیشترین میزان خطا را در برآورد دبی رسوب معلق دارد. جدول (۲) خلاصه انواع پارامترهایی را نشان می‌دهد که در مدل‌های مورد بررسی در ایستگاه حسن‌خان به دست آمده اند. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب منحنی سنج رسوب مدل بهینه (روش  $M_{6.9}$ ) و (که براساس سال پر آب، سال کم آب و تغییر در ماه‌های فصول اصلی سال صورت گرفته در ایستگاه‌های حسن‌خان و شادی‌آباد را نشان می‌دهند).

در ایستگاه دهگلان مدلی که در آن تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس تغییر در ماه‌های فصول اصلی سال (فصول هیدرواقليمی) و دسته‌بندی دبی جریان به دو دسته انجام گرفته بود، مدل ( $M_{9.4}$ )، به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در این ایستگاه مدل  $M_{6.9}$  به دلیل کمبود داده (کمتر از ۱۰) در در فصول پاییز و تابستان از سال‌های کم آب به لحاظ آماری قابل استناد نمی‌باشد. همچنین در این ایستگاه مدل کلی بیشترین میزان خطا را در برآورد دبی رسوب معلق دارد. شکل (۴) منحنی سنج رسوب مدل‌های بهینه که بر اساس مدل  $M_{9.4}$  صورت گرفته را نشان می‌دهند.

صفر (نامناسب) و یک (مناسب) قرار می‌گیرد. یکی از معایب d این است که مقدار عددی نسبتاً بالا (بیشتر از ۰/۶۵) ممکن است حتی برای مدل‌های ضعیف هم فراهم بیاید. و  $R_E$  میزان خطای نسبی تخمین می‌باشد که مقدار آن هرچه کمتر باشد نشان دهنده خطای کمتر در مقدار برآوردی مدل است.

در روابط (۷) و (۸) MAE متوسط خطای مطلق<sup>۱</sup>، Cp ضریب عملکرد<sup>۲</sup>، N تعداد مشاهدات،  $X_o$  داده‌های مشاهده ای،  $X_p$  داده‌های شبیه‌سازی شده،  $X_{avre}$  میانگین داده‌های مشاهده‌ای و N تعداد کل داده‌ها می‌باشند. هر چه میزان ضریب عملکرد که بیانگر چگونگی عملکرد شبیه‌سازی انجام شده است و متوسط خطای مطلق به صفر نزدیکتر باشد، مدل از اطمینان بیشتری برخوردار خواهد بود. پس از تشکیل جدول تجزیه واریانس، تعداد داده‌ها، مقادیر مجموع مربعات خطا، میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی، ضریب تبیین، اشتباه معیار، مقدار a و b و دیگر شاخص‌های مورد استفاده برای تمامی مدل‌ها تعیین شد و با توجه به شاخص‌های نامبرده شده، بهترین مدل انتخاب و براساس آن مقادیر دبی رسوب برای زمان‌هایی که نمونه‌برداری صورت نگرفته بود، تعیین گردید. در نهایت سری زمانی دبی روزانه رسوب برای کل دوره آماری به دست آمد.

## نتایج و بحث

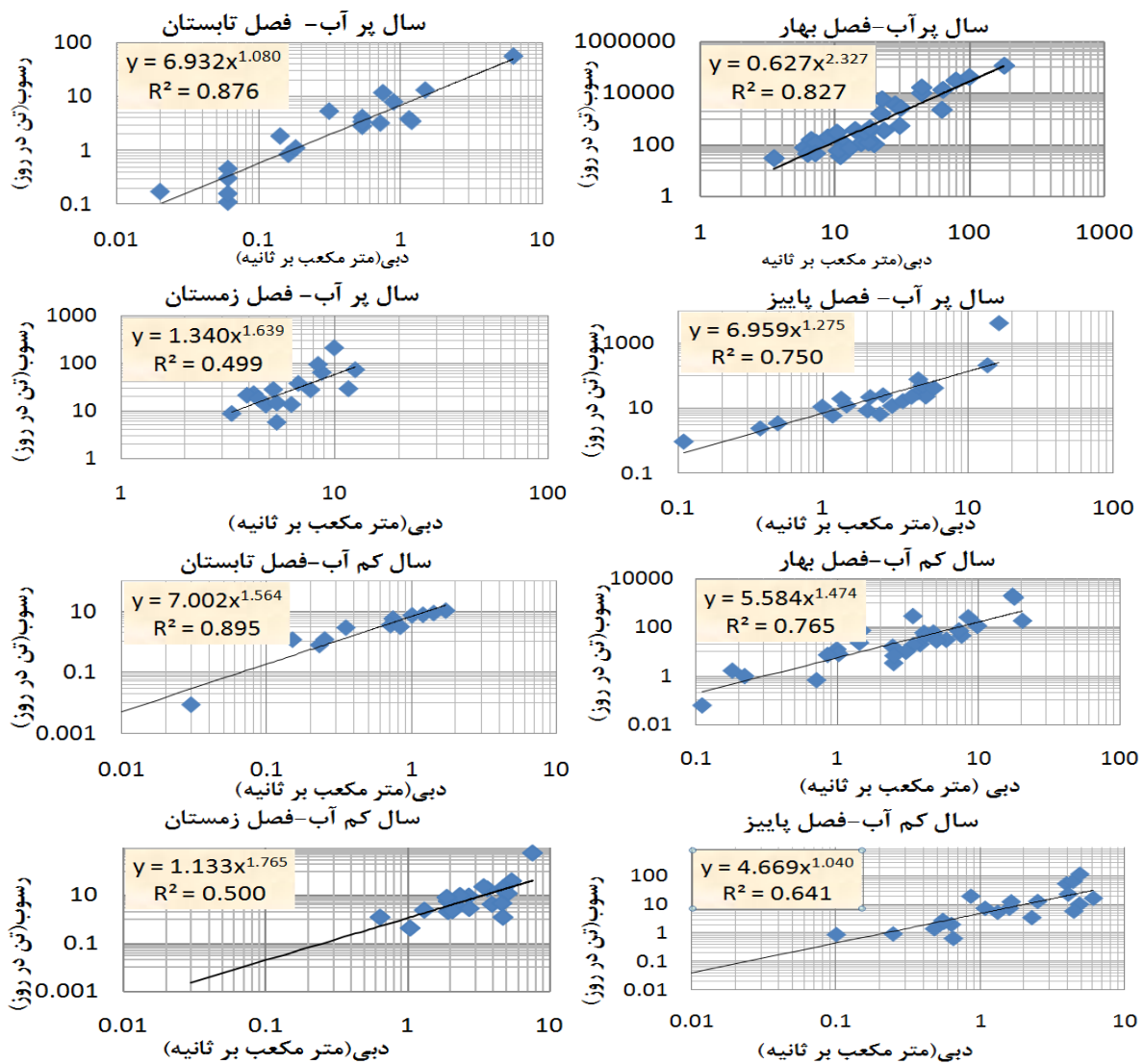
نتایج حاصل از آزمون نرمالیتی داده‌ها نشان داد که داده‌های دبی جریان در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه نرمال بوده است. در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، رابطه رگرسیونی بین مقادیر دبی آب و دبی رسوب معلق (معادله سنج رسوب) براساس مدل‌های پیشنهادی برقرار شد. در ایستگاه‌های حسن‌خان و شادی‌آباد روشی که در آن تقسیم‌بندی داده‌ها به صورت سال پر آب، سال کم آب و تغییر در ماه‌های فصول اصلی سال (فصول هیدرواقليمی)، روش ( $M_{6.9}$ ) انجام گرفته بوده، دارای کمترین مجموع مربعات خطا و در نتیجه کمترین میانگین مربعات خطا (MS)، کمترین اشتباه معیار (SE)، کمترین میانگین مربعات باقی مانده و خطای نسبی تخمین (ERen) بوده همچنین دارای کفایت مدل (ضریب کارایی) (ME)،

<sup>۱</sup> - Mean of Absolute Error

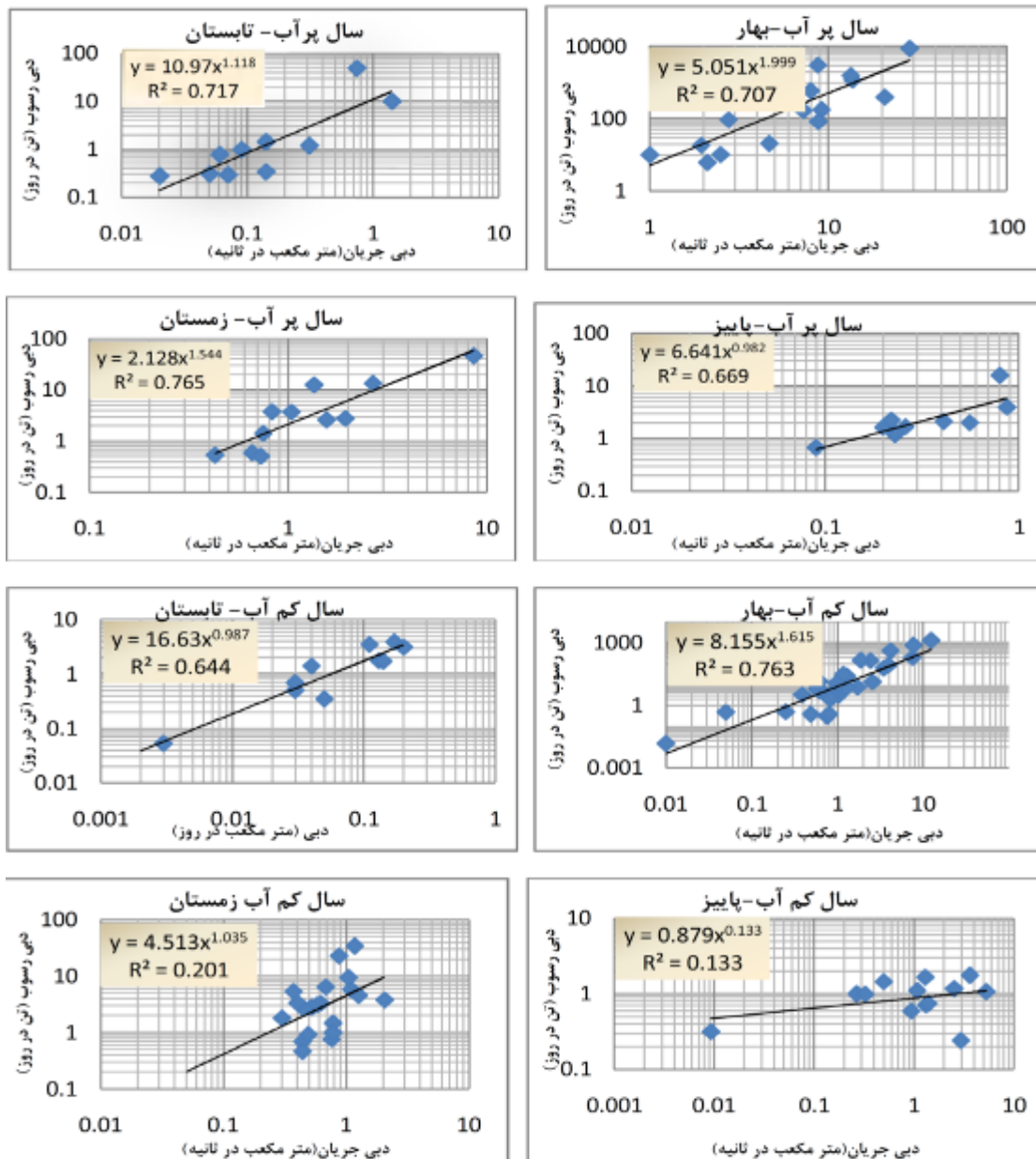
<sup>۲</sup> - Performance Coefficient



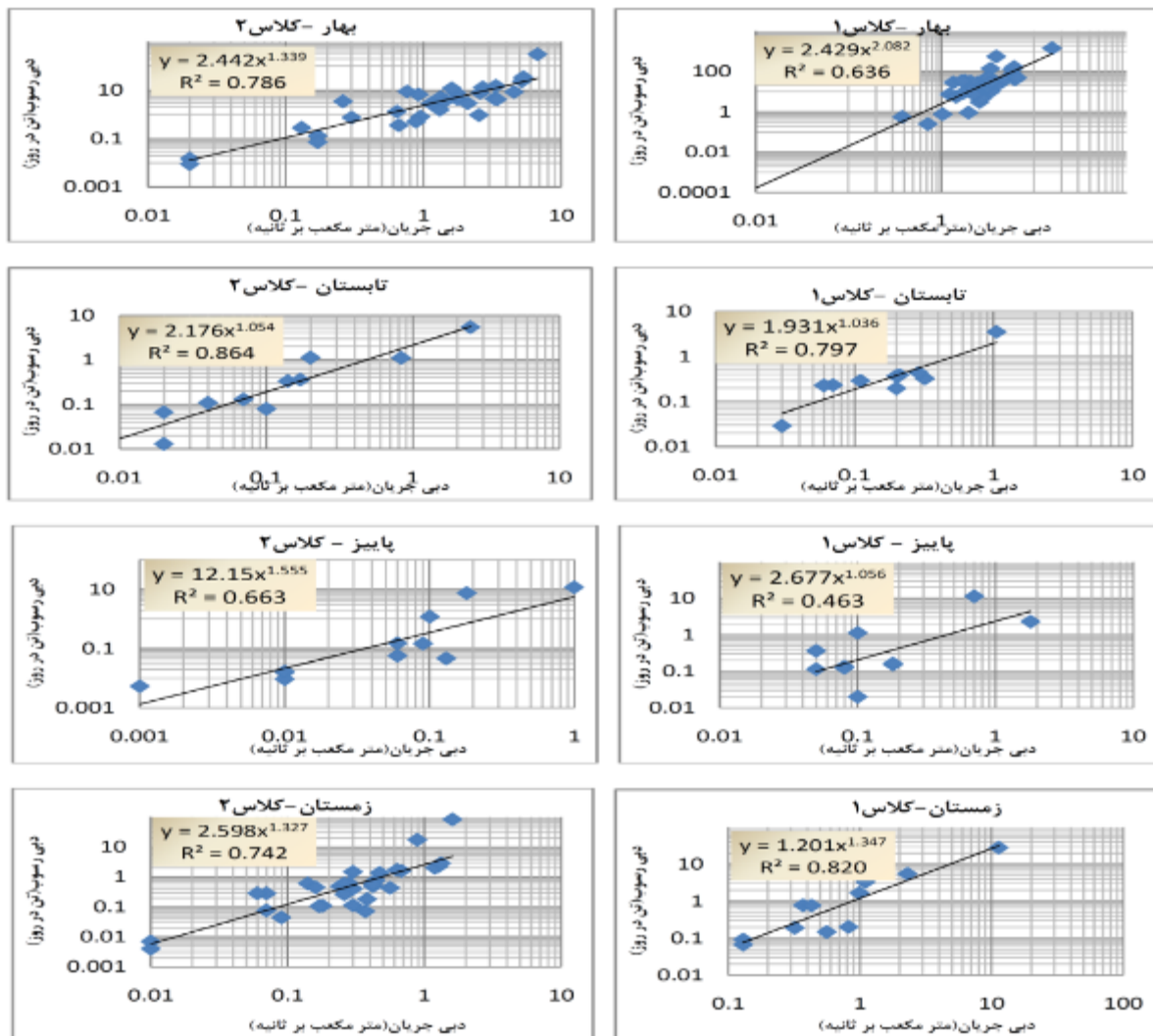




شکل (۲): منحنی سنجه رسوب مدل‌های بهینه در ایستگاه هیدرومتری حسن‌خان (مدل تغییرات در ماه‌های فصول اصلی سال)



شکل (۳): منحنی سنج رسوب مدل‌های بهینه در ایستگاه هیدرومتری شادی‌آباد (مدل تغییرات در ماه‌های فصول اصلی سال)



شکل (۴): منحنی سنجه رسوب مدل‌های بهینه در ایستگاه هیدرومتری دهگلان (مدل تغییرات در ماه‌های فصول اصلی سال)

همکاران (۲۰۰۴)، مساعدی و همکاران (۲۰۰۶)، پیری و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد. این یافته اهمیت تفکیک داده‌ها را برای افزایش دقت و صحت روابط سنجه رسوب نشان می‌دهد. همچنین نوع، تعداد و کیفیت و کمیت داده‌ها در نوع گزینش مدل نهایی موثر بوده که با نتایج عرب‌خدیری و حکیم‌خانی (۲۰۰۶) که کیفیت داده‌های اولیه را در گزینش روش مناسب برآورد رسوب رودخانه موثر می‌دانند و ذرتی‌پور و همکاران (۲۰۰۸) نیز تغییر در نوع داده مورد بهره‌گیری در روش‌های هیدرولوژیکی ثابت گزینش روش‌های مناسب تغییر می‌کند، مطابقت داشته است. همچنین نتایج نشان داد که تعداد داده‌ها و مقدار دبی بر روی پارامترهای آماری مجموع مربعات خطا، مجموع مربعات باقی مانده، میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق مؤثر بوده است. به عبارت دیگر هرچقدر مقدار عددی داده‌ها زیاد باشد مقدار عددی

با توجه به مدل‌های بهینه انتخاب شده در این ایستگاه‌ها مشخص شد که مدل بهینه انتخاب شده در دو ایستگاه حسن‌خان و شادی‌آباد (روش  $M_{6.9}$ ) یکسان بوده در حالی که در ایستگاه دهگلان روش  $M_{6.9}$  به دلیل کمبود داده (کمتر از ۱۰) در سال کم آب و فصول پاییز و تابستان قابل تهیه و ارائه نبوده و بنابراین نمی‌توان فقط یک مدل خاص را برای افزایش دقت رابطه دبی آب و دبی رسوب معلق در تمامی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه پیشنهاد نمود. این نتایج با یافته‌های مساعدی و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. اما نکته مهم این است که بالاترین مقدار میانگین مربعات خطا (MS) و اشتباه معیار (SE) میانگین مربعات باقی مانده و خطای نسبی تخمین (ERen)، در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه مربوط به مدل کلی است که در آن برآورد دبی رسوب بدون هیچگونه تفکیک داده بوده است که با نتایج حیدرنژاد و

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تفکیک داده‌ها بر اساس سال‌های پرجریان، کم‌جریان و در نظر گرفتن فصول هیدرواقليمی می‌توان از این روش برای برآورد تولید رسوب معلق حوضه‌های فاقد آمار در سر شاخه حوضه‌ی آبخیز سفیدرود واقع در استان کردستان استفاده کرد. با توجه به اینکه شرایط آب و هوای هیدرولوژیکی و توپوگرافی در مناطق مختلف متفاوت بوده و استفاده از این روش تنها برای مناطق با شرایط آب و هوای اقلیمی مشابه این منطقه توصیه می‌شود. از طرف دیگری به علت هزینه‌های بالا و عوامل دیگر معمولاً اندازه‌گیری داده‌های رسوب مشکل بوده و در اکثر ایستگاه‌ها در طول ماه‌های مختلف کمتر از سه نمونه رسوب برداشت می‌شود، به همین دلیل آمار درستی از میزان رسوب حوضه‌های آبخیز در دست نیست. با استفاده از روش‌های استفاده شده در تحقیق حاضر و با در نظر گرفتن شرایط آب و هوای هر منطقه، که کمترین امکانات و اطلاعات را لازم دارد، می‌توان مقدار رسوب بیشتر ایستگاه‌های کشور را به طور تقریبی و با دقت قابل قبول تخمین زد و این روش‌ها می‌توانند آمار پایه‌ای از رسوب انتقالی از حوضه‌های کشور را که در حال حاضر آمار درستی ندارند ارائه دهد. معادله نمایی دبی آب و دبی رسوب معلق (منحنی سنج رسوب) در صورتی که برای تمام داده‌های دبی آب و رسوب بدون تفکیک و بدون نظر گرفتن فصول، سال، دسته‌بندی و ... در تقسیم‌بندی داده‌ها صورت گیرد میزان خطای آن بالا است، بنابراین پیشنهاد می‌شود برای تخمین رسوب در رودخانه‌های مورد بررسی از تفکیک و تقسیم‌بندی داده‌ها و مدل‌های معرفی شده استفاده گردد.

خطای مطلق بیشتر می‌شود به همین دلیل در ایستگاه حسن‌خان و شادی‌آباد که مقدار دبی آن بیشتر از ایستگاه دهگلان بوده، مقدار عددی متوسط خطای مطلق در هر روش بیشتر است. به عنوان مثال در ایستگاه حسن‌خان تعداد داده‌ها در حالت پایه جریان ۱۴۰ و مجموع مربعات باقی مانده ۲۲۳/۳، میانگین مربعات خطا ۱/۲۳ می‌باشد در حالیکه در شاخه نزولی ۱۳ داده و مجموع مربعات باقی مانده ۱۲/۴۰۲ میانگین مربعات خطا ۱/۲۷ بوده است. شاخص متوسط خطای مطلق (MAE) می‌تواند برای مقایسه روش‌ها و مدل‌های مختلف با همدیگر در هر ایستگاه به صورت جداگانه مورد استفاده قرار گیرد، اما برای مقایسه روش‌ها و مدل‌ها هر ایستگاه با ایستگاه دیگر نتیجه درستی به ما نمی‌دهد. بیشترین وزن را در این تحقیق بر میانگین خطای نسب تخمین (ERen)، میانگین مربعات خطای (MS<sub>E</sub>)، اشتباه معیار (SE) بوده است و نتایج نشان داد که حاصل جمع ضریب کارایی (E) و ضریب عملکرد (CP) برابر یک بوده و R<sup>2</sup> یا یک شاخص نمی‌توانند به تنهایی برای انتخاب مدل بهینه با صحت زیاد استفاده کرد و از برآیند چند تا شاخص می‌توان به نتیجه بهتری دست یافت.

از طرف دیگر مدل‌های بهینه انتخاب شده نشان می‌دهند که تغییرات میزان و نوع بارش در سال‌های پر باران و کم باران و همچنین در فصول و ماه‌های مختلف سال به دلیل ایجاد تغییرات پیچیده و ترکیبی در شرایط فیزیکی و رطوبتی خاک و پوشش گیاهی، در نهایت منجر به ایجاد تغییرات غیر یکنواختی در میزان فرسایش سطح حوضه، دبی جریان و رسوب معلق حمل شده توسط رودخانه‌ها می‌گردد. به نحوی که با تفکیک داده‌ها برای شرایط مختلف بارش و جریان می‌توان عدم یکنواختی را حذف نموده و شرایط را برای ایجاد منحنی سنج رسوب با دقت و صحت بالاتر هموار نمود. اما نکته مهم این است که تأخیر طبیعی ایجاد شده در شرایط بارش و جریان توأم با پیچیدگی‌های اثر دما و پوشش گیاهی موجب می‌شوند که در نظر گرفتن فصول هیدرواقليمی منطقه مورد بررسی (تغییر ماه‌های اصلی فصول تقویمی سال با در نظر گرفتن داده‌های ماه آخر هر فصل همراه با فصل بعد) اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش دقت و صحت منحنی سنج رسوب نسبت به فصول تقویمی داشته باشد.

## منابع

۱. بردستانی، ص. غ. ح. اکبری و م. گیوه‌چی. ۱۳۸۹. مقایسه روش شبکه عصبی مصنوعی و روش منحنی سنج رسوب جهت برآورد بار رسوب رودخانه شاپور، مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۸-۱.
۲. پیری، ع. ا. م. حبیب‌نژاد، ض. احمدی، ک. سلیمانی و ا. مساعدی. ۱۳۸۴. بهینه‌سازی رابطه دبی آب و رسوب در حوزه معرف امامه، پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، ۳(۳): ۳۰-۴۰.
۳. حکیم‌خانی، ش و م. عرب‌خداری. ۱۳۸۵. تحلیل رگرسیونی بین رسوب معلق و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک حوضه دریاچه ارومیه. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۷(۲): ۲۳۱-۲۲۳.
۴. حیدرنژاد، م. ح. گلماهی، ا. مساعدی و م. ضیاءتبار احمدی. ۱۳۸۳. ارائه مدل بهینه برآورد رسوب و حجم رسوب‌گذاری در دو سد مخزنی ایران (مطالعه موردی: سدهای کرج و دز). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ۳۹ ص.
۵. دهقانی، ا. ا. م. ا. زنگانه، ا. مساعدی و ن. کوهستانی. ۱۳۸۸. مقایسه تخمین بار معلق به دو روش منحنی سنج رسوب و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی رودخانه دوغ استان گلستان) مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ۱(۱۶): ۱-۱۲
۶. ذرتی‌پور، ا. م. مهدوی، ش. خلیقی سیگارودی، ع. سلاجقه و ن. شمس‌المعالیف. ۱۳۸۷. بررسی تاثیر طبقه‌بندی رسوب بر بهبود روش‌های هیدروژئومورفولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها مطالعه موردی حوزه آبخیز طالقان. نشریه دانشکده منابع طبیعی، (۴۶۱): ۸۱۹-۸۰۹.
۷. صادقی، س. ح. ر. ۱۳۸۶. توسعه معادله منحنی سنج رسوب برای شاخه صعودی و ندولی هیدروگراف با استفاده از مدل رگرسیون مجله منابع آب ایران، ۱۱(۱): ۱۰۳-۱۰۱.
۸. صادقی، س. ح. ر. س. آقابیگی، ب. یثربی، م. وفاخواه و ع. اسماعیلی ساروی. ۱۳۸۴. تغییرات زمانی و مکانی تولید رسوب معلق زیر حوضه‌های مهم هراز، مطالعه موردی حوزه آبخیز هراز. پژوهش‌نامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، ۳(۳): ۲۸-۱۵.
۹. عرب‌خداری، م. ۱۳۸۴. بررسی رسوبدهی معلق حوزه‌های آبخیز ایران. مجله تحقیقات منابع آب ایران، (۲): ۵۱-۶۰.
۱۰. فیض‌نیا، س. ح. محمدعسگری و م. معظمی. ۱۳۸۶. بررسی کارایی روش شبکه عصبی مصنوعی در تخمین رسوب معلق روزانه (مطالعه موردی حوزه آبخیز زرد رامهرمز، استان خوزستان). نشریه دانشکده منابع طبیعی، (۴)۶۰: ۱۱۹۹-۱۲۱۰.
۱۱. مساعدی، ا. ا. محمدی استادکلایه، ع. نجفی‌نژاد و ف. یغمایی. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی روابط دبی آب و دبی رسوب معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه گرگان‌رود. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۹(۲): ۳۴۲-۳۳۱.
12. Achite, M. and S. Ouillon. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995) J. Hydro, 84(3):187-202.
13. Arabkhedri, M., F.S. Lai, I. Noor-Akma and M.K. Mohamad-Roslan. 2010. An application of adaptive cluster sampling for estimating total suspended sediment load. J. Hydrology Research 41(1): 63-67.
14. Draper, N.R. & H. Smith. 1981. Applied regression analysis. John Wiley and Sons, New York, N.Y, 2<sup>nd</sup> edition.
15. Hadley, R.F., R. Lal, C.A. Onstad, D.E. Walling and A. Yair. 1985. Recent developments in erosion and sediment yield studies, UNESCO, Paris, 127p.
16. Hadley, R.F., R. Lal, C.A. Onstad, D.E. Walling, A. Yair. 1985. Recent developments in erosion and sediment yield studies, UNESCO, Paris, 127p.
17. Khanchoul, K., Z.E.A. Boukhrissa, A. Acidi and T.R. Altschu. 2010. Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. Quaternary nternational xxx 1- 7.

18. Kumar, S. and R.A. Rastogi. 1987. A conceptual catchment model for estimating suspended sediment flow. *Journal of Hydrology* 95:155-163.
19. Sadeghi, S.H.R., T. Mizuyama, S. Miyata, T. Gomi, K. Kosugi, T. Fukushima, S. Mizugaki, Y. Onda. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma* 144:198–211.
20. Walling, D.E. and B.W. Webb. 1981. The Reliability of Suspended Sediment Load Data, In: *Erosion and Sediment Transport (Proc. of Florence Symp. June 1981)*, IAHS. Public, 133: 177 - 194.

## **Efficiency of Different Data Separation Methods to Increase the Accuracy of Sediment Rating Curve; Case Study A Part of the Sefidrood Watershed**

**Abstract**

Due to the low number of hydrometry stations in Iran and the lack of continuity of sediment sampling and measuring in many existing stations, on one hand the exact amount of sediment load in many rivers in the country is not available and because of differences in climatic, hydrological and topographical conditions in the country, on the other hand, the preparation and calibration of sediment rating curves for different regions, is unavoidable. The current study was therefore carried out for preparing and improving the accuracy of the suspended sediment rating curve in hydrometry stations located on Telvar and Cham Shor Rivers in a part of the Sefidrood Watershed in Kurdistan Province. To achieve the study purpose, sediment rating equation was used as a base equation and then the data were separated using effective factors on sediment transport including hydrological and climatic factors. The models were then extracted from the data series and finally 12 statistic indicators were applied to select the optimal models. The results showed that the  $M_{6,9}$  model (based on separated data considering high/low flows and hydroclimatic seasons) in Hasan Khan and Shadi Abad Stations and the  $M_{9,4}$  model (based on separated data considering hydroclimatic seasons and classified flows) in Dehgolan Station were selected as the best models. The suspended sediment loads based on total and optimal models were estimated by an average 73.32 and 34.20% lower than observed values in three studied stations. Referring to the results, the data set separation for different conditions of precipitation and flow leads to data homogeneity to the extent required to preparing sediment rating curve with a higher accuracy. Results also confirmed that the natural delays in rainfall and flow conditions with the complexity of temperature and vegetation, causes the data separated into hydroclimatic seasons may be more effective than those separated into the main seasons on increasing the accuracy of sediment rating curves.

**Key words: Hydroclimatic Seasons, Sediment Rating Curve, Sefidrood Watershed, Suspended Load.**