

بررسی کارایی معادله سنجه رسوب چندمتغیره و ارتباط عملکرد آن با خصوصیات فیزیکی حوضه آبخیز

مهدی مردیان^{۱*}، جواد وروانی^۲، واحد بردی شیخ^۳ و علی نجفی نژاد^۴

چکیده

به دلیل کمبود امکانات، نظارت و بازبینی پیوسته دبی رسوب در بیشتر رودخانه‌ها ممکن نیست و به طور معمول از معادله سنجه برای برآورد رسوب‌دهی استفاده می‌شود. در این میان، افزودن متغیرهای وابسته به زمان برای افزایش صحت و دقت برآورد معادله سنجه ضروری است. در این پژوهش، با استفاده از معادله ۷ پارامتری کوهن و همکاران، انواع روابط دبی-رسوب چندمتغیره برای پنج ایستگاه هیدرومتری شامل قزاقلی، پونل، کشور، گلینک و بند شاه‌عباسی در محدوده سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۴۷ تهیه شد و به کمک شاخص‌های صحت و دقت، معادله بهینه رسوب هر ایستگاه ارزیابی شد. همچنین چگونگی ارتباط مقادیر شاخص‌های دقت و صحت با برخی از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه بررسی شد. طبق نتایج، متوسط شاخص صحت و دقت ایستگاه‌های مطالعاتی به ترتیب برابر ۱/۹۵۸ و ۳/۴۸۸ است که نشان از کارایی خوب معادلات رسوب چندمتغیره دارد. همچنین دبی متوسط سالانه بیشترین همبستگی را با شاخص صحت و دقت نشان داد که این همبستگی را می‌توان به بالا بودن تعداد نمونه‌برداری‌ها ربط داد.

واژه‌های کلیدی: بار رسوب، چندمتغیره، شاخص صحت، شاخص دقت، مدل رگرسیونی.

ارجاع: مردیان م. وروانی ج. بردی شیخ و. و نجفی نژاد ع. ۱۳۹۳. بررسی کارایی معادله سنجه رسوب چندمتغیره و ارتباط عملکرد آن با خصوصیات فیزیکی حوضه آبخیز. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۸۷-۱۹۴.

۱- عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک.

۲- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک.

۳- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۴- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

* نویسنده مسئول: mehdimardian@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۳

مقدمه

رسوبات رودخانه‌ای یکی از مهم‌ترین تهدیدهای اکوسیستمی است که خسارات وارده از آن به طبیعت، کشاورزی و سازه‌های آبی گسترده و زیان‌آور است. فزونی رسوبات رودخانه‌ها که نشان دهنده تشدید فرسایش، وضعیت نامناسب منابع طبیعی تجدیدشونده، تخریب اراضی جنگلی و بهره‌برداری نامناسب از اراضی کشاورزی است (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۶)، باعث برهم‌زدن تعادل اکوسیستمی می‌شود.

فرسایش سطح حوضه، حمل ذرات رس و لای و فرسایش بستر و کناره‌های کانال‌ها، مهم‌ترین عوامل تشکیل دهنده بار رسوبی رودخانه‌ها به شمار می‌آیند (جواهری و همکاران، ۱۳۸۴). در این میان به مطالعه غلظت رسوب معلق به سه دلیل توجه بیشتری شده است: اول اینکه بار معلق شاخصی از تحویل رسوب از کل سطح آبخیز است؛ در حالیکه بار بستر شاخصی از شرایط بستر در زمان نمونه‌برداری است. دوم اینکه، غلظت مواد حاصل‌خیز در بار معلق خیلی بیشتر است؛ در نتیجه اهمیت آن نیز بیشتر از بار بستر است (صادقی و همکاران، ۲۰۰۸). دلیل سوم اینکه به طور معمول بار معلق بدون تماس با کف رودخانه است و از ذرات رس، سیلت و یا شن ریز تشکیل شده است که نمونه‌برداری و اندازه‌گیری آن به مراتب آسان‌تر از بار بستر است (میمیکو، ۱۹۸۲).

با توجه به کمبود امکانات و عدم ثبت پیوسته از تغییرات دبی-رسوب، منحنی سنج رسوب معمول‌ترین روش برای برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها است. منحنی سنج به شکل گسترده‌ای برای ارزیابی مستقیم تغییرات رسوب‌دهی معلق، و غیرمستقیم برای محاسبه بار کل رسوب‌دهی به کار گرفته می‌شود (توماس، ۱۹۸۸). این رابطه به صورت یک معادله خطی لگاریتمی طبق رابطه ۱ نشان داده می‌شود و شکل کلی آن به صورت رابطه ۲ است (هو و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\log(Q_s) = \log(a) + b \log(Q_w) \quad (1)$$

$$Q_s = a Q_w^b \quad (2)$$

در این رابطه Q_s غلظت رسوب بر حسب میلی گرم در لیتر یا تن در روز، Q_w دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، و a و b ضرایب‌های ثابت معادله هستند. در مختصات لگاریتمی مقدار a فاصله قائم محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدأ مختصات و مقدار نمای b برابر

با شیب خط بهترین برازش است (آیدانزا و ناپلیتانو، ۲۰۰۶). شرایط محیطی از جمله خصوصیات حوضه آبخیز، شرایط هیدرولیکی رودخانه و نوع رسوبات بر ضرایب معادله سنج رسوب اثر گذارند (میمیکو، ۱۹۸۲).

به دلیل تغییر حالت از لگاریتمی به حالت طبیعی نوعی ارباب ایجاد می‌شود که در بیشتر مواقع منجر به "کم تخمینی" مقدار رسوب انتقالی دوره‌های طولانی مدت می‌شود (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۸۳). بدین صورت که مقدار باقیمانده‌ها، یعنی اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر محاسباتی، توزیع نرمالی نداشته و مقدار آن بیشتر از صفر می‌شود (کائو و همکاران، ۲۰۰۵ و کرودر و همکاران، ۲۰۰۷).

برای کم کردن خطای اربابی فوق، یک سری فاکتورهای اصلاحی مثل FAO ، $QMLE$ ، $Smearing$ ، $MVUE$ و β در معادله سنج رسوب به کار می‌رود. اما فاکتورهای اصلاحی معادله سنج رسوب فقط یک عدد ثابت هستند که ضریب a معادله را به صورت یک عدد ثابت تغییر می‌دهند. پس اثر این ضریب اصلاحی برای دبی‌های مختلف جریان یکسان است که این از مهم‌ترین عیب‌های فاکتورهای اصلاحی به حساب می‌آید.

یکی دیگر از راه‌های افزایش صحت و دقت برآورد رسوب‌دهی، افزودن متغیرهای مستقل اضافی به معادله سنج رسوب است (داداش‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸). در همین راستا کوهن و همکاران (۱۹۹۲) مدل ۷ پارامتری را ارائه می‌دهند و در آن دبی و زمان به صورت توابع مختلف در مدل رگرسیونی وارد می‌شوند که جزئیات این مدل در رابطه ۳ آمده است.

$$\begin{aligned} \ln(C) = & \beta_0 + \beta_1 \ln(Q/Q_{bar}) + \\ & \beta_2 (\ln(Q/Q_{bar}))^2 + \beta_3 (T - T_{bar}) + \\ & \beta_4 (T - T_{bar})^2 + \beta_5 \sin(2\pi T) + \\ & \beta_6 \cos(2\pi T) + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه ε اشتباه استاندارد، T زمان اندازه‌گیری، Q دبی، β پارامتر و اندیس bar به معنای میانگین مقادیر پارامتر مذکور است. در اصل این مدل برای برقراری رابطه خطی بین چندین متغیر مستقل و متغیر وابسته (رسوب) به کار می‌رود. این رابطه برعکس فاکتورهای اصلاحی، به زمان نمونه‌برداری توجه دارد و شدت‌های مختلف جریان را در نظر می‌گیرد.

پژوهش‌های زیادی در زمینه ارزیابی انواع منحنی سنج و

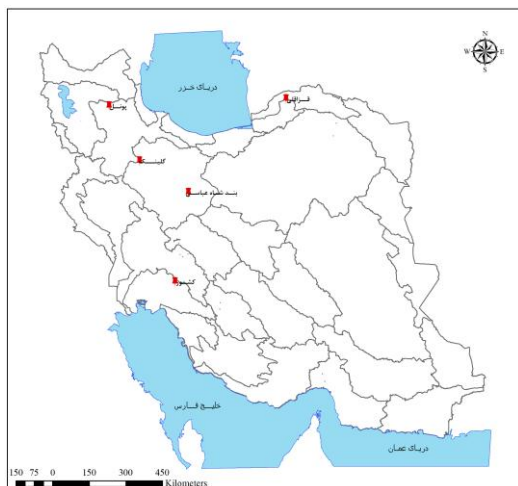
منحنی‌های سنجه کارایی قابل قبولی در برآورد رسوب‌دهی به‌خصوص در مورد وقایع سیلابی ندارند. نتایج پژوهش‌های هو و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داد در دوره قبل از ساخت سدها تندی خط سنجه رسوب بیشتر از دوره‌های بعد از ساخت است و به‌دلیل تله‌اندازی رسوبات در بازه‌های بالادست، شیب خط منحنی سنجه در پایین‌دست رودخانه کمتر است.

اساس کار در این پژوهش، استفاده از روش چندمتغیره کوهن و همکاران (۱۹۹۲) است که در آن علاوه بر دبی، زمان نیز به شکل‌های مختلف وارد معادله دبی- رسوب شده است. با توجه به اینکه در پژوهش‌های داخلی کمتر به این روش پرداخته شده است و بیشتر فاکتورهای اصلاحی معادله سنجه رسوب بررسی شده است ارزیابی روش مذکور ضروری است. به جهت کمبود داده‌های دبی- رسوب که استفاده از رابطه‌ها و مدل‌های تجربی را برای مدیریت آبخیزهای کشور توصیه می‌کند، بدون شک انجام این پژوهش برای شفاف‌سازی مسائل مربوط به رسوب‌دهی آبخیزها ضروری است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

در این پژوهش، ۵ ایستگاه شامل قزاقلی، پونل، گلینک، بند شاه‌عباسی و کشور که در بخش‌های شمالی و غربی کشور قرار دارند انتخاب شدند (جدول ۱ و شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

ارتباط ضرایب سنجه با خصوصیات حوضه آبخیز انجام شده است. حیدرئزاد و همکاران (۱۳۸۳) دریافتند در مدلی که تفکیک داده‌ها به‌صورت ماهانه است حداقل مربعات خطا نسبت به مدلی که منحنی سنجه براساس تمام داده‌ها و بدون تفکیک آن‌ها ترسیم می‌شود وجود دارد. صادقی و همکاران (۱۳۸۴) اشاره دارند که تفکیک داده‌های اندازه‌گیری رسوب بر حسب موقعیت قرارگیری آن‌ها در هیدروگراف سیل مربوطه موجب افزایش دقت تخمین شده و امکان تهیه رسوب نگارها را نیز مهیا می‌کند. مساعدی و همکاران (۱۳۸۵) نیز نتیجه گرفتند مقدار رسوب در شاخه صعودی هیدروگراف جریان برای یک دبی مشخص بیشتر از شاخه نزولی است. داداش‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) نیز نشان دادند با وجود کارایی مؤثر روش چندمتغیره در برآورد بار رسوبی سالانه، به‌دلیل پراکنش نامناسب داده‌های سیلابی این روش در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیل نارکارآمد است.

والینگ (۱۹۷۷) دریافت که نمونه‌برداری در مواقع سیلابی می‌تواند شیب منحنی را زیاد تغییر دهد. همچنین تقسیم‌بندی دبی‌ها براساس فصل سال می‌تواند دقت را بالا ببرد. گیلوری و همکاران (۱۹۹۰) بیان می‌دارند ویژگی‌هایی مثل روند زمانی و تغییرات فصلی می‌تواند توسط منحنی سنجه چندمتغیره تشریح شوند. این روش به تعداد داده‌های کمتری برای برآورد دقیق بار رسوبی نیاز دارد. وانگ و همکاران (۱۹۹۹) همبستگی بار معلق با دبی آب و عامل زمان را مناسب ارائه منحنی سنجه چندمتغیره می‌دانند که در این بین، روند فصلی دراز مدت بار معلق یکی از متغیرهای مهم وابسته به زمان تعریف شده است. ژانگوی و همکاران (۲۰۰۶) با مقایسه مدل ۷ پارامتره کوهن با روش کریجینگ و کوکریجینگ بیان می‌دارند این مدل برآورد خوبی از غلظت رسوب دارد، اما مقادیر اوج را کم تخمین و مقادیر کم را بیش تخمین نشان می‌دهد. ندومبا و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهش‌های خود به این نکته اشاره دارند که رفع مشکل کم تخمینی در ارتباط با نوع ترسیم منحنی سنجه و کمیت و کیفیت داده‌ها است. خانچول و همکاران (۲۰۰۹) کلاس‌بندی مقادیر دبی براساس فصل وقوع سیلاب را مناسب برآورد رسوب وقایع سیلابی دانستند. بلانکو و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و هیدرومتری مورد مطالعه

ایستگاه- رودخانه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	مساحت آبخیز (کیلومتر مربع)	سال‌های آماری	طول دوره آماری (سال)	تعداد داده
قزاقلی- گرگانرود	۳۰	۶۸۱۱	۱۳۵۰-۸۱	۳۱	۳۶۰۰
پونل- شفارود	۵۰	۳۵۰	۱۳۴۷-۷۵	۲۸	۶۱۰
کشور- سرخاب	۷۶۰	۳۳۵	۱۳۴۷-۷۵	۲۸	۱۵۱۵
گلینک- طالقانرود	۱۸۲۰	۷۷۵	۱۳۵۰-۸۱	۳۱	۶۵۰
بند شاه‌عباسی- و فرقان	۱۵۷۰	۱۴۳۰۰	۱۳۴۵-۸۱	۳۶	۴۴۰

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{SSC_e}{SSC_o}}{N} \quad (4)$$

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (SSC_e - SSC_m)^2}{N}} \quad (5)$$

در این معادله‌ها SSC_o غلظت رسوب مشاهده‌ای (میلی گرم در لیتر، یا تن در روز)، SSC_e غلظت رسوب برآوردی (میلی گرم در لیتر، یا تن در روز)، SSC_m میانگین مقادیر رسوب برآوردی (میلی گرم در لیتر، یا تن در روز)، و N تعداد نمونه‌های مشاهده‌ای است.

بررسی تغییرات شاخص‌های صحت و دقت

در بخش دوم پژوهش به بررسی چگونگی ارتباط مقادیر شاخص‌های دقت و صحت با برخی از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبخیز پرداخته شد. در همین راستا، نحوه تغییرات مقادیر این شاخص‌ها با توجه به برخی خصوصیات بالادست ایستگاه‌ها مانند مساحت، ارتفاع متوسط آبخیز، بارش سالانه و دبی متوسط سالانه بررسی شد. برای این کار با برقراری رابطه رگرسیونی بین مقادیر فیزیکی حوضه آبخیز ایستگاه‌ها با مقادیر هر یک از شاخص‌های صحت و با آزمودن توابع خطی، توانی، لگاریتمی و نمایی، اقدام به انتخاب توابع با ضریب همبستگی بالاتر شد. در نهایت با توجه به نوع و چگونگی رابطه به دست آمده، به تشریح نتایج پرداخته شد.

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج مربوط به مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره دبی- رسوب را نشان می‌دهد. همچنین شکل کلی معادله دبی رسوب ایستگاه مورد نظر براساس بالاترین ضریب همبستگی مشخص شده است.

ایستگاه‌های انتخاب شده در این مطالعه همگی دارای آمار به نسبت کامل و بیش از ۲۵ سال نمونه‌برداری بوده‌اند. لازم به ذکر است ایستگاه‌های مذکور به نحوی انتخاب شدند که ضمن داشتن دوره‌های آماری با فراوانی نمونه‌برداری حداقل روزانه در بعضی از ماه‌های مختلف سال، شرایط اقلیمی به نسبت متفاوت نیز وجود داشته باشد. این مورد به روشن شدن تغییرات برآورد منحنی‌های سنج رسوب در منطقه‌های مختلف کمک زیادی می‌کند.

تهیه انواع مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره

در ابتدا داده‌های دبی- رسوب ایستگاه‌ها از شرکت مدیریت منابع آب جمع‌آوری شد. سپس با توجه به هدف پژوهش، برای تهیه معادله سنج رسوب چندمتغیره از روش ۷ پارامتره کوهن و همکاران (۱۹۹۲) مطابق با معادله ۳ استفاده شد. بدین صورت که مقادیر پارامترهای معادله سنج رسوب چندمتغیره در هر ایستگاه به‌صورت پایه زمانی ماهانه در Excel استخراج شد. سپس تمام متغیرهای مستقل و متغیر وابسته به محیط رگرسیونی نرم‌افزار SPSS وارد شدند و بر مبنای روش گام به گام، مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره برای هر ایستگاه استخراج شد. سپس از بین مدل‌های ارائه شده مدلی که از بالاترین ضریب همبستگی برخوردار بود به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

تعیین معادله بهینه دبی- رسوب چندمتغیره

برای تعیین معادله بهینه دبی- رسوب چندمتغیره هر ایستگاه از شاخص‌های آماری صحت و دقت استفاده شد. بدین صورت که نسبت مقدار برآوردی به مقدار مشاهداتی به عنوان شاخص صحت (معادله ۴)، و ضریب تغییرات برآورد به عنوان شاخص دقت (معادله ۵) مبنای ارزیابی کارایی معرفی شدند.

جدول ۲- مدل های چندمتغیره ماهانه پیشنهادی روش گام به گام در ایستگاه های مطالعاتی

ایستگاه	مدل	R	R ²	خطای استاندارد	تغییرات R ²	معنی داری	متغیرهای مستقل
قزاقلی	۱	۰/۸۲۳	۰/۶۷۸	۰/۵۶۵	۰/۶۷۸	۰	log(Q/Q _{bar})
	۲	۰/۸۴۵	۰/۷۱۴	۰/۵۳۵	۰/۰۳۶	۰/۰۰۱	log(Q/Q _{bar}), sin(2JIt)
گلینک	۱	۰/۸۲۰	۰/۶۷۲	۰/۵۸۳	۰/۶۷۲	۰	log(Q _w)
	۲	۰/۸۴۰	۰/۷۰۶	۰/۵۵۵	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱	log(Q _w), T-T _{bar}
	۳	۰/۸۵۸	۰/۷۳۶	۰/۵۲۹	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	log(Q _w), T-T _{bar} , cos(2JIt)
	۴	۰/۸۶۷	۰/۷۵۲	۰/۵۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	log(Q _w), T-T _{bar} , cos(2JIt), (T-T _{bar}) ²
	۵	۰/۸۸۲	۰/۷۷۸	۰/۴۹۰	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱	log(Q _w), T-T _{bar} , cos(2JIt), (T-T _{bar}) ² , sin(2JIt)
کشور	۱	۰/۸۸۴	۰/۷۸۱	۰/۷۴۴	۰/۷۸۱	۰	log(Q _w)
	۲	۰/۸۹۳	۰/۷۹۷	۰/۷۱۷	۰/۰۱۷	۰	log(Q _w), T
	۳	۰/۸۹۶	۰/۸۰۳	۰/۷۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۱۹	log(Q _w), T, sin(2JIt)
	۴	۰/۸۹۹	۰/۸۰۸	۰/۷۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۳۱	log(Q _w), T, sin(2JIt), log(Q/Q _{bar}) ²
پونل	۱	۰/۴۷۴	۰/۲۲۴	۰/۸۵۲	۰/۲۲۴	۰	T
	۲	۰/۷۲۲	۰/۵۲۱	۰/۶۷۵	۰/۲۹۷	۰	log(Q _w), T
	۳	۰/۷۶۵	۰/۵۸۵	۰/۶۳۳	۰/۰۶۴	۰/۰۰۳	log(Q _w), T, sin(2JIt)
شاه عباسی	۱	۰/۹۰۴	۰/۸۱۷	۰/۵۳۷	۰/۸۱۷	۰	log(Q _w)
	۲	۰/۹۱۵	۰/۸۳۸	۰/۵۰۸	۰/۰۲۱	۰	log(Q _w), log(Q/Q _{bar}) ²
	۳	۰/۹۱۹	۰/۸۴۵	۰/۴۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۲۵	log(Q _w), log(Q/Q _{bar}) ² , T-T _{bar}

$$\begin{aligned} \text{Log}(Q_s) = & 0.712 + (1.98(\text{Log}(Q_w)) + \\ & 8.364 * (10^{-5}((\text{Log}(Q/Q_{bar}))^2)) + \\ & 0.275(T - T_{bar}) \end{aligned} \quad (10)$$

در جدول ۳ مقادیر شاخص صحت و دقت و همچنین متغیرهای فیزیکی حوضه آبخیز بالادست ایستگاه ها آمده است. همچنین در جدول ۴ نتایج مناسب ترین رابطه برازش داده شده بین ضریب شاخص صحت و دقت با خصوصیات فیزیوگرافی آبخیز ارائه شده است.

طبق نتایج جدول ۳ بیشترین مقدار شاخص صحت متعلق به ایستگاه سرخاب- کشور برابر ۳/۱۴، کمترین مقدار متعلق به ایستگاه و فرقان- بند شاه عباسی برابر ۰/۹۶ و میانگین ۵ ایستگاه مطالعاتی برابر ۱/۹۵۸ است. همچنین بیشترین مقدار شاخص دقت متعلق به ایستگاه سرخاب- کشور برابر ۵/۷۱، کمترین مقدار متعلق به ایستگاه قزاقلی- گرگانرود برابر ۱/۷۴ و میانگین ۵ ایستگاه مطالعاتی برابر ۳/۴۸۸ است.

با توجه به اینکه مقدار شاخص صحت در بهترین حالت برابر مقدار واحد است میانگین ۱/۹۵۸ از معادلات سنجه چندمتغیره مقدار خوبی محسوب می شود. همچنین با توجه به اینکه مقدار کم ضریب تغییرات بیانگر دقت زیاد روش است میانگین ۳/۴۸۸ شاخص دقت از معادلات سنجه چندمتغیره نیز مقدار خوبی به حساب می آید این کارآمدی خوب با نتایج پژوهش های کوهن و همکاران

مدل بهینه ایستگاه قزاقلی- گرگانرود:

مدل شماره ۲ با ضریب تبیین ۰/۷۱۴ عملکرد بهتری نسبت به مدل شماره ۱ دارد.

$$\begin{aligned} \text{Log}(Q_s) = & 3.59 + (1.586(\text{Log}(Q/Q_{bar})) \\ & - 0.281(\text{Sin}(2\pi)) \end{aligned} \quad (6)$$

مدل بهینه ایستگاه گلینک- طالقانرود:

مدل شماره ۵ با ضریب تبیین ۰/۷۷۸ عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها دارد.

$$\begin{aligned} \text{Log}(Q_s) = & 0.319 + (2.206(\text{Log}(Q_w)) \\ & - 2.155 * 10^{-4}(T - T_{bar}) - \\ & (0.377(\text{Cos}(2\pi)) - 3.17 * 10^{-7}((T - T_{bar})^2) \\ & - 0.266(\text{Sin}(2\pi)) \end{aligned} \quad (7)$$

مدل بهینه ایستگاه کشور- سرخاب:

مدل شماره ۴ با ضریب تبیین ۰/۸۰۸ عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها دارد.

$$\begin{aligned} \text{Log}(Q_s) = & 1.011 + (2.708(\text{Log}(Q_w)) + \\ & 106 * 10^{-4}(T) + \\ & (0.177(\text{Sin}(2\pi)) + 0.382(\text{Log}(Q/Q_{bar}))^2) \end{aligned} \quad (8)$$

مدل بهینه ایستگاه پونل- شفارود:

مدل شماره ۳ با ضریب تبیین ۰/۵۸۵ عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها دارد.

$$\begin{aligned} \text{Log}(Q_s) = & 5.223 + 7.037 * 10^{-4}(T) \\ & + (1.882(\text{Log}(Q_w)) + (0.352(\text{Sin}(2\pi))) \end{aligned} \quad (9)$$

مدل بهینه ایستگاه بند شاه عباسی- و فرقان:

مدل شماره ۳ با ضریب تبیین ۰/۸۴۵ عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها دارد.

(۱۹۹۲)، وانگ و همکاران (۱۹۹۹) و ژانگوی و همکاران (۲۰۰۶) هماهنگی دارد.

جدول ۳- مقادیر شاخص صحت و دقت و متغیرهای فیزیکی حوضه آبخیز ایستگاه‌ها

نام ایستگاه	شاخص صحت معادله رسوب	شاخص دقت معادله رسوب	مساحت (km ²)	ارتفاع (m)	بارش سالانه (mm)	دبی متوسط سالانه (m ³ /s)
کشور	۳/۱۴	۵/۷۱	۳۳۵	۷۶۰	۹۵۰/۶	۵/۷۵
بند شاه‌عباسی	۰/۹۶	۲/۷۸	۱۴۳۰۰	۱۵۷۰	۳۰۰	۹/۴۳
پونل	۲/۴۶	۴/۸۳	۳۵۰	۵۰	۱۵۵۲/۷	۵/۹۹
گلینک	۱/۱۲	۲/۳۸	۷۷۵	۱۸۳۰	۴۷۹/۵	۱۳/۴۷
قزاقلی	۲/۱۱	۱/۷۴	۶۸۱۱	۳۰	۶۴۹	۱۶/۳۶

جدول ۴- مناسب‌ترین رابطه برازش داده شده بین شاخص صحت و دقت با خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبخیز

پارامتر (X)	شاخص ارزیابی	رابطه بهینه	ضریب تبیین (R ²)
مساحت (کیلومتر مربع)	صحت	$y = -0.326\ln(x) + 4.3533$	۰/۳۸۴
	دقت	$y = 5E-08x^2 - 0.0008x + 4.7297$	۰/۵۴۳
ارتفاع متوسط آبخیز (متر)	صحت	$y = -1E-06x^2 + 0.0019x + 2.2574$	۰/۸۰۶
	دقت	$y = -3E-06x^2 + 0.0057x + 3.0925$	۰/۵۴۴
بارش متوسط سالانه (میلی‌متر)	صحت	$y = -3E-06x^2 + 0.0073x - 1.2463$	۰/۸۹۷
	دقت	$y = -2E-06x^2 + 0.0054x + 0.5423$	۰/۵۱۰
دبی متوسط سالانه (مترمکعب بر ثانیه)	صحت	$y = 1.4325(0.0618x) - x^2 + 9.069$	۰/۹۵۲
	دقت	$y = 32.266x^{-1.039}$	۰/۹۶۷

نتیجه‌گیری

طبق نتایج و مباحث، منحنی سنج رسوب چندمتغیره در ایستگاه‌هایی که هم‌خطی زمانی بین دبی و زمان وجود نداشته باشد، نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد و در اکثر موارد برآوردهای صحیحی از رسوب نسبت به بقیه روش‌ها دارد. زیرا وجود ارتباط خطی باعث بالا رفتن اشتباه استاندارد می‌شود. در ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، روش چندمتغیره از نظر میزان صحت بالا بود؛ که دلیل را می‌توان در این دانست که در مدل‌های چندمتغیره پارامترهای بیشتری در معادله وارد می‌شوند و خصوصیات بیشتری از داده‌های اولیه در مدل بررسی می‌شود. از این رو می‌توان بیان کرد که معادله سنج رسوب چندمتغیره کارایی خوبی در محاسبه بار رسوبی ایستگاه‌های مطالعاتی بخش‌های غربی و شمالی کشور دارد.

در این میان یکی از دلایل برآورد بهتر معادله سنج رسوب چندمتغیره، در نظر گرفتن تغییرات زمانی داده‌های اولیه بار معلق است که در معادله کوهن و همکاران (۲۰۰۷) به کار رفته است. از آنجا که رسوب‌دهی رودخانه در طی سال نوسانات زیادی دارد، هر چه میزان نوسانات و

طبق نتایج جدول ۴ بجز مساحت حوضه آبخیز، سایر پارامترهای فیزیکی همبستگی بالایی با شاخص صحت دارند. در این بین دبی متوسط سالانه بیشترین همبستگی را از خود نشان می‌دهد. از طرفی مشاهده می‌شود این پارامترها رابطه عکس با شاخص صحت دارند. همچنین در این جدول، پارامترهای فیزیکی حوضه آبخیز همبستگی خوبی با شاخص دقت دارند که دبی متوسط سالانه بیشترین همبستگی را از خود نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود این پارامترها همانند نتایج مربوط به شاخص صحت رابطه عکس با شاخص دقت دارند. می‌توان بیان کرد با توجه به اینکه دبی متوسط سالانه بیشترین همبستگی را با مقادیر شاخص صحت و دقت دارد و از طرفی در رودخانه‌های پرآب به طور معمول نمونه‌برداری‌ها بیشتر است این همبستگی بالا در ارتباط با تعداد داده‌ها است. به طوری که هر چه تعداد نمونه‌برداری‌ها بیشتر باشد معادله سنج رسوب محکمتر بسته خواهد شد و این عدم قطعیت را کاهش، و صحت و دقت برآوردها را افزایش می‌دهد.

می‌تواند کمک زیادی در برآورد متوسط رسوبدهی در مقیاس‌های زمانی مختلف داشته باشد و در برنامه‌های مدیریت آبخیزها برای تصمیم‌گیری بهتر به کار گرفته شود. لذا انجام این طور پژوهش‌ها در سایر حوضه‌های آبخیز کشور پیشنهاد می‌شود.

منابع

۱. جواهری ن. قمشی م. و کاشفی‌پور م. ۱۳۸۴. مقایسه روش‌های رگرسیون آماری و فازی جهت برآورد بار رسوبی رودخانه‌های کارون و دز. مجله علمی کشاورزی. ۲۸(۲): ۱۸۳-۲۰۰.
 ۲. حیدرنژاد م. گلماهی س. ح. مساعدی ا. و احمدی م. ض. ۱۳۸۳. ارائه مدل بهینه برآورد رسوب در دو ایستگاه هیدرومتری (مطالعه موردی: ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی سد کرج). پژوهش‌نامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر. ۲(۲): ۶۷-۵۴.
 ۳. داداش‌زاده اصل. ف. محسنی ساروی م. احمدی ح. و وروانی ج. ۱۳۸۸. ارزیابی و توسعه منحنی‌های سنج رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز قره‌چای). پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). ۸۴: ۲۸-۳۵.
 ۴. صادقی ح. توفیقی ب. و مهدوی م. ۱۳۸۴. تهیه مدل تخمین رسوب لحظه‌ای در حوضه آبخیز زرین درخت. مجله منابع طبیعی ایران. ۵۸(۴): ۷۵۹-۷۶۷.
 ۵. عرب‌خدری م. حکیم‌خانی ش. و وروانی ج. ۱۳۸۳. اعتبار روش‌های برون‌یابی در برآورد میانگین رسوبدهی معلق سالانه (۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۱(۳): ۱۲۳-۱۳۱.
 ۶. فیض‌نیا س. محمدی ع. محسنی ساروی م. و قدیمی عروس محله ف. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی و حساسیت سازندها به فرسایش در رسوبدهی حوضه‌های آبخیز (مطالعه موردی: دریاچه نمک). مجله منابع طبیعی ایران. ۶۰(۳): ۸۱۱-۸۲۸.
 - مساعدی ا. محمدی استاد کلاته ا. نجفی‌نژاد ع. و یغمایی. ف. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی روابط دبی جریان و دبی رسوب معلق در ایستگاه‌های منتخب رودخانه گرگان‌رود. محله منابع طبیعی ایران. ۵۹(۲): ۳۳۱-۳۴۲.
- تغییرات بیشتر بررسی و در نظر شود معادله سنج می‌تواند بار رسوب را با صحت و دقت بیشتری تخمین بزند.
- طبق نتایج و مباحث، تغییرات شاخص صحت و دقت در ایستگاه‌های مختلف حاکی از تأثیرپذیری شدید بار معلق رسوبی از شرایط اقلیمی و ویژگی‌های مختلف حوضه آبخیز است. در ایستگاه‌های مورد مطالعه این موضوع به خوبی صادق است. پس توصیه می‌شود در ایستگاه‌هایی که رژیم جریان آن‌ها سیلابی است، برای بهبود نتایج، نمونه‌برداری‌های بیشتری از دبی‌های بالا و سیلابی انجام گیرد و همچنین رسم منحنی سنج به طور جداگانه برای طبقه‌های مختلف جریان پایه، بالا و سیلابی انجام شود. این نتیجه در پژوهش‌های حیدرنژاد و همکاران (۱۳۸۳)، صادقی و همکاران (۱۳۸۴) و خانچول و همکاران (۲۰۰۹) نیز حاصل شده است. پس با توجه به شرایط فعلی داده‌ها نمی‌توان قضاوت قطعی کرد که افزایش اندازه نمونه می‌تواند در بالا بردن صحت و دقت روش‌های مختلف نقش مهمی داشته باشد. به طوری که اگر افزایش نمونه‌برداری‌ها فقط از دبی‌های بالا باشد باعث بیش تخمینی رسوب و بر عکس می‌شود. همچنین اگر نمونه‌ها پراکنده باشند باعث کاهش R^2 و در نتیجه کاهش دقت و صحت منحنی سنج خواهد شد.
- با توجه به نتیجه‌گیری‌هایی که در مورد توسعه رابطه‌های دبی- رسوب از این پژوهش به دست آمد، لازم به ذکر است تا به یکی از مهم‌ترین عیب‌های منحنی‌سنج رسوب نیز اشاره کرد. مهم‌ترین ایراد وارده بر منحنی سنج رسوب این است که به دلیل خطی بودن نمی‌تواند رسوب وقایع سیلابی را به خوبی برآورد کنند. زیرا در یک دبی مشخص در طول شاخه بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف جریان، غلظت رسوب برابر نیست و این خاصیت باعث می‌شود تا شکل منحنی سنج به صورت حلقه درآید (صادقی و همکاران، ۲۰۰۸). با این حال اگر در هر یک از ماه‌های وقوع سیل، نمونه‌برداری‌های زیادی داشته باشیم می‌توان منحنی سنج مختص برآورد رسوب سیلاب در آن ماه را ارائه داد تا رسوب برآوردی از منحنی سنج اختلاف کمی با رسوب برآوردی از رسوب‌گراف داشته باشد.
- علاوه بر این تهیه رابطه بهینه دبی رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری، براساس ارزیابی روش‌های منحنی سنج و فاکتور اصلاحی که بتواند به صورت متغیر زمانی عمل کند

19. Waling D. E. 1977. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for small watersheds. *Water Resources Research*. 13:531-538.
20. Wang P. and Linker L. 1999. An alternative regression method for constituent loads from streams. *Water Quality and Ecosystems Modeling*. 4:935-942.
21. Zhongwei L. Zhang Y. K Schilling K. and Skopec M. 2006. Cokriging estimation of daily suspended sediment load. *Jurnal of Hydrology*. 237:389-398.
7. Blanco M. L. R. Castro M. M. T. Palleiro L. and Castro M. T. T. 2010. Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology*. 123:181-188.
8. Cohn T. A. Caulder D. A. Gilroy E. J. Zynjuk L. D. and Summers R. M. 1992. The validity of a sample statistical model for estimation of fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. *Water Resources Research*. 28(9):2353-2363.
9. Crowder D. W. Demissie M. and Markus M. 2007. The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load-discharge relationships. *Journal of Hydrology*. 336:250-268.
10. Gilroy E. J. Cohn T. A. Delong L. L. Hirsch R. M. and Wells D. K. 1990. Estimating constituent loads. *Water Resources Research*. 25(5):937-942.
11. Hu B. Wang H. Yang Z. and Sun X. 2011. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International*. 230:34-43.
12. Iadanza C. and Napolitano F. 2006. Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth*. 31:1212-1227.
13. Kao S. J. Lee T. Y. and Milliman J. D. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 16(3):653-675.
14. Khanchoul K. Altschul R. and Assassi F. 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Arabian Journal of Geosciences. 2(3):257-271.
15. Mimikou M. 1982. An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece. *Hydrological Sciences*. 27:369-383.
16. Ndomba P. M. Mtalo F. W. and Killingtveit A. 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.
17. Sadeghi S. H. R. Mizuyama T. Miyata S. Gomi T. Kosugi K. Fukushima T. Mizugaki S. and Onda Y. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*. 144:198-211.
18. Thomas R. B. 1988. Monitoring baseline suspended sediment in forested basins: the effects of sampling on suspended sediment rating curves. *Hydrological Sciences*. 33(5):499-514.