

تعیین بهترین رابطه دبی- رسوب معلق بر اساس تقسیم‌بندی‌های زمانی و ضرایب تصحیح مختلف (مطالعه موردی: رودخانه بشار)

جواد دانشی^۱، امیر ناصرین^{۲*}، سعید جلیلی^۲

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۱۲/۱۲)

چکیده

استفاده از معادلات پیچیده هیدرولیکی برای تخمین رسوب نیاز به استفاده از داده‌های زیادی دارد که در بسیاری از رودخانه‌ها در دسترس نیستند. بنابراین، برای برآورد رسوب از معادلات ساده‌تری همچون منحنی سنجه استفاده می‌شود. در برخی موارد منحنی‌های سنجه دقت مناسبی ندارند. برای رفع این مشکل، از ضرایب اصلاحی و تقسیم‌بندی داده‌ها بر مبنای عوامل مختلف استفاده می‌شود. تحقیق حاضر، با هدف امکان‌سنجی استفاده از روش‌های مختلف اصلاحی و تقسیم‌بندی داده‌ها برای افزایش دقت در استفاده از این منحنی‌ها در ایستگاه‌های پاتاوه، قلات و شاه‌مختار رودخانه بشار استان کهگیلویه و بویراحمد انجام شد. مدل‌های مختلف منحنی سنجه با استفاده از ۷ شاخص خط‌سنجی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد هرگونه تقسیم‌بندی زمانی داده‌ها، دقت تخمین رسوب را افزایش می‌دهد و تقسیم‌بندی ماهانه و فصلی داده‌ها، به طور میانگین، به ترتیب ۶۱ و ۳۶ دقت تخمین‌ها را افزایش داد. اگرچه استفاده از مدل حد واسط داده‌ها ۷۰ درصد امتیاز بیشتری از مدل سالیانه داشت، استفاده از روش اصلاحی فائو موجب کاهش ۲۲ درصدی دقت برآوردها شد. به طور کلی، با وجود تأثیر مثبت مدل‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و پوشش گیاهی بر افزایش دقت معادلات سنجه، به ترتیب به میزان ۳۵، ۲۸ و ۲۰ درصد، هیچ‌یک مدل برتر نبودند. نتایج تحقیق تأیید کرد که تولید و انتقال رسوب معلق در رودخانه تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی قرار دارد. توجه به این تغییرات در استفاده از معادلات دبی- رسوب موجب افزایش دقت در برآورد رسوب رودخانه می‌شود.

کلیدواژگان: پوشش گیاهی، سیلاب، شرایط اقلیمی، منحنی سنجه.

مقدمه

فرسایش خاک پدیده غالب در ایجاد تغییر بر سطح زمین است. در پی بروز فرسایش، ذرات خاک بر اثر ورود نیروهای مختلف، مثل قطرات باران، از سطح خاک جدا شده و بر اثر نیروی رواناب جابه‌جا می‌شوند. میزان رسوب‌گذرای از خروجی یک حوضه را بازده رسوب حوضه گویند [۱]. این بازده با توجه به شرایط محیطی حوضه مثل اقلیم، خاک، توپوگرافی کاربری اراضی و مداخلات انسانی، که بر تولید، انتقال، انباشت و زمان ماندن رسوب مؤثر هستند، تعیین می‌شود [۲]. مهم‌ترین این عوامل که در ایستگاه‌های مختلف آب‌سنجی اندازه‌گیری می‌شود، دبی جریان است. دبی جریان در رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مثل برداشت‌ها، شیب و هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه قرار دارد [۳] و بر خصوصیات مختلف کیفی آب مؤثر است [۴]. تعیین مقدار رسوب در حوضه‌ها به نصب وسایل اندازه‌گیری و صرف زمان و تأمین نیروی کارگری و هزینه‌های مربوطه نیاز دارد. بنابراین، تعیین و معرفی مدل‌های با دقت مناسب در محدوده‌های فاقد ایستگاه حوضه امکان برنامه‌ریزی و اقدام برای کاهش رسوب را فراهم می‌کند. منحنی‌های سنجه، به عنوان یک ابزار مناسب، امکان برآورد میزان رسوب با استفاده از دبی جریان ایجاد می‌کند.

پژوهش‌های زیادی در مورد برآورد بار رسوب به وسیله منحنی سنجه و عوامل مؤثر بر آن انجام شده است. ریسی و همکاران (۱۳۹۸) تغییرات زمانی منحنی سنجه رسوب معلق را با استفاده از چند روش آماری در حوضه گاماسیاب بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از تابع انتقال به دلیل در نظر گرفتن پارامتر زمان در برآورد رسوب می‌تواند به افزایش دقت آن بینجامد. همچنین، آن‌ها نتیجه گرفتند که علاوه بر دبی جریان، عوامل دیگر مانند خصوصیات فیزیوگرافیک و زمین‌شناسی و اطلاعات آب‌وهوای منطقه هم در تخمین رسوب رودخانه تأثیرگذارند [۵]. هورویتز (۲۰۰۳) طی تحقیقی در مورد رودخانه می‌سی‌سی‌پی دریافت دامنه خطاها مرتبط با برآورد جریان برای بازه‌های زمانی نسبتاً کوتاه (مثلاً روزانه یا هفتگی) احتمالاً به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر از دامنه خطا در موارد مرتبط با بازه‌های زمانی طولانی‌تر (مثلاً فصلی یا سالانه) است؛ زیرا در این مورد، به دلیل نبود زمان کافی برای تعادل، پیش‌بینی بیش از حد یا

کمتر از حد انجام خواهد شد [۶]. آهن و همکاران (۲۰۱۷) استفاده از مدل خطی پویا برای تخمین میزان رسوب با استفاده از منحنی‌های سنجه متغیر زمانی را پیشنهاد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل زمانی پویا برای تشخیص تغییرات زمانی رسوب مناسب است و تغییرات غلظت رسوب را به خوبی برآورد می‌کند [۷].

تفکیک زمانی داده‌ها در بسیاری از تحقیقات مورد توجه بوده است. نتایج تحقیقات مختلف [۸] نشان می‌دهد استفاده از منحنی سنجه بدون تفکیک داده‌ها همواره با قدری خطا همراه است. نجفی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹) نتیجه گرفتند تفکیک زمانی، به هر شکل، موجب بهبود دقت در مدل‌سازی در برآورد رسوب با استفاده از منحنی سنجه می‌شود و استفاده از مدل ماه‌های بدون پوشش گیاهی بهترین دقت را در برآورد رسوب در حوضه قره‌سو به همراه دارد. بخشی از این خطا مربوط به توزیع زمانی انتقال رسوب تولیدی حوضه است [۹]. تغییرات زمانی رسوب در رودخانه‌ای در برزیل را بررسی کردند و دریافتند که در این رودخانه ۹۴ درصد رسوبات در فصل مرطوب منتقل می‌شود. در مقیاس سالانه، دبی‌های حداکثر در تولید و انتقال رسوب تأثیر زیادی دارد. رضانی‌پور و همکاران (۱۳۹۶) مدل‌های مختلف منحنی سنجه را در زیرحوضه‌های کشف‌رود ارزیابی کردند و دریافتند مدل سالانه ناکارآمدترین مدل بوده و مدل‌های هیدرولوژیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی مدل‌های بهینه در تخمین بار رسوب در این رودخانه هستند. آن‌ها دریافتند علاوه بر تأثیر مقیاس زمانی بر میزان رسوب رودخانه در مقیاس سالانه، خصوصیات سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و خصوصیات سازه‌ها حفاظتی حوضه موجب کاهش میزان رسوب شده است. گرچه این مقدار در سال‌های مختلف تا سه برابر میزان متوسط متغیر است، در مقیاس فصلی، ۸۰ درصد رسوبات در فصل‌های پاییز و زمستان ایجاد می‌شوند. همچنین، در مقیاس تک‌بارش‌ها، رطوبت خاک و دبی جریان عوامل مؤثر در میزان رسوب هستند [۱۰].

با توجه به موارد یادشده، تقسیم‌بندی زمانی دوره‌ای می‌تواند تأثیر زیادی بر دقت میزان رسوب برآوردی با استفاده از منحنی‌های سنجه داشته باشد. اگرچه پژوهش‌های زیادی در زمینه به‌کارگیری منحنی‌های سنجه صورت گرفته است، در مورد تأثیر تقسیم‌بندی زمانی بر دقت

محدوده شهرستان یاسوج، قرار دارد. شروع سرشاخه رودخانه بشار در استان فارس است. در این محدوده مطالعاتی، سه ایستگاه هیدرومتری فعال به نام‌های قلات، شاهمختار و پاتاوه وجود دارد. در ایستگاه‌های یادشده کار رسوب‌سنجی هم انجام می‌شود. ایستگاه قلات در بالادست رودخانه بشار و ایستگاه شاهمختار در کنار شهر یاسوج و ایستگاه پاتاوه هم در خروجی حوضه رودخانه بشار قرار گرفته است. رودخانه بشار پس از خروج از این محدوده وارد محدوده مطالعاتی ده‌بارز می‌شود. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های یادشده در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های رسوب معلق و دبی جریان مورد استفاده در تحقیق، از اداره آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد تهیه شد.

این منحنی‌ها تحقیقات زیادی انجام نشده است. رودخانه بشار یکی از رودخانه‌های مهم استان کهگیلویه و بویراحمد است و ارزیابی دقیق رسوب در این رودخانه، موجب کاهش انباشت رسوب در مخازن و کانال‌های آبرسانی و آبیاری، کاهش تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و عواقب آن در بروز سیل می‌شود. بنابراین، در این تحقیق، سعی شد به منظور دستیابی به دقیق‌ترین برآورد رسوب، تأثیر استفاده از روش‌های تفکیک زمانی و استفاده از ضرایب اصلاحی بر دقت منحنی‌های سنج در این رودخانه بررسی شود.

مواد و روش‌ها

رودخانه بشار یکی از زیرحوضه‌های آبریز کارون با مساحت ۲۸۰۰ کیلومتر مربع در استان کهگیلویه و بویراحمد،

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های مطالعه‌شده

رودخانه	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	بازه زمانی مورد بررسی
	قلات	۵۱-۴۱-۰۰	۳۰-۳۳-۰۰	۱۸۷۰	۱۳۹۸-۱۳۷۵
بشار	شاهمختار	۵۱-۳۱-۰۰	۳۰-۴۱-۰۲	۱۷۴۰	۱۳۷۳-۱۳۹۱
	پاتاوه	۵۱-۱۵-۰۰	۳۰-۵۷-۰۰	۱۵۶۰	۱۳۹۸-۱۳۸۵

که در آن a و b ضرایب ثابت هستند. از نظر نوع منحنی سنج و استفاده از دبی جریان، روش‌های برآورد رسوب را می‌توان به منحنی سنج یک‌خطی، چندخطی و حد وسط دسته‌ها تقسیم‌بندی کرد که همگی از روش USBR پیروی می‌کنند [۱۱].

روش تک‌خطی

در این روش برآورد رسوب در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی غلظت مواد معلق (c) برحسب گرم در لیتر با دبی متناظر آن (Q_w) بر حسب متر مکعب بر ثانیه طی یک دوره طولانی اندازه‌گیری می‌شود. رسوب با استفاده از رابطه ۲ زیر حسب تن در روز (Q_s) محاسبه می‌شود:

$$Q_s = 0.0864 \times c \times Q_w \quad (2)$$

مدل چندخطی

بنا به شرایط پراکنش داده‌ها، می‌توان به جای گذر یک خط از میان نقاط دو یا سه خط از میان آن‌ها عبور داد. در آن صورت برای منحنی سنج بیش از یک رابطه وجود خواهد داشت. روش کار مشابه با روش یک خطی است. به‌طبع، گذر دو یا سه خط برازش بهتری را ایجاد خواهد کرد.

روش‌های مورد آزمون

در منحنی‌های سنج با ایجاد ارتباط بین دو متغیر غلظت رسوب با دبی جریان به عنوان یک روش تجربی به صورت گسترده استفاده شده است. با توجه به ضرایب ثابت و متغیر موجود در هر رابطه، روش‌های مختلفی ارائه شده است. در ادامه، روش‌های مد نظر برای استفاده در آن تحقیق معرفی خواهند شد.

روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (روش USBR)

در این روش پس از تعیین مقادیر غلظت رسوب، دبی جریان رودخانه، یک رابطه ریاضی بین بار رسوب معلق رودخانه و آبدی آن برقرار می‌شود. داده‌های دبی جریان و دبی رسوب به صفحه لگاریتمی منتقل شده و رابطه‌ای به صورت معادله ۱ که به منحنی سنج رسوب معروف است، بین دو متغیر برقرار می‌شود. در نتیجه، در مقیاس لگاریتمی، نقطه‌ای مثل a ، به عنوان محل تقاطع خط با محور قائم تا مبدأ و نقطه‌ای مثل b که شیب خط یادشده است. معادله منحنی سنج را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

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

روش حد واسط دسته‌ها

سنجه مربوط به آن‌ها استخراج می‌شود. مدل ماهانه، مشابه روش قبل است، با آن تفاوت که داده‌ها به ۱۲ سری ماهانه (بر اساس ماه‌های سال) تقسیم می‌شوند و برای هر ماه منحنی خاص خود استخراج می‌شود.

مدل اقلیمی

در این مدل داده‌ها با توجه داده‌ها بلندمدت بارش و دمای منحنی آبروترومیک ترسیم و ماه‌های خشک و تر ایستگاه تعیین می‌شود. سپس، برای ماه‌های خشک و تر روابط رگرسیونی استخراج می‌شود.

مدل وضعیت پوشش گیاهی

در مدل پوشش گیاهی با توجه به وجود داشتن یا نداشتن پوشش گیاهی سبز ماه‌های سال به دو دسته تقسیم می‌شوند. سپس، با بررسی داده‌های مربوط به هر یک از آن دو دسته، برای هر یک از آن دو دسته، به طور مستقل، معادله‌ای تعیین می‌شود.

مدل هیدرولوژیک

در این مدل ابتدا دبی در ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته و میانگین آن تعیین می‌شود. سپس، ماه‌هایی که دبی آن‌ها بیش از میانگین باشد، به عنوان ماه‌های سیلابی و ماه‌هایی که دبی آن‌ها کمتر از میانگین باشد، به عنوان ماه‌های غیر سیلابی تلقی شده و برای هر یک روابط رگرسیونی مستقلی استخراج می‌شود.

ارزیابی آماری روابط تخمین رسوب معلق

پس از تعیین معادلات رسوب به روش‌های مختلف، دقت هر یک از معادلات، با توجه به مقادیر تخمینی و مشاهداتی غلطت رسوب، ارزیابی شد. این ارزیابی با استفاده از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار عمومی (GSD)، ضریب تبیین (R^2)، کارایی مدل (EF)، میانگین درصد خطای نسبی (NMSE)، و شاخص توافق (d) است. شاخص‌های یادشده با استفاده از معادلات ۵ تا ۱۱ به صورت زیر تعیین شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$GSD = \frac{RMSE}{\bar{P}} \quad (6)$$

در این روش دبی‌هایی متناطر با غلظت رسوب اندازه‌گیری شده را مد نظر قرار می‌دهند و آن‌ها را براساس دبی جریان از کوچک به بزرگ مرتب می‌کنند [۱۲]. سپس، داده‌ها به دسته‌هایی تقسیم می‌شود و متوسط دبی هر دسته (دبی میانه) را متناطر با متوسط رسوب آن دسته تعیین خواهد شد. در نهایت، بین دبی و رسوب یک رابطه رگرسیونی توانی برقرار می‌شود. اگر رابطه دارای یک ضریب همبستگی بالا باشد، ادامه کار مانند روش USBR انجام خواهد شد. برای دسته‌بندی داده‌ها ابتدا مقداری برای دسته‌ها فرض می‌شود و با توجه به تعداد وقایع در هر دسته در مورد آن تصمیم‌گیری خواهد شد. اگر در هر یک از دسته‌ها حداقل یک واقعه قرار نگرفته باشد، تعداد دسته‌ها کم‌کم کاهش خواهد یافت تا حداقل یک واقعه در هر دسته قرار بگیرد.

روش فائو

این روش توسط جونز و همکاران (۱۹۸۱) [۱۳] برای کاهش خطا با استفاده از تعدیل ارقام در تخمین رسوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه شده است. در واقع، در این روش با جایگزینی a با α ، به عنوان ضریب اصلاحی، در رابطه USBR، می‌توان مقادیر محاسباتی و مشاهداتی را با استفاده از رابطه ۳ به هم نزدیک کرد [۱۴]:

$$Q_s = \alpha Q_w^b \quad (3)$$

که در آن رابطه، ضریب اصلاحی α از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_w^b} \quad (4)$$

در این رابطه \bar{Q}_s ، میانگین بار رسوب و \bar{Q}_w^b ، میانگین دبی جریان رودخانه است.

مدل‌های سالانه، فصلی و ماهانه

در مدل سالانه، داده‌ها متناطر دبی جریان و دبی رسوب بدون تفکیک به کار برده شده و تنها از یک رابطه رگرسیونی بین تمامی رسوب اندازه‌گیری شده و دبی جریان استفاده می‌شود. در مدل فصلی، داده‌ها متناطر دبی جریان و دبی رسوب با توجه به تاریخ نمونه‌برداری و بر اساس فصل‌های چهارگانه، به چهار سری بهاره، تابستانه، پاییزه و زمستانه تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس منحنی

زیر مدل‌های مربوطه استفاده شد. در نهایت، برای تعیین بهترین مدل در مجموع سه ایستگاه میانگین امتیاز ایستگاه‌ها در هر مدل محاسبه شد.

نتایج و بحث

داده‌های دبی و رسوب مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های پرت حذف و سایر داده‌ها مورد بازسازی قرار گرفت. پس از دسته‌بندی داده‌های دبی و رسوب معلق اندازه‌گیری شده بر اساس مدل‌های مختلف مورد مطالعه، معادلات منحنی سنجه رسوب برای این مدل‌ها استخراج شد. ضرایب مربوط به معادلات سنجه در مدل‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب a در ایستگاه پاتاوه بین ۰/۰۰۳ تا ۳/۴۱۹، در ایستگاه قلات بین ۰/۰۶۸ تا ۶/۳۰۲ و در ایستگاه شاه‌مختار بین ۰/۰۲۴ تا ۲۰/۵۳۶ است. همچنین، ضریب b در ایستگاه‌های یادشده به ترتیب بین ۱/۰۷۰ تا ۳/۲۱۱، بین ۱/۱۶۶ تا ۲/۳۷۲ و بین ۰/۸۸۳ تا ۲/۶۷۴ بود (جدول ۲). این گونه فرض می‌شود که پارامتر a نشان‌دهنده شدت فرسایش و عرضه رسوب حوضه است. به بیان دیگر، در حوضه‌های با ضریب a بالاتر موادی که به راحتی فرسایش می‌یابند و حمل می‌شوند بیشتر هستند، در حالی که پارامتر توان، b، نشان‌دهنده ظرفیت انتقال و قدرت فرسایشی رواناب رودخانه است [۱۵]. این پارامترها به طور گسترده‌ای برای انعکاس تغییرات زمانی و مکانی رژیم‌های انتقال رسوب در بخش‌های مختلف در امتداد جریان اصلی تحت تأثیر سدسازی، جنگل‌زدایی/ احیای جنگل، شرایط آب و هواشناسی و ویژگی‌های بارندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶].

برای تعیین بهترین معادلات منحنی سنجه، معادلات ۵ تا ۱۱ به عنوان شاخص‌های سنجش خطای بروز یافته در معادلات مختلف استفاده شد. مقادیر مربوط به این شاخص‌ها برای مدل‌های مختلف در دسته‌بندی مورد بررسی و برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است. بر اساس مقادیر هر یک از شاخص‌های خطاسنجی در هر یک از زیر مدل‌ها به آن‌ها امتیازی بین ۱ تا ۲۷ تعلق می‌گیرد. به طور نمونه، مقادیر امتیاز کسب‌شده معیارهای مورد اشاره در هر یک از زیرمدل‌ها برای ایستگاه پاتاوه جدول ۶ ارائه شده است. در این راستا در ارزیابی نتایج به دست آمده در هر مدل خطاسنجی، به زیرمدل‌ها بر اساس مقادیر کسب‌شده در شاخص‌های خطاسنجی به ترتیب رده‌بندی بین

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

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

$$RME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \times 100 \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (11)$$

در این روابط O_i و P_i به ترتیب مقادیر برآوردشده و مشاهداتی رسوب، \bar{O} و \bar{P} به ترتیب میانگین برآوردشده و مشاهداتی مقادیر رسوب هستند. همچنین، S واریانس مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده و n تعداد نمونه است. مدلی که دارای کمترین مقدار RMSE و GSD، بیشترین R^2 و EF، کمترین مقدار NSME، RME و d باشد بهترین قابلیت پیش‌بینی را دارد. در نتیجه، آن مدل به عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد رسوب معلق از میان مدل‌ها مورد بررسی تعیین می‌شود.

پس از تعیین مقدار شاخص خطاسنجی برای مدل‌ها و زیرمدل‌هایی مورد مطالعه، بر اساس میزان مطلوبیت شاخص‌ها به آن‌ها امتیاز تعلق می‌شود. با توجه به بررسی ۲۷ معادله برای برآورد رسوب در این مطالعه، هر یک از معادلات امتیازی بین ۱ تا ۲۷ تعلق می‌گرفت. به طبع، امتیاز ۲۷ به معادله با بهترین برآورد و به همین صورت با کاهش دقت برآورد معادلات از امتیاز آن‌ها کم می‌شد و به معادله با کمترین دقت امتیاز ۱ تعلق می‌گرفت. بنابراین، با در نظر گرفتن همه شاخص‌های خطاسنجی دقیق‌ترین معادله امکان کسب ۱۸۹ امتیاز را داشت (۷ شاخص خطاسنجی ضرب در بالاترین امتیاز، ۲۷). اگر معادله‌ای با توجه به تمامی شاخص‌های خطاسنجی نامناسب بود حداقل امتیاز یعنی ۷ را کسب می‌کرد (۷ شاخص خطاسنجی ضرب در کمترین امتیاز، ۱). همچنین، برای تعیین بهترین مدل در هر ایستگاه از میانگین امتیازهای

کمترین دقت، امتیاز زیرمدل ۷ بوده و در شرایط حداکثر دقت هر زیرمدل امکان اخذ ۱۸۹ امتیاز را دارد. اگرچه این دو حالت برای هیچیک از معادلات مورد بررسی اتفاق نیفتاد. از مجموع امتیازهای کسب شده در شاخص‌های خطاسنجی برای هر زیرمدل، امتیاز زیرمدل‌ها تعیین شد و برای تعیین مدل بهینه از میانگین امتیاز کسب شده در زیرمدل‌های مربوطه در شاخص‌های مختلف استفاده شد. به طور مثال، امتیاز مدل فصلی با میانگین‌گیری از ۴ زیرمدل بهار، تابستان، پاییز و زمستان تعیین شد (جدول ۶). مقادیر میانگین امتیاز کسب شده در مدل‌های مختلف به روش یادشده برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است. به علاوه، میانگین امتیازهای کسب شده در سه ایستگاه به عنوان شاخص مدل برتر مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۷).

زیرمدل‌ها امتیاز داده می‌شود. بنابراین، زیرمدلی که بهترین تخمین را داشته باشد، بیشترین امتیاز (امتیاز ۲۷) و زیرمدلی که کمترین دقت را داشته باشد کمترین امتیاز (امتیاز ۱) را کسب می‌کند. مثلاً با توجه به جدول ۶، بر اساس رده‌بندی شاخص R^2 در زیرمدل‌های مختلف با توجه مقدار ۰/۸۳ در زیرمدل سالیانه، این مدل در رده نهم قرار گرفته و امتیاز ۱۹ را کسب کرده است. با در نظر گرفتن حداقل امتیاز ممکن در شاخص‌های خطاسنجی برای هر زیرمدل، یعنی ۱ و استفاده از ۷ شاخص خطاسنجی در ارزیابی زیرمدل‌ها، حداقل امتیاز ممکن برای هر زیرمدل ۷ است. همچنین، با در نظر گرفتن حداکثر امتیاز ممکن در هر شاخص خطاسنجی برای هر زیرمدل، یعنی ۲۷ و استفاده از ۷ شاخص خطاسنجی در ارزیابی زیرمدل‌ها، حداکثر امتیاز ممکن برای هر زیرمدل ۱۸۹ است. به بیان بهتر، از دیدگاه نظری در شرایط وجود

جدول ۲. مقادیر ضرایب منحنی سنجه (a) و (b) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

شاه‌مختار	قلات			پاتاوه		زیرمدل	مدل
	b	A	B	a	b		
۱/۷۷۳	۱/۱۶۷	۱/۸۰۹	۰/۷۸۵	۲/۱۸۴	۰/۱۸۳	سالیانه	سالیانه
۱/۹۰۷	۰/۵۳۱	۱/۷۳۶	۰/۷۱	۲/۰۲۰	۰/۲۱۹	بهار	
۱/۰۳۷	۴/۶۴۲	۲/۰۰۶	۰/۶۳۳	۱/۱۳۹	۲/۴۵۷	تابستان	فصلی
۱/۸۶۹	۱/۱۵۴	۲/۲۷۳	۰/۴۸۶	۲/۷۰۸	۰/۰۵۲۱	پاییز	
۲/۰۶۹	۰/۳۹۷	۱/۷۹۱	۰/۸۴۶	۲/۵۵۱	۰/۰۴۴	زمستان	
۱/۹۶۱	۰/۶۰۵	۲/۰۱۳	۰/۳۲۰	۱/۸۴۷	۰/۶۰۸	فروردین	
۰/۹۴۲	۶/۵۳۵	۱/۱۶۶	۲/۵۶۲	۱/۹۳۱	۰/۳۵۴	اردیبهشت	
۱/۴۶۵	۱/۳۲۲	۱/۵۹۵	۱/۰۳۵	۱/۴۷۰	۰/۷۶۷	خرداد	
۱/۱۳۴	۴/۱۱۰	۱/۴۵۹	۱/۷۰۱	۱/۱۱۰	۲/۰۵۷	تیر	
۰/۸۹۴	۵/۶۱۲	۱/۸۸۴	۰/۷۹۱	۱/۰۷۰	۳/۴۱۹	مرداد	
۱/۰۰۵	۴/۷۳۳	۲/۵۰۲	۰/۲۸۳	۱/۸۱۹	۰/۵۹۵	شهریور	ماهانه
۰/۸۸۳	۵/۴۱۴	۲/۲۹۲	۰/۴۴۱	۱/۹۶۱	۰/۲۲۱	مهر	
۰/۹۷۵	۴/۸۶۰	۲/۳۱۶	۰/۵۰۸	۲/۶۹۹	۰/۰۸۲	آبان	
۲/۱۲۰	۰/۷۵۴	۲/۲۷۲	۰/۴۷۳	۲/۷۵۷	۰/۰۳۷	آذر	
۲/۰۴۱	۰/۶۳۱	۱/۹۳۷	۰/۸۸۵	۲/۵۵۹	۰/۰۵۹	دی	
۲/۱۹۷	۰/۲۷۱	۱/۸۸۳	۰/۷۴۳	۲/۵۹۲	۰/۰۲۹	بهمن	
۲/۲۳۱	۰/۱۴۴	۱/۸۵۶	۰/۴۴۵	۳/۲۱۱	۰/۰۰۳	اسفند	
۰/۹۹۵	۴/۷۳۹	۱/۷۱۴	۰/۹۲۵	۱/۵۱۰	۱/۰۳۸	بخش اول	چندبخشی
۲/۶۷۴	۰/۰۲۴	۲/۳۷۲	۰/۰۸۶	۲/۱۳۵	۰/۳۵۷	بخش دوم	
۱/۷۷۳	۲۰/۵۳۶	۱/۸۰۹	۶/۳۰۲	۲/۱۸۴	۲/۵۱۵	مدل فائو	فائو
۲/۱۸۹	۰/۳۱۵	۲/۰۰۱	۰/۶۶۱	۲/۶۲۴	۰/۰۶۲	حد وسط	حد وسط دسته‌ها
۲/۰۱۸	۰/۵۲۴	۱/۸۴۹	۰/۷۳۸	۲/۲۹۷	۰/۱۰۹	پرآب	هیدرولوژیکی
۱/۰۴۸	۴/۳۰۷	۱/۶۴۲	۰/۹۸۸	۲/۱۱۵	۰/۲۲۸	کم‌آب	
۱/۰۵۴	۴/۲۵۶	۱/۶۲۰	۰/۹۸۸	۱/۸۴۰	۰/۶۹۷	خشک	اقلیمی
۱/۹۳۵	۰/۷۳۹	۱/۸۲۹	۰/۸۰۴	۲/۲۸۹	۰/۱۳۸	تر	
۱/۵۷۸	۱/۷۴۶	۱/۸۵۲	۰/۸۱۲	۱/۸۵۴	۰/۴۱۶	با پوشش	پوشش گیاهی
۱/۹۴۲	۰/۷۳۶	۱/۷۰۳	۰/۸۶۶	۲/۴۹۸	۰/۰۷۳	بدون پوشش	

جدول ۳. مقادیر آماره‌های خطاسنجی در مدل‌های مختلف تعیین منحنی سنج رسوب ایستگاه پاتاوه

نام مدل	نام زیرمدل	R ²	RMSE	EF	GSD	NMSE	RME	d
سالیانه	سالیانه	۰/۸۳	۱۰۶۳۳۳	-۰/۶	۶/۹	۱۳۵۱۳۷	۱/۱	۰/۷
فصلی	بهار	۰/۷۹	۵۳۸۰۶	-۰/۳	۳/۴	۵۷۹۸۵	۱/۰۷	۰/۷۲
	تابستان	۰/۴۸	۲۵	۰/۲	۰/۶	۲۲	-۰/۵۰	۰/۵۳
	پاییز	۰/۹۱	۹۰۳۸۰	۰/۶	۱/۹	۵۸۵۳۵	-۰/۷۲	۰/۸۳
	زمستان	۰/۸۴	۱۱۰۹۱۰	-۰/۹	۳/۰	۱۴۹۰۱۵	۱/۱۴	۰/۷۱
ماهانه	فروردین	۰/۸۳	۶۸۵۳۵	۰/۲۲	۱/۷	۵۷۹۲۲	-۰/۸۷	۰/۷۵
	اردیبهشت	۰/۴۱	۲۱۴۰۶	-۰/۰۳	۲۷/۵	۲۰۸۷۷	۱/۴۸	۰/۶۸
	خرداد	۰/۵۷	۷۶	۰/۸۱	۱/۰	۵۷	-۰/۵۷	۰/۸۶
	تیر	۰/۶۰	۱۷	۰/۵۵	۰/۵	۱۱	-۰/۳۶	۰/۶۸
	مرداد	۰/۵۲	۲۴	۰/۰۸	۰/۶	۲۲	-۰/۴۸	۰/۴۹
	شهریور	۰/۵۸	۳۰	۰/۰۸	۰/۸	۲۸	-۰/۵۰	۰/۵۷
	مهر	۰/۵۰	۲۶	۰/۱۴	۰/۸	۲۳	-۰/۵۵	۰/۵۴
	آبان	۰/۷۵	۳۴۴۷	۰/۲۵	۱/۵	۲۸۶۰	-۰/۹۴	۰/۷۸
	آذر	۰/۹۶	۱۵۵۰۲۶	۰/۵۶	۱/۱	۹۸۵۳۰	-۰/۴۷	۰/۸۱
	دی	۰/۸۶	۱۶۵۷۸	۰/۶۳	۱/۶	۹۷۰۳	۱/۱	۰/۸۳
	بهمن	۰/۹۲	۱۴۸۸۲۰	-۰/۳	۱/۷	۱۶۳۰۴۴	-۰/۸۱	۰/۷۲
	اسفند	۰/۶۷	۲۲۱۹۹	۰/۰	۱/۰	۲۱۳۰۱	۱/۴۹	۰/۶۱
چندبخشی	بخش اول	۰/۵۵	۴۳۹	۰/۱۳	۴/۶	۴۰۹	-۰/۶۷	۰/۶۰
	بخش دوم	۰/۵۰	۳۱۱۷۱۶	-۲/۴۸	۲/۹	۵۷۱۴۳۸	۱/۶۹	۰/۵۶
فائو	مدل فائو	۰/۲۰	۱۵۱۶۶۷۲	-۳۳۰	۷/۲	۲۷۴۹۲۶۲۳	۲/۱	۰/۱۶
حد وسط دسته‌ها	حد وسط	۰/۸۱	۴۷۷۶۹	۰/۰	۱/۸	۴۶۶۸۰	۱/۱۹	۰/۳۳
	پرآب	۰/۸۴	۲۳۸۰۰۳	-۱/۹۶	۳/۴	۴۰۹۴۹۱	۱/۳۳	۰/۶۴
هیدرولوژیکی	کم‌آب	۰/۷۳	۱۱۱۲۱	۰/۳۱	۱۵/۴۶	۹۱۱۹	-۰/۹۸	۰/۷۱
	خشک	۰/۶۴	۸۹۲۸	۰/۰۲	۷۲/۱	۸۷۹۶	-۰/۷۵	۰/۶۴
اقلیمی	تر	۰/۸۴	۲۳۱۷۷۶	-۳/۱۰	۴/۹۰	۴۶۱۸۲۰	۱/۲۷	۰/۶۳
	با پوشش	۰/۸۲	۲۲۱۴۵	۰/۵۵	۵/۶۰	۱۴۶۹۶	-۰/۸۲	۰/۸۱
پوشش گیاهی	بدون پوشش	۰/۸۵	۱۱۹۲۶۳	۰/۰۳	۳/۲	۱۱۶۲۴۷	۱/۲۰	۰/۷۶

جدول ۴. مقادیر آماره‌های خطاسنجی در مدل‌های مختلف تعیین منحنی سنج رسوب ایستگاه قلات

نام مدل	نام زیرمدل	R ²	RMSE	EF	GSD	NMSE	RME	d
سالیانه	سالیانه	۰/۷۶	۲۷۱۱	۰/۷	۴/۱۹	۱۳۹۶	۱/۳۰	۰/۸۱
فصلی	بهار	۰/۷۳	۲۲۸۰	۰/۱	۱۲/۱	۲۱۰۷	-۰/۸۳	۰/۶۵
	تابستان	۰/۴۸	۱۰	۰/۶	۰/۷۳	۶/۵	۱/۲۴	۰/۸۴
	پاییز	۰/۷۵	۲۶۸۹۴	-۲۶/۷	۶/۹۷	۱۴۰۵۴۱	۱/۴۲	۰/۴۵
	زمستان	۰/۷۵	۴۱۸۷	-۲۶/۶	۲/۳	۲۰۱۵	۱/۴۰	۰/۸۲
ماهانه	فروردین	۰/۷۰	۳۷۲۷	۰/۱	۶/۳۳	۳۴۳۹	۱/۴۰	۰/۶۱
	اردیبهشت	۰/۴۷	۶۵	۰/۶	۱/۰	۴۲	-۰/۶۴	۰/۶۶
	خرداد	۰/۶۱	۲۰	۰/۶	۰/۷۶	۱۲	-۰/۴۹	۰/۶۸
	تیر	۰/۵۵	۱۱	۰/۶	۰/۵۵	۶	-۰/۵۵	۰/۶۳
	مرداد	۰/۵۰	۱۰	۰/۴	۰/۷۹	۸	۱/۰	۰/۵۸
	شهریور	۰/۴۱	۱۱	۰/۴	۱/۲۳	۸	۱/۷۴	۰/۵۷
	مهر	۰/۴۵	۹	۰/۶	۰/۸۷	۶	۱/۴۳	۰/۶۳
	آبان	۰/۴۷	۳۰	-۰/۳	۲/۰	۲۴	۱/۴۵	۰/۶۱
	آذر	۰/۸۷	۴۵۱۱۸	-۲۶/۳	۳/۹۸	۲۳۰۴۸۲	۱/۳۴	۰/۴۴
	دی	۰/۸۰	۲۹۷۵	۰/۳	۲/۴۹	۲۴۶۹	۱/۲۴	۰/۷۴
	بهمن	۰/۸۱	۱۲۰۲۲	-۰/۱	۲/۲۱	۱۶۸۴۶	۱/۲۳	۰/۷۳
	اسفند	۰/۶۵	۵۰۳۶	۰/۷	۴/۴۲	۲۷۰۱	۱/۲۱	۰/۸۰
چندبخشی	بخش اول	۰/۵۱	۳۹	۰/۳	۱/۷۸	۳۳	۱/۲۱	۰/۶۰
	بخش دوم	۰/۶۱	۲۹۲۴۲	-۵/۸	۳/۰۹	۷۵۶۶۷	۱/۴۲	۰/۶۰
فائو	مدل فائو	۰/۷۴	۳۳۷۵۹	-۴۰/۳	۶/۵۰	۲۱۶۵۴۱	۱۳/۴۲	۰/۴۲
حد وسط دسته‌ها	حد وسط	۰/۹۰	۸۹۷	۰/۹۶	۰/۵۲	۱۷۱	-۰/۷۲	۰/۶۵
	پرآب	۰/۷۷	۴۶۰۵	-۰/۷	۲/۵۸	۲۶۵۲	۱/۴۷	۰/۸۱
هیدرولوژیکی	کم‌آب	۰/۵۵	۲۷	۰/۷	۱/۰۵	۱۵	۱/۲۴	۰/۷۲
	خشک	۰/۵۸	۲۳	۰/۸	-۰/۸۶	۱۱	۱/۲۰	۰/۷۴
اقلیمی	تر	۰/۷۸	۴۰۵۱	۰/۷	۲/۸۳	۲۲۴۷	۱/۴۸	۰/۸۱
	با پوشش	۰/۷۹	۱۴۳۸	۰/۲	۱۶/۳۰	۱۳۰۰	۱/۲۰	۰/۶۹
پوشش گیاهی	بدون پوشش	۰/۷۱	۴۸۳۲	۰/۶	۲/۶۷	۳۰۰۵	۱/۴۶	۰/۸۵

جدول ۵. مقادیر آماره‌های خطاسنجی در مدل‌های مختلف تعیین منحنی سنج‌رسوب ایستگاه شاه‌مختار

مدل	زیرمدل	R ²	RMSE	EF	GSD	NMSE	RME	d
سالیانه	سالیانه	۰/۸۶	۵۰۸۵۹	۰/۳	۱۷/۱۵	۴۲۳۲۱	۰/۹۷	۰/۷۳
فصلی	بهار	۰/۸۵	۲۱۸۹۸	۰/۴	۸/۰۸	۱۶۴۱۱	۰/۹۱	۰/۷۳
	تابستان	۰/۵۶	۱۵	۰/۵	۰/۵۶	۱۰	۰/۴۲	۰/۶۲
	پاییز	۰/۸۴	۱۰۷۸۷	۰/۹	۳/۲۵	۳۷۶۶	۰/۷۰	۰/۸۸
	زمستان	۰/۸۵	۷۹۹۷۱	۰/۵	۶/۲۲	۵۶۶۳۳	۱/۳۵	۰/۷۶
ماهانه	فروردین	۰/۷۹	۳۰۰۶۳	۰/۵	۲/۵۶	۱۹۵۷۸	۱/۶۴	۰/۷۴
	اردیبهشت	۰/۶۹	۷۰	۰/۷	۰/۵۶	۳۹	۰/۳۴	۰/۶۹
	خرداد	۰/۷۴	۱۹	۰/۷	۰/۴۵	۹	۰/۴۳	۰/۷۷
	تیر	۰/۶۲	۱۶	۰/۶	۰/۴۶	۹	۰/۴۷	۰/۶۸
	مرداد	۰/۵۲	۱۳	۰/۴	۰/۵۶	۱۰	۰/۳۶	۰/۵۸
	شهریور	۰/۴۴	۱۳	۰/۳	۰/۶۳	۱۱	۰/۴۲	۰/۵۲
	مهر	۰/۳۹	۱۲	۰/۴	۰/۵۵	۹	۰/۴۲	۰/۴۹
	آبان	۰/۵۴	۱۵	۰/۵	۰/۵۶	۱۰	۰/۴۲	۰/۶۴
	آذر	۰/۸۸	۷۳۱۳۵	-۱/۰	۱/۴۵	۱۰۱۵۱۲	۰/۹۵	۰/۷۲
	دی	۰/۸۷	۶۷۶۹۰	۰/۷	۳/۶۸	۳۶۱۵۳	۱/۵۵	۰/۸۱
	بهمن	۰/۸۶	۲۷۶۶۸	۰/۹	۱/۶۲	۸۳۱۴	۱/۱۴	۰/۸۹
	اسفند	۰/۸۶	۱۰۰۸۳۴	۰/۳	۸/۲۱	۸۱۸۱۵	۱/۱۱	۰/۷۱
چندبخشی	بخش اول	۰/۶۳	۳۰	۰/۵	۰/۸۱	۲۲	۰/۴۴	۰/۶۷
	بخش دوم	۰/۷۷	۶۹۸۵۶	۰/۷	۱/۲۷	۹۱۱۰۷	۱/۲۰	۰/۸۳
فائو	مدل فائو	۰/۸۰	۱۹۲	-۵/۹	۰/۰۰۴	۴۱۶۷۹۱	۲۵	۰/۵۲
حد وسط دسته‌ها	حد وسط	۰/۸۸	۲۳۰۵۳	۰/۷۵	۲/۵۴	۱۱۷۰۹	۰/۹۲	۰/۷۸
	هیدرولوژیکی	پرآب	۰/۸۶	۹۶۴۳۹	-۰/۱	۸۵۲	۱۰۰۵۱۲	۰/۸۰
اقليمی	کم‌آب	۰/۷۱	۶۲	۰/۰	۵/۸	۶۲	۰/۷۰	۰/۵۰
	خشک	۰/۷۲	۳۱	۰/۸	۰/۷۲	۱۴	۰/۴۴	۰/۹۱
پوشش گیاهی	تر	۰/۸۷	۶۳۰۹۱	۰/۴	۶/۹۷	۴۶۶۸۶	۱/۲۶	۰/۷۶
	با پوشش	۰/۸۳	۱۶۶۸۱	۰/۲	۲۶/۵۹	۱۴۶۱۲	۰/۷۰	۰/۷۰
	بدون پوشش	۰/۸۷	۶۶۷۹۷	۰/۵	۷/۶۵	۴۸۹۴۷	۱/۱۸	۰/۷۶

جدول ۶. مقادیر امتیازهای کسب‌شده هر مدل توسط آماره‌های خطاسنجی در ایستگاه پاتاوه

مدل	زیرمدل	R ²	RMSE	EF	GSD	NMSE	RME	D	مجموع امتیاز زیر مدل	میانگین امتیاز هر مدل
سالیانه	سالیانه	۱۸	۹	۶	۶	۷	۱۱	۱۳	۷۰	۷۰
فصلی	بهار	۱۵	۱۲	۸	۱۱	۱۱	۱۲	۹	۷۸	۷۸
	تابستان	۳	۲۵	۱۸	۲۵	۲۵	۲۳	۲۴	۱۴۳	۱۴۳
	پاییز	۲۵	۱۰	۲۵	۱۵	۱۰	۱۹	۲	۱۰۶	۱۰۶
	زمستان	۲۲	۸	۵	۱۳	۶	۹	۱۲	۷۳	۷۳
ماهانه	فروردین	۱۹	۱۱	۱۹	۱۷	۱۲	۱۵	۸	۱۰۱	۱۰۱
	اردیبهشت	۲	۱۶	۹	۲	۱۵	۴	۱۴	۶۲	۶۲
	خرداد	۸	۲۲	۲۷	۲۲	۲۲	۲۱	۱	۱۲۳	۱۲۳
	تیر	۱۰	۲۷	۲۲	۲۷	۲۷	۲۷	۱۵	۱۵۵	۱۵۵
	مرداد	۶	۲۶	۱۵	۲۶	۲۶	۲۵	۲۵	۱۴۹	۱۴۹
	شهریور	۹	۲۳	۱۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۱	۱۳۸	۱۳۸
	مهر	۵	۲۴	۱۷	۲۴	۲۴	۲۴	۲۳	۱۳۸	۱۳۸
	آبان	۱۴	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۴	۶	۱۱۴	۱۱۴
	آذر	۲۷	۵	۲۴	۲۱	۱۹	۹	۴	۱۱۶	۱۱۶
	دی	۲۴	۱۷	۲۶	۱۹	۱۷	۱۰	۳	۱۱۶	۱۱۶
	بهمن	۲۶	۶	۷	۱۸	۵	۱۷	۱۰	۸۹	۸۹
	اسفند	۱۲	۱۴	۱۱	۴	۱۴	۳	۱۹	۷۷	۷۷
چندبخشی	بخش اول	۷	۲۱	۱۶	۹	۲۱	۲۰	۲۰	۱۱۴	۸۱/۵
	بخش دوم	۵	۲	۳	۱۴	۲	۲	۲۲	۴۹	۴۹
فائو	مدل فائو	۱	۱	۱	۵	۱	۱	۲۷	۳۷	۳۷
حد وسط دسته‌ها	حد وسط	۱۶	۱۳	۱۰	۱۶	۱۳	۸	۲۶	۱۰۲	۱۰۲
هیدرولوژیکی	پرآب	۲۲	۳	۴	۱۰	۴	۵	۱۷	۶۴	۸۰/۵
	کم‌آب	۱۳	۱۸	۲۱	۳	۱۸	۱۳	۱۱	۹۷	۹۷
اقليمی	خشک	۱۱	۱۹	۱۲	۱	۱۹	۱۸	۱۶	۹۶	۷۹/۵
	تر	۲۲	۴	۲	۸	۳	۶	۱۸	۶۳	۶۳
پوشش گیاهی	با پوشش	۱۷	۱۵	۲۳	۷	۱۶	۱۶	۵	۹۹	۸۸
	بدون پوشش	۲۳	۷	۱۳	۱۲	۸	۷	۷	۷۷	۷۷

بیشتری در تخمین رسوب انتقالی داشت. به علاوه، این مدل‌ها در ایستگاه قلات دارای امتیازهای بیشتری از نظر معیارهای خطاسنجی بودند. در ایستگاه پاتاوه مدل پوشش گیاهی نسبت به دو مدل دیگری برتری داشت. این موضوع نشان‌دهنده تأثیرگذاری در نظر گرفتن وجود پوشش گیاهی در تخمین رسوب در برآورد رسوب در ایستگاه است، اگرچه در دو ایستگاه دیگر مدل اقلیمی مناسب‌تر از دو روش دیگر بود. به بیانی، در نظر گرفتن شرایط اقلیمی بیش از در نظر گرفتن پوشش گیاهی یا شرایط هیدرولوژیک در ایستگاه‌های یادشده منجر به افزایش دقت می‌شود. با این وجود، به لحاظ نزدیکی زمانی دوره‌های وجود پوشش گیاهی، کم‌آبی و خشکی اقلیمی با هم و دوره‌های بدون پوشش گیاهی، پرآبی و اقلیم مرطوب با هم، چگونگی توزیع دقت در این سه مدل مشابه بود. به نحوی که در هر سه ایستگاه دقت در دوره‌های با پوشش گیاهی، کم‌آبی و خشک بیش از دوره‌های بدون پوشش گیاهی، پرآبی و مرطوب بود. دلیل بروز خطای کمتر در ماه‌های با پوشش گیاهی، سیلابی و مرطوب بودن دامنه تغییرات دبی رودخانه در این دوره‌ها است. در این دوره‌ها عموماً دبی نزدیک به دبی پایه بوده و انتقال رسوب کمتر از دوره‌های مکمل تحت تأثیر دبی بوده‌است. در حالی که، در دوره‌های بدون پوشش گیاهی، مرطوب و سیلابی سایر عوامل همچون مقدار و شدت بارندگی، که در منحنی‌های سنجه لحاظ نمی‌شود، هم بر میزان رسوب انتقالی مؤثر است. طباطبایی و همکاران (۱۳۹۸) دریافتند که به طور کلی خطای مدل‌های مختلف منحنی سنجه با افزایش دبی افزایش می‌یابد [۱۷].

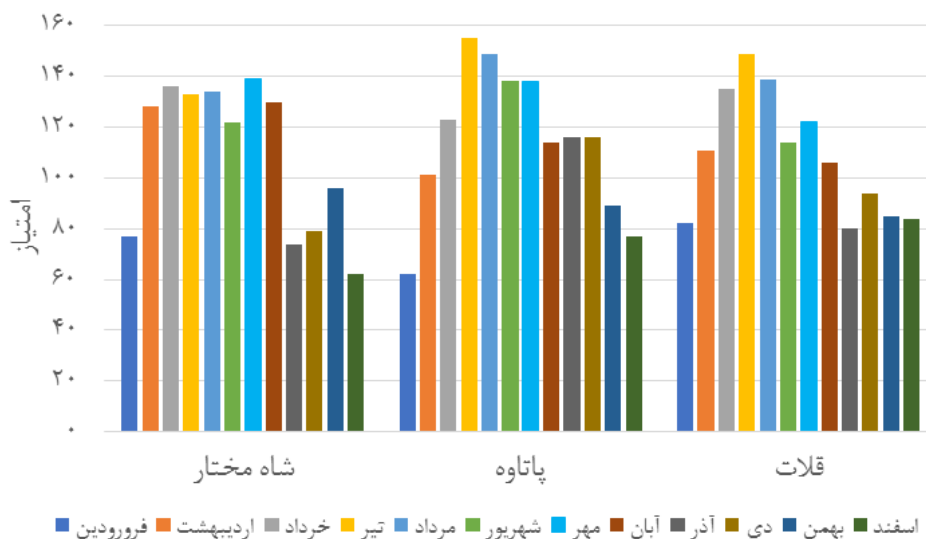
در مجموع نتایج نشان داد استفاده از داده‌ها در حصول منحنی سنجه رسوب بدون تفکیک زمانی، رسوب را با بیشترین مقدار خطا برآورد می‌کند (شکل ۳). این موضوع در بسیاری از تحقیقات از جمله رضانی‌پور و همکاران (۱۳۹۶)، مردیان و همکاران (۱۳۹۷) تأیید شده است [۱۸] و [۱۹]. نتایج حاصل از مدل‌های مختلف نشان داد در مجموع اگرچه مدل ماهیانه در ایستگاه‌های پاتاوه و شاه‌مختار دقت بیشتری در برآورد دبی رسوب داشت، اما در ایستگاه قلات و نیز در مجموع روش حد واسط دست‌ها برآورد بهتری از رسوب به دنبال داشت. به طور کلی، تقسیم‌بندی زمانی داده‌ها به خردترین شکل ممکن یعنی

طبق نتایج به دست آمده مدل‌هایی که با در نظر گرفتن دسته‌بندی داده‌ها به دست آمده‌اند نسبت به مدل سالانه که از داده‌ها بدون تقسیم‌بندی استفاده می‌کند، امتیازهای بیشتری دارند. بنابراین، به طور کلی هرگونه تقسیم‌بندی داده‌ها موجب بهبود تخمین میزان رسوب با استفاده منحنی سنجه می‌شود (جدول ۷). نتایج بررسی آماری در ایستگاه‌های پاتاوه، قلات و شاه‌مختار نشان داد مدل‌های ماهانه و حد وسط دسته‌ها دارای کمترین خطا هستند (جدول ۷). به طور کلی، تقسیم‌بندی زمانی داده‌ها تأثیر مثبتی در کاهش خطای تخمین میزان رسوب دارد. به نحوی که با تقسیم‌بندی داده‌ها به فصلی و همچنین ماهانه خطا کاهش می‌یافت. به طور کلی، خطا در مدل ماهانه کمتر از مدل فصلی بود. هیستوگرام امتیاز ماه‌های و فصل‌های مختلف، در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. بین ماه‌های مختلف، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور، مهر و آبان دارای امتیاز بیشتری بودند و سایر ماه‌ها امتیاز کمی داشتند. همچنین، بین فصل‌های مختلف، فصل تابستان دارای بیشترین امتیاز و فصل زمستان کمترین امتیاز بودند. به طور کلی، با توجه به بررسی امتیازهای کسب‌شده توسط ماه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که مقدار امتیاز ماه‌ها و فصل‌های مختلف با میزان دبی جریان رابطه عکس دارد.

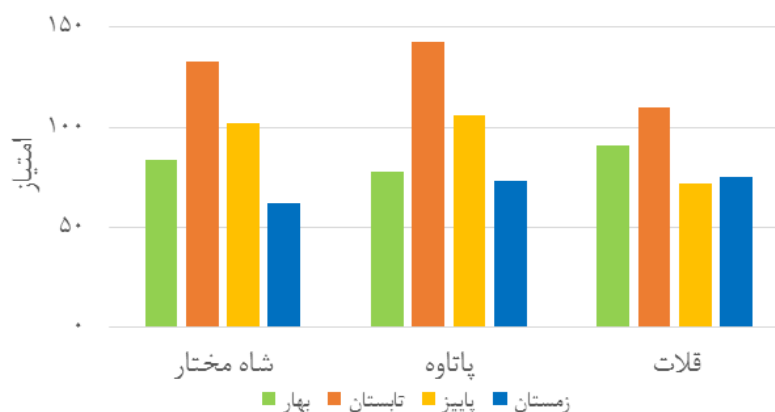
نتایج نشان داد استفاده از روش تصحیحی فائو، که به صورت سالیانه اما با ضرایب متفاوت از روش سالانه استفاده می‌شود، در دو ایستگاه قلات و پاتاوه کمترین دقت را در برآورد دبی رسوب داشت و تنها در ایستگاه شاه‌مختار به طور نسبی قابلیت برآورد میزان رسوب انتقالی را داشت. همچنین، با وجود اینکه استفاده از روش چندخطی در ایستگاه شاه‌مختار موجب برآورد بهتری از رسوب شد، اما در مجموع استفاده از این روش نتایج قابل قبولی به همراه نداشت. استفاده از حد وسط دسته‌ها می‌تواند به شکل معناداری دقت برآورد دبی رسوب انتقالی را افزایش دهد. بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، در ایستگاه قلات بهترین مدل برای تخمین رسوب انتقالی حد وسط دسته‌ها بود، اگرچه در دو ایستگاه دیگر هم با اختلاف کمی در رده دوم از نظر دقت در برآورد رسوب قرار گرفت. از بین سه روش اقلیمی، هیدرولوژیکی و پوشش گیاهی، روش اقلیمی، به طور میانگین، روش اقلیمی دقت

به علاوه، روش اصلاحی فائو که با تغییر ضرایب، مقدار رسوب را تخمین می‌زند، موجب بهبود در دقت برآوردها نشد. به صورت مشابه، در تحقیق احمدی و همکاران (۱۳۹۱) روش فائو در اغلب موارد بدترین روش برآورد رسوب در جاجرود تشخیص داده شد [۲۰]. اگرچه برخی محققان همچون لطیفی و حسن‌زاده (۱۳۸۶) [۲۵] استفاده از روش چندخطی را موجب افزایش دقت برآورد رسوب در رودخانه گاماسیاب دانسته‌اند، در تحقیق حاضر، استفاده از روش چندخطی اگرچه موجب بهبود تخمین مقدار رسوب شد. با این وجود، نسبت به روش‌های تفکیک زمانی از دقت بیشتری برخوردار نبود.

ماهانه موجب بهبود دقت شد. به شکل مشابه، احمدی و همکاران (۱۳۹۱)، یوسفی و برزگری (۱۳۹۴)، اولیویرا و کوارشما (۲۰۱۷)، فورسا و همکاران (۲۰۲۱) و مسلم‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) [۲۰-۲۲، ۱۰ و ۲۳] مزیت استفاده از تفکیک زمانی داده‌ها را ذکر کرده بودند. روش حد وسط داده‌ها به دلیل کاهش چشمگیر دامنه نوسان‌های داده‌ها موجب افزایش دقت منحنی سنججه می‌شود، اگر چه چگونگی تعیین دسته‌ها می‌تواند دقت برآورد این معادله را تحت تأثیر قرار دهد. در همین راستا، سبهبانی (۱۳۸۹) روش حد وسط دسته‌ها را بهترین روش در تخمین رسوب رودخانه حبله‌رود معرفی کرد [۲۴].



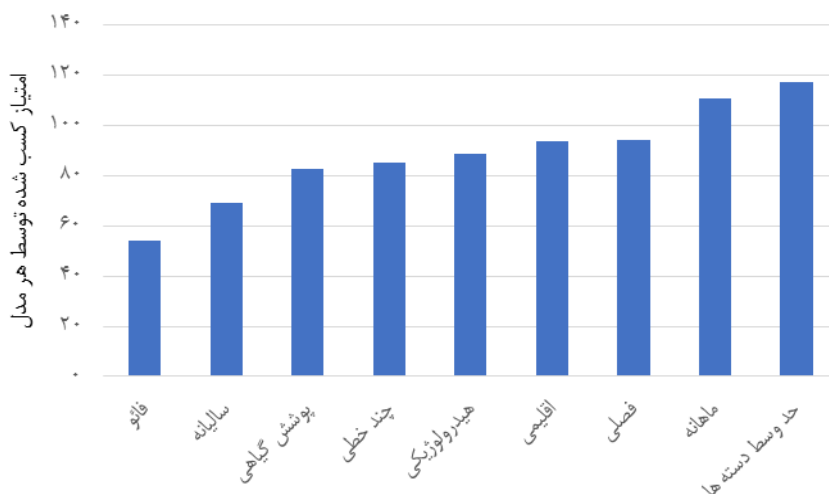
شکل ۱. هیستوگرام امتیاز ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۲. هیستوگرام امتیاز فصل‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۷. امتیازهای کسب‌شده هر مدل توسط آماره‌ها خطاسنجی برای ایستگاه‌های مطالعه‌شده

نام مدل	مجموع امتیازهای حاصل از معیارها خطاسنجی			میانگین امتیازهای هر مدل
	پاتاوه	قلات	شاهمختار	
مدل سالیانه	۷۰	۶۵	۷۲	۶۹
مدل فصلی	۱۰۰	۸۷	۹۲/۲	۹۴/۱
مدل ماهانه	۱۱۴/۸	۱۰۸/۴	۱۰۹/۲	۱۱۰/۸
مدل چندخطی	۸۱/۵	۸۳/۵	۹۱	۸۵/۳
مدل فائو	۳۷	۴۰	۸۵	۵۴
مدل حد وسط دسته‌ها	۱۰۲	۱۴۲	۱۰۸	۱۱۷/۳
مدل هیدرولوژیکی	۸۰/۵	۱۰۲	۸۳	۸۸/۵
مدل اقلیمی	۷۹/۵	۱۰۷	۹۴	۹۳/۵
مدل پوشش گیاهی	۸۸	۸۲/۵	۷۷	۸۲/۵



شکل ۳. اولویت در استفاده از مدل‌های مورد مطالعه در تحقیق

معلق در این رودخانه در فصل مرطوب منتقل می‌شود [۲۲]. اگرچه دلایل متفاوتی همچون وجود داشتن یا نداشتن پوشش گیاهی در ماه‌های مختلف، در توزیع زمانی رسوب را می‌توان ذکر کرد، یکی از دلایل مهم آن تأثیر نوع استفاده از زمین در برهه‌های زمانی مختلف ذکر شده است [۲۷ و ۲۸].

نتیجه‌گیری

به طور کلی، برآورد دقیق رسوب برای طراحی، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های آبی و شبکه‌های آبیاری اهمیت زیادی دارد. به دلیل سهولت استفاده، منحنی‌های سنجه همچنان به عنوان ابزاری کارآمد برای تخمین و پیش‌بینی میزان رسوب انتقالی در رودخانه‌ها مورد توجه هستند. تقسیم‌بندی دوره‌های زمانی، روشی مؤثر در افزایش دقت

به طور کلی، پژوهشگران زیادی استفاده از تفکیک زمانی داده‌ها در استفاده از منحنی‌های سنجه برای افزایش دقت تخمین رسوب رودخانه‌ها را مؤثر دانسته‌اند [۲۳ و ۲۶]، اگرچه در تحقیقاتشان مبنای متفاوتی جهت دسته‌بندی داده‌ها در نظر گرفته‌اند. احمدی و همکاران (۱۳۹۱) در تفکیک فصلی و ماهانه داده‌ها، تفکیک ماهانه را مناسب‌تر دانسته‌اند. زکوان و احمد (۲۰۲۱) تفکیک ماهانه را بهترین مقیاس تفکیک در منحنی سنجه رودخانه گنگ معرفی کردند [۲۶]، اگرچه هیچ رابطه ثابتی بین پارامترهای منحنی سنجه و مقدار دبی یا فصل یافت نشد. متفاوت بودن معادلات سنجه به دلیل جریان رسوب متفاوت در دوره‌های متفاوت است. اولیویرا و کوارشما (۲۰۱۷) با بررسی ماهانه و فصلی جریان رسوب در رودخانه داس برزیل دریافتند که بیش از ۹۰ درصد از مواد

- Sediment Rating Curve and Comparison of it with the Some Statistical Methods for Estimating Suspended Sediment Load (Case Study: Gamasiab Watershed). *J Watershed Manag Res.* 2019;10(20):83–96.
- [6]. Horowitz AJ. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrol Process.* 2003;17(17):3387–409.
- [7]. Ahn KH, Yellen B, Steinschneider S. Dynamic linear models to explore time-varying suspended sediment-discharge rating curves. *Water Resour Res.* 2017;53(6):4802–20.
- [8]. Eassa Kia, Eassa; Emadi A. Comparison of Statistical Methods for Long-Term Suspended Sediment Yield Estimation (Case Study: Babolrood River). *J Watershed Manag Res.* 2013;4(8):15–27.
- [9]. Najafinezhad, Ali; Babaei, Akbar; Saniei, Ebrahim; Mahmoudi O. Comparison of seasonal suspended sediment measurement curves and monthly suspended load in a number of rivers in Golestan province. In: 4th national conference on erosion and sedimentation. 2010.
- [10]. Fortesa J, Ricci GF, García-Comendador J, Gentile F, Estrany J, Sauquet E, et al. Analysing hydrological and sediment transport regime in two Mediterranean intermittent rivers. *Catena.* 2021;196.
- [11]. Saghafian, Bahram; Ghermezcheshmeh, Bagher; Samiei M. Regional Analysis of Sediment in the southwestern Watersheds of Iran. 2007.
- [12]. Jansson MB. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *J Hydrol.* 1996;183(3–4):227–41.
- [13]. Jones, K.R; Berney, O.; Carr, O.p.; Barrett EC. *Arid zone hydrology for agricultural development.* Rome, Italy.; 1981. 271 p.
- [14]. Arab-Khedri, Mahmoud; Hakimkhani, Shahrokh; Vardani J. Validity of extrapolation methods in estimating the average annual suspended sedimentation (17 hydrometric stations of the country). *Q J Agric Sci Nat Resour.* 2004;11(3):123–32.
- [15]. Asselman NEM. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J Hydrol.* 2000;234(3–4):228–48.
- [16]. Sun P, Wu Y, Gao J, Yao Y, Zhao F, Lei X, et al. Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the Middle Yellow River Basin. *Sci Total Environ.* 2020;698.
- منحنی‌های سنج‌سنج است. تحقیق حاضر با هدف بررسی کارآمدی تأثیر تقسیم‌بندی زمانی داده‌های دبی جریان و رسوب بر افزایش دقت منحنی سنج رسوب در سه ایستگاه از رودخانه بشار انجام شده است. طبق نتایج این تحقیق، تقسیم‌بندی زمانی به هر نحو ممکن موجب افزایش دقت تخمین رسوب انتقالی دارد. بیشترین دقت در تقسیم‌بندی مدل‌های ماهانه و حد وسط دسته‌ها مشاهده شد. همچنین، روش تصحیحی فائو موجب کاهش دقت برآورد رسوب در این رودخانه شد. استفاده از مدل‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و پوشش گیاهی اگرچه موجب بهبود تخمین‌ها شد. اما از مدل‌های ماهانه و فصلی دقت کمتری داشت. به طور کلی، تقسیم‌بندی دوره‌های زمانی، روشی مؤثر در افزایش دقت منحنی‌های سنج‌سنج است. تفاوت در دقت مدل‌های مختلف نشان‌دهنده تأثیر عواملی غیر دبی در ایجاد رسوب در رودخانه است. برای برآورد دقیق‌تر از میزان رسوب ارائه مدل‌های جامع‌تر که سایر عوامل را در نظر می‌گیرند ضروری به نظر می‌رسد.
- ### قدردانی
- این تحقیق برگرفته از پایان‌نامه دانشجویی است و به این‌وسیله از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌شود.
- ### منابع
- [1]. Vanmaercke M, Poesen J, Broeckx J, Nyssen J. Sediment yield in Africa. *Earth-Science Rev.* 2014;136:350–68.
- [2]. Zhang HY, Shi ZH, Fang NF, Guo MH. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. *Geomorphology.* 2015;234:19–27.
- [3]. Kasir H, Naserin A, Jafari A, ... Field Evaluation of Some of the Grain-size Analysis Methods for Determining Hydraulic Conductivity of Streambed. *Iran J Soil ... [Internet].* 2020; Available from: https://ijswr.ut.ac.ir/mobile/article_76422_1f4d629fe61251e2ed9e4bbc69077692.pdf
- [4]. Valipour L, Naserin A, Jalily S. Investigating the Relationship between Hydrological Drought and the Electrical Conductivity of the River in the Downstream Stations of the Karkheh River. *Iran J Ecohydrol.* 2023;9(4):815–31.
- [5]. Raeesi M, Najafinejad A, Azim Mohseni M. Investigation of Temporal Phenomena of

- [17]. Tabatabaei M, Salehpour Jam A, Hosseini SA. Presenting a New Approach to Increase the Efficiency of the Sediment Rating Curve Model in Estimating Suspended Sediment Load in Watersheds (Case Study: Mahabad-Chai River, Lake Urmia Basin, West Azarbayegan Province, Iran). *J Watershed Manag Res.* 2019;10(19):181-93.
- [18]. Ramezanipour, Elyas; Mosaedi, abolfazl; Mosadeghi M. Determination of the Best Model for Estimation of Suspended Sediment by using Statistical Error Criteria (Case study: Some Sub-Watersheds of Kashaf Roud). *J Watershed Manag Res.* 2017;8(15):112-24.
- [19]. Mardian, Mehdi; Solaimani, Karim; Shahedi, Kaka; Kavian, Ataollah; Ghadimi F. Analysis of Temporal Variations for the Suspended Load Transport in the Marboreh River, Darreh-Takht, Lorestan Province, Iran. *Watershed Manag Res.* 2018;31(1)(118):60-72.
- [20]. Ahmadi, Hassan; Malekian, Arash; Abedi R. The most Appropriate Statistical Method for Suspended Sediment Estimation of Rivers (Case Study: Roodak Station of the Jajrood Basin). *Q J Environ Eros Res.* 2012;2(1):78-88.
- [21]. Yousefi, Mohsen; Barzegari F. Determining the most suitable measuring curve method and comparing it with artificial neural network in order to estimate suspended sediments (case study: Lorestan province). *J Range Watershed Manag.* 2015;68(2):413-426.
- [22]. Oliveira KSS, Quaresma V da S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *J South Am Earth Sci.* 2017;78:101-15.
- [23]. Moslemzadeh M, Roueinian K, Salarijazi M. Improving the estimation of sedimentation in multi-purpose dam reservoirs, considering hydrography and time scale classification of sediment rating curve (case study: Dez Dam). *Arab J Geosci.* 2022;15(3).
- [24]. Sobhani H. Application and comparison of statistical methods for estimation of suspended sediment load (case study: Hable Rood watershed). Semnan University; 2010.
- [25]. Latifi, A; Hassanzadeh Y. The comparison of different methods of estimating the suspended sediment load in rivers and choosing the most appropriate method (case study: Gamasiab River). In: 7th International River Engineering Conference. Ahvaz; 2007. p. 9.
- [26]. Zakwan M, Ahmad Z. Analysis of sediment and discharge ratings of Ganga River, India. *Arab J Geosci.* 2021;14(19).
- [27]. Esfandiari, M; Moeini, M; Moqadasi A. Effect of land use and vegetation on erosion forms and sediment production (Case study: Vers Watershed Qazvin Province). *Q Geogr J Territ.* 2014;11(42):51-62.
- [28]. Sadeghi SHR, Khazayi M, Mirnia SK. Effect of soil surface disturbance on overland flow, sediment yield, and nutrient loss in a hyrcanian deciduous forest stand in Iran. *Catena.* 2022;218.