



## بهینه‌یابی مناسب‌ترین مدل برآورد رسوب معلق رودخانه‌ی سد آبشینه‌ی همدان

علی‌رضا ایلدرمی<sup>۱\*</sup>، مهران محمدپناه مقدم<sup>۲</sup>

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

### چکیده

مدل‌های ریاضی با استفاده از معادلات حاکم بر انتقال، توزیع و انباشت رسوب، یکی از روش‌های کارآمد برای پیش‌بینی و برآورد بار معلق رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. در این بررسی بار معلق رودخانه سد آبشینه همدان با استفاده از مدل‌های USBR، منحنی حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه فصلی و FAO برآورد و ضمن نمونه‌برداری مستقیم از بار معلق، مدل‌ها با روش اصلاحی تبدیل لگاریتمی (CF1, CF2) و مدل آماری GS<sup>+</sup> ارزیابی و مناسب‌ترین مدل برآورد بار معلق رودخانه انتخاب شد. نتایج نشان داد که مدل فائو به دلیل بررسی پارامترهای بیشتر در شرایط مرزی و کمترین مقدار ضرایب تصحیح CF1 و CF2 و خطای کمتر میزان رسوبات بار معلق را با دقت و کارایی قابل‌قبول‌تری محاسبه نموده و از برآزش و تطابق بیشتری با مقادیر رسوب مشاهداتی برخوردار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی نتایج متفاوتی نسبت به هم داشته و تقسیم‌بندی داده‌ها برحسب زمان وقوع، تأثیر فراوانی در کاهش خطا دارد، به طوری که مدل فائو با کمترین درصد خطای نسبی و میانگین توان دوم خطابه ترتیب به میزان ۹۹/۵۸ درصد و ۱۰/۰۰۱ به‌عنوان روش بهینه و مدل دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی با بیشترین درصد خطای نسبی به میزان ۱۰۰/۳۴ و ضریب همبستگی پایین به‌عنوان نامناسب‌ترین مدل برآورد رسوب معلق رودخانه‌ی آبشینه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که مدل فائو در برآورد میزان رسوب معلق رودخانه با ضرایب تصحیح CF1=1.24 و CF2=1.46 و کمترین میزان خطا نسبت به مدل USBR خطی با CF1=1.87 و CF2=1.97 و حد وسط با CF1=2.43 و CF2=3.01 از دقت بیشتری برخوردار است. پیشنهاد می‌شود در مدل‌های برآورد بار معلق رودخانه‌ها بازنگری و از مدل‌های با کمترین خطا استفاده گردد.

**کلمات کلیدی:** بارمعلق، مدل فائو، مدل USBR، منحنی سنجه رسوب، رودخانه‌ی آبشینه، همدان

## ۱- مقدمه

ارزیابی فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها دارای پیچیدگی‌های فراوانی بوده و استفاده عملی از نتایج بررسی‌ها مستلزم دقت و توجه زیادی است (گریک و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲: ۳۰). در حال حاضر از طریق داده‌های اندازه‌گیری بار معلق و به کمک منحنی سنج رسوب می‌توان رسوب انتقالی رودخانه را برآورد نمود. اگرچه همواره با مقداری خطا همراه می‌باشد، اما این داده‌ها در بسیاری از پروژه‌های مدیریت منابع آب بسیار مهم می‌باشند (ژانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲: ۳۵). در این رابطه مدل‌های ریاضی شبه دوبعدی به عنوان یک راه‌حل بهینه و کارآمد، در مباحث هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها و کاهش خطاهای موجود کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۸: ۸۳). بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که تحلیل ریاضی و عددی ظرفیت انتقال رسوب و تغییرات آن در رودخانه‌ها به دلیل کاربرد دقیق و مطابق با واقعیت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

در تحقیقات صورت گرفته به منظور ارائه مدل بهینه برآورد بار معلق حوضه نشان داده شد که مدل هیدرولوژیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی به ترتیب با داشتن کمترین میزان خطا، به عنوان مدل‌های بهینه برآورد بار معلق می‌باشند. رضانی پور و همکاران (۲۰۱۷). بعلاوه در یک بررسی دیگر در رابطه با تحلیل و مقایسه بار معلق حوضه‌های آبخیز خزر و ایران مرکزی با استفاده از روابط متغیرهای بارش، دبی و رسوب معلق مدل‌های نسبتاً خوبی حاصل شده است. فرج‌زاده و همکاران (۲۰۱۷). در حال حاضر جهت برآورد بار رسوب ماهانه ایستگاه‌های حوضه با استفاده از مدل MPSIAC<sup>۳</sup> و ریزمقیاس نمایی آبشاری، مشخص شد که دو عامل فرسایش رودخانه‌ای و فرسایش سطحی بیشترین امتیاز را دارند. نورانی و همکاران (۲۰۱۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی میزان رسوب رودخانه با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی نیز از دقت بهتری در تخمین میزان رسوب حوضه برخوردار است. ابوالفتحی و همکاران (۲۰۱۸). بررسی اثر مقیاس زمانی در پیش‌بینی بار معلق با استفاده از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای داده‌های روزانه، نشان می‌دهد که مدل  $k$  نزدیک‌ترین همسایه، برای داده‌های ماهانه و سالانه مدل فرآیند گوسی مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی بار معلق می‌باشند. اسدی و همکاران (۲۰۱۷). مقایسه و ارزیابی روش‌های برآورد رسوب معلق بیانگر این است که تغییر منطقه اقلیمی بین ایستگاه‌های مورد بررسی موجب تغییر مدل‌های بهینه برآورد رسوب معلق انتخابی می‌شود. غلامی و همکاران (۲۰۱۷). همچنین مشخص شده که در بررسی پدیده‌های زمانی منحنی سنج رسوب معلق حوضه مدل سری زمانی تابع انتقال در مقایسه با سایر مدل‌ها از عملکرد بالاتری برخوردار است. رئیسی و همکاران

1- Gericke et al.

2- Jhang et al.

3- Modified Pacific Southwest Inter -Agency  
Committee

(۲۰۱۹). و در مدل‌سازی رابطه‌ی میزان رسوبات معلق و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه بیان شده که چهار عامل دبی و متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوضه مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در برآورد رسوبات معلق می‌باشند. هنربخش و همکاران (۲۰۱۹)، در برخی از تحقیقات بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب نشان داده شده که، مدل الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به منحنی سنجه رسوب دارد. ناصری و همکاران (۲۰۱۹). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب حوضه با استفاده از مدل‌های MUSLE<sup>۱</sup> و SWAT<sup>۲</sup>، مناطق بحرانی با مقادیر تولید رسوب زیاد و خیلی زیاد در بالادست حوضه قرار دارند. کرمی و همکاران (۲۰۱۹). در تحقیقی جهت بررسی تغییرات زمانی و مکانی منحنی سنجه رسوب در رودخانه با استفاده از مدل‌های شبه دو بعدی نشان داده شد که استفاده از شرایط آزمایشگاهی و مقایسه آن با داده‌های محاسباتی می‌تواند به حل معادلات شبیه‌سازی رسوب و برآورد دقیق‌تر کمک نماید. هو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۱)، در مدل‌سازی و بررسی چند فازی انتقال رسوب و فرسایش بستر و تغییرات مورفودینامیک ساحلی رودخانه مشخص شد که با مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و فرسایش و آزمون چند فازی می‌توان نقص‌ها و محدودیت‌های داده‌های تجربی را برطرف نمود. اودا<sup>۴</sup> (۲۰۱۹). در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های رو باز سطح آزاد مشاهده شد که مدل شبیه‌سازی خوبی بین جریان و رسوبات جهت پیش‌بینی، ارائه و با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد. لی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۹). در حال حاضر برای شبیه‌سازی مقدار رسوب در مخزن سد از دو مدل، 2D و نوع متوسط یا گودونف<sup>۶</sup> استفاده می‌شود و با مطالعه مدل فیزیکی و یک فلوم آزمایشگاهی می‌توان فرسایش جانبی و تغییرات بستر را براساس مقدار دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی کانال متغیر بررسی و با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابق داد، تا نتایج خوبی به دست آید. ایقبال و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۹). بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد در سال‌های اخیر به جهت تغییر کاربری اراضی، برداشت شن و ماسه از بستر و ساخت و سازها در حریم رودخانه‌ها بار معلق و در نتیجه فرسایش در حوضه‌های آبریز کشور افزایش یافته است. در پژوهش حاضر سعی شده تا با بکارگیری مدل‌های منحنی سنجه، شامل منحنی سنجه خطی، خطی شکسته (چند خطی)، حد وسط داده‌ها، فصلی و FAO، و بر اساس معیارهای آماری و با مشاهدات واقعی (داده‌های اندازه‌گیری شده) برای یک دوره‌ی معین از رسوب معلق و جریان آب، مناسب‌ترین مدل برآورد بار معلق حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی سد آبشینه همدان تعیین شود. تا

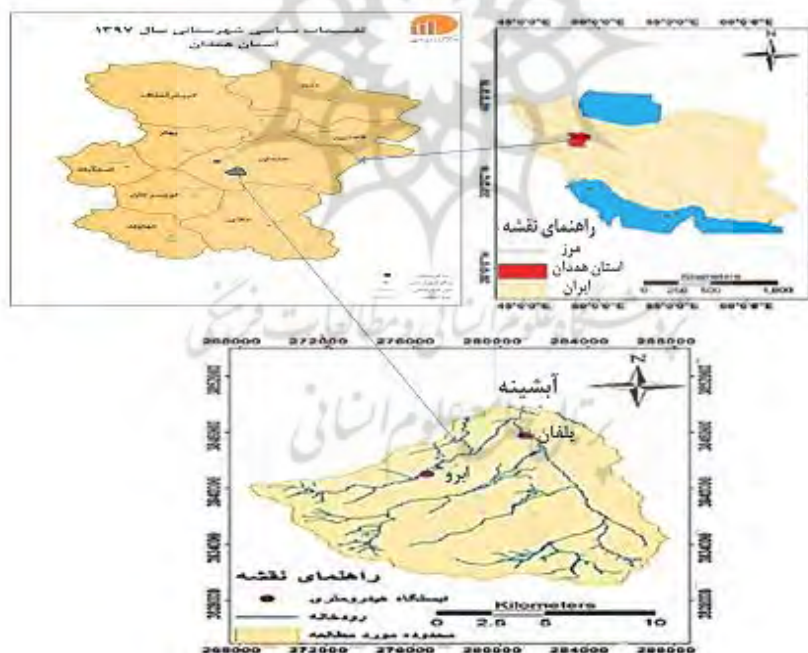
1- Modified Universal Soil Loss Equation  
2- Soil and Water Assessment Tool  
3- Hu, Bangqi  
4- Ouda

5- Lai, et al.  
6- Godunov  
7- Iqbal, et al.

بتوان از نتایج پیش‌بینی و برآورد دقیق بار معلق، در طراحی، اجرای سازه‌ها و طرح‌های ساماندهی رودخانهی آبشینه همدان استفاده نمود)

## ۲- مواد و روش

حوضه‌ی آبریز سد آبشینه در جنوب شرقی شهرستان همدان بین  $34^{\circ}34'$  و  $34^{\circ}45'$  عرض شمالی و  $48^{\circ}$  و  $48^{\circ}42'$  طول شرقی واقع شده و از زیرحوضه‌های رودخانه‌ی قره‌چای همدان می‌باشد (شکل ۱). دبی متوسط رودخانه‌ی آبشینه  $5/2$  مترمکعب در ثانیه در سال است. متوسط بارندگی سالیانه حوضه  $312/9$  میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن  $11/3$  درجه سانتی‌گراد است. از نظر سنگ‌شناسی دارای سنگ‌های نفوذی و دگرگونی از نوع گرانیت، شیست، هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

Fig. (1): Location of the study area

در این بررسی مجموعه داده‌های متناظر آمار دبی جریان و رسوب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری آبشینه از سازمان آب منطقه‌ای استان همدان مربوط به سال‌های آماری کامل یعنی اول مهر ۸۶ تا پایان شهریور ۹۶ برای برآزش داده‌ها انتخاب و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جهت بررسی داده‌های مورد استفاده ابتدا اقدام به

کنترل، تصحیح و بازسازی داده‌های ایستگاه‌ها، جهت آزمون کفایت، آزمون داده‌های پرت و آزمون نرمال بودن گردید. سپس جهت اطمینان از همگنی داده‌ها، با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در محیط نرم افزار SPSS تست همگنی انجام گرفت. با اطمینان از کافی و همگن بودن داده‌ها، مدل‌های سنجه-رسوب در مورد داده‌های متناظر دبی جریان (Qw) و دبی رسوب (Qs) مورد آزمون قرار گرفتند. در ادامه جهت برآورد بار معلق رودخانه از مدل‌های منحنی سنجه رسوب USBR، منحنی حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه فصلی و FAO و ضمن نمونه‌برداری مستقیم از بار معلق، از رابطه توانی دبی و رسوب (غلظت رسوب) و برای ضریب‌های اصلاحی منحنی‌های سنجه رسوب از روش تبدیل لگاریتمی و برازش خطا بر داده‌های تبدیل یافته، استفاده شد. همچنین جهت کاهش و رفع محدودیت‌هایی تبدیل لگاریتمی برای تعیین ضریب منحنی سنجه و انتخاب مدل مناسب، از روش‌های تحلیل آماری کریجینگ و مدل G+ نیز استفاده شده است.

#### ۲-۱- مدل سنجه رسوب یک خطی یا روش U.S.B.R

با استفاده از میزان دبی رودخانه در زمان برداشت نمونه، یک رابطه‌ی ریاضی غیرخطی بین بار معلق و دبی جریان و یک رابطه‌ی رگرسیونی به صورت معادله‌ی توانی منحنی سنجه رسوب برقرار می‌گردد.

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

که در این معادله مقدار a ضریب فاصله قائم محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدأ مختصات و مقدار نمای b برابر با شیب خط بهترین برازش می‌باشند.

$$\log a \cong \frac{\left| \sum_{i=1}^n \log Q_s - 0 b \right| \sum_{i=1}^n \log Q_w}{N} \quad (2)$$

$$b \cong \frac{\left( \sum_{i=1}^n \log Q_w \partial \log Q_s \right) 0 \left( \sum_{i=1}^n \log Q_w \partial \right) \sum_{i=1}^n Q_s}{N \left( \sum_{i=1}^n (\log Q_w)^2 - 0 \right) \sum_{i=1}^n (\log Q_s)^2} \quad (3)$$

در این روش پس از تعیین غلظت نمونه‌های رسوب در دبی رودخانه‌ی آبشینه (جدول ۱)

جدول (۱): مقادیر غلظت نمونه‌های رسوب در دبی حوضه‌ی آبریز آبشینه

Table (1): Concentration values of sediment samples in the discharge of Abshineh Watershed

دبی رسوبی (t/d)	دبی (m <sup>3</sup> /s)
۰/۴۱۱۲۶۴	۰/۲۸
۴۰۱/۵۸۶	۴/۳۵
۴۷۱۳/۳۸۹	۶/۱
۲۲/۳۹۳۲	۲/۵۳
۳/۷۷۹۰۲	۰/۵۹
۲/۴۵۱۷۳	۰/۸۷
۱۵۳۲/۶۴۳	۵/۶۴
۱۳۵۲/۱۹۲	۷
۲۰۴۰۰/۴۱	۳۲/۱
۲۱۸۰/۶۵۳	۱۳/۰۷
۳۶۶۴/۰۳۶	۸/۱
۲۱/۷۷۹۷۱	۴/۶
۱۱/۵۱۱۸۵	۱/۱۵
۰/۶۴۰۴۶۶	۰/۱۱۳
۳۰۸۹/۳۶	۱۷/۴۳

#### ۲-۲-منحنی سنجه رسوب (مدل خطی شکسته) یا چند خطی U.S.B.R

در این روش بر اساس توصیه U.S.B.R بر مبنای دبی جریان رودخانه رودخانه به جای یک خط رگرسیون می‌توان دو یا چند خط از میان داده‌های اندازه‌گیری شده عبور داد که خط بهترین برازش نیز بر مبنای روش حداقل مربعات می‌باشد. خطوط برازش داده شده بایستی از ضریب همبستگی قابل قبولی برخوردار باشند.

#### ۲-۳-منحنی سنجه رسوب حد وسط داده‌ها

روش حد وسط دسته‌ها عبارت است خطی که بر تمام نقطه‌های میانگین دسته برازش یافته باشد، بنابراین خط رگرسیونی باید از میانگین بار معلق در هر جریان معین عبور کند. در این تحقیق جهت برآورد بار رسوب معلق ابتدا دبی جریان بر اساس یک نمونه معین به ۱۵ دسته تقسیم و برای متوسط هر دسته، میانگین رسوب همان دسته تعیین گردید (اسدی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۱).

#### ۲-۴-مدل منحنی سنجه رسوب فصلی

اساس این مدل شبیه مدل خطی U.S.B.R می‌باشد با این تفاوت که در این مدل تفکیک داده‌ها بصورت فصلی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۵- مدل FAO یا روش سازمان خواربار و کشاورزی

در این روش، ابتدا بهترین خط با معادله درجه ۲ به روش حداقل مربعات، به مقادیر لگاریتمی (نه مقادیر واقعی)، برازش داده شد تا بار معلق برآورد شده برای هر دبی جریان مشاهده شده ( $Q_w$ ) در طول دوره‌ی آماری (۸۶-۱۳۹۶) به حالت مقادیر حداقل مشاهداتی، نزدیک‌تر باشد. به منظور تعدیل ارقام در معادله‌ی منحنی سنجه رسوب به جای  $a$  از ضریب  $a'$  که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید، استفاده شد (رئیزی و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۳).

که در آن مقدار  $a'$  از تقسیم میانگین‌های  $Q_s$  و  $Q_w$  متناظر اندازه‌گیری شده به دست می‌آید.

$$a' \equiv \frac{Q_s}{Q_w} \quad (۴)$$

$$Q_s \equiv a' Q_w^b \quad (۵)$$

$$a' \equiv \bar{Q}_s \sqrt{Q_w^b} \quad (۶)$$

## ۲-۶- روش دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی

در این روش بر اساس تشابه تغییرات هیدرولوژیکی در ماه‌های سال، هر سال آبی در رودخانه‌ی آبشینه به سه دوره‌ی A (خرداد، تیر، مرداد و شهریور)، B (مهر، آبان، آذر، دی و بهمن) و C (اسفند، فروردین و اردیبهشت) تقسیم و برای هر دوره، منحنی سنجه آن ترسیم گردید.

## ۲-۷- مدل منحنی سنجه بار معلق با کاربرد روش اصلاح خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی (CF)

برای حذف آثار ضریب اصلاحی، از روابط ۷ و ۸ استفاده شده که در آن  $n$  تعداد نمونه‌های دبی بار معلق،  $\log Q_s \bar{0}1$  لگاریتم مقدار مشاهداتی دبی بار معلق و  $\log Q_s \bar{c}d$  لگاریتم مقدار محاسباتی دبی بار معلق است (روابط ۷ و ۸).

$$CF = XP[2.6^2] \quad (۷)$$

$$\Sigma(\log Q_s \bar{0}1 - \log Q_s \bar{c}d) / (n - 2)^2 \quad (۸)$$

## ۲-۸- همبستگی بین بار معلق و دبی جریان

در این بررسی با اندازه‌گیری بار معلق در اکثر ایستگاه‌های آبنجی رودخانه‌ی آبشینه رابطه‌ی بین بار معلق ( $Q_s$ ) و دبی جریان ( $Q_w$ ) محاسبه شد. این رابطه به شکل کلی زیر است:

$$Q_s = a Q_w^b \quad (۹)$$

## ۹-۲- معیارهای ارزیابی مدل‌ها

جهت ارزیابی مدل‌ها، انتخاب بهترین مدل و تعیین دقت آن، از شاخص‌های میانگین توان دوم خطا، ضریب همبستگی و ضریب تبیین استفاده شد. (روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲). با در نظر گرفتن معیارهای انتخاب مدل بهینه (ME، R<sup>2</sup> و MSE) روش بهینه با استفاده از روابط زیر، انتخاب شد. در روابط زیر: SSE: مجموع مربعات خطا، MSE: میانگین مربعات خطا، Q<sub>sio</sub>: دبی بار معلق اندازه‌گیری شده، Q<sub>sic</sub>: دبی بار معلق محاسبه شده، Q<sub>wi</sub>: دبی جریان اندازه‌گیری شده، Q<sub>w</sub>: میانگین دبی جریان اندازه‌گیری شده، Q<sub>s</sub>: میانگین بار معلق اندازه‌گیری شده، DF درجه آزادی و R ضریب همبستگی می‌باشد.

$$SSE \cong \sum_{i=1}^n (\log Q_{sio} - \log Q_{sic})^2 \quad (10)$$

$$MSE \cong \frac{SSE}{DF} \quad (11)$$

$$R \cong \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{sic} - \log \bar{Q}_s)(\log Q_{wi} - \log \bar{Q}_w)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\log Q_{sic} - \log \bar{Q}_s)^2 \sum_{i=1}^n (\log Q_{wi} - \log \bar{Q}_w)^2}} \quad (12)$$

در مرحله‌ی بعد جهت ارزیابی مدل مناسب اقدام به اندازه‌گیری بار معلق رسوبی در طی یک دوره‌ی ۳۰ روزه گردید. ضمن اینکه در طول این مدت هر روز دو بار به روش نمونه‌برداری تجمعی نقطه‌ای از بار معلق رودخانه نمونه‌برداری شد. بعد از توزین غلظت نمونه‌های رسوب برحسب میلی‌گرم در لیتر و با توجه به دبی جریان همزمان اندازه‌گیری شده، میزان دبی رسوب از رابطه‌ی ۱۳ تعیین گردید. در این رابطه Q<sub>s</sub>: دبی بار رسوبی معلق برحسب تن بر روز، Q<sub>w</sub>: دبی جریان برحسب متر مکعب بر ثانیه، C: متوسط غلظت مواد رسوبی برحسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

$$Q_s \cong 0.0864 \partial C \partial Q_w \quad (13)$$

جهت ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده در برآورد بار رسوب با میزان اندازه‌گیری شده از معیار آماری میانگین درصد خطای نسبی (RME) استفاده گردید (روابط ۱۴ و ۱۵).

$$RME \cong \frac{\sum_{i=1}^n RE_i}{n} \quad (14)$$



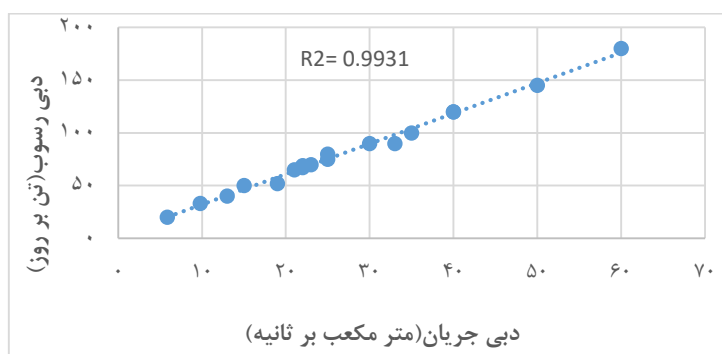
$$RE_i \equiv \left| \frac{S_o - S_c}{S_o} \right| \times 100 \quad (15)$$

در این معادلات: RME میانگین درصد خطای نسبی،  $RE_i$ : درصد خطای نسبی هر برآورد،  $S_o$ : میزان رسوب معلق اندازه‌گیری شده (مشاهده شده)،  $S_c$ : میزان رسوب معلق برآورد شده و  $n$ : تعداد دفعات مقادیر برآورد شده رسوب معلق می‌باشد.

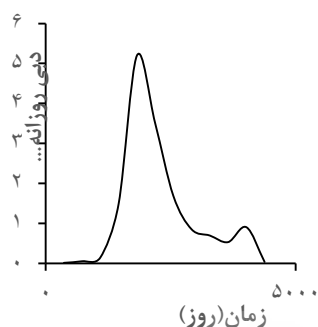
#### ۲-۱۰- داده‌های مورد نیاز

در این بررسی داده‌های ۱۰ سال آبی (اول مهر ۸۶ تا پایان شهریور ۹۶)، برای برازش داده‌های هیدرومتری سد آبشینه استفاده شد (اشکال، ۲، ۳ و ۴). همچنین اطلاعات رسوب معلق ایستگاه آبشینه به عنوان شرط مرزی ورودی و جهت واسنجی به کار گرفته شد (شکل ۵). با توجه به اطلاعات مصالح بستر و بررسی نمونه‌های رسوبی منحنی‌های دانه‌بندی تهیه و مشخص شد که ذرات بار معلق رودخانه از رسوبات رس و سیلت می‌باشد (شکل ۳ و ۶). رابطه‌ی دبی جریان و دبی رسوب را برای یک روز به صورت نمونه ارائه داده که از خروجی مدل GS+ همبستگی و دقت داده‌های مورد استفاده از لحاظ آماری را نشان می‌دهد. بعلاوه چون منطقه‌ی مورد مطالعه بواسطه وجود سد مخزنی اکباتان و پایین‌دست آن سد آبشینه که هر دو از حساسیت بالای از لحاظ طغیان‌های فصلی و بار رسوبی معلق برخوردار است، دارای دو ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی است و داده‌ها به صورت ۲۴ ساعته ثبت و نگهداری می‌شود. بنابراین با دسترسی به این داده‌ها بررسی دقیقی از لحاظ میزان رسوب وارده به مخزن انجام شده، که نمودارهای آن در شکل‌های ۲ الی ۵ ارائه و تحلیل‌های بعدی نیز با تکیه به این آمارها انجام شده است.

$$Q_s = 3/2876 Q_w^{2/17789} \quad (16)$$

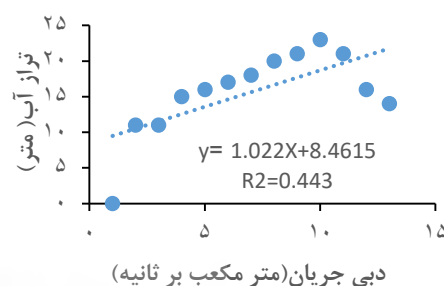


شکل (۲): رابطه‌ی بین دبی جریان و رسوب حوضه‌ی آبریز آبشینه همدان طی سال‌های آماری (۱۳۸۶-۱۳۹۶)  
Fig. (2): Relationship between flow discharge and sediment on Hamedan Abshineh Watershed (during statistical years (2007-2017)



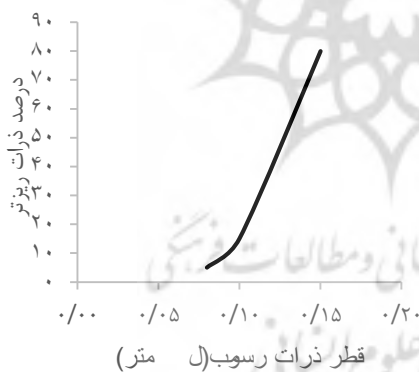
شکل (۴): منحنی دبی - اشل حوضه‌ی آبریز آبشینه (شرط مرزی پایین دست)

**Fig. (4):** discharge –(Eshel)rating Curve of the Abshineh Watershed (Downstream border condition)

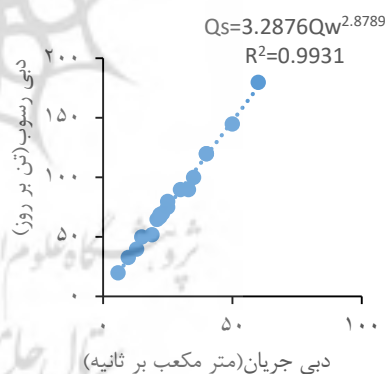


شکل (۳): هیدروگراف کمیت دبی جریان روزانه حوضه‌ی آبریز آبشینه (شرط مرزی بالادست)

**Fig. (3):** Hydrograph flow discharge rate the day Abshineh Watershed (Upstream border condition)



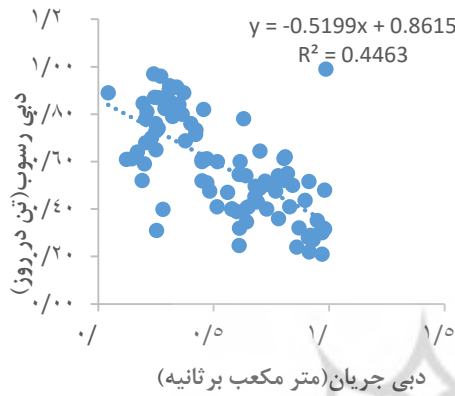
شکل (۶): منحنی دانه‌بندی ذرات حوضه‌ی آبریز آبشینه  
**Fig. (6):** Particle size distribution curve of Abshineh Watershed



شکل (۵): منحنی سنج رسوب معلق ایستگاه آبشینه  
**Fig. (5):** Suspended sediment rating curve of Abshineh station

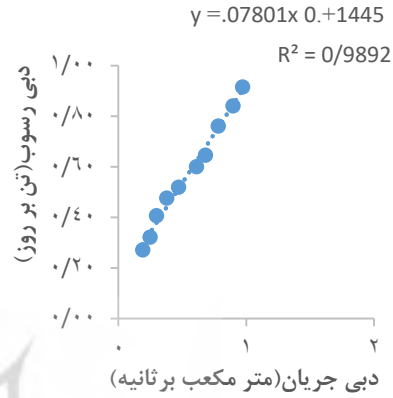
### ۳- یافته‌ها و بحث

در این بررسی ابتدا با استفاده از روش‌های مختلف آماری (تک‌خطی، حد وسط، فائو، فصلی و روش دوره مشابه هیدرولوژیکی) همبستگی داده‌ها و روابط رگرسیونی آن‌ها محاسبه و نمودارهای هریک از آن‌ها ترسیم شد اشکال (۷ الی ۱۶).



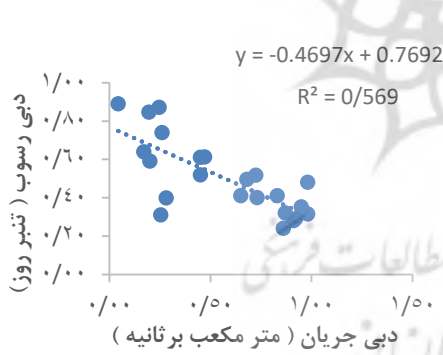
شکل (۸): منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها

Fig. (8): Sediment rating curve in the Average of the categories



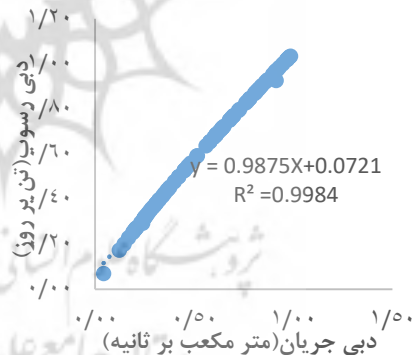
شکل (۷): منحنی سنجه رسوب تک خطی

Fig. (7): Single-line sediment rating curve



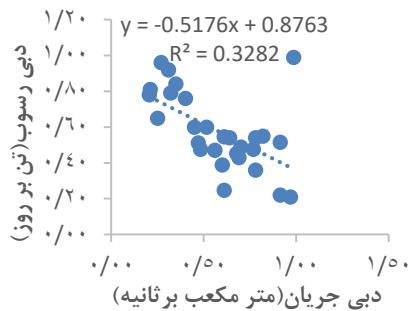
شکل (۱۰): منحنی سنجه رسوب فصلی پاییز

Fig. (10): Autumn seasonal sediment rating curve



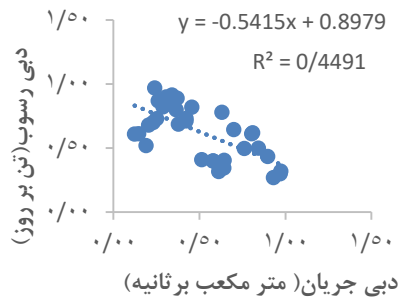
شکل (۹): منحنی سنجه رسوب فائو

Fig. (9): FAO sediment rating curve



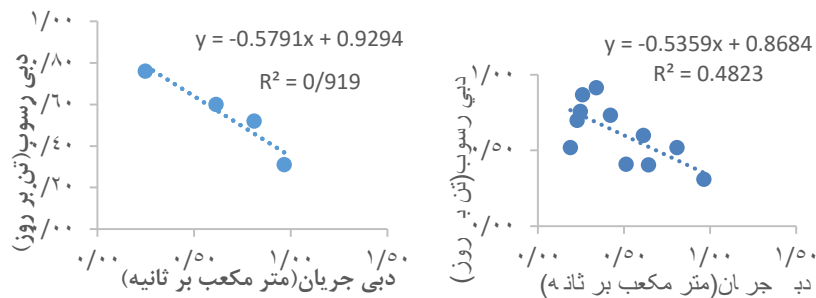
شکل (۱۲): منحنی سنجه رسوب فصلی بهار

Fig. (12): Spring seasonal sediment rating curve

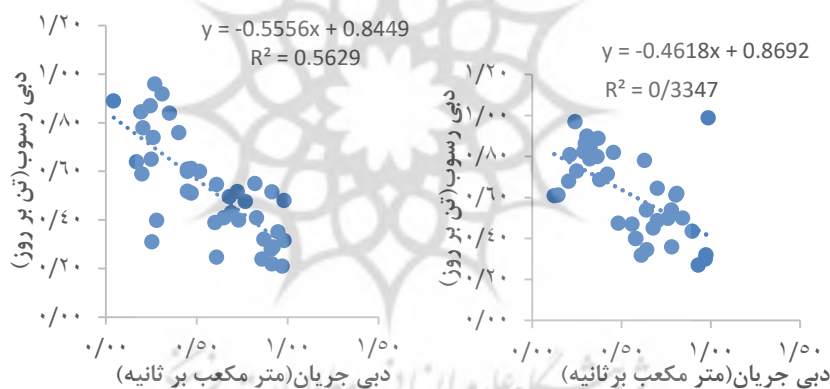


شکل (۱۱): منحنی سنجه رسوب فصلی زمستان

Fig. (11): Winter seasonal sediment rating curve



شکل (۱۳): منحنی سنج رسوب فصلی تابستان  
شکل (۱۴): منحنی سنج دوره مشابه هیدرولوژیکی  
**Fig. (13):** Summer seasonal sediment rating curve **Fig. (14):** Similar hydrological period rating curve A



شکل (۱۵): منحنی سنج دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی B  
شکل (۱۶): منحنی سنج دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی C  
**Fig. (15):** Similar hydrological period rating curve B **Fig. (16):** Similar hydrological period rating curve C

بررسی و نتایج حاصل از نمودارهای همبستگی داده‌ها و روابط رگرسیونی نشان می‌دهد که ضرایب تصحیح CF1 و CF2 در مدل فائو نسبت به دو روش USBR خطی و روش حد وسط کمترین میزان خطا را در برآورد رسوب معلق ارائه داده است (جدول ۱). با توجه به مقدار دبی جریان رودخانه‌ی آبشینه به مقدار ۵/۲ مترمکعب بر ثانیه، میزان رسوبات معلق برحسب تن در روز برای کل دوره‌ی آماری (۱۰ سال) ۳۴۵۲/۱۷ تن محاسبه گردید که برای هر سال به طور متوسط معادل ۳۴۵/۲۱۷ تن به دست آمد و نشان می‌دهد که با میزان رسوبات اندازه‌گیری شده در سال ۹۱ به مقدار ۲۴۵/۸۷۷ تن، هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. با توجه به اینکه مدل‌های مورد استفاده در این بررسی جز مدل‌های فیزیکی می‌باشند و از خصوصیات مدل‌های فیزیکی برآورد جمعی و تخمینی بار معلق می‌باشد. حصول این نتیجه با توجه به توانای مدل نسبت به مدل‌های عددی و ریاضی قابل قبول و در مقایسه با سایر مدل‌های فیزیکی مشابه خود از دقت بیشتری برخوردار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد

که مدل دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی با بیشترین درصد خطای نسبی به میزان ۱۰۰/۳۴ به همراه مقادیر پایین ضریب همبستگی، به‌عنوان نامناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در حوضه می‌باشد. بررسی جدول (۱) نشان می‌دهد که در مدل فائو پراکنش نقاط کم و خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی به حداقل رسیده، ولی در مدل‌های دیگر، داده‌ها دسته‌بندی نشده و فراوانی داده‌های دبی پایه بر مقادیر ضرایب منحنی سنج رسوب، تأثیر زیادی داشته و دقت مدل‌ها را کاهش داده است، به طوری که در مدل‌های حد وسط دسته‌ها، USBR خطی و هیدرولوژیکی داده‌های استثنایی با مقادیر رسوب زیاد در زوج متناظر دبی جریان و رسوب، باعث افزایش مقادیر برآوردی روابط مدل‌ها شده، درحالی‌که تأثیر کمی بر افزایش مقدار رابطه‌ی مدل FAO داشته است و نشان می‌دهد که معادله‌ی FAO میزان رسوب معلق محاسباتی را با دقت خوبی برآورد می‌نماید. در مدل‌های فصلی نیز مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار بار رسوبی معلق مربوط به فصل بهار و ناشی از نوع کاربری و همچنین شدت بالای باران‌های فصلی در حوضه‌ی آبریز سد آبشینه همدان می‌باشد.

جدول (۱): نتایج مقادیر معیارهای انتخاب مدل بهینه

Tab. (1): Results of the values of the optimal model selection criteria

رابطه‌ی رگرسیونی توانی	CF2	CF1	روش‌ها	MSE	RME	R <sup>2</sup>
$Y=0.1526x^2+0.0206x-0.138$	1.97	1.87	USBR (خطی)	۰/۰۴۰۱	۱۰۰/۳۰	۰/۴۴۶۳
$Y=1.0359x^2-1.0402x+1.55$	1.46	1.24	فائو	۰/۰۰۰۱	۹۹/۵۸	۰/۹۹۸۴
$Y=0.0247x^2+1.3501x$	3.01	2.43	حد وسط دسته‌ها	۰/۰۰۰۶	۹۹/۶۶	۰/۹۸۹۲
$Y=0.3821x^2+0.6231x-0.116$	1.08	1.065				۰/۵۶۹ پاییز
$Y=0.5246x^2+0.8355x-0.213$	1.04	1.0895		۰/۱۹۴۲		۰/۳۲۸۲ زمستان
$Y=0.7821x^2+0.9231x-0.716$	1.16	1.1328	فصلی	۰/۵	۱۰۰/۳۱	۰/۴۴۹۱ بهار
$Y=0.1821x^2+0.2231x-0.016$	0.03	0.0231				۰/۹۱۹ تابستان
$Y=0.2564x^2+0.1538x-0.009$	1.56	1.342	دوره مشابه			A ۰/۴۸۲۳
$Y=0.3583x^2+0.6854x-0.549$	1.76	1.243	هیدرولوژی	۰/۰۳۹۷	۱۰۰/۳۴	B ۰/۵۶۲۹
$Y=0.4871x^2+0.8564x-0.201$	1.87	1.126	کی			C ۰/۳۳۴۷

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی نتایج متفاوتی نسبت به هم داشتند. در مدل بدون تقسیم‌بندی داده‌ها، مدل فائو با کمترین درصد خطای نسبی و میانگین توان دوم خطا به ترتیب به میزان ۹۹/۵۸ درصد و ۰/۰۰۰۱ به عنوان مدل مناسب انتخاب و روش بهینه آن نیز به صورت رابطه‌ی ۱۷ محاسبه شد (جدول ۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد مقادیر اصلاحی CF2، CF1 دبی جریان و دبی رسوبی رودخانه آبشینه

همدان در خصوص نمونه‌های استفاده شده دارای درصدی از خطا می‌باشد، که با اعمال ضریب اصلاحی CF1، CF2 اصلاح و در مراحل بعدی در مدل‌ها استفاده شد (جدول ۳).

$$Q_s = 0.9875 Q_w^{0.0721} \quad (17)$$

جدول (۲): درصد خطای نسبی بین نتایج محاسباتی و مشاهداتی برآورد رسوب حوضه‌ی آبریز آبشینه  
Tab. (2): Percentage of relative error between computational and observational results of sediment estimation of Abshineh Watershed

رسوب برآوردی توسط FAO	رسوب اندازه گیری شده از سال ۹۱	MSE	RME
۳۴۵/۲۱۷	۲۴۵/۸۷۷	۰/۰۰۰۱	۹۹/۵۸

جدول (۳): داده‌های ضریب اصلاحی حوضه‌ی آبریز آبشینه (دبی جریان و دبی رسوبی، CF1، CF2)  
Tab. (3): Abshineh Watershed Correction Coefficient Data (Flow and Sediment Flow, CF1, CF2)

دبی رسوبی CF2	دبی جریان CF2	دبی رسوبی CF1	دبی جریان CF1	دبی رسوبی (t/d)	دبی (m <sup>3</sup> /se)
۲/۷۳	۳/۸۵	۱/۵۶	۲/۳۴	۰/۴۱۱۲۶۴	۰/۲۸
۲/۶۸	۳/۵۹	۱/۴۹	۳/۴۳	۴۰۱/۵۸۶	۴/۳۵
۴/۹۳	۵/۹۱	۲/۳۴	۳/۶۵	۴۷۱۳/۳۸۹	۶/۱
۱/۶۷	۲/۱۲	۰/۹۸	۱/۶۵	۲۲/۳۹۳۲	۲/۵۳
۰/۹۴	۱/۸۵	۱/۰۷	۱/۸۷	۳/۷۷۹۰۲	۰/۵۹
۱/۸۶	۱/۶۰	۱/۸۷	۱/۰۹	۲/۴۵۱۷۳	۰/۸۷
۳/۶۵	۴/۸۹	۱/۵۶	۳/۶۴	۱۵۳۲/۶۴۳	۵/۶۴
۴/۸۱	۵/۹۲	۳/۴۱	۴/۵۶	۱۳۵۲/۱۹۲	۷
۸/۴۵	۱۰/۸۵	۶/۹۳	۸/۸۹	۲۰۴۰۰/۴۱	۳۲/۱
۷/۲۴	۹/۵۶	۷/۹۱	۹/۶۵	۲۱۸۰/۶۵۳	۱۳/۰۷
۶/۸۷	۷/۴۱	۵/۷۶	۶/۶۷	۳۶۶۴/۰۳۶	۸/۱
۲/۰۷	۳/۷۲	۱/۸۶	۲/۷۶	۲۱/۷۷۹۷۱	۴/۶
۱/۴۱	۰/۸۷	۱/۸۳	۲/۶۲	۱۱/۵۱۱۸۵	۱/۱۵
۰/۸۱	۱/۰۳	۲/۰۵	۲/۴۵	۰/۶۴۰۴۶۶	۰/۱۱۳
۶/۴۳	۹/۹۴	۷/۹۱	۹/۸۷	۳۰۸۹/۳۶	۱۷/۴۳

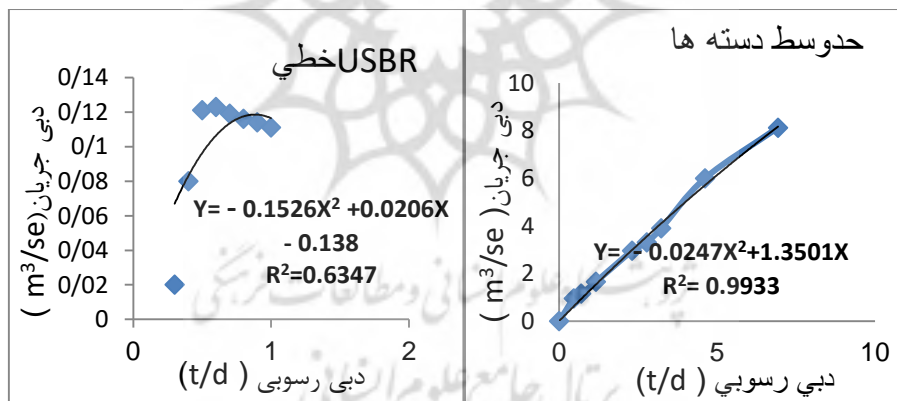
جهت بررسی دقیق‌تر میزان کارایی مدل‌ها در برآورد رسوب معلق از توابع نمایی و لگاریتی استفاده شد. بررسی شکل ۱۷ نشان می‌دهد که مدل USBR خطی نتوانسته برآورد دقیقی از میزان برآورد رسوب معلق ارائه دهد،

چرا که معادله تابع نمایی (رابطه‌ی ۱۸) را منفی ارائه نموده و ثابت می‌کند که در طی زمان میزان برآورد رسوب معلق کاهش می‌یابد که این امر با توجه به داده‌های مشاهداتی امری غیرواقعی به نظر می‌رسد و مطابقت ندارد.

$$Y = -0.1526x^2 + 0.0206x - 0.138 \quad (18)$$

در توابع حد وسط دسته‌ها ایراد اصلی اینست که میزان پراکندگی داده‌های آماری در این مدل مد نظر قرار نمی‌گیرد و با استفاده از روش درون‌یابی<sup>۱</sup> فقط به پردازش تعداد محدودی از داده‌های آماری می‌پردازد و همین امر باعث شده معادله تابع نمایی رسوبی نیز در این مدل بصورت منفی باشد (رابطه‌ی ۱۹). بنابراین در مدل حد وسط میزان برآورد رسوب معلق در طی زمان کاهش می‌یابد که این روش نیز همانند تابع USBR خطی با توجه به داده‌های مشاهداتی امری غیرواقعی به نظر می‌رسد (شکل ۱۸).

$$Y = -0.0247x^2 + 1.3501x \quad (19)$$



شکل (۱۸): نمودار حد وسط دسته‌ها برآورد رسوب معلق

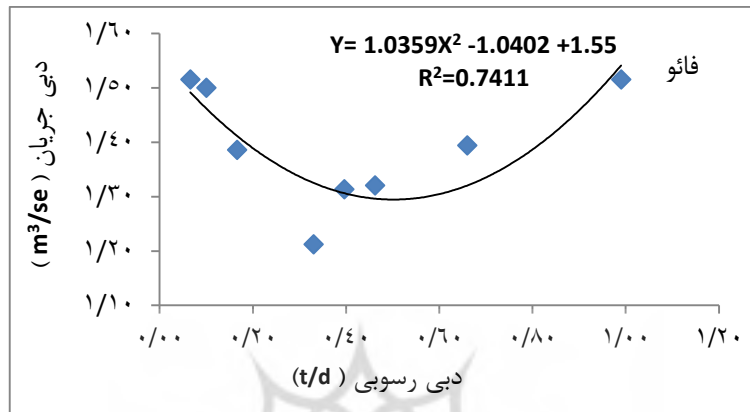
**Fig. (18):** Intermediate categories Diagram of suspended sediment estimation

شکل (۱۷): نمودار USBR برآورد رسوب معلق

**Fig. (17):** USBR diagram of suspended sediment estimation

اما بررسی شکل ۱۹ نشان می‌دهد که مدل فائو از دقت و کارایی بیشتری در زمینه‌ی برآورد رسوب معلق رودخانه‌ی سد آبشینه برخوردار است و بیانگر این است که رابطه‌ی تابع نمایی (رابطه‌ی ۲۰) مثبت محاسبه شده و ثابت می‌کند که مدل فائو با دقت بیشتری میزان رسوب معلق را در طی زمان ارزیابی می‌کند که این امر نیز به دلیل بررسی پارامترهای بیشتر در شرایط مرزی در مدل فائو می‌باشد.

$$Y = 1.0359x^2 - 1.0402x + 1.55 \quad (20)$$



شکل (۱۹): نمودار برآورد رسوب معلق حوضه‌ی آبریز آبشینه در مدل FAO

Fig. (19): Estimation diagram of suspended sediment of Abshineh Watershed in FAO model

نتایج مدل GS+ نشان می‌دهد که مدل USBR همراه با متغییر اصلی داده‌ها، تا حدودی از توزیع نسبی نرمال و مدل FAO از توزیع کاملاً نرمال تبعیت می‌کنند. جدول ۴ و اشکال (۲۰ و ۲۱).

جدول (۴): نتایج بررسی روش FAO و USBR در نرم افزار GS+

Tab. (4): Results of FAO and USBR methods in Gs + software

مدل	انحراف معیار	آزمون واریانس	چولگی
USBR	۲/۴۴۵۹	۵/۹۸	۰/۰۷
FAO	۲۴/۹۱۴۵	۶۲۰/۷۳	۰/۹۹



شکل (۲۱): نمودار مقادیر توزیع فراوانی روش FAO

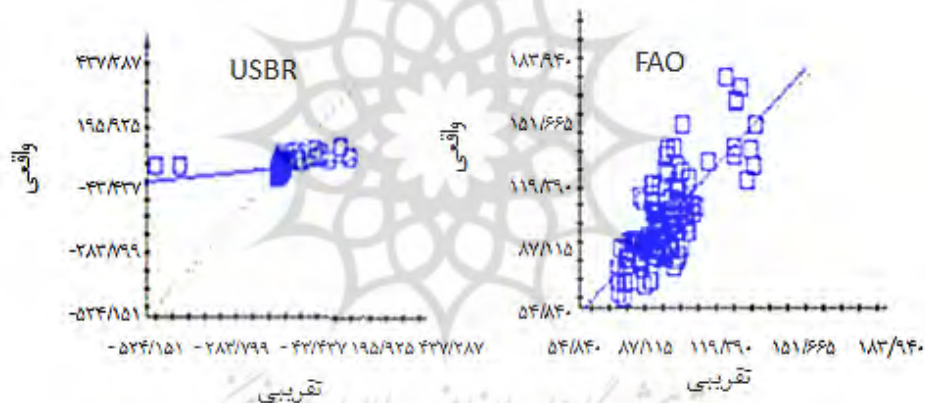
Fig. (21): Graph of frequency distribution values of FAO method

شکل (۲۰): نمودار مقادیر توزیع فراوانی روش USBR

Fig. (20): Graph of frequency distribution values of USBR method



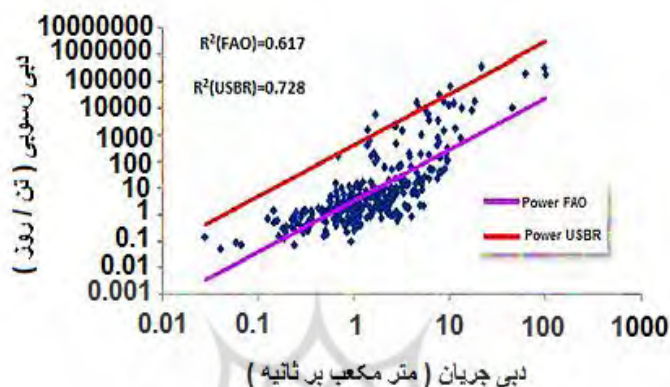
نتایج تحلیل داده‌ها با استفاده از روش کریجینگ در مدل‌های FAO و USBR نشان می‌دهد که خط رگرسیونی برازش داده شده در روش USBR نسبت به خط  $y=x$  دارای انطباق خوبی نبوده و تحلیل کامل و دقیقی از داده‌های مشاهداتی رسوب ارائه نکرده است. اما در مدل FAO داده‌های محاسباتی نسبت به خط رگرسیونی برازش داده شده  $y=x$  از انطباق بالا و خوبی برخوردار است (شکل ۲۲). نتایج نشان می‌دهد که برآورد رسوب توسط مدل‌های FAO، USBR از دقت قابل قبول و خوبی نسبت به مدل‌های حد وسط داده‌ها و مشابه هیدرولوژیکی برخوردار می‌باشند و مدل حد وسط داده‌ها بین دو مدل FAO، USBR واقع شده و زمانی بایستی مورد استفاده قرار گیرد که دو مدل دیگر برآورد دقیقی ارائه نکرده باشند.



شکل (۲۲): نتایج تحلیل مقادیر واقعی و برآوردی روش FAO و USBR با استفاده از روش کریجینگ

**Fig. (22):** Results of analysis of real values and estimation of FAO and USBR methods using kriging method

همچنین نتایج حاصل از خروجی مدل Gs+ و مقایسه‌ی برآورد میزان رسوب نشان می‌دهد که برآورد میزان رسوب تن در روز در روش FAO با  $R^2=0/728$  نسبت به روش USBR با  $R^2=0/617$  دارای تطابق بیشتر و از برازش رسوبی خوبی با داده‌های مشاهداتی برخوردار بوده و رسوب معلق رودخانه‌ی سد آبشینه را با دقت بیشتری برآورد نموده است (شکل ۲۳).



شکل (۲۳): نتایج مقایسه‌ی برآورد میزان رسوب در روش‌های USBR و FAO در مدل  $Gs+$   
Fig. (23): Comparison results of sediment estimation in USBR and FAO methods in  $Gs+$  model

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه بالای لایروبی مخزن سدها جهت برآورد بار رسوبی، استفاده از مدل‌های آماری و ریاضی منطقی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر برآورد بار رسوبی با استفاده از معادلات رگرسیونی منحنی سنج به دلیل سهولت باعث کاربرد فراوان این روش‌ها در برآورد بار معلق رودخانه‌ها شده، و از آنجائی‌که در این معادلات تنها یک متغیر مستقل وارد می‌شود، لذا قادر به پیش‌بینی دقیق و صحیح مقدار بار معلق و رسوبی واقعی نمی‌باشند. بنابراین باید سعی شود با اعمال شرایط یا تغییراتی در آن‌ها از جمله دسته‌بندی داده‌ها و استفاده از سایر مدل‌ها خطای برآورد رسوب را کاهش داد. در این تحقیق داده‌های متناظر دبی جریان و رسوب حوضه‌ی آبریز سد آبشینه‌ی همدان، با استفاده از مدل‌های USBR، منحنی حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه فصلی و FAO بررسی شد و ضمن نمونه‌برداری مستقیم و با استفاده از روش اصلاحی تبدیل لگاریتمی، کریجینگ و مدل  $Gs+$ ، مدل‌ها ارزیابی و بهترین و مناسب‌ترین مدل برآورد بار معلق رودخانه‌ی سد آبشینه تعیین شد. نتایج نشان داد که مدل فائو در برآورد میزان رسوب معلق رودخانه با ضرایب تصحیح  $CF1=1.24$  و  $CF2=1.46$  و کمترین میزان خطا نسبت به مدل USBR خطی با  $CF1=1.87$  و  $CF2=1.97$  و حد وسط با  $CF1=2.43$  و  $CF2=3.01$  از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج خروجی مدل  $Gs+$  و مقایسه‌ی برآورد میزان بار معلق در مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل FAO به دلیل تطابق و دقت بیشتر، برازش رسوبی دقیق‌تر با داده‌های مشاهداتی و با کمترین خطا، به عنوان بهترین مدل و روش USBR با تطابق و برازش کمتر با داده‌های مشاهدتی در درجه‌ی بعدی و دوره‌ی مشابه هیدرولوژیکی با بیشترین درصد خطای نسبی به میزان  $۱۰۰/۳۴$  و ضریب همبستگی پایین به‌عنوان نامناسب‌ترین

مدل برآورد رسوب معلق در حوضه انتخاب شدند. بررسی‌ها نشان داد که مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی نتایج متفاوتی نسبت به هم داشته، به طوری که در مدل بدون تقسیم‌بندی داده‌ها مدل فائو نسبت به سایر مدل‌های دیگر با کمترین درصد خطای نسبی و میانگین توان دوم خطا به عنوان مدل بهینه و مناسب از دقت و کارایی بیشتری جهت برآورد رسوب معلق به شکل تعدیل‌شده در حوضه‌ی آبریز آبشینه همدان برخوردار است که با نتایج حاصله از رئیسی و همکاران (۲۰۱۹) و غلامی و همکاران (۲۰۱۷) از لحاظ روش و دقت نتایج مطابقت دارد. پیشنهاد می‌شود به منظور اطمینان و کارایی بیشتر نتایج حاصل از اجرای مدل‌های شبه دو بعدی، از مدل‌های دیگری مانند River intake نیز استفاده و در روش‌های برآورد بار معلق روخانه‌ها بازنگری و از روش‌های با کمترین خطا استفاده شود.



## ۵-منابع

- Abolfathi, D., Madadi, A., & Asghari, S. (2018). Modeling the amount of river sediment using artificial neural network method (Case study: Golrood River), *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 7(2), 208-196.
- Asadi, M., Fathzadeh, A., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2017). Investigation of the effect of time scale (daily, monthly and annual) on the prediction of suspended sediment load, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(10), 121-143.
- Farajzadeh, M., Heidary, A. A., Mollashahi, M., & Rajabi Rostamabadi, N. (2017). Analysis and comparison of suspended sediment in the Caspian and Central Iran watersheds, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(11), 59-82.
- Gericke, A., Venohre, M. (2012). Improving the estimation of erosion-related suspended solid yields in mountainous, non-alpine river catchments, November, *Environmental Modelling and Software*, 37, 30-40.
- Gholami, L., Ghorghi, H., Abdollahi, J., Khaledi, Z., & Darvishan, A. (2017). Comparison and evaluation of suspended sediment estimation methods using data classification (Case study: Doork Merk, Shirgah and Krikla water stations), *Journal of Water Resources Research Iran*, 13(3), 187-193.
- Honarbaksh, A., Fashin Niazi, A., Soltani, A., & Tahmasebi, P. (2019). Modeling the relationship between suspended sediments and hydrological and environmental characteristics of the basin (Case study: Dez Dam basin), *Quantitative geomorphological research*, 8(1), 105-117.
- Hu, B., Wang T.H., Yang, Z., & 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.
- Iqbal, M., Ghumman, A.R., Haider, S., Hashmi, H. N., & Khan, M. A. (2019). Application of Godunov type 2D model for simulating sediment flushing in a reservoir, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5), 4289-4307.
- Karami, F., Bayati Khatibi, M. (2019). Modeling soil erosion and prioritizing sediment production in Sattarkhan Ahar dam basin using MUSLE and SWAT models, *Journal of Hydrogeomorphology*, 18, (23), 119-141.
- Lai, Y.G., & Wu, K. (2019). A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes, *Fluids*, 4(1), 18-28.
- Nasseri, F., Azari, M., Dastarani, M. T. (2018). Optimization of Coefficients of Sediment Measurement Equations Using Genetic Algorithm (Case Study: Ghazaghi and Bagh- -Abbasi Stations), *Iranian Journal of Irrigation and Water*, 9(3), 82-98. (In Persian).

- Noorani, V., & Mohsenzadeh, S. (2017). Estimation of Monthly Sediment Load of Aji Chai Basin Stations Using MPSIAC Model and Waterfall Microscale, Artery, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(11), 83-103.
- Ouda, M. (2019). *Multiphase Modelling of Sediment Transport and Bed Erosion for the Study of Coastal Morphodynamics*, KULeuven, Technology Campus Brugge, Belgium, October 2019.
- Raeisi, M., Najafinejad, A., & AzimMohseni, M. (2019). Investigation of time phenomena of sediment measurement curve and its comparison with several statistical methods for estimating suspended sediment load (Case study: Gamasiab watershed), *Journal of Basin Management Watershed*, 20, 83-96.
- Ramezanipour, E., Mosaedi, A., & Mesdaghi, M. (2017). Determining the most appropriate method for estimating suspended sediment based on error statistics (Case study -a number of sub-basins), *Watershed Management Research Journal*, 8 (15), 112-124.
- Zahiri, A. R., Qoli Nejad, J., & Dehghani, A. (2018). Calculation of transverse distribution of river sediments using a quasi-two-dimensional mathematical model (Case study: Qarasu River), *Journal of Water Resources Engineering*, 11(38), 83-93.
- Zhang, W., Wei, X., Jinhai, Z., Yuliang, Z., & Zhang, Y. (2012). Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves, *Continental Shelf Research*, 38, 35-46.