



بررسی پدیده‌های زمانی منحنی سنجه رسوب و مقایسه آن با چند روش آماری برای برآورد بار رسوب معلق (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گاماسیاب)

مریم رئیسی^۱، علی نجفی نژاد^۲ و مجید عظیم محسنی^۳

۱- دانشجوی دکتری رشته آبخیزداری دانشگاه لرستان (نویسنده مسوول: maryam.raisi90@yahoo.com)

۲- دانشیار گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استادیار گروه آمار دانشگاه گلستان

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۷

صفحه: ۸۳ تا ۹۶

چکیده

ماهیت متغیر و پیچیده بار رسوب رودخانه‌ها باعث شده است که برآورد میزان رسوب وارده به مخازن و تولید رسوب دراز مدت، برای تعیین عمر سازه‌ها با مشکل رو به رو شود. کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب یکی از معمولی‌ترین روش‌های برآورد بار رسوبی معلق رودخانه‌هاست. صرف نظر از دقت اندازه‌گیری رسوب در نمونه‌برداری و سنجش غلظت نمونه‌ها و نیز اندازه‌گیری دبی متناظر آن و با توجه به تغییرات مکانی و زمانی رسوب معلق در عملیات اصلاح و مدیریت رودخانه، استخراج منحنی‌های سنجه رسوب یکی از مهم‌ترین منابع عمده خطا در برآورد رسوب می‌باشند. از این رو، ارائه منحنی‌های پشتیبان زمانی برای منحنی سنجه رسوب که بر اساس آن بتوان دقت و صحت رفتار زمانی این منحنی را ارزیابی کرد، ضروری به نظر می‌رسد. لذا، در این مطالعه، جهت بررسی تغییرات زمانی منحنی سنجه رسوب، منحنی‌های پشتیبان زمانی منحنی سنجه رسوب به منظور بررسی تغییرات شیب منحنی و تغییرات سالیانه آن، معرفی شده‌اند. همچنین، در این مطالعه، برای برآورد بار رسوب معلق، نتیجه حاصل از روش منحنی سنجه رسوب با نتایج حاصل از چند روش آماری در سه ایستگاه هیدرومتری و رسوب سنجی در حوزه آبخیز گاماسیاب، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از اعتبار سنجی مدل‌ها، نشان داد که مدل سری زمانی تابع انتقال، به دلیل در نظر گرفتن پارامتر زمان، با مجموع مربعات خطای $3/0000+$ تن در روز، $24/3$ تن در روز و $2/92$ تن در روز، به ترتیب در ایستگاه‌های سنگ سوراخ، وسج و مرویل، در مقایسه با سایر مدل‌های به کار رفته در این مطالعه، از عملکرد بالاتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: رسوب معلق، منحنی سنجه رسوب، منحنی‌های پشتیبان زمانی منحنی سنجه رسوب، روش‌های آماری و رودخانه گاماسیاب

مقدمه

کانال‌ها را به آسانی جابه‌جا می‌کند، که خود باعث تغییر در مورفولوژی کانال‌ها می‌شود. مطالعات برآورد رسوب بوسیله روابط رگرسیونی نشان می‌دهند، مقادیر پیش‌بینی شده ۲۵-۲۰ درصد بیشتر از مقادیر واقعی است (۱). لذا، برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا همراه می‌باشد (۱۶). که عمده‌ترین دلیل آن می‌تواند تغییرات مدل بر اساس تغییر زمان باشد. در این راستا، نتایج حاصل از یک مطالعه در رودخانه Pearl نیز نشان می‌دهد که پارامترهای سنجه رسوب بر اساس زمان تغییر می‌کند (۲۱). همچنین نتایج تحقیقی دیگر در زمینه تغییرات زمانی منحنی سنجه رسوب که در نواحی مرطوب کوهستانی اتیوپی جهت تعیین روابط غلظت رسوب معلق- دبی انجام گردید و رسوب ناشی از بارش از زمین‌های کشاورزی، توسط منحنی‌های سنجه رسوب برآورد شد، نشان می‌دهد که منحنی‌های سنجه رسوب تغییر جهت واضحی با توالی فصول بارانی نشان می‌دهند و این تغییر جهت در میزان غلظت رسوب در سه حوضه جنگلی که از نظر وسعت با یکدیگر تفاوت داشتند، مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که غلظت بالای رسوب با جریان‌های پائین در شروع فصول بارانی یافت می‌شوند و غلظت‌های پائین رسوب با جریان‌های بالا در پایان فصول بارانی رخ می‌دهند. نتایج نهایی تحقیق نشان داد که تغییر جهت از غلظت‌های بالای رسوب به غلظت‌های پائین با جریان‌های

هر ساله بالغ بر ۲۰ تا ۵۲ میلیارد تن رسوب توسط رودخانه‌های جهان انتقال می‌یابد و در آب‌های ساکن ته‌نشین می‌شود (۸). انتقال رسوب و رسوب‌گذاری، پیامدهایی چون ایجاد جزایر رسوبی در مسیر رودخانه و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال جریان‌های سیلابی، کاهش عمر مفید سدها و ظرفیت ذخیره مخازن، خوردگی تاسیسات سازه‌های رودخانه‌ای و وارد شدن خسارات به ابنیه آبی و مزارع، رسوب‌گذاری در کف کانال و بسیاری مسایل و مشکلات دیگر را در بردارد.

همچنین با توجه به اصول برداشت مصالح رودخانه‌ای و لزوم اطلاع از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان رودخانه در طراحی سازه‌های رودخانه‌ای، ضرورت بررسی و مطالعه روش‌های مختلف برآورد بار رسوب رودخانه‌ها به روشی تبیین می‌شود (۷). یکی از روش‌های متداول تخمین رسوب، روش منحنی سنجه رسوب است که در آن یک منحنی توانی بر داده‌های آماری دبی جریان- دبی رسوب برآورد شده داده می‌شود (۱۴). Morehead و همکاران (۱۵) به بررسی تاثیر فاکتور زمان در تغییرات میزان رسوب و همچنین تغییر در مورفولوژی کانال‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که عامل زمان با ایجاد تغییرات در فصول مختلف باعث تغییرات در منابع آب و متعاقباً تغییر پذیری در حجم آن، رسوب ذخیره شده در

میزان رسوب به کار گرفته شده است (۱۹). خصوصیتی از این مدل‌ها که آن‌ها را نسبت به سایر روش‌ها و الگوریتم‌ها متمایز می‌نماید حساسیت کمتر آنها نسبت به وجود خطا در ورودی‌ها است. علت این امر پردازش گسترده اطلاعات توزیعی می‌باشد (۱۴). در مطالعه‌ای که در رودخانه دوغ از شاخه‌های گرگانرود انجام گرفت، از روش منحنی سنج رسوب با روش‌های مختلف دسته‌بندی شامل فصلی، ماهانه، حدوسط دسته‌ها، دبی کلاسه، دوره مشابه هیدرولوژیکی، دوره کم آبی و پر آبی و نوع جریان و روش شبکه عصبی استفاده گردید. که در مجموع روش شبکه عصبی نتایج را با خطای کمتر و همبستگی بالاتر ارائه داد (۷). در این پژوهش، با توجه به این‌که برآورد رسوب بوسیله منحنی سنج رسوب تنها از طریق ایجاد ارتباط بین داده‌های دبی رسوب با داده‌های دبی متناظر آنها انجام می‌شود و اثر عوامل مؤثر دیگر، نظیر زمان در نظر گرفته نمی‌شود، منحنی‌های پشتیبان زمانی برای منحنی‌های سنج رسوب ارائه شده است. بدین ترتیب، ابتدا به منظور بررسی تغییرات منحنی سنج رسوب در طول زمان و با توجه به اهمیت شیب خط رگرسیون ابتدا منحنی شیب استاندارد به عنوان منحنی پشتیبان زمانی منحنی سنج رسوب ارائه گردید. سپس با توجه به اینکه منحنی‌های سنج رسوب تنها میزان دبی و رسوب را بدون در نظر گرفتن زمان ثبت آنها ارائه می‌دهند، از این رو نمی‌تواند زمان‌هایی که مقدار رسوب برآورد شده آریبی بیشتری نسبت به مقدار رسوب مشاهداتی دارند را مشخص نمایند. لذا نمودارهای سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده توسط منحنی سنج رسوب و میزان رسوب مشاهداتی، به عنوان منحنی‌های پشتیبان زمانی منحنی سنج رسوب ارائه گردیدند. در نهایت، در این پژوهش، با توجه به مزایای مدل سری زمانی تابع انتقال و نیز عملکرد مناسب آن در بسیاری از موارد در مهندسی منابع طبیعی، قابلیت این روش در مقایسه با روش‌های منحنی سنج رسوب، رگرسیون غیر خطی و شبکه عصبی جهت برآورد رسوب معلق در سه ایستگاه هیدرومتری منتخب رودخانه گاماسیاب، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. سپس دقت و صحت هر یک از این روش‌ها نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

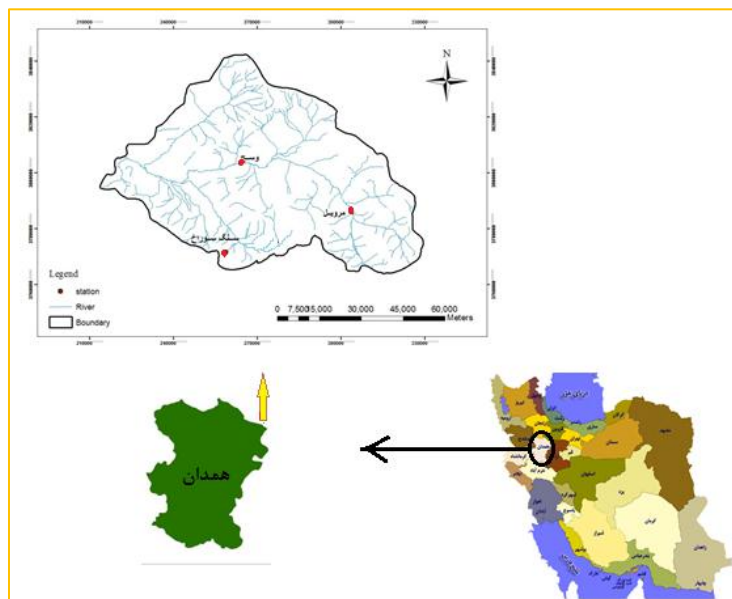
مواد و روش‌ها موقعیت منطقه

حوضه آبخیز گاماسیاب به مساحت ۱۷۰۶/۳ کیلومتر مربع در غرب کشور و در استان همدان در برگرفته یکی از سرشاخه‌های اصلی و اولیه سیستم رودخانه‌ای کرخه- دز می‌باشد که از دامنه شمالی کوه گرین و از چشمه کارستی بهمین نام سرچشمه می‌گیرد و در جهت شمال غربی در دشت نهاوند جریان می‌یابد (شکل ۱). رودخانه گاماسیاب که بزرگ‌ترین رودخانه استان همدان است در این محدوده مطالعاتی جریان دارد، این رودخانه پس از دریافت سایر جریانات دیگر حوضه‌های مجاور نظیر: ملایر، اسداباد، توپسرکان و کنگاور در محلی به نام دوآب از منطقه خارج می‌شود. با بررسی آمار رسوب و دبی جریان ایستگاه‌های

بزرگ‌تر در پایان دوره بارش، نقش مهمی در مشخص کردن تغییر غلظت رسوب در طی فصول بارانی بازی می‌کند و نشان‌دهنده کم شدن بار رسوبی و رقیق شدن جریان‌های پایه بزرگ‌تر می‌باشد (۱۰). در مطالعه‌ای دیگر که توسط Stott و همکاران (۲۰) بر روی پویایی بار رسوب معلق در منطقه آلپ انجام شد، ایشان دریافتند که در سال ۲۰۰۳ میانگین دما در این منطقه ۲ درجه سانتیگراد و میانگین دبی جریان ۲/۳ برابر و بار رسوب معلق نیز بین ۳/۱ و ۴/۱ برابر بزرگ‌تر از مقادیر آن‌ها در سال ۲۰۰۴ بوده است. اما مشاهدات نشان داده است که در طی سال ۲۰۰۴ مقدار غلظت رسوب معلق افزایش داشته است که ایشان علت این امر را پدیده گرمایش جهانی و بالا رفتن دمای هوا دانستند که این امر خود باعث بالا رفتن دبی از طریق افزایش دما در فصل ذوب و جا به جایی بیشتر رسوبات می‌شود. مدل تابع انتقال یک روش سری زمانی می‌باشد که روابط بین سری‌های زمانی را در نظر می‌گیرد. در مطالعه‌ای جهت بررسی تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از تغییر درجه حرارت و میزان بارش در آن منطقه از تابع انتقال استفاده شده است و به این نتیجه رسیده‌اند که تابع انتقال می‌تواند میزان تغییرات سطح آب در آینده را با دقت بالایی پیش‌بینی کند (۱۷). در تحقیقی که جهت بررسی تغییرات زمانی و مکانی رسوب معلق در طول رودخانه گرگانرود با استفاده از مدل رگرسیونی و مدل تابع انتقال انجام شد، پس از تعیین معادله نهایی تابع انتقال، پیش‌بینی بار رسوب معلق توسط این مدل صورت گرفت و با نتایج پیش‌بینی بار رسوب معلق توسط مدل رگرسیونی سنج رسوب مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل تابع انتقال در پیش‌بینی نسبت به مدل سنج رسوب دارای دقت بالاتری می‌باشد (۱۱). روشی دیگر که در این پژوهش، به منظور بررسی تقعر و تحدب منحنی سنج رسوب مورد ارزیابی قرار گرفت، روش رگرسیون غیرخطی می‌باشد. نتایج مطالعه‌ای در زمینه مقایسه روش رگرسیون غیرخطی با روش رگرسیون خطی در رودخانه راین و بعضی از انشعابات آن، نشان داد که رگرسیون خطی با فاکتور اصلاحی و بدون فاکتور اصلاحی بار رسوب را کمتر از حد واقعی برآورد می‌کند و روش رگرسیون غیرخطی، به‌ویژه برای ایستگاه‌های با منحنی سنج رسوب مقعر به طور دقیق‌تری بار رسوب را برآورد می‌کند (۳). در کشور ما اطلاعات دقیق و صحیح از فرسایش، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری بسیار کم است و بین اندازه‌گیری‌ها و برآوردهای انجام شده نیز اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. در این زمینه مدل‌های ریاضی و فرمول‌های تجربی متعددی مورد استفاده قرار گرفته که البته برخی از آن‌ها به دلیل پیچیدگی و نیاز به تعداد زیاد پارامترهای ورودی، در بسیاری از موارد امکان استفاده از آن‌ها وجود ندارد. همچنین به علت محدودیت‌هایی که برخی مدل‌های استفاده شده از جمله مدل‌های رگرسیونی از خود نشان داده‌اند، در سال‌های اخیر دسته دیگری از مدل‌های غیرخطی تحت عنوان مدل‌های هوش مصنوعی همچون شبکه‌های عصبی که مبتنی بر فرآیند یادگیری از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند نیز در زمینه‌های مختلف مرتبط با هیدرولوژی و هیدرولیک از جمله پیش‌بینی

در بعضی از ماه‌های سال شرایط اقلیمی نسبتاً متفاوت نیز داشته باشند. (جدول ۱) و (جدول ۲) به ترتیب مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه و خلاصه اطلاعات آماری داده‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

مختلف کشور، در این مطالعه سه ایستگاه رسوب سنجی و هیدرومتری سنگ سوراخ، وسج و مرویل که بر روی سرشاخه اصلی گاماسیاب قرار دارند، به نحوی انتخاب شدند که ضمن داشتن دوره‌های آماری با فراوانی نمونه‌برداری حداقل روزانه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Geographical location of the studied area

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of Hydrometric of studied stations

| نام ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | مساحت حوضه آبخیز تحت پوشش (کیلومتر مربع) | رودخانه | ارتفاع از سطح دریا (متر) | درجه‌بندی ایستگاه‌ها | طول دوره آماری مورد مطالعه (سال) |
|-------------|---------------|---------------|--|----------|--------------------------------|-------------------------|--|
| سنگ سوراخ | ۴۸°، ۲۳' | ۳۴°، ۳۱'، ۳۵" | ۵۳ | گاماسیاب | ۱۸۰۰ | درجه یک | ۲۶ |
| وسج | ۴۸°، ۲۶'، ۸" | ۳۴°، ۱۹'، ۲" | ۲۹۴۰ | آب ملایر | ۱۵۳۵ | درجه یک | ۲۶ |
| مرویل | ۴۸°، ۵۳'، ۱۱" | ۳۴°، ۱۰'، ۲" | ۲۸۰ | مرویل | ۱۸۰۵ | درجه دو | ۲۶ |

جدول ۲- آمار توصیفی میزان رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبخیز گاماسیاب

Table 2. Descriptive statistics of sediment rate in the hydrometric stations in the Gamasiab watershed

| ایستگاه | میانگین (Ton/Day) | انحراف معیار |
|-----------|-------------------|--------------|
| سنگ سوراخ | ۲۷/۹ | ۱۲۱/۸ |
| وسج | ۲۰۸/۲ | ۱۵۲۰/۷ |
| مرویل | ۳۳/۷ | ۲۲۳/۱ |

منحنی سنج رسوب

در این تحقیق برای رسم منحنی‌های سنج رسوب، از مقادیر دبی جریان و بار رسوب معلق لگاریتم گرفته شد. منحنی سنج رسوب در تمامی ایستگاه‌ها در نرم‌افزار Minitab 14.0 ترسیم شد.

$$Y_S = a + bX_S \quad (1)$$

رابطه (۱)
 Y_S : لگاریتم دبی جریان، X_S : لگاریتم دبی رسوب، a : عرض از مبدا و b : شیب خط

منحنی‌های پشتیبان زمانی منحنی سنج رسوب منحنی شیب زمانی

با توجه به منحنی سنج رسوب (۱) شرط اساسی برای

کفایت مدل این است که پارامترهای a و b به زمان وابسته نباشند. با توجه به اهمیت شیب خط رگرسیون بررسی این فرضیه در مورد آن بسیار ضروری می‌باشد. از این رو منحنی شیب استاندارد به عنوان یک نمودار پشتیبان زمانی منحنی سنج رسوب طی الگوریتم زیر ارائه می‌گردد:

۱- ابتدا مقادیر لگاریتم غلظت رسوب و دبی جریان استاندارد گردید. ۲- مقادیر شیب منحنی سنج رسوب هر سال بدست آمد، سپس منحنی سری زمانی شیب ترسیم گردید. ۳- برای هر یک از ایستگاه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد یک فاصله اطمینان برای شیب منحنی سنج رسوب هنگام ترسیم نمودارهای سری زمانی در نظر گرفته شد.

زمانی که لگاریتم داده‌های دبی جریان - بار رسوب در مقابل هم رسم می‌شوند، وقتی روند داده‌ها مقعر یا محدب باشد، منحنی سنجه رسوب بار رسوبات را بیشتر از حد واقعی یا کمتر از آن برآورد می‌کند. تضاد نتایج موجود به مفید واقع شدن استفاده از رگرسیون غیر خطی جهت برآورد بار رسوب منجر می‌شود (۶). در این مطالعه جهت انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و اجرای مدل رگرسیون غیرخطی توانی از نرم‌افزار SPSS 17.0 استفاده شد. معادله کلی رگرسیون غیر خطی به صورت زیر است (۸):

$$\log(Q_s) = \log(a) + b(\log Q)^c \quad (۲)$$

رابطه (۲) Q_s : دبی رسوب، a : عرض از مبدأ، b : شیب خط c : توان و Q : دبی جریان

با رسم منحنی‌های سنجه رسوب مجموعه داده ۲۶ ساله هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر ضرایب a و b به دست آمد. و مقدار اولیه c ، یک لحاظ شد. سپس معادله رگرسیون غیر خطی بر روی سری داده‌ها اعمال شده و خروجی مدل به دست می‌آید. بدین ترتیب مقادیر a ، b و c مدل رگرسیون غیرخطی به دست می‌آید. وقتی مقدار c برابر یک برآورد شود، مقدار بار رسوب پیش‌بینی شده همان مقداری خواهد بود که رگرسیون خطی برآورد می‌کند. در نهایت، مقایسه شکل‌های منحنی سنجه رسوب و پارامترهای آن بر این اساس صورت می‌گیرد که اگر مقدار c کمتر از 0.5 برآورد شود منحنی محدب است و اگر بیشتر از $1/5$ باشد منحنی مقعر و اگر بین $1/5 - 0.5$ برآورد شود منحنی خطی است.

مدل شبکه عصبی مصنوعی^۲

در این پژوهش با توجه به مزایای شبکه عصبی مصنوعی و نیز عملکرد مناسب آن در بسیاری موارد در مهندسی منابع آب، قابلیت روش هوشمند شبکه عصبی در مقایسه با روش معادله سنجه رسوب خطی، غیرخطی و مدل سری زمانی تابع انتقال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این مطالعه جهت انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و اجرای مدل شبکه عصبی از نرم‌افزار SPSS 17.0 استفاده شد که برآورد رسوب توسط این روش طی الگوریتم زیر انجام شد: ۱- نرمال‌سازی داده‌های لگاریتمی و تعیین ورودی و خروجی مدل: نکته مهم این است که باید داده‌ها را قبل از وارد کردن آن‌ها در شبکه، نرمال‌سازی کرد. به طور عمده وارد کردن داده‌های خام در شبکه سرعت و دقت شبکه را کم می‌کند (۱۳). لذا برای جلوگیری از بروز چنین شرایطی و همچنین به لحاظ یکسان کردن ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل نرمال‌سازی داده‌ها مطابق رابطه (۳) صورت گرفت.

$$P_N = (P - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}) : P_N \quad (۳)$$

رابطه (۳) P : معرف داده‌های مشاهداتی، P_{\max} : حداکثر داده‌ها و P_{\min} : حداقل داده‌ها. در نهایت مقادیر دبی جریان به عنوان ورودی و مقادیر بار رسوب به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شدند.

۲- تعیین شبکه عصبی مناسب: با توجه به کاربرد گسترده شبکه پرسپترون چند لایه در مهندسی آب (۷)، در تحقیق حاضر نیز از این مدل استفاده شد.

نمودارهای سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده توسط منحنی سنجه رسوب و میزان رسوب مشاهداتی

با توجه به اینکه منحنی‌های سنجه رسوب تنها میزان دبی و رسوب را بدون در نظر گرفتن زمان ثبت آنها ارائه می‌دهند، از این رو نمی‌توانند زمان‌هایی که مقدار رسوب برآورد شده آریبی بیشتری نسبت به مقدار رسوب مشاهداتی دارند را مشخص نمایند. رسم این نمودار طی مراحل زیر انجام می‌شود:

- ۱- برای رسم این نمودار، ابتدا منحنی سنجه رسوب کلی برای هر سه ایستگاه سنگ سوراخ، وسج و مرویل ترسیم گردید.
- ۲- میزان رسوب پیش‌بینی شده در هر یک از ایستگاه‌های مذکور برآورد گردید.
- ۳- نمودار سری زمانی میزان رسوب مشاهداتی و پیش‌بینی شده به طور همزمان ترسیم گردید.

مدل تابع انتقال

از آنجا که برآورد رسوب بوسیله منحنی سنجه رسوب تنها از طریق ایجاد ارتباط بین داده‌های دبی رسوب با داده‌های دبی جریان متناظر آن‌ها انجام می‌شود، لذا اثر عوامل مؤثر دیگر، نظیر زمان در تخمین بار رسوب توسط این منحنی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. از این رو برای در نظر گرفتن فاکتور مهم زمان در برآورد رسوب از مدل سری زمانی تابع انتقال استفاده شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه جهت انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری مدل سری زمانی تابع انتقال از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد که طی الگوریتم زیر ارائه می‌گردد (۵):

- ۱- برازش یک مدل مناسب SARIMA^۱ بر مقادیر لگاریتم دبی جریان: معیار ارزشیابی مدل مناسب، آماره باکس- پیرز (Q_1) در نظر گرفته می‌شود که دارای توزیع خی دو می‌باشد. هر چه مقدار این آماره کوچکتر یا مقدار معنی دار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از برازش مدل مناسب در این مرحله می‌باشد.
- ۲- برازش مدل اولیه تابع انتقال می‌باشد: معیار ارزشیابی برازش مدل در این مرحله نیز یک آماره خی دو (Q_2) می‌باشد که بر اساس آن در مورد اعتبار مدل قضاوت می‌شود. هر چه مقدار این آماره کوچکتر یا مقدار معنی دار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از برازش مدل مناسب در این مرحله می‌باشد.

- ۳- برازش مدل بر باقیمانده‌ها و مدل تابع انتقال: پس از برازش مدل اولیه تابع انتقال بر مقادیر داده‌های لگاریتم دبی رسوب بر حسب دبی جریان، باقیمانده‌های این مدل محاسبه می‌گردد. پس از اطمینان از اینکه این باقیمانده‌ها از سری داده‌های اصلی مستقل هستند بر روی آنها مدل سری زمانی SARIMA برازش می‌گردد. مانند گام اول معیار ارزشیابی این مدل یک آماره خی دو (Q_3) می‌باشد. هر چه مقدار این آماره کوچکتر یا مقدار معنی دار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از برازش مدل مناسب در این مرحله می‌باشد.

بررسی روابط غیرخطی دبی جریان - بار رسوب هنگام تبدیل لگاریتمی داده‌ها

رایج‌ترین روش جهت برآورد بار رسوب، منحنی‌های سنجه رسوب است که این منحنی‌ها به وسیله رگرسیون خطی روی لگاریتم داده‌های دبی - بار رسوب ایجاد می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

تابع مجموع مربعات خطا^۶

$$SSE = \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

در اینجا \hat{Y}_t مقدار متغیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Y_t مقدار متغیر مشاهده شده، t زمان مشاهده و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از منحنی سنجه رسوب

پس از تبدیل لگاریتمی مقادیر بار رسوب و دبی جریان، منحنی‌های سنجه رسوب در هر یک از ایستگاه‌ها به ترتیب زیر در (اشکال ۲ تا ۴) رسم گردید که با توجه به نمودارها مشخص می‌گردد که تمام منحنی‌ها از R^2 پائینی برخوردارند.

نتایج حاصل از منحنی پشتیبیان منحنی پشتیبیان زمانی

نتایج حاصل از منحنی شیب زمانی

پس از استاندارد نمودن مقادیر غلظت رسوب و دبی جریان، منحنی شیب زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای هر یک از ایستگاه‌ها ترسیم شد که نتایج آن برای هر ایستگاه در شکل‌های (۵ تا ۷) ارائه شده است. خطوط (—) در نمودارها نشان‌دهنده فاصله اطمینان برای شیب منحنی و خطوط (---) نشان‌دهنده میانگین شیب منحنی در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد.

در این تحقیق همانطور که از اشکال و نمودارها پیداست، سال‌هایی که شیب منحنی سنجه رسوب از میزان فاصله اطمینان کمتر است در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه تعیین شد.

نتایج حاصل از ترسیم نمودارهای سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده توسط منحنی سنجه رسوب و میزان رسوب مشاهداتی (شکل‌های ۸ تا ۱۰).

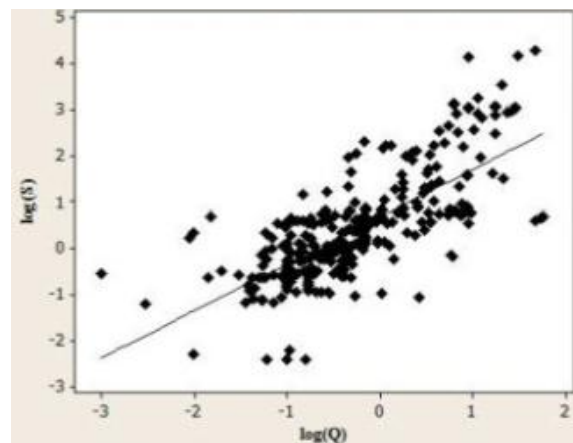
۳- تعیین داده‌های Test و Training: در روش شبکه عصبی ابتدا یک تعداد از داده‌ها که نماینده همه شرایط ممکن هستند برای آموزش شبکه و بقیه داده‌ها برای آزمون انتخاب می‌شوند (۱۳). با توجه به این نکته، در نهایت حدود ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد از داده‌ها برای آزمون شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده می‌شود. اما، از آنجایی که در این مطالعه مقایسه کارایی چند روش آماری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، سعی بر این است که در تمامی روش‌ها از سری داده‌های یکسانی استفاده شود و دقت مدل‌ها در هر یک از چهار روش مورد مطالعه (رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی و تابع انتقال) برای تعداد داده یکسانی سنجیده شود. به همین منظور، برای تمام داده‌ها کد ۱ در نظر گرفته شد تا تمامی داده‌ها در یک دسته آموزشی قرار گیرند. ۴- در نظر گرفتن تابع محرک مناسب برای لایه‌های پنهان و خروجی و همچنین در نظر گرفتن تعداد لایه‌های پنهان و تعداد مناسب نرون‌ها برای لایه‌های پنهان: که در این مرحله با استفاده از روش سعی و خطا^۷ توابع مناسب برای هر یک از لایه‌های پنهان و خروجی و همچنین تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان تعیین می‌شود (۱۳).

برآورد و اعتبار سنجی مدل‌ها

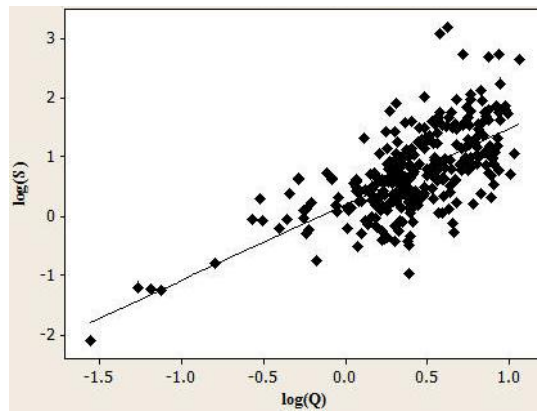
پس از برازش مدل‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی توانی، شبکه عصبی و تابع انتقال بر سری لگاریتم داده‌های دبی جریان و دبی رسوب اقدام به پیش‌بینی رسوب در ۱۲ ماه آینده گردید. سپس اعتبار سنجی مدل با استفاده از توابع استاندارد که در مدل‌های رگرسیونی و سری‌های زمانی برای تعیین کارایی مدل به صورت زیر می‌باشند (۱۲) در ایستگاه‌های مورد مطالعه انجام شد: تابع میانگین قدر مطلق فاصله^۴

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t| \quad \text{رابطه (۴)}$$

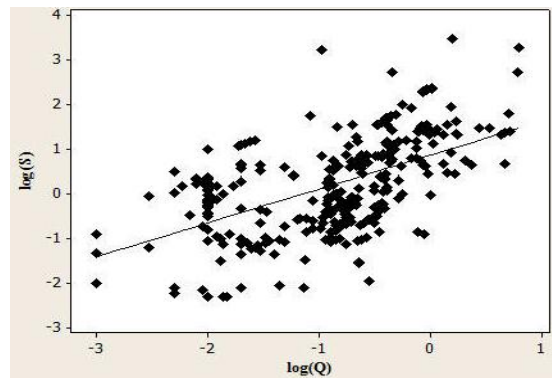
تابع مجذور مربع میانگین خطا^۵



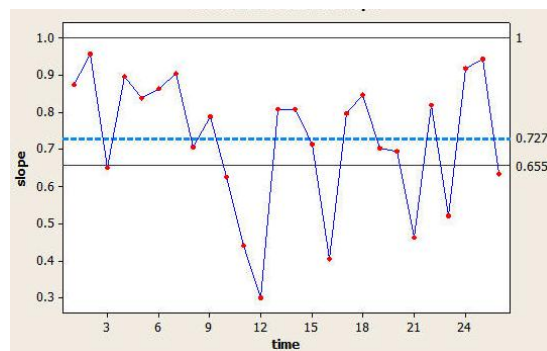
شکل ۲- نمودار خطی بر اساس لگاریتم دبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه سنگ سوراخ ($R^2=0.43$)
Figure 2. Linear graph, based on the logarithm of the flow discharge and the suspended sediment in the Sang-Surakh station ($R^2=0.43$)



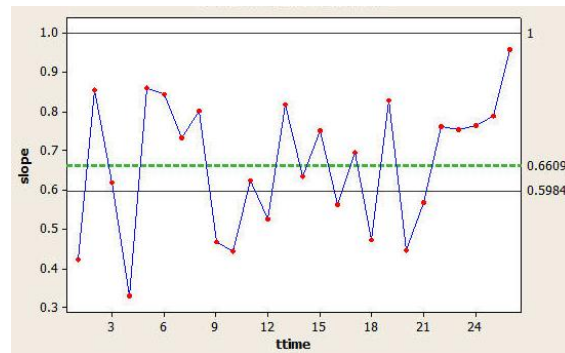
شکل ۳- نمودار خطی بر اساس لگاریتم دبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه وسج ($R^2=0.53$)
 Figure 3. Linear graph, based on the logarithm of the flow discharge and the suspended sediment in the Vasaj station ($R^2=0.53$)



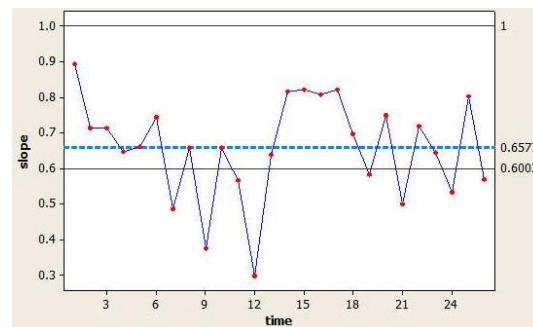
شکل ۴- نمودار خطی بر اساس لگاریتم دبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه مرویل ($R^2=0.32$)
 Figure 4. Linear graph, based on the logarithm of the flow discharge and the suspended sediment in the Marvil station ($R^2=0.32$)



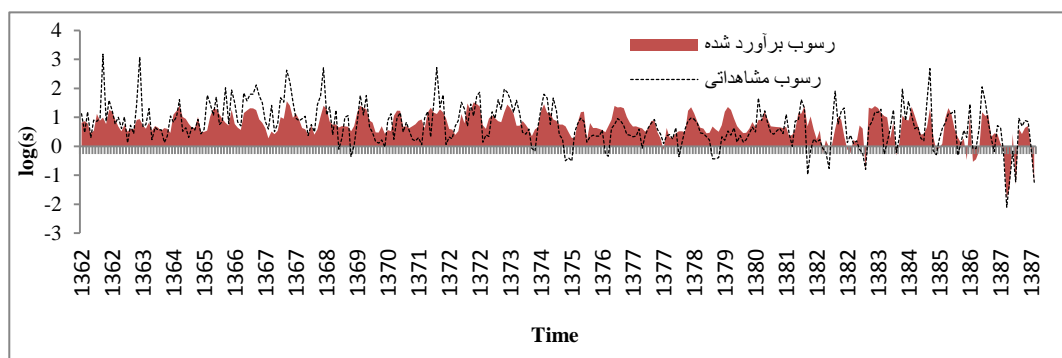
شکل ۵- نمودار سری زمانی تغییرات شیب منحنی سنج رسوب در ایستگاه سنگ سوراخ
 Figure 5. The Time series graph of variations of slope of the sediment rating curve in the Sang-Surakh station



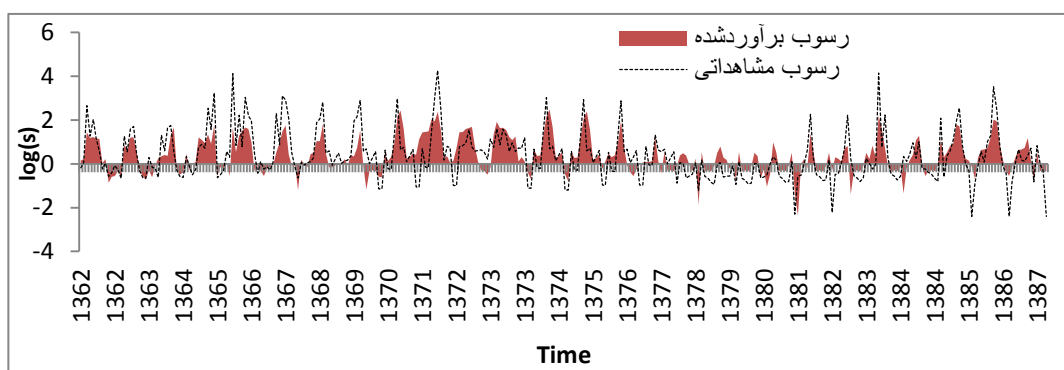
شکل ۶- نمودار سری زمانی تغییرات شیب منحنی سنج رسوب در ایستگاه وسج
Figure 6. The Time series graph of variations of slope of the sediment rating curve in the Vasaj station



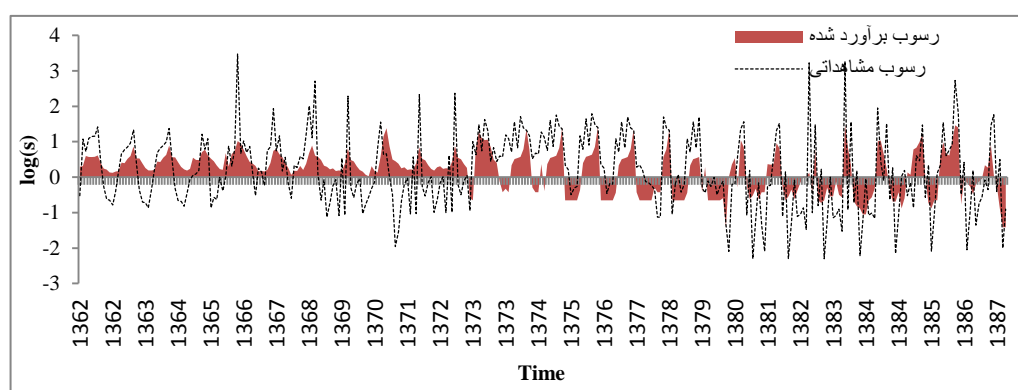
شکل ۷- نمودار سری زمانی تغییرات شیب منحنی سنج رسوب در ایستگاه مرویل
Figure 7. The Time series graph of variations of slope of the sediment rating curve in the Marvil station



شکل ۸- نمودار سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده و مشاهداتی در ایستگاه سنگ سوراخ
Figure 8. Time series graph of the estimated and observed sediment rate in the Sang-Surakh station



شکل ۹- نمودار سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده و مشاهداتی در ایستگاه وسج
Figure 9. Time series graph of the estimated and observed sediment rate in the Vasaj station



شکل ۱۰- نمودار سری زمانی میزان رسوب پیش‌بینی شده و مشاهداتی در ایستگاه مرویل
Figure 10. Time series graph of the estimated and the observed sediment rate in the Marvil station

نتایج حاصل از مدل تابع انتقال
دبی جریان (جدول ۳):
نتایج حاصل از برآزش مدل SARIMA بر مقادیر لگاریتم

جدول ۳- نکویی برآزش مدل SARIMA در هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری رسوب سنجی مورد مطالعه
Table 3. The Fitting of the SARIMA model at each of the studied hydrometric stations

| ایستگاه | Q | P-value |
|-----------|------------|-------------|
| سنگ سوراخ | $Q_1=43/4$ | $P_1=0/507$ |
| وسج | $Q_1=35/5$ | $P_1=0/749$ |
| مرویل | $Q_1=43/2$ | $P_1=0/523$ |

نتایج حاصل از برآزش مدل اولیه تابع انتقال (جدول ۴):

جدول ۴- نکویی برآزش مدل اولیه تابع انتقال در هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی مورد مطالعه
Table 4. The Fitting of the first transfer function model at each of the studied hydrometric stations

| ایستگاه | Q | P-value |
|-----------|-------------|-------------|
| سنگ سوراخ | $Q_2=35/1$ | $P_2=0/698$ |
| وسج | $Q_2=38/05$ | $P_2=0/659$ |
| مرویل | $Q_2=42/2$ | $P_2=0/677$ |

نتایج حاصل از برازش مدل بر باقیمانده‌ها و مدل نهایی تابع انتقال (جدول ۵):

جدول ۵- نکویی برازش مدل نهایی تابع انتقال در هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی مورد مطالعه

Table 5. The Fitting of the final transfer function model at each of the studied hydrometric stations

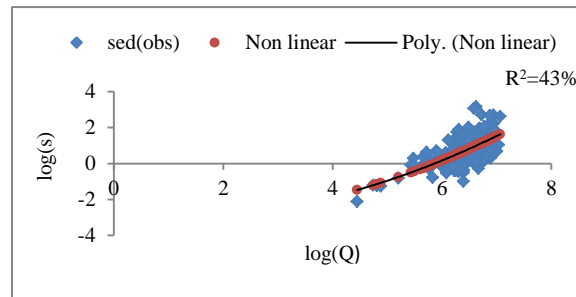
| ایستگاه | Q | P-value |
|-----------|-------------|-------------|
| سنگ سوراخ | $Q_3=30/42$ | $P_3=0/952$ |
| وسج | $Q_3=55/28$ | $P_3=0/554$ |
| مرویل | $Q_3=35/95$ | $P_3=0/876$ |

نتایج حاصل از مدل رگرسیون غیرخطی در این مرحله آنالیز رگرسیون غیرخطی روی لگاریتم (جدول ۶) و (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳) ارائه شده است. داده‌های دی- بار رسوب انجام شد و نتایج حاصل از آن در

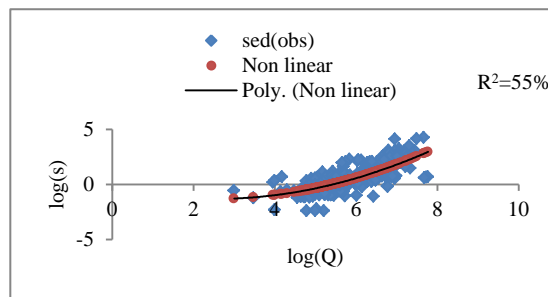
جدول ۶- مقادیر ضرایب a, b, c و مقایسه شکل‌های منحنی سنج رسوب بر اساس مقدار پارامتر c

Table 6. Coefficient values: a, b, c and comparing of sediment rating curves based on the parameter c value

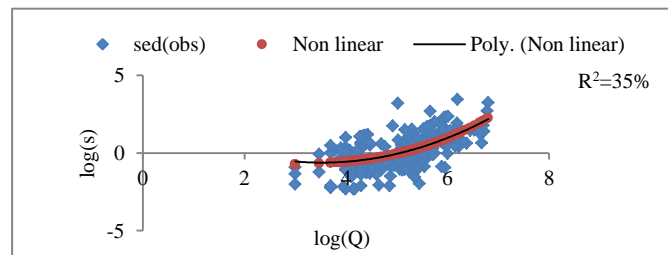
| نام ایستگاه | a | b | c | شکل منحنی سنج رسوب |
|-------------|--------|-------|-------|--------------------|
| سنگ سوراخ | -۲/۶۰۱ | ۰/۱۶۳ | ۴/۸۵۵ | مقعر |
| وسج | -۱/۳۹۶ | ۰/۰۶۳ | ۵/۸۹۷ | مقعر |
| مرویل | -۰/۷۴۴ | ۰/۰۱۳ | ۸/۳۵۴ | مقعر |



شکل ۱۱- نمودار غیرخطی، بر اساس لگاریتم دیبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه سنگ سوراخ ($R^2=0/43$)
Figure 11. Nonlinear graph, based on the logarithm of the flow discharge and the suspended sediment in the Sang-Surakh station ($R^2=0.43$)



شکل ۱۲- نمودار غیرخطی، بر اساس لگاریتم دیبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه وسج ($R^2=0/55$)
Figure 12. Nonlinear graph, based on the logarithm of the flow discharge and the suspended sediment in the Vasaj station ($R^2=0.55$)



شکل ۱۳- نمودار غیرخطی، بر اساس لگاریتم دیبی جریان و رسوب معلق در ایستگاه مرویل ($R^2=0/35$)
Figure 13. Nonlinear graph, based on the logarithm of the flow and the suspended sediment in the Marvil station ($R^2=0.35$)

نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی

نتایج حاصل از آن در (جدول ۷) ارائه شده است.

جدول ۷- مدل نهایی شبکه عصبی مصنوعی در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 7. The final neural network model at each of the studied stations

| نام ایستگاه | تعداد لایه‌های پنهان | تعداد نرون‌ها در لایه اول | تعداد نرون‌ها در لایه دوم | تابع محرک در لایه پنهان | تابع محرک در لایه خروجی |
|-------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| سنگ سوراخ | ۱ | ۳ | - | سیگموئید | واحد |
| وسج | ۱ | ۳ | - | هایپربولیک تانژانت | سیگموئید |
| مرویل | ۱ | ۲ | - | هایپربولیک تانژانت | سیگموئید |

نتایج حاصل از برآورد و اعتبارسنجی مدل‌های مورد ارزیابی

مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در این ۱۲ ماه در هر ایستگاه در جداول (۸ تا ۱۰) ارائه شده است. همچنین دقت و صحت هر یک از مدل‌ها توسط معیارهای SSE و $RMSE$ ، MAD در هر یک از ایستگاه‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در جداول (۸ تا ۱۰) ارائه گردیده است.

پس از برازش مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی توانی، شبکه عصبی و تابع انتقال بر سری داده‌های دبی جریان در این مرحله با استفاده از این مدل‌ها اقدام به برآورد رسوب در ۱۲ ماه آینده شد. نتایج مدل‌های مذکور به همراه

جدول ۸- مقایسه داده‌های واقعی و برآورد شده بار رسوب معلق توسط مدل‌های مورد مطالعه در ایستگاه سنگ سوراخ

Table 8. The Comparison of the observed data of the suspended sediment load by studied models in the Sang-Surakh station

مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (Ton/day)

| زمان | مقادیر واقعی (Ton/day) | تابع انتقال | رگرسیون خطی | رگرسیون غیر خطی | شبکه عصبی |
|------|------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------|
| ۳۰۱ | ۴/۳۰۶ | ۴/۳۰۵ | ۱/۲۳ | ۱/۱۷ | ۱/۷۷ |
| ۳۰۲ | -/۵۹۶ | -/۵۹ | -/۸۱ | -/۷۹ | ۱/۱۶ |
| ۳۰۳ | -/۰۰۸ | -/۰۰۷۹ | -/۰۱۶ | -/۰۳۴ | -/۰۱۴ |
| ۳۰۴ | -/۰۶۴ | -/۰۶۴ | -/۰۳۸ | -/۰۶۳ | -/۰۳۶ |
| ۳۰۵ | -/۶۷۶ | -/۶۷ | ۲/۶۳ | ۲/۵۱ | ۳/۵۴ |
| ۳۰۶ | -/۰۵۹ | -/۰۵ | -/۰۴۷ | -/۰۷۲ | -/۰۴۶ |
| ۳۰۷ | ۹/۳۸۴ | ۹/۳۸ | ۴/۰۴ | ۳/۸۹ | ۵/۱۲ |
| ۳۰۸ | ۴/۹۲۹ | ۴/۹۲ | ۲/۶۵ | ۲/۵۱ | ۳/۶۳ |
| ۳۰۹ | ۷/۸ | ۷/۷۹ | ۴/۳۳ | ۴/۱۶ | ۵/۳۷ |
| ۳۱۰ | ۷/۰۸۳ | ۷/۰۷ | ۵/۰۶ | ۴/۸۹ | ۶/۱۶ |
| ۳۱۱ | -/۹۲۴ | -/۹۲ | -/۷۴۳ | -/۷۲ | ۱/۰۵۹ |
| ۳۱۲ | -/۰۵۷ | -/۰۵ | -/۰۵۷ | -/۰۸۵ | -/۰۵ |
| MAD | | -/۰۰۰۸ | -/۰۲۵ | -/۰۲۸ | -/۰۲۲ |
| RMSE | | -/۰۰۰۱ | -/۰۳۰۵ | -/۰۳۴۷ | -/۰۳۹ |
| SSE | | -/۰۰۰۰۳ | ۱/۱۲ | ۱/۴۴ | ۱/۰۱۱ |

جدول ۹- مقایسه داده‌های واقعی و برآورد شده بار رسوب معلق توسط مدل‌های مورد مطالعه در ایستگاه وسج

Table 9. The Comparison of the observed data of the suspended sediment load by studied models in the Vasaj station

مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (Ton/day)

| زمان | مقادیر واقعی (Ton/day) | تابع انتقال | رگرسیون خطی | رگرسیون غیر خطی | شبکه عصبی |
|------|------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------|
| ۳۰۱ | -/۱۵۷ | -/۱۶۲ | -/۷۹ | -/۶۹ | -/۶۴ |
| ۳۰۲ | ۱/۰۵۲ | ۱/۰۹ | ۱/۸۶ | ۱/۴۷ | ۱/۵۱ |
| ۳۰۳ | ۴/۴۶۲ | ۲/۰۸ | ۴/۳۶ | ۳/۳۸ | ۳/۸ |
| ۳۰۴ | ۱/۴۸۳ | ۱/۶۹ | ۴/۴۶ | ۳/۵۴ | ۳/۹ |
| ۳۰۵ | ۱/۳۱۶ | ۵/۰۸ | ۵/۳۷ | ۴/۲۶ | ۴/۸۹ |
| ۳۰۶ | ۲/۴۰۷ | ۱۲/۰۲ | ۱۵/۱ | ۱۳/۸ | ۱۶/۵۹ |
| ۳۰۷ | ۵/۱۳۶ | ۸/۳۱ | ۱/۵۵ | ۱/۲۳ | ۱/۲۳ |
| ۳۰۸ | -/۱۵۱ | ۱/۶۹ | -/۱۷ | -/۲۲ | -/۱۹ |
| ۳۰۹ | ۶/۸۶۶ | ۲/۶۹ | ۳/۳۸ | ۲/۶۳ | ۲/۸۸ |
| ۳۱۰ | -/۹۳۷ | -/۲۶ | -/۴۶ | -/۴۴ | -/۴ |
| ۳۱۱ | -/۴۹۵ | -/۸۳ | -/۵۱ | -/۴۷ | -/۴۳ |
| ۳۱۲ | -/۰۰۴ | -/۰۲ | -/۴۶ | -/۴۴ | -/۴ |
| MAD | | -/۴۱ | -/۵۱ | -/۵۱ | -/۵۱ |
| RMSE | | -/۵۴ | -/۷۳ | -/۷۲ | -/۷۲ |
| SSE | | ۳/۲۴ | ۶/۵۲ | ۶/۳۲ | ۶/۳ |

جدول ۱۰- مقایسه داده‌های واقعی و برآورد شده بار رسوب معلق توسط مدل‌های مورد مطالعه در ایستگاه مرویل
Table 10. The Comparison of the observed data of the suspended sediment load by studied models in the Marvil station

| مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (Ton/day) | | | | | |
|--|------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------|
| زمان | مقادیر واقعی (Ton/day) | تابع انتقال | رگرسیون خطی | رگرسیون غیر خطی | شبکه عصبی |
| ۳۰۱ | ۱/۵۴۹ | ۱/۶۹ | ۰/۳۳ | ۰/۳۳ | ۰/۳۳ |
| ۳۰۲ | ۰/۴۴ | ۰/۷۹ | ۰/۶۳۸ | ۰/۵ | ۰/۴۷ |
| ۳۰۳ | ۰/۱۸۱ | ۰/۶۶ | ۰/۷۵۵ | ۰/۵۷ | ۰/۵۳ |
| ۳۰۴ | ۰/۲۷۱ | ۰/۴۱ | ۰/۹۱ | ۰/۶۶ | ۰/۶۱ |
| ۳۰۵ | ۰/۸۲۹ | ۰/۲۲ | ۲/۱۶ | ۱/۵۸ | ۱/۵۱ |
| ۳۰۶ | ۰/۴۴۷ | ۰/۷ | ۱/۸۵۷ | ۱/۳۱ | ۱/۲۵ |
| ۳۰۷ | ۲۶/۲۶۸ | ۲۰/۳۷ | ۸/۱۶ | ۱۱/۲۲ | ۱۳/۸ |
| ۳۰۸ | ۵۷/۳۷۲ | ۱/۸ | ۱/۱۱۹ | ۰/۷۹ | ۰/۷۴ |
| ۳۰۹ | ۰/۳۹۲ | ۰/۶۵۷ | ۰/۵۷ | ۰/۴۶ | ۰/۴۳ |
| ۳۱۰ | ۳/۱۵۷ | ۰/۹۶ | ۰/۱۳ | ۰/۲۳ | ۰/۲۳ |
| ۳۱۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۳۸ | ۰/۱۹ | ۰/۱۶۲ |
| ۳۱۲ | ۰/۱۲۶ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۳۸ | ۰/۱۹ | ۰/۱۶۲ |
| MAD | | ۰/۵۵ | ۰/۷۴ | ۰/۶۸ | ۰/۶۶ |
| RMSE | | ۰/۷ | ۰/۸۵ | ۰/۸۵ | ۰/۸۴ |
| SSE | | ۵/۹۲ | ۸/۷۶ | ۸/۷۶ | ۸/۵۷ |

مصنوعی برای برآورد بار رسوبی، استفاده گردید. نتایج حاصل از اعتبار سنجی مدل‌ها نشان داد که مدل منطق فازی دارای دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر، در برآورد بار رسوب می‌باشد. که علت این امر را می‌توان در نظر گرفتن عوامل متغیر دیگری نظیر زمان در این مدل دانست (۲). بنابراین در این تحقیق یکی از روش‌هایی که برای برآورد بار رسوبی مورد استفاده قرار گرفت، روش سری زمانی تابع انتقال می‌باشد که از مزایای آن در نظر گرفتن عامل زمان در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد، همچنین در این روش، هنگام برآورد رسوب معلق، علاوه بر مقادیر زمان حال، مقادیر زمان گذشته دبی جریان و رسوب معلق نیز در نظر گرفته می‌شود، که از نقاط قوت مدل تابع انتقال در پیش‌بینی، محسوب و باعث افزایش دقت این مدل در برآورد مقادیر رسوب معلق می‌شود که نتایج حاصل از آن در جداول (۸ تا ۱۰) ارائه شده است. که در این راستا نتایج Melesse و همکاران (۱۲) مبنی بر محاسبه RMSE، E و MAPE برای مقادیر رسوب معلق پیش‌بینی شده توسط مدل سری زمانی SARIMA نیز مؤید بالا بودن دقت مدل سری زمانی در پیش‌بینی می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که این نتیجه برای مدل تابع انتقال که حالت پیشرفته مدل سری زمانی SARIMA می‌باشد و در پیش‌بینی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل SARIMA می‌باشد، نیز صادق است. در این تحقیق برای برآورد بار رسوبی علاوه بر روش منحنی سنجه رسوب از روش‌هایی دیگر، از جمله روش رگرسیون غیر خطی، روش شبکه عصبی و مدل سری زمانی تابع انتقال نیز استفاده شد. در این تحقیق مشخص گردید که روش رگرسیون غیر خطی نسبت به منحنی سنجه رسوب از عملکرد بهتری در پیش‌بینی بار رسوبی برخوردار است که این نتیجه در جداول (۸ تا ۱۰) گزارش شده است. با توجه به جدول (۵) ضریب c در تمامی ایستگاه‌ها بیش از ۱/۵ محاسبه شد. بنابراین شکل منحنی سنجه رسوب در تمامی ایستگاه‌ها مقعر می‌باشد. در این راستا Crowder و همکاران (۶) روش رگرسیون غیرخطی را با

با توجه به نمودارهای (۲ تا ۴) که همبستگی پایینی بین دبی جریان و بار رسوبی در هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند (در ایستگاه سنگ سوراخ برابر: ۰/۴۳، در ایستگاه وسج برابر با ۰/۵۳ و در ایستگاه مرویل برابر با ۰/۳۲) و همچنین بر اساس نتایج حاصل از پیش‌بینی و اعتبار سنجی مدل‌ها (جدول ۸ تا ۱۰)، می‌توان گفت که منحنی سنجه رسوب از عملکرد خوبی برخوردار نیست که بر اساس نمودارهای (۵ تا ۱۰) علت عمده آن را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد: با توجه به نمودارهای (۵ تا ۷) که نشان می‌دهند در تمامی ایستگاه‌ها در بعضی از سال‌ها شیب منحنی سنجه رسوب کمتر از فاصله اطمینان و در نتیجه، همبستگی میان بار رسوب و دبی جریان نیز کمتر است، لذا، میزان رسوب برآورد شده در بعضی از این سال‌ها کمتر از میزان رسوب مشاهداتی و در بعضی سال‌ها بیش‌تر از میزان رسوب مشاهداتی است (نمودارهای ۸ تا ۱۰). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در این سال‌ها علاوه بر دبی جریان، عوامل دیگری نیز در تولید رسوب نقش داشته‌اند و از آنجایی که منحنی‌های سنجه رسوب، تنها میزان دبی جریان همزمان را در ارزیابی بار رسوبی در نظر گرفته و زمان ثبت داده‌ها را در برآورد بار رسوبی در نظر نمی‌گیرند، قادر به پیش‌بینی دقیق و صحیح مقدار بار رسوبی واقعی رودخانه‌ها نمی‌باشند و این موضوع در نتایج سایر تحقیقات نیز مشخص گردیده است (۹). لذا از نتایج فوق می‌توان چنین استنباط کرد که ارتباط بین دبی جریان و رسوب معلق، وابسته به زمان و از مکانی به مکان دیگر متغیر است. در این راستا می‌توان به مطالعه Zhang و همکاران (۲۱) در بررسی تغییرات روابط بین دبی جریان و غلظت رسوب معلق بر اساس داده‌های ماهانه ۵۰ سال رودخانه بزرگ پیرل اشاره کرد که از منحنی‌های سنجه رسوب استفاده نمودند و نتایج تحقیقات نشان داد که پارامترهای سنجه رسوب بر اساس زمان تغییر می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر که در سد Jagin انجام شد، از سه مدل: منطق فازی، منحنی سنجه رسوب و مدل شبکه عصبی

نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین بار رسوب پیش‌بینی شده و مشاهداتی در روش شبکه عصبی ($r=0.88$) نسبت به روش منحنی سنجه رسوب ($r=0.81$) بیشتر است. اگرچه این تفاوت خیلی مهم نبوده اما دقت بالاتر شبکه عصبی را نشان می‌دهد. دلیل این اختلاف کم می‌تواند به دلیل نمونه‌برداری کم، مخصوصاً در طی حوادث سیلابی بالا باشد. در مورد استفاده از اطلاعات آماری پیوسته، طولانی مدت و با دقت بیشتر، نتایج بهتری از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به‌دست می‌آید. نتایج حاصل از مطالعه‌ای که در حوضه El Kebir برای برآورد بار رسوب معلق با استفاده از دو روش منحنی سنجه رسوب و مدل شبکه عصبی مصنوعی انجام شد، نشان داد که مدل شبکه عصبی دارای بازدهی بالاتری در پیش‌بینی بار رسوب می‌باشد (۴). در نهایت با توجه به نتایج حاصل از پیش‌بینی و همچنین اعتبار سنجی هر یک از مدل‌ها با استفاده از روابط MAD ، $RMSE$ و SSE در هر ایستگاه مورد مطالعه که در جداول (۸ تا ۱۰) ارائه شد، می‌توان چنین استنباط کرد که مدل تابع انتقال نسبت به سایر مدل‌ها از عملکرد بهتری برخوردار بوده که علت را می‌توان به در نظر گرفتن عامل مهم زمان در برآورد رسوب دانست. لذا نتایج این تحقیق و سایر تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که تنها دبی جریان در برآورد بار رسوبی کافی نبوده و باید اثر عوامل دیگر از جمله خصوصیات فیزیوگرافی و زمین‌شناسی منطقه و همچنین اطلاعات آب و هوایی که تصویر روشنی از کارکردهای کمی و کیفی سیستم هیدرولیک حوضه به‌دست می‌دهد، نیز مورد بررسی قرار گیرد.

روش رگرسیون خطی در ۲۶ ایستگاه در سراسر رودخانه می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده مقایسه کردند. نتایج حاصل از پلات کردن لگاریتم‌های دبی در مقابل بار رسوب، سه نوع منحنی مقعر، محدب^۱ و خطی بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که اگر یک آبراهه منحنی دبی- بار رسوب مقعر یا محدب دارد، نتایج حاصل از رگرسیون خطی (حتی زمانی که فاکتور اصلاحی استفاده شود) اریب خواهد داشت و بار رسوب معلق، برای مکان‌هایی که منحنی مقعر دارند، کمتر از حد واقعی و برای مکان‌هایی که منحنی دبی- بار رسوب محدب دارند، بیشتر از حد واقعی، برآورد می‌گردد. نتایج اصلی نشان می‌دهد که رگرسیون که بهترین برآوردهای بار رسوب را به‌دست می‌دهد، به میزان انحناء پلات داده‌های دبی- بار رسوب بستگی دارد و در نهایت نتایج حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها دارای منحنی مقعر بودند. که نتیجه حاصل از مطالعه مذکور با نتیجه مطالعه حاضر مطابقت دارد. در این تحقیق روش دیگری که برای برآورد رسوب مورد ارزیابی قرار گرفت، روش شبکه عصبی می‌باشد. نتایج حاصل از پیش‌بینی نشان می‌دهد که روش شبکه عصبی نسبت به منحنی سنجه رسوب و روش رگرسیون غیر خطی از عملکرد بهتری در پیش‌بینی بار رسوبی برخوردار است که این نتایج در جداول (۸ تا ۱۰) ارائه شده است. در این راستا می‌توان به مطالعه معماریان خلیل آباد و همکاران (۱۳) اشاره کرد که برای برآورد بار رسوب معلق رودخانه Bar واقع در استان خراسان رضوی از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده کردند. سپس نتایج حاصل از آن با برآوردهای به‌دست آمده از روش رایج آماری $Q_s = 0.000335Q^{2.61}$ مقایسه شد.

منابع

1. Achite, M. and S. Ouillon. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, *J. Hydro.* 84: 3. 187-202.
2. Angabini, S., H. Ahmadi, S. Feiznia, B. Motamed Vaziri and S. Ershadi. 2014. Using Intelligence Models to Estimate Suspended Sediment System Case Study: Jagin Dam. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3: 166-172.
3. Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234(4): 228-248.
4. Boukhrissa, Z.A., K. Khanchoul, Y. Le Bissonnais and M. Tourki. 2013. Prediction of sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria. *Indian Academy of Sciences*, 5: 1303-1312.
5. Bowerman, B.L. and R. O'Connell. 1993. *Forecasting and Time Series: An Applied Approach*, third edition. Amazon publication, 722 pp.
6. Crowder, D.W., M. Demissie and M. Markus. 2007. The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load-discharge relationships. *Journal of Hydrology*, 336: 250-268.
7. Dehghani, A.A., M.E. Zanganeh, A. Mosaedi and N. Kohestani. 2009. Comparison of Suspended Sediment Estimation by Artificial Neural Network and Sediment Rating Curve Methods (Case Study: Doogh River in Golestan Province). *Journal of Agri. Sci. & Natur. Resour.* 16: 1-12 (In Persian).
8. Demissie, M., Xia, R., Keefer, L., Bhowmik, N., 2004. The sediment budget of the Illinois river. Illinois State Water Survey, Contract Report 2004-13, Champaign, IL, 51pp.
9. Feiznia, S., F. Majdabadi Farahani, M. Mohseni Saravi and M. Arabkhedri. 2002. Evaluation of proper length of record for estimation of mean annual sediment yield and its relation with area, variation of annual sediment yield, climate, geology and vegetation cover. *Journal of Agriculture Science and Natural Resources*, 9(3): 3-16.
10. Ferguson, R.I. 1986. River loads underestimated by rating curves. *Water Resources*, 22: 74-76.
11. Guzman, C.D., A.S. Tilahun, A.D. Zegeye and T.S. Steenhuis. 2013. Suspended sediment concentration- discharge relationships in the (sub-) humid Ethiopian highlands. *Hydrology and System Sciences*, 17: 1067- 1077.
12. Khazaei Moghani, S. 2011. Temporal and Spatial Variations of Suspended Sediment in Gorganrood river. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 112 pp (In Persian).
13. Melesse, A.M., S. Ahmad, M.E. McClain, X. Wang and Y.H. Lim. 2011. Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. *Agricultural Water Management*, 98: 855-866.
14. Memarian-Khalilabad, H., S. Feiznia and K. Zakikhani. 2009. Estimating river suspended sediment yield using MLP neural network in arid and semi-arid basins Case study: Bar River, Neyshaboor, Iran. *Desert*, 14: 43-52.
15. Mofid, H. and H. Mousavi Jahromi. 2008. Forecasting of sediment load and calibration of creation of reference stations of sediment estimation. Fourth of National Congress of Civil engineering. Tehran University, Iran, 8 pp (In Persian).
16. Morehead, M., J. Syvitski, E. Hutton and S. Peckham. 2003. Modeling the temporal variability in the flux of the sediment from ungauged river basins. *Elsevier*, 39: 95-110.
17. Mosaedi, A. 1998. Hydrological sizing of sediment reservoir system for irrigation and water supply. Ph.D. Thesis, Technical University of Budapest, Hungary, 200 pp.
18. Meshkani, M.R. and A. Meshkani. 1997. Stochastic modeling of the Caspian sea level fluctuations. *Theoretical and Applied Climatology*, 58: 189-195.
19. Rezapour, O.M., L.T. Shui and D. Bin Ahmad. 2010. Review of artificial neural network model for suspended sediment estimation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(8): 3347-3353.
20. Stott, T. and N. Mount. 2006. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation Seasons: Implications for global warming. *Elsevier*, 332: 259-270.
21. Zhang, W., W. Xiaoyan, Z. Jinhai, Z. Yuliang and Z. Yanjin. 2012. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Elsevier*, 35-46.

Investigation of Temporal Phenomena of Sediment Rating Curve and Comparison of it with the Some Statistical Methods for Estimating Suspended Sediment Load (Case Study: Gamasiab Watershed)

Maryam Raesi¹, Ali Najafinejad² and Majid Azim Mohseni³

-
- 1- Ph.D. Student, Dept. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Agriculture, Lorestan University (Corresponding Author: Email: Maryam.raisi90@yahoo.com)
2- Assistant Professor, Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
3- Assistant Professor, Dept. of statistics science Golestan University
Received: April 27, 2016 Accepted: October 9, 2019
-

Abstract

The variable and complex nature of the sediment load of rivers has led to problem in estimation of sediment entering the reservoirs and the production of long term sediment, for determining the lifetime of the structures encounter. Application of sediment rating curves is one of the most common methods for estimating the suspended sediment load of rivers. Regardless of the accuracy of sediment measurement in sampling and measuring the concentration of samples and also measuring the corresponding discharge and with due attention to the spatial and temporal changes of suspended sediment in river management and reform operations, the providing of sediment rating curves is one of the most important resources of error for estimating sediment. Therefore, providing time backup curves for sediment rating curves is necessary for evaluation of accuracy and precision of sediment rating curves. So, in this research are presented time backup curves for sediment rating curves for investigating temporal variations of the sediment rating curve are applied for considering slope changes of curve and annual changes of it too. Also, this research compared the results of the sediment rating curve method with the results of some statistical methods for estimating the suspended sediment load in three hydrometric stations in Gamasiab watershed. The results of validations showed that transfer function model take into account time parameter with SSE 0.00003 ton/day, 3.24 ton/day, 5.92 ton/day, respectively for stations: Sang-Surakh, Vasaj and Marvil has high precision in the forecasting and moreover it presents confidently unbiased forecasts for the future.

Keywords: Suspended sediment load, Sediment rating curve, Time backup curves of sediment rating curve, Statistical methods and Gamasiab River