

## برآورد حجم رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کرج و دز و مقایسه آن با نتایج هیدروگرافی

\*ابوالفضل مساعدی<sup>۱</sup>، سیدفضل‌الله هاشمی‌نجفی<sup>۲</sup>، محمد حیدر نژاد<sup>۳</sup>،

مرتضی نبی‌زاده<sup>۴</sup> و محمدابراهیم مشکاتی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی،  
<sup>۲</sup>دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی اهواز،  
<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۲۳؛ تاریخ پذیرش:

### چکیده

فرسایش و انتقال رسوب از پدیده‌هایی می‌باشند که در مراحل مختلف تبدیل بارش به رواناب و در مسیر انتقال جریان به وقوع می‌پیوندند. بخشی از رسوبات در حال انتقال در مخازن سدها ته‌نشین می‌شوند که می‌توانند عواقب فنی، اقتصادی و یا حتی اجتماعی نامطلوب به بار آورند. بنابراین باید میزان رسوب‌گذاری در مخزن سد قبل از احداث آن و همچنین در هنگام بهره‌برداری با اطمینان قابل‌قبولی برآورد شود. از سوی دیگر تعیین مقدار دقیق فرسایش و یا رسوب‌گذاری در عمل بسیار مشکل بوده ولی روش‌های متفاوتی برای برآورد آنها پیشنهاد شده است. در این پژوهش به منظور برآورد میزان رسوب ورودی به مخازن سدهای دز و کرج و همچنین میزان رسوب خروجی از این سدها، براساس آمار دبی و غلظت رسوب متناظر آنها در ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی این سدها، معادلات منحنی‌های سنجه رسوب ماهانه در این ایستگاه‌ها تعیین گردید. سپس با استفاده از معادلات به دست آمده و براساس مقادیر دبی روزانه، دبی رسوب ورودی به هر سد و خروجی از آن در طول دوره‌ای که عملیات هیدروگرافی در سدها انجام شده است، برآورد شد. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نیز، پس از تعیین مناسب‌ترین آرایش شبکه و مدل، دبی رسوب ورودی و خروجی هر سد برآورد گردید. سپس مقادیر دبی رسوب با توجه به وزن مخصوص رسوبات به حجم رسوب ورودی و یا خروجی تبدیل شدند. با استفاده از نتایج هیدروگرافی‌های انجام شده، مقادیر حجم رسوب‌گذاری در مخزن هر یک از سدها در طول دوره هیدروگرافی تعیین شد. آن‌گاه مقادیر حجم رسوب برآوردی در هر سد با مقدار واقعی رسوب‌گذاری مقایسه گردید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که معادلات سنجه رسوب، مقدار رسوب‌گذاری را برای سد دز حدود ۷۰ درصد میزان حجم واقعی و برای سد کرج حدود ۹۷ درصد مقدار واقعی برآورد نموده‌اند، حال آن‌که شبکه عصبی مصنوعی برای سد دز ۱۱۵ درصد حجم واقعی و برای سد کرج ۹۴ درصد حجم واقعی برآورد داشته است. پیشنهاد می‌گردد که مشابه این پژوهش در مورد تعدادی بیش‌تر از رودخانه‌ها و مخازن سدها از مناطق مختلف جهان با شرایط متفاوت اقلیمی و هیدرولوژیکی انجام شوند تا کارایی روش ذکر شده مورد بررسی بیش‌تری قرار گرفته و بتوان به توسعه این روش کمک نمود.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب، بار معلق، منحنی سنجه رسوب، شبکه عصبی مصنوعی، سد دز، سد کرج

## مقدمه

آب و خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور می‌باشد. مخازن سدها نیز نقش بسیار مهمی را در سامانه‌های منابع آب دارا می‌باشند. سدهایی که در مسیر رودخانه‌ها ساخته می‌شوند بر خصوصیات جریان رودخانه تأثیر گذاشته و باعث می‌شوند که رودخانه بخشی از رسوبات در حال انتقال خود را در مخزن سد ته‌نشست دهد. عواقب فنی و اقتصادی رسوب‌گذاری در مخازن سدها نامطلوب است و باید میزان رسوب‌گذاری در مخزن سد قبل از احداث آن و در هنگام بهره‌برداری با اطمینان قابل‌قبولی برآورد شود. بعضی از اثرات رسوب‌گذاری در مخزن سد عبارتند از: تأثیر بر رفتار هیدرولیکی جریان خروجی از مخزن سد، کاهش ظرفیت آب‌گیری مخازن، امکان مسدود شدن آبگیرهای عمقی، اختلال در سامانه بهره‌برداری مخزن و فرسایش بستر پایاب (شفاعی‌بجستان، ۱۹۹۸؛ فیض‌نیا، ۲۰۰۸).

روش‌های متعددی مانند هیدروگرافی مخزن، اندازه‌گیری مستقیم ضخامت رسوب در مخازن، سنجش از راه دور، استفاده از مدل‌های ریاضی و کامپیوتری و استفاده از آمار هیدرومتری جهت تعیین حجم رسوب‌گذاری در مخازن وجود دارد. ولی به دلیل متفاوت بودن تکنیک‌ها و پیچیده بودن مسأله رسوب‌گذاری نمی‌توان یک روش جامع و مقرون به صحت، دقت و در عین حال کم‌هزینه را در همه موارد توصیه نمود.

واضح است که مقدار رسوب‌گذاری در مخازن سدها تابع حجم رسوب ورودی به آنها و همچنین حجم رسوب خروجی از آنها می‌باشد. سابقه بررسی علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها بیش از ۱۰۰ سال است. روش اندازه‌گیری بار معلق رسوب، بر پایه اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق و دبی جریان، روشی مطمئن بوده که مستلزم اندازه‌گیری پیوسته است و معمولاً تنها برای رودخانه‌های مهم و دائمی قابل استفاده می‌باشد (تلوری، ۲۰۰۲؛ پاوللی و بیگی، ۲۰۰۴؛ صادقی، ۲۰۰۴؛ عرب‌خدری، ۲۰۰۵؛ پرهمت و دومیری‌گنجی، ۲۰۰۵).

یکی از روش‌های تجربی در برآورد دبی درازمدت رسوب، ایجاد رابطه رگرسیونی بین دبی جریان لحظه‌ای و دبی رسوب معلق می‌باشد. به این منظور از داده‌های دبی رسوب معلق و دبی لحظه‌ای متناظر اندازه‌گیری شده در بعضی از روزهای سال استفاده می‌شود و منحنی یا منحنی‌های سنجه رسوب<sup>۱</sup> رودخانه تعیین می‌گردد. منحنی‌های سنجه رسوب یکی از معمول‌ترین روش‌های برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها هستند. در عین حال برآورد رسوب از طریق منحنی‌های سنجه همواره با مقداری خطا همراه می‌باشد (مساعدی، ۱۹۹۸؛ اسلمن، ۲۰۰۰؛ عرب‌خدری و همکاران، ۲۰۰۴؛ اعظمی و همکاران، ۲۰۰۵؛ میرباقری و رجایی، ۲۰۰۶). به عنوان مثال دیگر، صادقی و همکاران (۲۰۱۰) وجود ضریب کارایی کمتر از ۵۰ درصد در مدل‌های مورد بررسی در حوضه آبخیز خامسان را نشانه بی‌کفایتی منحنی سنجه در تخمین کامل و دقیق بار معلق می‌دانند. بنابراین بهتر است، ضمن این‌که دبی رسوب به عنوان تابعی از دبی جریان در نظر گرفته می‌شود، با اعمال روش‌هایی نسبت به کاهش خطای برآورد دبی رسوب اقدام نمود. برای مثال، مساعدی (۱۹۹۸) و محمدی‌استادکلایه (۲۰۰۲) در بررسی‌های خود نشان دادند که دسته‌بندی مقادیر دبی براساس زمان وقوع آنها می‌تواند به کاهش خطای برآورد دبی رسوب کمک نماید.

علاوه بر تکنیک‌های قبلی که به منظور کاهش خطای برآورد دبی رسوب استفاده می‌شود، امروزه به کارگیری روش‌های هوشمند نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. جین (۲۰۰۱) با توسعه منحنی‌های سنجه رسوب و به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) که نماینده ریاضی اصلاح‌شده‌ای از عملکرد مغز بشر هستند، حجم رسوب در رودخانه می‌سی‌سی‌پی را مورد مطالعه قرار داد و مشاهده کرد که نتایج این روش با مقادیر مشاهداتی نسبت به تکنیک‌های معمول نزدیک‌تر است. از دیدگاه ریاضی شبکه عصبی به عنوان یک تقریب‌گر می‌باشد و توانایی آن در تقریب بین الگوهای یک مسأله باعث می‌شود تا بتوان

محل سد ۲۰ کیلومتر فاصله دارد. سطح حوضه آبریز در محل ایستگاه ۱۶۷۸۹ کیلومترمربع می‌باشد. اندازه‌گیری‌های دبی جریان در این ایستگاه از سال ۱۳۴۴ و نمونه‌برداری بار معلق در آن از اواخر سال ۱۳۴۹ آغاز شده است. متوسط دبی سالانه در این ایستگاه ۲۶۱/۵۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی خروجی سد دز، دزفول نام دارد. فاصله این ایستگاه نیز تا محل سد در حدود ۲۵ کیلومتر است، از آمار و داده‌های این ایستگاه می‌توان به‌عنوان داده‌های پایین دست سد دز استفاده نمود. سطح حوضه آبریز در محل ایستگاه تا سد در حدود ۲۵۰ کیلومترمربع می‌باشد. اندازه‌گیری‌های دبی جریان در این ایستگاه از سال ۱۳۳۵ و نمونه‌برداری بار معلق رودخانه از سال ۱۳۵۱ آغاز شده است. متوسط دبی سالانه در این ایستگاه ۲۳۴/۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (حیدرنژاد، ۲۰۰۴).

**ب) سد کرج:** ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی ورودی سد کرج سیرا نامیده می‌شود. اندازه‌گیری‌های دبی جریان در این ایستگاه از سال ۱۳۳۳ و نمونه‌برداری بار معلق رودخانه در آن از سال ۱۳۴۶ آغاز شده است. متوسط درازمدت دبی سالانه در ایستگاه سیرا حدود ۱۲/۳۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. سطح حوضه آبریز در محل ایستگاه ۷۲۰ کیلومترمربع است. شیب رودخانه در محل ایستگاه ۱/۸ درصد می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری خروجی سد کرج بیلقان نام دارد. این ایستگاه در پایین دست سد کرج و در محل تنظیم و تقسیم آب شرب شهر تهران و آب کشاورزی احداث شده است. اندازه‌گیری‌های دبی جریان در این ایستگاه از سال ۱۳۲۶ و نمونه‌برداری بار معلق رودخانه در آن از سال ۱۳۴۷ آغاز شده است. متوسط درازمدت دبی سالانه در ایستگاه بیلقان حدود ۱۵/۳۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (حیدرنژاد، ۲۰۰۴).

روش تحقیق: مراحل مختلف انجام این پژوهش به اختصار بیان می‌شود.

مسائل با پیچیدگی زیاد از قبیل شناسایی الگو، تفکیک الگو، نگاشت غیرخطی، حافظه انجمنی، خودسازمان‌دهی و کنترل را انجام داد (منهاج، ۲۰۰۲).

شبکه عصبی مصنوعی در حیطة مهندسی آب برای حل مسائل مختلفی به‌کار گرفته شده و نتایج رضایت‌بخشی به همراه داشته است. از این میان می‌توان به مدل بارش رواناب با استفاده از ANN اشاره نمود (مینس و هال، ۱۹۹۶؛ سیگیزوغللو و آلپ، ۲۰۰۴). همچنین از روش‌های ANN در مدل‌سازی پارامترهای کیفی آب نیز استفاده شده است (انکال‌انجین و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از ANN در برآورد میزان رسوب توسط محققان بسیاری انجام شده که می‌توان به تحقیقات توفیک و همکاران (۱۹۹۷)، جین (۲۰۰۱)، ناج و همکاران (۲۰۰۲)، مریت و همکاران (۲۰۰۳)، کیسی (۲۰۰۴) و آگاروال و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد.

با توجه به موارد بالا، در حالی که مطالعات وسیعی در رابطه با برآورد دبی رسوب به‌عنوان تابعی از دبی جریان و براساس ایجاد رابطه رگرسیونی، صورت گرفته ولی هنوز نیاز به مطالعات بیشتر و بررسی دقت تکنیک‌های جدید (از جمله شبکه عصبی مصنوعی) در برآورد دبی رسوب، مشهود است. بنابراین، این پژوهش به‌منظور مقایسه دقت نتایج دو روش رگرسیونی (منحنی سنج رسوب) و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد دبی رسوب انتقالی می‌باشد که به این منظور پس از تعیین دبی رسوب، به هر یک از روش‌های ذکرشده، در ایستگاه‌های ورودی و خروجی سدهای دز و کرج، حجم رسوب باقی‌مانده در مخزن این سدها برآورد شده و با حجم رسوب اندازه‌گیری شده در مخزن سد مقایسه خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

**مشخصات هیدرولوژیکی ایستگاه‌های هیدرومتری سدهای مورد مطالعه:**

**الف) سد دز:** ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی ورودی سد دز تله‌زنگ نامیده می‌شود. این ایستگاه تا

۱۲ گانه سنجه رسوب تعیین و در نهایت میانگین کل مربعات خطا محاسبه شد.

$$Q_s = aQ_w^b \quad (2)$$

در این معادله،  $Q_s$ : بار معلق برحسب تن بر روز،  $Q_w$ : دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه و  $a$  و  $b$ : ضرایب معادله می‌باشند.

**(b) شبکه عصبی مصنوعی:** به منظور استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ابتدا مقادیر دبی جریان و دبی رسوب اندازه‌گیری شده، به علت بزرگ بودن داده‌ها و برای کم‌تر کردن خطا، بین  $0/1$  تا  $0/9$  نرمال شده و به دو سری داده جهت آموزش و آزمون تقسیم شدند. تعداد داده‌های مورد استفاده برای آموزش شبکه عصبی در ایستگاه‌های سد دز در مجموع ۴۰۰ سری داده مربوط به سال‌های ۱۳۵۱ تا ۱۳۸۰ بود. تعداد داده‌های مورد استفاده برای آموزش شبکه عصبی سد کرج (مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری سیرا و بیلقان یعنی ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی سد کرج) ۳۰۰۰ سری داده مربوط به سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۰ بود. هر سری داده شامل ۲ مؤلفه است که ۱ مؤلفه آن متغیر ورودی (دبی جریان) و مؤلفه دیگر متغیر خروجی (دبی رسوب) می‌باشد.

**طراحی شبکه:** شبکه عصبی به کار رفته در این پژوهش شبکه عصبی مصنوعی با آموزش تحت نظارت (سرپرستی) و دارای ساختار MLP با الگوریتم پس انتشار خطا می‌باشد. در طی سعی و خطای مکرر مشخص شد که این شبکه قابلیت مدل نمودن پدیده‌های مورد نظر را بهتر از سایر شبکه‌ها دارا است. به منظور آموزش شبکه عصبی مصنوعی از جعبه ابزار Neural Network که در نرم‌افزار Matlab 7.2 تعبیه شده، استفاده گردید. با توجه به نتایج تجربی، تعداد یک لایه برای لایه مخفی در نظر گرفته شد. برای تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی (میانی) ابتدا با فرض ۵ نرون در لایه میانی شروع به آموزش شبکه نموده و خطای آموزش و آزمون برآورد شده، سپس با افزودن بر تعداد نرون‌های لایه میانی، خطاها محاسبه گردید. بنابراین، به کمک شبکه عصبی مصنوعی نیز با توجه به مقادیر متناظر دبی رسوب و دبی

**(الف) جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز شامل:** آمار غلظت رسوب اندازه‌گیری شده و دبی جریان روزانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری، موقعیت سدهای مورد مطالعه، منحنی‌های سطح و حجم اولیه و ثانویه مخازن سدهای مورد بررسی همراه با مشخصات فنی و هیدرولیکی سازه‌های آنها و مشخصات مخازن،

(ب) بررسی داده‌های دبی اخذ شده و انجام آزمون‌های آماری لازم، مانند آزمون داده پرت و تست همگنی داده‌ها. پس از اطمینان از نبود داده پرت (براساس آزمون گرویز-بک) و همگنی داده‌های میانگین دبی سالیانه براساس آزمون من-ویننی در سطح ۹۵ درصد، مراحل بعدی پژوهش انجام شد.

(ج) تبدیل آمار غلظت رسوب معلق به دبی رسوب براساس دبی جریان. به این منظور از معادله ۱ استفاده شد.

$$Q_s = 0/0864CQ_w \quad (1)$$

در این معادله،  $Q_s$ : بار معلق برحسب تن بر روز،  $C$ : غلظت مواد معلق بر حسب گرم بر لیتر،  $Q_w$ : دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

(د) برآورد دبی رسوب در روزهایی که غلظت رسوب در آن روزها اندازه‌گیری نشده است. به این منظور به دو روش عمل شد.

**(a) ایجاد رابطه رگرسیونی بین مقادیر دبی رسوب معلق و دبی جریان اندازه‌گیری شده:** در این روش برآورد دبی رسوب براساس تفکیک داده‌های دبی‌های جریان و رسوب اندازه‌گیری شده در هر ماه، مورد مطالعه قرار گرفت و برای هر یک از ماه‌های سال با توجه به آمار طولانی‌مدتی که در اختیار قرار دارد، ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب (معادله ۲) به دست آمد. به این منظور یک رابطه رگرسیونی براساس معادله ۲ بین مقادیر دبی رسوب و مقادیر دبی جریان اندازه‌گیری شده برای هر یک از ماه‌های سال تعیین شد. به عبارت دیگر ۱۲ رابطه رگرسیونی (۱۲ معادله منحنی سنجه رسوب در هر یک از ایستگاه‌ها) بین دبی جریان و دبی رسوب استخراج شد. سپس میانگین مربعات خطا در مورد هر یک از معادلات

جریان اندازه‌گیری شده، ارتباط دبی رسوب و دبی جریان به تفکیک هر ماه براساس کسب مقادیر حداقل میانگین مربعات خطا، استخراج شد.

**ه) برآورد دبی رسوب معلق روزانه و تعیین میانگین دبی رسوب معلق سالیانه در طول دوره مورد بررسی:** در مورد هر یک از ایستگاه‌ها، براساس معادلات رگرسیونی منحنی‌های سنجه رسوب ماهانه و همچنین شبکه عصبی مصنوعی، مقادیر دبی جریان روزانه در طول دوره آماری به هر یک از این مدل‌ها وارد شد و مقدار بار معلق روزانه آن برآورد گردید. به این صورت که، برای هر روز یک مقدار و در مجموع ۳۶۵ مقدار در هر سال برای رسوب معلق برآورد شد که از مجموع آنها بار معلق حاصل شده در طول سال به‌دست آمد. سپس میانگین بار معلق سالانه با توجه به سال‌های مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت و به این ترتیب متوسط بار معلق سالانه هم در هر ایستگاه برآورد گردید.

**و) برآورد نسبت بار بستر به بار معلق:** به‌منظور برآورد بار بستر روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مختلفی وجود دارد، اما تاکنون روش دقیق که مقرون به صحت و دقت باشد معرفی نشده است. با توجه به این‌که آمار مناسبی در زمینه بار بستر در ایستگاه‌های ورودی و خروجی سد‌های دز و کرج وجود ندارد، در این پژوهش به‌منظور برآورد بار بستر از نسبت بار بستر به معلق ( $k$ ) استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مقدار این نسبت در مناطق کوهستانی، در رودخانه‌های با شیب زیاد بیش‌تر بوده و در نواحی جلگه‌ای که دارای شیب کم‌تری هستند نسبت آن، به‌میزان محسوسی کاهش می‌یابد. مطابق بررسی‌های انجام شده توسط کاراشف نسبت بار بستر به بار معلق در رودخانه‌ها تابع شرایط توپوگرافی است. براساس بررسی‌های انجام شده در رودخانه‌های ایران (بهادری، ۲۰۰۰) مقدار نسبت بار کف به بار معلق ( $k$ ) تا حدودی تابع شیب رودخانه‌ها بوده و از نظریه کاراشف پیروی می‌نماید. در این پژوهش با توجه به شیب رودخانه‌های دز و کرج، با توجه به شیب ۰/۵ درصد در ایستگاه تله‌زنگ و شیب متوسط ۰/۴ درصد

در ایستگاه دزفول، و همچنین با توجه به شیب ۱/۸ درصد در ایستگاه سیرا و شیب ۰/۹۲ درصد در ایستگاه بیلقان، نسبت بار بستر به معلق ( $k$ ) تعیین گردید. پس از تعیین نسبت  $k$  دبی بار بستر در هر سال با توجه به میزان بار معلق همان سال برآورد شد.

**ز) برآورد بار رسوب کل:** از مجموع بار معلق و بار بستر سالانه در هر ایستگاه هیدرومتری بار رسوب کل که منتقل شده، بر حسب تن بر سال برآورد گردید.

**ح) برآورد حجم رسوب انتقالی در هر ایستگاه با توجه به جرم مخصوص رسوبات:** براساس گزارش‌های رسوب‌سنجی تهیه شده توسط وزارت نیرو (بی‌نام، ۱۹۹۱؛ بی‌نام، ۱۹۹۷)، جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد کرج به‌طور متوسط ۱/۴ تن بر مترمکعب و در مخزن سد دز به‌طور متوسط ۱/۵ تن بر مترمکعب برآورد شده است (حیدرنژاد، ۲۰۰۴). از تقسیم بار رسوب کل سالانه بر حسب تن بر سال بر جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده بر حسب تن بر مترمکعب، حجم رسوب سالانه که در هر ایستگاه هیدرومتری منتقل شده است، به‌دست آمد. به این ترتیب برای هر ایستگاه هیدرومتری ۲ مقدار متفاوت (با توجه به روش برآورد که می‌تواند منحنی سنجه رسوب و یا شبکه عصبی مصنوعی باشد) از حجم رسوب انتقالی به‌دست آمده است.

**ط) تعیین حجم واقعی رسوب باقی‌مانده در مخزن هر سد و مقایسه آنها با مقادیر برآوردی در هر روش:** از تفاضل حجم رسوب انتقالی در هر یک ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی هر سد (حجم رسوب ورودی و حجم رسوب خروجی) حجم رسوب انباشته شده در مخزن همان سد برآورد گردید. با توجه به منحنی‌های سطح و حجم اولیه و ثانویه به‌دست آمده از عملیات هیدروگرافی سد‌های کرج و دز حجم رسوب واقعی در سد‌های یاد شده به‌دست آمده و با حجم رسوب به‌دست آمده از روش رگرسیونی منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه گردید، تا میزان خطا و دقت هر یک از دو روش ذکر شده مورد بررسی قرار گیرد.

## نتایج و بحث

محاسبه بار معلق سالانه:

الف) سد دز: پس از اطمینان از همگنی (در سطح ۹۵ درصد) داده‌های دبی سالانه در طول دوره آماری ۴۲-۱۳۴۱ تا ۸۱-۱۳۸۰ در ایستگاه‌های هیدرومتری تله‌زنگ و دزفول (ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی سد دز)، و تبدیل آمار غلظت رسوب اندازه‌گیری شده به دبی رسوب براساس معادله ۱، مقادیر دبی رسوب اندازه‌گیری شده در مورد هر یک از ایستگاه‌ها تعیین شدند. آن‌گاه مقدار دبی رسوب در مورد هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری به دو روش استفاده از منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی برآورد گردید. به این منظور، با به‌کارگیری معادله ۲ و استخراج ۱۲ معادله منحنی سنجه رسوب در هر ایستگاه (جدول‌های ۱ و ۲)، میزان رسوب معلق در ایستگاه ورودی به سد دز و ایستگاه خروجی از سد دز برای بازه زمانی ۴۲-۱۳۴۱ تا ۶۲-۱۳۶۱ برآورد شد. علت برآورد رسوب در این دوره زمانی آن است که عملیات نقشه‌برداری و هیدروگرافی در سال‌های ۱۳۴۱ و ۱۳۶۲ انجام شده و در نتیجه حجم رسوب باقی‌مانده در مخزن سد، در این دوره زمانی مشخص شده است.

علاوه بر استفاده از معادلات سنجه رسوب، برآورد دبی رسوب به کمک شبکه عصبی مصنوعی نیز تعیین گردید. همان‌گونه که ذکر شد، با توجه به نتایج تجربی، تعداد یک لایه برای لایه مخفی در نظر گرفته شد. برای تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی (میانی) ابتدا با فرض ۵ نرون در لایه میانی شروع به آموزش شبکه نموده و خطای آموزش و آزمون برآورد شده، سپس با افزودن بر تعداد نرون‌های لایه میانی، خطاها محاسبه گردید و در نهایت با توجه به خطاهای آموزش و آزمون ۹ نرون برای لایه میانی در نظر گرفته شد. تابع محرک لایه میانی تانژانت هیپربولیک و تابع محرک لایه خروجی سیگموئید در نظر گرفته شد. علت انتخاب تابع محرک سیگموئید برای لایه خروجی، جواب‌های نامطلوب تابع خطی، طی فرآیند سعی و خطا

می‌باشد. عمل آموزش و آزمون برای هر دو ایستگاه ورودی و خروجی سد دز صورت گرفت. نمونه‌ای از این تکرارها در جدول ۳ ارائه شده است. پس از اطمینان از صحت آموزش، اقدام به شبیه‌سازی داده‌های دبی روزانه رسوب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بین سال‌ها ۴۲-۱۳۴۱ تا ۶۲-۱۳۶۱ گردید.

ب) سد کرج: به‌منظور برآورد میزان رسوب‌گذاری سد کرج نیز مانند روشی که برای سد دز بیان شده عمل شد. به این ترتیب پس از اطمینان از همگنی (در سطح ۹۵ درصد) داده‌های دبی سالانه در طول دوره آماری ۴۱-۱۳۴۰ تا ۸۱-۱۳۸۰ در ایستگاه‌های هیدرومتری سیرا و بیلقان (ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی سد کرج)، مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری شده مانند روش گفته شده در سد دز و براساس معادله ۱ به دبی رسوب تبدیل شدند. سپس بین مقادیر دبی رسوب و مقادیر جریان اندازه‌گیری شده برای ماه‌های مختلف روابط رگرسیونی براساس معادله ۲ برقرار گردید که نتایج این بخش نیز در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. با استفاده از روابط به‌دست آمده (۱۲ معادله منحنی سنجه رسوب ماهیانه در هر ایستگاه) میزان رسوب در ایستگاه‌های ورودی و خروجی به سد کرج برای بازه ۴۱-۱۳۴۰ تا ۷۰-۱۳۶۹ برآورد شد. در این سد، در سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۷۰ عملیات نقشه‌برداری و هیدروگرافی انجام شده و حجم رسوب باقی‌مانده در سد طی سال‌های ۴۱-۱۳۴۰ تا ۷۰-۱۳۶۹ قابل اندازه‌گیری است.

طراحی شبکه عصبی در مورد داده‌های ایستگاه‌های ورودی و خروجی سد کرج درست همانند داده‌های سد دز انجام پذیرفت. جدول ۶ نمونه‌ای از تکرارهای مختلف برای حصول به بهترین شبکه در ایستگاه سیرا و در ماه فروردین را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه پارامترهای آماری معادله منحنی سنجه رسوب در ایستگاه تله‌زنگ (ورودی سد دز).

زمان اندازه‌گیری دبی	تعداد داده‌ها	درجه آزادی	$a$	$b$	$R^2$	$a.Q_w^b$	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	میانگین کل مربعات خطا
فروردین	۳۴	۳۲	۰/۲۳۵۳	۱/۹۲۶۳	۰/۸۴۱۵	$0.2353Q_w^{1/9263}$	۱/۰۸۶۱	۰/۰۳۳۹	
اردیبهشت	۴۶	۴۴	۰/۰۵۲۱	۲/۱۶۴۰	۰/۸۱۲۵	$0.0521Q_w^{2/1640}$	۲/۳۸۹۰	۰/۰۵۴۲	
خرداد	۳۱	۲۹	۰/۰۶۶۲	۲/۱۱۵۷	۰/۸۲۱۳	$0.0662Q_w^{2/1157}$	۱/۶۶۸۳	۰/۰۵۷۵	
تیر	۳۰	۲۸	۰/۰۰۲۴	۲/۶۸۵۳	۰/۷۶۴۷	$0.0024Q_w^{2/6853}$	۲/۱۵۵۹	۰/۰۷۶۹	
مرداد	۳۲	۳۰	۰/۰۳۶۱	۲/۱۸۴۴	۰/۷۱۰۴	$0.0361Q_w^{2/1844}$	۱/۹۹۰۶	۰/۰۶۶۳	
شهریور	۲۲	۲۰	۰/۰۰۲۳	۲/۸۰۶۲	۰/۸۰۰۳	$0.0023Q_w^{2/8062}$	۰/۸۹۷۶	۰/۰۴۴۸	۰/۰۷۰۲
مهر	۱۸	۱۶	۰/۱۳۶۹	۱/۹۳۹۴	۰/۴۸۴۰	$0.1369Q_w^{1/9394}$	۰/۸۱۸۹	۰/۰۵۱۱	
آبان	۲۳	۲۱	۰/۰۰۲۷	۲/۹۶۴۴	۰/۷۹۸۰	$0.0027Q_w^{2/9644}$	۳/۶۰۵۰	۰/۱۷۱۶	
آذر	۳۰	۲۸	۰/۱۰۹۴	۲/۰۷۰۱	۰/۸۱۰۶	$0.1094Q_w^{2/701}$	۳/۲۸۱۰	۰/۱۱۷۱	
دی	۳۰	۲۸	۰/۰۳۶۹	۲/۲۸۰۸	۰/۷۹۵۴	$0.0369Q_w^{2/2808}$	۲/۲۰۲۷	۰/۰۷۸۶	
بهمن	۲۹	۲۷	۰/۰۸۴۵	۲/۰۸۳۷	۰/۷۸۰۵	$0.0845Q_w^{2/837}$	۱/۴۶۶۳	۰/۰۵۴۳	
اسفند	۳۸	۳۶	۰/۲۰۴۹	۱/۹۵۹۷	۰/۷۵۹۱	$0.2049Q_w^{1/9597}$	۲/۲۶۶۰	۰/۰۶۲۹	

جدول ۲- خلاصه پارامترهای آماری معادله منحنی سنجه رسوب در ایستگاه دزفول (خروجی سد دز).

زمان اندازه‌گیری دبی	تعداد داده‌ها	درجه آزادی	$a$	$b$	$R^2$	$a.Q_w^b$	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	میانگین کل مربعات خطا
فروردین	۱۹	۱۷	۰/۷۵۴۹	۱/۴۱۰۵	۰/۶۴۵۲	$0.7549Q_w^{1/4105}$	۲/۰۶۱۴	۰/۱۲۱۲	
اردیبهشت	۲۹	۲۷	۰/۷۷۸۰	۱/۳۹۸۸	۰/۷۶۷۶	$0.7780Q_w^{1/3988}$	۲/۶۹۰۸	۰/۰۹۹۶	
خرداد	۲۸	۲۶	۰/۲۰۸۶	۱/۵۵۹۲	۰/۷۶۱۴	$0.2086Q_w^{1/5592}$	۱/۰۲۱۳	۰/۰۳۹۲	
تیر	۲۷	۲۵	۰/۱۹۳۴	۱/۵۵۸۵	۰/۵۷۱۷	$0.1934Q_w^{1/5585}$	۱/۴۴۹۶	۰/۰۵۷۹	
مرداد	۲۱	۱۹	۰/۴۰۸۱	۱/۴۰۶۱	۰/۳۲۶۵	$0.4081Q_w^{1/4061}$	۰/۹۰۲۹	۰/۰۴۷۵	
شهریور	۲۵	۲۳	۰/۴۵۶۰	۱/۳۹۷۶	۰/۳۳۱۰	$0.4560Q_w^{1/3976}$	۰/۸۰۸۷	۰/۰۳۵۱	۰/۰۷۱۸
مهر	۲۵	۲۳	۰/۰۲۶۶	۱/۸۷۲۶	۰/۴۸۸۷	$0.0266Q_w^{1/8726}$	۰/۵۹۴۰	۰/۰۲۵۸	
آبان	۲۲	۲۰	۰/۰۰۳۳	۲/۴۸۱۵	۰/۵۸۱۷	$0.0033Q_w^{2/4815}$	۱/۴۹۸۳	۰/۰۷۴۹	
آذر	۲۵	۲۳	۰/۸۹۸۳	۱/۳۰۹۹	۰/۶۳۳۸	$0.8983Q_w^{1/3099}$	۱/۶۴۳۷	۰/۰۷۱۴	
دی	۲۳	۲۱	۰/۴۶۶۷	۱/۴۸۸۰	۰/۶۲۵۸	$0.4667Q_w^{1/4880}$	۱/۴۳۰۴	۰/۰۶۸۱	
بهمن	۳۲	۳۰	۰/۳۰۴۳	۱/۵۴۳۴	۰/۵۴۱۸	$0.3043Q_w^{1/5434}$	۴/۵۷۱۷	۰/۱۵۲۳	
اسفند	۲۲	۲۰	۱/۵۲۴۲	۱/۲۴۸۶	۰/۷۰۳۶	$1.5242Q_w^{1/2486}$	۱/۰۰۱۷	۰/۰۵۰۰	

جدول ۳- مقادیر ضریب همبستگی دبی و رسوب معلق ایستگاه دزفول در همراه تحت تأثیر تکرارهای متفاوت تعداد نرون و توابع محرک.

تعداد نرون لایه میانی	تابع محرک میانی	تابع محرک لایه خروجی	$R^2$
۵	سیگموئید	تانژانت هیپربولیک	۰/۸۹
۹	سیگموئید	تانژانت هیپربولیک	۰/۹۱
۱۲	سیگموئید	سیگموئید	۰/۹۰
۹	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید	۰/۹۵
۱۲	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید	۰/۹۲
۹	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید	۰/۹۳
۱۲	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید	۰/۹۱
۹	تانژانت هیپربولیک	خطی	۰/۹۲

جدول ۴- خلاصه پارامترهای آماری معادله منحنی سنج رسوب در ایستگاه سیرا (ورودی سد کرج).

زمان اندازه گیری دبی	تعداد داده‌ها	درجه آزادی	$a$	$b$	$R^2$	$a.Q_w^b$	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	میانگین کل مربعات خطا
فروردین	۷۹۲	۷۹۰	۰/۵۷۱۳	۲/۳۸۶۸	۰/۶۴۳۲	$۰/۵۷۱۳Q_w^{۲/۳۸۶۸}$	۱۷۸/۶۵۰۰	۰/۲۲۶۱	
اردیبهشت	۹۱۶	۹۱۴	۰/۰۶۷۰	۲/۹۳۹۸	۰/۷۳۱۵	$۰/۰۶۷۰Q_w^{۲/۹۳۹۸}$	۱۳۲/۶۳۰۰	۰/۱۴۵۱	
خرداد	۴۶۲	۴۶۰	۰/۰۰۹۵	۳/۳۷۲۳	۰/۷۰۳۹	$۰/۰۰۹۵Q_w^{۳/۳۷۲۳}$	۶۴/۷۸۰۰	۰/۱۴۰۸	
تیر	۸۸	۸۶	۰/۰۲۷۰	۳/۰۲۰۹	۰/۶۱۴۷	$۰/۰۲۷۰Q_w^{۳/۰۲۰۹}$	۱۵/۳۵۷۰	۰/۱۷۸۵	
مرداد	۸۲	۸۰	۰/۰۲۱۳	۴/۲۳۱۸	۰/۶۲۷۹	$۰/۰۲۱۳Q_w^{۴/۲۳۱۸}$	۲۱/۴۸۴۰	۰/۲۶۸۵	
شهریور	۵۲	۵۰	۰/۰۲۰۲	۴/۷۷۳۳	۰/۶۲۷۶	$۰/۰۲۰۲Q_w^{۴/۷۷۳۳}$	۷/۸۲۸۰	۰/۱۵۶۵	۰/۱۷۱۸
مهر	۸۸	۸۶	۰/۳۸۱۶	۲/۷۲۳۹	۰/۸۱۴۷	$۰/۳۸۱۶Q_w^{۲/۷۲۳۹}$	۱۳/۲۸۰۰	۰/۱۵۴۴	
آبان	۸۴	۸۲	۰/۱۳۰۰	۳/۵۱۹۲	۰/۷۵۶۷	$۰/۱۳۰۰Q_w^{۳/۵۱۹۲}$	۱۴/۰۳۴۰	۰/۱۷۱۱	
آذر	۶۵	۶۳	۰/۶۰۱۹	۲/۵۴۰۲	۰/۵۵۹۰	$۰/۶۰۱۹Q_w^{۲/۵۴۰۲}$	۸/۴۴۹۰	۰/۱۳۴۱	
دی	۵۸	۵۶	۱/۶۳۱۱	۱/۸۳۷۳	۰/۶۸۹۶	$۱/۶۳۱۱Q_w^{۱/۸۳۷۳}$	۲/۲۷۹۳	۰/۰۴۰۷	
بهمن	۹۳	۹۱	۱/۷۶۷۵	۱/۹۰۰۴	۰/۴۶۷۷	$۱/۷۶۷۵Q_w^{۱/۹۰۰۴}$	۱۰/۷۰۷۸	۰/۱۱۷۷	
اسفند	۲۷۲	۲۷۰	۰/۳۹۳۳	۲/۶۳۸۹	۰/۷۷۲۲	$۰/۳۹۳۳Q_w^{۲/۶۳۸۹}$	۵۰/۷۷۰۰	۰/۱۸۸۰	

جدول ۵- خلاصه پارامترهای آماری معادله منحنی سنج رسوب در ایستگاه بیلقان (خروجی سد کرج).

زمان اندازه گیری دبی	تعداد داده‌ها	درجه آزادی	$a$	$b$	$R^2$	$a.Q_w^b$	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	میانگین کل مربعات خطا
فروردین	۶۳	۶۱	۰/۴۷۳۸	۲/۲۳۱۰	۰/۶۰۴۱	$۰/۴۷۳۸Q_w^{۲/۲۳۱۰}$	۱۲/۷۸۶۰	۰/۲۰۹۶	
اردیبهشت	۶۵	۶۳	۰/۹۷۰۷	۱/۸۹۵۰	۰/۴۹۸۹	$۰/۹۷۰۷Q_w^{۱/۸۹۵۰}$	۲۱/۴۴۰۰	۰/۳۴۰۳	
خرداد	۴۰	۳۸	۰/۱۵۵۲	۲/۲۹۹۹	۰/۶۲۲۶	$۰/۱۵۵۲Q_w^{۲/۲۹۹۹}$	۶/۴۷۵۰	۰/۱۷۰۳	
تیر	۲۸	۲۶	۰/۹۷۰۹	۱/۵۵۹۹	۰/۴۰۵۱	$۰/۹۷۰۹Q_w^{۱/۵۵۹۹}$	۲/۶۹۷۶	۰/۱۰۳۷	
مرداد	۱۵	۱۳	۰/۰۰۵۱	۳/۵۲۰۵	۰/۴۶۵۹	$۰/۰۰۵۱Q_w^{۳/۵۲۰۵}$	۱/۱۹۷۷	۰/۰۹۲۱	
شهریور	۱۸	۱۶	۰/۰۰۰۵	۵/۲۶۱۳	۰/۲۶۴۷	$۰/۰۰۰۵Q_w^{۵/۲۶۱۳}$	۲/۷۱۷۴	۰/۱۶۹۸	۰/۱۸۶۷
مهر	۱۹	۱۷	۰/۰۰۳۲	۳/۸۸۶۳	۰/۵۲۳۳	$۰/۰۰۳۲Q_w^{۳/۸۸۶۳}$	۱/۹۵۹۹	۰/۱۱۵۲	
آبان	۲۰	۱۸	۰/۰۰۱۵	۴/۲۹۶۴	۰/۳۹۷۲	$۰/۰۰۱۵Q_w^{۴/۲۹۶۴}$	۴/۰۷۴۱	۰/۲۲۶۳	
آذر	۱۶	۱۴	۰/۰۰۲۵	۴/۴۳۶۷	۰/۶۹۱۴	$۰/۰۰۲۵Q_w^{۴/۴۳۶۷}$	۱/۹۹۸۸	۰/۱۴۲۷	
دی	۱۵	۱۳	۰/۶۴۷۲	۲/۱۲۸۰	۰/۷۱۲۲	$۰/۶۴۷۲Q_w^{۲/۱۲۸۰}$	۰/۴۹۵۶	۰/۰۳۸۱	
بهمن	۲۳	۲۱	۰/۵۲۶۷	۲/۲۴۱۳	۰/۴۳۹۸	$۰/۵۲۶۷Q_w^{۲/۲۴۱۳}$	۳/۰۷۷۷	۰/۱۴۶۵	
اسفند	۴۱	۳۹	۰/۰۳۴۶	۳/۳۱۹۶	۰/۵۳۶۸	$۰/۰۳۴۶Q_w^{۳/۳۱۹۶}$	۴/۳۷۵۲	۰/۱۱۲۱	

جدول ۶- مقادیر ضریب همبستگی دبی و رسوب معلق ایستگاه سیرا در فروردین ماه تحت تأثیر تکرارهای متفاوت تعداد نرون و توابع محرک.

$R^2$	تعداد نرون لایه میانی	تابع محرک میانی	تابع محرک لایه خروجی
۰/۹۱	۵	سیگموئید	تانژانت هیپربولیک
۰/۹۳	۹	سیگموئید	تانژانت هیپربولیک
۰/۸۶	۱۲	سیگموئید	سیگموئید
۰/۹۴	۹	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید
۰/۹۱	۱۲	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید
۰/۹۰	۹	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید
۰/۸۷	۱۲	تانژانت هیپربولیک	سیگموئید
۰/۹۳	۹	تانژانت هیپربولیک	خطی

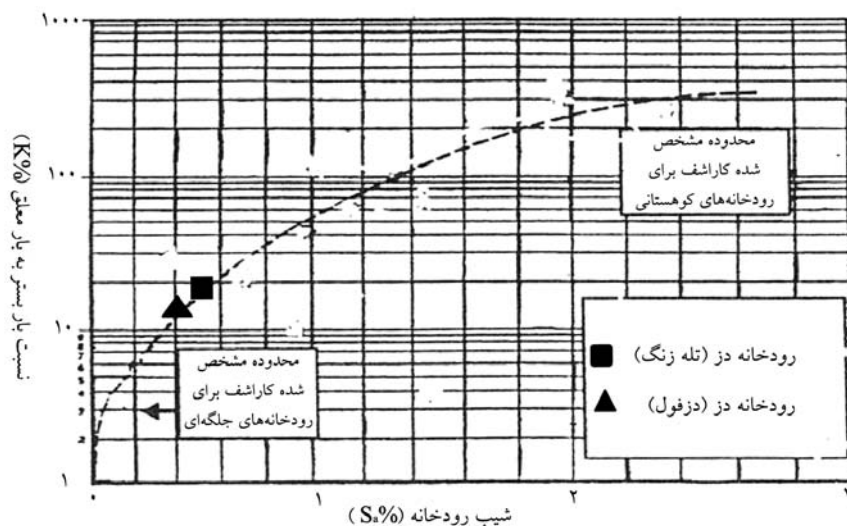


محاسبه بار بستر: با استفاده از گراف کاراشف (که با توجه به شیب بستر رودخانه نسبت بار کف به بار معلق را برآورد می‌کند) و با توجه به شیب متوسط ۰/۵ درصد در محدوده ایستگاه تله‌زنگ و شیب متوسط ۰/۴ درصد در محدوده ایستگاه دزفول، نسبت بار بستر به معلق در ایستگاه ورودی تله‌زنگ تقریباً برابر با ۲۰ درصد و در ایستگاه خروجی دزفول تقریباً برابر با ۱۵ درصد به دست می‌آید (شکل ۱). نسبت بار کف به بار معلق، با توجه به شیب ۱/۸ درصد در محدوده ایستگاه سیرا (ایستگاه ورودی سد کرج) و شیب ۰/۹۲ درصد در محدوده ایستگاه بیلقان (ایستگاه خروجی سد کرج)، به ترتیب تقریباً برابر ۲ و ۰/۴۵ به دست می‌آید (شکل ۲).

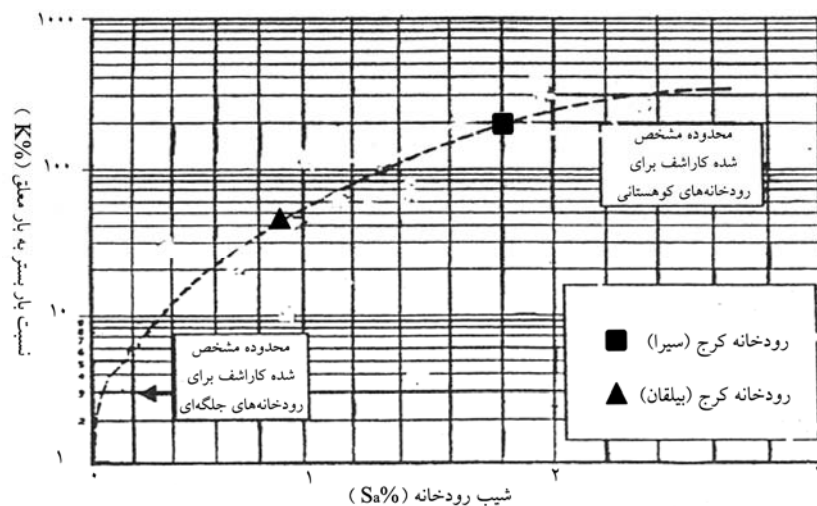
برآورد حجم رسوب مخزن: همان‌گونه که بیان شد، پس از تعیین مقدار بار معلق در هر ایستگاه براساس مدل رگرسیونی منحنی سنجه رسوب ماهانه و همچنین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی طی دوره مورد بررسی، بار بستر، بار کل و در نهایت حجم رسوب محاسبه گردید. آنگاه حجم رسوب برآوردی با حجم رسوب واقعی براساس منحنی‌های سطح-حجم-ارتفاع اولیه و ثانویه (به دست آمده از عملیات هیدروگرافی که قبلاً انجام شده است) مقایسه شدند. جدول‌های ۷ و ۸ مقادیر بار معلق، بار بستر، بار کل و حجم رسوب انتقال یافته برای ایستگاه‌های ورودی و خروجی سدهای دز و کرج را نشان می‌دهند.

جدول ۷- مقادیر برآوردی بار معلق، بار بستر، بار کل (بر حسب میلیون تن) و حجم رسوب (میلیون مترمکعب) انتقال یافته در دو ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ و دزفول طی سال‌های ۱۳۴۱ تا ۱۳۶۲.

نام ایستگاه	روش برآورد رسوب							
	رابطه رگرسیونی				شبکه عصبی مصنوعی			
	بار معلق	بار بستر	بار کل	حجم رسوب	بار معلق	بار بستر	بار کل	حجم رسوب
تله‌زنگ	۱۵۹/۹۸۶	۳۱/۹۹۷	۱۹۱/۹۸۳	۱۲۷/۹۸۸	۲۶۰/۱۰۷	۵۲/۰۲۱	۳۱۲/۱۲۹	۲۰۸/۰۸۶
دزفول	۱۲/۸۱۱	۱/۹۲۱	۱۴/۷۳۳	۹/۸۲۲	۱۵/۲۹۶	۲/۲۹۴	۱۷/۵۹۰	۱۱/۷۲۷



شکل ۱- نمودار تغییرات نسبت بار بستر به بار معلق بر حسب شیب در رودخانه دز.



شکل ۲- نمودار تغییرات نسبت بار بستر به بار معلق بر حسب شیب در رودخانه کرج.

جدول ۸- مقادیر برآوردی بار معلق، بار بستر، بار کل (بر حسب میلیون تن) و حجم رسوب (میلیون مترمکعب) انتقال یافته در دو ایستگاه هیدرومتری سیرا و بیلقان طی سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۷۰.

نام ایستگاه	روش برآورد رسوب						
	رابطه رگرسیونی			شبکه عصبی مصنوعی			
	بار معلق	بار بستر	بار کل	حجم رسوب	بار معلق	بار بستر	بار کل
سیرا	۷/۴۵۲	۱۴/۹۰۴	۲۲/۳۵۷	۱۵/۹۶۹	۷/۱۶۴	۱۴/۳۲۸	۲۱/۴۹۲
بیلقان	۳/۶۴۳	۱/۶۳۹	۵/۲۸۲	۳/۷۷۳	۳/۴۹۳	۴/۷۱۶	۵/۰۶۵

و براساس مدل شبکه عصبی مصنوعی برابر با ۱۹۶/۳۵۹۱۳۶ میلیون مترمکعب به دست می‌آید.

با توجه به جدول ۸ حجم رسوب انباشته شده در مخزن سد کرج بین سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۴۰ براساس رابطه رگرسیونی برابر با ۱۲/۱۹۶ میلیون مترمکعب و مدل شبکه عصبی مصنوعی برابر با ۱۱/۷۳۳ میلیون مترمکعب به دست می‌آید.

مقایسه حجم رسوب برآورد شده با حجم رسوب واقعی (به دست آمده از هیدروگرافی): براساس منحنی‌های سطح-حجم-ارتفاع به دست آمده از عملیات هیدروگرافی، حجم رسوب انباشته شده در مخزن سد طی سال‌های ۱۳۴۱ تا ۱۳۶۲ معادل ۱۶۹/۸۱۱ میلیون مترمکعب و سد کرج طی سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۷۰، معادل ۱۲/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است. مقایسه مقادیر تخمینی توسط رابطه رگرسیونی و مدل شبکه عصبی

با توجه به این که جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد دز به طور متوسط ۱/۵ تن بر مترمکعب و در مخزن سد کرج به طور متوسط ۱/۴ تن بر مترمکعب برآورد شده و با توجه به بار رسوب کل انتقال یافته در هر ایستگاه، مقادیر حجم رسوب که در هر ایستگاه هیدرومتری منتقل شده است، به دست آمد. مقادیر برآوردی حجم رسوب انتقال یافته در دو ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ و دزفول در جدول ۷ و در دو ایستگاه هیدرومتری سیرا و بیلقان در جدول ۸ نشان داده شده‌اند.

با توجه به جدول ۷ حجم برآوردی رسوب انباشته شده در مخزن سد دز بین سال‌های ۱۳۴۱ تا ۱۳۶۲ که از کم کردن میزان رسوب انتقال یافته در ایستگاه دزفول (خروجی از سد دز) از حجم رسوب انتقال یافته در ایستگاه تله‌زنگ (ورودی به سد) به دست می‌آید، براساس رابطه رگرسیونی برابر با ۱۱۸/۱۶۶۵۶۷ میلیون مترمکعب

مصنوعی با مقادیر واقعی نشان‌دهنده آن است که رابطه رگرسیونی برای سد دز مقدار رسوب‌گذاری را حدود ۷۰ درصد میزان حجم واقعی و برای سد کرج حدود ۹۷ درصد مقدار واقعی برآورد نموده است. حال آن‌که شبکه عصبی مصنوعی برای سد دز ۱۱۵ درصد حجم واقعی و برای سد کرج ۹۴ درصد حجم واقعی برآورد داشته است.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با تقسیم‌بندی داده‌های دبی جریان و دبی رسوب براساس زمان اندازه‌گیری (ماه) و طراحی شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر تابع چند لایه پرسپترون، روشی نوین برای برآورد رسوب‌گذاری مخازن سدها ارایه شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی با نتایج به‌دست آمده از مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی به خوبی قادر به پیش‌بینی میزان رسوب‌گذاری مخازن سدها می‌باشد. به‌نظر می‌رسد در برآورد دبی رسوب، استفاده از شبکه عصبی خطای کم‌تری در مقایسه با منحنی سنجه رسوب داشته باشد. در هر حال باید توجه نمود که اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر و کامل‌تر دبی جریان و دبی رسوب و واسنجی هرچه دقیق‌تر روش‌های برآورد

رسوب معلق همراه با مطالعه استفاده از تکنیک‌های جدید محاسباتی و هوش مصنوعی، قابلیت برآورد دقیق‌تر میزان رسوب‌گذاری در مخازن سدها را فراهم خواهد آورد. این موضوع می‌تواند به کاهش هزینه‌های هیدروگرافی مخازن کمک نموده ضمن آن‌که در برنامه‌ریزی دقیق‌تر و به‌هنگام مدیریت منابع آب سد کمک خواهد نمود. با توجه به این‌که قسمتی از حجم رسوب انباشته شده در مخازن سدها بار بستر رودخانه‌ها می‌باشد، پیشنهاد می‌شود که اندازه‌گیری‌های بار بستر و مطالعات آن به‌صورت جامع‌تری صورت پذیرد. زیرا در نظر گرفتن بار بستر به‌صورت درصدی از بار معلق با توجه به شرایط مورفولوژی رودخانه نتایج کاملاً قابل‌اتکایی نمی‌تواند داشته باشد، به‌ویژه در ایستگاه‌های هیدرومتری خروجی و پایین‌دست سدها که ممکن است رسوبات دچار دست‌خوردگی زیادی شده باشند. پیشنهاد می‌گردد که مشابه این پژوهش در مورد تعدادی بیشتر از رودخانه‌ها و مخازن سدها از مناطق مختلف جهان با شرایط متفاوت اقلیمی و هیدرولوژیکی انجام شوند تا کارایی روش ذکر شده مورد بررسی بیشتری قرار گرفته و بتوان به توسعه این روش کمک نمود.

### منابع

1. Agarwal, A., Singh, R.D., Mishra, S.K., and Bhunya, P.K. 2005. ANN-based sediment yield models for Vamsadhara river basin (India). *Water SA*, 31: 1. 95-100.
2. Anonymous. 1991. Technical Report on Sedimentology and sediment survey of Amir Kabir Dam. Surveys and Labs of Water Resources Institute, 113p. (In Persian)
3. Anonymous. 1997. Technical Report on Sedimentology and sediment survey of Dez Dam. Surveys and Labs of Water Resources Institute, 86p. (In Persian)
4. Arabkhedri, M., Hakimkhani, Sh., and Varvani, J. 2004. The Validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric station), *J. Agric. Sci. and Natur. Resour.* 11: 3. 123-131. (In Persian)
5. Arabkhedri, M. 2005. A Study on the Suspended Sediment Yield in River Basins of Iran. *Iran Water Resour. Res. J.* 1: 2. 51-60. (In Persian)
6. Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J. Hydro.* 234: 228-248.
7. Azami, A., Najafinezhad, A., and Arabkhedri, M. 2005. Evaluation of hydrological models for estimating suspended sediment load during base flow and flood in watershed of Ilam dam. *Proceedings of 3<sup>rd</sup> National Conference on Erosion and Sedimentation*, Pp: 298-306. (In Persian)
8. Bahadori, F. 2000. Principles of river sand harvesting. Office of rivers engineering, coastal and flood control of Ministry of Energy, Tehran, 36p. (In Persian)

9. Cigizoglu, H.K., and Alp, M. 2004. Rainfall runoff modeling using three neural network methods. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Lecture Notes in Computer Science)*. 3070 Springer-Verlag-Berlin, Pp: 166-171.
10. Feiznia, S. 2008. *Applied Sedimentology with Emphasis on Soil Erosion & Sediment Production*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Press, 356p. (In Persian)
11. Heydarnezhad, M. 2004. Optimum modeling of sediment estimation and sediment volume in two reservoir dams of Iran (Case study, Karaj and Dez dams). M.Sc. Thesis. Mazandaran University, 208p. (In Persian)
12. Jain, S.K. 2001. Development of integrated sediment rating curves using ANNs. *J. Hydra. Engine.* 127: 1. 30-37.
13. Kisi, O. 2004. Multi-layer perceptrons with Levenberge Marquardt training algorithm for suspended sediment concentration prediction and estimation. *Hydro. Sci. J.* 49: 6. 1025-1040.
14. Menhaj, M.B. 2002. *Fundamental of Neural Network*. Amir Kabir University, 716p. (In Persian)
15. Merritt, W.S., Letcher, R.A., and Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modeling & Software*, 18: 8-9. 761-799.
16. Minns, A.W., and Hall, M.J. 1996. Artificial neural networks as rainfall runoff models. *Hydro. Scie. J.* 41: 3. 399-417. (In Persian)
17. Mirbagheri, S., and Rajaei, T. 2006. Improving of prediction and estimates of suspended load of rivers using artificial neural networks. *Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering*, Pp: 435-443. (In Persian)
18. Mohammadi Ostadkelaye, A. 2002. Optimization of flow discharge and suspended load discharge in hydrometric stations of Gorganrood River. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 90p. (In Persian)
19. Mosaedi, A. 1998. Hydrological sizing of sedimenting reservoir system for irrigation and water supply. Ph.D. Thesis. Technical University of Budapest. Hungary, 101p.
20. Nagy, H.M., Watanabe, K., and Hirano, M. 2002. Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model. *J. Hydra. Engine.* 128: 6. 588-595.
21. Onkal-Engin, G., Demir, I., and Engin, S.N. 2005. Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks. *Environmental Modelling & Software*, 20: 7. 843-850.
22. Pavanelli, D., and Bigi, A. 2004. Suspended sediment concentration for three Apennine monitored basins, particle size distribution and physical parameters. *Agro Environ. Proceedings of a workshop. udine*. Pp: 537-544.
23. Porhemmat, J., and Domeri Ganji, M. 2005. Analysis of sediment transport equations in hydrometric stations of Hendijan-Jarahi watersheds. *Proceedings of 3<sup>rd</sup> National Conference on Erosion and Sedimentation*, Pp: 265-272. (In Persian)
24. Sadeghi, S.H.R. 2004. Producing of Sediment rating curves for raising and falling limbs of hydrograph using the concept of regression. *Iran-Water Resour. Res. J.* 1: 101-103. (In Persian)
25. Sadeghi, S.H.R., Fazli, S., and Khaleidi Darvishan, A. 2010. Evaluation of efficiency sediment rating curve in Khamesan typically watershed. *CD of 4<sup>rd</sup> National Seminar on Erosion and Sediment*. Noor. Iran, 6p. (In Persian)
26. Shafai-Bajestan, M. 1998. *Hydraulics of Sediment transport*, Shahid chamran University Press, 470p. (In Persian)
27. Tawfik, M., Ibrahim, A., and Fahmy, H. 1997. Hysteresis sensitive neural network for modeling rating curves. *J. Computing in Civil Engine.* 11: 3. 206-211.
28. Telvari, A. 2002. Relationship between suspended sediment yield and some of the catchment characteristics in some catchments of Dez and Karkheh rivers in Lorestan province. *Pajouhesh and Sazandegi J.* 56&57: 56-61. (In Persian)

---

## **Estimation of sediment volumes in Karaj and Dez Reservoirs and their comparison with Hydrographic surveying**

**\* A. Mosaedi<sup>1</sup>, S.F. Hashemi Najafi<sup>2</sup>, M. Heydarnezhad<sup>3</sup>,  
M. Nabizade<sup>4</sup> and M.E. Meshkati<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Associate Prof., Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>2</sup>Former M.Sc. Student, Dept. of Water Structure Engineering, Tarbiat Modarres University, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Sciences and Researches Branch of Islamic Azad University of Ahwaz, <sup>4</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

---

### **Abstract**

Erosion and sediment transportation are phenomena that occur in the courses of rainfall conversion to runoff and in the flow of water in stream. Parts of the transporting material settled down in dam reservoirs which have not only some technical trouble, but also economic and even social disasters. So it is important to estimate the amount of sedimentation accurately, before and during of reservoir operation. On the other hand, determination of the actual amount of erosion or sedimentation is too difficult, but different methods of estimation have been suggested. To estimate the amount of input and output sediments discharge from these dams, we have used monthly sediment rating curves (SRC) which are established in up and down streams stations. Then by using the equations and based on the daily flow discharge, the daily input and output sediment discharges were estimated during hydrographic surveying period. Besides the estimation method mentioned above, to estimate the input and output sediment discharge, the artificial neural network (ANN) was used and the best arrays of network and model were founded. For both methods the volumes of sediments were estimated base of specific density of sediments. Besides the estimation methods (SRC & ANN), the volumes of sediments in each of reservoirs are also determined based of hydrographic surveying and compared with the results of different estimations. The results indicated that the sediment rating curves (SRC) were estimated the amount of sediment as 70 percent and %97 of the actual volume in Dez and Karaj dams respectively. By using the artificial neural network (ANN), these estimations were %115 for Dez and %94 for Karaj. To find the efficiency of these methods, we suggest that these methods will be applied to some other reservoirs with different climatic and hydrological regimes.

**Keywords:** Sediment; -----; Sediment rating curves; Artificial neural network; Dez dams; Karaj dams