Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems

مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۲-۱۵۲۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

مقایسه و ارزیابی کارائی مدل‌های داده مبنا جهت تخمین رسوب معلق پایین دست سد درودزن

آرش جاعل*

استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶

صفحات: ۱ تا ۱۲

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده

سدها بر حسب ابعاد خود با ایجاد محیط‌های ساکن بخش اعظمی از رسوب ورودی به مخزن را مهار می‌کنند. با این وجود رسوب خروجی از سد به عوامل مختلفی مانند روش مدیریت سد، رسوب ورودی، ارتفاع آب در مخزن و شکل مخزن و دبی تخلیه بستگی دارد. در این تحقیق میزان رسوب معلق خروجی از سد درودزن بر اساس دوره آماری ۲۵ ساله با استفاده از سه روش یادگیری بر اساس الگوریتم داده مبنا یعنی نزدیکترین نقاط همسایه، رگرسیون‌گیری و شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در روش نزدیک‌ترین همسایه تعداد همسایه و وزن هر پارامتر بر دقت نتایج اثر گذار است بطوریکه در بین ساختارهای مختلف روش نزدیکترین همسایه، روش انتخاب ۶ همسایه با انتخاب وزن‌های ۰/۲۷۱ و ۰/۲۷۱ و ۰/۴۵۸ به ترتیب برای دبی ورودی و دبی رسوب ورودی و دبی خروجی نتایج مناسبتری را نسبت به دیگر ساختارهای این روش نشان می‌دهد. در بین ساختارهای مختلف شبکه عصبی ساختار با ۲ لایه مخفی و تعداد ۴ و ۷ گره بترتیب در لایه های اول و دوم دقت بالاتری نسبت به دیگر ساختارها نشان می‌دهند. مقایسه هر سه روش نشان‌دهنده دقت بالاتر روش شبکه عصبی نسبت به دو روش دیگر است.

واژه‌های کلیدی: رسوب معلق خروجی، رگرسیون‌گیری کلاسیک، سد درودزن، شبکه عصبی، نزدیک‌ترین همسایه.

مقدمه

احداث سدها به عنوان سازه‌های عظیم آبی یکی از شاخص‌های پیشرفت هر کشور محسوب می‌شوند. این سازه‌ها با ایجاد محیط‌های ساکن در پشت خود بخش اعظمی از رسوب ورودی به مخزن را مهار می‌کنند که میزان آن به پارامترهای مختلفی مانند حجم مخزن، خصوصیات و مقدار رسوب ورودی به مخزن و زمان بستگی دارد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲). رسوب‌گذاری در مخزن سد علاوه بر کاهش عمر مفید سد، منجر به آزادسازی جریان تمیز و عاری از رسوب که باعث افزایش ظرفیت حمل رسوب در پایین دست شده و موجب فرسایش و پایین رفتن تراز بستر رودخانه در پایین دست می‌گردد. معمولا از منحنی موسوم به منحنی تله‌اندازی برای پیش‌بینی میزان رسوب ته نشین شده و محاسبه عمر مفید سد استفاده می‌شود. منحنی تله‌اندازی رسوب به نوعی تابعی از رسوب خروجی از مخزن است، با اینحال رسوب خروجی از سد تابع پارامترهای مختلفی مانند روش مدیریت سد، زمان رسوب‌شویی سد، نوع و مکان سازه تخلیه رسوب، ارتفاع آب در مخزن، دبی تخلیه، شکل دره، نحوه ته‌نشین شدن رسوبات در مخزن و ... است (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲). بیان تاثیر دقیق هر کدام از عوامل به پیچیدگی بیشتر موضوع می‌انجامد. اما می‌توان با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری و استفاده از هوش مصنوعی دبی رسوب خروجی از سد را تخمین زد. در

* Email: arashjael60@yahoo.com نویسنده مسئول: آرش جاعل

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

این تحقیق با استفاده از دبی و دبی رسوب ورودی به مخزن و دبی خروجی از سد، دقت سه روش مختلف در پیش‌بینی دبی رسوب خروجی از سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات مختلفی برای برقراری ارتباط بین رسوبات رودخانه-ای و سد صورت گرفته است که در جدول (۱) به تعدادی از آنها اشاره شده است. هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی دبی رسوب خروجی از مخزن سد درودزن می‌باشد.

جدول (۱): مروری بر پژوهش‌های مرتبط بین سد و رسوبات رودخانه‌ای

نام سد/ رودخانه- [کشور] (منبع)	موضوع پژوهش	نکات قابل توجه
بند St. John واقع بر رود Sandusky–[آمریکا] (Granata et al.,2008)	تخریب بند (سد کوتاه) به منظور کاهش ارتفاع آب در مخزن	در سال ۲۰۰۳ بند St. John به ارتفاع ۲/۲ متر و طول تاج ۴۳ متر ابتدا شکافته[1] و سپس تخریب شد. مقدار دبی تخلیه و رسوب معلق در طول زمان شکافت از مقادیر قبل از آن قابل تشخیص نبود. اما در زمان تخریب، دبی به ۳۳ متر مکعب بر ثانیه و بیشترین غلظت رسوبات معلق به ۵۹ میلی گرم در لیتر می‌رسید. و در نهایت پس از ۸ ساعت از تخریب به مقدار پیش زمینه در رودخانه که ۱/۵ متر مکعب بر ثانیه و ۱۹ میلی‌گرم در لیتر بود رسید.
سد Condit، رودخانه سالمون سفید- [آمریکا] (Downs et al., 2009)	تخریب سد همراه با بهره‌گیری از نرم‌افزار عددی	رسوبات سد عمدتا از جنس ماسه و سیلت بوده. در روز اول تخریب سد بیشترین غلظت رسوبات معلق (TSS) به ۵۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ قسمت در میلیون (ppm) مشاهده شد. این غلظت پس از گذشت یک سال به مقدار پیشینه خود قبل از حذف سد رسید.
دریاچه Mills، رودخانه Elwha–[آمریکا] (Downs et al., 2009)	افت ناگهانی سطح آب مخزن	رسوب‌شویی در ناحیه دلتای رودخانه مشاهده شد. اندازه رسوبات در حد ماسه و شن بود. همچنین بیشترین غلظت TSS ثبت شده برابر حدود ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ ppm بود.
سد پانگ- [هندوستان]- (Garg & Jothiprakash, 2010)	برنامه نویسی ژنتیک به منظور تخمین حجم رسوب گیر افتاده در سد	توانایی برنامه‌نویسی ژنتیک در بدست آوردن رابطه غیر خطی بین ورودی و خروجی در بازه های کوتاه مورد تایید قرار گرفته است.
سد مخزنی لار، رودخانه هراز، [ایران] (غلامی و همکاران، ۱۳۹۲)	تاثیر احداث سد بر روابط دبی- دبی رسوب	بر اساس ارتباط بین دبی آب و دبی رسوب معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه لار-پلور (پایین دست سد) رابطه $Q_S = 29.53Ln(Q) - 6636.1$ $(R^2 = 0.559)$ برای سالهای قبل از احداث سد(۱۳۴۷-۱۳۵۹) و برای سال‌های بعد از احداث سد(۱۳۶۰-۱۳۸۰) رابطه $Q_S = 27.008Ln(Q) + 46.235$ $(R^2 = 0.119)$ بدست آمد. که Q_S دبی رسوب بر حسب تن در سال و Q دبی بر حسب مترمکعب در سال می-باشد.
سد دز- رود دز [ایران] (Valipour et al., 2013)	استفاده از مدل‌های سری زمانی و شبکه عصبی در تخمین دبی ورودی	بر اساس آمار ۴۵ ساله دبی ورودی به مخزن سد دز با استفاده از روش‌های آرما و آریما و همچنین شبکه عصبی تخمین زده شد. مشخص گردید که روش شبکه عصبی دینامیک با تابع سیگموئید و ۱۷ گره در لایه مخفی بهترین مدل برای پیش‌بینی دبی ورودی به مخزن سد دز است. نتایج نشان می‌دهد که مدل آریما دقت بیشتری نسبت به مدل آرما دارد.

[1] breach

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

سدThree Gorges ـ رودخانه یانگ تسه-[چین] (Wang et al., 2018)	استفاده از آنالیز آنتروپی برای بررسی اثر سدهای بزرگ ساخته شده و آبگیری سد Three Gorges بر رسوبات معلق	اثر سدهای بزرگ ساخته شده و آبگیری سد Three Gorges Dam (TGD) بر پیچیدگی دینامیک رسوب معلق رودخانه یانگ تسه را با استفاده از مدل آنتروپی[1] چند مقیاس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج گویای اثر سدها بر روی رسوبات معلق می‌باشد. بطوریکه در کوتاه مدت (تا ۳۰ روز) در نزدیکی سد رسوبات معلق دارای ویژگی‌های دینامیکی ساده‌تری نسبت به فاصله‌های دورتر از سد داشته و با افزایش فاصله این پیچیدگی افزایش می‌یابد. همچنین آبگیری سد TGD تاثیر قابل توجهی بر پیچیدگی سری رسوبات در سیستم اصلی رودخانه یانگ تسه داشته است.
سد کوچک (check Dam) در رودخانه Krzczonówka [لهستان]- (Korpak & Matyas, 2019)	کاهش ارتفاع در سال ۲۰۱۳	بستر رودخانه شنی بود. نتایج حاصل از مطالعات نقشه برداری طی سالهای قبل و در سال ۲۰۱۴ نشان از تغییرات بلند مدت و آهسته مقطع رودخانه داشت. رها سازی رسوبات تجمع یافته در پشت سد منجر به ایجاد برکه های گل آلود شده است و بیشترین ته نشینی دقیقا در پایین دست سد اتفاق افتاده است.
رودخانه Mekong ـ [جنوب شرقی آسیا]- (Beveridge et al., 2020)	تاثیر مشترک ساخت سد و تغییر در سیمای سرزمین بر غلظت رسوبات معلق	اثر ساخت سد و تغییر در سیمای سرزمین بر غلظت رسوبات معلق کانال‌ها و انشعابات حوضه آبخیز S۳ رودخانه Mekong مورد بررسی قرار گرفت. از سنجش از دور استفاده شد. تغییر سیمای سرزمین، الگوی اسکان جمعیت شهر نشین و غلظت رسوبات معلق تعیین شد و تغییرات غلظت رسوبات را به مراحل ساخت سد ارتباط داده شد. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییر در غلظت رسوبات معلق همزمان با ساخت سدها در آن منطقه ادامه خواهد داشت.
سد مخزنی شیرین دره واقع در استان خراسان شمالی-[ایران]- (امامقلی زاده و همکاران، ۱۳۹۹)	استفاده از مدل عددی	با مدل عددی HEC-RAS میزان رسوب ورودی به سد مخزنی شیرین دره شبیه سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که در هنگامی که سرعت سقوط بر اساس رابطه روبی و مصالح بستر با مدل اسکنر مرتب سازی شود، از بین معادلات مختلف انتقال رسوب، مدل لارسن (۱۹۵۸) تطابق مناسبی با داده‌های اندازه-گیری نشان می‌دهد. همچنین پیش‌بینی می‌شود که در ۱۰۰ سال آینده حدود ۸۰ درصد حجم اولیه سد از رسوب انباشت شود.
سد Three Gorges ـ رودخانه یانگ تسه میانی- [چین]- (Lyu et al., 2020)	مطالعه حمل رسوب معلق پایین دست سد	۵۰۰ سیلاب رودخانه یانگ تسه میانی به منظور دریافت تاثیر سد بر پسماند[2] حمل رسوب معلق و بلافاصله بعد از سد در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (کمتر از یکسال) و بلند مدت (۱۹۹۲-۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ساخت سد، فرکانس و مقدار سیلاب را کاهش داده است. با این وجود سد تاثیر کمی بر بار رسوبات معلق دارد و بار رسوبات معلق در زمان سیلابی بسیار بیشتر از سهم دبی می‌شود. به گونه‌ای که در مقیاس ماهانه و فصلی، در تابستان و ابتدای پاییز، ۸۰ درصد رسوبات معلق توسط ۶۵ درصد از دبی جریان حمل می‌شود.
رودخانه Mekong ـ [جنوب شرقی آسیا]- (Bussi et al., 2021)	تأثیر مشترک ساخت سد و تغییر اقلیم را برآورد رسوب معلق به دلتای رودخانه Mekong	از مدل هیدرولوژیکی و رسوبی INCA به همراه یک مدل اقلیمی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که اگر تمام سدهایی که برای دو دهه آینده برنامه‌ریزی شده‌اند ساخته شوند، باعث کاهش رسوب معلق تا ۵۰ درصد می شود که باعث کاهش حاصلخیزی دلتا و کاهش معیشت مردم آن ناحیه دارد. همچنین ساخت سد تاثیر بیشتری نسبت به تغییر اقلیم در این روند داشته است.

[1] - multi-scale entropy
[2] - hysteresis

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

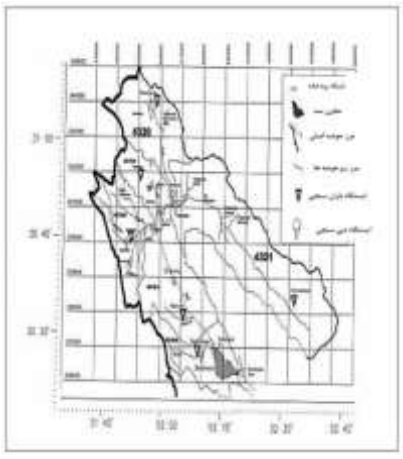
مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مطالعاتی

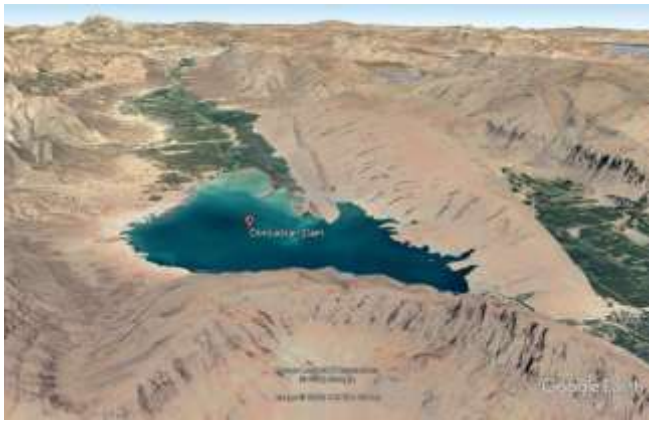
در این تحقیق، نتایج اندازه‌گیری‌های دبی و دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری چمریز در بالادست سد به عنوان دبی و رسوب ورودی به سد و دبی و دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری درودزن به عنوان خروجی رسوب سد و دبی خروجی از مخزن سد در نظر گرفته شدند. سد درودزن در سال ۱۳۴۵ و در ۶۰ کیلومتری شهرستان مرودشت بر روی رودخانه کر در استان فارس احداث شد و در سال ۱۳۵۲ به بهره‌برداری رسید. نوع سد خاکی با هسته رسی با طول تاج ۷۱۰ متر و ارتفاع از پی ۷۸ متر می‌باشد. حجم کل مخزن ۹۹۳ میلیون متر مکعب و حجم مفید آن ۸۶۰ میلیون متر مکعب است. شکل (۱) مکان سد را در حوضه آبخیز درودزن نشان می‌دهد. پس از بررسی آمار دوره ۲۵ ساله از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۰ که عمدتا داده‌ها بصورت ماهانه برداشت گردیده‌اند انتخاب گردید و در مجموع تعداد ۲۸۶ سری داده به عنوان مبنا جهت مقایسه مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در جدول (۲) خصوصیات آماری پارامترهای مورد استفاده ذکر شده است.

جدول(۲): خصوصیات آماری دبی و دبی رسوب ورودی به سد درودزن و خروجی از سد

پارامتر	میانگین	خطای استاندارد میانگین	میانه	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی
دبی ورودی به سد (m^3/s)	۵۵/۴۷	۹۷۱/۷	۸۵/۱۳	۳۶۷/۱۲۰	۹۲/۸۳	۳۵۲۴۷
دبی رسوب ورودی به سد(ton/day)	۶۱/۹۰۸۴	۷۴۷/۴۶۰۹	۰۳/۷۲	۶۵۵/۶۹۶۰۵	۴۹/۱۷۲	۲۱۱۵۵
دبی خروجی از سد (m^3/s)	۸۷/۱۷	۷۳/۲	۲۵۰۵۱	۳۰۶/۳۱	۸۲/۳۸	۴۳۹۷۵
دبی رسوب خروجی سد (ton/day)	۶۳/۱۳۷	۷۸۹/۴۰	۴۴/۲۸	۹۱۴/۶۱۵	۷۵/۱۲۲	۴۴۱۰۹



الف- حوضه آبخیز سد درودزن



ب- نمایی از دریاچه سد درودزن

شکل(۱): جانمایی سد درودزن به همراه حوضه آبخیز آن

معرفی مدل‌های مورد استفاده

در این تحقیق از سه مدل رگرسیون گیری کلاسیک، طبقه‌بندی نزدیکترین همسایه و شبکه عصبی استفاده شده است که در ادامه به معرفی آنها پرداخته می‌شود. از ۲۸۶ سری داده مورد استفاده در این تحقیق، ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل انتخاب گردید. انتخاب داده‌ها به‌صورت تصادفی بوده اما بیشترین و کمترین مقدار داده دبی رسوب در طبقه‌بندی آموزش مدل قرار گرفته است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

روش رگرسیون گیری کلاسیک

برای بیان پدیده‌ها اغلب لازم است تا یک تابع بر داده‌های تجربی برازش شود و بهترین منحنی که بیانگر اطلاعات آزمایشی است بدست آید. در این تحقیق به‌منظور واسنجی مدل رگرسیونی از روش حداقل مجذورات استفاده شده است. در این روش سعی می‌شود ضرایب ثابت بهترین معادله‌ای که کمترین انحراف را نسبت به نقاط داشته باشد تعیین گردد.

معرفی روش نزدیکترین همسایه

از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های رگرسیون غیر پارامتری می‌توان به روش نزدیکترن همسایه K اشاره کرد. در الگوریتم پیش‌بینی با استفاده از نزدیکترین همسایه دو نوع پارامتر مهم وجود دارد که دقت پیش بینی را کنترل می‌کند: اول تعداد همسایه‌ها و دوم وزن هریک از متغیرهای مستقل(W). در این روش تابع توزیع مقادیر پیش‌بینی با استفاده از توزیع غیرپارامتری تابع کرنل بدست می‌آید. الگوریتم مورد استفاده در این روش به این شرح است که با اندازه‌گیری و مشاهده متغیر های مستقل در زمان واقعی مدل به جستجوی حالت‌های مشابه به حالت فعلی در سری تاریخی می‌پردازد. وقایعی که در سری‌های تاریخی بعد از این حالت‌ها پیش آمده‌اند می‌توانند به عنوان گزینه محتمل در شرایط فعلی نیز در نظر گرفته شوند. احتمال وقوع هریک از این حالت‌ها در شرایط حاضر بستگی به شباهت بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی با بردار متغیرهای مستقل مشاهداتی در سری تاریخی دارد. در این الگوریتم، متغیرهای مشاهداتی در زمان واقعی را می‌توان بصورت برداری به شکل زیر نشان داد:

$$X_r = \{x_{1r}, x_{2r}, ..., x_{nr}\} \quad (۱)$$

که در آن x_{nr} نشان‌دهنده متغیر مستقل مشاهده شده n ام در زمان واقعی r می‌باشد چنین برداری با متغیرهای مستقل مشاهده شده تاریخی به شکل $X_t = \{x_{1t}, x_{2t}, ..., x_{nt}\}$ مقایسه می‌گردد که در آن x_{nt} n امین متغیر مستقل مشاهده شده در زمان t در دوره مشاهده اطلاعات می‌باشد. به ازای هر یک از بردارهای تاریخی نشان داده شده در فوق یک مقدار مشاهداتی وابسته به این بردار تحت عنوان D_t وجود دارد. اختلاف بردار متغیر مستقل مشاهداتی فعلی با بردارهای متغیر های مستقل تاریخی بصورت فاصله اقلیدسی زیر محاسبه می‌گردد:

$$Dis_t = \sqrt{W_1(X_{1r} - X_{1t})^2 + W_2(X_{2r} - X_{2t})^2 + ... + W_n(X_{nr} - X_{nt})^2} \quad (۲)$$

در رابطه فوق Dis_t فاصله بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی از بردارهای تاریخی می‌باشد. گزینه‌هایی که به عنوان گزینه برتر از میان سری‌های تاریخی برای تعیین مقادیر پیش بینی Dr انتخاب می شوند گزینه‌هایی هستند که دارای کمترین فاصله از بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی (Dist) می‌باشند. همانطور که از رابطه فوق بر می‌آید تعیین فاصله مشخص شده بستگی به وزنی دارد که برای هریک از متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شود. تعیین این وزن‌ها از مهمترین مسائل در این روش پیش‌بینی می‌باشد. پس از محاسبه وزن‌ها مقدار عددی متغیر مطلوب Dr می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$D_r = \sum_1^m \left(\frac{\frac{1}{Dis_t}}{\sum_1^m \frac{1}{Dis_t}} \right) \times D_t \quad (۳)$$

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

عبارت $\left(\frac{\frac{1}{Dis_t}}{\sum_1^m \frac{1}{Dis_t}}\right)$ یک تابع کرنل و بیان کننده مقدار احتمال وقوع یک پیش بینی برابر با میزان متغیر تاریخی (D_t) در صورت مشاهده شرایط اقلیمی فعلی می‌باشد. در رابطه فوق m تعداد همسایه‌هایی است که برای پیش بینی در نظر گرفته می‌شود (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۹).

روش شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی یکی از پویاترین حوزه‌های تحقیق در دوران معاصر می‌باشد که افراد متعددی از رشته‌های گوناگون علمی را به خود جلب کرده است. در این تحقیق پس از استانداردسازی داده‌ها به محدوده بین ۱- تا ۱، از روش پرسپترون چند لایه با قاعده فراگیری پس انتشار خطا و تابع محرک منطقی (سیگموئید) به منظور آموزش و آزمون مدل استفاده شده است. الگوریتم آموزشی برای پرسپترون چندلایه به این صورت است که:

۱- مقادیر اولیه ضرایب وزنی و آستانه‌ها انتخاب می‌شوند.۲- ورودی و خروجی مطلوب به شبکه ارائه می‌شود. بنابراین آموزش از نوع نظارت شده خواهد بود. ۳- خروجی شبکه محاسبه می‌شود. هر لایه مقدار زیر را محاسبه کرده و به لایه بعد انتقال می‌دهد.

$$y_{pi} = f[\sum_{i=0}^{n-1} w_i x_i] \quad (۴)$$

که n تعداد عناصر بردار ورودی، x ورودی شبکه و w وزن اختصاص داده شده به هر ورودی می‌باشد.۴- ضرایب وزنی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود. برای این منظور ابتدا از لایه خارجی شروع کرده و به عقب برگشت داده می‌شود.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta_{pj} o_{pj} \quad (۵)$$

که $w_{ij}(t)$ نشان‌دهنده ضرایب وزنی از گره I به گره j در زمان t، η ضریب بهره و δ_{pj} نمایانگر خطای مربوط به الگوی p در گره j است. در مورد واحدهای لایه خارجی از رابطه (۶) و در مورد واحدهای لایه پنهان از رابطه (۷) مقدار δ_{pj} بدست می‌آید.

$$\delta_{pj} = ko_{pj}(1-o_{pj})(t_{pj}-o_{pj}) \quad (۶)$$

$$\delta_{pj} = ko_{pj}(1-o_{pj})\sum_k \delta_{pk} w_{jk} \quad (۷)$$

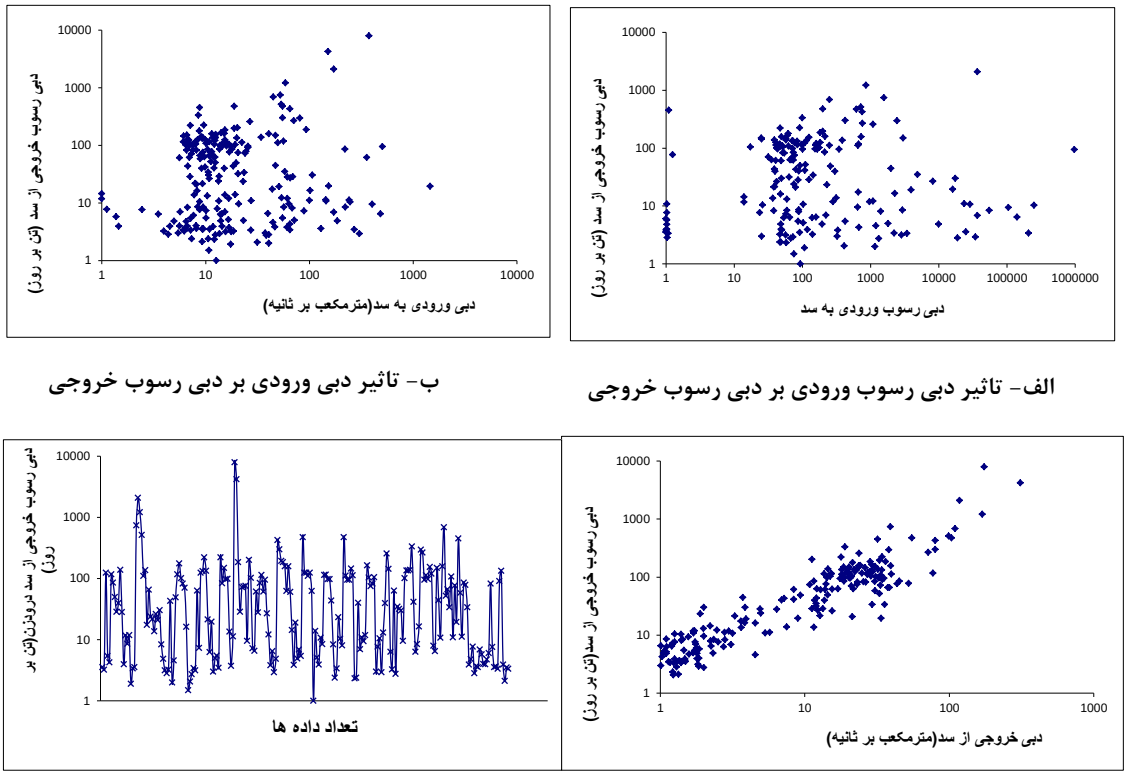
که o_{pj} مقدار خروجی تابع انتقال می‌باشد (البرزی، ۱۳۸۹).

نتایج و بحث

استخراج رابطه رگرسیونی

شکل (۲) به بیان ارتباط بین دبی رسوب خروجی از سد و سایر پارامترها برای ۲۲۸ سری داده می‌پردازند. در شکل (۲- الف) تاثیر دبی رسوب ورودی به سد بر دبی رسوب خروجی با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۰۱- رسم شده است. در شکل (۲- ب) تاثیر دبی ورودی به سد بر دبی رسوب خروجی با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۱۸۵ نشان داده شده است. شکل دایروی گون حاصل نشان از عدم همبستگی دو پارامتر نسبت به هم دارد. در شکل (۲- ج) تاثیر دبی خروجی از سد بر دبی رسوب خروجی با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۷۲۷ رسم شده است. شکل (۲- د) دبی رسوب خروجی از سد را در برای دوره ۲۵ ساله نشان می‌دهد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]



الف- تاثیر دبی رسوب ورودی بر دبی رسوب خروجی

ب- تاثیر دبی ورودی بر دبی رسوب خروجی

ج- تاثیر دبی خروجی بر دبی رسوب خروجی

د- تغییرات دبی رسوب خروجی از سد

شکل(۲): ارتباط دبی رسوب خروجی از سد با هریک از پارامترهای ورودی

همان‌طور که مشاهده می‌شود دبی رسوب خروجی از مخزن سد همبستگی زیادی به دبی خروجی از سد و کمترین همبستگی با دبی رسوب ورودی به سد را دارد که می‌تواند ناشی از نقش سد به عنوان حجم کنترل در معادله پیوستگی دبی جرمی باشد. برای استخراج معادله رگرسیونی از ترکیب روابط رگرسیون گیری خطی و غیر خطی استفاده شد. برای این منظور از ترکیب ده رابطه رگرسیونی از جمله خطی، توانی، معکوس و نمایی استفاده گردید. پس از آزمون توابع مختلف در نهایت دو رابطه بر اساس تعداد پارامترها انتخاب گردید. رابطه (۸) بصورت ترکیب تابع خطی و نمایی تمام پارامترها به عنوان تابع نمایی تخمین زننده دبی رسوب خروجی از مخزن سد درود زن و رابطه (۹) به عنوان تابع توانی تخمین رسوب خروجی بر اساس دبی خروجی از سد انتخاب گردید.

$$Q_{S\,out} = \exp(-1.18\times10^{-3}\times Q_{in} + 1.3\times10^{-6}\times Q_{S\,in} + 5.46\times10^{-2}\times Q_{out} + 2.425) \qquad (۸)$$

$$Q_{Sout} = 3.9887 Q_{Out}^{1.0304} \qquad (۹)$$

در روابط فوق Q_{in} و $Q_{S\,in}$ به‌ترتیب نمایانگر دبی ورودی و دبی رسوب ورودی به سد و Q_{out} و $Q_{S\,out}$ بترتیب نمایانگر دبی خروجی و دبی رسوب خروجی از سد می‌باشند. درجدول (۳) نتایج آماری در مرحله استخراج و صحت سنجی برای هر دو مدل نشان داده شده است. رابطه (۹) بدلیل سادگی و دارا بودن دقت بیشتر به عنوان رابطه منتخب روش رگرسیون گیری انتخاب شد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

جدول(۳): نتایج آماری حاصل از روش رگرسیون‌گیری کلاسیک در مرحله آموزش و آزمون

نتایج آماری برای مرحله استخراج مدل(آموزش)			نتایج آماری برای مرحله صحت سنجی مدل (آزمون)		
شماره رابطه	R2	RMSE	MAE	R2	RMSE	MAE
(۸)	۰/۱۹	۲/۲۰۷E+07	۲/۱۴۶E+6	۰/۲۸	۹۴/۶۱۲	۴۰/۳۸۴
(۹)	۰/۴	۵۹۹/۵۰۳	۹۳/۵۷۸	۰/۳۷	۲۰۰/۵۴۴	۴۹/۷۵۱

در جدول فوق معیارهای آماری برای انتخاب روابط میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) انتخاب گردید.

تعیین بهترین نقطه همسایگی

در جدول (۴) نتایج آماری برای تخمین دبی رسوب خروجی از سد در مراحل آموزش و آزمون با استفاده از روش K-NN نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بر اساس معیارهای آماری، تعداد ۶ نقطه همسایگی دارای دقت بیشتری نسبت به دیگر نقاط همسایگی می‌باشد.

جدول(۴): نتایج آماری حاصل از روش بهترین نقطه همسایگی در مرحله آموزش و آزمون

تعداد همسایگی	نتایج آماری برای مرحله آموزش			نتایج آماری برای مرحله آزمون		
	R2	RMSE	MAE	R2	RMSE	MAE
یک همسایگی	۰/۶۳	۷۶۴/۹۸۴	۱۵۵/۸۴۴	۰/۵۹	۵۴/۲۶۶	۲۶/۶۴
دو همسایگی	۰/۴۳	۱۷۰/۰۹۷	۵۲/۲۹۳	۰/۷۳	۴۰۳/۶۹۱	۸۷/۲۵۴
سه همسایگی	۰/۳۸	۷۰۲/۷۵	۱۲۶/۹۱۹	۰/۷۱	۵۸/۰۹۵	۳۳/۵۶۴
چهار همسایگی	۰/۵۹	۱۰۲/۵۵۲	۴۵/۱۹۸	۰/۸۱	۵۵۸/۹۸۶	۱۲۴/۶۰۶
پنج همسایگی	۰/۶۲	۳۷۲/۲۶۸	۸۱/۷۳۴	۰/۶۵	۵۵/۴۶۵	۲۴/۵۹۸
شش همسایگی	۰/۷۰	۲۷۵/۴۳۴	۷۵/۰۷۵	۰/۷۲	۴۲/۵۳۶	۲۱/۰۶۳
هفت همسایگی	۰/۸۹	۲۸۷/۶۸۸	۷۵/۱۷	۰/۰۲	۱۸۹/۲۲۶	۴۷/۴۵۴
هشت همسایگی	۰/۴۵	۱۷۵/۸۲۳	۴۲/۲۷	۰/۵۹	۵۲۰/۲۴۶	۱۰۹/۳۵۳
نه همسایگی	۰/۷۱	۳۰۸/۱۴۸	۶۸/۵۲۱	۰/۵۲	۴۶/۸۱۹	۲۷/۴۳۵
ده همسایگی	۰/۷۱	۲۹۹/۲۸۵	۶۷/۵۷۰	۰/۵۶	۶۳/۵۸۶	۳۳/۵۸۳

در جدول (۵) وزن‌های هر یک از پارامترها در روش نزدیکترین نقطه همسایگی که به نوعی نشان‌دهنده اهمیت آنها است، برای نقاط همسایگی مختلف نشان داده شده است. در تعداد ۶ نقطه همسایگی، وزن داده شده برای دبی ورودی و دبی رسوب ورودی برابر با ۰/۲۷ و برای دبی خروجی از مخزن ۰/۴۵۸ می‌باشد.

جدول(۵): وزن اختصاص یافته به هر یک از ورودی‌ها در روش نزدیکترین نقطه همسایگی

تعداد نقاط همسایگی	دبی خروجی از مخزن	دبی رسوب ورودی به مخزن	دبی ورودی به مخزن
یک همسایه	۰.۵۴۴۲	۰.۱۶۰۵	۰.۲۹۵۳
دو همسایه	۰.۵۳۴۲	۰.۲۱۰۲	۰.۲۵۵۶
سه همسایه	۰.۴۹۷۰	۰.۲۵۱۳	۰.۲۵۱۷
چهار همسایه	۰.۶۰۱۶	۰.۱۹۱۲	۰.۲۰۷۲
پنج همسایه	۰.۵۲۳۷	۰.۲۳۶۹	۰.۲۳۹۴
شش همسایه	۰.۴۵۷۹	۰.۲۷۰۸	۰.۲۷۱۳
هفت همسایه	۰.۴۲۳۰	۰.۳۰۵۳	۰.۲۷۱۷
هشت همسایه	۰.۴۷۶۱	۰.۲۵۸۷	۰.۲۶۵۵
نه همسایه	۰.۴۱۶۰	۰.۲۹۷۹	۰.۲۸۶۱
ده همسایه	۰.۴۱۸۶	۰.۲۷۵۹	۰.۳۰۵۵

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

تعیین بهترین ساختار شبکه عصبی

در جدول (۶) نتایج حاصل از شبکه عصبی در دو مرحله آموزش و آزمون با استفاده از پرسپترون چند لایه و الگوریتم آموزشی پیشخورد برای یک لایه مخفی و دو لایه مخفی و با تعداد حداکثر ده گره در هر لایه مخفی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار دو لایه مخفی با تعداد ۴ گره در لایه مخفی اول و ۷ گره در لایه مخفی دوم نتایج مناسبتری نسبت به دیگر ساختارها ارائه می‌دهد.

جدول(۶): ارزیابی بهترین نتایج شبکه عصبی مورد استفاده در این تحقیق

تعداد لایه مخفی	ساختار لایه	نتایج آماری برای مرحله آموزش			نتایج آماری برای مرحله آزمون		
		R2	RMSE	MAE	R2	RMSE	MAE
یک لایه مخفی	۱-۳-۳	۰/۸۹	۶۷/۴۷۲	۳۳/۶۱۵	۰/۴۰	۵۶/۱۵۵	۳۱/۱۴۴
	۱-۴-۳	۰/۹۰	۶۴/۹۳	۳۰/۱۹۳	۰/۴۴	۵۳/۲۷۴	۲۷/۷۴۶
	۱-۸-۳	۰/۹۰	۶۵/۳۸۷	۳۰/۳۳۶	۰/۲۸	۶۶/۳۹۷	۳۱/۲۹۲
	۱-۱۰-۳	۰/۹۰	۶۳/۸۷۹	۲۸/۸۸۲	۰/۴۸	۴۹/۲۶۵	۲۶/۶۳۳
دو لایه مخفی	۱-۱۰-۳-۳	۰/۸۷	۸۰/۴۷۴	۳۷/۷۹۹	۰/۰۱	۲۳۴/۷۶۱	۶۰/۶۱۸
	۱-۷-۴-۳	۰/۹۶	۳۸/۵۲۵	۱۸/۹۱۷	۰/۴۸	۴۸/۵۲	۲۵/۳۵۸
	۱-۶-۱۰-۳	۰/۹۳	۵۶/۵۳۲	۲۶/۰۱۸	۰/۳	۶۱/۸۸۸	۳۰/۹۳۴

مقایسه صحت سنجی بهترین ساختارهای حاصل از سه روش مورد استفاده در این تحقیق

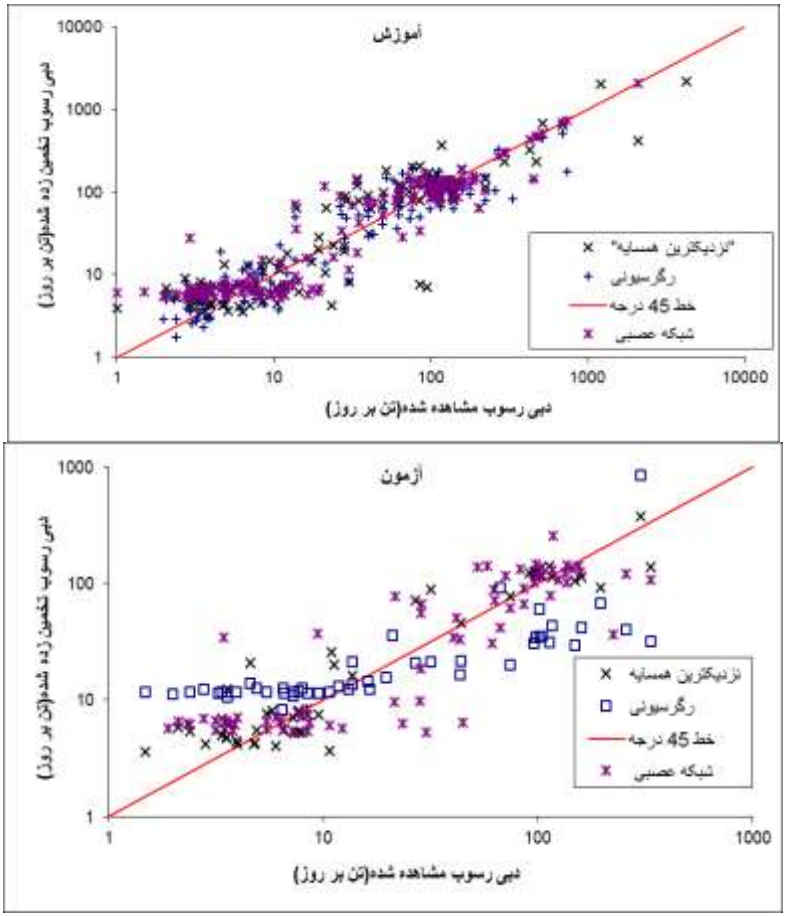
در جدول (۷) نتایج حاصل از بهترین ساختارها در هر سه مدل یعنی روش نزدیکترین نقاط همسایه، رگرسیون-گیری و شبکه عصبی نشان داده شده است. بر اساس قضاوت با معیارهای MAE و RMSE مشاهده می‌شود که شبکه عصبی کمترین مقدار خطا را در تخمین دبی رسوب خروجی از سد درودزن دارد و بعد از آن روش نزدیکترین همسایه خطای کمتری نسبت به روش رگرسیون‌گیری دارد. در شکل (۳) میزان انطباق نتایج هر کدام از روش‌ها در بهترین ساختار بر خط ۴۵ درجه در هرکدام از مراحل آموزش و آزمون جهت تخمین دبی رسوب خروجی از سد نشان داده شده است.

جدول(۷): ارزیابی دقت سه روش نزدیکترین نقاط همسایه، رگرسیون گیری و شبکه عصبی

روش مورد استفاده	نتایج آماری برای مرحله آموزش		نتایج آماری برای مرحله آزمون	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
رگرسیون‌گیری	۹۳/۵۷۸	۵۹۹/۵۰۳	۴۹/۷۵۱	۲۰۰/۵۴۴
نزدیکترین همسایه	۷۵/۰۷۵	۲۷۵/۴۳۴	۲۱/۰۶۳	۴۲/۵۳۶
شبکه عصبی	۱۸/۹۱۷	۳۸/۵۲۵	۲۵/۳۵۸	۴۸/۵۲

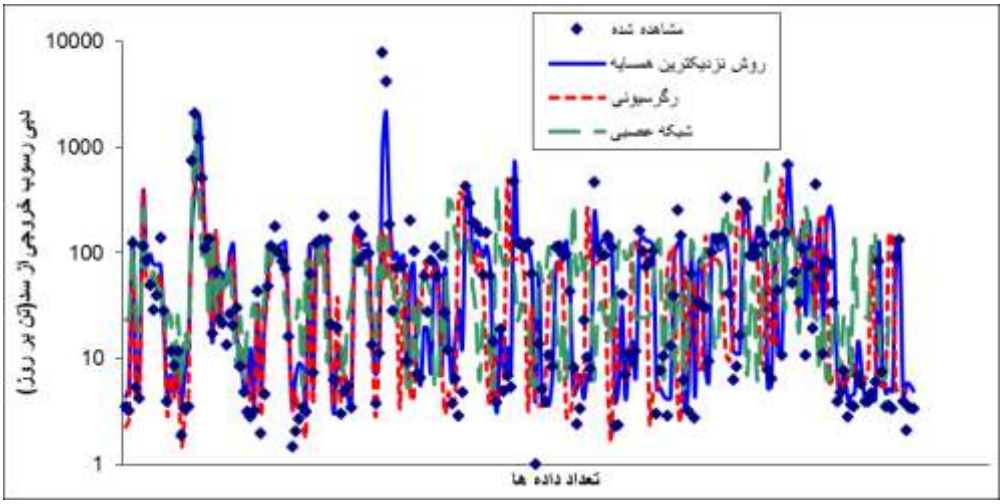
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]



شکل(۳): مقایسه بین روش‌های مختلف نزدیکترین همسایه، رگرسیون کلاسیک و شبکه عصبی در دو مرحله آموزش و آزمون

در شکل(۴) دبی رسوب خروجی از سد برای داده‌های ماهانه حاصل از ۲۵ سال را در مقابل بهترین ساختارهای هر سه روش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر سه روش دارای مقادیر پیش‌بینی در محدوده بین بیشترین داده و کمترین داده هستند. با این وجود روش نزدیکترین همسایه در پیش‌بینی بیشترین مقدار مشاهده شده تاریخی دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌دهد و روش رگرسیون‌گیری در پیش‌بینی کمترین مقدار مشاهده شده تاریخی دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد.



شکل(۴): مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای تمام داده‌ها

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سدها با تله اندازی رسوبات باعث افزایش ظرفیت حمل رسوب و در نهایت فرسایش بستر رودخانه پایین دست می‌شوند. اطلاع از رسوب خروجی از سد علاوه بر کمک به طراحی سازه‌های هیدرولیکی پایین دست، شناخت بهتر شرایط زیست محیطی و تخمین دقیق‌تر عمق فرسایش رودخانه پایین دست می‌شود. رسوب خروجی می‌تواند به عنوان شرایط مرزی برای حل مسائل عددی جریان به کار رود. ترکیب عوامل مختلف از جمله میزان رسوب وارد شده به مخزن، دبی خروجی از مخزن، راندمان تله اندازی، کنترل مسئله رسوبگذاری و مدیریت مخزن باعث پیچیدگی در تخمین رسوب خروجی از مخزن می‌شود. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آماری دبی و دبی رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری چمریز و درودزن، دقت سه روش رگرسیون‌گیری، روش نزدیکترین همسایه و شبکه عصبی در تخمین دبی خروجی از سد درودزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر می‌باشد:

۱- از بین سه پارامتر دبی ورودی، دبی رسوب ورودی و دبی خروجی، دبی رسوب ورودی با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۰۱ کمترین تاثیر و دبی خروجی از سد با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۷۳ بیشترین تاثیر را بر رسوب خروجی از سد دارد. با استفاده از روش رگرسیون‌گیری دو رابطه برای تخمین دبی رسوب خروجی ارائه شد. پس از ارزیابی آماری دبی رسوب خروجی تابع توانی از دبی خروجی در نظر گرفته شد.

۲- در روش نزدیکترین همسایه، تعداد همسایه‌ها و وزن هر پارامتر بر دقت نتایج تاثیر گذار است. در این تحقیق تعداد همسایه‌ها از ۱ تا ۱۰ تغییر داده شد و در نهایت تعداد ۶ نقطه همسایه به عنوان بهترین ساختار انتخاب گردید. برای وزن‌های ۰/۲۷۱۳ و ۰/۲۷۰۸ برای دبی ورودی و دبی رسوب ورودی و ۰/۴۵۷۹ برای دبی خروجی در این ساختار، بهترین دقت در شبیه‌سازی دبی رسوب خروجی از سد با استفاده از روش نزدیکترین نقطه همسایگی بدست می‌آید.

۳- ساختارهای مختلف شبکه عصبی با تعداد یک و دو لایه مخفی و تعداد حداکثر ده گره در هر لایه در تخمین دبی رسوب خروجی از سد استفاده گردید. از بین ساختارهای مختلف شبکه عصبی انتخاب دو لایه مخفی با تعداد ۴ گره در لایه مخفی اول و ۷ گره در لایه مخفی دوم نتایج مناسب‌تری نسبت به دیگر ساختارها ارائه می‌دهد.

۴- برای مقایسه دقت سه روش رگرسیون‌گیری، نزدیکترین نقطه همسایه و شبکه عصبی نتایج حاصل از بهترین ساختارها بر اساس معیارهای آماری متداول مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که از بین روش‌های مختلف شبکه عصبی با میانگین قدرمطلق خطا ۱۸/۹ در مرحله آموزش و ۲۵/۳۶ در مرحله آزمون بیشترین دقت و رگرسیون-گیری با میانگین قدرمطلق خطا ۹۳/۵۸ در مرحله آموزش و ۴۹/۷۵ در مرحله آزمون کمترین دقت را در تخمین دبی رسوب خروجی از سد دارند. همچنین روش نزدیکترین همسایه در پیش‌بینی بیشترین مقادیر مشاهده شده و روش رگرسیون‌گیری در پیش‌بینی کمترین مقادیر مشاهده شده دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها دارند.

منابع

۱. امامقلی‌زاده، ص.، ن. خادمی، س. ح. حسینی (۱۳۹۹) پیش‌بینی میزان رسوب ورودی به مخزن سد شیرین دره به کمک مدل HEC-RAS پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۱(۲۱)، ۲۰۸-۲۲۲.

۲. البرزی، م. [مترجم] (۱۳۸۹) آشنایی با شبکه های عصبی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

۳. شفاعی بجستان، م. (۱۳۹۲) مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

۴. غلامی، ع.، م. وفاخواه، و ش. نجف‌پور (۱۳۹۲) تاثیر احداث سد لار در تغییرات هیدرولیکی و بار رسوب معلق آن بر آبزیان رودخانه هراز. فن آوری‌های نوین در توسعه آبزی پروری (شیلات)، ۷(۳) (پیاپی ۲۷)، ۴۱-۵۰.

۵. کارآموز، م. و ش. عراقی‌نژاد (۱۳۸۹) هیدرولوژی پیشرفته، انشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

6. Beveridge C., Hossain F. and Bonnema M. (2020*). Estimating Impacts of Dam Development and Landscape Changes on Suspended Sediment Concentrations in the Mekong River Basin's 3S Tributaries.* Journal of Hydrologic Engineering, *25(7), 05020014.*

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]

7. Bussi G., Darby S. E., Whitehead P. G., Jin L., Dadson S. J., Voepel H. E. and Nicholas A. (2021). *Impact of dams and climate change on suspended sediment flux to the Mekong delta*. Science of the Total Environment, *755, 142468.*
8. Downs P. W., Cui Y., Wooster J. K., Dusterhoff S. R., Booth D. B., Dietrich W. E. and Sklar L. S. (2009*). Managing reservoir sediment release in dam removal projects: An approach informed by physical and numerical modelling of non-cohesive sediment*. International Journal of River Basin Management, *7(4), 433-452*.
9. Garg, V. and Jothiprakash V. (2010). *Modeling the time variation of reservoir trap efficiency*. Journal of Hydrologic Engineering, *15(12), 1001-1015.*
10. Granata T., Cheng F. and Nechvatal M. (2008*). Discharge and suspended sediment transport during deconstruction of a low-head dam*. Journal of Hydraulic Engineering, *134(5), 652-657*.
11. Korpak J. and Lenar-Matyas A. (2019). *Stream channel changes as a result of sudden sediment release due to check dam lowering (Polish Carpathians).* Environmental Earth Sciences, *78(14), 1-13.*
12. Lyu Y., Fagherazzi S., Zheng S., Tan G. and Shu C. (2020). *Enhanced hysteresis of suspended sediment transport in response to upstream damming: An example of the middle Yangtze River downstream of the Three Gorges Dam.* Earth Surface Processes and Landforms, *45(8), 1846-1859*.
13. Valipour M., Banihabib M. E. and Behbahani S. M. R. (2013*). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir*. Journal of hydrology, *476, 433-441*.
14. Wang Y., Rhoads B. L., Wang D., Wu J. and Zhang X. (2018*). Impacts of large dams on the complexity of suspended sediment dynamics in the Yangtze River*. Journal of Hydrology, *558, 184-195*.

Comparison and evaluation of the performance of data-driven models for estimating suspended sediment downstream of Doroodzan Dam

Arash Jael*
Assistant professor at the Agriculture department, Faculty of Engineering, Payam Noor University, Iran.
Received: 2021/07
Accepted: 2021/09

Abstract

Dams control most of the sediment entering the reservoir by creating static environments. However, sediment leaving the dam depends on various factors such as dam management method, inlet sediment, water height in the reservoir, the shape of the reservoir, and discharge flow. In this research, the amount of suspended sediment of Doroodzan Dam based on a statistical period of 25 years has been investigated using three learning methods based on the data-driven algorithm, namely the K nearest neighbors, regression, and neural network. The results show that among different structures of the K nearest neighbors, the selection of 6 neighborhoods has more precise outcomes than other structures. Also, among different structures of neural networks, a structure with two hidden layers and 4 and 7 nodes in each hidden layer respectively, predicted suspended sediment more accurately than other neural network structures. Comparison of different algorisms was indicated that neural networks have more accurate results than other mentioned methods.

Keywords: Artificial Neural Networks, Classic Regression, Doroodzan Dam, K-Nearest Neighbors, Suspended Sediment.

* Corresponding Author Email: arashjael60@yahoo.com

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.3.3.9]