دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

پیش‌بینی میزان رسوب ورودی به مخزن سد شیرین دره به کمک مدل HEC-RAS

صمد امامقلی‌زاده[۱]، نعمت‌الله خادمی[۲] و سید حسین حسینی[۳]

۱- دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، (نویسنده مسوول: s_gholizadeh517@Shahroodutac.ir)
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- استادیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
تاریخ ارسال: ۹۸/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲
صفحه: ۲۰۸ تا ۲۲۲

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سدها سبب کاهش ظرفیت و عمر آن‌ها می‌شود. تخمین میزان رسوب‌گذاری می‌تواند کمک موثری در مدیریت و طراحی ظرفیت مفید مخازن سدها کند. در تحقیق حاضر ارزیابی روند رسوب‌گذاری مخزن سد شیرین‌دره، که در ٦٥ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بجنورد واقع شده است، مورد بررسی قرار گرفت. این سد از نوع سد خاکی با هسته رسی است و حجم اولیه مخزن در تراز نرمال بهره‌برداری ۹۱/۵ میلیون مترمکعب است. از مدل ریاضی HEC-RAS4.1 به دلیل قابلیت شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب استفاده شد. از داده‌های هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹٦ مخزن سد شیرین‌دره، برای واسنجی مدل استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با معادلات مختلف انتقال رسوب (لارسن، انگلوند- هانسن، ایکرز- وایت، توفالتی، یانگ، میر پیتر- مولر، ویلکاک) نشان داد، استفاده از معادله لارسن (۱۹۵۸) به‌عنوان معادله انتقال رسوب، معادله روبی به‌عنوان معادله سرعت سقوط ذرات، روش مرتب‌سازی مصالح بستر با مدل اکسنر۵ و همچنین استفاده از ضریب زبری برابر با ۰/۰۳۵، تطابق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل وجود دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی برای مدت‌زمان ۱۰۰ سال آینده نشان داد که دراین مدت تقریبا ۷۳/۲ میلیون مترمکعب رسوب در مخزن انباشت خواهد شد که آن معادل با حدود ۸۰ درصد از حجم اولیه مخزن خواهد بود. به‌عبارتی به‌طور متوسط، سالانه حدود ۰/۸ درصد از حجم مخزن در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، سد شیرین‌دره، مخزن سد، مدل ریاضی HEC-RAS4.1

مقدمه

ایران جزء مناطق خشک جهان محسوب می‌شود. لذا بحران کمبود آب شیرین سبب شده سرمایه‌های بسیاری در این راه صرف شود. احداث سد در مسیر رودخانه‌ها و ذخیره آب در پشت آن‌ها از بهترین روش‌ها جهت بهره‌برداری از منابع آب در زمان کم‌آبی است. تامین آب، کنترل سیلاب، تولید انرژی برق‌آبی و ایجاد مراکز تفریحی از دیگر اهداف احداث سد است. ساختن سد بر روی رودخانه سبب بهم‌خوردن تعادل هیدرودینامیکی شده و درنتیجه تمامی یا بخشی از رسوبات در سد ته‌نشین می‌شود. با توجه به تأثیر مستقیم عمر مفید مخزن سد در میزان بازده اقتصادی آن و نظر به اینکه عمر مفید مخزن بر اساس میزان رسوب‌گذاری در آن تعیین می‌گردد، مسئله رسوب‌گذاری در مخزن سد از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در اقتصاد طرح خواهد بود (۲۳). جریان آب بر روی بستر زمین طبیعی باعث فرسایش خاک و حمل ذرات حاصل از آن توسط جریان به سمت پایین‌دست به‌صورت بار رسوبی معلق و بار بستر خواهد شد. این رسوبات می‌توانند مشکلاتی را برای سازه‌های کانال‌ها، آبگیرها و دهانه ورودی ایستگاه‌های پمپاژ ایجاد کنند (۱۷،۱۶). همچنین برای سدها، به دلیل کاهش شدید سرعت در بالادست سد و تقریبا ساکن‌شدن جریان در داخل مخزن سد، ته‌نشینی ذرات نامحلول و رسوبات موجود در آن، در مخزن سد امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (۳۲،۱۶). تحقیقات نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا یک درصد از مجموع حجم مخازن سدها در جهان به‌علت رسوب‌گذاری از دست می‌رود (۳۷،۹)، که آن تقریبا معادل با ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال است (۴۳). در ایران میزان کاهش حجم مخازن سدها در اثر رسوب‌گذاری به‌طور متوسط بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد در سال (۴۰) و ۰/۶۹ درصد در سال (۱۹) تخمین‌زده می‌شود. متوسط میزان کاهش حجم محاسبه‌شده توسط دفتر بهره‌برداری و نگهداری از مخازن سدهای وزارت نیرو با استفاده از اطلاعات ۲۷ سد بزرگ کشور در سال ۱۳۸۶ نیز در همین محدوده قرار دارد (۲۰).

مساله رسوب‌گذاری در مخازن سدها در بسیاری از کشورها از جمله ایران موجب به‌وجودآمدن مشکلات عدیده‌ای در بهره‌برداری از آنها شده است، که برای مثال در ایران می‌توان به سد دز (۱۸،۱۵)، سد سفید رود (۲۴) و سد کرج (۲۵،۱۲) اشاره نمود.

موضوع انتقال رسوب قرن‌هاست که موردمطالعه مهندسین و مورفولوژیست‌های رودخانه‌ها بوده است. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای حل مسائل به‌کار گرفته‌شده است که نتایج به‌دست‌آمده، غالباً تفاوت فاحشی با یکدیگر و مشاهدات صحرایی دارند. بسیاری از جنبه‌های پیچیده انتقال رسوب در میان موضوعات بحث‌انگیز برای مطالعه آینده باقی هستند و باید درک شوند. خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی، سازه‌های آبی ساخته‌شده بر روی یا کنار رودخانه‌ها بسیار گسترده، وسیع و زیان‌آور است، شناخت دقیق آن از اهداف مهم مهندسین هیدرولیک است. برای جلوگیری و یا به حداقل‌رساندن خسارات وارده، باید سه فرآیند فرسایش، انتقال و ته‌نشینی مواد رسوبی را موردمطالعه قرارداد. تاکنون

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

بسیاری از محققین به کمک روابط تجربی و نرم‌افزارهای مختلف مانند HEC-RAS4.1، GSTARS3، CCHE2D، MIKE 11 و غیره به بررسی روند رسوب‌گذاری در مخازن سدها پرداختند. برای مثال تادسه و دای (۳۸) با استفاده از تلفیق مدل HEC-RAS و مدل SWAT به بررسی رسوب‌گذاری مخزن سد کوما واقع در حوضه رودخانه آواش در اتیوپی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از تلفیق دو مدل مذکور با ضریب تبیین ۰/۸۵ و ۰/۶۷ و همچنین با داشتن ضرایب ناش- ساتکلیف (Nash Sutcliffe) به‌ترتیب برابر با ۰/۹۰ و ۰/۶۲ برای شبیه‌سازی روزانه به‌ترتیب برای محاسبه دبی و دبی رسوب دارای کارایی مناسب می‌باشد. فرشادی و همکاران (۲۲) میزان رسوبات ورودی به مخزن سد گتوند علیا را با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS4.0 تخمین زدند و پس از واسنجی و اجرای مدل میزان بار رسوب ورودی به مخزن سد گتوند علیا برابر با ۵۳۶۰۰۰۰ تن در سال محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد پس از گذشت۱۰۰ سال ۴۹۸ میلیون تن و با توجه به ضریب تله‌اندازی ۹۰ درصد، حجم کل رسوب در مخزن انباشته‌شده که معادل با ۱۴/۹۵درصد از حجم کل مخزن سد می‌باشد. اکبرزاده و همکاران (۴) به بررسی مقدار نشست رسوبات مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از روش‌های تجربی و مدل HEC-RAS پرداخته‌اند. در این پژوهش مقدار نشست رسوبات سد شهید عباسپور محاسبه و با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرارگرفته است.

نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین مدل عددی HEC-RAS و داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد. احمدی و همکاران (۳) به بررسی مقدار رسوب‌گذاری مخزن سد کرج با استفاده از روش‌های تجربی و مدل HEC-RAS پرداخته‌اند. آن‌ها با جمع‌آوری نقشه‌های مربوط به عملیات هیدروگرافی صورت‌گرفته، بعد از مطالعه و بررسی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد کرج در یک دوره‌ی۴۶ ساله بین سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۶ میزان دقت و خطای این مدل را به ازای توابع انتقال رسوب و توابع سرعت سقوط موجود در برنامه و بر اساس معیار شکل پروفیل طولی، مورد بررسی قرار دادند. بنی‌حبیب و همکاران (۸) به بررسی نحوه‌ی رسوب‌گذاری مخازن سدهای شکافدار و سدهای تأخیری با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. در این بررسی ابتدا توسط یک مدل آزمایشگاهی، مدل HEC-RAS واسنجی شد. سپس با به‌کاربردن اطلاعات به‌دست‌آمده و شبیه‌سازی سد شکافدار در مدل HEC-RAS نحوه‌ی رسوب‌گذاری در مخزن این دو سد با استفاده از معیار پروفیل طولی با یکدیگر مقایسه شد. خسرو پور و بنی‌هاشمی (۳۰) رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه را با توجه به شرایط مختلف بهره‌برداری و رژیم رودخانه در نرم‌افزار HEC-RAS بررسی نمودند. در این مطالعه با توجه به آمار ۴۳ساله آبدهی روزانه و ۱۷ساله رسوب مواد معلق، متوسط دبی ورودی آب و رسوب در ۱۲ ماه سال تعیین و به مدت ۴۵ سال در برنامه شبیه‌سازی شد. در این مطالعه با تعیین سناریوهایی که در آن سطح تراز آب ثابت فرض شده بود، مشخص شد که سرعت پیشروی دلتا با کاهش تراز بهره‌برداری افزایش می‌یابد.

منتظمی نوین و اعلمی (۱) به بررسی نحوه‌ی توزیع رسوب در سطح مخزن سد یامچی اردبیل به‌کمک نرم‌افزار HEC-6 و روش‌های کاهش سطح و افزایش سطح و مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده پرداخته‌اند. کل رسوب انباشته‌شده در مخزن این سد برای یک دوره‌ی ۶۰ ساله، بر اساس تابع توزیع یانگ و محاسبه‌شده توسط مدل HEC-6 حدود ۶/۹۱ میلیون مترمکعب به‌دست آمد. بر این اساس سالانه حدود ۱۱۵۱۶۷ مترمکعب از حجم مخزن سد توسط رسوب ته‌نشین‌شده و پر خواهد شد. با توجه به وزن حجمی ۱/۱۵ تن بر مترمکعب رسوبات، سالانه ۱۳۲۴۴۲ تن رسوب در مخزن ترسیب می‌شود. عماد محمد و همکاران (۳۴) رسوب‌گذاری مخزن سد موصل (عراق) را با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS نسخه ۴.۱ برای جریان رودخانه اصلی و رسوبات مخزن سد موصل بررسی کردند. برای شبیه‌سازی جریان، مدل را با ضریب همبستگی R^2=۰/۷۸ و روندیابی رسوب در سطح اولیه بستر را با R^2=۰/۹۸ و میانگین و انحراف معیار مطلق ۰/۹۵ واسنجی و از معادله ایکرز و وایت برای روندیابی رسوب‌گذاری استفاده کردند. حجم کل بار رسوب انباشته‌شده در مخزن km^3 ۱/۱۳ برآورد شد، که این مقدار بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده بود. به‌علاوه، این مدل نشان داد که عمده حجم رسوبات (حدود ۸۷/۷ درصد) در طول پنج سال اول بعد از بهره‌برداری سد انباشته‌شده است.

دیسارز و همکاران (۱۴) از مدل HEC-RAS به شبیه سازی تأثیر بلندمدت رسوب‌گذاری و فرسایش بر روی پروفیل سطح آب در رودخانه نر (Ner River) واقع در کشور لهستان پرداختند. آن‌ها از روابط مییر- پیتر و مولر و انگلوند-هانسن برای محاسبه میزان انتقال رسوب استفاده کردند. بر اساس نتاج به‌دست‌آمده آن‌ها.اظهار داشتند مدل مذکور می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی تأثیرات بلندمدت رسوب و فرسایش بر روی پروفیل‌های سطح آب ارائه نماید.

جوشی و همکاران (۲۹) مدل ریاضی HEC-RAS را برای برآورد انتقال بار رسوب در رودخانه ماومی (Maumee) واقع در اوهایو (Ohio) که از این رودخانه برای کشتیرانی استفاده می‌شود، به‌کار بردند. برای انجام صحت‌سنجی مدل آنها از ضریب زبری مانینگ و توابع مختلف انتقال رسوب استفاده کردند. نتایج مدل در پیش‌بینی تغییرات بستر و همچنین قسمت‌هایی از رودخانه نشان داد که مدل توانایی خوبی در مدل‌سازی رسوب دارد.

اقبال و همکاران (۲۷) از مدل ریاضی HEC-RAS برای شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در سد مخزنی Gulpur Hpp که بر رودخانه پونه واقع در پاکستان ساخته شده است، استفاده کردند. آنها در مطالعه خود با در نظرگرفتن سناریوهای مختلف مدیریت رسوب‌گذاری مانند استفاده از روش رسوب‌شویی به شبیه‌سازی جریان و رسوب پرداختند.

همچنین از مدل ریاضی HEC-RAS توسط سایر محققین برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب استفاده شده است که می‌توان برای مثال به برخی از آن‌ها مانند دیویکار و همکاران (۱۳)، جباری و همکاران (۲۸)، روشان و همکاران (۳۵)، اسدی و همکاران (۵) اشاره نمود.

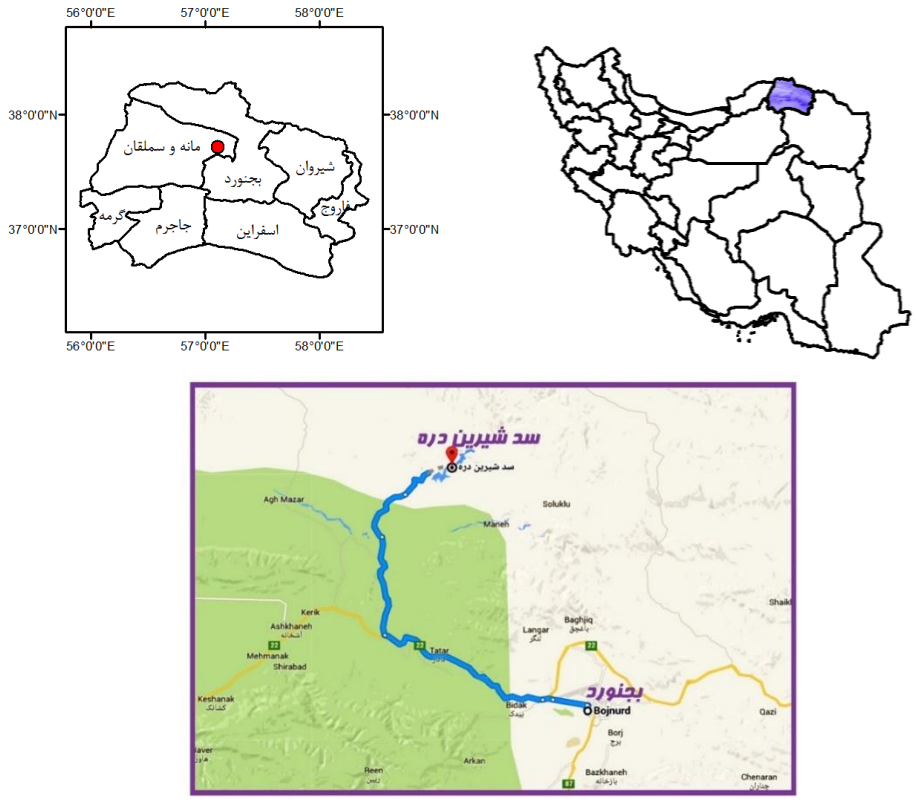
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

بررسی انجام شده نشان می‌دهد تا به حال هیچ‌گونه تحقیقی در ارتباط با بررسی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد شیرین دره با استفاده مدل‌های عددی انجام نشده است. لذا با توجه به اهمیت این سد منطقه به مدل‌سازی آن با استفاده از مدل HEC-RAS4.1 پرداخته شده است که نتایج به‌دست در این پژوهش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی شیرین‌دره در استان خراسان شمالی به فاصله ۶۵ کیلومتری شمال غربی شهر بجنورد قرار دارد و یکی از سدهای مهم استان است که بر روی رودخانه شیرین‌دره از سرشاخه‌های رودخانه اترک است، احداث گردید. محل سد در محدوده جغرافیائی ″۲ و ′۴۳ و °۳۷ عرض شمالی و ″۱۶و ′۷ و °۵۷ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1. The location of study area

سد مخزنی شیرین‌دره باهدف کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی، آب شرب شهرستان بجنورد، صنعت، احداث و در فروردین‌ماه سال ۱۳۸۴ بهره‌برداری شد. مشخصات فنی سد شیرین‌دره به شرح جدول ۱ است:

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

جدول ۱- مشخصات سد شیرین‌دره (۱۰)

Table 1. The The Shirin-Dareh Dam characteristics

پارامتر	مشخصات
نوع سد	خاکی با هسته رسی
ارتفاع سد از روی بستر رودخانه	۶۳ متر
طول تاج	۴۸۳ متر
تراز تاج از سطح دریا	۸۰۰/۵ متر
حجم بدنه سد	۳/۲۵ میلیون مترمکعب
تراز کف دریچه‌های سرریز	۷۸۷ متر
تراز نرمال	۷۹۵/۵ متر
ظرفیت اولیه مخزن در تراز نرمال	۹۱/۵ میلیون مترمکعب
عمر مفید مخزن (برآورد شده زمان طراحی)	۱۵۰ سال
حجم آب تنظیم‌شده سالانه	۶۵/۸ میلیون مترمکعب
دبی سیلاب طراحی	۱۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه
حداکثر دبی طراحی تخلیه‌کننده تحتانی	۲۶/۷ مترمکعب بر ثانیه
نوع و ابعاد سیستم انحراف	تونل به قطر داخلی ۶ متر و طول ۳۱۰ متر
ظرفیت سیستم انحراف	۳۰۳ مترمکعب بر ثانیه
نوع سرریز	اوجی دریچه دار از نوع " شوت با آستانه اوجی و دریچه دار" شامل چهار دریچه قطاعی

مدل ریاضی HEC-RAS

مدل ریاضی HEC-RAS توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی آمریکا (HEC) به‌منظور کمک به مهندسی هیدرولیک در تحلیل جریان کانال و تعیین پهنه سیلاب‌گیر، سیستم تحلیل رودخانه (RAS) توسعه داده شد. بسته‌های نرم‌افزاری اولیه HEC شامل HEC-1 (هیدرولوژی حوضه) HEC-2 (هیدرولیک رودخانه) HEC-3 (آنالیز مخزن برای نگهداری) و HEC-4 (برنامه آماری تولید جریان) بودند. مدل HEC-RAS یک برنامه کامپیوتری است که هیدرولیک جریان آب در رودخانه‌های طبیعی و کانال‌های دیگر را مدل می‌کند، این برنامه به‌صورت یک‌بعدی و دوبعدی موجود است. سیستم مدل‌سازی HEC-RAS به‌عنوان بخشی از نسل بعدی (NEXGEN) نرم‌افزار مهندسی هیدرولوژی مرکز مهندسی هیدرولوژی توسعه یافت. پروژه "NEXGEN" چندین جنبه مهندسی هیدرولوژی، شامل آنالیز بارش–رواناب (HEC-HMS)، هیدرولیک رودخانه (HEC-RAS)، شبیه‌سازی سیستم مخزن (HEC-RESSIM)، آنالیز خسارت سیلاب (HEC-FDA و HEC-FIA) و پیش‌بینی بلادرنگ رودخانه برای عملکردهای مخزن (CWMS) را شامل می‌شود. سیستم HEC-RAS نسخه بتا ۴.۱.۰ شامل چهار جزء آنالیز رودخانه است: ۱) محاسبه پروفیل سطح آب در جریان دائمی ۲) شبیه‌سازی جریان غیردائمی ۳) محاسبات انتقال رسوب مرز متحرک ۴) آنالیز کیفی آب. رکن اصلی مدل این است که تمام چهار جزء از داده ژئومتریک معمول و روش‌های محاسباتی هیدرولیکی یکسان استفاده می‌کنند. علاوه بر چهار جزء آنالیز رودخانه، سیستم شامل چند ویژگی طراحی هیدرولیکی است که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و پروفیل‌های اساسی سطح آب محاسبه شوند (۷، ۱۱). برنامه HEC-RAS4.1 محاسبات پروفیل سطح آب در جریان ماندگار، غیرماندگار، انتقال رسوب، محاسبات بستر متحرک و آنالیز کیفیت آب را پشتیبانی می‌کند. این برنامه برای اجرای محاسبات هیدرولیکی یک‌بعدی برای یک شبکه کامل از کانال‌های طبیعی و مصنوعی طراحی‌شده است.

مدل HEC-RAS سطح آب، دبی، سرعت متوسط، شیب انرژی هر یک از مقطع عرضی را محاسبه می‌کند. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت جریان غیردائمی یک بعدی توسط معادلات زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q_l \quad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial \left(\beta Q^2/A\right)}{\partial x}+g.A.\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQ|Q|}{C^2AR}=0 \quad (۲)$$

که در آن Q جریان، A سطح مقطع جریان، X فاصله در طول کانال، t زمان، q_L دبی جانبی جریان ورودی در واحد طول کانال، V سرعت، Z ارتفاع آب، S_f شیب اصطکاک، g شتاب ثقل است.

مدل‌سازی رسوب در HEC-RAS

مدل‌سازی انتقال رسوب مشخصا کار دشواری است. داده‌های که برای پیش‌بینی تغییر بستر موردنیاز می‌باشد، اساسا نامطمئن هستند و تئوری به‌کاررفته تجربی بوده و به یک آرایش وسیع از متغیرهای فیزیکی حساس است. با در دست‌داشتن داده‌های خوب، می‌توان مدل رسوب واسنجی‌شده را به‌صورت منطقه‌ای به‌کار برد. HEC-RAS دارای قالبی است که به کمک آن مدل‌سازی انتقال رسوب و مرزهای متحرک اجرا می‌شود. قابلیت‌های حاضر HEC-RAS در زمینه رسوب بر اساس هیدرولیک جریان شبه‌غیرماندگار استوار است. محاسبه پروفیل‌های سطح آب از یک مقطع عرضی به مقطع عرضی بعدی با حل معادله انرژی با یک‌روند متناوب به‌نام روش گام‌به‌گام انجام می‌شود. معادله انرژی به‌صورت زیر نوشته می‌شود (۴۲،۱۱):

$$Y_2+Z_2+\frac{\alpha_2V_2^2}{2g}=Y_1+Z_1+\frac{\alpha_1V_1^2}{2g}+h_e \quad (۳)$$

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

که در آن Y_1 و Y_2 عمق آب در مقاطع عرضی، V_1 و V_2 سرعت متوسط(سطح جریان کل/دبی کل)، Z_1 و Z_2 فاصله از تراز مبنا، α_1 و α_2 ضرایب توزیع سرعت، g شتاب ثقل، h_e افت هد انرژی است. در HEC-RAS افت هد انرژی (h_e) بین دو سطح مقطع، ترکیبی از افت‌های اصطکاکی و افت‌های ناشی از تنگ‌شدگی و بازشدگی است. معادله محاسبه افت انرژی به صورت زیر است:

$$h_e = L\bar{S}_f + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right| \quad (۴)$$

در این معادله: L طول متوسط حوضه (که در نرم‌افزار مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود، $\bar{S_f}$ شیب اصطکاکی بین دو مقطع، C ضریب افت ناشی از تنگ‌شدگی یا بازشدگی است.

$$L = \frac{L_{lob}\overline{Q_{ob}} + L_{ch}\overline{Q_{ch}} + L_{rob}\overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{rob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{lob}}} \quad (۵)$$

متوسط حسابی جریان‌های بین مقاطع به‌ترتیب برای ساحل چپ، کانال اصلی، ساحل راست $\overline{Q_{rob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{lob}}$

به‌همین ترتیب برنامه می‌تواند متوسط هد انرژی جنبشی را محاسبه کند. مدل HEC-RAS برای یک تراز سطح آب داده‌شده، انرژی متوسط را با محاسبه انرژی جریان از سه زیر بخش مقطع عرضی (ساحل چپ، کانال اصلی، ساحل راست) به‌دست می‌آورد (۱۱).

ارزیابی افت ناشی از تنگ‌شدگی و بازشدگی

این افت در مدل HEC-RAS با معادله (۴) بدست می‌آید:

$$h_{ce} = C\left|\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right| \quad (۶)$$

که در آن c ضریب تنگ‌شدگی یا بازشدگی است، برنامه فرض می‌کند که یک تنگ‌شدگی زمانی رخ می‌دهد که هد سرعت پایین‌دست است، برنامه فرض می‌کند در جریان بازشدگی رخ‌داده است(۱۱).

ظرفیت انتقال رسوب

رسوب انتقال‌یافته ترکیبی از بار بستر، بار معلق و بار شسته شده است. آغاز حرکت ذرات بستر به خصوصیات هیدرولیکی منطقه مجاور آن بستگی دارد. بنابراین، خصوصیات جریان در آن منطقه از اهمیت اولیه برخوردار است. استفاده از تنش برشی مرسوم‌تری برای تعیین نقطه آغاز حرکت است، تنش برشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_b = \gamma RS \quad (۷)$$

در معادله فوق τ_b تنش برشی بستر، γ وزن واحد حجم آب، R شعاع هیدرولیکی و S شیب‌خط انرژی است. فاکتور دیگری که نقش مهمی در شروع و تداوم تعلیق ذرات دارد، نوسانات آشفته در تراز بستر است. اندازه‌گیری نوسانات آشفته در نزدیکی بستر می‌تواند با سرعت برشی جایگزین شود:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad \text{یا} \quad u_* = \sqrt{gRS} \quad (۸)$$

که u_* سرعت برشی بستر است، علاوه بر این، اندازه، شکل، خصوصیات زبری و سرعت سقوط ذرات نماینده در آبرو اثر مهمی بر توانایی آن‌ها برای به حرکت درآمدن، معلق‌ماندن و منتقل‌شدن دارد. اندازه ذره عموماً با فطر متوسط ذره (d_m) جایگزین می‌شود(۴۶).

توابع انتقال رسوب

برای اجرای بخش رسوب، در مدل ریاضی HEC-RAS، امکان استفاده از ۷ تابع انتقال رسوب شامل لارسن (۳۱)، انگلوند- هانسن (۲۱)، ایکرز- وایت (۲)، توفالتی (۳۹)، یانگ (۴۵)، میر پیتر- مولر (۳۳)، ویلکاک (۴۴) وجود دارد که می‌توان برای شبیه‌سازی رسوب از آن‌ها استفاده کرد. برای مثال روش توسط لارسن (۳۱) که برای تخمین بار کل رسوب ارائه گردید، این روش تابعی از شرایط جریان و دبی رسوب است. رابطه لارسن توسط کمیته اجرائی ASCE در سال ۱۹۷۱ ازلحاظ ابعادی به‌صورت زیر بیان گردید:

$$C_m = 0.01\gamma \sum p_i \left(\frac{d_i}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right) F\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right) \quad (۹)$$

در رابطه فوق C_m غلظت کل دبی رسوب برحسب وزن در واحد حجم، p_i درصد مصالح هرکدام از طبقات منحنی دانه‌بندی، ω_i سرعت سقوط ذرات با اندازه متوسط d_i (سرعت سقوط متناسب با ذرات هرکدام از طبقات منحنی دانه‌بندی)، u_* سرعت برشی که از رابطه $(gDS)^{0.5}$ محاسبه می‌شود و τ' تنش برشی مربوط به مقاومت ذرات و τ_{ci} تنش برشی بحرانی که از نمودار شیلدز قابل‌محاسبه است و D عمق مؤثر جریان. لارسن رابطه زیر را برای تنش برشی ناشی از مقاومت ذرات ارائه نمود:

$$\tau' = \frac{\rho V^2}{58}\left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1/3} \quad (۱۰)$$

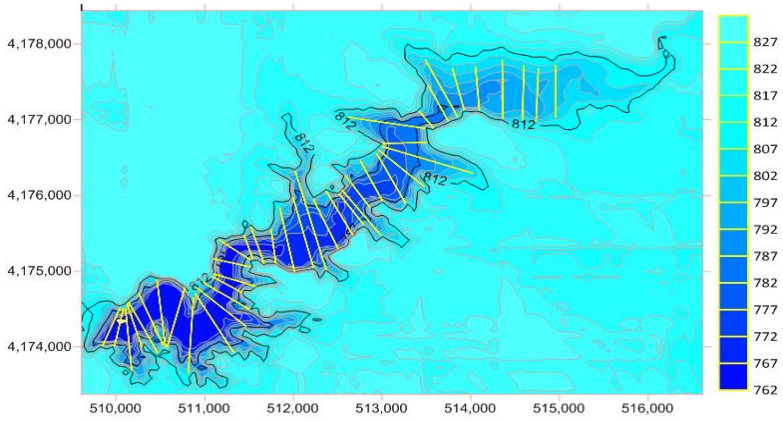
در رابطه فوق، پارامتر $\left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right)$ در تعیین بار بستر دارای اهمیت بوده و پارامتر $\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right)$ مربوط به بار معلق است. رابطه تابعی $F\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right)$ بر اساس داده‌های فلوم آزمایشگاهی بدست می‌آید. همچنین لازم به‌ذکر است که قطر میانه ذرات مورداستفاده در این روش بین ۰/۰۱۱ تا ۲۹ میلی‌متر است.

معرفی داده‌های ورودی به مدل

در مطالعه مخزن سد شیرین‌دره با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS، داده‌های فایل ورودی در سه بخش ژئومتری، هیدرولوژی و رسوب به مدل معرفی گردید که برای داده‌های ژئومتری از نقشه‌ی توپوگرافی مخزن سد با مقیاس ۱/۵۰۰۰، حاصل از عملیات هیدروگرافی مخزن سد در سال ۱۳۹۱ استفاده شد. داده‌های هیدرولوژی شامل دبی ورودی روزانه به مخزن و تغییرات تراز سطح آب سالانه مخزن در فاصله زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ و درجه حرارت آب است و داده‌های رسوب شامل دبی رسوب و دبی آب ورودی به مخزن، دانه‌بندی رسوبات بستر و درصد رسوبات معلق ورودی برای کلاس‌بندی‌های تعیین‌شده ذرات است. برای معرفی هندسه مخزن به‌طول تقریبی ۷۵۰۰متر از ۴۱ مقطع به فواصل ۶۰ تا ۳۰۰ متر متغیر استفاده شد. جانمایی مقاطع عرضی مخزن سد

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

شرین دره که به مدل HEC-RAS معرفی شد در شکل ۲ برحسب سیستم تصویر جهانی (UTM) نشان داده شده است.



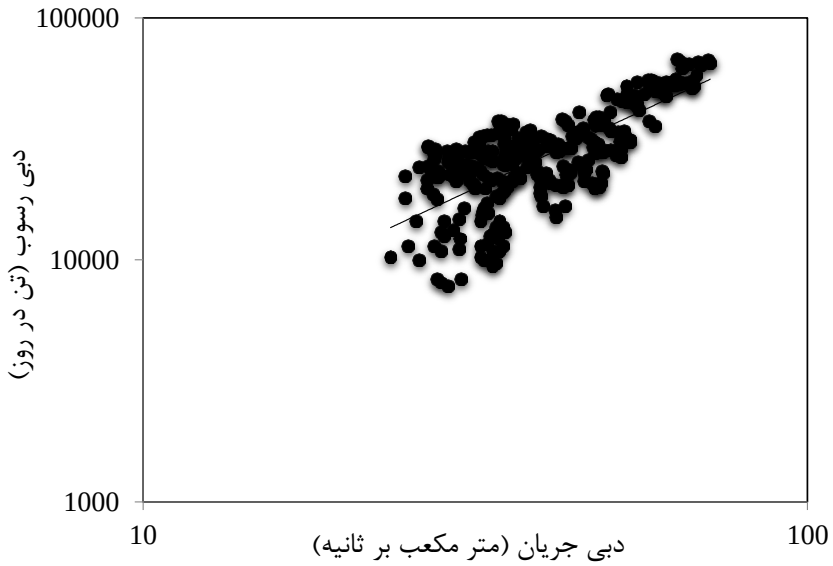
شکل ۲- محل مقاطع عرضی مخزن سد شیرین دره برحسب سیستم تصویر جهانی (UTM)
Figure 2. The location of transverse sections of the Shirin-Dare reservoir in the UTM coordinate system

برای تعیین رابطه دبی آب و دبی رسوبات ورودی به مخزن از آمار و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری قلعه بر واقع در بالادست سد شیرین‌دره استفاده شد (شکل ۳) دبی رسوب به‌صورت تابعی از دبی جریان با توجه به داده‌های آماری موجود به شرح زیر استخراج و به مدل معرفی شد.

$$Q_s=227.76Q^{1.3017} \quad (۱۱)$$

$R^2=0.6327$ P-value=4.72 E-9

در این معادله R^2 ضریب تبیین، Q_S دبی رسوب (تن در روز) و Q دبی آب (مترمکعب بر ثانیه) است. با توجه به اینکه آمار دبی و دبی رسوب ایستگاه قلعه بر به‌عنوان مرز بالادست بازه موردمطالعه، محدود به سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ است، آمار و اطلاعات مربوطه از همبستگی نسبتاً قابل‌قبولی برخوردار است.



شکل ۳- رابطه بین دبی و دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری قلعه بر
Figure 3. Relation between discharge and sediment discharge at the Qaleh hydrometric station

شرایط مرزی

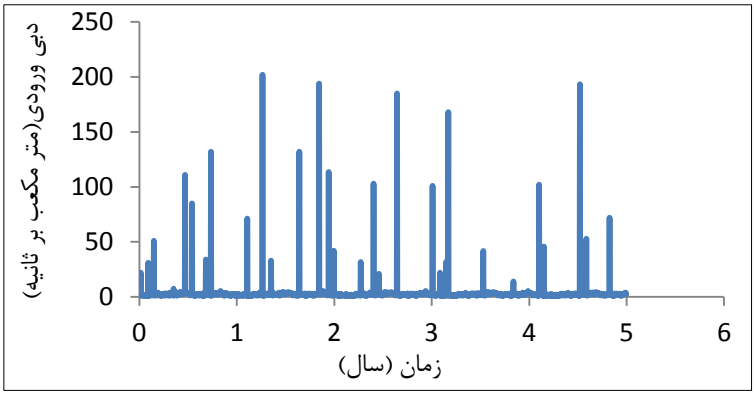
برای اجرای مدل ریاضی HEC-RAS، لازم است شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست به مدل معرفی شود. در این مدل برای شرایط مرزی بالادست، امکان معرفی دبی ورودی به مخزن سد به‌صورت سری زمانی جریان وجود دارد. همچنین برای شرط مرزی پایین‌دست امکان معرفی سه شرط عمق نرمال، دبی- اشل و سطح تراز آب مخزن به‌صورت سری زمانی وجود دارد که در این تحقیق از تراز زمانی سطح

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

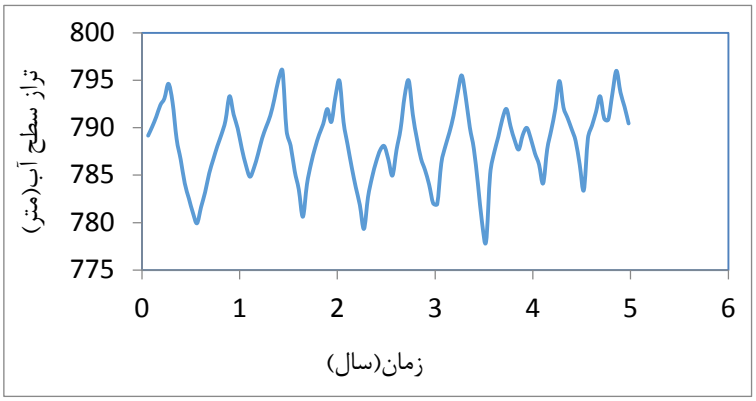
آب، به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست استفاده شد. شکل‌های ۴ و ۵ داده‌های سری زمانی مربوط به دبی ورودی به مخزن سد و تغییرات زمانی سطح تراز آب مخزن سد شیرین‌دره را نشان می‌دهد که از آن‌ها به‌ترتیب برای معرفی شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست در این مطالعه استفاده شد. همچنین دانه‌بندی مواد بستر با استفاده از منحنی دانه‌بندی بستر و در کلاس مختلف به مدل معرفی گرید.

واسنجی مدل

برای واسنجی مدل مذکور از نقشه‌های عملیات هیدروگرافی انجام‌شده در مخزن سد در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ استفاده شد. همچنین به‌طورکلی ظرفیت حمل رسوب به‌شدت تحت تأثیر هیدرولیک جریان است لذا واسنجی‌کردن نیم‌رخ سطح آب بسیار مهم است. برای واسنجی هیدرولیک جریان در مدل از داده‌های دبی- اشل در ایستگاه هیدرومتری بالادست سد استفاده شده است. بدین‌ترتیب که با داشتن تراز سطح آب به ازای دبی‌های مختلف که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقدار ضریب زبری مانینگ در مدل به‌نحوی انتخاب شد تا به ازای دبی معلوم ورودی، تراز سطح آب محاسبه‌شده توسط مدل با مقدار واقعی هم‌خوانی داشته باشد که در این تحقیق جهت واسنجی هیدرولیکی، مدل به ازای دبی ورودی مشخص و تراز سطح آب معلوم با ضریب زبری‌های متفاوت اجرا شد. همچنین در تحقیق حاضر به‌لحاظ تغییرات طبیعی مقاطع مخزن سد، مقادیر ضرایب همگرایی (c_c) و واگرایی (c_e) مقطع که برای شرایط مختلف به وسیله انجمن مهندسین ارتش آمریکا پیشنهاد شده است، در مطالعه حاضر ضرایب همگرایی و واگرایی به‌ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۴- سری زمانی دبی روزانه ورودی به سد شیرین‌دره برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶
Figure 5. Daily discharge input to the Shirin-Dareh reservoir for the time period from 2012 to 2017

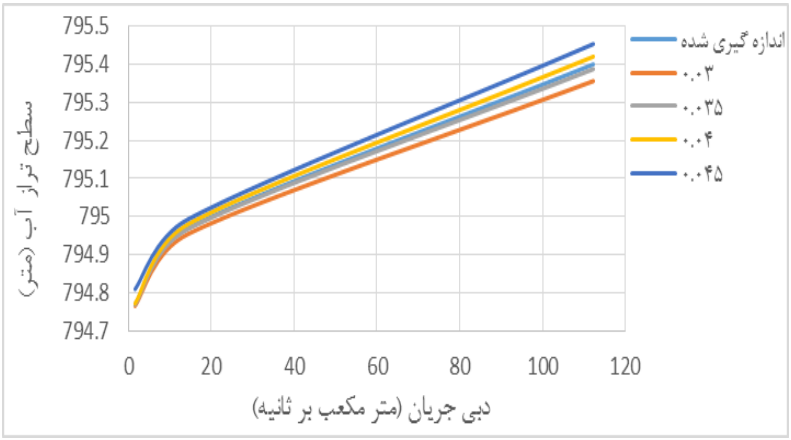


شکل ۵- سطح تراز آب مخزن سد شیرین‌دره برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶
Figure 4. Water surface level of the Shirin-Dareh reservoir for the time period from 2012 to 2017

نتایج و بحث

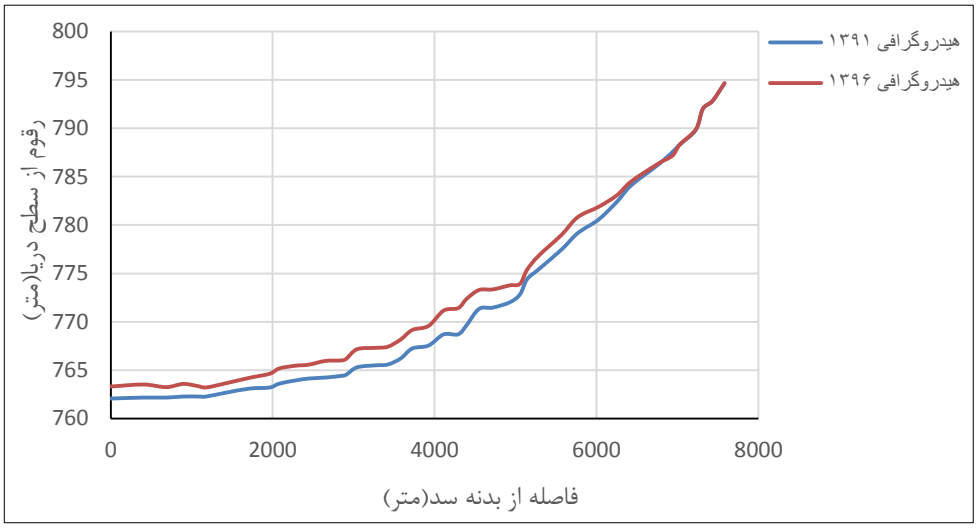
به‌منظور واسنجی هیدرولیک جریان، ضریب زبری‌های مختلف (۰/۳۰۰، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۰ و ۰/۰۴۵) به مدل معرفی شد. شکل ۶ منحنی-سطح تراز آب (اشل) به‌دست‌آمده از اجرای مدل با مقادیر ضریب زبری‌های مختلف برای ساحل چپ، ساحل راست و کانال اصلی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]



شکل ۶– رابطه دبی– اشل حاصل از اجرای مدل با ضریب زبری‌های مختلف
Figure 6. Relation between discharge and water elevation from the implementation model with different roughness coefficients

همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای مدل با ضریب زبری ۰/۰۳۵ به واقعیت نزدیک می‌باشد، که در این تحقیق جهت واسنجی‌کردن هیدرولیکی مدل مقدار ضریب زبری ۰/۰۳۵ انتخاب گردیده است. واسنجی‌کردن رسوب مدل شامل مراحل شناخت پارامترها، تعیین حساسیت مدل نسبت به پارامترها و در نهایت واسنجی‌کردن مدل می‌باشد. در این مدل عوامل تاثیرگذار عبارتنداز: نوع معادله انتقال رسوب، مدت زمان گام محاسباتی، معادله سرعت سقوط ذرات و انتخاب روش مرتب‌سازی مصالح بستر، حساسیت فرایند نسبت به تغییر این پارامترها از طریق آزمون و خطا بررسی شد و جهت واسنجی‌کردن رسوب مدل برای ارزیابی روند رسوب‌گذاری مخزن سد شیرین‌دره از نیم‌رخ طولی رسوب‌گذاری بدست آمده از عملیات هیدروگرافی مربوط سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ استفاده گردید. شکل ۷– نیم‌رخ طولی مخزن سد حاصل از عملیات هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۷– نیم‌رخ طولی مخزن سد در هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶
Figure 7. Longitudinal profile of the Shirin-Dare reservoir at 2012 and 2017

همچنین برای انتخاب تابع انتقال رسوب مناسب، ۷ مدل شامل لارسن(۳۱)، انگلوند– هانسن (۲۱)، ایکرز– وایت (۲)، توفالتی (۳۹)، یانگ(۴۵)، میر پیتر– مولر(۳۳)، ویلکاک (۴۴) انتخاب و باهم مقایسه شدند (جدول ۲). همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از معادلات مذکور و مقایسه با داده‌های هیدروگرافی اندزه‌گیری‌شده نشان می‌دهد بیشترین درصد خطای مربوط به معادلات انتقال رسوب میر پیتر– مولر (۱۸/۲۸ درصد) و انگلوند هانسن (۱۷/۷۸ درصد) و کمترین درصد خطا نیز مربوط به معادله لارسن بوده است. لذا معادله لارسن با میزان خطای ۳/۰۴۷ درصد به‌لحاظ پایین‌بودن مقدار

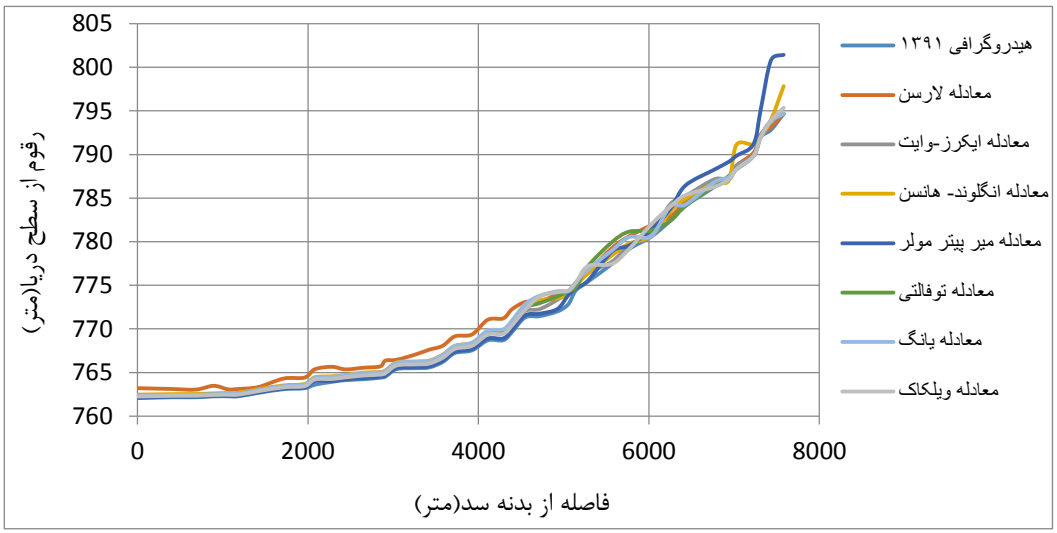
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

خطا و هم‌پوشانی خوب نتایج حاصل از اجرای مدل با این مقدار اندازه‌گیری‌شده قابل‌قبول است. در مجموع خطای به‌دست‌آمده از اجرای معادلات انتقال رسوب به‌کاررفته نشان می‌دهد، که خطای آن‌ها کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد که در محاسبات رسوب نسبتا قابل‌قبول می‌باشد. علت اصلی خطای ایجادشده در معادلات انتقال رسوب نهفته است، به‌دلیل آنکه تمام معادلات انتقال رسوب دارای مبانی تجربی هستند و هر یک دارای محدودیت‌هایی بوده و برای رسوبات و شرایط خاصی توسعه داده شده‌اند. البته ممکن است علت دیگری که به آن اشاره کرد ممکن است داده‌های اندازه‌گیری‌های انجام‌شده دبی و دبی رسوب بخصوص در زمان سیلاب به‌دقت اندازه‌گیری نشده باشد که نهایتاً اطلاعات ورودی این مدل‌ها را همراه با خطا می‌کند که این امر منجر به خطا در نتایج مدل می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به ازای معادله‌های مختلف انتقال رسوب در شکل ۸ نشان داده‌شده است.

جدول ۲- میزان حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن سد بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل توسط معادلات مختلف انتقال رسوب برای مدت‌زمان ۵ سال

Table 2. The deposited volume of sediment in the reservoir based on the results of model implementation by different sediment transport equations for 5 years

نوع معادله انتقال رسوب	حجم رسوبات ته نشین شده (میلیون متر مکعب)	درصد خطا
هیدروگرافی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶	۳/۶۱	-
لارسن	۳/۵۰۷	۳/۰۵
انگلوند- هانسن	۲/۹۶۸	۱۷/۷۸
ایکرز- وایت	۳/۰۵	۱۵/۵۱
توفالتی	۳/۱	۱۲/۱۴
یانگ	۳/۲	۱۱/۳۵
میر پیتر- مولر	۲/۹۵	۱۸/۲۸
ویلکاک	۳/۱۵۵	۱۲/۶



شکل ۸- نیمرخ طولی رسوب‌گذاری در بستر مخزن سد با اجرای مدل برای مدت‌زمان ۵ سال با توابع مختلف انتقال رسوب

Figure 8. The longitudinal profile of sedimentation in the reservoir with the implementation of the model for the period of 5 years with different sediment transport equations

برای انتخاب معادله سرعت سقوط ذرات، مدل با معادلات سرعت سقوط ذرات فان راین (۴۱)، توفالتی (۳۹)، روبی (۳۶) و گزارش ۱۲(۲۶) اجرا گردید که نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات روبی نتایج قابل‌قبولی داشته و نیمرخ حاصل از مدل و هیدروگرافی از هم‌پوشانی خوبی برخوردار می باشند، در نتیجه این معادله به عنوان معادله نهایی برای ارزیابی روند رسوب‌گذاری مخزن سد شیرین دره انتخاب گردیده است. همچنین نتایج حاصل از اجرای مدل برای گام زمانی محاسباتی مختلف نشان داده گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت از نتایج قابل قبولی برخوردار است. علاوه بر آن اجرای مدل با استفاده از روش مرتب‌سازی اکسنر۵ (۳۶)[1] در مقایسه با روش لایه فعال از نتایج بهتری برخوردار بوده و با نتایج حاصل از هیدروگرافی ۱۳۹۶ تطابق خوبی داشته است. در مجموع برای مشخص‌شدن حساسیت مدل ریاضی HEC-RAS نسبت به پارامترهای موثر در واسنجی‌کردن

1- Exner

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

مدل، مدل با ضریب زبری مختلف (۰/۰۳–۰/۰۳۵–۰/۰۴–۰/۰۴۵)، معادلات مختلف انتقال رسوب (لارسن، انگلوند–هانسن، ایکرز– وایت، توفالتی، یانگ، میر پیتر– مولر، ویلکاک) ، معادلات سرعت سقوط ذرات (فان راین، توفالتی، روبی و گزارش ۱۲)، دو روش مرتب‌سازی مصالح بستر (روش اکسنر و روش لایه فعال)، درجه حرارت مختلف (۱۵ تا ۹ درجه‌سانتی‌گراد) و گام مختلف زمانی محاسباتی (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۱۰ ساعت) اجرا گردید. با مقایسه بین نتایج حاصل از اجرای مدل با معرفی هریک از پارامترهای موثر ذکر شده و داده‌های حاصل از انجام هیدروگرافی مخزن می‌توان اظهار داشت که حساسیت مدل نسبت به هر یک از پارامترهای موثر در واسنجی‌کردن مدل چگونه است. جدول ۳ میزان حساسیت هریک از پارامترهای موثر در واسنجی‌کردن مدل را نشان می‌دهد.

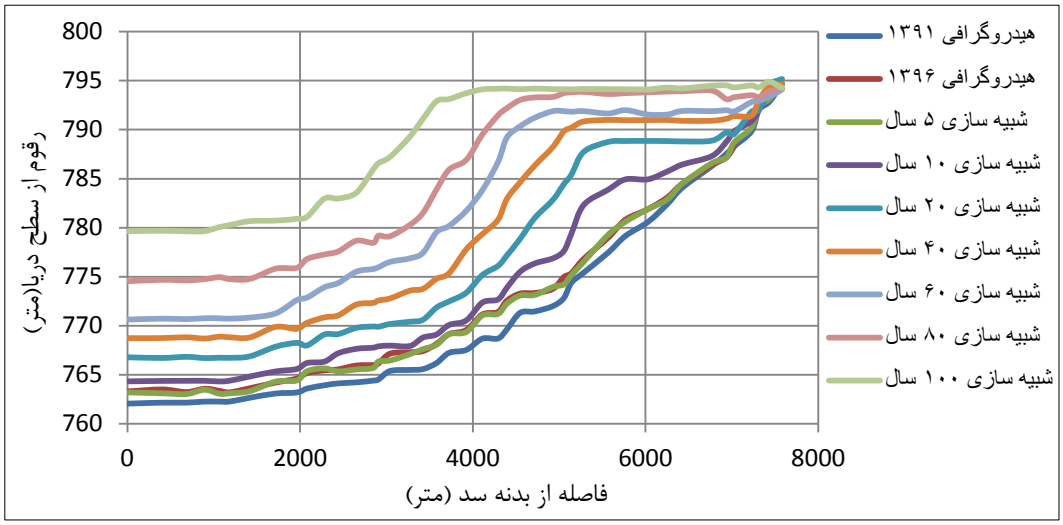
جدول ۳– میزان حساسیت هریک از پارامترهای موثر در واسنجی کردن مدل

Table 3. The sensitivity amount of the effective parameters in the calibration of the model

پارامترهای مدل	بازه‌های اجرا شده	میزان حساسیت
ضریب زبری	۰/۰۳–۰/۰۳۵–۰/۰۴–۰/۰۴۵	کم
معادله انتقال رسوب	تمام معادلات	زیاد
معادله سرعت سقوط ذرات	تمام معادلات	زیاد
روش مرتب‌سازی مصالح بستر	Exner5 و لایه فعال	زیاد
درجه حرارت آب	۱۵ تا ۱۹ (درجه سانتی گراد)	کم
گام زمانی محاسباتی	۱،۲،۳،۴،۵، ۱۰ (ساعت)	زیاد

پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری

بعد از مراحل واسنجی‌کردن مدل از لحاظ هیدرولیکی و رسوب، روند رسوب‌گذاری مخزن سد شیرین‌دره (انتخاب معادلات مناسب، معادله انتقال رسوب لارسن (۳۱)، معادله سرعت سقوط ذرات روبی (۳۶) و روش مرتب‌سازی اکسنر (۱۱) و گام زمانی ۱ ساعت برای بازه‌های زمانی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال بررسی گردید. شکل ۹ روند تغییرات پروفیل طولی مخزن سد شیرین‌دره با اجرای مدل برای بازه‌ی زمانی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال را نشان می‌دهد.



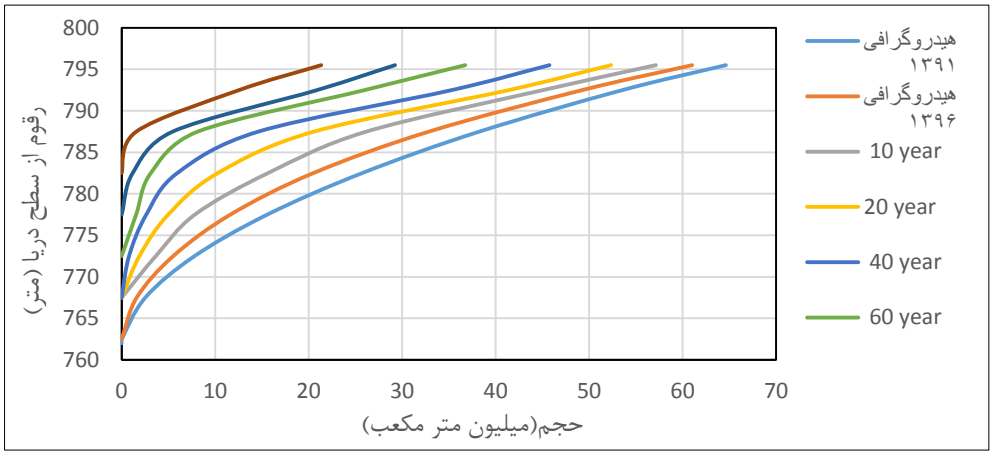
شکل ۹– تغییرات پروفیل طولی مخزن سد با اجرای مدل برای مدت زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال

Figure 9. Longitudinal profile changes of the reservoir with model implementation for 5, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 years

همان‌طور که نتایج شکل مذکور نشان می‌دهد، نحوه روند رسوب‌گذاری در مخزن سد شیرین‌دره با روند افزایشی همراه بوده است، به‌طوری‌که در اجرای مدل برای مدت‌زمان شبیه‌سازی ۶۰ سال، ۵۴/۷۵ میلیون مترمکعب رسوب در مخزن سد انباشته شده است، همچنین در شبیه‌سازی ۱۰۰ سال، ۷۰/۱۵ میلیون مترمکعب رسوب در داخل مخزن ته‌نشین شده است که حدود ۸۰ درصد ظرفیت مفید مخزن سد را شامل می‌شود به‌عبارتی متوسط کاهش سالانه حجم مخزن حدود ۰/۸ درصد می‌باشد که نتیجه به‌دست‌آمده در تطابق با نتایج سایر محققین دارد که بیان داشتند در ایران میزان کاهش حجم مخازن سدها در اثر رسوب‌گذاری به‌طور متوسط بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد (۴۰) و ۰/۶۹ درصد (۱۹) می‌باشد. با توجه به آمار منتشرشده توسط شرکت توسعه منابع ایران، میزان کل حجم مخزن سدهای کشور که در حال

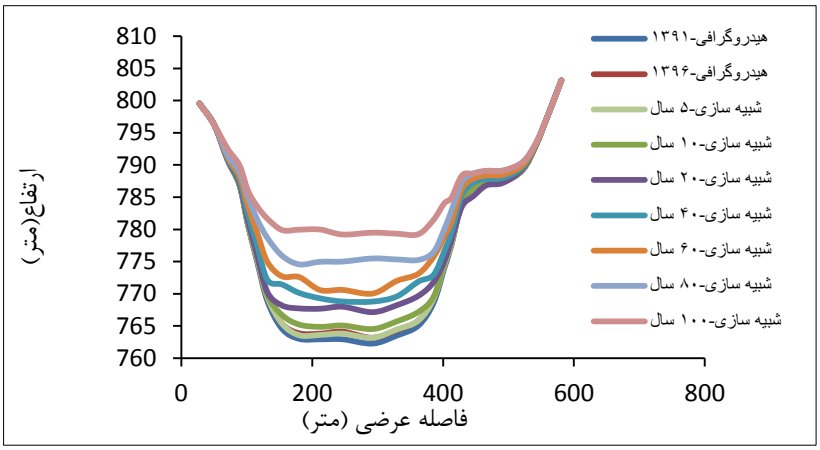
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

بهره‌برداری می‌باشند برابر با ۴۸,۴۵۴ میلیون مترمکعب می‌باشد که با در نظرگرفتن میزان رسوب‌گذاری ذکرشده (۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد) به‌طور تقریبی معادل ۲۴۲ تا ۳۶۳ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین آتکینسون (۶) حجم از دست‌رفتن مخازن سدها به‌علت رسوب‌گذاری را بین ۰/۵ تا یک درصد از مجموع حجم مخازن دنیا گزارش کرد. شکل۱۰ منحنی حجم- ارتفاع مخزن سد محاسبه‌شده را با استفاده از نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن و اجرای مدل (سطح تراز بستر پس از رسوب‌گذاری) برای مدت زمان‌های آتی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و۱۰۰ سال را نشان می‌دهد.



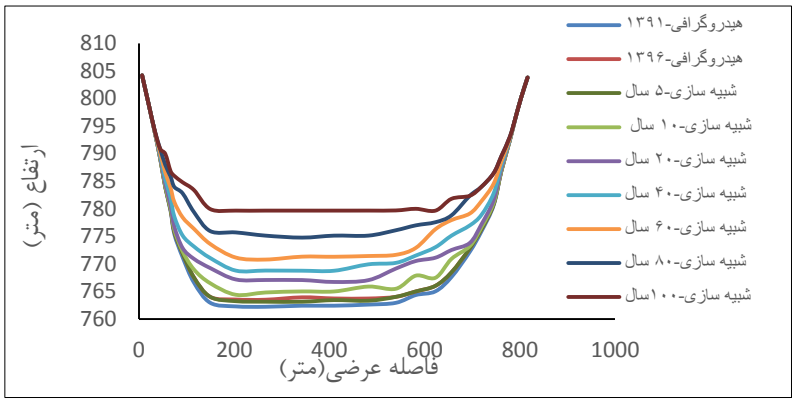
شکل ۱۰- منحنی‌های حجم– ارتفاع محاسبه‌شده برای دوره‌های زمانی مختلف
Figure 10. Calculated volume / height curves for different time periods

در ادامه چگونگی روند تغییرات تعدادی از مقاطع عرضی مخزن به فواصل مختلف با اجرای مدل برای مدت‌زمان‌های آتی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و۱۰۰ سال در شکل‌های زیر نشان داده‌شده است.



شکل ۱۱-تغییرات مقطع عرضی شماره(۴) به فاصله ۲۸۳ متر از بدنه سد
Figure 11. Changes of transverse section (4) at the distance of 283 m from the dam body

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]



شکل ۱۲- تغییرات مقطع عرضی شماره(۸) به فاصله ۸۹۳ متر از بدنه سد
Figure 12. Changes of transverse section (8) at the distance of 893 m from the dam body

در این مطالعه به بررسی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد شیرین‌دره پرداخته شد. بدین‌منظور از مدل ریاضی HEC-RAS4.1 جهت پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد مذکور استفاده گردید. آمار و اطلاعات مورد نیاز مدل برای ارزیابی روند رسوب‌گذاری از شرکت آب منطقه‌ای شهرستان بجنورد تهیه گردید. با استفاده از داده‌های عملیات هیدروگرافی انجام‌شده در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ در مخزن سد میزان حجم رسوبات ته‌نشین‌شده برای بازه‌ی زمانی ۵ سال در مخزن برابر با ۳/۶۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید. جهت واسنجی‌کردن مدل از پروفیل طولی رسوب‌گذاری بستر مخزن به‌دست‌آمده از عملیات هیدروگرافی استفاده شد. نتایج نشان داد که اجرای مدل با انتخاب معادله انتقال رسوب لارسن، معادله سرعت سقوط ذرات روبی، روش مرتب‌سازی اکسنر ۵ و گام زمانی محاسباتی یک ساعت و با درصد خطای ۳/۰۵ نتایج خوبی را ارائه نموده است. همچنین اجرای مدل برای مدت‌زمان ۱۰۰ سال نشان داد که پس از گذشت ۱۰۰ سال، حجم رسوبات انباشته‌شده در مخزن به حدود ۷۳/۲ میلیون مترمکعب خواهد شد این مقدار تقریباً معادل ۸۰ درصد ظرفیت مفید مخزن است به‌عبارتی متوسط کاهش سالانه حجم مخزن برابر با ۰/۸ درصد می‌باشد. از طرفی حجم باقی‌مانده مخزن سد پس از طی ۱۰۰ سال حدود ۲۱/۳۵ میلیون مترمکعب خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسنده‌گان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از زحمات مهندس حمیدرضا میرزائی و دیگر کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای شهرستان بجنورد، مهندسین مشاور دریا ترسیم و سازه آب پردازان جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها کمال تقدیر و تشکر نمایند.

منابع

1. Aalami, M.T. and M. Montazami Novin. 2010. The study of sediment distribution at Yamchi Ordebil Dam reservoir level using software and methods for reducing the surface and increasing the surface area and comparing the results, 5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (In Presian).
2. Ackers, P. and W.R. White. 1973. Sediment transport: new approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, 99 (HY11): 2040-2060.
3. Anonymous. 2018. Hydrographic Report. Regional Water Company of North Khorasan Province, 230 pp (In Presian)..
4. Ahmadi, M., S.R. Alwankar and M.R. Pirestani. 2010. Study of the amount of sedimentation of Karaj dam reservoir using experimental and numerical model HEC-RAS, 12th Iranian Hydraulic Conference, Urumieh, Iran (In Presian).
5. Akbarzadeh, N., S.H. Qureishi Najafabadi and M.R. Majdzadeh Tabatabaei. 2010. Investigation of sediment content of reservoir of Shahid Abbaspour Dam using experimental methods and HEC-RAS numerical model, National Clean Water Conference, Tehran, Iran (In Presian).
6. Asadi, F.Z., R. Fazloula and A. Emadi. 2017. Investigation of the river bed changes using HEC-RAS4. 0 model case study: Talar River. Journal of Watershed Management Research, 8(15): 25-35.
7. Atkinson, E. 1996. The feasibility of flushing sediment from reservoirs. Project Report. HR Wallingford Ltd. UK. 99 pp.
8. Azizian, A., A. Samadi and M. Aghaz. 2018. Applied learning of discharge and sediment modeling at HEC-RAS4.1. Novavar Publishing, 240 pp (In Presian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

9. Bani Habib, M.E., Y. Hassanzadeh and L. Hasan Esfahani. 2007. Comparative evaluation of the sedimentation of Rebate and Reactor Dam Tanks using the HEC-RAS model, 4th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering, Watershed Management, Karaj, Tehran, 1-8 pp.
10. Batuca, D.G. and J. Jordaan J.R. 2000. Silting and desilting of reservoirs. 1nd edn CRC Press, 330 pp.
11. Brunner, G.W. 2016. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
12. Dankoo, A., J. Samani, M.Z. Ahmadi and A. Emadi. 2010. Uncertainty analysis for estimation of sediment volume in Dam Reservoirs (Case Study: Amir Kabir Dam). Journal of Watershed Management Research, 1(2): 84-94.
13. Devikar, Y.L., R.A. Oak and S.D. Talegoakar. 2019. Reservoir sedimentation and flushing using Run-of-River Project. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 8(10): 2278-3075.
14. Dysarz, T., E. Szałkiewicz and J. Wicher-Dysarz. 2017. Long-term impact of sediment deposition and erosion on water surface profiles in the Ner River. Water, 9(168): 1-14.
15. Emamgholizadeh, S. and H. Samadi. 2008. Desilting of deposited sediment at the upstream of the Dez reservoir in Iran. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 3(1): 25-30.
16. Emamgholizadeh, S. and H. Torabi. 2008. Experimental investigation of the effects of submerged vanes for sediment diversion in the Veis (Ahwaz) Pump Station. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 8(13): 2396-2403.
17. Emamgholizadeh, S. and R.K. Demneh. 2019. A comparison of artificial intelligence models for the estimation of daily suspended sediment load: a case study on the Telar and Kasilian rivers in Iran. Water Science Technology. Water Supply, 19(1): 165-178.
18. Emamgholizadeh, S., H.S. Borojeni and M. Bina. 2005. The flushing of the sediments near the power intakes in the Dez Reservoir. WIT Transactions on Ecology the Environment, 83(10): 1-10.
19. Emamgholizadeh, S., S.M. Bateni and J.R. Nielson. 2018. Evaluation of different strategies for management of reservoir sedimentation in semi-arid regions: a case study (Dez Reservoir). Journal of Lake and reservoir management, 34(3): 270-282.
20. Energy, M.O. 2017. Guideline for Application of Mathematical Models in Sedimentation and Removal of Deposited Sediment from Dams Reservoirs Water and Wastewater Standards and Projects Bureau, pp: 173.
21. Engelund, F. and E. Hansen. 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk Vorlang, Copenhagen.
22. Farshadi, M.R. and M. Shafaei Bejestan. 2010. Estimation of sediment enterance to the Gotvand Olia dam reservoir using HEC-RAS 4.0 model, 2th National Conference on Water Resources Management, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
23. Ghomshi, M., M. Jahanshahi and M.R. Zayeri. 2012. Simulation of sediment deposition in Jiroft reservoir using GSTARS3 model. Journal of Irrigation Science and Engineering (Agricultural Science), 35(3): 1-10.
24. Hassanzadeh, Y. 1995. The removal of reservoir sediment. Water International, 20(3): 151-154.
25. Heidarnejad, M., S.H. Golmaee, A. Mosaedi and M. Ahmadi. 2006. Estimation of sediment volume in Karaj Dam Reservoir (Iran) by hydrometry method and a comparison with hydrography method. Journal of Lake Reservoir Management, 22(3): 233-239.
26. ICWS. 1957. Interagency Committee on Water Resources-subcommittee on sedimentation-Report No.12. Some fundamentals of particle size analysis: A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams, Minneapolis, Minnesota, United States.
27. Iqbal, M., A. Ghumman, H.N. Hashmi, M.A. Khan and H.F. Gabriel. 2016. Modeling for sediment management of Gulpur Hpp reservoir on Poonch river. Science International (Lahore), 28(4): 3903-3914.
28. Jabary, A., S.A. Hosseini, A.H. Haghiabi, S. Emamgholizadeh and A. Behnia. 2014. Prediction of the Sediment load in The River by HEC-RAS. Iranian of Irrigation and Water Engineering, 4(16): 12-23.
29. Joshi, N., G.R. Lamichhane, M. Rahaman, A. Kalra and S. Ahmad. 2019. Application of HEC-RAS to Study the Sediment Transport Characteristics of Maumee River in Ohio, World Environmental and Water Resources Congress. American Society of Civil Engineers, USA.
30. Khosroupour, H. and M.A. Bani Hashemi. 2008. Investigation of sedimentation in Karkheh dam reservoir using numerical model and providing solutions for sediment management in dough, Second national conference of the country's hydroelectric plants, Tehran, Iran (In Presian).
31. Laursen, E. 1958. The total sediment load of streams. Journal of the Hydraulics Division, 84(HY1): 1530: 1531-1530: 1536.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

32. Meskar, H. and R. Fazloula. 2013. Investigation of sedimentation pattern in the Shahid Rajaee Reservoir using GSTAR3.0 Numerical Model. Journal of Watershed Management Research, 4(7): 16-29.
33. Meyer-Peter, B. and T. Müller. 1948. Formulas for bed-load transport. Report on Second Meeting of International Association for Hydraulics Research, Stockholm Sweden., IAHR.
34. Mohammad, M.E., N. Al-Ansari, I. Issa and S. Knutsson. 2016. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. Lakes Reservoirs: Research Management, 21(3): 235-244.
35. Roshun, H., G. Vahabzadeh, K. Solaimani and R. Farhadi. 2013. Simulation of River Hydraulics Behavior Using HEC-RAS Model in GIS Environment (Case Study :Beshar River, Kohgiloyeh and Boyerahmad Province). Journal of Watershed Management Research, 4(7): 70-84.
36. Ruby, W. 1933. Settling velocities of gravel, sand and silt particles. American Journal of Science, 25: 325-338.
37. Schleiss, A.J., M.J. Franca, C. Juez and G. De Cesare. 2016. Reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Research, 54(6): 595-614.
38. Tadesse, A. and W. Dai. 2019. Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data. International journal of sediment research, 34(1): 27-37.
39. Toffaleti, F.B. 1968. Technical Report No. 5. A procedure for computation of total river sand discharge and detailed distribution, Bed to surface. Committee on Channel Stabilization, US Army Corps of Engineers.
40. Toloei, E. 2005. Design and exploitation of dams and reservoirs from sedimentation point, 1th sediment management conference., Ahvaz, Iran, 1-8 pp (In Presian).
41. Van Rijn, L.C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, 1006. Aqua publications Amsterdam.
42. Wang, J., Z. Zhang, B. Greimann and V. Huang. 2018. Application and evaluation of the HEC-RAS–riparian vegetation simulation module to the Sacramento River. Ecological modelling, 368: 158-168.
43. White, W.R. 2000. Contributing paper flushing of sediments from reservoirs. Prepared for thematic review IV.5: operation, monitoring and decommissioning of dams. Cape Town: World Commission on Dams.
44. Wilcock, P.R. 2001. Toward a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel bed rivers. Earth Surface Processes Landforms, 26(13): 1395-1408.
45. Yang, C.T. 1972. Unit stream power and sediment transport, Journal of Hydralic *Division*., ASCE. Citeseer.
46. Yang, C.T. 1996. Sediment transport: Theory and Practice. 2nd edn, Krieger Publishing Company. 396 pp.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]

Prediction of Input Sediment to the Shirin-Darreh Dam Reservoir Using HEC-RAS Numerical Model

Samad Emamgholizadeh[1], Nematollah Khademi[2] and Seyyed Hossein Hosseini[3]

1- Associate Professor, Department of Water and Enviromental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, (Correponding Author: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir)
2- M.Sc. Student, Department of Water and Soil Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology
3- Assistant Professor, Department of Water and Soil Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology
Received: 30 May, 2018 Accepted: 1 February, 2020

Abstract

Sedimentationin reduced the capacity and useable life of reserivors. Estimation of reservoir sedimentation rate can help us to proper management of designed useful capacity. In the present study, the sedimentation process of Shirin-Dare dam, which is located 65 km form the northeast of Bojnord city, was investigated. It is an earth dam with clay core and the initial volume of the reservoir at normal water level is 91.5 million cubic meters (MCM). The numerical model HEC-RAS4.1 was used to simulate flow and sediment transport. The hydrographic data of the Shirin-Dare reservoir at 2012 and 2017 was used for calibration of the model. The results of simulation with different sediment transport equations such as Laursen, Engelund and Hansen , Ackers and White, Toffaleti , Yang, Meyer-Peter and Muller, and Wilcock showed that using Larsen equation (1958) as a sediment transport equation, Ruby equation as fall velocity equation, substrate sorting method with Exner 5 and also using the Manning coefficient of roughness 0.0035, there is a good match between the measured data and the results of the implementation of the HEC-RAS model. Also, simulation results for the next 100 years showed approximately 73.2 million cubic meters of sediment will enter the reservoir, which will be about 80 percent of the initial volume of the reservoir. On average, about 0.8% of the volume of the reservoir is lost annually due to sedimentation.

Keywords: Dam reservoir, HEC-RAS4.1 Numerical model, Sedimentation, Shirin-Dare dam

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.25.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.208]