

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی

ارزیابی روند رسوبگذاری سد شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی

HEC-RAS 4.1.0

نگارنده :

نعمت الله خادمی

استاد راهنما :

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور :

دکتر سید حسین حسینی

تیر ۱۳۹۷

تشکر و قدردانی

از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر صمد امامقلی‌زاده که با راهنمایی‌های گرانبهای خود در طی کلیه مراحل این تحقیق یاریم نمودند نهایت قدردانی را دارم و همچنین از جناب آقای دکتر سید حسین حسینی استاد مشاور محترم که به خاطر همفکریهای ارزشمندشان سپاس گزارم.

تعهدنامه

اینجانب نعمت الله خادمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب – گرایش سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "ارزیابی روند رسوبگذاری سد شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی - HEC-RAS 4.1.0" تحت راهنمایی آقای دکتر صمد امامقلی زاده متعهد می‌شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم به آنان که وجودم جز هدیه وجودشان نیست
پدر و مادر عزیزم

تقدیم به همسر مهربانم
که مسیح وار با صبرش در تمامی لحظات رفیق راه بود

و تقدیم به غنچه‌های زندگیم داوود و امیرحسین
که کودکی گمشده ام را در چهره معصومشان پیدا کردم.

چکیده

پدیده‌های فرسایش و رسوبگذاری اثرات مخرب زیادی بر محیط زیست و زندگی انسان دارند. یکی از مهم‌ترین اثرات رسوبگذاری در مخازن سدها کاهش حجم مخازن سدها می‌باشد. احداث سد از متداول‌ترین روش‌ها جهت بهره‌برداری از سیستم منابع آب سطحی بوده که هزینه‌های بسیار هنگفتی در قالب طرح‌های عظیم ملی صرف ساخت آن می‌شود. رسوبگذاری در مخازن سد نه تنها سبب کاهش ظرفیت و عمر مخزن می‌شود، بلکه ضمن ایجاد اشکالات عدیده در باز و بسته کردن دریچه‌های عمقی و نیمه عمقی سد، موجب افزایش سطح مخزن و افزایش تبخیر و تلفات آب می‌شود. سد شیرین‌دره در شمال شرقی شهرستان بجنورد در ۶۵ کیلومتری این شهرستان واقع شده است که یک سد خاکی با هسته رسی است و حجم اولیه مخزن آن در حداکثر تراز سطح آب ۹۱/۵ میلیون متر مکعب است. مدل‌های ریاضی یکی از ابزارهای مهم برای پیش‌بینی مقدار رسوبگذاری در مخازن سدهای ذخیره‌ای و برآورد عمر مفید آنهاست. استفاده از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب نیاز به اطلاعات کامل‌تری دارند که اغلب چنین داده‌هایی در دسترس نمی‌باشد. با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS4.1 روند رسوبگذاری سد شیرین‌دره مورد بررسی قرار گرفت. بعد از واسنجی مدل به کمک داده‌های هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ مخزن سد شیرین‌دره، مدل برای دوره‌های زمانی مختلف اجرا گردید و نحوه رسوبگذاری مخزن سد حاصل از اجرای مدل در پروفیل طولی و تعدادی از مقاطع عرضی ترسیم گردید. نتایج شبیه‌سازی برای مدت زمان ۱۰۰ سال نشان داد که پس از گذشت این مدت حدود ۸۰ درصد حجم مخزن از رسوب پر می‌گردد، به عبارتی به طور متوسط، سالانه حدود ۰/۸ درصد از حجم مخزن کاسته می‌شود.

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

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه

خادمی ن ا، امامقلی زاده ص، حسینی س ح، قنبری ع ر، (۱۳۹۷)، تخمین میزان رسوبگذاری مخزن سد شیرین دره با استفاده از داده‌های صحرائی و نرم افزار ARC GIS، هفدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد، شهریور ۱۳۹۷.

فصل اول مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱-مقدمه.....	۲
۲-۱-اهمیت و ضرورت تحقیق.....	۳
۳-۱-اهداف تحقیق.....	۴
۴-۱-روش انجام تحقیق.....	۴
۵-۱-ساختار کلی پایان نامه.....	۵
فصل دوم تئوری تحقیق و مروری بر تحقیقات گذشته.....	۷
۱-۲-کلیاتی در مورد رسوبگذاری مخازن سدها.....	۸
۲-۲-تشریح مراحل ته نشینی رسوبات در مخازن سدها.....	۸
۳-۲-جمع‌آوری آمار و اطلاعات.....	۹
۱-۳-۲-تعیین محدوده‌ی مطالعه.....	۹
۲-۳-۲-جمع‌آوری اطلاعات، گزارش‌ها و نقشه‌ها.....	۱۰
۳-۳-۲-پردازش داده‌ها.....	۱۰
۱-۳-۳-۲-ارزیابی داده‌های هیدرولوژی.....	۱۱
۴-۳-۲-رسم منحنی دبی سنج رسوب.....	۱۲
۵-۳-۲-تخمین بار بستر.....	۱۲
۴-۲-مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب.....	۱۳
۵-۲-روش‌های برآورد حجم رسوبات نهشته شده در مخزن.....	۱۴

- ۱۴-۵-۱- نقشه برداری مخزن.....
- ۱۵-۵-۲- محاسبه حجم رسوبات نهشته شده.....
- ۱۵-۵-۳- تعیین حجم با استفاده از عمق رسوب نهشته شده.....
- ۱۵-۵-۳-۱- استفاده از مدل های کامپیوتری.....
- ۱۶-۶-۱- الگوی رسوبگذاری در مخزن سدها و برآورد عمر مفید سدها.....
- ۱۶-۶-۱-۱- پیش بینی چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها.....
- ۱۷-۶-۲- نیمرخ طولی رسوبگذاری.....
- ۲۰-۶-۳- دلتا.....
- ۲۱-۶-۴- نیمرخ عرضی رسوبگذاری.....
- ۲۳-۷-۲- عمر مفید مخزن سد.....
- ۲۳-۷-۱- راندمان تله اندازی.....
- ۲۴-۷-۲- برآورد عمر مفید مخزن سد.....
- ۲۶-۸-۱- روش های پیش بینی الگوی رسوبگذاری.....
- ۲۶-۸-۱-۱- روش های تجربی.....
- ۲۸-۸-۱-۱- روش تجربی کاهش سطح.....
- ۳۲-۸-۱-۲- روش تجربی افزایش سطح.....
- ۳۳-۸-۲- روش های ریاضی.....
- ۳۵-۸-۲-۱- معادلات حاکم.....
- ۳۷-۸-۲-۲- روش های حل معادلات.....

۳۸	۹-۲-انواع مدل‌های ریاضی موجود
۳۸	۱۰-۲-مروری بر تحقیقات گذشته
۴۷	فصل سوم مواد و روش‌ها
۴۸	۱-۳-مقدمه
۴۸	۲-۳-رودخانه شیرین دره
۴۹	۳-۳-سد شیرین دره
۴۹	۴-۳-مشخصات فنی سد شیرین دره
۵۲	۵-۳-شبکه ایستگاه هیدرومتری منطقه
۵۲	۶-۳-اطلاعات ژئومتری
۵۳	۷-۳-آمار دبی روزانه و تراز سطح آب
۵۳	۸-۳-جریان و دبی رسوب
۵۴	۹-۳-داده‌های مربوط به درجه حرارت آب
۵۵	۱۰-۳-اطلاعات مربوط به دانه بندی رسوبات ورودی به مخزن
۵۵	۱۱-۳-معرفی مدل HEC-RAS
۵۵	۱-۱۱-۳-تاریخچه
۵۶	۱۲-۳-مراحل انجام یک شبیه‌سازی در مدل ریاضی HEC-RAS
۵۶	۱-۱۲-۳-داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل
۵۷	۱-۱۲-۳-داده‌های هندسی
۵۷	۲-۱-۱۲-۳-داده‌های هیدرولوژی

۵۸	.....۳-۱-۱۲-۳ داده‌های هیدرولیکی
۵۸	.....۳-۱-۱۲-۴ داده‌های رسوب
۵۹	.....۳-۱۲-۲-کالیبره کردن مدل مدل
۶۰	.....۳-۱۲-۳-مشاهده و چاپ نتایج
۶۰	.....۳-۱۳-۱-مبانی مدل سازی رسوب در مدل HEC-RAS
۶۱	.....۳-۱۳-۱-ارزیابی افت ناشی از تنگ شدگی و باز شدگی
۶۲	.....۳-۱۳-۲-ظرفیت انتقال رسوب
۶۲	.....۳-۱۳-۳-توابع محاسبه زبری بستر در مدل HEC-RAS
۶۳	.....۳-۱۳-۴-توابع انتقال رسوب در مدل HEC-RAS
۶۴	.....۳-۱۳-۴-۱-روش یانگ
۶۶	.....۳-۱۳-۴-۲-روش انگلوند- هانسن
۶۶	.....۳-۱۳-۴-۳-روش ایکرز- وایت
۶۸	.....۳-۱۳-۴-۴-روش میر- پیتر و مولر
۷۰	.....۳-۱۳-۴-۵-روش لارسن
۷۱	.....۳-۱۳-۴-۶-روش توفالتی
۷۲	.....۳-۱۳-۴-۷-روش ویلکاک
۷۴	.....۳-۱۳-۵-روش‌های مرتب‌سازی مصالح بستر
۷۵	.....۳-۱۳-۶-حجم کنترل رسوب
۷۶	.....۳-۱۳-۷-روش‌های برآورد سرعت سقوط ذرات

فصل چهارم بحث و نتایج	۷۹
۱-۴-مقدمه	۸۰
۲-۴-داده‌های ورودی سد شیرین دره	۸۰
۱-۲-۴-دبی ورودی روزانه و سطح تراز آب	۸۰
۲-۲-۴-دبی - دبی رسوب ورودی	۸۲
۳-۴-نحوه واسنجی هیدرولیک جریان در مدل	۸۴
۴-۴-نحوه کالیبراسیون رسوب در مدل	۸۵
۵-۴-شبیه سازی مدل برای بازه‌ی زمانی مختلف	۹۴
۶-۴-پیش بینی وضعیت رسوبگذاری	۹۵
۷-۴-تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل	۱۰۲
۸-۴-محاسبه خطای مدل	۱۰۲
فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۰۵
۱-۵-مقدمه	۱۰۶
۲-۵-نتیجه‌گیری	۱۰۶
۳-۵-پیشنهادها	۱۰۷۷
پیوست	۱۰۹
منابع	۱۱۳
چکیده انگلیسی	۱۱۸

فهرست اشکال.....شماره صفحه

- شکل (۱-۲)-نمایش توزیع طولی رسوب گذاری در مخزن سد..... ۱۸
- شکل (۲-۲)-نمایش چهار نوع ترسیب طولی در مخزن سدها..... ۱۹
- شکل (۳-۲)-نمایش مناطق رسوبگذاری طولی در مخزن بزرگ و طولانی..... ۲۰
- شکل (۴-۲)-وضعیت تشکیل و توسعه دلتا در سال های مختلف، سد باکرا در کشور هند..... ۲۱
- شکل (۶-۲)-مقطع عرضی مخزن سد فرانسیس در سال های مختلف بهره برداری..... ۲۲
- شکل (۷-۲)-منحنی های $h(p)$ بر حسب عمق نسبی (P) ۳۲
- شکل (۲-۳)-نمای هندسی مخزن سد شیرین دره..... ۵۱
- شکل (۳-۳)-نمای اشل قرائت سطح آب سد شیرین دره..... ۵۱
- شکل (۴-۳)-توپوگرافی اطراف و خود مخزن ترسیم شده توسط نرم افزار Surfer15..... ۵۱
- شکل (۵-۳)-محل مقاطع عرضی بررسی شده مخزن سد شیرین دره توسط نرم افزار Surfer 15... ۵۲
- شکل (۶-۳)-منحنی حجم - ارتفاع اولیه مخزن سد شیرین دره..... ۵۴
- شکل (۷-۳)-دانه بندی رسوبات ورودی به مخزن سد شیرین دره..... ۵۵
- شکل (۸-۳)-روش های مورد استفاده در مدل HEC-RAS جهت مرتب سازی مصالح بستر..... ۷۵
- شکل (۹-۳)-نمای شماتیکی از حجم کنترل رسوب در هر مقطع عرضی..... ۷۶
- شکل (۱۰-۳)-فلوچارت چگونگی انجام شبیه سازی رسوبگذاری در مدل ریاضی HEC-RAS..... ۷۸
- شکل (۱-۴)-نمودار دبی روزانه ورودی به سد شیرین دره برای بازه ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶..... ۸۱
- شکل (۲-۴)-سطح تراز آب مخزن سد شیرین دره برای بازه ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶..... ۸۱
- شکل (۳-۴)-نمودار دبی - دبی رسوب ورودی به مخزن سد..... ۸۲

- شکل (۴-۴) - نمودار دبی سیلاب - دبی رسوب ورودی به مخزن سد..... ۸۳
- شکل (۵-۴) - منحنی دبی - سطح تراز آب (اشل) حاصل از اجرای مدل با ضریب زبری های مختلف..... ۸۴
- شکل (۶-۴) - نیمرخ طولی مخزن سد در هیدروگرافی سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶..... ۸۵
- شکل (۷-۴) - تغییرات نیمرخ طولی با اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال با توابع مختلف..... ۸۶
- (شکل ۸-۴) - نتایج حاصل از اجرای مدل برای بازه ی زمانی ۵ سال با استفاده از معادله انتقال رسوب لارسن..... ۸۹
- شکل (۹-۴) - نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات توفالتی..... ۸۹
- شکل (۱۰-۴) - نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات گزارش ۱۲..... ۹۰
- شکل (۱۱-۴) - نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات فان راین..... ۹۰
- شکل (۱۲-۴) - نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات ربی..... ۹۱
- شکل (۱۳-۴) - نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱۰ ساعت..... ۹۲
- شکل (۱۴-۴) - نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۲۰ ساعت..... ۹۲
- شکل (۱۵-۴) - نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت..... ۹۳
- شکل (۱۶-۴) - نتایج حاصل از اجرای مدل با روشهای مختلف مرتب سازی مصالح بستر..... ۹۳
- شکل (۱۷-۴) - تغییرات پروفیل طولی با اجرای مدل برای مدت زمان های آتی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال..... ۹۵
- شکل (۱۸-۴) - منحنی های حجم - ارتفاع محاسبه شده توسط نرم افزار سورفر ۱۵ با استفاده از نتایج حاصل از هیدروگرافی و اجرای مدل (سطح تراز بستر پس از رسوبگذاری) برای دوره های زمانی مختلف..... ۹۶
- شکل (۱۹-۴) - تغییرات مقطع عرضی شماره (۴) به فاصله ۲۸۳ متر از بدنه سد..... ۹۷

- شکل (۴-۲۰)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۸) به فاصله ۸۹۳ متر از بدنه سد ۹۷
- شکل (۴-۲۱)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۱۲) به فاصله ۱۷۸۰ متر از بدنه سد ۹۸
- شکل (۴-۲۲)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۱۶) به فاصله ۲۳۷۴ متر از بدنه سد ۹۸
- شکل (۴-۲۳)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۰) به فاصله ۳۰۰۰ متر از بدنه سد ۹۹
- شکل (۴-۲۴)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۴) به فاصله ۳۷۳۲ متر از بدنه سد ۹۹
- شکل (۴-۲۵)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۸) به فاصله ۴۲۷۳ متر از بدنه سد ۱۰۰
- شکل (۴-۲۶)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۳۲) به فاصله ۴۹۶۳ متر از بدنه سد ۱۰۰
- شکل (۴-۲۷)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۳۶) به فاصله ۵۸۶۰ متر از بدنه سد ۱۰۱
- شکل (۴-۲۸)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۴۰) به فاصله ۶۷۶۰ متر از بدنه سد ۱۰۱

فهرست جداول.....شماره صفحه

جدول (۱-۲) - رابطه بین بار بستر و بار معلق (Mahmood, 1987) ۱۳

جدول (۳-۲) - روابط به دست آمده توسط بورلند و میلر برای مساحت نسبی رسوب ۲۸

جدول (۴-۲) - تیپ استاندارد مخازن در روش روش کاهش سطح ۲۹

جدول (۵-۲) - مقادیر c , m و n جهت تعیین مساحت نسبی بر حسب نوع مخزن ۳۰

جدول (۱-۳) - سطح - حجم - ارتفاع، اولیه دریاچه سد شیرین دره ۵۴

جدول (۲-۳) - فهرست جزئیات توابع انتقال رسوب در مدل HEC-RAS ۷۴

جدول (۱-۴) - میزان حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن سد در هیدروگرافی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ و نتایج حاصل از اجرای مدل HEC-RAS توسط معادلات مختلف انتقال رسوب برای مدت زمان ۵ سال ۸۷

جدول (۲-۴) - میزان حساسیت هریک از پارامترهای موثر در کالیبراسیون ۹۴

فهرست نقشه‌ها.....شماره صفحه

نقشه (۱-۳) - موقعیت سد شیرین دره استان خراسان شمالی ۴۹

فصل اول

مقدمه و کلیات

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 کم آبی می‌باشد. تامین آب، کنترل سیلاب، تولید انرژی برق آبی و ایجاد مراکز تفریحی از دیگر اهداف احداث سد می‌باشد.

ساختن سد بر روی رودخانه سبب بهم خوردن تعادل هیدرودینامیکی شده و در نتیجه تمامی یا بخشی از رسوبات در سد ته نشین 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، مسأله رسوبگذاری در مخزن سد از مهمترین عوامل تأثیرگذار در اقتصاد طرح خواهد بود (جهانشاهی و همکاران، ۱۳۸۹). جریان آب بر روی بستر زمین طبیعی باعث فرسایش خاک و حمل ذرات حاصل از آن توسط جریان به سمت پایین دست به صورت بار رسوبی معلق و بار بستر خواهد شد. به دلیل کاهش شدید سرعت در بالادست سد و تقریباً سکون جریان در مخزن سد، ته نشینی ذرات نامحلول و رسوبات موجود در آن در مخزن سد امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. تحقیقات نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا، که بیش از ۷۰۰۰ میلیارد مترمکعب می‌باشد به علت رسوبگذاری از دست می‌رود (آکینسون، ۱۹۹۶).

این میزان در بعضی از کشورها بیش از ۱ درصد است. در ایران نرخ کاهش حجم مخازن سدها در اثر رسوبگذاری به طور متوسط بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد تخمین زده می‌شود که به طور تقریبی معادل ۱۷۵ میلیون تا ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال است (طلوعی، ۱۳۸۴).

متوسط نرخ کاهش حجم محاسبه شده 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 (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

موضوع انتقال رسوب قرن‌هاست که مورد مطالعه مهندسين و مورفولوژیست‌های رودخانه‌ها بوده است. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای حل مسائل به کار گرفته شده است، که نتایج به دست آمده، غالباً تفاوت فاحشی با یکدیگر و مشاهدات صحرایی دارند. بسیاری از جنبه‌های پیچیده انتقال رسوب در میان موضوعات بحث انگیز برای مطالعه آینده باقی هستند و باید درک شوند. خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی، سازه‌های آبی ساخته شده بر روی یا کنار رودخانه‌ها بسیار گسترده، وسیع و زیان آور است. شناخت دقیق آن از اهداف مهم مهندسان هیدرولیک می‌باشد. برای جلوگیری و یا به حداقل رساندن خسارات وارده، باید سه فرآیند فرسایش، انتقال و ته نشینی مواد رسوبی را مورد مطالعه قرار داد (عباسی پور، ۱۳۹۵).

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

از آنجایی که میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز در ایران به دلایل مختلفی زیاد است، پرداختن به مسائل رسوبگذاری در مخازن سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رسوبگذاری در مخزن علاوه بر کاهش میزان ذخیره آب باعث افزایش تبخیر برای یک ظرفیت ذخیره مشخص، آب گرفتگی و تشکیل باتلاق در اراضی بالادست سد، افزایش قدرت فرسایشی رودخانه در پایین دست سد، کاهش حجم کنترل سیلاب مخزن و در برخی موارد حاد باعث ایجاد پدیده روگذری در خلال سیل می‌شود. ته نشینی رسوب در پشت دیواره یک سد، پایداری آن را کاهش داده و بر عملکرد تاسیسات خروجی، دریچه‌ها و شیرهای تراز پایین دست اثرات نامطلوب می‌گذارد. پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب برای طراحان سدها، به منظور تعیین آستانه دریچه‌های عمقی و آبگیر و بررسی تعادل و پایداری سد اهمیت فراوان دارد (یانگ، ۱۹۹۶). علاوه بر این، در دوران بهره‌برداری از سدها، نحوه پخش رسوب در برآورد مجدد حجم مفید باقیمانده مخزن اهمیت می‌یابد (کمیته رسوب طرح استانداردهای صنعت آب، ۱۳۶۸).

۱-۳- اهداف تحقیق

مطالعه و تحقیق حاضر با توجه به مبانی و ضرورت‌های طرح کنترل رسوب در مخازن سدها در راستای بهره‌برداری بهینه از منابع آب و احیای توان از دست رفته‌ی این منابع در جهت کاهش بحران آب، در یکی از استان‌های مهم کشور (استان خراسان شمالی) جنبه نیاز آب بخش کشاورزی و شرب شهرستان بجنورد، با بررسی عددی پروفیل رسوب در مخزن سد شیرین‌دره، با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS تدوین می‌گردد. و هدف از ساختن سد، تنظیم آب رودخانه به منظور تأمین نیاز آب شرب شهرستان بجنورد، صنعت و آب مورد نیاز کشاورزان در اراضی پائین دست می‌باشد، پس در نتیجه ارزیابی روند رسوبگذاری سد مخزنی شیرین‌دره امر مهمی در مدیریت منابع آب منطقه تلقی می‌گردد. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی روند رسوبگذاری در سد شیرین‌دره، مقایسه نتایج مدل و هیدروگرافی انجام شده در مخزن سد و پیش بینی رسوبگذاری برای دوره‌های زمانی مختلف می‌باشد.

۱-۴- روش انجام تحقیق

برای رسیدن به اهداف تحقیق که در بخش قبل به آن اشاره شد، آمار و اطلاعات دبی جریان، دبی رسوب و هیدروگرافی انجام شده در مخزن سد شیرین‌دره جمع‌آوری گردید، سپس بعد از کالیبره کردن مدل به محاسبات روند رسوبگذاری در مخزن سد با استفاده از مدل HEC-RAS4.1 پرداخته شد.

۱-۵- ساختار کلی پایان نامه

این تحقیق در پنج فصل تهیه و تدوین گردیده است.

۱) در فصل اول همانطور که ملاحظه گردید به اهمیت، ضرورت انجام، اهداف و روش انجام این تحقیق اشاره شد.

۲) در فصل دوم تئوری تحقیق و مروری بر تحقیقات انجام شده در گذشته پرداخته خواهد شد.

۳) در فصل سوم نیز مواد و روش‌های انجام این تحقیق و به معرفی مدل ریاضی HEC-RAS4.1 پرداخته خواهد شد.

۴) فصل چهارم، در مورد نتایج حاصل از شبیه‌سازی رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS 4.1، نحوه کالیبره کردن مدل و پیش‌بینی روند رسوبگذاری سد شیرین دره ارائه خواهد شد.

۵) فصل پنجم، این فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادات را شامل می‌شود.

فصل دوم

تئوری تحقیق و مروری

بر تحقیقات گذشته

۱-۲- کلیاتی در مورد رسوبگذاری مخازن سدها

با استناد به نشریه ICOLD (۱۹۸۸) متوسط تلفات حجم مخزن به ۱٪ در سال می‌رسد، این آمار بر مبنای تلفات حجم ذخیره همه سدهای جهان اعلام شده است، این تلفات حجم قابل ملاحظه‌ای بوده و رسوبگذاری در مخازن یکی از مسائل اولیه‌ای است که در قرن بیست و یکم باید به آن توجه خاص شود و همچنین از مسائل مهم در ارتباط با مدیریت منابع آب می‌باشد (ویسچر و هاگر، ۱۹۹۷).

در حال حاضر تلاش‌های زیادی در زمینه پیش بینی الگوی ته نشینی رسوبات در مخازن انجام می‌گردد.

۲-۲- تشریح مراحل ته نشینی رسوبات در مخازن سدها

با کاهش سرعت جریان آب رودخانه حامل رسوب در برخورد با آب ساکن مخزن، نیروهای هیدرودینامیکی جریان کاهش یافته و در نتیجه از قدرت انتقال رسوبات کاسته شده و مواد جامد آن شروع به ته نشینی می‌کند، به طوریکه دانه‌های درشت در مصب رودخانه و دانه‌های ریز در مسیر جریان به طرف دیواره سد ته نشین می‌شوند. مواد رسوبی درشت دانه که در مصب رودخانه ته نشین شده‌اند با تشکیل دلتا و همسو با جهت جریان به طرف پایین دست پیشروی می‌کند، مواد رسوبی ریز دانه نیز به حالت معلق و همراه با جریان غلیظ در مجاورت بستر و در محل حجم مرده مخازن منتقل شده و در آنجا با آرام شدن جریان آب ته نشین می‌شوند. به طور کلی ماسه و سیلت که خاصیت چسبندگی آنها کم می‌باشند، در انتهای دریاچه ته نشین می‌شوند. رسوبات رس و سیلت که چسبندگی آنها در حد متوسط می‌باشد قسمت عمده مخزن را می‌پوشانند و بالاخره رسوبات رسی با چسبندگی زیاد و سیلت با قابلیت تراکم بالا بیشتر در جلوی دیواره سد انباشته می‌شوند (حمادی، ۱۳۷۸).

انباشت رسوبات در مخازن سدها موارد زیر را باعث می‌شود:

۱- از بین رفتن ظرفیت ذخیره مفید مخزن سدها

۲- اختلال در نواحی قابل کشتیرانی

۳- از بین رفتن منافع حاصل از کنترل سیلاب در پایین دست

۴- افزایش اثرات سوء سیلاب در بالادست مخزن ناشی از بالا آمدن بستر رودخانه در ناحیه انباشته‌های دلتایی

۵- خسارت ناشی از رسوبات وارد شده به تجهیزات برق آبی (گراد و رانگا، ۱۹۸۵).

در جائیکه غلظت رسوب و یا عمق آب برای شکل‌گیری جریان غلیظ کافی نمی‌باشد، جریان همگن در سرتاسر مخزن اتفاق خواهد افتاد. از آنجا که جریان غلیظ به سمت خروجی و بدنه سد حرکت می‌کند رسوبات نیز در طول مخزن و بستر آن ته نشین می‌شوند، تحت شرایط نامطلوبی مانند شیب کف و تداوم سیل نامناسب، جریان غلیظ قبل از اینکه به بدنه سد برسد متوقف خواهد شد. جریان‌های غلیظ و همگن هر دو باعث ته نشینی رسوبات به صورت لایه‌های افقی و نوارهای نازکی در عرض کف مخزن می‌شوند. تحت شرایط مطلوبی جریان غلیظ می‌تواند ذرات سیلت و رس را ده‌ها کیلو متر انتقال دهد تا اینکه حرکت آنها در اثر وجود یک کافردم در بالادست و یا رسیدن به بدنه سد متوقف شود، در این نقطه دریاچه‌ای از گل و آب حاوی رسوبات زیاد به وجود خواهد آورد که تدریجا به صورت رسوباتی از مواد ریزدانه ته نشین خواهد شد (فان و موریس، ۱۹۹۲).

۲-۳- جمع‌آوری آمار و اطلاعات

۲-۳-۱- تعیین محدوده‌ی مطالعه

با توجه به وسعت حوضه‌ای که مخزن در آن قرار دارد و با در نظر گرفتن اهمیت مطالعه موردنظر، ضروری است ابتدا محدوده‌ی مطالعه تعیین گردد. که ممکن است سطح وسیعی را شامل شود از این رو در پروژه‌های مطالعاتی رسوبگذاری مخازن سدها، بهتر است بخش‌های مختلف پروژه توسط مهندسیین مشاور متفاوت که تخصص مربوط را دارند انجام گیرد. لذا ضرورت دارد محدوده‌ی

مطالعه هر کدام از بخش‌ها تعیین و شرح وظایف آنها دقیقاً مشخص گردد.

۲-۳-۲- جمع‌آوری اطلاعات، گزارش‌ها و نقشه‌ها

- بدیهی است انجام هر مطالعه بدون بررسی کارهای انجام شده‌ی قبلی در آن محدوده مورد مطالعه امکانپذیر نخواهد بود. این عمل می‌تواند از دوباره کاری‌ها جلوگیری و ضمناً اهدافی را که مطالعات قبلی دنبال می‌کرده‌اند مشخص کند. در این رابطه ضروری است که موارد ذیل تهیه شود:
 - کلیه عکس‌های هوای با مقیاس‌های مختلف که در زمان‌های مختلف تهیه شده‌اند
 - کلیه نقشه‌های توپوگرافی و هیدروگرافی با مقیاس‌های مختلف که در زمان‌های مختلف تهیه شده‌اند
 - کلیه نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه و گزارش‌های زمین‌شناسی تهیه شده در آن محدوده که برای اهداف مختلفی تدوین شده‌اند
 - کلیه گزارش‌های مطالعات پایه انجام شده شامل گزارش‌های هواشناسی، هیدرولوژی، هیدرولیک، هیدرولیک رسوب، زمین‌شناسی و ژئوتکنیک
 - کلیه گزارش‌های تخصصی شامل مشخصات طرح‌های در دست اجرا و یا ساخته شده در محدوده‌ی مورد مطالعه
 - کلیه گزارش‌های مربوط به سد
 - کلیه مطالعات نیمه تفصیلی، تفصیلی و نقشه‌های خاکشناسی در محدوده مورد مطالعه
 - نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی و مشخصات هر ایستگاه
 - نقشه پراکنش ایستگاه‌های آبسنجی و مشخصات کامل هر ایستگاه

۲-۳-۳- پردازش داده‌ها

- پس از جمع‌آوری داده‌ها، نوبت به پردازش آنها می‌رسد تا اطلاعات جدیدی از این داده‌ها کسب گردد. اطلاعات جدید برای برآورد نهایی رسوبگذاری و یا انتخاب روش‌های رسوبزدایی و

تاثیر رسوبزدایی بر رودخانه پایین دست مورد نیاز می‌باشند. برای پردازش این داده ها باید از مدل‌های ریاضی معتبر که امروزه در اختیار می‌باشد بهره گرفت.

۲-۳-۳-۱- ارزیابی داده‌های هیدرولوژی

داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های آبسنجی به منظور محاسبات زیر استفاده می‌شود:

- رسم هیدروگراف بده روزانه در طول دوره آماری
- تفکیک جریان پایه از جریان سطحی و تعیین سهم هر یک در کل جریان ماهانه و سالانه رودخانه
- رسم منحنی تداوم جریان و تعیین معادله مورد نظر
- بررسی آمار سیلاب ایستگاه‌های هیدرومتری
- تعیین مقادیر سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف ۲ و ۵ و ۱۰ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ساله و PMF
- رسم منحنی غلظت رسوب و بده رسوب در مقابل بده (منحنی بده سنجی رسوب^۱)
- برآورد رسوب ماهانه بر اساس آمار بده روزانه موجود و با استفاده از منحنی بده - سنجی رسوب
- رسم منحنی بده متوسط ماهانه و آورد رسوب ماهانه و تعیین رابطه‌ی بین آنها
- برآورد رسوب معلق سالانه
- محاسبه‌ی رسوب کل با توجه به درصد بار بستر که از جدول ۲-۱ به دست می‌آید.
- محاسبه‌ی رسوب ویژه با توجه به سطح حوضه
- رسم منحنی دانه‌بندی و تعیین اندازه مشخصه‌ی رسوب و تعیین رابطه بین اندازه‌ی مشخصه‌ی رسوب و بده جریان
- تعیین زیر حوضه‌هایی که آورد رسوب بیشتری دارند

1-Discharge-sediment rating curve

- بررسی جریان‌های غلیظ اتفاق افتاده و تعیین خصوصیات آن

۲-۳-۴- رسم منحنی دبی سنج رسوب

چنانچه فرض گردد که در ایستگاه آبسنجی همه‌ی متغیرها ثابت هستند و تنها بده جریان ممکن است تغییر کند، در آن صورت می‌توان اینطور بیان کرد که بده رسوب یا غلظت رسوب تنها تابعی از بده جریان می‌باشد.

با رسم داده‌های اندازه‌گیری شده بده رسوب در مقابل بده جریان بر روی کاغذ لگاریتمی منحنی تشکیل می‌شود که آن را منحنی بده سنج رسوب گویند. از آن جا که فرض ثابت بودن همه متغیرها، کاملاً صحیح نمی‌باشد داده‌های واقع بر منحنی ممکن است خیلی پراکنده باشند و تشکیل منحنی واحدی را ندهند. مشخصات رسوب شامل غلظت دانه‌بندی، جنس رسوب هم چنین در دسترس بودن مقدار رسوب قابل انتقال و نیز درجه حرارت آب از جمله متغیرهایی هستند که ثابت نمی‌باشند و از این رو بهتر است تا منحنی بده سنج به صورت فصلی و یا در محدوده بده‌های متفاوتی ترسیم گردد تا رابطه‌ی به وجود آمده از دقت بیشتری برخوردار باشد.

شکل ریاضی منحنی بده سنج رسوب به صورت زیر می‌باشد:

$$C \text{ یا } Q_S = aQ^n \quad (۱-۲)$$

که در آن C غلظت رسوب معلق، Q_S بار معلق، Q بده رودخانه می‌باشد. این رابطه چنانچه بر روی کاغذ لگاریتمی رسم شود به صورت خط با معادله (۲-۲) خواهد بود:

$$\text{Log } C \text{ یا } \text{Log } Q_S = \text{Log } a + n\text{Log } (Q) \quad (۲-۲)$$

ضرایب a و n را می‌توان با روش‌های برازش معادلات یا رگرسیون توسط نرم افزارهای چون Excell و Spss بدست آورد.

۲-۳-۵- تخمین بار بستر

بار بستر معمولاً به علت پیچیدگی و دشواری و همچنین متغیرهای متعددی که در میزان آن

دخالت دارد، اندازه‌گیری نمی‌گردد. از این رو مقدار بار بستر به عنوان درصدی از بار معلق اختیار می‌شود. مقدار این درصد ممکن است از ۲ تا ۱۵۰ درصد تغییر کند. جدول ۱-۲ می‌تواند به عنوان مبنایی برای تعیین محدوده درصد فوق مورد استفاده قرار گیرد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

جدول (۱-۲) - رابطه بین بار بستر و بار معلق (Mahmood, 1987)

میزان بار بستر بر حسب بار معلق	ترکیب مصالح معلق	مصالح بستر	غلظت وزنی رسوب معلق (میلی گرم بر لیتر)
۱۵۰ تا ۲۵	۲۰ تا ۵۰ درصد ماسه	ماسه	کوچکتر از ۱۰۰۰
۳۵ تا ۱۰	۲۰ تا ۵۰ درصد ماسه	ماسه	۷۵۰۰ تا ۱۰۰۰
۱۵ تا ۵	کوچکتر از ۲۵ درصد	رس، لای، ماسه، کمی شن	بزرگتر از ۷۵۰۰
<۲	ماسه وجود ندارد	رس و لای	هر غلظتی

۲-۴- مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب

از جمله مطالعات ضروری در مخازن سدها، مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب می‌باشد. هدف اصلی از مطالعات هیدرولیک جریان، آگاهی از خصوصیات جریان نظیر سرعت، عمق، تنش برشی و بده جریان در رودخانه بالادست، محدوده مخزن و رودخانه پائین دست می‌باشد. این خصوصیات برای بده‌های سیلابی که هنوز اتفاق نیفتاده‌اند به منظور اعمال روش‌های پیشگیری از خسارات احتمالی بسیار ضروری است. مطالعات هیدرولیک رسوب نیز به منظور بررسی نحوه رسوبگذاری در مخزن و رودخانه بالادست، هم چنین نحوه فرسایش بستر رودخانه پایین دست، به خصوص در شرایط جریان‌های سیلابی که ممکن است در طول عمر پروژه با آن روبرو شود، می‌باشد. مطالعات هیدرولیک جریان و رسوب نیازمند استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

۲-۵- روش‌های برآورد حجم رسوبات نهشته شده در مخزن

مقدار حجم رسوب نهشته شده در مخزن سد، باید در دوره‌های زمانی مشخص تعیین گردد تا بر اساس آن بتوان نرخ رسوبگذاری سالانه و میزان حجم از دست رفته مخزن را تعیین کرد. نتایج به دست آمده کمک خواهد کرد تا از تاثیر عملیات کنترل فرسایش و رسوب بالادست، نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و میزان شدت رسوبگذاری مطلع شد و سپس بر اساس این نتایج بتوان با برنامه ریزی صحیح عمر مفید مخزن را افزایش داد. دقیق‌ترین و معمول‌ترین روش حجم رسوب نهشته شده، انجام عملیات نقشه برداری زمینی و آبنگاری^۱ مخزن در زمان‌های مختلف می‌باشد. بدین ترتیب که با انجام عملیات نقشه برداری می‌توان حجم مخزن را در هر دوره‌ای محاسبه کرد که پس از کسر کردن حجم مخزن محاسبه شده از عملیات نقشه برداری در دوره قبل، حجم رسوب نهشته شده محاسبه خواهد شد.

۲-۵-۱- نقشه‌برداری مخزن^۲

نقشه‌برداری مخزن با هدف تعیین حجم رسوبگذاری و تعیین حجم مفید سد با روش‌های مختلفی انجام می‌گردد. به منظور برنامه ریزی صحیح در رابطه با نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و هم چنین برآورد نرخ رسوبگذاری در مخزن سد ضروری است تا عملیات نقشه‌برداری به صورت دوره‌ای و در طول عمر مخزن برداشت گردد. نتایج حاصل از برداشت‌های نقشه‌برداری برای برنامه ریزی طولانی مدت و بهره‌برداری صحیح از مخزن بسیار ضروری است. روش‌های مختلفی برای نقشه برداری مخزن وجود دارد ولی قبل از اقدام به هرگونه عملیات نقشه برداری و با توجه به این که این عملیات بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است، ضروری است تا با یک برنامه‌ریزی صحیح و زمان بندی مناسب اقدام شود.

1- Bathymetric survey
2- Hydrographic survey

۲-۵-۲- محاسبه حجم رسوبات نهشته شده

یکی از روش‌های معمول برآورد حجم رسوب نهشته شده در مخزن کسر کردن حجم جدید اندازه‌گیری شده مخزن از حجم اولیه مخزن می‌باشد. از این رو لازم است تا به طور دوره‌ای مخزن نقشه‌برداری و حجم آن محاسبه گردد.

۲-۵-۳- تعیین حجم با استفاده از عمق رسوب نهشته شده

۲-۵-۳-۱- استفاده از مدل‌های کامپیوتری

برای پیش بینی آنچه پس از ساخت یک سد جدید یا اعمال یک منحنی عملکرد جدید رخ خواهد داد، به کارگیری شبیه سازی عددی یا روابط تجربی معتبر اجتناب ناپذیر می باشد. استفاده از مدل های ریاضی، ابتدا برای شبیه سازی توان رودخانه در حمل رسوب به داخل مخزن توسعه یافت. در این دیدگاه مقدار کلی رسوب وارد شونده به مخزن مد نظر بوده و جزییات الگوی رسوبگذاری در قسمت‌های مختلف مخزن مورد توجه نمی‌باشد. در سال‌های اخیر، جزییات مربوط به نحوه رسوبگذاری و فرسایش در مخزن نیز در بسیاری از پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا پیش بینی محل و میزان رسوبگذاری و فرسایش، روند شکل‌گیری و جابه‌جایی دلتای رسوبی در طول سال‌های بهره‌برداری، نحوه تاثیر جریان غلیظ در شرایط سیلابی و تاثیر روش‌های مدیریت سد بر این فرآیندها از اهمیت کاربردی برخوردار شده است. برای انجام این گونه مطالعات، شبیه‌سازی عددی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها شناخته شده است شبیه‌سازی عملیات رسوب‌زدایی مخزن و تاثیر مدیریت مخزن بر مجموعه‌ی مخزن و رودخانه‌های بالادست و پایین دست نیز در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته است. بیشترین فعالیت‌ها در زمینه شبیه‌سازی عددی فرآیند رسوبگذاری در مخازن سدها از زمانی شکل گرفت که رایانه‌های شخصی فراگیر شدند. به این دلیل حجم عمده‌ی این گونه مطالعات به سال‌های بعد از ۱۹۹۰مربوط می‌شود. تقریباً تمامی مطالعات شبیه‌سازی عددی در سال‌های اولیه با استفاده از مدل یک بعدی انجام شده‌اند. مدل‌های یک بعدی

هنوز هم نقش مهمی در مطالعات و مسایل کاربردی به عهده دارند. محاسبه دقیق فرآیند تحکیم رسوبات ته نشین شده و تعلیق مجدد آنها و اثر این پدیده بر جابه جایی رسوب، در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. کمتر مطالعه‌ای وجود دارد که بدون مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی در یک مخزن واقعی و یا نتایج آزمایشگاهی ارائه شده باشد. این امر نشانگر اهمیت اطلاعات اندازه‌گیری شده برای تضمین اعتبار عملکرد مدل‌ها و برازش آنها است. در پژوهش‌های انجام شده، مهم‌ترین معیارهای سازگاری برای سنجش عملکرد مدل‌ها، مقایسه‌ی میدان سرعت، میدان غلظت رسوب معلق و تغییرات هندسه بستر بین نتایج شبیه‌سازی و واقعیت بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

۲-۶- الگوی رسوبگذاری در مخزن سدها و برآورد عمر مفید سدها

۲-۶-۱- پیش‌بینی چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها

با ورود جریان رودخانه به مخزن سد، شرایط هیدرولیکی به خصوص سرعت جریان به شدت کاهش و پتانسیل انتقال رسوب رودخانه کاهش می‌یابد. در نتیجه ذرات رسوبی به تدریج نهشته می‌شوند. بار بستر و بخش درشت‌دانه، بار معلق بلافاصله در مناطق ابتدایی مخزن نهشته شده و دلتا را تشکیل می‌دهند. در حالی که بخش ریزدانه بارمعلق تا قسمت‌های عمیق مخزن و حتی تا نزدیک سد هم نفوذ کرده و سپس نهشته می‌شود. مخازنی که تنها یک رودخانه ورودی دارند معمولاً رسوبگذاری در آنها به صورت یکنواخت می‌باشد که این حالت بیشتر تابع شرایط توپوگرافی، هیدرولیکی، خصوصیات رسوب و چگونگی بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. در مخازنی که با تغییرات سطح آب زیاد در سال مواجه هستند، وضعیت رسوبگذاری متفاوت است چرا که بخشی از تپه‌های رسوبی ممکن است مجدداً فرسایش یافته و به نقاط پایین دست مخزن منتقل شوند. معمولاً رسوب در اثر سه عامل به درون مخزن و حتی تا نزدیکی‌های سد منتقل می‌شود که آنها عبارتند از:

- انتقال مواد درشت‌دانه به صورت بار بستر در طول شیب پایین دست دلتا

- انتقال مواد ریزدانه توسط جریان به سمت مخزن

- انتقال مواد بسیار ریزدانه توسط جریان چگال

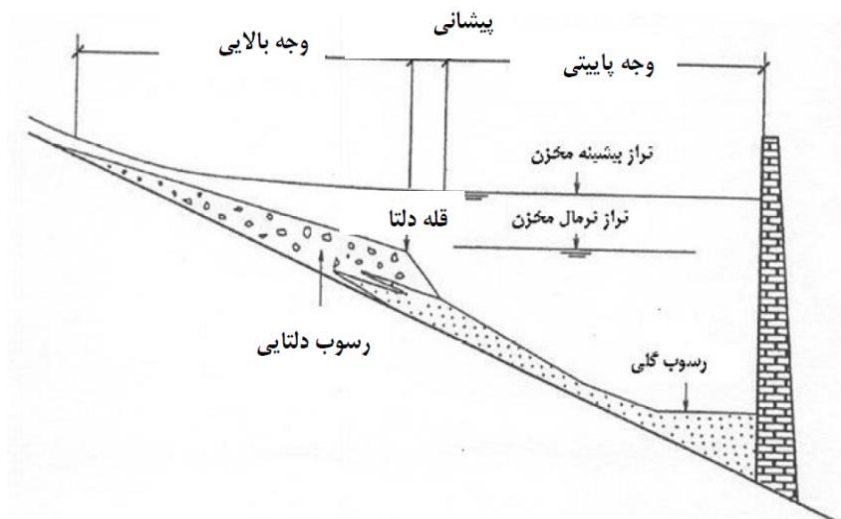
لغزش توده‌ای سواحل نیز از پدیده‌های دیگری است که در تعدادی از سدها اتفاق می‌افتد و ممکن است حجم زیادی رسوب را وارد مخزن کند. همه این عوامل باعث می‌شود که به تدریج بخشی از حجم مخزن توسط رسوب اشغال شود. در مواقعی ممکن است حجم رسوب ورودی به مخزن در مقایسه با حجم مخزن کم باشد ولی به علت ترسیب آنها در مکان‌های نامناسب، مثلاً در محل ورودی به نیروگاه، مشکلات خاصی را ایجاد کند، از این رو پیش‌بینی الگوی توزیع رسوب در مخازن همه سدها بسیار اهمیت دارد.

۲-۶-۲- نیم‌رخ طولی رسوبگذاری

شکل ۱-۲ توزیع طولی رسوبگذاری در یک مخزن سد را به صورت نمونه نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، مخزن سد به سه بازه (وجه بالایی^۱، قله^۲ و پیشانی یا وجه پایینی^۳) تقسیم شده است. در بازه اولی، دلتا با ترسیب مصالح درشت دانه تشکیل می‌شود. در این بازه با افزایش رقوم پیشانی یا نقطه عطف منحنی طولی رسوبگذاری، شیب به تدریج کاهش می‌یابد. انتهای این بازه آخرین مکانی است که مصالح درشت دانه مواد بستر تا آن فاصله منتقل می‌شوند. از این نقطه به بعد مصالح ریزدانه مواد بستر بر روی شیب تند ایجاد شده در جبهه پایین دست دلتا حرکت می‌نمایند ولی در فاصله کمی ترسیب می‌شوند. پس از آن بازه سومی است که عمدتاً مصالح بسیار ریز توسط جریان گل آلود به آن بازه منتقل می‌شوند. شیب این بازه به خصوص در نزدیکی های سد افقی و یا حتی معکوس می‌باشد. در محل سد رسوبات ریز دانه تشکیل دریاچه گل آلود می‌دهند. علاوه بر مصالح بسیار ریز، مواد آلی که توسط آبزیان در درون مخزن تولید شده‌اند نیز در این مکان ترسیب می‌شود. در شرایط نادری مثلاً سیلاب‌های شدید، لغزش دیوارهای مخزن و یا

۱- Topset bed
2- Pivot point
3- Foreset bed

حرکت جریان‌های واریزه‌ای ممکن است سبب انتقال بخشی از مواد درشت دانه به منطقه سوم شود که در این صورت نیم‌رخ عمقی رسوبات به صورت لایه لایه خواهد بود. به طور کلی چهار نوع ترسیب طولی در مخازن سدها تشخیص داده شده است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) نمایش توزیع طولی رسوب گذاری در مخزن سد

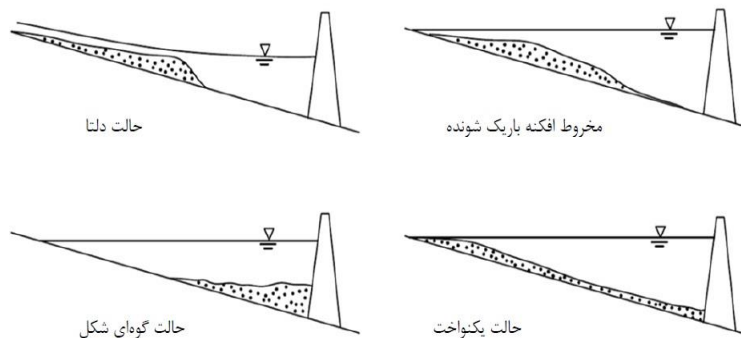
چهار نوع شکل رسوبگذاری نشان داده شده در شکل ۲-۲ به خصوصیات رسوب بستر رودخانه، درصد رسوبات ریزدانه همراه جریان و نوع بهره‌برداری از مخزن بستگی دارد که ذیلا توضیح داده می‌شود:

- رسوبگذاری دلتایی^۱ که بیشتر شامل ذرات درشت دانه (شن و ماسه) و بخش سیلت می‌باشد. این نوع ترسیب در مخازنی که نسبت حجم اولیه مخزن (C) به حجم جریان ورودی (I) زیاد می‌باشد و در آنها تغییرات تراز سطح آب کم می‌باشد، اتفاق می‌افتد.

- رسوبگذاری گوه‌ای^۲ بیشتر در مخازن کوچک و یا مخازن بزرگ که در زمان سیلاب سطح آب بسیار پایین آورده شود، به طوریکه جریان رودخانه‌ای برقرار شود و رسوبات نهشته شده در

-
- 1-Delta silting
 - ۲ -Wedge silting
 - 3-Progressive erosion
 - 4-Retrogressive erosion

دوردست در اثر فرسایش عمومی بستر^۳ و فرسایش پس رونده^۴ به نزدیکی سد منتقل شوند و در مخازنی که نسبت C/I در آنها کوچک و نوع رسوبات ریزدانه هستند و یا این که تغییرات سالانه تراز سطح آب مخزن زیاد است نیز اتفاق می افتد.

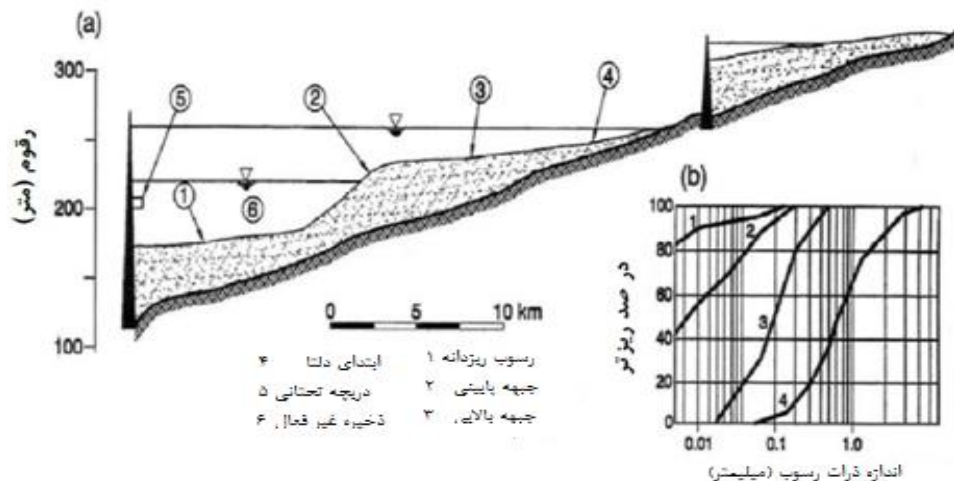


شکل (۲-۲) نمایش چهار نوع ترسیب طولی در مخزن سدها

- رسوبگذاری مخروطی نوع معمول رسوبگذاری در مخازن طویل می باشد. در این نوع رسوبگذاری دانه بندی رسوبات هر چه به سمت سد نزدیکتر شود، ریزتر می گردد.

- رسوبگذاری یکنواخت یا نواری، هر چند که این نوع رسوبگذاری غیرمعمول است ولی ممکن است در مخازن کم عرض با تغییرات سطح آب زیاد اتفاق افتد. چنین نوع رسوبگذاری در مخازنی که نسبت C/I زیاد است رخ می دهد (فان و موریس، ۱۹۹۲).

در شکل ۲-۳ نیز وضعیت رسوبگذاری طولی را در یک مخزن بزرگ طویل نشان می دهد. منحنی دانه بندی رسوبات ترسیب شده نیز در این شکل نشان داده شده است. البته به علت متغیرهای بسیار زیادی که در عمل ترسیب دخالت دارند، این نوع رسوبگذاری ممکن است در مخازن دیگر اتفاق نیفتد و یا به عبارتی پروفیل طولی رسوبگذاری از مخزنی به مخزن دیگر متفاوت باشد (هوللی و راهول، ۱۹۹۰).



شکل (۲-۳) نمایش مناطق رسوبگذاری طولی در مخزن بزرگ و طولانی

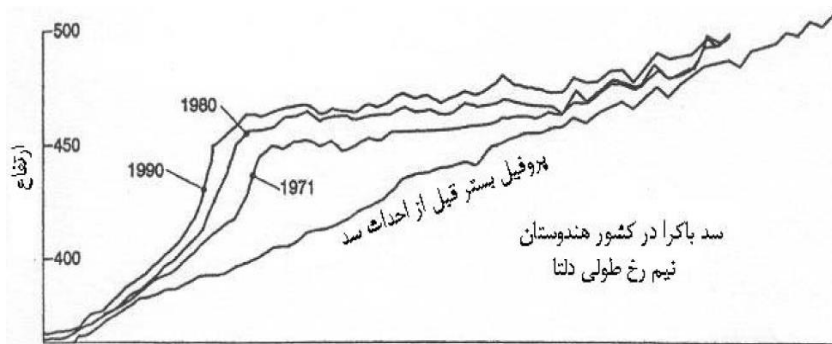
۲-۶-۳- دلتا

دلتا در محل ورود رودخانه به مخزن تشکیل و به تدریج به پایین دست و بالادست کشیده می‌شود. به طور کلی دلتاهای تشکیل شده در مخازن سدها دارای سه مشخصه می‌باشند:

- شیب جبهه بالایی و جبهه پایین دست قله کاملاً با هم متفاوت هستند به طوری که شیب جبهه بالایی بسیار کم تر از شیب جبهه پایینی قله است.
- دانه بندی رسوبات نیز در جبهه بالادست و جبهه پایین دست قله کاملاً متفاوت می باشد. دانه بندی ذرات رسوبی در جبهه بالایی قله درشت تر از جبهه پایینی قله است.
- تراز قله بستگی به نوع بهره‌برداری از مخزن سد و عمق مخزن دارد. در مخازن عمیق که در ترازهای متفاوتی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، دلتاها در ترازهای مختلفی تشکیل شده‌اند.

شکل ۲-۴ وضعیت تشکیل و توسعه دلتا را در سد باکرا در کشور هند نشان می‌دهد (هوللی و راهول، ۱۹۹۰). در سد گوانتینگ در کشور چین، دلتا ابتدا با سرعت ۳ کیلومتر در سال به سمت پایین دست و همزمان با سرعت ۲/۶ کیلومتر در سال به بالادست کشیده شد. با رسیدن دلتا به نقاط عمیق و عریض مخزن، سرعت رشد آن کاهش می‌یابد با توسعه دلتا به سمت پایین دست، ذرات درشت دانه بر روی ذرات ریزدانه ترسیب می‌شوند. مصالح درشت دانه نظیر قلوه سنگ باعث تشکیل توده‌ای عظیم دلتا می‌شود و با بالا آمدن سطح آب مخزن در زمان ورود سیلاب، دلتا به

سمت بالادست کشیده خواهد شد، زیرا ذرات درشت دانه با سرعت نهشته می‌شوند. بدیهی است با پایین رفتن سطح آب مخزن و ایجاد جریان رودخانه‌ای بخشی از دلتا مجدداً توسط جریان رودخانه ای فرسایش می‌یابد.

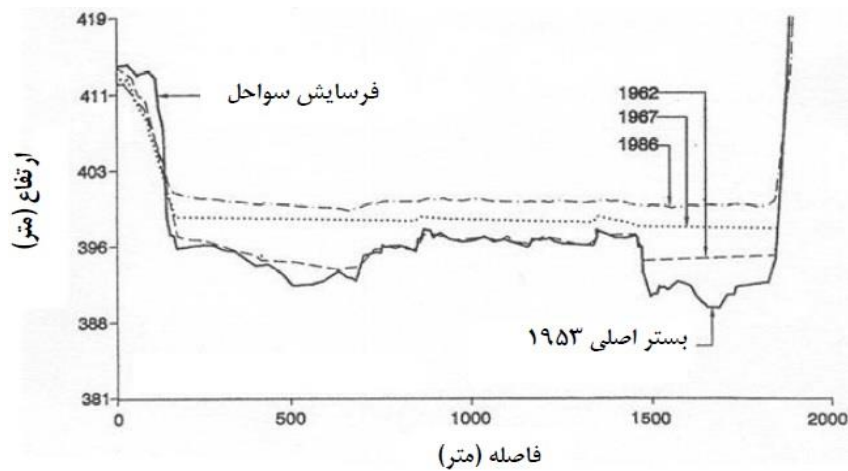


شکل (۲-۴) - وضعیت تشکیل و توسعه دلتا در سال‌های مختلف، سد باکرا در کشور هند

رشد دلتا را می‌توان با اطلاع از مقدار شیب دلتا پیش‌بینی کرد و از این طریق تراز سطح آب در زمان سیلاب را می‌توان برآورد کرد. همان‌طور که در شکل ۲-۴ دیده می‌شود، دلتا دارای دو شیب کند و تند به ترتیب در وجه بالایی و پیشانی آن است. شیب دلتا مهم‌ترین پارامتری است که بر اساس آن می‌توان طول بالا آمدن بستر رودخانه بالادست و حجم رسوب ذخیره شده را تعیین کرد.

۲-۶-۴- نیم‌رخ عرضی رسوبگذاری

شکل ۲-۶ مقطع عرضی مخزن سدی را در سال‌های مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، رسوب ابتدا در قسمت‌های عمیق مقطع عرضی ترسیب می‌شود و این عمل آنقدر ادامه دارد تا یک سطح هم‌تراز با سایر نقاط مقطع ایجاد گردد (هوللی و راهول، ۱۹۹۰). سپس رسوبگذاری تقریباً در تمام عرض صورت خواهد گرفت. البته کاهش سطح آب مخزن و احیانا برقراری جریان رودخانه‌ای در مخزن ممکن است فرسایش‌هایی را در بخش‌هایی از مقطع عرضی به وجود آورد که با بالا آمدن سطح آب مخزن و نهشته شدن مواد مجدداً این مناطق پر خواهد شد.



شکل (۲-۶)-مقطع عرضی مخزن سد فرانسس در سال‌های مختلف بهره‌برداری

- دلایل این که چرا مصالح رسوبی ابتدا در خط‌القعر (تالوگ) رودخانه ترسیب می‌شوند، عبارتند از:
- انتقال مواد توسط جریان چگال که دارای غلظت رسوب زیاد می‌باشد از خط‌القعر صورت می‌گیرد که باعث ترسیب تدریجی می‌شود.
 - با توجه به تغییرات غلظت در عمق و این که غلظت رسوب همیشه در کف بیش‌تر است، نقاطی از عرض رودخانه که عمق بیشتری دارند دارای غلظت رسوب بیش‌تری نسبت به سایر نقاط عرض رودخانه هستند. در نتیجه در صورت ایجاد شرایط رسوبگذاری در کل عرض، رسوبات بیش‌تری در مکان‌های عمیق‌تر ترسیب می‌شود.
 - حتی اگر فرض شود که رسوبگذاری در عرض مخزن به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد، مطمئناً با توجه به این که رسوبگذاری به عمق آب بستگی دارد، نرخ رسوبگذاری در محل‌های عمیق بیش‌تر خواهد بود (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۷- عمر مفید مخزن سد^۱

مخازن سدها به تدریج از رسوب پر می‌شود و مدت زمانی که حجم باقیمانده مخزن آنقدر کم باشد که اهداف مورد نظر اولیه ساخت مخزن یعنی کنترل سیل، تنظیم آب و تولید انرژی را تامین نکند، مخزن سد دیگر سودی نداشته باشد. این مدت زمان به عوامل زیادی از جمله به میزان رسوب نهشته شده در مخزن، وزن مخصوص رسوب نهشته شده و شرایط بهره‌برداری از مخزن بستگی دارد.

۲-۷-۱- راندمان تله اندازی^۲

راندمان تله اندازی مخزن عبارت است از درصدی از میزان رسوب ورودی که در یک دوره مشخص در مخزن باقی می‌ماند. به عبارت ریاضی می‌توان نوشت:

$$T_e = \frac{Q_{SI} - Q_{SO}}{Q_{SI}} \times 100 \quad (۳-۲)$$

که در آن: T_e راندمان تله اندازی برحسب درصد، Q_{SI} حجم رسوب ورودی به مخزن سد در سال، Q_{SO} حجم رسوب خروجی از مخزن سد در سال می‌باشند. با توجه به این که مقدار رسوب ورودی یا رسوب خروجی و یا هر دو نسبت به زمان تغییر می‌کنند، راندمان تله‌اندازی نیز یک متغیر زمانی است و در طول عمر مخزن تغییر می‌کند به طوری که ممکن است میزان راندمان تله اندازی تا ۵۰ درصد نسبت به مقدار اولیه آن تغییر کند. تعیین راندمان تله اندازی از این نظر اهمیت دارد که با استفاده از آن می‌توان حجم از دست رفته مخزن را در هر سال بر آورد کرد.

مقدار تلفات حجم مخزن که سالانه پر از رسوب می‌شود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha = \frac{Q_{SI} - Q_{SO}}{C_t} \quad (۴-۲)$$

۱-Reservoir useful life

۲-Trap efficiency

که در آن C_t حجم مخزن در ابتدای هر سال می‌باشد. با ضرب کردن سمت راست معادله فوق در $\frac{Q_{SI}}{Q_{SI}}$ می‌توان نوشت:

$$\alpha = \frac{Q_{SI} - Q_{SO}}{Q_{SI}} \times \frac{Q_{SI}}{Q_{SI}} = T_e \frac{Q_{SI}}{C_t} \quad (5-2)$$

که در آن: Q_{SI} وزن رسوب ورودی به مخزن می‌باشد.

بنابراین با داشتن مقدار T_e و Q_{SI} حجم رسوب ورودی سالانه از رابطه (۵-۲)، می‌توان مقدار درصد تلفات حجم مخزن در هر سال را محاسبه کرد.

۲-۷-۲- برآورد عمر مفید مخزن سد

عمر مفید سد، مدت زمانی است که مخزن سد کاربرد دارد. عمر مفید سد بیشتر مربوط به از دست رفتن حجم مفید مخزن به دلیل نهشته شدن رسوب است تا به مسایل سازه‌ای. (استراند، ۱۹۸۷) تاکید دارد که درصدی از حجم تمام مخازن سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های طبیعی در اثر ورود رسوب پر می‌شود و موضوع مهم در زمان طراحی و برنامه‌ریزی سد این است که بتوان مدت زمانی که مخزن سد چندان از رسوب پر خواهد شد تا نتوان از آن بهره‌برداری مفید کرد، را پیش بینی نمود.

با توجه به مطالبی که در این بخش ارائه شد می‌توان سه مرحله رسوبگذاری را در طول عمر مفید مخزن بیان کرد که عبارتند از:

مرحله یک: رسوبگذاری مداوم^۱

احداث سد باعث تغییر شرایط جریان از جریان رودخانه‌ای به جریان درون مخزن می‌گردد. این تغییر شرایط جریان همراه است با کاهش سرعت و افزایش رسوبگذاری به طوری که مصالح رسوبی درشت دانه بلافاصله ترسیب می‌گردند و دلتا را تشکیل می‌دهند. در حالی که رسوبات ریزدانه

۱-Continuous sediment trepping

2-Floodplain growing

توسط جریان‌های چگال ممکن است تا نزدیک بدنه سد هم منتقل شوند. رسوبات ریزدانه که به درون مخزن نفوذ می‌کنند ابتدا خط القعر رودخانه را پر می‌کنند و پس از آن در منطقه سیلابی رودخانه نهشته می‌شوند.

مرحله دو: رشد منطقه سیل‌گیر رودخانه^۲

در موقعیت‌های خاصی از مخزن تعادلی بین رسوبگذاری مداوم و فرسایش به وجود می‌آید که باعث کاهش درصد نهشته شدن رسوب نسبت به مرحله یک می‌گردد. این شرایط وقتی به وجود می‌آید که تراز رسوب به تراز لبه تاج سد رسیده باشد در چنین حالتی جریان رودخانه‌های در بستر مخزن به وجود خواهد آمد به طوری که کانال اصلی در مخزن شکل می‌گیرد که تراز کف آن در محل تاج با تراز لبه تاج یکی خواهد بود. در چنین شرایطی رسوب ورودی در زمان‌های سیلابی در مسیل کانال اصلی نهشته شده به طوری که تراز منطقه سیل‌گیر به تدریج بیش‌تر از تراز لبه تاج سرریز خواهد شد. مشابه الگوی فوق یعنی تشکیل کانال اصلی و مسیل‌ها در زمان رسوب‌زدایی مخازن سدها نیز به وجود می‌آید. در این شرایط تراز کف کانال اصلی با تراز لبه دریچه‌های تحتانی یکسان می‌شود. البته در زمانی که سطح آب مخزن بالا است (مخزن پر) کانال اصلی و مسیل‌ها کاملاً مستغرق شده و رسوبگذاری مجدداً باعث پرشدن کانال اصلی خواهد شد.

مرحله سه: بیلان کامل رسوب^۱

این مرحله وقتی است که میزان رسوب ورودی با رسوب خروجی برابر باشد. در این مرحله دلتا به بدنه سد رسیده است و عملاً جریان رودخانه‌ای در مخزن برقرار می‌گردد. در این مرحله راندمان تله اندازی صفر می‌باشد. با توجه به مراحل فوق به نظر می‌رسد که مرحله دو پایان عمر مفید سد باشد. از آنجا که بیشتر سدها در سال‌های اخیر احداث شده‌اند. بنابراین عمدتاً در مرحله

1 -Full sediment balance

2- Design life

یک رسوبگذاری قرار دارند و یا به عبارتی هنوز عمر مفید آنها تمام نشده است. در رابطه با عمر مفید مخزن تا کنون چندین تعریف ارائه شده است که عبارتند از:

عمر طرح^۲ عبارت است از دوره‌ای که برای برنامه ریزی مخزن در نظر گرفته شده است. برنامه ریزی و مطالعات اقتصادی معمولاً بر پایه مدت زمانی است که از ۵۰ سال تجاوز نمی‌کند در حالی که در زمان مطالعات حجمی معادل رسوب صد ساله در نظر می‌گیرند.

عمر پروژه^۱ در حقیقت دوره‌ای است که در آن مدت مخزن بتواند با توجه به اهداف اولیه ساخت آن عملکرد مناسبی داشته باشد. چنانچه مخزن سد پس از مدتی و در اثر نهشته شدن رسوبات نتواند اهداف اولیه را تامین کند، در آن صورت عمر پروژه به اتمام رسیده است. هر چند که بهره‌برداری از سد برای اهداف دیگری ممکن است ادامه یابد.

عمر اقتصادی^۲ دوره‌ای است که مزایای اقتصادی بهره‌برداری از سد بیشتر از هزینه‌های آن باشد. عمر مفید^۳ دوره‌ای است که در آن مدت مخزن سد مطابق اهداف اولیه و اهداف اصلاح شده مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بهره‌برداری مخزن پس از دوره عمر مفید مخزن اقتصادی نیست ولی به دلایل مختلفی چون اجتماعی، سیاسی، زیست محیطی و یا مسایل دیگر از آن بهره‌برداری می‌گردد. معمولاً سدها در پایان عمر مفید یا رها می‌شوند و یا این که تخریب می‌گردند (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۸- روش‌های پیش‌بینی الگوی رسوبگذاری

۲-۸-۱- روش‌های تجربی

با رسوبگذاری تدریجی در مخزن، منحنی ارتفاع - حجم مخزن نیز تغییر می‌کند. برای پیش‌بینی نحوه تغییرات این منحنی، روش‌های تجربی برای برآورد توزیع رسوب در مخزن به وجود آمده‌اند. این روش‌ها هر چند به دقت روش‌های عددی نیستند ولی خیلی سریع‌تر هستند و به

1-Project life
2-Economic life
3- Useful life

داده‌های اولیه کم‌تری نیاز دارند. پس از انجام عملیات نقشه برداری مخزن، از الگوی مشاهده شده توزیع رسوب می‌توان نوع روش تجربی مناسب را برای پیش‌بینی توزیع آن درآینده انتخاب کرد. توجه شود که روش‌های تجربی نمی‌توانند موقعیت نهشته شدن رسوبات را در مخزن پیش‌بینی کنند و تنها می‌توان با این روش‌ها تغییرات ایجاد شده در روابط ارتفاع - حجم و ارتفاع - سطح مخزن را پیش‌بینی کرد. اساس روش‌های تجربی بر مبنای مشاهدات و اندازه‌گیری‌های مخازن ساخته شده موجود پایه‌گذاری شده است. قابلیت روش‌های تجربی تنها به چند خصوصیت که ممکن است در ارزیابی اولیه این فرایند اهمیت داشته باشند، محدود می‌شود. مسلماً عمومیت دادن به این روش‌ها برای تمام مخازن صحیح نمی‌باشد. سادگی و فقدان داده‌های مورد نیاز برای آنالیز روند رسوبگذاری نسبت به روش‌های عددی از دلایل بکارگیری این روش‌ها در شرایط مختلف می‌باشد (صادقی عامل، ۱۳۸۱).

روش‌های تجربی مختلف جهت برآورد الگوی ته نشینی رسوبات در مخازن سدها عبارتند از:

- روش افزایش سطح

- روش کاهش سطح

- روش برلند

- روش چین

- روش هوبز

- روش سزچوکز و کوارشی

- روش گارد و همکاران

از میان روش‌های تجربی فوق‌الذکر، روش تجربی کاهش سطح از دقت و کارایی بالای برخوردار می‌باشد که در مقایسه با روش‌های دیگر بیشتر مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد.

۲-۸-۱-۱- روش تجربی کاهش سطح^۱

این روش در حقیقت یک روش ریاضی مبتنی بر اصول مشاهده‌ای در مخزن سد می‌باشد، در حال حاضر برای پیش‌بینی وضعیت رسوبگذاری در مخازن سدهای در دست طراحی و همچنین در مورد سدهای ساخته شده، کاربرد روش‌های تجربی- ریاضی سریع و کم هزینه و اغلب با ضریب اطمینان بالایی همراه بوده است (موترجا، ۱۹۸۶).

تئوری محاسبه عمق رسوب و تعیین چگونگی توزیع رسوبات در مخازن اولین بار توسط برلند و میلر در سال ۱۹۵۸ با مطالعه بر روی ۳۰ سد در آمریکا ارائه و سپس توسط مودی در سال ۱۹۶۲ اصلاح گردید. این دو محقق با مطالعه و بررسی اطلاعات حاصل از عمق یابی مخزن و رسوبگذاری واقعی در مخازن به این نتیجه رسیدند که رابطه‌ای بین شکل مخزن و درصد رسوبات ته نشین شده در ترازهای مختلف مخزن وجود دارد که این روش نیز بر پایه همین تئوری استوار می‌باشد. مساحت نسبی رسوبات هر یک از تیپ‌های مخازن در جدول ۲-۳ ارائه شده است، در این جدول a مساحت نسبی و p عمق نسبی می‌باشد، ستون ۳ این جدول روابط اصلاح شده توسط مودی را نشان می‌دهد (USBR, 1962).

1962)

جدول (۲-۳)- روابط به دست آمده توسط بورلند و میلر برای مساحت نسبی رسوب

مودی	بورلند و میلر	تیپ مخزن
$a = 5.074P^{1.85}(1 - P)^{0.35}$	$a = 3.417P^{1.5}(1 - P)^{0.2}$	I
$a = 2.487P^{0.57}(1 - P)^{0.41}$	$a = 2.324P^{0.5}(1 - P)^{0.4}$	II
$a = 16.967P^{1.15}(1 - P)^{2.32}$	$a = 15.8820P^{1.1}(1 - P)^{2.3}$	III
$a = 1.486P^{-0.25}(1 - P)^{1.34}$	$a = 4.232P^{0.1}(1 - P)^{2.5}$	IV

^۱ -Empirical area reduction method

شکل و تیپ مخزن از طریق ترسیم رابطه حجم-ارتفاع مخزن بر روی یک کاغذ تمام لگاریتمی و محاسبه عکس شیب خط (m) بدست آمده، مشخص می‌گردد، جدول ۲-۴ طبقه بندی مخازن سد را از نظر شکل و تیپ مخزن نشان می‌دهد، که در آن پارامتر (m) عکس شیب خط می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۷۶).

جدول (۲-۴) - تیپ استاندارد مخازن در روش کاهش سطح

پارامتر (m)	نوع مخزن	درجه بندی مخزن
۳/۵ - ۴/۵	دریاچه‌ای	تیپ I
۲/۵ - ۳/۵	دشت سیلابی	تیپ II
۱/۵ - ۲/۵	تپه‌ای	تیپ III
۱ - ۱/۵	دره‌ای	تیپ IV

مراحل محاسباتی تعیین نحوه توزیع رسوبات به روش کاهش سطح به صورت زیر می‌باشد: در این روش اول تراز رسوب در پشت سد حدس زده می‌شود. سپس عمق دریاچه در ترازهای مختلف مخزن بر کل ارتفاع (حد فاصل حداکثر رقوم سطح آب در مخزن تا کف سد) تقسیم بندی می‌شود. در ادامه با توجه به رابطه ذیل پارامتر A_p با نام مساحت نسبی بدون بعد بدست می‌آید.

$$A_p = c \cdot p^m \cdot (1 - p)^n \quad (۲-۶)$$

که در این رابطه c ، m و n اعداد ثابت بدون بعدی هستند که از جدول ۲-۵ استخراج می‌گردد.

جدول (۵-۲) - مقادیر c ، m و n جهت تعیین مساحت نسبی بر حسب نوع مخزن

نوع مخزن	حد انباشت رسوبات	C	M	N
تیپ ۱	بالا	۵/۰۷۴	۱/۸۵	۰/۳۵
تیپ ۲	بالا تر از حد وسط	۲/۴۸۷	۰/۵۷	۰/۴۱
تیپ ۳	پایین تر از حد وسط	۱۶/۹۶۷	۱/۱۵	۲/۳۲
تیپ ۴	پائین	۱/۴۸۶	-۰/۲۵	۱/۳۴

برای تعیین مساحت رسوبگذاری شده در عمق p ، ابتدا منحنی A_p مطابق با مخزن سد مورد نظر مشخص و سپس عدد ثابت k را که معادل $\frac{A_0}{A_p}$ می باشد، برای ارتفاع صفر حدس زده محاسبه می نماییم. ارتفاع صفر ارتفاعی است که حجم پائین تر از آن کاملاً توسط رسوب پوشیده شده است. در عبارت فوق، A_0 مساحت در ارتفاع صفر می باشد که از منحنی سطح - ارتفاع مخزن بدست می آید و A_p مساحت نسبی در عمق نسبی مربوط به ارتفاع صفر می باشد که از رابطه ۲-۶ بدست می آید. پس از محاسبه k از حاصلضرب k در A_p مساحت رسوبگذاری شده در ارتفاع های بیش از صفر محاسبه می شود. مساحت رسوبگذاری شده در پائین تر از ارتفاع صفر برابر مساحت اصلی سطح مخزن سد می باشد (صادقی عامل، ۱۳۸۱).

معادله اساسی در روش کاهش سطح به قرار زیر است:

$$S = \int_0^{Y_0} A dy + \int_{Y_0}^H K \cdot a \cdot dy \quad (۷-۲)$$

در این معادله متغیرهای به کار رفته عبارتند از: S حجم کل رسوب که در مخزن نهشته می شود، H ارتفاع مخزن در تراز عادی، Y_0 تراز بستر رسوبات پس از انباشت رسوب، A سطح مخزن در ترازهای مختلف، dy جزر ارتفاع، a سطح نسبی رسوب است که پس از انتخاب نوع مخزن، مقادیر آن به ازای مقادیر مختلف عمق نسبی p قابل محاسبه است، K ضریب تناسب جهت تبدیل سطح نسبی رسوب به سطح واقعی و از رابطه (۵-۲) به دست می آید:

$$K = \frac{A_0}{a_0} \quad (8-2)$$

که در آن: A_0 سطح واقعی مخزن در تراز Y_0 ، a_0 سطح نسبی مخزن در تراز Y_0

ترم اول معادله ۷-۲ حجم رسوبات نهشته شده از کف تا ارتفاع Y_0 و ترم دوم آن حجم رسوبات از تراز Y_0 تا تراز نرمال سد خواهد بود.

با انتگرال گیری از معادله اخیر و پس از ساده نمودن، معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{1 - v_0}{a_0} = \frac{S - V_0}{HA_0} \quad (9-2)$$

که در آن: v_0 و V_0 حجم نسبی و واقعی مخزن در تراز Y_0 ، a_0 و A_0 سطح نسبی و واقعی مخزن در تراز Y_0 می باشد.

در روش مودی هدف محاسبه Y_0 ، یعنی تعیین عمق رسوبات نهشته شده در مخزن می باشد. جهت تعیین Y_0 توابع $h(p)$ و $h'(p)$ به صورت زیر تعیین می شوند:

$$h(p) = \frac{1 - V(p)}{a(p)} \quad (10-2)$$

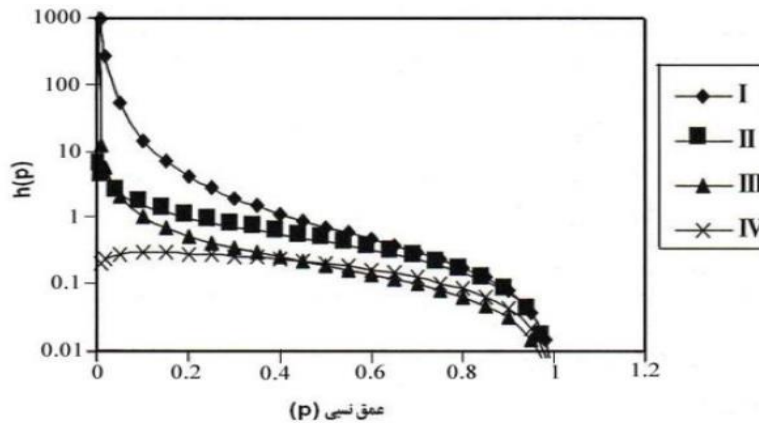
$$h'(p) = \frac{S - V(Y)}{H \cdot A(Y)} \quad (11-2)$$

با توجه به اینکه $P = \frac{Y}{H}$ است، در نتیجه:

$$h'(p) = \frac{S - V(P.H)}{H_0 \cdot A(P.H)} \quad (12-2)$$

که در آنها: H ارتفاع کف مخزن تا تراز نرمال سطح آب مخزن، $h(p)$ تابعی از عمق نسبی، حجم نسبی مخزن براساس یکی از چهار نوع مخزن، $h'(p)$ تابعی از عمق، سطح و حجم مخزن و نیز حجم رسوبات درون مخزن برای مخزن مورد نظر، $V(P.H)$ ظرفیت مخزن در تراز داده شده، S حجم کل رسوبات ورودی به مخزن که نهشته می شود، $A(P.H)$ سطح مخزن در تراز داده شده می باشد (راهنمای

مطالعات رسوبگذاری و رسوب زدایی مخازن سدها، (۱۳۹۱). در شکل ۷-۲ منحنی‌های $h(p)$ برحسب عمق نسبی P برای هر یک از تیپ‌های مختلف نشان داده شده است (استراند و پمبرتون، ۱۹۸۲).



شکل (۷-۲) منحنی‌های $h(p)$ برحسب عمق نسبی (P)

با توجه به معادله ۹-۲ ملاحظه می‌گردد که برای محاسبه عمق رسوبات در سدها باید معادلات ۲-۱۰ و ۲-۱۱ با یکدیگر مساوی شوند. این کار به صورت نموداری می‌تواند انجام گیرد. با رسم مقادیر $h'(p)$ از رابطه ۲-۱۲ بر روی شکل ۷-۲ و امتداد آن تا جایی که منحنی مربوط به معادله ۹-۲ را که برای انواع مختلف مخازن رسم شده قطع نماید. محل تلاقی خط رسم با منحنی مربوط به مخزن در دست مطالعه مقدار P یا عمق نسبی رسوبات است، مقدار Y_0 از ضریب P در H تعیین می‌شود (شفاعی بجزستانی، ۱۳۹۴).

۲-۸-۱-۲- روش تجربی افزایش سطح^۱

فرض اساسی در این روش براین است که احجام رسوبگذاری یکسان، با ضخامت یکسانی در مخزن ترسیب می‌شوند. البته توزیع رسوبگذاری از یک مخزن به مخزن دیگر متفاوت است ولی قابل پیش بینی است. هندسه‌ی مخزن، نوع بهره‌برداری و دانه بندی رسوب تماماً روی نحوه‌ی توزیع رسوب تاثیر می‌گذارند. روش افزایش سطح که بر پایه اصول ریاضی استوار می‌باشد اولین بار توسط

^۱ -Area-increment method

^۲ - E.A.cristofano

کریستوفانو^۲ ارائه گردیده است. در این روش نهشته شدن رسوبات در یک مخزن توسط افزایش مساحت مخزن در هر ارتفاع به مقدار ثابت تخمین زده می‌شود. این روش به کمک رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$S = A_0(H - Y_0) + V_0 \quad (۱۳-۲)$$

که در آن: S حجم رسوباتی که باید در مخزن توزیع گردد (متر مکعب)

A_0 مساحت اولیه مخزن در ارتفاع صفر جدید در محل

H عمق مخزن در حداکثر سطح نرمال آب (متر)

Y_0 عمق رسوبات ته نشین شده بر حسب متر (ارتفاع صفر جدید)

V_0 حجم رسوبات در زیر ارتفاع صفر جدید (متر مکعب)

رابطه‌ی ۱۳-۲ در حقیقت بیانگر این مطلب است که کل حجم رسوبات S شامل قسمتی است که به طور یکنواخت در ارتفاع بالای Y_0 توزیع می‌شود و قسمتی که در زیر ارتفاع صفر نهشته شده است (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۴).

۲-۸-۲- روش‌های ریاضی^۱

با پیدایش رایانه‌ها و راه‌کارهای جدید برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت آب و رسوبات، مدل‌های ریاضی متعددی با فرضیات ساده کننده و درجه‌های مختلف دقت به منظور شبیه‌سازی روند رسوبگذاری در مخزن سدها بوجود آمدند. به دلیل دشواری عملیات اندازه‌گیری مستقیم رسوبات نهشته شده در مخازن و بالا بودن هزینه‌های آن و همچنین عدم دقت روش‌های تجربی برای کلیه سدها، مدل‌های ریاضی و رایانه‌ی به عنوان ابزار بسیار مفید و کارآمد مورد توجه و

۱ - Mathematical models, Numerical models

استفاده قرار گرفته‌اند.

برنامه‌های رایانه‌ای را می‌توان براساس موارد زیر طبقه بندی کرد:

- متغیرهای محاسبه شده در مدل

- ابعاد محاسبات

- ویژگی روش‌های عددی به کار رفته شده در مدل

بسیاری از برنامه‌های رایانه‌ای برای کاربرد ویژه نوشته شده‌اند. اما امروزه تعداد زیادی برنامه‌های پیشرفته وجود دارند به طوری که قادر به تحلیل مسائل مختلفی می‌باشند. مدل شبیه سازی روند حرکت رسوبات در مخزن بر پایه معادلات اندازه حرکت و پیوستگی جریان، معادله پیوستگی رسوب و معادله انتقال رسوب تهیه می‌شود. یک مدل مناسب باید بتواند تمام پدیده‌های موثر در انتقال، توزیع، ته نشینی و آبستگي و جریان غلیظ را در مخزن سد در نظر گرفته و شبیه‌سازی نماید.

به منظور کاربردی کردن مدل‌ها، محققین با در نظر گفتن فرضیات ساده کننده، روش‌هایی را در جهت حل معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت و پیوستگی آب و رسوب ارایه نموده‌اند. فرضیات اعمال شده در این روش‌ها از جهاتی شبیه به هم می‌باشند. اهم این فرضیات و ساده‌سازی‌ها به شرح زیر است:

الف- اهمیت بیشتر طول نسبت به دو بعد دیگر و یا به عبارتی فرض انتقال جریان و رسوب در یک بعد از آنجا که طول در مسیر رودخانه چندین برابر بزرگتر از عرض و عمق است، تقریب یک بعدی جریان قابل توجیه خواهد بود.

ب- اختلاف زیاد تغییرات تراز سطح آب و بستر رودخانه یا مخزن و یا به عبارتی فرض می‌شود که تغییرات تراز سطح آب که ناشی از تغییرات بده است، چندین برابر سریع تر از عکس‌العمل بستر نسبت به این تغییرات می‌باشد. این فرض حل مستقل معادلات جریان آب و انتقال رسوب را ممکن

می‌سازد.

ج- ثابت فرض کردن بده جریان و صرف نظر از عوامل اینرسی در معادلات حرکت در حل مسایل معادلات یک بعدی جریان آب به شکل معادلات معروف سنت-ونانت در نظر گرفته می‌شوند. چون تغییرات بده رودخانه نسبت به زمان آرام است لذا عبارات مربوط به اینرسی معادله اندازه حرکت خیلی کوچک‌تر از دیگر عبارات می‌باشد.

د- دانش ناقص انتقال رسوبات. استفاده از روابط تجربی انتقال رسوبات، علیرغم عدم انطباق شرایط برقراری معادلات مذکور با شرایط حاکم در مخزن.

ه- به دلیل وضعیت هندسی بسیار نامنظم مجرای رودخانه‌های طبیعی، فقط روش‌های عددی قابل توجیه بوده و محاسبات باید مرحله به مرحله از بازه‌ای به بازه دیگر دنبال شوند.

بنابراین ضمن اعمال فرضیات ساده‌کننده فوق‌الذکر، به ازاء یک سری بده‌های ثابت و معلوم، نیم‌رخ سطح آب از پایین دست به طرف بالادست مخزن با استفاده از روش‌های گام‌به‌گام انجام می‌گیرد. محاسبات انتقال و رسوبگذاری یا فرسایش نیز از طرف بالادست بطرف پایین دست مخزن، بازه به بازه با استفاده از فرمول‌های متداول در هیدرولیک رسوب انجام می‌پذیرد. رسوب ورودی از بازه‌ای به بازه دیگر به حالت تعادل در آمده و سرانجام به تغییر شکل بستر رودخانه منجر می‌گردد (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۴).

۲-۸-۱-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم اساسی مورد استفاده در مدل‌های ریاضی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود،

در مدل‌های یک بعدی معادلات سنت و نانت^۱ به صورت زیر می‌باشد.

^۱ - Saint Venant Equations

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (14-2)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\beta Q^2 / A \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (15-2)$$

که در آن h عمق آب، Q دبی آب، β ضریب توزیع سرعت، q_1 دبی ورودی یا خروجی جانبی، C ضریب شزی، R شعاع هیدرولیکی، x در جهت جریان، $\frac{\partial y}{\partial x}$ بیانگر شیب بستر و g شتاب ثقل می باشد. یک شکل معمول از رابطه‌ی اندازه حرکت که در رودخانه‌ها و کانال‌ها استفاده می شود به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{gn^2}{\delta^2 R^{g/3}} u^2 \quad (16-2)$$

که در آن u سرعت طولی متوسط گیری شده در مقطع، t زمان، x راستای افقی در امتداد طولی، g شتاب ثقل، n ضریب زبری مانینگ نماینده‌ی اثر مقاومت از زبری بستر و کناره‌ها در مقابل جریان، h ارتفاع سطح آب نسبت به تراز مبنای مقایسه و R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان هستند. در این رابطه فرض بر آن است که شیب آبراهه اندک می باشد.

معادله یک بعدی غلظت رسوب معلق به شکل زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial(A \cdot C)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_t) \cdot A \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right] + S_u \cdot A + S_p \cdot A \cdot C \quad (17-2)$$

که در آن C غلظت رسوب معلق، v لزجت سیال، v_t لزجت گردابه‌ای، S_u و S_p ضرایب مربوط به جملات منبع می باشند.

معادله پیوستگی رسوب:

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial Q_t}{\partial x} = q_{LS} \quad (18-2)$$

و با در نظر گرفتن $\frac{\partial A_s}{\partial t} = \frac{\partial Z_b W^1}{\partial t}$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-P)W^1} \frac{\partial Q_t}{\partial X} = \frac{q_{LS}}{W^1} \quad (19-2)$$

که در رابطه فوق Q_t میزان کل رسوب انتقالی که شامل بار بستر و بار معلق می‌باشد، A_s سطح مقطع مربوط به کف کانال، p تخلخل، q_{LS} میزان دبی رسوبی جانبی در واحد طول، Z_b تراز کف و W^1 عرض متوسط جریان می‌باشد (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۴).

۲-۲-۸-۲- روش‌های حل معادلات

بهترین روش برای معادلات دیفرانسیل جزئی که با شرایط مرزی معین تعیین می‌شود، بدست آوردن حل تحلیلی آنهاست، ولی گاهی اوقات تحلیل مسائل در شکل بی‌قاعده و نامنظم با شرایط مرزی مختلف و ناحیه‌های با مشخصات متفاوت و یا غیر خطی بسیار مشکل و غیر ممکن می‌گردد. بنابراین باید در صورت بروز چنین مشکلاتی روش‌های تحلیل محاسباتی را برای بدست آوردن حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی بکار گرفت. بعضی از روش‌های عددی برای حل مسائل پیوسته عبارتند از (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۴):

۱- روش تفاضل محدود^۱

۲- روش اجزاء محدود^۲

۳- روش حجم محدود^۳

۱ - Finite difference method

2- Finite element method

3- Finite volume method

۲-۹- انواع مدل‌های ریاضی موجود

مدل‌های مختلف ارائه شده بر پایه نظریه انتقال رسوب، از لحاظ قابلیت شبیه سازی جریان آب و رسوب به صورت یک بعدی یا چند بعدی و روش‌های حل در نظر گرفته شده در آنها و شرایط مرزی و همچنین در نظر گرفتن پدیده‌های همانند تشکیل لایه محافظ، جریان غلیظ، تغییرات هندسی مقطع و غیره، دارای انواع مختلفی می‌باشند. برخی از روش‌های ریاضی که در آنها از تئوری انتقال رسوب استفاده شده است عبارتند از (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۴):

مدل - SED2WES	مدل - MIKE11
مدل - GSTARS3	مدل - CCEHE1D
مدل - SSIIM	مدل - FLOW-3D
مدل - BRI-STARS	مدل - TABS
	مدل - HEC-RAS4.1

۲-۱۰- مروری بر تحقیقات گذشته

تاکنون بسیاری از محققین به کمک روابط تجربی و نرم افزارهای HEC-RAS4.1، GSTARS3، CCHE2D، MIKE 11 و غیره، اهداف پژوهشی خود را مورد بررسی قرار داده‌اند که اهم آنها به شرح زیر است.

فرشادی و همکاران، (۱۳۸۹) میزان رسوبات ورودی به مخزن سد گتوند علیا را با استفاده از نرم افزار HEC-RAS 4.0 تخمین زدند و در نتیجه پس از کالیبره کردن و اجرای نرم افزار میزان بار رسوب ورودی به مخزن سد گتوند علیا برابر با ۵۳۶۰۰۰۰ تن در سال محاسبه شده است، که پس از گذشت ۱۰۰ سال برابر با ۵۳۶ میلیون تن و با توجه به ضریب تله اندازی ۹۰ درصد، حجم کل رسوب انباشته شده در مخزن این سد برابر با ۴۹۸ میلیون متر مکعب خواهد بود که ۱۴/۹۵ درصد حجم کل

مخزن سد را تشکیل می‌دهد.

اکبرزاده و همکاران، (۱۳۸۹) 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 با استفاده از روابط تجربی و مدل عددی HEC-RAS محاسبه و با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته است. آنها مشاهده کردند که مدل عددی HEC-RAS نتایج نزدیکتری را به واقعیت نشان می‌دهد.

احمدی و همکاران، (۱۳۹۱) به بررسی مقدار رسوبگذاری مخزن سد کرج با استفاده از روش‌های تجربی و مدل HEC-RAS پرداخته‌اند. که در این پژوهش با جمع آوری نقشه‌های مربوط به عملیات هیدروگرافی صورت گرفته، بعد از مطالعه و بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد کرج در یک دوره‌ی ۴۶ ساله بین سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۶ میزان دقت و خطای این مدل به ازای توابع انتقال رسوب و توابع سرعت سقوط موجود در برنامه و براساس معیار شکل پروفیل طولی، مورد بررسی قرار گرفته و سپس بهترین تابع و روش مناسب انتخاب گردیده است، در نهایت نتایج مدل عددی با مقادیر حاصل از روابط تجربی که برای محاسبه‌ی احجام رسوبگذاری و ضریب تله اندازی ارائه شده، همراه با درصد خطای هر یک از این روش‌ها با توجه به نتایج واقعی حاصل از هیدروگرافی مخزن این سد مورد مقایسه قرار گرفته است.

بنی حبیب و همکاران، (۱۳۸۶) 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 به کار بردن اطلاعات به دست آمده و شبیه سازی سد شکافدار در مدل Hec-Ras نحوه‌ی رسوبگذاری در مخزن این دو سد با استفاده از معیار پروفیل طولی با یکدیگر مقایسه شد.

خسروپور و بنی هاشمی، (۱۳۸۷) رسوبگذاری در مخزن سد کرخه را با توجه به شرایط مختلف بهره برداری و رژیم رودخانه در نرم افزار Hec-Ras بررسی نمودند. در این مطالعه با توجه به آمار ۴۳

ساله آبدهی روزانه و ۱۷ ساله رسوب مواد معلق، متوسط دبی ورودی آب و رسوب در ۱۲ ماه سال تعیین و به مدت ۴۵ سال در برنامه شبیه سازی 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، (۱۳۸۸) به بررسی نحوه‌ی توزیع رسوب در سطح مخزن سد یامچی اردبیل به کمک نرم افزار HEC-6 و روش‌های کاهش سطح و افزایش سطح و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده پرداخته‌اند. کل رسوب انباشته شده در مخزن این سد برای یک دوره‌ی ۶۰ ساله، براساس تابع توزیع یانگ و محاسبه شده توسط مدل HEC-6 حدود ۶/۹۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. بر این اساس سالانه حدود ۱۱۵۱۶۷ مترمکعب از حجم مخزن سد توسط رسوب ته نشین شده و پر خواهد شد. با توجه به وزن حجمی ۱/۱۵ تن بر مترمکعب رسوبات، سالانه ۱۳۲۴۴۲ تن رسوب در مخزن ترسیب می‌شود.

مسکار و فضل‌اولی (۱۳۹۲)، به بررسی الگوی رسوبگذاری در مخزن سد شهید رجایی با استفاده از مدل عددی GSTARS3.0 پرداختند، نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد که پس از طی ۵۰ سال از زمان بهره‌برداری سد، حجم رسوبات انباشته شده در مخزن به حدود ۲۱ میلیون متر مکعب می‌رسد که تقریباً ۲۲٪ از حجم مفید مخزن را پر خواهد نمود.

قمشی و همکاران، (۱۳۶۷) نحوه رسوبگذاری در مخزن سد دز را مورد مطالعه قرار دادند و از روش تجربی کاهش و افزایش سطح استفاده کردند، روش کاهش سطح با مخزن تیپ ۲ حجم رسوبات این سد را ۷۷۲ میلیون متر مکعب برآورد کرده است. از این مطالعه نتیجه گرفته شد که بعد از ۱۱۴ سال رسوبات مخزن نیمی از ظرفیت اولیه را در بر می‌گیرند و بعد از ۱۹۴ سال ۸۰ درصد ظرفیت مخزن اولیه توسط رسوبات اشغال خواهد شد.

موسوی و همکاران، (۱۳۸۵) توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود را با استفاده از مدل‌های تجربی افزایش و کاهش سطح بررسی کردند. عملیات رسوب‌سنجی در مخزن این سد در سال‌های ۱۳۶۷

و ۱۳۷۸ صورت گرفته است. مقایسه توزیع رسوبات ته نشین شده در سد با مدل‌های توزیع رسوب نشان داد که مدل کاهش سطح بورلند و میلر با کمترین خطا نسبت به سایر روش‌ها، بیشترین هم‌خوانی را با نحوه توزیع رسوب دارد و توزیع رسوب در سال‌های ۱۳۹۹، ۱۴۲۴، ۱۴۴۹ پیش بینی شده است.

رهنمایی، (۱۳۷۴) روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح را برای تعیین توزیع رسوبات مخزن سد کرج به کاربرد و نتایج را با اندازه‌گیری‌های سال ۱۳۷۰ مقایسه کرد. در رقوم بالای مخزن، حجم‌های رسوب حاصل از دو روش تجربی تفاوت معنی داری با رسوب سنجی نداشتند ولی در رقوم‌های پایین، روش کاهش سطح جواب بهتری داده است.

موسوی و صمدی بروجنی، (۱۳۷۵) نحوه رسوبگذاری در مخازن ۱۴ سد کوچک منطقه چهار محال و بختیاری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های افزایش و کاهش سطح در مورد توزیع رسوب سدهای کوچک نیز کاربرد دارند. این دو روش در رقوم پایین مخزن دارای دقت کم و در رقوم بالا دارای دقت خوبی هستند.

عابدینی و طالب بیدختی، (۱۳۶۸) نحوه توزیع رسوب در مخزن سد درودزن را با استفاده از روش پیشنهادی مودی (۱۹۶۲، USBR) بررسی کردند، در نهایت نتایج نشان داد که این روش در مقایسه با روش‌های قبلی باعث حذف آزمون و خطا گردیده و کاربرد آن منجر به محاسبه مستقیم عمق رسوبات و توزیع آنها در مخازن سدها می‌گردد. تراز بستر در محل احداث سد درودزن بعد ۵۰ سال به اندازه ۱۲/۲ متر بالا می‌آید.

قمشی و صدق آمیز، (۱۳۸۵) وضعیت رسوبگذاری مخزن سد کرخه صفر را با استفاده از مدل HEC-6 (اداره مهندسی ارتش آمریکا) و مدل DEPO پیش بینی کردند، آنها به منظور استفاده از این مدل‌ها حجم زیادی از اطلاعات شامل وضعیت هندسی مقاطع مخزن، آمار دبی جریان، آمار دبی جریان - دبی رسوب، دانه بندی مواد معلق در جریان‌های مختلف، دانه بندی مواد بستر و برخی اطلاعات دیگر

استفاده کردند و بعد از آماده سازی فایل‌های ورودی برای اجرای دو مدل با دسترس بودن اطلاعات ورودی اقدام به اجرای آنها و مقایسه گرافیکی نتایج خروجی برای حالات مختلف پرداختند، طبق نتایج بدست آمده ضریب کاهش حجم مخزن ۰/۰۰۱۵۸ و همچنین در پایان دوره ۱۰۰ ساله، حجم مخزن در حدود ۵/۴-۵/۸ میلیارد متر مکعب و فاصله پیشانی رسوب در دلتا از بدنه سد ۲۳-۱۸ کیلومتر برآورد شد، در نهایت آنها پیشنهاد کردند که کلیه تاسیسات در فاصله دیواره سد و دلتای پیش بینی شده تعبیه شوند تا انباشت رسوب برای آنها خسارت وارد نکند.

رمضانی و قمشی، (۱۳۹۰) میزان تأثیر جریان‌های غلیظ را با استفاده از مدل TCM در یک دوره ۳۰ ساله در سد سفید رود مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. مقایسه بین حالتی که جریان‌های غلیظ، خود را به بدنه سد رسانده و از سد خارج شوند و حالتی که تأثیر این جریان‌ها نادیده گرفته شوند و تقریباً کلیه رسوبات ورودی به مخزن درون آن ته نشین شوند، انجام گردید، نتایج نشان داد که در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، بازده تله اندازی شاخه قزل اوزن حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت دیگر کاهش می‌یابد، همچنین، برای شاخه شاهرود این کاهش حدود ۲۰ درصد می‌باشد. مقایسه بین این دو حالت نشان می‌دهد که در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، متوسط کاهش حجم سالیانه مخزن در شاخه قزل اوزن از ۱/۰۷ به ۰/۷۳ درصد و در شاخه شاهرود از ۰/۵۵ به ۰/۴۳ کاهش می‌یابد.

عماد محمد و همکاران، (۲۰۱۶) رسوبگذاری مخزن سد موصل (عراق) را با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS ورژن ۴،۱ برای جریان رودخانه اصلی و رسوبات مخزن سد موصل بررسی کردند، برای شبیه‌سازی جریان مدل را با (ضریب همبستگی $R^2=0/78$) و روندیابی رسوب در سطح اولیه بستر، را (با نتایج $R^2=0/98$ و میانگین و انحراف معیار مطلق ۰/۹۵) کالیبره و از معادله ایگز و وایت در مدل HEC-RAS برای روندیابی رسوبگذاری استفاده کردند، حجم کل بار رسوب انباشته شده در مخزن $1/13 km^3$ برآورد شد، که این مقدار بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده بود، درحالی‌که بررسی‌های مربوط به ژرفاسنجی قبلی $1/143 km^3$ به دست آمده است. به علاوه، این مدل نشان

دادکه بسیاری از رسوبات حدود ۸۷/۷٪ در طول پنج سال اول بعد از بهره‌برداری سد انباشته شده است. آرین و همکاران، (۱۳۹۱) شبیه‌سازی روند رسوبگذاری سد مخزنی شهریار را با استفاده از مدل‌های دو بعدی CCHE2D و شبه‌دو بعدی GSTARS3 انجام دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای مدل دو بعدی در تخمین میزان نشست رسوبات و جریان‌های عرضی می‌باشد.

بهرنگی و همکاران، (۱۳۸۷) با استفاده از فرمول‌های تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف و نتایج هیدروگرافی و آمار هیدرولوژیکی حوضه سد لتیان، به بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد لتیان پرداختند. با بررسی آمار ۲۸ ساله سد و مقایسه‌ی آن با روش‌های تخمینی، دقت یا ضعف فرمول‌های مختلف تجربی در مورد این سد بررسی شد. در نهایت عمر مفید این مخزن با احتساب حجم مفید ۸۵ میلیون مترمکعب و اطلاعات آماری ۲۸ ساله، ۹۶ سال برآورد شد.

تیپیل و همکاران، (۲۰۰۴) روند رسوبگذاری مخزن سد داکوتای جنوبی (آمریکا) را با استفاده از مدل 6-HeC مورد بررسی قرار دادند. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۹۶۸ تا ۱۹۹۷ صورت گرفته است و با استفاده از مدل ارائه شده، شرایط مخزن در ۵۰ سال آینده مورد بررسی قرار گرفته است.

رحمانیان و همکاران، (۱۳۸۶) به بررسی تخمینی رسوبگذاری در مخازن سدها پرداختند. در این تحقیق فرمول‌های تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف، برای تخمین رسوبات مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت به مطالعه در زمینه‌ی رسوبگذاری در مخزن سد استقلال، با در نظر گرفتن نتایج هیدروگرافی سال‌های مختلف و مقایسه‌ی آن با فرمول‌های تجربی پرداخته شده است. براساس اطلاعات میانگین ۲۴ ساله از روند رسوبگذاری در مخزن سد عمر مفید آن حدود ۵۵ سال پیش بینی شده است.

سادات هلبر و همکاران، (۱۳۹۳) فرایند رسوبگذاری سد باراسونا (اسپانیا) را با استفاده از مدل WASA-SED برای دوره زمانی ۲۰۰۶-۱۹۹۸ پس از تعیین ضخامت لایه فعال با اطلاعات مربوط به

دو بازه زمانی که یکی مربوط به دوره بهره‌برداری عادی از مخزن (۱۹۸۶-۱۹۹۳) و دیگری دوران بهره‌برداری همراه با انجام عملیات فلاشینگ در مخزن (۱۹۹۵-۱۹۹۷) شبیه سازی شد، و با اطلاعات برداشت شده از مخزن سد مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه نشان می‌دهد الحاقیه جدید مدل WASA-SED در شبیه سازی رسوبگذاری در مخازن سدهایی که در حوضه‌های آبخیز با فرسایش پذیری بالا قرار گرفته‌اند از دقت مناسبی برخوردار است.

موسوی و محمدزاده هابیلی، (۱۳۹۱) شبیه سازی توزیع رسوب در مخزن سد کوثر را با استفاده از الگوی توزیع رسوب مخزن سد دز انجام دادند با توجه به یکی بودن ضریب مخزن (۰/۴۱) سد دز و سد کوثر، سه بار رسوب سنجی در مخزن سد دز (سال‌های ۱۳۶۲، ۱۳۷۶، ۱۳۸۲) صورت گرفته است، این دو سد در حوضه آبریز خلیج فارس قرار دارد، از الگوی توزیع رسوب سد دز برای پیش بینی توزیع رسوب در مخزن سد کوثر استفاده شده است. حجم رسوبات ورودی به مخزن سد کوثر ۴۷۵ هزار متر مکعب در سال است، توزیع رسوب در مخزن این سد در دوره‌های ۲۰۰ ساله پس از بهره‌برداری تخمین زده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب مخزن پس از ثابت شدن نرخ رسوبگذاری به عدد ۰/۵۹ خواهد رسید، در حدود ۶۳۲ سال پس از بهره‌برداری، تراز رسوبات به تراز دریاچه‌های آبگیر سد می‌رسد، همچنین پس از ۱۴۳۷ سال، مخزن سد به طور کامل از رسوب پر خواهد شد.

کریشناپان، (۱۹۸۵) مقایسه‌ای بین دو مدل HEC-6 و MOBED-2 انجام داد که مقایسه وی شامل دو بخش بود، در بخش اول، تفاوت عمده بین دو مدل مذکور با بررسی معادلات پایه هر یک بیان شد و در بخش دوم با مجموعه داده‌های ورودی یکسان، مقایسه‌ای بین قابلیت پیش بینی دو مدل برای شبیه سازی انتقال رسوب انجام شد. داده‌های ورودی مربوط به بازه‌ای از رودخانه ساسکاچوان جنوبی و سدگاردینار بوده است. مقایسه پیش بینی دو مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که قابلیت پیش بینی مدل MOBED-2 نسبت به مدل HEC-6 برتری دارد و مدل HEC-6 برای تعیین ضریب مانینگ و عرض بستر به واسنجی گسترده نیازمند است.

وانگ و هو، (۲۰۰۹) به بررسی راهکارهای مختلف برای مدیریت رسوب مخازن در کشور چین پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که فلاشینگ آزاد باعث تنش‌های اکولوژیکی بالایی به اکوسیستم پایین دست مخزن سد می‌شود. آنها ذخیره آب صاف و رهاسازی جریان غلیظ را به عنوان بهترین راه کار برای کنترل رسوب در مخازن پیشنهاد نمودند، که این روش دارای مزیت استفاده از انرژی برق اکولوژیکی را مورد توجه قرار می‌دهد.

به دلیل اهمیت زیاد رسوبگذاری در مخازن سدها، با توجه به بررسی مطالعات انجام شده بالا و نتایج قابل قبول مدل‌های ریاضی از جمله مدل ریاضی HEC-RAS در زمینه رسوبگذاری مخزن سد، به ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره می‌پردازیم.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

در این فصل درباره مدل ریاضی HEC-RAS، منطقه مورد مطالعه و معادلات و روش‌های حل آنها بحث می‌شود. برای استفاده کاربردی از هر مدل ریاضی هیدرولیک جریان و رسوب، باید این مدل با توجه به شرایط خاص منطقه کالیبره و صحت‌سنجی شود. برای کالیبره مدل‌های ریاضی رسوبگذاری مخازن سدها، باید پروفیل طولی رودخانه در محل مخزن سد و قبل از احداث سد و نیز حداقل یک پروفیل طولی از کف مخزن در مدت بهره‌برداری موجود باشد. همچنین هیدروگرافی دبی جریان ورودی به مخزن سد (در شرایط عادی و سیلابی)، هندسه مقاطع عرضی رودخانه در محل و بالادست مخزن سد، دانه‌بندی رسوبات ورودی و نیز رابطه دبی-دبی رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری بالادست سد مورد نیاز می‌باشد. در این مرحله، به کمک مدل‌سازی ریاضی جریان و رسوب در مخزن و مقایسه نتایج پروفیل طولی رسوبگذاری با پروفیل طولی اندازه‌گیری شده، رابطه تجربی انتقال رسوب مناسب برای مخزن سد تعیین خواهد شد. بعد از کالیبره مدل، مرحله صحت‌سنجی مدل ریاضی انجام خواهد شد. در این مرحله باید نتایج مدل‌سازی برای یک دوره زمانی دیگر نیز تکرار شده و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه شود. اگر نتایج مقایسه رضایت بخش بود مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مناسب است در غیر اینصورت مرحله واسنجی مجدداً تکرار شود. در نهایت ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن برای دوره‌های زمانی آینده انجام خواهد شد.

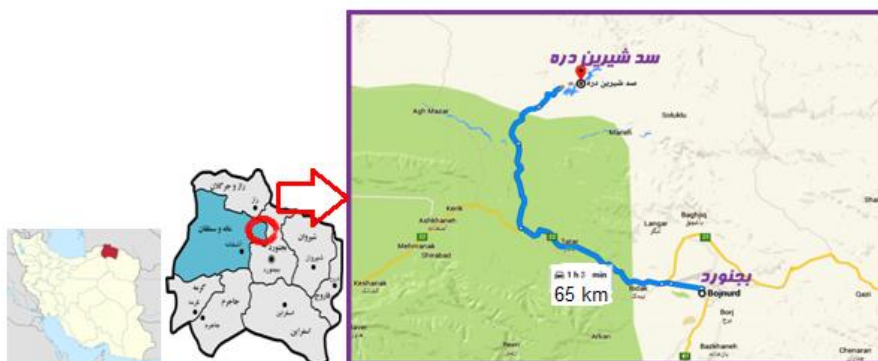
۳-۲- رودخانه شیرین دره

رودخانه شیرین دره که یکی از سرشاخه‌های رود اترک می‌باشد در شمال شرق استان خراسان شمالی واقع شده است، و محدوده جغرافیایی $37^{\circ}48'16''$ تا $37^{\circ}53'42''$ عرض شمالی حوضه آبریز رودخانه شیرین دره می‌باشد و نام آن از روستای شیرین دره که در مسیر همین رودخانه و نزدیک به سد گرفته شده است. این رودخانه از نوع دائمی بوده و جریان آب پایه آن از محل چشمه‌های متعددی که در دامنه‌های پایین دست کوه باش تپه در محل

روستای ارناوه واقع هستند، تامین می شود. و از اتصالات انشعابات کوه‌های دالانچه، کنجوخور، میسگر، بزین، میسو، قلعه جوق، گل داغ، نظرگاه، کلاته چنار و ... تغذیه می گردد.

۳-۳- سد شیرین دره

سد مخزنی شیرین دره در استان خراسان شمالی به فاصله ۶۵ کیلومتری شمال غربی شهر بجنورد قرار دارد و یکی از سدهای مهم استان می باشد که بر روی رودخانه شیرین دره از سرشاخه‌های رودخانه اترک می باشد، احداث گردیده است. محل سد در محدوده جغرافیائی $2''$ و $43'$ و 37° عرض شمالی و $16''$ و $7'$ و 57° طول شرقی واقع شده که موقعیت آن در نقشه شکل ۴-۱ مشخص شده است.



نقشه (۳-۱)- موقعیت سد شیرین دره استان خراسان شمالی

۳-۴- مشخصات فنی سد شیرین دره

سد مخزنی شیرین دره با هدف کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی، آب شرب شهرستان بجنورد، صنعت احداث و در فروردین ماه سال ۱۳۸۴ بهره برداری شد. مشخصات فنی سد شیرین دره به شرح زیر می باشد:

خاکی با هسته رسی

نوع سد:

۶۳ متر

ارتفاع سد از روی بستر رودخانه:

طول تاج:	۴۸۳ متر
تراز تاج از سطح دریا:	۸۰۰/۵ متر
حجم بدنه سد:	۳/۲۵ میلیون متر مکعب
تراز کف دریچه های سرریز:	۷۸۷ متر
تراز نرمال:	۷۹۵/۵ متر
ظرفیت اولیه مخزن در تراز نرمال:	۹۱/۵ میلیون متر مکعب
حجم آب تنظیم شده سالانه:	۶۵/۸ میلیون متر مکعب
دبی سیلاب طراحی:	۱۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه
حداکثر دبی طراحی تخلیه کننده تحتانی:	۲۶/۷ متر مکعب بر ثانیه
نوع و ابعاد سیستم انحراف:	تونل به قطر داخلی ۶ متر و طول ۳۱۰ متر
ظرفیت سیستم انحراف:	۳۰۳ متر مکعب بر ثانیه

نوع سرریز: اوجی دریچه دار از نوع " شوت با آستانه اوجی و دریچه دار " شامل چهار دریچه قطاعی می باشد (گزارش هیدروگرافی، ۱۳۹۱).

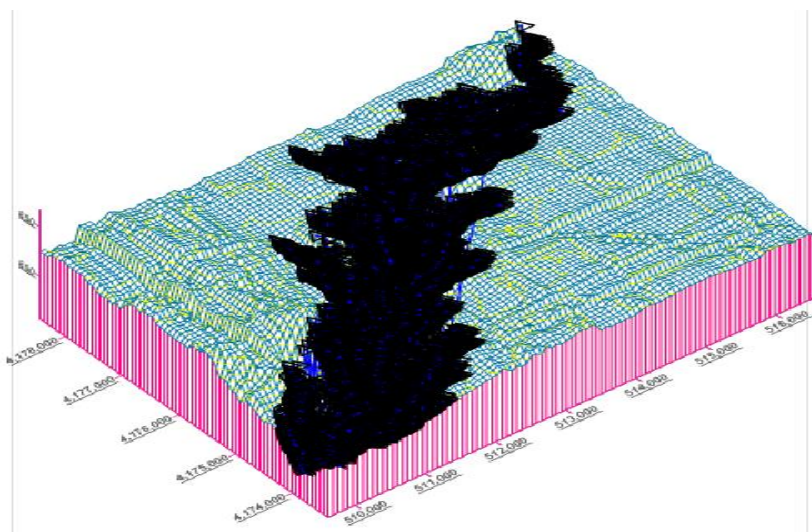
شکل ۲-۳ نمای هندسی مخزن سد شیرین دره، شکل ۳-۳ نمایی از تاج سد و اشل قرائت سطح آب و شکل ۴-۳ نیز توپوگرافی ترسیم شده اطراف و خود مخزن در محیط نرم افزار Surfer15 را نشان می دهد.



شکل (۲-۳) - شمای هندسی مخزن سد شیرین دره



شکل (۳-۳) - نمای اشل قرائت سطح آب سد شیرین دره



شکل (۴-۳) - توپوگرافی اطراف و خود مخزن ترسیم شده توسط نرم افزار Surfer15

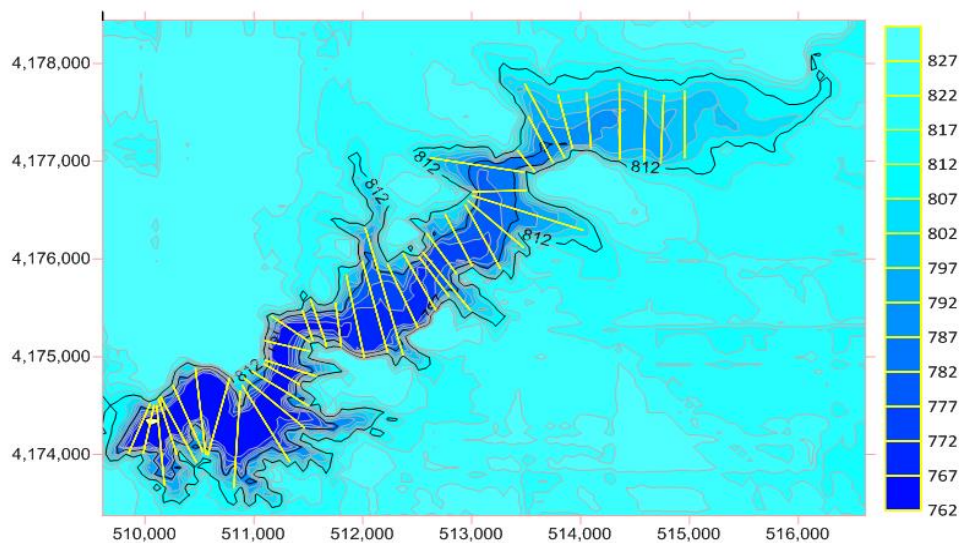
۳-۵- شبکه ایستگاه هیدرومتری منطقه

به منظور مطالعات هیدرولوژیکی و سیلاب در حوضه آبریز از آمار و اطلاعات موجود در ایستگاه هیدرومتری استفاده می‌شود. ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه قلعه بربر نام دارد و مختصات جغرافیائی $2''$ و $43'$ و 37° عرض شمالی و $16''$ و $7'$ و 57° طول شرقی در بالادست سد قرار دارد.

انجام دقیق مطالعات رسوب در مخازن و رودخانه‌ها به روش‌های ریاضی، مستلزم داشتن اطلاعات جامع و متنوعی در قالب سه بخش ژئومتری، هیدرولوژی و رسوب می‌باشد.

۳-۶- اطلاعات ژئومتری

در این پژوهش، برای معرفی هندسه مخزن به مدل، به طول تقریبی 7500 متر از نقشه بستر مخزن پس از 7 سال بهره برداری هیدروگرافی انجام شده در سال 1391 با مقیاس $1:5000$ ، استفاده گردیده است و از 41 مقطع عرضی ترسیم شده در محیط نرم افزار $Surfer15$ به فواصل 60 تا 300 متر مورد استفاده قرار گرفت، شکل $3-5$ محل مقاطع عرضی بررسی شده مخزن سد شیرین دره در محیط نرم افزار $Surfer15$ را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵)- محل مقاطع عرضی بررسی شده مخزن سد شیرین دره توسط نرم افزار $Surfer 15$

۳-۷-آمار دبی روزانه و تراز سطح آب

برای دبی ورودی روزانه از آمار و اطلاعات برداشت شده برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ از ایستگاه هیدرومتری قلعه بربر در بالا دست سد و برای اطلاعات تراز سطح آب نیز از اشل قرائت شده در مخزن سد برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ استفاده شده است.

۳-۸-جریان و دبی رسوب

تجربیات و مطالعات مختلفی که توسط منابع مختلف از جمله اداره عمران آمریکا (USBR) انجام شد به این نتیجه انجامید که بین دبی جریان و دبی مواد معلق رسوبی رابطه زیر برقرار می‌باشد:

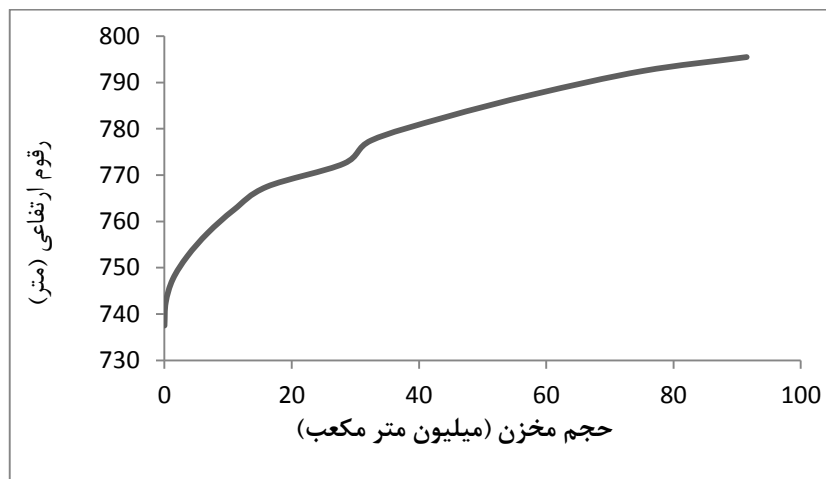
$$Q_s = a \cdot Q_w^b \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه، Q_s دبی مواد معلق بر حسب تن در روز، Q_w دبی جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه و a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

در این تحقیق از آمار دبی و دبی رسوب ایستگاه قلعه بربر در مرز بالادست بازه مورد مطالعه، محدود به سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ می‌باشد مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۳-۱ مقادیر سطح-حجم اولیه دریاچه سد شیرین دره آورده شده است، شکل ۳-۶ منحنی حجم-ارتفاع اولیه مخزن سد شیرین دره را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۱) سطح - حجم - ارتفاع، اولیه دریاچه سد شیرین دره

ردیف	تراز آب در مخزن از سطح دریا	سطح (ha)	حجم (MCM)
۱	۷۳۷/۵	۰	۰
۲	۷۴۲/۵	۱۱/۸	۰/۲
۳	۷۴۷/۵	۳۶	۱/۳
۴	۷۵۲/۵	۵۴	۳/۶
۵	۷۵۷/۵	۷۵	۶/۸
۶	۷۶۲/۵	۹۱	۱۰/۹
۷	۷۶۷/۵	۱۱۸	۱۶/۱
۸	۷۷۲/۵	۱۶۵	۲۸/۲
۹	۷۷۷/۵	۲۰۸	۳۲/۵
۱۰	۷۸۲/۵	۲۵۶/۶	۴۴/۱
۱۱	۷۸۷/۵	۳۰۷	۵۸/۲
۱۲	۷۹۲/۵	۳۷۶	۷۵/۲
۱۳	۷۹۵/۵	۴۳۳	۹۱/۵



شکل (۳-۶) - منحنی حجم - ارتفاع اولیه مخزن سد شیرین دره

۳-۹- داده‌های مربوط به درجه حرارت آب

به دلیل فرایندهای حاکم بر پدیده انتقال رسوب، سرعت سقوط ذرات به دمای آب حساس

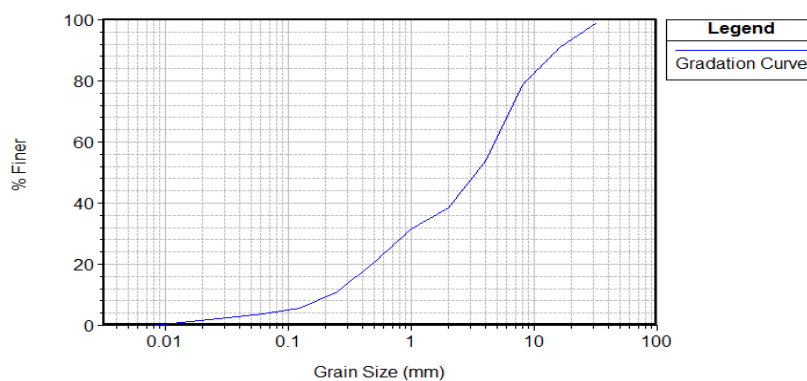
می‌باشد. سرعت سقوط ذرات یکی از پارامترهای اصلی ورودی به مدل HEC-RAS بوده و لذا تهیه

اطلاعات دما جهت اجرای مدل رسوبی ضروری می‌باشد.

در نسخه ۴/۱ مدل تنها یک مقدار دما در هر گام زمانی بایستی مشخص شود و برای تعیین یک سری زمانی دما، از گزینه Set temperature در ویرایشگر جریان شبه غیرماندگار انتخاب می‌شود. برای تحقیق حاضر از میانگین دمای ثبت شده برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ توسط ایستگاه هواشناسی شهرستان بجنورد استفاده گردید و میانگین دما ۱۷ درجه سانتی‌گراد برای شبیه‌سازی مدل به کار برده شد.

۳-۱۰-۱- اطلاعات مربوط به دانه بندی

براساس نمونه‌های برداشت شده رسوبات بستر مخزن سد، دانه‌بندی رسوبات بستر در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل (۳-۷) دانه بندی ذرات رسوبات ورودی به مدل

۳-۱۱- معرفی مدل HEC-RAS^۱

۳-۱۱-۱- تاریخچه

مرکز HEC-RAS در سال ۱۹۶۴ برای رسمی کردن مهارت‌های تکنیکی که بعدها به عنوان مهندسی هیدرولوژی شناخته شدند، توسط وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا (گروه مهندسی ارتش) شکل گرفت (راهنمای مدل HEC-RAS، ۱۹۹۱). مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC) به منظور کمک

1- Hydraulic Engineering Center–River Analysis System

به مهندسی هیدرولیک در تحلیل جریان کانال و تعیین پهنه سیلابگیر، سیستم تحلیل رودخانه (RAS) را توسعه داد که این خود شامل قابلیت‌های بی‌شمار از جمله ورود اطلاعات، اجزای تحلیل هیدرولیکی، قابلیت مدیریت و ذخیره داده‌ها و قابلیت‌های گرافیکی و گزارش‌گیری می‌باشد. بسته‌های نرم افزاری 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 به صورت یک بعدی و دو بعدی موجود می‌باشد.

سیستم مدل سازی HEC-RAS به عنوان بخشی از نسل بعدی (NEXGEN) نرم افزار مهندسی هیدرولوژی مرکز مهندسی هیدرولوژی توسعه یافت. پروژه "NEXGEN" چندین جنبه مهندسی هیدرولوژی، شامل آنالیز رواناب-بارش (HEC-HMS)، هیدرولیک رودخانه (HEC-RAS)، شبیه سازی سیستم مخزن (HEC-RESSIM)، آنالیز خسارت سیلاب (HEC-FDA و HEC-FIA) و پیش بینی بلادرنگ رودخانه برای عملکردهای مخزن (CWMS) را شامل می‌شود. سیستم HEC-RAS نسخه Beta 4,1,0 شامل چهار جزء آنالیز رودخانه می‌باشد، برای حالات (۱) محاسبه پروفیل سطح آب در جریان دائمی (۲) شبیه سازی جریان غیر دائمی (۳) محاسبات انتقال رسوب مرز متحرک (۴) آنالیز کیفی آب. رکن اصلی مدل این است که تمام چهار جزء از داده ژئومتری معمول و روش‌های محاسباتی هیدرولیکی یکسان استفاده می‌کنند. علاوه بر چهار جزء آنالیز رودخانه، سیستم شامل چند ویژگی طراحی هیدرولیکی می‌باشد که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و پروفیل‌های اساسی سطح آب محاسبه شوند (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۱۲- مراحل انجام یک شبیه‌سازی در مدل ریاضی HEC-RAS

۳-۱۲-۱- داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل

برای حل معادلات ریاضی حاکم بر جریان و رسوب در رودخانه‌ها و مخازن سدها، باید شرایط

مرزی مدل مشخص شوند. این شرایط داده‌های جریان و رسوب در مرزهای بالا و یا پایین دست و وضعیت توپوگرافی یا هندسه مدل می‌باشد. مسلماً هرچه دقت داده‌های ورودی بیش‌تر باشد نتایج حاصل از مدل نیز دقیق‌تر خواهد بود. در این بخش داده‌های مورد نیاز مدل در چهار قسمت شامل داده‌های هندسی، هیدرولوژی، داده‌های هیدرولیکی و داده‌های رسوب ارائه می‌گردد (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۱۲-۱-۱- داده‌های هندسی

داده‌های هندسی، وضعیت پستی بلندی بستر، سواحل و مسیل رودخانه و مخزن را مشخص می‌کند و یکی از مهم‌ترین اجزای مدل‌سازی هیدرولیکی می‌باشد. بدیهی است وضعیت پستی و بلندی بین موقعیت‌های که مختصات آنها اندازه‌گیری نشده است. با روش‌های درونیابی تعیین خواهند شد. در مدل یک بعدی HEC-RAS بایستی محدوده مورد نظر را در قالب مقاطع عرضی متعدد در موقعیت‌های خاص و به صورت سری مختصات نقاط در دو بعد x , y تعریف می‌شوند. مقاطع عرضی، از مهم‌ترین داده‌های هندسی رودخانه و مخازن هستند و دقت نتایج به اطلاعات جمع‌آوری شده از مقاطع عرضی بستگی دارد. مقاطع عرضی باید آن‌چنان انتخاب شوند که شرایط هیدرولیکی بطور کامل شبیه‌سازی گردد. و برای رسیدن به یک مدل هندسی مطلوب و نزدیک به واقعیت، بایستی تعداد و فواصل مقاطع عرضی از یکدیگر براساس اصول فنی و استاندارد باشد. و برای وارد کردن این اطلاعات در پنجره اصلی مدل از گزینه‌ی Geometric data استفاده می‌شود، که شامل تعریف مقاطع عرضی، محل‌های تقاطع، گزینه‌های مربوط به تعریف سازه‌های عرضی و طولی، تعریف حوضچه‌های ذخیره، ایستگاه‌های پمپاژ، پارامترهای شکست سد و... می‌باشد.

۳-۱۲-۱-۲- داده‌های هیدرولوژی

در بیش‌تر مدل‌های ریاضی، آبنگار جریان ورودی در مرز بالادست نیاز می‌باشد. معمولاً آبنگار به دسته‌های مختلف تقسیم بندی می‌شود و برای هر دبی فرض می‌شود که در یک مدت زمان

مشخص، ثابت است. از آنجا که رسوب بیش تر تابع دبی‌های زیاد می‌باشد این مدت زمان را در دبی‌های کم طولانی‌تر انتخاب می‌کنند. داده‌های هیدرولوژی شامل سه جریان ماندگار، شبه غیر ماندگار و غیر ماندگار می‌باشد. که در مدل HEC-RAS داده‌های جریان ماندگار در بخش (Steadyflow)، داده‌های جریان شبه غیرماندگار در بخش (quasi unsteady flow) و داده‌های جریان غیرماندگار نیز در بخش (unsteady flow) برای مدل تعریف می‌شوند.

۳-۱۲-۱-۳ - داده‌های هیدرولیکی

بیشتر مدل‌های ریاضی ابتدا شرایط هیدرولیکی جریان را در طول مخزن محاسبه می‌کنند از این‌رو داشتن شرایط مرزی ضروری است. در جریان‌های زیر بحرانی معمولاً مقدار دبی یا آبنگار دبی در مرز بالادست و مقدار اشل برای آن دبی در بازه پایین دست مورد نیاز است. در صورتیکه برای شبیه‌سازی جریان‌های فوق بحرانی هم مقدار اشل و هم مقدار دبی در بالادست باید معلوم باشد. در مدل‌های دو و سه بعدی، بردارهای سرعت در مرز بالادست نیاز است که معمولاً در اختیار نیست از این‌رو براساس دبی معلوم، بردارهای سرعت در آن مقطع به صورت تصنعی طوری ساخته می‌شوند که رابطه توزیع قائم لگاریتمی سرعت برقرار باشد.

۳-۱۲-۱-۴ - داده‌های رسوب

اطلاعات دیگری که مدل‌های ریاضی نیاز دارد، داده‌های رسوب می‌باشد، خصوصیات رسوب بستر و معلق بخصوص دانه‌بندی و وزن مخصوص اولیه می‌باشد. ضریب شکل ذرات و زاویه ایستائی نیز از متغیرهایی است که بهتر است قبلاً اندازه‌گیری و به مدل معرفی شوند. مهمولاً در برنامه مدل‌های ریاضی تعداد زیادی از روابط تجربی برآورد میزان رسوب کل وجود دارد که کاربر می‌تواند یکی از آنها را انتخاب کند. نتایج بدست آمده براساس یک معادله‌ی انتقال رسوب با نتایج حاصل از کاربرد معادله‌ی انتقال رسوب دیگری متفاوت می‌باشد و حتی ممکن است مقدار حجم رسوب نهشته را تا دو برابر و یا بیش‌تر هم محاسبه کند. از این‌رو بهتر است ابتدا با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده

رسوب در ایستگاه آبرسانی، مناسب‌ترین رابطه انتقال رسوب مشخص شود. حتی در چنین شرایطی باز هم ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشند. روش دیگر برای انتخاب مناسب‌ترین معادله انتقال رسوب استفاده از نتایج نقشه برداری مخزن می‌باشد. البته این وقتی کاربرد دارد که از مخزن پس از مدتی بهره‌برداری، نقشه برداری به عمل آمده باشد و با مقایسه با نقشه برداری اولیه قبل از احداث سد، حجم یا وزن رسوبگذاری مشخص شده باشد. چنانچه این اطلاعات موجود باشد مدل ریاضی را می‌توان با معادلات انتقال رسوب مختلف اجرا و وزن رسوب محاسبه شده توسط مدل را با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کرد و معادله‌ی را انتخاب کرد که اختلاف مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کمینه باشد.

۳-۱۲-۲- کالیبره کردن مدل

معادلات به کار رفته در مدل‌های ریاضی دارای ضرایب متعددی هستند که انتخاب ناصحیح آنها ممکن است منجر به جواب‌های دور از واقعیت گردد. یکی از روش‌هایی که به انتخاب مناسب ضرایب می‌تواند کمک کند واسنجی مدل از نظر هیدرولیکی است. از این رو بهتر است ابتدا مدل به صورت بستر صلب (بدون انتقال رسوب) و با وارد کردن تدریجی مقاطع عرضی اجرا گردد. پس از تکمیل داده‌های هندسی رودخانه و مخزن، مدل با شرایط بده کم، بده لبریز، و بده‌های سیلابی اجرا و واسنجی می‌گردد. پس از واسنجی هیدرولیکی مدل، بخش انتقال رسوب مدل اجرا می‌گردد. در این بخش انتخاب معادله‌ی انتقال رسوب مناسب جزء کار واسنجی مدل خواهد بود. از این رو اطلاعات آبنگاری مخزن می‌تواند به عنوان مبنای کار واسنجی قرار گیرد. بدین ترتیب که مقدار حجم اندازه‌گیری رسوب نهشته شده با مقدار محاسبه شده از مدل مقایسه می‌شود. روش دقیق‌تر این است که پروفیل طولی مخزن که قبلاً اندازه‌گیری شده است با آنچه که مدل پیش‌بینی کرده است مقایسه کرد. مسلماً نمی‌توان انتظار داشت که این دو پروفیل برهم منطبق باشند ولی می‌توان با اجرای مدل با معادلات متفاوت انتقال رسوب، معادله‌ی را که سطح محصور بین این دو منحنی باشد به عنوان مناسب‌ترین

معادله انتخاب کرد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۴).

۳-۱۲-۳- مشاهده و چاپ نتایج

پس از اتمام محاسبات جریان (مانگار، شبه غیرماندگار، غیر ماندگار) و رسوب می‌توان نتایج حاصل را در خروجی‌های مدل مشاهده نمود. یکی از ویژگی‌های مدل HEC-RAS، ارائه خروجی‌های گرافیکی و جدولی متعدد و گویا می‌باشد. خروجی‌های مهم مدل عبارتند از: نیمرخ‌های عرضی جریان در مقاطع عرضی و نیز نیمرخ‌های طولی رودخانه، منحنی‌های سنجه جریان، پارامترهای هیدرولیکی جریان برای هر مقطع عرضی، نمودارهای سه بعدی از طرح شماتیک رودخانه (پرسپکتیو)، هیدروگراف‌های جریان، توزیع جریان در طول مقاطع عرضی، همچنین پروفیل طولی رسوبگذاری، نیمرخ عرضی رسوبگذاری و سری‌های زمانی رسوبگذاری در هر مقطع عرضی را در پنجره viwe می‌توان مشاهده کرد (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۱۳- مبانی مدل سازی رسوب در مدل HEC-RAS

مدل سازی انتقال رسوب مشخصاً کار دشواری است. داده‌های که برای پیش بینی تغییر بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند اساساً نامطمئن هستند و تئوری بکار رفته تجربی بوده و به یک آرایش وسیع از متغیرهای فیزیکی بسیار حساس است. با در دست داشتن داده‌های خوب می‌توان مدل سازی انتقال رسوب و مرزهای متحرک اجرا می‌شوند. قابلیت‌های HEC-RAS4.1 در زمینه رسوب بر اساس هیدرولیک جریان شبه غیر دائمی استوار می‌باشد. در روش شبه غیر ماندگار یک هیدروگراف جریان با یک سری از پروفیل‌های جریان دائمی همراه با دوره‌های جریان مرتبط با آن تقریب زده می‌شود. محاسبه پروفیل‌های سطح آب از یک مقطع عرضی به یک مقطع عرضی بعدی با حل معادله انرژی با یک روند متناوب بنام گام استاندارد انجام می‌شود. معادله انرژی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (۲-۳)$$

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 می باشد. در HEC-RAS افت هد انرژی (h_e) بین دو سطح مقطع، ترکیبی از افت های اصطکاکی و افت های ناشی از تنگ شدگی و بازشدگی است. معادله محاسبه افت انرژی به شکل زیر می باشد:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3-3)$$

در این معادله: L طول متوسط حوضه (که در نرم افزار مطابق رابطه ۳ محاسبه می شود)، \bar{S}_f شیب اصطکاکی بین دو مقطع، C ضریب افت ناشی از تنگ شدگی یا باز شدگی می باشد.

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{rob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{lob}} \quad (4-3)$$

متوسط حسابی جریان های بین مقاطع به ترتیب برای ساحل چپ، کانال اصلی، ساحل راست $\bar{Q}_{rob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{lob}$ به همین ترتیب برنامه می تواند متوسط هد انرژی جنبشی را محاسبه کند. مدل HEC-RAS برای یک تراز سطح آب داده شده، انرژی متوسط را با محاسبه انرژی جریان از سه زیر بخش مقطع عرضی (ساحل چپ، کانال اصلی، ساحل راست) بدست می آورد (طباطبایی و شهرکی، ۱۳۹۲).

۳-۱۳-۱- ارزیابی افت ناشی از تنگ شدگی و باز شدگی

این افت در HEC-RAS با معادله ۴-۳ بدست می آید:

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (5-3)$$

که در آن C ضریب تنگ شدگی یا بازشدگی می باشد، برنامه فرض می کند که یک تنگ شدگی زمانی رخ می دهد که هد سرعت پایین دست است، برنامه فرض می کند در جریان بازشدگی رخ داده است (ون ریجن ۱۹۸۴).

۳-۱۳-۲- ظرفیت انتقال رسوب

رسوب انتقال یافته 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 مرسوم تری برای تعیین نقطه آغاز حرکت است، تنش برشی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\tau_b = \gamma RS \quad (۶-۳)$$

در معادله فوق τ_b تنش برشی بستر، γ وزن واحد حجم آب، R شعاع هیدرولیکی و S شیب خط 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:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad \text{یا} \quad u_* = \sqrt{gRS} \quad (۷-۳)$$

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 در آمدن، معلق ماندن و منتقل شدن دارد. اندازه ذره عموماً با قطر متوسط ذره (d_m) جایگزین می‌شود (یانگ ۱۹۹۶).

۳-۱۳-۳- توابع محاسبه زبری بستر در مدل HEC-RAS

در مدل HEC-RAS معادلات مختلفی جهت محاسبه ضریب زبری مانینگ وجود دارد به طوری که کاربر می‌تواند از هر معادله‌ای جهت تخمین ضریب زبری مقطع عرضی استفاده نماید.

معادلات موجود به شرح زیر است:

۱- معادله مانینگ

۲- معادله کولگان

۳- معادله استریکلر

۴- معادله لیمرینوس

۵- معادله براونلی

۶- معادله سرویس حفاظت خاک برای کانال‌های با پوشش گیاهی

• معادله مانینگ

زمانی که این معادله توسط کاربر انتخاب می‌شود بایستی یک یا چند مقدار زبری برای مقطع تعریف شود تا مدل بتواند مقادیر هیدرولیکی مورد نظر را محاسبه نماید. معادله مانینگ اساس محاسبات مربوط به جریان یکنواخت در مدل HEC-RAS می‌باشد (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵):

$$Q = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۳-۸)$$

که در آن Q دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه)، n فاکتور ضریب زبری، A مساحت جریان (متر مربع)، S شیب کف (متر) و R شعاع هیدرولیکی (متر) جریان می‌باشد.

۳-۱۳-۴- توابع انتقال رسوب در مدل HEC-RAS

حرکت رسوب در رودخانه‌ها به لحاظ اهمیت آن در درک هیدرولیک رودخانه، مهندسی رودخانه، ریخت‌شناسی رودخانه و موضوعات وابسته قرن‌هاست که توسط مهندسی هیدرولیک و زمین‌شناسان مورد مطالعه قرار گرفته است. انتقال رسوب موضوع پیچیده‌ای است و غالباً با روش‌های نیمه تجربی و یا تجربی بررسی می‌شود. اغلب بررسی‌های نظری براساس برخی فرضیات آرمانی و ساده کننده استوار شده‌اند که در آن‌ها نرخ انتقال رسوب را می‌توان توسط یک یا دو عامل غالب، مانند دبی جریان، سرعت متوسط جریان، شیب انرژی و تنش برشی تخمین زد. در این زمینه معادلات متعددی ارائه شده است. از آنجائی که هرکدام از توابع انتقال رسوب در شرایط مختلف توسعه داده شده‌اند، ممکن است نتایج بدست آمده از هر تابع با توابع دیگر متفاوت باشد. بنابراین لازم است از مبانی علمی

و شرایط توسعه هر تابع انتقال رسوب آگاهی کافی حاصل گردد تا بتوان با توجه به شرایط موجود رودخانه، رابطه مناسب را انتخاب نمود. مدل HEC-RAS4.1 از هفت روش مختلف که به شرح زیر می‌باشند، جهت محاسبه میزان انتقال رسوب استفاده می‌نماید (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵):

۳-۱۳-۴-۱- روش یانگ

یانگ (۱۹۷۳) مفهوم توان واحد آبراهه را به عنوان یک متغیر مستقل مهم در ارتباط با تعیین دبی رسوب کل معرفی نمود. بر حسب تعریف، توان آبراهه توان موجود در واحد وزن سیال جهت انتقال رسوب می‌باشد که با حاصل ضرب سرعت جریان و شیب انرژی (VS) برابر است. در واقع توان واحد آبراهه، نرخ استهلاک انرژی پتانسیل در واحد وزن آب است که اساس آن بر نظریه تلاطم قرار دارد. یک تحلیل ابعادی از متغیرهای توان واحد آبراهه (VS)، سرعت سقوط ذرات (ω)، سرعت برشی (u^*)، اندازه متوسط ذرات (d_{50}) و لزوجت سینماتیکی (ν) بیانگر آن است که دبی رسوب کل یا غلظت کل رسوب به متغیرهای مستقل بدون بعد $\frac{VS}{\omega}$ ، $\frac{d_{50}}{V}$ و $\frac{u^*}{\omega}$ بستگی دارد. این محقق از تحلیل رگرسیون چند متغیر ۴۶۳ مجموعه داده های آزمایشگاهی برای انتقال ماسه بر حسب متغیرهای بدون بعد مذکور، رابطه زیر را ارائه نمود:

$$\text{Log } c_t = I + j \log \left(\frac{VS - V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (9-3)$$

در رابطه فوق ضرایب I, j به شرح زیر است:

$$I = 5.435 - 0.286 \text{Log} \left(\frac{\omega d_{50}}{V} \right) - 0.457 \text{Log} \left(\frac{u^*}{\omega} \right) \quad (10-3)$$

$$j = 1.799 - 0.409 \text{Log} \left(\frac{\omega d_{50}}{V} \right) - 0.314 \left(\frac{u^*}{\omega} \right) \quad (11-3)$$

سرعت بحرانی V_{cr} برای شروع حرکت ذرات از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\frac{V_{CR}}{\omega} = \frac{2.5}{\text{Log}\left(\frac{u_* d_{50}}{v}\right) - 0.06} + 0.66 \quad \text{for} \quad 1.2 < \frac{u_* d_{50}}{v} < 70 \quad (12-3)$$

$$\frac{V_{CR}}{\omega} = 2.05 \quad \text{for} \quad \frac{u_* d_{50}}{v} \geq 70 \quad (13-3)$$

در معادلات فوق c_t غلظت رسوب کل برحسب ppm وزنی، v سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، V_{CR} سرعت بحرانی برای آغاز حرکت ذرات (متر بر ثانیه)، S شیب طولی بستر، ω سرعت سقوط ذرات (متر بر ثانیه)، I, j ضرایب معادله یانگ برای انتقال رسوب، d_{50} قطر متوسط ذرات (متر)، u_* سرعت برشی (متر بر ثانیه)، U لزوجت سینماتیکی (متر مربع بر ثانیه).

لازم به ذکر است، معادلات یانگ که در بالا اشاره شد برای ذرات ماسه در محدوده 0.065 الی 2 میلیمتر تعریف شده‌اند. یانگ (۱۹۸۴) برای ذرات شن بزرگتر از 2 میلیمتر، ضرایب I, j را به صورت زیر اصلاح نمود:

$$I = 6.681 - 0.633 \text{Log}\left(\frac{\omega d_{50}}{v}\right) - 4.816 \text{Log}\left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (14-3)$$

$$j = 2.784 - 0.305 \text{Log}\left(\frac{\omega d_{50}}{v}\right) - 0.282 \left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (15-3)$$

در نهایت پس از تعیین c_t ، می‌توان مقدار q_t را بر حسب $m^3/s/m$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$q_t = \frac{c_t \gamma Q}{10^6 \gamma_s} = \frac{c_t Q}{10^6 s} = \frac{c_t V y}{10^6 s} \quad (16-3)$$

۳-۱۳-۴-۲- روش انگلوند- هانسن

معادله انگلوند-هانسن، یک معادله از نوع بار کل بوده که مبین وابستگی انتقال رسوب به تنش

برشی و فاکتور اصطکاک بستر می‌باشد:

$$\phi_t = 0.4\tau_*^{2.5} \quad (17-3)$$

در رابطه فوق ϕ_t تابع بدون بعد بار کل می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi_t = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} \quad (18-3)$$

τ_* تنش برشی بدون بعد (پارامتر شیلدز) بوده و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \quad (19-3)$$

f ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ که می‌توان آن را از رابطه زیر بدست آورد:

$$f = \frac{8grs}{v^2} \quad (20-3)$$

در نهایت با ترکیب تمامی روابط فوق، رابطه مناسب جهت برآورد بار کل مواد بستر در واحد

عرض ($m^3/s/m$) به صورت زیر حاصل خواهد گردید:

$$q_t = \frac{0.05V^2}{\sqrt{g(s-1)^2d_{50}c^3}} \quad (21-3)$$

که در آن c ضریب شزی (مجذور متر بر ثانیه)، v سرعت متوسط (متر بر ثانیه)، d_{50} قطر متوسط

ذرات (متر) و s وزن مخصوص نسبی است.

۳-۱۳-۴-۳- روش ایگرز- وایت

ایگرز-وایت براساس توان آبراهه، مزایای تحلیل ابعادی و جمع‌آوری داده‌های تجربی حاصل از

انجام آزمایش بر روی فلوم‌های آزمایشگاهی با عمق جریان کمتر از ۰/۴ متر و عدد فرود کوچکتر از

۰/۸، یکی از رایج‌ترین روابط انتقال بار کل را ارائه نمود. رابطه آنها نرخ انتقال بار کل را بر حسب سه

پارامتر بدون بعد قطر ذره (d_{*g})، تحرک (F_g) و انتقال (G_g) بیان می‌کند. قطر بدون بعد ذره که اثرات نیروی ثقل، جرم مخصوص و لزوجت را بیان می‌کند، با رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$d_{*g} = \left(\frac{(s-1)gd_{35}^3}{V^2} \right)^{1/3} \quad (22-3)$$

بر اساس قطر بدون بعد ذره، تمام ذرات رسوب را از نظر اندازه می‌توان به سه گروه درشت، متوسط و ریز تقسیم بندی نمود:

$D_{50} > 2.5MM$	$(d_{*g} > 60)$	درشت
$0.04MM \leq D_{50} \leq 2.5MM$	$(1 \leq d_{*g} \leq 60)$	متوسط
$D_{50} < 0.04MM$	$(d_{*g} < 1)$	ریز

ضریب بدون بعد تحرک که به وسیله نسبت نیروی برشی در واحد سطح بستر به وزن مستغرق یک لایه از ذرات بیان شده است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_g = \frac{u_*^n}{\sqrt{(s-1)gd_{35}}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \text{Log} \left(\frac{10y}{d_{35}} \right)} \right]^{1-n} \quad (23-3)$$

ضریب بدون بعد انتقال، که براساس مفهوم توان آبراهه استوار می‌باشد از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$G_g = c \left(\frac{F_g}{A} \right)^m \quad (24-3)$$

در آستانه حرکت ذرات رسوب، $F_g = A$ است. در روابط فوق برای ذرات با اندازه‌های متوسط ($1 \leq d_{*g} \leq 60$)، ضرایب n ، A ، m و c از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$n = 1 - 0.56 \log d_{*g} \quad (25-3)$$

$$A = \frac{0.23}{\sqrt{d_{*g}}} + 0.14 \quad (26-3)$$

$$m = \frac{9.66}{d_{*g}} + 1.334 \quad (27-3)$$

$$\log c = 3.86 \log d_{*g} - (\log d_{*g})^2 - 3.53 \quad (28-3)$$

برای ذرات با اندازه‌های درشت ($d_{*g} > 60$)، ضرایب n ، A ، m و c به صورت زیر می‌باشد:

$$n = 0 \quad A = 0.17 \quad m = 1.5 \quad c = 0.025 \quad (29-3)$$

و در نهایت معادله ایکرز- وایت برای برآورد بار کل رسوب بر حسب ($m^3/s/m$)، به صورت زیر می‌باشد:

$$q_t = \frac{q}{y} G_g s d_{35} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n \quad (30-3)$$

در معادلات فوق d_{*g} قطر بدون بعد ذره، s وزن مخصوص نسبی، d_{35} قطر معرف ذرات (متر)، y عمق جریان (متر)، F_g پارامتر بدون بعد تحرک، n ، A ، m و c ضرایب معادلات ایکرز- وایت که حاصل تحلیل رگرسیونی داده‌های آزمایشگاهی باشد، v سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، u_* سرعت برشی (متر بر ثانیه)، q_t دبی بار کل در واحد عرض (متر بر ثانیه)، q دبی جریان در واحد عرض (متر مربع بر ثانیه).

۳-۱۳-۴-۴- روش میر- پیتر و مولر

میر- پیتر و همکاران مطالعات جامعی بر روی انتقال رسوب انجام دادند و رابطه ای را در سال ۱۹۳۴ و با نام فرمول میر- پیتر ارائه نمودند. میر- پیتر و مولر پس از ۱۴ سال مطالعه و تحقیقات آزمایشگاهی دیگر در زوریخ سوئیس، رابطه‌ی جدیدی را در سال ۱۹۴۷ و با نام فرمول میر- پیتر و

مولر ارائه نمودند. این فرمول به صورت زیر می باشد:

$$\gamma \left(\frac{K_S}{K_r} \right)^{1.5} RS = 0.047(\gamma_s - \gamma) d_m + 0.25 \rho^{1/3} q_b^{2/3} \quad (31-3)$$

در رابطه فوق γ و γ_s به ترتیب وزن مخصوص آب و رسوب (در واحد تن بر متر مکعب)، R شعاع هیدرولیکی (متر)، S شیب انرژی، d_m قطر متوسط ذرات (متر)، ρ جرم مخصوص آب (تن بر متر مکعب)، q_b نرخ انتقال بار بستر در واحد عرض و $\frac{K_S}{K_r}$ نوع شیب و بگونه‌ای تنظیم می‌شود که مقاومت ناشی از ذرات (S_r) که فقط بخشی از افت انرژی کل است، عامل حرکت بار بستر می باشد.

معادله فوق را می توان به صورت بدون بعد زیر بیان نمود:

$$\left[\frac{q_b(\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s} \right]^{2/3} \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \frac{0.25}{(\gamma_s - \gamma) d_m} = \frac{\left(\frac{K_S}{K_r} \right)^{1.5} \gamma RS}{(\gamma_s - \gamma) d_m} - 0.047 \quad (32-3)$$

شیب انرژی را می‌توان از فرمول استریکلر به دست آورد:

$$S = \frac{V^2}{K_S^2 R^{4/3}} \quad (33-3)$$

در صورتیکه افت انرژی مربوط به مقاومت ناشی از ذرات را بتوان از فرمول استریکلر نیز محاسبه نمود، داریم:

$$S_r = \frac{V^2}{K_r^2 R^{4/3}} \quad (34-3)$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$\frac{K_S}{K_r} = \left(\frac{S_r}{S} \right)^{1/2} \quad (35-3)$$

البته نتایج آزمایش‌های این محققین نشان داد که این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{S_r}{S} = \left(\frac{K_S}{K_r} \right)^{3/2} \quad (36-3)$$

همچنین ضریب K_r توسط مولر و به صورت زیر تعیین گردید:

$$K_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (37-3)$$

در رابطه فوق d_{90} قطری که ۹۰٪ مصالح از آن ریزترند (متر).

با استفاده از معادلات فوق، نرخ بار بستر را می‌توان محاسبه نمود. فرمول میر-پیتر و مولر در اروپای مرکزی از مقبولیت زیادی برخوردار است.

۳-۱۳-۴-۵ - روش لارسن

این روش توسط لارسن (۱۹۵۸) برای تخمین بار کل رسوب ارائه گردید. این روش تابعی از شرایط جریان و دبی رسوب می‌باشد. رابطه لارسن توسط کمیته اجرائی ASCE در سال ۱۹۷۱ از لحاظ ابعادی به صورت زیر بیان گردید:

$$C_m = 0.01\gamma \sum p_i \left(\frac{d_i}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right) F\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right) \quad (38-3)$$

در رابطه فوق C_m غلظت کل دبی رسوب برحسب وزن در واحد حجم، p_i درصد مصالح هر کدام از طبقات منحنی دانه‌بندی، ω_i سرعت سقوط ذرات با اندازه متوسط d_i (سرعت سقوط متناسب با ذرات هر کدام 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 قابل محاسبه می‌باشد و D عمق موثر جریان.

لارسن رابطه زیر را برای تنش برشی ناشی از مقاومت ذرات ارائه نمود:

$$\tau' = \frac{\rho V^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1/3} \quad (39-3)$$

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 می‌باشد. رابطه تابعی $F\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right)$ بر اساس داده‌های فلوم آزمایشگاهی بدست می‌آید. همچنین لازم

به ذکر است که قطر میانه ذرات مورد استفاده در این روش بین ۰/۱۱ تا ۰/۲۹ میلیمتر می باشد.

۳-۱۳-۴-۶ روش توفالتی

این روش به نوعی اصلاح شده روش بار کل اینشتین می باشد. برعکس روش اینشتین که بار معلق را با محاسبه c_a (غلظت در ارتفاع مبنا a بالای بستر) بر مبنای بار بستر محاسبه می کند، روش توفالتی (۱۹۶۳) بار بستر را بر مبنای نیم رخ غلظت مواد معلق محاسبه می نماید. توفالتی نیم رخ عمق جریان را به چهار قسمت مختلف تقسیم بندی نمود و برای هر یک از مناطق فوق، رابطه ای جهت توزیع غلظت مواد معلق ارائه نمود. این چهار قسمت به ترتیب عبارتند از: منطقه بالا، منطقه میانه، منطقه پایین و منطقه بستر. در این روش برای هر کدام از قسمت های فوق، میزان انتقال رسوب محاسبه و با جمع تمامی آنها بار کل انتقال یافته محاسبه خواهد گردید. این روش کاملاً تجربی بوده و بر مبنای داده های متعدد صحرایی استوار می باشد. قطر ذرات مورد استفاده در آزمایش های توفالتی بین ۰/۳ تا ۰/۹۳ میلیمتر متغیر می باشد. معادلات کلی انتقال رسوب در هر کدام از بخش ها برای یک ذره منفرد به شرح زیر می باشد:

$$g_{ssl} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1+n_v-0.756z} \quad (40-3)$$

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (41-3)$$

$$g_{ssu} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} \left[(R)^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z} \right]}{1+n_v-1.5z} \quad (42-3)$$

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (43-3)$$

$$M = 43.2PC_L(1 + n_v)VR^{1+n_v-0.756z} \quad (44-3)$$

$$n_v = 0.1198 + 0.00048T \quad (45-3)$$

در نهایت با جمع تمامی معادلات فوق خواهیم داشت:

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (46-3)$$

در روابط فوق g_{ssL} میزان انتقال رسوب در منطقه پایین (تن در روز در هر فوت)، g_{ssM} میزان انتقال رسوب در منطقه میانه (تن در روز در هر فوت)، g_{ssU} میزان انتقال رسوب در منطقه بالا (تن در روز در هر فوت)، g_{sb} میزان انتقال رسوب در منطقه بستر (تن در روز در هر فوت)، g_s میزان انتقال رسوب کل (تن در روز در هر فوت)، M پارامتر غلظت رسوب، P درصد وزنی مصالح بستر با اندازه میانه d_m ، C_L درصد وزنی غلظت رسوب در منطقه پایین، R شعاع هیدرولیکی (فوت)، d_m قطر میانه ذرات (فوت)، Z توان معادلات انتقال رسوب که مبین ارتباط بین مشخصات هیدرولیکی و رسوبی می باشد، T دمای آب (فارنهایت)، n_v توان مربوط به دما.

۳-۱۳-۴-۷- روش ویلکاک

این روش تنها برای محاسبه نرخ انتقال رسوب در رودخانه‌های با بستر شنی و ماسه ای قابل کاربرد می باشد (ویلکاک و کرو، ۲۰۰۳). ویلکاک (۲۰۰۱) بر اساس مشاهدات انتقال رسوب در چهار آبراهه و یک فلوم آزمایشگاهی نشان داد که نرخ انتقال گروه ذرات ماسه و شن هنگامی که تنش برشی بستر با یک رابطه مرجع تجربی تنش برشی برای ماسه (τ_{rs}) و شن (τ_{rg}) درجه بندی می شود، با دو رابطه رایج مجزا قابل توصیف است. لذا ایشان نرخ انتقال رسوب را به دو بخش ناشی از ذرات شن و رسوب ناشی از ذرات ماسه تقسیم نموده و برای هر کدام رابطه‌ای را ارائه نموده که به شرح زیر می باشد (ویلکاک، ۲۰۰۱؛ پیتلیک و همکاران، ۲۰۰۹).

$$W_g^* = \begin{cases} 11.2 \left(1 - 0.846 \frac{\tau_{rg}}{\tau}\right)^{4.5} & (\tau > \tau_{rg}) \\ 0.0025 \left(\frac{\tau}{\tau_{rg}}\right)^{14.2} & (\tau \leq \tau_{rg}) \end{cases} \quad (47-3)$$

$$W_s^* = 11.2 \left(1 - 0.846 \sqrt{\frac{\tau_{rs}}{\tau}}\right)^{4.5} \quad (48-3)$$

در معادلات فوق، اندیس‌های g و s به ترتیب مربوط به ذرات شن و ماسه، W^* نرخ انتقال رسوب بدون بعد، τ_{rg} تنش برشی مرجع برای ذرات شن و τ_{rs} تنش برشی مرجع برای ذرات ماسه هستند. این مقادیر را می‌توان از روی مقادیر اندازه‌گیری شده بار بستر بدست آورد.

در نهایت نرخ انتقال رسوب کلی هر بخش (سن و ماسه) از معادلات زیر بدست می‌آید:

$$Q_{bs} = \frac{W_s^* \cdot f_s \cdot \rho_s \cdot B \cdot u_*^3}{(s-1)g} \quad (49-3)$$

$$Q_{bg} = \frac{W_g^* \cdot f_g \cdot \rho_s \cdot B \cdot u_*^3}{(s-1)g} \quad (50-3)$$

بار کل Q_b نیز حاصل جمع دو رابطه فوق می‌باشد. در روابط فوق، f_g و f_s به ترتیب درصد ذرات شن و ماسه، s وزن مخصوص نسبی ذرات، g شتاب ثقل، B عرض رودخانه و u_* سرعت برشی می‌باشد که از رابطه $u_* = \sqrt{gRS}$ قابل محاسبه است. در جدول (۲-۳) فهرستی از جزئیات و محدوده کاربرد هر کدام از توابع انتقال رسوب مورد استفاده در نسخه 4.1 مدل HEC-RAS ارائه گردیده است. پارامترهای بکار رفته در جدول عبارتند از: d قطر ذرات بکار رفته به کار رفته در آزمایش‌ها (میلیمتر)، d_m متوسط قطر ذرات (میلیمتر)، s وزن مخصوص ذرات رسوبی، V سرعت متوسط کانال (فوت بر ثانیه)، S شیب خط انرژی، T عرض کانال (فوت)، R شعاع هیدرولیکی (فوت) و NA اطلاعات و داده‌های ذکر نشده است.

جدول (۳-۲) - فهرست جزئیات توابع انتقال رسوب در مدل HEC-RAS

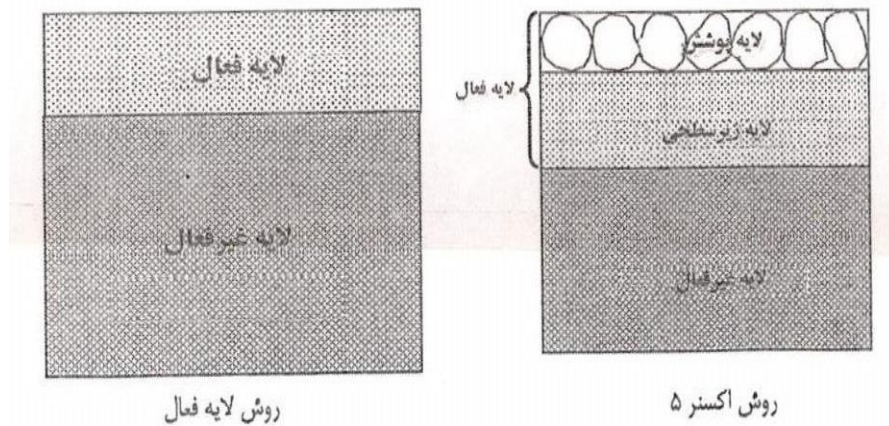
Function	d	d _m	s	V	D	S	W	T
Ackers-White (flume)	0.04 - 7.0	NA	1.0 - 2.7	0.07 - 7.1	0.01 - 1.4	0.00006 - 0.037	0.23 - 4.0	46 - 89
Englund-Hansen (flume)	NA	0.19 - 0.93	NA	0.65 - 6.34	0.19 - 1.33	0.000055 - 0.019	NA	45 - 93
Laursen (field)	NA	0.08 - 0.7	NA	0.068 - 7.8	0.67 - 54	0.0000021 - 0.0018	63 - 3640	32 - 93
Laursen (flume)	NA	0.011 - 29	NA	0.7 - 9.4	0.03 - 3.6	0.00025 - 0.025	0.25 - 6.6	46 - 83
Meyer-Peter Muller (flume)	0.4 - 29	NA	1.25 - 4.0	1.2 - 9.4	0.03 - 3.9	0.0004 - 0.02	0.5 - 6.6	NA
Tofaletti (field)	0.062 - 4.0	0.095 - 0.76	NA	0.7 - 7.8	0.07 - 56.7 (R)	0.000002 - 0.0011	63 - 3640	32 - 93
Tofaletti (flume)	0.062 - 4.0	0.45 - 0.91	NA	0.7 - 6.3	0.07 - 1.1 (R)	0.00014 - 0.019	0.8 - 8	40 - 93
Yang (field-sand)	0.15 - 1.7	NA	NA	0.8 - 6.4	0.04 - 50	0.000043 - 0.028	0.44 - 1750	32 - 94
Yang (field-gravel)	2.5 - 7.0	NA	NA	1.4 - 5.1	0.08 - 0.72	0.0012 - 0.029	0.44 - 1750	32 - 94

۳-۱۳-۵ - روش‌های مرتب‌سازی مصالح بستر

این مدل جهت محاسبه ضخامت لایه فعال و همچنین تغییرات عمقی لایه‌های بستر رودخانه از دو روش استفاده می‌نماید (شکل ۳-۸):

۱- روش اکسنر ۵ (Exner⁵, ۱۹۲۰, ۱۹۲۵): این روش به عنوان پیش فرض در مدل بکار می‌رود و شامل سه لایه فعال در بستر می‌باشد که توانای شکل‌گیری یک لایه سطحی مسلح که محدوده فرسایش مصالح زیرین را محدود می‌نماید، داراست.

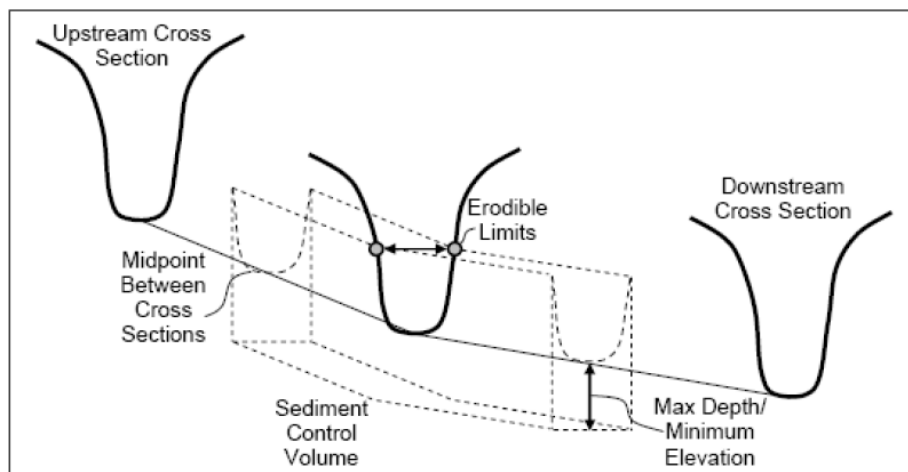
۲- لایه فعال: در این روش ضخامت لایه فعال برابر با d_{90} انتخاب می‌گردد. این فرض فقط برای بسترهای شنی مناسب است و بیش‌تر در روش انتقال رسوب ویلکاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل (۳-۸) روش‌های مورد استفاده در مدل HEC-RAS جهت مرتب سازی مصالح بستر

۳-۱۳-۶- حجم کنترل رسوب

در بسته نرم افزاری HEC-RAS، یک حجم کنترل رسوب برای هر مقطع عرضی همان‌طور که در شکل (۳-۹) نشان داده شده، در نظر گرفته می‌شود. حجم کنترل برای هر مقطع از حدفاصل میان مقطع مورد نظر و مقطع عرضی بالادست شروع و تا حدفاصل میان مقطع مورد نظر و مقطع عرضی پایین دست ادامه می‌یابد. پهنا و ضخامت عمودی حجم کنترل باید توسط کاربر مشخص شوند. اندازه عمودی حجم کنترل با خط چین در نیم‌رخ متناظر با هر مقطع نشان داده خواهد شد. ضخامت عمودی حجم کنترل را می‌توان در ستون‌های با عنوان Max Depth یا Min Elev وارد نمود. ستون Max Depth به کاربر اجازه می‌دهد تا حداکثر عمق قابل فرسایش مورد نظر را تنظیم نماید. و ستون Min Elev به کاربر این اجازه را می‌دهد تا ارتفاعی که مدل قادر به فرسایش آن نمی‌باشد را وارد کند (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل (۳-۹) نمای شماتیکی از حجم کنترل رسوب در هر مقطع عرضی

۳-۱۳-۷- روش‌های برآورد سرعت سقوط ذرات

یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر میزان انتقال رسوبات، سرعت سقوط ذرات رسوبی می‌باشد. سرعت سقوطی که یک ذره بدست می‌آید، مستقیماً به شرایط نسبی جریان آب و ذره رسوب هنگام ورود به جریان، انتقال و یا ته نشینی وابسته است.

سرعت سقوط مبین برآیند اثر ذره، شکل، زبری سطح، چگالی و لزوجت سیال می‌باشد. در مدل HEC-RAS چهار روش مختلف برای محاسبه سرعت سقوط ذرات وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از:

۱- روش توفالتی

۲- روش ون راین

۳- روش روبی

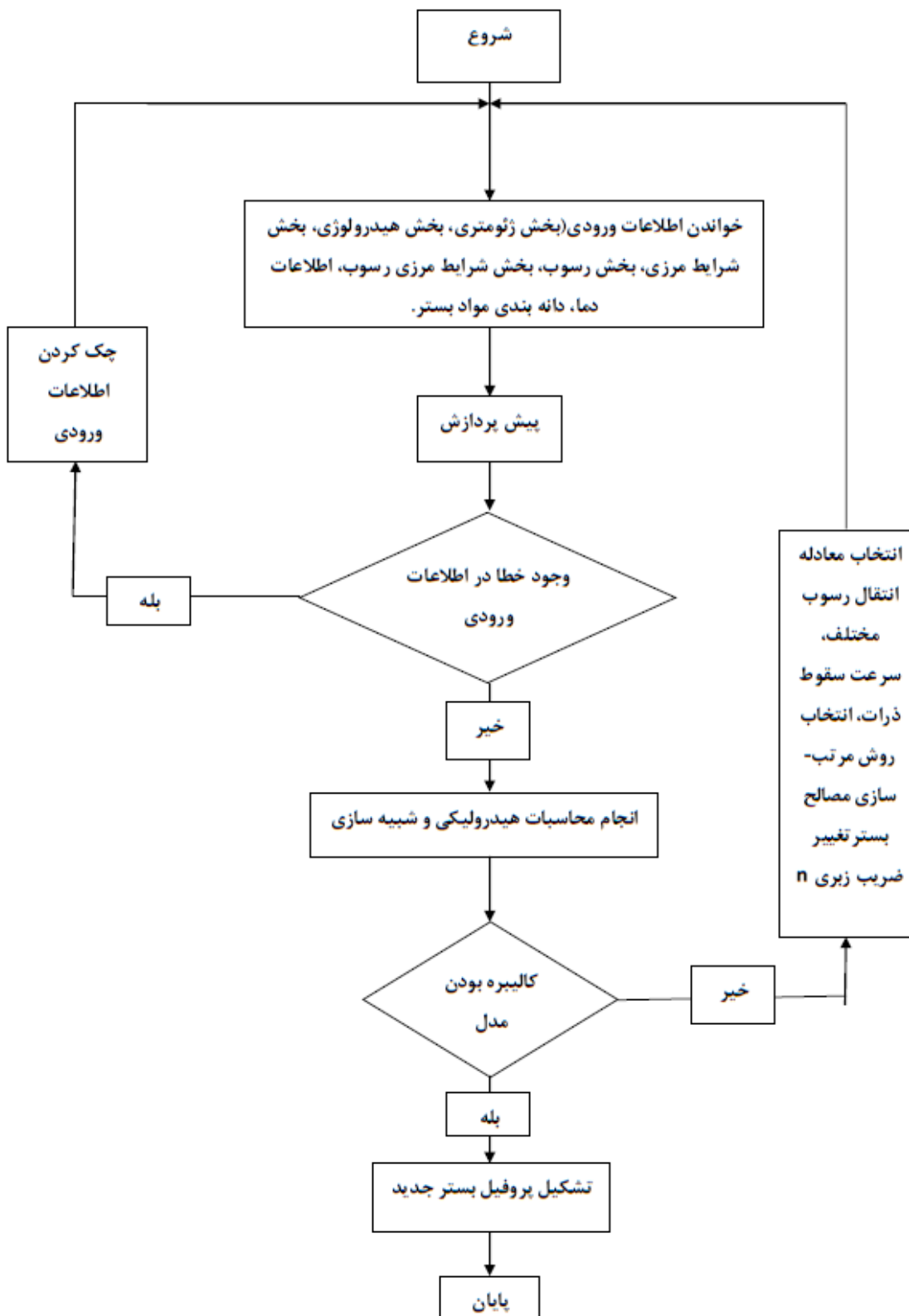
۴- روش گزارش ۱۲

همان طور که عنوان شد، یکی از عوامل مهم در سرعت سقوط، فاکتور شکل ذرات می‌باشد. این فاکتور بیانگر فرم یا ترکیب ظاهری یک ذره بدون توجه به اندازه یا ترکیب شیمیایی آن می‌باشد و از

رابطه زیر بدست می آید:

$$sf = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (۵۱-۳)$$

در رابطه فوق a طول محور بزرگ ذره، b طول محور میانی ذره، c طول محور کوچک ذره می باشد. ضریب شکل برای کره ۱ است. ذرات ماسه طبیعی دارای ضریب شکل متوسطی در حدود ۰/۷ می باشد. مقدار این فاکتور در مطالعات توفالتهی ۰/۹ و در مطالعات ون راین حدود ۰/۷ اختیار شده است. با توجه به نوع مصالح و دانه بندی مصالح بستر، کاربر می تواند به جای استفاده از مقادیر پیش فرض مدل، مقدار این فاکتور را محاسبه نماید (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۵). شکل ۳-۱۰ فلوجارت چگونگی انجام شبیه سازی رسوبگذاری در مدل ریاضی HEC-RAS را نشان می دهد.



شکل (۳-۱۰) فلوچارت چگونگی انجام شبیه سازی رسوبگذاری در مدل ریاضی HEC-RAS

فصل چهارم

بحث و نتایج

۴-۱- مقدمه

در این فصل از پایان نامه، نتایج حاصل از اجرای مدل مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و کالیبره کردن مدل تحلیل روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین‌دره، مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل به بررسی نتایج بدست آمده از اجرای مدل جهت شبیه‌سازی رسوبگذاری در مخزن سد شیرین‌دره پرداخته شده است.

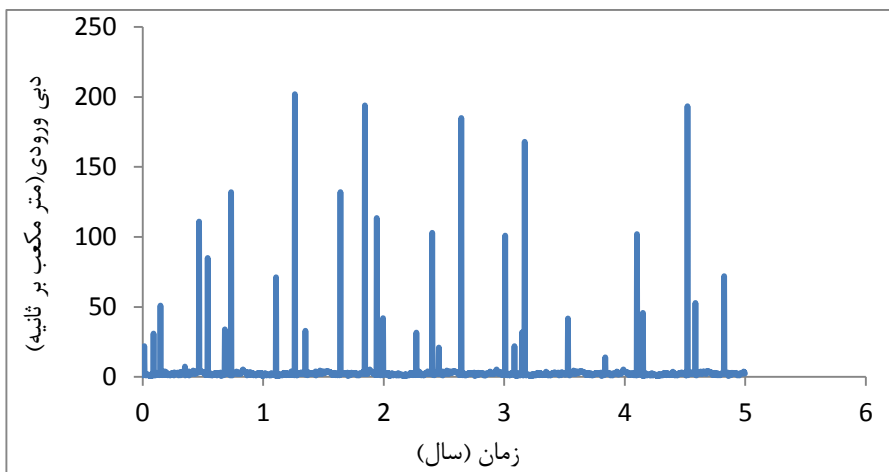
۴-۲- داده‌های ورودی سد شیرین‌دره

برای انجام این تحقیق ابتدا داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی تهیه گردید. داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی عبارتند از: دبی ورودی روزانه به مخزن، دبی رسوب، مختصات توپوگرافی مخزن شامل مقاطع عرضی، دانه بندی رسوبات بار کف بستر و دما می‌باشند.

همچنین داده‌های دبی ورودی و سطح تراز آب مخزن (اشل) به صورت سالانه از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفت.

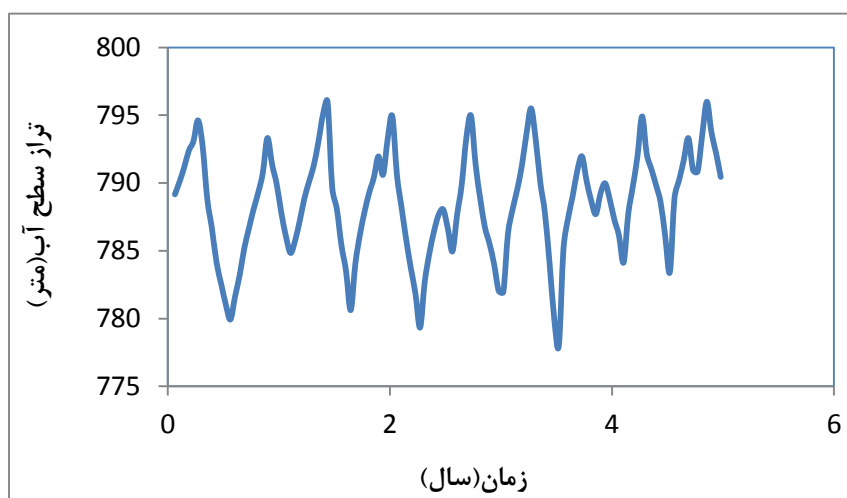
۴-۲-۱- دبی ورودی روزانه و سطح تراز آب

شکل ۴-۱ و ۴-۲ نمودار دبی ورودی روزانه به مخزن سد و سطح تراز آب (اشل) در مخزن سد شیرین‌دره را نشان می‌دهد که در مدل دبی ورودی روزانه به عنوان شرط مرزی بالادست Flow Series و تراز سطح آب به عنوان شرط مرزی پایین‌دست سد Stage Series استفاده شد که این داده‌ها برای بازه‌ی سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ می‌باشد.



شکل (۴-۱) نمودار دبی روزانه ورودی به سد شیرین دره برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶

با توجه به نمودار ۴-۱ مشاهده می‌شود که بیش‌ترین دبی گزارش شده ۲۰۲ متر مکعب بر ثانیه و کمترین آن ۰/۲۲ متر مکعب بر ثانیه بوده است.

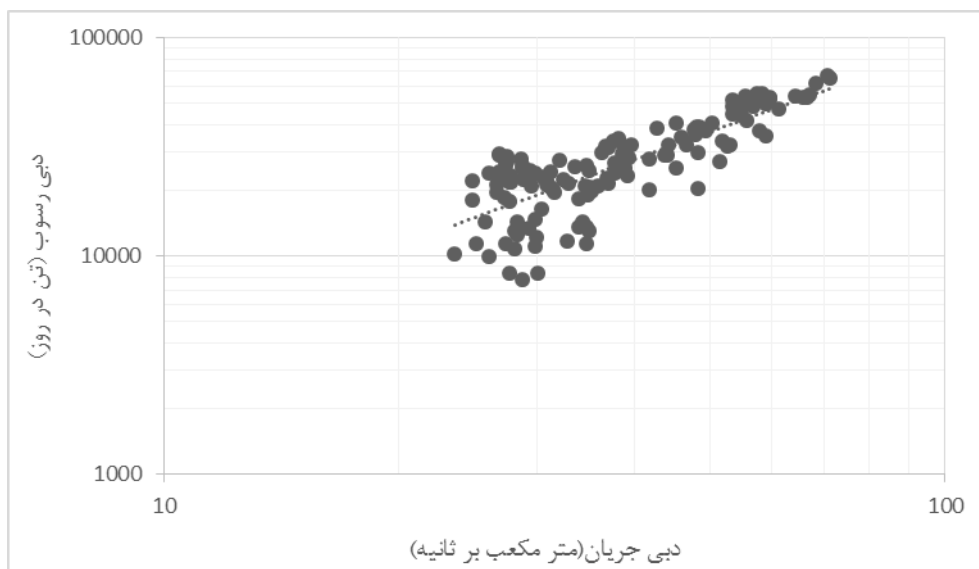


شکل (۴-۲) سطح تراز آب مخزن سد شیرین دره برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶

در شکل ۴-۲ مشاهده می‌شود سطح تراز آب در بازه سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ نوسان زیادی داشته است. که بالاترین سطح تراز ثبت شده برابر با ۷۹۶ متر (حداکثر تراز) از سطح دریا و پایین‌ترین سطح تراز ثبت شده برابر با ۷۷۸ متر از سطح دریا بوده است.

۴-۲-۲-دبی - دبی رسوب ورودی

جهت معرفی داده‌های دبی-دبی رسوب ورودی به مخزن سد از آمار و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری قلعه بربر که در بالادست سد قرار دارد مورد استفاده قرار گرفت، شکل ۳-۴ نمودار سنجه رسوب ورودی به سد شیرین دره که در مدل مورد استفاده قرار گرفته شده است را نشان می‌دهد.



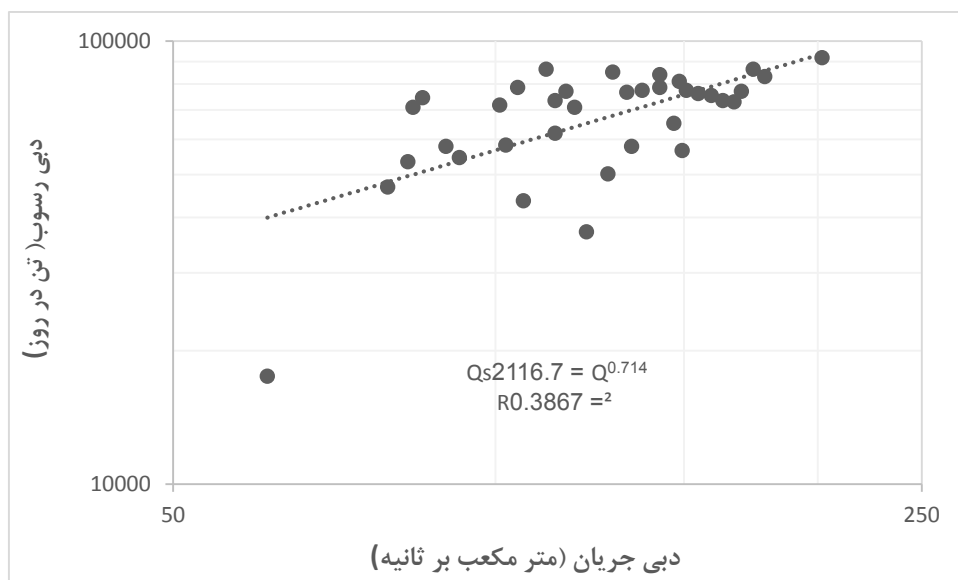
شکل (۳-۴) - نمودار دبی - دبی رسوب ورودی به مخزن سد

رابطه بین دبی-دبی رسوب در رودخانه شیرین دره به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_s = 227.76Q^{1.3017} \quad (۱-۴)$$

$$R^2 = 0.6327$$

در این معادله R ضریب همبستگی، Q_s دبی رسوب (تن در روز) و Q دبی آب (متر مکعب بر ثانیه) می‌باشد. با توجه به اینکه آمار دبی و دبی رسوب ایستگاه قلعه بربر به عنوان مرز بالادست بازه مورد مطالعه، محدود به سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ می‌باشد، آمار و اطلاعات مربوطه از همبستگی نسبتاً قابل قبولی برخوردار می‌باشد. همچنین در شکل زیر نمودار دبی - دبی رسوب اندازه‌گیری شده در زمان سیلاب در ایستگاه هیدرومتری قلعه بربر را نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) - نمودار دبی - دبی رسوب در زمان سیلاب

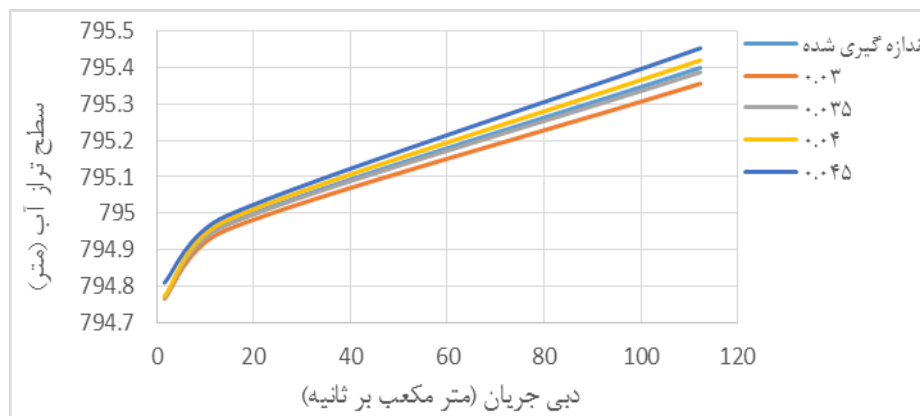
با توجه به رابطه شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود که دبی - دبی رسوب اندازه‌گیری شده در زمان سیلاب از همبستگی خوبی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین برای تعیین میزان رسوب ورودی به مخزن سد مورد مطالعه مراحل زیر انجام گرفته است:

- برای محاسبه حجم رسوبات انباشته شده در مخزن از هیدروگرافی انجام شده در مخزن سد در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ استفاده شده است. ابتدا با استفاده از نرم افزار Land اختلاف حجم رسوبگذاری مخزن بین بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ محاسبه و برابر با ۳۶۴۱۶۳۹ متر مکعب بدست آمد، جهت کنترل و صحت محاسبات از مقادیر اختلاف حجم مخزن تعیین شده در محیط نرم افزار ARC GIS استفاده شد و به عنوان حجم رسوبات انباشته شده برای بازه‌ی زمانی سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ در مخزن سد تعیین گردید، حجم محاسبه شده برای سال ۱۳۹۱ در تراز نرمال برابر با ۶۴/۶۳ میلیون متر مکعب و برای سال ۱۳۹۶ در تراز نرمال ۶۱/۰۲ میلیون متر مکعب بود. همچنین میزان خطای حجم رسوبات محاسبه شده در مخزن سد توسط نرم افزار Land، کمتر از یک درصد همراه بوده است. میزان حجم رسوبات محاسبه شده با داده‌های عملیات هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ توسط نرم افزار ARC GIS برابر با ۳۶۱۰۴۸۰ متر مکعب که با در نظر گرفتن وزن مخصوص رسوبات ۱/۱۵

تن در یک متر مکعب رسوب برابر با ۴۱۵۲۰۵۲ تن محاسبه گردید، متوسط رسوبات انباشته شده سالانه برابر با ۷۲۲۰۹۶ مترمکعب می‌باشد.

۴-۳- نحوه کالیبره هیدرولیک جریان در مدل

برای کالیبره هیدرولیک جریان در مدل از داده‌های دبی-اشل در ایستگاه هیدرومتری بالادست سد استفاده شده است. بدین ترتیب که با داشتن تراز سطح آب به ازای دبی‌های مختلف که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، مقدار ضریب زبری مانینگ در مدل به نحوی انتخاب شد تا به ازای دبی معلوم ورودی، تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدل با مقدار واقعی هم خوانی داشته باشد که در این تحقیق جهت کالیبره هیدرولیکی، مدل با جریان بدون رسوب (صلب) به ازای دبی ورودی مشخص و تراز سطح آب معلوم با ضریب زبری‌های متفاوت اجرا گردید، همچنین در تحقیق حاضر به لحاظ تغییرات طبیعی مقاطع مخزن سد، مقادیر ضرایب همگرایی (C_c) و واگرایی (C_e) مقطع که برای شرایط مختلف به وسیله انجمن مهندسين ارتش آمریکا پیشنهاد شده است (Hydrologic Engineering Center, 2010a)، در مطالعه حاضر ضرایب همگرایی و واگرایی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ در نظر گرفته شد. شکل ۴-۵ منحنی-سطح تراز آب(اشل) بدست آمده از اجرای مدل با مقادیر ضریب زبری‌های مختلف برای ساحل چپ، ساحل راست و کانال اصلی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵)-منحنی دبی-سطح تراز آب(اشل) حاصل از اجرای مدل با ضریب زبری‌های مختلف

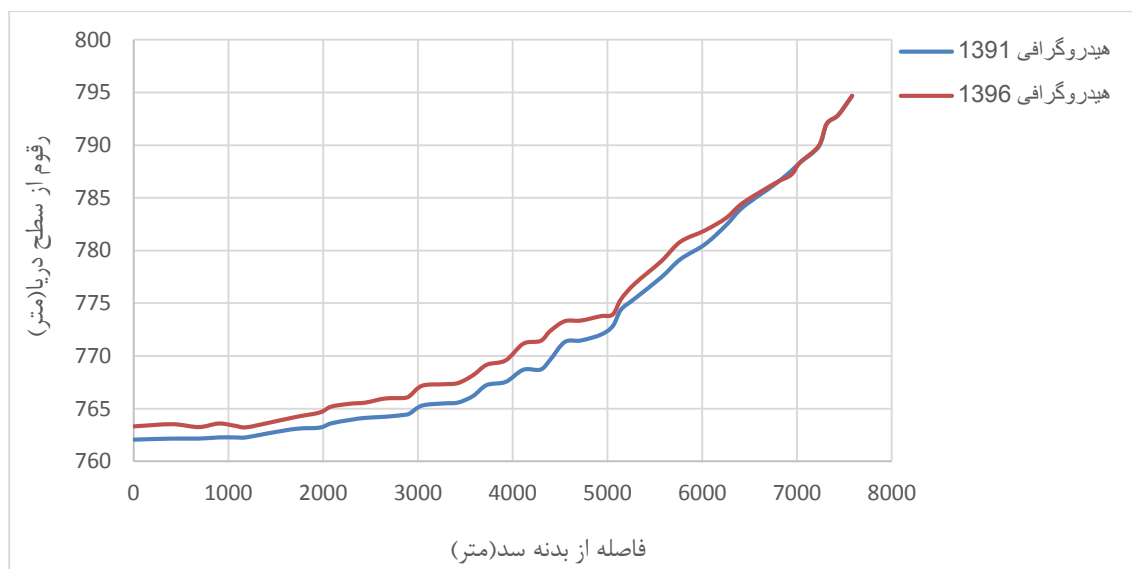
همان طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای مدل با ضریب زبری ۰/۰۳۵ به

واقعیت نزدیک می‌باشد، که در این تحقیق جهت کالیبره کردن هیدرولیکی مدل مقدار ضریب زبری ۰/۰۳۵ انتخاب گردیده است.

۴-۴- نحوه کالیبره کردن رسوب در مدل

کالیبره کردن رسوب مدل شامل مراحل شناخت پارامترها، تعیین حساسیت مدل نسبت به پارامترها و در نهایت کالیبره مدل می‌باشد. در این مدل عوامل تاثیرگذار عبارتند از: نوع معادله انتقال رسوب، مدت زمان گام محاسباتی، معادله سرعت سقوط ذرات و انتخاب روش مرتب سازی مصالح بستر، حساسیت فرایند نسبت به تغییر این پارامترها از طریق آزمون و خطا بررسی شد و جهت کالیبره کردن رسوب مدل برای ارزیابی روند رسوبگذاری مخزن سد شیرین دره از نیمرخ طولی رسوبگذاری بدست آمده از عملیات هیدروگرافی مربوط سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ استفاده گردید.

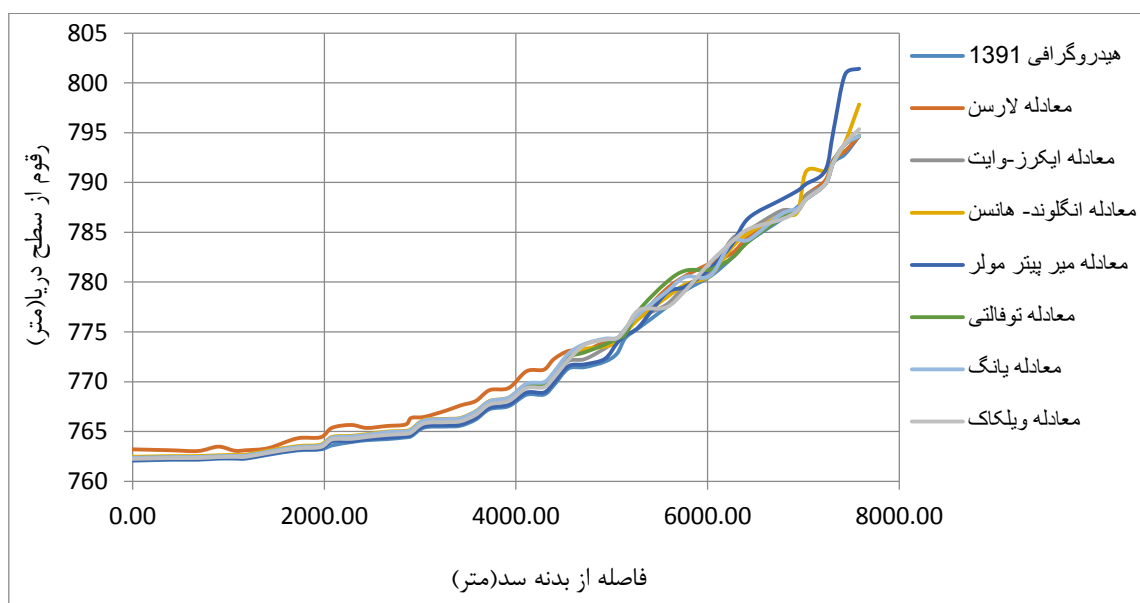
شکل ۴-۶ نیمرخ طولی مخزن سد حاصل از عملیات هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶) - نیمرخ طولی مخزن سد در هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶

در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود که روند رسوبگذاری مخزن سد به صورت یکنواخت یا نواری رخ داده است، هر چند که این نوع رسوبگذاری غیر معمول است ولی ممکن است در مخازن کم عرض با تغییرات سطح آب زیاد اتفاق افتد. چنین نوع رسوبگذاری در مخازنی که نسبت C/I زیاد است رخ می‌دهد (موریس و فان ۱۹۹۸).

برای انجام کالیبره رسوب، مدل با استفاده از معادلات مختلف انتقال رسوب، سرعت سقوط ذرات و روش مرتب سازی مصالح بستر و گام زمانی محاسباتی مختلف برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ اجرا گردید. نتایج اجرای مدل با توابع مختلف انتقال رسوب برای بازه‌ی زمانی ۵ سال در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل (۴-۷) - روند تغییرات نیم‌رخ طولی رسوبگذاری در بستر سد با اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال با توابع مختلف انتقال رسوب

همان طور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود مدل نسبت به تابع انتقال رسوب دارای بالاترین حساسیت می‌باشد. با توجه به اجرای مدل با معادلات انتقال رسوب یانگ، توفالتی، ایکرز-وایت، انگلوند-هانسن، میر-پیتر و مولر و ویلکاک رسوبگذاری خوبی رخ نداده است و تنها تابع انتقال رسوب لارسن از نتایج قابل قبولی برخوردار می‌باشد. در مطالعه موردی انجام شده منطقی‌ترین الگوی رسوب،

الگوی رسوبگذاری مربوط به تابع انتقال رسوب لارسن بود، با توجه به جدول ۳-۲ فصل قبل که در آن فهرستی از جزئیات و محدوده کاربرد هر کدام از توابع انتقال رسوب مورد استفاده در نسخه ۴/۱ مدل HEC-RAS ارائه گردیده است، شرایط سد مورد مطالعه که بار رسوبی آن بیش تر از نوع سیلت و شن می باشد با جزئیات و محدوده کاربرد دیگر معادلات انتقال رسوب مغایرت داشته و تنها با شرایط معادله لارسن مطابقت دارد به همین علت معادله انتقال رسوب لارسن منطقی ترین الگوی رسوبگذاری را ارائه نموده است. همچنین در جدول ۴-۱ میزان حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن سد با توجه به هیدروگرافی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ و نتایج حاصل از اجرای مدل HEC-RAS4.1 با بکارگیری معادلات مختلف انتقال رسوب و معادله سرعت سقوط ذرات Ruby و روش مرتب سازی^۱ Exner5 برای مدت زمان ۵ سال آورده شده است.

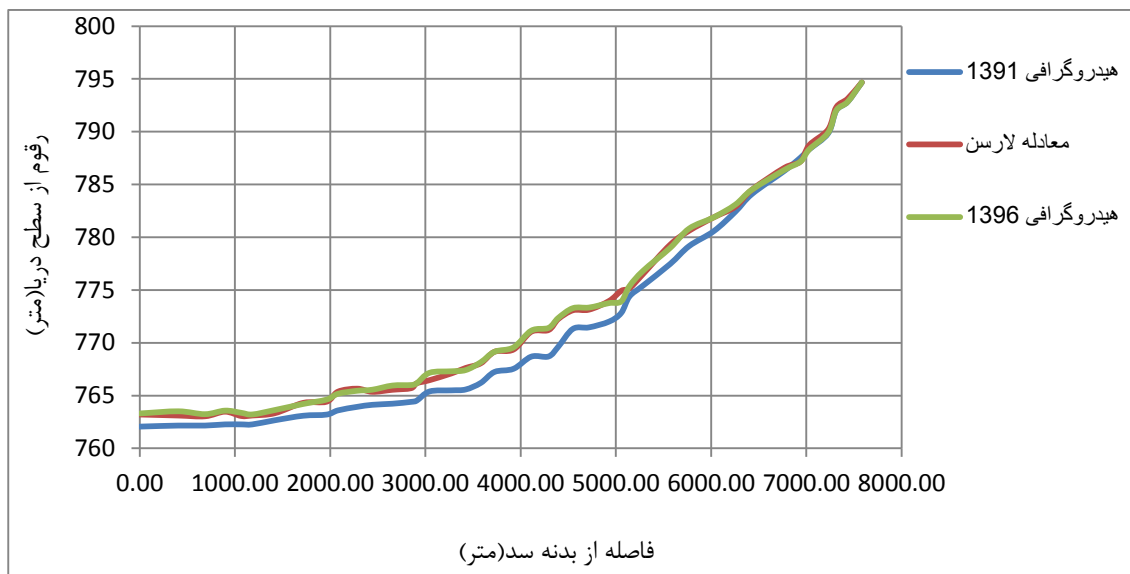
جدول (۴-۱)-میزان حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن سد در هیدروگرافی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ و نتایج حاصل از اجرای مدل توسط معادلات مختلف انتقال رسوب برای مدت زمان ۵ سال

درصد خطا	حجم رسوبات ته نشین شده (میلیون متر مکعب)	نوع معادله انتقال رسوب
-	۳/۶۱	هیدروگرافی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶
۳/۰۴۷	۳/۵۰۷	لارسن
۱۷/۷۸	۲/۹۶۸	انگلوند- هانسن
۱۵/۵۱	۳/۰۵	ایکرز- وایت
۱۲/۱۴	۳/۱	توفالتی
۱۱/۳۵	۳/۲	یانگ
۱۸/۲۸	۲/۹۵	میر پیتر- مولر
۱۲/۶	۳/۱۵۵	ویلکاک

1-sorting method

بررسی جدول ۴-۱ نشان داد که مدل از قابلیت خوبی برای ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد برخوردار بوده و میزان خطای حاصل از این مدل با نتایج حاصل از هیدروگرافی در حدود ۳/۰۴۷ درصد بدست آمد، که قابل قبول تلقی می‌گردد.

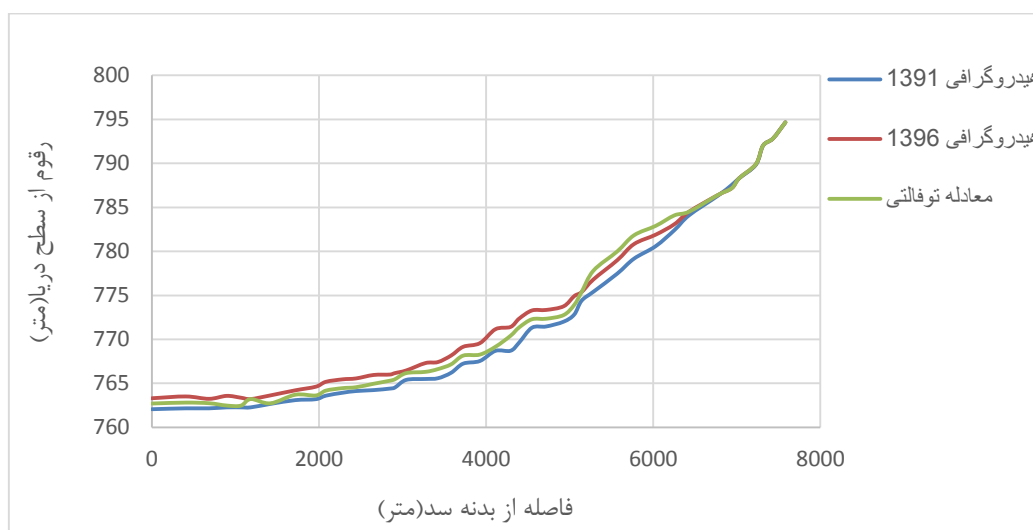
مقایسه بین نتایج مدل و رسوبات اندازه‌گیری شده در مخزن سد که از عملیات هیدروگرافی در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ استخراج شده بود، حاکی از وجود اختلافاتی بین شبیه‌سازی انجام شده (معادله انتقال رسوب لارسن) و واقعیت موجود بوده که ناشی از چند علت می‌تواند باشد، اولین علت یک بعدی و دو بعدی بودن مدل‌های ریاضی است، حال آنکه مسائل واقعی دارای ماهیت سه بعدی هستند با وجود آنکه در مدل‌های ریاضی سعی شده است با لحاظ کردن پارامترهایی نظیر آشفتگی جریان این تقریب حداقل شود، بروز خطا اجتناب ناپذیر است. علت دیگر خطا در معادلات انتقال رسوب نهفته است، بدلیل آنکه تمام معادلات انتقال رسوب دارای مبانی تجربی تئوریکی هستند، هر یک دارای محدودیت‌هایی بوده و برای رسوبات و شرایط خاصی مناسب هستند. این امر ناشی از عدم شناخت کامل پدیده انتقال رسوبات و پارامترهای موثر بر آن می‌باشد. علت دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد دقیق نبودن اندازه‌گیری‌های انجام شده پیرامون دبی - دبی رسوب هنگام وقوع سیلاب و دانه‌بندی آن است که نهایتاً اطلاعات ورودی این مدل‌ها را همراه با خطا می‌کند که این امر منجر به خطا در نتایج می‌شود. همچنین وجود جریان‌های لایه‌ای در اعماق مخزن به دلیل تغییرات دما می‌تواند در میزان رسوبات معلق تأثیرگذار بوده و باعث بروز خطا در نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با واقعیت گردند. شکل ۴-۸ نتایج مربوط به هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ - ۱۳۹۶ و مدل عددی با معادله لارسن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- نتایج حاصل از اجرای مدل برای بازه‌ی زمانی ۵ سال با استفاده از معادله انتقال رسوب لارسن

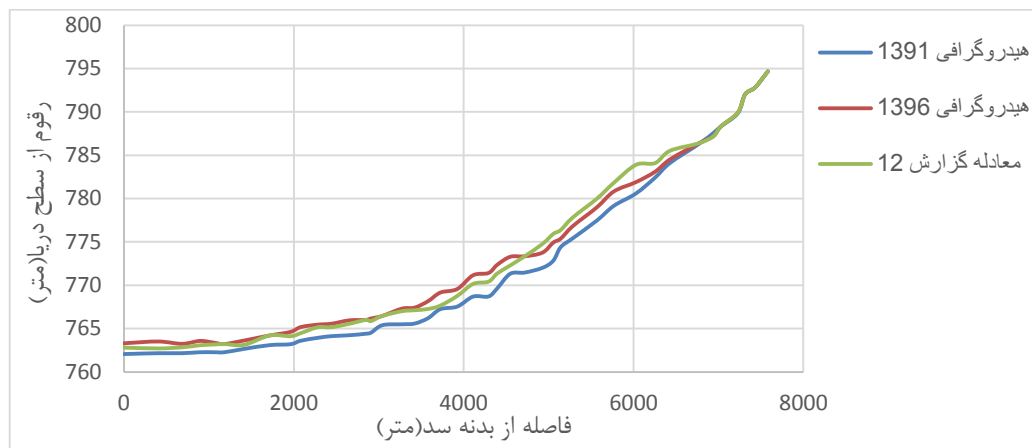
با توجه به مطالب اشاره شده و شکل ۴-۸ و قابلیت‌های معادله انتقال رسوب لارسن در مدل سازی به عنوان معادله نهایی جهت ارزیابی روند رسوبگذاری مخزن سد شیرین دره انتخاب گردیده است.

برای انتخاب معادله سرعت سقوط ذرات، مدل با معادلات سرعت سقوط ذرات Ruby, Toffaleti, Van rijn و Report 12 اجرا گردید که نتایج حاصل از اجرای مدل در اشکال ۴-۹ تا ۴-۱۲ نشان داده شده است.



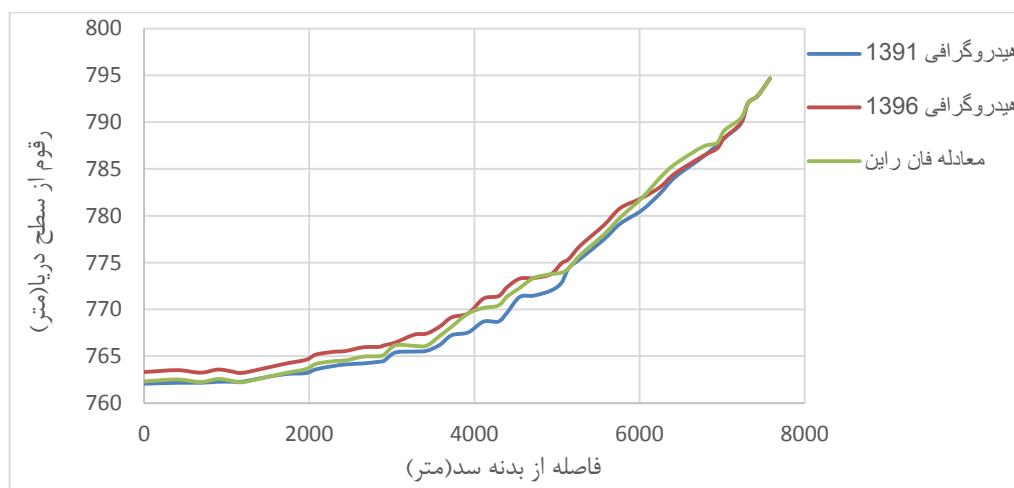
شکل ۴-۹- نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات توفالتی

در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود که اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات توفالتی انتقال رسوب خوبی صورت نگرفته است و بیشتر رسوبات در فاصله ۶۰۰۰ متری سد انباشته شده است.



شکل (۴-۱۰)- نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات گزارش ۱۲

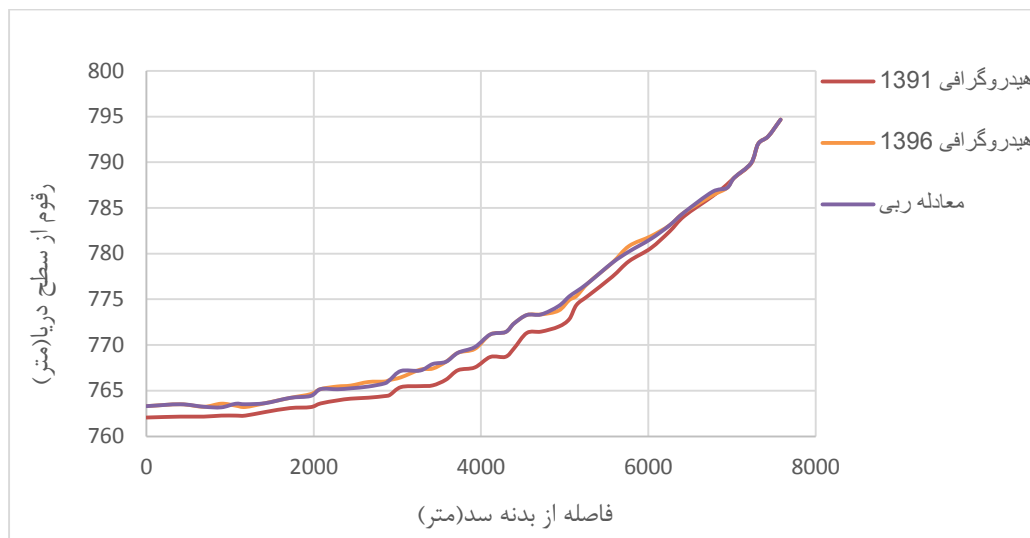
در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود که اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات گزارش ۱۲ قابلیت خوبی نداشته و نتایج مدل با نتایج هیدروگرافی هم پوشانی ندارد.



شکل (۴-۱۱)- نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات فان راین

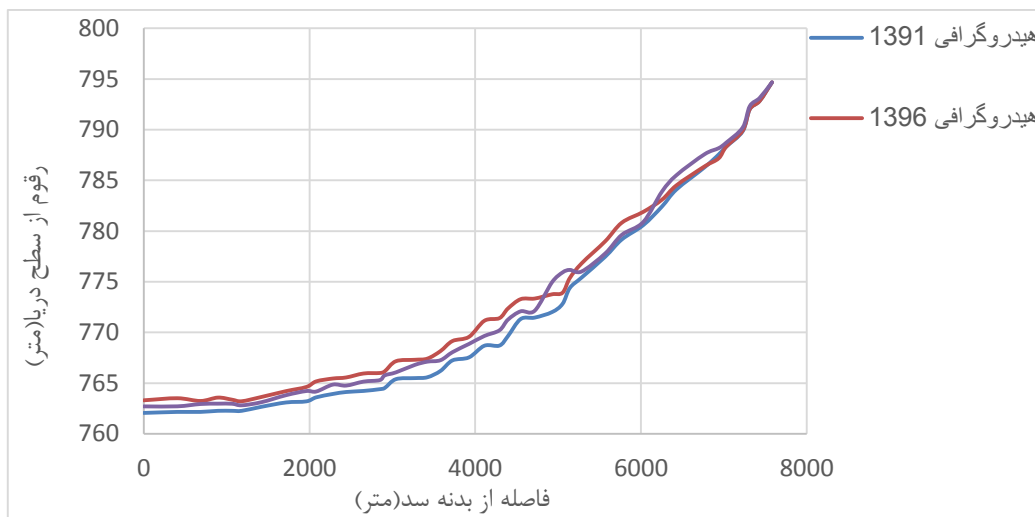
باتوجه به شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات فان راین انتقال رسوب خوبی صورت نپذیرفته است و در فاصله ۲۰۰۰ متر تا تا بدنه سد

رسوبات کمی ته‌نشین شده است.



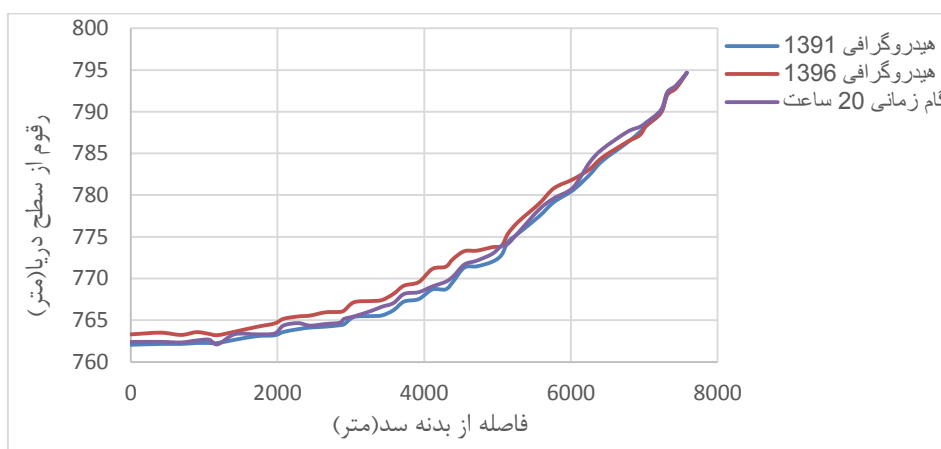
شکل (۴-۱۲)- نتایج اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات ربی

در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود که اجرای مدل با استفاده از معادله سرعت سقوط ذرات ربی نتایج قابل قبولی داشته و نیم‌رخ حاصل از مدل و هیدروگرافی از هم‌پوشانی خوبی برخوردار می‌باشند، در نتیجه این معادله به عنوان معادله نهایی برای ارزیابی روند رسوبگذاری مخزن سد شیرین دره انتخاب گردیده است. همچنین در اشکال ۴-۱۳ تا ۴-۱۵ نتایج حاصل از اجرای مدل برای گام زمانی محاسباتی مختلف نشان داده شده است.



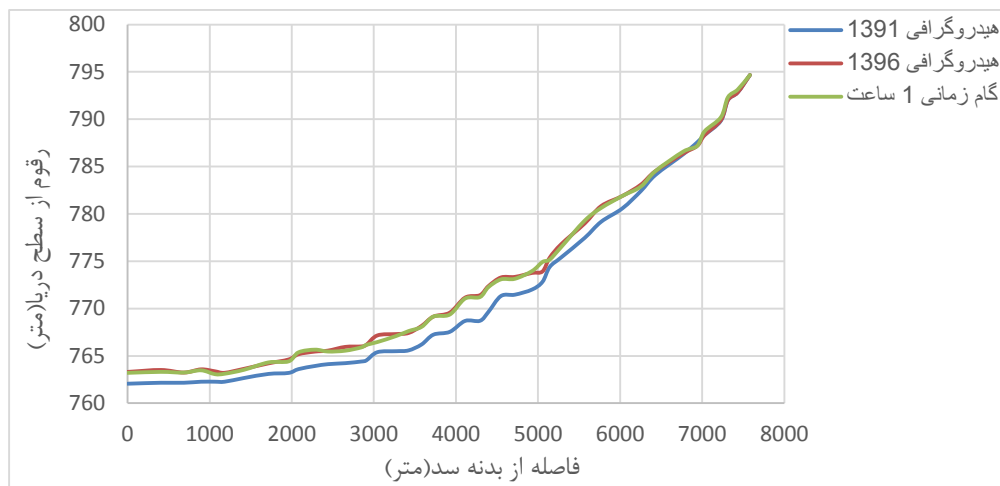
شکل (۴-۱۳)- نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱۰ ساعت

در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱۰ ساعت با نتایج هیدروگرافی ۱۳۹۶ هم پوشانی خوبی نداشته است و از الگوی رسوبگذاری قابل قبولی برخوردار نمی‌باشد.



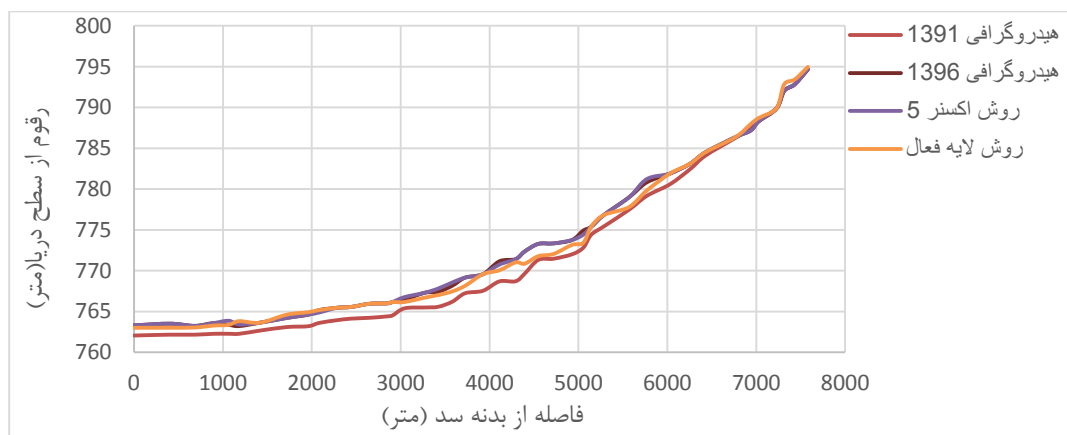
شکل (۴-۱۴)- نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۲۰ ساعت

با توجه به شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود که اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۲۰ ساعت با نتایج هیدروگرافی هم پوشانی ندارد. در این حالت نسبت به نیچ هیدروگرافی سال ۱۳۹۶ رسوبگذاری کمتری رخ داده است.



شکل (۴-۱۵)- نتایج حاصل از اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت

در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود که اجرای مدل با گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت از نتایج قابل قبولی برخوردار بوده و نتایج آن با نتایج هیدروگرافی ۱۳۹۶ هم‌پوشانی خوبی داشته است لذا برای اجرای مدل جهت ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره از گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت استفاده گردید. همچنین در شکل ۴-۱۶ نتایج حاصل از اجرای مدل جهت انتخاب روش مرتب‌سازی مصالح بستر نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۶)- نتایج حاصل از اجرای مدل با روش‌های مختلف مرتب‌سازی مصالح بستر

با توجه به شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود اجرای مدل با استفاده از روش مرتب‌سازی Exner 5 در مقایسه با روش لایه فعال از نتایج بهتری برخوردار بوده و با نتایج حاصل از هیدروگرافی ۱۳۹۶ تطابق خوبی داشته است، لذا جهت ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره از روش مرتب‌سازی

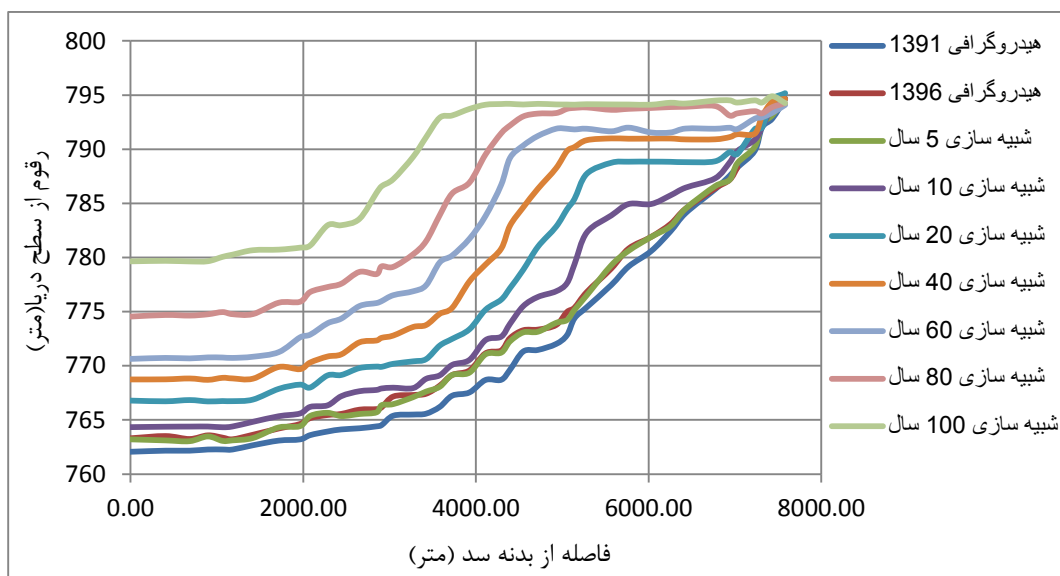
Exner5 استفاده گردید. جدول ۴-۲ میزان حساسیت هر یک از پارامترهای موثر در کالیبراسیون مدل را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۲) - میزان حساسیت هر یک از پارامترهای موثر در کالیبراسیون

پارامترهای مدل	بازه‌های اجرا شده	میزان حساسیت
ضریب زبری	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	۱۷ (درجه سانتی‌گراد)	کم
گام زمانی محاسباتی	۱-۱۰-۲۰ (ساعت)	زیاد

۴-۵- شبیه‌سازی مدل برای بازه‌ی زمانی مختلف

بعد از مراحل کالیبره کردن مدل از لحاظ هیدرولیکی و رسوب، روند رسوبگذاری مخزن سد شیرین‌دره (انتخاب معادلات مناسب، معادله انتقال رسوب Laursen، معادله سرعت سقوط ذرات Ruby و روش مرتب‌سازی Exner5 و گام زمانی ۱ ساعت) برای بازه‌های زمانی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال بررسی گردید، شکل ۴-۱۷ 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.



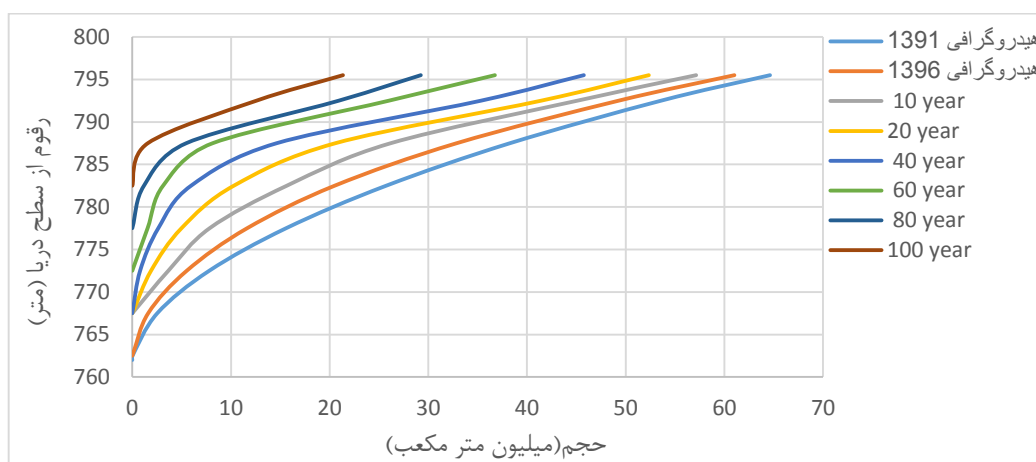
شکل (۴-۱۷)- تغییرات پروفیل طولی با اجرای مدل برای مدت زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال

در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود که برای بازه‌ی زمانی ۱۰ سال و بیشتر در داخل مخزن دلتا تشکیل شده که با گذشت زمان به سمت بدنه پیشروی می‌کند، طبق مطالعات علت آن می‌تواند وجود ذرات درشت دانه (شن و ماسه) و بخش سیلت باشد، این نوع ترسیب در مخازنی که نسبت حجم اولیه مخزن (c) به حجم جریان ورودی (I) زیاد باشد، اتفاق می‌افتد.

۴-۶- پیش بینی وضعیت رسوبگذاری

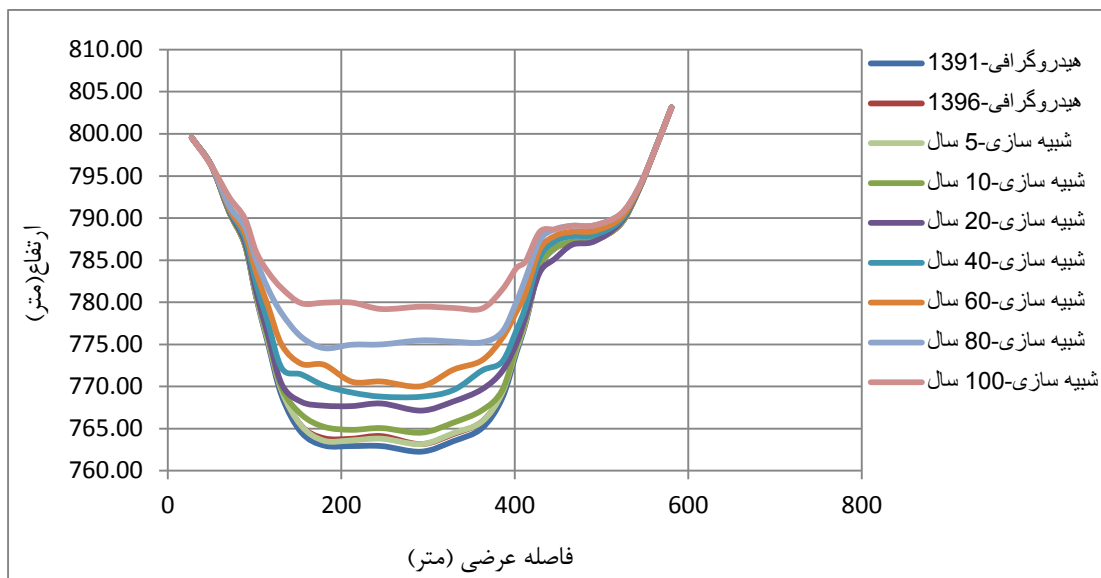
به منظور پیش بینی روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره، پس از انتخاب معادله انتقال رسوب (Laursen)، معادله سرعت سقوط ذرات (Ruby) و روش مرتب‌سازی مصالح بستر (Exner5) و گام زمانی ۱ ساعت، مدل برای مدت زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال اجرا گردید. نتایج بدست آمده در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است، همان طور که نتایج شکل مذکور نشان می‌دهد، نحوه روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره با روند افزایشی همراه بوده است، بطوری که در اجرای مدل برای مدت زمان 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

ته نشین شده است که حدود ۸۰ درصد ظرفیت مفید مخزن سد را شامل می‌شود به عبارتی متوسط کاهش سالانه حجم مخزن حدود ۰/۸ درصد می‌باشد در حالی که تحقیقات نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا، که بیش از ۷۰۰۰ میلیارد مترمکعب می‌باشد به علت رسوبگذاری از دست می‌رود (آتکینسون، ۱۹۹۶). شکل ۴-۱۸ منحنی حجم-ارتفاع مخزن سد محاسبه شده توسط نرم افزار سورفر ۱۵ 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 و ۱۰۰ سال را نشان می‌دهد.



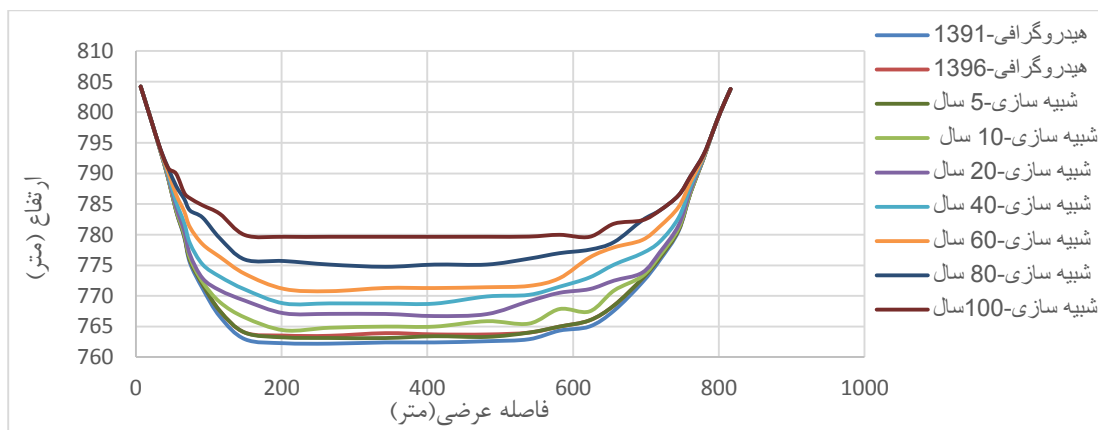
شکل (۴-۱۸) - منحنی‌های حجم-ارتفاع محاسبه شده توسط نرم افزار surfer15 با استفاده از نتایج حاصل از هیدروگرافی و اجرای مدل (سطح تراز بستر پس از رسوبگذاری) برای دوره‌های زمانی مختلف

در ادامه چگونگی روند تغییرات تعدادی از مقاطع عرضی مخزن به فواصل مختلف با اجرای مدل برای مدت زمان‌های آتی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سال در اشکال ۴-۱۹ تا ۴-۲۸ نشان داده شده است.



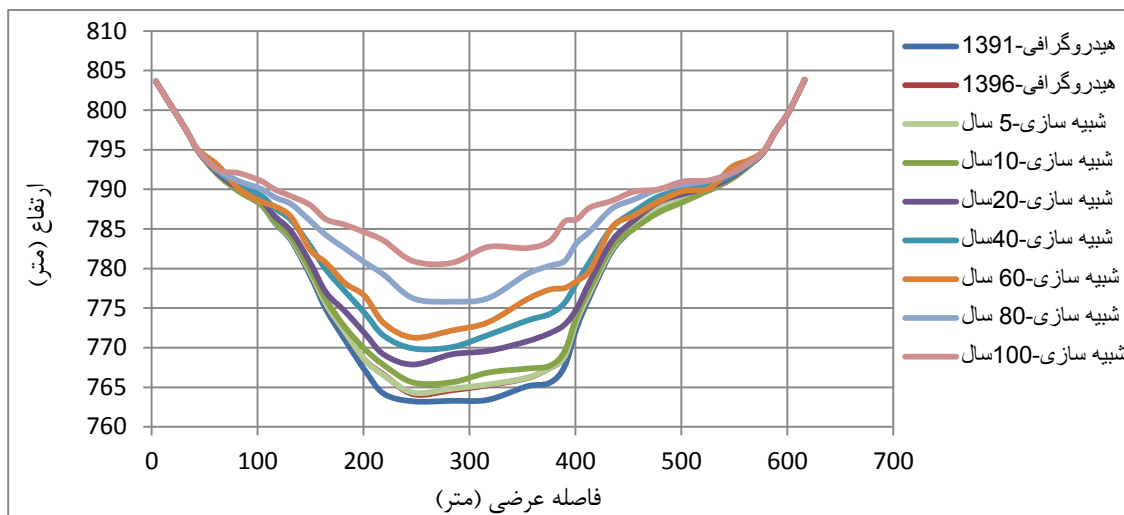
شکل (۴-۱۹)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۴) به فاصله ۲۸۳ متر از بدنه سد

در شکل ۴-۱۹ تغییرات مقطع عرضی در فاصله ۲۸۳ متر از بدنه سد نشان داده شده است همان طور که مشخص است میزان رسوبات انباشته شده در شبیه سازی ۵ سال کمتر از مقدار هیدروگرافی بوده است و برای سایر زمان های شبیه سازی، رسوبگذاری قابل ملاحظه ای رخ داده است.



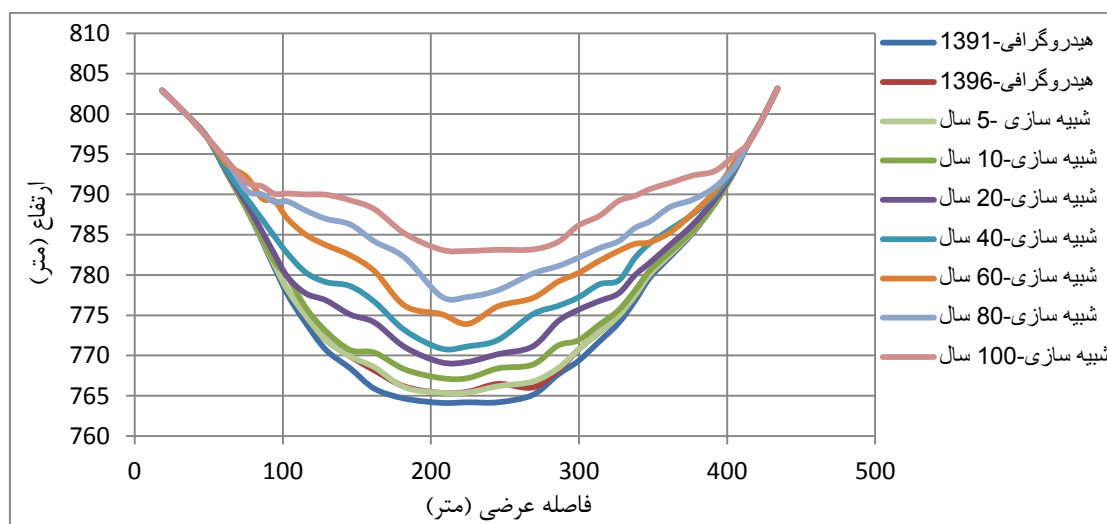
شکل (۴-۲۰)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۸) به فاصله ۸۹۳ متر از بدنه سد

در شکل ۴-۲۰ تغییرات مقطع عرضی در فاصله ۸۹۳ متر از بدنه سد نشان داده شده است با توجه به شکل مذکور مشاهده می شود که بین نتایج شبیه سازی ۵ سال و بستر هیدروگرافی ۱۳۹۶ در فاصله میانی مقطع عرضی مذکور از تطابق و هم پوشانی کمتری برخوردار بوده است.



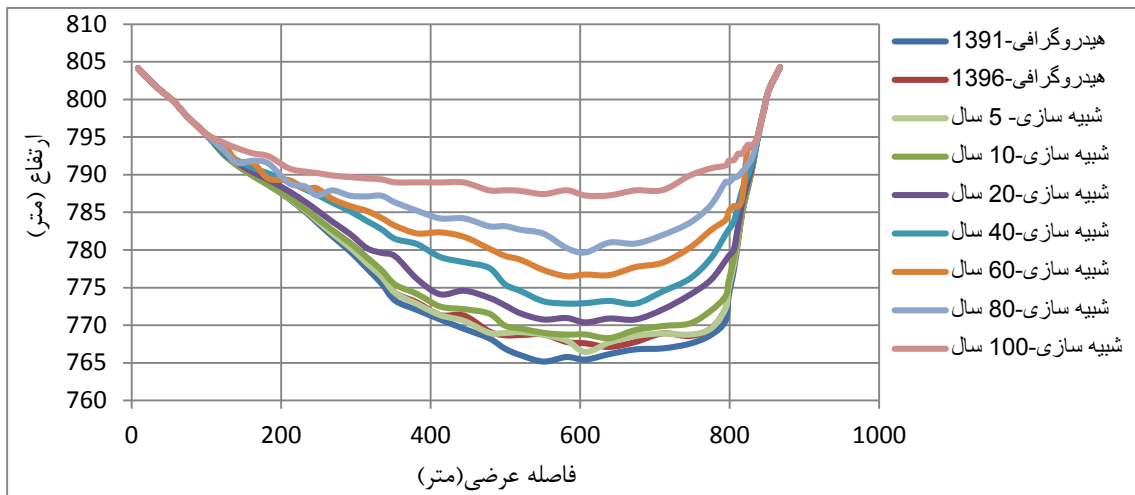
شکل (۴-۲۱)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۱۲) به فاصله ۱۷۸۰ متر از بدنه سد

در شکل ۴-۲۱ نتایج حاصل از اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال و بستر هیدروگرافی سال ۱۳۹۶ از هم‌پوشانی خوبی برخوردار بوده است و با اجرای مدل برای مدت زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سال رسوبگذاری بیشتر در فاصله عرضی ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر اتفاق افتاده است.



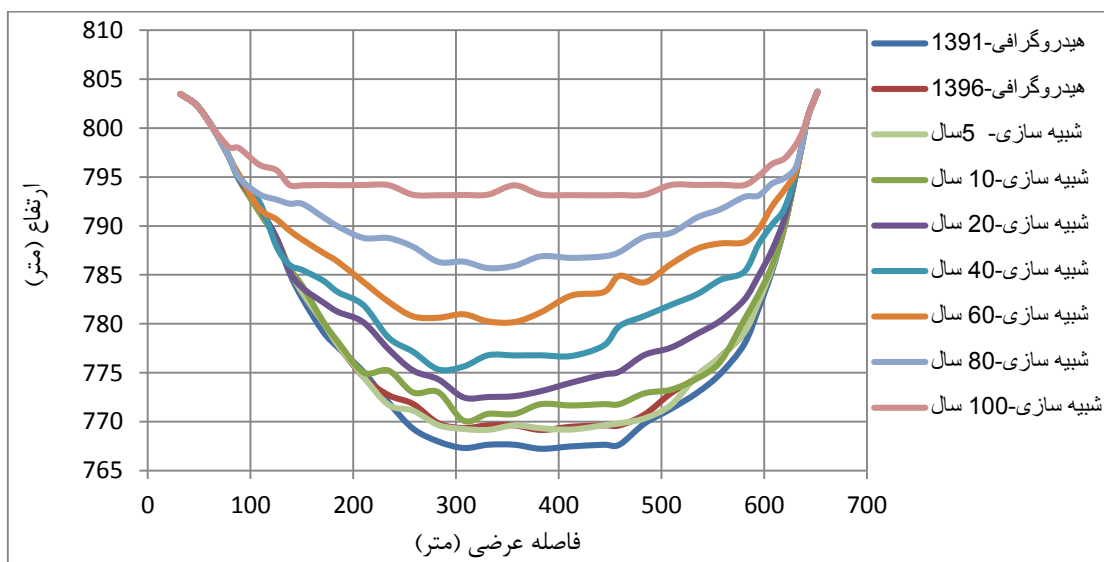
شکل (۴-۲۲)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۱۶) به فاصله ۲۳۷۴ متر از بدنه سد

همان طور که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود نتایج اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال در مقایسه با نتایج هیدروگرافی (واقعیت) اختلاف کمتری داشته است.



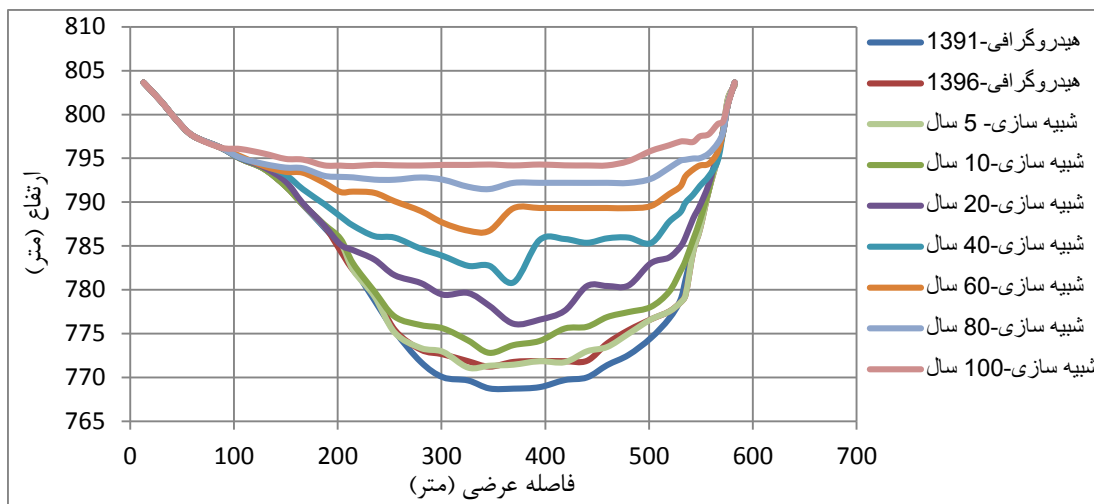
شکل (۴-۲۳)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۰) به فاصله ۳۰۰۰ متر از بدنه سد

شکل ۴-۲۳ نشان می‌دهد که نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن در سال ۱۳۹۶ با نتایج بدست آمده از اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال از هم‌پوشانی خوبی برخوردار نبوده است و برای سایر مدت زمان‌های شبیه‌سازی، رسوبگذاری قابل ملاحظه‌ای رخ داده است.



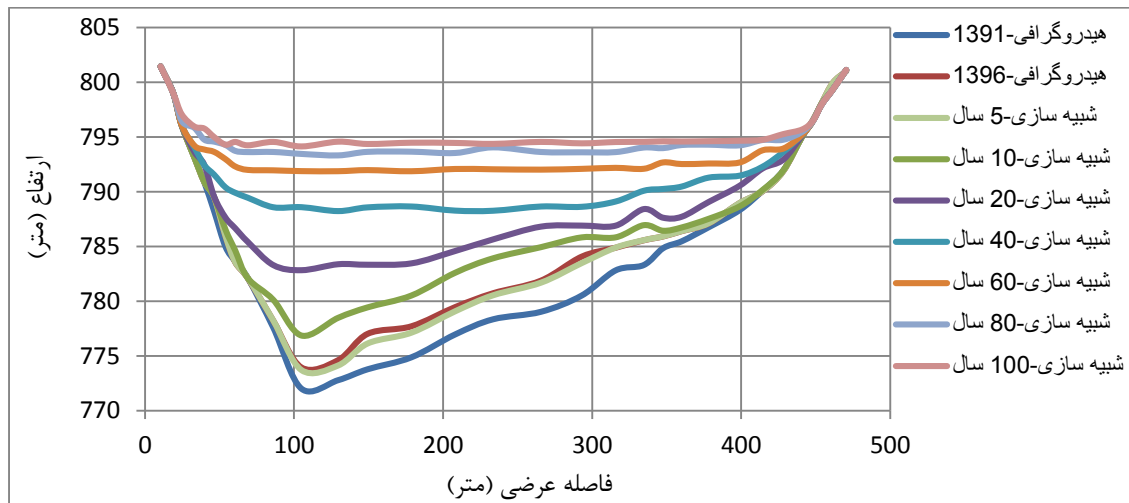
شکل (۴-۲۴)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۴) به فاصله ۳۷۳۲ متر از بدنه سد

در مقطع عرضی شماره ۲۴ که در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است فاصله سطح تراز رسوبگذاری در مدت زمان ۱۰۰ سال حدود ۷۹۴ متر رسیده است.



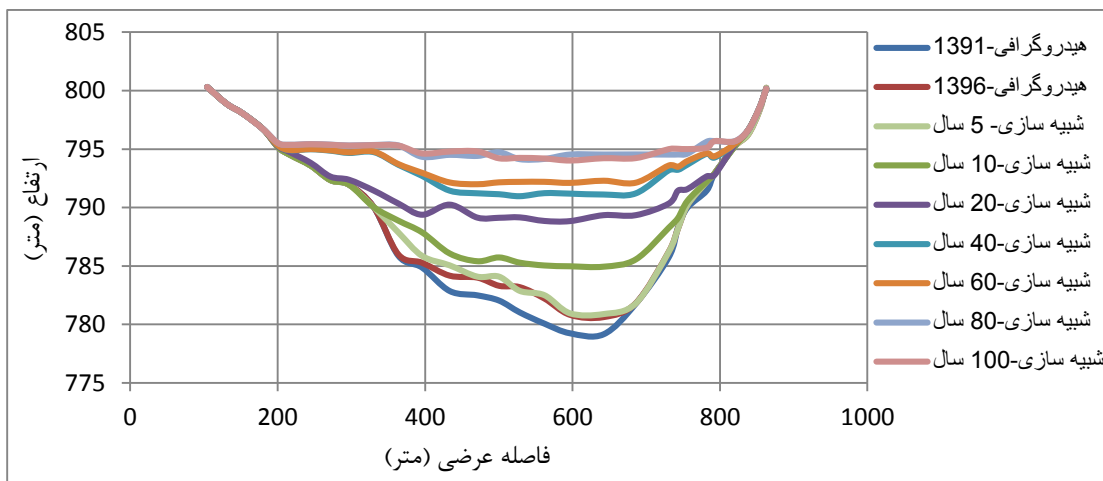
شکل (۴-۲۵)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۲۸) به فاصله ۴۲۷۳ متر از بدنه سد

با توجه به شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود نتایج مدل با نتایج هیدروگرافی از تطابق خوبی برخوردار می‌باشند و رسوبگذاری قابل ملاحظه‌ای برای سایر دوره‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی رخ داده است.



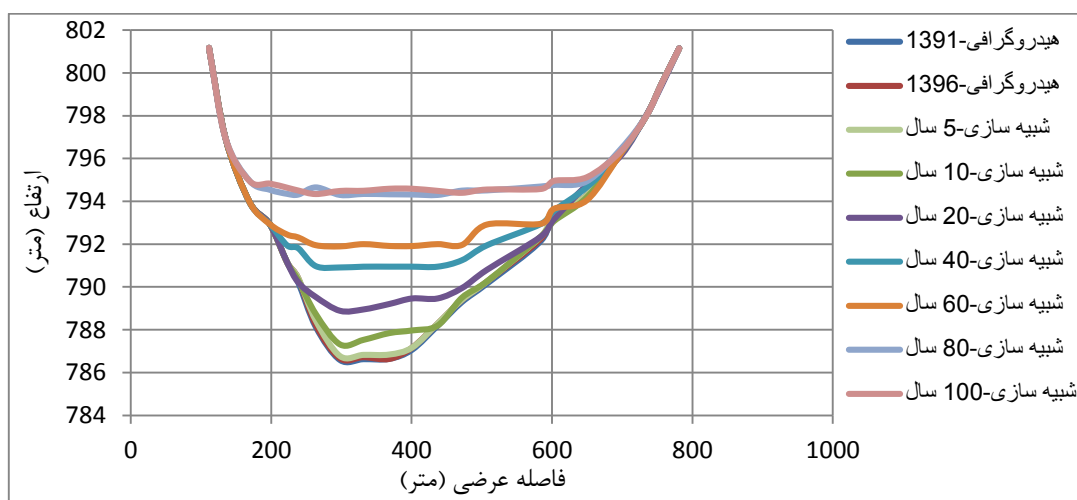
شکل (۴-۲۶)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۳۲) به فاصله ۴۹۶۳ متر از بدنه سد

در شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌شود که به علت تنگ شدگی مقطع عرضی بستر هیدروگرافی ۱۳۹۶ در مقایسه با بستر شبیه سازی ۵ سال تطابق خوبی نداشته و میزان رسوبگذاری برای مدت زمان ۵ سال نسبت به نتایج هیدروگرافی کمتر بوده است.



شکل (۴-۲۷)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۳۶) به فاصله ۵۸۶۰ متر از بدنه سد

با توجه به شکل ۴-۲۷ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای مدل برای شبیه‌سازی ۵ سال در این مقطع در فاصله عرضی حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر رسوبگذاری اتفاق افتاده است همچنین در مدت زمان‌های شبیه‌سازی ۶۰ و ۱۰۰ سال رسوبگذاری کمتری رخ داده است که این علت می‌تواند بخاطر کاهش چشم‌گیر حجم مخزن در این فاصله از بدنه سد باشد.



شکل (۴-۲۸)- تغییرات مقطع عرضی شماره (۴۰) به فاصله ۶۷۶۰ متر از بدنه سد

در شکل ۴-۲۸ نتایج اجرای مدل و نتایج حاصل از هیدروگرافی‌های مخزن در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که در این فاصله از بدنه سد برای شبیه‌سازی ۱۰۰ سال رسوبگذاری کمی اتفاق

افتاده است و همچنین نتایج مدل با نتایج هیدروگرافی از هم‌پوشانی خوبی برخوردار بوده است.

۷-۴- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل

مهم‌ترین بخش هر تحقیقی، استخراج و ارزیابی نتایج آن می‌باشد. به‌طور کلی نتایج هر نوع بررسی و تحقیق بستگی به کیفیت آمار و اطلاعات موجود و قابل دسترس دارد. هر قدر جمع‌آوری آمار و اطلاعات و آماده‌سازی آنها دقیق‌تر باشد، یقیناً نتایج ارائه شده از دقت بالاتری برخوردار خواهند شد. به‌طور معمول برای مخزن سدهای که یک شاخه دارند به دلیل سرعت آب زیاد در نواحی که عرض مقطع کم است، فرسایش یا رسوبگذاری کمتری اتفاق می‌افتد و در نواحیکه عرض مقطع زیاد است به دلیل کم شدن سرعت آب رسوبگذاری رخ می‌دهد که در این تحقیق با توجه به اثر مارپیچی بودن شکل مخزن این اتفاق به ندرت رخ داده است، همچنین در مقاطع عرضی شماره ۲۰، ۲۴، ۳۲ و ۳۶ نتایج مدل با نتایج هیدروگرافی برخلاف مقاطع عرضی شماره ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۸ و ۴۰ از هم‌پوشانی خوبی برخوردار نبوده و با واقعیت کمی متفاوت می‌باشند.

۸-۴- محاسبه خطای مدل

در این تحقیق معیار اصلی دقت مدل، نتایج هیدروگرافی انجام شده می‌باشد که در جدول ۴-۱ نتایج حاصل از اجرای مدل برای مدت زمان ۵ سال با مقدار محاسبه شده از عملیات هیدروگرافی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ مورد مقایسه قرار گرفته است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین درصد خطای مدل با استفاده از معادلات انتقال رسوب میر پیتر- مولر و انگلوند هانسن و کمترین درصد خطا نیز مربوط به معادله لارسن بوده است، میزان خطای معادله لارسن برابر با ۳/۰۴۷ درصد می‌باشد که به لحاظ پایین بودن آن و هم‌پوشانی خوب نتایج حاصل از اجرای مدل با این معادله قابل قبول می‌باشد. علت اصلی خطا در معادلات انتقال رسوب نهفته است، بدلیل آنکه تمام معادلات انتقال رسوب دارای مبانی تجربی تئوریک هستند، هر یک دارای محدودیت‌هایی بوده و برای رسوبات و شرایط خاصی مناسب هستند. این امر ناشی از عدم شناخت کامل پدیده انتقال جامدات و پارامترهای موثر بر آن

می‌باشد. علت دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد دقیق نبودن اندازه‌گیری‌های انجام شده پیرامون
دبی - دبی رسوب در زمان سیلاب و دانه‌بندی آن است که نهایتاً اطلاعات ورودی این مدل‌ها را همراه
با خطا می‌کند که این امر منجر به خطا در نتایج می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این مطالعه هدف بررسی ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد شیرین‌دره می باشد، بدین منظور از مدل ریاضی HEC-RAS4.1 جهت پیش بینی 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. همچنین با استفاده داده‌های عملیات هیدروگرافی انجام شده در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ در مخزن سد میزان حجم رسوبات ته نشین شده برای بازه‌ی زمانی ۵ سال در مخزن برابر با ۳/۶۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید. جهت کالیبره کردن مدل از پروفیل طولی رسوبگذاری بستر مخزن بدست آمده از عملیات هیدروگرافی استفاده شد. پس از معرفی پارامترها به مدل و انجام مراحل کالیبره، مدل برای دوره‌های زمانی مختلف جهت ارزیابی روند رسوبگذاری مخزن سد شیرین‌دره اجرا گردید.

۵-۲- نتایج حاصل از اجرای مدل

نتایج نشان داد که اجرای مدل با انتخاب معادله انتقال رسوب (Laursen)، معادله سرعت سقوط ذرات (Ruby)، روش مرتب‌سازی (Exner5) و گام زمانی محاسباتی ۱ ساعت و با درصد خطای ۳/۰۴۷ نتایج خوبی را ارائه نموده است. همچنین اجرای مدل برای مدت زمان ۱۰۰ سال نشان داد که پس از گذشت ۱۰۰ سال، حجم رسوبات انباشته شده در مخزن به حدود ۷۰۱۵۴۵۹۸ متر مکعب معادل ۸۰۶۷۷۷۸۷ تن خواهد شد این مقدار تقریباً معادل ۸۰ درصد ظرفیت مفید مخزن است به عبارتی متوسط کاهش سالانه حجم مخزن برابر با ۰/۸ درصد می‌باشد. از طرفی حجم باقی مانده مخزن سد پس از طی ۱۰۰ سال حدود ۲۱/۳۵ میلیون متر مکعب خواهد شد.

۵-۳- پیشنهادها

۱- جهت مقایسه نتایج مدل HEC-RAS4.1 و برآورد دقیق تر رسوبگذاری، می توان از مدل های دو بعدی نظیر CCHE2D و یا مدل های سه بعدی نظیر SSIIM برای ارزیابی روند رسوبگذاری در مخزن سد استفاده کرد و نتایج حاصله را با مقادیر واقعی اندازه گیری شده و نتایج مدل HEC-RAS4.1 مقایسه کرد.

۲- مدل HEC-RAS4.1 قابلیت محاسبات فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه ها و مخازن را دارد. لذا پیشنهاد می شود که مدل مذکور جهت عملیات رسوب شویی (فلاشینگ) مخازن نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۳- برداشت مقاطع عرضی سد شیرین دره حد فاصل بدنه سد تا ایستگاه هیدرومتری بالادست

۴- با مدیریت و بهره برداری بالادست سد نظیر حفاظت از زمین های کشاورزی از حرکت دلتای رسوب به سمت بدنه سد و عواقب سوء آن می توان جلوگیری کرد.

۵- با ایجاد بندهای انحرافی در بالادست سد نیز می توان از ورود رسوبات به داخل مخزن جلوگیری کرد.

۶- انجام تحقیقات مشابه در مورد سایر مخازن با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS4.1

۷- در حال حاضر مدل های ریاضی به ابزار دقیقی در مطالعات و مدیریت منابع آب تبدیل شده اند و دقت این مدل ها به میزان صحت و دقیق بودن داده های ورودی بستگی دارد. لذا توصیه می گردد که اندازه گیری های دانه بندی مواد معلق و همچنین رسوبات بار کف که هیچگونه اندازه گیری مستقیمی از آن موجود نیست در میدان وسیعی از تغییرات دبی ایستگاه هیدرومتری بالادست مخازن انجام گیرد.

۸- با توجه به بالا بودن میزان رسوبگذاری در مخزن سد شیرین دره به منظور جلوگیری از ورود

رسوبات فرسایش یافته از حوضه بالادست مخزن سد پیشنهاد می‌گردد که در حوضه‌های آبریز طرح‌های جلوگیری از فرسایش خاک از جمله گابیون‌بندی از نوع توری سنگی اجرا گردد.

۹- با توجه به اینکه رابطه دبی رسوب زمان سیلاب از همبستگی خوبی برخوردار نمی‌باشد لذا پیشنهاد می‌گردد اندازه‌گیری‌های دبی - دبی رسوب زمان سیلاب با دقت بیش‌تر انجام گردد.

پیوست

اجزای یک پروژه در مدل HEC-RAS

فایل‌های پلان

فایل‌های پلان دارای پسوند P01 تا P99 می باشند. حرف P نمایانگر یک فایل پلان و عدد بعد از آن، نشان دهنده شماره پروفیل می باشد. در ضمن ایجاد پلان‌ها، آنها از ۰۱ تا ۹۹ شماره گذاری می شوند. فایل پلان شامل: یک توضیح و یک شاخص کوتاه برای پلان، یک فهرست از فایل‌های مرتبط با پلان (نظیر فایل هندسی و فایل جریان ماندگار) و یک توضیح درباره کلیه گزینه‌های شبیه سازی برای پلان تعیین شده‌اند، می باشد.

فایل‌های اجرا

فایل‌های اجرا دارای پسوند R01 تا R99 می باشند. حرف R نمایانگر یک فایل اجرا و عدد بعد آن، نشان دهنده ارتباط آن با یک فایل پلان خاص می باشد. فایل با پسوند R01. یک فایل اجرای است که به فایل پلان با پسوند P01. مرتبط می باشد. فایل اجرا شامل کلیه داده‌های لازم برای انجام محاسباتی است که توسط فایل پلان مربوطه درخواست می شود. برای مثال اگر تحلیل جریان ماندگار مورد نظر باشد، فایل اجرا شامل داده‌های هندسی، داده‌های جریان ماندگار و کلیه گزینه‌های محاسباتی ضروری مرتبط با فایل پلان خواهد بود. فایل اجرا دارای فرمت ASCII است، اما خود توضیح نمی باشد و در بردارنده ورودی هر یک از ابزارهای محاسباتی موجود در سیستم HEC-RAS می باشد.

فایل‌های خروجی

فایل‌های خروجی دارای پسوند O01 تا O99 می باشند. حرف O نمایانگر یک فایل خروجی و

عدد بعد آن، نشان دهنده ارتباط آن با یک فایل پلان خاص می‌باشد. فایل با پسوند O12. یک فایل خروجی است که به فایل پلان با پسوند P12. مرتبط می‌باشد. فایل خروجی شامل کلیه نتایج محاسباتی از ابزارهای محاسباتی مورد درخواست می‌باشد.

فایل داده‌های هندسی

فایل‌های هندسی دارای پسوند G01. تا G99. می‌باشد. حرف G نمایانگر یک فایل هندسی بوده و عدد بعد از آن ترتیبی که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند، نشان می‌دهد. فایل‌های هندسی شامل کلیه داده‌های هندسی برای سیستم رودخانه‌ای می‌باشد که تحلیل شده است. داده‌های هندسی شامل: اطلاعات مقطع عرضی، داده‌های سازه‌های هیدرولیکی (نظیر پل ها و کالورت‌ها)، ضرائب و اطلاعات روش مدل سازی می‌باشد. داده‌های هندسی با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلماتی کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

فایل‌های داده‌های هیدرولوژی

داده‌های جریان ماندگار

فایل‌های داده‌های جریان ماندگار دارای پسوند F01. تا F99. می‌باشد. حرف F نمایانگر یک فایل داده‌های جریان ماندگار بوده و عدد بعد از آن ترتیبی که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند، نشان می‌دهد. فایل‌های داده‌های جریان ماندگار شامل: تعداد پروفیل‌های که باید محاسبه شوند و داده‌های جریان و شرایط مرزی برای هر بازه می‌باشد. فایل‌های داده‌های جریان ماندگار با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

داده‌های جریان غیر ماندگار

فایل‌های داده‌های جریان غیرماندگار دارای پسوند U01 تا U99. می‌باشد. حرف U نمایانگر یک فایل داده‌های جریان غیرماندگار بوده و عدد بعد از آن نشان دهنده ترتیبی است که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند. فایل‌های داده‌های جریان غیرماندگار شامل: هیدروگراف‌های جریان در مرزهای بالادست، شرایط جریان آغازین و شرایط مرزی پایین دست می‌باشد. فایل‌های داده‌های جریان غیرماندگار با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

داده‌های جریان شبه غیر ماندگار

فایل‌های داده‌های جریان شبه غیرماندگار دارای پسوند Q01 تا Q99. می‌باشد. حرف Q نمایانگر یک فایل داده‌های جریان شبه غیرماندگار بوده و عدد بعد از آن نشان دهنده ترتیبی است که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند. فایل‌های داده‌های جریان شبه غیرماندگار شامل: هیدروگراف‌های جریان در مرزهای بالادست، شرایط جریان آغازین و شرایط مرزی پایین دست می‌باشد. فایل‌های داده‌های جریان شبه غیرماندگار با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

فایل‌های داده‌های رسوب

فایل‌های داده‌های رسوب دارای پسوند S01 تا S99. می‌باشد. حرف S نمایانگر یک فایل داده‌های رسوب بوده و عدد بعد از آن نشان دهنده ترتیبی است که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند. فایل‌های داده‌های رسوب شامل: داده‌های جریان، شرایط مرزی برای هر بازه، و داده‌های رسوب می‌باشد. فایل‌های داده‌های رسوب با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

فایل داده‌های کیفیت آب

فایل‌های داده‌های کیفیت آب دارای پسوند W01 تا W99 می‌باشد. حرف W نمایانگر یک فایل داده‌های داده‌های کیفیت آب بوده و عدد بعد از آن نشان دهنده ترتیبی است که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند. فایل‌های داده‌های داده‌های کیفیت آب شامل: شرایط مرزی دمایی برای هر بازه، شرایط اولیه، پارامترهای جابجای پخشیدگی (Advection Dispersion) و داده‌های هواشناسی می‌باشد. فایل‌های داده‌های کیفیت آب با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

فایل‌های داده‌های طرح هیدرولیکی

فایل‌های داده‌های طرح هیدرولیکی دارای پسوند H01 تا H99 می‌باشد. حرف H نمایانگر یک فایل داده‌های طرح هیدرولیکی بوده و عدد بعد از آن نشان دهنده ترتیبی است که فایل‌ها براساس آن برای یک پروژه خاص ذخیره شده‌اند. فایل‌های داده‌های طرح هیدرولیکی شامل: اطلاعات متناظر با نوع محاسبات طرح هیدرولیکی مورد نظر می‌باشد. فایل‌های داده‌های طرح هیدرولیکی با فرمت ASCII ذخیره می‌شوند. این فایل شامل کلمات کلیدی برای تشریح هر قطعه از داده‌ها بوده و بخش عظم آن خود توضیح می‌باشد.

منابع

- ۱- احمدی م و الوانکار س ر و پیرستانی م ر، (۱۳۹۱)، بررسی مقدار رسوبگذاری مخزن سد کرج با استفاده از روش‌های تجربی و مدل عددی Hec-Ras، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
- ۲- اکبرزاده ن و قریشی نجف‌آبادی ح و مجدزاده طباطبایی م ر، (۱۳۸۹)، بررسی مقدار نشست رسوبات مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از روشهای تجربی و مدل عددی Hec-Ras، همایش ملی آب پاک، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.
- ۳- آرین ا، (۱۳۹۱)، برآورد روند رسوبگذاری در مخزن سد با استفاده از مدل های دوبعدی و شبه دو بعدی، شرکت مهندسی مهتاب قدس، فصلنامه ی شماره ی ۵۹، ص ۳۵.
- ۴- بهرنگی ف، بنی‌هاشمی م و رحمانیان م، (۱۳۸۷)، بررسی تخمینی رسوبگذاری در مخزن سد لتیان، مجموعه مقالات دومین کنفرانس نیروگاه برق‌آبی، تهران.
- ۵- بنی‌حبيب م و حسن‌زاده ی و حسن‌اصفهانی ل، (۱۳۸۶)، ارزیابی مقایسه‌ای نحوه‌ی رستوبگذاری مخازن در سدهای شکافدار و سد تاخیری معمولی با استفاده از Hec-Ras، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، مدیریت، حوضه‌های آبریز.
- ۶- جهانشاهی م، قمشی م و شفاعی بجستانی م، (۱۳۸۹). پیش بینی روند رسوبگذاری در مخزن سد جیرفت با استفاده از مدل Gstars3، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۷- خسروپور ح و بنی‌هاشمی م (۱۳۸۷)، بررسی رسوبگذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از مدل عددی و ارائه‌ی راه‌کارهایی برای مدیریت رسوبگذاری، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه برق‌آبی، تهران.
- ۸- حمادی ک، (۱۳۷۸)، "بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل ریاضی HEC-6"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۹- رحمانیان م، بنی‌هاشمی م و جمال‌زاده م، (۱۳۸۶)، برآورد رسوبگذاری در مخازن با روش‌های تخمینی، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.
- ۱۰- رضانی ی و قمشی م، (۱۳۹۰)، بررسی میزان تأثیر جریان های غلیظ بر روند رسوبگذاری مخزن سد سفیدرود، نشریه آب و خاک، جلد ۵، شماره ۴، ص ۸۸۰-۸۷۴.

- ۱۱- رهنمایی د، (۱۳۷۴)، رسوبگذاری در مخازن سدها، آب و توسعه، ۳(۱): ۵۰-۵۸.
- ۱۲- سادات هلیبر س م، پرورش ریزی ع و فرهودی ج، (۱۳۹۳)، شبیه سازی رسوبگذاری در مخازن سدها با استفاده از مدل WASA-SED (مطالعه موردی سد باراسونا- اسپانیا)، نشریه دانش آب و خاک/ جلد ۲۴ شماره ۳ ص ۱۶۱-۱۷۳.
- ۱۳- شعبانلو س، (۱۳۷۹)، بررسی نحوه رسوب گذاری در تعدادی از سدهای مخزنی ایران با حجم های متفاوت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۱۴- شفاعی بجستانی م، (۱۳۹۴)، اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۱۵- طباطبایی س م، شهرکی ا، (۱۳۹۲)، شبیه سازی موردی هیدرولیک رسوب در مخزن سد به کمک نرم افزار HEC-RAS، ششمین همایش ملی آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، بهمن ماه ۱۳۹۲.
- ۱۶- طلوعی ا، (۱۳۸۴)، طراحی و بهره برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب، نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز.
- ۱۷- عباسی پور س م ح، (۱۳۹۵)، بررسی عددی پروفیل رسوب در پشت مخزن سد شهید کاظمی بوکان با استفاده از مدل hec-ras پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.
- ۱۸- عابدینی م و طالب بیدختی ن، (۱۳۶۸)، چگونگی توزیع و کنترل رسوب در مخازن سدها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، مهتاب قدس، ص ۷۹۱-۸۲۰.
- ۱۹- عزیزیان ا، صمدی ا، آغاز م، (۱۳۹۵)، آموزش کاربردی مدلسازی جریان و رسوب در HEC-RAS4.1، انتشارات نوآور، ص ۱ تا ۲۷۲.
- ۲۰- عامل صادقی م، فتحی مقدم م، شفاعی بجستان م، (۱۳۸۱)، "بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد تنظیمی دز با استفاده از مدل ریاضی BRI-STARS"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته تاسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲۱- فرشادی م ر و شفاعی بجستان م، (۱۳۸۹)، برآورد رسوب ورودی به مخزن سد گتوند علیا با استفاده از نرم افزار Hec-Ras 4.0، دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ۲۲- قمشی م، (۱۳۶۷) نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و

زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، صفحه ۲۱۰.

۲۳- قمشی م و صدق آمیز ع، (۱۳۸۵)، پیش بینی روند رسوبگذاری در مخزن سد کرخه صفر، مجله علمی کشاورزی، جلد ۲۹، شماره ۳، ص ۲۳-۳۵.

۲۴- کمیته رسوب طرح استانداردهای صنعت آب، (۱۳۶۸). "محاسبه میزان رسوبات و چگونگی تجمع آنها در مخازن سدها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهتاب قدس، تهران، ۶۶۹-۶۹۰.

۲۵- گزارش هیدروگرافی، (۱۳۹۱ و ۱۳۹۶)، شرکت آب منطقه ای استان خراسان شمالی.

۲۶- مسکار ه و فضل اولی ر، (۱۳۹۲)، بررسی الگوی رسوبگذاری مخزن سد شهید رجایی با استفاده از مدل عددی GSTARS3.0، پژوهش نامه مدیریت حوزه آبخیز سال چهارم/ شماره ۷/ بهار و تابستان ۱۳۹۲، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲۷- منتظمی نوین م و اعلمی م ت، (۱۳۸۸)، بررسی نحوه توزیع رسوب در سطح مخزن سد یامچی اردبیل به کمک نرم افزار HEC-6 و روش های کاهش سطح و افزایش سطح و مقایسه ی نتایج به دست آمده، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲۸- موسوی س ف، حیدرپور م و شعبانلو س، (۱۳۸۵)، بررسی رسوب در مخزن سد زاینده رود با استفاده از مدل های افزایش و کاهش سطح، آب و فاضلاب ۵۷ : ۷۶-۸۲.

۲۹- موسوی س ف و صمدی بروجنی ح، (۱۳۷۵)، ارزیابی توزیع رسوب در مخازن سدهای کوچک منطقه چهارمحال و بختیاری، آب و فاضلاب ۱۸ : ۴-۱۳.

۳۰- موسوی س ف و محمد زاده هایلی ج، (۱۳۹۱)، شبیه سازی توزیع رسوب در مخزن سد کوثر با استفاده از الگوی توزیع رسوب مخزن سد دز، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم/ شماره دهم، ص ۲۱۴-۲۰۹.

۳۱- وزارت نیرو، (۱۳۹۶)، راهنمای کاربرد مدل های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها، ضابطه شماره ۳۰۹- الف، ص ۱۱-۹۷.

۳۲- وزارت نیرو، (۱۳۹۱)، راهنمای مطالعات رسوبگذاری و رسوب زدایی مخازن سدها، نشریه شماره ۵۸۹- الف، ص ۱ تا ۳۰۲.

۳۳- وزارت نیرو، استاندارد مهندسی آب کشور، (۱۳۷۶)، "تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها".

- 34-Atkinson E. (1996).The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs” HR Wallingford.
- 35-Fan, J. and L. Morris (1992), "Reservoir sedimentation I: Delta and Density Current Deposits " journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No.3, pp. 353-369.
- 36-Grade, R. J. and K. G. Ranga Raju (1985),"Mechanics of sediment transportation and stream problems, JOHN WILEY and SONS.
- 37-Hydrologic Engineering Center (2010a). HEC-RAS River Analysis System: Users Manual. CPD-68, Version4.1.0, US Army Corps of Engineering. DAVIS, California.
- 38-Holly, F. M. and Rahuel J. L(1990) "New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modeling", Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, No. 4, pp. 401-416.
- 39-Krishnappan. B. G (1985). Comparison of MOBED-2 and HEC-6 river flow models, Canadian Journal of Civil Engineering, 12: 464-471.
- 40-Mahmood, K (1987), Reservoir Sedimentation Impact, Extent and Mitigation, World Bank Technical paper No. 71.
- 41-Mutreja, K. N. (1986) "Applied Hydrology" MC GRAW-HILL.
- 42-Mohammad. E. M, Al-Ansari. N. A, Issa E. &Knutsson. S (2016). Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model, 21, 235–244.
- 43-Palmieri A. Shah, F. Annandale, G. W. Dinar, A (2003) “Reservoir Conservation, Vol1, the RESCON Approach” The World Bank.
- 44-Pacific Southwest Inter-Agency Committee (PSIAC), Water Management Subcommittee (1968), Factors Affecting Sediment Yield in the Pacific Southwest Area and Selection and Evaluation of Measures for Reduction of Erosion and Sediment Yield.
- 45-Teal, M. J. Schulte, M. A. and Williams, D. T. and Remus, J. I. (2004) “Sediment Modeling of Big Bend Reservoir”, South Dakota, ASCE.
- 46-Wang Z. Y & Hu. C. H (2009).Strategies for managing reservoir sedimentation. International Journal of Sediment Research, 24(4): 369-384.
- 47-Yang C. T. (1996). Sediment transport: theory and practice, McGraw Hill, New York, 396.
- 48-VanRijn L. C. (1984). Sediment transport Part Bed Load Transport, J. Hydr. Eng. ASCE, Vol 110, pp 1431-1456, Part, Suspended Load Transport, J. Hydr. Eng. ASCE, Vol. 110, pp.1613-1641, Part, Bed Forms and Alluvial Roughness, J. Hydr.ASCE, Vol 110, pp 1733-1754.
- 49-vischer, D. L and W. H. Hager (1997), reservoir sedimentation, chapter No 8, Dam Hydraulics.

50-Strand, R. I. and Pemberton, E. L. (1982) Reservoir sedimentation. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

51-United States Bureau of Reclamation. (1962). Revision of the procedure to compute sediment distribution in large reservoirs, Sedimentation Section, Hydrology Branch.

Abstract

The erosion and sedimentation phenomena have many destructive effects on the environment and human life. One of the most important effects of the reservoir sedimentation is the reduction of the storage of reservoirs. The construction of the dam is one of the most popular methods for exploitation of surface water resources, which is a huge expense in the form of huge national plans. Reservoir sedimentation not only reduces the capacity and life of the reservoir, but also causes numerous problems in opening and closing the deep and semi-deep gates of the dam, increasing the reservoir surface and increasing the evaporation and water losses. Shirin-Dare dam is located in the northeast of Bojnourd city, 65 km from the city, which is a dam with clay core and its initial volume at the maximum level of water level is 91.5 million cubic meters. Mathematical models are one of the important tools for predicting the amount of sedimentation in reservoirs of storage dams and estimating their useful life. The use of two-dimensional and three-dimensional models to simulate the hydraulic flow and sediment requires more complete information that most of these data are not available. Using the HEC-RAS4.1 numerical model, the sedimentation process of the Shirin-Dare dam was studied. After calibration of the model with using the hydrographic data in 2013 and 1396 of the reservoir of Shirin-Dare Dam, was implemented for different time periods and the sedimentation of the reservoir of the dam resulted from the implementation of the model in the longitudinal profile and a number of cross sections. The simulation results for 100 years showed that after this period, about %80 of the volume of the reservoir is filled with sediment, which means an average of annually %0.8 is reduced from the volume of the reservoir.

Keywords: Sedimentation, Reservoir, Shirin-Dareh Dam, HEC-RAS4.1 Numerical Model.



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

M. Sc. Thesis in Water Structures Engineering

**Assessment of Sedimentation Process In Shirin-dareh
Dam Reservoir by HEC-RAS4.1 Model**

By: Neamatullah khademi

Supervisor:

Dr. Samad Emamgholizadeh

Advisor:

Dr. Seiid Hossein Hosseini

July 2018