

حذف رسوب از مخازن انرژی آبی جریان رودخانه ای توسط تخلیه هیدرولیک

نیسا اسحاق و تی. آی. الدو

چکیده

محبوبیت مفهوم توسعه پایدار رو به افزایش است و پروژه های هیدروالکتریک طراحی شده و اجرا شده درباره این مفهوم نیازمند مدیریت رسوب (بعنوان یک معیار اصلی طراحی) هستند. تخلیه فرونشینی برای مدیریت رسوب در چنین پروژه هایی اجرا میشود. بررسی ها با استفاده از مدل های هیدرولیک برای پروژه ها لازم هستند تا نگرانی های طراحی مختص به سایت را برطرف کنند. در مطالعه حاضر شبیه سازی هایی معرفی شده است که از مدل هیدرولیک برای حذف رسوب توسط تخلیه فرونشینی مخازن پروژه هیدروالکتریک پونات سانگچو^۱ (واقع در بوتان)^۲ استفاده کرده اند. آزمایشات انجام شده بر روی مدل مقیاس 1:100 هندسی مشابه نشان میدهد که تخلیه^۳ (شستشو توسط جریان آب) در حفظ منطقه آبرگیر نیروگاه خالی از ته نشینی رسوب، مؤثر است. ته نشینی از بالادست جریان رودخانه را نمی توان بصورت هیدرولیکی تخلیه کرد. بعلاوه بر اساس دامنه وسیعی از داده های تجربی از مطالعات مدل هیدرولیک، معادلات تجربی برای پیش بینی کمیت رسوبی که از ذخایر (مخازن) تخلیه میشود توسعه داده شده اند. معادلات حاضری که توسعه داده شده اند نسبت به معادلات استفاده شده در معادلات بیان شده در مقالات موجود دارای پارامترهای بیشتری هستند. دو معادله برای دامنه های مختلف شیب بستر رودخانه با شیب تند (0.005-0.04) و شیب متوسط (0.001-0.005) توسعه داده شده است. معادلات توسعه یافته بر اساس مجموعه داده های مختلف

^۱Punatsangchhu

^۲Bhutan

^۳flushing

اعتباریابی شدند و مشخص شد که پیش بینی هایی را میتوان با دقت قابل قبول انجام داد. این معادلات را میتوان بصورت مؤثر برای طراحی هیدرولیک حذف رسوب از ذخایر انرژی آبی جریان رودخانه مورد استفاده قرار داد.

کلمات کلیدی: معادله تجربی، تخلیه هیدرولیک، مدل‌های هیدرولیک، مدل‌های تک بعدی، پروژه انرژی آبی جریان رودخانه، رسوب گذاری ذخایر

نمادگذاری

φ	یک پارامتر بی بُعد وابسته به نوع رسوب
C_f	حجم ته نشینی رسوب
C_f/C_v	نسبت ته نشینی رسوب ذخایر به ظرفیت بیان شده بصورت کسر
C_v	ظرفیت مخزن (ذخیره) (بر حسب میلیون متر مکعب)
d_{50}, D_{50}	اندازه متوسط رسوب (میلیمتر)
L	طول مخزن (متر)
Q, Q_f	تخلیه لبریز ($m^3 s^{-1}$)
Q_s	ظرفیت انتقال رسوب ($t s^{-1}$)
S	شیب بستر رودخانه
T	مدت تخلیه (ساعت)
V_s	حجم رسوب تخلیه شده (میلیون متر مکعب)
V_w	حجم آب (میلیون متر مکعب)
W, W_f	عرض کانال تخلیه (متر)

۱. مقدمه

ظرفیت انبارش ذخایر (مخازن) در سراسر جهان بعلت ته نشینی رسوب به میزان ۱ تا ۲ درصد در سال کاهش می یابد (این عدد در چین بیشتر از ۲ درصد است). مطالعات نشان میدهد که ۸۰ درصد ظرفیت انبارش مفید ذخایر انرژی آبی تا سال ۲۰۳۵ از بین خواهد رفت (موریس و فان ۱۹۹۷؛ وایت ۲۰۰۰؛ باسون ۲۰۰۸؛ اشلیس و همکارانش ۲۰۱۴). بخاطر اینکه سایت های مناسب برای سدسازی برای پروژه های ذخایر جدید محدود و یا ناموجود هستند بنابراین به

توسعه پایدار پروژه های منابع آب با اتخاذ تکنیک های مدیریت رسوب نیاز خواهیم داشت (اشلیس و همکارانش ۲۰۱۴؛ اسحاق و الدو ۲۰۱۶). تکنیک های مدیریت رسوب را میتوانیم در سه طبقه گروه بندی کنیم: مدیریت آبخیز، جلوگیری از ته نشینی (نهشت) در ذخایر، و حذف رسوب ته نشین شده قبلی. در مدیریت آبخیز از ورود رسوب به داخل ذخایر جلوگیری میشود. با اجتناب از ته نشست، هواگیری جاری چگالی و بندسازی رسوب میتوان از ته نشینی رسوب جلوگیری کرد. تکنیک های حذف رسوب عبارتند از: تخلیه فرونشینی، لایروبی، خاکبرداری خشک و غیره (یون ۱۹۹۲؛ لای و شن ۱۹۹۶؛ موریس و فان ۱۹۹۷؛ شن ۱۹۹۹؛ برنت ۲۰۰۰؛ وایت ۲۰۰۰؛ یانگ ۲۰۰۳؛ آناندیل ۲۰۱۱؛ اشلیس و همکارانش ۲۰۱۴).

بندسازی رسوب و تخلیه فرونشینی بصورت گسترده برای حذف رسوب از ذخایر کوچک و متوسط مورد استفاده قرار می گیرند و خروجی های (دهانه های آبگیر) سطح پایین بزرگی برای پروژه های جریان رودخانه تعبیه میگردد. در طی بندسازی رسوب، بار رسوب ورودی در مسیر مخزن هدایت میشود بدون اینکه امکان رسوب داشته باشد. تخلیه فرونشینی توسط پایین آوردن سطح آب مخزن انجام میشود، تا اندازه ای که برای ایجاد شرایط جریان رودخانه ای کافی باشد؛ رسوب ته نشین شده قبلی را هم می توان با فرسایش قهقرایی حذف کرد. با اینحال تأثیر تخلیه به شرایط هیدرولوژیکی (آب شناختی)، توپوگرافیکی، فنی و عملیاتی بستگی دارد (یون ۱۹۹۲؛ لای و شن ۱۹۹۶؛ موریس و فان ۱۹۹۷؛ شن ۱۹۹۹؛ باتوکا و جردن ۲۰۰۰؛ برنت ۲۰۰۰؛ وایت ۲۰۰۰؛ یانگ ۲۰۰۳؛ اسحاق و الدو ۲۰۱۶). شرایط هیدرولوژیکی مستلزم این است که آب کافی باید برای تخلیه موجود باشد و ظرفیت نسبت جریان ورودی باید کوچک باشد، بطوریکه بتوانیم مخزن را مجدداً پر کنیم. شرایط توپوگرافیکی نشان میدهد که ذخایر باید باریک و طویل گردند. در ذخایر عریض، یک کانال تخلیه ایجاد میگردد و فرسایش قهقرایی فقط در کانال تخلیه رخ میدهد. الزامات فنی این است که خروجی های بندسازی باید فراهم گردند که ظرفیت کافی برای تأثیرگذاری بر فرونشینی ذخایر داشته باشند. شرایط عملیاتی باید اجازه دهد که سطح آب مخزن به اندازه ای پایین بیاید که شرایط جریان رودخانه ای را ایجاد کند.

در ناحیه هیمالیایی بعثت شرایط توپوگرافیکی و هیدرولوژیکی رودخانه ها، پتانسیل زیادی برای توسعه انرژی آبی وجود دارد. با اینحال چالش اصلی در توسعه پروژه های انرژی آبی در این رودخانه ها، طراحی و اجرای پروژه ها با تکنیک های مؤثر مدیریت رسوب است. بسیاری از پروژه های هیدروالکتریکی بر روی رودخانه های هیمالیایی اخیراً بصورت طرح های جریان رودخانه ای طراحی شده اند و سرریزهای آبگیر با اندازه بزرگی را فراهم می سازند که تاج (تاج سد) آنها خیلی به بستر رودخانه نزدیک است تا آب اضافی در هنگام وقوع سیل و رسوب در حین تخلیه/بندسازی از آن عبور کند. در این مطالعه جزئیات شبیه سازی تخلیه هیدرولیک یک پروژه انرژی آبی جریان رودخانه ای را با استفاده از یک مدل فیزیکی معرفی میکنیم. همچنین بر اساس تعداد زیادی از مطالعات مدل هیدرولیک، دو معادله تجربی نیز مورد بحث قرار میگیرد که برای پیش بینی کمیت رسوبی که قابل تخلیه است استخراج شده است.

۲. تخلیه هیدرولیک ذخایر برای حذف رسوب

پروژه های انرژی آبی جریان رودخانه ای در ناحیه هیمالیایی با مفهوم مدیریت رسوب توسط تخلیه فرونشینی ذخایر در حین بادهای موسمی (فصل بارندگی) برای حذف ته نشینی رسوب سالانه طراحی شده اند. طراحی هیدرولیک مؤلفه های مختلف (سرریزها، اقدامات انتشار انرژی، ورودی ها و سیستم های هادی آب) غالباً مختص سایت مربوطه هستند. سطوح هم تراز، اندازه و تاج-آبگیر بالاتر از مؤلفه ها تا حد زیادی به خصوصیات ته نشینی رسوب در ذخایر وابسته هستند. بنابراین در حین بررسی ضروری است که مراحل مطالعه امکان پذیری و برنامه ریزی این پروژه های انرژی آبی، الگوی رسوب گذاری در ذخایر، حجم و موقعیت ته نشینی رسوب را برآورد یا پیش بینی کنند؛ این رسوب را میتوان با تخلیه برای از ذخایر حذف کرد تا طراحی ساختارهای هیدرولیک مختلف پروژه و زمانبندی عملیات ذخایره بهینه گردد. شبیه سازی های مدل هیدرولیک معمولاً ابزار قابل قبولی برای این بررسی ها هستند که پارامترهای حاکم غالباً مختص به این سایت هستند. شبیه سازی تخلیه هیدرولیک رسوب معمولاً با استفاده از مدل های مقیاس فیزیکی انجام میشود. مدل های تجربی برای تخلیه ذخایر طاقت فرسا، پرهزینه و زمان بر هستند. در طی مراحل بررسی و برنامه ریزی پروژه میتوانیم از معادلات تجربی استفاده کنیم؛ از این طریق کمیت رسوب را برآورد میکنیم که میتوان آنرا توسط تخلیه از ذخایر حذف کرد.

2.1 مدل‌سازی فیزیکی و عددی برای تخلیه رسوب

جزئیات تخلیه مخزن انجام شده برای مدل مقیاس فیزیکی و حذف رسوب، و شبیه‌سازی های مدل عددی توسط محققان زیادی گزارش شده‌اند. مدیریت رسوب توسط تخلیه فرونشینی ذخایر بر روی رودخانه آلپین ریور در ائو توسط آلتائوس و دی سزار (۲۰۰۶) گزارش شده است. امام قلی زاده و صمدی (۲۰۰۸) امکان پذیری حذف رسوب ته نشین شده از مخزن دز^۵ را مورد مطالعه قرار داده‌اند. جزئیات عملیات تخلیه ذخایر بر روی رودخانه کروب^۶ و استراتژی های مدیریت یکپارچه آب و پایین دست رسوب سدها در ژاپن گزارش شده‌اند (کانتوش و همکارانش ۲۰۱۰؛ سومی و کانتوش ۲۰۱۰). جی و همکارانش (۲۰۱۱) امکان جایگزینی لایروبی مکانیکی با تخلیه رسوب از طریق تغییرات عملیات دریچه تنظیم آب در مخزن سد در بند مصب رودخانه ناکدانگ^۷ (NREB) را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بعلاوه تأثیرات روشهای مختلف کنترل بر روی رسوب گذاری بصورت کمی با استفاده از مدل عددی دو بعدی CCHE2D تحلیل شدند (جی و همکارانش ۲۰۱۶).

آزمایشاتی توسط محققان مختلف در مجراهای آزمایشی انجام شده است تا جنبه های مختلف تخلیه مانند تأثیرات تخلیه بر روی لبریز شدن، تشکیل کانال و خصوصیات هندسی مخروط تخلیه در مجاورت خروجی های پایین ذخایر مطالعه شود (طالبه دختی و نقشینه ۲۰۰۴؛ امام قلی زاده و همکارانش ۲۰۰۶؛ جوگوویک و همکارانش ۲۰۰۹؛ کانتوش و اشلیس ۲۰۰۹؛ مشکاتی و همکارانش ۲۰۰۹). هوانگ و هوانگ (۲۰۰۱) تأثیر فرسایش رسوب در پایین آوردن سطح آب رودخانه لیوجیاکسیا^۸ را با استفاده از مدل فیزیکی مطالعه کرده‌اند.

مدلهای ریاضی با موفقیت برای پیش بینی رسوب گذاری در ذخایر اعمال شده است و مثالهای زیادی در این باره در مقالات موجود است. موریس و فان (۱۹۹۷)؛ اسلوف (۱۹۹۱)؛ باتوکا و جردن (۲۰۰۰)؛ و آناندیل (۱۹۸۷) مدل‌های مهم را بصورت مختصر مرور کرده‌اند. یک مدل‌های عددی تک بعدی بصورت گسترده برای پیش بینی الگوی ته نشینی بلند

^۶Alpine River Drau

^۵Dez

^۶Kurobe

^۷Nakdong

^۸Liujiaxia

مدت در ذخایر مورد استفاده قرار گرفته اند (برنت ۲۰۰۰؛ USBR 2006؛ آهن و یانگ ۲۰۱۰؛ کاستیلو و همکارانش ۲۰۱۴، ۲۰۱۵؛ اسحاق و همکارانش ۲۰۱۴؛ اسحاق و الدو ۲۰۱۶). کاربردهای مدل عددی تک بعدی برای پیش بینی خصوصیات رسوب گذاری بلند مدت ذخایر جدید در پژوهش اشلیس و همکارانش (۲۰۱۴) گزارش شده است. اخیراً بعلت پیشرفت هایی که در دینامیک سیالات محاسباتی حاصل شده است از مدل‌های عددی برای شبیه سازی تخلیه رسوب استفاده شده است (اسماعیلی و همکارانش ۲۰۱۴، ۲۰۱۵). آهن و یانگ (۲۰۱۰) رسوب گذاری و فرآیندهای تخلیه مخزن زیائولانگدی^۹ واقع در رودخانه یلو^{۱۰} در چین را با استفاده از مدل عددی تک بعدی GTSARS3 مورد مطالعه قرار داده اند. کاربردهای مدل عددی سه بعدی SSIIM با یک شبکه انطباقی، غیرقائم و غیرساختارمند برای تخلیه مخزن انرژی آبی کالی گانداکی^{۱۱} در نپال و مخزن آنگوستورا^{۱۲} در کاستاریکا گزارش شده اند (اولسن و هون ۲۰۱۰؛ هون و اولسن ۲۰۱۲ الف، ۲۰۱۲ ب). گالرانو و کاناتا (۲۰۱۱) سیستمی از مدل‌های عددی را برای شبیه سازی تخلیه ذخایر پیشنهاد کرده اند. سیستم پیشنهاد شده مدلها برای مخزن پیو دی کادور^{۱۳} و منطقه آبخیز آن مورد استفاده قرار گرفت. مدل هیدرودینامیکی بیشتر توسعه داده شد تا پدیده های تبدیل موج، شکست موج، و جریان های کرانه ای (نزدیک به ساحل) در هندسه پیچیده نواحی ساحلی شبیه سازی شوند (گالرانو و همکارانش ۲۰۱۶ الف، ۲۰۱۶ ب). کامپیسانو و همکارانش (۲۰۰۴) بررسی تجربی و عددی را در مورد تأثیرات فرسایش امواج تخلیه بر روی ذخایر رسوب مجرای فاضلاب ارائه داده اند. کشت پور و همکارانش (۲۰۱۵) مدل هیدرودینامیک سه بعدی را همراه با مدل‌های انتقال رسوب و تلاطم اعمال کرده اند تا توسعه حفره های فرسایش در یک ورودی جزر و مدی را مورد بررسی قرار دهند. کاستیلو و همکارانش (۲۰۱۴، ۲۰۱۵) جزئیات شبیه سازی های مدل عددی و تحلیل را ارائه داده اند؛ این مدل برای پیش بینی تخلیه سد پوت-کاردنیلو^{۱۴} پیشنهادی در رودخانه پوت در اکوادور اعمال

^۹Xiaolangdi

^{۱۰}Yellow

^{۱۱}Kali Gandaki

^{۱۲}Angostura

^{۱۳}Pieve di Cadore

^{۱۴}Paute-Cardenillo

شده بود. معمولاً معادلات تجربی و شبیه سازی های مدل عددی تک بعدی برای برآورد رسوب گذاری در مخزن، و شبیه سازی های مدل عددی دو بعدی و سه بعدی برای برآورد تخلیه رسوب از مخزن مورد استفاده قرار میگیرند.

2.2 معادله تجربی برای کمیت رسوب تخلیه شده

روابط تجربی کمی برای برآورد خروجی رسوب در حین تخلیه توسط محققان گزارش شده است آتکینسون ۱۹۹۶؛ لای و شن ۱۹۹۶؛ موریس و فان ۱۹۹۷؛ شن ۱۹۹۹؛ باتوکا و جردن ۲۰۰۰؛ برنت ۲۰۰۰. پال و دیلون (باتوکا و جردن ۲۰۰۰) یک رابطه تجربی را برای کمیت رسوب تخلیه شده با «تخلیه لبریز» (تخلیه به منظور شستشوی رسوب) توسعه داده اند.

$$V_s = 0.048V_w^{0.687}, \quad (1)$$

که V_s حجم رسوب تخلیه شده (بر حسب میلیون متر مکعب) و V_w حجم آب (بر حسب میلیون متر مکعب) است که برای تخلیه استفاده میشود. این معادله از داده های خیلی محدود از نمونه اولیه و مدل ذخایر توسعه داده شد که تخلیه فرونشینی برای آن انجام شده است.

آتکینسون (۱۹۹۶) معیاری را برای ارزیابی امکان پذیری تخلیه ذخایر استخراج کرده است و این معیارها را با استفاده از داده های ۱۴ مخزن تأیید کرده است که تخلیه برای آن انجام شده است. مفاهیم تعادل رسوب و ظرفیت پایدار ذخایر برای استخراج معیارها مورد استفاده قرار گرفته اند. ظرفیت انتقال رسوب جریان تخلیه توسط معادله تجربی دانشگاه تسینگوا^{۱۵} برآورد شد:

$$Q_s = \phi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{W^{0.6}}, \quad (2)$$

که Q_s ظرفیت انتقال رسوب (t/s)؛ Q_f تخلیه لبریز (تخلیه توسط جریان آب) (m^3/s)؛ S شیب و W عرض کانال (m)، و ϕ یک پارامتر بی بعد وابسته به نوع رسوب است. برای رسوب های رس سیلینت دار ریز $\phi = 1600$ ؛ برای

^{۱۵}Tsinghua

$\phi = 650$ ، $D_{50} < 0.1 \text{ mm}$ برای $\phi = 300$ ، $D_{50} > 0.1 \text{ mm}$ و برای تخلیه لبریز پایین ($< 50 \text{ m}^3/\text{s}$) ، $\phi = 180$ است. این معادله بر اساس داده های جمع آوری شده از ذخایر چین طراحی شد.

عرض کانال تابعی از تخلیه لبریز است. آتکینسون (۱۹۹۶) از داده های میدانی ذخایر، معادله زیر را برای عرض کانال معرفی کرد:

$$W_f = 12.8Q_f^{0.5}, \quad (3)$$

که W_f عرض کانال (متر) و Q_f تخلیه لبریز (m^3/s) است. نتایج تجربی بدست آمده توسط لای و شن (۱۹۹۶) نشان داده اند که عدد ثابت ضرب در معادله (۳) دارای مقدار پایین تر ۱۰.۹۱ است. مقادیر پایین تر ۵ تا ۷ نیز برای ذخایر ژاپن گزارش شده اند (باتوکا و جردن ۲۰۰۰).

فان و جیانگ (موریس و فان ۱۹۹۷؛ برنت ۲۰۰۰) یک معادله تجربی مشابه با معادله (۲) را برای محاسبه میزان خروجی رسوب بعلت فرسایش قهقرایی توسعه داده اند. میزان خروجی رسوب (L_{wo} (kg/s) برابر با $L_{wo} = KQ_o^{1.2}(S \times 10^4)^{1.8}$ است که Q_o تخلیه آب (m^3/s)، S شیب ته نشینی و K ثابت تناسب برابر با ۰.۰۰۳۵ برای مخزن سانمنزیا^۱ در چین است.

۳. روش شناسی

در این مطالعه جزئیات شبیه سازی تخلیه هیدرولیک یک مخزن با استفاده از مدل مقیاس فیزیکی ارائه شده است. همچنین بر اساس تعداد زیادی از مطالعات مدل فیزیکی و مشاهدات تجربی، تلاشی برای توسعه معادلات تجربی برای برآورد حجم رسوب تخلیه شده از ذخایر صورت گرفته است. این معادلات با استفاده از پارامترهای معلوم سیستم مخزن برای پیش بینی حجم رسوبی که قابل تخلیه است توسعه داده شده اند. دو معادله برای سیستم های رودخانه هایی با شیب متوسط و تند استخراج شده اند. کارایی معادلات تجربی با داده های موجود تأیید شد و مشخص شد که این داده ها رضایت بخش هستند.

^۱Sanmenxia

3.1 مدل عددی تک بعدی برای رسوب گذاری مخزن

پیش بینی رسوب گذاری مخزن، پیش نیازی برای شبیه سازی تخلیه مخزن است. مدل‌های ریاضی برای رسوب گذاری مخزن، جریان آب و انتقال رسوب، توزیع فضایی و زمانی رسوب در مخزن، مسلح کردن^۷ و طبقه بندی رسوب و غیره را شبیه سازی میکنند. شبیه سازی بلند مدت که در مدت زمان طولانی و دسترسی های طولانی تر به مخازن با استفاده از مدل‌های عددی دو بعدی و سه بعدی توسعه داده شده اند بعلاوه الزامات منابع و زمان محاسباتی، عملی نمی باشند. بعلاوه الگوی رسوب گذاری در امتداد مخازن باریک و طولانی را میتوان با استفاده از مدل‌های عددی تک بعدی بصورت دقیق پیش بینی کرد. بنابراین الگوی رسوب گذاری بلند مدت در مخازن پروژه های جریان رودخانه ای را میتوانیم با استفاده از مدل عددی تک بعدی پیش بینی کنیم. این مدلها معادلات پیوستگی و گشتاور تک بعدی جریان آب و پیوستگی رسوب در سیستم مخزن-رودخانه را حل میکنند. در مطالعه حاضر از مدل عددی تک بعدی HEC-RAS 4.1 (USACE 2010) برای برآورد خصوصیات رسوب گذاری محتمل در مخزن استفاده شده است.

3.2 مدل تجربی برای تخلیه مخزن

شبیه سازی های مدل هیدرولیک تخلیه مخزن در طی مرحله برنامه ریزی پروژه های نیروی (آبی) جریان رودخانه ای برای بهینه سازی پارامترهای مختلف طراحی و زمان بندی عملیات از ملاحظات مدیریت رسوب، ضروری هستند (اسحاق و همکارانش ۲۰۱۴؛ اسحاق و الدو ۲۰۱۶، ۲۰۱۷). بسیاری از مدل‌های عددی تک بعدی قابلیت شبیه سازی شرایط جریان خیلی متلاطم در حین تخلیه را ندارند. معمولاً برای شبیه سازی تخلیه مخزن از مدل‌های مقیاس فیزیکی استفاده میشود. برای شبیه سازی تخلیه هیدرولیکی رسوب های مخزن از مدل‌های مقیاس هندسی (GS) مشابه بر مبنای قانون تشابه فرود^۸ (جیمز فرود) استفاده میشود. ذرات رسوب بر روی بستر رودخانه با استفاده از تنش برشی بحرانی در معیارهای حرکت ابتدایی مقیاس بندی میشوند. رسوب دروا^۹ بر مبنای معیارهای سرعت سقوط مقیاس بندی میشود.

^۷Armouring

^۸Froude

^۹Suspended

در مطالعه حاضر یک مدل مقیاس هندسی مشابه 1:100 از رودخانه پونات سانگچو ساخته شد که منطقه بالادستی در حدود ۱۰ کیلومتر و منطقه پایین درستی در حدود ۵۰۰ متر از سد را برای شبیه سازی های تخلیه پوشش می داد. تخلیه ها و مدت زمان های متناظر با تخلیه های نمونه اولیه برابر با 600، 800، 1000 و $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ (6، 8، 10 و 12 l/s در مدل) و مدت زمان های ۱۲ و ۲۴ ساعت (1.2 و 2.4 ساعت در مدل) در مدل مورد مطالعه قرار گرفتند. در پایان شبیه سازی، حجم رسوب جمع آوری شده در حفره دریچه و جریان پایین دست سرریزها اندازه گیری شد. سطوح بستر در هر برش عرضی نیز اندازه گیری شد و محاسبات حجمی برای برآورد کمیت رسوب تخلیه شده از مخزن انجام شد.

3.3 استقاق معادله تجربی

معادلات موجود در مقالات برای برآورد کمیت رسوبی که توسط تخلیه هیدرولیک قابل حذف کردن از مخزن است، از داده های محدود و بر مبنای چندین پارامتر استخراج شده است. فرآیند تخلیه به پارامترهای زیادی بستگی دارد که مربوط به هندسه مخزن، جریان آب و رسوب، و پارامترهای ساختاری/عملیاتی سد هستند. برای اینکه حجم رسوب تخلیه شده را بهتر پیش بینی کنیم باید معادلات را بر مبنای داده ها و پارامترهای بیشتری استخراج کنیم. در مطالعه حاضر تلاش شده است که معادلات تجربی استخراج شوند که میتوانند حجم رسوب حذف شده از مخزن (توسط تخلیه هیدرولیکی) را بصورت دقیق پیش بینی کنند. تحلیل رگرسیون چندگانه غیرخطی با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری R انجام شد تا رابطه ای برای پیش بینی حجم رسوب قابل حذف از مخزن، استخراج گردد.

۴. مطالعه موردی از تخلیه مخزن

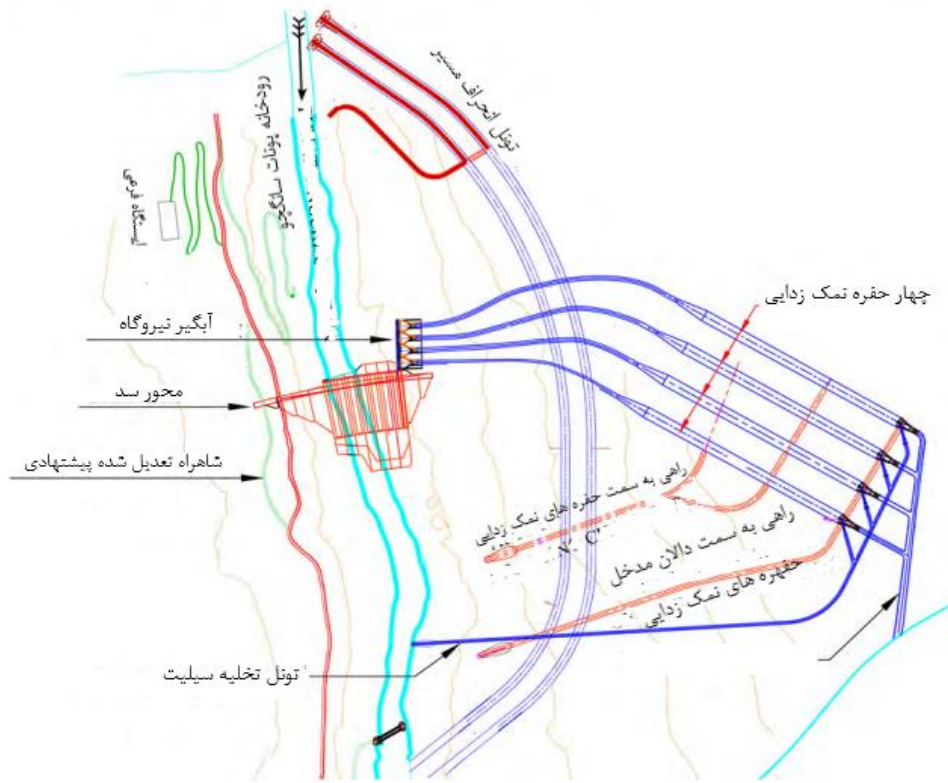
در این مطالعه آزمایشاتی بر مبنای یک مدل (مقیاس بندی شده) برای شبیه سازی تخلیه رسوب از مخزن پروژه انرژی آبی با نام پروژه نیروی (آبی) هیدروالکتریکی Punatsangchhu-I در بوتان انجام شد. آزمایشات تخلیه برای خصوصیات ته نشینی رسوب انجام شد که از شبیه سازی مدل عددی تک بعدی بدست آمده بود.

4.1 خصوصیات پروژه

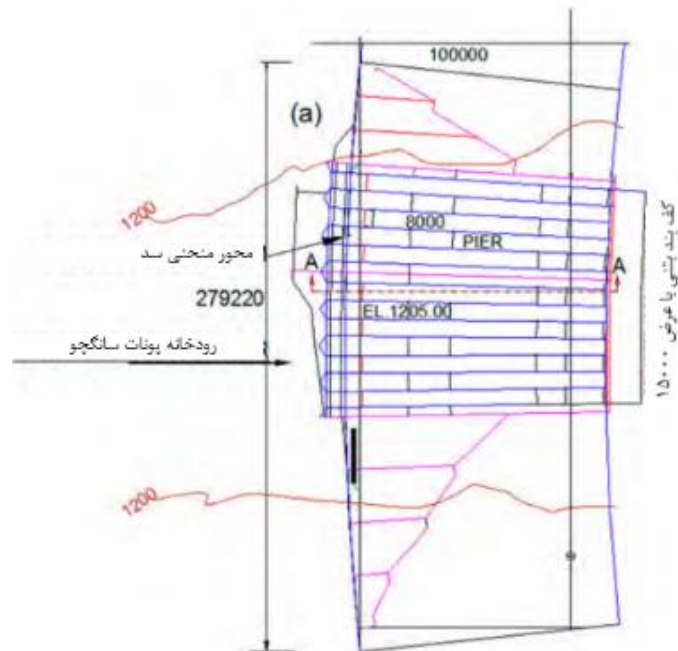
پروژه هیدروالکتریکی پونات سانگچو بر روی رودخانه پونات سانگچو در ناحیه وانگدو واقع در بوتان پیشنهاد شده است. سایت (محل) سد در حدود ۷ کیلومتری پایین دست پل وانگدی^۱ و در ۸۰ کیلومتری کاپیتال تیمپو^۲ واقع شده است (شکل 1a). سایت اندازه گیری وانگدی رپید^۳ در حدود ۵۰۰ متری پایین دست پل وانگدی واقع شده است. رودخانه پونات سانگچو که از دامنه های هیمالیا در شمال غربی بوتان در ارتفاع حدوداً ۷۰۰۰ متری سرچشمه می گیرد شاخه ای از رودخانه رودخانه براهماپوترا^۴ است. رودخانه های فوچو^۵ و موچو^۶ در پوناکا به هم وصل میشوند و رودخانه پونات سانگچو را تشکیل میدهند. حوزه آبخیز کلی رودخانه پونات سانگچو تا سایت پروژه 6,390 km² است. 3,115 km² از آبخیز از آب شدن برف ها و 3,275 km² باقیمانده آن از آب باران تشکیل میشود. بادهای موسمی و فصل تخلیه بالا از ژوئن تا سپتامبر است. میانگین جریان ماهیانه در طی دوره بالا حدود 800 m³/s است. جریان رودخانه در طی دوره ساخت باید از تونل های انحراف مسیر عبور کند. تونل های انحراف مسیر برای عبور دادن 967 m³/s سیل طراحی شده اند که یک سیل با دوره بازگشت ۲۵ ساله است که با استفاده از مقادیر اوج غیر بادهای موسمی در سایت Wangli G&D برای دوره 1991-2004 محاسبه شد. این پروژه برای حداکثر سیل محتمل (PMF) برابر با 11,500 m³/s و سیل طغیان دریاچه یخچالی (GLOF) برابر با 4,300 m³/s طراحی شده است.



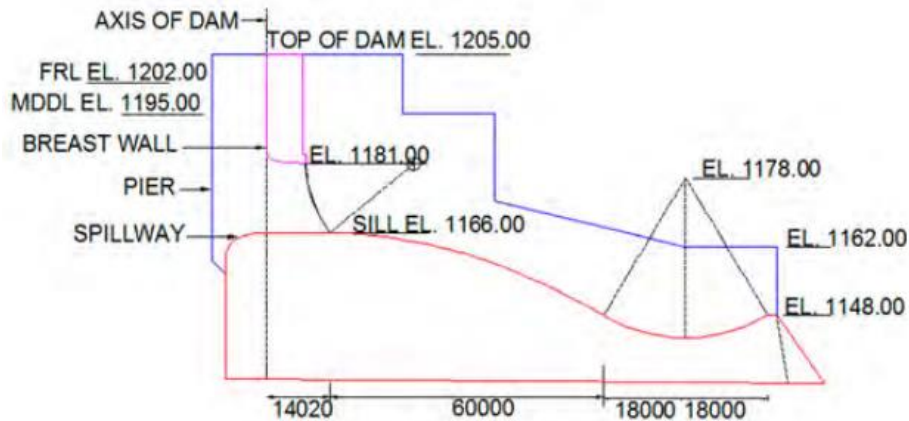
-
- ^۱Wangdue
 - ^۲Wangdi
 - ^۳Capital Thimpu
 - ^۴Wangdi Rapid
 - ^۵Brahmaputra
 - ^۶Phochhu
 - ^۷Mochhu



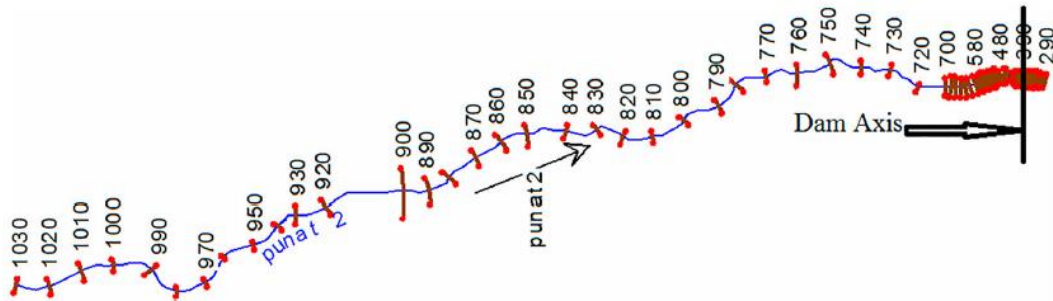
شکل ۱. (a) نقشه موقعیت پروژه، (b) طرح کلی مختلط سد



برش A-A آبگیر ماکزیمم (b)



شکل ۲. پلان و برش سرریز



شکل ۳. طرح رودخانه با علامتگذاری موقعیت های برش عرضی

این پروژه، ساخت یک سد انحراف در امتداد رودخانه پونات سانگچو را تجسم میکند که موارد روبرو را نیز شامل می‌گردد: سیستم آبگیر برای تخلیه $462.65 \text{ m}^3/\text{s}$ از طریق چهار واحد؛ حفره های نمک زدایی؛ یک سیستم هادی آب و یک نیروگاه زیرزمینی. ظرفیت ایجاد برق پیشنهادی این پروژه 1200 MW است و از ارتفاع ناخالص 357 متری استفاده میکند. طرح کلی مختلط سد در شکل 1(b) نشان داده شده است.

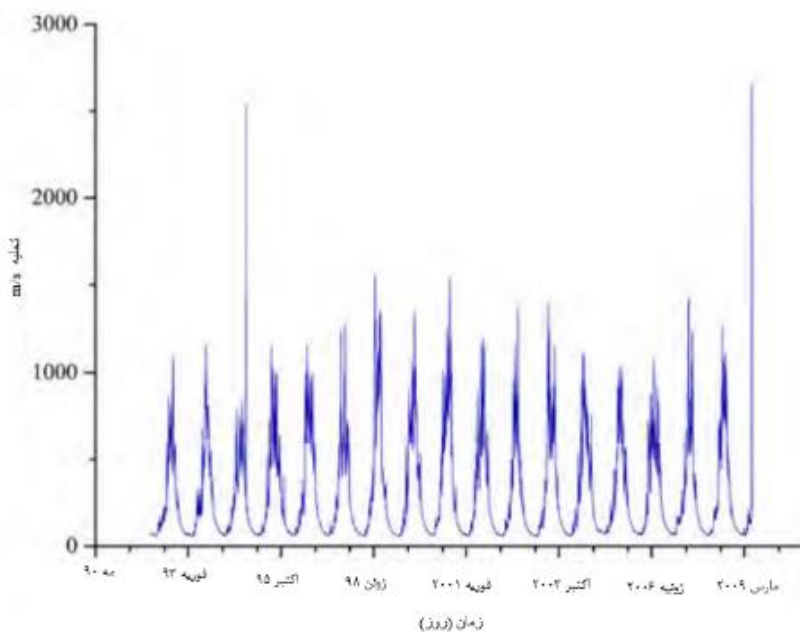
هفت سرریز دریاچه سد با عرض 8 متر و ارتفاع 15 متر فراهم شده اند تا تخلیه محاسباتی برابر با $11,500 \text{ m}^3/\text{s}$ و تخلیه GLOF برابر با $4,300 \text{ m}^3/\text{s}$ را انجام دهند. سطح عملیاتی پیشنهادی مخزن از ارتفاع $\text{El. } 1195 \text{ m}$ تا $\text{El. } 1202 \text{ m}$ متغیر است؛ بطور خلاصه، حداقل سطح فرونشینی (MDDL) در طی فصل جریان بالا تا سطح کامل

مخزن (FRI) در طی فصل جریان پایین. تاج سرریز دریاچه در ارتفاع El. 1166 m قرار دارد. یک سرریز کمکی نیز برای تاج سد در ارتفاع بالاتر El. 1198 m فراهم شده است. پلان و برش سد و سرریز در شکل ۲ ارائه شده است.

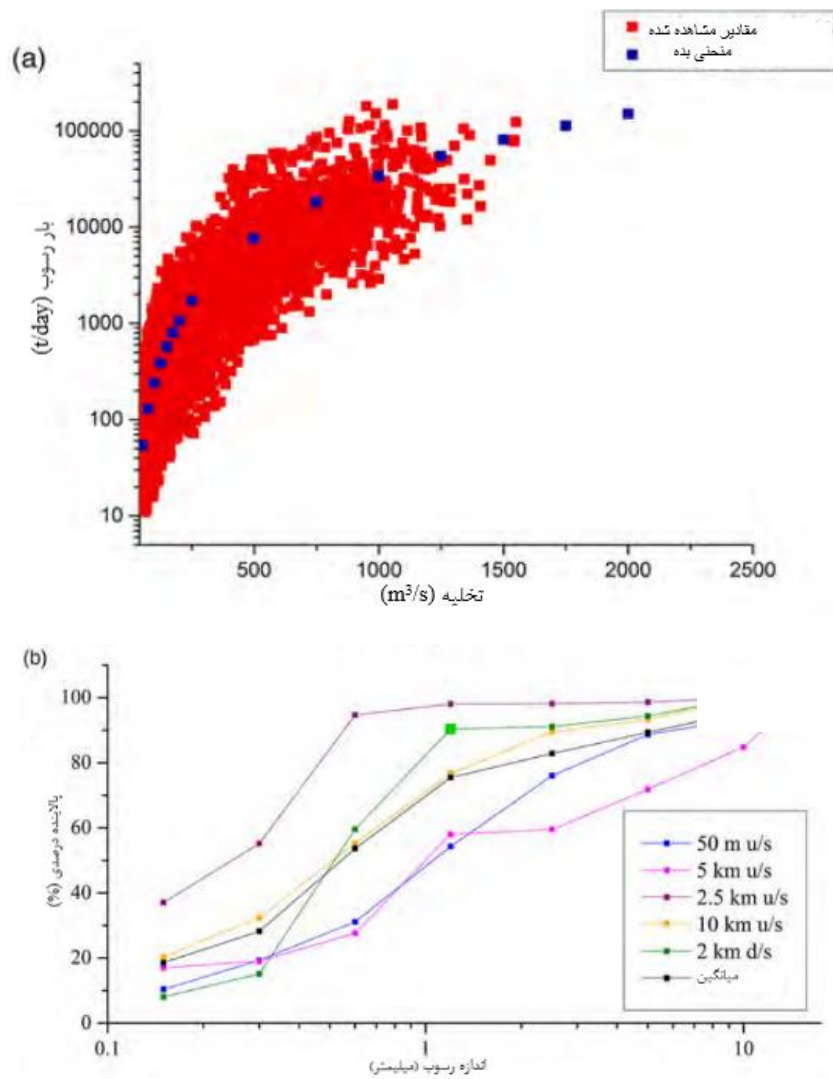
4.2 مدل عددی تک بعدی برای رسوب گذاری مخزن

یک مدل عددی تک بعدی با استفاده از نرم افزار HEC-RAS 4.1 (USACE 2010) توسعه داده شد تا خصوصیات رسوب گذاری محتمل در مخزن پروژه پونات سانگچو را برآورد کند. مدلی از رودخانه با دسترسی 18.5 کیلومتری از محور سد به بالا دست و دسترسی 1.5 کیلومتری از پایین دست ساخته شد. توپوگرافی/عمق سنجی منطقه مطالعه توسط پلان رودخانه و برش های عرضی در مدل نشان داده شد. داده های برش عرضی در فواصل نزدیک تر در حدود ۳۵ متر برای حدود ۱,۵ متری از سد، و فواصل دورتر ۵۰۰ متری در بالا دست رودخانه موجود بودند. در شکل ۳ طرح کلی رودخانه در مدل عددی تک بعدی را نشان داده ایم.

مدل عددی تک بعدی را توسط تعدیل ضریب زبری (n) برای شرایط هیدرودینامیک تنظیم کردیم. محاسبات جریان ماندگار برای تخلیه های مشاهده شده و سطوح متناظر آب در نمونه اولیه انجام شد تا برای ضریب زبری به مقدار 0.048 برسد.



شکل ۴. هیدروگراف تخلیه روزانه

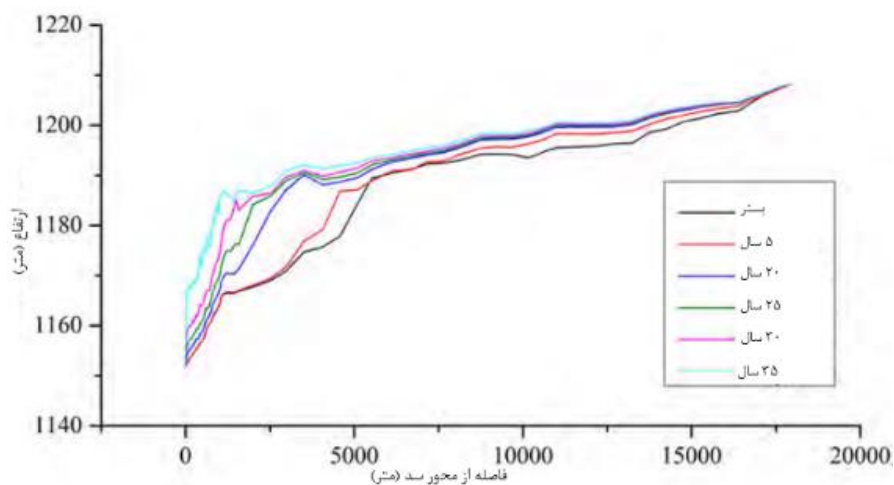


شکل ۵. (a) منحنی بده رسوب، (b) منحنی های دانه بندی مصالح بستر

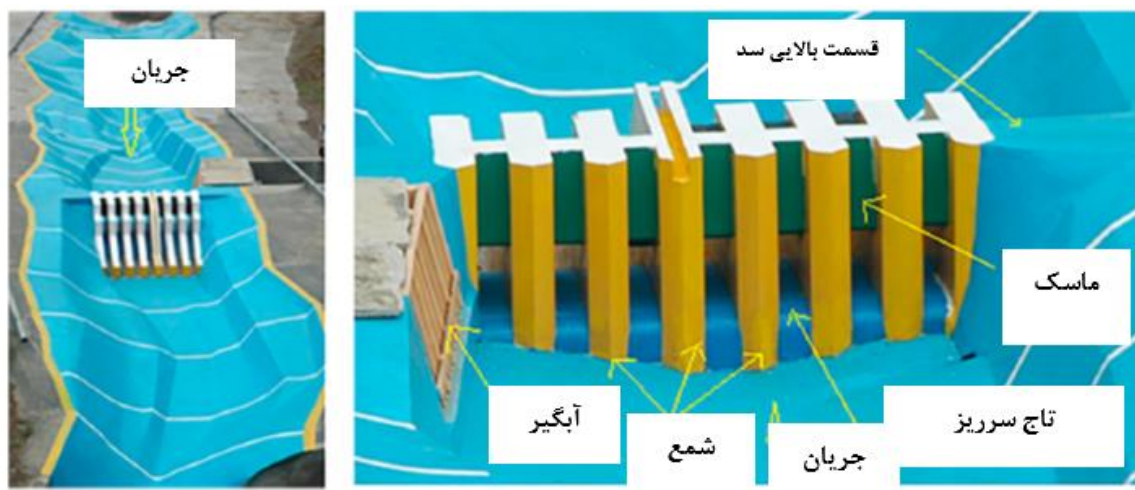
اندازه گیری های تخلیه بصورت روزانه در سایت اندازه گیری وانگدی رسید انجام میشد و داده ها برای دوره ژوئیه ۱۹۹۲ تا ژوئیه ۲۰۰۹ موجود بودند. هیدروگراف تخلیه روزانه بالا (شکل ۴) بعد از تصحیح خطاها و پر کردن شکاف ها بعنوان مرز بالا دست در اجرای شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفت. غلظت رسوب دروا در امتداد مشاهدات تخلیه متناظر نیز در سایت اندازه گیری وانگدی رسید برای همان دوره انجام شد. منحنی بده رسوب (شکل ۵) بعد از تعدیل بار اندازه گیری نشده از روی داده های بالا طراحی شد و بار بستر (۲۰ درصد بار دروا) بعنوان شرایط کرانی رسوب بالا دست در شبیه سازی های رسوب گذاری مخزن مورد استفاده قرار گرفت. بار رسوب سالانه حدود $30,23 \text{ Mm}^3$ است.

منحنی دانه بندی مصالح بستر از پنج موقعیت مختلف در دسترسی مطالعه نیز بعنوان داده های ورودی برای مدل تک

بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵.۵b)



شکل ۶. خصوصیات برش طولی بستر مخزن بعد از سالهای مختلف از معادله مخزن

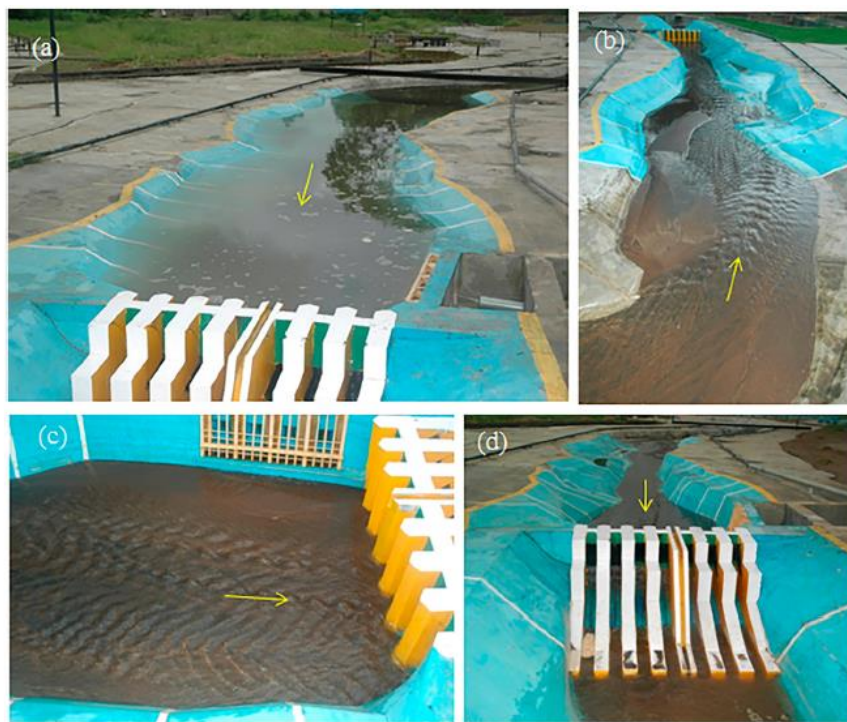


شکل ۷. تصویر مدل مخزن پونات سانگچو که سد و سرریز را نشان میدهد

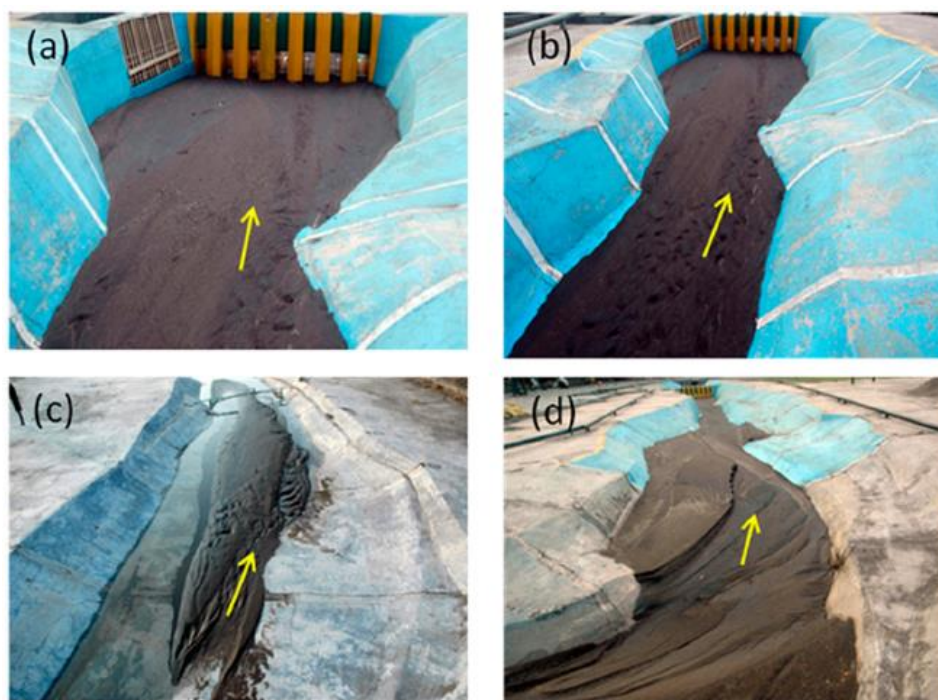
شبیه سازی های انتقال رسوب در جریان شبه-ماندگار انجام شدند تا سطوح رسوب گذاری در مخزن پیش بینی شود. دسترسی مخزن از بستر بالا دست به محور سد مدلسازی شد. هیدروگراف تخلیه و منحنی بده رسوب بصورت سطوح عملیات مخزن و مرز بالا دست MDDL (El. 1195 m) و FRL (El. 1202 m) بعنوان مرز پایین دست فراهم شدند. الگوریتم ترکیب بستر Exner 5، مرحله زمانی متغیر با تخلیه، و مدل انتقال رسوب آکرز-وایت در این شبیه سازی ها اتخاذ شدند.

خصوصیات پیش بینی شده رسوب گذاری برای سالهای مختلف با شرایط عملیاتی MDDL در شکل ۶ نشان داده شده است.

شبیه سازی ها نشان دادند که رسوب گذاری در محور سد بعد از یک دوره حدوداً ۳۳ ساله به سطح تاج سرریز با ارتفاع El. 1166 m رسید. مخازن جریان رودخانه ای در طی فصل بادهای موسمی که غلظت رسوب بالا بود در MDDL عمل میگردند، و در فصل هایی که بادهای موسمی نمی وزیدند در FRL عمل میگردند. بنابراین ما برای شبیه سازی شرایط کرانی ته نشینی رسوب، از پروفیل بالا بعنوان ورودی برای مدل های شبیه سازی برای تخلیه مخزن استفاده کردیم. این پروژه با تخلیه فرونشینی در طی بادهای موسمی برنامه ریزی شده است، یعنی زمانیکه غلظت رسوب از مقدار طراحی «آبگیرهای نمک زدایی» بیشتر میشود. بنابراین شبیه سازی هایی توسط پایین آوردن سطح آب در محور سد در طی جریان های اوج سالانه با تخلیه سالانه انجام شدند. مشاهده شد که در هنگام تخلیه، ته نشینی رسوب از یک منطقه حدوداً ۵ کیلومتری به پایین دست و به سمت محور سد حرکت میکند. و در نهایت اینکه این پروفیل، با سطح رسوب گذاری نزدیک به سد در سطح تاج سرریز تثبیت خواهد شد.



شکل ۸. تصویر مدل مخزن پونات سانگچو در هنگام تخلیه

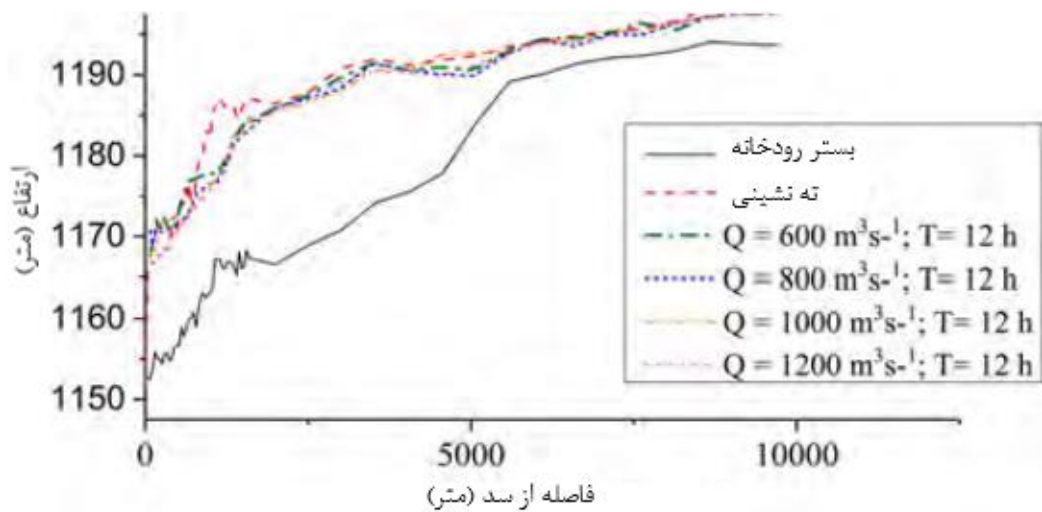


شکل ۹. تصویر مدل مخزن پونات سانگچو بعد از تخلیه با $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ بمدت ۲۴ ساعت

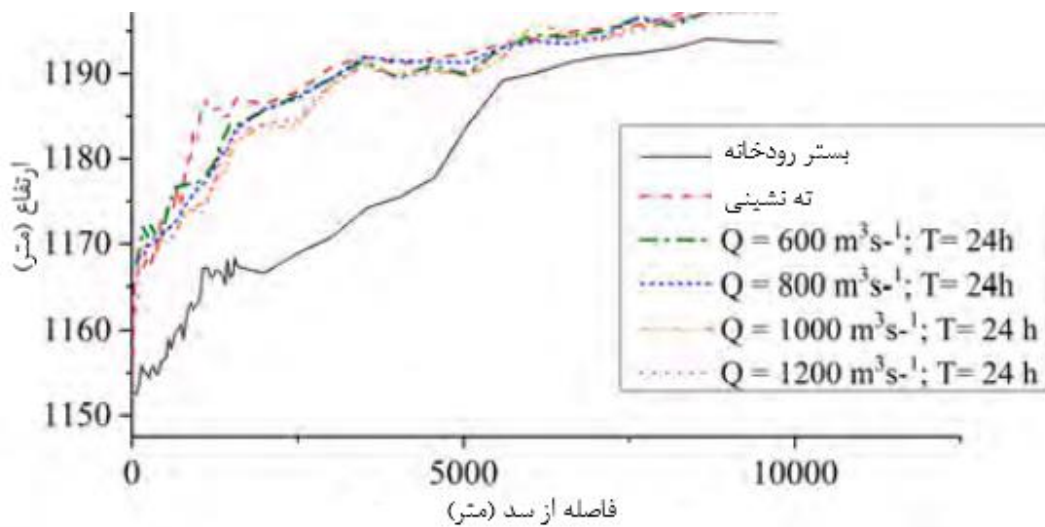
4.3 مدل تجربی برای تخلیه مخزن

در مطالعه حاضر یک مدل هندسی مشابه با مقیاس 1:100 از رودخانه پونات سانگچو برای شبیه سازی های تخلیه ساخته شد. مخزن حدوداً به ۱۰ کیلومتری بالا دست و ۵۰۰ متری پایین دست می رسد (شکل ۷). بخاطر اینکه نیروهای گرانشی در جریان های کانال باز غالب هستند مدل ما بر مبنای اصول قانون تشابه فرود است. ابعاد و پارامترهای هیدرولیکی مدل و نمونه اولیه با یک اصل یکسان با هم مرتبط بودند. نسبت های مقیاس برای پارامترهای مهم عبارتند از: طول 1:100، عمق 1:100، مساحت 1:10,000، حجم 1:1,000,000، سرعت 1:10، تخلیه 1:100,000، و زمان 1:10. سد با سرریزها، دریچه های تنظیم آب و ساختار آبگیر مشابه با طراحی اصلی در مدل ساخته شد. اقداماتی برای اندازه گیری تخلیه جریان ورودی (دبی ورودی) (که در انتهای بالا دست مدل با استفاده از مجرای موج ساکن اندازه گیری شد)، تخلیه از طریق آبگیر (که توسط V-notch اندازه گیری شد)، سطوح آب (شنل اشاره گر) و سطوح بستر (که در امتداد هر برش عرضی با استفاده از شنل اشاره گر اندازه گیری شد) فراهم شد. یک حفره دریچه برای جمع آوری رسوب تخلیه شده فراهم شد.

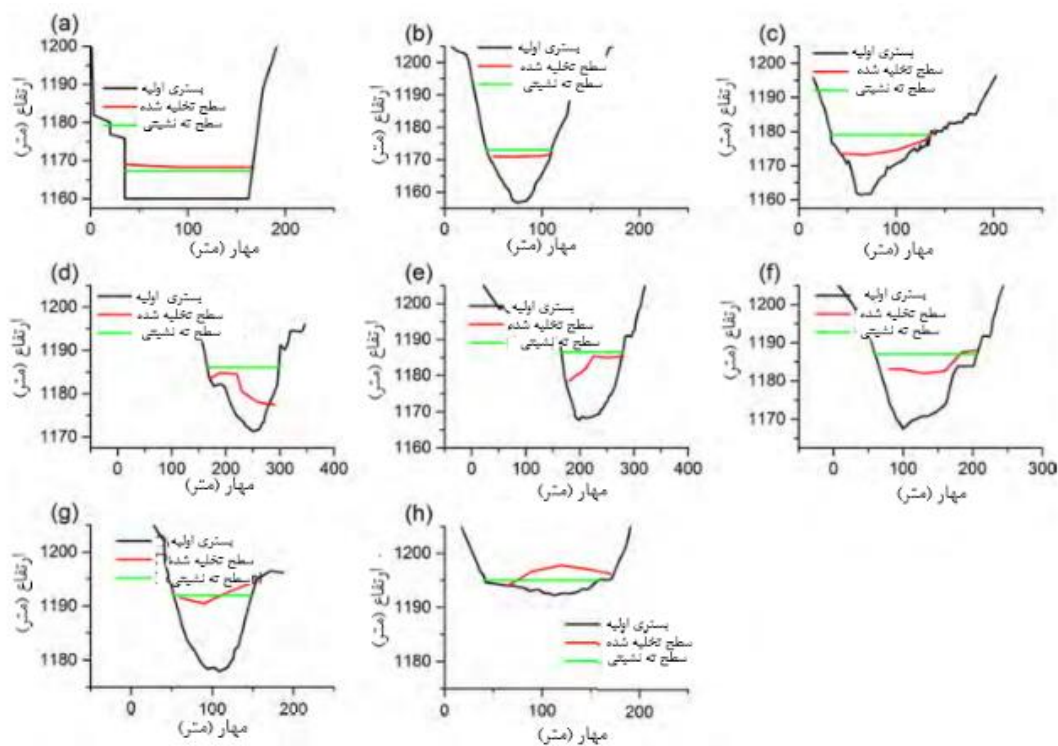
ما مدل را با ماسه ریز و طبق خصوصیات رسوب گذاری محاسبه شده از مدل عددی تک بعدی برای ایجاد شرایط اولیه برای شبیه سازی های تخلیه، پر کردیم. تنش برشی بحرانی شیلدز و معیارهای حرکت ابتدایی یانگ برای شبیه سازی اندازه رسوب در مدل استفاده شدند. قطر میانه (d_{50}) نمونه های مصالح بستر از 0.3 تا ۱ میلیمتر متغیر بود. d_{50} رسوب طبق منحنی دانه بندی میانگین 0.8 میلیمتر بود. اندازه رسوب مورد نیاز در مدل برای شبیه سازی اندازه نمونه اولیه 0.8 میلیمتری بر مبنای معیارهای یانگ 0.14 میلیمتر است. طبق معیارهای شیلدز اندازه رسوب مورد نیاز در مدل 0.10 میلیمتر است. چون ماسه ریز برای شبیه سازی d_{50} مصالح بستر موجود نبود، در آزمایشات از ماسه محلی موجود استفاده شد که دارای d_{50} برابر با 0.24-0.26 میلیمتر بود. تجربه های بدست آمده از پروژه های مشابه نشان داد که نتایج مطالعات مدل محافظه کارانه می باشد. کمیت واقعی رسوب حذف شده توسط تخلیه در نمونه اولیه بیشتر از چیزی خواهد بود که توسط مدل پیش بینی شده است. اثر و کوانتوم تخلیه مخزن در مدل برای تخلیه ها و مدت زمان های مختلف تخلیه مورد مطالعه قرار گرفت. تخلیه های اوج سالانه در طی ماه های بارندگی (فصل بادهای موسمی) از 600 تا $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ متغیر بود. تخلیه فراتر از مدت زمان ۲۴ ساعت امکان پذیر نیست چون در حین تخلیه تولید برق متوقف میشود. بنابراین تخلیه ها و مدت زمان های متناظر با تخلیه های نمونه اولیه برابر با 600، 800، 1000 و $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ (6، 8، 10 و 12 l/s در مدل) و مدت زمان های برابر با ۱۲ و ۲۴ ساعت (1.2 و 2.4 ساعت در مدل) در مدل مورد مطالعه قرار گرفتند. سطح آب مخزن در ابتدای آزمایش در FRL نگه داشته شد و تمام دریچه های تنظیم آب بطور کامل باز شدند تا سطح آب فروکش کند و شرایط جریان آزاد ایجاد گردد. تخلیه برای مدت زمان تعیین شده و در پایان آزمایشات شبیه سازی شد، و حجم رسوب جمع آوری شده در حفره دریچه و پایین دست سرریزها اندازه گیری شد. حفره دریچه در هر یک از برش های عرضی نیز اندازه گیری شد و محاسبات حجمی برای برآورد کمیت رسوب تخلیه شده از مخزن انجام شد. همین روند آزمایش برای هر یک از سری آزمایشات دنبال شد. شکل ۸ مدل مخزن را نشان میدهد که سطح آب آن در FRI و در طی عملیات تخلیه، ثابت نگه داشته میشود.



شکل ۱۰. برش طولی مخزن پونات سانگچو بعد از تخلیه ب مدت ۱۲ ساعت



شکل ۱۱. برش طولی مخزن پونات سانگچو بعد از تخلیه ب مدت ۲۴ ساعت



شکل ۱۲. برش های عرضی معمول بعد از تخلیه بمدت ۲۴ ساعت با تخلیه $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

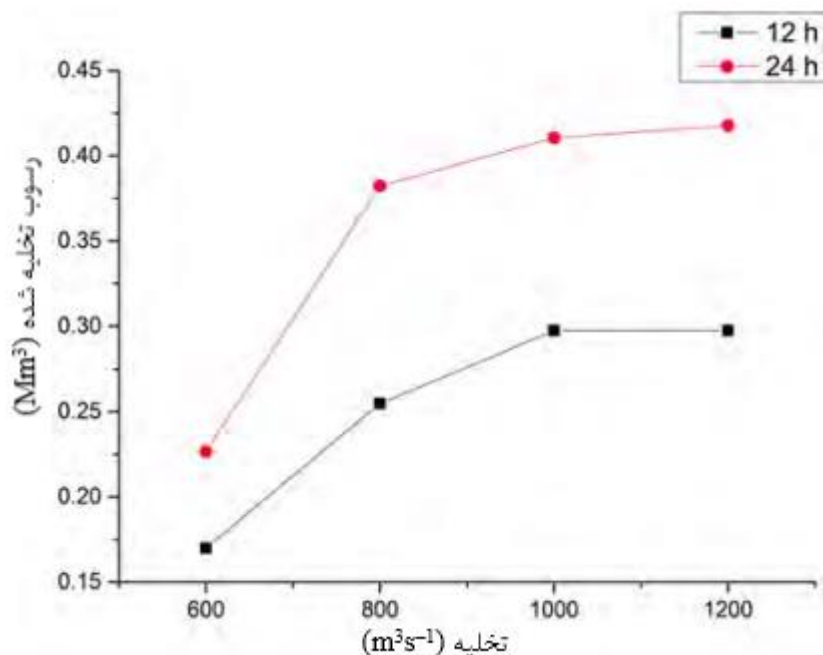
جدول ۱. حجم رسوب تخلیه شده در مدت ۱۲ و ۲۴ ساعت با تخلیه های مختلف

کمیت رسوب تخلیه شده				تخلیه (m^3s^{-1})
۲۴ ساعت		۱۲ ساعت		
درصد (%)	حجم (m^3)	درصد (%)	حجم (m^3)	
2.52	226,535	1.89	169,901	600
4.26	382,277	2.84	254,852	800
4.59	410,594	3.31	297,327	1000
4.66	417,673	3.31	297,327	1200

سطوح ته نشینی رسوب در مدل بعد از ۲۴ ساعت تخلیه با تخلیه $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ در شکل ۹ ارائه شده است. پروفیل طولی مخزن بعد از تخلیه بمدت ۱۲ ساعت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۱ پروفیل طولی بعد از ۲۴ ساعت تخلیه را نشان میدهد. برش های عرضی معمول برای ۲۴ ساعت تخلیه با تخلیه برابر با $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. حجم رسوب تخلیه شده از مخزن در جدول ۱، و برای تمام آزمایشات با تخلیه های لبریز و مدت زمان های مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

4.4 بحث درباره نتایج مدل تجربی

خصوصیات (پروفیل) ته نشینی رسوب استخراج شده از مدل عددی تک بعدی در مدل تخلیه بعنوان شرایط اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. این پروفیل الگوی رسوب گذاری را بعد از ۳۳ سال عملیات مخزن نشان میدهد. رودخانه پونات سانگچو دارای سه شیب بستر مختلف در منطقه دسترسی مخزن است. منطقه ای که ۱ کیلومتر از پایین دست سد فاصله دارد دارای شیب بستر خیلی تندی است (0.013). رودخانه در منطقه 1.5 تا 4.5 کیلومتری عریض تر است و دارای شیب بستر ملایم تر 0.0034 است. وانگدی رپید در منطقه بین ۵ تا 5.5 کیلومتری بالا دست از سد قرار دارد. منطقه ۶ کیلومتری از بالا دست رودخانه دارای شیب خیلی ملایمی در حدود 0.001 است. بعلت شرایط معمول سایت (شیب های بستر رودخانه)، قسمت عمده رسوب وارد شونده در طی دوره اولیه عملیات مخزن، در امتداد مناطق بالا دست مخزن ته نشین میشود. مدل عددی تک بعدی برای رسوب گذاری مخزن، این پدیده را نشان داد. نتایج شبیه سازی همچنین نشان داد که قسمت عمده ته نشینی رسوب در امتداد گستره استخر (بین 1.5 و 4.5 کیلومتری) در پایین دست وانگدی رپید رخ میدهد (شکل ۶).



شکل ۱۳. حجم رسوب تخلیه شده با تخلیه های مختلف برای مطالعه موردی

شبهه سازی های تخلیه مخزن نشان داد که برای همه ترکیبات مختلف تخلیه ها و مدت زمان ها، ته نشینی رسوب از جبهه دلتا^۲ (1.5 تا 4.5 کیلومتری) در نواحی وسط به پایین دست انتقال یافت و از مخزن تخلیه شد (اشکال ۱۰ و ۱۱). رسوب بین بستر رودخانه گیر میگرد و سطح تاج سرریز قابل تخلیه نبود. بعلت شیب بستر خیلی تند در ناحیه پایین دست نزدیک سد و آبگیر، رسوب گذاری از سطح تاج سرریز بالاتر نمی رود و سطح ته نشینی همیشه پایین تر از سطح معکوس آبگیر باقی می ماند.

مشاهدات مدل، شکل گیری یک کانال تخلیه در امتداد مناطق وسیع تر میانی نشان داد. کانال تخلیه (مجرای آبگذری) از یک قسمت ساحل به قسمت دیگر منتقل میشد و مشاهده شد که میله ها در سر پیچ ها خمیده می شوند (اشکال ۹ و ۱۲). همچنین مشاهده شد که رسوب ته نشین شده در امتداد منطقه دورتر بالا دست (حدود 5.6 کیلومتری تا 7.5 کیلومتری بالا دست محور سد) حتی با تخلیه بالاتر $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ، تخلیه (شسته) نمی شود. چون بستر رودخانه در نواحی بالا دست نسبتاً عریض تر و هموارتر است، ته نشینی رسوب از این قسمت ها در هنگام تخلیه (شستشو توسط جریان آب) فرساییده نمی شد. بنابراین برای حذف ته نشینی رسوب از مناطق بالا (که تخلیه هیدرولیک در آنها مؤثر نباشد) ممکن است لازم باشد از روشهای حذف مکانیکی دیگر استفاده کنیم.

کمیت رسوب تخلیه شده (شسته شده)، با افزایش تخلیه و مدت زمان افزایش می یابد. با اینحال زمانیکه تخلیه لبریز (تخلیه به منظور شستشوی رسوب) از 1000 به $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ افزایش پیدا کرد فقط یک افزایش حاشیه ای در کمیت رسوب تخلیه شده رخ داد. کمیت رسوب تخلیه شده از 0.17 Mm^3 و تخلیه $600 \text{ m}^3/\text{s}$ برای مدت زمان ۱۲ ساعته، تا 0.42 Mm^3 و تخلیه $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ برای مدت زمان ۲۴ ساعت متغیر بود. شبهه سازی های تخلیه (شستشو) بر روی پروفیل ته نشینی در حدود ۳۳ سال انجام شد، وقتی که ۷۲ درصد ظرفیت انبارش با ته نشینی رسوب پر میشود. شبهه سازی های تخلیه نشان داد که ته نشینی رسوب سالانه را میتوان با شستشوی ۲۴ ساعته و تخلیه $600 \text{ m}^3/\text{s}$ حذف کرد؛ و در مدت زمان ۱۲ ساعته، شستشو با مقادیر بالاتری از تخلیه انجام میشود.

۵. انحراف معادلات تجربی برای حجم رسوب شسته شده

^۲Delta front

5.1 داده های استفاده شده

مطالعات مدل هیدرولیک برای شستشوی فرونشینی چندین مخزن انرژی آبی جریان رودخانه ای در ناحیه هیمالیایی بر روی مدل های مقیاس (ماکت) در ایستگاه تحقیقاتی مرکزی آب و انرژی (CWPRS) در پیون^۸ (هند) انجام شد (CWPRS)، ۲۰۰۱، الف، ۲۰۰۱، ب، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، الف، ۲۰۰۸، ب، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، الف، ۲۰۱۱، ب، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶). داده های تجربی از این مطالعات برای توسعه معادلات تجربی برای برآورد/پیش بینی حجم رسوب شسته شده از مخازن مورد استفاده قرار گرفته اند.

در اینجا داده های متناظر با مطالعات تجربی انجام شده در CWPRS برای شستشوی مخزن (تخلیه مخزن) ۱۳ پروژه انرژی آبی جریان رودخانه ای در ناحیه هیمالیایی بررسی شده اند. این آزمایشات بر روی مدل های مقیاس هندسی مشابه (مشابه از لحاظ هندسی) از مخازن انجام شدند (که در بخش های قبلی گزارش شده است). مقیاس این مدل ها از 1:60 تا 1:100 متغیر بود. مقیاس مدل های Chamera – II, Parbati – II و Dhauli-ganga، 1:70، مقیاس مدل Devsari، 1:60 و مقیاس مدل های دیگر 1:100 بود. ارتفاع سدها از ۲۶ متر (در مورد TLDP – III) تا ۱۱۶ متر (برای مورد Subansiri) متغیر بود. با اینحال ارتفاع اغلب سدها بین ۳۰ تا ۶۰ متر است. مخازن Teesa، V، Tala، Sewa – II، Kotlibhel IA، II، Subansiri، Punatsangchhu – I و TLDP – III وقتی شسته شدند که ته نشینی رسوب حدود ۷۰ درصد ظرفیت مخزن بود. مخازن TLDP – IV، Kotlibhel – IA و Devsari هم وقتی شسته شدند که ته نشینی رسوب حدود ۳۰ درصد بود. در چند مورد، عملیات شستشوی مخزن با حداکثر ته نشینی انجام شد و در بقیه موارد شستشو زمانی انجام شد که ته نشینی به سطح تاج سرریز یا سطح معکوس آبگیر می رسید. در تمام موارد، شستشو با تخلیه هایی در دامنه «میانگین تخلیه ماهانه در طی فصل بارندگی» انجام شد. شستشو معمولاً بمدت زمان متناظر با ۱۲، ۲۴ و ۳۶ ساعت در نمونه اولیه انجام می شد. جزئیات نقاط داده در جداول ۲ و ۳ توصیف شده است.

شیب بستر رودخانه ها در این موارد از 0.0012 تا 0.05 و طول مخزن از «کمتر از ۳ کیلومتر» تا «بیشتر از ۳۰ کیلومتر» متغیر بود. برای مخازن کوچکتر، ناحیه مخزن مدلسازی میشد و برای مخازن بزرگتر، فقط ناحیه ۱۰ کیلومتری مخزن شبیه سازی میشد.

تحلیل داده ها از مطالعات اولیه و نتایج مطالعات حاضر نشان داد که شیب بستر رودخانه، مهمترین پارامتر حاکم بر شستشوی رسوب است. همچنین مشاهده شد که تخلیه لبریز (تخلیه به منظور شستشوی رسوب) و مدت زمان شستشو، پارامترهای مهم دیگر هستند. بر اساس شیب بستر رودخانه و ظرفیت مخزن، پروژه های مخزن به سه طبقه زیر گروه بندی شده اند:

- شیب خیلی تند: مخازنی با جریان هایی با شیب زیاد ($>2\%$) - شیب بستر خیلی تند $>4\%$ (0.04)؛ نوع جریان "A" و ظرفیت انبارش کم ($<5 \text{ Mm}^3$)

- شیب تند: شیب بستر تند $4\% - 0.5\%$ ($0.005-0.04$)؛ جریان نوع "C" یا "D" و ظرفیت انبارش کم ($<10 \text{ Mm}^3$)

- شیب متوسط: مخازنی با جریان هایی با شیب کم ($<2\%$) - شیب بستر متوسط 0.1% تا 0.5% ($0.001-0.005$)؛ جریان نوع "C" یا "D" و ظرفیت انبارش متوسط ($>10 \text{ Mm}^3$)

جریان های نوع "A"، "C" و "D" طبق سیستم طبقه بندی جریان راسگن (۱۹۹۴) تعیین شده اند. ما در این تحلیل فقط طبقات شیب تند و شیب متوسط را بررسی می کنیم. جزئیات پروژه ها و دامنه پارامترهای مهم داده ها بترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده اند.

کمیت رسوب شسته شده به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که عبارتند از: هندسه مخزن، تخلیه به منظور شستشو، مدت زمان، و خصوصیات رسوب. ماتریس نمودار پراکنش برای طبقات شیب تند و شیب متوسط مورد تحلیل قرار گرفتند تا تغییرات حجم رسوب شسته شده با پارامترهای مهم و رابطه بین پارامترهای مختلف مشاهده شود. با داشتن مجموعه ای از متغیرهای X_1, X_2, \dots, X_k ماتریس نمودار پراکنش شامل تمام نمودارهای پراکنش دو به دوی متغیرها در یک صفحه منفرد و با فرمت ماتریس می باشد. عبارت دیگر اگر k متغیر وجود داشته باشد ماتریس نمودار

پراکنش دارای k ردیف و k ستون خواهد بود و ردیف i ام و ستون j ام این ماتریس، نموداری از X_i در مقابل X_j خواهد بود.

تحلیل داده ها نشان داد که شیب بستر رودخانه (S) مهمترین پارامتر حاکم بر شستشوی رسوب است. تنش برشی که به شیب وابسته است یک عامل حاکم (غالب) برای حرکت رسوب در هنگام شستشو می باشد. همچنین مشاهده شد که تخلیه لبریز (تخلیه به منظور شستشو) (Q) و مدت زمان تخلیه (T) پارامترهای مهم دیگری هستند. تحلیل داده ها نشان داد که برای هر پروژه بررسی شده، کمیت رسوب شسته شده با افزایش تخلیه لبریز و مدت زمان، افزایش می یافت. البته برای هر تخلیه، شستشو بعد از مدت زمان معینی بی اثر می شد. مدت زمان شستشوی مؤثر معمولاً با افزایش تخلیه، کاهش می یافت. همچنین کمیت رسوب شسته شده، فراتر از یک تخلیه معین، تثبیت می شد؛ معمولاً تخلیه با دبی لبریز مطابقت داشت.

اندازه رسوب هم ی پارامتر مهم دیگر است. پارامتر شیلد برای تنش برشی بحرانی برای انتقال رسوب نسبت معکوسی با اندازه رسوب دارد. بنابراین کمیت شستشو باید با افزایش اندازه رسوب کاهش یابد. در تحلیل حاضر با تغییرپذیری اندازه رسوب، داده های زیادی موجود نبودند. کمیت رسوب شسته شده به ظرفیت نسبت جریان ورودی مخزن بستگی دارد. مخازنی که نسبت جریان ورودی-ظرفیت کوچکی دارند برای شستشو مناسب هستند. کمیت رسوب شسته شده بیشتر از ۷۰ درصد رسوب ته نشین شده برای طبقه «شیب خیلی تند» بود. در بعضی از مطالعات موردی، عملیات شستشوی مخزن زمانی انجام میشد که سطح ته نشینی به سطح تاج سرریز یا سطح معکوس آبگیر می رسید. در بعضی از موارد دیگر هم عملیات شستشو زمانی انجام میشد که سطح ته نشینی به حالت تعادل می رسید. در موارد طبقات شیب تند و شیب متوسط، ته نشینی رسوب از نوع دلتا بود. کمیت رسوب شسته شده به موقعیت جبهه دلتا با توجه به محور و ظرفیت سد (که پیشاپیش با ته نشینی رسوب اشغال شده بود) بستگی داشت. اگر شستشو زمانی انجام می شد که جبهه دلتا از خروجی شستشو دور بود، رسوب از جبهه دلتا به سمت سد حرکت میکرد و تا سطح تاج سرریز در مخزن ته نشین میشد. بنابراین درصد ظرفیت مخزن پر شده با رسوب، پارامتر مهمی برای بهینه سازی زمانبندی شستشو است.

جدول ۲. جزئیات و دامنه داده های استفاده شده برای توسعه معادله تجربی برای شیب تند

شماره	جزئیات پروژه	مقیاس مدل	تعداد		تخلیه لبریز $m^3 s^{-1}$	مدت زمان شستشو h	اندازه رسوب (d_{50}) mm	طول مخزن m	ارتفاع سد m	ظرفیت در FRL Mm^3	ته نشینی رسوب %
			نقاط داده	شیب							
1.	Devsari	1:60	7	0.00667	200-700	12-24	0.26	4800	35	12.46	33.06
2.	Chamera – II	1:70	12	0.00857	300-500	12-36	0.26-0.53	3500	39	2.25	58.98
3.	Teesta V	1:100	12	0.009	1000-2000	12-216	0.53	2500	47	13.52	72.86
4.	Tala	1:100	6	0.0274	300-500	12-36	0.26	2920	89	9.8	77.24
5.	Sewa -II	1:100	12	0.017	50-200	24-72	0.26	2310	40	5.45	77.43

5.2 انحراف معادله تجربی

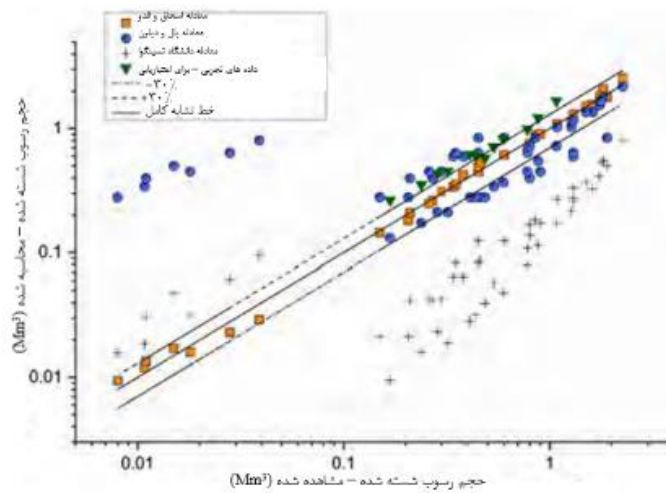
بسته به اهمیت پارامتر و سهولت دسترسی در طی مراحل برنامه ریزی پروژه ها، پارامترهای روبرو برای توسعه معادله تجربی برای پیش بینی کمیت شستشو رسوب انتخاب شدند: شیب بستر رودخانه (S)؛ تخلیه لبریز (Q_f)؛ مدت زمان شستشو (T)؛ اندازه رسوب (d_{50})؛ طول مخزن (L)؛ نسبت ظرفیت-جریان ورودی؛ و درصد ظرفیت پر شده با رسوب. ما تحلیل رگرسیون چندگانه غیرخطی را انجام دادیم تا رابطه ای را برای پیش بینی حجم رسوبی استخراج کنیم که میتوان (با استفاده از پارامترهای معلوم هندسه مخزن و جریان شستشو) آنرا از مخازن شستشو داد. ما تحلیل رگرسیون را انجام دادیم تا مناسب ترین معادله را با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری "R" استخراج کنیم که شامل پارامترهای انتخاب شده است. معادلاتی جداگانه ای را برای طبقات شیب تند و متوسط استخراج کرده ایم. مجموعه داده ها از آزمایشات قبلی برای استخراج معادلات مورد استفاده قرار گرفته اند، و از داده های مطالعه حاضر برای اعتباریابی معادلات استفاده کردیم.

بطور کلی ۳۷ مجموعه داده از ۵ بررسی مدل مخزن (جدول ۲) برای استخراج معادله طبقه شیب تند مورد استفاده قرار گرفته اند.

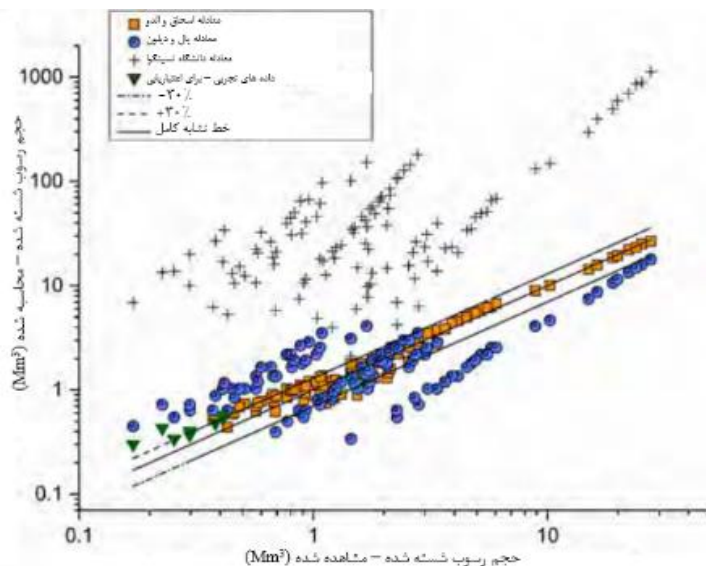
معادله استخراج شده برای طبقه شیب تند (0.005-0.04) (که از این به بعد آنرا معادله اسحاق و الدو برای شیب تند می نامیم) بصورت زیر است:

$$V_s = 0.11 S^{0.0886} Q^{0.5818} T^{0.6442} (C_v/V_w)^{-0.1319} (C_f/C_v)^{4.5724} d_{50}^{-0.3171}, \quad (4)$$

که V_s حجم رسوب شسته شده (بر حسب میلیون متر مکعب)؛ S شیب بستر رودخانه؛ Q تخلیه لبریز (m^3/s)؛ T مدت زمان شستشو (ساعت)؛ C_v ظرفیت مخزن (بر حسب میلیون متر مکعب)؛ V_w حجم آب استفاده شده برای شستشو (بر حسب میلیون متر مکعب)؛ C_f/C_v نسبت ته نشینی رسوب مخزن به ظرفیت بیان شده بصورت کسر؛ C_f حجم ته نشینی رسوب؛ d_{50} اندازه رسوب (میلیمتر)؛ و L طول مخزن (متر) است.



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش بینی شده حجم رسوب شسته شده (شیب تند)



شکل ۱۵. مقایسه مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش بینی شده حجم رسوب شسته شده (شیب متوسط)

جدول ۳. جزئیات و دامنه داده های استفاده شده برای توسعه معادله تجربی برای شیب متوسط

شماره	جزئیات پروژه	تعداد نقاط داده	شیب	تخلیه	مدت زمان تخلیه	اندازه رسوب (ds)	طول مخزن	ارتفاع سد	ظرفیت بر	ته نشینی رسوب %
				$m^3 s^{-1}$	h	mm	m	m	$Mm^3 FRI$	
1.	Kotlibhel - II	15	0.00129	700-3000	12-36	0.26	29,000	57	78.58	71.3
2.	Subansiri Lower	12	0.001833	6000-7500	12-216	0.21	10,000	116	316.16	75.7
3.	Dhualasidh	12	0.002	1000-4000	12-36	0.26	6500	48	95.87	14.22
4.	Punatsangchhu-I	8	0.0032	600-1200	12-24	0.23	14,500	54	12.5	71.84
5.	Teests Low Dam Project (TLDP) - III	15	0.002273	1000-5000	12-36	0.26	5500	26	18.36	66.23
6.	Teests Low Dam Project (TLDP) - IV	12	0.0025	1000-2500	12-36	0.26	3500	32.5	36.63	37.6
7.	Kotlibhel - IA	23	0.00452	500-1200	12-144	0.26	10,000	82.5	46.17	32.8
8.	Kotlibhel - IB	15	0.00246	400-2000	12-36	0.26	10,000	68.5	57.41	95.84

مقدار چندگانه مربع آر (آر به توان دو) چندگانه معادله متناسب 0.9962 و مقدار مربع آر تطبیق شده 0.9955 است که تطابق خوبی را با مقادیر مشاهده شده و معادله متناسب نشان میدهد. این معادله با استفاده از مجموعه داده های جداگانه (۱۲ مجموعه داده) اعتباریابی شد. شکل ۱۴ نمودار داده های مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده را نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که مقادیر پیش بینی شده در حد خطای ۳۰ درصدی قرار دارند. همچنین معادله استخراج شده برای شیب متوسط (0.001-0.005) (که از این به بعد آنرا معادله اسحاق و الدو برای شیب متوسط می نامیم) بصورت زیر می باشد:

$$V_s = 9.604 S^{1.788} Q^{1.334} T^{1.429} (C_v/V_w)^{0.919} (C_f/C_v)^{0.959} d_{50}^{3.678} L^{0.154} \quad (5)$$

مقدار مربع آر چندگانه معادله متناسب 0.955 و مقدار مربع آر تطبیق شده 0.952 است که تطابق خوبی را با مقادیر مشاهده شده و معادله متناسب نشان میدهد. داده های استفاده شده برای اشتقاق معادله شامل ۱۰۴ مجموعه داده از ۸ مدل مخزن بود. این معادله با استفاده از داده های مجموعه آزمایشات حاضر (۸ مجموعه داده) اعتباریابی شد. شکل ۱۵ نمودار داده های مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده را نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که مقادیر پیش بینی شده در حد خطای ۴۰ درصدی قرار دارند. پراکنش در این مورد ممکن است بعلت تفاوت زیاد در شیب های بستر موجود در امتداد نواحی مختلف مخزن باشد که برای اعتباریابی در نظر گرفته شده است.

5.3 بحث درباره معادلات تجربی

مقادیر پیش بینی شده برای حجم رسوب شسته شده با تخلیه لبریز با استفاده از معادله پال و دیلون (معادله ۱) نیز در اشکال ۱۴ و ۱۵ بیان شده است. اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان میدهند که ممکن است بیش از یک معادله برای پیش بینی حجم رسوب شسته شده با استفاده از حجم آب استفاده شده وجود داشته باشد. سه مجموعه منحنی مختلف را میتوان برای طبقه شیب متوسط، متناسب ساخت. البته در این مورد، سه معادله مختلف نیز امکان پذیر هستند. معادله ۱ فقط تخلیه لبریز برای پیش بینی تخلیه رسوب را بررسی میکند. تغییرات مقادیر پیش بینی شده میتواند بعلت حذف پارامترهای مهم دیگر باشد.

همچنین کمیت شستشو که با استفاده از معادله دانشگاه تسینگوا (معادله ۲) پیش بینی شد در اشکال ۱۴ و ۱۵ بیان شده است. با اینحال در داده های موجود و مجموعه آزمایشات جاری، میزان جریان خروجی تخلیه رسوب اندازه گیری نشد. حجم کلی رسوبی که از مخزن شسته شد در پایان هر آزمایش اندازه گیری شد. مقادیر طرح ریزی شده، میانگین میزان تخلیه رسوب هستند که از حجم کلی رسوب شسته شده محاسبه شده است. معادله ۲ برای میزان جریان خروجی رسوب تعادل در مخازن وسیع طراحی شد، وقتی که شستشوی فرونشینی بطور کامل انجام میشود و عرض کانال شستشو و میزان جریان خروجی رسوب تثبیت میشود. در تحلیل حاضر، عرض کانال با استفاده از معادله ۳ و ضریب 10.91 پیش بینی شد؛ این ضریب توسط لای و شن (۱۹۹۶) گزارش شده است. چون داده های استفاده شده در تحلیل حاضر با مخازن باریک و سراسیب مطابقت دارند بنابراین معادله ۳ عرض کانال شستشو را بیشتر از حد معمول پیش بینی کرده است. اشکال ۱۴ و ۱۵ مجموعه منحنی های چندگانه برای نوع مختلفی از مخازن را نشان میدهند. ضریب قابلیت فرسایش بی بُعد (ϕ) برای طبقه شیب تند برابر با ۱، و برای طبقه شیب متوسط برابر با ۳۰۰ انتخاب شد. چند معادله دیگر نیز در مقالات موجود هستند (موریس و فان ۱۹۹۷؛ باتوکا و جردن ۲۰۰۰؛ برنت ۲۰۰۰). البته ما در اینجا آنها را مقایسه نکرده ایم، عمدتاً به این دلیل که داده های آنها در مرحله برنامه ریزی پروژه ها موجود نیست. مقایسه معادله فان و جیانگ کم و بیش نتایج مشابهی را برای معادله ۲ نشان میدهد. بنابراین در اشکال ۱۴ و ۱۵ از طرح یکسانی استفاده نشده است.

مجموعه معادلات حاضر بر مبنای داده های مطالعات مدل فیزیکی برای شستشوی مخزن پروژه های نیروی آبی در ناحیه هیمالیایی توسعه داده شده است. معادله ۱ نیز برای همین ناحیه توسعه داده شده است. با اینحال پیش بینی با استفاده از معادله بالا خوب نیست چون فقط بر مبنای یک پارامتر از حجم آب استفاده شده برای شستشو است. معادله ۲ بر مبنای مخازن چینی (که از کانال شستشو وسیع تر هستند) و برای میزان تخلیه رسوب در حالت تعادل توسعه داده شده است. معادلات حاضر برای پیش بینی کمیت رسوبی که از مخازن پروژه های جریان رودخانه ای در ناحیه هیمالیایی قابل شستشو است توسعه داده شده اند. این مخازن از نوع باریک و تنگ هستند و کانال شستشو به کل عرض مخزن توسعه داده میشود. شیب بستر رودخانه تند است و از 0.05 تا 0.001 متغیر است.

معادلات توسعه یافته حاضر (معادلات ۴ و ۵) دقیق تر هستند و چون پارامترها پیشاپیش موجود هستند میتوان از آنها در طی مراحل برنامه ریزی و بررسی پروژه ها بصورت مؤثر استفاده کرد تا برآوردهای مقدماتی کمیت رسوب قابل حذف توسط شستشو را بدست آورد. این معادلات برای تحلیل امکان پذیری پروژه، سودمند هستند. چون درصد ظرفیت انبارش آب (که پیشاپیش توسط ته نشینی رسوب اشغال شده است) بعنوان یکی از متغیرها در این معادله شامل گشته است، بنابراین معادلات حاضر در طی برنامه ریزی و طراحی پروژه های انرژی آبی خیلی سودمند هستند. زمان بندی های جایگزین مختلف شستشو در سطوح مختلف ته نشینی رسوب را میتوانیم تحلیل کنیم و زمانبندی شستشو را می توانیم بهینه کنیم.

۶. نتیجه گیری ها

در مطالعه حاضر شبیه سازی های مدل هیدرولیک برای شستشوی رسوب از مخزن پروژه هیدروالکتریک پونات سانگچو در بوتان انجام شدند. شبیه سازی های مدل عددی تک بعدی که برای پیش بینی الگوی ته نشینی بلند مدت در مخزن انجام شد نشان داد که سطح رسوب گذاری در سایت سد در حدود ۳۳ سال عملیات مخزن به سطح تاج سرریز می رسد. همچنین بعلت الگوی شیب معمول بستر رودخانه (که در ناحیه مخزن موجود بود) مشخص شد که سطوح ته نشینی رسوب در مناطق دارای شیب متوسط و تند، بالا هستند و جبهه دلتا به حدود 1.5 کیلومتری محور سد می رسد. آزمایشات برای شستشوی هیدرولیک بر اساس یک مدل هندسی مشابه با مقیاس 1:100 در ناحیه دسترسی

۱۰ کیلومتری مخزن انجام شد و خصوصیات رسوب گذاری آن توسط مدل عددی تک بعدی بعنوان شرایط اولیه محاسبه شد. آزمایشات نشان داد که شستشو در تداوم حذف ته نشینی رسوب از منطقه آبنگیر نیروگاه، مؤثر است. اگر شستشو هر ساله با تخلیه بیش از $800 \text{ m}^3/\text{s}$ بمدت ۱۲ ساعت انجام شود تخلیه رسوب سالانه را میتوان شستشو داد. با اینحال بعلت شیب های معمول بستر هموار در نواحی بالا دست، ته نشینی رسوب از نواحی بالا دست را نمی توان بصورت هیدرولیکی شستشو داد. ممکن است برای حذف ته نشینی از نواحی بالا دست به روشهای جایگزین نیاز پیدا کنیم.

راه دیگری برای مطالعات مدل هیدرولیک این است که از معادلات تجربی برای بدست آوردن یک ارزیابی مقدماتی از حجم رسوب قابل حذف توسط شستشو، استفاده کنیم. چند رابطه تجربی موجود در مقالات با استفاده از داده های موجود از مطالعات آزمایشی قبلی (انجام شده در ایستگاه مرکزی تحقیقات نیروی آب واقع در پیون، هند) بصورت متقابل بررسی شده اند. مشاهده شد که معادلات برای پیش بینی کمیت شستشو به اندازه کافی خوب نیستند چون مقدار داده ها و پارامترهای استفاده شده برای توسعه این معادلات محدود بود. در مطالعه حاضر تلاش شده است تا معادلات تجربی برای پیش بینی کمیت رسوب قابل شستشو از مخازن با استفاده از طیف وسیعی از داده های تجربی و شامل سازی پارامترهای بیشتر، توسعه داده شود. تحلیل های رگرسیون چندگانه غیرخطی بین پارامترهای مهم مخازن و کمیت اندازه گیری شده رسوب قابل شستشو انجام شده اند. دو معادله جداگانه (با نام معادلات اسحاق و الدو) برای دامنه های مختلف شیب بستر رودخانه توسعه داده شده است: شیب تند (شیب 0.005-0.04) و شیب متوسط (شیب 0.001-0.005). معادلات با استفاده از داده های بدست آمده از ۱۰۴ مجموعه داده از ۸ مطالعه تجربی مختلف برای شیب متوسط، و ۳۷ مجموعه داده از ۵ مطالعه تجربی مختلف برای شیب تند توسعه داده شدند. این تحلیل، همبستگی خیلی خوبی را بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده با ضرایب رگرسیون چندگانه بزرگتر از 0.95 نشان داد. معادلات بر اساس مجموعه داده های مختلف اعتباریابی شدند و مشخص شد که پیش بینی هایی را میتوان در حد خطای 30-40% انجام داد. بنابراین این معادلات را میتوانیم در طی مراحل برنامه ریزی و مطالعه امکان پذیری مورد استفاده قرار دهیم تا ارزیابی مقدماتی را از حجم رسوب قابل حذف توسط شستشوی هیدرولیک از مخازن پروژه

های نیروی آبی جریان رودخانه ای انجام دهیم. این معادلات در طی مراحل مطالعه امکان پذیری برای تحلیل پیشنهادات و طراحی های جایگزین، و همچنین برای بهینه سازی زمان بندی شستشو خیلی سودمند هستند.

References

- Ahn, J. and Yang, C.T., 2010. Simulation of Xiaolangdi reservoir sedimentation and flushing processes. 2nd joint federal interagency conference, 27 June–1 July, Las Vegas, NV.
- Althaus, J.J. and De Cesare, G., 2006. ALPRESERV, Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects, Volume 3, Reservoir Sedimentation, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, 85577, Neubiberg, Germany.
- Annandale, G.W., 1987. Reservoir sedimentation. Amsterdam: Elsevier Science.
- Annandale, G.W., 2011. Going full circle. International Water Power Dam Construction, April, pp. 30–34.
- Atkinson, E., 1996. Feasibility of flushing sediment from reservoir. Report OD137 HR Wallingford.
- Basson, G., 2008. Reservoir sedimentation – An overview of global sedimentation rates, sediment yield & sediment deposition prediction. International Workshop on Erosion, Transport and Deposition of Sediment, Berne, 28–30 April 2008.
- Batucu, D.G. and Jordan, J.M., 2000. Silting and desilting of reservoirs. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Brandt, S.A., 2000. A review of reservoir desiltation. International Journal of Sediment Research, 15, 321–342.
- Campisano, A., Creaco, E., and Modica, C., 2004. Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits. Journal of Hydrology, 299, 324–334.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Álvarez, M.A., 2014. Simulation of the flushing into the dam – reservoir Paute – Cardenillo. In: Schleiss et al. eds. Reservoir sedimentation-. London: Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-138-02675-9.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Álvarez, M.A., 2015. Complementary methods for determining the sedimentation and flushing in a reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, 141 (11), 05015004. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001050.
- CWPRS, 2001a. Hydraulic model studies for flushing of sediment from Ravi reservoir, Chamera Hydroelectric Project, Stage II, Himachal Pradesh, Technical Report No. 3842.
- CWPRS, 2001b. Mathematical model studies for reservoir sedimentation at Chamera Hydroelectric Project, Stage II, Himachal Pradesh, Technical Report No. 3766.
- CWPRS, 2002. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Teesta V Hydroelectric Project, Sikkim, Technical Report No. 3870.
- CWPRS, 2004. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Subansiri Hydroelectric Project, Arunachal Pradesh, Technical Report No. 4152.
- CWPRS, 2005. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Sewa, Stage II, Jammu & Kashmir, Technical Report No. 4259.
- CWPRS, 2006. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Teesta Low Dam Hydroelectric Project, Stage III, West Bengal, Technical Report No. 4396.
- CWPRS, 2008a. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Parbati Hydroelectric Project, Stage III, Himachal Pradesh, Technical Report No. 4537.
- CWPRS, 2008b. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Teesta Low Dam Hydroelectric Project, Stage IV, West Bengal, Technical Report No. 4520.
- CWPRS, 2010. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Kotlibhel-IA Hydroelectric Project, Uttarakhand, Technical Report No. 4789.
- CWPRS, 2011a. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Kotlibhel-II Hydroelectric Project, Uttarakhand, Technical Report No. 4827.

CWPRS, 2011b. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Kotlibhel-IB Hydroelectric Project, Uttarakhand, Technical Report No. 4835.

CWPRS, 2014. Hydraulic model studies for reservoir sedimentation and flushing, Devsari Hydroelectric Project, Uttarakhand, Technical Report No. 5172.

CWPRS, 2015. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Mangdechhu Hydroelectric Project, Bhutan, Technical Report No. 5267.

CWPRS, 2016. Hydraulic model studies for flushing of sediment from reservoir, Dhaulasidh Hydroelectric Project, Stage III, Himachal Pradesh, Technical Report No. 5387.

Emamgholizadeh, S. and Samadi, H., 2008. Desilting of deposited sediment at the upstream of the Dez reservoir in Iran. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 3 (1), 25–35.

Emamgholizadeh, S., et al., 2006. Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1 (4), 7–16.

Esmaili, T., et al., 2014. Three-dimensional numerical modeling of flow field in rectangular shallow reservoirs. Reservoir Sedimentation – Special Session on Reservoir Sedimentation of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014 pp. 11–19.

Esmaili, T., et al., 2015. Three-dimensional numerical modeling of sediment flushing: case study of Dashidaira Reservoir, Japan. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June–3 July, 2015, The Hague, The Netherlands.

Gallerano, F. and Cannata, G., 2011. Compatibility of reservoir sediment flushing and river protection. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (10), 1111–1125.

Gallerano, F., Cannata, G., and Lasaponara, F., 2016a. A new numerical model for simulations of wave transformation, breaking and longshore currents in complex coastal regions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 80, 571–613.

Gallerano, F., Cannata, G., and Lasaponara, F., 2016b. Numerical simulation of wave transformation, breaking and run-up by a contravariant fully non-linear Boussinesq equations model. *Journal of Hydrodynamics*, 28 (3), 379–388.

Haun, S. and Olsen, N.R.B., 2012a. Three-dimensional numerical modelling of the flushing process of the Kali Gandaki hydropower reservoir. *Lakes and Reservoirs, Research and Management*, 17 (1), 25–33.

Haun, S. and Olsen, N.R.B., 2012b. Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing in a prototype scale. *International Journal of River Basin Management*, 10 (4), 341–349.

Huang, J. and Huang, Y., 2001. A physical model research on the effect of sediment scour in lowering water level of the Liujiaxia Reservoir. Proceedings of the theme D XXIX IAHR Congress, Vol. II, Beijing, China.

Isaac, N. and Eldho, T.I., 2016. Sediment management studies of a runoff-of-the-river hydroelectric project using numerical and physical model simulations. *International Journal of River Basin Management*, 14 (2), 165–175. doi:10.1080/15715124.2015.1105234.

Isaac, N. and Eldho, T.I., 2017. Sediment management studies of runoff-of-river hydroelectric power project in the Himalayan region using hydraulic model studies. *Sādhanā* (2017). doi:10.1007/s12046-017-0666-0.

Isaac, N., Eldho, T.I., and Gupta, I.D., 2014. Numerical and physical model studies for hydraulic flushing of sediment from Chamera-II reservoir, Himachal Pradesh, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20 (1), 14–23. doi:10.1080/09715010.2013.821788.

Ji, U., Julien, P.Y., and Park, S.K., 2011. Sediment flushing at the Nakdong river Estuary Barrage. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1522–1535.

Ji, U., Jang, E.-K., and Kim, G., 2016. Numerical modelling of sedimentation control scenarios in the approach channel of the Nakdong river Estuary Barrage, South Korea. *International Journal of Sediment Research*, 31, 257–263.

Jugović, Č.J., et al., 2009. Hydraulic Flushing of Alpine Reservoirs – Model Study. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering Ohrid/Macedonia*, 1–5 Paper: A89 pp 278–288.

Kantoush, S.A. and Schleiss, A.J., 2009. Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries. *Environmental Technology*, 30 (8), 855–863.

- Kantoush, S.A., et al., 2010. Impacts of sediment flushing on channel evolution and morphological processes: Case study of the Kurobe River, Japan. International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2010, Braunschweig, Germany, ISBN 978-3-939230-00-7, pp. 1165–1173.
- Keshtpoor, M., et al., 2015. 3D numerical simulation of turbulence and sediment transport within a tidal inlet. Coastal Engineering, 96, 13– 26.
- Lai, J.S. and Shen, H.W., 1996. Flushing sediment through reservoirs. Journal of Hydraulic Research, 34 (2), 237–255.
- Meshkati, M.E., et al., 2009. Evolution of developing flushing cone during the Pressurized flushing in reservoir storage. World Academy of Science, Engineering and Technology, 58.
- Morris, G.L. and Fan, J., 1997. Reservoir sedimentation Hand book. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Olsen, N.R.B. and Haun, S., 2010. Free surface algorithms for 3D numerical modelling of reservoir flushing. River Flow, 2010, 1105–1110.
- Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. Catena, 22, 169– 199.
- Schleiss, A.J., et al., ed., 2014. Reservoir sedimentation. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Shen, H.W., 1999. Flushing sediment through reservoirs. Journal of Hydraulic Research, 37 (6), 743–757.
- Sloff, C.J., 1991. Reservoir sedimentation; a literature survey. Communications on hydraulic and geotechnical engineering, No. 1991-02. Delft: TU Delft.
- Sumi, T. and Kantoush, S.A., 2010. Integrated Management of Reservoir Sediment Routing by Flushing, Replenishing, and Bypassing Sediments in Japanese River Basins. Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics, Seoul, Korea, pp 831–838.
- Talebbeydokhti, N., and Naghshineh, A., 2004. Flushing sediment through reservoirs. Iranian Journal of Science & Technology. Transaction B, 28 (B1), 120–136.
- USACE, 2010. HEC-RAS River analysis system –hydraulic Reference Manual and User’s Manual. Davis, CA 95616: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 690 Second Street.
- USBR, 2006. Erosion and sedimentation manual. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation November 2006.
- White, R., 2000. Flushing of sediment from reservoirs. UK: HR Wallingford. 2000.
- Yang, X., 2003. Manual on Sediment Management and Measurement. WMO-No. 948, Operational Hydrology Report No. 47.
- Yoon, Y.N., 1992. The state and the Perspective of the Direct sediment removal methods from reservoirs. International Journal of Sediment Research, 7 (20), 99–115.