

نوع مقاله: پژوهشی

## ارزیابی اثر عرض مجرای رسوبشوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوبشویی در سدهای انحراف آب

مهرداد اسدی<sup>۱</sup>، محمدجواد منعم<sup>۲\*</sup>، جمال محمد ولی سامانی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.<sup>۲\*</sup> استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

### چکیده

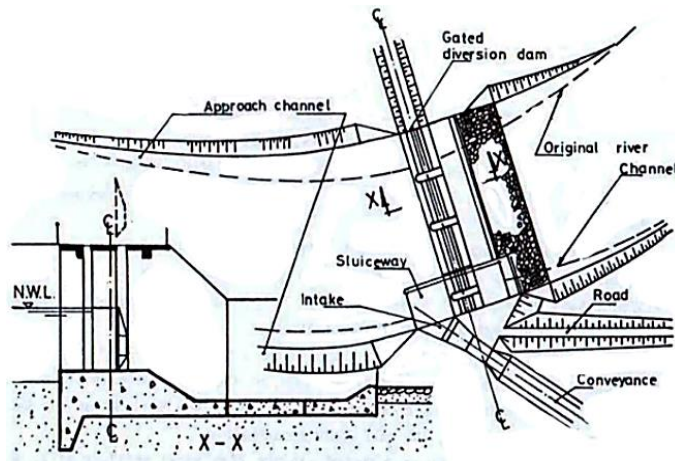
سدهای انحراف آب، به عنوان یکی از سازه‌های مهم برای کنترل جریان و برداشت آب، در معرض انباشت رسوب قرار دارند که این امر می‌تواند بهره‌برداری از آن‌ها را محدود کند. در دوره بهره‌برداری از سامانه آبیگری سد انحراف آب، رسوبات در مقابل دهانه آبیگری انباشته می‌شود. یکی از روش‌های موثر تخلیه رسوب از مقابل دهانه آبیگری، احداث مجرای رسوبشوی مجهز به دریچه کنترل است. نسبت بازشدگی به عرض دریچه مجرای تخلیه یکی از عوامل مهم موثر بر کارایی رسوبشویی است که متأسفانه معیار مشخصی برای آن وجود ندارد. در این تحقیق، با استفاده از مدل FLOW-3D، تاثیر این نسبت و عرض مجرا ( $W_s$ ) بر میزان رسوبشویی بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها با دبی ثابت انجام شده‌اند و نسبت‌های مختلف بازشدگی به عرض دریچه برای هر عرض مجرا تحلیل شده است. نتایج تحقیق نشان داد نسبت  $a/b=0.5$  و عدد فرود  $0.16 < Fr < 0.3$  بهترین شرایط را برای رسوبشویی فراهم می‌کنند. افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب منجر به کاهش دامنه مؤثر رسوبشویی می‌شود به طوری که عرض‌های بسیار کوچک یا بزرگ، ناکارآمد بوده‌اند و محدوده  $1.0W_i < W_s < 1.15W_i$  بیشترین کارایی را از نظر میزان و دامنه رسوبشویی داشته است. عدد فرود بالاتر از  $0.3$  موجب فرسایش بیش از حد و کمتر از  $0.16$  منجر به رسوب‌گذاری شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد برای تخلیه بهینه رسوبات، نسبت  $a/b=0.5$  توصیه می‌شود تا شرایط هیدرودینامیکی پایدار و کارایی بالای تخلیه رسوب تضمین گردد.

**واژه‌های کلیدی:** سد انحراف آب، مجرای تخلیه رسوب، نسبت بازشدگی به عرض

### مقدمه

سد انحراف آب همراه تأسیسات وابسته در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌طور کلی، شستشوی رسوب مؤثرتر خواهد بود اگر عمق آب کم، دبی زیاد، دریچه‌های تخلیه‌کننده عریض و رسوبات به تازگی ته‌نشین شده باشند (Bogárdi, 1974). وایت و بتیس (White and Bettess, 1984) با استفاده از تئوری جریان پتانسیل، جریان زیر دریچه را برای شرایط استاتیک شبیه‌سازی کردند.

سدهای انحراف آب، سازه‌هایی هستند که در رودخانه‌ها و در مقابل جریان آب احداث می‌شوند و با ایجاد مانع در مقابل جریان، تراز سطح آب را برای انتقال آب به محل مصرف بالا می‌آورند. یکی از اجزای سدهای انحرافی، مجرای تخلیه رسوبات (Sluiceway) است که معمولاً در مقابل دهانه آبیگری احداث و از آن بهره‌برداری می‌شود. پلان



شکل ۱- پلان سد انحراف آب و مقطع طولی مجرای تخلیه رسوب (Razvan, 1989)

Fig.1- Diversion Dam Plan and Longitudinal Section of Sluiceway (Razvan, 1989)

کارایی شستشوی رسوبات با ظهور فرسایش پیشرونده به طور چشمگیری افزایش می یابد.

طبق نظر رادکیوی (Raudkivim, 2020) اگر مجرای تخلیه رسوب دارای ابعاد مناسب باشد، جریان عبوری از آن شرایط تقرب جریان مناسبی را برای جریان انحرافی فراهم می کند و حداقل بازشدگی دریاچه مجرای تخلیه رسوب باید به اندازه ای باشد که بزرگ ترین اندازه ذرات رسوب بتواند از آن عبور کند. سطح مقطع مجرای تخلیه رسوب باید به اندازه کافی برای انتقال آب به کانال آبرگیر و نیز برای شستشوی رسوب بزرگ باشد و از طرفی برای حفظ سرعت لازم برای شستشوی رسوب در شرایط غالب یا در شرایط طراحی شده جریان در رودخانه باید به اندازه کافی کوچک باشد (Vanoni, 2006). طبق نظر رزوان (Razvan, 1989)، معیار طراحی عرض مجرای تخلیه رسوب بدین ترتیب است که در کمترین تراز سطح آب، جریان درون مجرا باید قادر به انتقال و حذف رسوبات ته نشین شده در محدوده مجرای تخلیه رسوب باشد.

غلامی علم (Gholami Alam, 1998) عوامل موثر در طراحی مجاری تخلیه رسوب سدهای انحراف آب را در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض ۷۵ سانتی متر، عمق ۸۰ سانتی متر و شیب کف صفر بررسی کرد. بستر فلوم

این محققان با روش سرعت فرسایش بحرانی نشان دادند فاصله ای که در آن سرعت به کمتر از سرعت بحرانی کاهش می یابد کوتاه است. این موضوع نشان می دهد آبشستگی کامل در بالادست به نواحی نزدیک دریاچه محدود می شود و معمولاً بین ۱ تا ۵ متر از دریاچه هاست، این فاصله بسته به نوع سیستم و طراحی می تواند متفاوت باشد. محققان یاد شده همچنین نشان دادند سطح آب باید به طور قابل توجهی در بالادست کاهش یابد تا رسوب به محدوده دریاچه منتقل شود. در سد Mangahao، ۷۵ درصد از رسوبات انباشته شده طی ۳۴ سال، در عملیات یک ماهه رسوب شویی حذف شد. این عملیات با تخلیه حجم بالایی از آب همراه بود. وایت و بتیس می گویند ذخیره سازی مؤثر پس از رسوب شویی باید بیش از ۵۰ درصد از ظرفیت اولیه مخزن باشد تا عملیات اقتصادی و کارآمد تلقی شود. شن و همکاران (Shen et al., 1993) برای رسوب غیر چسبنده، به کمک تحلیل ابعادی، عمق شستشو را در رسوب شویی موضعی جلو دریاچه تخلیه رسوب تخمین زدند. این محققان مدل یک بعدی شبیه سازی و مدل دو بعدی تغییر شکل بستر را در هنگام تغییر رسوب مخزن به کار بردند و به این نتیجه رسیدند تخلیه رسوبات تابعی از عوامل هیدرولیکی از جمله دبی خروجی، شیب سطح آب و عرض کانال شستشو است و

تحقیق، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D، به بررسی تاثیر عرض مجرای تخلیه رسوب و اثر نسبت بازشدگی به عرض دریچه مجرای تخلیه رسوب بر میزان شستشوی رسوبات پرداخته شده است.

رابطه بین نسبت بازشدگی به عرض دریچه ( $a/b$ ) و کارایی شستشوی رسوب در مجاری مختلف تخلیه رسوب به‌طور جامع تحلیل شده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً معیار مشخصی برای این نسبت ارائه نمی‌دادند، این تحقیق نشان می‌دهد نسبت  $a/b=0.5$  شرایط بهینه را از نظر میزان و دامنه تخلیه رسوب فراهم می‌کند.

در این تحقیق، اثر عرض‌های مختلف مجرای تخلیه رسوب بررسی شده است. مطالعه تأثیر عرض مجرا ( $W_s$ ) بر دامنه رسوب‌شویی و حجم رسوبات تخلیه‌شده نشان می‌دهد که عرض‌های بسیار کوچک یا بزرگ، ناکارآمد هستند و محدوده  $1.0W_i < W_s < 1.15W_i$  بیشترین کارایی را دارد. این محدوده به طراحان امکان انتخاب ابعاد بهینه را برای مجرای تخلیه رسوب می‌دهد که علاوه بر افزایش کارایی، از مشکلاتی مانند فرسایش یا تجمع رسوبات جلوگیری می‌کند. استفاده از عرض کانال آبیگر ( $W_i$ ) به عنوان معیاری جدید برای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب مطرح شده است. این معیار که شاخصی است کمی، در مقایسه با دیگر معیارهای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب که شاخص‌های کیفی هستند، منجر به سردرگمی طراحان نمی‌شود.

### مواد و روش‌ها

در مواردی که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتنه، به دلایل مختلف، استفاده از مدل‌های فیزیکی باصرفه یا امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از مدل‌های ریاضی معتبر استفاده کرد. مدل‌های ریاضی اخیراً به خوبی توسعه یافته‌اند و مبتنی بر حل همزمان معادلات ناویر-استوکس هستند.

به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از ذرات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر پوشانیده شده بود. این مدل بر اساس شستشوی رسوبات توسط آب زلال طراحی شده بود تا حداکثر شستشو و تخلیه رسوبات قابل مشاهده باشد. در این مطالعه، اثر دیواره جداکننده مستقیم در شرایط مستغرق با طول‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد عرض مجرا بررسی گردید و نتایج نشان داد که طول برابر ۲۵ درصد عرض مجرا عملکرد مناسب‌تری دارد. اسدی و همکاران (Asadi et al., 2023) با استفاده از مدل FLOW-3D تاثیر ابعاد مختلف دیوار جداکننده را بر عملکرد مجرای تخلیه رسوب بررسی کردند و نشان دادند ارتفاع دیوار جداکننده که یکی از عوامل مهم طراحی هیدرولیکی سدهای انحراف آب است، نقش بسزایی بر میزان شستشوی رسوب از مجرای تخلیه رسوب دارد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که بیشترین میزان شستشوی رسوبات در حالتی رخ می‌دهد که ارتفاع دیوار جداکننده برابر با تراز سطح آب سیلاب طرح باشد، و به عبارت دیگر تحت هیچ شرایطی جریان آب از روی آن عبور نکند.

استفاده از مدل عددی، به جای مدل فیزیکی، برای شبیه‌سازی به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و زمان، انعطاف‌پذیری بالا، و دقت قابل قبول ترجیح داده می‌شود. مدل‌های عددی امکان شبیه‌سازی شرایط پیچیده و تحلیل سناریوهای متنوع را با هزینه کمتر و سرعت بیشتر فراهم می‌کنند. این مدل‌ها با ارائه جزئیات دقیق، مانند توزیع سرعت و فشار در نقاط مختلف، و امکان تغییر آسان پارامترها، ابزاری قدرتمند برای تحلیل سیستم‌های مهندسی هستند. مدل‌های عددی محدودیت‌های مقیاس آزمایشگاهی را ندارند و می‌توانند شرایط واقعی و بزرگ‌مقیاس را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند، در حالی که مدل‌های فیزیکی برای هر تغییر نیازمند بازطراحی یا اصلاح هستند. این ویژگی‌ها، مدل عددی را به رویکردی موثر و کارآمد برای مطالعات هیدرودینامیکی و مدیریت رسوبات تبدیل می‌کند. در این

### معادلات حاکم بر جریان

معادله های ناویر-استوکس با متوسط گیری رینولدز (RANS). در این مدل، ترم های اضافی به معادله های ناویر-استوکس افزوده می شود تا تاثیر نوسان های آشفته بر مومنتم جریان شبیه سازی شود.

### مدل آشفتگی

مدل  $k-\varepsilon$  RNG یکی از مدل های آشفتگی پر کاربرد در دینامیک سیالات محاسباتی است که به طور ویژه برای شبیه سازی جریان های آشفته توسعه یافته است. این مدل، نسبت به مدل استاندارد  $k-\varepsilon$ ، در بسیاری از کاربردها به ویژه جریان هایی با نواحی پیچیده، جریان های برشی شدید و تغییرات سریع چندین مزیت و دقت بالاتری دارد.

مدل  $k-\varepsilon$  RNG را یاخوت و اورزاگ (Yakhot and Orszag, 1986) توسعه دادند و برخلاف مدل استاندارد، مبتنی بر نظریه نرمال سازی گروهی (Renormalization Group Theory) است. این مدل، مشابه مدل استاندارد  $k-\varepsilon$ ، از دو معادله دیفرانسیل جزئی برای توصیف میدان آشفتگی استفاده می کند. معادله  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی را مدل می کند. معادله  $\varepsilon$  میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی را توصیف می کند. این دو معادله به مدل RNG امکان می دهند که میزان تولید و اتلاف انرژی جنبشی آشفته را در سیال های آشفته شبیه سازی کند.

معادله های اصلی این مدل برای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و میزان اتلاف آن ( $\varepsilon$ ) به صورت روابط ۳ و ۴ بیان می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

که در آن:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = (2S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}}$$

است.

برای حل مسائل مکانیک سیالات و هیدرودینامیک، مدل های ریاضی را می توان با اطمینان نسبتاً مناسبی جایگزین مدل های فیزیکی کرد. مدل FLOW-3D ابزاری قدرتمند و دقیق است که بر پایه مدل های ریاضی می تواند انواع مسائل مربوط به مکانیک سیالات و هیدرودینامیک را حل کند. این مدل با حل معادله های پیوستگی و ناویر-استوکس می تواند مسائل را به صورت سه بعدی حل کند. معادله های پیوستگی و ناویر-استوکس برای جریان غیر قابل تراکم آشفته با لزوجت و چگالی ثابت را می توان به صورت روابط ۱ و ۲ بیان کرد (Flow Science Inc., 2014)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در رابطه های بالا  $u_i$  = معرف سرعت در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $t$  = زمان،  $A$  = کسر سطح آزاد در جهت  $i$  جریان،  $V_F$  = کسر حجمی سیال در هر سلول،  $\rho$  = چگالی سیال،  $p$  = فشار هیدرواستاتیک،  $f_i$  = نشان دهنده تنش های رینولدز است. برای حل تنش های رینولدز نیاز به استفاده از یک مدل آشفتگی است.

در جریان های آشفته، از مدل های آشفتگی برای شبیه سازی نیروهای اضافی ناشی از نوسان های کوچک مقیاس در سرعت استفاده می شود. در این مطالعه، از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده که مبتنی است بر

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

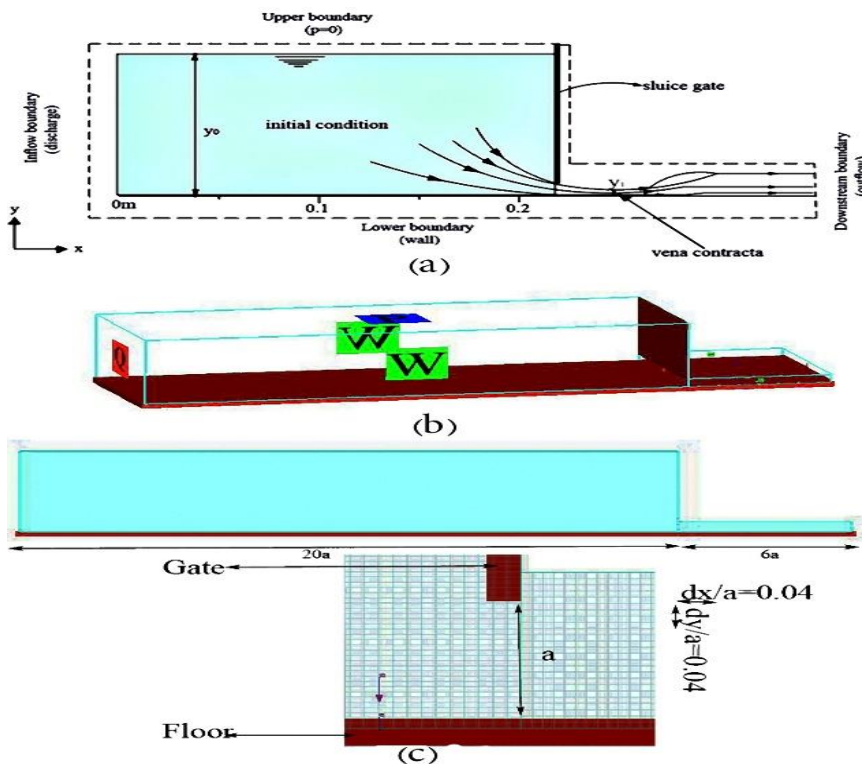
شده است، بنابراین پارامتر حساس و تعیین کننده بر کارایی دریاچه، ارتفاع سطح آب در بالادست دریاچه خواهد بود. برای صحت‌سنجی نتایج مدل، ابعاد سلول‌های شبکه‌بندی فضای محاسباتی باید به گونه‌ای انتخاب شود که نتایج مستقل از ابعاد شبکه‌بندی و با دقت مورد نیاز به دست آید.

در این مطالعه، برای صحت‌سنجی نتایج محاسبه شده از داده‌های تجربی آکوز و همکاران (Akoz et al., 2009) استفاده شده است. در شکل 2a، نمای شماتیکی از دریاچه، شرایط و میدان محاسبات نشان داده شده است. طبق توصیه کیم (Kim, 2007) فاصله طولی در بالادست و پایین‌دست دریاچه برای شروع و پایان محاسبات به ترتیب برابر 20a و 6a (a میزان بازشدگی دریاچه) در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (2b) و (2c) نمایی از میدان محاسبات و شبکه‌بندی در مدل FLOW-3D نشان داده شده است.

در این معادله‌ها،  $k$  = انرژی جنبشی آشفتگی و معیاری است برای شدت آشفتگی.  $\epsilon$  = میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است که میزان انتقال انرژی را از مقیاس‌های بزرگ به مقیاس‌های کوچک آشفتگی بیان می‌کند. لزوجت آشفته و بیانگر انتقال مومنتم ناشی از آشفتگی است و به صورت  $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$  محاسبه می‌شود.

$P_k$  میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از برش‌های جریان است و از رابطه  $P_k = \mu_t (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \cdot \nabla \bar{u}$  به دست می‌آید. پارامترهای پراکندگی هستند که معمولاً مقادیر 0.7194 و 0.7194 برای آنها انتخاب می‌شود  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  ضرایب تجربی است که به ترتیب برابر با 1/42 و 1/68 هستند.

صحت‌سنجی شبکه‌بندی میدان محاسباتی و معادله انتقال رسوب دریاچه سازه کنترل کننده مجرای تخلیه رسوب است که در این مطالعه کارکرد آن به صورت جریان آزاد در نظر گرفته



شکل ۲- نمای شماتیکی از دریاچه، شرایط و میدان محاسباتی

Fig.2-Schematic view of the sluice gate, boundary condition, computational domain.

جریان بالادست دریچه ایجاد می شود. در حالی که کاهش این نسبت از ۰/۰۴ به ۰/۰۳ به رغم افزایش هزینه محاسبات، بهبود چندانی در افزایش دقت محاسبه تراز سطح آب ایجاد نمی کند. بنابراین، نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه برابر با ۰/۰۴ به عنوان نسبت بهینه در نظر گرفته شد.

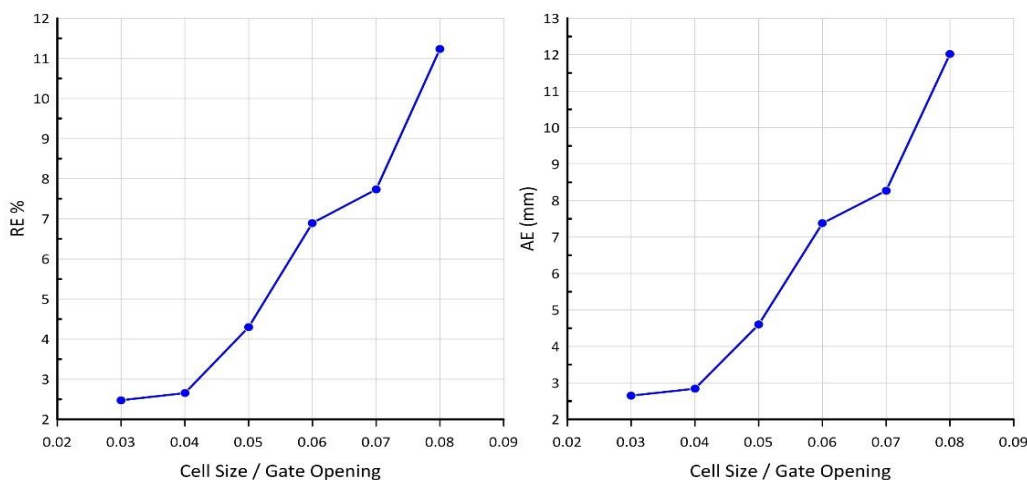
$$AE = |y_{0(exp)} - y_{0(comp)}| \quad (5)$$

$$RE\% = \left| \frac{y_{0(exp)} - y_{0(comp)}}{y_{0(exp)}} \right| \times 100 \quad (6)$$

$y_{0(exp)}$  = عمق بالادست دریچه است که توسط آکوز و همکاران (Akoz et al., 2009) اندازه گیری شده و  $y_{0(comp)}$  = عمق بالادست دریچه است که با مدل FLOW-3D محاسبه شده است.

برای ارزیابی تاثیر شبکه بندی بر دقت شبیه سازی جریان عبوری از زیر دریچه، شش نسبت بدون بعد اندازه سلول به بازشدگی دریچه (۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸) بررسی و برای هر یک از نسبت ها، عمق جریان در بالادست دریچه محاسبه شده است. این مقادیر با هدف شناسایی تعادل بین دقت شبیه سازی و هزینه محاسباتی انتخاب شدند.

با استفاده از روابط ۵ و ۶ (Daneshfaraz et al., 2023) میزان خطای مطلق (AE) و خطای نسبی (RE) عمق آب بالادست دریچه محاسبه و نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهند با کاهش نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه از مقدار ۰/۰۸ تا ۰/۰۴ بهبود قابل توجهی در دقت شبیه سازی و به ویژه در پیش بینی عمق



شکل ۳- خطای مطلق و نسبی برآورد ارتفاع سطح آب بالادست دریچه در مقابل نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه

Fig.3- The absolute and relative error of estimating the upstream water level of the sluice gate versus the ratio of the cell size to gate opening.

اختلاف آن ها با داده های مرجع، از روش میانگین مربعات خطا (رابطه ۷) استفاده شد.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_0^2} (u_{comp} - u_{exp})^2 \quad (7)$$

که  $MSE$  = میانگین مربعات خطا،  $u_{comp}$  = مولفه طولی سرعت جریان محاسبه شده توسط مدل و  $u_{exp}$  = مولفه طولی سرعت

به منظور ارزیابی دقیق تر صحت نتایج مدل عددی و حصول اطمینان از تطابق آن با رفتار واقعی جریان، پروفیل های سرعت در بالادست دریچه به طور جامع بررسی شدند. در این راستا، در سه موقعیت مشخص در بالادست دریچه پروفیل های سرعت جریان محاسبه شدند. به منظور سنجش میزان دقت پروفیل های محاسبه شده و تعیین

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

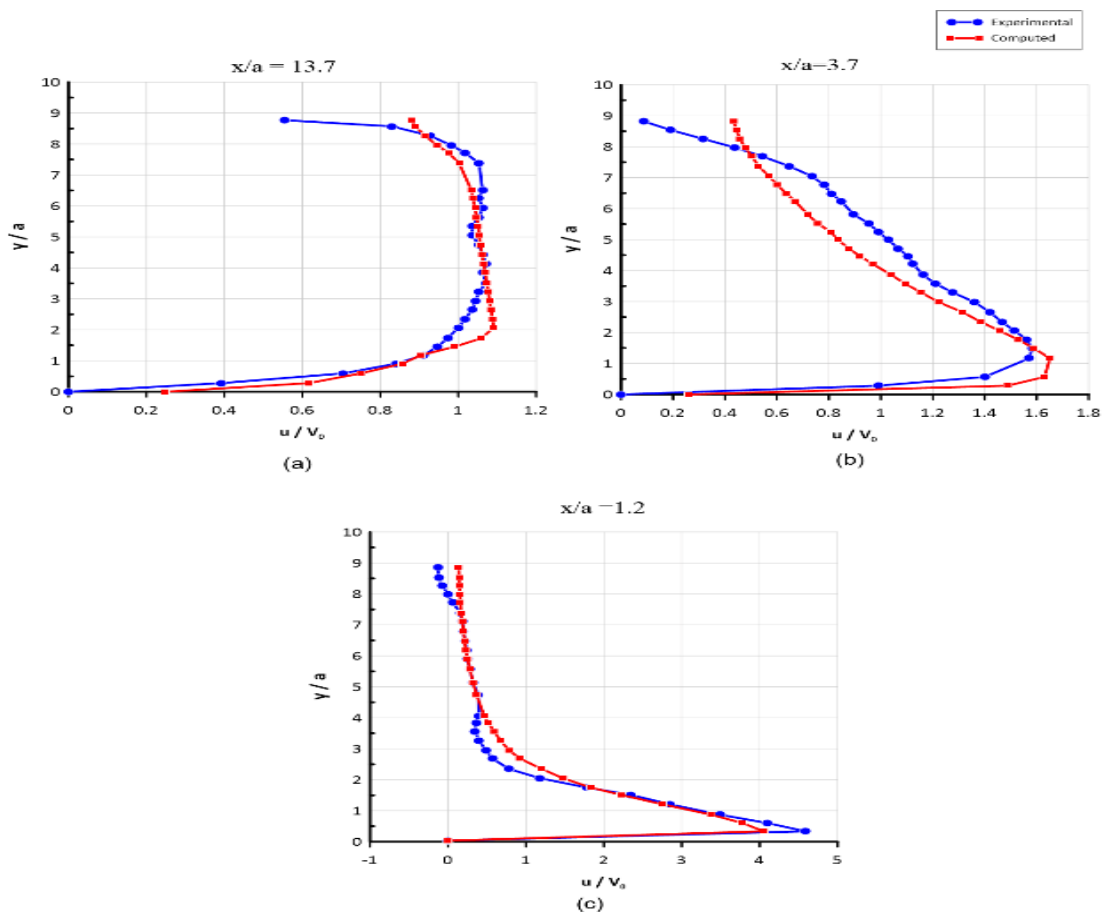
است که اکوز و همکاران (Akoz *et al.*, 2009) آن را اندازه‌گیری کرده‌اند،  $V_0$  = سرعت متوسط جریان در بالادست دریاچه است و  $n$  = تعداد نقاطی است که در آن مقدار سرعت اندازه‌گیری و محاسبه شده است. در جدول (۱)، موقعیت نقاط مورد بررسی و مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE) محاسبه شده برای هر نقطه ارائه شده است. علاوه بر این، در شکل (۴) پروفیل‌های

محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده مؤلفه طولی سرعت به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پروفیل‌های محاسبه‌شده با استفاده از نسبت اندازه سلول به میزان بازشدگی دریاچه برابر با ۰/۰۴، از دقت مناسبی برخوردار است و تطابق خوبی با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده دارند. این امر نشان‌دهنده توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار واقعی جریان در بالادست دریاچه است.

جدول ۱- مقادیر میانگین مربعات خطا مربوط به پروفیل‌های سرعت.

Table 1- the mean squared error for velocity profiles.

MSE	موقعیت position
0.01	1.2a
0.03	3.7a
0.04	13.7a



شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های مولفه طولی سرعت محاسبه و اندازه‌گیری شده

Fig.4-Comparison of computed and measured velocity profiles



در مطالعه حاضر، با انتخاب نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه برابر با ۰/۰۴ روند شستشوی رسوب با استفاده از هر سه رابطه انتقال رسوب بررسی شد.

شکل (۵) مقایسه ای بین توپوگرافی بستر مجرای تخلیه رسوب اندازه گیری شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998) و توپوگرافی های محاسبه شده بر اساس روابط انتقال رسوب را نشان می دهد. نتایج حاصل از توپوگرافی اندازه گیری شده نشان می دهد حداکثر طول حفره آبستنگی ایجاد شده در فلوم آزمایشگاهی حدود ۵۰ سانتی متر و عرض آن تقریباً ۵۰ سانتی متر است. در این میان، نزدیک ترین تطابق میان ابعاد حفره آبستنگی محاسبه شده و داده های آزمایشگاهی، مربوط به رابطه میسر-پیتر و مولر است که طول حفره را حدود ۶۰ سانتی متر و عرض آن را تقریباً ۵۵ سانتی متر پیش بینی کرده است.

در جدول (۲) میزان خطای مطلق و نسبی هر یک از روابط در برآورد حجم رسوبات تخلیه شده ارائه شده است. در شکل (۶) روند رسوب شویی محاسبه شده با روابط انتقال رسوب در مقابل زمان نشان داده شده است. این نتایج بیانگر آن است که رابطه انتقال رسوب میسر-پیتر و مولر با دقت بیشتری، نسبت به دو رابطه دیگر، روند و میزان شستشوی رسوبات را تخمین می زند. این امر نشان دهنده کارایی بالای این رابطه در شبیه سازی فرآیندهای انتقال رسوب ترسیب شده در بالادست دریچه است.

مدل FLOW-3D در بخش انتقال رسوب امکان استفاده از روابط ۸، ۹ و ۱۰ را فراهم کرده است (Flow Science Inc., 2014).

$$\phi_i = \beta_i (\theta_i - \theta_{cr,i}^*)^{1.5} c_{b,i} \quad (8)$$

$$\phi_i = \beta_i d_{*i}^{-0.3} \left( \frac{\theta_i}{\theta_{cr,i}^*} - 1 \right)^{2.1} c_{b,i} \quad (9)$$

$$\phi_i = \beta_i \theta_i^{0.5} (\theta_i - \theta_{cr,i}^*) c_{b,i} \quad (10)$$

این روابط به ترتیب معادله انتقال رسوب میسر-پیتر و مولر، فان راین، و نیلسن هستند که در آن مقدار  $\beta_i$  معمولاً در رابطه میسر-پیتر و مولر برابر ۸، در رابطه فان راین برابر با ۰/۰۵۳ و در رابطه نیلسن برابر با ۱۲ است.  $C_{b,i}$  جز حجمی گونه های  $i$  در مصالح بستر است. این ضریب در معادله های اصلی وجود ندارد اما در معادله های بالا برای منظور کردن اثر چندگانگی مصالح بستر آورده شده است.  $\theta_i$  شدت انتقال بار بستر بدون بعد است و به میزان حجمی انتقال بار بستر در واحد عرض بستگی دارد.

در گام دوم این تحقیق، برای تعیین مناسب ترین معادله انتقال رسوب از داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998) استفاده شده است. یکی از گزینه های آزمایشگاهی مورد بررسی در این مطالعه، مربوط به دریچه ای با بازشدگی ۲۰ سانتی متر، عرض ۷ سانتی متر و دبی جریان ۲۸ لیتر بر ثانیه است که در آن حجم رسوب تخلیه شده برابر با ۱۱۷۲۴ سانتی متر مکعب گزارش شده است.

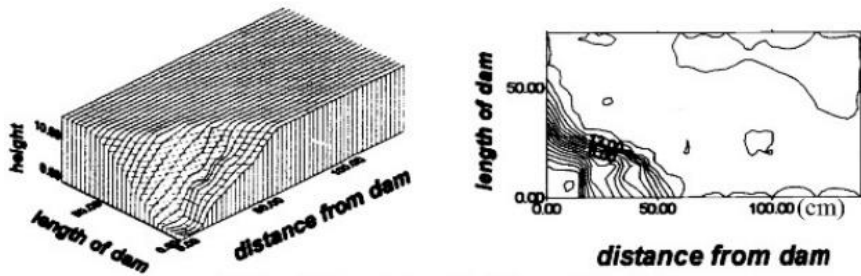
جدول ۲- میزان خطای نسبی و مطلق معادله های انتقال رسوب در برآورد حجم رسوب شویی

Table 2- Absolute and relative errors of sediment transport equations in estimating sediment extraction

خطای نسبی %	خطای مطلق (cm <sup>3</sup> )	حجم رسوب شویی محاسبه شده (cm <sup>3</sup> )	رسوب شویی اندازه گیری شده (cm <sup>3</sup> )	رابطه
Relative Error	Absolute Error	Com. sediment	Meas. sediment	Equation
0.08	9.77	11733.77	11724	میسر پیتر و مولر
62.64	7343.73	19063.73	11724	نیلسن
114.03	1336.99	25092.99	11724	فان راین

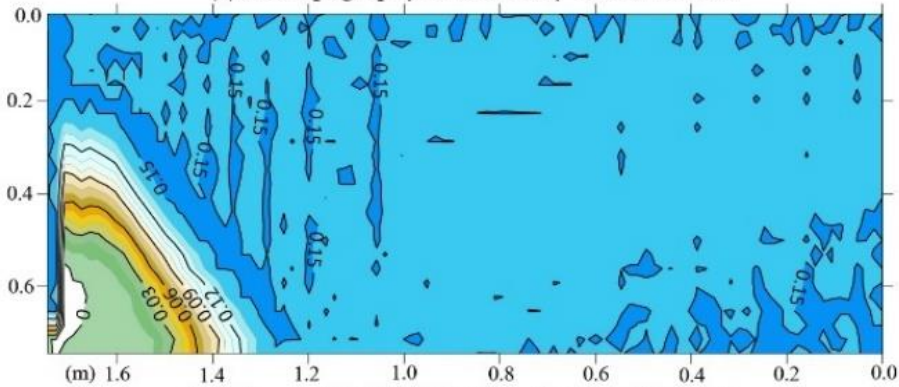


ارزیابی اثر عرض مجرای رسوبشوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوبشویی در سدهای انحراف آب



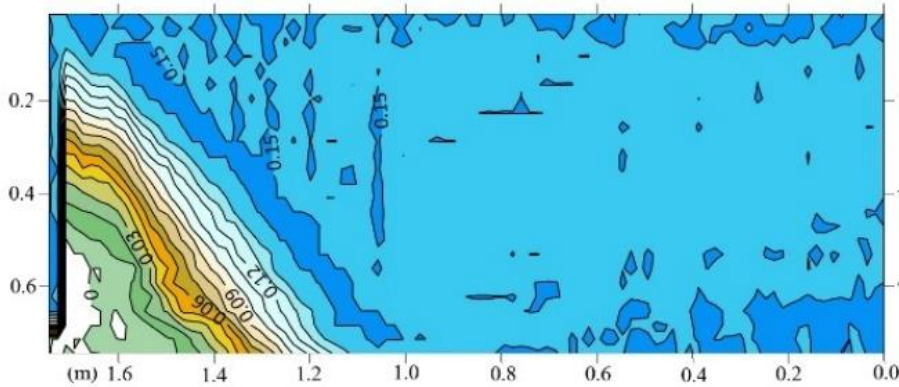
(الف) توپوگرافی بستر اندازه گیری شده توسط غلامی (۱۳۸۷).

(a) Bed topography measured by Gholami Alam



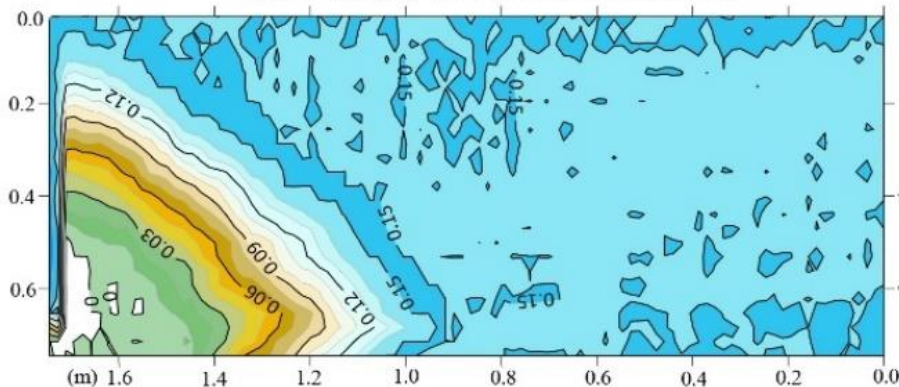
(ب) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از معادله مییر پیتر و مولر

(b) Bed topography computed with Meyer Peter and Muler Eq.



(ج) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از معادله نیلسن.

(c) Bed topography computed with Nielson Eq.

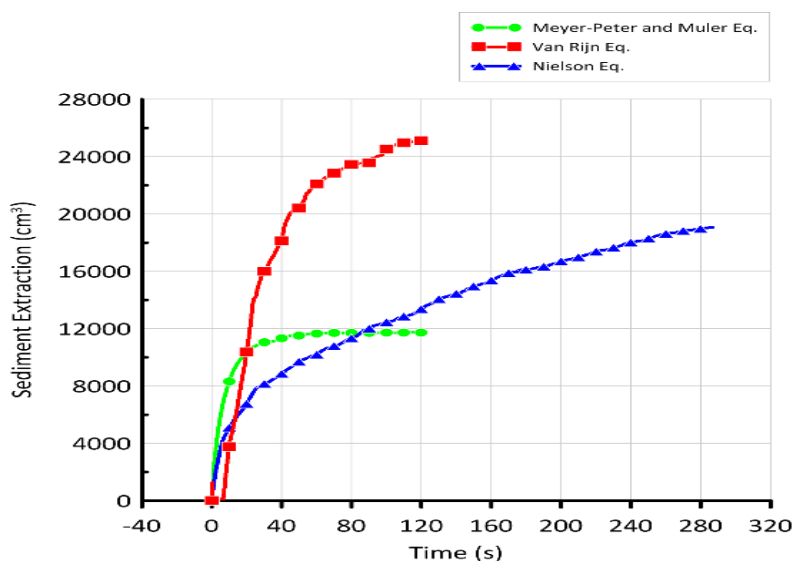


(د) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از فان راین.

(d) Bed topography computed with Van Rijn Eq.

شکل ۵- توپوگرافی بستر محاسبه شده با روابط انتقال رسوب و اندازه گیری شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998).

Fig.5- Bed topography, computed with sediment transport equations and measured by Gholami Alam



شکل ۶- مقایسه فرآیند تخلیه رسوب حاصل از روابط انتقال رسوب

Fig.6- Comparison of sediment extraction process by sediment transport equations

هر دو دریچه کاملاً باز بوده و دبی  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  در مجرای تخلیه رسوب جریان داشته است. با توجه به کارکرد معمول سدهای انحراف آب در میانه عمر مفید آنها، فرض شده است که سد انحراف آب در دوره بهره‌برداری تا تاج سد با رسوبات کاملاً پر شده است. همچنین محدوده دهانه آبگیر تا تراز آستانه و کف آبگیر یعنی تا ارتفاع  $1/8$  متر مملو از رسوبات است.

برای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب، معیارهای مختلفی ارائه شده است که سه معیار توصیه شده عبارت‌اند از: بیشتر از عرض دهانه آبگیر باشد،  $10$  تا  $15$  درصد طول تاج سرریز سد انحرافی باشد (Zahiri & Jafari, 2020) و قادر به عبور  $10$  تا  $20$  درصد سیلاب طرح باشد (IS6966-1, 1996).

معیارهای بیان شده، در موقعیت‌های مختلف احداث سد انحراف آب دامنه‌ای وسیع از اعداد را پیش روی طراح قرار می‌دهد و موجب سردرگمی و بعضاً انتخاب نادرست می‌شود. در این مطالعه، به دلایل زیر عرض مجرای رسوب‌شوی به صورت ضریبی از عرض کانال انتقال آب آبگیر در نظر گرفته شد و مورد بررسی قرار گرفته است.

عرض کانال انتقال آب با ملاحظات فنی، اقتصادی و اجرایی بر اساس اصول دقیق هیدرولیکی و شرایط مناسب

#### مشخصات فیزیکی مجرای تخلیه رسوب

طبق معمول برای کنترل و تخلیه رسوبات انباشته‌شده در مقابل دهانه آبگیر، مجرای تخلیه رسوب مجهز به دو دریچه طراحی و اجرا می‌شود. اداره احیای ایالات متحده (USBR) توصیه کرده است که دبی عبوری از مجرای تخلیه رسوب، دو برابر دبی سامانه انحراف آب باشد (Martin and Carlson, 1953). انتخاب دبی دو برابر دبی انحراف به این دلیل است که تخلیه رسوب معمولاً نیاز به جریان سریع‌تر و قوی‌تر دارد تا بتواند تمامی ذرات را به پایین دست منتقل کند. در این حالت، جریان از انرژی کافی برخوردار است که از ته‌نشینی رسوبات در مجرای تخلیه جلوگیری می‌کند. این معیار همچنین باعث می‌شود با تغییرات دبی ورودی به سد، عملکرد مجرای تخلیه ثابت بماند و نیازی به تنظیمات پیچیده نباشد.

در این مطالعه، دبی سامانه انحراف آب برابر با  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  فرض شده است و این دبی، پروژه انحراف را در زمره پروژه‌های متوسط مقیاس قرار می‌دهد. بدین ترتیب دبی مجرای تخلیه رسوب برابر با  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  در نظر گرفته شد. بنابراین، هر یک از دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب باید ظرفیت عبور  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  را داشته باشد. در کلیه شبیه‌سازی‌ها

## ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

شرایط مرزی در بالادست سد انحراف آب به صورت دبی و برابر با  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در پایین دست سرریز و دریچه به صورت جریان خروجی (outflow) است، دبی خروجی از سرریز برابر  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  و دبی خروجی در پایین دست مجرای تخلیه رسوب برابر با  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  است. شرط مرزی در سطح آب برابر با  $P=0$  است. با توجه به مطالب گفته شده، مقادیر پارامترهای طراحی به شرح جدول (۳) در نظر گرفته شد.

در شکل (۷)، نمای شماتیکی از سیستم تخلیه رسوب و اجزای سد انحراف آب نشان داده شده است. شکل (a) نمای کلی از رودخانه، دیوار جداکننده، سرریز و مجرای تخلیه رسوب را نمایش می‌دهد. در شکل (b) شرایط مرزی و ضخامت اولیه رسوبات در بالادست دریچه‌ها مشاهده می‌شود. شکل (c) نمایی از سرریز و انباشت رسوبات در بالادست آن و شکل (d) نمای دریچه‌های تخلیه رسوب را نشان می‌دهد.

جریان طراحی می‌شود تا جریان آب در محدوده‌ای از سرعت مناسب قرار گیرد که از نظر انتقال دبی و رسوبات به طور همزمان قابل قبول باشد. به همین دلیل، این عرض چندان تابع موقعیت مکانی پروژه نیست و از مکانی به مکان دیگر با ظرفیت یکسان تغییر قابل توجه ندارد. بر خلاف آن، عرض سد انحرافی بسته به شرایط توپوگرافی، هندسه و هیدرولوژی رودخانه می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

انتخاب عرض مجرای تخلیه بر اساس ضریبی از عرض کانال آبگیر، کنترل بیشتری بر نسبت دبی به عرض مجرای تخلیه می‌دهد. این امر در شرایطی اهمیت بیشتری دارد که دبی عبوری محدود باشد، زیرا با محدودتر کردن عرض مجرای تخلیه می‌توان سرعت جریان و نیروی برشی لازم را برای جابه‌جایی رسوبات حفظ کرد. در مقابل، استفاده از عرض سد انحرافی به عنوان معیار، ممکن است در شرایطی که عرض سد بسیار بیشتر از عرض کانال انتقال آب باشد، منجر به جریان‌های کند و ناپایدار در مجرای تخلیه گردد و در نتیجه راندمان رسوب‌شویی کاهش یابد.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای طراحی مجرای تخلیه رسوب

Table 3-The values of the design parameters of the sluiceway

مقدار Value	واحد Unit	پارامتر Parameter
35	m	عرض رودخانه
5.5	m	ارتفاع سد انحرافی
200	$\text{m}^3/\text{s}$	دبی سیلاب
60	$\text{m}^3/\text{s}$	دبی مجرای تخلیه رسوب
11.58	m	طول دیوار جداکننده
7.5	m	ارتفاع دیوار جداکننده
6.0	m	عرض کانال آبگیر
1.0	mm	قطر متوسط ذرات رسوب

دارند. برای تعیین پارامترهای گزینه‌های مختلف، ابتدا عرض مجرای رسوب‌شوی به صورت ضریبی از عرض کانال آبگیر انتخاب شده است. پس از آن با تعیین مقادیر مناسب تکیه‌گاه‌ها (P) و (Lg)، عرض هر یک از دریچه‌ها (b) تعیین شده است. سپس با مشخص بودن دبی دریچه‌ها و تراز سطح

برای ارزیابی کارایی سیستم تخلیه رسوب گزینه‌های مختلفی طبق جدول (۴) در نظر گرفته شده است. در این گزینه‌ها شش عرض متفاوت برای مجرای تخلیه ( $W_s$ ) در محدوده  $0.58$  تا  $1.83$  برابر عرض کانال آبگیر ( $W_i$ ) انتخاب شده است، که در محدوده توصیه شده برای طراحی قرار

آب بالادست (h) با استفاده از رابطه ۱۱ بازشدگی دریچه (a) محاسبه شده است (Swamee, 1992). برای حفظ یک دبی عبوری ثابت در مجرای تخلیه رسوب (۶۰ m<sup>3</sup>/s) با رعایت ملاحظات سازه ای مربوط به تکیه گاه ها و فاصله بین دو دریچه، افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب، منجر به افزایش

$$a = \frac{Q}{0.891b\sqrt{gh} \left( \frac{h-a}{h+15a} \right)^{0.0649}} \quad (11)$$

جدول ۴- گزینه های مشخصات دریچه و مجرای تخلیه رسوب.

Table 4- Options for specifications of the sluice gate and sluiceway

$W_s/W_i$	a/b	$L_g/W_i$	$W_s/W_i$	a/b	$L_g/W_i$
0.58	1.15	0.000	1.30	0.50	0.200
1.00	0.60	0.043	1.30	0.60	0.277
1.00	0.70	0.050	1.30	0.70	0.350
1.00	0.80	0.100	1.50	0.32	0.150
1.00	0.90	0.147	1.50	0.40	0.267
1.15	0.50	0.050	1.50	0.50	0.400
1.15	0.60	0.127	1.50	0.60	0.477
1.15	0.70	0.200	1.83	0.20	0.167
1.30	0.32	0.050	1.83	0.40	0.600
1.30	0.40	0.067	1.83	0.50	0.733
			1.83	0.60	0.810

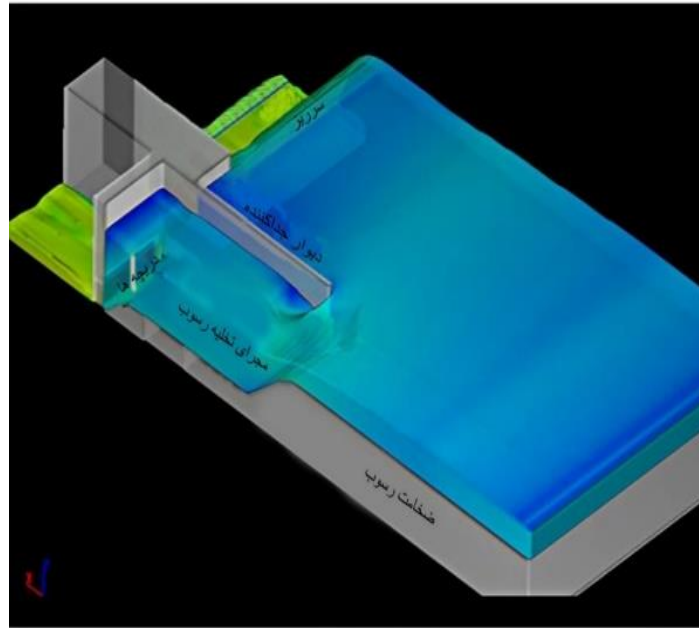
## نتایج

### اثر عرض مجرای تخلیه رسوب

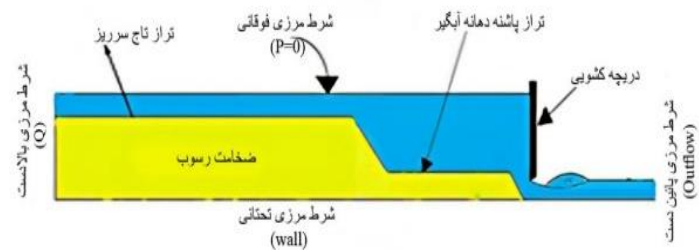
تخلیه رسوب به عرض کانال آبخیز ( $W_s/W_i$ ) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد برای یک دبی مشخص، با افزایش عرض مجرا، مقدار عدد فرود کاهش پیدا می کند. با توجه به اینکه مجرای تخلیه رسوب معمولاً در شرایط سیلابی وارد عمل می شود بنابراین با افزایش عرض مجرا، سرعت عبور جریان از این محدوده کاهش می یابد. تاثیر عرض های مختلف مجرای تخلیه رسوب بر حجم شستشوی رسوب ترسیب شده در مجرای تخلیه رسوب در دوره بهره برداری نرمال، بررسی و نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. برای عرض ها و نسبت های a/b مختلف، مدت شبیه سازی ها متفاوت است. بنابراین در شکل (۹)، نتایج مربوط به مناسب ترین نسبت a/b و حداقل مدت شبیه سازی برابر ۱۸۰۰ ثانیه نشان داده شده است.

در شبیه سازی های ابتدایی، مشخص شد که شرایط جریان به لحاظ هیدرودینامیکی پس از مدتی در حدود ۸ دقیقه پایدار می شود و بنابراین بازه زمانی شبیه سازی ها به صورت ده دقیقه ای انتخاب شده است. پس از آن، نتایج با یکدیگر مقایسه شدند و در صورت نزدیکی مقادیر به دست آمده، مدت شبیه سازی افزایش داده شده است تا اینکه بتوان تمایز نتایج را به درستی نشان داد. بدین ترتیب، در هزینه محاسبات و زمان اجرای گزینه ها صرفه جویی شده است. در شکل (۸) مقادیر عدد فرود  $Fr = \frac{Q}{W_s y \sqrt{g y}}$  که در آن  $W_s$  عرض مجرای تخلیه رسوب، y فاصله تراز سطح آب تا کف دریچه مجرای تخلیه رسوب، Q دبی عبوری از مجرای تخلیه رسوب و g شتاب ثقل است) در مقابل نسبت عرض مجرای

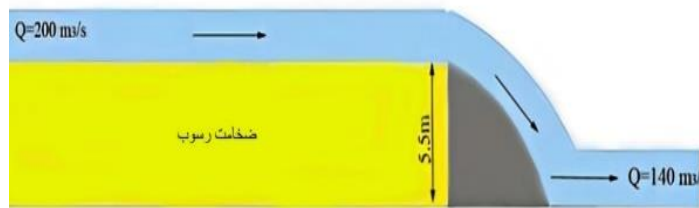
ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب



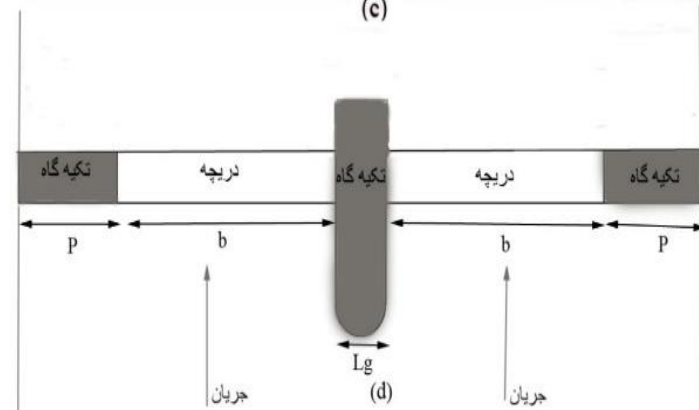
(a)



(b)



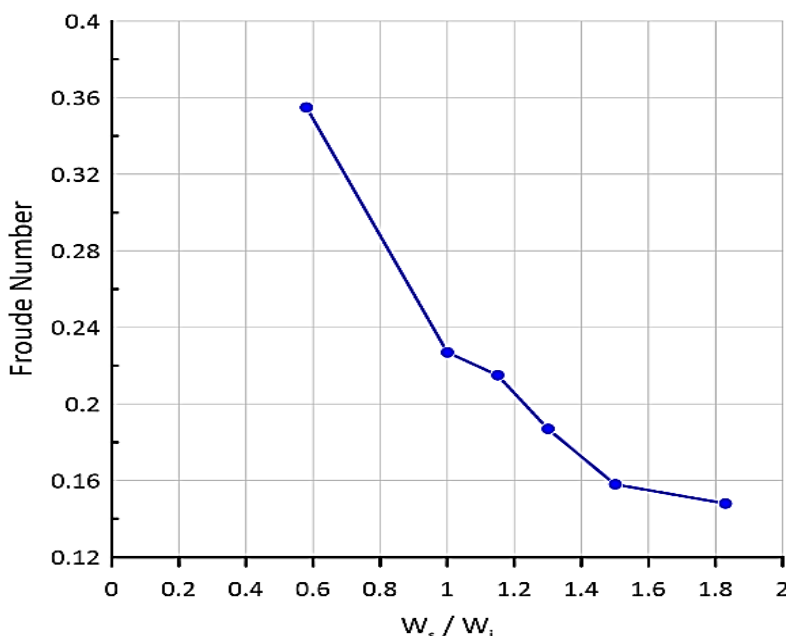
(c)



(d)

شکل ۷- نمای شماتیکی از رودخانه، سد انحراف آب، شرایط مرزی و اولیه جریان و دریاچه‌های رسوب‌شوی

Fig. 7-Schematic view of the river, diversion dam, boundary and initial conditions, and sediment flushing gates



شکل ۸- رابطه عدد فرود با نسبت عرض مجرای تخلیه رسوب به عرض کانال آبگیر

Fig. 8- Dependency of the Froude number and the ratio of the sluiceway width to the intake channel width

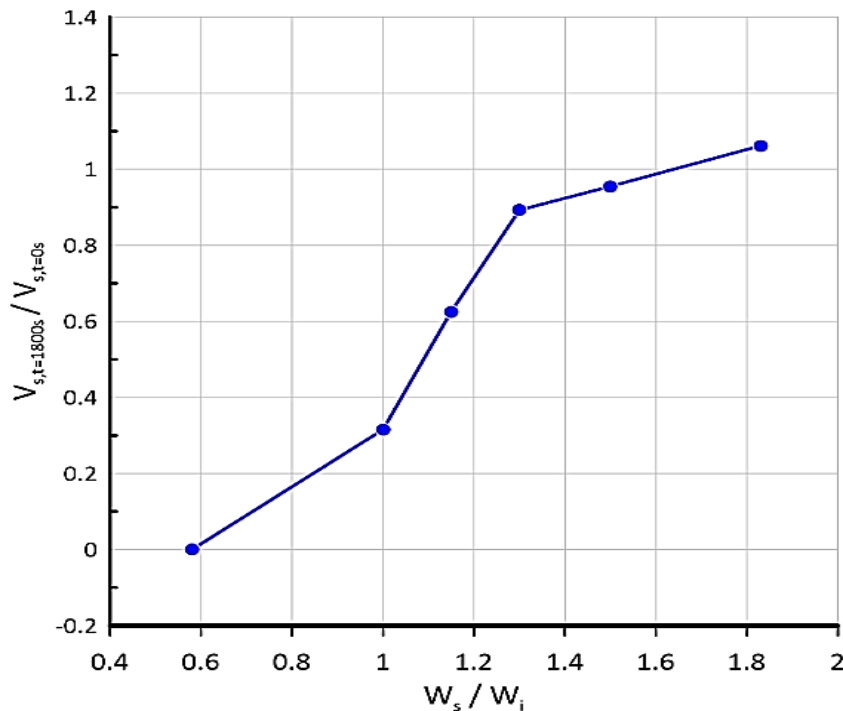
شکل (۹) نشان می‌دهد که در عرض  $W_s=0.58W_i$ ، این وضعیت ناکارآمد است، منجر به تجمع رسوبات در نزدیکی دریچه می‌شود، و می‌تواند در آینده موجب کاهش کارایی و حتی مسدود شدن مجرا و ورود بیشتر رسوبات به دهانه آبگیر شود. از این رو، این وضعیت نیز با هدف‌های طراحی و کارایی سامانه تناسب ندارد. فرآیند رسوب‌شویی در دو عرض مجرای  $W_s=1.3W_i$  و  $W_s=1.5W_i$  به‌طور جزئی رخ داده است و تامین‌کننده هدف طراحی مجرای تخلیه رسوب نیست. دو عرض مجرای  $W_s=1.0W_i$  و  $W_s=1.15W_i$  منجر به رسوب‌شویی کامل شده است بطوری که راندمان تخلیه رسوبات تا حدود ۶۰ درصد افزایش یافته است. بازه  $1.0 \leq \frac{W_s}{W_i} < 1.3$  نشان دهنده حالتی مطلوب برای رسوب‌شویی است. انتخاب عرض مجرا در این محدوده منجر به بهبود تخلیه رسوب به شکل کنترل‌شده و متناسب با جریان عبوری می‌شود و شرایط جریان هیدرودینامیکی در تعادل قرار دارد. این بخش از نمودار به عنوان حالت ایده‌آل برای هدف‌های طراحی در نظر گرفته می‌شود، زیرا رسوب با کارایی مناسب تخلیه می‌شود و از مشکلات ناشی از گسترش فرسایش به بالادست یا انباشت رسوب جلوگیری می‌کند.

نسبت حجم رسوب موجود در زمان  $t=1800s$  به حجم اولیه رسوب برابر صفر است بنابراین، فرآیند رسوب‌شویی از حالت موضعی خارج می‌شود و به سمت بالادست پیشروی می‌کند. این وضعیت نشان می‌دهد که مجرا به‌شدت در حال تخلیه رسوب است، به‌گونه‌ای که ممکن است فرسایش رسوبات به سمت سازه‌های بالادست پیشروی کند و موجب ناپایداری و ایجاد آسیب به سازه‌های حفاظتی آبگیر و ساحل رودخانه شود. از نظر طراحی، این وضعیت نامطلوب و با هدف‌های پایدارسازی ناسازگار است. این امر در شرایط آبگیری همزمان با عملیات رسوب‌شویی، موجب انتقال و ورود بیشتر رسوب به دهانه آبگیر نیز می‌شود که مطلوب نیست و باید از آن پرهیز کرد. در عرض  $W_s=1.83W_i$ ، این نسبت، بزرگ‌تر از یک است که نشان دهنده شروع فرآیند رسوب‌گذاری و افزایش حجم رسوبات در مجرای تخلیه رسوب است. در این حالت، به‌دلیل عرض زیاد مجرا، جریان انرژی کافی برای تخلیه رسوب ندارد و به همین دلیل ذرات رسوب به‌صورت متمرکز در این محدوده انباشته می‌شوند.



ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

نکته دیگری که در ارتباط با عرض‌های مورد بررسی باید در اینجا اشاره شود این است که معیارهای مختلفی برای عرض مجرا توصیه می‌شود. این معیارها عبارت‌اند از ۱۱ درصد طول تاج سرریز که معادل  $W_s=0.58W_i$  می‌شود، و یا متناسب با عرض دهانه آبگیر که معادل  $W_s=1.83W_i$  می‌شود. همان‌طور که از نتایج بالا قابل مشاهده است هر دو عرض‌های به دست آمده از معیارهای توصیه شده هدف نهایی احداث مجرای تخلیه رسوب را برآورده نمی‌کنند.



شکل ۹- تاثیر نسبت عرض مجرای تخلیه رسوب به عرض کانال آبگیر بر حجم رسوب‌شویی

Fig. 9- Effect of the ratio of the width of the sluiceway to the width of the intake channel on sediment flushing volume

اثر نسبت باز شدگی به عرض دریاچه (a/b) بر حجم رسوب‌شویی

برای پنج مقدار مختلف عرض مجرای رسوب‌شوی، مقادیر مختلف نسبت بازشدگی به عرض دریاچه و اثر آن بر حجم رسوب‌شویی بررسی شده است. دلیل بررسی این گزینه‌ها آن است که در عرض‌های مختلف مجرا، شرایط هیدرودینامیک جریان متفاوت است و انتخاب نسبت مناسب a/b می‌تواند به بهبود رسوب‌شویی، جلوگیری از رسوبگذاری، و بهینه‌سازی عملکرد سیستم کمک کند. به این ترتیب، با ارزیابی نسبت‌های مختلف می‌توان ترکیب مناسبی از ابعاد دریاچه و مجرا را برای دستیابی به جریان پایدار و تخلیه مؤثر رسوب پیدا کرد که همزمان از فرسایش و تجمع بیش از حد رسوبات جلوگیری کند. در کلیه این شبیه‌سازی‌ها از دو دریاچه فعال با نسبت a/b یکسان در مجاری تخلیه رسوب استفاده شده است.

ابتدا گزینه‌های معرفی شده در (جدول ۴) به مدت ۶۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شده‌اند. پس از آن، نتایج به دست آمده برای هر عرض مجرا (جدول ۵) بر اساس غلظت رسوب خروجی و حجم پاک‌سازی رسوب ارزیابی شده و شبیه‌سازی مناسب‌ترین نسبت‌ها ادامه یافته است.



جدول ۵- میزان ورود و خروج رسوبات از مجرای تخلیه رسوب در مدت ۶۰۰ ثانیه

Table 5- Sediment influx and efflux from the sediment discharge channel over a duration of 600 seconds

غلظت رسوب خروجی (kg/m <sup>3</sup> )	حجم پاک سازی رسوب (m <sup>3</sup> )	حجم رسوب خروجی (m <sup>3</sup> )	حجم رسوب ورودی (m <sup>3</sup> )	a/b	W <sub>s</sub> /W <sub>i</sub>
Sediment efflux concentration	Volume of sediment flushing	Volume of sediment efflux	Volume of sediment influx		
12.50	57.81	260.20	202.39	0.6	
14.55	67.00	309.60	242.60	0.7	1.00
17.83	102.43	337.00	234.57	0.8	
15.52	83.90	325.83	242.74	0.9	
13.61	57.46	292.32	234.86	0.5	
12.33	43.98	250.49	206.51	0.6	1.15
10.67	37.87	231.61	193.74	0.7	
10.32	14.35	210.20	195.85	0.32	
10.20	14.12	218.76	204.64	0.4	
11.24	11.57	238.83	227.26	0.5	1.3
9.02	-1.78	186.49	188.27	0.6	
9.85	-4.78	204.24	209.02	0.7	
8.32	14.96	163.15	148.19	0.32	
8.25	4.77	172.73	167.96	0.4	1.5
8.03	6.17	173.21	167.04	0.5	
7.71	7.38	153.10	145.72	0.6	
5.51	-12.83	119.55	132.38	0.2	
4.95	-43.09	101.38	144.47	0.4	1.83
5.42	-50.64	120.27	170.91	0.5	
4.75	-7.01	97.92	104.93	0.6	

در جدول (۶) نتایج نهایی مربوط به هر عرض و را به گونه ای تعریف کرد که بیشترین مقدار رسوب شویی رخ نسبت های a/b نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد. نتایج همچنین نشان داد در اکثر عرض ها نسبت که برای هر عرض مجرای تخلیه رسوب می توان نسبت a/b=0.5 مؤثرترین نسبت برای رسوب شویی است.

جدول ۶- نتایج گام آخر شبیه سازی مربوط به هر عرض مجرای تخلیه رسوب

Table 6- Results of the final step of the simulation related to each width of the sluiceway

غلظت رسوب خروجی (kg/m <sup>3</sup> )	حجم پاک سازی رسوب (m <sup>3</sup> )	حجم رسوب خروجی (m <sup>3</sup> )	حجم رسوب ورودی (m <sup>3</sup> )	زمان (s)	a/b	W <sub>s</sub> /W <sub>i</sub>
Sediment efflux concentration	Volume of sediment flushing	Volume of sediment efflux	Volume of sediment influx	Time		
11.06	124.96	713.63	588.67	1800	0.8	1.00
9.94	115.72	636.49	520.77	1800	0.9	
9.23	78.59	599.35	520.76	1800	0.5	1.15
8.62	61.97	530.63	468.66	1800	0.6	
6.79	19.23	440.69	421.46	1800	0.4	1.30
7.48	25.50	483.74	458.24	1800	0.5	
5.13	9.24	404.93	395.69	2400	0.32	
4.97	13.96	427.21	413.25	2400	0.4	1.50
4.96	4.69	430.23	425.54	2400	0.5	
3.85	-24.71	421.49	446.20	3000	0.2	1.83
3.72	-20.62	417.23	437.85	3000	0.5	

## ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

### اثر نسبت $a/b$ بر روی دامنه رسوب‌شویی

ضخامت متوسط رسوب به ارتفاع آستانه آبخیز استفاده شده است. دامنه موثر تا نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که این نسبت کمتر از یک باشد. در شکل (۱۰)، دامنه موثر ایجاد شده توسط بهترین گزینه‌های  $a/b$  در هر عرض مجرا نشان داده شده است.

این شکل نشان می‌دهد که در عرض  $W_s=1.0W_i$ ، کل محدوده مجرای تخلیه رسوب تحت تاثیر فرآیند رسوب‌شویی قرار می‌گیرد و نسبت  $a/b=0.8$  در برداشت رسوب از ۶۰ درصد ابتدایی طول مجرای تخلیه رسوب موثرتر عمل کرده است. به تدریج با افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب، دامنه موثر رسوب‌شویی نیز کاهش پیدا کرده است به طوری که در عرض  $W_s=1.5W_i$  این دامنه به ۴۰ درصد انتهایی طول مجرای تخلیه رسوب محدود شده است.

### توپوگرافی‌های مجرای تخلیه رسوب

در شکل (۱۱)، توپوگرافی بستر در محدوده مجرای تخلیه رسوب مربوط به مقادیر مختلف عرض مجرا پس از عبور سیلاب به مدت ۳۰ دقیقه نشان داده شده است. عرض مجرا از شکل  $a$  تا  $f$  به ترتیب افزایش یافته است. ترازهای بستر نشان می‌دهد که در مجرای (a)، فرآیند رسوب‌شویی به سمت بالادست مجرای تخلیه رسوب انتقال یافته و از حالت موضعی خارج شده است. در مجرای (b)، فاصله‌ای به طول ۵ متر از انتهای مجرای تخلیه رسوب و در مجاورت دریچه‌های این مجرا کاملاً پاک‌سازی شده است. در مجرای (c)، طول پاک‌سازی کامل رسوب کاهش یافته و به ۴ متر رسیده است. به همین ترتیب طول پاک‌سازی کامل رسوب از مجاورت دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب به تدریج کاهش می‌یابد و در مجرای (f) به کمترین مقدار در حدود ۲/۵ متر می‌رسد.

این موضوع نشان می‌دهد افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب نه تنها منجر به کاهش دامنه رسوب‌شویی در مجرای تخلیه رسوب می‌شود بلکه طول پاک‌سازی کامل در مجاورت دریچه‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

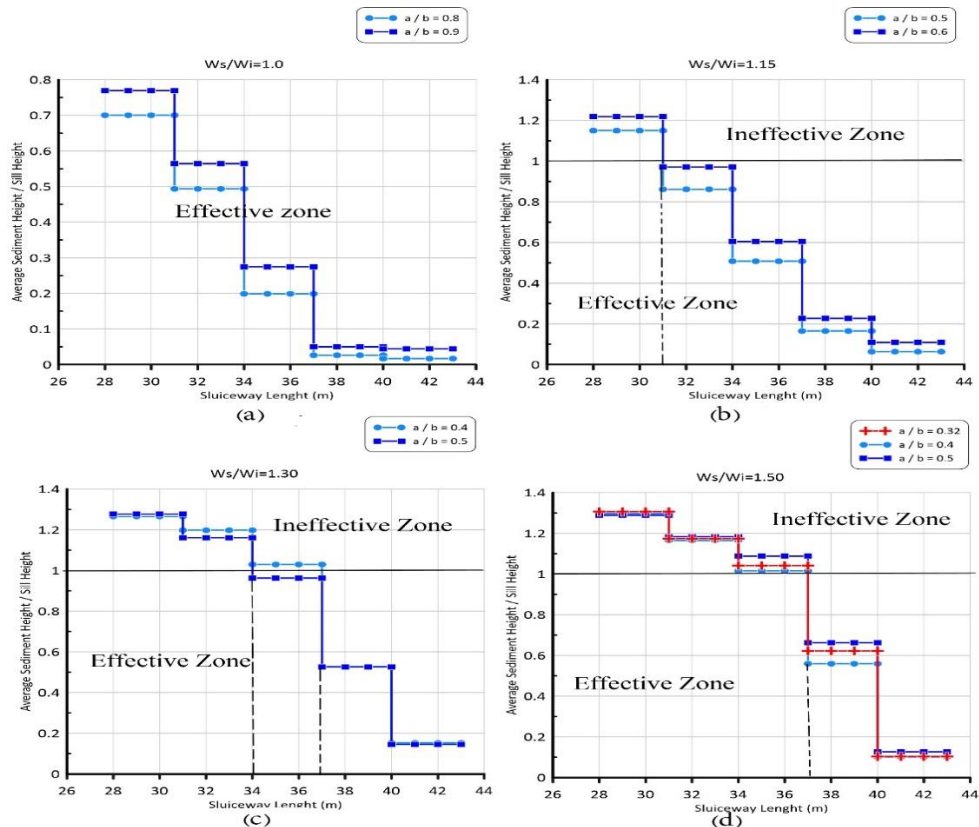
دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب در پایین دست دهانه آبخیز قرار دارند. بنابراین، دامنه موثر رسوب‌شویی ایجاد شده توسط این دریچه‌ها یکی از عواملی است که در شرایط بهره‌برداری نرمال بر میزان ورود رسوب به دهانه آبخیز تاثیر تعیین کننده‌ای دارد.

دامنه موثر رسوب‌شویی به فاصله‌ای اطلاق می‌شود که طی آن، رسوبات در طول مجرای تخلیه رسوب جابه‌جا می‌شوند. این دامنه معیاری برای سنجش کارایی فرآیند شستشوی رسوب در برداشت و انتقال رسوبات به شمار می‌آید. دامنه موثر نه تنها به سرعت و دبی جریان، بلکه به ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مانند اندازه و چگالی ذرات بستگی دارد. به طور کلی، دامنه موثر بیشتر نشان‌دهنده توان جریان در جابه‌جایی کامل تر رسوبات و جلوگیری از ته‌نشینی آن‌ها در طول مسیر است و از این رو به عنوان شاخص کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های رسوب‌شویی و طراحی مناسب مجرای تخلیه رسوب کاربرد دارد.

دامنه موثر رسوب‌شویی تابعی از شرایط هیدرودینامیکی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه است. انتخاب صحیح نسبت  $a/b$  و تنظیم عدد فرود در محدوده مناسب می‌تواند شرایط لازم را برای انتقال رسوبات از مسافت‌های دورتر و بهبود عملکرد شستشوی رسوبات را فراهم کند.

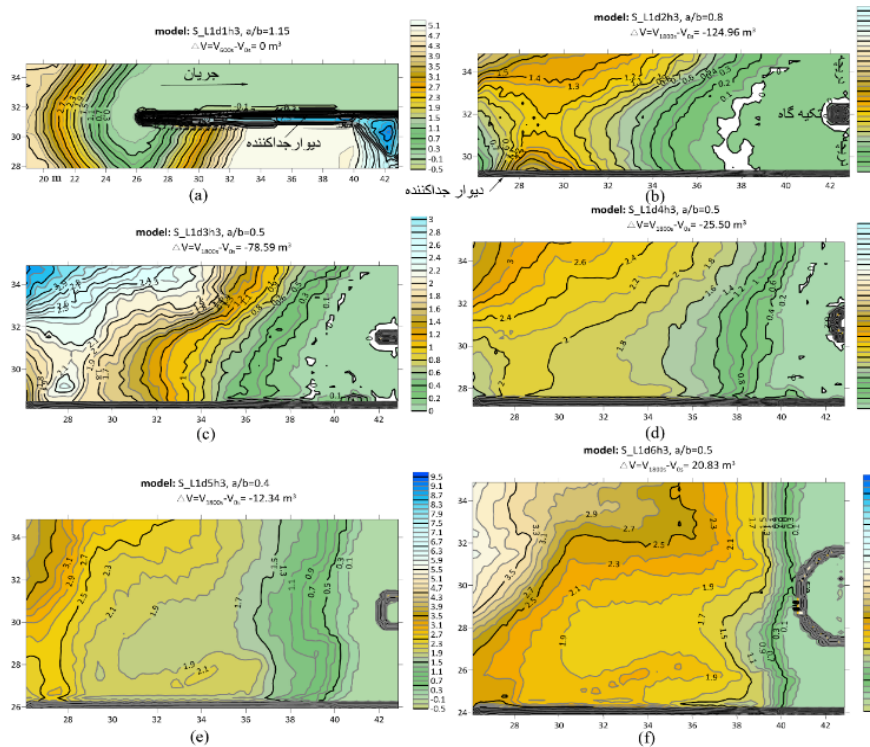
برای محاسبه دامنه رسوب‌شویی، طول مجرای تخلیه رسوب به پنج قسمت مساوی تقسیم و پس از آن ضخامت متوسط رسوب در هر قسمت از تقسیم حجم رسوب به مساحت سطح مجرا محاسبه شده است.

در فرآیند رسوب‌شویی، هدف کاهش تراز رسوبات در مجرای تخلیه رسوب به ترازهایی پایین‌تر از آستانه آبخیز است تا اینکه در دوره بهره‌برداری نرمال از آبخیز امکان ته‌نشینی بیشتر رسوب در مجرای تخلیه رسوب و کاهش ورود رسوب به دهانه آبخیز فراهم گردد. بنابراین، در این مطالعه برای ارزیابی دامنه موثر رسوب‌شویی از نسبت



شکل ۱۰- دامنه موثر رسوب شویی ایجاد شده توسط نسبت های مختلف  $a/b$  در عرض های مختلف.

Fig.10-The effective sediment flushing range created by various  $a/b$  ratios at different sluiceway widths



شکل ۱۱- توپوگرافی بستر در مجرای تخلیه رسوب در زمان  $t=1800s$ .

Fig. 11-Topography of the bed in the sluiceway at time  $t=1800$  seconds

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

جدول ۷- مقادیر متوسط عدد فرود برای نسبت‌های مختلف a/b  
Table 7- Average values of the Froud Number for different ratio a/b

انحراف معیار Standard deviation	عدد فرود Froud Number	نسبت a/b Ratio a/b	عرض مجرای تخلیه رسوب Width of sluiceway
0.110	0.355	1.15	Ws/Wi = 0.58
0.090	0.238	0.6	Ws/Wi = 1.00
0.092	0.276	0.7	
0.106	0.290	0.8	
0.101	0.281	0.9	
0.095	0.224	0.5	Ws/Wi = 1.15
0.098	0.222	0.6	
0.096	0.221	0.7	
0.084	0.202	0.32	Ws/Wi = 1.30
0.086	0.207	0.4	
0.084	0.209	0.5	
0.079	0.192	0.6	
0.083	0.195	0.7	
0.069	0.163	0.32	Ws/Wi = 1.50
0.071	0.162	0.4	
0.07	0.161	0.5	
0.072	0.158	0.6	
0.073	0.153	0.2	Ws/Wi = 1.83
0.070	0.151	0.4	
0.071	0.154	0.5	
0.063	0.148	0.6	

#### اثر نسبت a/b بر عدد فرود

همان‌طور که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، برای عرض‌های بزرگ‌تر مانند  $W_s/W_i=1.83$ ، عدد فرود در سطح پایین‌تری باقی می‌ماند (حدود ۰/۱۷ تا ۰/۱۸)، که بیانگر جریان آرام‌تر و تلاطم کمتر در مقایسه با عرض‌های کوچک‌تر است. این وضعیت به دلیل ایجاد رسوبگذاری بیشتر در مجاری با عرض‌های بزرگ رخ می‌دهد و نشان می‌دهد که در چنین حالتی بازدهی شستشوی رسوب کاهش می‌یابد.

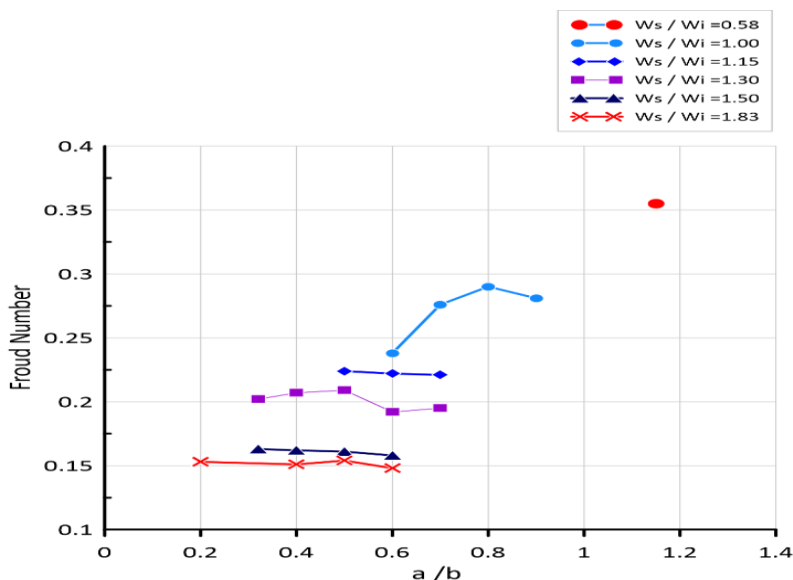
برای نسبت  $W_s/W_i=1.0$  با افزایش نسبت a/b مشاهده می‌شود که عدد فرود افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جریان با انرژی بالاتر و احتمال شستشوی بهتر رسوبات است. جریان در این حالت قوی‌تر و تلاطمی‌تر است و می‌تواند به شستشوی رسوبات از مجرای تخلیه رسوب کمک کند.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که با کنترل مناسب نسبت a/b می‌توان عدد فرود را در سطح مطلوبی نگه داشت

نسبت بازشدگی به عرض دریچه می‌تواند رفتار هیدرودینامیکی جریان را در محدوده مجرای تخلیه رسوب تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، عدد فرود جریان در مجرای تخلیه رسوب برای یک دبی عبوری ثابت، علاوه بر عرض مجرا تحت تاثیر این نسبت نیز قرار می‌گیرد. در جدول (۷) مقادیر متوسط و انحراف معیار عدد فرود در مجرای تخلیه رسوب در محدوده‌ای به طول ۸ متر قبل از دریچه‌های این مجرا ارائه و در شکل (۱۲) تغییرات عدد فرود با عرض مجرا و نسبت a/b نشان داده شده است.

تغییر در این نسبت می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و عدد فرود داشته باشد. از آنجا که عدد فرود به نوع و شدت جریان مربوط است، این نسبت می‌تواند به‌طور مستقیم بر رفتار جریان و انتقال انرژی تاثیر بگذارد.

که شستشوی مؤثر رسوبات را تضمین کند و نیز از تلاطم بیش از حد جلوگیری شود. نسبت های  $a/b$  که عدد فرود را در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۳ نگه می دارند، معمولاً عملکرد بهتری برای شستشوی رسوب نشان می دهند، زیرا جریان دارای انرژی کافی برای جابه جایی رسوب است و از تجمع آن در بالادست جلوگیری می کند.



شکل ۱۲- رابطه بین عدد فرود و نسبت  $a/b$ .

Fig. 12- Dependency of the Froude number and the ratio  $a/b$ .

می دهد که چگونه تغییر عرض مجرا می تواند بر روند رسوب شویی تاثیر بگذارد. عرض های ناکارآمد شامل مقاطعی هستند که راندمان تخلیه رسوب در آن ها پایین است و اغلب باعث ته نشینی بیشتر رسوب می شوند یا اینکه فرآیند رسوب شویی از حالت موضعی خارج شده و به بالادست انتقال یافته است. عرض های موثر، مقطعی با عملکرد مناسب در رسوب شویی هستند و دارای سرعت جریان کافی و الگوی مناسبی برای تخلیه رسوب هستند. دسته سوم، عرض های کم تاثیر را در بر می گیرد که اگرچه نسبت به عرض های ناکارآمد عملکردشان بهتر است، اما از کارایی عرض های موثر فاصله دارند.

نتایج تحقیق نشان داد چنانچه عرض مجرای تخلیه در محدوده  $1 \leq \frac{W_s}{W_i} \leq 1.15$  (که  $W_i$  عرض کانال آبیگر است) قرار گیرد بیشترین میزان رسوب شویی رخ می دهد. بررسی ارتباط بین اعداد فرود و فرآیند رسوب شویی نشان داد که در اعداد فرود بزرگ تر از ۰/۳ احتمال خروج فرآیند رسوب شویی

در کل، این نمودار تأکید می کند که تنظیم مناسب نسبت  $a/b$  برای هر عرض خاص مجرای تخلیه می تواند به شستشوی بهینه رسوبات و حفظ بازده سیستم کمک کند.

### بحث و نتیجه گیری

با توجه به اینکه تاکنون معیاری مناسب برای نسبت بازشدگی به عرض دریاچه مجرای تخلیه رسوب ارائه نشده است بنابراین در این مطالعه به بررسی اثر این نسبت بر میزان رسوب شویی مجرای تخلیه رسوب در شرایط مختلف پرداخته شده است. در این مطالعه همچنین معیارهای مختلف ارائه شده برای تعیین عرض مجرای تخلیه رسوب ارزیابی و معیار مناسبی برای این عرض پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، عرض های مختلف را می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: عرض های ناکارآمد، عرض های کم تأثیر و عرض های موثر. این دسته بندی به منظور تشخیص کارایی هر عرض در انتقال و تخلیه رسوبات پیشنهاد شده است و نشان

## ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

از حالت موضعی بسیار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در اعداد فرود کوچک‌تر از  $0.16 < Fr < 0.3$  فرآیند رسوب‌شویی به فرآیند رسوب‌گذاری تبدیل می‌شود که با هدف‌های احداث مجرای تخلیه رسوب ناسازگار است. بنابراین برای رسوب‌شویی موثر، دامنه مناسب برای اعداد فرود به  $0.16 < Fr < 0.3$  محدود می‌شود. بررسی اثر نسبت بازشدگی به عرض دریچه نشان داد که این نسبت می‌تواند رفتار هیدرودینامیکی جریان در محدوده مجرای تخلیه رسوب را تحت تاثیر قرار دهد. با تغییر رفتار هیدرودینامیکی و ثابت بودن دیگر عوامل، نیروهای موثر بر انتقال رسوبات دستخوش تغییر می‌شود. در نسبت  $a/b=0.5$  یک عدد فرود مناسب ایجاد می‌شود که می‌تواند به انتقال بیشتر رسوبات به پایین دست مجرای تخلیه رسوب کمک کند. با توجه به اینکه معیار مشخصی برای نسبت  $a/b$  ارائه نشده است بنابراین در این مطالعه به بررسی اثر این نسبت بر میزان تخلیه رسوب پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد برای هر عرض مجرای تخلیه رسوب در محدوده عدد فرود قابل قبول ذکر شده در بالا، نسبت  $a/b = 0.5$  مناسب‌ترین عملکرد را در انتقال و تخلیه رسوبات از مجرای تخلیه رسوب دارد.

## مراجع

- Akoz, Mevlut Sami, Mehmet Salih Kirkgoz, & Ahmet Alper Oner. (2009). Experimental and Numerical Modeling of a Sluice Gate Flow. *Journal of Hydraulic Research* 47(2):167–76.
- Asadi, M., Monem, M. J., & Samani, J. (2023). Investigation of the Effect of Straight Divider Wall Dimensions on the Performance of the Sluiceway of a Diversion Dam. *Proceedings of 22<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, University of Maragheh*, pp. 1-9 (in Farsi).
- Bogárdi, János. (1974). *Sediment Transport in Alluvial Streams*. Akademiai Kiado Budapest.
- Daneshfaraz, Rasoul, Reza Norouzi, Parisa Ebadzadeh, & Alban Kuriqi. (2023). Influence of Sill Integration in Labyrinth Sluice Gate Hydraulic Performance. *Innovative Infrastructure Solutions* 8(4):118.
- Flow Science Inc. (2014). FLOW-3D user's manual version 11.0. Flow Science Inc., Santa Fe.
- Gholami Alam, A. (1998). Investigation of Effective Parameters in Designing the Sluiceway of Diversion Dams and Examination of Design Criteria. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Theran, Iran (in Farsi).
- Kim, Dae-Geun. (2007). Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11:127–32.
- Martin, Harold M., & E. J. Carlson. (1953). Model Studies of Sediment Control Structures on Diversion Dams. Pp. 109–22 in *Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention*. ASCE.
- Raudkivi, Arved J. (2020). *Sedimentation: Exclusion and Removal of Sediment from Diverted Water*. CRC Press.
- Razvan, Ernest. (1989). River Intakes and Diversion Dams. *Developments in Civil Engineering* 25.
- Shen, Hsieh Wen, Jihn-Sung Lai, & Dihua Zhao. (1993). Hydraulic Desiltation for Noncohesive Sediment. Pp. 119–24 in *Hydraulic Engineering*. ASCE.
- Swamee, Prabhata K. (1992). Sluice-Gate Discharge Equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(1):56–60.
- Vanoni, Vito A. (2006). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers.

- White, W. R., & R. Bettess.(1984). The Feasibility of Flushing Sediments through Reservoirs. *IAHS-AISH Publication* (144):577–87.
- Yakhot, Victor, & Steven A. Orszag. (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing* 1(1):3–51.
- Zahiri, A. R., & Jafari, S. M. (2020). Design of Diversion Dams and River Side Intakes. Jahad-e-Daneshgahi Press (in Farsi).



**Original Research**

## **Investigating the effect of Sluiceway width and the ratio of gate Opening to Gate Width on Sediment flushing in Diversion Dams**

**M. Asadi, M.J. Monem\*, J.M.V. Samani**

**\*Corresponding Author:** Professor Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran Iran,

**Received:** 12 November 2024, **Accepted:** 3 January 2025

**Email:** monem\_mj@modares.ac.ir

**https://doi.org/** 10.22092/IDSER.2025.367651.1600

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

Sediment accumulation is a persistent challenge in the operation of diversion dams, which are critical infrastructures for water diversion and flow management. Sediments tend to deposit in front of intake structures, obstructing water flow and impairing operational efficiency. Sediment flushing, achieved through sluiceways equipped with control gates, is an effective approach to alleviate these deposits. However, one of the key design parameters the gate opening-to-width ratio ( $a/b$ ) significantly influences flushing efficiency, though no standardized guideline for optimizing this ratio currently exists. This study investigates how the gate opening-to-width ratio ( $a/b$ ) and sluiceway width ( $W_s$ ) affect sediment flushing performance using the FLOW-3D computational fluid dynamics (CFD) model. Simulations under controlled flood conditions provide insights into optimal design parameters to enhance sediment flushing efficiency, aiming to inform best practices in hydraulic design.

#### **Methodology**

This study employs FLOW-3D, a high-resolution CFD software that solves the Navier-Stokes equations for incompressible, turbulent flow. The model integrates the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model, which accurately captures complex shear flows and turbulent interactions, making it ideal for studying sediment transport in hydraulic structures.

Simulations were conducted under constant flood inflow conditions, with variations in the gate opening-to-width ratio ( $a/b$ ) for each sluiceway width ( $W_s$ ). To ensure model accuracy, results were validated against experimental data from prior research, confirming the model's ability to reproduce sediment flushing patterns. The study examined sluiceway widths from 0.58 to 1.83 times the intake channel width ( $W_i$ ), assessing how each width and its corresponding  $a/b$  ratio affected flushing performance. Key parameters such as Froude number ( $Fr$ ), gate dimensions, and sluiceway configurations were analyzed to determine their impact on sediment removal efficiency.

#### **Results and Discussion**

Results indicated that a Froude number between 0.16 and 0.3 produced the best flushing efficiency, providing sufficient flow energy to mobilize and transport sediments while minimizing turbulence and backflow. Analysis of sluiceway widths showed that as the width increased, flushing efficiency declined due to reduced flow velocities. A narrower sluiceway width of  $0.58W_i$  exhibited high sediment removal rates, but this aggressive flushing risked destabilizing upstream structures due to increased erosive forces. Conversely, a wider sluiceway ( $1.83W_i$ ) promoted sediment deposition, as lower flow energy led to ineffective flushing and potential blockages.

An optimal range for sluiceway width between 1.0 and 1.15 times the intake width ( $W_i$ ) was identified. This range provided adequate flow velocity and shear stress to minimize sediment deposition within the sluiceway and control downstream sediment transport without risking erosion of upstream structures.

Regarding the gate opening-to-width ratio ( $a/b$ ), simulations showed that an  $a/b$  ratio of 0.5 consistently enhanced flushing efficiency across different sluiceway widths. Lower ratios ( $<0.5$ ) resulted in reduced flushing due to insufficient flow energy, while higher ratios ( $>0.5$ ) created localized turbulence and erosion, compromising overall system stability. Optimizing the  $a/b$  ratio at 0.5 balanced sediment mobilization with flow stability, achieving efficient flushing without excessive backflow or structural impacts.

The study further evaluated sediment transport length, or the effective flushing range, within the sluiceway. With an  $a/b$  ratio of 0.5, the effective sediment transport distance reached approximately 60% of the sluiceway length for narrower configurations, though this range decreased with increased sluiceway widths. These results underscore the need to balance sluiceway width and gate ratio to maintain effective sediment transport along the sluiceway length.

### **Conclusion**

This research presents essential guidelines for enhancing sediment flushing in diversion dams through optimized sluiceway design. A Froude number between 0.16 and 0.3, combined with an  $a/b$  ratio of 0.5, was found to maximize sediment removal efficiency. An optimal sluiceway width between 1.0 and 1.15 times the intake width ( $W_i$ ) further improved sediment transport, achieving efficient flushing with controlled downstream flow and minimizing upstream erosion.

**Keywords:** Diversion dam, FLOW-3D, Gate opening-to-width ratio, Sluiceway

