

بررسی و ارزیابی اثر جت در فلاشینگ تحت فشار مخازن سدهای برق آبی

احمد عبدی پور^۱

حسن احمدی*^۲

ابوالفضل شمسایی^۳

چکیده

فلاشینگ تحت فشار، یکی از روش‌های تخلیه رسوبات از مخازن است. در این روش رسوبات اطراف تخلیه کننده تحتانی به صورت موضعی شسته می‌شوند و لازم است تا حد امکان عمق آب داخل مخزن کاهش یابد. در این پژوهش برای اولین بار جهت افزایش رسوب‌شویی و زدودن رسوبات نزدیک سد به خصوص رسوبات جلوی دهانه آبگیر نیروگاه‌ها، از جت در جلوی دهانه خروجی سد استفاده شده است. برای بررسی میزان تأثیر جت در افزایش رسوب‌شویی اقدام به ساخت یک مدل آزمایشگاهی گردیده است. در آزمایش‌ها از ۵ عدد جت با سه سرعت مختلف و سه قطر نازل مختلف در دو تراز تخلیه کننده استفاده شده است. نتایج نشان دادند از بین پارامترهای متغیر، سرعت جت بیشترین تأثیر را در رسوب‌شویی دارد. همچنین تأثیر پارامترهای مذکور بر راندمان رسوب‌شویی مورد بررسی قرار گرفته و یک رابطه بی‌بعد توانی بین راندمان رسوب‌شویی و پارامترهای مؤثر با ضریب تبیین بالایی به دست آمده است. آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از روش جت‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش راندمان رسوب‌شویی داشته و می‌تواند در کنار سایر روش‌های رسوب‌زدایی به‌عنوان یک گزینه مناسب در مدیریت بهره‌برداری از مخازن در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی

فلاشینگ تحت فشار، آبگیر نیروگاه، مدل فیزیکی، رسوب‌شویی، سرعت جت.

۱. دانشجوی دکترای مهندسی عمران - مهندسی آب - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، ha.ahmadi56@yahoo.com.

۳. استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

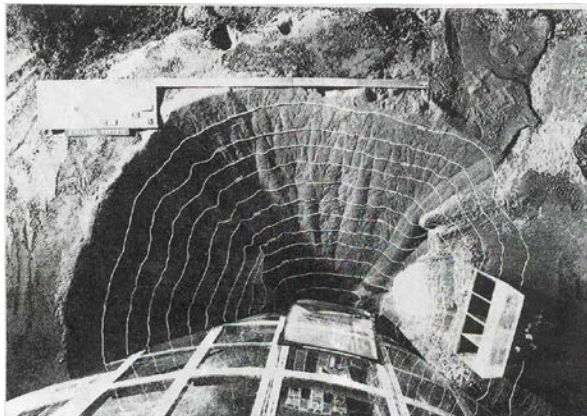
مقدمه

حجم کل سدهای جهان در اثر رسوب‌گذاری به‌طور متوسط ۰/۳ درصد معادل ۴۵ کیلومتر مکعب در سال کاهش می‌یابد. در قاره آسیا این میزان به ۱ درصد هم می‌رسد (السن و بیسن^۱، ۲۰۰۴). برای جبران حجم ازدست‌رفته ناشی از رسوب‌گذاری علاوه بر هزینه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و فرهنگی ناشی از ساخت سد جدید، سالانه ۱۳ بلیون دلار آمریکا برآورد هزینه شده است. (پالیمیری^۲، ۲۰۰۳). همواره بهره‌برداری مناسب از منابع ذخیره و افزایش عمر مفید سدها در مهندسی سدسازی از اهمیت خاصی برخوردار است.

برای رفع مشکل رسوب‌گذاری از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود که به‌طور خلاصه عبارت‌اند از: عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک، عبور دهی جریان غلیظ، رسوب-شویی هیدرولیکی، استفاده از سیستم کنارگذر برای جریان‌های غلیظ و دفع رسوبات مخزن به‌وسیله ادوات مکانیکی مانند لایروبی و سیفون کردن. بکار بردن این روش‌ها مستلزم شناخت کامل توانایی و محدودیت‌های این روش‌ها است. به‌طوری‌که گاهی اوقات ممکن است استفاده از این روش‌ها در برخی از مخازن اقتصادی نباشد (آتکینسون^۳، ۱۹۹۶).

رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت‌فشار، یک روش مؤثر جهت بازیابی حجم مفید مخازن سد است. به‌ویژه این روش مدیریت رسوب برای مناطقی که از مشکل محدودیت منابع آبی رنج می‌برند، بسیار حائز اهمیت است. به‌علاوه رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت‌فشار به سبب داشتن تأثیر موضعی آب-شستگی در اطراف دریچه‌های تحتانی سد، گزینه بسیار مناسبی برای زدودن رسوب تجمع یافته از آبگیر نیروگاه‌ها است. در این روش ارتفاع آب درون مخزن سد همواره از تراز ارتفاعی دریچه‌های تحتانی بالاتر می‌ماند و به همین دلیل به آن رسوب‌شویی تحت‌فشار اطلاق می‌شود. با باز شدن ناگهانی دریچه‌های تحتانی سد، عملیات بهره‌برداری از این روش آغاز

می‌گردد. به‌گونه‌ای که جریان روزنه‌ای خارج شونده از دریچه‌های تحتانی، با ایجاد یک نیروی فرساینده رسوبات تجمع یافته پشت سد را خارج می‌کند. در این روش پس از مدتی از انجام رسوب‌شویی حفره یا چاله‌ای از آب شستگی به شکل مخروط یا قیف در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی به وجود آمده و توسعه می‌یابد. شکل (۱) نمایی از مدل حفره رسوب‌شویی ایجادشده در مدل فیزیکی سد جببیدم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): پلان حفره رسوب‌شویی مدل فیزیکی سد جببیدم

در مورد موضوع رسوب‌شویی هیدرولیکی مطالعات فراوانی انجام شده است که از جمله می‌توان به مطالعات امامقلی زاده (۲۰۱۴) اشاره کرد که با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی الگوی رفتار جریان در همسایگی دریچه‌های تحتانی و شکل مخروط رسوب‌شویی پرداخت و نشان داد که با کاهش تراز آب پشت مخزن و افزایش دبی تخلیه‌کننده، ابعاد حفره رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. فانگ و کائو^۴ (۱۹۹۶) مطالعاتی را بر روی سد زیپینگپو^۵ واقع در کشور چین انجام دادند. فانگ و کائو به‌منظور بررسی تأثیر تخلیه‌کننده تحتانی در جلوگیری از ورود رسوبات به داخل تجهیزات توربین نیروگاه در رسوب-شویی تحت‌فشار، به مطالعه مدل آزمایشگاهی آن پرداختند. اسچورلین^۶ (۲۰۰۴) در تحقیق خود نشان داد که زمانی که مخروط رسوب‌شویی به تعادل می‌رسد هیچ‌گونه رسوبی خارج نمی‌شود مگر اینکه ارتفاع آب مخزن کاهش یابد. لای و شن^۷

⁶ Scheuerlein

⁷ Lai & Shen

¹ Olesen & Basson

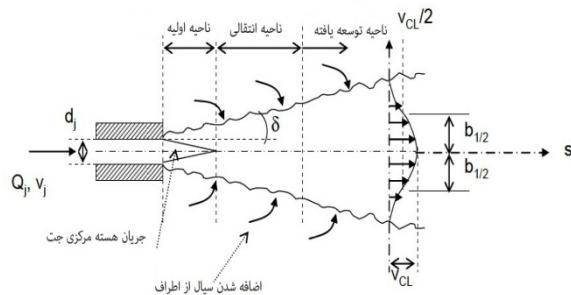
² Palmieri

³ Atkinson

⁴ Fang & Cao

⁵ Zipingpu

کار می‌رود. جریان هسته مرکزی توسط یک لایه برشی آشفته احاطه شده است که لایه اختلاط نیز نامیده می‌شود. این لایه، مرزی را بین جریان هسته مرکزی و سیال مخزن ایجاد می‌کند. در ناحیه انتقالی، سیال از اطراف شروع به اضافه شدن به جریان جت می‌کند و در ناحیه توسعه یافته این اختلاط کامل می‌شود و لایه اختلاط به محور جت نفوذ می‌کند.



شکل (۳): رفتار جریان جت بر طبق نظریه بلوینز (۱۹۸۴)

سرعت جریان جت در خط مرکزی خروجی جت با دور شدن از خروجی و تا رسیدن به ناحیه توسعه یافته کاهش می‌یابد. بر طبق تحقیقات جیرکا^۶ (۲۰۰۴) سرعت جریان جت در خط مرکزی و در جهت محور s و با در نظر گرفتن عدد اشمیت آشفتنگی برابر با $1/20$ به صورت رابطه زیر است:

$$v_{CL}(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha_{jet}}} \cdot \frac{\sqrt{M_j}}{s} \approx 6.43 \frac{v_j d_j}{s} \quad (1)$$

که در آن $\alpha_{jet} = 0.055$ عدد ثابت جت و v_{CL} = سرعت در راستای خط مرکزی خروجی جت.

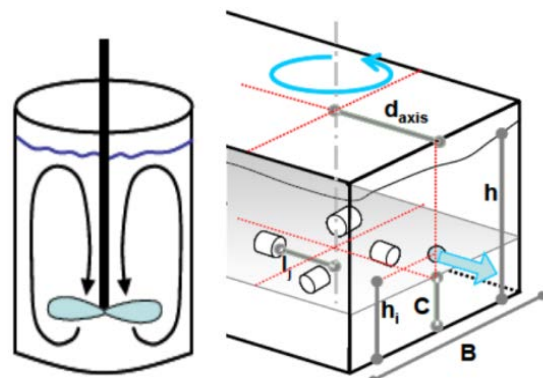
سرعت جریان در جهت شعاعی با فرض یک توزیع گوسین در فاصله r از خط مرکزی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$v(r) = v_{CL}(s) \cdot e^{-c_3(r^2/s^2)} \quad (2)$$

که مقدار c_3 از روی توزیع گوسین و بر اساس روابط بلوینز مقدار ۹۴ است.

در این پژوهش از یک روش جدید برای افزایش رسوب شویی تحت فشار و به خصوص زدودن رسوبات جلوی دهانه آبگیر استفاده شده است که به صورت قابل توجهی رسوبات تخلیه شده جلوی تخلیه کننده را افزایش می‌دهد. در این روش

(۱۹۹۵) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی پدیده رسوب-شویی پرداختند. در تحقیق او رسوبات مورد استفاده دارای قطر متوسط $1/25$ میلی‌متر و از نوع غیرچسبنده بودند. جنزر آلزاس^۱ و همکاران (۲۰۱۵) با ایجاد جریان گردابی با استفاده از جت‌های دایره‌ای به تخلیه جریان‌های معلق و بررسی الگوی جریان پرداختند و نتیجه گرفتند که راندمان خروج جریان گل‌آلود به میزان $1/5$ تا 2 برابر افزایش می‌یابد. ایشان با استفاده از جریان چرخشی ایجاد شده توسط جت‌ها، جریان گل‌آلود ورودی به مخزن را از داخل تونل‌های آبگیر تخلیه می‌کردند (شکل (۲)). ذرات جریان گل‌آلود در مدل ایشان از جنس پوست گردو بود که به دلیل عدم چسبندگی ذرات پوست گردو به جریان و همین‌طور کدر نکردن جریان و داشتن شفافیت و همچنین سبک بودن و معلق ماندن در سیال استفاده شد.



شکل (۲): مدل آزمایشگاهی جت‌های چرخشی در مخزن توسط جنزر آلزاس و همکاران (۲۰۱۵)

شکل (۳) رفتار جریان یک جت بر طبق نظریه بلوینز^۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان جت شامل سه ناحیه است:

۱- ناحیه اولیه^۳، ۲- ناحیه انتقالی^۴ و ۳- ناحیه توسعه یافته^۵. ناحیه اولیه شامل یک جریان هسته مرکزی و یک لایه برشی احاطه کننده است. سرعت در قسمت جریان هسته مرکزی برابر با سرعت خروجی نازل جت (V_j) برای سرعت خروجی یکنواخت است. جریان هسته مرکزی تقریباً بدون بریدگی است و اغلب عبارت‌های جریان پتانسیل یا هسته پتانسیل به

⁴ transition

⁵ fully developed

⁶ Jirka

¹ Jenzer Althaus

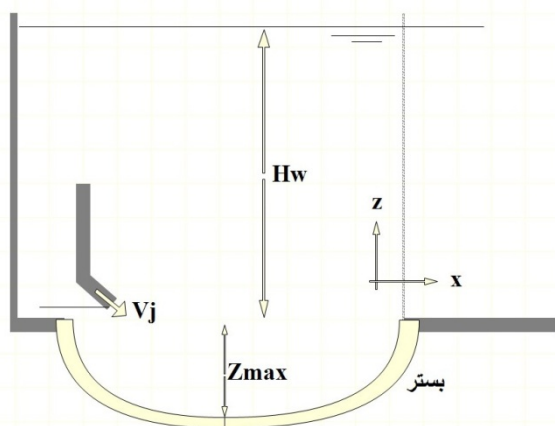
² Blevins

³ initial region

در آزمایش‌ها، پارامترهای L_j , θ_j , B , L , ρ_s , ρ_w ثابت هستند.

مکانیسم عملکرد جت

جت، ذرات رسوب را بلند کرده و به پایین دست محل برخورد حمل می‌کند. در نتیجه محل برخورد جت به یک کاهنده انرژی جریان تبدیل شده و حفره آب شستگی شکل می‌گیرد (شکل (۴)). مهم‌ترین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذرات رسوب شامل مومنوم جریان جت، نیروی درگ یا رانش و نیروهای مقاوم شامل نیروی برشی کف و وزن هستند.



شکل (۴): حفره آب شستگی ناشی از جت مستغرق

در مشخص کردن شرایط آستانه حرکت، موازنه میان لایه رسوبات ساکن بستر تحت اصطکاک کششی جریان روش رایجی است. شیلدز^۲ (۱۹۳۶)، اولین کسی بود که از سرعت اصطکاکی استفاده کرد و یک پارامتر فیزیکی را که بر انتقال رسوبات تأثیر دارد به شکل رابطه زیر نشان داد:

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d} \quad (۴)$$

از طرفی فاکتور اصطکاک بحرانی برابر است با:

$$(\tan \phi)_c = \tau_c^* \Delta D_{90}^* \quad (۵)$$

$$D_{90}^* = \left(\frac{\Delta g}{g^2}\right)^{1/3} \quad (۶)$$

$$\Delta = \rho_s / \rho - 1 \quad (۷)$$

با استفاده از قرارگیری جت در جلوی دهانه خروجی، تخلیه رسوبات انباشته شده در کف مخزن، تحت رسوب‌شویی تحت فشار افزایش می‌یابد. این روش رسوب‌شویی برای مخازنی که در آن مشکل منابع آب وجود دارد، یک گزینه بسیار مناسب است. در مخازنی که حجم جریان ورودی به مخزن خیلی کمتر از حجم ذخیره آن‌ها است، همچنین در مواردی که مشکل رسوب به وجود آمده موضعی^۱ است مانند تجمع رسوبات در جلوی آبگیر (مانند آبگیر نیروگاه سد دز)، می‌توان از این روش بهره گرفت.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

در رسوب‌شویی تحت فشار همراه با جت‌ها، پس از باز کردن دریچه تخلیه کننده رسوبات ته‌نشین شده در طی زمان شروع به خارج شدن می‌کنند تا اینکه به حالت تعادل (T_e) برسد و دیگر رسوبی خارج نمی‌شود. حجم رسوب‌شویی (V_f) به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که عبارت‌اند از:

سرعت خروجی جت‌ها (V_j)، قطر نازل‌ها (d_j)، فاصله قرارگیری جت‌ها از خروجی (L_j)، زاویه نازل با محور افقی (θ_j)، دبی جریان خروجی (Q_{out})، سطح بازشدگی دریچه (A_{out})، ارتفاع رسوبات تجمع یافته پشت مخزن (H_s)، ارتفاع آب مخزن (H_w)، موقعیت تخلیه کننده (H_{out})، عرض مخزن (B)، طول مخزن (L)، چگالی رسوبات (ρ_s) و چگالی آب (ρ_w).

با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و در نتیجه ثابت بودن برخی از پارامترها و عدم بررسی تغییرات آن‌ها در این تحقیق، ترکیب و دسته‌بندی مناسب از گروه‌های بدون بعد با توان‌های معلوم، جایگزین پارامترهای بدون بعد گردیده و در نهایت هر خصوصیت بدون بعد از پدیده موردنظر را می‌توان به شکل تابعی به صورت زیر نشان داد:

$$\frac{V_f}{H_w^3} = f\left(\frac{V_j}{\sqrt{gd_j}}, \frac{L_j}{B}, \theta_j, \frac{Q_{out}/A_{out}}{\sqrt{gH_w}}, \frac{H_{out}}{H_s}, \frac{B}{L}, \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \quad (۳)$$

¹ Local

² Shields

تخلیه کننده با مقطع دایره‌ای شکل (شیر ۲ اینچ) در خط مرکزی فلوم و ارتفاع ۱۵ و ۳۰ سانتی متر استفاده می‌گردد که در هر آزمایش با باز بودن یک دهانه، دهانه دیگر بسته می‌ماند. با توجه به اینکه جریان‌های چرخشی در زیر دریچه تخلیه کننده تحتانی موجب می‌شود مقداری از رسوبات پایین تر از رقوم کف دریچه نیز شسته شوند. لذا، رقوم ارتفاعی تخلیه کننده تحتانی اول ۱۵ سانتی متر بالاتر از رقوم کف مدل در نظر گرفته شد. ارتفاع رسوبات در نظر گرفته شده ۳۰ سانتی متر از کف مخزن و قطر متوسط ذرات رسوب برابر ۰/۲۲۵ میلی متر است. آزمایش‌ها به دو صورت انجام می‌گیرد: (۱) آزمایش‌های بدون جت و (۲) آزمایش‌های با جت‌ها.

• آزمایش‌های بدون جت

در این حالت پس از اینکه کف مخزن از رسوبات مورد نظر تا رقوم مشخص پر شد و مخزن از طریق ناحیه ورودی با آب پر گردید، دهانه تخلیه کننده باز می‌شود و تا رسیدن به حالت تعادل و ایجاد مخروط ادامه می‌یابد. در این زمان برای اینکه ارتفاع آب داخل مخزن ثابت بماند، آب خروجی از مدل توسط پمپ به صورت چرخشی از قسمت پشتی وارد مخزن می‌شود. برای کنترل و اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از تخلیه کننده، علاوه بر سرریز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه واقع در حوضچه ته‌نشینی از یک روتامتر که بعد از پمپ نصب شده بود استفاده شد. با این کار دبی ورودی و خروجی به طور دقیق کنترل و اندازه‌گیری می‌شد. جدول (۱) مشخصات آزمایش‌های انجام شده بدون جت را نشان می‌دهد.

• آزمایش‌های با جت

برای این آزمایش از ۵ عدد جت استفاده شد. برای ثابت نگه داشتن ارتفاع آب در مخزن، از یک روش منحصربه‌فرد استفاده گردید به این صورت که برای تأمین آب جت‌ها از آب خود مخزن اصلی و از قسمت پشتی مخزن (ناحیه آرام کننده جریان) استفاده شد که توسط پمپ دیگری عمل چرخش آب را انجام می‌داد؛ با این روش مقدار آب خروجی از مخزن اصلی و آب خروجی از جت‌ها با هم برابر می‌شد و ارتفاع مخزن ثابت می‌ماند. در این آزمایش‌ها نیز برای کنترل و اندازه‌گیری دبی

هافمنز^۱ (۱۹۹۵) با نوشتن معادلات تعادل و حل ۸ معادله ۸ مجهول، در نهایت ماکزیمم عمق رسوب شویی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$Z_{max} + H_w = \frac{\sqrt{Q_j V_j \sin \theta / g}}{(c_{2v})^{-1}} \quad (8)$$

$$c_{2v} = \sqrt{\frac{20}{D_{90}^{2/3}}} \quad (9)$$

که در روابط فوق، θ = زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب، θ = زاویه نازل جت با محور افق، τ_c = تنش برشی بحرانی و Z_{max} = ماکزیمم عمق رسوب شویی.

شرح مدل فیزیکی

مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک) ساخته شد. مدل اصلی به شکل مکعب مستطیلی و دارای طول کلی ۲/۳۰ متر به عرض ۱/۲۰ متر و به ارتفاع ۱/۲۰ متر است. برای مشاهده کیفی داخل مخزن دو بخش از مخزن (بخش جلویی و کناری) از جنس پلکسی گلاس و بقیه قسمت‌های مدل فلزی است. کل سیستم مدل آزمایشگاهی بر روی اسکلت فلزی به ارتفاع ۱۲۰ سانتی متر قرار داده شد.

مدل دارای سه قسمت اصلی است: ۱- قسمت ورودی مدل (ناحیه آرام کننده جریان)، ۲- مخزن اصلی مدل و ۳- ناحیه اندازه‌گیری جریان خروجی از مدل (حوضچه ته‌نشینی رسوبات).

قسمت ورودی مدل دارای ابعادی به طول ۳۰ سانتی متر به عمق ۱/۲۰ متر و عرض ۱/۲۰ متر است. در این قسمت تلاطم جریان ورودی گرفته شده و جریان به صورت آرام وارد مخزن می‌شود. قسمت اصلی مخزن دارای ابعادی به طول ۲ متر و به عمق ۱/۲۰ متر و به عرض ۱/۲۰ متر است. حوضچه ته‌نشینی رسوبات به طول ۱۳۵ سانتی متر و به عمق ۷۰ سانتی متر و عرض ۹۰ سانتی متر بوده که شامل دو قسمت است؛ قسمت اول شامل توری برای آرام سازی جریان و قسمت دوم شامل یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه جهت اندازه‌گیری جریان خروجی از تخلیه کننده. برای رسوب شویی، از دو

با توجه به مختصات آن‌ها به نرم‌افزار Surfer داده شده و حجم رسوب‌شویی در هر آزمایش محاسبه می‌گردد. همچنین در طی هر آزمایش در بازه‌های زمانی مختلف آزمایش قطع شده و رسوبات خروجی از مخزن برداشت می‌شد و بعد از اتمام هر آزمایش توسط ترازو وزن می‌گردید. شکل (۵) و (۶) پلان و نمای مدل فیزیکی نشان داده شده است و در جدول (۲) مشخصات آزمایش‌های با جت‌ها آورده شده است.

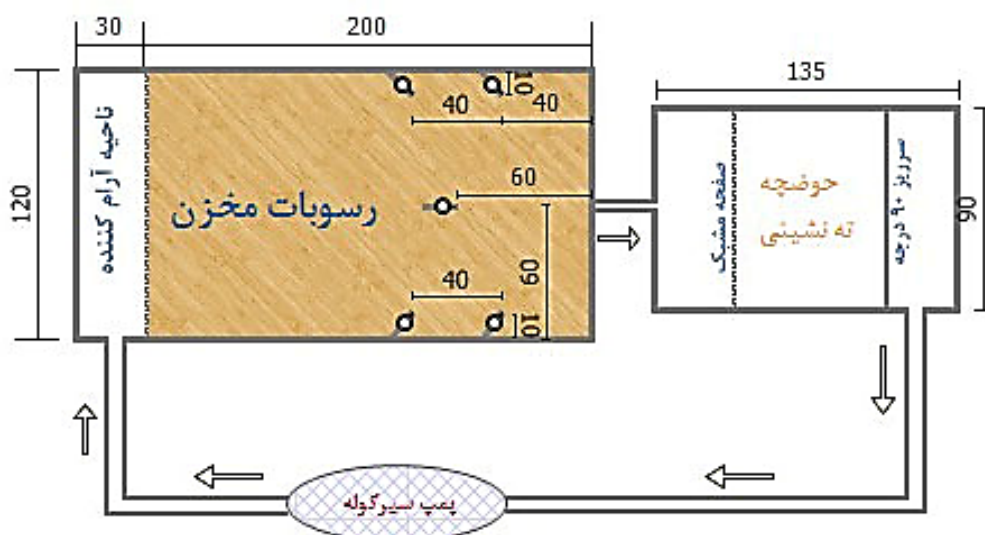
جت‌ها از یک روتامتر استفاده شد و توسط ۵ شیر میزان دبی در جت‌ها به صورت یکسان توزیع شد. برای اینکه دیواره‌های کناری بر جریان جت تأثیر نداشته باشند، جت‌های کناری از هر طرف از دیواره‌ها به اندازه ۱۰ سانتی‌متر فاصله داده شد. بعد از انجام هر آزمایش لازم بود پروفیل رسوب‌شویی برداشت شود. برای این منظور از یک متر لیزری که بر روی یک کالسکه نصب می‌شد استفاده گردید. به‌منظور برداشت پروفیل بستر از یک شبکه ۵×۵ سانتی‌متری استفاده شد. رقوم ارتفاعی گره‌ها

جدول (۱): مشخصات آزمایش‌های مرجع (بدون جت)

$H_s(cm)$	$H_w(cm)$	$H_{out}(cm)$	$Q_{out}(lit/s)$
۳۰	۱۰۰ و ۷۰ و ۴۰	۱۵	۴ و ۲/۵، ۱

جدول (۲): مشخصات آزمایش‌های انجام‌گرفته با جت‌ها

$H_s(cm)$	$H_w(cm)$	$H_{out}(cm)$	$Q_{out}(lit/s)$	jet. N	$V_j(m/s)$	$d_j(mm)$	$\sum Q_j(lit/s)$
۳۰	۱۰۰	۳۰ و ۱۵	۲/۵	۵	۱/۸ و ۱/۲ و ۰/۱۶	۴	۰/۶ و ۰/۴ و ۰/۲
۳۰	۱۰۰	۳۰ و ۱۵	۲/۵	۵	۱/۸ و ۱/۲ و ۰/۱۶	۶	۱/۲ و ۰/۸ و ۰/۴
۳۰	۱۰۰	۳۰ و ۱۵	۲/۵	۵	۱/۸ و ۱/۲ و ۰/۱۶	۸	۲/۲۵ و ۱/۵ و ۰/۱۸



شکل (۵): پلان مدل فیزیکی

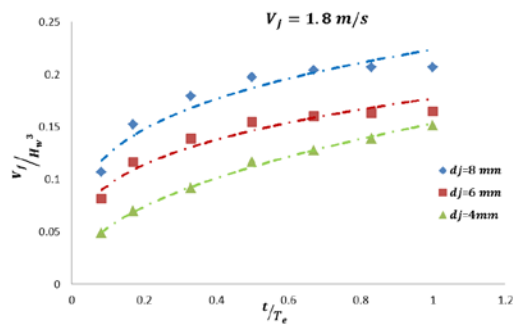


شکل (۶): تصویری از مدل ساخته شده

ترازهای پایین تر افزایش می یابد. به این ترتیب مقدار بیشتری از رسوبات کف شست و شو داده شده و در نتیجه حجم رسوب-شویی افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت خروجی جت، رسوبات در زمان کمتری شسته می شوند. همین طور برای یک سرعت خروجی جت ثابت، با افزایش قطر جت ها، حجم رسوب شویی افزایش می یابد. با افزایش قطر نازل جت ها ناحیه تحت تأثیر ناشی از جت افزایش یافته و در نتیجه سطح بیشتری توسط جت شسته می شود. شیب تند تغییرات زمانی حجم رسوب شویی در زمان های ابتدایی، نشان دهنده خروج رسوبات با غلظت زیاد بوده که با گذشت زمان و رسیدن به حالت تعادل از این غلظت کاسته می شود؛ بنابراین مشخص است که راندمان رسوب شویی در زمان های اولیه بیشترین مقدار خود را دارد. در جدول (۳) میزان تأثیر مستقل هر یک از پارامترهای قطر جت، سرعت خروجی جت و تراز دهانه خروجی بر حجم رسوب شویی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که از بین پارامترهای مذکور، تغییرات سرعت خروجی جت بیشترین تأثیر را بر میزان حجم رسوب-شویی دارد. با ثابت ماندن دیگر پارامترها و با تغییر سرعت خروجی جت از ۳ متر بر ثانیه به ۶ و ۹ متر بر ثانیه، حجم رسوب شویی در کمترین میزان ۵۰ درصد و بیشترین میزان حدود ۱۸۰٪ درصد افزایش می یابد.

نتایج

به منظور دست یابی به اهداف تحقیق و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده، تغییرات حجم رسوب شویی در مقابل پارامترهای دیگر مورد بررسی قرار می گیرد. در اشکال (۷) تا (۱۱) تأثیر پارامترهای متغیر بی بعد شده بر حجم رسوب شویی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود هر چه رقوم ارتفاع رسوب نسبت به خروجی بالاتر باشد حجم رسوب-شویی بیشتر خواهد بود؛ زیرا در ترازهای پایین تر نرخ گسترش ابعاد مخروط رسوب شویی افزایش می یابد و لذا رسوبات بیشتری تخلیه می شود؛ اما نباید از این موضوع غافل بود که افزایش بیش از حد رسوبات باعث تحکیم رسوبات نهشته شده گردیده و این امر سبب ایجاد مشکلاتی در خروج رسوبات از تخلیه کننده خواهد شد؛ به طوری که اقدامات اضافی برای سهولت تخلیه رسوبات و در نتیجه صرف هزینه بیشتر الزامی خواهد بود؛ بنابراین ملاحظات اقتصادی نیز در مدیریت رسوب شویی مخازن باید در استفاده از این نتایج مورد توجه قرار گیرد. همچنین مشاهده می شود که برای یک قطر ثابت با افزایش سرعت خروجی جت ها، حجم رسوب شویی افزایش می یابد. برای تفسیر، می توان گفت که با افزایش سرعت خروجی جت ها، میزان تنش برشی وارد بر کف افزایش یافته و همچنین امکان رسیدن فشار ناشی از سرعت های بالا بر



شکل (۱۱): نمودار بی بعد تغییرات زمانی حجم رسوب شویی با سرعت خروجی جت ۱/۸ متر بر ثانیه

جدول (۳): تأثیر پارامترهای متغیر بر میزان حجم رسوب شویی در آزمایش های جت

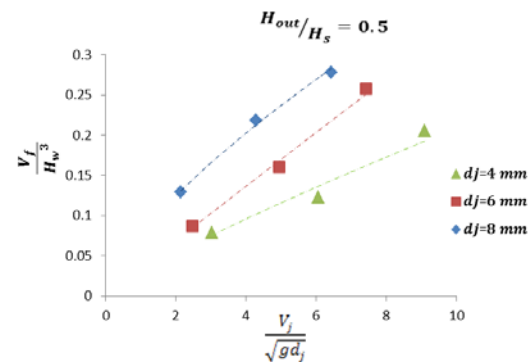
	کمینه تغییر حجم رسوب شویی	بیشینه تغییر حجم رسوب شویی
تأثیر تغییرات	٪۵۰	٪۱۸۰
تأثیر تغییرات قطر	٪۱۱	٪۷۰
تأثیر تغییرات تراز	٪۱۴	٪۳۷

شکل (۱۲) روند افزایشی راندمان رسوب شویی را نشان می دهد. برای یک دبی تخلیه ثابت و در یک تراز خروجی ثابت با افزایش عدد بی بعد شامل سرعت و قطر جت، راندمان رسوب شویی افزایش می یابد. راندمان رسوب شویی در واقع نسبت حجم رسوبات تخلیه شده به حجم آب تخلیه شده در مدت زمان تعادل است که توسط کیان^۱ (۱۹۸۲) به عنوان راندمان رسوب شویی تعریف شده است. همین طور با پایین آمدن تراز تخلیه کننده راندمان رسوب شویی افزایش می یابد. فرم های توانی برازش داده شده در شکل (۱۲) را می توان با رابطه ای ساده به شکل زیر تخمین زد:

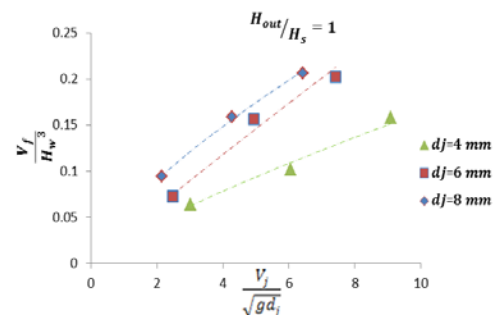
$$\frac{V_f}{V} = a \left(\frac{\sum Q_j V_j}{g H_w^3} \right)^b \quad (10)$$

که ضریب a و مقدار ثابت b = توابع معینی از تراز نسبی تخلیه کننده.

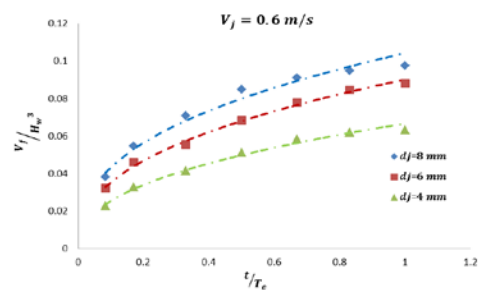
مقدار برآورد شده راندمان رسوب شویی توسط رابطه در مقابل تمام مقادیر اندازه گیری شده در شکل (۱۳) ترسیم شده است. ضریب تبیین ۰/۹۲۶ و نزدیکی نقاط مشاهده ای با خط انطباق کامل، بیانگر برازش مناسب نتایج حاصل از این تحقیق توسط این رابطه است.



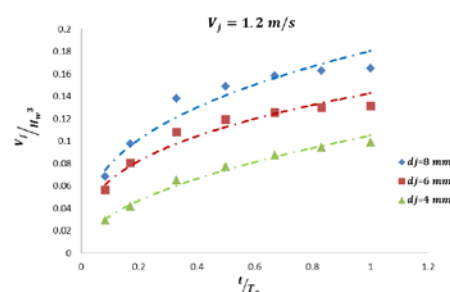
شکل (۷): تغییرات سرعت خروجی جت در مقابل حجم رسوب شویی در تراز تخلیه کننده ۱۵ سانتی متر



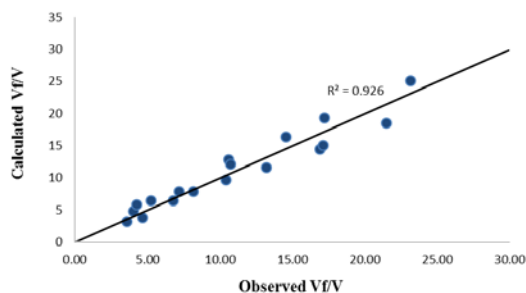
شکل (۸): تغییرات سرعت خروجی جت در مقابل حجم رسوب شویی در تراز تخلیه کننده ۳۰ سانتی متر



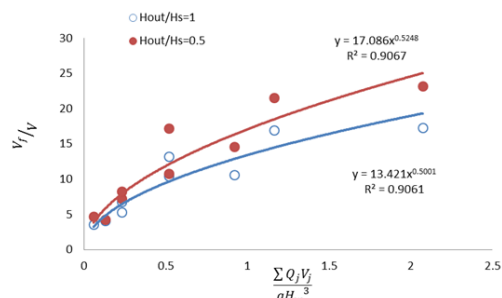
شکل (۹): نمودار بی بعد تغییرات زمانی حجم رسوب شویی با سرعت خروجی جت ۰/۶ متر بر ثانیه



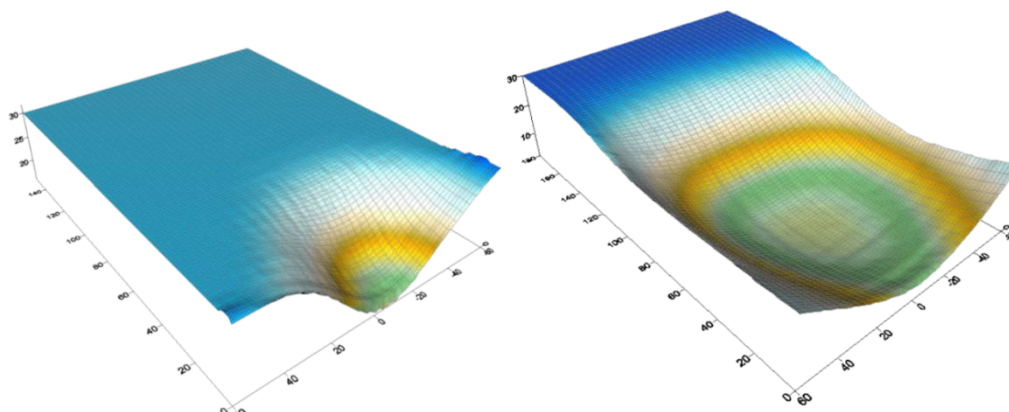
شکل (۱۰): نمودار بی بعد تغییرات زمانی حجم رسوب شویی با سرعت خروجی جت ۱/۲ متر بر ثانیه



شکل (۱۳): مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و محاسبه شده راندمان رسوب‌شویی توسط رابطه (۱)



شکل (۱۲): تغییرات راندمان رسوب‌شویی با تغییرات عدد بی بعد شامل قطر و سرعت خروجی جت



شکل (۱۴): شکل سه‌بعدی مخروط رسوب‌شویی. الف) شکل چپ آزمایش مرجع (بدون جت)، ب) شکل راست آزمایش با جت

افزایش ناحیه تحت تأثیر رسوب‌شویی شده و رسوب بیشتری تخلیه می‌شود. در رسوب‌شویی تحت فشار برای داشتن بیشینه راندمان بهتر است تا جایی که شرایط بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد، ارتفاع آب مخزن را کاهش داد. مقادیر راندمان رسوب‌شویی آزمایش‌های جت برای یک دبی خروجی ثابت، با توجه به مقدار سرعت خروجی جت و قطر نازل‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای از راندمان رسوب‌شویی آزمایش‌های بدون جت بالاتر است؛ که نشان از تأثیر قابل توجه جت‌ها بر میزان رسوب‌شویی دارد.

در شکل (۱۴) تصویر سه‌بعدی پروفیل برداشت‌شده مخروط رسوب‌شویی اطراف تخلیه‌کننده با برنامه Surfer بعد از انجام یکی از آزمایش‌های مرجع و جت نشان داده شده است. برای از بین بردن خطای محاسباتی با توجه به ابعاد مش ۵×۵، رسوبات خروجی به‌صورت دقیق اندازه‌گیری حجمی گردید و از پروفیل برداشت‌شده صرفاً جهت ترسیم شکل سه‌بعدی استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری شده حجم رسوب-شویی در دو حالت با جت و بدون جت در جداول (۴) و (۵) آورده شده است. ارتباط بین پارامتر ارتفاع آب مخزن و حجم مخروط رسوب‌شویی معکوس است. به عبارت بهتر کاهش ارتفاع آب مخزن، موجب افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی می‌شود. به این معنی که در یک دبی ثابت، هرچه عملیات رسوب‌شویی هیدرولیکی در ارتفاع پایین‌تری رخ دهد، ابعاد حفره رسوب‌شویی بزرگ‌تر خواهد بود؛ زیرا با کاهش ارتفاع مخزن برای اینکه دبی را ثابت نگه داریم باید میزان بازشدگی تخلیه‌کننده تحتانی را افزایش دهیم؛ در نتیجه این امر سبب

جدول (۴) حجم رسوبشویی اندازه‌گیری شده برای آزمایش‌های بدون جت

EX.N	H_s (cm)	H_w (cm)	H_{out} (cm)	Q_{out} (lit/s)	V_f (cm ³)
R1	۳۰	۱۰۰	۱۵	۱	۹۳۴۰
R2	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲/۵	۱۱۷۲۰
R3	۳۰	۱۰۰	۱۵	۴	۱۳۴۵۰
R4	۳۰	۷۰	۱۵	۱	۹۷۶۰
R5	۳۰	۷۰	۱۵	۲/۵	۱۲۱۲۰
R6	۳۰	۷۰	۱۵	۴	۱۳۹۵۰
R7	۳۰	۴۰	۱۵	۱	۱۰۵۵۰
R8	۳۰	۴۰	۱۵	۲/۵	۱۲۶۳۰
R9	۳۰	۴۰	۱۵	۴	۱۴۹۳۵

جدول (۵) حجم رسوبشویی اندازه‌گیری شده برای آزمایش‌های با جت ($H_{out}=15\text{cm}$)

EX.N	H_s (cm)	H_w (cm)	H_{out} (cm)	Q_{out} (lit/s)	V_j (m/s)	d_j (mm)	V_f (cm ³)
J1	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۰.۶	۴	۸۳۷۵۲
J2	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۰.۶	۶	۹۶۶۰۳
J3	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۰.۶	۸	۱۲۹۴۶۹
J4	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۲	۴	۱۲۲۸۵۶
J5	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۲	۶	۱۶۰۹۴۳
J6	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۲	۸	۲۱۸۶۴۸
J7	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۸	۴	۲۰۵۶۶۰
J8	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۸	۶	۲۵۸۰۳۸
J9	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲.۵	۱.۸	۸	۲۷۷۶۹۷

جدول (۶) مقادیر راندمان رسوبشویی آزمایش‌های مرجع (بدون جت) و آزمایش‌های جت

EX.N	راندمان رسوبشویی در ۱۰ دقیقه اول	راندمان رسوبشویی در ۶۰ دقیقه
R2	۷/۸۱	۱/۳
R5	۸/۰۸	۱/۳۵
R8	۸/۴۲	۱/۴
J1	۱۵/۳	۹/۳
J2	۲۲/۱۶	۱۰/۷۳
J3	۲۹/۳۸	۱۴/۳۸
J4	۳۲/۹۵	۱۳/۶۵
J5	۵۲/۵۵	۱۷/۸۸
J6	۶۹/۱۴	۲۴/۲۹
J7	۵۲/۲۷	۲۲/۸۵
J8	۷۲/۹۱	۲۸/۶۷
J9	۸۱/۸	۳۰/۸۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار اثر جت بر میزان رسوبشویی تحت فشار اطراف خروجی تخلیه‌کننده مخزن سد مورد بررسی قرار گرفت. جهت دستیابی به اهداف این تحقیق یک مدل فیزیکی ساخته شد که خلاصه‌ای از نتایج حاصل به شرح زیر است:

رقوم تراز تخلیه‌کننده به‌عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند از بین این پارامترها، سرعت خروجی جت بیشترین تأثیر را در افزایش میزان رسوبشویی داشتند؛ به طوری که با افزایش سرعت خروجی جت از ۰/۶ متر بر ثانیه به ۱/۲ و ۱/۸ متر بر ثانیه و با ثابت ماندن دیگر پارامترهای متغیر، حجم رسوبشویی در کمترین میزان حدود ۵۰٪ و در بیشترین میزان ۱۸۰٪ افزایش داشت.

۲- تأثیر پارامترهای مذکور بر راندمان رسوبشویی مورد بررسی قرار گرفت و یک رابطه بی‌بعد توانی بین راندمان رسوبشویی و پارامترهای مؤثر به دست آمد که مقادیر

۱- آزمایش‌ها در دو حالت آزمایش‌های مرجع (بدون جت) و آزمایش‌های جت انجام گرفت. در آزمایش‌های جت از بین پارامترهایی که بر رسوبشویی اثر می‌گذاشتند، مهم‌ترین متغیرها شامل سرعت خروجی جت و قطر نازل و همچنین

9- Olesen, K. W. and Basson, G. (2004). "1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs." Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran.

10- Palmieri, A. (2003). "Social and economic aspects of reservoir conservation." World Water Forum, Kyoto, Japan.

11- Qian, N. (1982). "Reservoir sedimentation and slope stability, technical and environmental effects." Fourteenth International Congress on Large Dams, Transactions, Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 May, Vol .3, pp: 639-690.

12- Scheuerlein, H., Tritthart, M., and Nunez Gonzalez, F. (2004). "Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs." Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran, pp: 245-254.

13- Shen, H. W. and Lai J. S. (1996). "Sustain reservoir useful life by flushing sediment." *International Journal of Sediment Research*. 11(3), 10-17.

14- Shields, A. (1936). "Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement." Preussiischen Research Institute of Hydraulic Engineering, Berlin, Germany, Issue 26.

اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده توسط رابطه مذکور، ضریب همبستگی بالایی را نشان داد.

۳- راندمان رسوب‌شویی آزمایش‌های جت بسته به سرعت و قطر جت به‌طور قابل‌توجهی از آزمایش‌های مرجع بالاتر بود که نشان از تأثیر فراوان جت‌ها داشت.

۴- روش جت می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب در کنار سایر روش‌های رسوب‌گذاری در مدیریت بهره‌برداری از مخازن به کار گرفته شود هرچند این روش به جهت جدید بودن برای نهایی شدن نیاز به بررسی و تحقیقات بیشتر در ابعاد مختلف دارد.

منابع

1- Atkinson, E. (1996). "The feasibility of flushing sediment from the reservoir." *Report OD 137*.

2- Blevins, R. D. (1984). "Applied fluid dynamics handbook." Reprint edition with corrections.

3- Krieger Publishing Company, Malabar, Florida 32950.

4- Emamgholizadeh, S. and Fathi-Moghdam, M. (2014). "Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs." *Journal of Hydrologic Engineering*. 19(4), 674-681.

5- Fang, D, and Cao, S. (1996). "An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir." Proceedings of the 6th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, March 10-14, pp: I.78-I.84.

6- Hoffmans, G. J. C. M. (2009). "Closure problem to jet scour." *Journal of Hydraulic Research*. 47(1), 100-109.

7- Althaus, J., Cesare, G. and Schleiss, A. (2015). "Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet-Induced Flow." *Journal of Hydraulic Engineering*. 141(2), 04014078.

8- Jirka, G. (2004). "Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet." *Environmental Fluid Mechanics*. 4(1), 1-56.