

## بررسی عددی اثر پارامترهای رسوب و تراز پایاب بر آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D

نازیلا کاردان، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

محمد حسین بهپور\*؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی منابع آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۰

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۳)

### چکیده

آبشستگی موضعی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به وجود می‌آید. عوامل موثر بر میزان تغییرات پروفیل آبشستگی موضعی و نحوه‌ی کنترل آن در مجاری روباز توسط محققین متعدد به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق که به صورت مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Flow3D صورت گرفته است، هدف بررسی تغییرات عوامل مختلف نظیر تغییر در میزان بازشدگی دریچه کشویی، اندازه رسوبات بستر، نوع مدل آشفتگی و تعداد سلول‌های میدان محاسباتی، بر میزان آبشستگی پایین‌دست دریچه‌های کشویی می‌باشد. نتایج نشان داد مدل آشفتگی LES با معادله انتقال رسوب Van Rijn، برای شبیه‌سازی خصوصیات آشفتگی جریان مناسب‌تر است. به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل عددی، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی مشخص شد که مدل Flow3D از دقت بالایی در شبیه‌سازی آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی برخوردار است. علاوه بر این مطالعات نشان داد بازشدگی به عنوان یک شاخص، به تنهایی بر روی بیشینه عمق آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی بدون کف‌بند، تاثیرگذار نیست؛ بلکه شدت جت عبوری از زیر دریچه اثر غالب بر میزان آبشستگی دارد، هرچقدر جت عبوری از زیر دریچه بیش‌تر باشد بیشینه عمق آبشستگی نیز به تبع آن بیشتر می‌گردد.

واژگان کلیدی: آبشستگی، دریچه کشویی، مدل‌سازی عددی، Flow3D.

\* نویسنده مسئول: [mhosein.behpour@gmail.com](mailto:mhosein.behpour@gmail.com)

## ۱- مقدمه

آبشستگی موضعی یکی از موضوعات مهم و قابل توجه در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی است. پدیده‌ی آبشستگی یا همان عمل فرسایش زمانی رخ می‌دهد که مقدار رسوب وارد شده در یک بازه‌ی مورد بررسی، کمتر از مقدار رسوب خارج شده باشد؛ با عمل فرسایش در مجاورت سازه‌های حساس، بستر رودخانه به تدریج گود می‌شود. از جمله مشکلاتی که در اثر گود شدن بستر رودخانه ایجاد می‌شود می‌توان به شکست برشی و لغزشی در بستر و نیز افزایش گرادیان هیدرولیکی خروجی اشاره کرد که در نهایت با افزایش فشار بالا برنده و ایجاد پدیده تراوش، ضریب اطمینان سازه در برابر واژگونی و لغزش به شدت کاهش پیدا کرده و پایداری سازه با مشکل مواجه می‌شود. از این رو، شناخت درست عمل فرسایش و آبشستگی موجب می‌شود طراحان سازه‌ای و هیدرولیکی دید دقیق‌تری به طراحی سازه‌های هیدرولیکی مختلف داشته باشند و با لحاظ نمودن ضوابط اولیه مربوط به کنترل آبشستگی، یک طرح بهینه و ایمن ارائه نمایند (Kardan et al., 2014). بنابراین مطالعه و در نظر گرفتن عمل فرسایش و آبشستگی برای بستر سازه‌های هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت بوده و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام یافته است.

Farhoudi and Smith (۱۹۸۵، ۱۹۸۲) فرآیند آبشستگی در پایین‌دست پرش هیدرولیکی را بررسی و ویژگی‌های کلی این فرآیند و حفره‌ی آبشستگی را بیان نمودند. ایشان نشان دادند بعد از گذشت زمان شرایط تعادلی آبشستگی برقرار شده و برای منحنی آبشستگی یک معادله‌ی بدون بُعد ارائه کردند. Hassan and Narayanan (۱۹۸۵) آبشستگی پایین‌دست دریاچه کشویی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و بعد از برقراری شرایط تعادلی یک رابطه‌ی تجربی برای تغییرات زمانی منحنی آبشستگی ارائه نمودند. Chatterjee و همکاران (۱۹۹۴) پدیده‌ی آبشستگی و انتقال رسوب را در پایین‌دست دریاچه‌های کشویی مستغرق بررسی نموده و نشان دادند مشخصات آبشستگی را می‌توان به وسیله‌ی زمان تعادل، محل بیشینه عمق آبشستگی و فاصله نقطه‌ی بالای تلماسه از کف بند صلب، بیان کرد. سپس توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی را با استفاده از رابطه‌ی حجم کل آبشستگی در هر زمان و بیشینه عمق آبشستگی به ازای خصوصیات جریان و اندازه ذرات، ارائه نمودند. Hoffmans and Pilarczyk (۱۹۹۵) آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌های کشویی را بررسی کرده و اثر طول کف صلب و فاصله‌ی بستر رسوبی بر میزان فرسایش بستر رسوبی را ارزیابی نمودند.

Balachandar and Kells (۱۹۹۷) پدیده‌ی آبشستگی بستر ماسه‌ای در پایین‌دست دریاچه کشویی را با مدنظر قراردادن دادن طول کوتاه کف بند مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مشاهده نمودند فرآیند توسعه حفره آبشستگی به دو مرحله حفر کردن و پر کردن دوباره، تقسیم می‌شود و بیان داشتند جریان خروجی از زیر دریاچه مستقیماً با بستر ماسه‌ای برخورد کرده و یک آبشستگی سریع ایجاد می‌نماید. Balachandar و همکاران (۲۰۰۰) اثر اندازه رسوب بستر رسوبی پایین‌دست دریاچه کشویی را بررسی نمودند. نتایج مطالعات نشان داد که میزان عمق آبشستگی برای ذرات رسوبی غیریکنواخت بسیار کمتر از ذرات رسوبی با دانه‌بندی یکنواخت است. Kells و همکاران (۲۰۰۱) به صورت آزمایشگاهی تاثیر اندازه رسوب و دبی جریان را بر آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌های کشویی مورد ارزیابی قرار دادند. Gaudio and Marion (۲۰۰۳) سیر تکوین حداکثر عمق آبشستگی نسبت به زمان در پایین‌دست کف بند را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و نشان دادند عمق حفره آبشستگی در زمانی کوتاه گسترش پیدا کرده و این مقدار بسیار نزدیک به عمق حفره در زمان تعادل است. Shiva و همکاران (۲۰۰۴) آبشستگی موضعی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریاچه کشویی قائم در شرایط وجود مصالح چسبنده در بستر فرسایش‌پذیر به صورت آزمایشگاهی با در نظر گرفتن میزان رس، بازشدگی دریاچه، و عمق پایاب مختلف در فلوام مستطیلی انجام دادند.

Adduce and Sciortino (۲۰۰۶) در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی موضعی در پایین‌دست یک آب‌پایه همراه با کف بند در شرایط آبشستگی آب زلال در حالات مختلف با تغییر دبی و عمق پایاب پرداختند و به این نتایج دست یافتند که منحنی‌های بدون بعد آبشستگی در تمامی آزمایشات شبیه هم هستند. Dey and Sarkar (۲۰۰۶) گودال‌های آبشستگی پایین‌دست دریاچه در شرایط مختلف را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند تغییرات زمانی عمق آبشستگی به صورت رابطه‌ی نمایی است. این محققان دریافته‌اند در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آبشستگی مستقل از عدد فرود ذره می‌گردد. Dey and Sarka (۲۰۰۷) به بررسی اثر جریان نشستی رو به بالا بر آبشستگی پایین‌دست کف بند پرداختند.

AliHosseini و همکاران (۲۰۰۸) تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین‌دست جت افقی مستغرق را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که پروفیل بی بعد شده طول آبشستگی مستقل از زمان است. Omid و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، تاثیر عمق پایاب بر هندسه گودال آبشستگی در پایین‌دست بستر حفاظت شده به وسیله کف‌بند را مطالعه نمودند. نتایج مطالعات نشان داد تاثیر عمق پایاب به عدد فرود ذرات بستگی دارد به طوری که در اعداد فرود کم، افزایش عمق پایاب منجر به تشدید آبشستگی می‌شود. این در حالی است که در اعداد فرود بالا یک عمق پایاب بحرانی وجود دارد که در آن حداقل فرسایش رخ می‌دهد. Hosseini (۲۰۰۹) با انجام شبیه‌سازی فیزیکی منحنی حفره آبشستگی در زمان‌های مختلف را ثبت نمود. تحلیل نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی تشابه هندسی بین پروفیل‌های طولی آبشستگی می‌باشد. به عبارتی پس از بررسی پارامترهای مختلف مانند ضخامت جت (میزان بازشدگی دریاچه کشویی)، دبی، سرعت جت، عمق پایاب، قطر دانه‌بندی ذرات رسوبی، انطباق بسیار خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد مشاهده شد. این امر نشان دهنده‌ی آن است که منحنی‌های آبشستگی شبیه به هم بوده و در حالت بی‌بعد مستقل از تمامی پارامترها و عوامل ذکر شده می‌باشند.

Goel and Pal (۲۰۰۹) بیان داشت آبشستگی در پشت دریاچه کشویی به دبی و عمق پایاب و نیز به شرایط جریان در طرف دیگر دریاچه و زیر دریاچه و میزان بازشدگی آن بستگی دارد. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی این محققان، بیشینه عمق و حجم آبشستگی به میزان دبی عبوری، عمق پایاب و... حساس می‌باشند. Dehghani and Bashiri (۲۰۰۹) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از عبور همزمان جریان از زیر دریاچه و روگذری از آن پرداختند. آنها برای مقایسه نتایج، حداکثر عمق آبشستگی تنها ناشی از جریان روگذر و نیز حداکثر عمق آبشستگی تنها ناشی از جریان عبوری از زیر دریاچه را بررسی کردند. نتایج نشان داد در یک عدد فرود جریان ثابت، با افزایش ارتفاع روگذری، حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش نسبت عمق آب به روی سرریز به بازشدگی دریاچه، نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عمق آب در پشت دریاچه افزایش می‌یابد. لذا قسمت عمده آبشستگی در جریان ترکیبی، مربوط به عبور جریان روگذر است. Baghdadadi و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی عددی آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های افقی مستغرق با استفاده از مدل عددی FLOW3D به صورت سه‌بعدی پرداختند. ایشان در تحقیق خود حالت‌های مختلف بازشدگی دریاچه و دبی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعات حاکی از وجود، خطای حدود ۱۱ درصد بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی بود. با توجه به پیچیدگی‌های پدیده آبشستگی و رسوب، نتایج مطلوبی حاصل شد.

Shiva و همکاران (۲۰۱۵) دریافته‌اند با گذشت زمان ابعاد منحنی آبشستگی افزایش یافته ولی نرخ افزایش آن کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش عمق جریان در حفره آبشستگی، طبق قانون پیوستگی از سرعت جریان کاسته شده و در نتیجه تنش برشی کاهش می‌یابد. این مکانیسم موجب کاهش نرخ آبشستگی با گذشت زمان می‌گردد که مشابه آبشستگی در مصالح چسبنده بدون کف‌بند و مصالح غیرچسبنده می‌باشد. Rustlati و همکاران (۲۰۱۷) اثر چسبندگی مواد بستر بر آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌های کشویی را بررسی نمودند. مطالعات نشانگر عمق آبشستگی پایین‌دست دریاچه شدیداً از جنس مواد رسوبی بستر تاثیر می‌گیرد. Carvalho و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی هندسه‌ی گودال آبشستگی در پایین‌دست دریاچه‌ی کشویی پرداخته و اثر پارامترهای مختلف نظیر قطر رسوب و طول کف‌بند را مورد ارزیابی قرار دادند. Sharafati و همکاران (۲۰۲۰) به صورت آزمایشگاهی فرسایش بستر در پایین‌دست دریاچه‌های کشویی را بررسی و سپس با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به پیش‌بینی میزان آبشستگی پرداخته و نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی را بررسی نمودند.

در شبیه‌سازی آبشستگی، اغلب تحقیقات انجام یافته بصورت آزمایشگاهی بوده است؛ لیکن امروزه با توجه به توسعه‌ی سیستم‌های کامپیوتری و محاسباتی، و نیز وجود پیچیدگی‌های غیرقابل اندازه‌گیری در جریان عبوری از پیرامون سازه‌های هیدرولیکی در حالت‌های مختلف جریان، استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌تواند در بررسی هیدرولیکی چنین جریان‌هایی موثر واقع شود. در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی فرسایش پایین‌دست دریاچه‌های کشویی مورد توجه قرار گرفته و اثر تغییر در عوامل مختلف نظیر بازشدگی دریاچه، و اندازه رسوب بستر بر منحنی آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌های کشویی با استفاده از مدل نرم‌افزاری Flow3D مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا با مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود، صحت نتایج عددی با استفاده از معیارهای خطا ارزیابی شده و سپس نمودارها و نتایج مربوط به هر گروه از مدل‌های مورد بررسی، ارائه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- نرم افزار Flow3D

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته، از بسته نرم افزاری Flow3D استفاده شده است که توانایی محاسبات بالا در جریان کانال‌های باز را دارا می‌باشد. در این مدل عددی، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌گردند. در این روش میدان محاسباتی به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیلی تقسیم‌بندی شده که برای هر سلول میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی تمامی متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال<sup>۱</sup> و روش کسر مساحت-حجم مانع<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی هندسی مرزها استفاده می‌شود. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد آب (مرز آب و هوا) و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و مرزهای هندسی احجام صلب (مرز آب و جامد) کاربرد دارد. مدل هیدرودینامیک بر مبنای حل معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی و معادله پیوستگی می‌باشد. معادلات ناویراستوکس و پیوستگی مورد استفاده در Flow3D برای جریان‌های غیرقابل تراکم در ادامه آمده است (Flow Science Inc. 2008):

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_j} + G_i + f_i - k u_i \quad (2)$$

در این رابطه؛  $u_i$  سرعت متوسط،  $P$  فشار،  $A_i$  کسر مساحت باز برای جریان در راستای  $i$  کسر حجم باز برای جریان،  $G_i$  شتاب ناشی از نیروهای وزنی،  $f_i$  شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز،  $k$  ترم دراک بین ذرات رسوب و  $\rho$  دانسیته سیال است. تنش برشی بستر تنشی است که از طرف سیال بر بستر رسوبی وارد شده و با استفاده از تابع دیواره برای جریان‌های آشفته سه‌بعدی محاسبه می‌گردد (Flow Science Inc. 2008; Smith and Foster, 2005):

$$u = u_\tau \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Y}{\frac{v}{u_\tau} + k_s} \right) \right] \quad (3)$$

در این رابطه  $u$  سرعت جریان،  $u_\tau$  سرعت برشی،  $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$ ،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $Y$  فاصله از دیواره،  $v$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $\kappa = 0.4$  ضریب فن-کارمن، و  $k_s$  ضریب زبری نیکورادزه می‌باشد. در این مدل ضریب زبری نیکورادزه بر حسب متوسط اندازه ذرات بستر بیان می‌شود:

$$k_s = c_s d_{50} \quad (4)$$

مدل آبشستگی نرم افزار Flow3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش (انتشار) - انتقال<sup>۳</sup>، میزان انتقال رسوب و آبشستگی بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش کسر حجم سیال ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌نماید. دانسیته سیال در هر سلول محاسباتی به صورت  $\bar{\rho} = \rho + f_s (\rho_s - \rho)$  محاسبه می‌شود. در این معادله  $f_s$  کسر رسوبات جامد در سلول محاسباتی،  $\rho_s$  دانسیته رسوبات و  $\rho$  دانسیته سیال است. مجموع کسر جامد رسوب  $f_s$  و کسر مربوط به قسمت سیال  $f$ ، برابر یک می‌باشد ( $f + f_s = 1$ ). مدل آبشستگی این نرم افزار شامل انتقال رسوبات بستر و رسوبات معلق است. رسوبات بستر که توسط ذرات محصور شده‌اند به راحتی نمی‌توانند جابجا شوند و در صورتی که فرسایش یابند و در سطح مشترک سیال و رسوب به صورت معلق درآیند می‌توانند حرکت کنند. همچنین اگر سرعت ته‌نشست ذرات معلق بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد ذرات رسوب، دوباره به بستر باز می‌گردند. با فرض جریان دو

<sup>1</sup> Volume of Fraction (VOF)

<sup>2</sup> Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR)

<sup>3</sup> Diffusion - Advection

فازی ذرات رسوب در سیال و برقراری رابطه مومنتم در فاز پیوسته سیال، معادله (۵) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی معادله (۶)، و از تفاضل معادله (۵) و معادله (۶)، رابطه (۷) حاصل می‌شود (Flow Science Inc. 2008):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F \quad (۵)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (۶)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{drift} = \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (۷)$$

در این روابط،  $u_s$  سرعت ذرات رسوب،  $\bar{u} (= (1-f_s)u + f_s u_s)$  سرعت متوسط حجمی سیال،  $F$  نیروهای وزنی،  $u_r (= u_s - \bar{u})$  سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال،  $u_{drift} (= u_s - \bar{u})$  سرعت رانشی ذرات رسوب می‌باشد. رابطه بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیال  $\nabla \bar{u} = 0$  نیز باید برقرار باشد. پارامتر شیلدز بحرانی  $\theta_{cr}$  کمینه تنش برشی جهت بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد (Brethour, 2001):

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g(\rho_s - \rho)d_n} \quad (۸)$$

$d_n$  قطر ذره رسوب و اندیس  $n$  به  $n$  امین ذره رسوب اشاره دارد. مقدار پایه برای عدد شیلدز بحرانی در بسترهای صاف افقی تعریف شده و معمولاً برابر مقدار ثابت  $0.05$  در نظر گرفته شده و یا با استفاده از رابطه سالبوی و وایت‌هاوس مقدار دقیق آن قابل تعریف است. فرم بی‌بعد معادله انتقال رسوب برای ذره رسوب  $n$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(S_n - 1)d_n^3]^{\frac{1}{2}}} \quad (۹)$$

$q_{b,n}$  نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و  $\Phi_n$  بر اساس معادله Meyer-Peter and Müller (1984) محاسبه می‌شود:

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (۱۰)$$

$B_n$  ضریب بار بستر بوده و مقدار آن برای نرخ انتقال رسوب پایین بین  $5$  تا  $5/7$ ، برای نرخ انتقال متوسط حدود  $8$  و برای نرخ انتقال بالا برابر  $13$  اختیار می‌گردد.  $c_{b,n}$  جزء حجمی ذره رسوب  $n$  در بستر است:

$$\sum_{n=1}^N c_{b,n} = 1 \quad (۱۱)$$

$N$  تعداد کل ذرات رسوب می‌باشد. رابطه Van Rijn (1984) برای محاسبه ضخامت لایه رسوبی  $h_n$  مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$h_n = 0.3d_n d_{s,n}^{0.7} \left( \frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (۱۲)$$

انتقال رسوب فرسایش یافته و رسوب معلق با معادله پخش (انتشار) - انتقال، با در نظر گرفتن سرعت شناوری  $u_{drift}$  و سرعت بلند شدگی  $u_{Lift}$  مدل می‌شود.  $D$  ضریب پخشیدگی مولکولی و  $C_{s,n}$  غلظت ذرات رسوب است (Flow Science Inc. 2008):

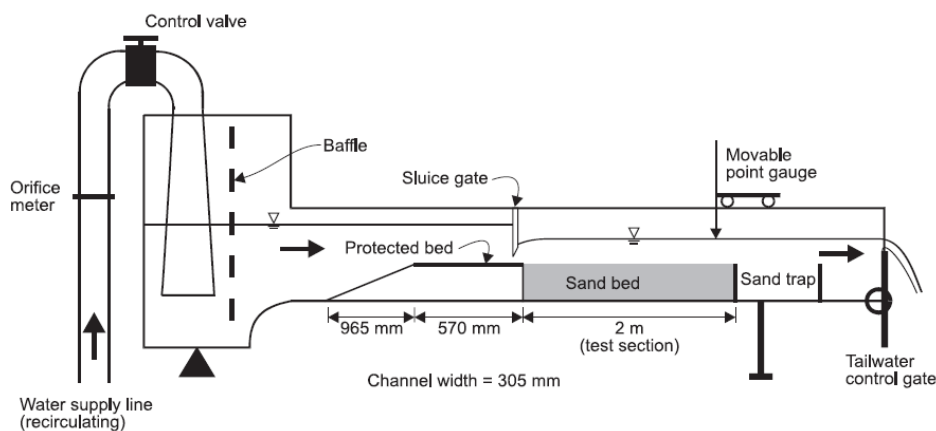
$$\frac{\partial C_{s,n}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla C_s = D \nabla^2 C_s - u_{Lift} \nabla C_{s,n} - u_{Drift} \nabla C_{s,n} \quad (۱۳)$$

به‌همین ترتیب غلظت حجمی رسوبات معلق،  $c_{s,n}$ ، به‌صورت نسبت حجم هر ذره رسوب معلق  $n$  به حجم ترکیب رسوب-سیال حاصل می‌شود (Flow Science Inc. 2008):

$$c_{s,n} = \frac{C_{s,n}}{\rho_n} \quad (14)$$

### ۳- صحت‌سنجی

در این تحقیق برای ارزیابی صحت نتایج مدل عددی آبستگي پایین‌دست دريچه کشویی از داده‌های آزمایشگاهی Kells و همکاران (۲۰۰۱) استفاده شده است. این آزمایشات در کانالی به طول ۶ متر، عرض ۰/۳۰۵ متر و طول بستر رسوبات به اندازه‌ی ۲ متر صورت گرفته‌است (شکل ۱). بازشدگی دريچه (b) ۱۰ میلی‌متر، ارتفاع جریان در پشت دريچه ۱۵۶ میلی‌متر و در پایین‌دست دريچه (بعد از بازشدگی تا انتهای کانال) ۶۵ میلی‌متر است. قطر متوسط رسوبات ( $d_{50}$ ) برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱)، بستر رسوبي بلافاصله بعد محل دريچه قرار دارد.



شکل ۱: نمایی از کانال آزمایشگاهی در مطالعه تجربي Kells و همکاران (۲۰۰۱).

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، پارامترهای مختلفی نظیر تعداد سلول‌های میدان محاسباتی، مدل‌های آشفتگی، و معادلات انتقال رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و انفعال میدان، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی عددی بوده است. Flow3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی نحوه برخورد نسبتاً متفاوتی با سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌های مستطیلی شکل در نرم‌افزار ارائه می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای اشغال شده توسط سیالات در داخل آن‌ها تعریف می‌شود. برای مدل عددی شبیه‌سازی شده در این تحقیق از یک بلوک شبکه‌بندی استفاده شده و تعداد ۲۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی مورد آزمون قرار گرفته‌اند. در محدوده‌ی پایین‌دست دريچه و در محل بستر رسوبي، به دلیل اینکه تمامی برجستگی‌های بستر توسط مدل عددی شناخته شده و هیدرودینامیک جریان با دقت بیشتری شبیه‌سازی گردد، نیاز به استفاده از شبکه‌بندی ریزتر می‌باشد، به‌طور کلی اندازه سلول‌ها در نواحی که گرادیان سرعت بالا و اهمیت هیدرودینامیکی بیشتری دارند، کوچک‌تر و در نواحی که گرادیان سرعت پایین دارند، بزرگ‌تر است. برای مدل آشفتگی، دو مدل RNG و LES انتخاب و بررسی شده است. در نرم‌افزار Flow3D سه معادله انتقال رسوب Van Rijn، Meyer-Peter-Muller و Nielsen قابل انتخاب است که در اینجا هر سه معادله ارزیابی و دقت هر معادله تعیین شده است.

به منظور مقایسه‌ی دقت سه معادله‌ی انتقال رسوب و انتخاب بهترین معادله، از معیارهای جذر ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده می‌شود. توابع معیار و روابط ریاضی آنها به صورت روابط (۱۵) معرفی می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - Y_i|$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum [T_i - Y_i]}{\sum [Y - Y_i]}$$

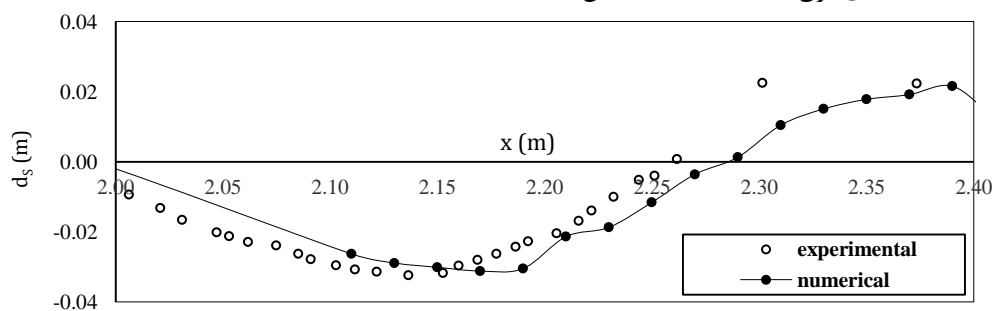
در روابط فوق  $T_i$  مقدار واقعی،  $Y_i$  مقدار پیش‌بینی شده،  $n$  تعداد داده‌ها، و  $Y$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های پیش‌بینی کننده است.

در جدول ۱ نتایج حاصله برای عمق آبستگي بیشینه و مقادير خطا آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه نتایج مدل عددی با تعداد سلول شبکه و مدل آشفستگی مختلف با داده‌های آزمایشگاهی Kells و همکاران (۲۰۰۱).

مدل	تعداد سلول	مدل آشفستگی	مقدار آزمایشگاهی (mm)	مقدار عددی (mm)	RMSE	MAE	$R^2$
Meyer-Peter-Muller	۲۰۰۰۰۰	RNG		۲۶/۴	۰/۰۱۶۴	۰/۰۱۵۳	۰/۸۲۹
	۴۰۰۰۰۰	RNG		۱۸/۶	۰/۰۱۵۷	۰/۰۱۳۹	۰/۸۸۵
	۲۰۰۰۰۰	LES	۳۲/۴۰	۷۳/۷	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۲۱	۰/۵۶۳
	۴۰۰۰۰۰	LES		۳۸/۶	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۶۸	۰/۹۰۵
Nielsen	۲۰۰۰۰۰	RNG		۳۱/۴	۰/۰۱۶۸	۰/۰۱۱۰	۰/۹۵۶
	۴۰۰۰۰۰	RNG		۲۰/۳	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۲۳	۰/۸۹۸
	۲۰۰۰۰۰	LES	۳۲/۴۰	۵۳/۳	۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۷۱	۰/۷۳۴
	۴۰۰۰۰۰	LES		۳۰/۴	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۱۸	۰/۹۱۱
Van Rijn	۲۰۰۰۰۰	RNG		۱۷/۸	۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۸۵	۰/۸۶۴
	۴۰۰۰۰۰	RNG		۲۱/۳	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۱۶	۰/۹۰۱
	۲۰۰۰۰۰	LES	۳۲/۴۰	۳۶/۶	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۵۵	۰/۹۴۱
	۴۰۰۰۰۰	LES		۳۲/۲	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۱۲	۰/۹۸۲

نتایج حاصله برای مدل شبیه‌سازی شده با معادله رسوب Van Rijn، مدل آشفستگی LES و تعداد سلول ۴۰۰۰۰۰، دارای کمترین خطا ( $R^2=0.982$ ,  $MAE=0.012$ ) نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. در شکل ۲ منحنی آبستگي پایین دست دریچه، که با پارامترهای انتخاب شده‌ی فوق به دست آمده، نمایش داده شده است.

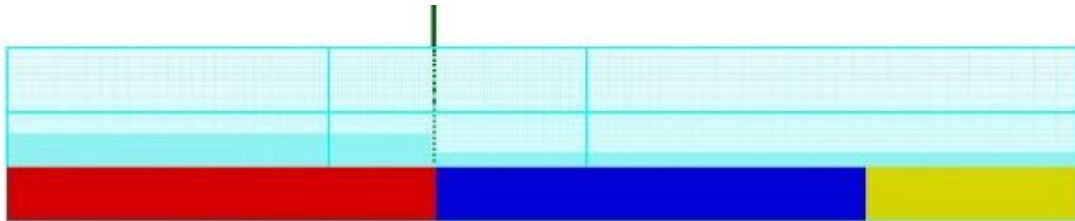


شکل ۲: مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصله از بررسی پارامترهای مختلف.

## ۴- مشخصات میدان حل

## ۴-۱ مدل هندسی و شبکه‌بندی

مدل هندسی مورد استفاده برای تحلیل عددی آبستگي پایین‌دست دريچه مطابق شکل ۳، شامل فاصله بالادست دريچه با بستر ثابت به طول ۲ متر، بستر رسوبي قابل فرسایش به طول ۲ متر در پای دريچه، بستر ثابت در پایین‌دست بستر رسوبي ۱ متر و ضخامت دريچه ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. برای تعريف مدل هندسی به نرم‌افزار Flow3D و تحلیل آن نیاز است که مدل شبکه‌بندی گردد.



شکل ۳: نحوه‌ی شبکه‌بندی در مدل‌سازی عددی.

با توجه به نتایج حاصله در مرحله صحت‌سنجی مدل، شبکه‌بندی مدل با تعداد کل ۴۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی صورت گرفته است. یکی از مهم‌ترین نکاتی که در شبیه‌سازی عددی مورد توجه قرار می‌گیرد شبکه‌بندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است. در همه‌ی مدل‌سازی‌های عددی انجام یافته، ابعاد شبکه طوری تعیین شد که پارامترهای کنترل شبکه در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه مانند بیشینه نسبت ابعاد شبکه<sup>۱</sup> در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه<sup>۲</sup> در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشند. برای نتایج دقیق و موثر، مقدار هر یک از دو پارامتر بالا باید به عدد یک نزدیک بوده و مقدار نسبت ابعاد شبکه در مجاور یکدیگر از ۱/۲۵ و همچنین نسبت ابعاد شبکه در راستاهای مختلف نباید از ۳ تجاوز کند (Flow Science Inc. 2008). بر این اساس، شبکه‌بندی مدل، به طور دوبعدی و در راستای طولی به طور غیر یکنواخت انتخاب شده با این نکته که در نزدیکی دريچه کشویی، تعداد سلول بیش‌تر در نظر گرفته شده است.

## ۴-۲ تعريف شرایط مرزی

برای تحلیل عددی مدل اصلی در نرم‌افزار Flow3D، مرز بالادست بصورت فشار ثابت<sup>۳</sup>، مرز پایین‌دست بصورت خروجی<sup>۴</sup>، مرز در بستر و طرفین کانال بصورت شرایط دیواره<sup>۵</sup> و همچنین مرز سطح آزاد آب به صورت شرایط تقارن<sup>۶</sup> در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup> Maximum aspect ratio

<sup>۲</sup> Maximum adjacent cell size ratio

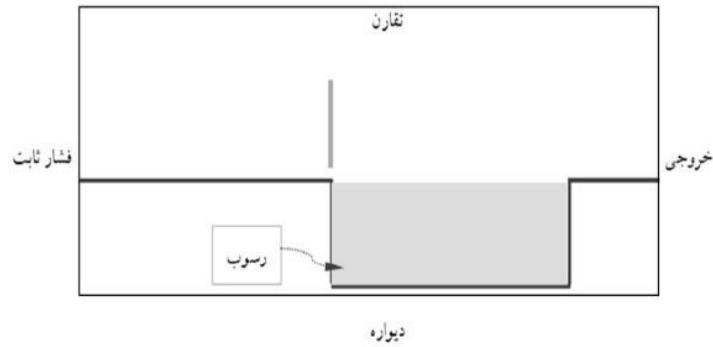
<sup>۳</sup> Specified pressure

<sup>۴</sup> Outflow

<sup>۵</sup> Wall

<sup>۶</sup> Symmetry





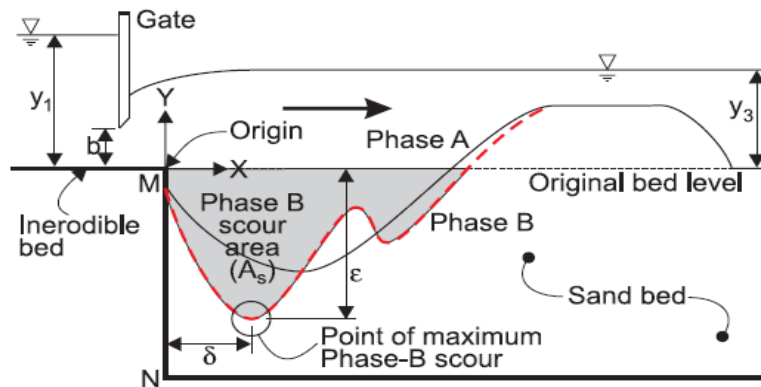
شکل ۴: شرایط مرزی بکار رفته در مدل‌سازی عددی.

### ۳-۴ مدل‌های مورد بررسی

در ابتدا مدل مینا با قطر متوسط رسوب ( $d_{50}$ ) ۱ میلی‌متر با چگالی نسبی ۲/۶۶، بازشدگی دریاچه کشویی ۱۰ میلی‌متر، و دبی ۱/۷ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مقدار پارامترهای مختلف رسوب بستر ارائه شده است. برای بازشدگی دریاچه ۵ حالت ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ میلی‌متر، برای قطر متوسط رسوب ۳ اندازه‌ی ۰/۵۷، ۱/۲۴، ۲/۱۸ میلی‌متر و برای تراز پایاب ( $y_3/b$ ) سه مقدار ۴، ۶/۳، و ۸/۸ انتخاب شده است. در تمامی حالات، منحنی‌های آبشستگی برای زمان شبیه‌سازی ۳۶۰۰ ثانیه ترسیم و مقایسه شده‌اند. برای منحنی‌های آبشستگی، پارامترهای نشان داده شده در شکل ۵ ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: مشخصات رسوب بستر.

ضریب بار بستر	ضریب تعلیق مواد بستر	بیشینه ضریب تراکم مواد بستر	زاویه ایستایی (درجه)	عدد شیلدز بحرانی	چگالی نسبی	قطر متوسط ذرات رسوب (mm)
۸	۰/۰۱۸	۰/۶۵	۳۲	۰/۰۳۳	۲/۶۶	۱



شکل ۵: پارامترهای تعریف شده برای مقایسه‌ی منحنی‌های آبشستگی.

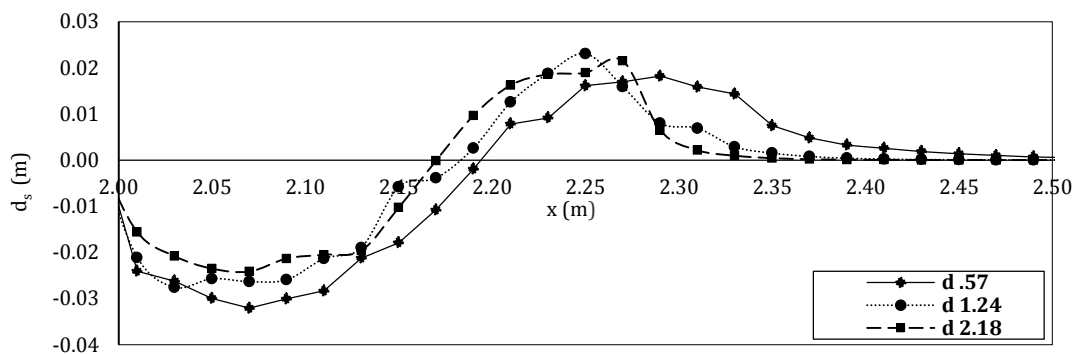
### ۵- یافته‌ها (نتایج)

#### ۵-۱ بررسی اثر قطر رسوب بر منحنی آبشستگی

در حالت اول، تاثیر تغییر در اندازه قطر متوسط رسوب بستر، ۰/۵۷، ۱/۲۴، و ۲/۱۸ میلی‌متر، برای بازشدگی دریاچه ۱۰ میلی‌متر، دبی جریان ۱/۷ لیتر بر ثانیه و سه مقدار مختلف تراز پایاب ( $y_3/b$ ) ارزیابی شده است. در جدول ۳، این نتایج ارائه شده است. شکل ۶ منحنی آبشستگی را برای مدل‌های گروه A نمایش می‌دهد.

جدول ۳: تاثیر اندازه ذرات رسوب بر میزان آبشستگی.

نام مدل	قطر متوسط رسوب $d_{50}$ (mm)	دبی جریان (lit/s)	پارامتر $y_3/b$	$\varepsilon$ (mm)	$\delta$ (mm)	مساحت حفره آبشسته (cm <sup>2</sup> )
A1	۰/۵۷	۱/۷۰	۴/۰۰	۳۲/۱۰	۷۳	۹۴/۶۰
A2	۱/۲۴	۱/۷۰	۴/۰۰	۲۶/۴۰	۶۸	۷۴/۵۰
A3	۲/۱۸	۱/۷۰	۴/۰۰	۲۴/۲۰	۵۸	۴۹/۴۲
B1	۰/۵۷	۱/۷۰	۶/۳۰	۴۱/۲۰	۸۸	۱۰۱/۲۰
B2	۱/۲۴	۱/۷۰	۶/۳۰	۳۷/۳۰	۷۷	۹۰/۳۵
B3	۲/۱۸	۱/۷۰	۶/۳۰	۲۱/۴۰	۵۴	۴۲۸/۶۰
C1	۰/۵۷	۱/۷۰	۸/۸۰	۵۵/۴۰	۱۰۵	۱۳۸/۵۰
C2	۱/۲۴	۱/۷۰	۸/۸۰	۳۵/۵۰	۹۴	۸۵/۴۵
C3	۲/۱۸	۱/۷۰	۸/۸۰	۱۹/۴۰	۴۸	۲۶/۲۰



شکل ۶: تاثیر اندازه رسوب بستر بر بیشینه عمق آبشستگی.

با افزایش قطر متوسط رسوب از ۰/۵۷ به ۱/۲۴ میلی‌متر، میزان آبشستگی به اندازه ۲۱ درصد کاهش یافته است. میزان کاهش آبشستگی با افزایش اندازه رسوبات از ۱/۲۴ به ۲/۱۸ میلی‌متر، ۳۲ درصد است. این امر به دلیل اثر جت جریان بر بستر رسوبی می‌باشد که با بزرگتر شدن اندازه رسوبات بستر، اثر جت عبوری از زیر دریاچه کشویی کمتر شده و رسوبات کمتری دچار فرسایش می‌گردند، در نتیجه از گودی و مساحت حفره آبشستگی کاسته می‌شود.

در بررسی اثر تراز پایاب مشخص است که به ازای دبی ثابت ۱/۷ لیتر بر ثانیه، وقتی بستر از ذرات کوچک ۰/۵۷ میلی‌متر تشکیل یافته است، افزایش تراز پایاب موجب افزایش عمق آبشستگی و نیز ابعاد حفره‌ی آبشسته می‌گردد؛ در واقع انتظار می‌رفت با توجه به دبی ثابت جریان، افزایش عمق و کاهش سرعت متوسط جریان موجب کاهش فرسایش بستر گردد در حالی که خلاف آن ثابت شده است. این مساله را بدین صورت می‌توان توجیه نمود که در گام اول افزایش عمق جریان موجب کاهش سرعت متوسط جریان به میزان قابل توجه شده ولی اثر آن بر کاهش سرعت برشی در نزدیکی بستر قابل توجه نبوده و کاهش سرعت برشی به اندازه‌ای نبوده است که موجب کاهش انتقال رسوب در بستر نیز گردد. از سویی دیگر در اینجا اثر غالب جت جریان خروجی از دریاچه معلوم می‌گردد. یعنی با وجود افزایش عمق و کاهش سرعت متوسط جریان، جت جریان خروجی از دریاچه بر شرایط پایین‌دست دریاچه غالب بوده و موجب افزایش فرسایش بستر رسوبی شده است. با افزایش اندازه رسوب به ۱/۲۴ میلی‌متر، این روند اندکی تغییر می‌یابد. در افزایش تراز پایاب از مقدار  $y_3/b=4.00$  به مقدار  $y_3/b=6.30$ ، افزایش فرسایش بستر مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی همان اثر سرعت برشی و غالب بودن جت جریان خروجی است. با افزایش تراز پایاب به مقدار  $y_3/b=8.8$ ، کاهش در مقدار عمق آبشستگی نسبت به تراز پایاب  $y_3/b=6.30$  دیده می‌شود. این امر نشان می‌دهد که با توجه به اندازه رسوب بستر، کاهش سرعت برشی به اندازه‌ای نبوده است که انتقال رسوب را متاثر کرده و

موجب کاهش آن گردد. همچنین در این مدل، اثر جت جریان دیگر غالب نبوده و انتقال ذرات رسوب عمدتاً متأثر از عمق جریان در پایین دست دریچه بوده‌اند.

در اندازه‌ی رسوب ۲/۱۸ میلی‌متر به دلیل اندازه و وزن زیاد ذرات رسوب، افزایش تراز پایاب و کاهش سرعت برشی در نزدیکی بستر، بر انتقال رسوب تاثیر گذاشته و با افزایش تراز پایاب و عمق جریان از میزان فرسایش بستر کاسته می‌شود.

### ۵-۲ بررسی اثر بازشدگی دریچه بر تغییرات منحنی آبشستگی

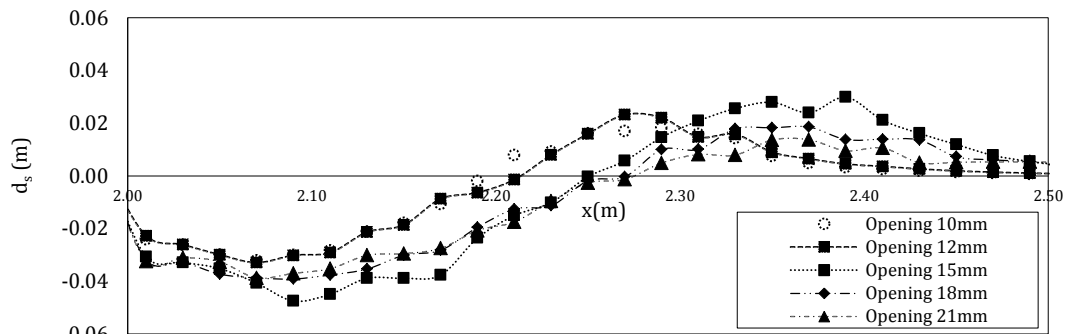
در بخش گذشته، با ثابت نگه داشتن میزان بازشدگی دریچه، اثر اندازه رسوبات بر میزان فرسایش بستر رسوبی بعد دریچه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش با ثابت ماندن دبی جریان و تراز پایاب، برای سه اندازه رسوب بستر، ۵ اندازه بازشدگی دریچه انتخاب و اثر آن بر میزان فرسایش بستر و نیز رسوب‌گذاری انتهایی بررسی شده است. جدول ۴ نتایج حاصله برای بازشدگی‌های ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ میلی‌متر، و قطر متوسط رسوب‌های ۰/۵۷، ۱/۲۴، و ۲/۱۸ میلی‌متر ارائه شده است. در شکل ۷ نمودارهای حاصله برای سه قطر رسوب مختلف ترسیم شده است.

جدول ۴: تاثیر اندازه بازشدگی دریچه بر میزان آبشستگی به ازای قطر متوسط رسوب ۰/۵۷.

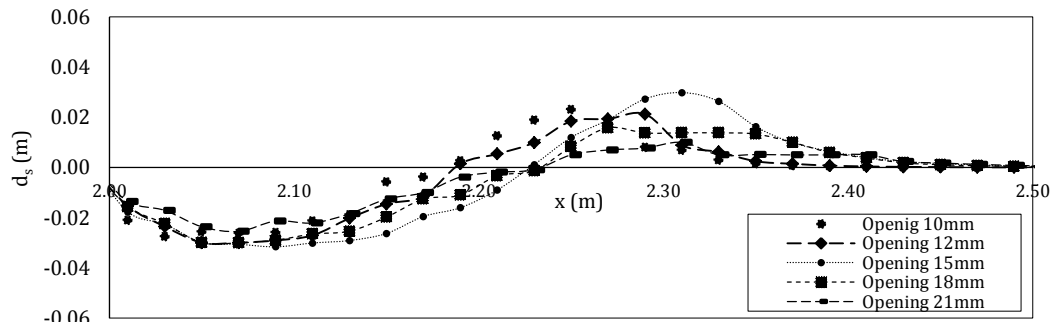
سرعت بیشینه (m/s)	عدد فرود (بی بعد)	میزان تغییرات (%)	$\delta$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	پارامتر $y_3/b$	دبی جریان (lit/s)	بازشدگی (mm)	قطر متوسط رسوب (mm)
۱/۴۷	۴/۷۴	-----	۳۲	۹۶	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۰	
۱/۴۸	۴/۲۲	۲/۴	۳۳	۱۰۲	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۲	
۱/۷۱	۴/۴۷	۳۲	۴۷/۵	۱۲۵	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۵	۰/۵۷
۱/۵۳	۳/۶۶	۱۸	۳۹	۱۰۳	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۸	
۱/۳۳	۲/۹۵	۱۷	۳۸	۹۸	۴/۰۰	۱/۷۰	۲۱	
۱/۴۵	۵	-----	۲۶/۵	۸۲	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۰	
۱/۵۶	۴/۲۵	۱۳/۶	۳۰	۸۷	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۲	
۱/۷۱	۴/۴۶	۱۶/۴	۳۲	۹۷	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۵	۱/۲۴
۱/۵	۳/۵۸	۱۳/۶	۳۰	۸۰	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۸	
۱/۴۱	۳/۱۲	۶	۲۵/۵	۷۷	۴/۰۰	۱/۷۰	۲۱	
۱/۴	۴/۴	-----	۴/۵	۷۹	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۰	
۱/۴۴	۴/۲	۳/۵	۴	۸۲	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۲	
۱/۵۷	۴/۱	۱۸	۴	۹۱	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۵	۲/۱۸
۱/۳۸	۳/۳	۸	۳/۵	۷۹	۴/۰۰	۱/۷۰	۱۸	
۱/۲۲	۲/۷	۴	۴	۶۴	۴/۰۰	۱/۷۰	۲۱	

با توجه به جدول فوق، به ازای تمام مقادیر رسوب، افزایش مقدار بازشدگی از ۱۰ میلی‌متر به ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر، موجب افزایش آبشستگی در بستر رسوبی بعد دریچه می‌گردد، دلیل این امر آن است که با افزایش بازشدگی دریچه تا مقدار ۱۵ میلی‌متر، تاثیر سرعت جت خروجی از زیر دریچه بر فرسایش بستر بیشتر شده و آبشستگی افزایش می‌یابد. این تغییرات در قطر رسوبات بزرگتر کمتر است چون نیروی محرک بیشتری برای جابجایی این ذرات نیاز است. با افزایش بازشدگی، خروج جریان از زیر دریچه به صورت جت نبوده و اثر سرعت جت جریان کاهش می‌یابد. در این حالت چون جریان خروجی از زیر دریچه به صورت جت نبوده از قدرت آن برای جابجایی ذرات کاسته شده و آبشستگی در بازشدگی ۱۸ میلی‌متر بسیار کمتر از مقدار آن در بازشدگی ۱۵ میلی‌متر است. با افزایش بازشدگی دریچه، روند مشابهی اتفاق افتاده و آبشستگی بسیار کمتر از مقدار آن به ازای بازشدگی ۱۵ و ۱۸ میلی‌متر شده است. مقایسه سرعت جت خروجی از زیر دریچه نیز موید این مطالب است

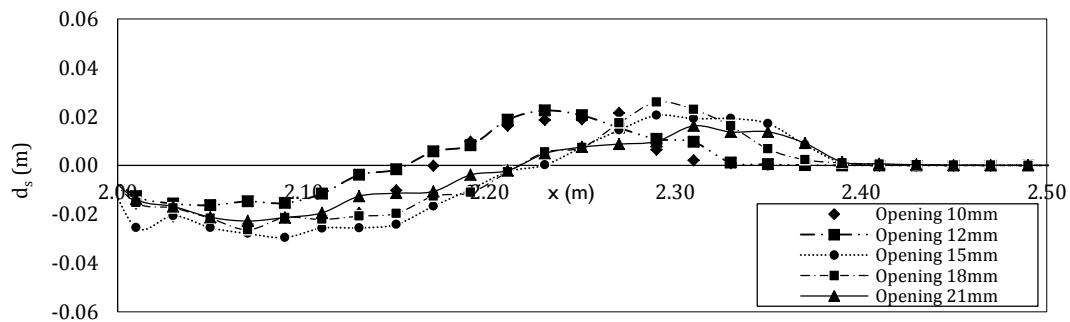
که بیشینه سرعت در بازشدگی ۱۵ میلی‌متر رخ داده و با بازشدگی دریاچه گرچه دبی خروجی از زیر دریاچه بیشتر می‌گردد؛ لیکن به دلیل زیاد بودن سطح مقطع خروجی جریان، سرعت جت خروجی نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که موجب کاهش آبشستگی جریان نیز گردیده است. از سویی دیگر، با افزایش میزان باز شدگی دریاچه و کاهش سرعت جت خروجی، اثر گردابی جریان کاهش یافته و مقدار رسوب معلق ناشی از تلاطم جریان نیز کاهش می‌یابد که خود این امر کاهش آبشستگی را به دنبال دارد.



(الف)

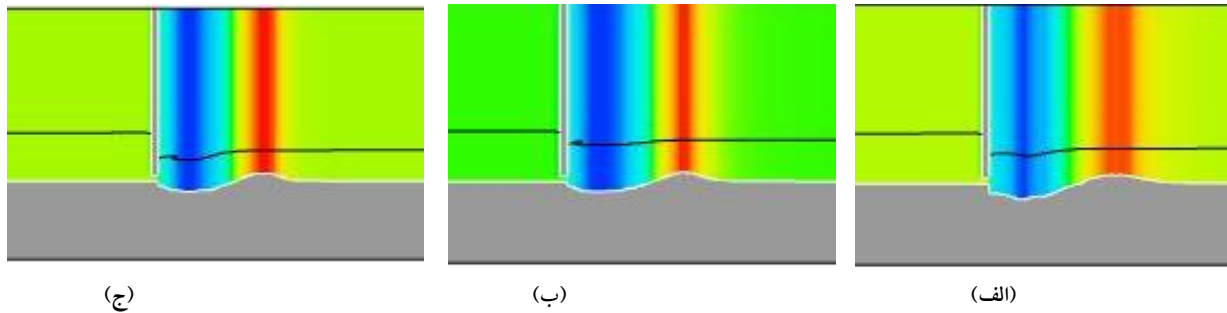


(ب)

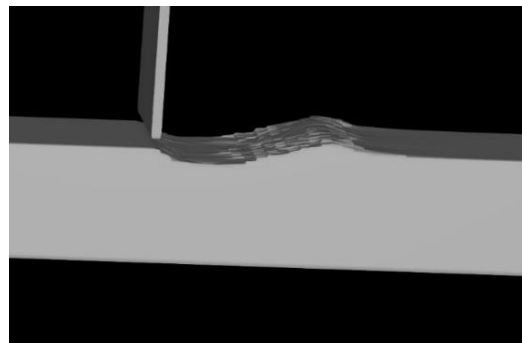


(پ)

شکل ۷: بیشینه عمق آبشستگی در بازشدگی‌های مختلف دریاچه برای (الف) متوسط رسوب ۰/۵۷ میلی‌متر (ب) متوسط رسوب ۱/۲۴ میلی‌متر (پ) متوسط رسوب ۲/۱۸ میلی‌متر با دبی ثابت ۱/۷ لیتر بر ثانیه.



شکل ۸: شماتیک پیشینه عمق آبشستگی با بازشدگی ۱۵ میلی‌متر برای ۳ قطر رسوب مختلف (الف) ۰/۵۷، (ب) ۱/۲۴، و (ج) ۲/۱۸ میلی‌متر.



شکل ۹: نمای سه‌بعدی از آبشستگی بعد دریاچه با بازشدگی ۱۵ میلی‌متر برای قطر رسوب ۱/۲۴.

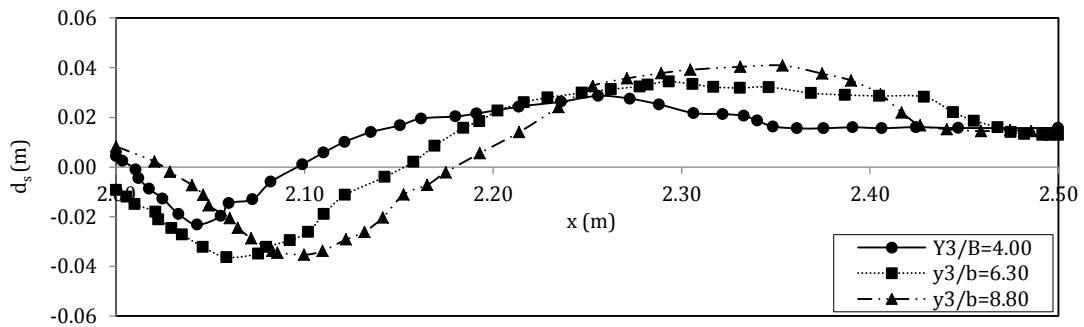
با بررسی نتایج بدست آمده از ۱۵ مدل شبیه‌سازی شده، برای ارزیابی اثر بازشدگی‌های مختلف، قطر مختلف ذرات رسوبی (۰/۵۷، ۱/۲۴، ۲/۱۸ میلی‌متر)، و مقادیر مختلف تراز پایاب، بر پیشینه عمق آبشستگی بعد از دریاچه کشویی بدون کف‌بند، مشخص شد بازشدگی دریاچه به تنهایی نمی‌تواند بر عمق حفره آبشستگی، به عنوان یک شاخص تاثیرگذار معرفی گردد.

عمق حفره آبشستگی تشکیل شده در پایین‌دست دریاچه کشویی به شدت به اندازه ذرات بستر وابسته است به طوری که با بزرگتر شدن اندازه ذرات رسوبی، اثر جت جریان خروجی از دریاچه و تراز پایاب تغییر می‌یابد. در بستر رسوبی با اندازه ذرات ریز، اثر جت جریان عبوری از زیر دریاچه و سرعت برشی نزدیک بستر غالب بوده و در اندازه ذرات رسوبی درشت، اثر تراز پایاب غالب است. از سویی دیگر در تراز پایاب کم و بازشدگی کم دریاچه، بر شدت گردابه‌های داخل حفره افزوده شده و میزان ذرات معلق برخواسته از بستر رسوبی افزایش می‌یابد، از اینرو، با اثر تشدید گردابه‌های تشکیل یافته در حفره آبشسته، بر عمق آبشستگی افزوده می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد پارامترهای متعددی بر میزان پیشینه عمق آبشستگی بعد از دریاچه کشویی تاثیرگذار است. در ثانیه‌های ابتدایی جت عبوری از زیر دریاچه با کاهش بازشدگی، افزایش می‌یابد و بعد از دریاچه پرش هیدرولیکی و جریان مستغرق اتفاق می‌افتد، این جریان مستغرق بر جریان بالادست تاثیر می‌گذارد ولی بدلیل آنکه هد بالادست ثابت فرض شده است باعث کاهش شدت جریان عبوری و به تبع آن جت عبوری از زیر دریاچه می‌شود. هرچقدر میزان اختلاف سرعت جت عبوری از زیر دریاچه در بازشدگی‌های مختلف بیش‌تر شود بر شدت گردابه داخل حفره آبشسته افزوده می‌شود. همچنین هرچقدر قطر ذره رسوب کمتر باشد، ذرات معلق فرسایش یافته از بستر رسوبی که در گردابه

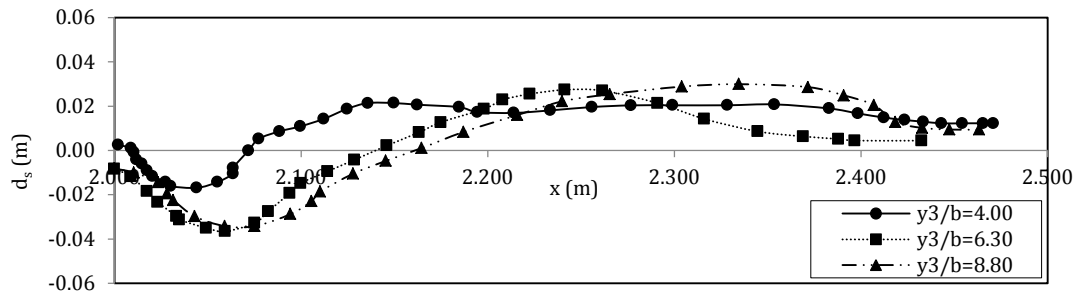
موجودند بیش‌تر شده و باعث کاهش جت عبوری از زیر دریاچه می‌گردند. افزایش شدت گردابه موجب افزایش عمق گودال می‌شود.

### ۳-۵ بررسی اثر تراز پایاب بر تغییرات منحنی آبشستگی

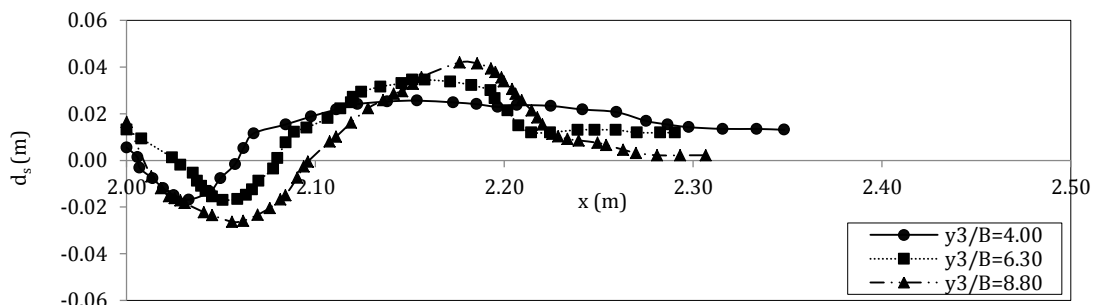
در جدول ۵ و شکل ۱۰ تاثیر تراز پایاب بر تغییرات حفره آبشستگی پای دریاچه به ازای دبی ۱/۷ لیتر بر ثانیه و سه اندازه رسوب مختلف ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۰: تاثیر تراز پایاب بر تغییرات عمق آبشستگی برای رسوب (الف) ۰/۵۷ میلی‌متر (ب) ۱/۲۴ میلی‌متر و (پ) ۲/۱۸ میلی‌متر.

جدول ۴: تاثیر اندازه ذرات رسوب و تاثیر پایاب بر میزان آبشستگی.

نام مدل	قطر متوسط رسوب $d_{50}$ (mm)	دبی جریان (lit/s)	پارامتر $y_3/b$	$\varepsilon$ (mm)	$\delta$ (mm)	مساحت حفره آبشسته (cm <sup>2</sup> )
شکل (الف)	A1	۰/۵۷	۴/۰۰	۳۲/۱۰	۷۳	۹۴/۶۰
	B1	۰/۵۷	۶/۳۰	۴۱/۲۰	۸۸	۱۰۱/۲۰
	C1	۰/۵۷	۸/۸۰	۵۵/۴۰	۱۰۵	۱۲۸/۵۰
شکل (ب)	A2	۱/۲۴	۴/۰۰	۲۶/۴۰	۶۸	۷۴/۵۰
	B2	۱/۲۴	۶/۳۰	۳۷/۳۰	۷۷	۹۰/۳۵
	C2	۱/۲۴	۸/۸۰	۳۵/۵۰	۹۴	۸۵/۴۵
شکل (پ)	A3	۲/۱۸	۴/۰۰	۲۴/۲۰	۵۸	۴۹/۴۲
	B3	۲/۱۸	۶/۳۰	۲۱/۴۰	۵۴	۴۲۸/۶۰
	C3	۲/۱۸	۸/۸۰	۱۹/۴۰	۴۸	۲۶/۲۰

نتایج نشان می‌دهد در قطر رسوب ۰/۵۷ میلی‌متر، به ازای دو تراز پایاب  $y_3/b = 4.00$  و  $y_3/b = 6.31$  تعادل در شرایط آبشستگی سریع‌تر اتفاق می‌افتد. به ازای این دو مقدار از تراز پایاب، تغییرات زمانی در منحنی آبشستگی کمتر بوده لیکن با افزایش تراز پایاب، تغییرات منحنی در هر گام زمانی زیاد شده و آبشستگی در هر مرحله تشدید می‌گردد. همچنین با بررسی سه حالت (الف)، (ب) و (پ) شکل ۱۰، معلوم می‌گردد با افزایش تراز پایاب، نقطه تلاقی منحنی آبشستگی به ازای تمامی مقادیر قطر رسوب به سمت پایین‌دست دریاچه جابجا می‌شود. این امر نشان می‌دهد به ازای تراز پایاب بزرگتر، حفره آبشستگی بزرگتری در پای دریاچه تشکیل شده و طول بستر جامد بزرگتری برای جلوگیری از فرسایش بستر مورد نیاز است. همچنین از شکل‌ها مشهود است که با افزایش قطر رسوب بستر، حجم حفره آبشستگی ( $A_s$ ) به میزان قابل توجهی کاهش داشته است. این روند تغییر در تمام مقادیر تراز پایاب مشاهده می‌شود.

#### ۶- بحث و نتیجه‌گیری

- در پژوهش حاضر مدل عددی انتقال رسوب در پایین‌دست دریاچه کشویی شبیه‌سازی شده و نتایج زیر حاصل شده است.
- ✓ مدل عددی Flow3D مدلی مناسب برای تخمین بیشینه عمق آبشستگی بعد از دریاچه‌کشویی است.
  - ✓ به منظور بررسی صحت نتایج عددی، سه معادله انتقال رسوب Van Rijn، Meyer-Peter-Muller و Nielsen، و دو مدل آشفتگی LES و RNG مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد در شبیه‌سازی بیشینه عمق آبشستگی بعد از دریاچه کشویی بدون کفبند صلب، مدل آشفتگی LES در مقایسه با روش RNG، و مدل انتقال رسوب Van Rijn در مقایسه با دو مدل دیگر منجر به حصول نتایج دقیق‌تری می‌گردد.
  - ✓ به ازای تراز پایاب معین و دبی معلوم، با افزایش قطر رسوبات بستر، میزان بیشینه عمق آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. بدیهی است این امر به دلیل افزایش مقاومت ذرات بزرگتر در برابر تنش برشی جریان است.
  - ✓ بازشدگی به عنوان یک شاخص، به تنهایی بر روی بیشینه عمق آبشستگی بعد از دریاچه‌کشویی، تاثیرگذار نیست بلکه شدت جت عبوری از زیر دریاچه کشویی اثر غالب بر میزان آبشستگی دارد، هرچقدر جت عبوری از زیر دریاچه کشویی بیش‌تر باشد بیشینه عمق آبشستگی نیز به تبع آن بیشتر می‌گردد. در واقع اثر تراز پایاب و جت جریان خروجی از دریاچه باید به صورت همزمان مورد ارزیابی قرار گیرد.
  - ✓ اثر شدت گردابه ایجاد شده و میزان ذرات معلق موجود در گردابه ایجاد شده بعد از دریاچه‌کشویی نشان می‌دهد عمق گودال آبشستگی شدیداً وابسته به شدت گردابه‌های ایجاد شده ناشی از جت جریان عبوری از دریاچه است.

## منابع

1. Adduce, C. and Sciortino, G. (2006). Scour due to a horizontal turbulent jet: numerical and experimental investigation. *Journal of hydraulic Research*, 44(5), 663-673.
2. Alihosseini, P., Ebrahimi, K., Sanei, M. and Mashaal, M. (2008). Experimental investigation of temporal variation of scour profile downstream of submerged hydraulic jumps. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Iranian Conference on Hydraulic*. Nov. 11-13. Sh. Abaspour University. Tehran. Iran.
3. Baghdadi, H., Ershadi, S. and Rostami, M. (2011). Numerical investigation of the local scouring due to submerged horizontal jets using Flow3D. *10<sup>th</sup> Hydraulic Conference*, Rasht, Iran.
4. Balachandar, R., Kells, J.A. and Thiessen, R.J. (2000). The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 138-150.
5. Brethour J.M. (2001). Transient 3-d model for lifting, transporting and depositing solid material. *International Symposium on Environmental University Hydraulics*, Tempe, Arizona.
6. Carvalho, L., Carvalho, E., Aleixo, R., Manuela, M. and Lima, C.L. (2018). Experimental study of the bed morphology downstream of a sluice gate. *River Flow Conference*, 40, 03034.
7. Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N. and Chatterjee, M. (1994). Local scour due to submerged horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 120(8), 973-992.
8. Dehghani, A.A. and Bashiri, H. (2009). Experimental investigation of scouring in downstream of combined flow over weirs and below gates, *33<sup>rd</sup> IAHR Conference*, Canada. 978-94-90365-01-1.
9. Dey, S. and Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 246-257.
10. Dey, S. and Sarkar, A. (2007). Effect of upward seepage on scour and flow downstream of an apron due to submerged jets. *Journal Hydraulic Engineering*, 133(1), 59-69.
11. Farhoudi, J. and Smith, K.V.H. (1982). Time scale for scour downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 108(10), 1147-1162.
12. Farhoudi, J. and Smith, K.V.H. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research*, 23(4), 343-358.
13. Flow Science Inc. (2008). Flow 3D User's Manual. Sanata Fe. N.M.
14. Gaudio, R. and Marion, A. (2003). Time evolution of scouring downstream of bed sills. *Journal of Hydraulic Research*, 41, 271-284.
15. Goel, A. and Pal, M. (2009). Application of support vector machines in scour prediction on grade-control structures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, 216-223.
16. Hassan, N.M.K.N. and Narayanan, R. (1985). Local scour downstream of an apron, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 111(11), 1371-1385.
17. Hoffmans, G.J.C.M. and Pilarczyk, K.W. (1995). Local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(4), 326-340.
18. Hosseini, A. (2009). Investigation of the local scouring caused by submerged horizontal jets using experimental model, PhD Thesis, Tehran University, Tehran, Iran.
19. Kardan, N., Hakimzadeh, H. and Hassanzadeh, Y. (2014). 3D numerical simulation of hydrodynamic parameters around the bridge piers using various turbulence models. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 37(4), 39-54 (In Persian).
20. Kells, J. A., Balachandar, R. and Hagel, K.P. (2001). Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, 440-451.
21. Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1984). Formulas for bed-load transport, *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, 39-64.



22. Omid, M.H., Hamidi Far, H. and Raeisi, A. (2008). Investigating the effect of tail water depth on scouring hole geometry downstream of the rigid bed. *8<sup>th</sup> international Congress in Civil Engineering*, Shiraz, Iran.
23. Shiva, F., Attari, J. and Saneei, M. (2004). Experimental studying the scouring caused by horizontal jets using rigid bed in cohesive materials. National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Mashhad, Iran (In Persian).
24. Shiva, F., Attari, J. and Saneei, M. (2002). Investigating the effect of Bentonite clay on parameters of scouring hole downstream hydraulic structures. *7<sup>th</sup> National Congress on Civil engineering*, Zahedan, Iran (In Persian).
25. Shiva, F., Attari, J. and Saneie, M. (2015). Prediction of scour profile in cohesive beds downstream of vertical sluice gates. *Watershed Engineering and Management*, 7(3), 1-22 (In Persian).
26. Rustiati, N.B., Dermawan, V., Rispiningtati, L. and Limantara, L.M. (2017). The influence of sandy clay bed material to local scour behavior. *Journal of Water and Land Development*, 35(5-7), 193-202.
27. Sharafati, A., Tafarajnoruz, A., Shourian, M. and Yaseen, Z.M. (2020). Simulation of the depth scouring downstream sluice gate: The validation of newly developed data-intelligent models. *Journal of Hydro-environment Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.11.002>.
28. Smith, H. D., & Foster, D. L. (2005). Modeling of Flow around a Cylinder over a Scoured Bed. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(1), 14-24.

# Investigating the effect of sediment parameters and tailwater elevation on Scouring downstream of the sluice gate

**Nazila Kardan:** Assistant Phosphor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

**Mohammad Hossein Behpour<sup>1\*</sup>:** MSc. student, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Article History (Received: 2020/02/22

Accepted: 2020/06/09)

## Extended abstract

### 1- Introduction

The turbulent jets downstream of hydraulic structures, such as sluice gates, jet nozzles, spillways, or weirs, may cause severe local scour. The scouring process is inherently complex due to the rapid change of turbulent flow characteristics with sediment motion in the scour zone. Excessive scour is undesirable and may be detrimental to the foundations of the structures. Sluice gates are wood or metal sheets that slide vertically and act as a portal to regulate the water passage within the irrigation channels, dams, and some wastewater control plants. The operation of the gates in small channels is traditionally accomplished manually, while in modern channel networks or relatively large channels, an electrically or hydraulically powered mechanism should be considered. The flow passing the gate forms a high-velocity jet with a relatively high erosive force that may develop a scour hole in an erodible channel downstream of the gate. To reduce the destructive action of the jet and regulate the flowing fluid under the gate, a rigid and non-erodible apron is commonly constructed under and downstream of the gate. In this case, the scour forms downstream of the apron, and depending on its shape and depth, it may threaten the stability of the gate foundation. In fact, the apron is generally a thin concrete layer implemented on the canal bed sediments, and its stability depends strongly on the strength of the sediment particles against detachment. The interaction between the flow and the sediment particles may extend the scour hole up to the downstream edge of the apron over a relatively short time. Afterwards, the sediment particles beneath the apron detach and wash away over a longer duration, causing to undermine the apron. Depending on the flow intensity, sediment size, and apron length, this phenomenon may occur in a few hours to several months. A collapsed apron may interrupt the flow passage and threaten the whole structure stability.

Recently, several studies have been conducted so as to improve our understanding of the phenomena of scour and sediment transport due to a horizontal jet issuing from below a sluice gate. The high-velocity jet issuing from below the gate produces shear stresses that exceed the critical shear stress for the incipient motion of the bed material. Over a period of time, the scouring of the bed material causes the flow depth downstream from the gate to increase, thereby resulting in a mechanism of reduced bed shear stress, which in turn reduces the rate of scour. Though the flow field is simple, the scour mechanism is complex and dynamic.

### 2- Methodology

The dimensions and flow conditions of the numerical model were the same as Kells et al., 2001 laboratory model. The geometries of the numerical model were created using flow3D software, and solutions were created out by VOF method. In this study, the effect of grain size on the dynamics of local scour processes is discussed in the context of the erosion that takes place downstream from a submerged sluice gate. Three gradations of non-cohesive bed material were used to study the scour process for various tailwater depth and sluice openings. The sand gradations included three sizes of uniformly graded. A total of 18 model was simulated, each for a period of 2 h. An equilibrium scour condition was attained over this time period for all of the models, although a sense of similarity in the bed profiles is observed in the region close to the sluice gate.

---

\* Corresponding Author: [mhosein.behpour@gmail.com](mailto:mhosein.behpour@gmail.com)

### 3- Results

The present results indicate that the depth and the area of scour are highly dependent on the bed grain size, both increasing as the grain size is reduced. Moreover, the maximum scour depth increases with increases in the tailwater depth. Finally, it was found that the location of the point of maximum scour depth, as measured from the upstream end of the erodible sand bed, moved downstream with an increase in either the opening or tailwater depth and upstream with an increase in the grain size.

### 4- Discussion & Conclusions

The primary purpose of this study was to evaluate the effect of grain size and, to a lesser extent, of grain size distribution on the dynamics of local scour below a sluice gate. In short, it was found that the grain size has a significant influence on the extent of scour, which occurs, with more scour occurring for smaller-sized material. As well, it was found that less scour occurred for a graded sand than a uniform one having a similar median grain size. Of particular interest, however, is that for any given grain size, the greater is the tailwater depth, the greater is the depth, extent, and volume of scour. It appears that the tailwater serves to slow the rate of jet expansion, thus increasing the length of bed exposed to high velocity, hence high shear stress, conditions.

**Key Words:** Grain size, Local scouring, Numerical model, Sluice gate, Tailwater depth.