

شبیه‌سازی عددی اثر زاویه دریچه کشویی بر جریان و اندرکنش آن با بستر فرسایش پذیر پایین دست

شهاب نیر^۱، مهران خیرخواهان^۲، خسرو حسینی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۹

چکیده

پایداری سازه‌های هیدرولیکی یکی از مسائل مهمی است که همواره مورد توجه محققین می‌باشد. تغییرات بستر ناشی از جریان عبوری اطراف سازه‌های هیدرولیکی یکی از عوامل تأثیرگذار بر این پایداری است. در مطالعه حاضر آبشستگی و رسوب‌گذاری در پایین‌دست دریچه کشویی با زوایای مختلف (۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. نتایج این مدل‌سازی نشان داد که مدل عددی Flow-3D علاوه بر پیش‌بینی مقادیر حدی عمق و ارتفاع رسوب‌گذاری با شاخص آماری $R^2=0/9$ ، در شبیه‌سازی شکل این تغییرات نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. تغییرات بستر نشان داد که با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه عمق آبشستگی تا ۳/۴ برابر ضخامت جت جریان افزایش یافته، در حالی که برای زاویه ۶۰ درجه با ۲/۸ برابر بازشدگی دریچه، حداقل مقدار را داراست. فاصله مقادیر حدی آبشستگی و رسوب‌گذاری برای زاویه ۶۰ درجه در حدود ۱۲ برابر ضخامت جت جریان و همچنین عرض و طول گردابه تشکیل شده در پایین‌دست دریچه به ترتیب برابر با بزرگای عمق جریان و ۱۶ الی ۱۷ برابر ضخامت جت جریان است. چرخش این گردابه در ناحیه بین خط جدایی جریان و دریچه، با سرعتی در حدود ۱۰ درصد سرعت جت جریان به صورت پادساعتگرد محدود است. لذا دریچه ۶۰ درجه با در نظر گرفتن عمق آبشستگی و ارتفاع رسوب‌گذاری، بهترین زاویه جهت طراحی است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، تغییرات زمانی آبشستگی، جت جریان، رسوب‌گذاری، Flow-3D

مقدمه

سرعت موضعی جریان و تغییر در خطوط جریان باعث ایجاد نیروهای فرسایش اضافی بر بستر اطراف سازه می‌شوند. در نتیجه نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به تغییرات تراز عمومی بستر آبراهه می‌شوند. آبشستگی اطراف سازه‌هایی نظیر پایه‌پل، آبسکن، کالورت‌ها، حوضچه‌های آرامش، سرریزها، شوت‌ها و همچنین دریچه‌های کشویی که خروجی آب با سرعت زیاد است، اتفاق می‌افتد. لذا پیش‌بینی میزان حداکثر عمق آبشستگی و تلاش در راستای کاهش این عمق اهمیت دارد. بنابراین همواره بررسی میزان تأثیر عوامل مختلف موثر بر آن در شرایط مختلف بستر و سازه مورد توجه است. وقتی جریان با سرعت زیاد و ضخامت نسبتاً کم وارد سیالی با سرعت کمتر از خود شود، میدان حاصل از تداخل این دو جریان، جت نامیده می‌شود (Karim et al., 2000). جریان در زیر دریچه کشویی نیز از این نوع است. جریان بلافاصله بعد از خروج از زیر دریچه، به صورت جت وارد سیال اطراف خود می‌شود. بر اثر عبور جریان از روی بستر و اندرکنش بین جریان و رسوب، بخشی از انرژی جریان کاسته می‌شود. همچنین ممکن است در پایین‌دست دریچه پرش هیدرولیکی رخ دهد که موجب اتلاف بخشی از انرژی جنبشی جریان به صورت

آبشستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در اطراف سازه‌های هیدرولیکی به وجود می‌آید. این پدیده ممکن است پایداری سازه‌هایی که در مجاورت آن قرار دارند را تهدید کند و حتی موجب ناپایداری و تخریب آن‌ها شود. تحقیق و مطالعه در ارتباط با اثرات پدیده آبشستگی اهمیت زیادی دارد چرا که در بعضی مواقع ممکن است تخریب سازه‌های زیربنایی در اثر این پدیده، منجر به وقایع غیرقابل جبران شود (Annandale, 2006). یکی از انواع آبشستگی، آبشستگی موضعی ناشی از اثر موضعی سازه‌ها بر الگوی جریان است که به صورت موضعی در پایین‌دست یا اطراف سازه‌ها رخ می‌دهد. این سازه‌ها با تغییر در

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
* نویسنده مسئول: (Email: khoseini@semnan.ac.ir)

توسط بروزرز و راودکیوی و همچنین هافمنس و ورهچ در خصوص پدیده آبستگي در شرایط هیدرولیکی مختلف انجام شد که نهایتاً به ارائه روابطی جهت محاسبه حداکثر عمق آبستگي ناشی از جت افقی مستغرق عبوری از زیر دریچه، سرعت خروجی از زیر دریچه و سرعت جریان در پایین دست حفره آبستگي منجر شد (Breusers and Raudkivi, 1991; Hoffmans and Verheij, 1997). علی و نیشابوری اثر عدد فرود را بر گسترش حفره آبستگي بررسی کردند و مشاهده کردند که عمق آبستگي تعادلی با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد (Ali and Neyshaboury, 1993). این نتایج با مطالعه دی و سرکار که آبستگي ناشی از یک جت افقی دریچه کشویی را برای کف‌بندهایی با طول مختلف را بررسی کردند، مطابقت دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که حفره و تلماسه تشکیل شده در پایین دست دریچه در زمان‌های مختلف با یکدیگر مشابه هستند و مستقل از تمامی پارامترهای موثر از جمله دانه‌بندی مصالح، زمان، عمق پایاب، ضخامت و سرعت جت است. همچنین مشاهده کردند که در پایین دست جت جریان، با افزایش عدد فرود عمق آبستگي تعادلی افزایش می‌یابد (Dey and Sarkar, 2006).

مطالعات آزمایشگاهی تحت اثر عوامل مختلف توسط محققین بسیاری نظیر اگنبرگر و مولر (Eggenberger and Mueller, 1944)، کوتولاس (Kotoulas, 1967)، والتین (Valentin, 1967)، دی و وستریچ (Dey and Westrich, 2003) و همچنین هوفینگر و همکاران (Hopfinger et al., 2004)، جهت پیش‌بینی عمق آبستگي و ارائه رابطه محاسباتی انجام شده است. در همین راستا اوپوماز داده‌های آزمایشگاهی خود را جهت یافتن معادله لگاریتمی-خطی و رابطه بین اندازه رسوبات، عمق آبستگي، عمق آب پایاب، دبی جریان و هد بالادست مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. ایشان دریافت که عمق آبستگي با $D_{90}^{0.4}$ رابطه عکس دارد و معادله خود را به صورت رابطه (۱) ارائه داد.

$$d_0 + h_1 = w \frac{h^{0.5} q^{0.6}}{D_{90}^{0.4}} \quad (1)$$

به طوری که در رابطه (۱)، d_0 عمق آبستگي (متر)، h_1 عمق پایاب (متر)، D_{90} قطر ۹۰ درصد ذرات رسوب (میلی‌متر)، h ارتفاع جریان بالادست دریچه (متر)، q دبی جریان در عرض واحد (متر مکعب بر ثانیه بر متر) و w نیز بعنوان یک ضریب تعریف شده است (Uyumaz, 1988).

ادوس و اسکورتینو در مطالعه آزمایشگاهی خود به بررسی آبستگي در پایین دست یک آب‌پایه همراه با کف‌بند پرداختند و مانند لارسن بیان داشتند که پروفیل بدون بعد آبستگي در همه آزمایش‌ها مشابه هم هستند و اینکه پروفیل سرعت در طول چاله آبستگي به یک جت آزاد غیرمتمقارن شبیه است (Adduce and Sciortino, 2006). ترگناگی آبستگي در شرایط جریان دائمی و غیر دائمی را

گرما خواهد شد. هرچند ممکن است طول کوتاهی از بستر پایین دست دریچه توسط کف‌بند و یا سنگ‌چین محافظت شود، اما معمولاً جت جریان هرچند با انرژی کاهش یافته، به بستر فرسایش‌پذیر می‌رسد. این تغییر نوع بستر باعث جدایی خطوط جریان در انتهای قسمت حفاظت شده و تشکیل گردابه‌هایی در آن ناحیه می‌شود. نفوذ جت در لایه رسوبی، سبب معلق شدن ذرات رسوبی شده و در اثر جریان غلتابی، این ذرات به بالا و پایین دست حمل شده و حفره آبستگي را تشکیل می‌دهند (ناصحی، ۱۳۷۵).

در لحظات ابتدایی فرسایش، قسمت عمده رسوبات به صورت بار معلق حمل می‌شوند، سپس به تدریج چاله آبستگي با گذشت زمان در بعد افقی گسترش می‌یابد. بر اثر این آبستگي، سطح مقطع جریان افزایش پیدا کرده و با توجه به قانون پیوستگی جریان، سرعت متوسط کاهش می‌یابد، بنابراین نرخ فرسایش کاهش یافته و چاله آبستگي به حالت تعادل^۱ که جریان قدرت حمل ذرات را ندارد، می‌رسد (مسعودیان، ۱۳۷۴). همانطور که بیان شده مطالعه آبستگي و فرسایش در اطراف سازه‌های هیدرولیکی همواره مورد توجه محققین مختلفی بوده است که همواره در راستای پایداری بیشتر سازه‌ها تلاش کرده‌اند. دریچه‌های کشویی یکی از این سازه‌ها هستند و جت ناشی از آن‌ها، در پایین دست خود تغییراتی را ایجاد می‌کند که بررسی این تغییرات نیز از دید محققین پنهان نبوده است.

شکل پروفیل ایجاد شده در پایین دست جت توسط لارسن بر روی بستر متحرک مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. ایشان بیان داشت که با استفاده از پارامتر طول X_D می‌توان پروفیل بدون بعد را برای آبستگي به دست آورد. X_D در واقع فاصله افقی از محل خروجی جت تا تاج تپه پایین دست حفره آبستگي تعریف شد که تابعی از زمان و سرعت خروجی از زیر دریچه است (Laursen, 1952). تاراپر روند آبستگي ناشی از جت افقی مستغرق را به سه مرحله تقسیم کرد که به ترتیب شامل، گسترش تصادفی طول حفره آبستگي، حمل مصالح به صورت بار بستر و حفره آبستگي متناسب با لگاریتم زمان و نهایتاً مرحله آخر کاهش سرعت روی جداره است که مقارن با زمان تعادل رخ می‌دهد (Tarapore, 1956).

راجاراتنام جت‌هایی با عمق پایاب مختلف (عمقی چند برابر با ضخامت جت و عمقی تقریباً برابر با ضخامت جت) را آزمایش کرد. نتایج ایشان حاکی از تشابه پروفیل طولی آبستگي و تغییرات لگاریتمی عمق آبستگي نسبت به زمان بوده که با یافته‌های لارسن (Laursen, 1952) مطابقت داشت (Rajaratnam, 1981 and Rajartnam et al., 1977, 1983, 2003). نتایج آزمایشات لیم نشان داد که عمق پایاب شدیداً بر روند توسعه آبستگي ناشی از جت دیواره‌ای تأثیر دارد (Lim, 1985). تحقیقات آزمایشگاهی مختلفی

کاهه و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقات خود به مدلسازی آبستگي پایین‌دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه پرداختند. نتایج مدل عددی Flow-3D نشان داد که این نرم افزار از قدرت بالایی در شبیه‌سازی اندرکنش بین جریان و رسوب بستر برخوردار است. شیوا و همکاران (۱۳۹۴) اثر طول کفبند بر آبستگي ناشی از جت افقی خروجی از یک دریچه کشویی قائم را بررسی نمودند و مشاهده کردند که با گذشت زمان ابعاد پروفیل آبستگي افزایش یافته در حالی که نرخ فرسایش کاهش می‌یابد. امن‌زاده و کاردان (۱۳۹۷) آبستگي در پایین‌دست دریچه کشویی را به صورت عددی و با استفاده از مدل Flow-3D شبیه‌سازی کردند. ایشان بیان داشتند که این مدل عددی توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی این پدیده دارد و همچنین بیان داشتند که هرچه میزان بازشدگی دریچه بیشتر شود، برای یک دبی ثابت، حداکثر عمق آبستگي کاهش می‌یابد. گوهری و همکاران (۱۳۹۸) آبستگي پایین‌دست سرریز لایبرنت مستطیلی با دریچه را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و بیان داشتند که در این سرریز با تخلیه بیشتر انرژی در محل برخورد با کفبند، امکان انتقال بیشتر رسوبات با پایین‌دست کاهش می‌یابد و ارتفاع موج ماسه در پایین‌دست کفبند بیشتر است.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بررسی شرایط جریان و آبستگي اطراف دریچه‌ها و جت‌ها انجام شده است که در بخش مقدمه به آن پرداخته شد. نکته قابل توجه در این خصوص آن است که مدل‌های عددی یکی از روش‌های مهم در دهه‌های حاضر هستند که به کمک آن‌ها می‌توان شرایط مختلف را مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار داد. لذا، در تحقیق حاضر با توجه به منابع بررسی شده و همچنین به کمک مدل عددی Flow-3D که در تحقیقات مختلف توانایی آن مشخص گردیده است، مدلسازی جریان و اندرکنش آن با بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست دریچه تحت اثر زوایای مختلف مورد تحقیق واقع شده است، تا اثر این زوایا بر فرسایش پایین‌دست بررسی شود.

مواد و روش‌ها

مدل Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow science, Inc صورت گرفته است. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آشفتگی، محیط‌های متخلخل، آبستگي و غیره است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل دوبعدی یا سه‌بعدی میدان جریان را به صورت حجم دارا می‌باشد و از المان‌های سه‌بعدی متعامد استفاده می‌کند و در ایجاد مانع در برابر جریان، قابلیت‌های ویژه‌ای دارد. امتیاز این مدل استفاده از شبکه‌بندی مستطیلی و روش حجم محدود است.

مورد بررسی و آزمایش قرار داد و نشان داد که حداکثر عمق آبستگي در زمان تعادل، به دبی حداکثر در زمان سیلاب بستگی دارد (Tregnaghi, 2008).

در مطالعه عددی اسمیت از مدل آبستگي نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی انتقال رسوبات ریزدانه به منظور پیش‌بینی تغییرات زمانی بستر استفاده شد. نتایج نشان داد که شکل کلی چاله آبستگي با مشاهدات هماهنگی خوبی دارد، هرچند عمق چاله آبستگي کمتر از واقعیت است (Smith, 2007). عبدالعزیز و همکاران جهت بهبود عملکرد نرم‌افزار Flow-3D یک معادله انتقال بار بستر جدید جهت برآورد ابعاد حفره آبستگي و پشته‌های رسوبی ناشی از جت افقی مستغرق در پایین‌دست دریچه نوشتند (Abdelaziz et al., 2010). در بررسی آزمایشگاهی آبستگي ناشی از عبور همزمان جریان از زیر دریچه و روگذری از آن توسط دهقانی و همکاران مشخص شد که قسمت عمده آبستگي در جریان ترکیبی، مربوط به عبور جریان روگذر است (Dehghani et al., 2010).

حمیدی‌فر و همکاران (۱۳۸۹) آبستگي موضعی بستر در پایین‌دست دریچه کشویی را بررسی کردند و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط و نمودارهایی بدون بعد جهت محاسبه ابعاد مشخصه‌های حفره آبستگي در مجاورت کفبند ارائه کردند. در پژوهشی دیگر، حمیدی‌فر و همکاران با بررسی زبری بستر مشاهده کردند که، حداقل درصد کاهش عمق آبستگي بر روی بستر زبر در حدود ۵۹ درصد و برای بزرگترین عدد فرود ($F_r=12.78$) و کوچکترین مقدار زبری ($k_s=1$ mm) بود. همچنین برای بزرگترین زبری ($k_s=5$ mm)، حداقل کاهش عمق آبستگي بیش از ۹۳ درصد در مقایسه با بستر صاف بود (Hamidifar et al., 2011). شستاکف و همکاران با استفاده از روش PIV^۱ شکل‌گیری جریان را در جت شکافدار بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای برخی دوره‌های کوتاه مدت گردابه‌های مقیاس بزرگ شبه دوبعدی به صورت متقارن در جهات مختلف جت مشاهده می‌شود. این روند گاه و بیگاه در جت‌های دور و نزدیک رخ می‌دهد که نیاز به تحقیق بیشتری دارد (Shestakov et al., 2015). محمد و همکاران اثر برخورد جت جریان به کف فرسایش‌پذیر را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مدل عددی Flow-3D با دقتی برابر با ۹۵/۲۵ درصد دقت خیلی خوبی در شبیه‌سازی مدل این مسأله داشته است (Mohammed et al., 2018). مارتینو و همکاران به بررسی آزمایشگاهی حفره آبستگي ناشی از جت جریان پرداختند. ایشان بیان داشتند که در ابتدای گسترش حفره آبستگي تپه‌های پایین‌دست دستخوش جابجایی‌هایی از شکل مثلی به دوزنقه‌ای هستند (Martino et al., 2019).

$$h_n = 0.3d_n d_{*,n}^{0.7} \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (۶)$$

معیارهای ارزیابی مدل

برای مقایسه کمی عملکرد مدل‌های پیشنهادی می‌توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقی‌مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده بهره گرفت. در این تحقیق از میانگین مطلق خطا^۴ (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE)، ضریب تعیین^۶ (R^2) و خطای متوسط مربعات^۷ (MSE) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. بیان ریاضی این آزمون‌ها در رابطه (۷) آورده شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O - P|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O - P)^2}{N}}$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O - P)^2}{\left(\sum_{i=1}^N O^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N P^2}{N} \right) \right)} \right] \quad (۷)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (O - P)^2$$

در رابطه (۷)، O و P به ترتیب مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده هستند (Nayyer et al., 2019).

صحت‌سنجی مدل عددی

جهت بررسی صحت نتایج مدل عددی Flow-3D و اطمینان از استناد به نتایج آن، از مدل آزمایشگاهی مارتینو و همکاران (Martino et al., 2019) استفاده شده است. ایشان در کار آزمایشگاهی خود جهت شبیه‌سازی آبستتگی در پایین‌دست جت جریان در زیر دریچه کشویی از یک فلوم به طول ۱/۵ متر، عرض ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده کردند. بستر فلوم از یک لایه رسوب یکنواخت با $D_{50}=1.1\text{mm}$ و چگالی رسوب خشک kg/m^3 ۲۶۵۰ پوشیده شده است. همچنین دبی جریان ۶/۵۱ lit/min برای ارتفاع عمق پایاب برابر با ۱۳ سانتی‌متر و با دریچه کشویی لبه تیز به ضخامت ۲ سانتی‌متر و بازشدگی ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. این فلوم و مشخصات آن در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد، هندسه مدل آزمایشگاهی و شرایط رسوب عیناً مطابق شکل ۱ در نرم‌افزار مدل شد. (Martino et al., 2019)

این نرم‌افزار از دو روش عددی VOF^۱ و FAVOR^۲ برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌گیرد (Flow-3D user manual, V.9).

معادلات حاکم بر جریان در این مدل عددی شامل پیوستگی (رابطه ۲) و مومنتوم (رابطه ۳) در سیستم متریک هستند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y \quad (۳)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z$$

در روابط فوق، V_F جز حجمی سیال، ρ چگالی سیال، u و v سرعت جریان در راستای x و y و z ، همچنین A_x ، A_y و A_z برابر با مساحت کسری محیط به جریان در جهت‌های x ، y و z هستند. f ، G و b به ترتیب برابر با شتاب بدنه، شتاب لزج و افت جریان در محیط‌های متخلخل هستند. همچنین معادله انتقال رسوب برای ذره رسوب n به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(s_n - 1)d_n^3]^{0.5}} \quad (۴)$$

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (۵)$$

در رابطه (۴)، $q_{b,n}$ نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و Φ_n بر اساس رابطه (۵) میریپتر-مولر (۱۹۸۴) محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۰) B_n ضریب بار بستر است که برای نرخ انتقال رسوب پایین بین ۵ تا ۵/۷، برای نرخ انتقال متوسط حدود ۸ و برای نرخ انتقال بالا برابر با ۱۳ است. $C_{b,n}$ جزء حجمی ذره رسوب n در بستر است که به صورت $\sum_{n=1}^N C_{b,n} = 1$ محاسبه می‌گردد که در آن N تعداد کل ذرات رسوب است. معادله فن‌راین^۳ برای محاسبه ضخامت لایه رسوبی h_n به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود (Flow-3D user manual, V.9).

۴- Mean Absolute Error

۵- Root Mean Square Error

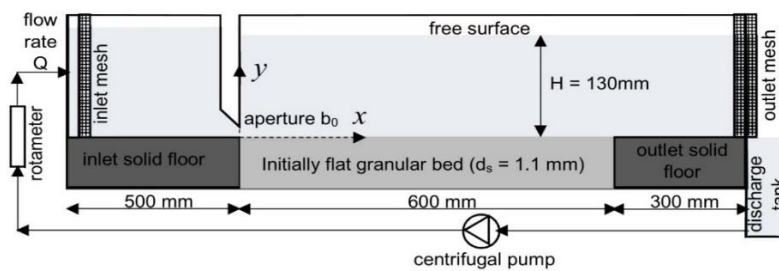
۶-The Coefficient of Determination

۷- Mean Square Error

۱- Volume of Fluid

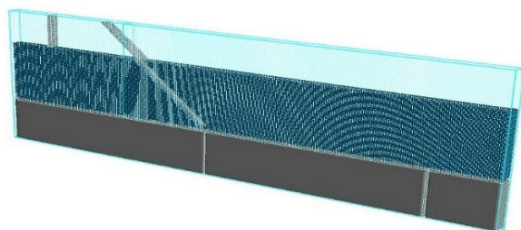
۲- Fractional Area/Volume Obstacle Representation

۳- Van Rijn

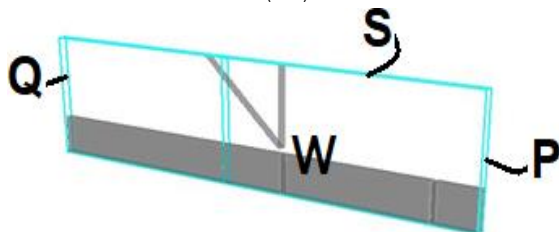


شکل ۱- مشخصات فلوم آزمایشگاهی (Martino et al., 2019)

پارامترهای طولی حفره آبستگي و تلماسه (d_s) استفاده شده است. جدول ۳ نیز مقادیر معیارهای ارزیابی جهت مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در شکل ۳ و جدول ۲ حاکی از توانایی مناسب این مدل عددی در شبهه‌سازی پدیده مورد بحث در مقاله حاضر است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف): نمایش شبکه محاسباتی، (ب): هندسه مدل و شرایط مرزی در نرم‌افزار با استفاده از ابزار FAVOR برای دریچه ۹۰ و ۴۵ درجه

همانطور که مشاهده می‌شود مدل عددی Flow-3D با دقت بالایی توانسته است میزان و شکل فرسایش ناشی از جت جریان در پایین دست دریچه عمودی را شبهه‌سازی کند و نتایج قابل قبولی ارائه دهد که این مسأله با نتایج کاهه و همکاران (۱۳۹۳)، امن زاده و کاردان (۱۳۹۷) و همچنین محمد و همکاران (Mohammed et al. 2018) مطابقت دارد. لذا در ادامه جهت مدلسازی دریچه با زوایای مختلف (۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) و آبستگي پایین دست آن برای دبی ۶/۵۱ lit/min از نرم‌افزار Flow-3D استفاده می‌شود تا اثر تغییر دریچه با بازشدگی یکسان در همه مدلسازی‌های با یکدیگر مقایسه

جهت شبهه‌سازی اندرکنش بین جریان و رسوبات بستر، از مش با ابعاد یکنواخت ۳/۵ میلی‌متر در تمام جهات استفاده شد. شرایط مرزی در مرزهای مدل به صورت دیواره^۱ در کف و کناره‌ها، دبی ورودی^۲ در مرز ورود جریان، فشار^۳ در مرز خروجی و مرز متقارن^۴ در Z_{max} که در تماس با اتمسفر است تعریف شده است (جدول ۱). هندسه مدل در محیط نرم‌افزار با استفاده از ابزار FAVOR در شکل ۲ برای زاویه ۹۰ و ۴۵ درجه نشان داده شده است. در تحقیق حاضر با استناد به صحت‌سنجی انجام شده با توجه به نتایج مدل آزمایشگاهی، تغییراتی در زاویه دریچه کشویی ایجاد شد تا اثر این تغییرات بر بستر پایین دست بررسی گردد. لذا دریچه به زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه مدلسازی شد.

جدول ۱- شرایط مرزی مورد استفاده در مدل‌سازی

مرزهای مدل					
X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}
Volume Flow Rate (Q)	Pressure (P)	Wall (w)	Wall (w)	Wall (w)	Symmetry (S)

بحث و نتایج

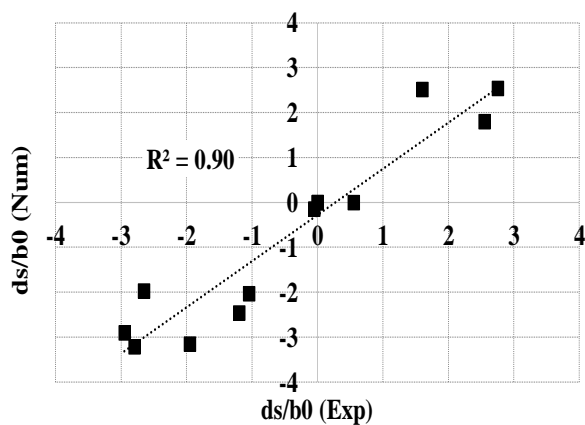
پس از مدلسازی، نتایج حاصل از شبهه‌سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی مارتینو و همکاران (Martino et al., 2019) در شکل ۱ با یکدیگر مقایسه شد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر آبستگي مدل عددی، زاویه حفره، روند تغییرات بستر، ارتفاع رسوب‌گذاری، محل تغییر آبستگي به فرسایش و همچنین شیب سطوح تلماسه‌ها در مدل عددی با دقت مناسب و قابل قبولی شبهه‌سازی شده است. در شکل ۳، b_0 ارتفاع بازشدگی دریچه کشویی است که جهت بی‌بعد سازی از ابعاد طولی هندسه (Z و X) و

- ۱- Wall
- ۲- Volume Flow Rate
- ۳- Pressure
- ۴- Symmetry

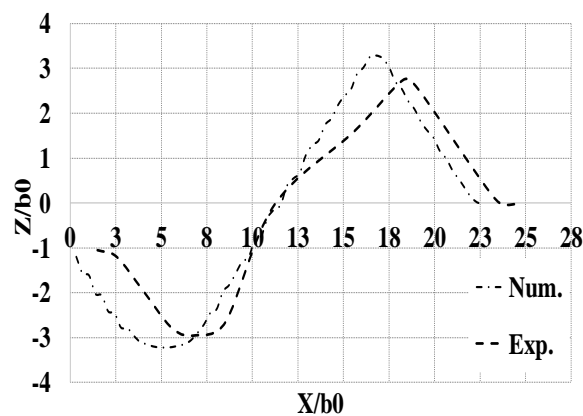
گردد.

(عمق فرسایش، ارتفاع رسوب‌گذاری و ابعاد حفره)، خطوط جریان اطراف دریچه و همچنین مقادیر سرعت جت جریان خروجی از دریچه برای حالت‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در ادامه آورده شده است.

با تأیید عملکرد مدل عددی Flow-3D در شبیه‌سازی، نتایج حاصل از سایر شبیه‌سازی‌های مورد نظر پژوهش حاضر در بخش‌های مختلف شامل تغییرات بستر فرسایش‌پذیر پایین‌دست دریچه



(ب)



(الف)

شکل ۳- مقایسه نتایج مدل عددی (Num) و آزمایشگاهی (Exp) برای دریچه با زاویه ۹۰ درجه، الف) بستر با عمق آبستگي تعادلی و ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین‌دست دریچه، ب) مقادیر کمی عمق آبستگي و ارتفاع رسوب‌گذاری

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی مدل عددی

MAE	RMSE	R ²	MSE
0.55	0.7	0.9	0.49

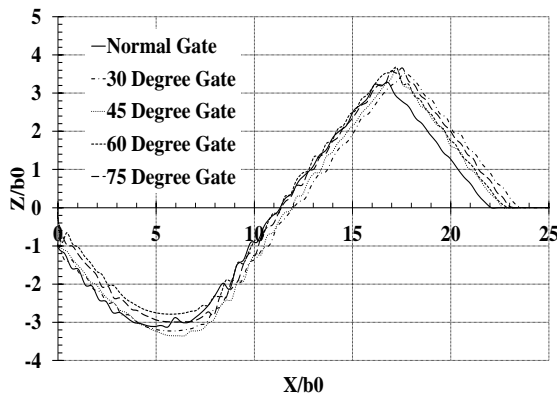
می‌دهند.

در مسأله آبستگي پایین‌دست دریچه، علاوه بر عمق آبستگي، ارتفاع تلماسه، زوایای بازو بالا رونده تلماسه، بازوی پایین‌رونده تلماسه و همچنین ارتفاع آن نیز قابل بررسی و مقایسه است. شکل ۵ تغییرات بستر را در پایین‌دست دریچه برای زوایای مختلف نشان می‌دهد. مقادیر عمق آبستگي نهایی و ابعاد حفره آبستگي و همچنین ارتفاع رسوب‌گذاری و ابعاد تلماسه به خوبی در این شکل مشخص و برای ابعاد بازشدگی دریچه و ضخامت جت جریان بی‌بعد شده است. به طور کلی شکل حفره آبستگي و تلماسه در تمامی زوایا مشابه یکدیگر است و اختلاف اساسی در عمق آبستگي و ارتفاع رسوب‌گذاری است. کمترین عمق آبستگي و بیشترین ارتفاع رسوب‌گذاری برای زاویه ۶۰ درجه تشکیل شده، که به ترتیب در فاصله ۵/۳ و ۱۷/۲۵ برابری ارتفاع بازشدگی دریچه قرار دارد. بنابراین فاصله مقادیر حدی عمق آبستگي و حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری در حدود ۱۲ برابر ضخامت جت جریان زیر دریچه یا بازشدگی دریچه است. ارتفاع رسوب‌گذاری به عمق فرسایش در این زاویه حدود ۳۰ درصد بیشتر است.

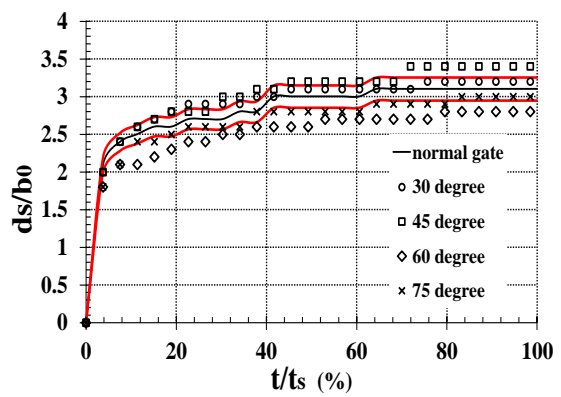
تغییرات بستر فرسایش‌پذیر

تغییرات حداکثر عمق آبستگي (ds) نسبت به زمان برای تمامی زوایا در شکل ۴ مشخص شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود عمق آبستگي در ابتدای فرسایش در زمان کوتاه‌تری تغییر می‌کند و نرخ آبستگي بسیار بالا است به نحوی که در حدود ۴۰ درصد زمان تعادل، عمق فرسایش به طور متوسط در حدود ۹۲ درصد کل عمق آبستگي تعادلی است.

با افزایش زاویه دریچه از حالت نرمال به ۳۰ و ۴۵ درجه، عمق آبستگي تعادلی افزایش یافته و این افزایش برای زاویه ۴۵ درجه بیش از پنج درصد و در حدود ۳/۴ برابر بازشدگی دریچه است. در ادامه با افزایش زاویه به ۶۰ و ۷۵ درجه، مشاهده می‌شود که در زاویه ۶۰ درجه فرسایش کاهش یافته و حداکثر عمق آبستگي تعادلی، با نسبتی در حدود ۲/۸ برابر بازشدگی دریچه، کمترین مقدار را داراست که در حدود ۱۰ درصد از حالت نرمال کمتر است. همچنین با افزایش زاویه به ۷۵ درجه مجدداً عمق آبستگي افزایش می‌یابد اما آبستگي تعادلی این زاویه در حدود ۳ برابر بازشدگی دریچه و پنج درصد کمتر از حالت زاویه نرمال است. خطوط قرمز روی شکل ۴ مقادیر ۵ درصد کمتر و بیشتر (±۵%) از زاویه نرمال را نشان



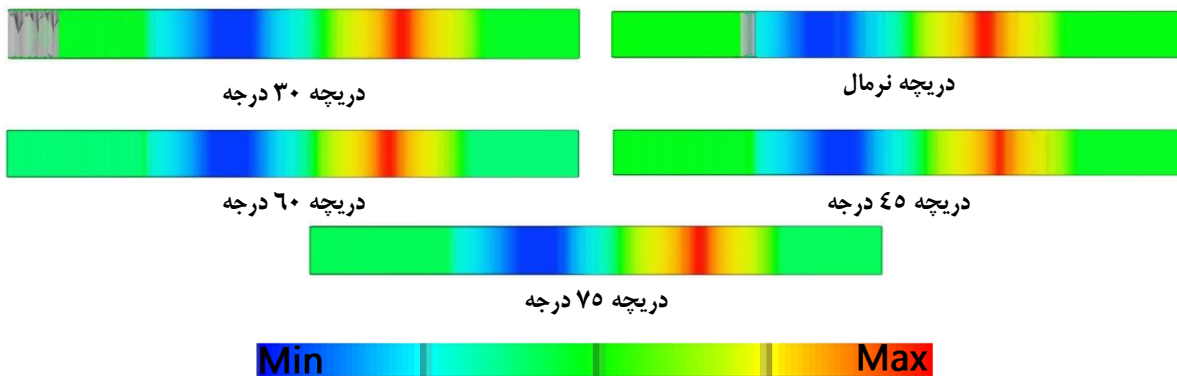
شکل ۵- تغییرات بستر فرسایش پذیر در پایین دست دریچه با زوایای مختلف



شکل ۶- تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی بی بعد در پایین دست دریچه برای زوایای مختلف

از طول تلماسه (طول تصویر شده تلماسه بر روی محور افقی)، به طور متوسط در حدود پنج درصد بیشتر و برای زاویه ۷۵ درجه، پنج درصد کمتر است. این درحالی است که برای زاویه ۴۵ درجه این نسبت در حدود ۱۳ درصد است. نهایتاً نسبت طول تصویر حفره به تصویر تلماسه در زاویه ۶۰ درجه برابر با یک است. شکل ۶ طول تصویر بیان شده را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۶ مشخص می‌شود که مقدار حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری (محدوده قرمز رنگ) برای زاویه ۴۵ درجه نسبت به سایر زوایا کمتر است و تلماسه در این زاویه قله تیزتری دارد.

بیشترین عمق آبشستگی و کمترین ارتفاع رسوب‌گذاری به ترتیب برای دریچه با زاویه ۳۰ درجه و دریچه نرمال مشاهده شد. در آزمایش مارتینو و همکاران (Martino et al., 2019) فاصله مقادیر حدی در حالت زاویه نرمال حدود ۱۱/۵ برابر ضخامت جت جریان بوده است که این مقدار در مدل عددی حدود ۱۲/۶ برابر بوده است که اختلاف آن کمتر از ۱۰ درصد است. این مسأله نیز مبین دقت مناسب مدل عددی است. نکته دیگر در ارتباط با تغییرات بستر در پایین دست دریچه آن است که طول حفره آبشستگی (طول تصویر شده حفره آبشستگی بر روی محور افقی) در دریچه نرمال و دریچه با زاویه ۳۰،

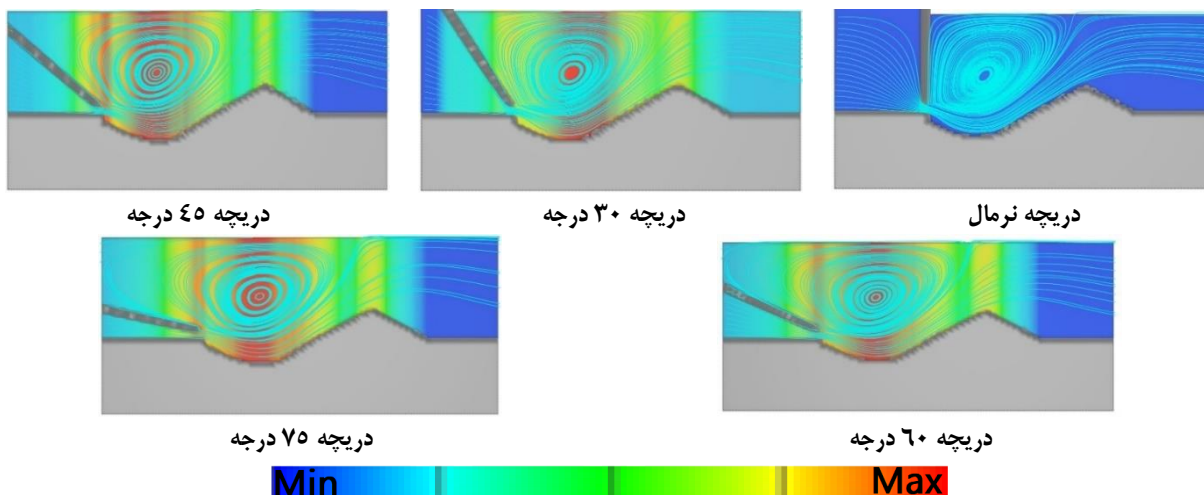


شکل ۷- پلان تراز بستر، طول حفره آبشستگی و تلماسه در زوایای مختلف

گردابه به اندازه عمق جریان و طول گردابه در حدود ۱۶ الی ۱۷ برابر ضخامت جت جریان در پایین دست است. بعد از این طول که دقیقاً در محل پیدایش ارتفاع حداکثر رسوب‌گذاری است جریان حرکت خود در مسیر اصلی به سمت پایین دست را از سر گرفته و از گردابه خارج می‌شود.

خطوط جریان و سرعت

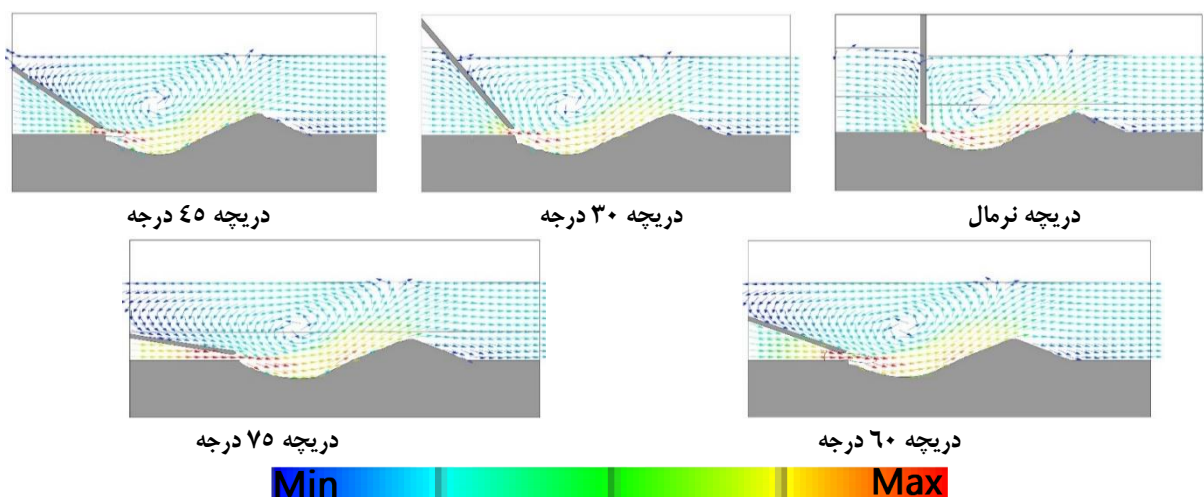
خطوط جریان اطراف دریچه و همچنین تغییرات سرعت در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. خطوط جریان کمک می‌کند تا شرایط جریان و گردابه‌های تشکیل شده مشاهده شوند. جریان عبوری پس از گذر از زیر دریچه و در نتیجه اندرکنش آن با رسوبات بستر، شروع به چرخش کرده و در پایین دست دریچه، گردابه‌ای به بزرگی عمق جریان را تشکیل می‌دهند. در واقع ارتفاع



شکل ۷- خطوط جریان اطراف دریچه

سمت بالادست قدرت حمل رسوب ناشی از آبشستگی در پایین دست دریچه را از دست داده و با رسوب گذاری در مسیر برگشت خود به صورت گردابی حرکت می کند. در واقع رسوب گذاری در کل محدوده گردابه ایجاد می شود اما چون بخشی از جریان جدا شده در عمق جریان به صورت مستقیم حرکت می کند مانع از رسوب گذاری در کل این محدوده می شود. تلماسه و حفره تشکیل شده نتیجه یک تعادل بین آبشستگی و رسوب گذاری هستند. در شکل های که مربوط به خطوط جریان هستند، محل مقادیر مختلف عدد فرود نیز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین مقادیر عدد فرود در محدوده چاله آبشستگی و راستای تشکیل مرکز گردابه هستند.

با دقت در شکل های ۷ و ۸ مشخص می شود که سرعت جریان در یک ناحیه بسیار کوچک در محل نوک دریچه مقدار قابل توجهی دارد. این ناحیه کوچک اندکی قبل و بعد از دریچه وجود دارد، اما با عبور از دریچه و افزایش عمق سریعاً مقدار آن کاهش یافته و با تشکیل یک ناحیه جدایی جریان در طول توسعه گودال آبشستگی، بخشی از آن به سمت پایین دست و بخشی دیگر با چرخش در محل حفره جریان سرعتی برابر با حدود ۱۰ درصد حداکثر سرعت جریان به خود می گیرد. محل تشکیل مرکز گردابه و همچنین ناحیه جدایی جریان بالای تلماسه دقیقاً در محل های هستند که سرعت دارای مقادیر حداقلی است. علت این مسأله آن است که جریان برگشتی به



شکل ۸- سرعت جریان اطراف دریچه

گسترده گی بسیاری که در مسائل مختلف وجود دارد همواره مورد توجه و حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل عددی Flow-3D تغییرات بستر در پایین دست دریچه با زوایای مختلف و جت جریان ناشی از آن برای رسوبات با $D_{50}=1.1\text{mm}$ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقدار باز شدگی دریچه و ضخامت جت جریان در

نتیجه گیری

مدل سازی عددی یکی از روش های متداولی است که در حال حاضر محققان بسیاری جهت بررسی و تحلیل مسائل مختلف از آن استفاده می کنند. بررسی صحت نتایج مدل عددی با توجه به

امن‌زاده، ف.، و کاردان، ن. ۱۳۹۷. مدلسازی عددی آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران. آذرماه. دانشگاه تهران.

حمیدی‌فر، ح.، امید، م. ح.، و نصرآبادی، م. ۱۳۸۹. آبشستگی موضعی بستر در پایین‌دست دریچه کشویی. نشریه آب و خاک. ۴: ۲۴-۷۳۶.

شیوا، ف.، عطاری، ج. و صانعی، م. ۱۳۹۴. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۷: ۳-۲۴۰-۲۵۴.

کاهه، م. دهقانی، ا.، کاهه، م.، و ظهیری، ع. ۱۳۹۳. مدلسازی عددی آبشستگی پایین‌دست سازه ترکیبی سرریز- دریچه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۱: ۵-۱۱۵-۱۳۳.

گوهری، س. و کبیری، ز. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست سرریز لایبرنت مستطیلی با دریچه. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۲۰: ۷۵-۸۵-۱۰۰.

مسعودیان، م. ۱۳۷۴. پیش‌بینی آبشستگی جت دیواری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی دانشگاه تربیت مدرس.

ناصحی، م. ۱۳۷۵. پروفیل آبشستگی در پایین‌دست آبشار قائم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

Abedelaziz, S., Bui, M.D., and Rutschmann, P. 2010. Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet. River Flow. A. Ditttrich, K. Koll, J. Aberle and P. Geisenhainer.

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.

Ali, K.H.M. and Neyshaboury A.A.S. 1993. Localized scour downstream of a deeply submerged horizontal jet. Proceeding of Instn. Of Civil Engineers. 2.91: 1-18.

Annandale, G.W. 2006. Scour Technology. McGraw-Hill, New York, 430 p.

Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A. J. 1991. Scouring. Balkema, Rotterdam, 142 p.

Dehghani, A.A., Bashiri, H., and Dehghani, N. 2010. Downstream scour of combined flow over weirs and below gates. Proceeding of River Flow 2010,

تمام حالت برابر در نظر گرفته شد. تغییرات زاویه علاوه بر اینکه بی‌اثر نبوده است بلکه اثرات معنا داری بر روی عمق آبشستگی و ارتفاع تلماسه داشته است. نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه اشاره شده است.

- ارزیابی و مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل عددی Flow-3D نشان می‌دهد که این مدل با شاخص آماری R^2 (ضریب تعیین) برابر با ۰/۹ دارای دقت قابل قبولی جهت شبیه‌سازی مسأله آبشستگی و رسوب‌گذاری است. همچنین فاصله مقادیر حدی آبشستگی و رسوب‌گذاری در مدل آزمایشگاهی استفاده شده جهت صحت سنجی و مدل عددی به ترتیب ۱۲/۶ و ۱۱/۵ برابر ضخامت جت جریان است که بیان‌کننده خطایی کمتر از ۱۰ درصد برای مدل عددی است.

- مدل عددی Flow-3D علاوه بر شبیه‌سازی قابل قبول مقادیر حدی آبشستگی و رسوب‌گذاری، در شبیه‌سازی شکل حفره و تلماسه نیز دقت مناسبی دارد.

- تغییرات راستا دریچه نشان داد که با افزایش زاویه دریچه از حالت نرمال به ۳۰ و ۴۵ درجه، مقدار عمق آبشستگی افزایش یافته به نحوی که در زاویه ۴۵ درجه برابر با ۳/۴ برابر ضخامت جت جریان است.

- حداقل عمق آبشستگی در زاویه ۶۰ درجه تشکیل شد، که در حدود ۲/۸ برابر ضخامت جت جریان است. با افزایش زاویه تا ۷۵ درجه عمق آبشستگی افزایش یافته و در حدود ۳ برابر ضخامت بازشدگی دریچه به تعادل رسید. در ارتباط با تلماسه تشکیل شده در پایین‌دست حفره آبشستگی، مشاهده شد که بیشترین ارتفاع رسوب‌گذاری نیز در زاویه ۶۰ درجه و کمترین ارتفاع رسوب‌گذاری در زاویه ۶۰ درجه، محل تشکیل مقادیر حدی آبشستگی و رسوب‌گذاری به ترتیب در فاصله ۵/۳ و ۱۷/۲۵ برابر ضخامت جت جریان در پایین‌دست دریچه است. این حالت به عنوان بهترین زاویه قرارگیری دریچه می‌تواند در طراحی‌ها نیز لحاظ گردد.

- تلماسه تشکیل شده در پایین‌دست دریچه ۴۵ درجه تیزترین قله را دارد.

- گردابه تشکیل شده در پایین‌دست دریچه ضخامتی برابر با بزرگای عمق جریان و طولی در حدود ۱۶ الی ۱۷ برابر ضخامت جت جریان دارد. ناحیه جدایی این گردابه و جریان اصلی از کف حفره آبشستگی شروع شده و تا سطح جریان، دقیقاً محل تشکیل حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری، ادامه دارد. گردابه تشکیل شده در ناحیه این خط جدایی و دریچه، با سرعتی در حدود ۱۰ درصد سرعت جت جریان دارای گردش پادساعتگرد است.

appendix 2: 39-64.

- Mohammed, Fadhi M., Jassim, A., Adil Abbas, H. 2018. An experimental study of factors influencing the scour depth resulting from the collision of water jet in stilling basin floor. *Journal University of Kerbala*. 16. 2: 52-67.
- Nayyer, S., Farzin, S., Karami, H. and Rostami, M. 2019. A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 41.6: 256.
- Rajaratnam, N. 1981. Erosion by plane turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*. 19.4: 339-358.
- Rajaratnam, N. and Berry, B. 1977. Erosion by circular turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Research*. 15.3: 277-289.
- Rajaratnam, N. and MacDougall, R.K. 1983. Erosion by plane wall jets with minimum tail water. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109.7: 1061-1064.
- Rajaratnam, N. and Mazurek, K.A. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tail water. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129.3: 225-229.
- Shestakov, M.V., Dulin, V.M., Tokarev, M.P., Sikovsky, D.P. and Markovich, D.M. 2015. PIV study of large-scale flow organisation in slot jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 51: 335-352.
- Smith, H.D.B. 2007. Flow and sediment dynamics around three-dimensional structures in coastal environments. Ph.D Dissertation. The Ohio State University.
- Tarapore, Z.S. 1956. Scour below a submerged sluice gate. Ph.D Dissertation. University of Minnesota.
- Tregnaghi, M. 2008. Local scouring at bed sills under steady and unsteady conditions. Ph.D Dissertation. Università degli Studi di Padova.
- Uyumaz, A. 1988. Scour downstream of vertical gate. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114.7:811.
- Valentin, F. 1967. Considerations concerning scour in the case of flow under gates. In *Proceedings of the 12th*
- Germany.
- Dey, S. and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron for due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132.3: 246-257.
- Dey, S. and Westrich, B. 2003. Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129.1: 44-53.
- Eggenberger, W. and R. Mueller. 1944. in *Experimentelle und Theoretische Untersuchungen Ueber das Kolkproblem*, Mittel. Versuchsanstalt für Wasserbau. Zurich. Chap. 5.
- FLOW-3D user manual. Ver. 9.0.
- Hamidifar, H., Omid, M.H. and Nasrabadi, M. 2011. Scour downstream of a rough rigid apron. *World Applied Sciences Journal*. 14.8:1169-1178.
- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. 1997. Scour manual. Balkema, Rotterdam.
- Hopfinger, E.J., Kurniawan, A., Graf, W.H., and Lemmin, U. 2004. Sediment erosion by Görtler vortices: the scour-hole problem. *Journal of Fluid Mechanics*. 520: 327-342.
- Karim, O.A. and Ali, K.H.M. 2000. Prediction of patterns in local scour holes caused by turbulent water jets. *Journal of Hydraulic Research*. 38.4: 279-288.
- Kotoulas, D. 1967. Das kolkproblem in rahmen der wildbachverbauung mitteil. *Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswesen*. 43.1.
- Laursen, E.M. 1952. Observations on the nature of scour. *Proceeding of 5th Hydr. Conf. Univ. of Iowa. Studies in Engineering. Bull. 34: 179-197.*
- Lim, S.Y. 1985. Scour and particle diffusion caused by water jets. Ph.D Dissertation. University of Liverpool.
- Martino, R.G., Ciani, F.G., Paterson, A. and Piva, M.F. 2019. Experimental study on the scour due to a water jet subjected to lateral confinement. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 75: 219-227.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. In *IAHSR 2nd meeting*, Stockholm,

Numerical Simulation of Gate angle Effect on Flow and Its Interaction with Downstream Erodible Bed

Sh. Nayyer¹, M. Kheirkhahan², Kh. Hosseini^{3*}

Received: Nov.02, 2019

Accepted: Dec.10, 2019

Abstract

Stability of hydraulic structures is one of the main problem that usually researchers focused on it. Bed change around the hydraulic structures caused by flow is one of this effected items on stability. In this research, the scouring and sedimentation downstream of gate with different angles (30, 45, 60 and 75 degrees) has been investigated with Flow-3D software. This simulation results illustrated that Flow3D software in addition to the prediction of scour depth and sedimentation high with $R^2=0.9$, have acceptable results of bed shape change in simulation. The erodible bed changes showed that with increasing of angle up to 45 degrees, scour depth will increase up to 3.4 times of flow jet thickness, while for gate with 60 degrees this amount is minimum and equal to 2.8. Distance of scour and sedimentation maximum depth and high for 60 degrees was about 12 times of flow jet thickness, also the wide and length of composed vortex downstream of gate were about equal to flow depth and 16 to 17 times of flow jet thickness, respectively. The vortex circulation between separation stream layer and gate, and its velocity is 10 percent of jet velocity which rotate counter clockwise. So gate with angle of 60 degrees according to scour depth and sedimentation high was the best angle for design.

Keywords: Flow Jet, Scouring, Sedimentation, Time Variation of Scouring, Flow-3D

1- Ph.D. Student in Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Ph.D. in Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor. in Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

(*- Corresponding Author Email: khoseini@semnan.ac.ir)