

بررسی عددی و آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های چوگانی و مستقیم

مهناز خلیج، سعید گوهری* و سید سعید اخروی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۱۴)

چکیده

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی آبشستگی پیرامون سازه حفاظتی آبشکن در دو شکل مستقیم و چوگانی پرداخته شده است. در این پژوهش از مدل آبشکن‌های مستقیم و چوگانی با طول ۱۲٪ متر در دبی‌های ۱۰/۵، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه در کانال آزمایشگاهی مستقیم استفاده شده است. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی انتهای دماغه برای آبشکن چوگانی و مستقیم با افزایش دبی جریان افزایش یافته است که مقادیر آن برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۰/۰۹۵ و ۰/۱۰۴ متر بود. همچنین عرض گودال آبشستگی در آبشکن مستقیم ۲/۲۵ و در آبشکن چوگانی دو برابر طول مؤثر آبشکن بود. در این راستا، حداکثر عمق آبشستگی پیرامون دماغه در دو آبشکن مستقیم و چوگانی به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۹ برابر طول مؤثر آبشکن مشاهده شد. شکل بستر رسوبی در پایین دست آبشکن مستقیم در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن کشیده تر دیده شد و تا حدود ۱/۳ برابر عرض کانال در پایین دست آبشکن ادامه داشت، در حالی که برای آبشکن چوگانی حدود ۱/۱۵ برابر عرض کانال بود. به طور کلی ابعاد گودال آبشستگی پیرامون آبشکن چوگانی کمتر از آبشکن مستقیم بود. علاوه بر این به منظور درک رفتار هیدرولیکی جریان پیرامون آبشکن، از مدل عددی Flow3D استفاده شد. بررسی آماری نتایج دو مدل حاکی از وجود خطای نسبی حدود ۲۰ درصد بود که نشان از عملکرد مناسب مدل در تخمین عمق آبشستگی حداکثر است.

واژه‌های کلیدی: آبشکن‌های چوگانی و مستقیم، آبشستگی، مدل‌سازی، عمق آبشستگی

۱. گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

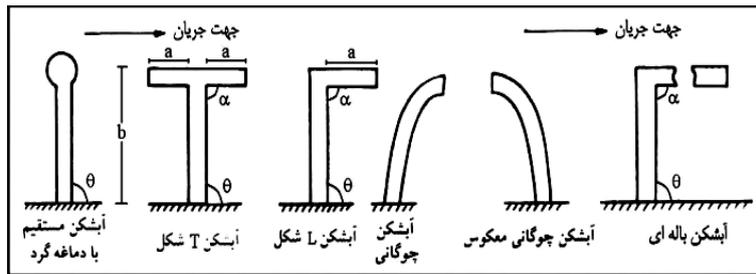
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saeedgohari@yahoo.com

مقدمه

عوامل هیدرولیکی جریان نقش بسزایی در ایجاد فرسایش و تخریب سواحل رودخانه‌ها دارند. این نقش به‌ویژه درحالتی که دیواره‌ها از مصالح غیرچسبنده و لایه‌ای تشکیل شده باشد، بسیار چشمگیر خواهد بود. افزایش دبی سبب افزایش سرعت و تنش برشی شده که این خود موجب ایجاد آبشستگی در بستر و پای دیواره‌ها می‌شود. آبشکن‌ها سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای حفاظت از سواحل رودخانه استفاده می‌شوند. پیش‌بینی حجم و هندسه گودال آبشستگی اطراف آبشکن‌ها می‌تواند در شناخت رفتار رودخانه‌ها مؤثر باشد. آبشکن‌ها با کاهش مقطع رودخانه، الگوی جریان را به‌طور محسوسی تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک شدن به سازه آبشکن آرایش خود را تغییر داده و به تبعیت از ساختار هندسی، نوع سازه (آبشکن نفوذپذیر یا نفوذناپذیر) و سایر مشخصات فنی، الگوهای متفاوتی از جریان در دماغه و میدان آبشکن پدیدار می‌شود (۱). هنگامی که جریان به سازه آبشکن در مسیر مستقیم می‌رسد، در نتیجه تغییر توزیع تنش برشی در اطراف آبشکن، جریان‌های آشفته چرخشی و گردابی در اطراف سازه پدیدار می‌شود. این جریان‌های گردابی به افزایش میزان سرعت و آشفستگی در دماغه بالادست می‌انجامد که سبب آبشستگی موضعی در این ناحیه می‌شود. ترکیب این عوامل منجر به حذف ذرات بستر از اطراف تکیه‌گاه و توسعه گودال آبشستگی می‌شود. این موضوع در زمان طولانی با ایجاد گودال‌های بزرگ در نوک آبشکن، احتمال شکست سازه را به‌دنبال خواهد داشت (۳). در میان انواع سازه‌های آبشکن، آبشکن چوگانی به‌دلیل شکل خاص آن به نوعی منحصر به فرد است. این سازه دارای طولی مستقیم با دیواره‌های متصل به ساحل رودخانه است. دماغه آبشکن چوگانی به شکل‌های انحنا و عصایی شکل طراحی می‌شوند، به‌طوری که در دماغه آبشکن تمرکز جریان و تشدید تلاطم سبب وقوع فرسایش موضعی و تشکیل گودال فرسایشی می‌شود (۵).

عمده پژوهش‌های پیشین بر آبشکن‌های مستقیم صورت

گرفته است (شکل ۱). زیفانگ و همکاران (۲۳)، توزیع شدت آشفستگی جریان پیرامون آبشکن‌ها با شکل دماغه‌های متفاوت و در شرایط یکسان جریان را از طریق مدل‌های آزمایشگاهی بررسی و خطوط تراز آشفستگی را ترسیم کردند. نتایج نشان داد که شدت آشفستگی در آبشکن کمانی شکل و بادبزی نسبتاً ضعیف‌تر از چوگانی شکل است و بیشترین آشفستگی پیرامون آبشکن ذورنقه‌ای شکل رخ می‌دهد. متین‌فرد و همکاران (۱۴)، به بررسی تغییر شرایط هیدرولیکی جریان در اطراف گروه آبشکن L شکل در مسیر قوسی پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر حداکثر سرعت جریان در مجاورت آبشکن از زاویه ۳۰ درجه به ۹۰ درجه کاهش می‌یابد. دوان و همکاران (۶)، به بررسی الگوی جریان پیرامون آبشکن مستطیلی با استفاده از سرعت جریان سه بعدی در بسترهای صاف و تغییر شکل یافته پرداختند. پژوهش‌های آنها نشان‌دهنده افزایش مؤلفه طولی و عرضی و کاهش مؤلفه عمقی سرعت بعد از تشکیل گودال آبشستگی بود. همچنین تنش برشی بستر در اطراف آبشکن شش تا هشت مرتبه بزرگ‌تر از تنش برشی بالادست گزارش شده است. آنها با بررسی تغییرات زمانی ابعاد گودال آبشستگی و تغییرات بستر پیرامون آبشکن T شکل دریافتند که افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین دست قوس جریان سبب افزایش ابعاد گودال آبشستگی می‌شود (۲۲). همچنین مدل‌سازی جریان در آبشکن T شکل با در نظرگیری تغییرات شعاع انحنای قوس جریان نشان از افزایش عمق حداکثر گودال آبشستگی با افزایش نسبت شعاع قوس به عرض جریان است (۲۱). هوشمند آیینی و همکاران (۹)، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی عددی الگوی جریان در اطراف آبشکن‌های چوگانی شکل پرداختند. نتایج نشان داد که گردابه‌های تشکیل‌یافته تا فاصله چندین برابری طول آبشکن نیز ادامه یافته است. همچنین به‌دلیل انحراف جریان در نوک آبشکن حداکثر سرعت در جهت عمود بر جریان در این ناحیه مشاهده شده است. ژنگ و ناکاگوا (۲۴)، با انجام آزمایش‌هایی روی تک آبشکن نفوذپذیر و نفوذناپذیر



شکل ۱. نمای دو بعدی آبشکن‌های مختلف (۱)

و مقایسه آبستکی اطراف این دو نوع آبشکن، به این نتیجه رسیدند که حداکثر عمق آبستکی اطراف آبشکن نفوذپذیر، به میزان تقریباً ۵۰ درصد از آبشکن نفوذناپذیر کمتر است. ناگی (۱۵) به بررسی آزمایشگاهی آبستکی آبشکن مستقیم در کانال مستقیم در دو حالت مستغرق و غیرمستغرق و سه زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به ساحل پایین دست (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) پرداخت. نتایج بر آن شد که حداکثر عمق آبستکی در حالت مستغرق کمتر از غیرمستغرق است. همچنین حداکثر عمق آبستکی با افزایش زاویه آبشکن افزایش می‌یابد. کوتیاری و رانگاراچو (۱۲)، تغییرات زمانی آبستکی در پایه پل‌ها و آبشکن‌ها را بررسی و مدلی به منظور برآورد عمق آبستکی ارائه کردند. این مدل با اطلاعات سایر پژوهشگران مورد آزمون قرار گرفته و بیشتر برآوردها در محدوده $\pm 30\%$ درصد خطا بوده‌اند. فضلی و همکاران (۸)، نیز به بررسی آزمایشگاهی تغییرات آبستکی و چگونگی تشکیل گودال آبستکی اطراف آبشکن‌های مستقیم در قوس ۹۰ درجه پرداختند. نتایج نشان داد که هر چه موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس پیش رود، مقدار آبستکی بیشتر می‌شود. کوچک و همکاران (۱۱)، اثر سه نوع آبشکن (نفوذپذیر، نفوذناپذیر و باندا لایک) بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه و در شرایط مستغرق بررسی کردند. نتایج نشان داد هر سه سازه با انحراف حداکثر سرعت به میانه کانال مانع از فرسایش در قوس خارجی می‌شوند و عمق فرسایش در اطراف سازه باندا لایک به مراتب کمتر از آبشکن‌های نفوذناپذیر است. آرمان و همکاران (۴)، با استفاده از مدل عددی

به بررسی الگوی جریان و رسوب در یک قوس ۹۰ درجه ملایم همراه و بدون حضور آبشکن‌ها پرداختند. نتایج پژوهش‌های نشان داد که با افزایش طول آبشکن‌ها، حداکثر میزان سرعت، عمق فرسایش و رسوبگذاری افزایش یافته است. مروری بر پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که اکثر پژوهش‌ها روی آبشکن‌های مستقیم، L و T شکل استوار بوده است و تحقیقات جامع آزمایشگاهی پیرامون آبشکن چوگانی به‌خوبی صورت نگرفته است. بدین منظور در این پژوهش سعی شده است که علاوه بر انجام مطالعات آزمایشگاهی بر آبشکن‌های چوگانی، به مطالعه عددی رفتار هیدرولیکی جریان پیرامون آنها پرداخته شود. در این پژوهش، مطالعات آزمایشگاهی و عددی در دو آبشکن چوگانی و مستقیم در دبی‌های مختلف جریان صورت گرفته است و نتایج حاصل به‌صورت کمی و کیفی به تفکیک مقایسه قرار شده‌اند.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

عمق آبستکی در دماغه آبشکن‌ها تابعی از نوع و مشخصات آبشکن، دانه‌بندی مواد بستر، وضعیت بار رسوبی و شرایط هیدرولیکی جریان است. بدین منظور طرح آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان صورت گرفت. آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی با طول (L) ۱۰/۵ متر، عرض (B) و ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد (شکل ۲). جنس کف و بدنه فلوم فلزی و دیواره‌ها از شیشه هستند. در انجام آزمایش‌ها، شیب بستر ثابت و برابر ۰/۰۰۱



شکل ۲. نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۳. مدل آزمایشگاهی: (الف) آبشکن چوگانی و (ب) آبشکن مستقیم

برابر با ۰/۰۸ متر و طول زبانه آبشکن برابر با ۰/۰۴ متر است. لازم به ذکر است که زبانه آبشکن به صورت کمان دایره با زاویه ۹۰ درجه طراحی شده است و شعاع دایره معادل طول زبانه آبشکن است. به منظور بررسی تأثیر دبی بر آبشستگی، سه دبی جریان ۱۰/۵، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب با عمق جریان (h) ۰/۱۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۷ متر برای آبشکن‌های چوگانی و مستقیم با طول ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. خلاصه‌ای از شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.

مدل عددی

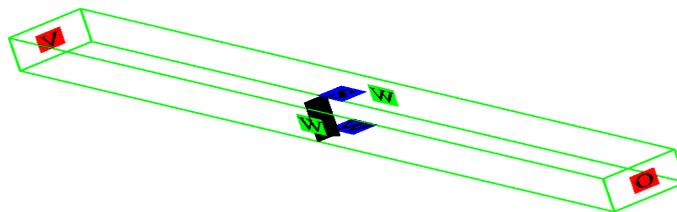
نرم‌افزار Flow3D نرم‌افزاری چندجانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در مدل‌سازی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی است. روش حل معادلات در این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود است. در نرم‌افزار Flow3D تولید شبکه به دو روش کارترین و استوانه‌ای صورت می‌گیرد و این امکان وجود دارد که با توجه به اهمیت برخی مقاطع، تعداد و اندازه شبکه‌هایی که برای تولید میدان حل نیاز است ریزتر (پراهمیت) و یا درشت‌تر (کم‌اهمیت) در نظر گرفته شود. به دلیل قوس دار بودن هندسه آبشکن در نزدیکی آبشکن شبکه

در نظر گرفته شده است. با توجه به پیشنهاد رودکیوی و اتما (۲۰) برای جلوگیری از تشکیل ریبیل ($d_{50} > 7/0$) قطر متوسط مصالح رودخانه‌ای (d_{50}) معادل ۱ میلی‌متر و با ضریب انحراف معیار هندسی ($\sigma_g = 1/3$) انتخاب شد. ضخامت لایه رسوبات، ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و در تمام آزمایش‌ها، شرایط آب زلال حاکم بود. در ابتدا و انتهای بازه سه متری رسوبات از بلوک‌های آجری و مصالح درشت‌دانه به منظور ایجاد جریان کاملاً توسعه یافته و جلوگیری از وارد شدن رسوبات در مخزن تعبیه شده است. فاصله محل نصب آبشکن تا ابتدای کانال ۴/۷۵ متر به منظور ورود جریانی با شرایط هیدرولیکی ثابت است. مدت زمان تعادل نسبی آزمایش بر اساس مطالعات پیشین پنج ساعت در نظر گرفته شد (۱).

در این پژوهش از دو مدل آبشکن چوگانی و مستقیم استفاده شده است (شکل ۳). آبشکن‌های مورد استفاده در این پژوهش نفوذناپذیر و غیرمستغرق از جنس ورق فلزی با ضخامت سه میلی‌متر و طول ۰/۱۲ متر هستند. طراحی هندسه آبشکن چوگانی به گونه‌ای است که دو سوم طول کل آبشکن به عنوان طول مستقیم و یک سوم آن نیز به عنوان زبانه آبشکن طراحی می‌شود. برای آبشکن چوگانی با طول ۰/۱۲ متر، طول مستقیم آبشکن

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر در آزمایش‌ها

پارامتر	محدوده تغییرات
دبی جریان (Q)	۲۰ - ۱۰/۵ لیتر بر ثانیه
عمق جریان در بالادست (h)	۱۷/۵ - ۱۱/۵ سانتی‌متر
سرعت جریان در بالادست (U)	۰/۲۴ - ۰/۱۸۳ متر بر ثانیه
طول آبشکن (L)	۱۲ سانتی‌متر
اندازه ذرات رسوبی (d ₅₀)	۱ میلی‌متر
عدد رینولدز (Re)	۲۰۰۰۰ - ۴۷۰۰۰



شکل ۴. شرایط مرزی مدل

نتایج و بحث

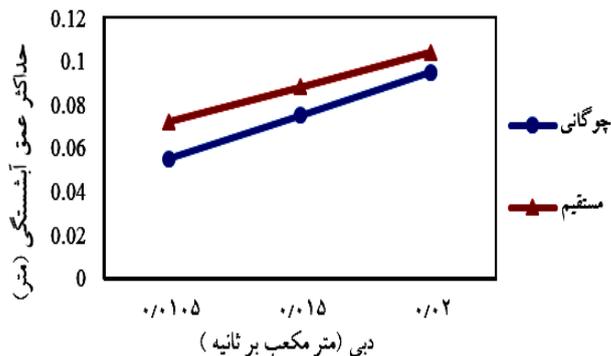
عمق آبشستگی

همانطور که گفته شد، تخمین حداکثر عمق آبشستگی در طراحی سازه، همواره برای مهندسان هیدرولیک حائز اهمیت بوده است. شکل ۵ حداکثر عمق آبشستگی در آبشکن مستقیم و چوگانی با دبی‌های ۱۰/۵، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شده است، با افزایش دبی، عمق آبشستگی نیز افزایش یافته است. بین عمق آبشستگی و دبی جریان رابطه مستقیمی وجود دارد و با افزایش دبی جریان، قدرت جریان‌های ثانویه بیشتر شده است که در نتیجه باعث افزایش عمق آبشستگی در اطراف آبشکن می‌شود (۱۳). حداکثر عمق آبشستگی در آبشکن چوگانی برای هر سه دبی کمتر از آبشکن مستقیم است. به‌منظور ارائه دقیق‌تر، حداکثر عمق آبشستگی در انتهای دماغه آبشکن در جدول ۲ بیان شده است.

توپوگرافی بستر

به منظور بررسی کمی تغییرات گودال آبشستگی و نیز وضعیت

ریز انتخاب شد. هندسه مسئله (کانال مستطیلی شکل به ابعاد ۱۰×۵×۰/۵ متر) و آبشکن‌های چوگانی و مستقیم به طول ۱۲/۰ متر، ضخامت ۰/۰۱ متر و ارتفاع ۰/۵ متر پس از ترسیم در محیط نرم‌افزار اتوکد به نرم‌افزار Flow3D وارد شد. محل قرارگیری آبشکن از ورودی و خروجی جریان باید تا حدی باشد که تأثیری روی عمق ورودی و خروجی نداشته باشد. برای شبکه‌بندی از سه متری ورودی کانال به طول چهار متر محدوده سیال در نظر گرفته شد. به‌منظور شبیه‌سازی از بین مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار از مدل آشفتگی (شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ LES) استفاده شده است (۶ و ۲۰). دلیل انتخاب این مدل، کاربرد وسیع آن در حوزه هیدرولیک رسوب است و پژوهشگران متعددی استفاده از این مدل را پیشنهاد داده‌اند. شرایط مرزی مدل در کف و دیواره‌ها از نوع دیوار (wall) و در سطح جریان از نوع متقارن (symmetry) است. شرط اولیه ورودی جریان از نوع سرعت (velocity) با مقدار ۰/۳ متر بر ثانیه و عمق جریان برابر ۰/۱۷ متر (لازم به ذکر است این شرط برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه است) انتخاب شد و شرط مرزی خروجی از نوع جریان خروجی (outflow) انتخاب شد (شکل ۴).



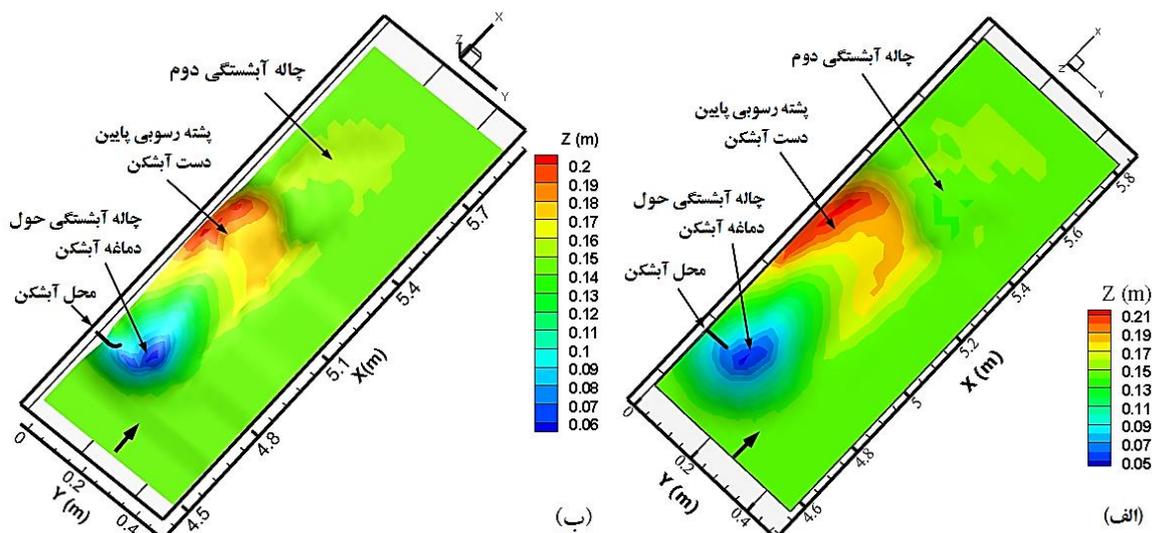
شکل ۵. مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در آبشکن مستقیم و چوگانی با دبی‌های مختلف

جدول ۲. حداکثر عمق آبشستگی بر حسب متر (ds)

نوع آبشکن		دبی (لیتر بر ثانیه)
مستقیم	چوگانی	
۰/۰۷۲	۰/۰۵۵	۱۰/۵
۰/۰۸۸	۰/۰۷۶	۱۵
۰/۱۰۴	۰/۰۹۵	۲۰

عمیق‌تر شدن آن سبب کاهش شعاع گودال می‌شود. پندی و همکاران (۱۸) نیز به نتایج مشابهی در مورد شکل گودال آبشستگی در پشت دماغه آبشکن دست یافتند. اگرچه در آزمایش‌های مختلف با میزان جریان متفاوت، شکل گودال آبشستگی تا حدی متفاوت شده است ولی حالت اصلی خود را از دست نداده است. همچنین آنها تأثیر قابل توجه عدد فرود را در حداکثر عمق آبشستگی بررسی و رابطه مستقیمی میان عدد فرود و میزان عمق آبشستگی ارائه کردند. شایان ذکر است که نتایج پژوهش حاضر نشان داد که گذشت زمان منجر به عمیق‌تر شدن و گسترده‌گی گودال آبشستگی و در نتیجه توسعه بیشتر بار رسوبی در پایین دست می‌شود و موقعیت حداکثر عمق آبشستگی مطابق مشاهدات و برداشت‌ها در طول تغییرات نیم‌رخ بستر در هر شکل ثابت بوده و در انتهای دماغه آبشکن قرار داشته است. دلیل این امر افزایش چشمگیر تنش برشی بستر در ناحیه دماغه و در بالادست جریان است. راجاراتنام و نواجوکو این میزان تنش برشی بستر را پنج برابر تنش برشی جریان برآورد کردند (۱۹).

رسوب‌گذاری اطراف آبشکن‌ها، نتایج اندازه‌گیری شده ارتفاع بستر در پایان آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار Tecplot رسم شدند که نتایج مربوط به آبشکن چوگانی و مستقیم برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل محور X و Y موقعیت قرارگیری نقاط برداشت شده در بستر ماسه‌ای و Z اعماق آبشستگی و رسوب‌گذاری را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که رقوم اولیه کف بستر ۰/۱۵ متر است. بنابراین در قسمت Z اعداد کوچک‌تر از این مقدار، آبشستگی و اعداد بزرگ‌تر از آن، رسوب‌گذاری را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود ابعاد گودال آبشستگی پیرامون آبشکن چوگانی کمتر از آبشکن مستقیم است و گودال آبشستگی پیرامون آبشکن مستقیم بیشتر به سمت پایین دست کشیده شده است. در پایین دست آبشکن چوگانی در مجاورت دیواره کانال، آبشستگی شکل نگرفته است که این مورد را می‌توان به‌عنوان مزیتی برای آبشکن چوگانی در نظر گرفت زیرا منجر به حفاظت دیواره مجاور آبشکن از فرسایش می‌شود. به‌طور کلی شکل گودال در دماغه آبشکن‌ها به‌صورت هرمی وارونه بوده که

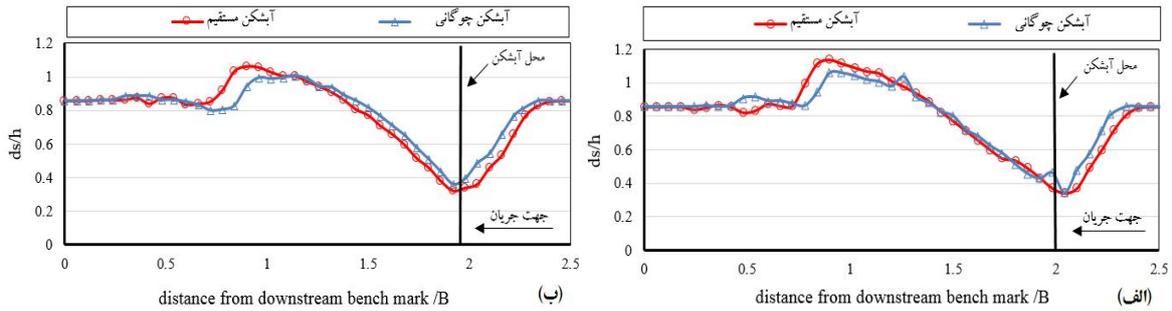


شکل ۶. تغييرات توپوگرافي بستر پيرامون آبشكن: (الف) مستقيم و (ب) چوگاني

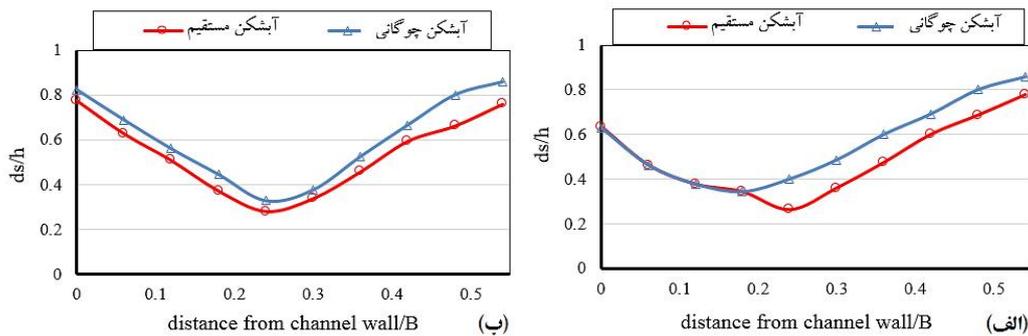
اميدوار عسکری و نظری (۱۷) نیز در پژوهشی به مقایسه آبشکن کماني شکل و مستقیم پرداختند. اگرچه شکل گودال آبستگي در مطالعه آنها تا حدی متفاوت از پژوهش حاضر است اما نتایج مشابهی حاکی از کاهش چشمگیر عمق آبستگي و ابعاد گودال آبستگي در آبشکن کماني نسبت به مستقیم مشاهده شد. همانطور که از شکل ۶ مشخص است ابعاد گودال آبستگي در مجاورت آبشکن چوگاني در این پژوهش نیز از میزان مشابه در آبشکن مستقیم به مراتب کمتر است.

با توجه به تغییرات توپوگرافي مشخص است که شکل بستر رسوبي برای آبشکن مستقیم در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن کشیده‌تر است و تا حدود ۱/۳ برابر عرض کانال، در پایین دست آبشکن ادامه دارد و برای آبشکن چوگاني، طول شکل بستر رسوبي در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن حدود ۱/۱۵ برابر عرض کانال است. بنابراین به صورت کمی نیز میزان برآورد طول گودال آبستگي نشان از طول کمتر گودال در آبشکن چوگاني است. کوکن و گوگاس (۱۰) در تحلیل تغییرات طول گودال آبستگي، قدرت گرداب نعل اسبی در پایین دست آبشکن را عامل اصلی ابعاد متفاوت گودال و به ویژه طول آن عنوان کردند.

تغییرات نیم‌رخ بستر نشان داد که در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن‌ها بیشترین تغییرات نیم‌رخ آبستگي شکل گرفته است، به همین دلیل در شکل ۷ نیم‌رخ طولی آبستگي در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری (۰/۱۸B و ۰/۳B) از دیواره مجاور آبشکن‌های مستقیم و چوگاني با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه ارائه شده است. محور عمودی، نسبت بی‌بعد حداکثر عمق آبستگي به عمق جریان (ds/h) و محور افقی نسبت بی‌بعد فاصله از نقطه معلوم (بنچ‌مارک) به عرض کانال (distance from downstream bench mark/B) را نشان می‌دهد (در پایین دست آبشکن و در فاصله یک متری، نقطه‌ای به عنوان مبدأ برای برداشت توپوگرافي انتخاب شده و از آن به عنوان بنچ‌مارک نام برده شده است). برای آبشکن مستقیم ارتفاع بستر رسوبي بیشتر است که علت این پدیده همان افزایش عمق گودال آبستگي پيرامون آبشکن مستقیم است. با توجه به تغییرات توپوگرافي مشخص است که در حالت کلی ابعاد گودال آبستگي پيرامون آبشکن چوگاني کمتر از ابعاد گودال آبستگي پيرامون آبشکن مستقیم است. نجفی و امین‌نژاد نشان دادند که هرچه شکل دماغه آبشکن آئرو دینامیک باشد، فرسایش کمتری پيرامون دماغه آبشکن به وجود می‌آید (۱۶) و دلیل این امر را تغییر جهت خطوط جریان و کاهش گرادیان فشار عنوان کردند.



شکل ۷. نیم‌رخ طولی بستر برای فاصله‌های به ترتیب الف) ۰/۰۹ و ب) ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن‌ها



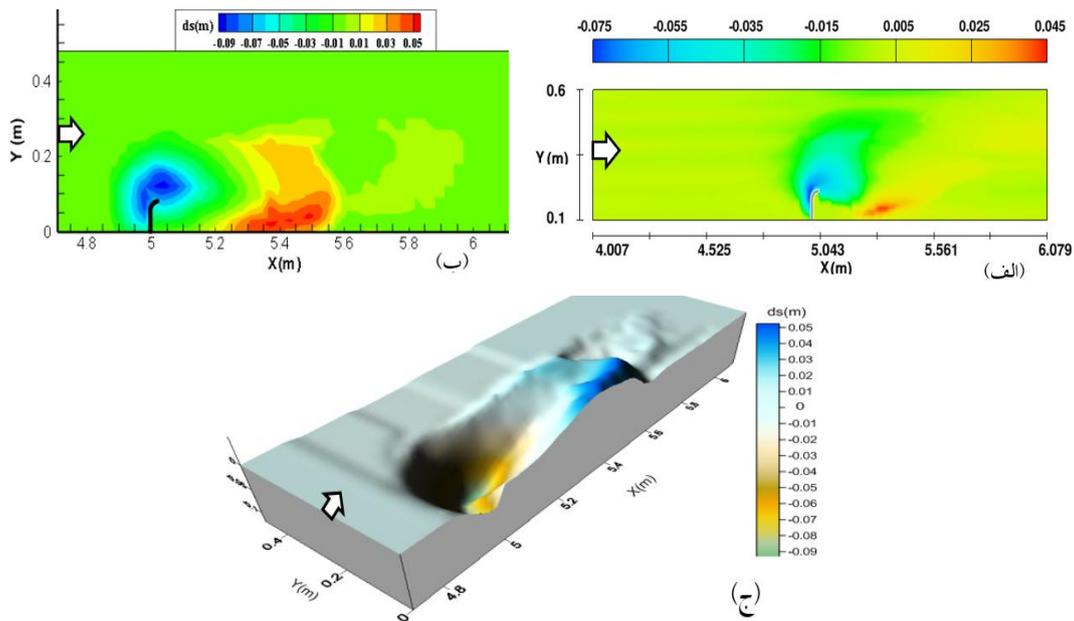
شکل ۸. مقایسه نیم‌رخ عرضی حداکثر عمق آبشستگی در: الف) ۲۰ میلی‌متری بالادست و ب) ۲۰ میلی‌متری پایین‌دست آبشکن‌ها

آبشکن نشان دادند که در آبشکن چوگانی به دلیل قوسی که در پشت آبشکن وجود دارد، باعث انحراف جریان کمتری می‌شود و سبب ایجاد گودال آبشستگی کم‌عمق‌تری می‌شود (۷).

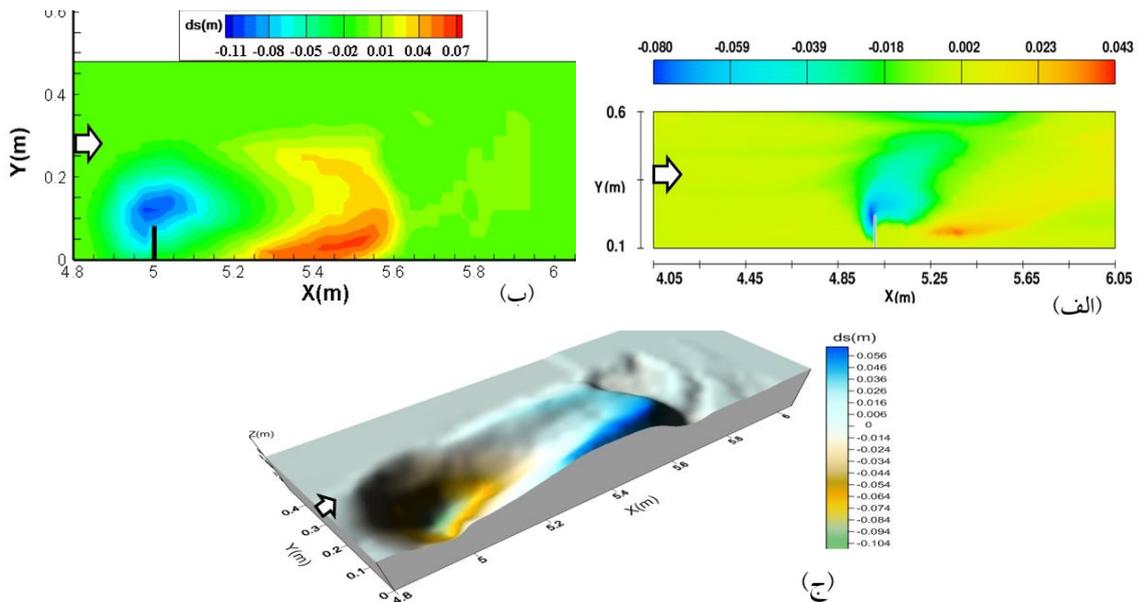
نتایج عددی

به منظور مقایسه نتایج آزمایشگاهی از مدل‌سازی عددی با شرایط ارائه شده در بخش مدل عددی استفاده شده است. شکل ۹ مطابقت الگوی آبشستگی عددی و آزمایشگاهی پیرامون آبشکن چوگانی با طول ۰/۱۲ متر و دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. شکل ۹ به ترتیب الگوی آبشستگی عددی توسط نرم‌افزار FLOW3D، الگوی آبشستگی آزمایشگاهی ترسیمی به صورت دوبعدی توسط نرم‌افزار Tecplot و به صورت سه‌بعدی توسط نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نیز الگوی آبشستگی ناشی از شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی پیرامون آبشکن مستقیم با طول ۰/۱۲ متر و دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه را بر اساس سه نرم‌افزار مذکور نشان می‌دهد.

در نمودار شکل ۸ به مقایسه نیم‌رخ عرضی حداکثر عمق آبشستگی در مقاطع ۲۰ میلی‌متری بالادست و پایین‌دست آبشکن‌های مستقیم و چوگانی برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه پرداخته شده است. محور عمودی نسبت به بعد عمق آبشستگی به عمق جریان (ds/h) و محور افقی نسبت به بعد فاصله حداکثر عمق آبشستگی از دیواره کانال به عرض کانال (distance from channel wall/B) را نشان می‌دهد. پس از مقایسه نیم‌رخ عرضی بستر برای آبشکن مستقیم و چوگانی، ابعاد گودال آبشستگی در مقاطع بالادست و پایین‌دست آبشکن چوگانی کمتر از ابعاد گودال آبشستگی در آبشکن مستقیم است. عرض گودال آبشستگی در آبشکن مستقیم ۲/۲۵ برابر طول مؤثر آبشکن و در آبشکن چوگانی ۲ برابر طول مؤثر آبشکن است. نکته قابل توجه این است که فاصله حداکثر عمق آبشستگی از دیواره کانال در آبشکن مستقیم بیشتر از آبشکن چوگانی است که موجب محافظت دیواره کانال از آبشستگی توسط این نوع آبشکن می‌شود که برای محافظت ساحل و خود آبشکن مفید است. اسحاقیه و طالب بیدختی با بررسی عددی شکل‌های مختلف



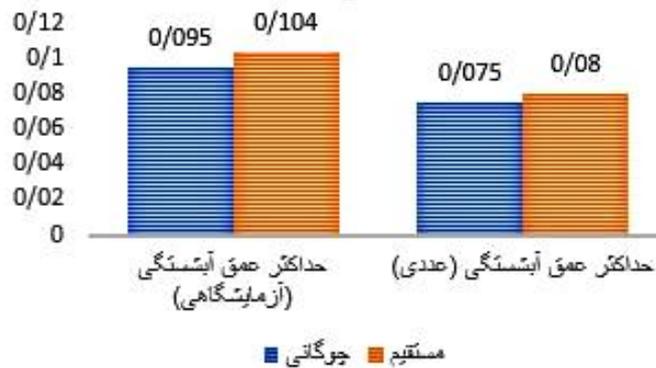
شکل ۹. تغییرات تراز بستر در آبشکن چوگانی



شکل ۱۰. تغییرات تراز بستر در آبشکن مستقیم

نتایج عددی نشان می‌دهد که آبستگي اطراف آبشکن چوگانی کمتر از آبستگي پيرامون آبشکن مستقیم است و با نتایج آزمایشگاهی کاملاً مطابقت دارد. شکل ۱۱ مقایسه حداکثر عمق آبستگي حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد و حداکثر عمق آبستگي انتهای دماغه برای آبشکن

همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است، اطراف آبشکن به صورت موضعی، آبستگي رخ داده و رسوبات افته به صورت نواحی قرمز رنگ در شکل مشخص هستند. حداکثر عمق آبستگي در نتایج عددی پيرامون دماغه آبشکن شکل گرفته است که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. همچنین



شکل ۱۱. مقایسه حداکثر عمق آبشستگی پیرامون آبشکن‌ها در مدل عددی و آزمایشگاهی

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (2)$$

$$SI = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{o,i} - X_{m,i})^2}}{X_{o,i}} \quad (3)$$

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های مستقیم و چوگانی در کانال مستقیم پرداخته شد. بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی پیرامون آبشکن مستقیم و چوگانی نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی برای آبشکن چوگانی کمتر از آبشکن مستقیم است. نتایج آزمایشگاهی بیانگر این است که حداکثر عمق آبشستگی در آبشکن مستقیم ۰/۸۷ برابر طول مؤثر آبشکن و در آبشکن چوگانی ۰/۷۹ برابر طول مؤثر آبشکن است. پس از مقایسه نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر برای آبشکن مستقیم و چوگانی نتیجه آن شد که ابعاد گودال آبشستگی در مقاطع بالادست و پایین‌دست آبشکن چوگانی کمتر از ابعاد گودال آبشستگی پیرامون آبشکن مستقیم است. شکل بستر رسوبی برای آبشکن مستقیم در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن کشیده‌تر است و تا حدود ۱/۳ برابر عرض کانال در پایین‌دست آبشکن ادامه دارد و برای آبشکن چوگانی، طول بستر رسوبی در فواصل ۰/۰۹ و ۰/۱۵ متری از دیواره مجاور آبشکن حدود ۱/۱۵ برابر عرض کانال است. عرض گودال

چوگانی ۰/۰۷۵ متر و برای آبشکن مستقیم ۰/۰۸ متر رخ داده است که تقریباً معادل ۸۰ درصد عمق آبشستگی در شرایط آزمایشگاهی است. با توجه به منابع مختلف این درصد در شبیه‌سازی قابل قبول است. همچنین ابعاد گودال آبشستگی در مدل عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی است. مطابق نتایج مدل عددی، عرض گودال آبشستگی در آبشکن چوگانی حدوداً دو برابر طول مؤثر آبشکن و در آبشکن مستقیم حدود ۲/۴ برابر طول مؤثر آبشکن است. مقدار خطای نسبی با فرمول زیر حاصل از مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی حدود ۲۰ درصد است.

$$\Delta d = \left| \frac{ds_{\text{آزمایشگاهی}} - ds_{\text{عددی}}}{ds_{\text{آزمایشگاهی}}} \right| * 100 \quad (1)$$

علاوه بر این نتایج مقایسه میان مدل عددی و آزمایشگاهی نشانگر توافق مناسب (تقریباً ۸۰ درصد) بین دو روش برای محاسبه عمق آبشستگی حداکثر بود. میزان این توافق از محاسبه پارامتر آماری نمایه پخشیدگی (SI=۲۲/۲ درصد) به دست آمده است. همچنین قابل ذکر است که خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین دو روش در تخمین عمق آبشستگی حداکثر، تقریباً ۰/۰۲۲۰۹۱ است. بر این اساس، وجود میزان خطای پایین و میزان کم نمایه پخشیدگی نشانگر توافق بالای داده‌های بررسی شده در شکل ۱۱ است. بنابراین عملکرد مدل عددی برای تخمین عمق آبشستگی قابل قبول است.

آبشكن رخ مى‌دهد و باعث حفاظت ديواره كانال از آبستگي مى‌شود. نتايج مدل‌سازى عددى با نرم‌افزار Flow3D حاكى از توافق مناسب (۸۰ درصد) ميان دو روش آزمایشگاهى و عددى بود.

آبستگي در آبشكن مستقيم ۲/۲۵ برابر طول مؤثر آبشكن و در آبشكن چوگانى دو برابر طول مؤثر آبشكن است. به‌طور كلى ابعاد گودال آبستگي پيرامون آبشكن چوگانى كمتر از آبشكن مستقيم است. در آبشكن چوگانى به‌دليل انحناى دماغه آبشكن، جريان به آرامى منحرف مى‌شود كه درنتيجه آبستگي كمترى پيرامون اين

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, A.A. and M. Malek Nejad Yazdi. 2014. Experimental investigation on the effect of length, space and shape of Gabion Groins on local scouring depth. *Journal. of Water and Soil Conservation* 21(4): 231-246. (In Farsi).
2. Anonymous. 2011. Water Engineering Standard. Guideline for Estimation of Local Scour. NO. 549. Vice presidency for Strategic Planning and Supervision publication of management and planning. (In Farsi)
3. Anonymous. 2012. Scouring and sedimentation around groins. NO. 248 Vice presidency for Strategic Planning and Supervision Publication of Management and Planning. (In Farsi).
4. Arman, A., J. Zahiri and P. Fatahi. 2017. Simulation of Flow and Sediment Pattern with Spur dikes Series in a 90-degree Mild Bend using CCHE2D Model. *Journal. of Water and Soil Conservation* 24(3): 21-39. (In Farsi).
5. Dailami. R. 2015. Three-dimensional simulation of the flow around the spur dike at the 90-degree bend using the Flow-3D model. MSc. Thesis in Water Engineering. Faculty of Agriculture. Shahid Chamran University. (In Farsi)
6. Duan, J. G., H. Li, X. Fu and Q. Wang. 2009. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. *Advances in Water Resources* 32: 1717-1725.
7. Eshaghiyeh, P. and N. Talebbidokhti. 2008. Three-dimensional modeling of flow around the groove with VOF model. *In: Proceeding if the 4th National Congress of Civil Engineering*. University of Tehran. (In Farsi)
8. Fazli, M., M. Ghodsian and S. A. Salehi. 2008. Scour and flow field around a spur dike in a 90 Bend. *International Journal of Sediment Research* 23: 56-68.
9. Hooshmand Aini, A., H. Mousavi Jahromi and Q. Elias. 2012. Numerical Investigation of Flow Patterns around Single Hockey spur dike Using Computational Fluid Dynamics. *In: Proceeding if the Second National Structural-Earthquake-Geotechnical Conference*, Pardisan Institute of Higher Education. Babsler. Mazandaran. (In Farsi)
10. Koken, M. and M. Gogus. 2015. Effect of spur dike length on the horseshoe vortex system and the bed shear stress distribution. *Journal of Hydraulic Research*, 53(2): 196-206.
11. Koochak, P., S. M. Kashefipour, M. Ghomeshi, and A. Fathi. 2017. the effect of the type of spur dike on bed topography in a 90 degree bend under submerged condition. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 47(1): 73-80. (In Farsi).
12. Kothyari, U. C. and K. G. Ranga Raju. 2001. Scour around spur dikes and bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 39: 367-374.
13. Masjedi, A. and A. Moradi. 2009. Experimental Investigation of the Effect of the location single spur dike on its Scour depth in 180 Degree bend. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 13(50): 43-50. (In Farsi).
14. Matinfard, A., M. Heidarnejad and J. Ahadian. 2007. Effect of changes in the hydraulic condition on the velocity distribution around a L shaped spur dike at the river bend using Flow-3D model. *Technology & Applied Science Research* 3: 1862-1868.
15. Nagy, H. 2005. Hydraulic evaluation of emerged and submergd spur dikes: temporal bed evolution and equilibrium state characteristics. *Alexandria Engineering Journal* 44: 279-290.
16. Najafi, A. and B. Aminnejad. 2013. Numerical investigation of the shape of the perpendicular groins head on the scour and bed shear stress using different boundary conditions. *In: Proceeding if the 8th National Congress of Civil Engineering*. Faculty of Civil Engineering. Babol. (In Farsi).
17. Omidvar Askari, H. and S. Nazari. 2012. Investigation of the Effect of hockey groins on the scouring thalweg in river in 90 Degree bend. *In: Proceeding if the Second National Conference on Sustainable Development in arid and semiarid regions*. Islamic Azad University of Abarkouh Branch. (In Farsi).
18. Pandey, M., Z. Ahmad and P. K. Sharma. 2017. Scour around impermeable spur dikes: a review, *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 24(1): 25-44.
19. Rajaratnam, N. and B. Nwachukwu. 1983. Flow near groin-like structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 109: 463-480.

20. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 109(3): 339-350.
21. Vaghefi, M. and P. Radan. 2013. Numerical Study of Scour and Flow Pattern in 90 Degree bend with T-shaped Groins and Changes in radius of curvature of the bend. *Water Resource Engineering* 7(23): 37-51. (In Farsi).
22. Vaghefi, M., M. Ghodsian and S. A. A. Salehi Neyshaboori. 2009. Investigation on time variation of scour around T shaped spur dike in a 90-degree bend. *Journal. of Water and Soil Conservation* 16(1): 79-105. (In Farsi).
23. Xiufang, Z., W. Pingyi and Y. Chengyu. 2012. Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. *In: Proceeding of the International Conference on Modern Hydraulic Engineering*. pp: 772-775.
24. Zhang, H. and H. Nakagawa. 2008. Scour around Spur Dykes: Recent Advances and Future Researches. *Annals of the Disas. Prev. Res. Ins., Kyoto University*, 51B.

The Numerical and Experimental Study of Scouring Pattern around Direct and Polo-Shaped Groynes

M. Khalaj, S. Gohari* and S. S. Okhravi¹

(Received: August 19-2018 ; Accepted: December 5-2018)

Abstract

Experimental and numerical study of scouring pattern on the direct and polo-shaped groynes have been investigated in this paper. In this study, direct and polo-shaped groynes models with a length of 0.12 meter have been used in discharges of 10.5, 15, 20 liters per second in a direct flume. The results showed that the maximum scour depth formed around the groyne head of direct and polo-shaped types has increased with augmentation of flow discharge, which was 0.095 and 0.104 meter in the case of 20 L/s discharge respectively. Also, the width of scour hole was 2.25 and 2 times of effective length of the groyne in direct and polo-shaped groynes respectively. In this regards, maximum scour depth around the head of groyne was seen 0.87 and 0.79 times of the effective length of the groyne. Sand form located at downstream of the direct groyne at the distance of 0.09 and 0.15 meters from the side wall of direct groyne was stretched and extended to about 1.3 times of the channel width as well. While the length of the sand form for direct groyne was 1.15 times of the channel width. Overall, the dimensions of the scour hole around the polo-shaped groyne, was less than the direct groyne. In addition to understanding the hydraulic behaviour around the groyne, Flow3D software was used. Statistical survey of the results obtained by experimental and numerical models attested that the relative error of the numerical model could be about 20%, which shows an appropriate performance of using Flow3D for predicting the maximum scour depth.

Keywords: Polo-shaped and direct groynes, Scour, Modeling, Scour depth

1. Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: s.gohari@basu.ac.ir, saeedgohari@yahoo.com