

بررسی آزمایشگاهی استفاده از شکاف در پایه جهت کنترل آبشستگی پایه پل

مهناز حیدری بنی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، مجتبی صانعی^۳، سید محمود کاشفی پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۷ صص: ۳۸-۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۰۲

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از شکاف در پایه پل با مقطع مستطیلی به منظور کنترل آبشستگی بوده است. بدین منظور چهار شکاف با اشکال دوزنقه ای، دوزنقه‌ای بر عکس، مثلثی و مثلثی برعکس با سطح مقطع یکسان و شرایط آب زلال در سه تراز قرارگیری هم‌تراز بستر، ۱/۵ سانتی‌متر و ۳ سانتی‌متر بالای بستر در شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲ مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق آب‌شستگی بالادست پایه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. به طوری که در همه شکل‌های هندسی شکاف، شکاف هم‌تراز بستری تغییرات چکیده فارسی تغییر می‌یابد. مختلف نیز بیان شود. که حتی متری از بستر نشان می‌دهد از بستر و هم‌تراز با بستر عملکرد بهتری در کاهش ابعاد چاله آب‌شستگی نسبت به حالت‌های نزدیک سطح آب (دور از بستر) و آزمایش‌های شاهد دارد. میزان درصد کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی موضعی برای شکاف مثلث برعکس ۱۵/۵ تا ۵۱/۸۱ درصد، ۲۱/۱۶ تا ۶۲/۱۸ درصد برای شکاف دوزنقه برعکس، ۲۶/۶۷ تا ۶۵/۲۸ درصد برای شکاف مثلثی و ۳۸/۸۳ تا ۷۳/۵۸ درصد برای شکاف دوزنقه نسبت به آزمایش‌های شاهد بدست آمد.

کلمات کلیدی: بررسی آزمایشگاهی، آبشستگی، شکل شکاف، پایه پل

^۱ کارشناسی ارشد عمران آب- سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

^۲ استادیار دانشکده ی مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

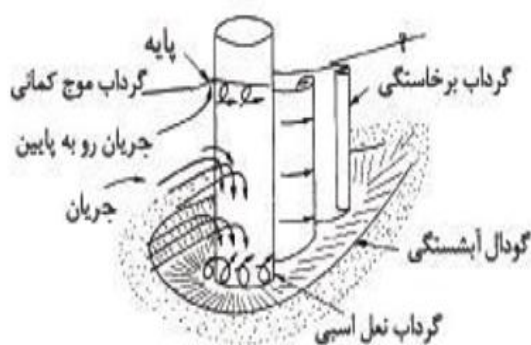
^۳ دانشیار پژوهشکده ی حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

^۴ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* نویسنده مسول مقاله: mortezabakhtiari@yahoo.com

مقدمه

گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آن‌ها عمود بر بستر رودخانه است و به آن‌ها گرداب برخاستگی می‌گویند. این گرداب‌ها همانند گردباد ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند و به انتقال ذرات از جلو اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می‌کنند (چیو (۱۹۹۲)). گرداب‌های دیگری نیز در جلوی پایه شکل می‌گیرند که به آن‌ها گرداب موج کمائی یا سطحی گفته می‌شود که در جریان‌ات کم عمق دارای اهمیت می‌باشند (رادکیوی (۱۹۹۸)).



شکل ۱- جریان رو به پایین و سیستم‌های گردابی اطراف پایه استوانه‌ای پل، شفافی بچستان (۱۳۸۷).

با توجه به مطالب ذکر شده شناخت پدیده‌ی آبشستگی و مهم‌تر از آن به کار بردن روش‌ها برای کاهش آبشستگی اطراف پایه پل ضروری به نظر می‌رسد. برای جلوگیری و کاهش آبشستگی در پایه‌ی پل‌ها محققان روش‌های مختلفی ارائه کردند. چیو (۱۹۹۲) دو روش اساسی برای محافظت پی پل‌ها در مقابل آبشستگی ذکر نمود که عبارت‌اند از:

۱- روش مستقیم:

در این روش‌ها به مقاومت بستر در مقابل تنش‌های وارده افزوده می‌شود. این کار با تعویض مصالح اطراف پایه با مصالح مقاوم‌تر انجام می‌شود. در روش‌های مستقیم با افزایش مقاومت ذرات بستر در برابر فرسایش، نظیر سنگ‌چین^۲ و تورهای گابیون فلزی در اطراف پایه سعی در کاهش و کنترل آبشستگی می‌شود.

۲- روش‌های غیرمستقیم:

در روش‌های غیرمستقیم با عوض کردن الگوی جریان در اطراف پایه قدرت و اثر عوامل فرسایش یعنی

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند و به‌عنوان کلید راه‌های ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هرساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پل‌ها، درست زمانی که بیشترین نیاز به آن‌ها وجود دارد تخریب می‌گردند. یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبشستگی^۱ اطراف پایه‌های پل هست. با اینکه مصالح ساختمانی و فنون سازه‌ای پیشرفت چشمگیری داشته است، تعداد پل‌های تخریب‌شده بر اثر آبشستگی اطراف پایه‌ها روزبه‌روز بیشتر می‌شود. آبشستگی پایه پل‌ها بزرگ‌ترین دلیل شکست پل‌ها در ایالات متحده آمریکا می‌باشد. در طول ۳۰ سال گذشته بیشتر از ۱۰۰۰ پل از ۶۰۰۰۰۰ پل ساخته شده در ایالات متحده آمریکا تخریب شده‌اند که ۶۰ درصد آن‌ها به دلیل آبشستگی بوده است (سامر و همکاران، ۲۰۰۲).

مکانیزم آبشستگی

الگوی جریان و آبشستگی اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده و توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (چابرت و انگلیندر، ۱۹۵۶، هاجرت، ۱۹۷۵، ملویل و رادکیوی، ۱۹۷۷). مکانیسم آبشستگی به این صورت است که پس از برخورد جریان به دماغه‌ی پل، روی پایه با توجه به اینکه سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود، فشار بیشتر نیز در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌شود و به این ترتیب گرادیان فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می‌آید که خود باعث یک جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود. جریان رو به پایین همانند یک جت عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. بخشی از جریان پایین‌رونده که به سمت بالا بازگشت می‌کند، در برخورد به جریان عمومی رودخانه، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و دوباره به پایه برخورد می‌کند. این چرخش جریان و بازگشت آن در داخل حفره، گردابی تشکیل می‌دهد که به تدریج در دو طرف پایه، امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب پدید می‌آورد که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند (بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱)). در اثر جدایی جریان در کناره‌های پایه نیز

² RipRap

¹ Scour

شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد.

آقاخانی افشار و همکاران (۱۳۸۹) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر شکاف پایه و ارتفاع آن بر روی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال پرداختند. آن‌ها در حالات مختلفی از شکاف با عرض‌های مختلف در تک‌پایه استوانه‌ای و در ترازهای مختلف و نیز فواصل قرارگیری بین دو پایه استوانه‌ای معادل با مساحت تک‌پایه‌های شکاف‌دار که در جهت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند، در شرایط جریان آب زلال در حالات مختلف آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و در ادامه عمق و حجم حفره آبشستگی در مدل‌ها مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که در تک‌پایه استوانه‌ای زمانی که در پایه شکافی به عرض $0/3$ قطر پایه که در داخل بستر فرسایش ناپذیر امتداد یافته است، ایجاد گردد؛ عمق حفره آبشستگی به میزان $74/4$ درصد کاهش می‌یابد. در گروه پایه‌ها نیز در حالت $(\frac{W}{D} = 1)$ که W فاصله‌ی بین دو پایه و D قطر پایه است) و زمانی که قطر پایه برابر $18/5$ میلی‌متر باشد، عمق آبشستگی به میزان $24/9$ درصد و زمانی که قطر پایه برابر $20/4$ میلی‌متر باشد، عمق آبشستگی به میزان $32/8$ درصد نسبت به عمق آبشستگی در تک‌پایه کاهش می‌یابد. مولایی (۱۳۹۳) به بررسی اثر ابعاد شکاف در کاهش آبشستگی با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداخت. بدین منظور با به کارگیری ۷ مدل آزمایشگاهی، کنترل آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ی پل در شرایط آب زلال را بررسی کرد. مدل‌ها شامل یک پایه‌ی استوانه‌ای بدون شکاف و شش پایه استوانه‌ای شکاف‌دار بودند که شکاف‌ها به صورت سه شاخه با یک ورودی و دو خروجی با زاویه یکسان نسبت به هم (به شکل Y) بود. طول (ارتفاع) شکاف‌ها $0/5$ ، 1 و 2 برابر قطر پایه و عرض آن‌ها $0/25$ و $0/5$ برابر قطر پایه انتخاب شد. آزمایش‌ها در 3 دبی $6/8$ ، $7/15$ ، $7/19$ لیتر بر ثانیه در دو موقعیت نزدیک و داخل بستر انجام شد. ایجاد شکاف روی پایه موجب کاهش حجم و عمق آبشستگی می‌شود و هر چه شکاف عریض‌تر باشد، عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی دارد. استفاده از شکاف داخل بستر (نصف ارتفاع شکاف) نسبت به شکاف مجاور بستر توانست آبشستگی را به میزان 9 درصد تقلیل

جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی کنترل می‌گردد. برای این حالت از روش‌هایی نظیر قراردادن یک طوق و یا شکاف روی پایه و یا صفحه‌ی گسترده پره یا مستغرق^۱ یا بهره بردن از شم‌های حفاظتی در اطراف پایه می‌توان نام برد.

نظر به اینکه تحقیق حاضر در خصوص روش استفاده از شکاف جهت کنترل آبشستگی و تأثیر آن بر توپوگرافی بستر می‌باشد لذا در این بخش تحقیقات گذشته صورت گرفته در مورد این روش ارائه می‌گردد تا به نوآوری تحقیق حاضر نیز اشاره شود.

استفاده از شکاف قائم در پایه پل به منظور کاهش آبشستگی، توسط توسط یانو و تاناکا در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد گردید. آنان آزمایش‌های خود را با پایه‌هایی به قطر 30 میلی‌متر انجام دادند و از شکاف‌های مربع شکل به ابعاد 10×10 و 20×20 میلی‌متر استفاده کردند. شکاف‌ها دقیقاً در جهت جریان قرار داشتند و محل قرارگیری آن‌ها نسبت به کف بستر متغیر بود. در بهترین حالت، کاهش آبشستگی حدود 15 تا 91 درصد بود.

استفاده از شکاف در کنترل و کاهش آبشستگی در گروه پایه‌های استوانه‌ای نیز توسط نوزاد و همکاران (۱۳۸۰) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در تحقیق خود از گروه پایه‌های دوتایی در جهت جریان و نی‌ز عمود بر جهت جریان و همچنین تک‌پایه شکافدار و بدون شکاف استفاده کردند. فاصله بین پایه‌ها در حالتی که پشت سر هم قرار داشتند، برابر $10D$ و در حالتی که عمود بر جهت جریان قرار گرفتند برابر $4D$ بود. بر اساس نتایج این تحقیق، در سرعتی معادل نصف سرعت آستانه حرکت ذرات، مقدار نهایی آبشستگی در پایه شکافدار نسبت به پایه بدون شکاف حدود 71 درصد کاهش داشت. و در حالتی که سرعت جریان 71 و 85 درصد سرعت آستانه حرکت بود، به ترتیب مقدار نهایی آبشستگی 25 و 15 درصد نسبت به پایه بدون شکاف کاهش نشان داد.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۲) استفاده از شکاف قائم مستطیلی را برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در پایه‌های پل را بررسی نمود. در این پژوهش پایه پل با مقطع مستطیلی گرد گوشه و دایره‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد حداکثر کاهش آبشستگی به وسیله

¹ Submerged Vane

- با افزایش عمق جریان عمق آبستگی کاهش می‌یابد.
- در پایه‌های با عرض بیشتر، میزان اثر شکاف در کاهش عمق آبستگی بیشتر است.

وی با دسته‌بندی آزمایش‌ها بر اساس شکل پایه، برای محاسبه‌ی عمق آبستگی روابطی ارائه داد.

خدابخشی و همکاران (۲۰۱۴) اثر عرض و ارتفاع شکاف یک‌پایه دایروی را در کنترل آبستگی بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمانی که ارتفاع شکاف به اندازه D (قطر پایه) در زیر بستر قرار گیرد، عمق آبستگی حدود ۲۰/۳۴ الی ۳۹/۷۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، عمق و حجم چاله‌ی آبستگی نیز افزایش می‌یابد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، تحقیق نزدیک به تحقیق حاضر تحقیق اردلانی و همکاران (۱۳۹۵) بوده است که تفاوت این دو تحقیق در شکل هندسی شکاف‌های ایجاد شده در پایه‌ها می‌باشد.

آنالیز ابعادی

عوامل متعددی بر میزان آبستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها مؤثرند. این عوامل عبارت‌اند از:

سرعت جریان (v)، سرعت آستانه‌ی حرکت (v_c)، عمق جریان (B)، مساحت شکاف (A)، عرض پایه (D)، شتاب ثقل (g)، چگالی سیال (ρ)، چگالی ذرات رسوبی (ρ_s)، اندازه‌ی رسوبات (d_{50})، مدت‌زمان هر آزمایش (t)، شیب کانال (S)، تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر (h)، ویسکوزیته‌ی دینامیکی (μ).

(d_s) عمق آبستگی و زاویه‌ی قرارگیری پایه نسبت به جریان (α). در حالت کلی می‌توان رابطه‌ی (۱) را نوشت:

$$f(d_s, v, v_c, B, A, D, \rho, \rho_s, d_{50}, t, S, H, \mu, \alpha) = 0 \quad (1)$$

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه‌ی بالا را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (۲) نوشت:

$$F(S, \alpha, \frac{H}{B}, \frac{B}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{v_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{A}{D^2}, \frac{gD}{v^2}, \frac{vt}{D}, \frac{\mu}{\rho v D}) = 0 \quad (2)$$

در آزمایش‌های تحقیق حاضر پارامترهای α ، S، t، A، B، ρ و ρ_s ثابت هستند. با توجه به این موارد رابطه‌ی بالا به‌صورت رابطه (۳) درمی‌آید:

$$F(\frac{h}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{v_c}, \frac{gD}{v^2}, \frac{\mu}{\rho v D}) = 0 \quad (3)$$

دهد. حداکثر کاهش حجم حفره و عمق آبستگی به وسیله‌ی شکاف‌هایی با طول و عرض معادل دو برابر و نصف قطر پایه و در موقعیت داخل بستر اتفاق افتاد که توانست آبستگی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد.

اردلانی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل شکاف و لنگر دوم سطح شکاف روی کنترل آبستگی موضعی پایه پل پرداختند. بدین منظور چهار شکل شکاف مستطیلی در دو اندازه، لوزی و مربعی با مساحت سطح برابر، در سه تراز نزدیک سطح آب، هم‌تراز بستر و زیر بستر در چهار عدد فرود ۰/۱۹، ۰/۲۴، ۰/۲۷ و ۰/۳ و در دو دانه بندی در شرایط آب زلال مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که عمق آبستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبستگی با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر و عدد فرود جریان و لنگر دوم سطح رابطه مستقیم و با اندازه متوسط دانه‌ها رابطه عکس دارد. به‌گونه‌ای که بهترین عملکرد متعلق به شکاف مستطیلی با کمترین لنگر دوم سطح در تراز زیر بستر و کمترین عدد فرود جریان بود که به میزان ۶۸/۹ درصد عمق آبستگی را کاهش داد.

گیرمالدی و همکاران (۲۰۰۹) روی محل قرارگیری شکاف کارکردند. نتایج حاصل نشان داد هرچه شکاف در بستر خاک فرو رود کاهش عمق آبستگی بیشتر می‌باشد. البته شکاف ممکن است به وسیله رسوبات رودخانه پر شود و از عملکرد آن کم شود. آزمایش‌ها، عملکرد مفید شکاف پایه پل را در کاهش آبستگی موضعی اطراف پایه نشان دادند.

القراب (۲۰۱۳) روی شکافی کارکرد که ورودی جریان آن از جلوی پایه و خروجی‌ها از دو طرف پایه صورت می‌گرفت (شکل ۲-۱۳). او ۳۳۶ آزمایش را با الگوی زیر انجام داد:

تغییر در شکل پایه (۳ شکل مربع، دایره و مستطیل)، ابعاد پایه، ابعاد شکاف، فاصله‌ی قرارگیری شکاف‌ها از هم، دبی و عمق جریان.

وی به این نتایج رسید:

- با افزایش ابعاد پایه عمق آبستگی افزایش می‌یابد.
- با افزایش دبی جریان عمق آبستگی افزایش می‌یابد.
- با افزایش فاصله شکاف‌ها از هم عمق آبستگی افزایش می‌یابد.

- با افزایش ابعاد شکاف عمق آبستگی کاهش می‌یابد.

توجه به ارتفاع کانال، ارتفاع پایه ۵۰ سانتی متر از جنس پلکسی گلاس در نظر گرفته شد (اتما و رادکیوی ۱۹۸۳).



شکل ۲- نمایی از کانال آزمایشگاهی مشخصات مدل پایه بدون شکاف

مشخصات مدل پایه شکافدار

به منظور بررسی آزمایش‌های این تحقیق چهار نوع شکاف هم‌سطح با مساحت ۶ سانتی‌متر مربع از جنس پلکسی گلاس بر روی پایه مستطیلی ایجاد گردید. شکاف‌ها دارای سطح مقطع مثلث، مثلث برعکس، دوزنقه و دوزنقه برعکس با ارتفاع‌های به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۳۴ (۳ سانتی‌متر) و ۰/۶۷ (۴ سانتی‌متر) عرض برابر ۰/۳۴ (۲ سانتی‌متر) و ۰/۳۴ (۲ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. شکل (۳-۱۶) مدل پایه‌های شکافدار و بدون شکاف را نشان می‌دهد.

این چهار نوع شکاف در پایه در سه موقعیت هم‌تراز بستر، ۱/۵ سانتی‌متر از بستر، ۳ سانتی‌متر از بستر بررسی شد. شکاف‌ها به گونه‌ای قرار گرفته بودند که هیچ نوع انحرافی از راستای جهت جریان و نیز امتداد طولی پایه‌ها نداشتند.

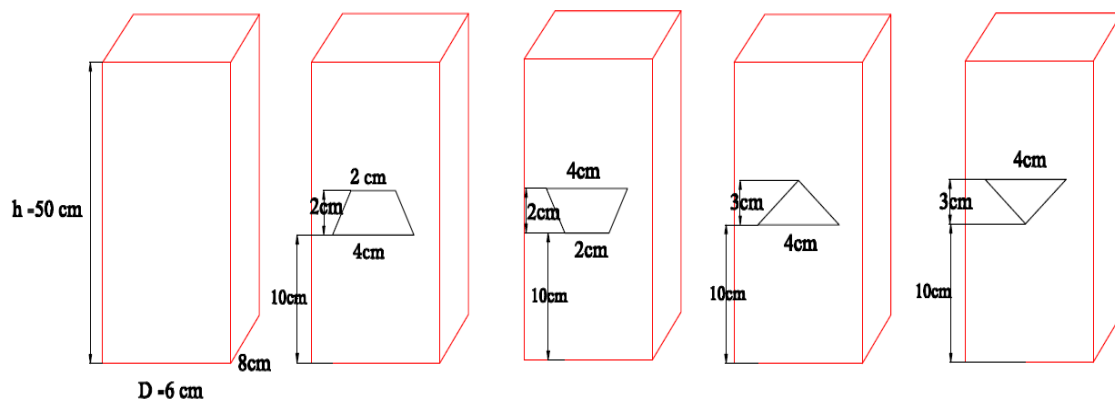
در رابطه‌ی بالا $\frac{h}{D}$ عدد بی‌بعد تراز قرارگیری شکاف از بستر، $\frac{d_s}{D}$ عدد بی‌بعد آبستگي، $\frac{d_{50}}{D}$ عدد بی‌بعد اندازه‌ی رسوبات بستر، $\frac{v}{v_c}$ بیانگر شدت جریان، $\frac{gD}{v^2}$ بیانگر عکس مجذور عدد فرود و $\frac{\mu}{\rho v D}$ بیانگر عدد رینولدز و اثر نیروی لزجت است.

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تهران و در کانالی به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۵ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و شیب طولی ۰/۰۰۲ انجام گرفت. شکل ۲ نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. جنس بستر و چهار متر ابتدایی کانال آجر و سیمان و جنس ده متر اصلی دیواره از پلکسی گلاس است. آب به کمک پمپ از مخزن زیرزمینی به داخل کانال وارد می‌شد. در ابتدای فلوم حوضچه‌ای برای آرامش جریان تعبیه شد. در ورودی کانال بلوک‌های مشبک جهت از بین رفتن تلاطم جریان قرار داده شد. دبی عبوری به وسیله‌ی یک سرریز مستطیلی لبه تیز در انتهای فلوم، اندازه‌گیری می‌شد. عمق جریان نیز به وسیله‌ی یک دریچه‌ی فولادی در انتهای فلوم تنظیم می‌شد.

بر اساس یافته‌های اتما و رودکیوی (۱۹۸۳) در انتخاب عرض پایه که آن را تابعی از قطر رسوبات بستر می‌داند، لذا عرض ۶ سانتی‌متر برای پایه انتخاب گردید. برای انتخاب ارتفاع پایه نیز دو نکته در نظر گرفته شد. اول آنکه نباید در آب مستغرق باشد و دوم آنکه ارتفاع پایه مانعی در مقابل حرکت طولی بدروفایلر نباشد. بنابراین با



شکل ۳- نمایی شماتیک از مدل پایه‌های شکافدار و بدون شکاف

دانه بندی رسوبات

اولین مسئله در انتخاب اندازه ذرات رسوب که باید مورد توجه قرار گیرد، این است که قطر متوسط ذرات طوری انتخاب شود که فرم ریپل در بستر رسوبات تشکیل نگردد. در صورت ایجاد ریپل در بستر، مقداری انتقال رسوب وجود خواهد داشت که از بالادست وارد حفره آبشستگی شده و عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. فرم ریپل در ذراتی با اندازه ۰/۵ تا ۰/۷ میلی‌متر تشکیل می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۷۸). ذرات کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر عموماً ذراتی چسبنده هستند و چسبندگی ذرات، عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. بنابراین برای اجتناب از تشکیل ریپل و حذف تأثیر چسبندگی ذرات بر روی عمق آبشستگی، قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. ملویل (۱۹۹۷) اذعان کرد زمانی که نسبت قطر پایه (D) به قطر متوسط ذرات (d_{50}) بیش از ۵۰ درصد باشد، می‌توان از تأثیر قطر ذرات بر عمق آبشستگی صرف نظر نمود. اتما و رادکیوی (۱۹۸۳) برای این موضوع شرط ۲۰- $\frac{D}{d_{50}} < 25$ را توصیه کردند. همچنین لی و استورم (۲۰۰۹) حداقل مقدار را برای $\frac{D}{d_{50}}$ برابر ۲۵ بیان کردند.

مسئله دیگر در انتخاب رسوب، دانه‌بندی آن است. غیریکنواختی ذرات رسوب موجب کاهش عمق آبشستگی می‌شود. طبق نظریه اتما و رادکیوی (۱۹۸۳) برای حذف تأثیر غیریکنواختی ذرات رسوب، باید انحراف معیار هندسی اندازه ذرات رسوب (σ_g) کمتر از ۱/۳ باشد. محدودیت در اندازه ذرات رسوب در آزمایشگاه، اندازه ذره رسوب نوع اول ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد که با توجه به مدت‌زمان هر آزمایش و با توجه به اینکه آزمایش‌ها در $\frac{u}{u_c} = 0.93$ (در نزدیکی شرایط آستانه حرکت) صورت پذیرفتند، هیچ‌گونه تغییر شکلی در بستر بالادست پایه مشاهده نشد، در نتیجه از این مصالح در آزمایشگاه استفاده شد. با توجه به موارد ذکر شده در این تحقیق برای انتخاب رسوب از ماسه طبیعی رودخانه با دانه‌بندی یکنواخت و $G_s = 2.67$ (چگالی نسبی)، $d_{50} = 0.5mm$ و $\sigma_g = 1.23$ انتخاب گردید.

ضخامت مصالح بستر

ملویل و چیو (۱۹۹۹) حداکثر مقدار آبشستگی را ۲/۴ برابر عرض پایه بیان کرده‌اند که در این تحقیق این عرض

پایه ۶ سانتی‌متر بوده و از همین رو ضخامت مصالح بستر ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

شرایط جریان

با توجه به اینکه این پژوهش در شرایط آب زلال صورت گرفت، به‌منظور تعیین عمق و سرعت جریان، سری آزمایش‌های ابتدایی انجام گرفت تا بتوان عمق و سرعت‌هایی را مشخص نمودند که از یک‌سو شرایط آب زلال در آن‌ها برقرار باشد و از سوی دیگر هم آبشستگی موضعی در آن‌ها رخ دهد و هم اعداد فرود جریان به‌گونه‌ای قابل‌بحث تغییر کنند. در نهایت عمق ۸ سانتی‌متر و اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۱۹ انتخاب شد. محاسبات به‌صورت زیر است. ملویل (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی برای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز است.

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (۳)$$

$$0.1mm < d_{50} < 1mm$$

و برای سرعت بحرانی از رابطه زیر (توزیع لگاریتمی سرعت) استفاده نمود:

$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (۳)$$



شکل ۴- نمایی از کانال آزمایشگاهی

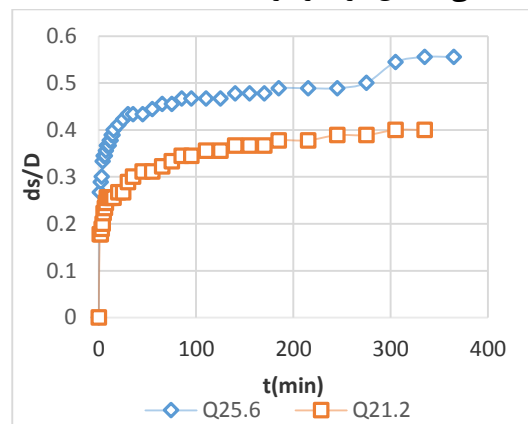
به منظور تعیین زمان آزمایش‌های تحقیق حاضر در ابتدا اقدام به آزمایش‌های طولانی صورت گرفت که ابتدا زمان ۲۴ ساعت منظور گردید سپس در مرحله بعد با استفاده از نتایج آزمایش ۲۴ ساعته مدت زمان ۶ ساعت انتخاب گردید و در مرحله بعد نظر به اینکه در شرایط آزمایش‌های تحقیق حاضر، ۸۰ درصد آبشستگی‌ها در یک

گرداب نعل اسبی آغاز می‌گردد. این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن ضعیف است ولی با گذشت مدت زمان ۵ دقیقه از لحاظ اندازه و قدرت رشد کرده و سبب کنده شدن رسوبات از این قسمت و جابجایی آن‌ها به سمت پایین دست می‌شود. ذرات شسته شده به صورت تپه‌های رسوبی در کناره‌ها و پشت پایه در پایین دست جمع می‌شدند. ارتفاع و محل قرار گیری این تپه‌ها بسته به اندازه دبی‌ها متفاوت است به طوریکه در عدد فرود ۰٫۳ این پشته‌ها تا دیواره فلوم انتقال می‌یافت. در ادامه وجود این تپه موجب شکل‌گیری چاله‌ای در پشت آن می‌گردید و این روند بسته به شدت جریان، در خطوطی با زاویه‌ی حدود ۴۵ درجه در دو طرف پایه ادامه پیدا می‌کرد. طول این دنباله‌ها اعداد فرود ۰٫۳ و ۰٫۲ به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. ماکزیمم عمق آبشستگی تک پایه شاهد بعد از مدت زمان آزمایش در همه دبی‌ها در بالادست و کناره‌های پایه رخ می‌داد. از طرف دیگر با افزایش شدت جریان، اختلاف بین عمق آبشستگی در کناره و وسط پایه کاهش می‌یابد تا آنجا که در عدد فرود ۰٫۳ این مقدار در کناره‌ها و وسط پایه به یکدیگر نزدیک می‌شود. در واقع می‌توان گفت در پایه‌های مستطیلی، با افزایش شدت جریان اثر جریان‌های رو پایین بر جریان‌های شیاری در تشکیل گرداب‌ها بیشتر می‌باشد و در شدت جریان‌های کمتر، گرداب‌های حاصل از جدایش جریان در کناره‌ی پایه مؤثرترند. در شکل ۶ وضعیت رخ داده شده در شرایط آزمایش‌های این بخش و برای اعداد فرود ۰٫۲۷ و ۰٫۳ نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ابعاد چاله آبشستگی افزایش می‌یابد به طوری که در اعداد فرود ۰٫۳ و ۰٫۲۷ و ۰٫۲۴ و ۰٫۲ بیشترین عمق آبشستگی ۱٫۹۳ سانتی‌متر، ۲٫۷۳ سانتی‌متر، ۴ سانتی‌متر، ۶ سانتی‌متر بدست آمد.

همچنین بررسی کیفی وضعیت رخ داده برای چاله آبشستگی نشان می‌دهد بیشترین میزان آبشستگی در قسمت مقابل دماغه پایه پل رخ داده و به تدریج به سمت چپ پایه منتقل شده است. در بخش‌های بعدی مقادیر کمی و نتایج کیفی به دست آمده با نتایج آزمایش‌های مربوط به ایجاد شکاف در پایه مقایسه می‌گردد.

ساعت اول رخ داد لذا مدت زمان یک ساعت برای آزمایش‌های اصلی تحقیق در نظر گرفته شد.



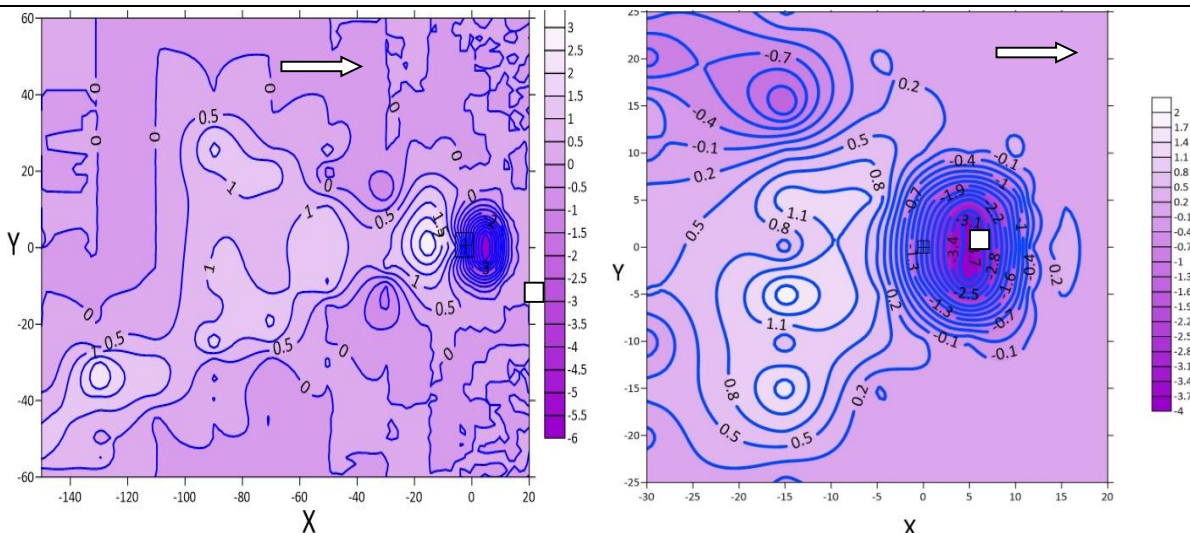
شکل ۵- منحنی تغییرات زمانی آبشستگی برای اعداد فرود $Fr=0.24$ و $Fr=0.2$ در مدت شش ساعت

نتایج و بحث

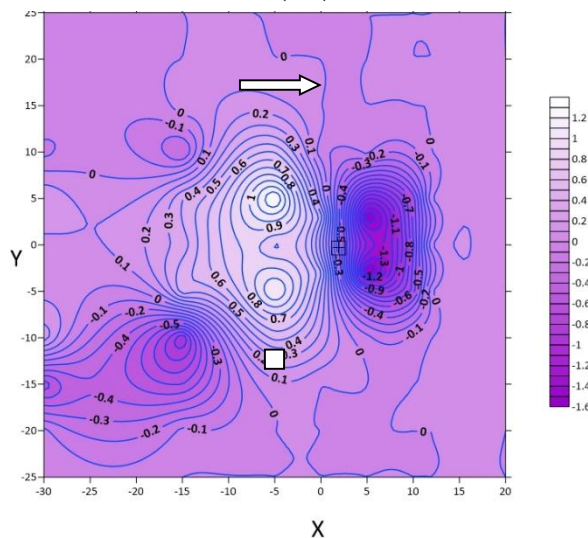
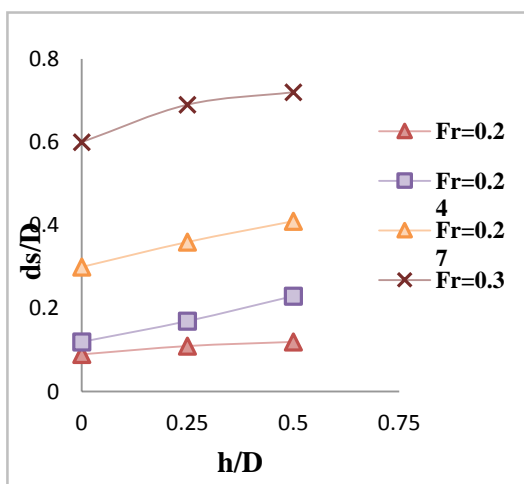
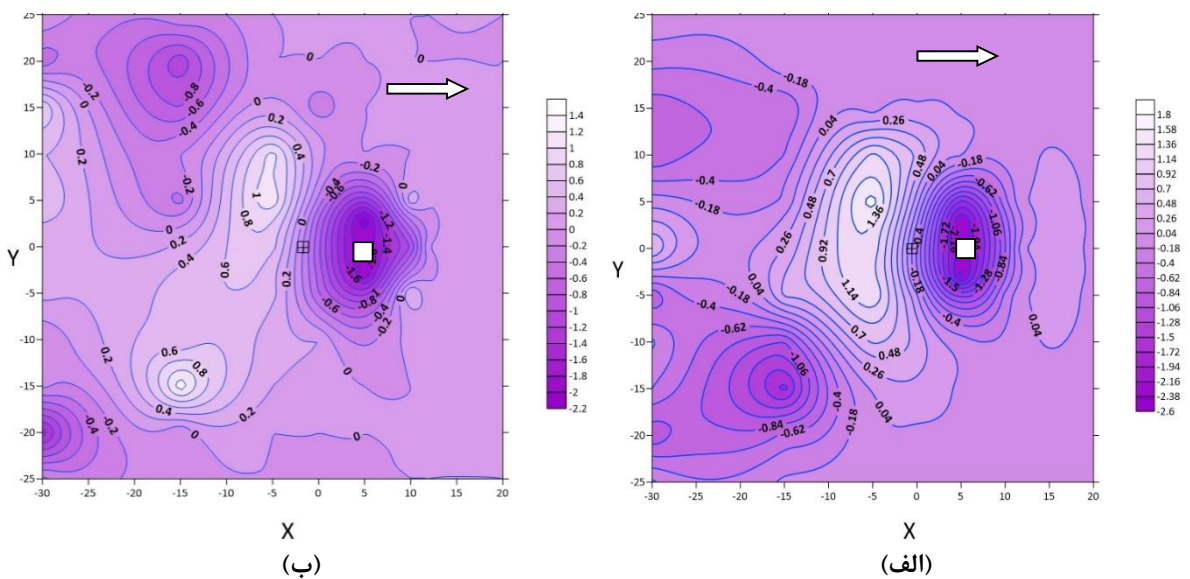
در این بخش نتایج حاصل از تحقیق ارائه می‌گردد. نتایج ارائه شده در این بخش برای حالت‌های آزمایش‌های شاهد (بدون شکاف)، پایه دارای شکاف دوزنقه‌ای، پایه دارای شکاف دوزنقه‌ای بر عکس، پایه دارای شکاف مثلثی و پایه دارای شکاف مثلثی بر عکس می‌باشد. لازم به ذکر است نظر به تعداد بالای نتایج استخراج شده و همچنین روند مشابه رخ داده برای نتایج کلیه حالات اعداد فرود مورد بررسی، فقط نتایج عدد فرود ۰٫۲۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است در تصاویر ترسیم شده برای خطوط کنتور هر مدل منظور از X طول کانال و Y عرض کانال می‌باشد.

آزمایش‌های شاهد (بدون شکاف)

آزمایش‌های انجام شده برای این بخش در مدت زمان ۶۰ دقیقه و برای اعداد فرود ۰٫۳ و ۰٫۲۷ و ۰٫۲۴ و ۰٫۲ مورد آزمایش قرار گرفت. فرایند آبشستگی به دلیل گوشه-دار بودن شکل مقطع پایه، از کناره‌های پایه آغاز می‌شود و با گذشت مدت زمان یک دقیقه به جلوی پایه انتقال می‌یابد. در واقع در پایه مستطیلی شکل آزمایش، سطح گرداب شیاری، که به علت افزایش جادشدگی خطوط جریان، زیاد می‌شود، شیاری با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خطوط جریان در کناره پایه‌ها ایجاد می‌کند. با گذشت زمان حفره آبشستگی گسترش یافته و به وسط پایه می‌رسد. پس از تشکیل حفره آبشستگی، فعالیت سیستم



الف: عدد فرود ۰,۲۷ ب: عدد فرود ۰,۳
 شکل ۶- تغییرات توپوگرافی بستر در شرایط آزمایش‌های شاهد (پایه بدون شکاف)



(د) (ج)
 شکل ۷- تغییرات توپوگرافی بستر در حالت ایجاد شکاف دوزنقه‌ای در پایه الف) ۱/۵ سانتی متر بالای بستر ب) ۳ سانتی متر بالای بستر ج) همتراز بستر د) تأثیر تراز قرار گیری شکاف بر عمق آبستگی حداکثر

آزمایش‌های شکاف ذوزنقه ای

آزمایش‌های این بخش در مجموع تعداد ۱۲ آزمایش بوده است آزمایش‌ها در شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲) انجام شد. شکاف مورد استفاده در سه موقعیت نسبت به بستر (۱/۵ سانتی متری از بستر، ۳ سانتی متر از بستر و همتراز با بستر) بوده است. در شکل (۷) وضعیت توپوگرافی برای شرایط عدد فرود ۰/۲۷ در ثانیه نشان داده شده است.

در جدول (۱) به مقایسه کمی نتایج بدست آمده در کلیه آزمایش‌های تحقیق اشاره شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد برای اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲ ایجاد شکاف در رقوم هم‌تراز بستر نسبت به حالت بدون شکاف در پایه به ترتیب ۷۳/۵۸، ۷۳/۲۶، ۵۵ و ۳۸/۸۳ درصد حداکثر عمق آبشستگی را کاهش داده است. سایر مقایسه‌های مربوط به قرارگیری شکاف در رقوم بالاتر از بستر نسبت به بدون ایجاد شکاف در بستر در جدول (۱) آورده شده است. بررسی کیفی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد روند بدست آمده برای کلیه دبی‌ها مشابه یکدیگر است و با افزایش عدد فرود، حداکثر عمق آبشستگی افزایش یافته است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در هر دبی قرارگیری شکاف نزدیک بستر عملکرد بهتری نسبت به حالت‌های قرارگیری شکاف بالای بستر نشان می‌دهد.

همچنین بررسی کیفی نتایج نشان می‌دهد شکل چاله آبشستگی برای کلیه حالت‌های مورد آزمایش در این بخش به صورت متقارن بوده است. بدین ترتیب که بیشترین میزان آبشستگی در دماغه رخ داده و به تدریج به شکل متقارن به کناره‌ها منحرف شده است.

آزمایش‌های شکاف ذوزنقه ای برعکس

شرایط انجام آزمایش‌های این بخش مشابه آزمایش‌های قبل در مجموع تعداد ۱۲ آزمایش بوده است که در شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲) انجام شد و شکاف مورد استفاده نیز در سه موقعیت (۱/۵ سانتی متری از بستر، ۳ سانتی متر از بستر و همتراز با بستر) قرار گرفت. در شکل (۸) نتایج این بخش ارائه شده است. نمودار شکل (۸-د) تغییرات حداکثر عمق

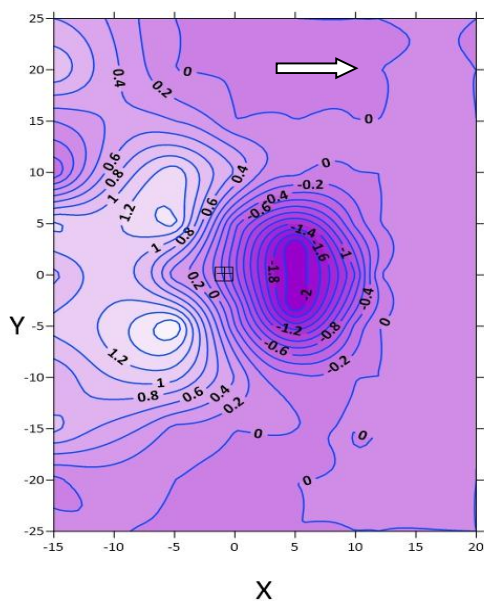
آبشستگی را در مقابل موقعیت شکاف نسبت به بستر را نشان می‌دهد. محور عمودی نسبت بی بعد حداکثر عمق آبشستگی (ds/D) و محور افقی موقعیت قرارگیری شکاف نسب به بستر (h/D) را نشان می‌دهد.

در جدول (۱) به مقایسه کمی میان نتایج بدست آمده در شرایط آزمایش‌های تحقیق حاضر پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت قرارگیری شکاف همتراز بستر نسبت به حالت پایه بدون شکاف برای اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲، به ترتیب ۶۲/۱۸، ۵۳/۴۸، ۴۵ و ۲۱/۱۶ درصد حداکثر عمق آبشستگی کاهش داشته است. بررسی کلیه نتایج در این بخش حاکی از عملکرد بهتر وجود شکاف نسبت به حالت بدون شکاف و همچنین قرارگیری شکاف نزدیک بستر نسبت به شکاف‌های بالاتر از بستر دارد. توپوگرافی بدست آمده بعد از انجام آزمایش نشان می‌دهد در این حالت نیز مشابه حالت شکاف ذوزنقه ای چاله آبشستگی تقریباً به صورت متقارن بوده است البته ذکر این نکته ضرورتی است که در برخی موارد اندکی چاله آبشستگی به سمت چپ پایه منتقل شده است.

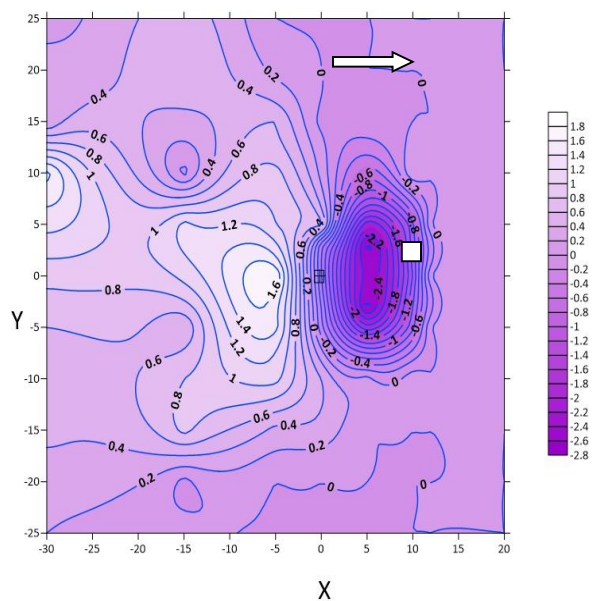
آزمایش‌های شکاف مثلثی

آزمایش‌ها در شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲) انجام شد. شکاف مورد استفاده در سه موقعیت نسبت به بستر (۱/۵ سانتی متری از بستر، ۳ سانتی متر از بستر و همتراز با بستر) قرار گرفت. نمودار شکل (۹) توپوگرافی بستر برای شکاف مثلثی در سه موقعیت قرارگیری همتراز بستر، ۱/۵ سانتی متری نسبت به بستر و ۳ سانتی متری از بستر نشان می‌دهد. محور X و Y موقعیت قرارگیری نقاط برداشت شده در بستر ماسه ای و Z اعماق آبشستگی و رسوبگذاری را نشان می‌دهد.

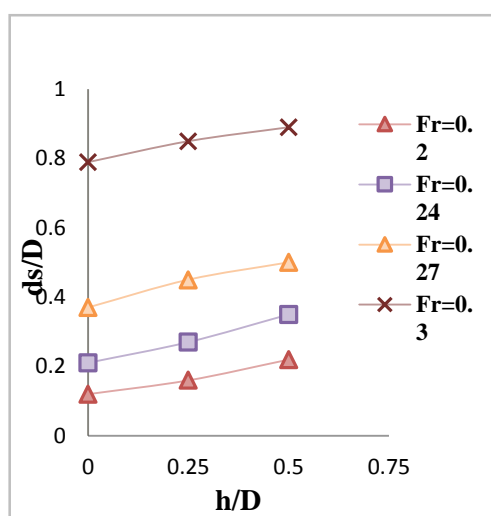
همچنین به منظور بررسی تغییرات عمق آبشستگی حداکثر در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف، نمودارهای بدون بعد عمق آبشستگی حداکثر در مقابل پارامتر بدون بعد رقوم قرارگیری شکاف در شرایط مختلف جریان در شکل (۹-د) نشان داده شده است.



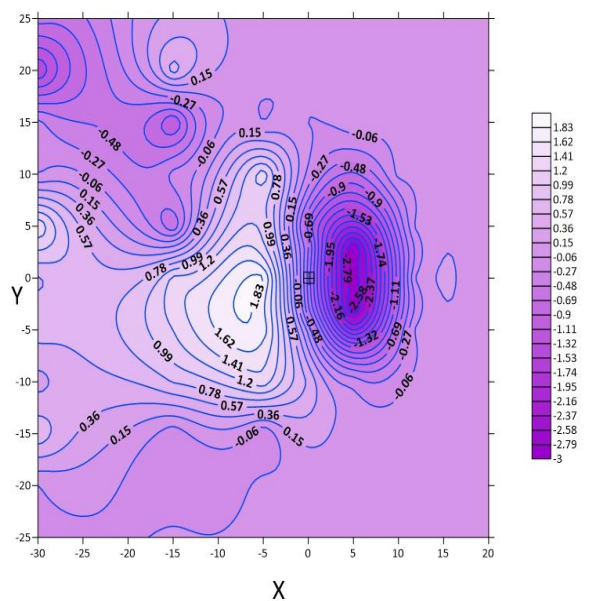
(ب)



(الف)



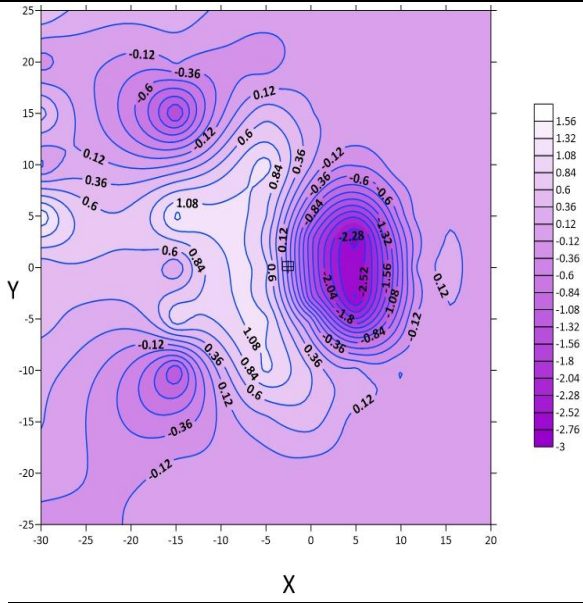
(د)



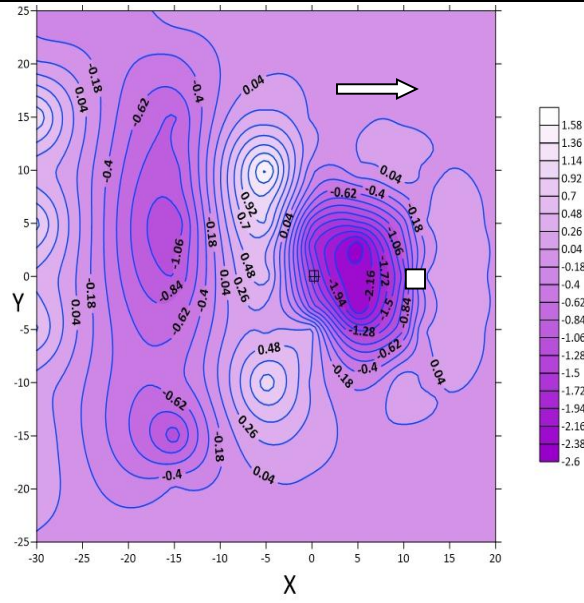
(ج)

شکل ۸- تغییرات توپوگرافی بستر در حالت ایجاد شکاف دوزنقه‌ای برعکس در پایه الف) ۱/۵ سانتی متر بالای بستر ب)

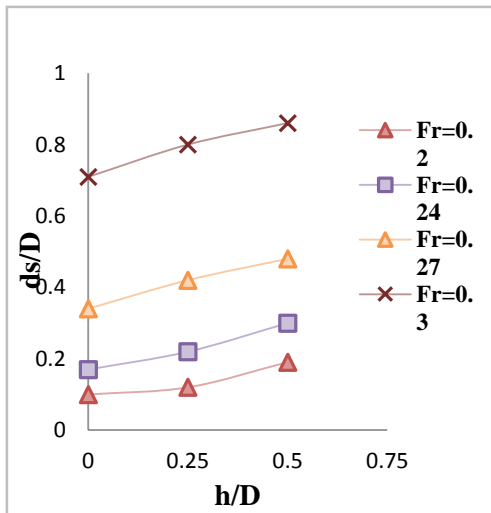
۳ سانتی متر بالای بستر ج) همتراز بستر د) تأثیر تراز قرار گیری شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر



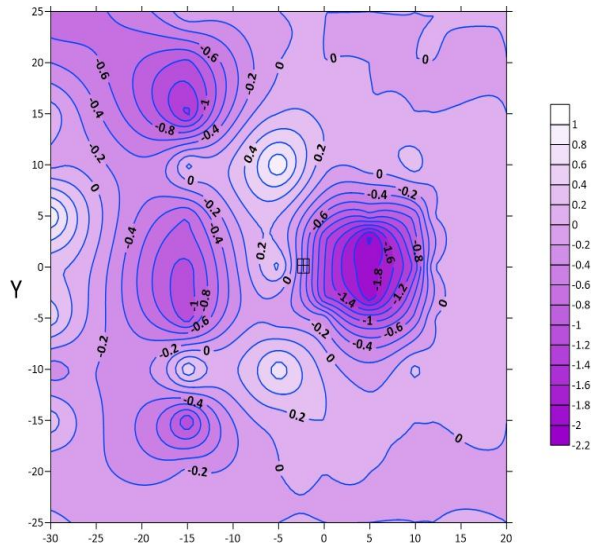
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

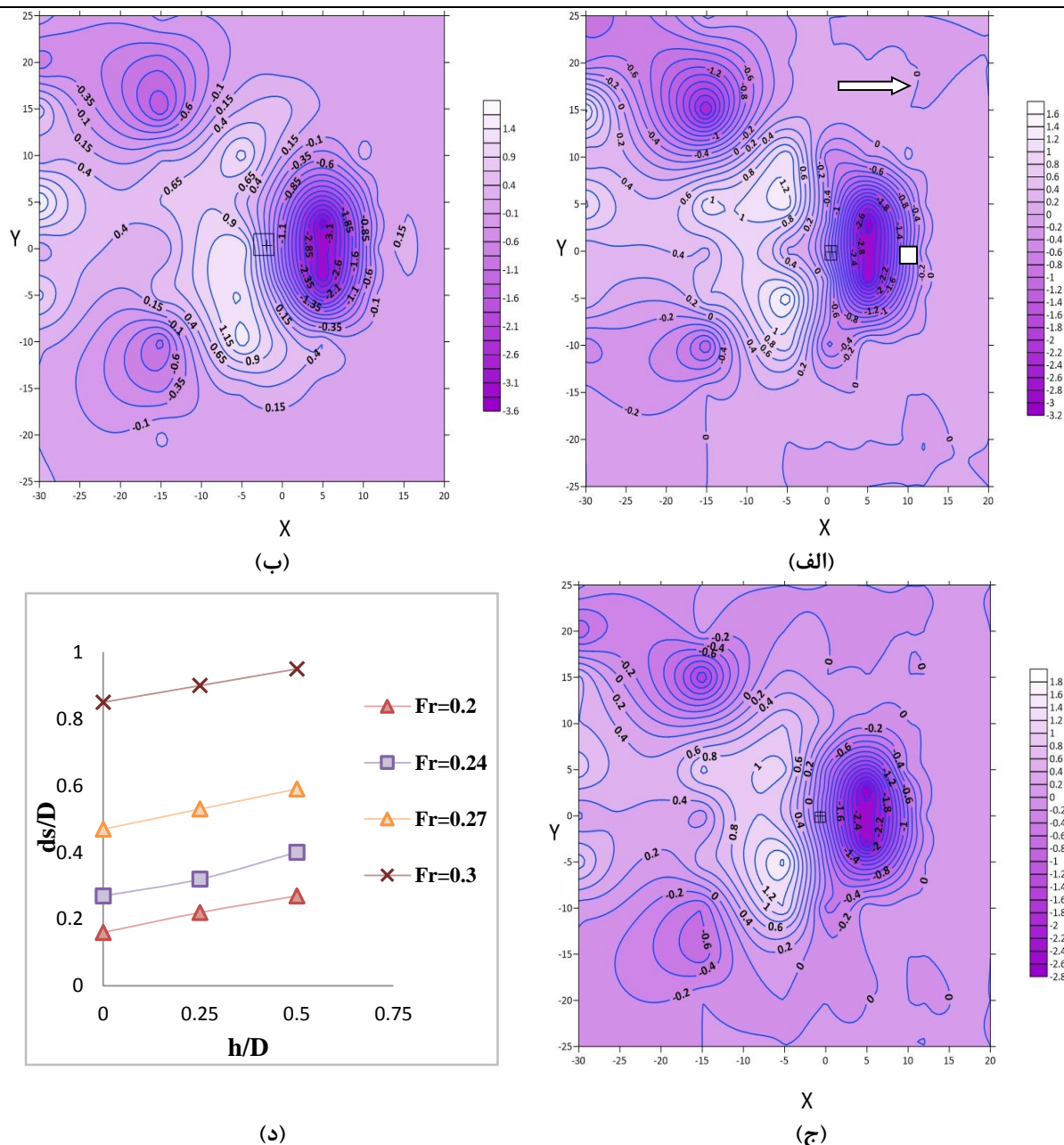
شکل (۹): تغییرات توپوگرافی بستر در حالت ایجاد شکاف مثلثی در پایه الف) ۱/۵ سانتی متر بالای بستر ب) ۳ سانتی-متر بالای بستر ج) همتراز بستر د) تأثیر تراز قرار گیری شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر

آزمایش‌های شکاف مثلث برعکس

آزمایش‌های این بخش در مجموع تعداد ۱۲ آزمایش بوده است که همانگونه که پیش از این بیان گردید برای شکاف برای اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲، بوده است و برای هر دبی شکاف در سه ۱/۵ سانتی‌متر بالای بستر، ۳ سانتی‌متر بالای بستر و همتراز بستر آزمایش‌ها انجام شده است. در شکل (۱۰) به وضعیت توپوگرافی بستر در شرایط عدد فرود ۰/۲۷ پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات عمق آبشستگی حداکثر در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف، نمودارهای بدون بعد عمق آبشستگی حداکثر در مقابل پارامتر بدون بعد رقوم قرارگیری شکاف در شرایط مختلف جریان در شکل (۱۰-۱) نشان داده شده است.

مقایسه کمی میان نتایج نشان می‌دهد در حالت قرارگیری شکاف همتراز بستر نسبت به حالت پایه بدون شکاف برای شکاف برای اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲، به ترتیب ۶۵/۲۸، ۶۳/۳۷، ۴۸/۵ و ۲۶/۶۷ درصد حداکثر عمق آبشستگی کاهش داشته است.

بررسی شکل چاله آبشستگی نشان می‌دهد در این حالت شکل چاله آبشستگی قدری متفاوت با حالت‌های قبل می‌باشد. در این حالت بیشترین میزان آبشستگی در دماغه پایه پل رخ داده و به تدریج به سمت راست پایه کشیده شده است.



شکل (۱۰): تغییرات توپوگرافی بستر در حالت ایجاد شکاف مثلثی برعکس در پایه الف) ۱/۵ سانتی متر بالای بستر (ب) ۳ سانتی متر بالای بستر (ج) همتراز بستر (د) تأثیر تراز قرار گیری شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر

در همه آزمایش‌ها با مدل های هندسی متفاوت شکاف، شکاف های مورد استفاده در نزدیکی بستر عملکرد بهتری در کاهش عمق آبشستگی حداکثر حول پایه نسبت به حالت های قرار گرفته در نزدیکی سطح آب (دور از بستر) داشته اند.

در تمامی مدل‌های بررسی شده، شکاف‌های قرار گرفته در سطح بستر بهتر از شکاف‌های قرار گرفته نزدیک سطح آب عمل کرده و کاهش بیشتری در آبشستگی به وجود می‌آورند. علت این امر را می‌توان به این صورت

مقایسه کمی میان نتایج نشان می‌دهد در حالت قرارگیری شکاف همتراز بستر نسبت به حالت پایه بدون شکاف برای شکاف برای اعداد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۲، به ترتیب ۵۱/۸۱، ۴۱/۳۹، ۳۰ و ۱۵/۵ درصد حداکثر عمق آبشستگی کاهش داشته است. بررسی کلیه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش دبی حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد و در کلیه حالت‌ها با قرارگیری شکاف همتراز بستر عملکرد بهتری نسبت به زمانی که شکاف بالاتر از بستر است مشاهده می‌شود.

عملکرد بهتری از شکاف‌های فرارگرفته در نزدیک سطح آب خواهند داشت. نتایج حاصله در این بخش با نتایج تحقیقات چیو (۱۹۹۲)، کومار و همکاران (۱۹۹۹)، گیرمالدی و همکاران (۲۰۰۹)، آفاخانی افشار (۱۳۸۹)، مولایی (۱۳۹۳) و اردلانی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. درصد کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به پایه بدون شکاف در شرایط متفاوت جریان و تراز مختلف قرارگیری در جدول (۱) نشان داده شده است.

توجیه کرد که هنگامی که شکاف نزدیک بستر قرار می‌گیرد، با عبور دادن سریع جریان، باعث منحرف شدن جریان رو به پایین از بستر می‌شود. همچنین این شکاف با کاهش قطر مؤثر پایه، باعث کاهش گرداب‌های نعل اسبی به وجود آمده در اطراف پایه خواهد شد. در مقابل، هنگامی که شکاف نزدیک سطح آب قرار داشته باشد، از طریق کاهش عمق مؤثر جریان باعث کاهش آب‌شستگی خواهد شد، و در کاهش جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی در اطراف پایه، تأثیر کمتری خواهد داشت. از آن‌جا که کنترل این دو عامل، که عوامل اصلی آب‌شستگی هستند، اهمیت بیشتری دارد، بنابراین شکاف‌هایی که هم‌تراز بستر هستند،

جدول (۱): درصد کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به پایه بدون شکاف در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف

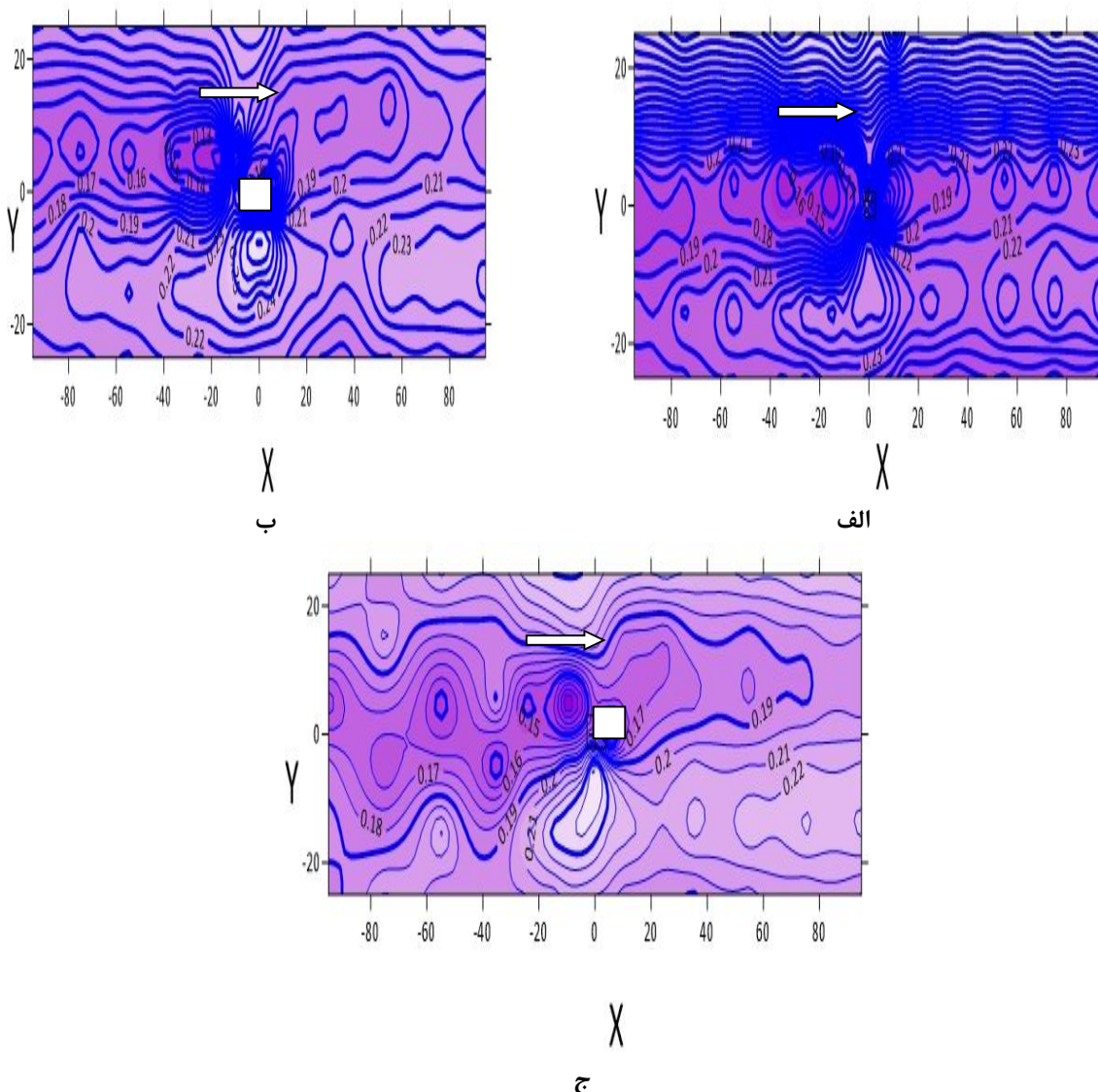
شکل شکاف	موقعیت شکاف نسبت به بستر (h)	درصد بهبود (Fr=۰/۲۰)	درصد بهبود (Fr=۰/۲۴)	درصد بهبود (Fr=۰/۲۷)	درصد بهبود (Fr=۰/۳۰)
مثلث برعکس	0	۵۱/۸	۴۱/۴	۳۰	۱۵/۵
	۱/۵cm	۳۴/۲	۳۰/۳	۲۰	۱۰
	۳cm	۱۷/۱	۱۲/۱	۱۱/۷	۵/۵
دوزنقه برعکس	0	۶۲/۲	۵۳/۵	۴۵	۲۱/۲
	۱/۵cm	۵۱/۸	۴۱/۴	۳۳/۳	۱۵/۵
	۳cm	۳۱/۱	۲۴/۲	۲۵	۱۱/۲
مثلث	0	۶۵/۳	۶۳/۸	۴۸/۵	۲۶/۷
	۱/۵cm	۵۸/۵	۵۱/۳	۳۶/۷	۲۰
	۳cm	۴۱/۵	۳۴/۱	۲۸/۳	۱۴/۵
دوزنقه	0	۷۳/۶	۷۳/۳	۵۵	۳۸/۸
	۱/۵cm	۶۲/۳	۶۱/۳	۴۶/۷	۳۱/۲
	۳cm	۶۲/۲	۴۸/۷	۳۸/۳	۲۷/۸

کاهش سرعت جریان شده است. در جلوی پایه و فاصله ۶cm از بستر سرعت به دلیل فاصله بیشتر از شکاف دارای مقدار کمتری نسبت به مقدار سرعت در فاصله ۳cm از بستر می‌باشد. در واقع شکاف هم‌تراز بستر به عنوان یک روزنه عمل کرده و مثل این می‌باشد که مانعی در مقابل جریان وجود ندارد. همچنین نتیجه دیگری که می‌توان از این نمودارها به دست آورد این که بیشترین سرعت به ترتیب مربوط به شکاف مثلث برعکس، دوزنقه برعکس و دوزنقه می‌باشد که بیشترین تا کمترین ممان دوم سطح را به خود اختصاص داده‌اند.

به منظور تحلیل نتایج به دست آمده در آزمایش‌های تحقیق حاضر اقدام به برداشت پارامترهای سرعت در سه بعد برای سه پایه با شکاف‌های دوزنقه، دوزنقه برعکس و مثلث برعکس در دو عمق با فاصله ۳cm و ۶cm از بستر صورت پذیرفت.

که در شکل (۱۱) نتایج مربوط به برداشت سرعت در عمق ۳ سانتی‌متر از بستر نشان داده شده است.

بررسی نتایج بدست آمده برای سرعت نشان می‌دهد در هنگام برخورد جریان به پایه، پایه به عنوان یک مانع باعث



شکل (۱۱): مقایسه‌ی تغییرات خطوط همتراز سرعت در سه شکل شکاف و عمق ۳cm از بستر. الف) شکاف مثلث برعکس ب) شکاف دوزنقه برعکس ج) شکاف دوزنقه

کندتر می‌شود تا آنکه در نهایت عمق آبشستگی به سمت عددی ثابت میل می‌کند.

- نرخ آبشستگی با عدد فرود جریان، تراز قرارگیری شکاف از بستر و ممان دوم سطح شکاف رابطه مستقیم دارد.

- با افزایش ۵۰ درصدی عدد فرود جریان، عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی در پایه بدون شکاف به ترتیب حدود ۳/۱ و ۹ برابر می‌شود. همچنین عملکرد شکاف در کاهش عمق آبشستگی در پایه‌های شکاف‌دار نیز کاهش می‌یابد. باتوجه به نتایج بدست آمده، شکاف دوزنقه در عدد فرود ۰/۲ با به وجود آوردن کاهش در حدود ۷۳/۵۸ و ۸۱/۵۹ درصد در عمق و حجم چاله

بنابراین می‌توان گفت با افزایش ممان دوم سطح شکاف، سرعت در اطراف پایه افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

به صورت کلی می‌توان نتایج حاصل از تحقیق حاضر را به صورت زیر خلاصه نمود:

- در پایه‌هایی با مقطع مستطیلی، در سرعت‌های $\frac{u}{u_c} < 0.95$ حداکثر عمق آبشستگی در طرفین پایه و در فاصله‌ای در حدود $X=0/75D$ و $Y=0/29D$ از مرکز پایه ایجاد می‌شود.

- عمق آبشستگی در لحظات اولیه آزمایش به سرعت افزایش می‌یابد ولی با گذشت زمان این روند به تدریج

فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هفتم شماره سوم، صفحه ۱۳ تا ۲۷.

۴) شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. هیدرولیک انتقال رسوب.

ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

۵) مولایی ح. ۱۳۹۳. تعیین اثر هندسه ی شکاف روی کاهش عمق آبشستگی در پایه های استوانه ای. پایان نامه ی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

۶) نوزاد ح، حیدرپور م، افضلی مهر ح. ۱۳۸۰. کنترل و کاهش آبشستگی موضعی پایه ی پل با استفاده از شکاف در گروه پایه ها. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۵ تا ۱۷ آبان، دانشگاه فنی تهران.

7) Breusers H N C, Rudkivi A J. 1991. Scouring-Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland.

8) Chiew Y M. 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(11), 1260-1269.

9) EL-Ghorab E. 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. Alexandria Engineering Journal (2013) 52, 467-478.

10) Grimaldi C, Gaudio R, Calomino F and Cardoso A. H. 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot bed sill. Journal of hydraulic Engineering, ASCE, 135(5), pp 431-425.

11) Hjorth p. 1975. Study on the Nature of Local Scour, Dep. Water Resources Engrg. Lund Inst. of Tech., Bulletin Series A, No. 46.

12) Khodabakhshi A, Saneie M and Abdoh Kolahchi A., 2014. Experimental study on effect of slot level on scour around bridge pier. International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol3, pp 103-108.

13) Kumar V, Ranga Raju K G, Vittal N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. J. Hyd. Eng., ASCE, 125(12): 1302-1305.

14) Mehville B.W and Raudkivi, A. J. 1977. Flow Characteristics in Local scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Research, IAHR., 15, 373-380.

15) Mellvil B W. 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. J Hyd Engrg ASCE 132(2): 125-136.

16) Raudkivi A J, Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), pp. 339-350.

17) Sumer B.M and Fredsoe J. 2002. The mechanics of scour in the marine environment.

آبشستگی، بهترین عملکرد را نسبت به شکاف های دیگر داشته است. و شکاف مثلث برعکس در عدد فرود $0.3/0$ با کاهش در حدود $15/5$ و $42/81$ درصد در شرایط مشابه کمترین عملکرد را داشته است.

- با افزایش عدد فرود جریان، تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره ی آبشستگی افزایش می یابد.

- با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق آبشستگی بالادست پایه های شکاف دار به افزایش می یابد. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره آبشستگی نیز افزایش می یابد. به طوریکه در تمامی اعداد فرود شکاف های قرار گرفته در تراز روی بستر با به وجود آوردن کاهش در حدود $15/5$ تا $51/81$ درصد برای شکاف مثلث برعکس، $21/16$ تا $62/18$ درصد برای شکاف دوزنقه برعکس، $26/67$ تا $65/28$ درصد برای شکاف مثلثی و $38/83$ تا $73/58$ درصد برای شکاف دوزنقه، در عمق آبشستگی، بهترین عملکرد را نسبت به دو تراز دیگر در شرایط مشابه، دارا می باشند. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره آبشستگی نیز افزایش می یابد.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به جهت قرار دادن امکانات، در این تحقیق تشکر و قدردانی به عمل می آید.

منابع

۱) اردلانی ا، بختیاری م، صانعی م و کاشفی پور س م. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی اثر شکل شکاف و لنگر دوم سطح شکاف روی کنترل آبشستگی موضعی پایه پل پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر. ۱۲۸ صفحه.

۲) آقاخانی افشار ا، غفوری مغربی م و اسماعیلی ک. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه های مجاور هم بر کاهش آبشستگی موضعی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳) حیدرپور م، افضلی مهر ح، نادری بنی م. ۱۳۸۲. کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در پایه ی پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف. مجله ی علوم و

Advanced series on ocean engineering, vol 17. World Scientific.

18) Tanaka S and Yano, M., 1967. Local scour around a circular cylinder. Proc. 12th LAHR Congress, Vol. 3, Fort Collins, USA.

19) Zarrati A.R., Gholami H and Mashahir M.B. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 42(1), pp 97-103.