

بررسی تاثیر آستانه اریب در آبشستگی پایه پل با مقطع دایره‌ای

سعید گوهری^۱، مرضیه رضایی^{۲*}

چکیده

وقوع آب شستگی موضعی در اطراف پایه‌ها یکی از دلایل عمده‌ی عدم پایداری پل‌ها است. ارائه‌ی روش‌های مناسب به منظور پیش‌بینی و مهار کردن عمق آب‌شستگی از مسائلی است که بسیار به آن توجه شده و روش‌های مختلفی برای مهار کردن آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل پیشنهاد گردیده است. در مطالعه‌ی حاضر اثر استفاده از آستانه‌ی اریب و تخت در کاهش آب شستگی اطراف پایه‌ی پل استوانه‌ای در شرایط آب صاف، در ته نشست‌های غیر چسبنده، بررسی و مقایسه شده است. آستانه در پایین دست پایه قرار داده شده و میزان اثر آن بر کاهش آب شستگی با تغییر فاصله بین پایه و آستانه، همچنین تاثیر شکل هندسی آستانه ارزیابی گردیده است. در این تحقیق از استوانه‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر برای پایه‌ی پل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نصب آستانه در مهار کردن آب شستگی موثر بوده است. همچنین، مقدار فاصله و شکل آستانه بیشترین تاثیر را در کاهش میزان آب شستگی داشته است. قرار گیری آستانه ی تخت و اریب در پایین دست پایه به ترتیب باعث کاهش ۱۱ و ۱۶ درصدی در حداکثر مقدار عمق آب شستگی شده است. با افزایش فاصله‌ی آستانه ی اریب تا پایه‌ی پل از اثر محافظتی آن کاسته می‌شود. همچنین، آستانه‌ی اریب به مقدار بیشتری حجم آب شستگی اطراف پایه را نسبت به آستانه‌ی تخت کاهش داده و از توسعه‌ی حفره‌ی آب شستگی به بالا دست جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آستانه، آب شستگی، پایه‌ی پل، ته نشست‌های غیر چسبنده

۱ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

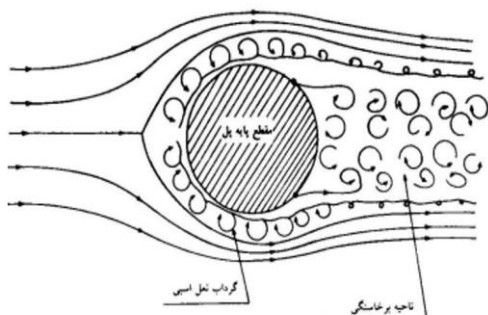
* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۶۳۳۵۲۹۱، saeedgohari@yahoo.com، s.gohari@basu.ac.ir

مقدمه

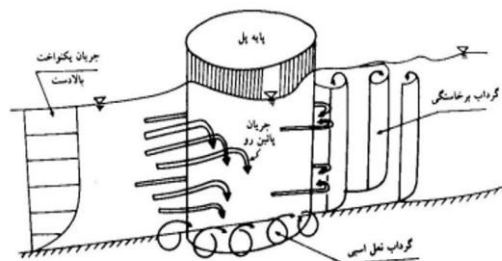
بحث آب شستگی هر چند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن، همچنین نبود رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان توجه خاص علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه را جلب کرده است. اهمیت بررسی پدیده‌ی آب شستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آب شستگی قابل ملاحظه باشد، به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای رسیده و پایداری این سازه را در معرض خطر قرار دهد، یا موجب تخریب آنها گردد. سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان را در نزدیکی خود تغییر داده و به صورت موضعی باعث آب شستگی در این محدوده می‌شوند.

الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده است که این پیچیدگی با تشکیل حفره‌ی آب شستگی در اطراف پایه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آیند که عملکرد آنها باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها گشته که حفره‌ی آب شستگی نامیده می‌شود. توسعه‌ی این گودال در اطراف پایه‌ها باعث خالی شدن زیر پی‌ها، در نتیجه خرابی آنها و خرابی پایه‌ی پل می‌گردد. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین گردابه‌هایی می‌شود. یکی برخورد جریان به پایه، دیگری جدا شدن جریان از پایه‌ی پل است. الگوی جریانی که در اطراف پایه‌ی پل شکل می‌گیرد به طور مستقیم یا غیر مستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط است. در واقع جریان آرام پس از برخورد با پایه‌ی پل دچار دگرگونی شده و بر اثر انحراف خطوط جریان و تشکیل لایه‌ی مرزی ناحیه‌ی پر فشار در بالادست پایه و ناحیه‌ی کم‌فشار در پایین‌دست آن به وجود می‌آید. این امر سبب تشدید شیب فشار و به وجود آمدن نوعی جریان ثانویه در اطراف پایه‌ی پل می‌شود که اصطلاحاً به گرداب نعل اسبی معروف است. ناحیه‌ی پایین‌دست، موسوم به ناحیه برخاستگی، ناحیه‌ای کم‌فشار و مجزا از جریان فعال رودخانه تلقی می‌شود. جریان‌های چرخشی ایجاد شده در این بخش موسوم به گرداب - برخاستگی برخلاف گرداب نعل اسبی، که دارای محوری افقی است، عموماً حول محور قائم تشکیل می‌شود (شکل ۱). منشاء تشکیل این گرداب‌ها پدیده‌ی جدایی جریان و تشکیل لایه‌های برشی ناشی از این فرایند در

جناحین پایین‌دست پایه است. از ویژگی‌های بارز این گرداب‌ها وجود یک مغزه‌ی کم‌فشار در ناحیه‌ی مرکزی است که به صورت مکشی عمل کرده و قادر است مواد و مصالح را از بستر جدا کرده و با خود حمل کند.



الف - نیمرخ نهایی موقعیت پایه‌ی پل و میدان جریان حاصله



ب - میدان جریان و موقعیت پایه‌ی پل در نیمرخ طولی

۱- چگونگی تشکیل گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستگی در اطراف پایه‌ی پل با مقطع دایره‌ای (ملویل و کلمن، ۲۰۰۰)

اقداماتی را که برای جلوگیری از آب شستگی و تخریب پایه‌های پل وجود دارد می‌توان در چهار دسته تقسیم کرد: ۱- کاهش قدرت گردابه‌ها در مجاورت پایه با ایجاد شکاف یا اصلاح کردن هندسه‌ی پایه‌ی پل ۲- بالا بردن مقاومت بستر در برابر فرسایش یا ایجاد پوشش سنگ‌چین، طوقه، ایجاد آستانه ۳- حفظ شرایط زیست-محیطی و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها ۴- بازرسی و پایش بستر، طبقه بندی نمود. در این تحقیق به بررسی تاثیر شکل و فاصله‌ی آستانه بر حداکثر ابعاد چاله آب شستگی اطراف پایه‌ی پل با مقطع دایره‌ای پرداخته شده است. شکل (۲) الگوی جریان را در اطراف پایه‌ی پل با آبشکن نشان می‌دهد.

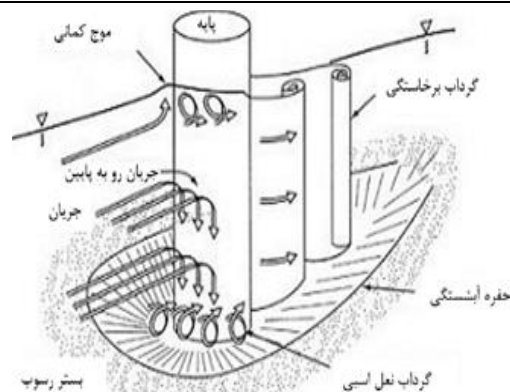
آزیودو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی آزمایشگاهی آب شستگی اطراف پایه‌های پل دایره‌ای و پل کشیده با و بدون شکاف پرداختند. نتایج آنها نشان دادند، که حداکثر عمق آب شستگی اطراف پایه‌های کشیده در مقایسه با پایه ی پل دایره‌ای کمتر بوده است. عمق آب شستگی هنگام استفاده از شکاف در دو پایه‌ی کشیده و دایره‌ای نیز نسبت به حالت بدون شکاف کمتر بوده است.

روش‌هایی که برای کاهش آب شستگی موضعی به کار رفته است، از جمله راه کارهای مهم می‌توان به استفاده از شکاف در پایه (چیو، ۱۹۹۲؛ حیدری پور، ۲۰۰۲) استفاده از سنگ‌چین (بروسر و همکاران، ۱۹۷۷؛ پارولا و همکاران، ۱۹۹۶)، استفاده از طوقه در اطراف پایه (اتما، ۱۹۸۰؛ کومار و همکاران، ۱۹۹۹؛ زراتی و همکاران، ۲۰۰۶) اشاره کرد.

چیو و لیم (۲۰۰۳) اولین بار استفاده از یک آستانه رادر بالادست پایه برای مهار کردن آب شستگی تحت شرایط آب‌صاف و بستر زنده پیشنهاد کردند. نتایج آنها نشان می‌دهند که بهترین حالت استفاده از آستانه در بالادست پایه، در یک آستانه‌ی عمودی (زاویه‌ی آن صفر باشد)، با ارتفاع آستانه‌ی بزرگتر از $\frac{1}{3}$ عمق جریان، همچنین فاصله بین پایه و آستانه $\frac{4}{4}$ برابر عرض پایه رخ داده است. بیشترین کاهش آب شستگی در آزمایش‌های آنها حدود ۵۰ درصد بود.

گریمالدی و همکاران (۲۰۰۹) مهار کردن آب شستگی اطراف پایه‌ی پل را با آستانه در پایین‌دست پایه بررسی کردند. بررسی آنها نشان داد که قرار گرفتن آستانه-ی تخت در یک فاصله‌ی کوتاه از پایه‌ی پل در پایین‌دست موجب کاهش عمق، حجم و مساحت آب شستگی در اطراف آن می‌گردد. در واقع هر چه فاصله‌ی بین پایه و آستانه کمتر باشد، آب شستگی کمتر خواهد بود. همچنین، آنها از آستانه در پایین‌دست پایه و شکاف در آن برای کاهش آب شستگی استفاده کردند. در این حالت، عمق آب شستگی ۴۵ درصد کاهش یافته است. همچنین، بیشترین کاهش مساحت و حجم حفره‌ی آب شستگی در بهترین حالت به ترتیب ۸۰ و ۹۰ درصد بوده است.

تحقیقات زیادی برای کاهش حفره‌ی آب شستگی اطراف پایه‌های پل با استفاده از آستانه‌ی تخت انجام شده است، اما مهار کردن آب شستگی با استفاده از آستانه با شکل‌های هندسی متفاوت کمتر مطالعه شده است.



۲- عملکرد آستانه در جلوگیری از آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌ی پل.

پگ لیارا و همکاران (۲۰۱۰) کاربرد آستانه‌ی گابیونی را در پایین‌دست برای حفاظت از آب شستگی پایه‌ی پل بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهند که آستانه فرآیند آب شستگی را کند کرده و به تاخیر می‌اندازد ولی، در صورت توسعه‌ی آب شستگی به زیر آستانه، آب شستگی با سرعت پیش رفته و چاله‌ی آب شستگی ایجاد می‌شود. بررسی سعادت‌ی پاچه کناری و همکاران (۱۳۹۳) نشان می‌دهد که موقعیت قرارگیری آستانه تأثیر محسوسی بر روند توسعه‌ی زمانی چاله‌ی آب شستگی دارد. همچنین، کارگذاری آستانه در مقابل پی نسبت به سایر موقعیتهای نصب آستانه، کارایی بیشتری در کاهش آب شستگی دارد. مقایسه نتایج آنها نشان می‌دهد که برای کلیه ترازهای کارگذاری پی، به طور متوسط کاربرد مقدار عمق آب شستگی با استقرار آستانه در بالادست ۲۲ درصد، آستانه‌ی میانی (در اطراف پایه ی پل)، ۱۸ درصد و آستانه‌ی پایین دست ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.

ملویل و همکاران (۱۹۹۹) راه کارهای کاهش آب شستگی را در اطراف پایه‌های پل به دو دسته‌ی کلی روش‌های پوششی همراه با مقاوم‌سازی بستر و استفاده از وسایل دگرگون‌کننده جریان دسته‌بندی نمودند.

روش‌های پوششی در پایه‌پل‌ها برای افزایش مقاومت در مقابل تنش‌های برشی، که در طی جریان‌های شدید ایجاد می‌شود به کار رفته و به صورت سپری در برابر آنها عمل می‌کنند. در صورتی که وسایل دگرگون‌کننده‌ی جریان میدان جریان اطراف پایه‌ها را گسسته ساخته و در نتیجه، قدرت فرسایش‌دهنده‌ی جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه‌ی پل کاهش می‌یابد (ملویل و هد فید، ۱۹۹۹).

توجه به آشفتگی جریان (مقدار عدد رینولدز در بازه ۱۹۰۰۰-۱۱۰۰۰ قرار دارد) می توان از فراسنج رینولدز صرف نظر کرد.

$$\frac{d_s}{h} = f_1 \left(\frac{u}{\sqrt{gh}}, \frac{\mu}{\rho \nu h}, \frac{h}{D}, \frac{W}{h}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D}{h}, \frac{L}{h}, \frac{u \cdot t}{h}, S_0, \sigma_g, \frac{d_{50}}{h} \right) \quad (2)$$

رابطه‌ی نهایی به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\frac{d_s}{h} = f \left(\frac{L}{h}, \frac{u \cdot t}{h}, Fr \right) \quad (3)$$

که در آن عدد فرود جریان است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در نهر پایه داری به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف فلزی، انجام شده است. برای بده جریان از یک تلمبه گریز از مرکز با قابلیت تامین ۲۵ لیتر بر ثانیه، استفاده شده است. بده‌های استفاده شده در این آزمایش ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر ثانیه بوده است. جریان به وسیله‌ی تلمبه وارد مخزن بالادست شده، سپس جریان با عبور از آرام کننده‌ها به پایین دست نهر وارد می‌شود. برای تنظیم عمق جریان در نهر از دریچه‌ای که در انتهای نهر نصب شده بود، استفاده گردید. شکل (۳) نمایی از نهر پایه دار آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ی حاضر اثر استفاده از آستانه‌ی اریب در فاصله‌های مختلف بررسی می‌گردد.

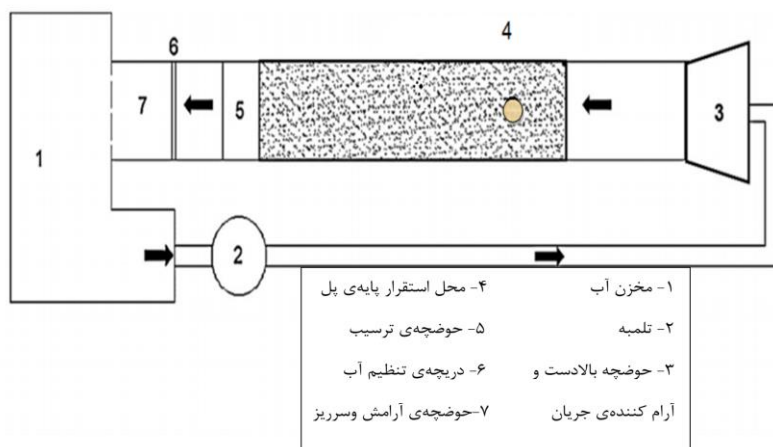
تحلیل ابعادی

عمق آب شستگی در اطراف پایه‌ی پل متاثر از عوامل زیادی شامل فراسنجهای توصیف کننده‌ی هندسه‌ی پایه‌ی پل، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال و ته نشست بستر و زمان هستند که آنها را می‌توان به صورت رابطه‌ی تابعی زیر نوشت:

$$d_s = f_1(\mu, \rho, L, \rho_s, D, W, S_0, h, \sigma_g, u, d_{50}, g, t) \quad (1)$$

که در آن μ لزجت پویائی سیال، ρ چگالی آب، L ، فاصله‌ی آستانه از پایه‌ی پل، ρ_s جرم مخصوص ذرات جامد، D قطر پایه‌ی پل، W عرض نهر پایه‌دار، S_0 شیب کف نهر، h عمق پایاب، σ_g لزجت سیال، d_{50} میانگین قطر ذرات، g شتاب گرانش، t زمان تعادل هستند. با استفاده از نظریه‌ی Π -باکینگهام رابطه (۱) با انتخاب ρ, h, u به عنوان فراسنجهای تکراری، رابطه‌ی میان فراسنجهای بی بعد، به صورت زیر خواهد بود:

با توجه با اینکه در این تحقیق شیب طولی نهر ثابت بوده و مصالح از یک جنس و یکنواخت هستند، فراسنجهای $\frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, S_0, d_{50}$ از تابع فوق حذف می‌شوند. از طرفی با



۳- نهر پایه دار آزمایشگاهی.

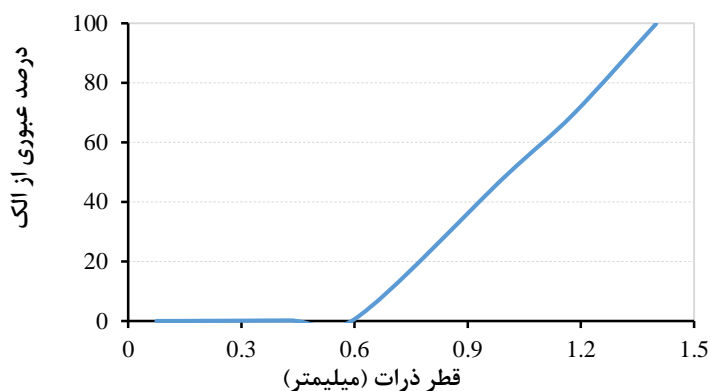


۴-نمایی از استقرار آستانه الف) آستانه‌ی اریب در $L=0$ ، ب) آستانه‌ی اریب $L=2.5$ cm، ج) آستانه‌ی اریب $L=5$ cm و د) آستانه‌ی تخت $L=0$

عمق آب شستگی موضعی، بر اساس پژوهش‌های ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات ته نشستی باید از ۲۵-۲۰ بیشتر باشد. همچنین، رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) بیان کردند که جهت ممانعت از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه‌ی حرکت، قطر ته نشست‌های باید از 0.7 میلی‌متر بیشتر باشد. ته نشست‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر 1 میلی‌متر بودند که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن در بازه‌ای به طول 3 متر از نهر پایه دار آزمایشگاهی، که محدوده‌ی مطالعه شده برای آب شستگی بود، قرار داده شدند. ضخامت مواد بستر با توجه به بیشینه‌ی عمق آب شستگی، که براساس آزمایش‌های اولیه به دست آمده بود، 15 سانتی‌متر انتخاب گردید. جهت شبیه‌سازی بهتر بستر ته نشستی نهر، بالادست و پایین دست بازه مورد مطالعه به ترتیب به طول 2 و 1 متر به عنوان صافی استفاده گردید. نمودار دانه بندی ته‌نشست‌های استفاده شده در این آزمایش‌ها نیز در شکل (۵) عرضه گردیده است.

پایه‌ی پل بررسی شده در این تحقیق از تک پایه‌ای با مقطع دایره‌ای و قطر 5 سانتی‌متر بوده است. مقیاس‌ها طوری انتخاب شده‌اند که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که دیواره‌ها بر روی آب شستگی تاثیری نداشته باشند. بر اساس نظر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اگر نسبت عرض نهر پایه دار به عرض پایه از $6/25$ بیشتر باشد، دیواره‌های نهر پایه دار تاثیری بر مقدار آب شستگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه‌ی پل بررسی شده در نهر پایه دار آزمایشگاهی برابر با 10 بود. آستانه‌ی تخت بررسی شده شامل صفحه شیشه‌ای به طول 25 سانتی‌متر و ضخامت 10 میلی‌متر و آستانه‌ی اریب شامل دو صفحه به طول $25/5$ سانتی‌متر به صورت مورب با زاویه $11/3$ نسبت به جداره نهر به هم متصل بودند. آستانه‌ها در فواصل 5 و $2/5$ سانتی‌متری و چسبیده به پایه بررسی گردیده‌اند. شکل (۴) نمایی از استقرار آستانه را در فواصل مختلف نشان می‌دهد.

یکی از عوامل موثر بر عمق آب شستگی اندازه‌ی ذره-ی ته نشست است. برای حذف اثر اندازه‌ی ته نشست بر



۵- نمودار دانه بندی ته نشست های استفاده شده در این آزمایش

روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه‌ی حرکت برای قطر ته نشست‌های استفاده شده مشخص گردد، بنابراین، برای شرایط مختلف عمق و بده، وضعیت آستانه‌ی حرکت بررسی شد. مقایسه‌ی نتایج با نمودار شیلدز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داد. در هر آزمایش، ابتدا با تعیین بده جریان برای سرعت و عمق پیش بینی شده، آب به تدریج و به آرامی وارد نهر شده و بعد از تنظیم بده، عمق ذکر شده با تغییر ارتفاع دریچه‌ی انتهایی تنظیم گردید. پدیده‌ی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل فرآیندی زمان بر بوده، تعیین زمان تعادل در مطالعات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. محققین معیارهای مختلفی را جهت تعیین زمان تعادل پیشنهاد کرده‌اند. ملویل و چیو (۱۹۹۹) اشاره نمودند که زمان تعادل زمانی است که میزان آب شستگی در طی دوره‌ی زمانی ۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد باشد رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، زمان تعادل را مدت زمانی معرفی نمودند که در سه ساعت متوالی بیش از یک‌میلی متر آب شستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش از معیار رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) جهت تعیین زمان تعادل استفاده

شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت ۱۲ ساعت صورت گرفت و تغییرات عمق آب شستگی با استفاده از عمق سنج با دقت ۱ میلی متر اندازه‌گیری شد (شکل ۶). با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آب شستگی‌های اندازه‌گیری شده با سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، زمان تعادل ۳۶۰ دقیقه، که معادل ۶ ساعت بود حاصل گردید. در جدول (۱) دامنه‌ی فراسنجهای آزمایشگاهی برای مطالعه تاثیر آستانه بر کاهش آبشستگی آمده‌اند. در مجموع، به منظور بررسی تاثیر شکل هندسی آستانه، شرایط هیدرولیکی و فاصله‌های مختلف قرارگیری آستانه اطراف پایه‌ی پل ۲۰ آزمایش انجام شده‌اند که دامنه‌ی فراسنجهای بررسی گردیده در جدول (۱) ارائه شده‌اند. تمام آزمایش‌ها در شرایط زیربحرانی انجام شده‌اند. از مجموع ۲۰ آزمایش انجام شده، ۴ آزمایش برای حالت شاهد با بده‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر ثانیه انجام شده است. همچنین، ۱۲ آزمایش بر روی آستانه‌ی اریب با بده‌های نامبرده تحت فواصل ۰، ۲/۵ و ۵ سانتیمتری انجام شده است. همچنین تعداد ۴ آزمایش بر روی آستانه‌ی تخت صورت گرفت است.

جدول ۱- دامنه‌ی فراسنجهای آزمایشگاهی مطالعه شده در این پژوهش

تعداد آزمایش‌ها	نوع آزمایش	بده Q(L/s)	عمق پایاب h(cm)	فاصله‌ی آستانه از پایه L(cm)	قطر پایه‌ی پل D(cm)	D ₅₀ (mm)
۴	شاهد	۵،۱۰،۱۵،۲۰	۴/۵-۶/۵-۸/۵-۱۱/۵	-	۵	۱
۴	آستانه‌ی تخت	۵،۱۰،۱۵،۲۰	۴/۵-۶/۵-۸/۵-۱۱/۵	۰	۵	۱
۴	آستانه‌ی اریب	۵،۱۰،۱۵،۲۰	۴/۵-۶/۵-۸/۵-۱۱/۵	۰	۵	۱
۴	آستانه‌ی اریب	۵،۱۰،۱۵،۲۰	۴/۵-۶/۵-۸/۵-۱۱/۵	۲/۵	۵	۱
۴	آستانه‌ی اریب	۵-۲۰	۴/۵-۶/۵-۸/۵-۱۱/۵	۵	۵	۱

نتایج و بحث

آستانه‌ی اریب زمانی است که راس آستانه چسبیده به پایه باشد، که در این حالت بیشترین کاهش در حجم و عمق به نسبت فواصل دیگر آستانه‌ی اریب و نسبت به آستانه‌ی تخت در همین فاصله مشاهده می‌شود. همچنین، کاهش عمق و حجم در حالت آستانه‌ی اریب چسبیده به پایه نسبت به آستانه‌ی تخت به ترتیب برابر با ۶ و ۲۳ درصد است.

علت این امر می‌تواند شکل هندسی آستانه در مهارکردن آبشستگی در اطراف پایه باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد، عامل اصلی فرسایش بستر در اطراف پایه، به ویژه در بالادست آن، گرداب نعل اسبی است. پس از برخورد جریان به پایه، جریان رو به پایینی شکل می‌گیرد، که در حین برخورد به بستر، ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلو پایه، این جریان وارد حفره گشته و بخشی از آب به سمت بالا دست بر می‌گردد، که در نهایت در برخورد با جریان اصلی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. در واقع، جریان رو به پایین کاملاً چرخیده و گردابه‌ها را ایجاد می‌کند که وجود صفحه‌های اریب آستانه، که شروع آن از بالا دست پایه است از پراکنندگی جریان جلوگیری کرده و از فعالیت گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌کاهد. در انتهای پایه آستانه به حالت مثلث گونه‌ای قرار گرفته است که علاوه بر اینکه باعث محافظت بیشتر پایه در برابر آبشستگی می‌شود، از آبشستگی کناره و قسمت پایینی پایه و گسترش و توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی به کناره‌ها جلوگیری می‌کند. در صورتی که در آستانه‌ی تخت، آستانه به صورت خطی قرار گرفته و کاملاً در پایین دست پایه قرار دارد، که در این صورت توانایی جلوگیری از پراکنندگی جریان را در بالادست پایه ندارد و برای جلوگیری از آبشستگی در کناره‌ها تا رسیدن به مکانی که آستانه ی تخت قرار دارد، مانعی وجود ندارد. شکل (۸) نشان دهنده‌ی نیمرخ عرضی بستر در بده‌های متفاوت و در حالت استقرار آستانه‌های اریب در فواصل متفاوت و آستانه‌ی تخت نسبت به حالت شاهد را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود حداکثر عمق آبشستگی در کناره‌های پایه ی پل رخ داده است، که حداکثر مقدار آبشستگی مربوط به حالت شاهد، و کمترین آبشستگی در کنار پایه در حالت کارگذاری آستانه‌ی اریب در $L=0$ است.

شکل (۹-الف) نشان دهنده‌ی تاثیر بده بر آستانه‌ی اریب بر حداکثر عمق آبشستگی است، همان طور که قبلاً

در این تحقیق نتایج حاصل از اندازه‌گیری حداکثر عمق آبشستگی در حالت شاهد (زمانی که هیچ سازه‌ای برای محافظت از پایه در برابر آبشستگی وجود ندارد) آستانه‌ی اریب در فاصله‌های متفاوت و آستانه‌ی تخت در حالت چسبیده به پایه در پایین دست برای شرایط متفاوت هیدرولیکی بررسی گردیدند، که در ادامه نتایج حاصل از آستانه‌ی اریب و آستانه‌ی تخت با حالت شاهد مقایسه کرده و میزان تاثیرگذاری هر یک از آستانه‌ها در کاهش میزان آبشستگی بررسی شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری حداکثر عمق آبشستگی در حالت‌های مختلف در شکل (۷) آورده شده اند.

بدیهی است که با افزایش بده در تمامی حالت‌ها حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه و پایین دست آن افزایش می‌یابد. در حالت کارگذاری آستانه‌ی تخت در فاصله‌ی چسبیده به پایه، حداکثر عمق و حجم آبشستگی نسبت به حالت شاهد به ترتیب ۱۱ و ۱۰ درصد کاهش یافته است، باید دانست که وجود آستانه مانع از چرخش آب داخل حفره در کناره‌های پایه می‌شود که باعث کاهش فعالیت گرداب نعل اسبی می‌گردد، همچنین آبشستگی تا زمانی ادامه می‌یابد که گرداب‌های برخاستگی توان حمل و بالا آوردن ذرات را تا ارتفاع آستانه داشته باشد، پس از آن، آستانه موجب کاهش قدرت و توان حمل ذرات به وسیله‌ی گرداب برخاستگی به پایین دست می‌شود و بدین طریق از فعالیت گرداب برخاستگی نیز می‌کاهد، بدین صورت، از حداکثر عمق و حجم آبشستگی در اطراف پایه کاسته می‌شود. آستانه‌ی اریب در فاصله‌های ۵، ۲/۵ و چسبیده به پایه بررسی شد. استفاده از این آستانه در فاصله ۵ سانتی متری باعث کاهش ۲۴ درصدی حجم آبشستگی و کاهش ۱۴ درصدی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه گردیده است.

آستانه در فاصله‌ی ۲/۵ سانتی متری نتیجه‌ی مطلوب تری را به نسبت دو آستانه‌ی قبلی نشان داده است. در این فاصله، کاهش حجم و حداکثر عمق آبشستگی به ترتیب ۲۵ و ۱۵ درصد است. در حالت قرارگیری آستانه‌ی اریب بدون فاصله از پایه، در واقع بهترین حالت استفاده از این آستانه، شاهد کاهش ۳۰ درصدی حجم آبشستگی و ۱۶ درصدی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل بودیم. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، بهترین حالت قرارگیری

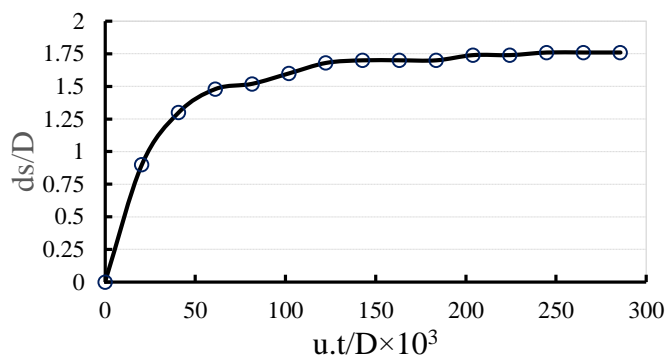
حفره‌ی آب شستگی در آستانه‌های اریب کمتر از حالت تخت و شاهد است؛ همچنین، در بین آستانه‌های اریب، هرچه فاصله نسبت به پایه کمتر می‌شود، این تاثیر بیشتر گردیده و گسترش حداکثر عرض حفره کاهش بیشتری می‌یابد، تا جایی که بهترین فاصله، آستانه‌ی اریب در فاصله‌ی چسبیده به پایه باشد.

شکل (۱۰) تغییرات پستی و بلندی بستر را در آستانه‌ی اریب در حالت چسبیده، حالت شاهد و آستانه‌ی تخت در بیشترین بده و تحت حداکثر مقدار آب‌شستگی نشان می‌دهد. جهت بررسی و تحلیل الگوهای ایجاد شده، داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار سورفر ترسیم شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالتی که هیچ‌گونه سازی حفاظتی برای جلوگیری از آب‌شستگی اطراف پایه پل وجود ندارد، حداکثر مقدار آب‌شستگی در اطراف پایه در این حالت صورت گرفته است.

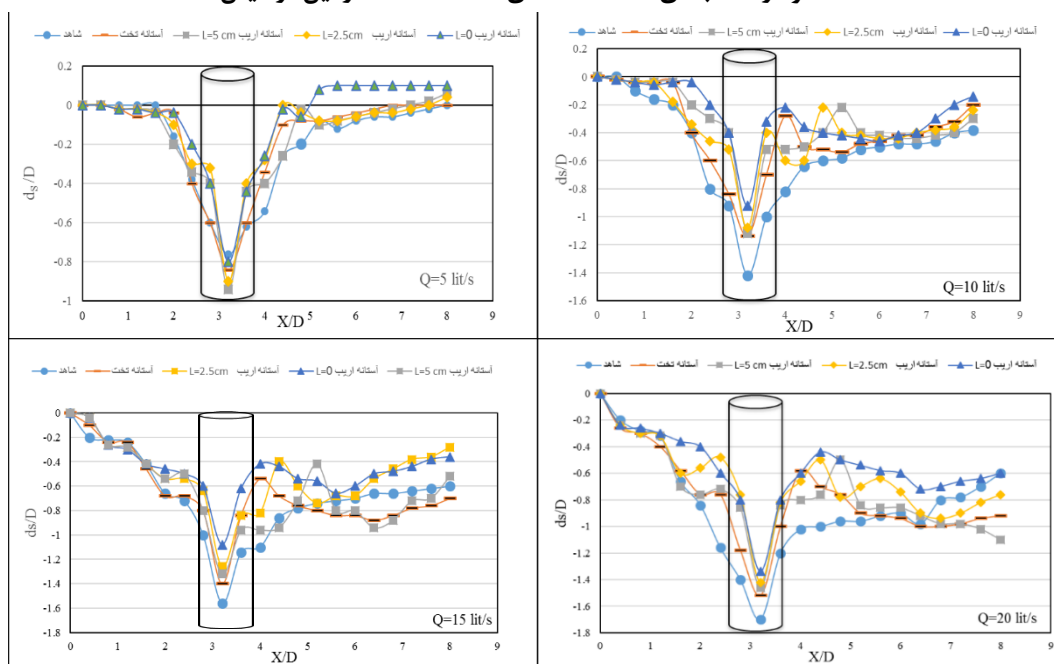
هم ذکر شد، با افزایش فاصله از پایه، تاثیر آستانه کمتر خواهد شد، و بهترین حالت قرار گیری آستانه زمانی است که چسبیده به پایه باشد.

شکل (۹-ب) نشان دهنده‌ی مقایسه فراسنجهای حفره‌ی آب‌شستگی در حالت‌های مختلف است. این نمودار نشان‌دهنده‌ی نسبت عرض حداکثر چاله‌ی آب‌شستگی نسبت به قطر پایه در عرض نهر است.

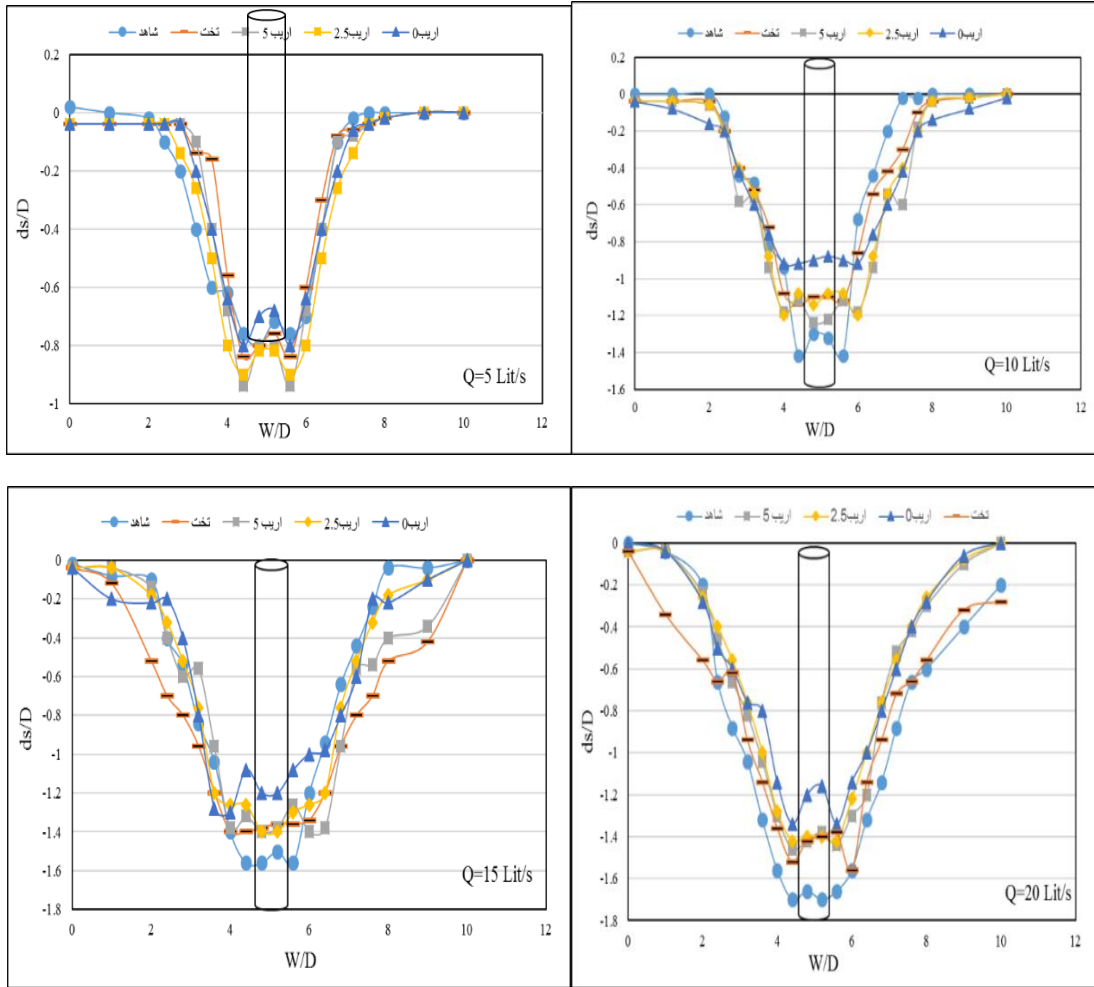
مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با استفاده از آستانه‌ی تخت در اطراف پایه و کناره‌ها توسعه‌ی حفره‌ی آب‌شستگی به طول آستانه‌ی تخت مستقر در نهر مشاهده شد، ولی در زمانی که از آستانه‌ی اریب استفاده گردید، علاوه بر کاهش حجم و عمق آب‌شستگی، به مقدار بیشتری در مقایسه با آستانه‌ی تخت از گسترش حفره و توسعه‌ی آن به کناره‌ها جلوگیری شد. همان‌طور که از شکل (۹-ب) مشخص است گسترش حداکثر عرض



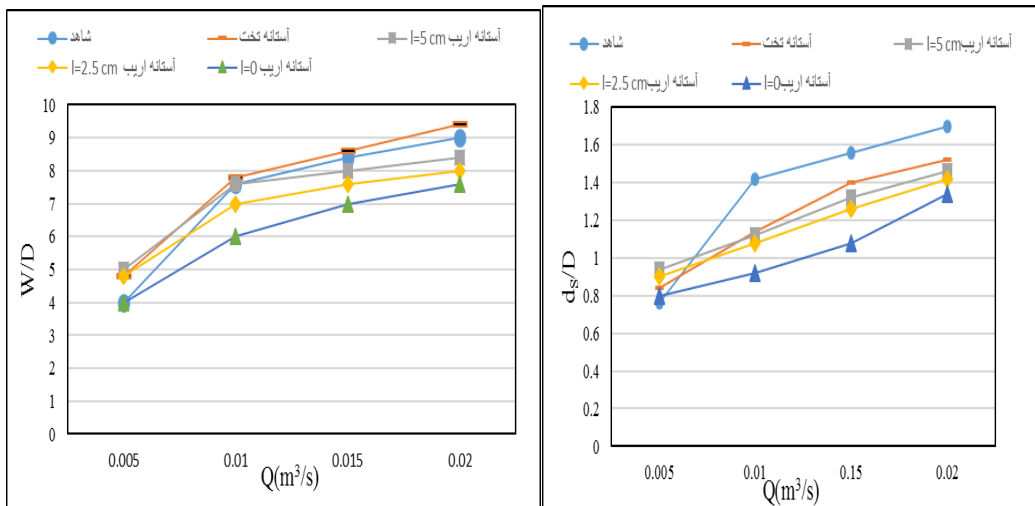
۵- نمودار دانه بندی ته نشست های استفاده شده در این آزمایش



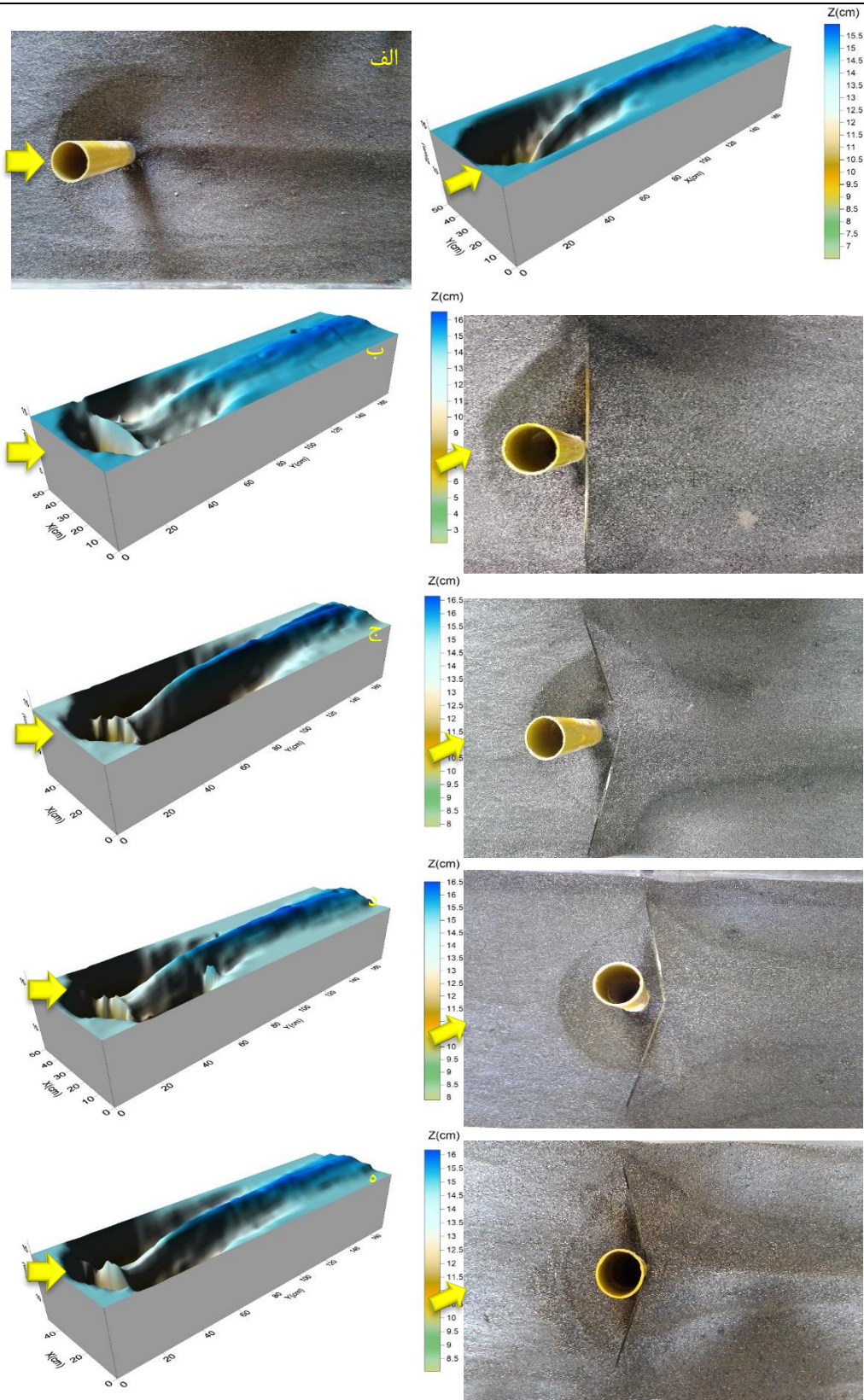
۷- نیمرخ نهایی آب‌شستگی تحت بده‌های متغیر در حالت شاهد و استقرار آستانه‌های مختلف.



۸- نیمرخ عرضی بستر تحت بدهای متغیر در حالت شاهد و استقرار آستانه‌های مختلف.



شکل ۹- الف) تاثیر بده بر حداکثر عمق آب شستگی ب) نسبت حداکثر عرض حفره به عرض نهر



۱۰- تغییرات پستی و بلندی بستر در حالت الف) شاهد ب) آستانه‌ی تخت (ج) آستانه‌ی اریب $L=5\text{ cm}$ (د) آستانه‌ی اریب $L=2.5\text{ cm}$ (ه) آستانه‌ی اریب $L=10\text{ cm}$.

نتیجه گیری

می کند، آستانه ی اریب در فاصله ی چسبیده به پایه ی پل است.

منابع:

- 1) Azevedo, M. L., Leite, F. C., and Lima, M.M.C.L. 2014. Experimental study of scour around circular and elongated bridge piers with and without pier slot. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 132(2): 154-161
- 2) Breusers, N. H. C., Nicollet, G. and Shen. H. W. 1977. Local scour around cylindrical piers. IAHR, Journal of Hydraulic Research, 15(3): 211-252.
- 3) Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(9): 260-269.
- 4) Chiew, Y. M. and Lim, S. Y. 2003. Protection of bridge piers using a sacrificial sill. Proc. ICE Water, Maritime and Energy 156(1): 53-62.
- 5) Etema, R. 1980. Scour at bridge piers. Report No.216, University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- 6) Grimaldi, C., R., Gaudio, F., Calomino Cardoso, A. H. 2009. Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. Journal of Hydraulic Engineering, 135(1): 13-21.
- 7) Heidarpour, M. Afzalimehr, H. and Khodarahmi, Z. 2007. Local scour protection of circular bridge pier groups using slot. Journal of Agriculture, Science and Natural Resource., 4(3).1-12. (In Persian)
- 8) Kumar, V., Ranga-Raju R. K. G. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125: 1302-1305.
- 9) Melville, B. W. and Sutherland, A. J. 1988. Design method for local scour at bridge piers. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 114(10): 1210-1226.
- 10) Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local Scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125 (1):59-65.

از میان روش هایی که برای مهار کردن و کاهش آب-شستگی در اطراف پایه های پل وجود دارد استفاده از آستانه کاربرد وسیع تری دارد. شکل و فاصله ی آستانه تاثیر زیادی در آب شستگی در اطراف پایه پل دارند، که در این پژوهش تاثیر شکل هندسی آستانه، فاصله ی آستانه از پایه-ی پل تحت شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی شد. نتایج، نشان می دهند که استفاده از آستانه ی اریب علاوه بر کاهش حجم و عمق آب شستگی نسبت به حالت شاهد، به ترتیب ۳۰ و ۱۶ درصد از توسعه ی حفره ی آب شستگی در بالادست جلوگیری می کند. مقدار کاهش حجم و عمق آب شستگی در آستانه ی تخت نسبت به حالت شاهد به ترتیب ۱۱ و ۱۰ درصد است. یکی از معایب استفاده از آستانه ی تخت توسعه ی حفره ی آب شستگی در بالادست می باشد ولی همان طور که ذکر گردید، آستانه ی اریب از توسعه ی حفره ی آب شستگی جلوگیری می کند. در این تحقیق بهترین نتایج مربوط به آستانه ی اریب در فاصله ی چسبیده به پایه ی پل است. آستانه ی اریب در مقایسه با آستانه ی تخت به میزان بیشتری حجم و حداکثر عمق آب شستگی را می اهد. این آستانه در مقایسه با آستانه ی تخت از توسعه ی حفره ی آب شستگی در بالادست جلوگیری می کند، در صورتی که در آستانه ی تخت حفره ی آب شستگی در جهت طول آستانه گسترش می یابد، علت این امر می تواند شکل هندسی آستانه در مهار کردن آب-شستگی در اطراف پایه باشد. آستانه ی اریب به علت شکل هندسی مورب، زمانی که اطراف پایه قرار می گیرد صفحه-های آستانه در امتداد پایه گسترش یافته و از آب شستگی کناره های پایه در فاصله ی نزدیک تر و در زمان زودتری جلوگیری کرده و ذرات را به پایین دست، جایی که پایه قرار گرفته است هدایت می کنند. در انتهای پایه، آستانه به حالت مثلث گونه ای قرار گرفته است که هم باعث محافظت بیشتر پایه در برابر آب شستگی می شود و هم از آب شستگی کناره-های پایه و قسمت پایینی آن و گسترش و توسعه ی حفره ی آب شستگی به کناره ها جلوگیری می کند. در حالتی که آستانه ی تخت، آستانه به صورت خطی قرار گرفته و برای جلوگیری از آب شستگی در کناره ها تا رسیدن به مکانی که آستانه ی تخت قرار دارد مانعی وجود ندارد. بهترین شکل آستانه، بهترین فاصله از پایه که تاثیر آستانه را بر حجم و حداکثر عمق آب شستگی در اطراف پایه بیشتر

- 11) Melville, B. W., Coleman, and S. E. 2000. Bridge scour. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.
- 12) Melville, B. W. and A. C. Hadfield. 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(11): 1221-1224
- 13) Pagliara, S., Carnacina, L., and Cigni, F. 2010. Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations. *Journal of Hydraulic Research*. 48(6): 764–774.
- 14) Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B.M. and El-Khour Y. 1996. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 122 (1):35-40.
- 15) Raudkivi, A. J., and Ettema, R. 1983. Clear water scour at cylindrical piers, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(3): 339-350
- 16) Saadati Pachekenari, S. S. Esmaeili Varaki, M. and Fazl Ola, R. 2014. Experimental Investigation of Effect of sill Location on Local Scour Around Inclined Bridge Piers Group. *Journal of Water and Soil*. 28(2): 406-419. (In Persian)
- 17) Zarrati, A. R., Nazariha, M., and Mashahir M. B. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2): 154-161