

کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف

منوچهر حیدرپور^۱، حسین افضل‌ی مهر^۱ و محسن نادری بنی^۲

چکیده

استفاده از شکاف در پایه پل‌ها یکی از روش‌های نوین در کنترل آب‌شستگی موضعی است. در این پژوهش، با به کارگیری ۲۰ مدل آزمایشگاهی، کنترل آب‌شستگی موضعی در یک پایه پل در شرایط آب زلال بررسی شد. مدل‌ها شامل یک پایه استوانه‌ای بدون شکاف و چهار پایه استوانه‌ای شکاف‌دار، سه پایه مستطیلی پیشانی گرد بدون شکاف و ۱۲ پایه مستطیلی شکاف‌دار هستند. طول شکاف‌ها برابر عرض (قطر) پایه و دو برابر آن انتخاب شده و در دو موقعیت نزدیک بستر و نزدیک سطح آب قرار دارند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای پایه استوانه‌ای، شکاف‌هایی با طولی معادل قطر پایه و دو برابر آن، در حالی که نزدیک سطح آب قرار گرفته باشند، تأثیری بر آب‌شستگی نهایی ندارند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که برای کلیه مدل‌هایی که در این پژوهش تحت شرایط معین آب زلال آزمایش شده‌اند، حداکثر کاهش آب‌شستگی، به وسیله شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض (قطر) پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. کارایی شکاف در کنترل آب‌شستگی موضعی نیز برای یک پایه مستطیلی پیشانی گرد بیشتر از یک پایه استوانه‌ای، برای حالتی که قطر پایه استوانه‌ای برابر عرض پایه مستطیلی پیشانی گرد است، می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی موضعی، پایه پل، شکاف در پایه پل

مقدمه

عنوان مثال، طی سی سال گذشته، یک هزار از مجموع پانصد هزار پل ساخته شده روی رودخانه‌های آمریکا تخریب شده، که شصت درصد آنها در اثر آب‌شستگی موضعی بوده است. در حالی که سهم زلزله در این تخریب‌ها تنها دو درصد است.

پل‌ها مهم‌ترین سازه‌های ارتباطی بوده و تخریب آنها بیشتر در اثر آب‌شستگی موضعی صورت می‌گیرد، که به وسیله میدان جریان موضعی در اطراف پایه‌های پل ایجاد می‌شود (۱۰). به

۱. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

آب‌شستگی متعادل به عمقی گفته می‌شود که تحت هر شرایطی از نظر زمانی به مقدار نهایی یا بیشینه خود رسیده باشد.

بالا بردن مقاومت مواد بستر در مقابل فرسایش و کاهش قدرت فرسایش، دو روشی هستند که برای کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی استفاده می‌شوند. بالا بردن مقاومت مواد بستر معمولاً با قرار دادن لایه سنگ‌چین به همراه فیلتر یا بدون آن در پیرامون پایه پل صورت می‌گیرد (۷). تورهای گابیون فلزی یا تورهای بافته شده از شاخه‌های درخت بید و پر کردن آنها با سنگ در اطراف پایه در بسیاری از پل‌ها استفاده شده، که از آن جمله می‌توان به پل‌های ساخته شده روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی اشاره کرد (۱۸). در روش کاهش قدرت فرسایش، برخی طراحان استفاده از یک صفحه گسترده با ضخامت کم در اطراف پایه و روی بستر را، که اصطلاحاً طوقه (Collar) گفته می‌شود، برای مقابله با جریان رو به پایین و تشکیل گرداب نعل اسبی توصیه می‌کنند. اخیراً بهره‌برداری از شکاف در پایه به منظور کاهش اثر جریان رو به پایین در آب‌شستگی موضعی پایه پل پیشنهاد شده است.

شیلدز (Shields) نخستین فردی بود که بررسی‌های بنیادی را در مورد حرکت آغازین یا شروع حرکت ذرات رسوب انجام داد (۲). دیاگرام شیلدز را که هندرسون (به نقل از ۱۷) اصلاح کرده، یکی از راه‌های مؤثر برای محاسبه شرایط آستانه حرکت در رسوب با دانه‌بندی یک‌نواخت است. چابرت و انگلدینگر (به نقل از ۶) یک برنامه وسیع اندازه‌گیری را روی مفاهیم مختلف آب‌شستگی موضعی اطراف پایه انجام دادند. هانگ (به نقل از ۶) توزیع فشار و سرعت نزدیک یک پایه سیلندری در کانال باز را تشریح کرد. بیکر (۵) با انجام کار تحلیلی که گرداب نعل اسبی آرام و آشفته را تشریح کرده بود، سعی کرد که رابطه‌ای میان عمق آب‌شستگی متعادل و پارامترهای جریان در شرایط آب زلال ارائه دهد. جین و فیشر (۱۲) با توجه به آنالیز ابعادی، رابطه‌ای را برای عمق آب‌شستگی در سرعت‌های زیاد ارائه دادند. جین (۱۱) با مرور بررسی‌های انجام شده، رابطه‌ای را برای عمق آب‌شستگی بیان کرد. ملویل (۱۵) و

میانگین خسارت تخریب پل‌ها که بر اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا تحمیل می‌شود، سالیانه در حدود پنجاه میلیون دلار است (۸). در کشور ما به دلیل عدم درک صحیح از هیدرولیک جریان اطراف پایه و رعایت نکردن ملاحظات فنی در طراحی و اجرای پل‌ها، هر ساله ده‌ها دهانه پل تخریب می‌شود، که دلیل عمده آن آب‌شستگی موضعی است. این امر، علاوه بر تحمیل خسارات فراوان، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل و غیره شده است. بنابراین، شناخت این پدیده، پیش‌بینی میزان آن، و لحاظ کردن آن در طراحی پل‌ها، و مهم‌تر از همه به کار بردن تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی بسیار ضروری است. آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه به دو صورت آب‌شستگی بستر زنده (Live-bed scour) و آب‌شستگی آب زلال (Clear-water scour) انجام می‌پذیرد. در آب‌شستگی بستر زنده، سرعت میانگین جریان (U) در بازه بالادست پل بیش از سرعت آستانه حرکت ذرات (Velocity of movement threshold) بستر (U_c) است، که در آن، علاوه بر آب‌شستگی موضعی اطراف پایه، بستر بالادست نیز فرسایش کلی یافته، ذرات بستر به داخل حفره آب‌شستگی وارد شده و باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود (۱۹). در آب‌شستگی آب زلال، سرعت میانگین جریان کمتر از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر است، و در بالادست پایه، هیچ‌گونه فرسایشی وجود ندارد و تنها در موضع اطراف پایه، حفره آب‌شستگی ایجاد می‌شود که البته این در صورتی است که هیچ نوع فرم بستری در سطح بستر تشکیل نشود.

عمق آب‌شستگی موضعی معمولاً به دو صورت عمق آب‌شستگی متعادل و عمق آب‌شستگی بیشینه (حداکثر) بیان می‌شود. عمق آب‌شستگی بیشینه در شرایط آب زلال در حالتی به وجود می‌آید که سرعت برشی (U^*) و یا سرعت میانگین جریان (U) در بالادست پایه پل برابر و یا نزدیک به مقادیر سرعت برشی بحرانی و یا سرعت بحرانی باشد، و تحت این شرایط میزان آب‌شستگی از نظر زمانی به تعادل رسیده و یا نهایی شده و به مقدار بیشینه خود می‌رسد. ولی عمق

آب‌شستگی (d_s) برحسب زمان به صورت تابعی نمایی پیشنهاد شده است:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{U_c}{U} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad [3]$$

برابر این رابطه، با دانستن زمان تعادل t_e (زمانی که در آن عمق آب‌شستگی به مقدار متعادل خود می‌رسد) و بیشینه عمق آب‌شستگی، عمق آب‌شستگی در هر زمان t محاسبه می‌شود. برای محاسبه زمان تعادل روابط زیر ارائه شده است:

$$t_e \text{ (days)} = \begin{cases} 30.89 \frac{b}{U} \left(\frac{U}{U_c} \right) \left(\frac{y}{b} \right)^{0.25} & \frac{y}{b} \leq 6 \\ 48.26 \frac{b}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0.4 \right) & \frac{y}{b} > 6 \end{cases} \quad [4]$$

و برای محاسبه بیشینه عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{d_{se}}{y} = k_3 \left(\frac{y}{b} \right)^{-0.65} \left(\frac{U}{\sqrt{gy}} \right)^{0.43} \quad [5]$$

که در آن k_3 تقریباً برابر ۱/۲ است.

نظری‌ها (۳) برخی روابط تجربی ارائه شده برای پیش‌بینی تغییرات زمانی آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌ها را در شرایط آب زلال و برای تک‌پایه‌های استوانه‌ای بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان داد که رابطه نظری‌الاسلام و همکاران (به نقل از ۳) با دقت بهتری می‌تواند تغییرات زمانی آب‌شستگی را در پایه‌ها تخمین بزند. این رابطه به شکل زیر است:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left[\sin \left(\frac{\pi t}{2T} \right) \right]^m \quad [6]$$

که در آن T مدت زمان انجام آزمایش است و m از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m = 0.35 \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{0.87} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.25} \quad [7]$$

تلاش‌های زیادی در زمینه کاربرد روش‌هایی برای کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌ها به وسیله پژوهندگان انجام یافته

ملویل و سادرلند (۱۷) روابطی را برای محاسبه سرعت برشی آستانه حرکت (U_*c) با توجه به اندازه d_{50} (قطر ذره‌ای که ۵۰٪ ذرات از نظر وزنی از آن کمتر باشند) ارائه کردند. متغیرهای اصلی، سرعت، قطر پایه، عمق جریان و اندازه ذرات رسوب بودند. مزامیل (به نقل از ۱۳) با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی، قدرت و ابعاد گرداب نعل اسبی را تعیین کرد. دانشگاه ایالتی کلرادو رابطه‌هایی برای محاسبه بیشینه عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده ارائه کرد (۲۰). ملویل و چو (۱۶) رابطه کاملی از پیشرفت زمانی عمق آب‌شستگی برای پایه‌های استوانه‌ای ارائه کردند. از آن جا که رابطه ملویل و چو (۱۶) به منظور مقایسه با نتایج پژوهش حاضر استفاده می‌شود، در این جا به طور کامل بیان می‌گردد. در این روش برای تعیین زمان تعادل و بیشینه عمق آب‌شستگی از روابط زیر استفاده شد.

$$d_{se} = k_{yb} k_i k_d \quad [1]$$

که d_{se} ، k_{yb} ، k_i و k_d به ترتیب بیشینه عمق آب‌شستگی، ضریب عمق جریان و قطر پایه، ضریب شدت جریان و ضریب اندازه ذرات با تعاریف زیر هستند:

$$k_{yb} = \begin{cases} 2.4b & \frac{b}{y} \leq 0.7 \\ 2(yb)^{0.5} & 0.7 < \frac{b}{y} \leq 5 \\ 4.5y & \frac{b}{y} > 5 \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 0.27 \log(2.24 \frac{b}{d_{50}}) & \frac{b}{d_{50}} < 25 \\ 1 & \frac{b}{d_{50}} \geq 25 \end{cases}$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{U}{U_c} & \frac{U}{U_c} \leq 1 \\ 1 & \frac{U}{U_c} > 1 \end{cases} \quad [2]$$

در رابطه فوق، b قطر پایه، y عمق جریان، d قطر میانگین ذرات رسوب، U سرعت میانگین جریان و U_c سرعت جریان در آستانه حرکت ذرات رسوب هستند. تغییرات عمق

مطالعه‌ای در مورد تأثیر شکاف در پایه مستطیلی پیشانی گرد آب‌شستگی موضعی کرد. آزمایش وی در شرایط آب زلال انجام شد. زراتی و عزیزی (۱) با استفاده از طوقه با پهنای برابر با عرض پایه روی پایه‌های مستطیلی پیشانی گرد در ترازهای مختلف، آزمایش‌هایی انجام دادند و نتیجه گرفتند که نصب چنین طوقه‌ای در تراز بستر می‌تواند تا ۸۰ درصد عمق آب‌شستگی را کاهش دهد. کومار و همکاران (۱۴) کاهش آب‌شستگی موضعی را با استفاده از طوقه در شرایط آب زلال بررسی کرده و رابطه‌ای برای آن ارائه دادند.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه بررسی‌های آزمایشگاهی این پژوهش در کانالی به طول ۷ متر، عرض ۰/۳۲ متر و ارتفاع ۰/۳۶ متر صورت گرفته است. دیواره و کف کانال از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. کف کانال بجز در یک محدوده یک متری بالادست، وسط و انتهای کانال به وسیله سکوه‌های فلزی بالا آورده شد. محدوده یک متری ابتدای کانال، نقش حوضچه آرامش را برای جریان خروجی از لوله انتقال آب داشت، و محدوده یک متری در انتهای کانال برای جمع آوری رسوب فرسایش یافته در نظر گرفته شد. منطقه انجام آزمایش‌ها، شامل محدوده یک متری وسط کانال بود. مدل پایه در فاصله ۴۰ سانتی‌متر از بالادست و ۶۰ سانتی‌متر از پایین دست این محدوده کار گذاشته شد. منطقه انجام آزمایش به وسیله مصالح غیر چسبنده ماسه‌ای با d_{50} برابر ۰/۶۱ میلی‌متر، انحراف معیار هندسی برابر ۱/۲۳ و چگالی نسبی برابر با ۲/۶۵ پر شد. به منظور هماهنگ کردن ضریب زبری در محدوده آزمایش و بالادست و پایین دست آن، سطح سکوه‌های فلزی با مصالح استفاده شده در منطقه انجام آزمایش پوشانده شد. این کانال به وسیله پمپی با حداکثر دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شد. تنظیم دبی خروجی از موتور پمپ به وسیله شیر تنظیم تعبیه شده قبل از دهانه ورودی به مخزن بالادست، صورت می‌گرفت. آب در سیکل بسته از منبع اصلی به مخزن کوچک ابتدای کانال پمپاژ شده، و در آن جا با عبور از یک آرام کننده وارد کانال می‌شد.

است. درگاهی (۹) با استفاده از طوقه سعی در کاهش آب‌شستگی موضعی کرد. آزمایش وی در شرایط آب زلال انجام شد. زراتی و عزیزی (۱) با استفاده از طوقه با پهنای برابر با عرض پایه روی پایه‌های مستطیلی پیشانی گرد در ترازهای مختلف، آزمایش‌هایی انجام دادند و نتیجه گرفتند که نصب چنین طوقه‌ای در تراز بستر می‌تواند تا ۸۰ درصد عمق آب‌شستگی را کاهش دهد. کومار و همکاران (۱۴) کاهش آب‌شستگی موضعی را با استفاده از طوقه در شرایط آب زلال بررسی کرده و رابطه‌ای برای آن ارائه دادند.

پیشنهاد استفاده از شکاف در پایه را نخستین بار چپو (۷) به عنوان یکی از راه‌های پیش‌گیری و کنترل آب‌شستگی موضعی مطرح کرد. کومار و همکاران (۱۴) با انجام آزمایش‌هایی، تأثیر شکاف بر کاهش آب‌شستگی را بررسی کردند. آنها از شکاف‌هایی با عرض‌های برابر یک چهارم و نصف قطر پایه و با ارتفاع بین ۰/۲ تا ۱/۸ برابر عمق آب بهره بردند، به طوری که قسمت بالایی شکاف نزدیک سطح آب بود و قسمت پایینی آن در موقعیت‌های مختلف قرار داشت. با استفاده از نتایج این پژوهش، نسبت عمق آب‌شستگی در پایه شکاف‌دار به مقدار آن در پایه بدون شکاف به صورت تابعی از "عرض شکاف به قطر پایه" و "ارتفاع شکاف به عمق جریان" بیان شد. بابر و همکاران (۴) با استفاده از شکاف‌های مستطیلی مختلف روی پایه‌های استوانه‌ای به قطر هشت سانتی‌متر واقع در دو کانال آزمایشگاهی مجزا، آزمایش‌هایی را به منظور بررسی اثر این شکاف‌ها در کاهش آب‌شستگی انجام دادند. آنها نسبت عمق آب‌شستگی در پایه شکاف‌دار به مقدار آن در پایه بدون شکاف را به صورت تابعی از "عرض شکاف به قطر پایه" و "ارتفاع شکاف به عمق جریان" بیان کردند.

استفاده از شکاف برای کنترل آب‌شستگی سابقه چندانی ندارد. با توجه به این که پژوهش‌های کمی در این زمینه صورت گرفته است، انجام پژوهش‌های بیشتر و گسترده‌تر را می‌طلبند. هر چند پژوهش‌هایی در زمینه کارایی شکاف در پایه‌های استوانه‌ای (Circular pier) صورت گرفته است، ولی تاکنون

برابر با عرض پایه) نزدیک بستر، شکاف بزرگ نزدیک سطح آب و شکاف کوچک نزدیک سطح آب. شکل ۳ موقعیت و ابعاد شکاف‌ها را در مدل‌های شکاف‌دار نشان می‌دهد.

انتخاب پارامترها و ابعاد مدل

عرض پایه: برای پرهیز از اثر جریان جانبی به وسیله دیواره‌ها روی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه، رودکیوی و اتما (۲۰) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض کانال را ۱:۶/۲۵ بیان کرده‌اند. در این پژوهش، برای اطمینان بیشتر، این نسبت ۱:۱۰ در نظر گرفته شد. بنابراین، عرض (قطر) پایه (b)، در کلیه حالات ۳۲ میلی‌متر انتخاب شد.

اندازه و یک‌نواختی ذرات: برای جلوگیری از ایجاد پدیده ریبیل (Ripple)، میانگین اندازه ذرات باید از ۰/۶ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد ($d_{50} > 0.6 \text{ mm}$) (۲۰). ضمناً برای حذف تأثیر اندازه ذرات بر عمق آب‌شستگی موضعی، نسبت قطر پایه به میانگین اندازه ذرات باید بیشتر از ۵۰ باشد (۱۹). به این ترتیب اندازه میانگین ذرات رسوب استفاده شده باید در شرایط زیر صادق باشد:

$$\begin{cases} \frac{b}{d_{50}} > 50 \\ d_{50} > 0.6 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d_{50} < \frac{b}{50} = \frac{32 \text{ mm}}{50} = 0.64 \text{ mm} \\ d_{50} > 0.6 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\Rightarrow 0.6 \text{ mm} < d_{50} < 0.64 \text{ mm} \quad [8]$$

هم‌چنین، برای حذف اثر غیر یک‌نواختی ذرات بر آب‌شستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات (σ_g) کوچک‌تر از ۱/۳ باشد (۲۰). در این پژوهش، از ماسه ریخته‌گری گرد گوشه با دانه‌بندی یک‌نواخت و چگالی نسبی $G_s = 2.65$ ، $d_{50} = 0.61 \text{ mm}$ و $\sigma_g = 1.23$ استفاده شد، که خصوصیات آن در معیارهای بیان شده صدق می‌کند.

ضخامت مصالح بستر: با توجه به بیشینه عمق آب‌شستگی برابر ۲/۴b، یعنی ۷/۷ سانتی‌متر، و با احتساب ۳۰ درصد افزایش احتمالی آن، ضخامت مصالح بستر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد (۱۶).

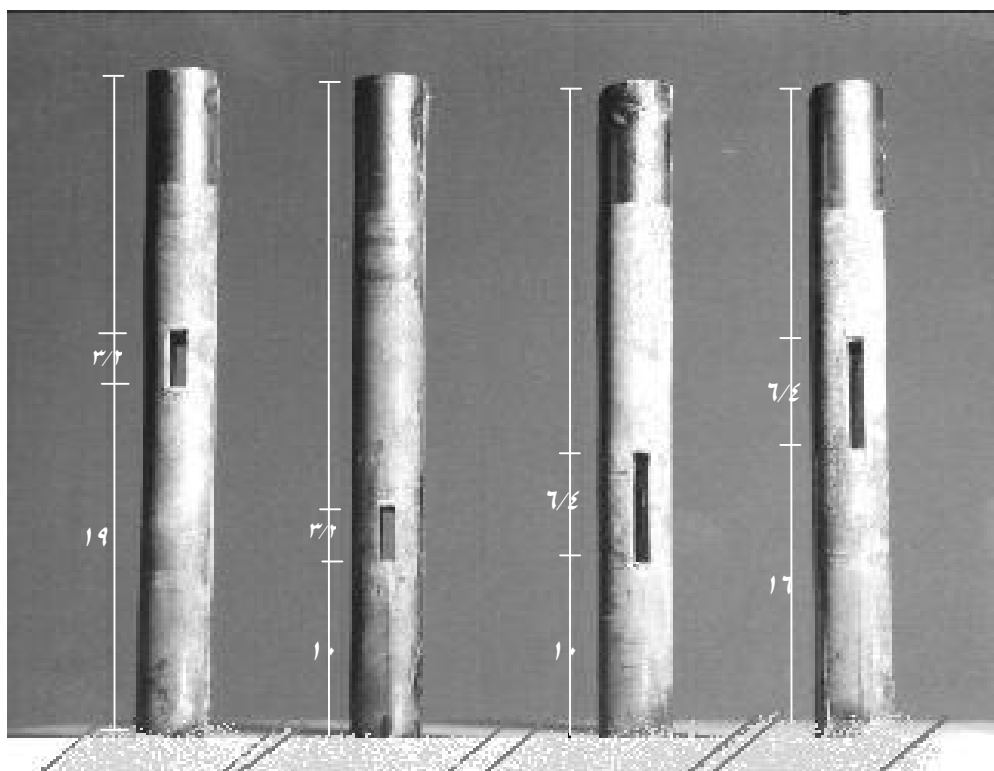
عمق و سرعت جریان: با توجه به این که آب‌شستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی می‌شود باید $U \leq U_c$ باشد. بر اساس

آب پس از عبور از کانال، به یک مخزن اندازه‌گیری دبی وارد می‌شد که در آن ارتفاع آب به کمک پیزومتر نصب شده مشخص، و دبی به روش حجم-زمان اندازه‌گیری می‌گردید. برای اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی و عمق جریان از یک عمق‌سنج با دقت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. عمق‌سنج روی ریلی در جهت عرضی و طولی کانال حرکت می‌کرد. شکل ۱ نمایی از کانال استفاده شده در آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های مدل‌های آزمایشگاهی

مدل‌های استفاده شده شامل یک مدل پایه استوانه‌ای بدون شکاف، سه مدل مستطیلی پیشانی گرد بدون شکاف (با ابعاد مختلف)، چهار مدل استوانه‌ای شکاف‌دار و ۱۲ مدل مستطیلی پیشانی گرد شکاف‌دار (با موقعیت‌ها و ابعاد مختلف شکاف) بود. مدل استوانه‌ای بدون شکاف از لوله فولادی به قطر ۳/۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر ساخته شد. مدل‌های مستطیلی پیشانی گرد دارای طول (در جهت جریان) برابر ۶ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۲ سانتی‌متر بودند و عرض پایه‌ها (عمود بر جریان) برابر قطر پایه استوانه‌ای، یعنی ۳/۲ سانتی‌متر اختیار شد. شکل ۲ مدل‌های پایه بدون شکاف را نشان می‌دهد.

با توجه به این که بررسی اندازه و نیز موقعیت شکاف در پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی پیشانی گرد مورد نظر بود، دو نوع شکاف مستطیلی شکل با ارتفاع‌های برابر عرض پایه (۳/۲ سانتی‌متر) و دو برابر عرض پایه (۶/۴ سانتی‌متر) و عرض برابر با ۰/۲۵ عرض پایه (۰/۸ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. این دو نوع شکاف در هر پایه در دو موقعیت نزدیک بستر و نزدیک سطح آب بررسی شد. شکاف‌ها به گونه‌ای قرار گرفته بودند که هیچ نوع انحرافی از راستای جهت جریان و نیز از امتداد طولی پایه‌ها نداشتند. به این ترتیب، به ازای هر مدل بدون شکاف چهار مدل شکاف‌دار ساخته شد که چهار نوع شکاف به کار رفته در آنها عبارت بود از: شکاف بزرگ (ارتفاع شکاف دو برابر عرض پایه) نزدیک بستر، شکاف کوچک (ارتفاع شکاف



شکل ۳. موقعیت و ابعاد شکاف‌ها در مدل‌های شکاف‌دار (ابعاد به سانتی‌متر)

مدت زمان انجام آزمایش: مدت زمان انجام آزمایش‌ها برابر معیار کومار و همکاران (۱۴) انتخاب شد، که عبارت است از مدت زمانی از آغاز آزمایش که پس از آن تغییرات عمق آب‌شستگی در یک دوره سه ساعته بیشتر از یک میلی‌متر نباشد. این زمان به عنوان زمان تعادل، و عمق آب‌شستگی اتفاق افتاده در آن به عنوان عمق آب‌شستگی متعادل فرض شده است. زمان تعادل، t_e و عمق آب‌شستگی متعادل، d_{se} ، در هر یک از مدل‌های شکاف‌دار و بدون شکاف در جدول ۱ آمده است.

تمامی مدل‌های آزمایش شده در شرایط یکسان جریان بررسی شدند. عمق‌های آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها در قسمتی که بیشترین عمق آب‌شستگی اتفاق افتاده، اندازه‌گیری شده است. این محل در دقایق آغازین آب‌شستگی در کناره پایه‌ها، و پس از آن در جلوی پایه‌ها و با فاصله چند میلی‌متری از پایه بوده است.

$$U_c = 5.75 U_{*c} \log\left(5.53 \frac{y_o}{d_{50}}\right) = 0.309 \text{ m/s} \quad [9]$$

$$\frac{U}{U_c} = 0.93$$

این مقدار نزدیک به معیار ۰/۹۵ است. تخمین عمق جریان در شرایط بحرانی با کاهش تدریجی عمق جریان به وسیله دریچه انجام شد، و در عمق حدود ۱۱/۸ سانتی‌متر آب‌شستگی بستر زنده مشاهده شد. بنابراین، حداکثر سرعت متناسب با حداقل عمق ۱۲ سانتی‌متر انتخاب شد.

بنا بر نظریه دتیز (به نقل از ۶)، میزان عمق آب‌شستگی با نسبت y_o/b افزایش می‌یابد، ولی برای $y_o/b > (1-3)$ ثابت است. بیشتر پژوهندگان دیگر نیز به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی $y_o/b > (1-3)$ باشد، عمق جریان بر عمق آب‌شستگی بی‌اثر است (۲۰). با توجه به این که در پژوهش حاضر این نسبت ۳/۷۵ است، عمق جریان هیچ تأثیری بر عمق آب‌شستگی نداشته است.

جدول ۱. زمان تعادل و عمق آب‌شستگی متعادل در انواع مدل‌های شکاف‌دار و بدون شکاف

| مستطیلی ۳×۱۲ | | مستطیلی ۳×۹ | | مستطیلی ۳×۶ | | استوانه‌ای | | انواع مدل پایه |
|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|----------------|
| d_{se} (mm) | t_e (min) | d_{se} (mm) | t_e (min) | d_{se} (mm) | t_e (min) | d_{se} (mm) | t_e (min) | |
| ۵/۸ | ۷۸۰ | ۵/۸۵ | ۴۲۰ | ۵/۹ | ۴۸۰ | ۷ | ۱۰۸۰ | شکاف بزرگ بالا |
| ۶/۳ | ۷۸۰ | ۵/۷ | ۴۲۰ | ۶/۰۵ | ۴۸۰ | ۷ | ۱۰۸۰ | شکاف کوچک بالا |
| ۵/۶ | ۷۸۰ | ۵/۲۵ | ۴۲۰ | ۵/۳ | ۴۸۰ | ۶/۳ | ۱۰۸۰ | شکاف بزرگ بستر |
| ۵/۶ | ۷۸۰ | ۵/۶ | ۴۲۰ | ۵/۷ | ۴۸۰ | ۶/۷ | ۱۰۸۰ | شکاف کوچک بستر |
| ۶/۳ | ۷۸۰ | ۶/۱۰ | ۴۲۰ | ۶/۵ | ۴۸۰ | ۷ | ۱۰۸۰ | بدون شکاف |

نتایج و بحث

تغییرات زمانی آب‌شستگی

۱. پایه استوانه‌ای

شکل ۴ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در پایه استوانه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، منحنی شکاف بزرگ بستر با فاصله نسبتاً زیادی از منحنی‌های دیگر قرار دارد. در این شکل، نتایج به دست آمده از بررسی‌های ملویل و چپو (۱۶) به منظور مقایسه آورده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که منحنی ملویل و چپو با منحنی پایه بدون شکاف تقریباً بر هم منطبق‌اند. در این حالت شکاف‌های کوچک بستر، کوچک بالای بستر و بزرگ بالای بستر تأثیر بسیار کمی در عمق آب‌شستگی داشته، و منحنی‌های این شکاف‌ها با منحنی پایه بدون شکاف بسیار نزدیک هم هستند. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، بیشینه عمق آب‌شستگی در پایه بدون شکاف، و برابر ۱/۹۸b است.

۲. پایه مستطیلی ۳×۶

شکل ۵ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در اطراف پایه مستطیلی ۳×۶ نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل دیده می‌شود، شکاف بزرگ بستر، عملکرد خوبی در کاهش عمق آب‌شستگی دارد، و روند این کاهش با گذشت زمان پیشرفت دارد. شکاف‌های کوچک نزدیک بستر، بزرگ بالا و کوچک بالا نیز در رده‌های بعدی کاهش قرار دارند. مثلاً در زمان $t=0/5t_e$

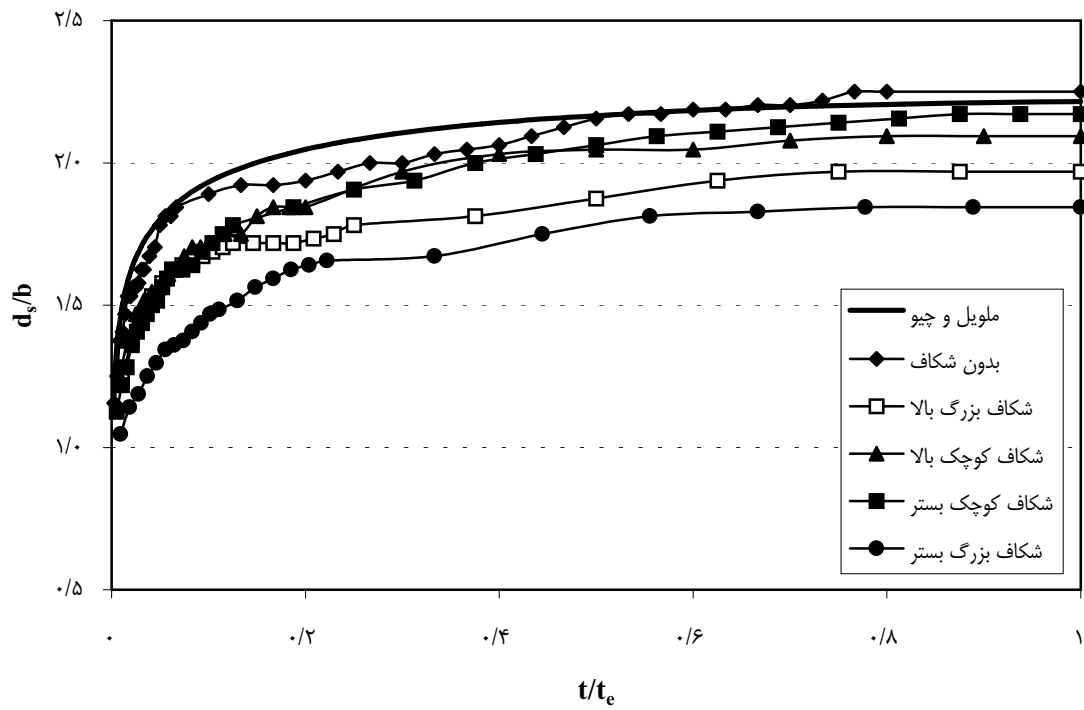
عمق آب‌شستگی برای شکاف بزرگ نزدیک بستر برابر ۱/۶۰b، و برای شکاف کوچک نزدیک بستر، شکاف بزرگ بالا و شکاف کوچک بالا و بدون شکاف به ترتیب ۱/۷۰b، ۱/۷۵b و ۱/۸۰b است.

۳. پایه مستطیلی ۳×۹

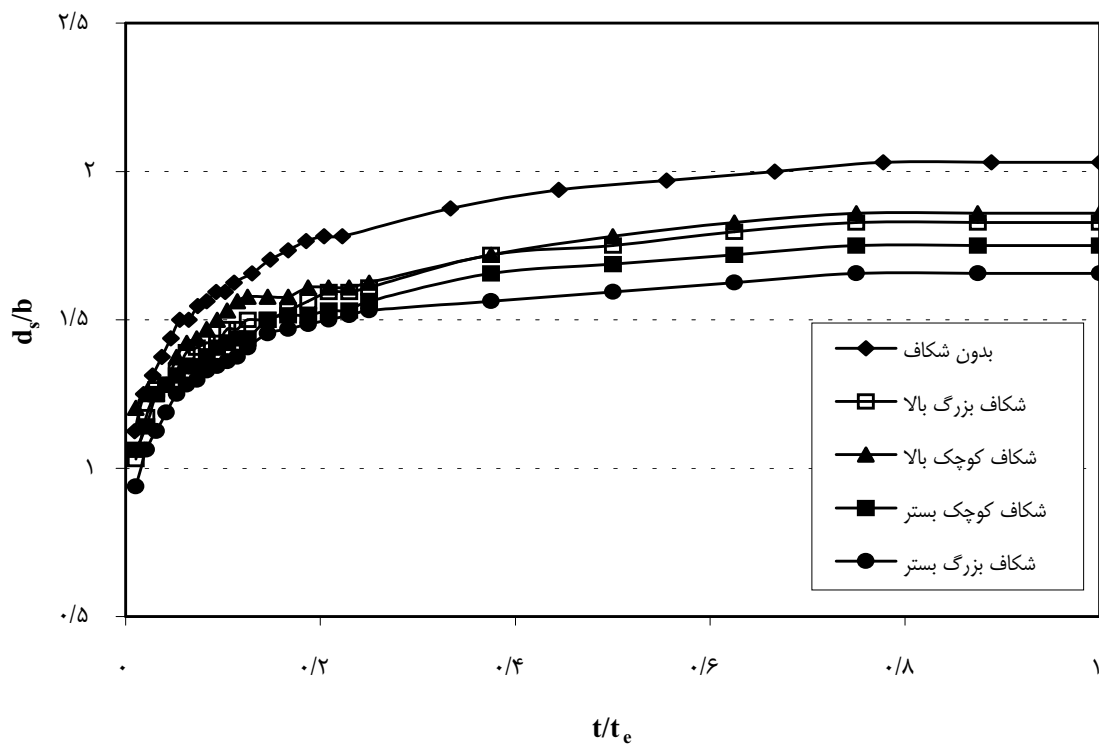
شکل ۶ تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی را نسبت به زمان برای پایه مستطیلی ۳×۹ نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی مربوط به پایه بدون شکاف است، و از منحنی‌های پایه‌های شکاف‌دار فاصله دارد. پس از آن، منحنی‌های شکاف بزرگ بالای بستر و شکاف کوچک بالای بستر است که تقریباً برهم منطبق‌اند، و سپس منحنی شکاف کوچک نزدیک بستر قرار دارد. مطابق پایه استوانه‌ای و پایه مستطیلی ۳×۶، شکاف بزرگ نزدیک بستر بیشترین کاهش آب‌شستگی را نشان می‌دهد، و منحنی مربوط به آن از منحنی‌های دیگر فاصله خوبی دارد. بیشینه عمق آب‌شستگی مربوط به پایه بدون شکاف، و برابر ۱/۹۵b است، و حداقل آن مربوط به پایه‌ای است که در آن شکاف بزرگ بستر وجود دارد، و برابر با ۱/۶b است.

۴. پایه مستطیلی ۳×۱۲

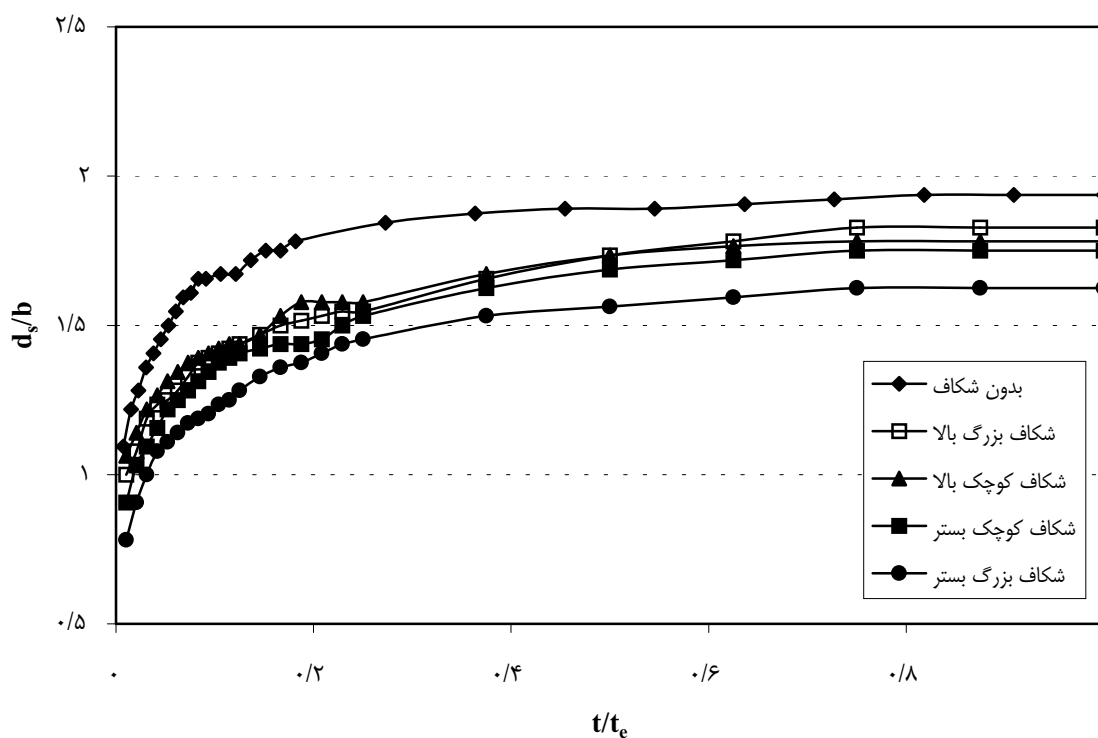
شکل ۷ تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی را نسبت به زمان برای پایه مستطیلی ۳×۱۲ نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل



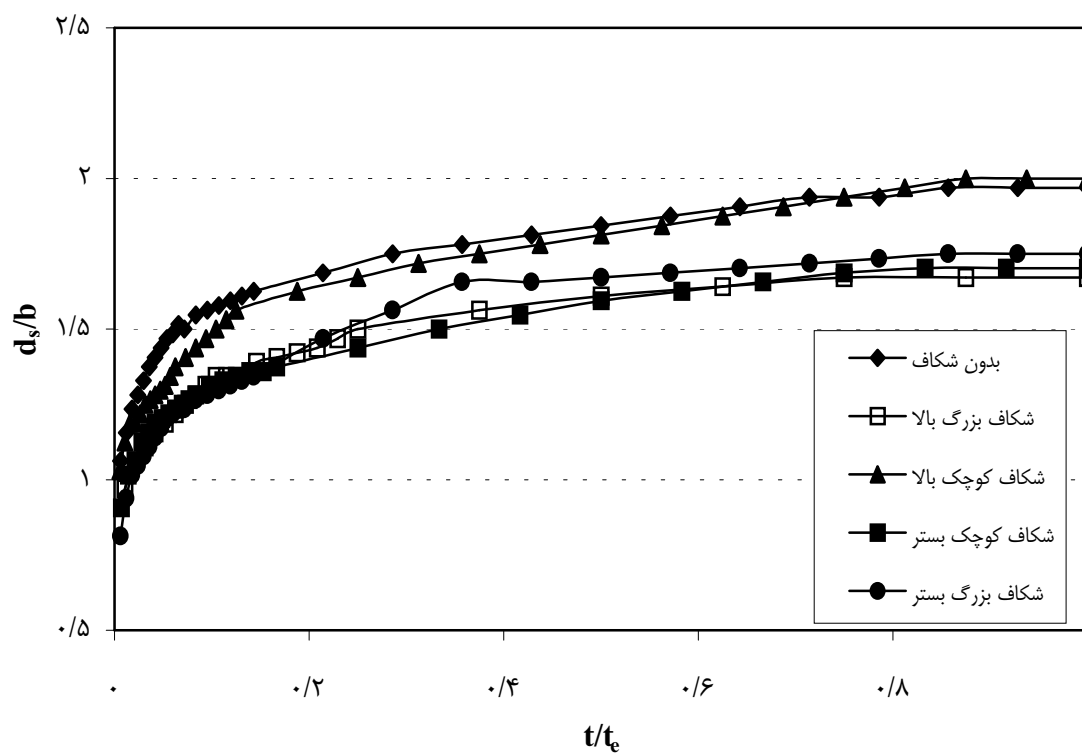
شکل ۴. تغییرات عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در پایه استوانه‌ای



شکل ۵. تغییرات عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در پایه مستطیلی ۳×۶



شکل ۶. تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان در پایه مستطیلی ۳×۹



شکل ۷. تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان در پایه مستطیلی ۳×۱۲

را تأیید می‌کند.

۱. پایه استوانه‌ای

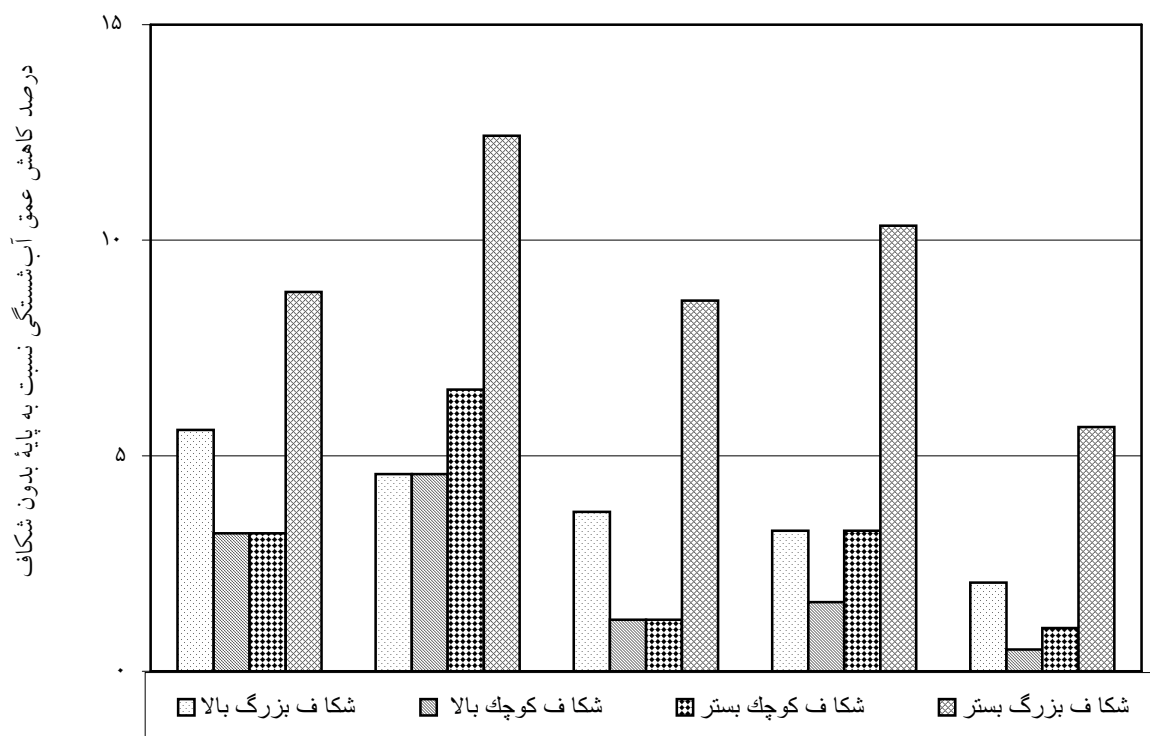
شکل ۸، نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیله شکاف را در پایه استوانه‌ای در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، عملکرد شکاف در کاهش آب‌شستگی در ساعات اولیه بهتر بوده، و با رسیدن به زمان نهایی کاهش پیدا کرده است. برابر نتایج، شکاف بزرگ بستر با به وجود آوردن کاهش در حدود ۶ تا ۱۳ درصد در عمق آب‌شستگی، بهترین عملکرد را نسبت به شکاف‌های دیگر داشته است. پس از شکاف بزرگ بستر، شکاف بزرگ بالا، شکاف کوچک بستر و شکاف کوچک بالا به ترتیب در رده‌های بعدی عملکرد قرار دارند، و به ترتیب باعث کاهش به میزان ۲، ۱ و ۰/۵ درصد در عمق آب‌شستگی در زمان نهایی شده‌اند، که این درصدها در دو ساعت اولیه آب‌شستگی به ترتیب برابر با ۳، ۴ و ۲/۵ درصد بوده است. هنگامی که شکاف در نزدیک بستر قرار می‌گیرد، افزایش در طول شکاف، باعث افزایش تأثیر آن در منحرف کردن جریان رو به پایین، و در نتیجه کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. هم‌چنین، هنگامی که شکاف در نزدیک سطح آب قرار می‌گیرد، افزایش طول شکاف باعث کاهش عمق مؤثر جریان، و سرانجام باعث افزایش تأثیر آن در کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود.

ولی نتایج بابار و همکاران (۴) روی پایه‌های استوانه‌ای به قطر ۸ سانتی‌متر، نشان می‌دهد که شکاف‌هایی با عرض برابر یک چهارم قطر پایه و با ارتفاع‌هایی بین ۰/۵ تا ۲/۵ برابر قطر پایه، کاهش در حدود ۶۰ درصد در حداکثر آب‌شستگی را به وجود آورده‌اند. هم‌چنین، پژوهش‌های چپو (۷) در بهره برداری از شکاف در پایه‌های استوانه‌ای نشان داد که به کار بردن شکاف با قطر برابر یک چهارم قطر پایه، ۲۰ درصد کاهش در آب‌شستگی پایه استوانه‌ای به وجود آورده است. کومار و همکاران (۱۴) نیز شکاف‌هایی با طول‌های مختلف را به منظور کاهش در عمق آب‌شستگی پایه‌های استوانه‌ای به کار بردند.

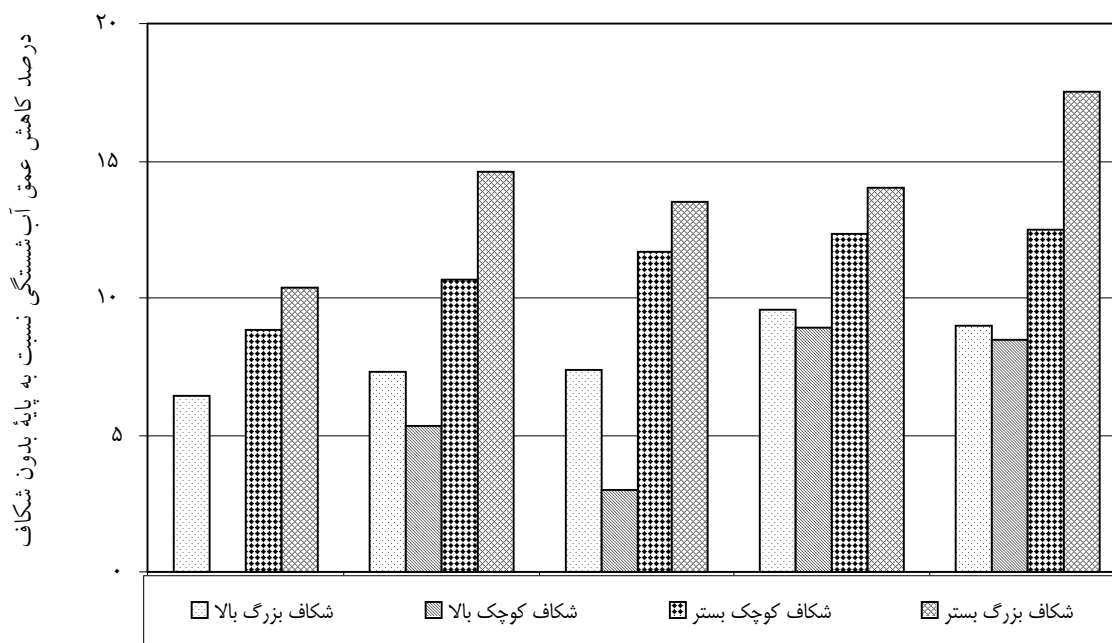
نشان می‌دهد، شکاف کوچک بالای بستر، عملکرد بهتری نسبت به شکاف بزرگ بالای بستر در کاهش عمق آب‌شستگی موضعی دارد، ولی مقدار این کاهش کم است. شکاف بزرگ مجاور بستر نیز در دو ساعت اول نسبت به شکاف کوچک مجاور بستر کاهش بیشتری را نشان می‌دهد، ولی پس از گذشت زمان دو نمودار به هم نزدیک می‌شوند. بیشینه عمق آب‌شستگی این پایه در این حالت مربوط به پایه بدون شکاف و برابر با ۱/۹۸b است، و حداقل آن در پایه‌ای با شکاف بزرگ بستر اتفاق می‌افتد، که برابر با ۱/۶۷b است.

کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیله شکاف در پایه‌های مختلف

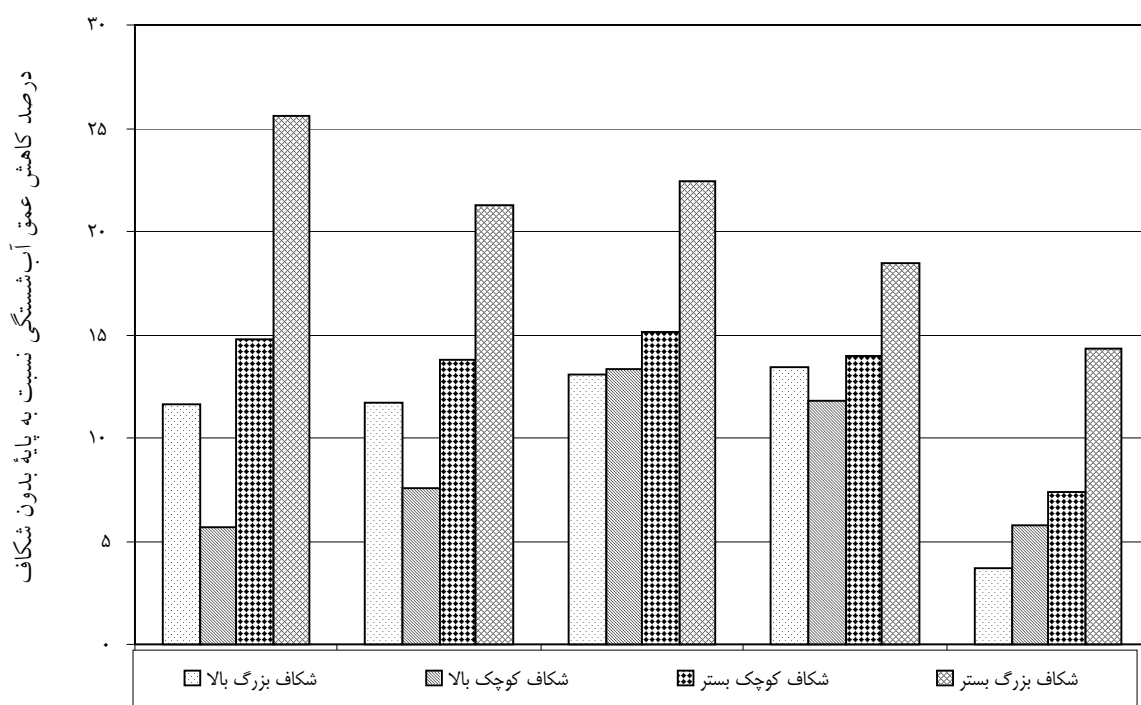
نتایج مربوط به عملکرد شکاف در کنترل آب‌شستگی موضعی در پایه‌های بررسی شده در شکل‌های ۸ تا ۱۱، به صورت درصد کاهش عمق آب‌شستگی در مدل‌های شکاف‌دار نسبت به مدل‌های بدون شکاف نشان داده شده است. همان طور که در شکل‌ها مشخص شده، در تمام مدل‌های بررسی شده، شکاف‌های قرار گرفته در نزدیک بستر بهتر از شکاف‌های نزدیک سطح آب عمل کرده و کاهش بیشتری در آب‌شستگی به وجود آورده‌اند. علت این امر را می‌توان به این صورت 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 نعل‌اسبی 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 نعل‌اسبی در اطراف پایه، تأثیر کمتری خواهد داشت. از آن جا که کنترل این دو عامل، که عوامل اصلی آب‌شستگی هستند، اهمیت بیشتری دارد، بنابراین شکاف‌هایی که نزدیک بستر قرار دارند، عملکرد بهتری از شکاف‌های قرار گرفته در نزدیک سطح آب خواهند داشت. نتایج چپو (۷) نیز این مسئله



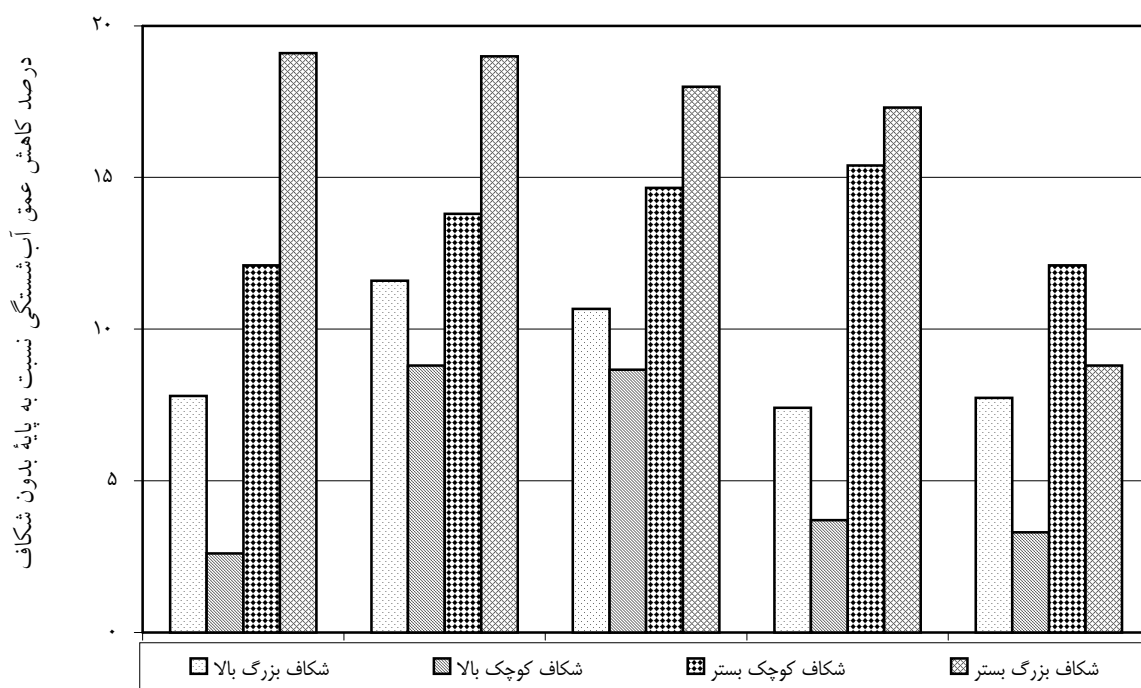
شکل ۸. درصد کاهش عمق آب شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعدالی) در پایه استوانه‌ای



شکل ۹. درصد کاهش عمق آب شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعدالی) در پایه مستطیلی ۳×۶



شکل ۱۰. درصد کاهش عمق آب‌شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایه مستطیلی ۳×۹



شکل ۱۱. درصد کاهش عمق آب‌شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایه مستطیلی ۳×۱۲

۴. پایه مستطیلی ۳×۱۲

شکل ۱۱ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی را در پایه مستطیلی ۳×۱۲ در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌دارد که در این پایه نیز با گذشت زمان، عملکرد شکاف‌ها روند کاهشی داشته است. در این پایه شکاف بزرگ بستر کاهشی بین ۸ تا ۱۸ درصد، شکاف کوچک بستر کاهشی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد، شکاف بزرگ بالا کاهشی بین ۵ تا ۱۲ درصد، و شکاف کوچک بالا کاهشی بین ۳ تا ۸ درصد در عمق آب‌شستگی را موجب شده‌اند و بنابراین، شکاف‌ها به تریبی که بیان شد، نقش مؤثرتری داشته‌اند. در این پایه، اثر شکاف‌های نزدیک بستر در کاهش عمق آب‌شستگی کم‌رنگ‌تر از پایه ۳×۹ می‌باشد، و شکاف‌های بالای بستر در این پایه نیز دارای رفتاری بسیار متفاوت با پایه ۳×۹ هستند، که ممکن است به خاطر طول زیاد این پایه نسبت به پایه ۳×۹ باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کارایی شکاف در کاهش عمق آب‌شستگی در اطراف پایه استوانه‌ای و پایه‌های مستطیلی گرد گوشه در شرایط آب‌شستگی آب زلال بررسی شده است. شکاف‌ها در دو موقعیت نزدیک سطح آب و نزدیک بستر قرار داشتند. برای نتایج، شکاف‌های نزدیک بستر تأثیر بیشتری نسبت به شکاف‌های نزدیک سطح آب در کاهش عمق آب‌شستگی داشتند، و با افزایش طول شکاف‌ها در هر دو موقعیت، عملکرد آنها افزایش یافت. هم‌چنین، شکاف‌ها در پایه‌های مستطیلی نسبت به پایه استوانه‌ای عملکرد بهتری داشته‌اند. در تمام مدل‌های بررسی شده، شکاف‌های با طول دو برابر قطر پایه‌ها و در موقعیت نزدیک بستر بیشترین تأثیر را در کاهش عمق آب‌شستگی داشتند.

نتایج بررسی آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع شکاف، عملکرد آن در کاهش آب‌شستگی بهتر بوده است.

۲. پایه مستطیلی ۳×۶

شکل ۹ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیله شکاف را در پایه مستطیلی ۳×۶ در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. چنان که در شکل مشخص است، عملکرد شکاف‌ها با گذشت زمان افزایش یافته است. در این پایه، شکاف‌های نزدیک بستر بهتر از شکاف‌های نزدیک سطح آب عمل کرده‌اند، و به ترتیب شکاف بزرگ بستر، شکاف کوچک بستر، شکاف بزرگ بالا و شکاف کوچک بالا تأثیر بیشتری در کاهش آب‌شستگی داشته‌اند، به طوری که این شکاف‌ها به ترتیب کاهشی در حدود ۱۵، ۱۲، ۸ و ۷ درصد در عمق آب‌شستگی پایه به وجود آورده‌اند. برابر نتایج، تمام شکاف‌ها در پایه مستطیلی ۳×۶ بهتر از پایه استوانه‌ای عمل کرده‌اند.

۳. پایه مستطیلی ۳×۹

شکل ۱۰ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی در پایه مستطیلی ۳×۹ را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل مشخص است که با گذشت زمان، عملکرد شکاف‌ها در کاهش آب‌شستگی موضعی کاهش یافته است. در ساعات آغازین آب‌شستگی در این پایه، شکاف بزرگ بستر، شکاف کوچک بستر، شکاف بزرگ بالا و شکاف کوچک بالا به ترتیب عملکردهای بهتری داشته، و باعث کاهشی در حدود ۲۳، ۱۴، ۱۱/۵ و ۶/۵ درصد در آب‌شستگی شده‌اند. در زمان نهایی این درصدها به ترتیب ۱۴، ۷/۵، ۳/۷ و ۵/۸ بوده‌اند. برابر نتایج، شکاف در این پایه بهتر از پایه مستطیلی ۳×۶ و پایه استوانه‌ای عمل کرده است.

منابع مورد استفاده

۱. زراتی، ا. و م. عزیزی. ۱۳۷۶. روش‌های محافظت پایه پل در برابر آب‌شستگی. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس هیدرولیک ایران. انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران.
۲. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۸. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. نظری‌ها، م. ۱۳۸۰. تغییرات زمانی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
4. Babar, R., S. Setia and B. Setia. 2000. Scour protection by a slot through a model bridge pier. Proceeding of International Symposium on Recent Advances in Experimental Fluid Mechanics, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
5. Baker, C. J. 1980. Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers. J. Hyd. Res., IAHR 18(1): 1-12.
6. Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H. W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. J. Hydr. Res., IAHR 15(3): 211-252.
7. Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE 118(9): 1260-1269.
8. Chiew, Y. M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE 121(9): 635-643.
9. Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. J. Hyd. Eng., ASCE 116(10): 1197-1214.
10. Ettema, R. and B. W. Melville. 1998. Scale effect in pier-scour experiments. J. Hyd. Eng., ASCE 124(6): 639-642.
11. Jain, S. C. 1981. Maximum clear water scour around circular piers. J. Hyd. Div., ASCE 107(5): 611-626.
12. Jain, S. C. and E. E. Fischer. 1980. Scour around bridge piers at high flow velocities. J. Hyd. Div., ASCE 106(11): 1827-1842.
13. Jayawardena, A. W., J. H. W. Lee and Z. Y. Wang. 1998. River Sedimentation: Theory and Applications. Proc. 7th Intl. Symp. River Sed., Hong Kong, 16-18 Dec., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
14. Kumar, V., K. G. Ranga Raju and N. Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collar. J. Hyd. Eng., ASCE 125(12): 1302-1305.
15. Melville, B. W. 1997. Pier and abutment scour-an integrated approach. J. Hyd. Eng., ASCE 123(2): 125-136.
16. Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE 125(1): 59-65.
17. Melville, B. W. and A. J. Sutherland. 1988. Design method for local scour at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE 114(10): 1210-1226.
18. Posey, C. J. 1974. Tests of protection for bridge piers. J. Hyd. Div., ASCE 100(12): 1773-1783.
19. Raudkivi, A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
20. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear water scour at cylindrical piers. J. Hyd. Eng., ASCE 109(3): 338-349.