

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

منوچهر حیدرپور^۱، حسین افضلی‌مهر^۱ و محسن نادری بنی^۲

چکیده

استفاده از شکاف در پایه‌های پل‌ها یکی از روش‌های نوین در کنترل آب شستگی موضعی است. در این پژوهش، با به کارگیری ۲۰ مدل آزمایشگاهی، کنترل آب شستگی 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 آب شستگی نهایی ندارند. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که برای کلیه مدل‌هایی که در این پژوهش تحت شرایط معین آب زلال آزمایش شده‌اند، حداکثر کاهش آب شستگی، به وسیله شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض (قطر) پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. کارایی شکاف در کنترل آب شستگی 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: آب شستگی 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 صحت درصد آنها در اثر آب شستگی 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 آب شستگی 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 عموماً با قرار دادن لایه سنگچین به همراه فیلتر یا بدون آن در پیرامون پایه پل صورت می‌گیرد (۷). تورهای گاییون 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 گسترشده 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 بهره برداری 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 رسواب انجام داد (۲). دیاگرام شیلدز را که هندرسون (به نقل از ۱۷) اصلاح کرده، یکی از راههای مؤثر برای محاسبه شرایط آستانه حرکت در رسواب با دانه‌بندی یکنواخت است. چاپرت و انگلینگر (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 کanal 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 بعدی، 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 دهانه پل تخریب می‌شود، که دلیل عدمه آن آب‌شستگی موضعی است. این امر، علاوه بر تحمیل خسارات فراوان، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل وغیره 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 زلال (Clear-water scour) (Live-bed scour) و آب‌شستگی بستر زنده، سرعت میانگین جریان (U) در بازه بالادست پل بیش از Velocity of movement (threshold) بستر (U₀) 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 (۹). در آب‌شستگی آب زلال، سرعت میانگین جریان کمتر از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر است، و در بالادست پایه، هیچ گونه 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 عموماً 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*) 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

آب شستگی (d_s) بر حسب 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 آب شستگی به مقدار متعادل خود می رسد) و بیشینه عمق آب شستگی، عمق آب شستگی در هر زمان t محاسبه می شود.

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 آب شستگی در شرایط آب زلال از رابطه زیر استفاده می شود:

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

که در آن k_3 تقریباً برابر $1/2$ است.

نظری ها (۳) برخی روابط تجربی ارائه شده برای پیش‌بینی تغییرات زمانی آب شستگی موضعی در اطراف پایه ها را در شرایط آب زلال و برای تک پایه های استوانه ای بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان داد که رابطه نظرالاسلام و همکاران (به نقل از (۳) با دقت بهتری می تواند تغییرات زمانی آب شستگی را در پایه ها 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 می آید:

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

تلاش های زیادی در زمینه کاربرد روش هایی برای کاهش آب شستگی موضعی در پایه ها به وسیله پژوهندگان انجام یافته

ملویل و سادرلند (۱۷) روابطی را برای محاسبه سرعت برنشی آستانه حرکت (U_{c*}) با توجه به اندازه d (قطر ذره ای که ۵۰٪ ذرات از نظر وزنی از آن کمتر باشد) ارائه کردند. متغیرهای اصلی، سرعت، قطر پایه، عمق جریان و اندازه ذرات رسوب بودند. مزامیل (به نقل از (۱۳) با انجام بررسی های آزمایشگاهی و تحلیلی، قدرت و ابعاد گرداب نعل اسپی را تعیین کرد. دانشگاه ایالتی کلرادو رابطه هایی برای محاسبه بیشینه عمق آب شستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده ارائه کرد (۲۰). ملویل و چیو (۱۶) رابطه کاملی از پیشرفت زمانی عمق آب شستگی برای پایه های استوانه ای ارائه کردند. از آن جا که رابطه ملویل و چیو (۱۶) به منظور مقایسه با نتایج پژوهش حاضر استفاده می شود، در اینجا به طور کامل بیان می گردد. در این روش برای تعیین زمان تعادل و بیشینه عمق آب شستگی از روابط زیر استفاده شد.

$$d_{se} = k_y b k_i k_d \quad [1]$$

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

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

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

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

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 اثر شکاف در کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی، با انجام آزمایش‌های گسترده روی پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی پیشانی گرد و مقایسه تغییرات زمانی آب‌شستگی و بیشینه آب‌شستگی موضعی، در شرایط آب‌شستگی آب زلال، بررسی شده است.

است. درگاهی (۹) با استفاده از طوقه سعی در کاهش آب‌شستگی موضعی کرد. آزمایش وی در شرایط آب زلال انجام شد. زراتی و عزیزی (۱۰) با استفاده از طوقه با پهنه‌ای 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 چیو (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 $1/8$ تا $1/2$ برابر عمق آب بهره بردن، 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. بایار و همکاران (۴) با استفاده از شکاف‌های مستطیلی مختلف روی پایه‌های استوانه‌ای به قطر هشت سانتی‌متر واقع در دو کanal 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 می‌طلبد. هر چند پژوهش‌هایی در زمینه کارایی شکاف در پایه‌های استوانه‌ای (Circular pier) صورت گرفته است، ولی تاکنون

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه بررسی‌های آزمایشگاهی این پژوهش در کanalی به طول ۷ متر، عرض 0.32 متر و ارتفاع 0.36 متر صورت گرفته است. دیواره و کف کanal از جنس پلکسی گلاس به ضخامت 10 میلی‌متر است. کف کanal بجز در یک محدوده یک متری بالادست، وسط و انتهای کanal به وسیله سکوهای فلزی بالا آورده شد. محدوده یک متری ابتدای کanal، نقش حوضچه آرامش را برای جریان خروجی از لوله انتقال آب داشت، و محدوده یک متری در انتهای کanal برای جمع آوری رسوب فرسایش یافته در نظر گرفته شد. منطقه انجام آزمایش‌ها، شامل 40 سانتی‌متر از بالادست و 60 سانتی‌متر از پایین دست این محدوده کار گذاشته شد. منطقه انجام آزمایش به وسیله مصالح غیر چسبنده ماسه‌ای با 50 برابر $61/6$ میلی‌متر، انحراف معیار هندسی برابر $1/23$ و چگالی نسبی برابر با $2/65$ پر شد. به منظور هماهنگ کردن ضریب زبری در محدوده آزمایش و بالادست و پایین دست آن، سطح سکوهای فلزی با مصالح استفاده شده در منطقه انجام آزمایش پوشانده شد. این کanal به وسیله پمپی با حداکثر دبی 11 لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شد. تنظیم دبی خروجی از موتور پمپ به وسیله شیر تنظیم تعییه شده قبل از دهانه ورودی به مخزن بالادست، صورت می‌گرفت. آب در سیکل بسته از منبع اصلی به مخزن کوچک ابتدای کanal پمپاژ شده، و در آن جا با عبور از یک آرام کننده وارد کanal می‌شد.

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) حداقل نسبت عرض پایه به عرض کanal 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 Ripple (Ripple)، میانگین اندازه ذرات باید از $6/0$ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد ($6/0 > 0/6$ mm). 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:

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

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

همچنین، برای حذف اثر غیر یکنواختی ذرات بر آب‌شستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات (g) کوچک‌تر از $1/3$ 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 $4/4b$ ، یعنی $7/7$ سانتی‌متر، و با احتساب 30 درصد افزایش احتمالی آن، ضخامت مصالح بستر 10 سانتی‌متر انتخاب شد (۱۶).

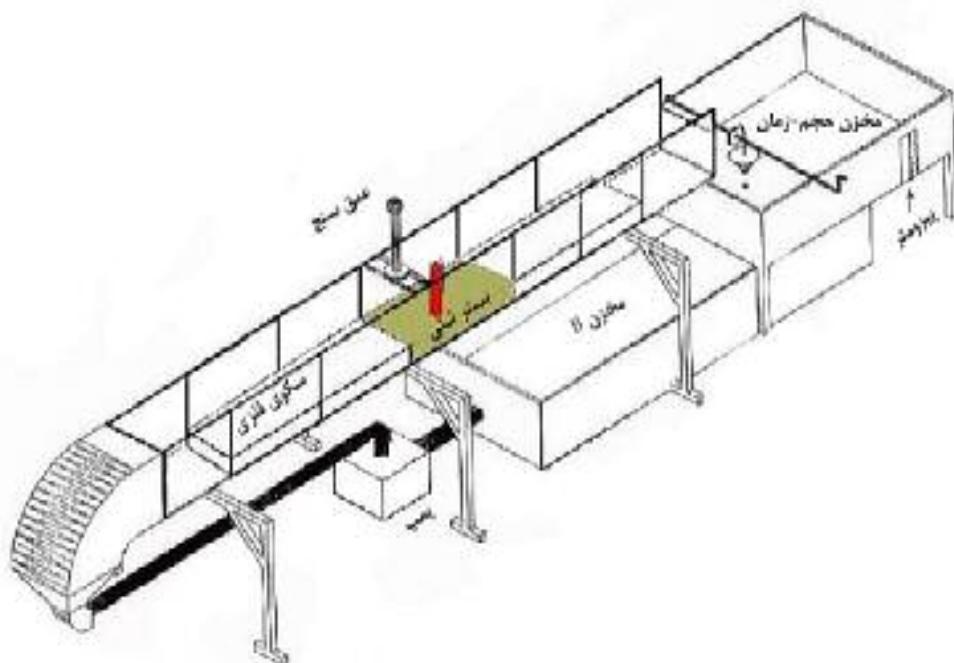
عمق و سرعت جریان: با توجه به این که آب‌شستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی می‌شود باید $U_c \leq U$ باشد. بر اساس

آب پس از عبور از کanal، 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 عمق سنج با دقیقاً $5/0$ میلی‌متر استفاده شد. عمق سنج روی ریلی در جهت عرضی و طولی کanal حرکت می‌کرد. شکل ۱ نمایی از کanal استفاده شده در آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد.

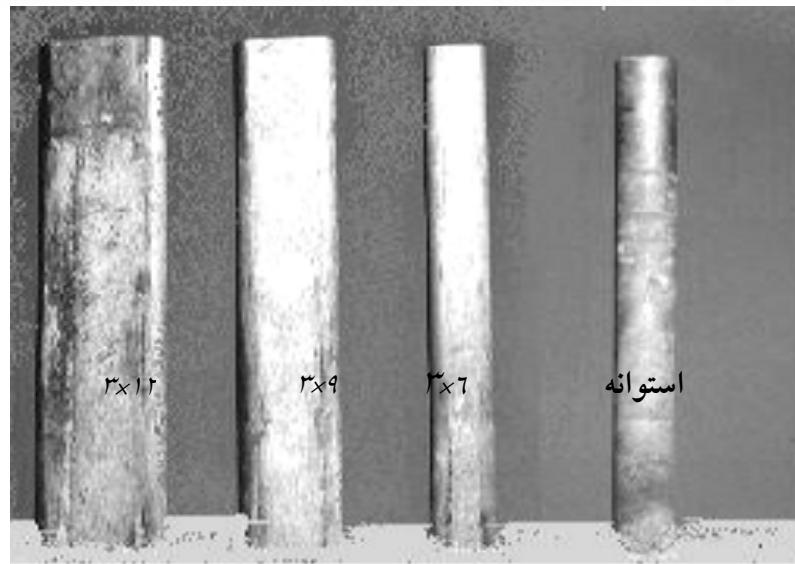
ویژگی‌های مدل‌های آزمایشگاهی

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 12 مدل مستطیلی پیشانی گرد شکاف‌دار (با موقعیت‌ها و ابعاد مختلف شکاف) بود. مدل استوانه‌ای بدون شکاف از لوله فولادی به قطر $2/2$ سانتی‌متر، ارتفاع 30 سانتی‌متر و ضخامت $0/2$ سانتی‌متر ساخته شد. مدل‌های مستطیلی پیشانی گرد دارای طول (در جهت جریان) برابر 6 سانتی‌متر و 12 سانتی‌متر بودند و عرض پایه‌ها (عمود بر جریان) برابر قطر پایه استوانه‌ای، یعنی $3/2$ 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 ($6/4$ سانتی‌متر) و دو برابر عرض پایه ($6/4$ سانتی‌متر) و عرض برابر با $0/25$ عرض پایه ($0/8$ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. این دو نوع شکاف در هر پایه در دو موقعیت نزدیک بستر و نزدیک 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 ۱. نمایی از کانال مورد استفاده در آزمایشگاه



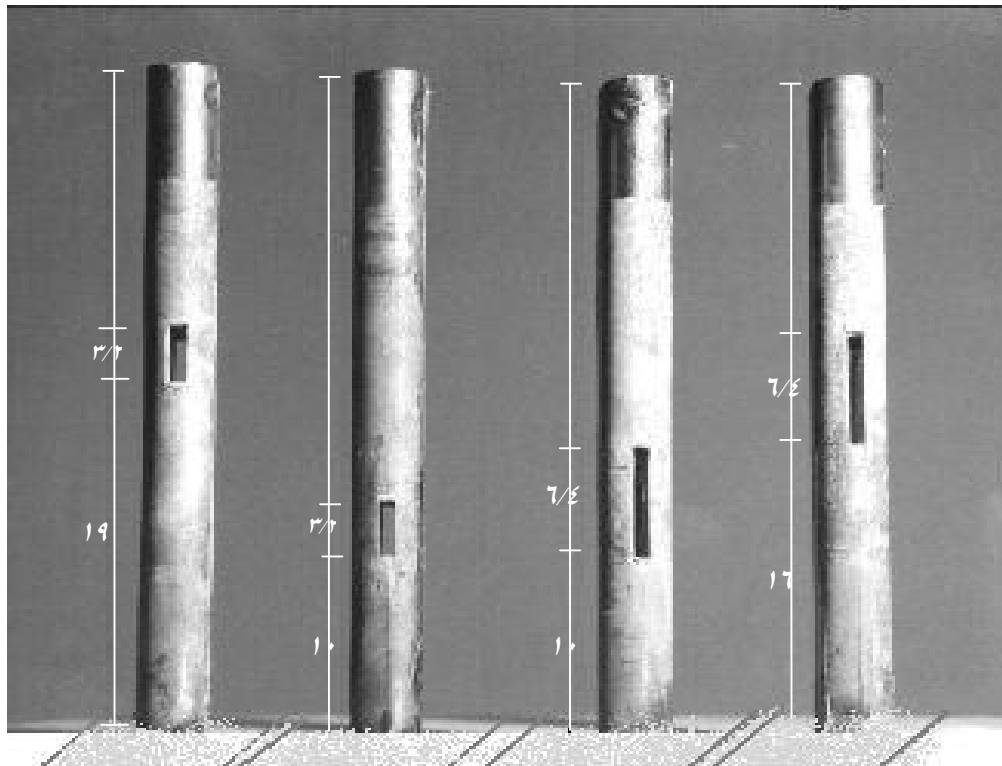
شکل ۲. مدل‌های بدون شکاف

نظر گرفته می‌شود که شرایط $U = 0.95U_c$ به صورت زیر برقرار شود:

$$d_{50} = 0.61 \text{ mm} \Rightarrow U_* = 0.0115 + 0.0125(d_{50})^{1.4}$$

$$= 0.017 \text{ m/s}, \quad y_0 = 12 \text{ cm} \Rightarrow U = 0.286 \text{ m/s}$$

بررسی‌های رودکیوی (۱۹) شرایط آب‌شستگی آب زلال در $U \leq 0.95U_c$ برقرار می‌شود. ولی بیشینه عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال زمانی برقرار می‌شود که $U = 0.95U_c$ باشد. بنابراین، با توجه به دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه، و با استفاده از معادلات ملویل (۱۵) و ملویل و سادرلند (۱۷) عمق جریان به گونه‌ای در



شکل ۳. موقعیت و ابعاد شکاف ها در مدل های شکاف دار (ابعاد به سانتی متر)

مدت زمان انجام آزمایش: مدت زمان انجام آزمایش ها برابر معیار کومار و همکاران (۱۴) انتخاب شد، که عبارت است از مدت زمانی از آغاز آزمایش که پس از آن تغییرات عمق آب شستگی در یک دوره سه ساعته بیشتر از یک میلی متر نباشد. این زمان به عنوان زمان تعادل، و عمق آب شستگی اتفاق افتاده در آن به عنوان عمق آب شستگی متعادل فرض شده است. زمان تعادل، t_e ، و عمق آب شستگی متعادل، d_{eq} ، در هر یک از مدل های شکاف دار و بدون شکاف در جدول ۱ آمده است.

تمامی مدل های آزمایش شده در شرایط یکسان جریان بررسی شدند. عمق های آب شستگی در اطراف پایه ها در قسمتی که بیشترین عمق آب شستگی اتفاق افتاده، اندازه گیری شده است. این محل در دقایق آغازین آب شستگی در کناره پایه ها، و پس از آن در جلوی پایه ها و با فاصله چند میلی متری از پایه بوده است.

$$U_c = 5.75 U_{*c} \log(5.53 \frac{y}{d_{50}}) = 0.309 \text{ m/s} \quad [4]$$

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

این مقدار نزدیک به معیار $0/95$ است. تخمین عمق جریان در شرایط بحرانی با کاهش تدریجی عمق جریان به وسیله دریچه انجام شد، و در عمق حدود $11/8$ سانتی متر آب شستگی بستر زنده مشاهده شد. بنابراین، حداکثر سرعت مناسب با حداقل عمق 12 سانتی متر انتخاب شد.

بنابر نظریه دیز (به نقل از ۶)، میزان عمق آب شستگی با نسبت b/y افزایش می یابد، ولی برای $(1-3) > b/y > 1$ ثابت است. بیشتر پژوهندگان دیگر نیز به این نتیجه رسیده اند که وقتی $(1-3) > b/y > 1$ باشد، عمق جریان بر عمق آب شستگی بی اثر است (۲۰). با توجه به این که در پژوهش حاضر این نسبت $3/75$ است، عمق جریان هیچ تأثیری بر عمق آب شستگی نداشته است.

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

مستطیلی ۳×۱۲				مستطیلی ۳×۹				مستطیلی ۳×۶				انواع مدل پایه
d _{se} (mm)	t _e (min)											
۵/۸	۷۸۰	۵/۸۵	۴۲۰	۵/۹	۴۸۰	۷	۱۰۸۰	شکاف بزرگ بالا				
۷/۳	۷۸۰	۵/۷	۴۲۰	۷/۰۵	۴۸۰	۷	۱۰۸۰	شکاف کوچک بالا				
۵/۶	۷۸۰	۵/۲۵	۴۲۰	۵/۳	۴۸۰	۷/۳	۱۰۸۰	شکاف بزرگ بستر				
۵/۶	۷۸۰	۵/۶	۴۲۰	۵/۷	۴۸۰	۷/۷	۱۰۸۰	شکاف کوچک بستر				
۷/۳	۷۸۰	۷/۱۰	۴۲۰	۷/۵	۴۸۰	۷	۱۰۸۰	بدون شکاف				

عمق آب شستگی برای شکاف بزرگ نزدیک بستر برابر $1/60\text{ b}$ و برای شکاف کوچک نزدیک بستر، شکاف بزرگ بالا و شکاف کوچک بالا و بدون شکاف به ترتیب $1/75\text{ b}$ ، $1/70\text{ b}$ و $1/95\text{ b}$ است.

نتائج و بحث

تغیرات زمانی آب شستگی

۱. پایه استوانه‌ای

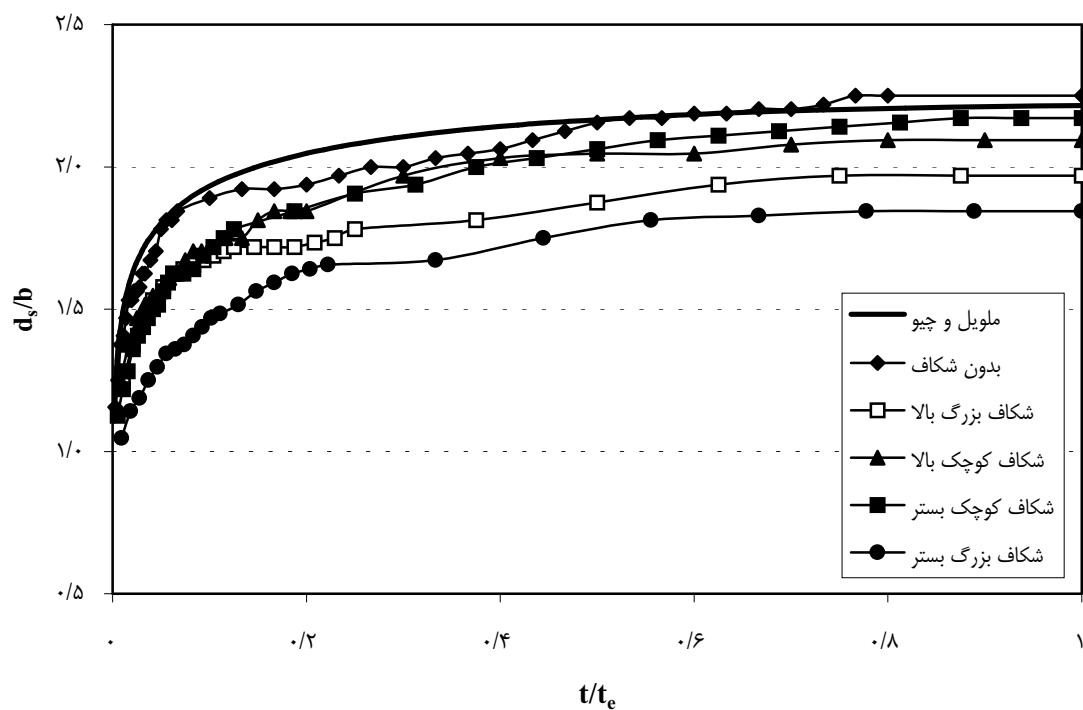
شکل ۴ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در پایه استوانه‌ای نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است، منحنی شکاف بزرگ بستر با فاصله نسبتاً زیادی از منحنی‌های دیگر فرار دارد. در این شکل، نتایج به دست آمده از بررسی‌های ملویل و چیو (۱۶) به منظور مقایسه آورده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که منحنی ملویل و چیو 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. همان گونه که شکل نشان می‌دهد، بیشینه عمق آب‌شستگی در پایه بدون شکاف، و برابر ۱/۹۸b است.

۲. پایهٔ مستطیلی ۶×۳

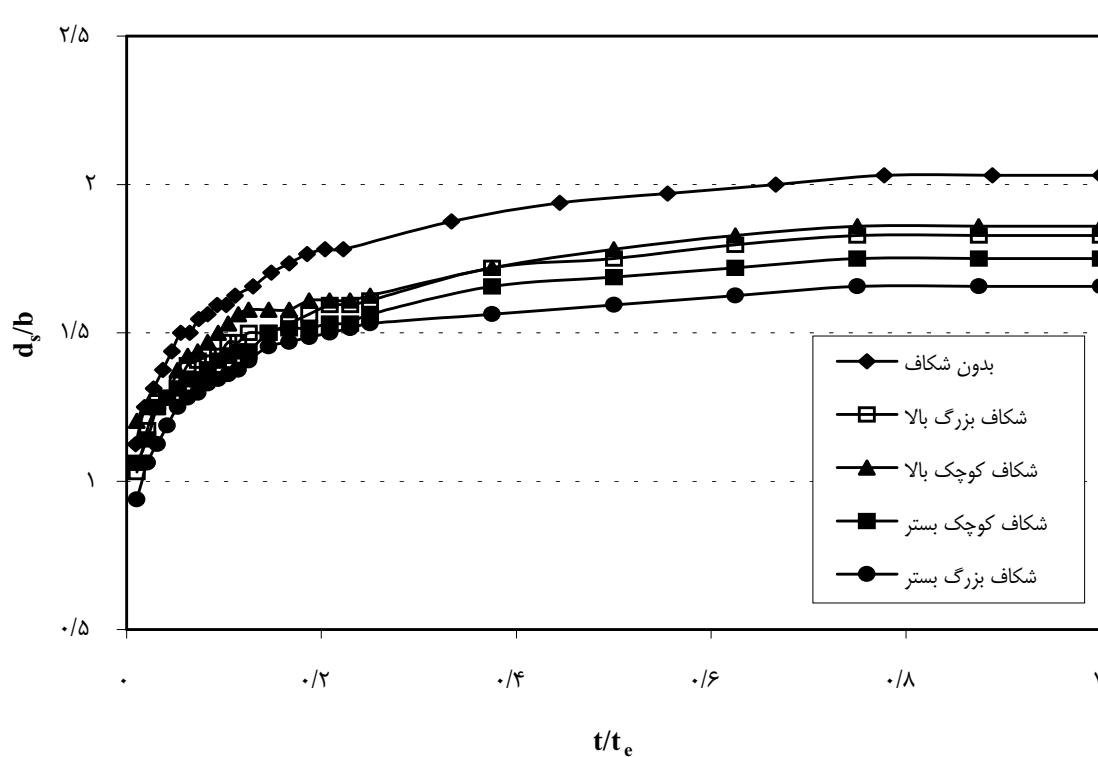
شکل ۵ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در اطراف پایه مستطیلی 3×6 نشان می‌دهد. چنان که در شکل دیده می‌شود، شکاف بزرگ بستر، عملکرد خوبی در کاهش عمق آب‌شستگی دارد، و روند این کاهش با گذشت زمان پیشرفت دارد. شکاف‌های کوچک نزدیک بستر، بزرگ بالا و کوچک بالا نیز در رده‌های بعدی کاهش قرار دارند. مثلاً در زمان $t=0$ در

٤. ياءٌ مستطيلٌ، ١٢ × ٣

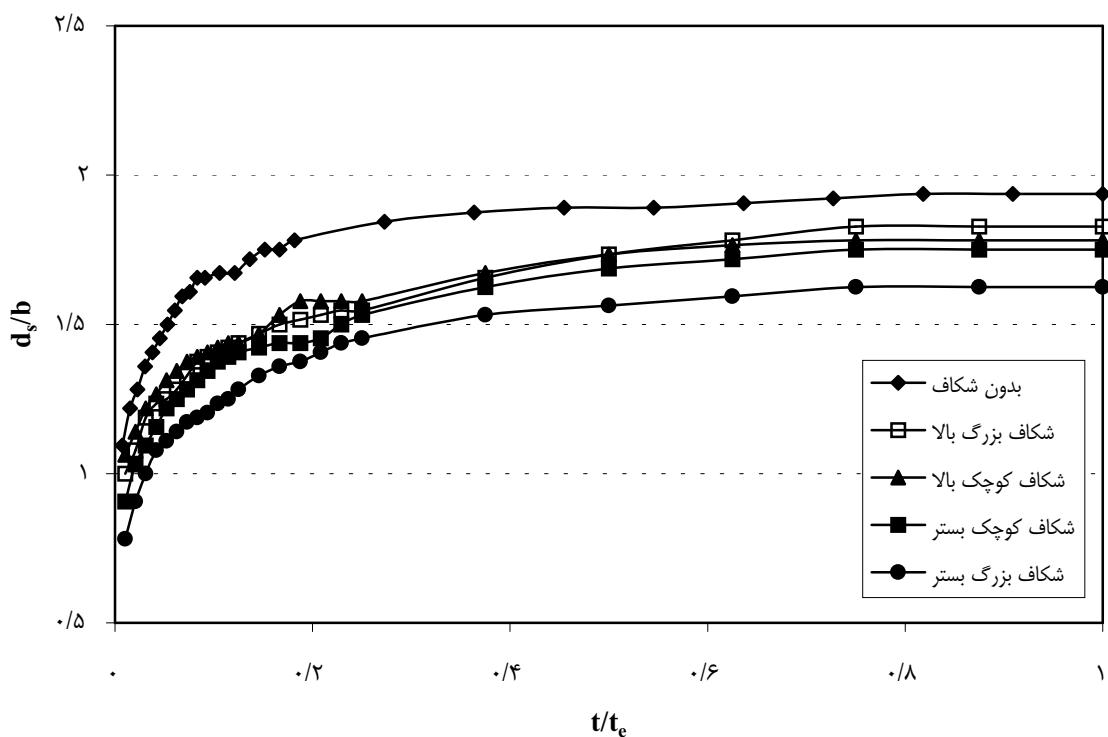
شکل ۷ تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی را نسبت به زمان
برای پایه مستطیلی 3×12 نشان می‌دهد. همان گونه که شکل



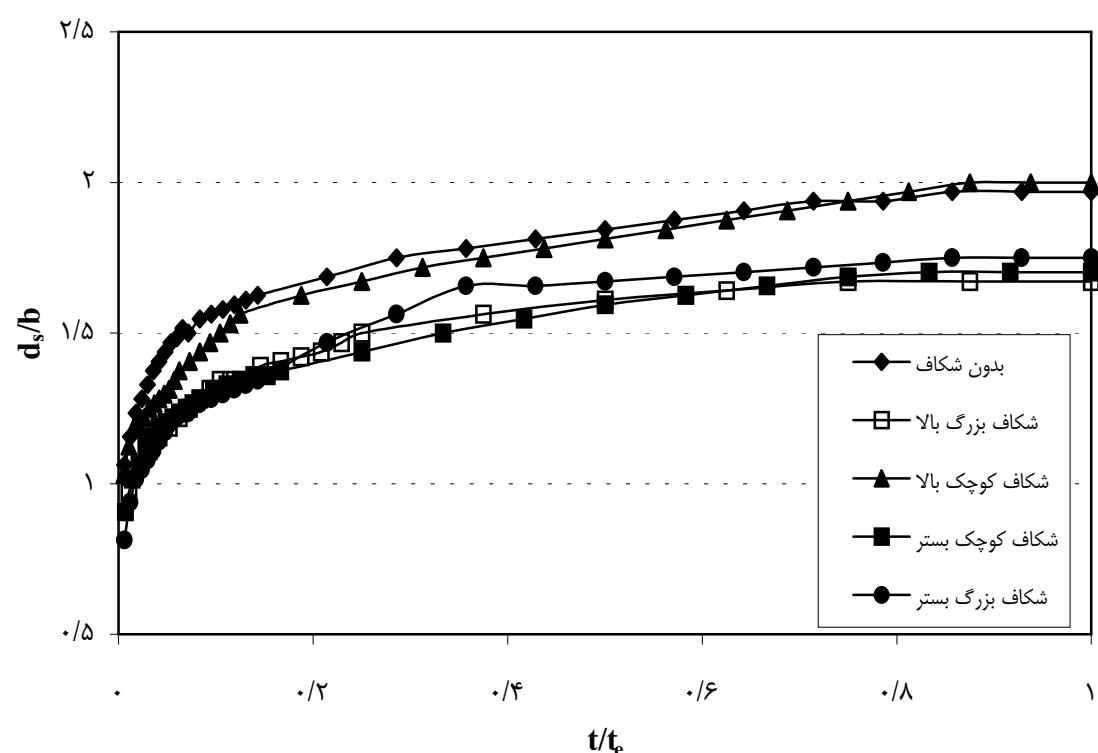
شکل ۴. تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان در پایه استوانه‌ای



شکل ۵. تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان در پایه مستطیلی 3×6



شکل ۶. تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان در پایه مستطیلی 3×9



شکل ۷. تغییرات عمق آب شستگی به زمان در پایه مستطیلی 3×12

را تأیید می‌کند.

۱. پایه استوانه‌ای

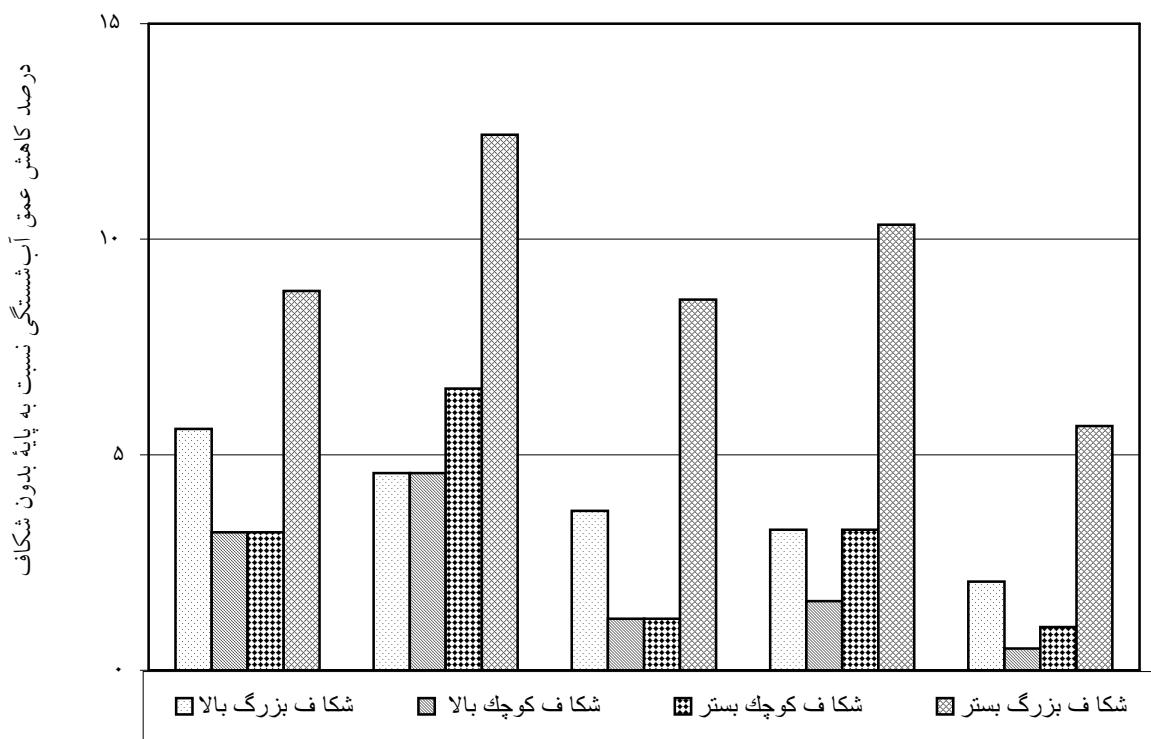
شکل ۸، نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب شستگی موضعی به وسیله شکاف را در پایه استوانه‌ای در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، عملکرد شکاف در کاهش آب شستگی در ساعت‌های اولیه بهتر بوده، و با رسیدن به زمان نهایی کاهش پیدا کرده است. برابر ۶ نتایج، شکاف بزرگ بستر با به وجود آوردن کاهشی در حدود ۶ تا ۱۳ درصد در عمق آب شستگی، 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 کاهشی به میزان ۲، ۱ و ۰/۵ درصد در عمق آب شستگی در زمان نهایی شده‌اند، که این درصدها در دو ساعت اولیه آب شستگی به ترتیب برابر با ۴، ۳ 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 آب شستگی 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 آب شستگی می‌شود.

ولی نتایج ببار 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، کاهشی در حدود ۶۰ درصد در حداکثر آب شستگی را به وجود آورده‌اند. هم‌چنین، پژوهش‌های چیو (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 آب شستگی پایه استوانه‌ای به وجود آورده است. کومار و همکاران (۱۴) نیز شکاف‌هایی با طول‌های مختلف را به منظور کاهش در عمق آب شستگی پایه‌های استوانه‌ای به کار برندند.

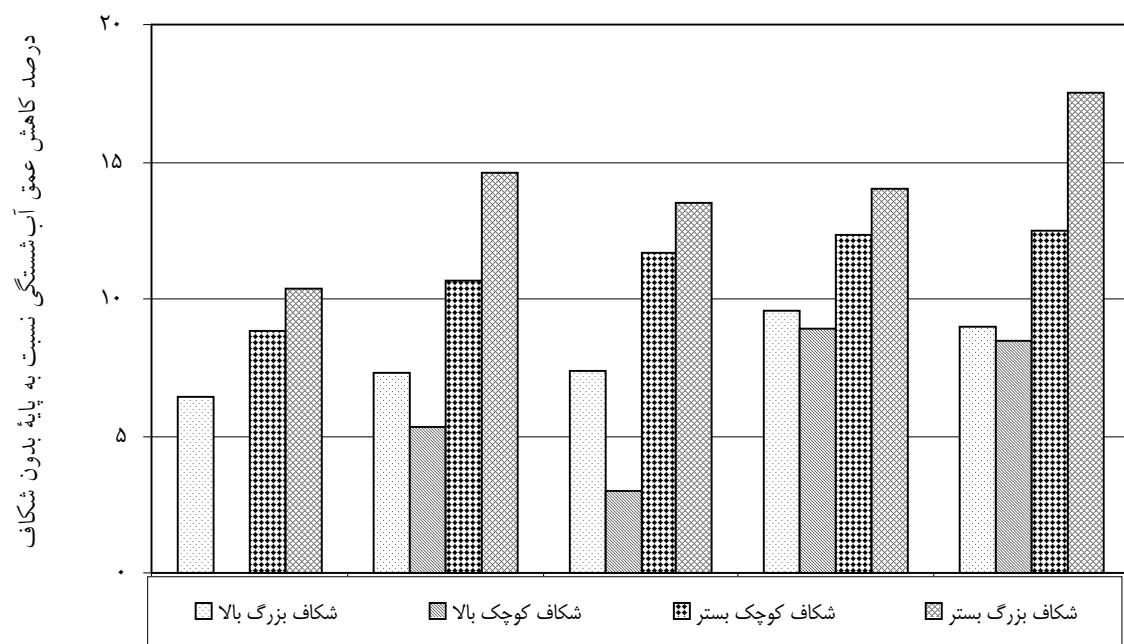
نشان می‌دهد، شکاف کوچک بالای بستر، عملکرد بهتری نسبت به شکاف بزرگ بالای بستر در کاهش عمق آب شستگی موضعی دارد، ولی مقدار این کاهش کم است. شکاف بزرگ مجاور بستر نیز در دو ساعت اول نسبت به شکاف کوچک مجاور بستر کاهش بیشتری را نشان می‌دهد، ولی پس از گذشت زمان دو نمودار به هم نزدیک می‌شوند. بیشینه عمق آب شستگی 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 ۱/۷۷b است.

کاهش عمق آب شستگی موضعی به وسیله شکاف در پایه‌های مختلف

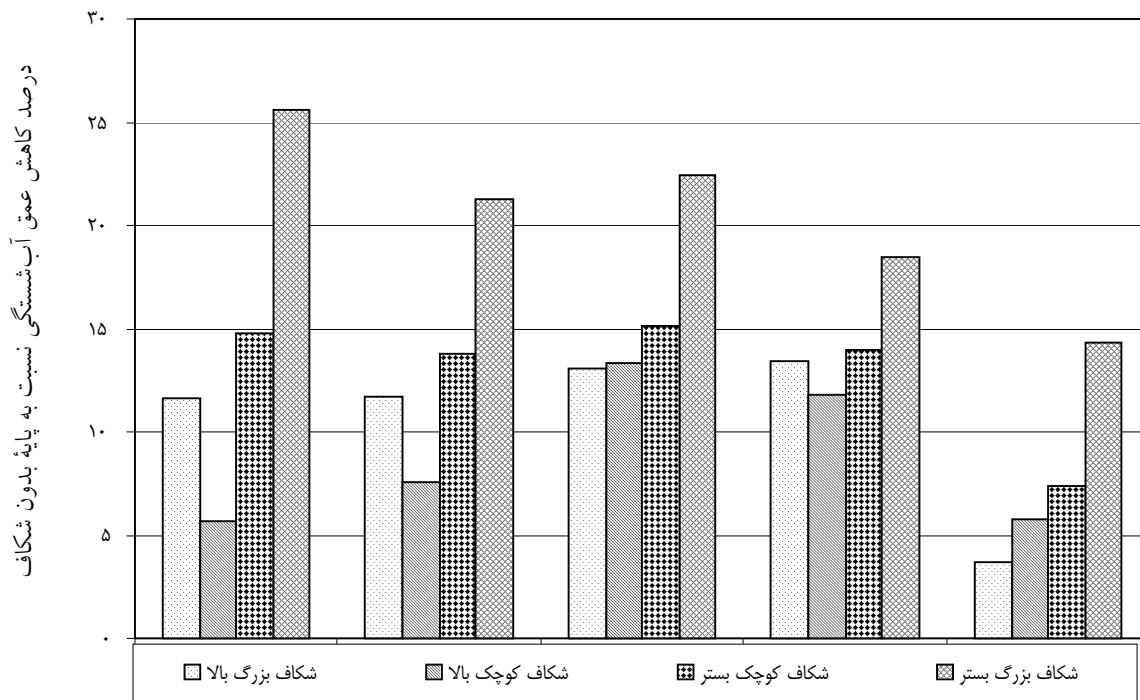
نتایج مربوط به عملکرد شکاف در کنترل آب شستگی موضعی در پایه‌های بررسی شده در شکل‌های ۸ تا ۱۱، به صورت درصد کاهش عمق آب شستگی در مدل‌های شکاف‌دار نسبت به مدل‌های بدون شکاف نشان داده شده است. همان طور که در شکل‌ها مشخص شده، در تمام مدل‌های بررسی شده، شکاف‌های قرار گرفته در نزدیک بستر بهتر از شکاف‌های نزدیک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



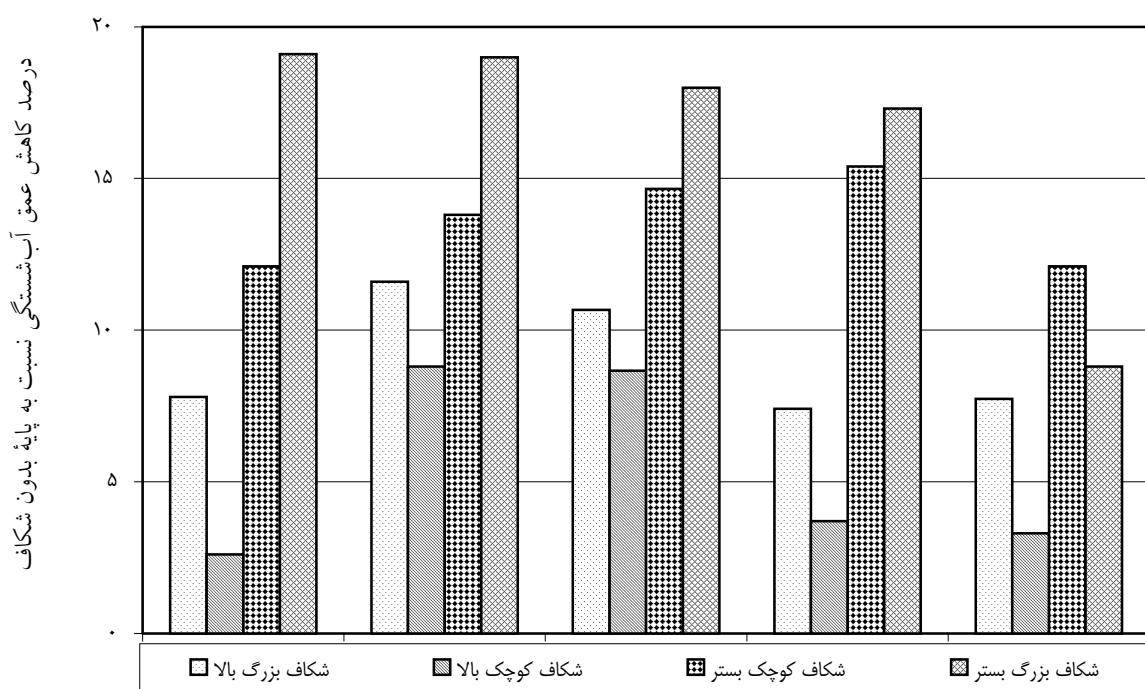
شکل ۸. درصد کاهش عمق آب شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایه استوانه‌ای



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 (تعادلی) در پایه مستطیلی 3×6



شکل ۱۰. درصد کاهش عمق آب شستگی بالا دست، به ترتیب از چپ به راست در زمان های ۱۰ دقیقه، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایه مستطیلی 3×9



شکل ۱۱. درصد کاهش عمق آب شستگی بالا دست، به ترتیب از چپ به راست در زمان های ۱۰ دقیقه، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایه مستطیلی 3×12

۴. پایه مستطیلی 3×12

شکل ۱۱ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی را در پایه مستطیلی 3×12 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 ترتیبی که بیان شد، نقش مؤثرتری داشته‌اند. در این پایه، اثر شکاف‌های نزدیک بستر در کاهش عمق آب‌شستگی کم‌رنگ‌تر از پایه 3×9 می‌باشد، و شکاف‌های بالای بستر در این پایه نیز دارای رفتاری بسیار متفاوت با پایه 3×9 هستند، که ممکن است به خاطر طول زیاد این پایه نسبت به پایه 3×9 باشد.

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

۲. پایه مستطیلی 3×6

شکل ۹ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیله شکاف را در پایه مستطیلی 3×6 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 3×6 بهتر از پایه استوانه‌ای عمل کرده‌اند.

۳. پایه مستطیلی 3×9

شکل ۱۰ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی در پایه مستطیلی 3×9 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 و ۵/۸ بوده‌اند. برابر نتایج، شکاف در این پایه بهتر از پایه مستطیلی 3×6 و پایه استوانه‌ای عمل کرده است.

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. برابر 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.

منابع مورد استفاده

۱. زراتی، ا. و.م. عزیزی. ۱۳۷۶. روش های محافظت پایه پل در برابر آب شستگی. 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. نظری ها، م. ۱۳۸۰. تغییرات زمانی آب شستگی موضعی اطراف پایه های 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. Nicolle 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.