کنترل و کاهش آب‌شستگی 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 پایهٔ پل‌ها یکی از روش‌های نوین در کنترل آب‌شستگی موضعی است. در این پژوهش، با به کارگیری ۲۰ مدل آزمایشگاهی، کنترل آب‌شستگی موضعی در یک پایهٔ پل در شرایط آب زلال بررسی شد. مدل‌ها شامل یک پایهٔ استوانه‌ای بدون شکاف و چهار پایهٔ استوانه‌ای شکاف‌دار، سه پایهٔ مستطیلی پیشانی گرد بدون شکاف و ۱۲ پایهٔ 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 پایهٔ 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 کلیهٔ مدل‌هایی که در این پژوهش تحت شرایط معین آب زلال آزمایش شده‌اند، حداکثر کاهش آب‌شستگی، به وسیلهٔ شکاف‌هایی با اندازهٔ دو برابر عرض (قطر) پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. کارایی شکاف در کنترل آب‌شستگی موضعی نیز برای یک پایهٔ مستطیلی پیشانی گرد بیشتر از یک پایهٔ استوانه‌ای، برای حالتی که قطر پایهٔ استوانه‌ای برابر عرض پایهٔ مستطیلی پیشانی گرد است، می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: *آب‌شستگی موضعی، پایهٔ پل، شکاف در پایهٔ پل*

مقدمه

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

۱. استادیار آبیاری، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

میانگین خسارت تخریب پل‌ها که بر ادارهٔ فدرال بـزرگراه‌هـای 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 دهانهٔ پل تخریب می‌شود، که دلیل عمدهٔ آن آب‌شستگی موضعی است. این امر، علاوه بر تحمیـل خسـارات فراوان، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل و غیره شده اسـت. بنابراین، شناخت این پدیده، پیش‌بینی میزان آن، و لحـاظ کـردن آن در طراحی پل‌ها، و مهم‌تر از همه به کار بردن تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی بسیار ضروری است.

آب‌شسـتگی موضعـی در اطـراف پایـه بـه دو صـورت آب‌شستگی بسـتر زنـده (Live-bed scour) و آب‌شسـتگی آب زلال (Clear-water scour) انجام می‌پذیرد. در آب‌شستگی بستر زنده، سرعت میانگین جریان (U) در بازهٔ بالادست پـل بیـش از سـرعت آسـتانهٔ حرکـت ذرات (Velocity of movement threshold) بستر (U_c) است، که در آن، عـلاوه بـر آب‌شسـتگی موضعی اطراف پایه، بستر بالادسـت نـیز فرسـایش کلـی یافتـه، ذرات بستر به داخل حفرهٔ آب‌شستگی وارد شده و باعث کاهش عمـق آب‌شسـتگی می‌شـود (۱۹). در آب‌شسـتگی آب زلال، سرعت میانگین جریان کمـتر از سـرعت آسـتانهٔ حرکـت ذرات بستر است، و در بالادست پایـه، هیـچ گونـه فرسایشـی وجـود ندارد و تنها در موضع اطـراف پایـه، حفـرهٔ آب‌شسـتگی ایجـاد می‌شود که البته این در صورتی است که هیچ نوع فـرم بسـتری در سطح بستر تشکیل نشود.

عمق آب‌شسـتگی موضعـی معمـولاً بـه دو صـورت عمـق آب‌شستگی متعادل و عمق آب‌شستگی بیشـینه (حداکـثر) بیـان می‌شود. عمق آب‌شستگی بیشینه در شرایط آب زلال در حـالتی به وجود می‌آید که سرعت برشی (U_*) و یا سـرعت میـانگین جریان (U) در بالادست پایهٔ پل برابـر و یـا نزدیـک بـه مقـادیر سرعت برشی بحرانی و یا سرعت بحرانی باشـد، و تحـت ایـن شرایط میزان آب‌شستگی از نظر زمانی بـه تعـادل رسـیده و یـا نـهایی شـده و بـه مقـدار بیشـینه خـود می‌رسـد. ولـی عمـق آب‌شستگی متعادل به عمقی گفته می‌شود که تحت هر شـرایطی از نظر زمانی به مقدار نهایی یا بیشینه خود رسیده باشد.

بالا بردن مقاومت مواد بسـتر در مقـابل فرسـایش و کـاهش قدرت فرسایش، دو روشی هسـتند کـه بـرای کنـترل و کـاهش آب‌شستگی موضعی استفاده می‌شوند. بالا بـردن مقـاومت مـواد بستر معمولاً با قرار دادن لایهٔ سنگ‌چین به همراه فیلتر یا بـدون آن در پیرامون پایهٔ پل صورت مـی‌گیـرد (۷). تورهـای گابیـون فلزی یا تورهای بافته شده از شاخه‌های درخت بید و پر کـردن آنها با سنگ در اطراف پایه در بسیاری از پل‌ها استفاده شده، کـه از آن جملـه می‌تـوان بـه پل‌هـای سـاخته شـده روی رودخانـهٔ می‌سی‌سـی‌پی اشـاره کـرد (۱۸). در روش کـاهش قـدرت فرسایش، برخـی طراحـان اسـتفاده از یـک صفحـهٔ گسـترده بـا ضخامت کم در اطراف پایه و روی بستر را، که اصطلاحاً طوقـه (Collar) گفته می‌شود، برای مقابلـه بـا جریـان رو بـه پـایین و تشکیل گرداب نعل اسبی توصیه می‌کنند. اخیراً بهره بـرداری از شکاف در پایه بـه منظـور کـاهش اثـر جریـان رو بـه پـایین در آب‌شستگی موضعی پایهٔ پل پیشنهاد شده است.

شیلدز (Shields) نخستین فردی بود که بررسی‌های بنیـادی را در مورد حرکت آغازین یا شروع حرکت ذرات رسوب انجام داد (۲). دیاگرام شیلدز را که هندرسون (به نقل از ۱۷) اصـلاح کرده، یکی از راه‌های مؤثر برای محاسبهٔ شرایط آسـتانهٔ حرکـت در رسوب با دانه‌بندی یک‌نواخت اسـت. چـابرت و انگلدینـگر (به نقل از ٦) یـک برنامـهٔ وسـیع انـدازه‌گیـری را روی مفـاهیم مختلف آب‌شستگی موضعی اطراف پایه انجام دادند. هانگ (بـه نقل از ٦) توزیع فشار و سرعت نزدیک یک پایـهٔ سـیلندری در کانال باز را تشریح کـرد. بیکـر (۵) بـا انجـام کـار تحلیلـی کـه گرداب نعل اسبی آرام و آشفته را تشریح کرده بود، سـعی کـرد که رابطه‌ای میان عمق آب‌شستگی متعادل و پارامترهای جریـان در شرایط آب زلال ارائه دهد. جین و فیشر (۱۲) بـا توجـه بـه آنالیز ابعادی، رابطه‌ای را برای عمق آب‌شستگی در سـرعت‌های زیاد ارائه دادند. جین (۱۱) بـا مـرور بررسـی‌های انجـام شـده، رابطه‌ای را برای عمـق آب‌شسـتگی بیـان کـرد. ملویـل (۱۵) و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

ملویل و سادرلند (۱۷) روابطی را برای محاسبهٔ سرعت برشی آستانهٔ حرکت (U_{*c}) با توجه به اندازهٔ d_{50} (قطر ذره‌ای که ۵۰٪ ذرات از نظر وزنی از آن کمتر باشد) ارائه کردند. متغیرهای اصلی، سرعت، قطر پایه، عمق جریان و اندازهٔ 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 محاسبهٔ بیشینهٔ عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده ارائه کرد (۲۰). ملویل و چیو (۱۶) رابطهٔ کاملی از پیشرفت زمانی عمق آب‌شستگی برای پایه‌های استوانه‌ای ارائه کردند. از آن جا که رابطهٔ ملویل و چیو (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 بیشینهٔ عمق آب‌شستگی از روابط زیر استفاده شد.

$$d_{se} = k_{yb} k_i k_d \qquad [۱]$$

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

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

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

$$k_i = \begin{cases} \frac{U}{U_c} & \frac{U}{U_c} \le ۱ \\ ۱ & \frac{U}{U_c} > ۱ \end{cases} \qquad [۲]$$

در رابطهٔ فوق، b قطر پایه، y عمق جریان، d_{50} قطر میانگین ذرات رسوب، U سرعت میانگین جریان و U_c سرعت جریان در آستانهٔ حرکت ذرات رسوب هستند. تغییرات عمق آب‌شستگی (d_s) برحسب زمان به صورت تابعی نمایی پیشنهاد شده است:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left\{-0.03\left|\frac{U_c}{U}\ln\left(\frac{t}{t_e}\right)\right|^{1.6}\right\} \qquad [۳]$$

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

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

[٤]

و برای محاسبهٔ بیشینهٔ عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{d_{se}}{y} = k_3 (\frac{y}{b})^{-0.65} (\frac{U}{\sqrt{gy}})^{0.43} \qquad [۵]$$

که در آن k_3 تقریباً برابر۱/۲ 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 رابطهٔ نظرالاسلام و همکاران (به نقل از ۳) با دقت بهتری می‌تواند تغییرات زمانی آب‌شستگی را در پایه‌ها تخمین بزند. این رابطه به شکل زیر است:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left[\sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right)\right]^m \qquad [٦]$$

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

$$m = 0.35\left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{0.87}\left(\frac{y}{b}\right)^{0.25} \qquad [۷]$$

تلاش‌های زیادی در زمینهٔ کاربرد روش‌هایی برای کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌ها به وسیلهٔ پژوهندگان انجام یافته

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

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 (۱٤) 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 (۱٤) 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 پایهٔ شکاف‌دار به مقدار آن در پایهٔ بدون شکاف به صورت تابعی از "عرض شکاف به قطر پایه" و" ارتفاع شکاف به عمق جریان" بیان شد. بابار و همکاران (٤) 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 پایهٔ بدون شکاف را به صورت تابعی از "عرض شکاف به قطر پایه" و "ارتفاع شکاف به عمق جریان" بیان کردند.

استفاده ازشکاف برای کنترل آب‌شستگی سابقهٔ 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 زمینهٔ کارایی شکاف در پایه‌های استوانه‌ای (Circular pier) صورت گرفته است، ولی تاکنون مطالعه‌ای در مورد تأثیر شکاف در پایهٔ مستطیلی پیشانی گرد (Round-noused pier) بررسی نشده است. در پژوهش حاضر اثر شکاف در کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی، با انجام آزمایش‌های گسترده روی پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی پیشانی گرد و مقایسهٔ تغییرات زمانی آب‌شستگی و بیشینهٔ آب‌شستگی موضعی، در شرایط آب‌شستگی آب زلال، بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

کلیهٔ بررسی‌های آزمایشگاهی این پژوهش در کانالی به طول ۷ متر، عرض ۰/۳۲ متر و ارتفاع ۰/۳٦ متر صورت گرفته است. دیواره و کف کانال از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. کف کانال بجز در یک محدودهٔ یک متری بالادست، وسط و انتهای کانال به وسیلهٔ سکوهای فلزی بالا آورده شد. محدودهٔ یک متری ابتدای کانال، نقش حوضچهٔ آرامش را برای جریان خروجی از لولهٔ انتقال آب داشت، و محدودهٔ یک متری در انتهای کانال برای جمع آوری رسوب فرسایش یافته در نظر گرفته شد. منطقهٔ انجام آزمایش‌ها، شامل محدودهٔ یک متری وسط کانال بود. مدل پایه در فاصلهٔ ٤۰ سانتی‌متر از بالادست و ٦۰ سانتی‌متر از پایین دست این محدوده کار گذاشته شد. منطقهٔ انجام آزمایش به وسیلهٔ مصالح غیر چسبندهٔ ماسه‌ای با d_{50} برابر ٠/٦١ میلی‌متر، انحراف معیار هندسی برابر ۱/۲۳ و چگالی نسبی برابر با ۲/٦٥ پر شد. به منظور هماهنگ کردن ضریب زبری در محدودهٔ آزمایش و بالادست و پایین دست آن، سطح سکوهای فلزی با مصالح استفاده شده در منطقهٔ انجام آزمایش پوشانده شد. این کانال به وسیلهٔ پمپی با حداکثر دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شد. تنظیم دبی خروجی از موتور پمپ به وسیلهٔ شیر تنظیم تعبیه شده قبل از دهانهٔ 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

آب پس از عبور از کانال، به یک مخزن انـدازه‌گیـری دبـی وارد می‌شـد کـه در آن ارتفـاع آب بـه کمـک پیزومـتر نصـب شـده مشخص، و دبی به روش حجم- زمان اندازه‌گیـری مـی‌گردیـد. برای انـدازه‌گیـری عمـق آب‌شسـتگی و عمـق جریـان از یـک عمق‌سنج با دقت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. عمق‌سنج روی ریلی در جهت عرضی و طولی کانال حرکت می‌کرد. شـکل ۱ نمـایی از کانال استفاده شده در آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های مدل‌های آزمایشگاهی

مدل‌های استفاده شده شـامل یـک مـدل پایـهٔ اسـتوانه‌ای بـدون شکاف، سه مدل مستطیلی پیشانی گرد بدون شـکاف (بـا ابعـاد مختلف)، چهار مدل استوانه‌ای شکاف‌دار و ۱۲ مـدل مسـتطیلی پیشانی گرد شکاف‌دار (با موقعیت‌ها و ابعـاد مختلـف شـکاف) بود. مدل استوانه‌ای بدون شکاف از لولـهٔ فـولادی بـه قطـر۳/۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر سـاخته شد. مدل‌هـای مسـتطیلی پیشـانی گرد دارای طـول (در جـهت جریان) برابر ٦ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۲ سـانتی‌متر بودنـد و عرض پایه‌ها (عمود بر جریان) برابر قطر پایهٔ اسـتوانه‌ای، یعنـی ۳/۲ سانتی‌متر اختیار شد. شکل ۲ مدل‌های پایهٔ بدون شـکاف را نشان می‌دهد.

با توجه به این که بررسی اندازه و نـیز موقعیـت شـکاف در پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی پیشانی گرد مـورد نظـر بـود، دو نوع شکاف مستطیلی شکل با ارتفاع‌های برابر عرض پایـه (۳/۲ سانتی‌متر) و دو برابر عرض پایه (٦/٤ سانتی‌متر) و عرض برابـر با ۰/۲۵ عرض پایه (۰/۸ سانتی‌متر) در نظر گرفته شـد. ایـن دو نوع شکاف در هر پایه در دو موقعیت نزدیـک بسـتر و نزدیـک سطح آب بررسی شد. شکاف‌ها به گونه‌ای قرار گرفته بودند کـه هیچ نوع انحرافی از راستای جهت جریان و نیز از امتداد طولـی پایه‌ها نداشتند. به این ترتیب، به ازای هـر مـدل بـدون شـکاف چهار مدل شکاف‌دار ساخته شد که چهار نـوع شـکاف بـه کـار رفته در آنها عبارت بود از: شـکاف بـزرگ (ارتفـاع شـکاف دو برابر عرض پایه) نزدیک بستر، شکاف کوچک (ارتفـاع شـکاف برابر با عرض پایه) نزدیک بستر، شکاف بـزرگ نزدیـک سـطح آب و شکاف کوچک نزدیـک سـطح آب. شـکل ۳ موقعیـت و ابعاد شکاف‌ها را در مدل‌های شکاف‌دار نشان می‌دهد.

انتخاب پارامترها و ابعاد مدل

عرض پایه: برای پرهیز از اثر جریان جانبی بـه وسـیلهٔ دیواره‌هـا روی آب‌شستگی موضعی اطراف پایـه، رودکیـوی و اتمـا (۲۰) حداکثر نسـبت عـرض پایـه بـه عـرض کانـال را ۱:٦/۲۵ بیـان کرده‌اند. در این پژوهش، برای اطمینان بیشتر، ایـن نسـبت ۱:۱۰ در نظر گرفته شـد. بنـابراین، عـرض (قطـر) پایـه (b)، در کلیـهٔ حالات ۳۲ میلی‌متر انتخاب شد.

اندازه و یک‌نواختی ذرات: برای جلوگیری از ایجاد پدیدهٔ ریپـل (Ripple)، میانگین اندازهٔ ذرات بـاید از ۰/٦ میلی‌مـتر بـزرگ‌تـر باشد (d_{50}>۰/٦ mm) (۲۰). ضمناً برای حذف تأثیر اندازهٔ ذرات بر عمق آب‌شستگی موضعی، نسبت قطر پایه به میانگین انـدازهٔ ذرات باید بیشتر از ۵۰ باشد (۱۹). به این ترتیب اندازهٔ میـانگین ذرات رسوب استفاده شده باید در شرایط زیر صادق باشد:

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

$$\Rightarrow 0.6\,\text{mm} < d_{50} < 0.64\,\text{mm} \qquad [۸]$$

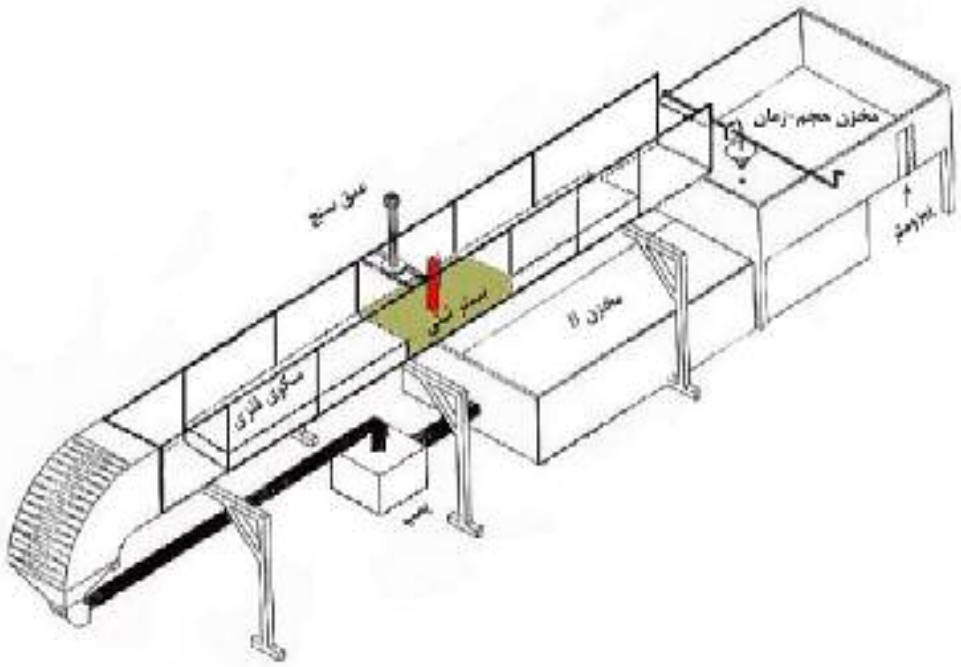
هـم‌چنیـن، بـرای حـذف اثـر غـیر یک‌نواختـی ذرات بـر آب‌شستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسـی ذرات (σ_g) کوچک‌تـر از ۱/۳ باشـد (۲۰). در ایـن پژوهـش، از ماسـه ریخته‌گری گرد گوشه با دانه‌بندی یک‌نواخت و چگالـی نسـبی $G_S = 2.65$، $d_{50} = 0.61\,\text{mm}$ و $\sigma_g = 1.23$ استفاده شد، کـه خصوصیات آن در معیارهای بیان شده صدق می‌کند.

ضخامت مصالح بستر: با توجه به بیشینهٔ عمق آب‌شسـتگی برابـر ۲/٤b، یعنی ۷/۷ سـانتی‌متر، و بـا احتسـاب ۳۰ درصـد افزایـش احتمالی آن، ضخامت مصالح بسـتر ۱۰ سـانتی‌متر انتخـاب شـد (۱٦).

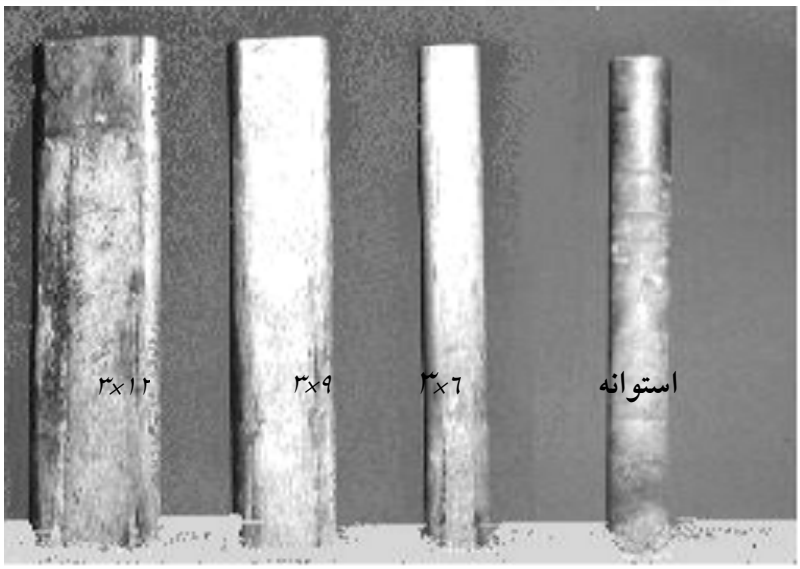
عمق و سرعت جریان: با توجه به این که آب‌شستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی می‌شود باید $U \le U_c$ باشد. بر اساس

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



شکل ۱. نمایی از کانال مورد استفاده در آزمایشگاه



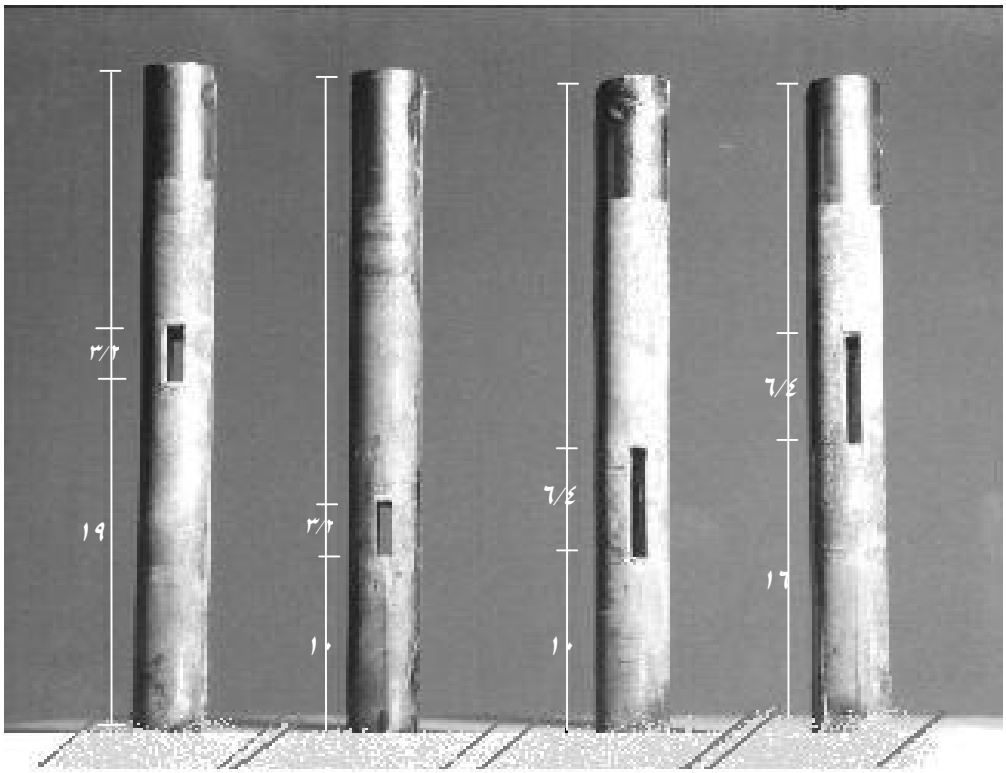
شکل ۲. مدل‌های بدون شکاف

بررسی‌های رودکیوی (۱۹) شرایط آب‌شستگی آب زلال در $U \le 0.95U_c$ برقرار می‌شود. ولی بیشینهٔ 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 نظر گرفته می‌شود که شرایط $U = 0.95U_c$ به صورت زیر برقرار شود:

$$d_{50} = 0.61\,\text{mm} \Rightarrow U_{*c} = 0.0115 + 0.0125(d_{50})^{1.4}$$
$$= 0.017\,\text{m/s}\ ,\quad y_\circ = 12\,\text{cm} \Rightarrow U = 0.286\,\text{m/s}$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



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

$$U_c = 5.75\, U_{*c} \log(5.53 \frac{y_\circ}{d_{50}}) = 0.309\,\mathrm{m/s} \qquad [۹]$$

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

این مقدار نزدیک به معیار ۰/۹۵ است. تخمین عمق جریان در شرایط بحرانی با کاهش تدریجی عمق جریان به وسیلهٔ 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 نظریهٔ دتیز (به نقل از ٦)، میزان عمق آب‌شستگی با نسبت $y_\circ / b$ افزایش می‌یابد، ولی برای $y_\circ / b > (1-3)$ ثابت است. بیشتر پژوهندگان دیگر نیز به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی $y_\circ / b > (1-3)$ 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.

مدت زمان انجام آزمایش: مدت زمان انجام آزمایش‌ها برابر معیار کومار و همکاران (١٤) انتخاب شد، که عبارت است از مدت زمانی از آغاز آزمایش که پس از آن تغییرات عمق آب‌شستگی در یک دورهٔ 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 کنارهٔ پایه‌ها، و پس از آن در جلوی پایه‌ها و با فاصلهٔ چند میلی‌متری از پایه بوده است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

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

انواع مدل پایه	استوانه‌ای		مستطیلی ۳×۶		مستطیلی ۳×۹		مستطیلی۳×۱۲	
	t_e (min)	d_{se} (mm)	t_e (min)	d_{se} (mm)	t_e (min)	d_{se} (mm)	t_e (min)	d_{se} (mm)
شکاف بزرگ بالا	۱۰۸۰	۷	٤۸۰	۵/۹	٤۲۰	۵/۸۵	۷۸۰	۵/۸
شکاف کوچک بالا	۱۰۸۰	۷	٤۸۰	٦/۰۵	٤۲۰	۵/۷	۷۸۰	٦/۳
شکاف بزرگ بستر	۱۰۸۰	٦/۳	٤۸۰	۵/۳	٤۲۰	۵/۲۵	۷۸۰	۵/٦
شکاف کوچک بستر	۱۰۸۰	٦/۷	٤۸۰	۵/۷	٤۲۰	۵/٦	۷۸۰	۵/٦
بدون شکاف	۱۰۸۰	۷	٤۸۰	٦/۵	٤۲۰	٦/۱۰	۷۸۰	٦/۳

نتایج و بحث

تغییرات زمانی آب‌شستگی

۱. پایه استوانه‌ای

شکل ٤ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در پایهٔ استوانه‌ای نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است، منحنی شکاف بزرگ بستر با فاصلهٔ نسبتاً زیادی از منحنی‌های دیگر قرار دارد. در این شکل، نتایج به دست آمده از بررسی‌های ملویل و چیو (١٦) به منظور مقایسه آورده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که منحنی ملویل و چیو با منحنی پایهٔ 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 پایهٔ بدون شکاف بسیار نزدیک هم هستند. همان گونه که شکل نشان می‌دهد، بیشینهٔ عمق آب‌شستگی در پایهٔ بدون شکاف، و برابر ۱/۹۸b است.

۲. پایهٔ مستطیلی ٦×۳

شکل ۵ تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در اطراف پایهٔ مستطیلی ٦×۳ 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 $t=۰/۵t_e$ عمق آب‌شستگی برای شکاف بزرگ نزدیک بستر برابر ۱/٦۰b، و برای شکاف کوچک نزدیک بستر، شکاف بزرگ بالا و شکاف کوچک بالا و بدون شکاف به ترتیب ۱/۷۰b، ۱/۷۵b، ۱/۸۰b و ۱/۹۵b است.

۳. پایهٔ مستطیلی ۳×۹

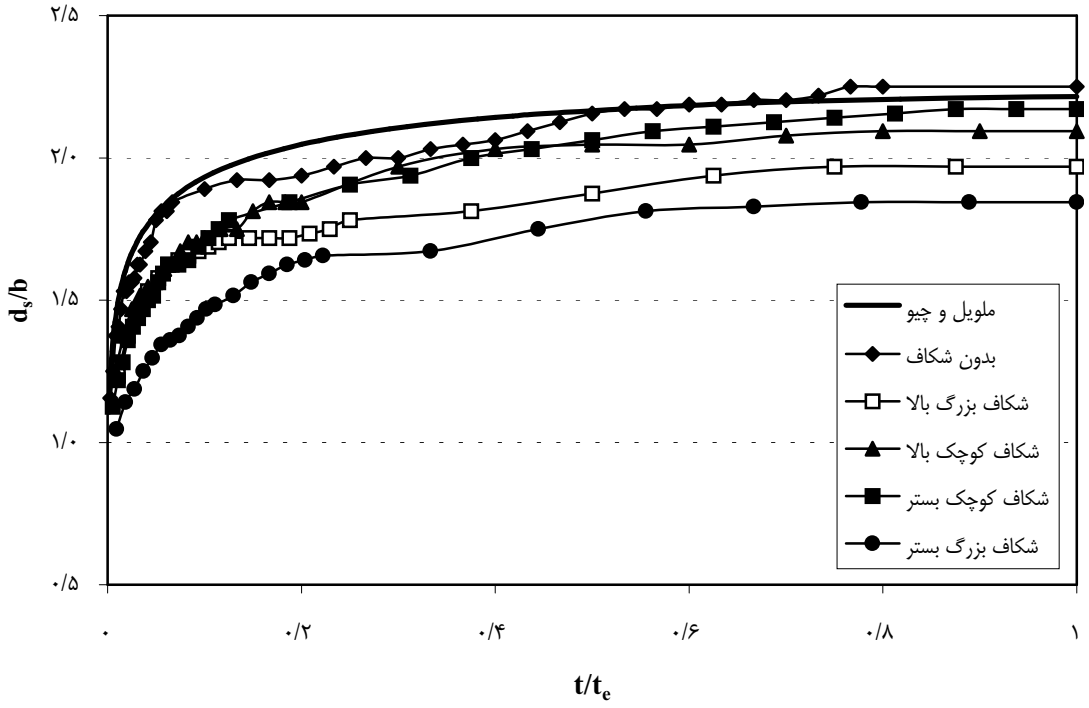
شکل ٦ تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی را نسبت به زمان برای پایهٔ مستطیلی ۳×۹ نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی مربوط به پایهٔ بدون شکاف است، و از منحنی‌های پایه‌های شکاف‌دار فاصله دارد. پس از آن، منحنی‌های شکاف بزرگ بالای بستر و شکاف کوچک بالای بستر است که تقریباً برهم منطبق‌اند، و سپس منحنی شکاف کوچک نزدیک بستر قرار دارد. مطابق پایهٔ استوانه‌ای و پایهٔ مستطیلی ٦×۳، شکاف بزرگ نزدیک بستر بیشترین کاهش آب‌شستگی را نشان می‌دهد، و منحنی مربوط به آن از منحنی‌های دیگر فاصلهٔ خوبی دارد. بیشینهٔ عمق آب‌شستگی مربوط به پایهٔ 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 ۱/٦b است.

٤. پایهٔ مستطیلی ۱۲×۳

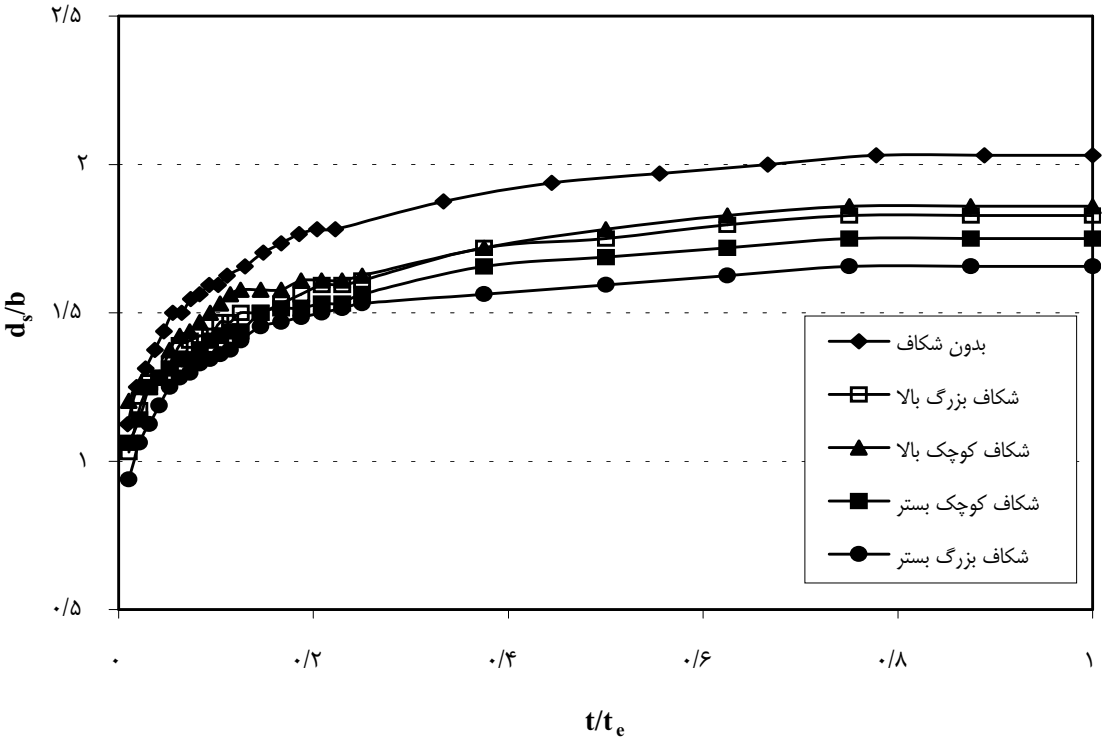
شکل ۷ تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی را نسبت به زمان برای پایهٔ مستطیلی ۱۲×۳ نشان می‌دهد. همان گونه که شکل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



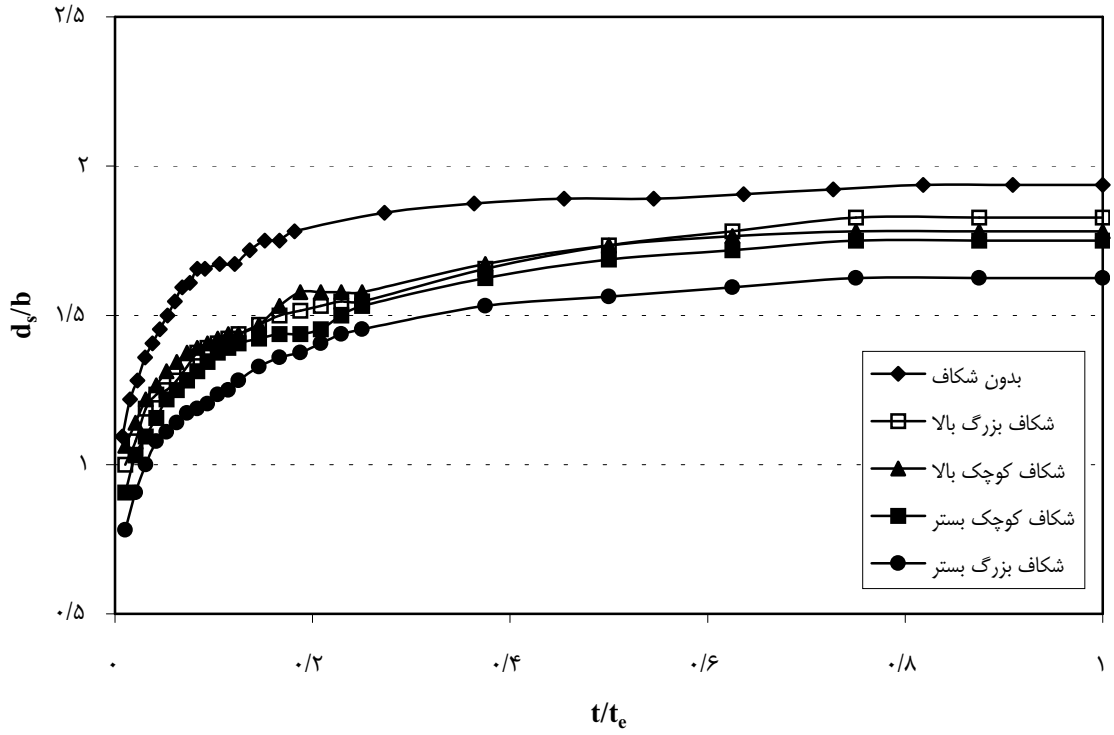
شکل ٤. تغییرات عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در پایهٔ استوانه‌ای



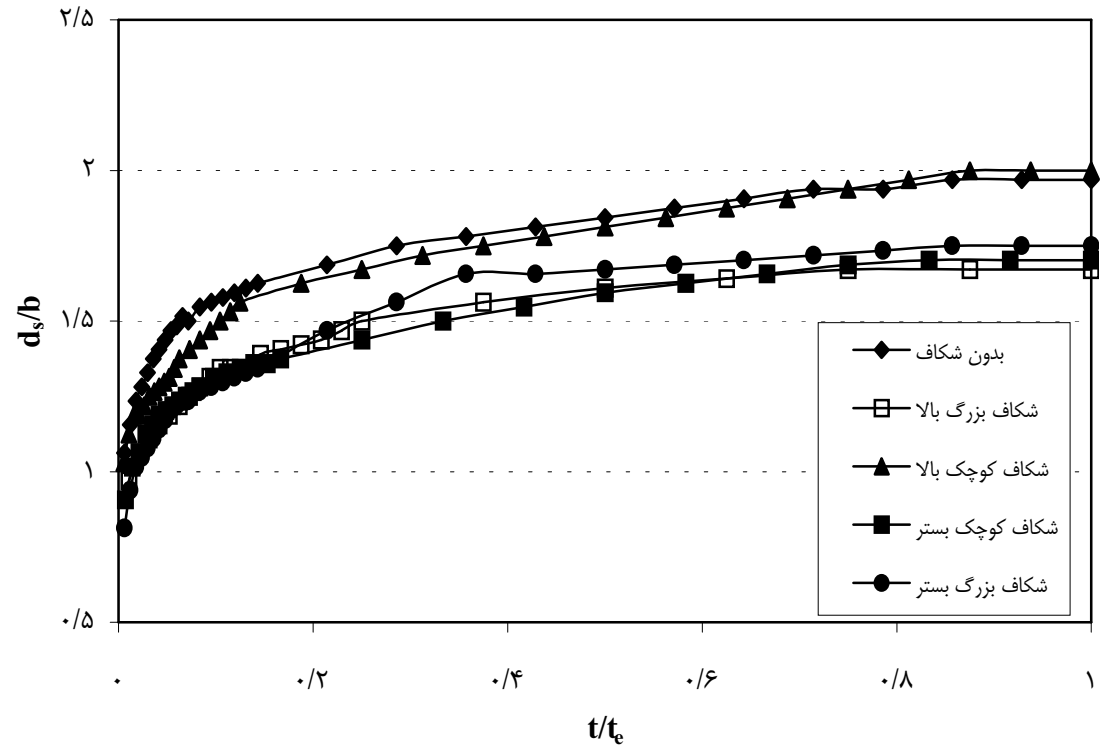
شکل ۵. تغییرات عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در پایهٔ مستطیلی ٦×۳

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



شکل ٦. تغییرات عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در پایهٔ مستطیلی ۹×۳



شکل ۷. تغییرات عمق آب‌شستگی به زمان در پایهٔ مستطیلی ۱۲×۳

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

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. بیشینهٔ 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 ۱/٦۷b است.

کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیلهٔ 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 نعل اسبی 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 چیو (۷) نیز این مسئله را تأیید می‌کند.

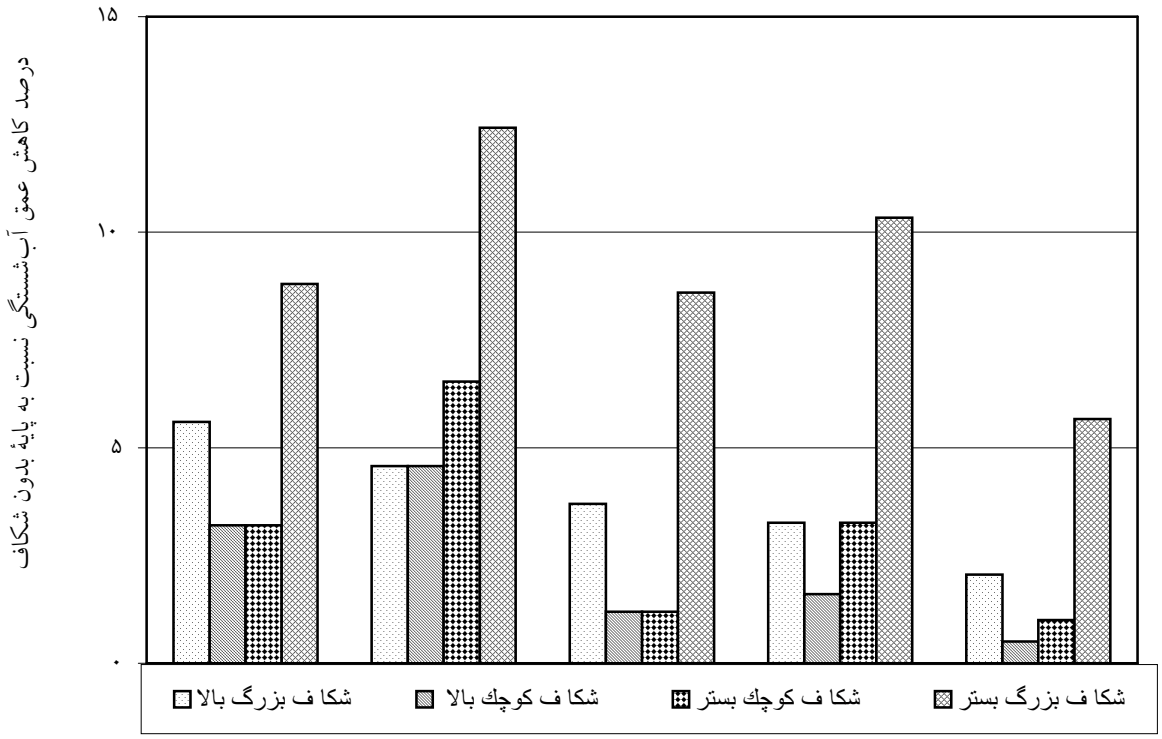
۱. پایهٔ استوانه‌ای

شکل ۸، نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیلهٔ شکاف را در پایهٔ 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 کاهشی در حدود ٦ 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 کاهشی به میزان ۲، ۱ و ۰/۵ درصد در عمق آب‌شستگی در زمان نهایی شده‌اند، که این درصدها در دو ساعت اولیهٔ آب‌شستگی به ترتیب برابر با ۳، ٤ 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.

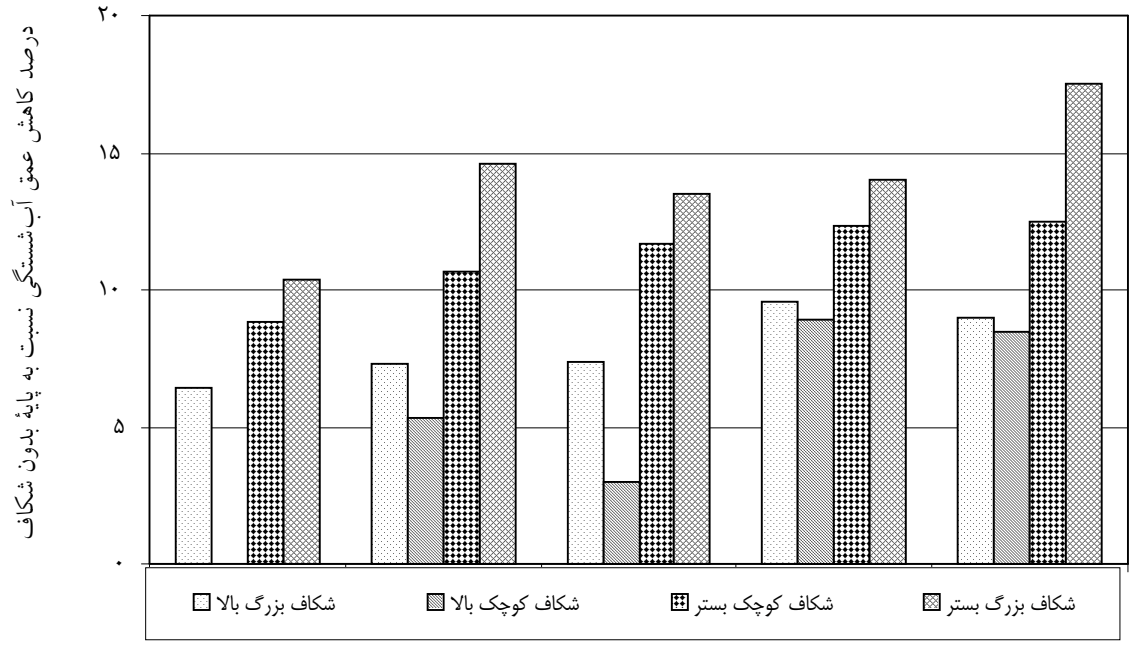
ولی نتایج بابار و همکاران (٤) روی پایه‌های استوانه‌ای به قطر ۸ سانتی‌متر، نشان می‌دهد که شکاف‌هایی با عرض برابر یک چهارم قطر پایه و با ارتفاع‌هایی بین ۰/۵ تا ۲/۵ برابر قطر پایه، کاهشی در حدود ٦۰ درصد در حداکثر آب‌شستگی را به وجود آورده‌اند. هم‌چنین، پژوهش‌های چیو (۷) در بهره برداری از شکاف در پایه‌های استوانه‌ای نشان داد که به کار بردن شکاف با قطر برابر یک چهارم قطر پایه، ۲۰ درصد کاهش در آب‌شستگی پایهٔ استوانه‌ای به وجود آورده است. کومار و همکاران (۱٤) نیز شکاف‌هایی با طول‌های مختلف را به منظور کاهش در عمق آب‌شستگی پایه‌های استوانه‌ای به کار بردند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



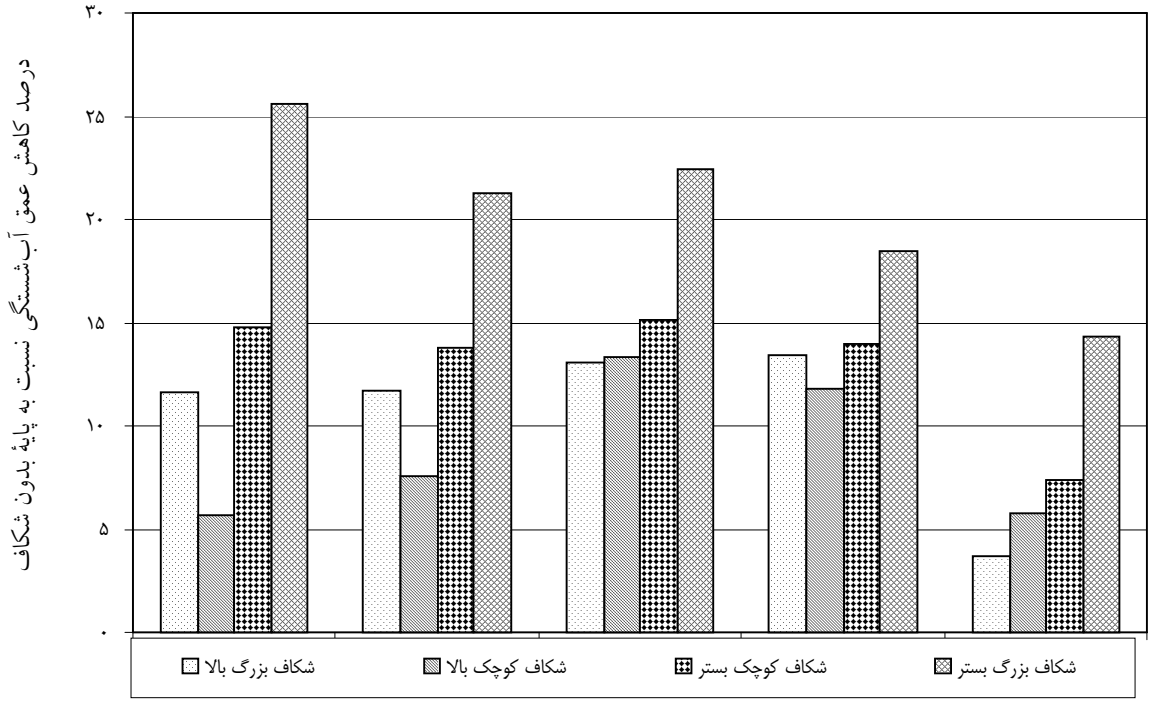
شکل ۸. درصد کاهش عمق آب‌شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایهٔ استوانه‌ای



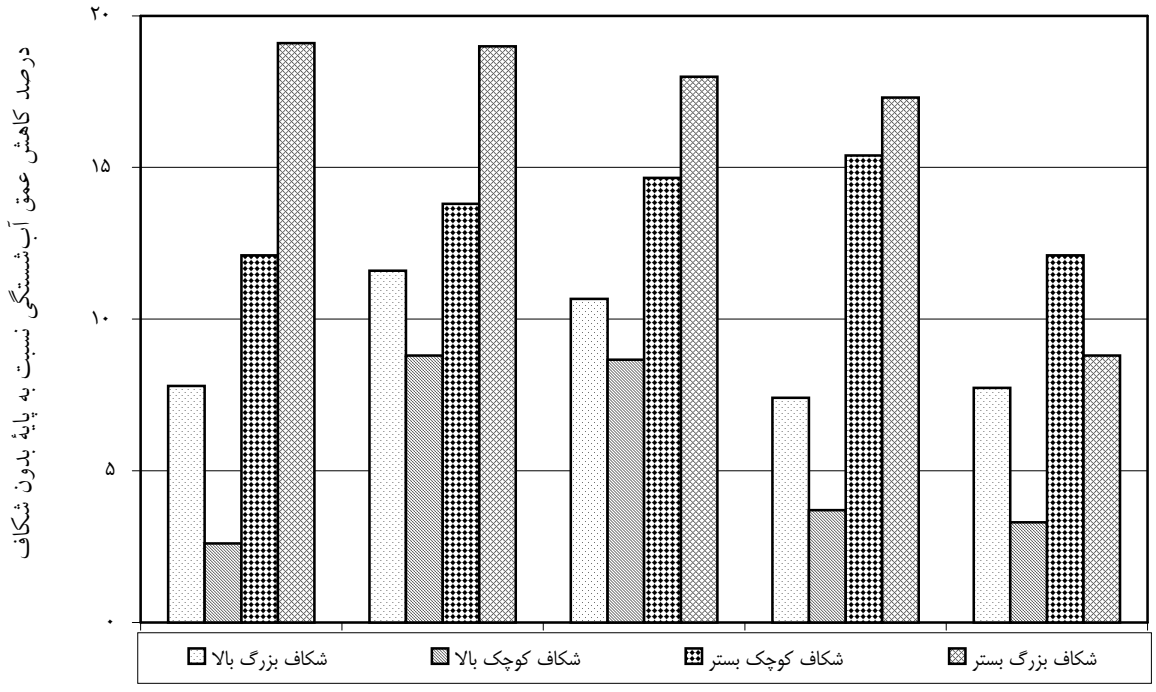
شکل ۹. درصد کاهش عمق آب‌شستگی بالادست، به ترتیب از چپ به راست در زمان‌های ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت و زمان نهایی (تعادلی) در پایهٔ مستطیلی ۶×۳

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]



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 پایهٔ مستطیلی ۹×۳



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 پایهٔ مستطیلی ۱۲×۳

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

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

۲. پایهٔ مستطیلی۶×۳

شکل ۹ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی به وسیلهٔ شکاف را در پایهٔ مستطیلی۶×۳ 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 پایهٔ مستطیلی ۶×۳ بهتر از پایهٔ استوانه‌ای عمل کرده‌اند.

۳. پایهٔ مستطیلی ۹×۳

شکل۱۰ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی در پایهٔ مستطیلی ۹×۳ 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 پایهٔ مستطیلی ۶×۳ و پایهٔ استوانه‌ای عمل کرده است.

۴. پایهٔ مستطیلی ۱۲× ۳

شکل ۱۱ نتایج مربوط به درصد کاهش عمق آب‌شستگی موضعی را در پایهٔ مستطیلی ۱۲×۳ 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 پایهٔ ۹×۳ می‌باشد، و شکاف‌های بالای بستر در این پایه نیز دارای رفتاری بسیار متفاوت با پایهٔ ۹×۳ هستند، که ممکن است به خاطر طول زیاد این پایه نسبت به پایه ۹×۳ باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کارایی شکاف در کاهش عمق آب‌شستگی در اطراف پایهٔ 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]

منابع مورد استفاده

۱. زراتی، ا. و م. عزیزی. ۱۳۷٦. روش‌های محافظت پایهٔ 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، دانشکدهٔ 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 Thechnology, 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.2.5]