

Experimental Study of the Effect of Mining Materials Downstream of Bridge Pier on Scour Profile with Optimizing Distance Approach

Amin Koohsari¹ | Mehdi Hamidi^{*2}

1. M.Sc. Graduate of Water Engineering and Hydraulic Structures, Babol Noshirvani University of Technology.
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Babol Noshirvani University of Technology. E-mail: hamidi@nit.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 08.16.2021
Revised: 11.30.2021
Accepted: 12.17.2021

Keywords:
Cylindrical Bridge Pier,
Longitudinal Profile of the
Hole,
Mining Material,
Scour Depth,
Turbulent Flow

ABSTRACT

Background and Objectives: Human encroachment in rivers, such as the construction of a structure (bridge) or deformation of the bed, has affected its natural flow, which leads to the phenomenon of scouring and the creation of holes in the natural bed river. After deformation of the bed due to sedimentation and erosion, these holes can move in the longitudinal direction of the river and cause various damages to the structures and facilities in the riverbed as well as the bridge pier. Bridges are one of the most important access structures whose failure has irreparable social effects, so the effect of mining material holes on the bridge piers can be very important. The extension of mining material holes along the riverbed and its movement towards the bridge piers and accompanied by the scouring phenomenon and turbulent flows formed around the piers causes the destructive effect of erosion and overturning of the pier. Therefore, in this study, the effect of mining material downstream of the cylindrical bridge pier on the surrounding scour profiles is investigated with changes in the depth and distance of the mining material hole from the pier.

Materials and Methods: For this purpose, on an experimental model and in clear water conditions and constant flow, changes in the profile of the hole and the effect of the depth of the hole and its distance from the pier to the scour profile around the bridge pier were evaluated, by mining holes with $H/D=0.8, 1.6$ (ratio of hole depth to pier diameter) and with $I/D=10, 20, 30$ (ratio of hole distance from pier to pier diameter) downstream in sediment bed with depth 0.1 meters.

Results: The results of experimental observations showed that in the case without mining hole, the lowest maximum scour depth related to the experiment was obtained with a Froude number of 0.26 at 9 mm; While the highest maximum scour depth was related to the experiment with a Froude number of 0.46 of 60 mm. Compared to the case without a mining hole at the Froude number of 0.43, the lowest maximum increase in scour depth in the hole harvesting experiment was with $H/D=0.8$ and at $I/D=20$ by 8%. While the highest increase in maximum scour depth in the experiment with hole removal was 26% with $H/D=1.6$ and $I/D=10$. In order to find the optimal distance for mining materials downstream, experiments with $I/D=30$ show the maximum values of scour depth equal to the case without mining material holes. Therefore, by increasing the distance from the pier $I/D=10, 20$, and then 30, the maximum increase in scour depth compared to the case without a mining hole decreased from 26% to 15% and then to zero%.

Conclusion: According to the results, it is possible to comprehend that mining material from the channel bed downstream, affects the amount of scour depth and increases it, and by increasing the mining hole depth and reducing its distance to the pier, the scour depth around the pier increased. Also, in order to predict the maximum scour depth, relationships in the case without mining hole and also for the case with it have been proposed using the obtained data based on regression analysis. The accuracy and also the scope of application of these relationships are mentioned with statistical indicators.

Cite this article: Koohsari, Amin, Hamidi, Mehdi. 2022. Experimental Study of the Effect of Mining Materials Downstream of Bridge Pier on Scour Profile with Optimizing Distance Approach. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28 (3), 1-26.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19400.3490

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مطالعه آزمایشگاهی اثر برداشت مصالح پایین دست پایه پل بر نیمرخ آب‌شستگی با رویکرد بهینه‌یابی فاصله

امین کوهساری^۱ | مهدی حمیدی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل. رایانامه: hamidi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: دست‌درازی انسان‌ها در رودخانه‌ها از جمله ساخت سازه (پل) و یا تغییر شکل بستر، بر جریان طبیعی آن اثر گذاشته که منجر به پدیده آب‌شستگی و ایجاد گودال‌هایی در بستر طبیعی رودخانه‌ها می‌شود. این حفره‌ها پس از تغییر شکل بستر در اثر رسوب‌گذاری و فرسایش می‌تواند تا فواصل طولانی در راستای طولی رودخانه گسترش پیدا کرده و آسیب‌های مختلفی بر سازه‌ها و تأسیسات موجود در بستر رودخانه‌ها همچون پایه‌های پل ایجاد نماید. پل‌ها از مهم‌ترین سازه‌های دسترسی بوده که خرابی آن‌ها اثرات جبران‌ناپذیر اجتماعی دارد، بنابراین اثر حفره‌های برداشت مصالح بر پایه‌های پل اهمیت زیادی می‌تواند داشته باشد. پیشروی حفره‌های برداشت مصالح در طول بستر رودخانه و حرکت آن به سمت پایه‌های پل و همراه شدن با پدیده آب‌شستگی و جریان‌های آشفته شکل‌گرفته در اطراف پایه‌ها، باعث ایجاد اثر مخرب فرسایش و واژگونی پایه می‌شود. از این رو در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی اثر برداشت مصالح در پایین‌دست پایه پل استوانه‌ای بر نیمرخ‌های آب‌شستگی اطراف آن با تغییرات عمق و فاصله حفره برداشت مصالح از پایه پرداخته می‌شود.
تاریخ دریافت: ۰۰/۰۵/۲۵ تاریخ ویرایش: ۰۰/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۲۶	واژه‌های کلیدی: برداشت مصالح، پایه پل استوانه‌ای، جریان آشفته، عمق آب‌شستگی، نیمرخ طولی حفره
	مواد و روش‌ها: برای این منظور در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط آب زلال و جریان دائمی، تغییرات نیمرخ حفره برداشت‌شده و میزان اثر عمق حفره و فاصله آن از پایه بر نیمرخ آب‌شستگی اطراف پایه پل، با برداشت حفره‌هایی با $H/D=1/6$ ، $0/8$ (نسبت عمق حفره به قطر پایه) و با $I/D=30$ ، 20 ، 10 (نسبت فاصله حفره از پایه به قطر پایه) در پایین‌دست پایه در بستر رسوبی با عمق $0/1$ متر ارزیابی گردید.
	یافته‌ها: نتایج مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، در حالت بدون حفره برداشت مصالح، کم‌ترین میزان بیشینه عمق آب‌شستگی مربوط به آزمایش با عدد فرود $0/26$ به میزان 9 میلی‌متر به دست آمد؛ درحالی‌که بیش‌ترین مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی مربوط به آزمایش با عدد فرود $0/46$ به میزان 60 میلی‌متر بود. در مقایسه با حالت بدون حفره در عدد فرود $0/43$ ، کم‌ترین میزان افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی در آزمایش با برداشت حفره با $H/D=0/8$ و در $I/D=20$ و به

مقدار ۸ درصد بوده است. درحالی‌که بیش‌ترین میزان افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی در آزمایش با برداشت حفره با $H/D=1/6$ و $I/D=10$ به مقدار ۲۶ درصد بوده است. به‌منظور یافتن فاصله بهینه برای برداشت مصالح پایین‌دست، آزمایش‌های با $I/D=30$ ، مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی برابر با حالت بدون برداشت مصالح را نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش فاصله از پایه از I/D برابر با ۱۰ به ۲۰ و سپس ۳۰، افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون حفره از ۲۶ درصد به ۱۵ درصد و سپس به صفر درصد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: با مشاهده کلی نتایج می‌توان دریافت برداشت مصالح از بستر کانال در پایین‌دست پایه، بر میزان عمق آب‌شستگی تأثیر گذاشته و مقدار آن افزایش پیدا کرد و با افزایش عمق حفره برداشت‌شده از بستر و نزدیک‌تر کردن فاصله آن به پایه، بر میزان عمق آب‌شستگی اطراف پایه افزوده شد. همچنین برای پیش‌بینی میزان بیشینه عمق آب‌شستگی، رابطه‌هایی در حالت بدون حفره برداشت و نیز برای حالت با حفره برداشت بر مبنای تحلیل رگرسیون با استفاده از داده‌های حاصل پیشنهاد گردیده است. دقت این روابط با شاخص‌های آماری بیان و دامنه کاربرد آن نیز ذکر گردیده است.

استناد: کوهساری، امین، حمیدی، مهدی (۱۴۰۰). مطالعه آزمایشگاهی اثر برداشت مصالح پایین‌دست پایه پل بر نیم‌رخ آب‌شستگی با رویکرد بهینه‌یابی فاصله. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۸ (۳)، ۱-۲۶.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19400.3490



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

بود، بررسی نمود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که تأثیر فاصله بین پایه‌ها در میزان عمق آب‌شستگی نسبت به عرض و قطر پایه‌ها به مراتب کم‌تر است و با ریزتر شدن مصالح، عمق آب‌شستگی بیش‌تر می‌شود (۱۸). رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی آب‌شستگی پایه‌های پل با مقطع استوانه‌ای در شرایط آب زلال انجام دادند. نتایج مشاهدات آن‌ها نشان داد که عمق آب‌شستگی به توزیع ذرات رسوبی در بستر، میانگین اندازه ذرات (d_{50}) و هم‌چنین نسبت عمق جریان به قطر پایه (y/D) وابسته است (۱۶). لی و همکاران (۲۰۰۴) به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و میدانی آب‌شستگی پایه پل پرداختند. ایشان دریافتند که هماهنگی هر چه بیش‌تر شکل پایه نسبت به خطوط جریان، به کاهش آب‌شستگی در اطراف آن پایه منجر می‌شود (۸). لی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی و عددی جایجایی حفره برداشت مصالح به شکل مثلثی در بستر متحرک و شرایط آب زلال پرداختند. ایشان مشاهده کردند در حالت آب زلال پس از برقراری جریان، حفره در بستر جایجا نشد اما پس از رسیدن به آب‌شستگی تعادلی، شیب بالادست حفره در زاویه بیش‌تری نسبت به شیب پایین دست حفره قرار گرفت. در حالت بستر متحرک شیب بالادست حفره به سمت پایین دست حرکت کرد اما در پایین دست آن فرسایش اتفاق افتاد (۹).

صانعی و همکاران (۲۰۱۱) به مطالعه آزمایشگاهی اثر برداشت شن و ماسه در بالادست و پایین دست پایه پل بر بیشینه عمق حفره آب‌شستگی پرداختند. ایشان با انجام آزمایش‌ها مشاهده کردند که برداشت مصالح از بالادست و پایین دست پایه پل، بیشینه عمق آب‌شستگی پایه را به ترتیب ۱۴ درصد کاهش و ۳۴ درصد افزایش داده است (۱۷). دسینه (۲۰۱۷) تأثیر انتقال حفره‌های برداشت مصالح در بسترهای رودخانه‌ای را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد.

بشر با ساخت سازه (پل) در مسیر رودخانه‌ها، بر روند طبیعی هیدرولیکی جریان اثر گذاشته که در صورت عدم طراحی و اجرای مناسب می‌تواند منجر به آسیب‌ها و خسارت‌های جبران‌ناپذیری شود. هم‌چنین برداشت بی‌رویه مصالح از رودخانه‌ها باعث به وجود آمدن حفره‌هایی در بستر رودخانه گردیده که ریخت‌شناسی^۱ بستر رودخانه‌ها را تغییر می‌دهد. پل‌ها یکی از پرکاربردترین سازه‌های ارتباطی به شمار می‌روند که یکی از دلایل مهم تخریب این سازه‌ها، وقوع پدیده آب‌شستگی در اطراف پایه‌های آن است. عبور جریان با سرعت زیاد در اطراف پایه‌های پل، جریان‌های آشفته را در اطراف آن ایجاد کرده و افزایش تنش برشی سطح آب و رسوب، شسته شدن مصالح در پیرامون این پایه‌ها را به دنبال دارد. برداشت مصالح در مجاورت سازه‌های احداث شده در رودخانه هم‌چون پایه‌های پل ممکن است موجب بروز آسیب به پایه پل و نهایتاً خسارات مالی و جانی ناشی از واژگونی آن گردد. بدین صورت هنگامی که جریان از روی یک حفره برداشت شده در پایین دست پل در بستر عبور می‌کند، باعث جدایش آن شده و جریان گردابه‌ای را به وجود آورده و باعث فرسایش بالادست حفره می‌شود. در نتیجه رسوبات حمل شده توسط جریان در پایین دست حفره ته‌نشین شده و باعث جایجایی بالادست حفره می‌گردد و حفره برداشت شده به سمت بالادست انتقال یافته و بر روی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل اثر می‌گذارد. مطالعاتی در زمینه آب‌شستگی پایه پل و هم‌چنین تأثیر برداشت مصالح بر میزان آب‌شستگی اطراف پایه انجام گرفته است که در ادامه مهم‌ترین این پژوهش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شن (۱۹۶۹) بیشینه میزان آب‌شستگی در شرایط آب زلال را در آزمایشگاه را با استفاده از مصالحی با دانه‌بندی متغیر که قطر متوسط آن بین ۰/۱۷ تا ۰/۶۸

آزمایش‌های ایشان نشان داد که برداشت مصالح در پایین‌دست گروه پایه باعث افزایش آب‌شستگی می‌گردد اما برداشت مصالح در بالادست گروه پایه کاهش آب‌شستگی را به دنبال دارد (۱۰).

حق‌نظر و همکاران (۲۰۱۹) در یک پژوهش آزمایشگاهی مکان مناسب برداشت حفره از بستر رودخانه و استخراج و بهره‌برداری آن را بررسی کردند. بدین منظور پس از بررسی دو حفره نتایج نشان داد که حرکت حفره پایین‌دست تأثیر معناداری بر حجم پرشدگی و مهاجرت حفره بالادست نداشت، اما با حرکت این حفره به سمت دیوار، حجم پرشدگی حفره بالادست تا ۲۵ درصد کاهش یافت (۴). لاد و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر حفره برداشت مصالح بر روی ریخت‌شناسی اطراف پایه استوانه‌ای شکل به صورت آزمایشگاهی پرداختند. بدین منظور یک حفره مستطیل شکل در بالادست دو پایه استوانه‌ای در بستر کانال آزمایشگاهی قرار داده شد. پس از بررسی نتایج مشاهده شد که در حالت با حفره، تنش‌های آشفته‌گی و سرعت متوسط در نزدیک بستر در بالادست پایه‌ها افزایش پیدا کرده است و هم‌چنین جریان برگشتی قوی و گردابه‌های نعل اسبی در بالادست پایه بالادست مشاهده شده است (۶). لاد و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی وضعیت تلاطم جریان در اطراف پایه پل با برداشت مصالح در بستر رسوبی کانال پرداختند. ایشان با بررسی نتایج مشاهده کردند در محلی که جریان از حفره برداشت‌شده از بستر عبور کرده و به پایه پل نزدیک شده بود، سرعت جریان در نزدیکی بستر، تنش برشی و تنش‌های رینولدز افزایش یافته است و هم‌چنین میزان گردابه‌های نعل اسبی در نزدیکی پایه بیش‌تر شد (۷). مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی شاخص‌های تأثیرگذار به‌منظور انتخاب موقعیت‌های مناسب برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. در پژوهش

آزمایش‌های ایشان در کانالی مستطیل شکل که دارای مصالح با دو دانه‌بندی با قطر متوسط ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر، برای دو پایه استوانه‌ای با قطر ۳ سانتی‌متر و پایه ترکیبی از مستطیل و مثلث با نسبت طول به عرض ۳ اجرا شد. هم‌چنین حفره‌هایی به طول و عرض ۰/۲۲ و ۰/۳ متر و با ارتفاع‌های ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ در بستر رسوبی برداشت شد و اثر آن‌ها بر آب‌شستگی پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مشاهدات او نشان داد که در حالت کلی زاویه ایستایی مصالح داخل آب بیش‌ترین اثر و نسبت بی‌بعد عمق حفره به عمق آب کم‌ترین اثر را در حالت‌های بدون حضور پایه‌های پل و پایه پل استوانه‌ای شکل دارد (۳). دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی آزمایشگاهی حداکثر عمق و طول گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. این آزمایش در کانالی به شکل مستطیل انجام و در بستر این کانال حفره‌های با ابعاد مشخص قرار گرفت و مصالحی با دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ انتخاب شد. با بررسی آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که با به وجود آوردن جریان در گودال‌ها و کاهش عمق آن‌ها، نسبت طول و عرض گودال به عمق جریان افزایش می‌یابد و هم‌چنین باعث کاهش نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان می‌شود. آن‌ها نشان دادند که نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان، بیش‌ترین تأثیر را در کاهش عمق و طول آب‌شستگی گودال دارد (۲). ماجدی اصل و همکاران (۲۰۱۹) اثر برداشت شن و ماسه بر الگوی آب‌شستگی دو گروه پایه پل سه‌تایی را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که برای هر دو مدل دانه‌بندی استفاده‌شده در آزمایش‌ها، در عدد فرود ۰/۵ بیش‌ترین آب‌شستگی در پایه اول در بستر بالادست و برای عدد فرود ۰/۲۵ بیش‌ترین آب‌شستگی در پایه چهارم در بستر پایین‌دست رخ داده است. هم‌چنین نتایج

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد پژوهشگران در مطالعات پیشین در زمینه آب‌شستگی به نحوه جابجایی حفره و چگونگی توسعه آن در دانه‌بندی‌های مختلف و شرایط مختلف جریان و با تغییرات در اندازه حفره برداشت شده پرداخته‌اند. هم‌چنین در پژوهش‌هایی که اثر برداشت مصالح بر میزان تغییرات عمق آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل در حالت‌های متفاوت بررسی گردیده است با قرار دادن گروه پایه در کانال بوده و نقش ابعاد و فاصله حفره بر مقادیر عمق آب‌شستگی تعیین نگردیده است. از این رو در این پژوهش، تأثیر برداشت مصالح در پایین دست پایه پل استوانه‌ای و فاصله حفره‌های برداشت از پایه و هم‌چنین عمق حفره‌ها بر روند آب‌شستگی اطراف پایه در دبی‌های مختلف جریان آب زلال گذرنده از بستر رودخانه‌ای به صورت آزمایشگاهی با رویکرد تعیین فاصله بهینه بررسی شده است. هم‌چنین برای پیش‌بینی میزان بیشینه عمق آب‌شستگی، یک رابطه در حالت بدون حفره و یک رابطه نیز برای حالت با حفره بر مبنای تحلیل رگرسیون با استفاده از داده‌های حاصل با بیان دقت و دامنه کاربرد پیشنهاد گردیده است که می‌تواند در کارهای عملی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در تعیین میزان آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل، عمق آب‌شستگی یک متغیر وابسته می‌باشد. از این رو فراسنجه‌های مؤثر بر آن را می‌توان به کمک تحلیل ابعادی به صورت رابطه ۱ بیان نمود:

ایشان، شاخص‌های پراهمیت در بهره‌برداری از مصالح برای رودخانه تالوار استان کردستان با شاخص‌هایی مانند وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری بستر و سیلاب دشت‌ها، و دانه‌بندی مصالح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بررسی‌ها از ریخت‌شناسی رودخانه بازه‌های مستقیم نسبت به تغییرات تراز بستر حساس‌تر بود و باید در این بازه‌ها برداشت مصالح در پهنا و عمق یکسانی انجام گیرد (۱۳).

حق‌نظر و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی نحوه پرشدگی حفره‌های ایجاد شده در بستر رودخانه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش فاصله بین حفره‌ها اثر ناچیزی بر حجم پرشدگی حفره بالادست دارد اما با افزایش فاصله بین دو حفره، میزان حجم پرشدگی در حفره پایین دست کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با کاهش نسبت طول گودال به عرض آن می‌توان گودال‌ها را در فاصله کوتاه‌تری از یکدیگر حفاری کرد (۵). ماجدی اصل و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر مشخصات هیدرولیکی، پارامترهای رسوب و برداشت مصالح بر عمق آب‌شستگی در اطراف گروه پایه پرداختند. در پژوهش ایشان ۲۲ آزمایش با دبی و عدد فرودهای متفاوت انجام گرفت. جهت بررسی تأثیر برداشت مصالح بر میزان عمق آب‌شستگی اطراف پایه، برداشت حفره هم در پایین دست و هم بالادست پایه‌ها انجام گرفت. نتایج مشاهدات ایشان نشان داد که هنگام برداشت مصالح در پایین دست گروه پایه، میزان عمق آب‌شستگی افزایش پیدا کرده است و برداشت مصالح از بالادست پایه‌ها، باعث کاهش عمق آب‌شستگی شده است (۱۱).

$$D_S = f(H \text{ و } L \text{ و } B \text{ و } b \text{ و } I \text{ و } D \text{ و } S_0 \text{ و } V \text{ و } g \text{ و } \gamma \text{ و } \rho_s \text{ و } \rho \text{ و } v \text{ و } t \text{ و } Y \text{ و } X) \quad (1)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام و در نظر گرفتن متغیرهای D, V, ρ و به‌عنوان متغیرهای تکرارشونده، می‌توان رابطه ۱ را به‌صورت رابطه ۲ بازنویسی کرد:

$$\frac{D_s}{D} = f\left(\frac{H}{D}, \frac{L}{D}, \frac{B}{D}, \frac{I}{D}, \frac{X}{D}, \frac{Y}{D}, S_0, Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{y}{D}, \frac{d_{50}}{D}, G_s = \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{VD}{v}, \frac{Vt}{D}\right) \quad (2)$$

ثابت بودن مقادیر طول و عرض کانال و حفره و شیب کانال می‌توان از ترکیب‌های $L/D, B/D, Y/D, X/D$ و S_0 صرف‌نظر نمود. دامنه تغییرات پارامترهای ثابت و متغیر در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. هم‌چنین می‌توان عدد فرود جریان Fr و وزن مخصوص رسوب G_s را با هم ترکیب نمود و عدد فرود چگال، F_{d50} را به دست آورد. پس از ساده‌سازی و حذف برخی از پارامترهای بی‌بعد، رابطه ۲ به‌صورت رابطه ۳ نوشته می‌شود:

$$\frac{D_s}{D} = f\left(\frac{H}{D}, \frac{I}{D}, \frac{y}{D}, F_{d50} = \frac{V}{\gamma\sqrt{(G_s-1)gd_{50}}}\right) \quad (3)$$

که شامل مشخصات هندسی حفره، کانال و پایه پل هم‌چون $S_0, D, X, Y, b, I, B, L, H$ ، مشخصات هیدرولیکی مانند V, g, y, d_s, t و مشخصات مربوط به آب و ذرات رسوبی شامل d_{50}, ρ_s, ρ و v می‌باشند.

در رابطه ۲ ترکیب بی‌بعد VD/v معادل عدد رینولدز^۱ است. در این پژوهش با توجه به قرار داشتن مقدار سرعت در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۲۶ متر بر ثانیه، عدد رینولدز در محدوده ۵۵۰۰ تا ۱۲۵۰۰ قرار دارد که نشان از آشفته بودن جریان است پس می‌توان از این ترکیب چشم‌پوشی کرد. به دلیل طولانی بودن مدت زمان رسیدن به آب‌شستگی تعادلی و ناچیز بودن تغییرات عمق آب‌شستگی در بازه زمانی، از ترکیب Vt/D نیز صرف‌نظر شده است. هم‌چنین با توجه به

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد.

Table 1. Variation range of parameters.

دامنه تغییرات Variation range	پارامترهای بی‌بعد Dimensional parameter	ردیف Number
0	S_0	1
80	X/D	2
12	Y/D	3
0.8 – 1.6	H/D	4
10 – 30	I/D	5
0.4 – 0.7	y/D	6
0.26 – 0.46	Fr	7

1- Reynolds Number

بالادست و پایین دست، پمپ، عمق سنج نقطه‌ای و دریچه انتهایی می‌باشد. به منظور ورود یکنواخت جریان و کاهش تلاطم آن و توسعه مناسب جریان در کانال، در ابتدای کانال در مخزن بالادست، آرام‌کننده جریان و صفحه مشبک تعبیه شده است که در شکل ۲ ارائه شده است. عمق‌های آب و رسوب توسط عمق‌سنج^۱ با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. مصالح انتخابی در آزمایش‌ها از جنس ماسه می‌باشد که در سراسر کانال و اطراف پایه پل به ارتفاع ثابت ۱۰ سانتی‌متر تعبیه شده است و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۳ آورده شده است. قطر متوسط ذرات رسوبی (d_s) بر اساس منحنی دانه‌بندی ارائه شده برابر ۰/۸۲ میلی‌متر است. رودکیوی و همکاران (۱۹۸۳) توصیه نموده‌اند که برای جلوگیری از تشکیل شکنج^۲، قطر متوسط ذرات بستر بیش‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد که این موضوع در انتخاب مصالح رسوبی بستر رعایت شده است (۱۶).

آزمایش‌های این پژوهش در فلوم مستطیل شکل با طول ۴ متر، عرض ۶۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اجرا گردید. در بالادست و پایین دست فلوم دو مخزن آب وجود دارد که با روشن شدن پمپ فلوم، آب از مخزن بالادست به کانال جریان یافته و به مخزن پایین دست می‌ریزد و دوباره با فشار پمپ و با لوله‌های متصل به مخزن بالادست منتقل می‌شود و تا روشن بودن پمپ این جریان چرخه‌ای آب ادامه خواهد یافت. دبی گذرنده از جریان توسط دبی‌سنج مغناطیسی فلوم اندازه‌گیری و کالیبره شده است. پمپ قابلیت برقراری جریان با دبی بین ۰ تا ۰/۰۸۳ مترمکعب بر ثانیه را دارد. شکل ۱ نمای فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده و همچنین مدل پایه در بستر رسوبی به همراه حفره برداشت را در پایین دست آن در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. فلوم آزمایشگاهی شامل کانال، مخزن



شکل ۱- (الف) فلوم آزمایشگاهی (ب) مدل آزمایشگاهی.

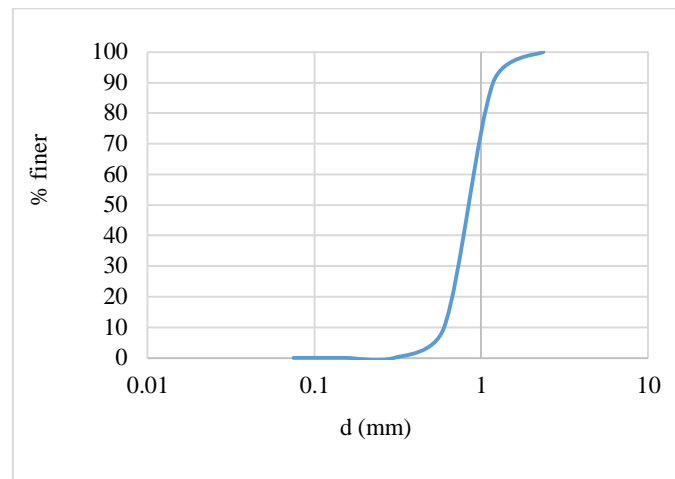
Figure 1. (a) Laboratory flume (b) Laboratory model.



شکل ۲- آرام‌کننده جریان و صفحه مشبک مخزن بالادست.

Figure 2. The flow attenuator and the lattice plate of the upstream tank.

- 1- Point Gauge
- 2- Ripple



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر رسوبی.

Figure 3. Granulation curve of sedimentary bed materials.

رسوبی انتخابی از منحنی دانه‌بندی، ۱/۲۶ به‌دست آمد (۱۶). مشخصات دانه‌بندی ذرات رسوبی نیز در جدول ۲ برحسب میلی‌متر نشان داده شده است.

هم‌چنین برای جلوگیری از اثر غیریکنواختی ذرات بر آب‌شستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد که با توجه به رابطه ۴، میزان انحراف معیار هندسی^۱ برای ذرات

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (4)$$

جدول ۲- مشخصات دانه‌بندی ذرات رسوبی.

Table 2. Granulation characteristics of sedimentary particles.

مقادیر Values (mm)	پارامتر ذرات رسوبی Sediment particles parameter	ردیف Number
1.3	D_{10}	1
0.64	D_{16}	2
0.82	D_{50}	3
0.94	D_{60}	4
1.14	D_{84}	5
0.72	Cu	6
1.26	σ	7

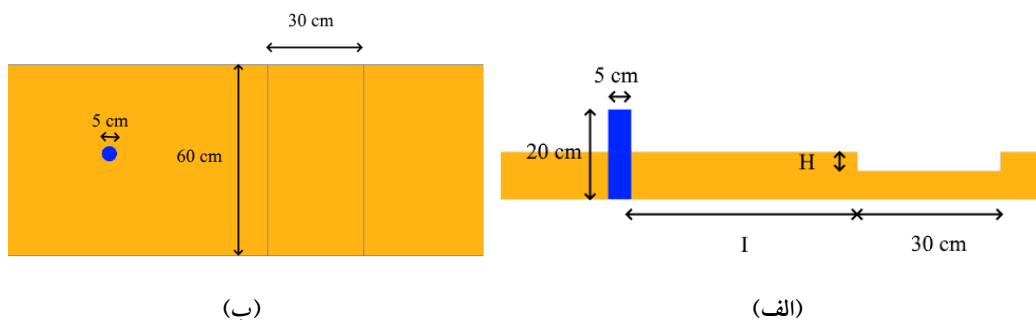
این پایه در خط مرکزی کانال و در فاصله ۱ متری از ابتدای آن قرار داده شده است (شکل ۴- الف). طبق پیشنهاد رودکیوی و همکاران چنان‌چه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد، دیواره‌های

برای بررسی پدیده آب‌شستگی اطراف پایه پل در بسترهای رودخانه‌ای، از پایه پل با مقطع استوانه‌ای به قطر ۰/۰۵ متر و ارتفاع ۰/۲ متر استفاده شده است که

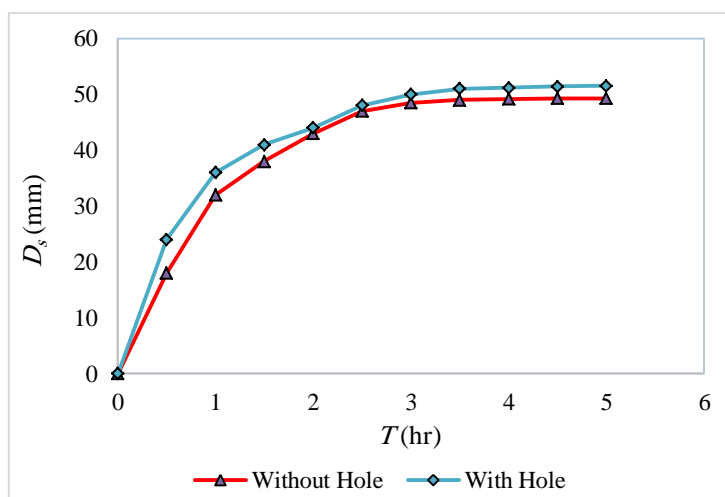
1- Geometric Standard Deviation

زمان آب شستگی تعادلی اطراف پایه پل مشاهداتی در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، با عدد فرودهای ۰/۲۶، ۰/۳۸ و ۰/۴۳ به ترتیب حدود ۲، ۳ و ۳/۵ ساعت بوده است. در هر سه دبی سهم عمده میزان عمق آب شستگی در ساعت اولیه اتفاق افتاده است. بر اساس منحنی زمانی آب شستگی زمان تا ۵ ساعت (۳۰۰ دقیقه) از شروع آزمایش، زمان آب شستگی تعادلی ۳/۵ ساعت (۲۱۰ دقیقه) از زمان شروع آزمایش انتخاب شد (شکل ۵). بنابراین همه نتایج عمق آب شستگی ارائه شده در این پژوهش این زمان می‌باشد.

فلوم تأثیری بر مقدار آب شستگی نخواهند داشت. ایشان همچنین برای جلوگیری از اثر اندازه رسوبات بر عمق آب شستگی، نسبت قطر پایه به قطر متوسط ذرات را بزرگتر از ۲۰-۲۵ پیشنهاد کردند (۱۶). برای تعیین اثر برداشت مصالح بر آب شستگی اطراف پایه پل، حفره‌هایی با مقطع مستطیلی و به طول ۰/۳ متر و عرضی هم‌عرض با کانال (۰/۶ متر) و با ۰/۸، $H/D=1/6$ در $I/D=10$ ، ۲۰، ۳۰ در پایین دست آن برداشت شد (شکل ۴-ب). با توجه به مطالعات رودکیوی و همکاران زمانی که تغییرات عمق آب شستگی در بازه زمانی یک ساعت کم‌تر از ۱ میلی‌متر گردد، آب شستگی به تعادل می‌رسد (۱۶).



شکل ۴- طرح شماتیک تنظیمات آزمایشگاهی (الف) نما از بالا (ب) نمای جانبی.
Figure 4. Schematic sketch of experimental setup (a) Up view (b) Side view.



شکل ۵- منحنی عمق آب شستگی تعادلی.
Figure 5. Equilibrium scour depth curve.

جریان در محدوده $0.3U_c < \bar{U} < U_c$ باشد، آب‌شستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد و اگر سرعت متوسط جریان \bar{U} بیش‌تر از سرعت آستانه حرکت U_c باشد، آب‌شستگی در شرایط بستر متحرک صورت می‌پذیرد (۱۵). برای تعیین سرعت برشی بحرانی^۳ به ازای اندازه متوسط دانه‌های رسوب (d_{50}) از جنس کوارتز برحسب متر و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط ۵ و ۶ ارائه می‌شود (۱۴).

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm}) \quad (5)$$

$$U_{*c} = 0.305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad (1\text{mm} < d_{50} < 100\text{mm}) \quad (6)$$

می‌شود (۱۴):

$$U_c = 5.75 \log \left(5.53 \frac{\bar{y}}{d_{50}} \right) * U_{*c} \quad (7)$$

آب‌شستگی تعادلی پمپ خاموش و بستر کانال زهکشی گردید و تغییرات آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش اثر عدد فرود، عمق حفره برداشت مصالح و فاصله حفره از پایه بر نیمرخ آب‌شستگی بررسی شده است. پس از اجرای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی در اطراف پایه پل و مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی آن، نتایجی مطابق جدول ۳ به‌دست آمد. بررسی‌ها نشان داد جریان

با توجه به منبع رسوب بالادست و نحوه ورود رسوب به منطقه آب‌شستگی، آب‌شستگی موضعی می‌تواند به دو صورت آب‌شستگی آب زلال^۱ و آب‌شستگی بستر متحرک^۲ رخ دهد. آب‌شستگی آب زلال به حالتی اشاره می‌کند که هیچ رسوبی از بالادست به منطقه آب‌شستگی وارد نمی‌شود. آب‌شستگی بستر متحرک در جایی رخ می‌دهد که انتقال بار بستر کلی به وسیله جریان وجود دارد (۱). برای تعیین عمق متوسط جریان \bar{y} ، زمانی که سرعت

و برای تعیین سرعت بحرانی از رابطه ۷ استفاده

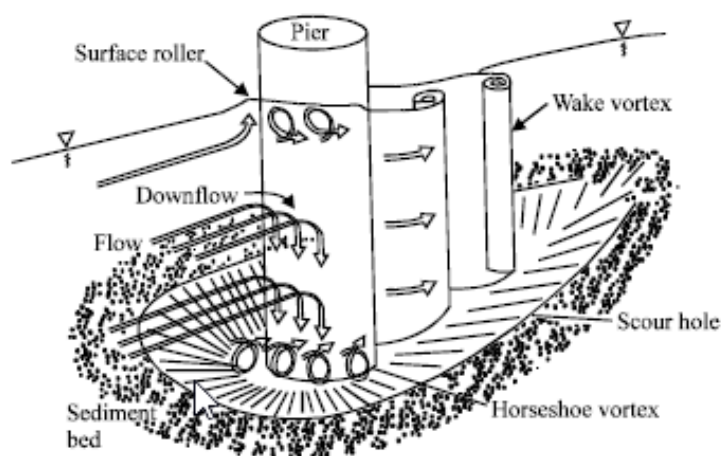
که با توجه به روابط، در عدد فرود ۰/۴۶ و در مقدار سرعت جریان ۰/۲۶ متر بر ثانیه در محدوده سرعت آستانه حرکت U_c که به میزان ۰/۲۸ متر بر ثانیه محاسبه شد قرار دارد و مشخص گشت که سرعت جریان در زیرآستانه حرکت ذرات بوده است.

پیش از شروع هر اجرای آزمایشگاهی در ابتدا پایه استوانه‌ای شکل برای بررسی پدیده آب‌شستگی در محل موردنظر قرار می‌گیرد. سپس مصالح در فلوم ریخته‌شده و سطح بستر ماسه‌ای با استفاده از یک صفحه مسطح‌کننده، کاملاً مسطح و هموار گردید. برای بررسی اثر حفره بر میزان آب‌شستگی، حفره‌هایی در محل‌های موردنظر در بستر ایجاد گردید و پس از پایان آزمایش میزان آب‌شستگی و تغییرات نیمرخ آن بررسی شد. در پایان هر آزمایش و رسیدن به

1- Clear Water Scour
2- Live Bed Scour
3- Critical Shear Stress

حفره شده و سبب می شود که حفره به سمت بالادست خود حرکت می کند که به این نوع پدیده آب شستگی بالارونده^۱ می گویند. این اثر توأمان به دلیل افزایش شیب بستر در پایین دست پایه، باعث افزایش سرعت جریان رسوبی می شود و عمق آب شستگی را افزایش می دهد. از جدول ۳ مشاهده می شود که مقادیر بیشینه عمق آب شستگی در بالادست پایه پل بیشتر از مقادیر بیشینه عمق آب شستگی در پایین دست می باشد، بنابراین در این پژوهش منظور از بیشینه عمق آب شستگی (D_{smax}) همان (D_{st}) می باشد. هم چنین مکان وقوع بیشینه عمق آب شستگی در بالادست و پایین دست پایه در شکل ۷ نشان داده شده است.

ایجاد شده در کانال پس از برخورد با پایه دچار دگرگونی شده و باعث انحراف و جدایی جریان به اطراف پایه می گردد و باعث ایجاد گردابه هایی در اطراف پایه می شود. سپس با افزایش شدت جریان موجب افزایش گردابه ها در اطراف پایه شده و ذرات رسوبی بیش تری شسته می شود. در شکل ۶ الگوی جریان پس از برخورد به پایه نشان داده شده است. در آزمایش ها با ایجاد حفره در پایین دست پایه پل، حفره برداشت شده و پایه پل هر دو به صورت هم زمان باعث فرسایش بیشتر بستر و افزایش آب شستگی اطراف پایه پل می گردد. بدین صورت که با رسیدن جریان به سمت حفره پایین دست الگوی جریان تغییر کرده و سرعت جریان افزایش پیدا کرده و جریان فوق بحرانی می گردد که این امر باعث فرسایش بالادست



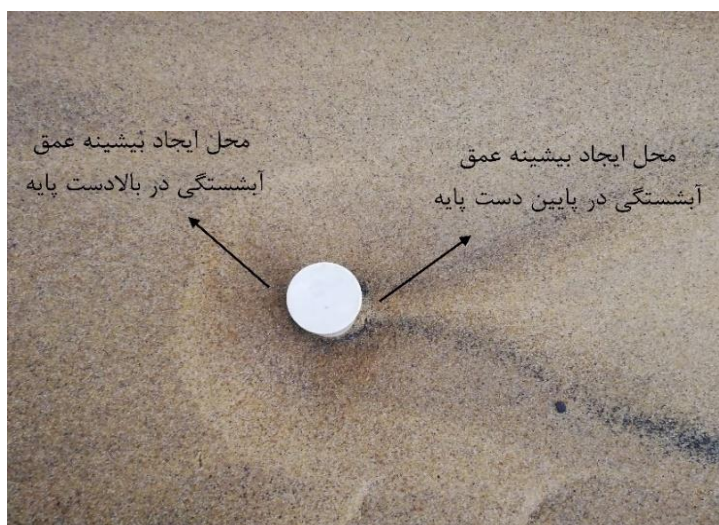
شکل ۶- الگوی جریان در برخورد به پایه پل (۱۲).

Figure 6. The flow pattern after the collision with the bridge pier (12).

جدول ۳- مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی در بالادست و پایین‌دست پایه پل برای هر اجرای آزمایشگاهی.

Table 3. Maximum scour depth values at upstream and downstream of the bridge pier for each experimental test.

بیشینه عمق آب‌شستگی در بالادست پایه	بیشینه عمق آب‌شستگی در پایین‌دست پایه	نسبت فاصله حفره از پایه به قطر پایه	نسبت عمق حفره به قطر پایه	عدد فرود چگال Densitometric Froude number Fr_{d50}	عدد فرود Froude number Fr	عمق جریان Flow depth y (m)	دبی Discharge Q ($m^3 s^{-1}$)	شماره آزمایش Test number
Maximum scour depth downstream of the pier D_{s1} (mm)	Maximum scour depth upstream of the pier D_{s2} (mm)	Ratio of hole distance to the pier diameter I/D	Ratio of hole depth to the pier diameter H/D					
9	-2	--	--	16.31	0.26	0.02	0.0014	1
32	-2	--	--	20.66	0.38	0.025	0.0028	2
46	20	--	--	20.84	0.43	0.03	0.0042	3
60	39	--	--	20.2	0.46	0.035	0.0056	4
7	0	20	0.8	16.31	0.26	0.02	0.0014	5
34	20	20	0.8	20.66	0.38	0.025	0.0028	6
50	25	20	0.8	20.84	0.43	0.03	0.0042	7
63	40	20	0.8	20.2	0.46	0.035	0.0056	8
55	28	20	1.6	20.84	0.43	0.03	0.0042	9
67	43	20	1.6	20.2	0.46	0.035	0.0056	10
53	20	10	0.8	20.84	0.43	0.03	0.0042	11
69	-2	10	0.8	20.2	0.46	0.035	0.0056	12
58	-2	10	1.6	20.84	0.43	0.03	0.0042	13
74	20	10	1.6	20.2	0.46	0.035	0.0056	14
46	39	30	0.8	20.84	0.43	0.03	0.0042	15
46	0	30	1.6	20.84	0.43	0.035	0.0042	16

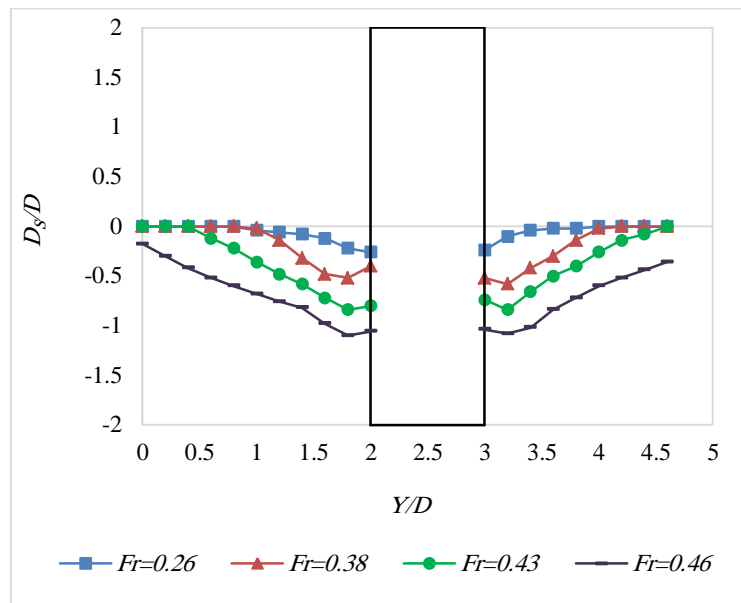


شکل ۷- محل ایجاد بیشینه عمق آبشستگی در بالادست و پایین دست پایه پل.

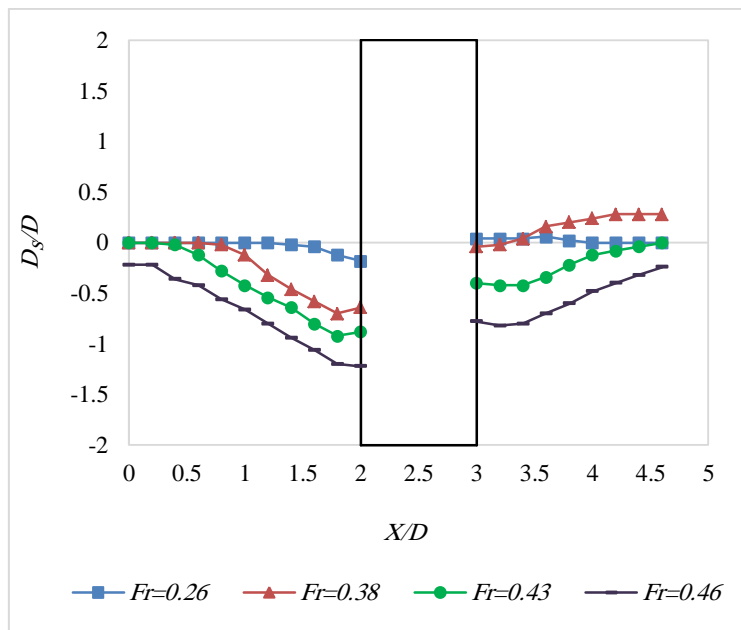
Figure 7. Location of maximum scour depth upstream and downstream of the bridge pier.

می توان گفت با افزایش عدد فرود و با بیش تر شدن سرعت جریان، میزان تنش برشی در اطراف پایه پل بیش تر شده که باعث شسته شدن مقدار بیش تری از رسوبات اطراف پایه می گردد. هم چنین نتایج نیمرخ ها نشان داد که آبشستگی در بالادست پایه بیش تر از میزان آن در پایین دست پایه است که به دلیل برخورد جریان اولیه به بالادست پایه و کاهش شدت آن در پایین دست پایه ها می باشد و میزان عمق آبشستگی در نیمرخ عرضی در دو طرف پایه تقریباً یکسان بوده است.

برای بررسی اثر افزایش عدد فرود بر آبشستگی اطراف پایه پل بدون حفره برداشت آزمایش هایی انجام شد که در این بخش به آن پرداخته می شود. در شکل ۷ نیمرخ طولی و عرضی بی بعد شده آبشستگی اطراف پایه پل در حالت بدون حفره و در عدد فرودهای ۰/۲۶، ۰/۳۸، ۰/۴۳ و ۰/۴۶ نشان داده شده است. در این پژوهش در تمامی شکل های نیمرخ عمق آبشستگی، محور قائم نشان دهنده پارامتر بی بعد عمق آبشستگی (d_s) به قطر پایه (D) و محور افقی پارامتر بی بعد طول (X) یا عرض (Y) کانال آزمایشگاهی به قطر پایه می باشد. باتوجه به شکل ۸



(الف)



(ب)

شکل ۸- عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت‌های بدون حفره برداشت مصالح برای عدد فرودهای مختلف (الف) نیم‌رخ طولی (ب) نیم‌رخ عرضی.

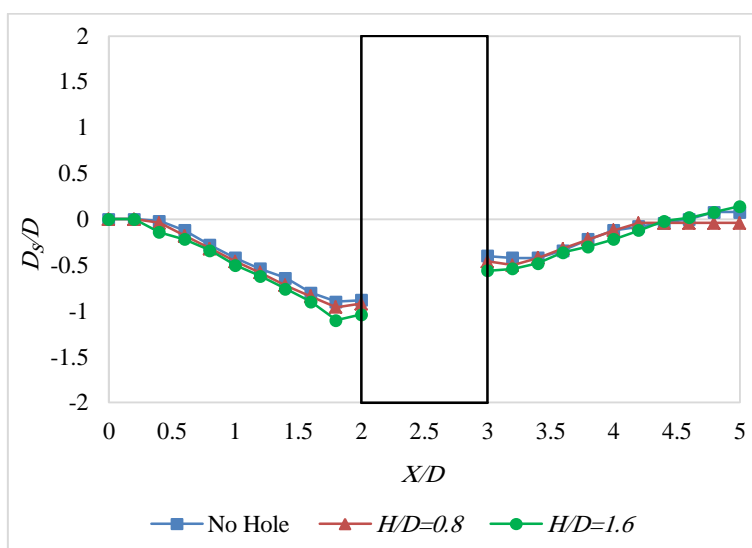
Figure 8. Dimensionless scour depth around the bridge pier in cases without mining holes for different Froude numbers (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.

در بستر کانال برداشت و اثر آن بر میزان آب‌شستگی مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۹ نیم‌رخ طولی و عرضی آب‌شستگی در سه حالت بدون حفره و حفره برداشت مصالح با $H/D=1/6$ ، $0/8$ در $I/D=20$

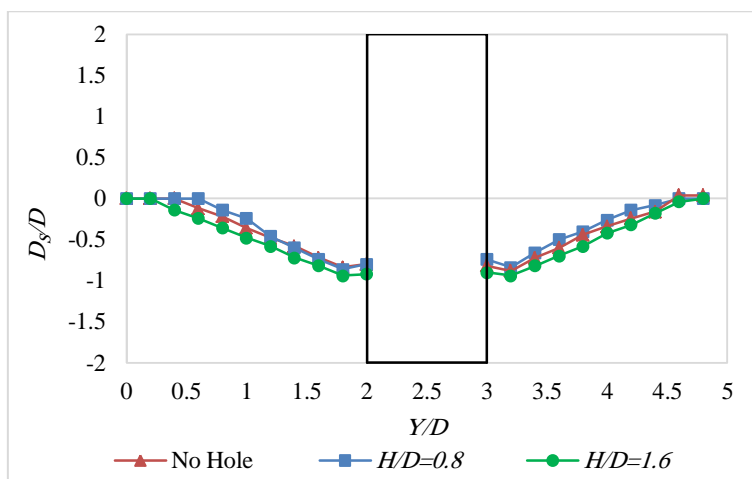
اثر عمق حفره برداشت‌شده بر نیم‌رخ آب‌شستگی: برای بررسی تأثیر برداشت مصالح بر میزان آب‌شستگی در اطراف پایه پل، حفره‌هایی با $0/8$ ، $H/D=1/6$ و طول و عرض یکسان در پایین‌دست پایه

عدد فرود 0.43 را نشان می‌دهند. با بررسی شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت با افزایش عمق حفره، میزان عمق آب‌شستگی در بالادست و پایین‌دست پایه افزایش می‌یابد و این میزان تغییرات در نیمرخ عرضی محسوس‌تر است. در شکل ۱۰ نتایج بیشینه عمق آب‌شستگی در دو حالت بدون حفره و با حفره با نسبت به حالت بدون حفره بیش‌تر می‌باشد.

در $H/D=0.8$ در بستر و در عدد فرودهای مختلف با هم مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر افزایش عدد فرود بر عمق آب‌شستگی در هر سه حالت یکسان است. هم‌چنین در تمامی دبی‌های آزمایش، میزان عمق آب‌شستگی در حضور حفره نسبت به حالت بدون حفره بیش‌تر می‌باشد.



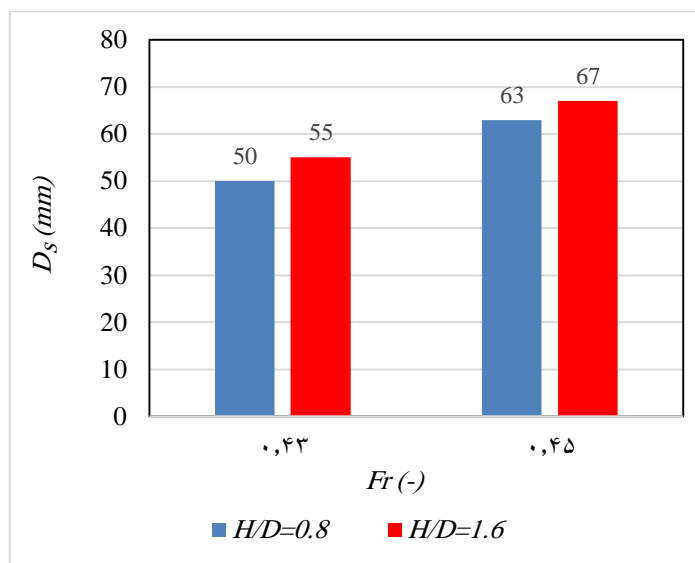
(الف)



(ب)

شکل ۹- عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت بدون حفره برداشت مصالح و دارای حفره با $H/D=0.8$ ، 1.6 (عدد فرود 0.43 و $I/D=20$) (الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

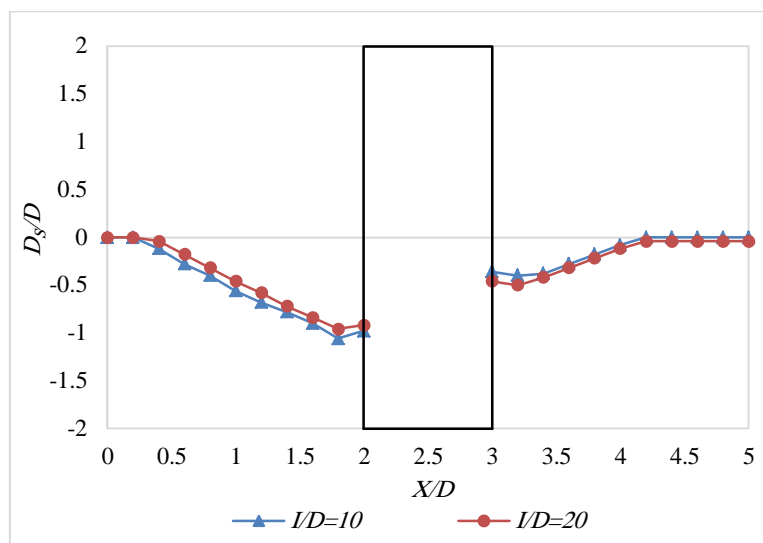
Figure 9. Dimensionless scour depth around the bridge pier in cases without mining hole and with holes in $H/D=0.8, 1.6$ ($Fr=0.43, I/D=20$) (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.



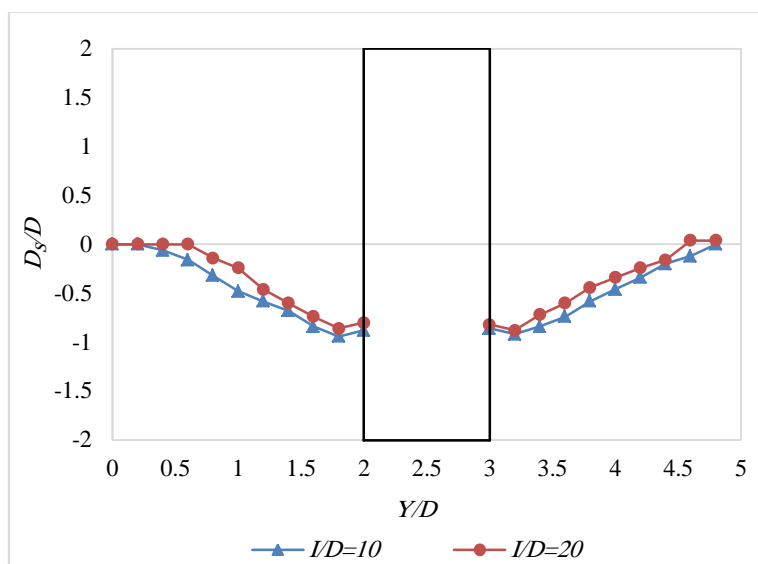
شکل ۱۰- اثر عمق حفره برداشت مصالح بر بیشینه عمق آب‌شستگی برای عدد فرودهای مختلف و $I/D=20$.
Figure 10. Effect of H/D on maximum scour depth in different Froude number and $I/D=20$.

پایین‌دست پایه با توجه به نزدیک‌تر بودن به حفره باعث کاهش آب‌شستگی نسبت به حفره دورتر می‌شود اما در بالادست و اطراف پایه، عمق آب‌شستگی به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. هم‌چنین در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در هر دو حالت حفره با $I/D=20$ ، بیش‌ترین عمق آب‌شستگی مربوط به حالت آزمایش با حفره با $H/D=1/6$ است و کم‌ترین میزان آب‌شستگی در هر دو حالت مربوط به شرایط با حفره با $H/D=0/8$ می‌باشد که نشانگر این است که هرچه میزان عمق حفره برداشت مصالح بیش‌تر شود میزان تأثیرگذاری آن بر عمق آب‌شستگی در اطراف پایه بیش‌تر شده و میزان آن در اطراف پایه افزایش می‌یابد.

برای بررسی اثر فاصله حفره از پایه پل بر نیم‌رخ‌های آب‌شستگی، نیم‌رخ طولی و عرضی بی‌بعد آب‌شستگی در حالت با حفره با $H/D=0/8$ در $I/D=10$ ، در شکل ۱۱ و در حالت با حفره با $H/D=1/6$ در $I/D=10$ ، $I/D=20$ ، برای عدد فرود $0/43$ نشان داده شده است. از نمودارهای ارائه‌شده قابل مشاهده است که با نزدیک شدن حفره به پایه در هر دو حالت حفره با $H/D=1/6$ ، $0/8$ میزان عمق آب‌شستگی در بالادست افزایش پیدا کرده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط هیدرولیکی یکسان، حفره با $I/D=10$ نسبت به حفره‌ای با همان مشخصات در $I/D=20$ ، سریع‌تر به سمت پایه توسعه می‌یابد و در مقدار کلی آب‌شستگی اثر بیشتری می‌گذارد؛ به‌طوری‌که



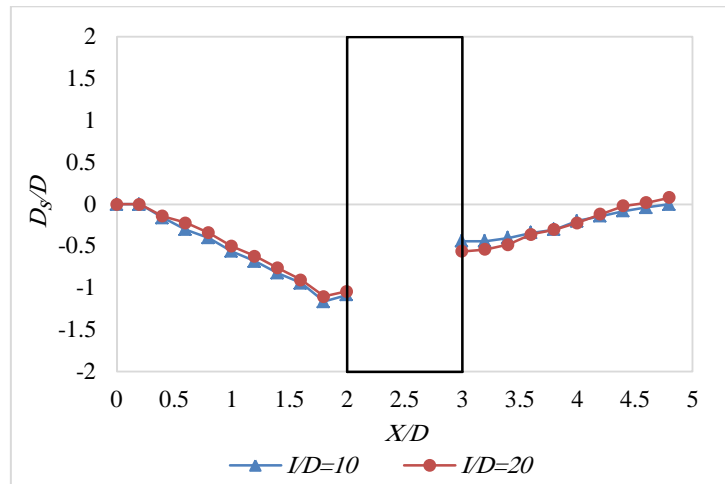
(الف)



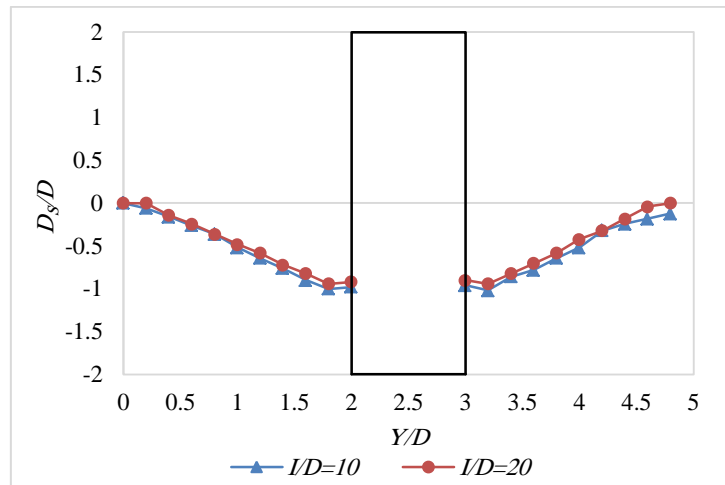
(ب)

شکل ۱۱- عمق آب شستگی بی بعد اطراف پایه پل در حالت های با حفره برداشت با $H/D=0.8$ در $I/D=10, 20$ برای عدد فرود $Fr=0.43$.
(الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

Figure 11. Dimensional scour depth around the bridge pier in cases with mining hole at $H/D=0.8$ in $I/D=10, 20$ for $Fr=0.43$ (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.



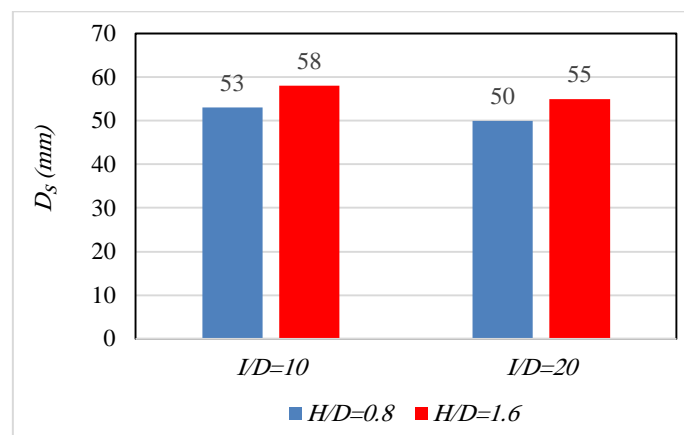
(الف)



(ب)

شکل ۱۲- عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت‌های با حفره برداشت با $H/D=1/6$ در $I/D=10$ ، $I/D=20$ عدد فرود $Fr=0.43$ (الف) نیم‌رخ طولی (ب) نیم‌رخ عرضی.

Figure 12. Dimensional scour depth around the bridge pier in cases with mining hole at $H/D=1.6$ in $I/D=10, 20$ for $Fr=0.43$ (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.



شکل ۱۳- بیشینه عمق آب‌شستگی در حالت‌های حفره برداشت با $H/D=1/6$ ، $H/D=0.8$ ، $H/D=1.6$ برای $I/D=10, 20$ عدد فرود $Fr=0.43$.

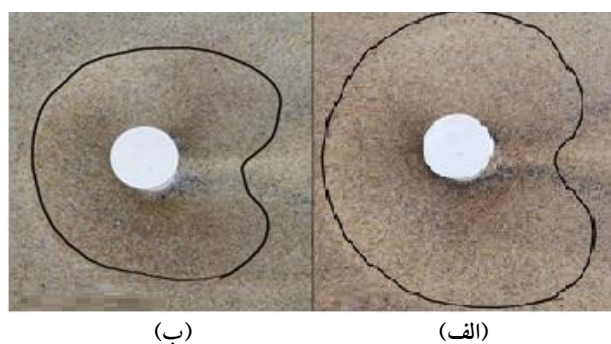
Figure 13. Maximum scour depth in cases without a mining hole and with holes at $H/D=0.8, 1.6$ in $I/D=10, 20$ for $Fr=0.43$.

سمت پایه پل، میزان توسعه آبشستگی بیشتر شده است. نتایج نشان داد که در عدد فرود یکسان، میزان توسعه آبشستگی در اطراف پایه در آزمایش با برداشت حفره با $H/D=1/6$ ، بیشتر از آزمایش با برداشت حفره با $H/D=0/8$ به دست آمد. هم چنین شکل ۱۶ نشان می دهد که تلماسه به صورت متقارن به سمت پایین دست توسعه یافته و بالآمدگی تلماسه تقریباً به صورت مساوی به سمت دیواره های کانال گسترش یافته است.

برای بررسی پدیده آبشستگی و چگونگی توسعه آن در اطراف پایه پل در اجراهای آزمایشگاهی مختلف، شکل های ۱۴ و ۱۵ که نشان دهنده نحوه گسترش آبشستگی در اطراف پایه پل می باشد، ارائه شده است. مشاهدات نشان داد که در شکل در آزمایش با برداشت حفره با $H/D=0/8$ کم ترین گستره آبشستگی در عدد فرود $0/26$ و بیش ترین میزان آن در عدد فرود $0/43$ در اطراف پایه رخ داده است. هم چنین مشاهده می شود به دلیل جابجایی حفره برداشت شده از بستر به



شکل ۱۴- توسعه حفره آبشستگی در حالت با برداشت حفره با $H/D=0/8$ برای عدد فرود (الف) $0/26$ (ب) $0/38$ و (ج) $0/43$.
Figure 14. Development of scour holes around the bridge pier with mining holes at $H/D=0.8$ (a) $Fr=0.26$ (b) $Fr=0.38$ (c) $Fr=0.43$.



شکل ۱۵- توسعه حفره آبشستگی در حالت حفره برداشت مصالح برای عدد فرود $0/43$ (الف) حفره با $H/D=0/8$ (ب) حفره با $H/D=1/6$.
Figure 15. Development of scouring hole around the bridge pier with mining for $Fr=0.43$ (a) $H/D=0.8$ (b) $H/D=1.6$.



شکل ۱۶- گسترش تلماسه در پایین دست پایه پل.

Figure 16. Expansion of dune downstream of the bridge pier.

عدد فرودهای متفاوت به‌دست آمد. برای تعیین دقت روابط پیشنهادی از خطای جذر میانگین مربعات^۲ و درصد خطای نسبی^۳ استفاده شده است که به‌ترتیب از رابطه‌های ۸ و ۹ به‌دست می‌آید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_P - X_O)^2}{n}} \quad (8)$$

$$RE(\%) = \left(\frac{X_P - X_O}{X_P}\right) \times 100 \quad (9)$$

و داده‌های به‌دست آمده در پژوهش‌های ملویل و همکاران (۱۵) استفاده شد و رابطه (۱۰) به‌دست آمد:

$$\frac{D_S}{D} = 4.43 \left(\frac{y}{D}\right)^{0.66} (Fr)^{1.08} \quad (10)$$

داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی می‌باشد. (شکل ۱۷- الف). هم‌چنین در حالت آزمایش با برداشت مصالح رابطه ۱۱ برای داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر، ارائه می‌شود:

$$\frac{D_S}{D} = 18.82 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.08} \left(\frac{I}{D}\right)^{-0.1} (Fr)^{3.08} \quad (11)$$

تطابق خوبی بین داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد (شکل ۱۷). هم‌چنین در جدول ۴ دامنه فراسنجه‌های به‌کار رفته در رابطه‌های پیشنهادی ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

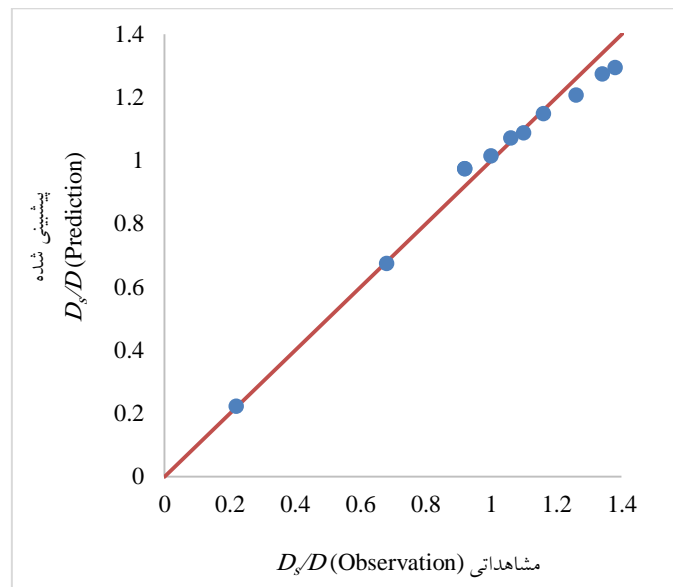
بر مبنای تحلیل ابعادی و با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی^۱ داده‌های آزمایشگاهی، دو معادله تجربی جداگانه برای پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی در حالت‌های بدون برداشت مصالح و با برداشت آن در ارتفاع و فاصله‌های مختلف از حفره و

که در آن‌ها، X_P مقادیر پیش‌بینی‌شده، X_O مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد. در حالت بدون برداشت حفره از ترکیب داده‌های مطالعه حاضر

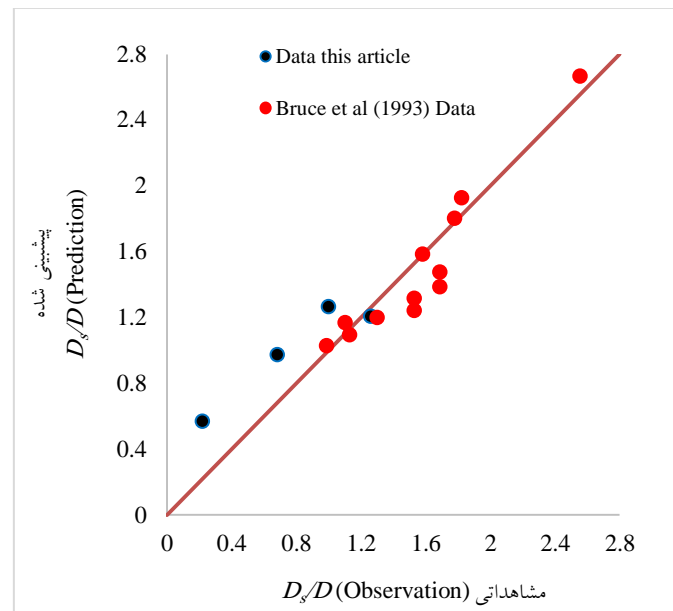
طبق رابطه ۱۰، D_S/D با فراسنجه‌های بی‌بعد y/D و عدد Fr رابطه مستقیم دارد. در این رابطه $RMSE=0/2$ و $RE=20/57$ درصد و ضریب همبستگی (R^2) برابر $0/93$ بوده است که نشانگر تطابق مناسبی بین

که در آن، فراسنجه D_S/D با فراسنجه‌های بی‌بعد H/D و عدد Fr رابطه مستقیم و با I/D رابطه عکس دارد. هم‌چنین در بین فراسنجه‌های این رابطه، عدد Fr بیش‌ترین تأثیر و H/D کم‌ترین تأثیر را دارد. در این رابطه $RMSE=0/052$ ، $RE=3/46$ درصد و ضریب همبستگی (R^2) برابر $0/99$ به‌دست آمد که

- 1- Nonlinear Regression
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Relative Error



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- تغییرات D_s/D مشاهداتی با D_s/D پیش‌بینی شده (الف) بدون حفره برداشت مصالح (ب) با حفره برداشت مصالح.
 Figure 17. Changes of D_s/D (observed) to D_s/D (predicted) (a) without minning hole (b) with minning hole.

جدول ۴- دامنه پارامترهای به کار رفته در رابطه‌های پیشنهادی.

Table 4. Domain of parameters used in proposed relations.

دامنه کاربرد Domain	فراسنجه‌های بی‌بعد Dimensional parameter	شماره Number
0.23 – 0.46	Fr	1
0.4 – 5.26	y/D	2
0.8 – 1.6	H/D	3
10 - 20	I/D	4

عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون حفره با افزایش ۱۵ درصدی همراه بود. هم‌چنین در آزمایش با برداشت حفره با $H/D=1/6$ و در $I/D=20$ مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون حفره، ۲۰ درصد افزایش داشت در حالی‌که برای حفره با عمق یکسان و در $I/D=20$ در دبی مشابه، مقدار افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون حفره، به ۲۶ درصد رسید. سپس در آزمایش برداشت حفره با $I/D=30$ میزان بیشینه عمق آب‌شستگی در هر دو حالت حفره با $H/D=1/6$ ، $0/8$ مشابه با حالت بدون برداشت حفره به‌دست آمد و در نتیجه افزایش عمق آب‌شستگی مشاهده نشد.

پس از بررسی و مشاهده آزمایش‌های آب‌شستگی بدون حفره و با برداشت حفره در ابعاد مختلف در جدول ۵ مقایسه‌ای بین این نتایج انجام گرفت. برای مقایسه نتایج این آزمایش‌ها، شرایط هیدرولیکی هم‌چون عمق جریان، دبی و عدد فرود جریان در تمامی آن‌ها یکسان در نظر گرفته شد و هم‌چنین طول و عرض حفره‌های برداشت شده در کانال نیز مشابه یکدیگر قرار داده شد. نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان تغییرات در عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون حفره، برای آزمایش با برداشت حفره با $H/D=0/8$ و با $I/D=20$ صورت گرفت که به میزان ۸ درصد افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی را در پی داشت. درحالی‌که با کم‌تر $I/D=10$ مقدار بیشینه

جدول ۵- تغییرات بیشینه عمق آب‌شستگی حالت‌های با حفره نسبت به حالت بدون حفره برداشت مصالح برای عدد فرود $0/43$.

Table 5. Maximum scour depth changes in cases with mining holes compared to cases without hole for $Fr=0.43$.

درصد تغییرات Variation percentage	بیشینه عمق آب‌شستگی در پایین‌دست پایه Maximum scour depth upstream of the pier D_{s2} (mm)	نسبت فاصله حفره از پایه به قطر پایه Ratio of hole distance to the pier diameter I/D	نسبت عمق حفره به قطر پایه Ratio of hole depth to the pier diameter H/D	شماره آزمایش Test number
—	46	—	—	3
8% Increase	50	20	0.8	7
20% increase	55	20	1.6	9
15% increase	53	10	0.8	11
26% increase	58	10	1.6	13
0% increase	46	30	0.8	15
0% increase	46	30	1.6	16

گردید و مقادیر مشخصه‌های نیمرخ آب‌شستگی بررسی شد. سپس در ۱۲ آزمایش حفره‌های مستطیلی شکل با طول و عرض یکسان با H/D های متفاوت $0/8$ و $1/6$ با 10 ، 20 ، 30 برداشت و اثر آن بر نیمرخ‌های عرضی و طولی آب‌شستگی اطراف پایه پل

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به مطالعه نیمرخ‌های آب‌شستگی اطراف پایه پل با حفره‌های برداشت مصالح در پایین-دست آن می‌پردازد. در ابتدا چهار آزمایش شاهد با دبی‌های مختلف بدون حفره پایین‌دست پایه پل اجرا

داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد نویسنده اول است که در شهریور سال ۱۴۰۰ به اتمام رسیده است. مدل آزمایشگاهی در مرداد سال ۱۳۹۹ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده است و سپس آزمایش‌های مورد نظر طی مدت ۴ ماه انجام گردید.

تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است: مشارکت امین کوهساری به عنوان نویسنده اول مقاله مدل‌سازی آزمایشگاهی، داده‌برداری، تفسیر و تحلیل داده‌ها و نگارش نسخه اولیه مقاله می‌باشد. مشارکت مهدی حمیدی به عنوان نویسنده مسئول مقاله نظارت و راهنمایی بر روند مدل‌سازی، بررسی و کنترل نتایج و ویرایش نهایی متن مقاله می‌باشد.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه اتمام‌یافته مقطع کارشناسی ارشد نویسنده اول می‌باشد که تحت حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در قالب گرنت دانشجویی و گرنت استاد راهنما انجام گردیده است.

و نحوه گسترش حفره آب‌شستگی بررسی شد. در آزمایش‌های بدون حفره برداشت، با افزایش عدد فرود شدت جریان بیش‌تر گردیده و حجم بیش‌تری از رسوبات در اطراف پایه شسته می‌شود بنابراین حفره آب‌شستگی عمیق‌تری حاصل می‌گردد. در آزمایش‌های با برداشت حفره مشاهده گردید برداشت مصالح در پایین دست پایه پل اثر افزایشی در بیشینه عمق آب‌شستگی اطراف پایه دارد. با افزایش عمق حفره برداشت شده از $H/D=0/8$ به $H/D=1/6$ در عدد فرود و فاصله ثابت، بیشینه عمق آب‌شستگی افزایش یافت. با نزدیک کردن حفره برداشت مصالح به پایه پل، مشاهده گردید که پیشروی حفره برداشت تأثیر بیش‌تری بر حفره آب‌شستگی اطراف پایه می‌گذارد و بیشینه عمق آب‌شستگی را افزایش می‌دهد. در راستای یافتن فاصله بهینه برای برداشت مصالح پایین دست، آزمایش‌ها با $I/D=30$ ، مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی برابر با حالت بدون برداشت مصالح را نشان می‌دهد. از نتایج آزمایشگاهی دو معادله تجربی یکی برای حالت بدون برداشت مصالح و دیگری برای حالت با حفره برداشت مصالح ارائه گردید. روابط پیشنهادی برای حالت بدون حفره برداشت مصالح و با آن به ترتیب دارای $RMSE=0/2$ ، $RE=20/57$ و $R^2=0/93$ و $RMSE=0/052$ ، $RE=3/46$ و $R^2=0/99$ هستند که تطابق مناسبی را بین داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند. هم‌چنین دامنه کاربرد این معادلات پیشنهادی نیز ارائه گردیده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت مساعدت در اجرای آزمایش‌ها و جناب آقای علی مهدیان خلیلی کارشناس آزمایشگاه هیدرولیک جهت کمک‌های فراوان در مراحل مختلف پژوهش، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

منابع

1. Ali, K.M.M., and Lim, S.Y. 1986. Local scour caused by submerged wall jets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 81: 4. 607-645.
2. Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., and Dasineh, M. 2019. The experimental investigation of the maximum depth and length of the created pit holes due to the bed material removal under subcritical flow condition. *Journal of Water and Soil Conservation*. 26: 1. 111-130. (In Persian)
3. Dasineh, M. 2017. Laboratory review of the transfer of pits made under the influence of riverbed. Master's Thesis. Maragheh University. Civil Engineering Department. (In Persian)
4. Hagnazar, H., Hashemzadeh, B.A., Amini, R., and Saneie, M. 2019. Experimental study on appropriate location of river material mining pits regarding extraction and utilization. *Journal of Mining and Environment*. 10: 1. 163-175.
5. Hagnazar, H., Sangsefidi, Y., Mehraein, M., and Tavakol, D.H. 2020. Evaluation of infilling and replenishment of river sand mining pits. *Environmental Earth Sciences*. 79: 362.
6. Lade, A.D., Deshpande, V., Kumar, B., and Oliveto, G. 2019. On the morphodynamic alterations around bridge piers under the influence of instream mining. *Water*. 11: 8. 1676.
7. Lade, A.D., Deshpande, V., and Kumar, B. 2019. Study of flow turbulence around a circular bridge pier in sand mined stream channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. 173: 5. 217-237.
8. Lee, S.O., Seungh, K., and Sturm, T.W. 2004. Comparison of laboratory and field measurements of bridge pier scour. 2nd International Conference on Scour and Erosion, Singapore.
9. Li, J., Qi, M., and Jin, Y. 2013. Experimental and numerical investigation of riverbed evolution in post-damaged conditions. *Proceeding of 2013 IAHR World Congress, China*.
10. Majedi, M.A., Daneshfaraz, R., and Valizadeh, S. 2019. Experimental study of river sand and gravel mining on scouring pattern around pier group. *Journal of Hydraulics*. 143: 3. 1611-1633. (In Persian)
11. Majedi, M.A., Daneshfaraz, R., Abraham, J., and Valizadeh, S. 2021. Effects of hydraulic characteristics, sedimentary parameters, and mining of bed material on scour depth of bridge pier groups. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 35: 2. 04020148.
12. Masjedi, A., Bajestan, M.S., and Kazemi, H. 2010. Effects of bridge pier position in a 180 degree flume bend on scour hole depth. *Journal of Applied Sciences*. 10: 8. 670-675.
13. Mehdizade, S., Ghorghi, M., and Shadi, A. 2020. Assessment of effective indexes for optimal site selection of river material mining, case study: Talvar River in Kurdistan province. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 12: 1. 153-165. (In Persian)
14. Melville, B.W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123: 2. 125-136.
15. Melville, B.W., and Chiew, Y.M. 1999. Time scale for local scour at bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125: 1. 59-65.
16. Raudkivi, A.J., and Ettema, Robert. 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109: 3. 338-350.
17. Saneie, M., Ghafouri, M.A., Davoudi, M.H., and Amiri, E. 2011. Effects of gravel and sand mining location on scour bridge pier. 4th Iran Water Resources Management Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
18. Shen, H.W. 1969. Mechanics of local scour: supplement, methods of reducing scour. Colorado State University, Engineering Research Center Fort Collins Co. United States 80523. 39.