

Experimental Prediction of the Bed Profile with the Full-submerged and Semi-submerged Debris Accumulation Upstream of the Cylindrical Bridge Pier

Pouria Akbari Dadamahalleh¹, Mehdi Hamidi^{*2}, Ali Mahdian Khalili³

1. M.Sc. Student of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: pouriaakbari@stu.nit.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: hamidi@nit.ac.ir
3. Ph.D. Candidate of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: ali.mahdian_kh@nit.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 10.04.2022
Revised: 02.05.2023
Accepted: 02.13.2023

Keywords:
Bridge Pier,
Debris,
Experimental Model,
Local Scour,
Submergence Depth

ABSTRACT

Background and Objectives: During floods, when the water velocity is high, the flow carries the pieces of tree leaves and other solid objects with them by colliding with the built bridge's piers in the direction of the water flow and accumulating upstream. This process causes a change in the procedure and maximum scour depth around the bridge pier. If the maximum scour depth exceeds the predicted values in design of the bridge piers, it can even weaken the piers and in some cases fail and overturn them. Therefore, in this research, the effect of the debris accumulation of upstream cylindrical bridge piers in two fully submerged and semi-submerged conditions on the scour profiles around the bridge pier and their maximum values are studied in a flume of Hydraulic laboratory of Babol Noshirvani University of Technology. For this purpose, all the different parameters are determined by dimensional analysis, and the efficacy of the effective parameters such as Froud densimetric number, submergence depth, and positions level of debris on the longitudinal and transverse profiles around the bridge pier are investigated. Also, one equation for predicting the maximum scour depth based on experimental data is proposed and the scope of application of the parameters obtained from the dimensional analysis for use in designs is stated.

Materials and Methods: Three sets of experiments were conducted, all of which were in the conditions of clear water and constant flow to investigate the effect of the debris accumulation on the scour values. The first set is the reference tests in the case of a cylindrical bridge pier with a diameter (D) equal to 3 cm, the second condition is for buried debris ($y_0=0$) and the third condition is for free debris ($y_0=D$). The variable parameters in the experiments are the relative velocity of the flow ($u/u_c \geq 0.838$) and the relative depth of the flow ($y/D \geq 1.33$). The distance of the bridge pier from the beginning of the apron was 3 meters and the median grain size of the sediment particles was 0.82 mm. In this research, while examining the time evolution of the maximum scour depth, to ensure the equilibrium of the scour hole in the tests, the time of the tests was considered 480 minutes.

Results: The results of the laboratory observations indicated that when the debris is buried, in $y/D=1$ to 1.67, the maximum scour depth increases by up to 10% compared to the reference condition. When the relative depth of

the flow increases, the buried debris act the same as a collar, and at $y/D \geq 2$, the scour depth is reduced compared to the reference condition. In the case of free debris, in all relative depths ($1.33 \leq y/D \leq 3$), the maximum scour depth has increased compared to the reference condition, and its critical case is about 57% at $y/D=1.33$. The correlation of the proposed equation for predicting the maximum scour depth with the $R^2=0.96$ and the $RMSE=0.22$ shows the appropriate accuracy of the proposed equation for the case of scour in the condition of debris accumulation.

Conclusion: By observing the results in general, it can be found that the debris accumulation upstream of the pier, in the case that the debris is placed above the sedimentary bed, causes a significant increase in the maximum scour depth. When these objects are at the same level as the sedimentary bed, they cause an increase in scouring in shallow flow depths, and in deeper flows, they decrease the maximum scour depth compared to the case without debris. Based on the proposed equation, the densimetric Froude number parameter has the greatest effect, and $(y-y_0)/D$ has the least effect on the results.

Cite this article: Akbari Dadamahalleh, Pouria, Hamidi, Mehdi, Mahdian Khalili, Ali. 2023. Experimental Prediction of the Bed Profile with the Full-submerged and Semi-submerged Debris Accumulation Upstream of the Cylindrical Bridge Pier. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (4), 95-114.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20642.3582

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پیش‌بینی آزمایشگاهی نیمرخ بستر با تجمع اجسام شناور مستغرق کامل و نیمه‌مستغرق در بالادست پایه پل استوانه‌ای

پوریا اکبری دادامحله^۱، مهدی حمیدی^{۲*}، علی مهدیان خلیلی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: pouriaakbari@stu.nit.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: hamidi@nit.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: ali.mahdian_kh@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: در مواقع سیلابی که سرعت جریان آب در رودخانه‌ها زیاد است، جریان بقایای شاخ و برگ درختان و دیگر اجسام جامد را با خود حمل کرده و با برخورد با پایه‌های پل‌های احداث شده در مسیر جریان آب، در بالادست آن تجمع می‌یابند. این فرایند موجب تغییر در روند و مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی اطراف پایه پل می‌شود. اگر مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی از مقادیر پیش‌بینی شده در طراحی پایه‌های پل بیش‌تر گردد، می‌تواند حتی سبب تضعیف پایه‌ها و در مواقعی خرابی و واژگونی آن‌ها شود. از این‌رو در این پژوهش به مطالعه اثر تجمع اجسام شناور در بالادست پایه‌های پل استوانه‌ای در دو حالت استغراق کامل و نیمه‌مستغرق بر نیمرخ‌های آب‌شستگی اطراف پایه پل و مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل پرداخته می‌شود. بدین منظور همه پارامترهای مختلف توسط آنالیز ابعادی تعیین و اثر پارامترهای مؤثر عدد فرود چگال، عمق استغراق و تراز قرارگیری اجسام شناور بر نیمرخ‌های طولی و عرضی اطراف پایه پل بررسی می‌شوند. هم‌چنین معادله‌ای برای پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی ارائه و دامنه کاربرد پارامترهای حاصل از تحلیل ابعادی برای کاربرد در طراحی‌ها بیان می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴	
واژه‌های کلیدی: اجسام شناور، آب‌شستگی موضعی، پایه پل، عمق استغراق، مدل آزمایشگاهی	
مواد و روش‌ها: برای بررسی اثر تجمع اجسام شناور بر مقادیر آب‌شستگی سه مجموعه آزمایش اجرا گردید که تمامی آن‌ها در شرایط آب زلال و جریان دائمی بودند. مجموعه اول آزمایش‌های شاهد در حالت پایه پل استوانه‌ای تنها با قطر (D) ۳ سانتی‌متر، حالت دوم برای اجسام شناور مدفون $(y_0=0)$ و حالت سوم برای اجسام شناور آزاد $(y_0=D)$ بوده است. پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها سرعت نسبی جریان $(0.23 \leq \frac{u}{u_c} \leq 0.838)$ و عمق نسبی جریان	

$(1/33 \leq \frac{y}{D} \leq 3)$ است. فاصله پایه پل از ابتدای بستر ثابت و برابر ۳ متر و اندازه دانه متوسط دانه‌ها ۰/۸۲ میلی‌متر بوده است. در این پژوهش ضمن بررسی منحنی‌های تکامل زمانی بیشینه عمق آب‌شستگی، برای اطمینان از به تعادل رسیدن حفره آب‌شستگی آزمایش‌ها، زمان انجام آزمایش‌ها ۴۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، هنگامی که اجسام شناور به صورت مدفون قرار گیرند، در $\frac{y}{D}$ تا ۱/۶۷، بیشینه عمق حفره آب‌شستگی حداکثر تا ۱۰ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش می‌یابد. با افزایش عمق نسبی جریان، اجسام شناور مدفون به صورت طوقه عمل کرده و در $\frac{y}{D} \geq 2$ از میزان عمق حفره آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد کاسته می‌شود. در حالت اجسام شناور آزاد در تمام عمق‌های نسبی $(1/33 \leq \frac{y}{D} \leq 3)$ بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد افزایش داشته و حداکثر آن حدود ۵۷ درصد در $\frac{y}{D} = 1/33$ است. همبستگی رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی با ضریب R^2 برابر با ۰/۹۶ و ضریب $RMSE$ برابر ۰/۲۲ نشان از دقت مناسب رابطه پیشنهادی برای حالت آب‌شستگی در حالت تجمع اجسام شناور دارد.

نتیجه‌گیری: با مشاهده کلی نتایج می‌توان دریافت تجمع اجسام شناور بالادست پایه در حالتی که اجسام شناور بالاتر از بستر رسوبی قرار گیرند موجب افزایش قابل توجه بیشینه عمق آب‌شستگی می‌شود. در مواقعی که این اجسام هم‌تراز با بستر رسوبی باشند، در عمق‌های نسبی جریان کم موجب افزایش آب‌شستگی و در اعماق نسبی جریان بیش‌تر موجب کاهش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد می‌شوند. براساس معادله پیشنهادی، پارامتر عدد فرود چگال بیش‌ترین اثر و پارامتر $\frac{y-y_0}{D}$ کم‌ترین اثر را بر نتایج دارد.

استناد: اکبری دادامحله، پوریا، حمیدی، مهدی، مهدیان خلیلی، علی (۱۴۰۱). پیش‌بینی آزمایشگاهی نیم‌رخ بستر با تجمع اجسام شناور مستغرق کامل و نیمه‌مستغرق در بالادست پایه پل استوانه‌ای. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹ (۴)، ۹۵-۱۱۴.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20642.3582



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

امروزه در کنار تغییرات اقلیمی، نقش عوامل انسانی بر محیط‌زیست طبیعی به‌ویژه جنگل‌ها و رودخانه‌ها، احتمال وقوع مخاطرات طبیعی حوزه آب و خاک را افزایش داده است. سیلاب و فرسایش دو پدیده مهم در مهندسی آب است که همواره مورد توجه مهندسان و مدیران این حوزه بوده است. از محیط‌های مهم درگیر در هنگام وقوع پدیده‌های سیلاب و فرسایش، بسترهای رودخانه‌ها می‌باشند. از طرفی ساخت پل برای ایجاد دسترسی و عبور از رودخانه، بر رژیم جریان آن اثر می‌گذارد و منجر به پدیده آب‌شستگی موضعی می‌گردد؛ از این رو طراحی و اجرای مناسب این سازه‌ها می‌تواند به کاهش آسیب‌ها و خسارت‌های احتمالی کمک کند. یکی از پدیده‌های مهم در بررسی پدیده آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل، اثرات ناشی از اجسام شناور برجای‌مانده از جریان‌های سیلابی است. این اجسام می‌توانند از شاخ و برگ کوچک تا تنه درختان در اندازه متنوع باشند. اجسام شناور چوبی کوچک همراه با شاخ و برگ به همراه اجسام شناور بزرگ ترکیب شده و توسط جریان آب حمل می‌شوند که تجمع اجسام شناور و انسداد در بالادست سازه پایه پل را در پی دارد (۱). این اجسام وضعیت گوناگونی از لحاظ شکل تجمع و نحوه قرارگیری در بالادست پایه‌های پل دارند و اغلب در طبیعت به شکل مکعب مستطیل تجمع می‌یابند (۲). در مطالعات مختلفی پژوهش‌گران به بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای و پیش‌بینی عمق آب‌شستگی آن پرداختند (۳، ۴، ۵، ۶). در زمینه اثر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی پایه پل در دهه‌های اخیر مطالعاتی آزمایشگاهی انجام شده است که در ادامه مهم‌ترین این پژوهش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ملویل و دانگول (۱۹۹۲) اثر شکل‌های مختلفی از اجسام شناور را بر آب‌شستگی پایه پل مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. ایشان مشاهده کردند که اجسام شناور استوانه‌ای شکل بیش‌ترین عمق آب‌شستگی را ایجاد می‌کنند، هم‌چنین قطر پایه پل را بزرگ‌تر از پایه واقعی در نظر گرفتند و رابطه‌ای را برای قطر مؤثر پایه پل، ارائه کردند (۷). دیهل (۱۹۹۷) با انجام پژوهشی آزمایشگاهی دریافت که تجمع اجسام شناور، وابسته به رابطه بین طول اجسام شناور و عرض کانال در بالادست است. هم‌چنین با تجمع اجسام شناور، سرعت در زیر این اجسام افزایش یافته و در نتیجه، آب‌شستگی بیش‌تری پیرامون پایه پل در مقایسه با عدم تجمع اجسام شناور ایجاد می‌گردد (۸). لاگاس و همکاران (۲۰۱۰)، نتایج پژوهش آزمایشگاهی خود را با رابطه ملویل و دانگول (۱۹۹۲) مقایسه نمودند و دریافتند که رابطه پیشین، قطر مؤثر پایه پل را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. در نهایت ایشان یک رابطه اصلاح‌شده برای قطر معادل، براساس نتایج آزمایش‌های خود پیشنهاد کردند (۹). ایشان هم‌چنین اثر زبری و تخلخل اجسام شناور بر آب‌شستگی پایه پل را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که زبری و تخلخل اجسام شناور، تأثیر چندانی بر روی الگو و بیشینه عمق آب‌شستگی ندارد (۹). پالیارا و کارناسینا (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، اثر زبری و تخلخل اجسام شناور چوبی را بر توسعه زمانی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل بررسی کردند. ایشان مشاهده کردند که عمق آب‌شستگی در حضور اجسام شناور می‌تواند تا ۳ برابر عمق آب‌شستگی در حالت بدون اجسام شناور شود و زبری نسبی اجسام شناور، اثر مستقیم بر آب‌شستگی پایه پل دارد. هم‌چنین تخلخل اجسام شناور، تأثیر ناچیزی بر هندسه حفره آب‌شستگی داشته است (۱۰). پالیارا و کارناسینا (۲۰۱۱) اثر اجسام شناور چوبی بزرگ بر

ایجاد می‌کنند و تجمع اجسام شناور در اطراف پایه پل، تقریباً ۹۰ درصد عمق آب‌شستگی را افزایش می‌دهد (۱۵). ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۸) آب‌شستگی اطراف پایه پل نوک تیز در حضور اجسام شناور با شکل‌های استوانه‌ای، صفحه‌ای و نیمه‌هرمی را در مطالعه‌ای آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با نزدیک شدن اجسام شناور به بستر کانال، عمق آب‌شستگی کم‌تر می‌شود و بیشینه عمق آب‌شستگی زمانی رخ می‌دهد که اجسام شناور دقیقاً زیر سطح جریان قرار داشته باشند. هم‌چنین زمانی که اجسام روی بستر کانال قرار بگیرند تا حدی از بستر محافظت کرده و عمق آب‌شستگی را کاهش می‌دهند (۱۶). رحیمی و همکاران (۲۰۱۸)، اثر طول، ضخامت، شکل و موقعیت اجسام شناور را بر حفره آب‌شستگی بررسی کردند. نتایج مشاهدات آزمایشگاهی ایشان نشان داد که بیشینه عمق آب‌شستگی، با افزایش ضخامت اجسام شناور افزایش می‌یابد. هم‌چنین اجسام شناور با شکل مستطیلی، بیش‌ترین عمق آب‌شستگی را ایجاد می‌کنند. با افزایش فاصله اجسام شناور از سطح آب، عمق آب‌شستگی در ابتدا افزایش می‌یابد و هنگامی که عمق استغراق نسبی اجسام شناور به $0/46$ برسد، اجسام شناور به‌صورت طوقه عمل کرده و عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد (۱۷). ابوسعیدی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، تأثیر اجسام شناور با خصوصیات هندسی مختلف بر الگوی جریان و آب‌شستگی بستر را در اطراف تکیه‌گاه و پایه پل موردبررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که تجمع اجسام شناور موجب افزایش آب‌شستگی تا ۵۸ درصد می‌گردد و با کاهش فاصله بین پایه و تکیه‌گاه پل، بیشینه عمق آب‌شستگی در مقایسه با آزمایش شاهد، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (۱۸). دیاس و همکاران (۲۰۱۹) اثر موقعیت اجسام شناور مثلثی و مربعی شکل را بر آب‌شستگی پایه پل استوانه‌ای برای جریان یکنواخت و در حالت

بیشینه عمق آب‌شستگی پایه پل را در شرایط آب زلال در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از مشاهدات آزمایشگاهی خود دریافتند که اجسام شناور چوبی بزرگ، موجب افزایش سرعت در اطراف پایه پل می‌شوند، هم‌چنین روابط جدیدی را برای پیش‌بینی آب‌شستگی پایه پل با وجود رانش بستر ارائه کردند (۱۱). پالیا و کارناسینا (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، اثر تجمع اجسام شناور چوبی مستطیلی، مثلثی و استوانه‌ای با ضخامت و عرض‌های مختلف را بر آب‌شستگی پایه پل در شرایط آب زلال بررسی کردند. ایشان براساس داده‌های آزمایشگاهی خود، رابطه‌ای را برای تخمین عمق آب‌شستگی پیشنهاد نمودند (۱۲). پارک و همکاران (۲۰۱۶) تجمع اجسام شناور در اطراف شمع‌های فداشونده و اثر آن بر آب‌شستگی پایه پل را در مطالعه‌ای آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج مشاهدات ایشان نشان داد که برای عمق‌ها و سرعت‌های مختلف جریان، عمق آب‌شستگی به ابعاد و ضخامت اجسام شناور بستگی دارد و با کارگذاری شمع‌های فداشونده، عمق آب‌شستگی ۳۹ الی ۶۰ درصد کاهش می‌یابد (۱۳). ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۶) اثرات هیدرودینامیکی انسداد آوار و اجسام شناور استوانه‌ای شکل و آب‌شستگی ایجادشده توسط آن‌ها در اطراف پایه پل را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. ایشان دریافتند که فاصله کم و دهانه کوتاه پایه‌های پل، موجب افزایش انسداد و تشدید آب‌شستگی و آسیب به پایه پل می‌شود (۱۴). رحیمی و همکاران (۲۰۱۷) اثر دبی، عمق آب، ضخامت و شکل اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی پایه پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که بیشینه عمق آب‌شستگی، با افزایش دبی، بیش‌تر و با افزایش عمق آب، کم‌تر می‌شود. هم‌چنین ضخامت و قطر اجسام شناور بر آب‌شستگی پایه پل مؤثر بوده و اجسام شناور مستطیل شکل، بیش‌ترین آب‌شستگی را

مروری بر مطالعات پژوهش‌گران، نشان می‌دهد که تجمع اجسام شناور موجب تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در مجاورت پایه پل می‌شود. در این پژوهش براساس مطالعات آزمایشگاهی پیشین، تراز قرارگیری اجسام شناور چوبی در جعبه‌ای مکعب مستطیلی منبای تغییرات پارامتریک حاصل از تحلیل ابعادی است. بر این اساس دو حالت اجسام شناور مدفون و آزاد در بستر در حالات‌های مختلف نیمه‌مستغرق و مستغرق کامل موردبررسی قرار می‌گیرند. نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر برای حالات مختلف هیدرولیکی ارائه و مقایسه می‌شوند. در انتها رابطه‌ای برای پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌گردد و دامنه کاربرد پارامترهای آن بیان می‌گردد.

مواد و روش‌ها

میزان آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل به فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان و بستر رسوبی، ابعاد و شکل پایه پل و اجسام شناور و زمان بستگی دارد که می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت:

$$d_s = f(y, u, b, D, L, W, T, d_{50}, \rho, \rho_s - \rho, v, g, t, n_d, \varepsilon, \Delta A, y_0, h_{sub}) \quad (1)$$

آب‌شستگی برحسب ثانیه، t_e زمان تعادل آب‌شستگی برحسب ثانیه، n_d نفوذپذیری اجسام شناور چوبی، ε زبری متوسط اجسام شناور، ΔA ضریب انسداد جریان توسط اجسام شناور، h_{sub} عمق استغراق (فاصله سطح بالایی اجسام شناور تا سطح آزاد جریان) برحسب متر و y_0 فاصله کف اجسام شناور تا بستر رسوبی برحسب متر می‌باشند. از ترکیب دو متغیر ρ و ρ_s ، پارامتر G_s حاصل می‌شود که برابر چگالی نسبی ذرات ($\frac{\rho_s}{\rho}$) است. با استفاده از تئوری Π باکینگهام و با ترکیب کمیت‌های بی‌بعد به دست آمده، فراسنجه‌های بی‌بعد مطابق رابطه ۲ به دست می‌آیند:

آب زلال در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که شکل و موقعیت تجمع اجسام شناور، تأثیر زیادی بر آب‌شستگی پایه پل دارد و هر اندازه که اجسام شناور در ارتفاع کم‌تری نسبت به بستر قرار بگیرند، عمق آب‌شستگی کم‌تر خواهد بود (۱۹). پالیارا و پالرمو (۲۰۲۰) با بررسی اثر موقعیت‌های مختلف پایه پل در عرض کانال در حضور اجسام شناور در آزمایشگاه، مشاهده کردند که بیشینه عمق آب‌شستگی زمانی که پایه پل نزدیک به دیواره کانال است، افزایش می‌یابد. همچنین وجود اجسام شناور موجب تشدید آن و افزایش طول حفره آب‌شستگی می‌شود (۲۰). پالرمو و پالیارا (۲۰۲۱)، به بررسی آزمایشگاهی اثر موقعیت پایه پل در حضور تجمع اجسام شناور پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که موقعیت پایه پل، فقط بر تکامل آب‌شستگی و شکل بستر برای جریان با عمق کم اثر می‌گذارد و برای جریان با عمق زیاد، اثر آن ناچیز است. همچنین محل پایه پل، بیشینه عمق آب‌شستگی تعادلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در صورت تجمع اجسام شناور، این اثر ناچیز می‌شود (۲۱).

در رابطه فوق، d_s بیشینه عمق آب‌شستگی برحسب متر، y بیانگر عمق جریان برحسب متر، u سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه، b عرض کانال برحسب متر، D قطر پایه پل برحسب متر، L طول اجسام شناور برحسب متر، W عرض اجسام شناور برحسب متر، T ضخامت اجسام شناور برحسب متر، d_{50} اندازه دانه‌ای که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر هستند برحسب متر، ρ چگالی دانه‌های رسوب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، ρ_s چگالی آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، v لزجت سینماتیکی سیال برحسب مترمربع بر ثانیه، g شتاب گرانشی زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، t زمان از شروع

$$d_s = f\left(\frac{y-y_0}{D} = \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{L}{D}, \frac{W}{D}, \frac{T}{D}, \frac{t_e}{t}, \frac{n_d}{D}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\Delta A}{D}, \frac{h_{sub}}{T}, \frac{\rho u y}{v}\right) = Re, \frac{u}{\sqrt{(G_s-1)g y d_{50}}} = F_{d50} \quad (2)$$

و از این پارامتر صرف‌نظر می‌گردد. با ترکیب دو پارامتر عمق جریان و تراز قرارگیری اجسام شناور پارامتری با عنوان H تعریف می‌شود که اثر تراز قرارگیری اجسام شناور را در نظر می‌گیرد. با ترکیب دو پارامتر h_{sub} و T نسبت استغراق اجسام شناور در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای u ، d_{50} و G_s و g در پارامتر F_{d50} که عدد فرود چگال است بی‌بعد شده‌اند. در نهایت، متغیرهای مؤثر بی‌بعد، به صورت رابطه ۳ خواهند بود:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{y-y_0}{D}, \frac{h_{sub}}{T}, F_{d50}\right) \quad (3)$$

اتما (۱۹۸۳) توصیه نموده‌اند که برای جلوگیری از تشکیل شکنج^۲، قطر متوسط ذرات بستر بیش‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد (۳). آزمایش‌های این پژوهش بر روی مصالحی از جنس ماسه با قطر متوسط ذرات رسوبی (d_s) برابر ۰/۸۲ میلی‌متر که در سراسر کانال و اطراف پایه پل به ضخامت ثابت ۱۰ سانتی‌متر تعبیه شده است؛ اجرا گردید. هم‌چنین برای جلوگیری از اثر غیریکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی باید انحراف معیار هندسی^۳ ذرات (σ_g) کوچک‌تر از ۱/۳ باشد (۳). مشخصات دانه‌بندی مصالح مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۱ منظور از d_i اندازه دانه‌ای است که i درصد مصالح از آن ریزترند. برای تنظیم عمق پایاب و عمق جریان در اطراف پایه پل از دریچه انتهایی فلوم استفاده شده است. شکل ۱ (الف) و (ب) به ترتیب نمای جانبی و نما از بالای تنظیمات مدل آزمایشگاهی اجراشده با جزئیات موقعیت اجزای سیستم را نشان می‌دهد، هم‌چنین پارامترهای مؤثر در شکل معرفی شده‌اند.

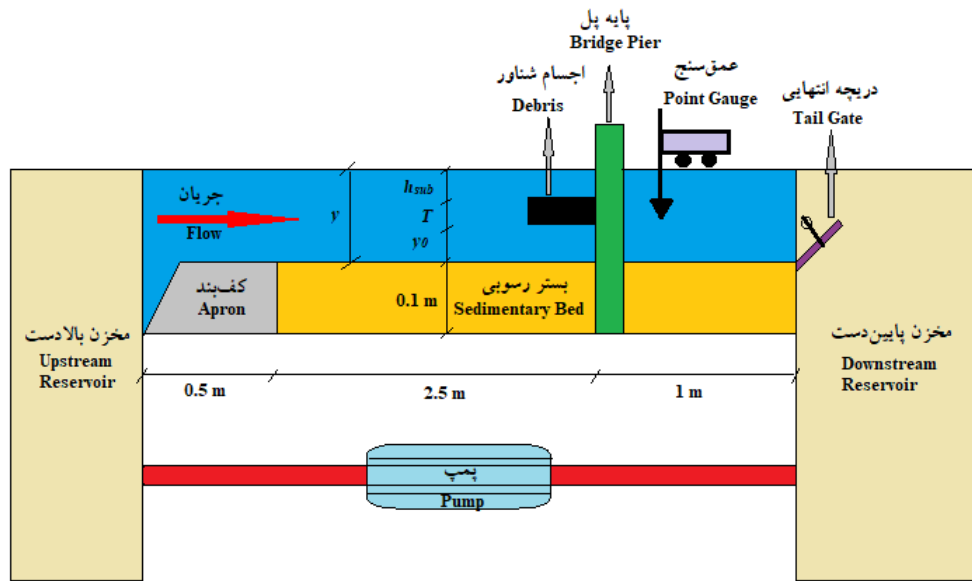
براساس مطالعه پالیارا و کارناسینا (۲۰۱۰)، زبری و نفوذپذیری اجسام شناور بر بیشینه عمق آب‌شستگی اثر چندانی ندارند. بنابراین از اثر زبری اجسام شناور و نفوذپذیری آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. با توجه به ثابت بودن ضخامت، عرض و طول اجسام شناور، از پارامترهای $\frac{L}{D}$ ، $\frac{W}{D}$ ، $\frac{T}{D}$ و هم‌چنین از اثر عرض کانال با ثابت بودن آن، صرف‌نظر می‌شود. عدد رینولدز در محدوده آشفتگی جریان است، پس می‌توان از این ترکیب چشم‌پوشی کرد. با توجه به ثابت بودن عرض کانال و ابعاد اجسام شناور، ضریب انسداد ثابت بوده

آزمایش‌ها در فلومی مستطیلی با طول ۴ متر، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۲ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شد. فلوم شامل کانال، مخزن بالادست و پایین‌دست، پمپ، عمق‌سنج^۱ و دریچه انتهایی است (شکل ۱- الف). با روشن شدن پمپ، آب از مخزن بالادست به کانال جریان یافته و به مخزن پایین‌دست می‌ریزد و دوباره توسط پمپ از طریق 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 با قابلیت برقراری جریان با دبی بین ۰ تا ۰/۰۸۳ مترمکعب بر ثانیه اندازه‌گیری و کالیبره شده است. به‌منظور 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 و پس از آن کف‌بندی صلب به طول ۰/۵ متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر قرار داده شده است. عمق‌های آب و رسوب توسط عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. رودکیوی و

2- Ripple

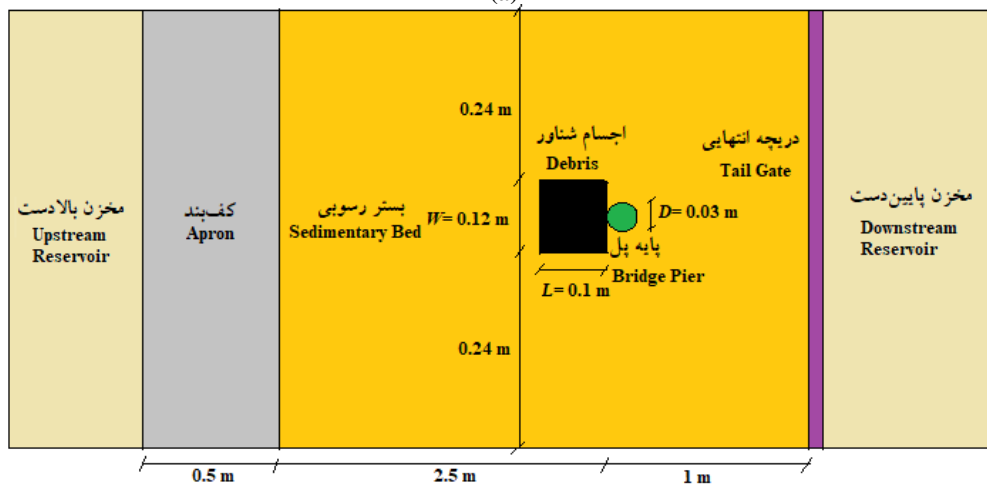
3- Geometric Standard Deviation

1- Point Gauge



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۱- طرح شماتیک تنظیمات مدل آزمایشگاهی (الف) نمای جانبی (ب) نمای بالا.

Figure 1. Schematic sketch of experimental model setup (a) Lateral view (b) Up view.

جدول ۱- مشخصات دانه‌بندی ذرات رسوبی.

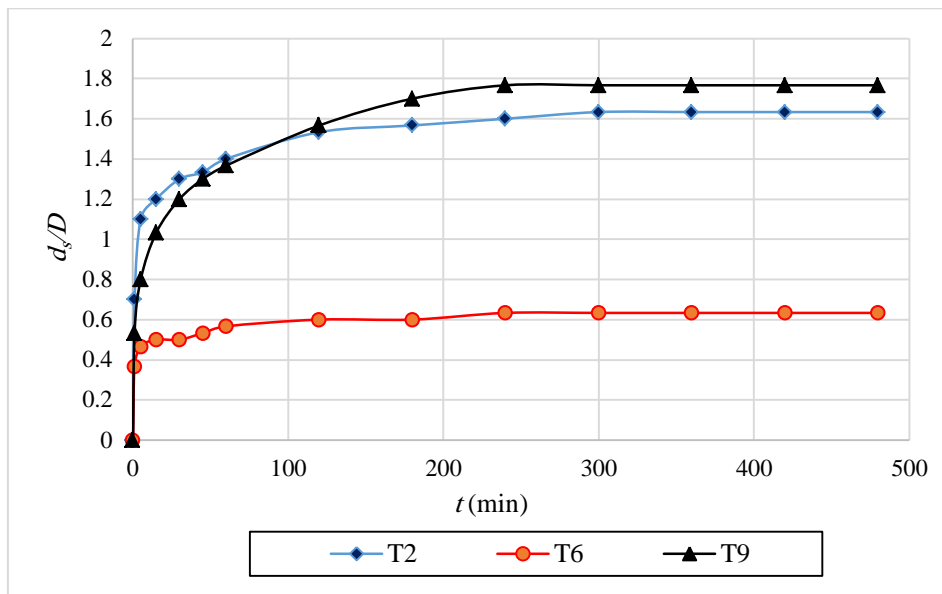
Table 1. Granulation characteristics of sedimentary particles.

مقادیر Values (mm)	پارامتر ذرات رسوبی Sediment particles parameter	ردیف Number
0.64	d_{16}	1
0.82	d_{50}	2
1.14	d_{84}	3
1.26	σ_g	4

۳ سانتی‌متر فاصله داشته باشد (حالت آزاد) به پایه پل توسط پیچ متصل می‌شود.

پیش از شروع هر اجرای آزمایشگاهی در ابتدا پایه استوانه‌ای شکل برای بررسی پدیده آب‌شستگی در محل موردنظر قرار گرفته است. سپس مصالح در فلوم ریخته شده و سطح بستر ماسه‌ای با استفاده از یک صفحه مسطح‌کننده، کاملاً هموار گردید. برای بررسی اثر اجسام شناور بر میزان آب‌شستگی، جعبه اجسام شناور بر روی پایه پل نصب و آزمایش شروع می‌شود. در پایان هر آزمایش و رسیدن به آب‌شستگی تعادلی پمپ خاموش و بستر کانال زهکشی گردید و تغییرات آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها با استفاده از عمق‌سنج اندازه‌گیری شد. با توجه به مطالعات رودکیوی و اتما (۱۹۸۳)، هنگامی که میزان تغییرات عمق حفره آب‌شستگی در مدت زمان ۳ ساعت از ۱ میلی‌متر کم‌تر گردد، آب‌شستگی به تعادل خواهد رسید (۳). زمان آب‌شستگی تعادلی مشاهداتی در اطراف پایه پل، طی آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر، با اعداد فرود $0/279$ و $0/098$ در حالت شاهد برای آزمایش‌های T2 و T6 به ترتیب برابر با ۲۴۰ و ۳۰۰ دقیقه و درحالت تجمع اجسام شناور مدفون آزمایش T9 برابر ۲۴۰ دقیقه بوده است. براساس منحنی زمانی آب‌شستگی (شکل ۲)، میزان عمده آب‌شستگی در ساعت اولیه آزمایش رخ می‌دهد. در این پژوهش برای اطمینان از به تعادل رسیدن حفره آب‌شستگی، زمان انجام آزمایش‌ها ۴۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

برای بررسی پدیده آب‌شستگی اطراف پایه پل در بسترهای رودخانه‌ای، از پایه پل با مقطع استوانه‌ای به قطر $0/03$ متر و ارتفاع $0/2$ متر استفاده شده است که این پایه در خط مرکزی کانال و در فاصله ۳ متری از ابتدای آن قرار داده شده است (شکل ۵). طبق پیشنهاد رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) چنان‌چه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از $6/25$ بیش‌تر باشد، دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آب‌شستگی نخواهند داشت. ایشان هم‌چنین برای جلوگیری از اثر اندازه رسوبات بر عمق آب‌شستگی، نسبت قطر پایه به قطر متوسط ذرات را بزرگ‌تر از ۲۰-۲۵ پیشنهاد کردند (۳، ۲۲، ۲۳). اجسام شناور چوبی در طبیعت در بالادست پایه پل، اکثراً به شکل مکعب مستطیل تجمع می‌یابند (۲، ۷، ۸، ۹) و بر اساس مطالعه رحیمی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸)، تجمع اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل، بیش‌ترین میزان آب‌شستگی را حول پایه پل ایجاد می‌کنند (۱۵، ۱۷). بر همین اساس، اجسام شناور مورد استفاده در این پژوهش به شکل مکعب مستطیل طراحی گردید. برای مدل‌سازی اجسام شناور از قطعات چوب با قطرهای $0/1$ الی $0/5$ سانتی‌متر در طول ثابت ۱۲ سانتی‌متر درون جعبه نگهدارنده فلزی که به پایه پل توسط پیچ نصب می‌گردد، استفاده شده است. جعبه نگهدارنده اجسام شناور دارای ضخامت ۵ سانتی‌متر، طول ۱۰ سانتی‌متر و عرض ۱۲ سانتی‌متر است و وجوه آن توسط توری فلزی مشبک پوشانده شده است تا قطعات چوب از جعبه خارج نشوند. این جعبه در دو حالت چسبیده به بستر (مدفون) و حالتی که سطح زیرین جعبه اجسام شناور، با بستر رسوبی،



شکل ۲- منحنی زمان آب‌شستگی تعادلی.

Figure 2. Equilibrium scour time curve.

حرکت بستر ($\frac{u}{u_c} < 1$) می‌باشد؛ بنابراین شرایط جریان آب زلال ($0.3 < \frac{u}{u_c} < 1$) حاکم است.

تغییرات نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ($\frac{u}{u_c}$) برای عمق‌های نسبی ($\frac{y}{D}$) مختلف در جدول ۲ آمده است. مشاهده می‌شود که سرعت متوسط جریان در تمامی اعماق نسبی جریان کم‌تر از سرعت آستانه

جدول ۲- تغییرات $\frac{u}{u_c}$ با تغییرات $\frac{y}{D}$
Table 2. Variation of $\frac{u}{u_c}$ with $\frac{y}{D}$ changes.

نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی Flow velocity ratio to critical velocity $\frac{u}{u_c}$	نسبت عمق جریان به قطر پایه Flow depth ratio to pier diameter $\frac{y}{D}$	ردیف Number
0.838	1	1
0.599	1.33	2
0.462	1.67	3
0.370	2	4
0.311	2.33	5
0.265	2.67	6
0.230	3	7

آزمایش‌ها و اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی در اطراف پایه پل و مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی آن، نتایجی مطابق جدول ۳ به‌دست آمده است. دبی جریان در آزمایش‌ها ثابت و برابر ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه است.

نتایج و بحث

در این پژوهش اثر عمق نسبی جریان، سرعت نسبی جریان و تراز قرارگیری اجسام شناور بر نیمرخ آب‌شستگی بررسی شده است. پس از اجرای

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

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

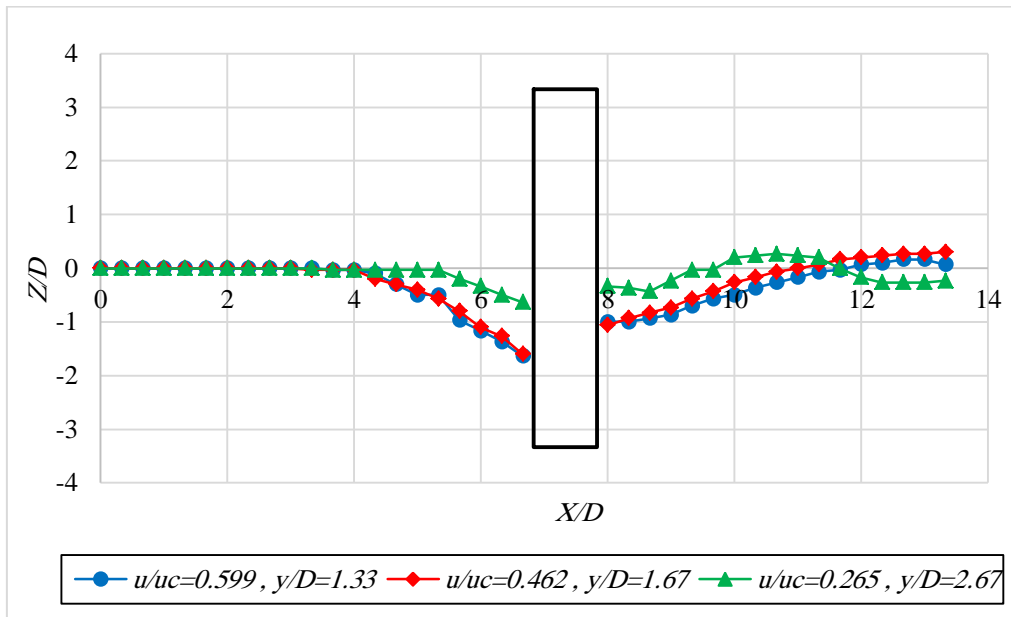
شماره آزمایش Test number	نسبت عمق جریان به قطر پایه Flow depth ratio to pier diameter $\frac{y}{D}$	نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی Flow velocity ratio to critical velocity $\frac{u}{u_c}$	عدد فرود چگال Densimetric Froude number F_{d50}	حالت آزمایش Test condition	نسبت فاصله کف اجسام شناور تا بستر رسوبی به قطر پایه Ratio of distance of debris bottom from sedimentary bed to pier diameter $\frac{y_0}{D}$	نسبت عمق استغراق به قطر پایه Submergence depth ratio to pier diameter $\frac{h_{sub}}{T}$	بیشینه عمق آب‌شستگی بی‌بعد شده Dimensionless maximum scour depth $\frac{d_s}{D}$
T1	1	0.838	3.688				1.67
T2	1.33	0.599	2.398				1.63
T3	1.67	0.462	1.719				1.60
T4	2	0.370	1.298	شاهد		-	0.93
T5	2.33	0.311	1.032	Reference			0.70
T6	2.67	0.265	0.842				0.63
T7	3	0.230	0.705				0.50
T8	1	0.838	3.688			0.4	1.83
T9	1.33	0.599	2.398	اجسام		0.2	1.77
T10	1.67	0.462	1.719	شناور		0	1.67
T11	2	0.370	1.298	مدفون	0	0.2	0.80
T12	2.33	0.311	1.032			0.4	0.67
T13	2.67	0.265	0.842	Buried debris		0.6	0.60
T14	3	0.230	0.705			0.8	0.3
T15	1.33	0.599	2.398			0.8	2.57
T16	1.67	0.462	1.719	اجسام		0.6	2.1
T17	2	0.370	1.298	شناور آزاد		0.4	1.4
T18	2.33	0.311	1.032		1	0.2	0.93
T19	2.67	0.265	0.842	Free debris		0	0.67
T20	3	0.230	0.705			0.2	0.6

با حدود ۵۷ درصد افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد است. اثر عمق نسبی ($\frac{y}{D}$) و سرعت نسبی جریان ($\frac{u}{u_c}$) بر نیمرخ‌های آب‌شستگی: برای بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی هم‌چون عمق نسبی جریان ($\frac{y}{D}$) و سرعت نسبی آن ($\frac{u}{u_c}$) بر روند آب‌شستگی، نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر در هر سه حالت شاهد، اجسام شناور مدفون و آزاد استخراج گردیدند. شکل ۳ (الف و ب) به ترتیب نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر در حالت شاهد را برای $\frac{u}{u_c}$ برابر با ۰/۲۶۵ تا ۰/۵۹۹ با $\frac{y}{D}$ برابر با ۱/۳۳ تا ۲/۶۷ نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در حالت شاهد، میزان آب‌شستگی بیشینه، در بالادست پایه پل رخ داده و با افزایش عمق نسبی جریان و به عبارتی کاهش سرعت نسبی جریان، بیشینه عمق آب‌شستگی روند نزولی پیدا می‌کند و

از جدول ۳ مشاهده می‌شود در حالت اجسام شناور مدفون، عمق نسبی جریان ($\frac{y}{D}$) در نحوه تغییرات بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد اثرگذار است. برای $\frac{y}{D}$ برابر با ۱ تا ۱/۶۷ افزایش جزئی بیشینه عمق حفره آب‌شستگی تا حدود ۱۰ درصد نسبت به حالت شاهد مشاهده شده است. با افزایش عمق نسبی جریان، اجسام شناور مدفون عملکردی همانند رفتار طوقه دارند و موجب کاهش بیشینه عمق آب‌شستگی می‌شوند. براساس نتایج آزمایشگاهی برای اجسام شناور مدفون، در $\frac{y}{D}$ برابر ۲ تا ۳ این رفتار مشاهده شده است. در حالت اجسام شناور در حالت آزاد اما نتایج متفاوت است و در تمامی عمق‌های نسبی جریان افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد رخ داده است. بحرانی‌ترین حالت اجسام شناور آزاد برای $\frac{y}{D} = ۱/۳۳$

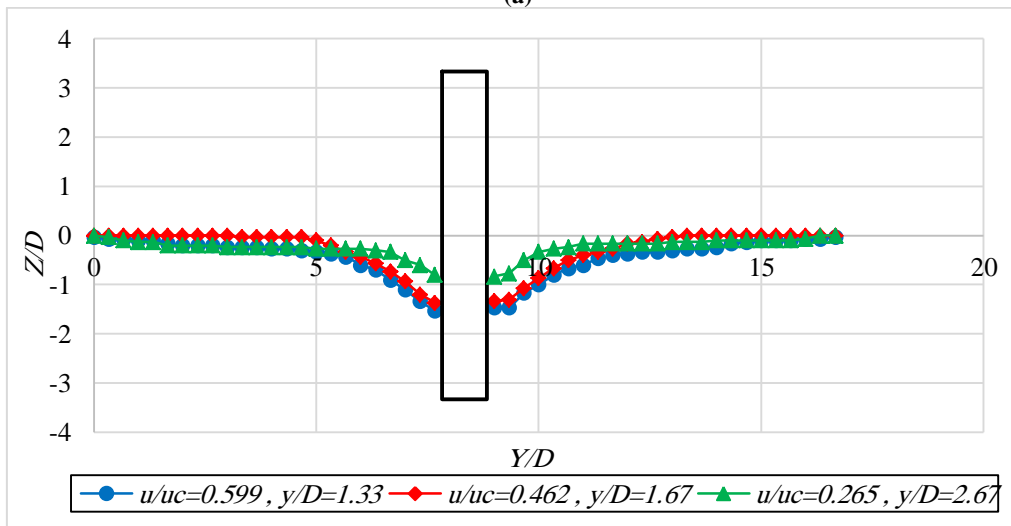
به صورت متقارن بوده و با افزایش عمق نسبی جریان و به تبع آن کاهش سرعت نسبی جریان، از حجم حفره آب‌شستگی در محور عمود بر جریان کاسته شده و بیشینه عمق آب‌شستگی در نیمرخ عرضی کاهش می‌یابد.

حجم حفره آب‌شستگی نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین با کاهش عمق نسبی جریان، طول تلماسه افزایش یافته و از ارتفاع آن کاسته می‌شود و فاصله شکل‌گیری نقطه اوج تلماسه با پایه پل نیز افزایش می‌یابد و فرار تلماسه صورت می‌گیرد. الگوی آب‌شستگی در نیمرخ عرضی در اطراف پایه پل



(الف)

(a)



(ب)

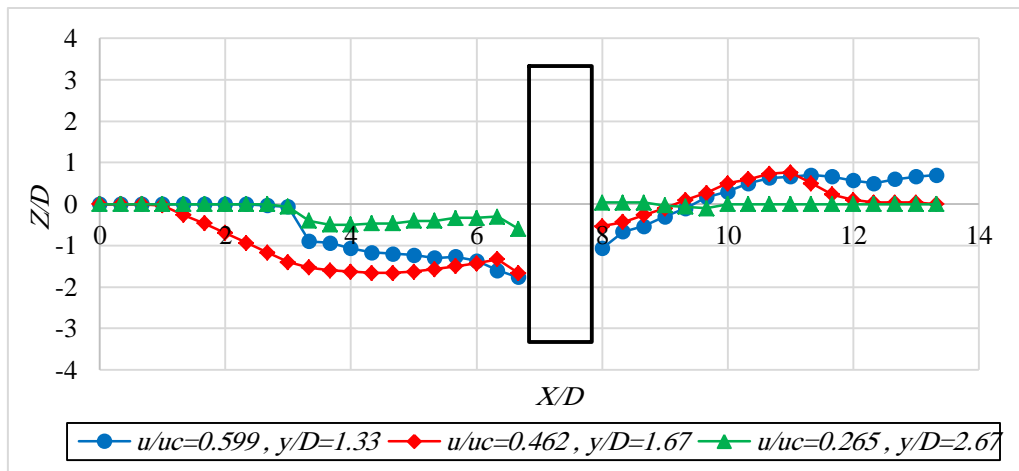
(b)

شکل ۳- اثر $\frac{y}{D}$ و $\frac{u}{u_c}$ بر عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت شاهد (الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

Figure 3. Effect of $\frac{u}{u_c}$ and $\frac{y}{D}$ on dimensionless scour depth around the bridge pier without debris (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.

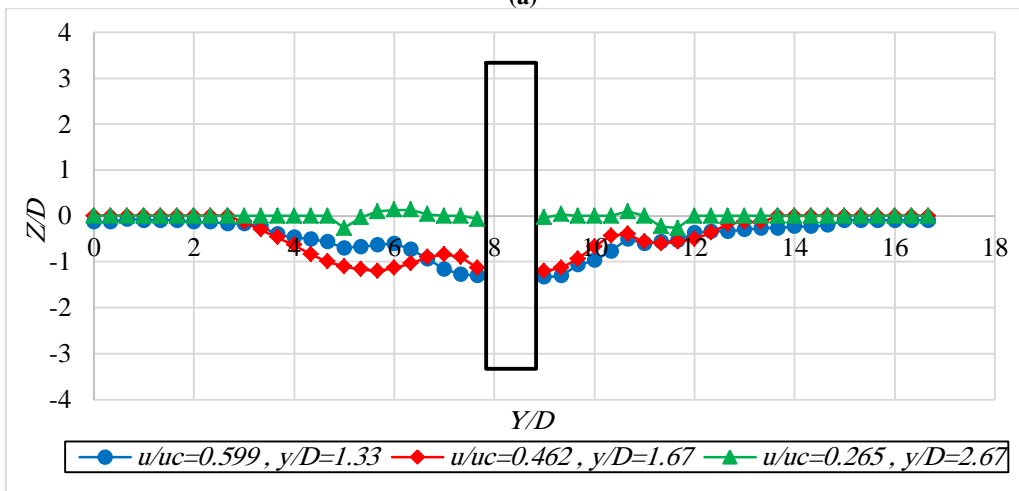
اوج را تجربه می‌کند و با کاهش عمق جریان، تلماسه از پایه پل فاصله گرفته و فرار تلماسه رخ می‌دهد. برای اعماق نسبی جریان ($\frac{y}{D}$) برابر با $\frac{1}{33}$ تا $\frac{1}{67}$ ، که میزان حجم حفره آب‌شستگی زیاد است، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نسبی جریان، ارتفاع تلماسه افزایش یافته، ولی طول آن کاهش می‌یابد و نقطه اوج تلماسه در نزدیکی پایه پل ایجاد می‌گردد. در حالت اجسام شناور مدفون، نیمرخ عرضی در طرفین پایه پل به صورت متقارن بوده و نسبت به نیمرخ طولی، میزان آب‌شستگی کم‌تری مشاهده شده است.

در شکل ۴ (الف و ب) به ترتیب نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر در حالت اجسام شناور مدفون برای $\frac{u}{u_c}$ برابر با $\frac{0}{265}$ تا $\frac{0}{599}$ و $\frac{y}{D}$ برابر با $\frac{1}{33}$ تا $\frac{2}{67}$ ارائه شده است. در حالت تجمع اجسام شناور مدفون، با افزایش عمق نسبی جریان و کاهش سرعت نسبی جریان، بیشینه عمق آب‌شستگی و ابعاد حفره آب‌شستگی کاهش پیدا می‌کند. هرچه عمق نسبی جریان کم‌تر شود، گسترش هندسه حفره آب‌شستگی بیش‌تر بوده و حجم حفره افزایش می‌یابد. با افزایش عمق نسبی جریان، تلماسه در نزدیکی پایه پل نقطه



(الف)

(a)



(ب)

(b)

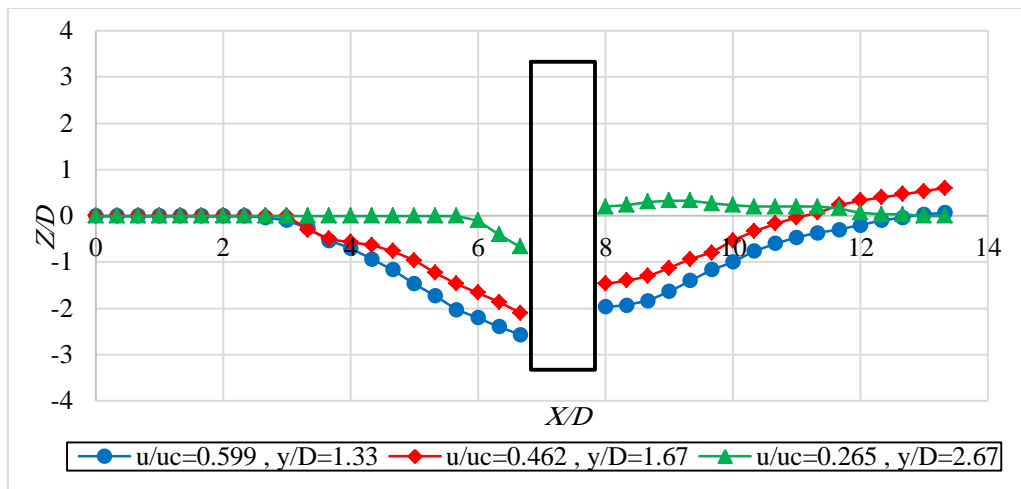
شکل ۴- اثر $\frac{u}{u_c}$ و $\frac{y}{D}$ بر عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت اجسام شناور مدفون (الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

Figure 4. Effect of $\frac{u}{u_c}$ and $\frac{y}{D}$ on dimensionless scour depth around the bridge pier with buried debris (a)

Longitudinal profile (b) Transverse profile.

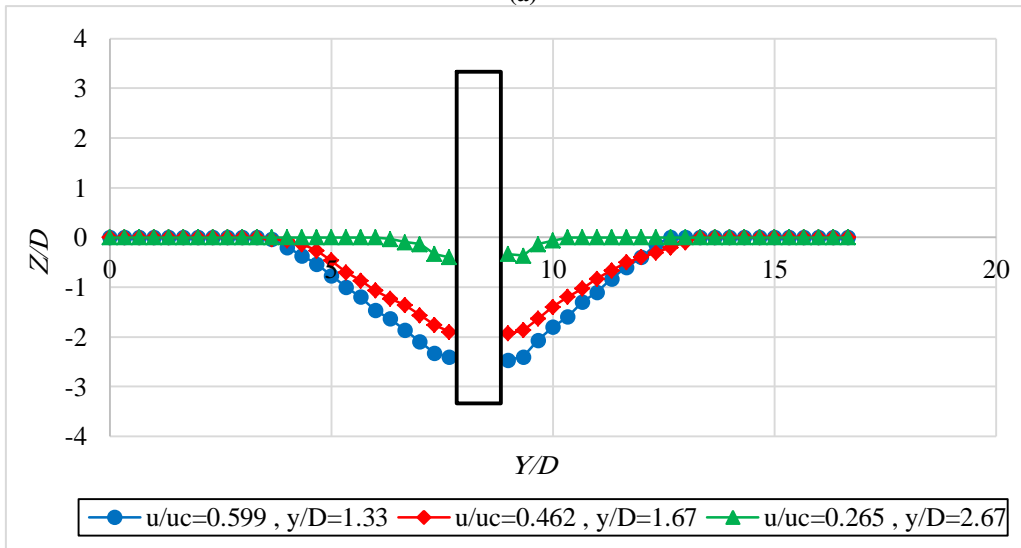
افزایش و کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین تلماسه از پایه پل دورتر می‌شود. نیمرخ عرضی برای حالت اجسام شناور آزاد، مشابه حالت شاهد و اجسام شناور مدفون، تقارن خود را حفظ نموده و با افزایش عمق نسبی جریان و کاهش سرعت نسبی جریان، از حجم حفره آب‌شستگی کاسته شده و عمق بیشینه آب‌شستگی نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ (الف و ب) نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر در حالت اجسام شناور آزاد برای $\frac{u}{u_c}$ برابر با ۰/۲۶۵ تا ۰/۵۹۹ و $\frac{y}{D}$ برابر با ۱/۳۳ تا ۱/۶۷ آمده است. در حالت جسم شناور آزاد، با افزایش عمق نسبی جریان و کاهش سرعت نسبی آن عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد و تلماسه در نزدیکی پایه پل شکل می‌گیرد. با کاهش عمق نسبی جریان، عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تلماسه به ترتیب،



(الف)

(a)



(ب)

(b)

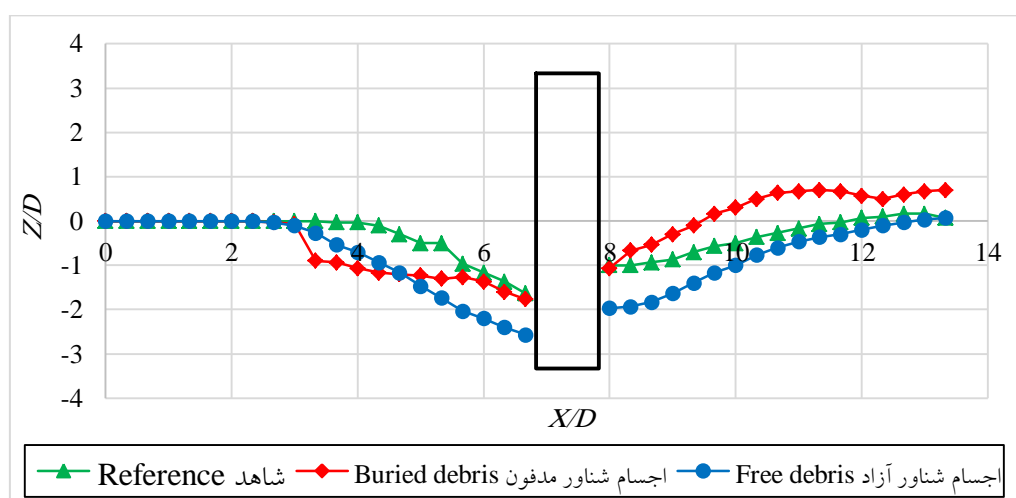
شکل ۵- اثر $\frac{u}{u_c}$ و $\frac{y}{D}$ بر عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در حالت اجسام شناور آزاد (الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

Figure 5. Effect of $\frac{u}{u_c}$ and $\frac{y}{D}$ on dimensionless scour depth around the bridge pier with submerged debris (a)

Longitudinal profile (b) Transverse profile.

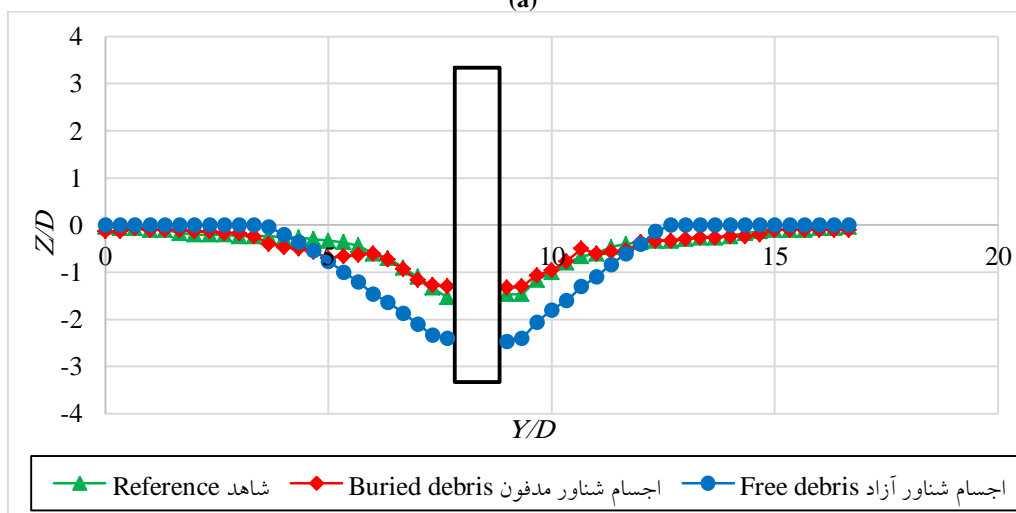
اما در حالت اجسام شناور آزاد، افزایش ۵۷ درصدی را تجربه می‌کند (شکل ۶). در نیمرخ عرضی آب‌شستگی، در صورت وجود اجسام شناور مدفون، در نزدیکی به ضلع تحتانی اجسام شناور که به بستر چسبیده است، آب‌شستگی موضعی نسبت به حالت شاهد مشاهده می‌شود و میزان عمق آب‌شستگی موضعی را در اعداد فرود بالا بسیار جزئی افزایش می‌دهد (شکل ۶).

اثر تراز قرارگیری اجسام شناور بر نیمرخ آب‌شستگی: در حالت حضور اجسام شناور به صورت مدفون و آزاد، به‌طور کلی، آب‌شستگی افزایش می‌یابد و در حالت آزاد نسبت به حالت مدفون، از نظر بیشینه عمق حفره آب‌شستگی، حالت بحرانی و افزایشی مشاهده می‌شود. در حالت اجسام شناور مدفون نسبت به حالت شاهد، در $\frac{u}{u_c} = 0.599$ و $\frac{y}{D} = 1.33$ بیشینه عمق حفره آب‌شستگی به میزان ۸ درصد افزایش می‌یابد،



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۶- اثر تراز قرارگیری اجسام شناور بر عمق آب‌شستگی بی‌بعد اطراف پایه پل در $\frac{u}{u_c} = 0.599$ و $\frac{y}{D} = 1.33$ (الف) نیمرخ طولی (ب) نیمرخ عرضی.

Figure 6. Effect of debris level on dimensionless scour depth around the bridge pier at $\frac{u}{u_c} = 0.599$, $\frac{y}{D} = 1.33$ (a) Longitudinal profile (b) Transverse profile.

تجربی برای پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی با تجمع اجسام شناور، از نتایج دو حالت اجسام شناور آزاد و مدفون به صورت رابطه ۴ ارائه می‌گردد.

$$\frac{d_s}{D} = 0.784 \left(\frac{y-y_0}{D} \right)^{-0.211} (F_{d50})^{1.129} \left(\frac{h_{sub}}{T} \right)^{0.721} \quad (4)$$

می‌آید.

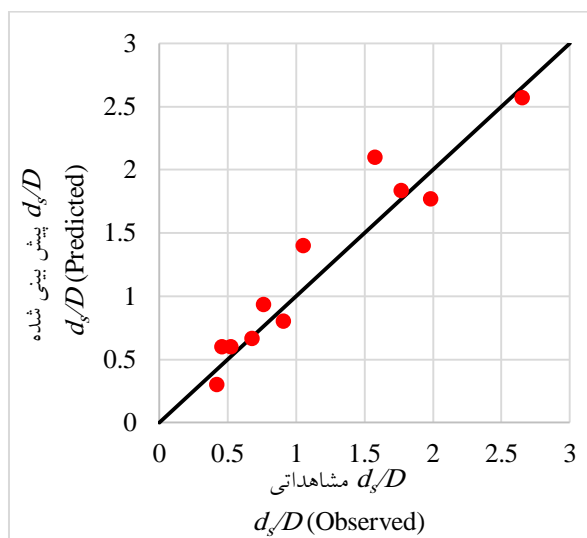
پیش‌بینی بیشینه عمق آب‌شستگی با تجمع اجسام شناور: بر مبنای تحلیل ابعادی و با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی^۱ داده‌های آزمایشگاهی، یک معادله

برای تعیین دقت رابطه پیشنهادی از خطای جذر میانگین مربعات^۲ استفاده شد که از رابطه ۵ به دست

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_P - X_O)^2}{n}} \quad (5)$$

که در رابطه فوق، X_P مقادیر پیش‌بینی شده، X_O مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشند. رابطه پیشنهادی نشان می‌دهد که بیشینه عمق آب‌شستگی با پارامترهای F_{d50} و $\frac{h_{sub}}{T}$ رابطه مستقیم و با $\frac{y-y_0}{D}$ رابطه معکوس دارد. براساس این معادله پارامتر F_{d50} بیش‌ترین اثر و پارامتر $\frac{y-y_0}{D}$ کم‌ترین اثر را بر نتایج دارد. مقادیر

پیش‌بینی شده از رابطه پیشنهادی را نشان می‌دهد، هم‌چنین در جدول ۴ دامنه پارامترهای به‌کار رفته در رابطه پیشنهادی ارائه شده است.



شکل ۷- تغییرات d_s/D مشاهداتی با d_s/D پیش‌بینی شده با تجمع اجسام شناور.

Figure 7. Changes of d_s/D (observed) to D_s/D (predicted) with debris accumulation.

1- Nonlinear Regression
2- Root Mean Square Error

جدول ۴- دامنه تغییرات پارامترها در معادله پیش‌بینی پیشنهادی.

Table 4. Domain variations of parameters in prediction proposed equation.

دامنه کاربرد Domain	پارامترهای بی‌بعد Dimensionless parameters	ردیف Number
0.33 - 3	$\frac{y-y_0}{D}$	1
0.71 - 3.69	Fd_{50}	2
0.2 - 0.8	$\frac{h_{sub}}{T}$	3

نتیجه‌گیری کلی

مشاهده شده است. بحرانی‌ترین حالت در کم‌ترین عمق نسبی جریان ($\frac{y}{D}=1/33$) است که ۵۷ درصد افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد رخ می‌دهد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی یک معادله تجربی برای حالت تجمع اجسام شناور بر مبنای تحلیل ابعادی و با روش رگرسیون غیرخطی پیشنهاد شده است. دامنه کاربرد این معادله پیشنهادی ارائه گردیده است و مقادیر $RMSE=0/22$ و $R^2=0/96$ نشان از تطابق مناسب بین داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی دارد. براساس این معادله پارامتر عدد فرود چگال بیش‌ترین اثر و پارامتر $\frac{y-y_0}{D}$ کم‌ترین اثر را بر نتایج دارد. نتایج حاصل از این پژوهش علی‌رغم دامنه کاربرد محدود می‌تواند برای کاربرد در طراحی‌های اولیه و تحلیل الگوی فرسایش محیط رودخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در انتها می‌توان اشاره کرد که در حالت اجسام شناور آزاد که احتمال رخداد آن در طبیعت محتمل‌تر است، عمق آب‌شستگی افزایش یافته است. این موضوع نیازمند توجه و رسیدگی از جمله ارائه راهکارهای حفاظتی و اجرای سازه‌های محافظ همانند سازه‌های تثبیت‌کننده بستر به‌ویژه در رودخانه‌های بالادستی در مناطق با شیب زیاد است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت مساعدت در اجرای آزمایش‌ها و

در این پژوهش اثر تجمع اجسام شناور در دو حالت قرارگیری مدفون ($y_0=0$) و آزاد ($y_0=D$)، به‌صورت مستغرق و نیمه‌مستغرق، در بالادست پایه پل منفرد استوانه‌ای، بر نیمرخ بستر با روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با حالت شاهد مقایسه شدند. مبنای مقایسه نیمرخ‌های عرضی و طولی و بیشینه عمق حفره آب‌شستگی، پارامترهای عمق نسبی جریان (۱ تا $\frac{y}{D}=3$) و سرعت نسبی جریان ($0/230$ تا $\frac{u}{u_c}=0/838$) بودند. نتایج مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، در هر سه حالت شاهد، اجسام شناور مدفون و آزاد با افزایش عمق نسبی جریان و کاهش سرعت نسبی جریان، میزان بیشینه عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. هنگامی که اجسام شناور به‌صورت مدفون قرار گیرند، در اعماق نسبی جریان کم (۱ تا $1/67$) بیشینه عمق حفره آب‌شستگی حداکثر تا ۱۰ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافته، اما با افزایش عمق نسبی جریان، (۲ تا ۳) از میزان عمق حفره آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد کاسته می‌شود. می‌توان گفت در $\frac{y}{D}>2$ اجسام شناور مدفون رفتاری مانند عملکرد طوقه از خود نشان می‌دهند. در حالت اجسام شناور آزاد، بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد افزایش داشته و در تمام عمق‌های نسبی جریان از $1/33$ تا ۳ افزایش بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به حالت شاهد

حمایت‌های مادی و معنوی در مراحل مختلف پژوهش، تشکر می‌نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد نویسنده اول است. دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران/ دبیر تخصصی/ سردبیر نشریه و بنابر درخواست ایشان با مکاتبه با نویسنده مسئول میسر خواهد بود.

تعارض منافع

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

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله که برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است، به شرح زیر می‌باشد:

مشارکت پوریا اکبری دادامحله به‌عنوان نویسنده اول مقاله اجرای مدل‌سازی آزمایشگاهی، داده‌برداری، تفسیر و تحلیل داده‌ها و نگارش نسخه اولیه مقاله بوده است.

مشارکت مهدی حمیدی به‌عنوان استاد راهنما و نویسنده مسئول مقاله نظارت بر روند مدل‌سازی آزمایشگاهی، کنترل نتایج و ویرایش نهایی متن مقاله بوده است.

مشارکت علی مهدیان خلیلی به‌عنوان استاد مشاور و نویسنده سوم مقاله طراحی و نظارت بر اجرای مدل‌سازی آزمایشگاهی، بررسی و کنترل داده‌ها و نتایج مقاله بوده است.

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 مقطع کارشناسی ارشد نویسنده اول است که تحت حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در قالب گرنت دانشجو و گرنت استاد راهنما انجام گردیده است.

منابع

1. Moshashaie, S.M., and Asadi, M.A. 2015. Scour around a square pier with parabolic nose in presence of woody debris in front of pier. *Modares Civil Engineering Journal*. 15: 4. 85-96 (In Persian).
2. Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E., and Spitz, W.J. 2006. Effects of debris on bridge pier scour. *Proceedings 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3)*, Amsterdam, the Netherlands. pp. 741-749.
3. Raudkivi, A.J., and Ettema, R. 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109: 3. 338-350.
4. Melville, B.W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123: 2. 125-136.
5. Melville, B.W., and Chiew, Y.M. 1999. Time scale for local scour at bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125: 1. 59-65.
6. Ebrahimi, T., Hamidi, M., Rahmani Firoozjaiee, A., and Khavasi, E. 2021. Numerical Investigation of Scour Around a Cylindrical Pier in Laboratory Scale Using Euler-Lagrange Approach. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 53: 1. 411-426. (In Persian)
7. Melville, B.W., and Dongol, D.M. 1992. Bridge Pier Scour with Debris Accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118: 9.
8. Diehl, T.H. 1997. Potential drift accumulation at bridge. Report No. FHWARD -97-026, Hydraulic Engineering No. 9, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

9. Lagasse, P.F., Zevenbergen L.W., and Clopper, P.E. 2010. Impacts of debris on bridge pier scour. Proceedings 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5), San Francisco, USA. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers. pp. 854-863.
10. Pagliara, S., and Carnacina, I. 2010. Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*. 48: 1. 3-13.
11. Pagliara, S., and Carnacina, I. 2011. Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137: 2. 254-261.
12. Pagliara, S., and Carnacina, I. 2011. Influence of large woody debris on sediment scour at bridge pier. *International Journal of Sediment Research*. 26: 2. 121-136.
13. Park, J.H., Chamroeun, S., Park, C.K., and Young, D.K. 2016. A study on the effects of debris accumulation at sacrificial piles on bridge pier scour. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20: 4. 1546-1551.
14. Ebrahimi, M., Kripakaran, P., Djordjević, S., Tabor, G., Kahraman, R., Prodanović, D., and Arthur, S. 2016. Hydrodynamic effects of debris blockage and scour on masonry bridges: towards experimental modelling. Proceedings of 8th International Conference on Scour and Erosion, Oxford, UK.
15. Rahimi, E., Qaderi, K., Rahimpour, M., and Ahmadi, M.M. 2017. Experimental study on effect of debris accumulation on bridge pier scour. *Modares Civil Engineering Journal*. 10: 6. 786-796. (In Persian)
16. Ebrahimi, M., Kripakaran, P., Prodanovic, D.M., Kahraman, R., Riella, M., Tabor, G., Arthur, S., and Djordjević, S. 2018. Experimental study on scour at a sharp-nose bridge pier with debris blockage. *Journal of Hydraulic Engineering*. 144: 12.
17. Rahimi, E., Qaderi, K., Rahimpour, M., and Ahmadi, M.M. 2018. Effect of debris on piers group scour: an experimental study. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 22. 1496-1505.
18. Abousaeidi, E., Qaderi, K., Rahimpour, M., and Ahmadi, M.M. 2018. Experimental investigation of the effect of debris accumulation on the local scour at bridge pier and abutment. *Journal of Water and Soil Conservation*. 25: 2. 267-282. (In Persian)
19. Dias, A.J., Sena Fael, C., and González, F.N. 2019. Effect of debris on the local scour at bridge piers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 471: 022024.
20. Pagliara, S., and Palermo, M., 2020. Effects of bridge pier location and debris accumulation on equilibrium morphology. *World Environmental and Water Resources Congress*. Henderson, Nevada, pp. 76-83.
21. Palermo, M., Pagliara, S., and Roy, D. 2021. Effect of debris accumulation on scour evolution at bridge pier in bank proximity. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 61: 1. 1-11.
22. Koohsari, A., and Hamidi, M. 2021. 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. (In Persian)
23. Sadeqlu, M., and Hamidi, M. 2022. Numerical investigation of the cylindrical bridge pier scour reduction by installing a group of two submerged vanes. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. 22: 85. 91-114. (In Persian)