



Laboratory Investigation of the Effect of Plastic Clay (Ball Clay) on Reducing Local Scour Around Bridge Piers

Mahdi Majdi Asl^{1✉} | Mohammad Ghorbanzadeh² | Mohammad Hossein Jahanpeyma³ | Mehdi Rezaei⁴

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh,

Iran. E-mail: mehdi.majedi@gmail.com

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail:

muhammad.1378gh@gmail.com

3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail:

jahanpeyma@maragheh.ac.ir

4. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail:

mehdi_rezaei@maragheh.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 21, 2025

Revised: Dec. 30, 2025

Accepted: Apr. 16, 2026

Published online: April. 2026

Keywords:

Sand Bed,
Nanomaterial,
Local Scour,
Metashape

In this study, the influence of incorporating plastic clay (Ball Clay) into a sandy bed on the mitigation of local scour around a cylindrical bridge pier was investigated through a comprehensive series of laboratory experiments. The experiments were conducted in a recirculating flume measuring 13 m in length, 1.2 m in width, and 0.8 m in depth, with the sediment bed composed of uniform sand with a median size of $d_{50} = 0.78$ mm. A cylindrical pier with a diameter of 9 cm was installed at the center of the test section, and plastic clay was mixed with the sediment at weight fractions of 5%, 10%, and 15%. The flow conditions considered included discharges of 10, 15, 20, 25, and 30 L/s, corresponding to Froude numbers of 0.12, 0.15, 0.168, 0.171, and 0.18, respectively. In total, 20 experiments were performed. To determine the equilibrium scour time, the temporal evolution of the scour depth was recorded at multiple time intervals. The results showed that for all flow conditions, the scour depth reached an asymptotic and stable state after approximately 210 minutes. At this stage, the sediment entrainment and deposition processes around the pier had reached dynamic equilibrium, such that the bed shear stress within the scour hole dropped below the critical shear stress of the particles. Consequently, the flow was no longer capable of mobilizing the bed material, and the scour depth remained constant thereafter. Based on this observation, the equilibrium scour depth at 210 minutes was adopted for all subsequent analyses. The bed topography was measured using (i) manual readings obtained with a mechanical point gauge, and (ii) three-dimensional surface reconstruction derived from close-range photogrammetry in Agisoft Metashape based on sets of overlapping images. The comparison demonstrated strong consistency between the two measurement techniques. The experimental results revealed that the addition of plastic clay significantly enhanced the resistance of the sediment bed to scouring by increasing inter-particle cohesion. Increasing the clay content markedly reduced the maximum scour depth, and in some flow conditions—particularly at 10 and 15 L/s—scour was almost completely inhibited. For instance, at 15 L/s, reductions of 54%, 100%, and 100% in scour depth were obtained for clay contents of 5%, 10%, and 15%, respectively. At 30 L/s, the corresponding reductions were 37%, 40%, and 50%. These findings demonstrate that higher clay contents, especially 15%, were capable of effectively suppressing local scour even under relatively high flow intensities. Overall, the results confirm the high potential of plastic clay as a cost-effective bed stabilization material for mitigating local scour around hydraulic structures. Furthermore, the addition of plastic clay substantially reduced not only the maximum depth but also the spatial extent of the scour hole. The 3D photogrammetric models accurately captured the scour geometry and proved to be a reliable tool for detailed morphological assessment.

Cite this article: Majdi Asl, M., Ghorbanzadeh, M., & Jahanpeyma, M. H. & Rezaei, M. (2025). Laboratory Investigation of the Effect of Plastic Clay (Ball Clay) on Reducing Local Scour Around Bridge Piers, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 333-351. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402768.670010>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402768.670010>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Local scour around bridge piers is a critical factor threatening the stability of hydraulic structures in riverbeds. It occurs due to flow concentration and increased bed shear stress around the pier, leading to erosion and potential structural failure. Understanding and controlling local scour is thus essential in river engineering and pier design. Various methods have been proposed to mitigate scour, including modifying pier geometry, using protective structures such as riprap and flow guide plates, and enhancing bed properties with mineral or chemical additives. Among these, natural and environmentally friendly materials have attracted attention as effective and cost-efficient solutions. Ballclay powder, a natural material with high cohesion and low permeability, can increase bed resistance and reduce the formation of deep scour holes around piers. The present study aims to experimentally investigate the effect of different percentages of Ballclay powder on local scour reduction around a cylindrical pier in a sandy bed. Laboratory-scale experiments were conducted under various flow discharges to assess the bed response to different mixtures. Scour depths were measured over time, and equilibrium conditions were analyzed at 210 minutes. The findings provide practical insights for controlling local scour and enhancing the safety and stability of hydraulic structures, highlighting the potential of Ballclay powder as an environmentally friendly and effective countermeasure.

Method

Laboratory experiments were conducted to investigate the effect of Ballclay powder on local scour around a cylindrical pier. The experiments were performed in a flume 13 m long, 1.2 m wide, and 0.8 m high. Flow was supplied by a centrifugal pump and discharge was controlled using an ultrasonic flowmeter with ± 0.1 L/s accuracy. Transparent Plexiglas sidewalls allowed visual observation of scour development. A 3-m-long sandy bed with a thickness of approximately 20 cm was prepared at the center of the flume using natural sand with a median particle size of $d_{50} = 0.78$ mm. A PVC cylindrical pier with an external diameter of 9 cm was installed at the center of the sediment layer. The pier diameter and position were selected to minimize flow interference with the flume walls and to maintain geometric similarity. Ballclay powder was mixed with the dry sand at weight fractions of 5%, 10%, and 15%, resulting in four test conditions: pure sand (control) and sand with 5%, 10%, and 15% Ballclay. For each condition, experiments were conducted under five discharges: 10, 15, 20, 25, and 30 L/s, with each test repeated independently. Scour depth was measured manually at the center of the hole using a graduated ruler, and equilibrium conditions were determined at 210 minutes. High-resolution photogrammetry was employed to capture the final bed geometry around the pier. Sequential overlapping images were processed in Agisoft Metashape to reconstruct accurate 3D models of the scour hole, allowing detailed analysis of scour depth, sediment distribution, and comparison across different experimental conditions.

Results

The longitudinal profiles of local scour depth in the clear-sand case indicate that increasing flow discharge significantly amplifies the scour hole around the cylindrical pier. This trend is attributed to higher flow energy and shear stress acting on the sandy bed, causing particle displacement and erosion. Particularly at higher discharges (25 and 30 L/s), the profiles show substantial scour depth, reflecting severe erosion under these conditions. The transverse scour profiles exhibit a symmetric distribution, with the maximum depth occurring at the pier center along the flow axis and gradually decreasing toward the sides. This pattern highlights the formation of horseshoe vortices and concentrated flow around the pier, leading to intense central erosion and lateral reduction. Higher discharges also broaden the scour width, indicating increased lateral as well as vertical erosion potential. The addition of Ballclay significantly reduced scour depth across all discharges. At 10 L/s, 5% Ballclay reduced scour depth by approximately 42%, while 10% and 15% completely prevented scour formation. The effectiveness of Ballclay is attributed to enhanced mechanical properties of the sediment bed; particle cohesion and reduced permeability limit particle displacement. At higher discharges (15–30 L/s), Ballclay still mitigated scour, although lower percentages (5% and 10%) showed reduced efficiency under stronger flows. For instance, at 15 L/s, the scour reduction reached 54%, 100%, and 100% for 5%, 10%, and 15% Ballclay, respectively, and similar trends were observed at higher discharges. Transverse profiles confirm that increasing Ballclay content decreases both the depth and lateral extent of the scour hole. At 15%, the bed remained almost flat, demonstrating full stabilization against erosion. Furthermore, downstream sediment accumulation decreased with Ballclay addition, reflecting reduced sediment detachment and transport. Short-range photogrammetry was employed to reconstruct 3D scour models, and the manually measured longitudinal profile was compared with the 3D model for 15% Ballclay at 30 L/s. The results show excellent agreement, validating the 3D reconstruction method as a reliable tool for detailed analysis of scour patterns.

Conclusions

In this study, the effect of adding Ballclay to a sandy bed on the reduction of local scour around a cylindrical pier was investigated under laboratory conditions at different flow discharges. The results clearly demonstrated that the mixture of sand with Ballclay significantly enhanced bed stability and effectively prevented the development of scour holes. The addition of 5% Ballclay reduced the average scour depth by approximately 40% across all discharges, while 10% and especially 15% Ballclay achieved much higher reductions, up to 98%, even completely eliminating scour at low discharges of 10 and 15 L/s. This improvement is mainly attributed to increased cohesion, reduced permeability, and enhanced shear strength of the sandy bed due to the fine and plastic properties of Ballclay. Temporal analysis of scour development showed that, for both the clean sand and the 5% mixture, the scour depth reached a quasi-steady state after

approximately 210 minutes, which was therefore considered as the equilibrium time for all experiments. Additionally, the formation of downstream sediment mounds, resulting from the displacement of eroded particles, was significantly reduced in the presence of Ballclay. This indicates that Ballclay not only mitigates scour depth but also prevents sediment redistribution along the flow path. Overall, the use of Ballclay as a simple, cost-effective, and environmentally friendly additive represents an efficient approach for controlling local scour around bridge piers in sandy beds. Further studies under unsteady flow conditions, long-term durability, and field implementation may provide valuable insights for practical protection of hydraulic structures.

Funding

Research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Mahdi Majedi Asl: Conceptualization, supervision, writing – review and editing.

Mohammad Ghorbanzadeh: Methodology, experimental investigation, data analysis, writing – original draft.

Mohammad Hossein Jahan Peyma: Data processing, results analysis, interpretation of findings.

Mahdi Rezaei: Three-dimensional reconstruction, visualization, preparation of figures and tables, data curation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the author(s) used [Chat Gpt] in order to [Text Editing]. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the publication.

This declaration does not apply to the use of basic tools for checking grammar, spelling, references, etc. If there is nothing to disclose, there is no need to add a statement.

Data availability statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to the University of Maragheh for providing laboratory facilities and scientific support for this research, and to Adak Tajhiz Iranian Company for their cooperation and support.

Ethical considerations

This study did not involve human participants or animals and therefore did not require ethical approval. The authors confirm that all ethical standards of research, including avoidance of data fabrication, falsification, and plagiarism, were fully observed.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر رس پلاستیکی (Ball Clay) بر کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه

مهدی ماجدی اصل^۱، محمد قربانزاده^۲، محمد حسین جهان پیما^۳ مهدی رضایی^۴۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. mehdi.majedi@gmail.com۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. mohammad.1378gh@gmail.com۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. jahanpeyma@maragheh.ac.ir۴. گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. peng.rezaie@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش، تأثیر افزودن رس پلاستیکی بر کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه استوانه‌ای در بستر ماسه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر، عمق ۰/۸ متر و با بستری از ماسه با دانه‌بندی $d_{50}=0.78\text{mm}$ انجام شد. پایه پل استوانه‌ای شکل به قطر ۹ سانتی‌متر در مرکز بستر قرار گرفت و درصد‌های مختلفی از رس پلاستیکی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) به بستر افزوده شد. آزمایش‌ها تحت دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه با اعداد فرود بترتیب برابر با ۰/۱۲، ۰/۱۵، ۰/۱۶۸، ۰/۱۷۱، ۰/۱۸ اجرا شدند. در مجموع ۲۰ آزمایش در این تحقیق انجام شد. برای تعیین زمان تعادل آبشستگی، تغییرات عمق حفره در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شد و مشاهده گردید که در تمامی دبی‌ها پس از گذشت ۲۱۰ دقیقه، روند تغییر عمق آبشستگی پایدار شده و به حالت تعادل رسید، زیرا با گذشت زمان، فرآیند برداشت و رسوب‌گذاری ذرات در اطراف پایه به تعادل رسیده و تنش برشی جریان در کف گودال از مقدار تنش برشی بحرانی ذرات کمتر شده است. در این شرایط، نیروی جریان دیگر توانایی جابه‌جایی مؤثر ذرات بستر را نداشته و عمق آبشستگی ثابت باقی مانده است. از این رو، تمامی نتایج نهایی بر اساس عمق آبشستگی در این زمان تحلیل شدند. برداشت داده‌ها از سطح بستر به دو روش انجام شد که ابتدا روش دستی با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی و همچنین تصاویر سه‌بعدی با بهره‌گیری از فتوگرامتری برد کوتاه در نرم‌افزار Metashape بر پایه تصاویر همپوشان. نتایج نشان داد که افزایش درصد رس پلاستیکی به دلیل ایجاد چسبندگی بین دانه‌های بستر به‌طور مؤثری عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد، به‌گونه‌ای که در برخی دبی‌ها (به‌ویژه ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه)، پدیده آبشستگی تقریباً مهار شد. به‌عنوان نمونه، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه کاهش عمق آبشستگی به ترتیب ۵۴، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد، و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۳۷، ۴۰ و ۵۰ درصد برای غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ثبت گردید. این روند نشان می‌دهد که درصد‌های بالاتر رس پلاستیکی (به‌ویژه ۱۵ درصد) حتی در دبی‌های بالا نیز توانسته‌اند از وقوع آبشستگی به صورت مؤثر جلوگیری کنند. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای افزودنی رس پلاستیکی در افزایش پایداری بستر و کاهش فرسایش موضعی اطراف سازه‌ها است همچنین نتایج نشان داد افزودن رس پلاستیکی موجب کاهش قابل توجه عمق و وسعت گودال آبشستگی می‌شود. همچنین، مدل‌های سه‌بعدی بازسازی شده تطابق مناسبی با داده‌های برداشت‌شده به روش دستی داشتند و به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل دقیق هندسه گودال قابل استفاده هستند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۷

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

بستر ماسه‌ای،

نانو مواد،

فرسایش موضعی،

Metashape

استناد: ماجدی اصل، مهدی؛ قربانزاده، محمد؛ جهان پیما، محمد حسین؛ رضایی، مهدی (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی تأثیر رس پلاستیکی (Ball Clay) بر کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۲)، ۳۳۳-۳۵۱.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402768.670010>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402768.670010>

مقدمه

پدیده آبشستگی موضعی یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری پایه‌های پل‌ها و سایر سازه‌های مستقر در بستر رودخانه‌ها به‌شمار می‌رود. این پدیده به‌دلیل تمرکز جریان در اطراف پایه و افزایش تنش برشی بر سطح بستر رخ می‌دهد و می‌تواند منجر به فرسایش شدید و در نهایت شکست سازه شود. به همین دلیل، شناخت و کنترل آبشستگی موضعی همواره یکی از مسائل مورد توجه در مهندسی رودخانه و طراحی سازه‌های هیدرولیکی بوده است. روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی ارائه شده‌اند که شامل اصلاح هندسه پایه، استفاده از سازه‌های حفاظتی مانند سنگ‌چینی، صفحات هدایت‌کننده جریان، و نیز بهبود خواص مکانیکی بستر با استفاده از افزودنی‌های معدنی یا شیمیایی است. در این میان، استفاده از مواد طبیعی و سازگار با محیط زیست به‌عنوان روشی مؤثر و کم‌هزینه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. صمیمی بهبهان و همکاران (۱۳۸۵) با بهره‌گیری از صفحات مستغرق دارای زاویه ۱۰ تا ۳۰ درجه نسبت به جهت جریان و با به‌کارگیری آرایش‌های چندتایی و چینش‌های ویژه، موفق شدند الگوی جریان نزدیک بستر را اصلاح کرده و عمق آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. همچنین، (Ghorbani & Karimi, 2007) در پژوهش خود به بررسی اثر استفاده از یک صفحه مستغرق با طول برابر قطر پایه دایره‌ای پل در جلوی پایه، و نیز استفاده از دو صفحه مستغرق در بالادست و به‌صورت چسبیده به پایه پرداختند. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر عواملی مانند زاویه برخورد جریان با صفحات مستغرق، تعداد صفحات، ارتفاع آن‌ها، فاصله صفحات در راستای جریان و عمود بر آن، و همچنین فاصله اولین ردیف صفحات تا جلوی پایه، بر شدت فرسایش موضعی است. در همین راستا، (Ghorbani & Kells, 2008) نیز در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد صفحات مستغرق منفرد و دابل را در کاهش آبشستگی موضعی بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که استفاده از صفحات مستغرق دابل در مقایسه با نوع منفرد، اثربخشی بیشتری در کاهش عمق آبشستگی داشته و در بهبود شرایط هیدرولیکی اطراف پایه مؤثرتر عمل می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر و نسبتاً ساده برای کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه پل‌ها، استفاده از طوق در اطراف پایه است. استفاده از طوق موجب تغییر در ساختار جریان پیرامون پایه شده و با کاهش شدت گردابه‌های موضعی، به‌ویژه گردابه نعل اسبی، از انتقال رسوبات از اطراف پایه به پایین‌دست جلوگیری می‌کند. (Daneshfaraz et al., 2019 a) در یک مطالعه آزمایشگاهی، اثرات حفره برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای بر پایه پل‌های مجاور را در دو دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلیمتر و با استفاده از اعداد فرود مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در هر دو دانه‌بندی، با کاهش عمق گودال‌ها و کاهش عدد فرود، نسبت‌های بی‌بعدی «ارتفاع گودال به عمق جریان» کاهش یافته و نسبت‌های «طول و عرض گودال به عمق جریان» افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تأثیر حفره برداشت مصالح بر آبشستگی اطراف پایه پل در ناحیه بالادست، بیشتر از ناحیه پایین‌دست است. همچنین (Daneshfaraz et al., 2019 b) به‌صورت آزمایشگاهی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای را در شرایط عدد فرود مختلف بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که زاویه ایستایی مصالح زیر آب بیشترین تأثیر را در افزایش آبشستگی داشته و نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان نیز بیشترین نقش را در کاهش طول و عمق آبشستگی ایفا می‌کند. افزون بر این، نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود و تنش برشی، نسبت سرعت برشی بحرانی به سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد. (Zarrati et al., 2004) در یک پژوهش آزمایشگاهی نشان دادند که هرچه طوق به بستر جریان نزدیک‌تر نصب شود، اثربخشی آن در فرسایش بستر اطراف پایه بیشتر خواهد بود. به‌گونه‌ای که در شرایط بهینه، طوق می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر در عمق گودال آبشستگی اطراف پایه شود. در ادامه این مطالعات، (Zarrati et al., 2006) با انجام آزمایش‌هایی روی پایه‌های استوانه‌ای و استفاده از انواع طوق‌های پیوسته، جداشده و ترکیب آن‌ها با سنگ‌چین، نشان دادند که به‌کارگیری همزمان طوق با دیگر روش‌های حفاظتی می‌تواند میزان آبشستگی را تا حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش دهد. (Majedi Asl et al., 2021) با بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق و آبپایه‌ها در شرایط مختلف، نشان دادند که استفاده از صفحات مستغرق با ارتفاع 0.44D می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای عمق آبشستگی را کاهش دهد. همچنین نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد مطلوب‌تر آبپایه‌ها با ارتفاع D در مقایسه با صفحات مستغرق بود، به‌گونه‌ای که در برخی شرایط کاهش آبشستگی بیش از ۸۰ درصد گزارش شد. بر اساس این نتایج، به‌کارگیری آبپایه‌ها در پایین‌دست پایه‌ها و صفحات مستغرق در بالادست، به‌عنوان رویکردی کارا برای بهبود پایداری بستر پیشنهاد گردیده است. ماجدی اصل و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر برداشت مصالح بر آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل تقویت‌شده با کابل پرداختند. نتایج نشان داد که برداشت مصالح از بالادست گروه پایه منجر به کاهش و برداشت از پایین‌دست سبب افزایش عمق بیشینه آبشستگی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر ماجدی اصل و ولی‌زاده (۱۳۹۸) با به‌کارگیری الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی عمق آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل، نشان دادند که استفاده از پارامترهای بعددار نسبت به بی‌بعد، دقت بالاتری دارد. همچنین ترکیب هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی به نتایج بهتری در ارزیابی مدل منجر شد. سلطانی ستوبادی (۱۴۰۴) با ارزیابی

عملکرد سه روش SVM، QNET و ANN در پیش‌بینی عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای در بسترهای خاک چسبیده نشان دادند که مدل QNET در ۹۲ درصد موارد دقت بالاتری (تا ۹۸ درصد) نسبت به SVM و ANN داشته و عدد فرود پایه مهم‌ترین عامل مؤثر بر عمق فرسایش است. حیدرپور و همکاران (۱۳۸۲) به مطالعه تأثیر استفاده از شکاف‌های قائم مستطیلی در کاهش و کنترل آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل پرداختند. در این تحقیق، پایه‌هایی با مقاطع مستطیلی گردگوشه و دایره‌ای تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش پایداری بستر اطراف پایه زمانی رخ می‌دهد که طول شکاف‌ها حدود دو برابر عرض پایه باشد و این شکاف‌ها در نزدیکی بستر نصب شده باشند. (Debnath & Chauduri (2010) با انجام مطالعه‌ای بر روی آبشستگی پایه پل در خاک‌های مخلوط ماسه و رس کائولین (با درصد رس بین ۰ تا ۴۰ درصد)، مشاهده کردند که با افزایش درصد رس، ابعاد گودال آبشستگی کاهش می‌یابد و شکل گودال به تدریج به فرم مخروطی وارونه نزدیک می‌شود. همچنین، آن‌ها روابط تجربی برای تخمین عمق آبشستگی ارائه دادند. (Ting et al. (2001 نیز آبشستگی موضعی پایه پل را در سه نوع خاک چسبیده شامل آرمستون (نوعی خاک رسی)، پورسلین (با ترکیب غالب کائولینیت) و بنتونیت (با غالبیت مونت‌موریلونیت) و همچنین دو نوع خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مقادیر پایین عدد رینولدز، میزان آبشستگی در اطراف پایه تقریباً یکنواخت است، اما با افزایش عدد رینولدز، آبشستگی بیشتر در پایین‌دست پایه متمرکز می‌شود و با شدت کمتری در جلوی پایه نیز دیده می‌شود. همچنین نشان دادند که نوع خاک تأثیر قابل توجهی بر نرخ و عمق نهایی آبشستگی دارد و در بسترهای با چسبندگی بالاتر، سرعت پیشرفت آبشستگی کمتر و عمق نهایی آبشستگی کاهش یافته است. در نهایت، رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی بر اساس عدد رینولدز پایه (R) ارائه دادند:

$$d_{\text{sec}} = 0.12R^{0.682} \quad \text{رابطه (۱)}$$

(Abu-seida et al. (2012) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی تکیه‌گاه پل در بسترهایی با خاک چسبیده پرداختند. در این تحقیق، بستر فلوم با درصد‌های مختلفی از رس کائولین (در بازه ۲ تا ۲۰ درصد) به صورت مخلوط آماده‌سازی شد و تکیه‌گاه‌هایی با دیواره قائم در سه اندازه مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های گودال آبشستگی به عوامل متعددی از جمله درصد رس موجود در بستر، حد پلاستیسیته، میزان تراکم نسبی، رطوبت اولیه خاک، عدد فرود جریان و شکل هندسی تکیه‌گاه وابسته است. در نهایت، چندین رابطه تجربی برای پیش‌بینی عمق تعادلی، بیشینه عمق، حجم آبشستگی و ویژگی‌های هندسی گودال توسعه داده شد. (Rezaie et al. (2018) در مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به بستر رودخانه‌ای پیرامون پایه‌های پل، منجر به کاهش عمق و طول آبشستگی ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای می‌شود. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که ترکیب مذکور، پایداری بستر پایه‌ها را افزایش داده و در برخی شرایط عمق آبشستگی را تا حدود ۴۵ درصد کاهش می‌دهد. (Rezaie et al. (2019) در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر اثر رس و نانو رس مونت‌موریلونیتی را بر کاهش آبشستگی پایین‌دست صفحات مشبک بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب رس با نانو رس مونت‌موریلونیتی تأثیر مثبتی در کاهش ابعاد حفره آبشستگی دارد؛ به طوری که استفاده از این ترکیب موجب کاهش طول آبشستگی تا حدود ۳۳ درصد و کاهش عمق آبشستگی تا حدود ۴۹ درصد در شرایط آزمایش شده گردید. این یافته‌ها بیانگر آن است که به کارگیری رس و نانو رس مونت‌موریلونیتی می‌تواند راهکاری مؤثر و سازگار با محیط‌زیست برای کنترل آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی باشد، به‌ویژه در مواردی که حفاظت بستر با مصالح سخت امکان‌پذیر نیست. (Ghaderi et al. (2020) در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که افزودن رس و ترکیب آن با مواد نانو ساختار، از جمله نانورس مونت‌موریلونیتی و میکروسیلیس، به بستر پایین‌دست سرریزهای پلکانی موجب کاهش عمق و طول آبشستگی می‌شود. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که این افزودنی‌ها، به‌ویژه در دبی‌های بالا و شرایط جریان غیرریزشی، با بهبود پایداری بستر، می‌توانند تا حدود ۴۸ درصد عمق و حدود ۴۶ درصد طول آبشستگی را کاهش داده و به‌عنوان راهکاری مؤثر و سازگار برای کنترل فرسایش پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند. (Daneshfaraz et al. (2023) در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر مواد غیرسازهای سبزه، شامل رس و نانورس مونت‌موریلونیتی، را بر کاهش آبشستگی پایین‌دست صفحات مشبک بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این مواد، علاوه بر کاهش قابل توجه طول و عمق آبشستگی، راهکاری سازگار با محیط‌زیست و کم‌هزینه برای محافظت از بستر سازه‌های هیدرولیکی فراهم می‌کند. رس پلاستیکی به‌عنوان یک ماده طبیعی با خاصیت چسبندگی بالا و قابلیت کاهش نفوذپذیری خاک، می‌تواند مقاومت بستر را در برابر جریان آب افزایش دهد و از بروز حفره‌های عمیق در اطراف پایه‌ها جلوگیری کند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصد‌های مختلف رس پلاستیکی بر میزان کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه استوانه‌ای در بستر ماسه‌ای است. در این پژوهش، با انجام آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی و تحت دبی‌های مختلف، رفتار بستر ماسه‌ای با ترکیب

درصدهای متنوع رس پلاستیکی بررسی شد. همچنین با تعیین زمان تعادل آبشستگی از طریق اندازه‌گیری عمق گودال در بازه‌های زمانی مختلف، نتایج نهایی در زمان پایدار شده (۲۱۰ دقیقه) مورد تحلیل قرار گرفت. این مطالعه می‌تواند در ارائه راهکارهای مؤثر و عملی برای کنترل آبشستگی و افزایش ایمنی سازه‌های آبی نقش داشته باشد. نوآوری تحقیق حاضر در دو بخش قابل تفکیک است. نخست، از نظر روش‌شناسی، برای نخستین بار از بازسازی سه‌بعدی بستر با استفاده از تصاویر همپوشان و نرم‌افزار Metashape جهت تحلیل آبشستگی موضعی در مقیاس برد کوتاه استفاده شده است؛ این رویکرد امکان بررسی دقیق تغییرات مکانی بستر، جابجایی محل بیشینه آبشستگی و تحول هندسه گودال آبشستگی در ناحیه نزدیک پایه پل را فراهم می‌کند. دوم، از نظر کاربردی، افزودن رس پلاستیکی علاوه بر کاهش عمق آبشستگی، موجب تغییر الگوی جریان و رسوب‌گذاری، تضعیف تشکیل تلماسه و جابجایی محل بیشینه آبشستگی می‌شود. ترکیب این دو جنبه، ارزش افزوده تحقیق حاضر را نسبت به مطالعات پیشین که عمدتاً بر کاهش مقادیر نهایی آبشستگی یا استفاده از مواد پیشرفته تمرکز داشته‌اند، مشخص می‌سازد.

بدین ترتیب، به‌کارگیری رس پلاستیکی به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه و عملی برای مواد پیشرفته‌تر مانند نانوکلی است؛ ماده‌ای که ضمن دارا بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابه، می‌تواند در بسترهای ریزدانه‌ی طبیعی رودخانه‌ها به‌طور بالقوه قابل استفاده باشد. این موضوع، قابلیت اجرایی رس پلاستیکی را در شرایط واقعی نسبت به سایر افزودنی‌ها برجسته می‌سازد و زمینه‌ی توسعه‌ی روش‌های کم‌هزینه برای کنترل آبشستگی را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی در حضور رس پلاستیکی

با افزودن رس پلاستیکی به بستر رسوبی، انتظار می‌رود که انسجام و چسبندگی میان ذرات رسوب افزایش یافته و در نتیجه عمق آبشستگی کاهش یابد. برای در نظر گرفتن این اثر، درصد اختلاط رس پلاستیکی به‌عنوان یک پارامتر جدید وارد رابطه تابعی می‌شود:

$$\frac{d_{s\max}}{D} = f(g, d_0, u_*, d_{50}, D, t, V, \gamma_s, \gamma_w, b, t_e, Ba) \quad \text{رابطه ۲}$$

در معادله فوق، $d_{s\max}$ حداکثر عمق آبشستگی، g شتاب گرانش زمین، d_0 عمق اولیه جریان، u_* سرعت برشی، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی، D قطر پایه، t زمان سپری شده از شروع آزمایش، V سرعت متوسط جریان، γ_s وزن مخصوص رسوبات، γ_w وزن مخصوص آب، b عرض کانال، t_e زمان تعادل آبشستگی و Ba درصد اختلاط رس پلاستیکی می‌باشد. رابطه بی‌بعد شده به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{d_{s\max}}{D} = f\left(\text{Re}, Fr, \frac{u_*}{V}, \frac{V \times t}{D}, \frac{d_0}{D}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{t}{t_e}, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, Ba\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

در این حالت، تأثیر مکانیکی و شیمیایی رس پلاستیکی در انسجام و مقاومت بستر از طریق پارامتر Ba وارد مدل شده و قابل بررسی است.

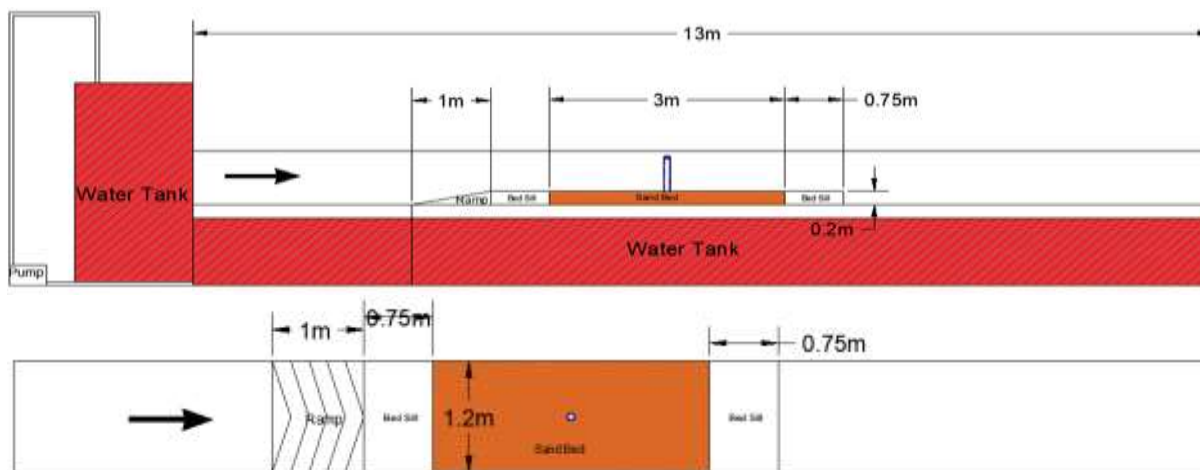
در معادله فوق، پارامترهای $\frac{u_*}{V}$ و $\frac{V \times t}{D}$ به دلیل ثابت بودن شیب بستر و قطر پایه‌های پل و ناچیز بودن تغییرات سرعت برشی و متوسط جریان، در تحلیل نهایی قابل نظر هستند. همچنین، عدد رینولدز (Re) که نسبت نیروی لزجت به اینرسی را نشان می‌دهد، در جریان متلاطم رودخانه ناچیز بوده و تأثیر آن می‌تواند نادیده گرفته شود. علاوه بر این، نسبت قطر متوسط ذرات به عرض کانال ($\frac{d_{50}}{b}$) نیز مقدار بسیار کمی دارد و بنابراین از رابطه نهایی حذف می‌شود. لذا رابطه ۳ بصورت رابطه ۴ خلاصه می‌گردد:

$$\frac{d_{s\max}}{D} = f\left(Fr, \frac{d_0}{D}, \frac{t}{t_e}, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, Ba\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر رس پلاستیکی بر کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه استوانه‌ای، در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۸ متر در دانشگاه مراغه انجام شدند که در شکل ۱ نمای شماتیک کانال آزمایشگاه ارائه شده است. جریان توسط یک پمپ سانتریفیوژ تأمین گردید و دبی با استفاده از دبی سنج التراسونیک با دقت ± 0.1 لیتر بر ثانیه

کنترل شد. برای مشاهده بهتر فرایند آبشستگی، دیواره‌های جانبی کانال از جنس پلکسی‌گلس شفاف انتخاب گردید. در مرکز کانال، بستری به طول ۳ متر با ضخامت حدود ۲۰ سانتی‌متر از رسوبات ماسه‌ای آماده شد. مصالح رسوبی از نوع ماسه طبیعی با دانه‌بندی $d_{50}=0.78\text{mm}$ بود. همچنین به منظور جلوگیری از شکل‌گیری الگوهای بستر مانند ریپل و تأمین مقیاس هندسی مناسب، شرط $d_{50}>0.7\text{mm}$ میلی‌متر رعایت شد. یکنواختی مصالح نیز با استفاده از انحراف معیار هندسی محاسبه گردید. با توجه به اینکه مقدار σ_g بیشتر از ۱/۵ به دست آمد، رسوبات به‌عنوان مصالح غیر یکنواخت طبقه‌بندی شدند. در مرکز ناحیه رسوبی، پایه‌ای استوانه‌ای از جنس PVC با قطر خارجی ۹ سانتی‌متر نصب گردید (شکل ۲). انتخاب ابعاد پایه بر اساس معیارهای هندسی تحقیقات پیشین انجام شد. مطابق با توصیه (Chiew & Melville (1987) برای جلوگیری از ایجاد اختلال در الگوی جریان اصلی، نسبت قطر پایه به عرض کانال نباید از ۱۰ درصد تجاوز کند؛ در این تحقیق نیز قطر پایه حدود ۷/۵ درصد عرض کانال است. همچنین برای کاهش اثر دیواره‌های کانال بر توزیع جریان و آبشستگی، بر اساس معیار (Raudkivi & Ettema (1983) نسبت فاصله‌ی محور پایه تا دیواره‌ی کانال به قطر پایه باید بیش از ۶/۲۵ باشد، که در آزمایش‌های حاضر این نسبت حدود ۶/۷ است. همچنین نسبت قطر پایه به قطر متوسط ذرات رسوبی بزرگ‌تر از ۳۰ است، که برای کاهش اثرات مقیاسی و افزایش دقت آزمایش مناسب می‌باشد.



شکل ۱. طرح شماتیک بستر متحرک و کانال آزمایشگاه



شکل ۲. تصویر آزمایشگاهی از بستر متحرک و مدل پایه پل

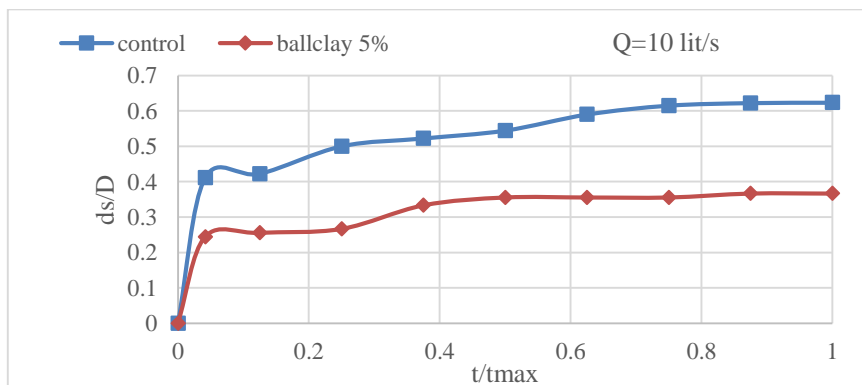
برای بررسی اثر رس پلاستیکی، درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس پلاستیکی به ماسه خشک بصورت یکنواخت افزوده شده و به‌صورت کامل مخلوط گردید. ترکیب حاصل پس از افزودن رطوبت اولیه، در بستر کانال پخش، تراز و متراکم شد. چهار حالت بستر شامل ماسه خالص (شاهد)، ماسه با ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد رس پلاستیکی در آزمایش‌ها لحاظ شدند. آزمایش‌ها برای هر حالت در پنج دبی متفاوت شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه انجام گرفتند. برای هر ترکیب از مصالح بستر و دبی، یک آزمایش مستقل انجام و پس از اتمام آن، مصالح بستر تعویض و مجدداً آماده‌سازی می‌شد. در مجموع ۲۰ آزمایش برای بررسی تأثیر رس پلاستیکی طراحی و اجرا شد. رس پلاستیکی نوعی خاک رس طبیعی است که عمدتاً از کانی‌های گروه کائولینیت تشکیل شده و دارای ترکیباتی مانند آلومینیوم سیلیکات، اکسید آهن، اکسید منیزیم و مواد آلی است. این خاک دارای سطح ویژه بالا، خاصیت چسبندگی بالا و ظرفیت

تبادل کاتیونی نسبتاً پایین است و به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود، در بهبود خصوصیات مکانیکی بسترهای رسوبی کاربرد دارد و باعث افزایش تنش برشی بحرانی و به تبع آن افزایش عدد شیلدز بحرانی می‌شود، در نتیجه، ذرات بستر پایداری بیشتری در برابر نیروی جریان پیدا می‌کنند. در شکل ۳ تصویر آزمایشگاهی و نمای نزدیک (با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر) از اختلاط رس پلاستیکی با بستر رسوبی نشان داده شده است. در نمای نزدیک، نحوه ایجاد چسبندگی میان ذرات نیز قابل مشاهده است.



شکل ۳. تصویر آزمایشگاهی و نمای نزدیک از اختلاط رس پلاستیکی با بستر رسوبی

به منظور تعیین زمان تعادل آبشستگی، در آزمایش‌های اولیه (به‌ویژه در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه)، تغییرات عمق گودال در بازه‌های زمانی ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. نتایج مربوط به حالت شاهد (ماسه خالص) و حالت‌های دارای رس پلاستیکی نشان داد که روند افزایش عمق در ابتدا سریع بوده و سپس با گذشت زمان کاهش یافته و در نهایت به حالت پایدار رسیده است (منحنی شکل ۴). در حالت شاهد، زمان تعادل حدود ۲۱۰ دقیقه به دست آمد، در حالی که با افزودن ۵ درصد رس پلاستیکی، این زمان به حدود ۱۵۰ دقیقه کاهش یافت. این موضوع بیانگر آن است که حضور رس پلاستیکی موجب افزایش چسبندگی بین دانه‌ها و در نتیجه پایداری سریع‌تر بستر شده است. بنابراین، زمان تعادل برای تمامی آزمایش‌ها برابر با ۲۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد و کلیه تحلیل‌ها بر اساس داده‌های این بازه زمانی انجام گرفت. شایان ذکر است که در آزمایش‌های مربوط به درصد‌های بالاتر رس پلاستیکی (۱۰ درصد و ۱۵ درصد)، در همین دبی هیچ‌گونه آبشستگی قابل توجهی مشاهده نشد؛ از این رو ترسیم منحنی تغییرات عمق برای این دو حالت ممکن نبود. اندازه‌گیری عمق آبشستگی با استفاده از خط‌کش مدرج فلزی و به صورت دستی، در مرکز حفره و با دقت میلی‌متری انجام شد.



شکل ۴. منحنی توسعه زمانی بیشترین عمق آبشستگی حالت شاهد و ۵ درصد رس پلاستیکی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

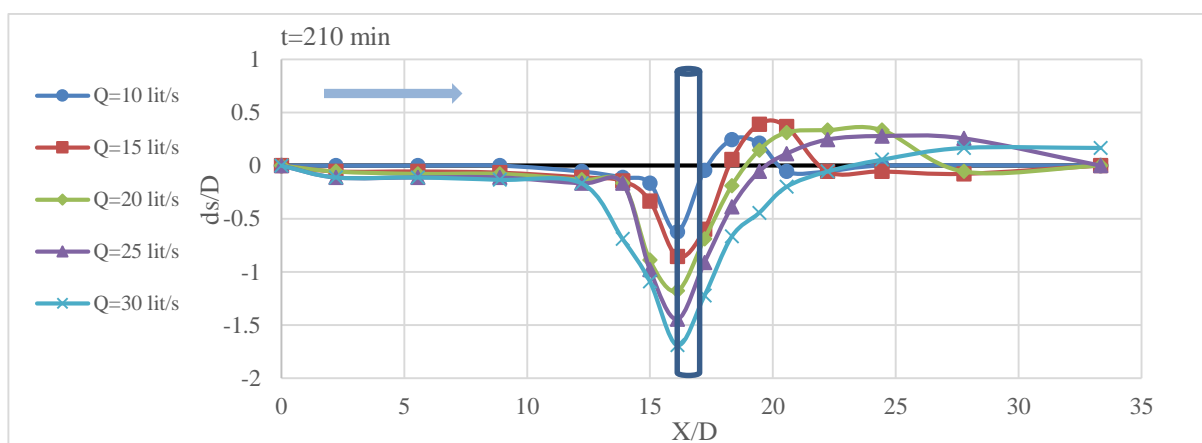
برای ثبت دقیق تغییرات هندسی بستر پس از انجام هر آزمایش، از روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده شد. این روش که بر پایه تصویربرداری پیاپی از زوایای مختلف و بازسازی سطح سه‌بعدی استوار است، امروزه به‌عنوان یکی از ابزارهای دقیق و مؤثر در مطالعات مهندسی هیدرولیک شناخته می‌شود. در این تحقیق، پس از پایان هر مرحله آزمایشی، مجموعه‌ای از تصاویر با کیفیت بالا، با زاویه‌های گوناگون و هم‌پوشانی مناسب از سطح بستر در محدوده اطراف پایه استوانه‌ای برداشت گردید. تصاویر ثبت‌شده در ادامه در نرم‌افزار

Agisoft Metashape پردازش شده و مدل‌های سه‌بعدی دقیقی از وضعیت نهایی بستر تولید شدند. این مدل‌ها امکان تحلیل جامع ویژگی‌هایی چون شکل و عمق گودال آبشستگی، گستره فرسایش، توزیع رسوبات، و مقایسه میان شرایط مختلف آزمایشگاهی (از جمله حالت‌های شاهد و بسترهای اصلاح‌شده با رس پلاستیکی) را فراهم کردند.

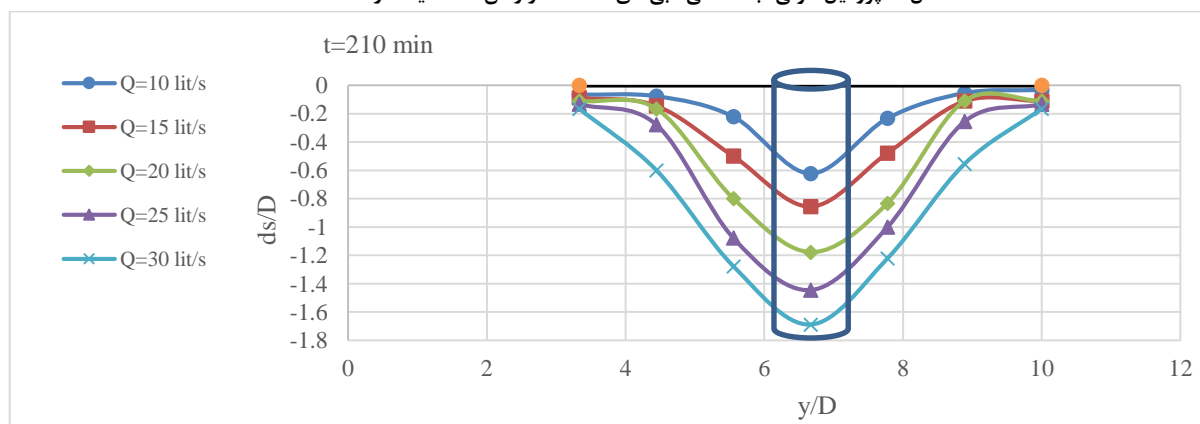
نتایج و بحث

تحلیل نتایج حالت شاهد (ماسه بدون رس پلاستیکی)

نمودار پروفیل طولی تغییرات عمق آبشستگی در حالت شاهد (شکل ۵) نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، عمق گودال آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این روند به دلیل افزایش انرژی جریان و در نتیجه تنش برشی بیشتر بر بستر ماسه‌ای رخ می‌دهد که موجب جابجایی و فرسایش ذرات رسوبی می‌گردد. به‌ویژه در دبی‌های بالاتر (۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه)، نمودارها عمق قابل توجهی از حفره را نشان می‌دهند که بیانگر شدت فرسایش در این شرایط است. پروفیل عرضی آبشستگی در حالت شاهد نیز (شکل ۶) الگوی متقارن و مشخصی از توزیع عمق گودال را در اطراف پایه استوانه‌ای نشان می‌دهد. در این حالت، بیشترین عمق آبشستگی دقیقاً در مرکز پایه، یعنی در راستای محور جریان، مشاهده شده و عمق به تدریج به سمت کناره‌ها کاهش می‌یابد. این توزیع نشان‌دهنده تمرکز جریان و گردابه‌های نعل اسبی در اطراف پایه است که موجب فرسایش شدید در ناحیه مرکزی و کاهش آن در طرفین می‌شود. افزایش دبی موجب گسترش عرضی گودال آبشستگی نیز شده است، به طوری که در دبی‌های بالا (۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه)، پروفیل عرضی علاوه بر افزایش عمق، در پهناهای گودال نیز گسترده‌تر شده است. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش قدرت جریان در فرسایش نه فقط عمقی بلکه جانبی بستر اطراف پایه است. در مجموع، پروفیل‌های عرضی در حالت شاهد مؤید آن هستند که بستر ماسه‌ای بدون تقویت، در برابر جریان‌های قوی‌تر مقاومت کمی داشته و به راحتی دچار فرسایش گسترده در عمق و عرض می‌گردد.



شکل ۵. پروفیل طولی آبشستگی دبی‌های مختلف در زمان ۲۱۰ دقیقه در حالت شاهد



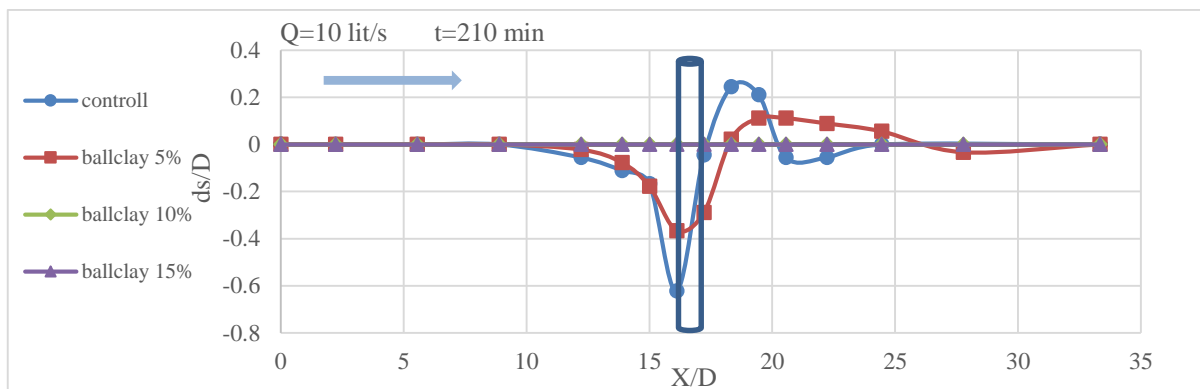
شکل ۶. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی‌های مختلف در زمان ۲۱۰ دقیقه در حالت شاهد

تأثیر افزودن رس پلاستیکی بر کاهش عمق آبشستگی

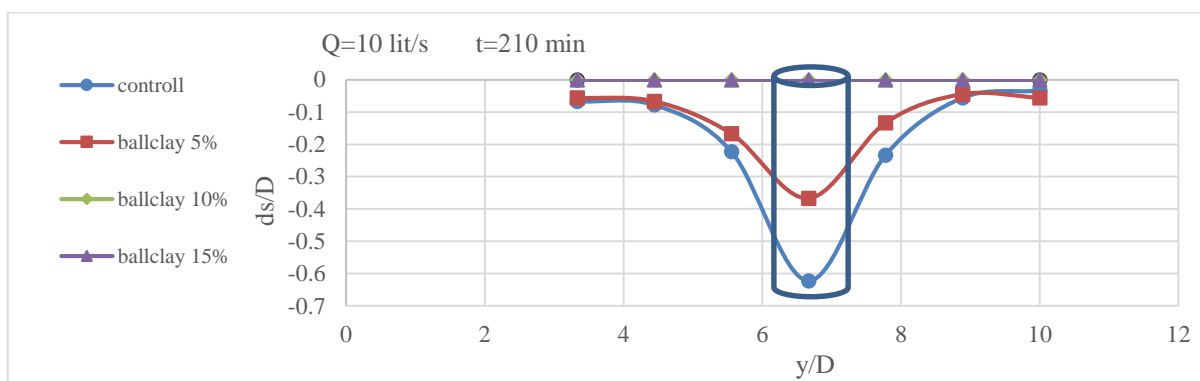
نمودارهای مقایسه‌ای پروفیل طولی مربوط به درصد‌های مختلف رس پلاستیکی (شکل‌های ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵) کاهش قابل توجه عمق آبشستگی را در تمامی دبی‌ها نشان می‌دهند. در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه، افزودن ۵ درصد رس پلاستیکی موجب کاهش حدود ۴۲ درصد در عمق آبشستگی شد، در حالی که ۱۰ درصد و ۱۵ درصد رس پلاستیکی کاملاً از شکل‌گیری گودال جلوگیری کردند، به طوری که نمودارهای آن‌ها عمق صفر را نشان می‌دهند.

دلیل اصلی این کاهش، تأثیر رس پلاستیکی بر بهبود خواص مکانیکی بستر ماسه‌ای است. رس پلاستیکی با ایجاد پیوندهای فیزیکی و شیمیایی میان ذرات رسوبی باعث افزایش چسبندگی و مقاومت بستر در برابر فرسایش می‌شود. این ترکیب موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر جریان‌های شدید می‌گردد، که در نهایت از جابجایی ذرات و توسعه حفره آبشستگی جلوگیری می‌کند. با افزایش دبی به ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، نمودارها نشان می‌دهند که افزودن رس پلاستیکی همچنان نقش مؤثری در مهار پدیده آبشستگی ایفا می‌کند، اگرچه کارایی آن در درصد‌های پایین‌تر (۵ درصد و ۱۰ درصد) با افزایش شدت جریان تا حدی کاهش می‌یابد. در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه، کاهش عمق آبشستگی به ترتیب ۵۴ درصد، ۱۰۰ درصد و ۱۰ درصد برای ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد رس پلاستیکی ثبت شد. در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، این مقادیر به ۴۳ درصد، ۶۲ درصد و ۹۰ درصد رسید. در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، کاهش عمق آبشستگی برای همان سه درصد به ترتیب برابر با ۴۰ درصد، ۴۶ درصد و ۸۹ درصد بود. در نهایت، در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه نیز مقادیر کاهش به ترتیب ۳۷ درصد، ۴۰ درصد و ۵۰ درصد ثبت شده است. این روند نشان می‌دهد که درصد‌های بالاتر رس پلاستیکی به دلیل ایجاد چسبندگی زیاد بین دانه‌های بستر، به‌ویژه ۱۵ درصد، حتی در دبی‌های بالا نیز توانسته‌اند از وقوع آبشستگی به صورت مؤثری جلوگیری کنند، در حالی که درصد‌های پایین‌تر در برابر جریان‌های شدید عملکرد کاهنده ولی محدودتری داشته‌اند. با افزایش درصد رس پلاستیکی از ۱۰ به ۱۵ درصد، کاهش قابل توجهی در عمق گودال مشاهده می‌شود. این کاهش آبشستگی را می‌توان به افزایش چشمگیر چسبندگی بین دانه‌های بستر و افزایش تنش برشی بحرانی رسوبات در درصد‌های بالاتر رس پلاستیکی نسبت داد. همچنین بررسی نیمرخ‌های آبشستگی با زمان نشان می‌دهد که در حالت شاهد و درصد‌های ۵ درصد و ۱۰ درصد رس پلاستیکی، روند تکامل گودال مشابه است؛ ابتدا حداکثر آبشستگی در جلوی پایه تشکیل شده و تلماسه مشخصی نیز در پایین‌دست شکل می‌گیرد. اما در ۱۵ درصد، به دلیل افزایش زیاد چسبندگی بستر، الگو دچار تغییر اساسی شده و تلماسه تشکیل نمی‌شود و محل بیشینه آبشستگی از جلوی پایه به پایین‌دست پایه منتقل می‌گردد. همچنین در مورد فاصله‌ی شروع آبشستگی تا پایه نیز نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد پودر رس پلاستیکی موجب کاهش محسوس این فاصله نسبت به حالت شاهد می‌شود. در دبی بیشینه ۳۰ لیتر بر ثانیه، فاصله‌ی آغاز آبشستگی در حالت شاهد حدود ۶۵ سانتی‌متر است. با افزودن ۵ درصد رس پلاستیکی این مقدار به حدود ۲۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد و در درصد ۱۰ درصد به حدود ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد. در نهایت، در درصد ۱۵ درصد، آبشستگی مستقیماً در مجاورت پایه آغاز شده است. این روند بیانگر آن است که افزایش چسبندگی و انسجام بستر در اثر افزودن رس پلاستیکی، توسعه افقی گودال را محدود کرده و تمرکز فرسایش را به نزدیکی پایه منتقل می‌کند.

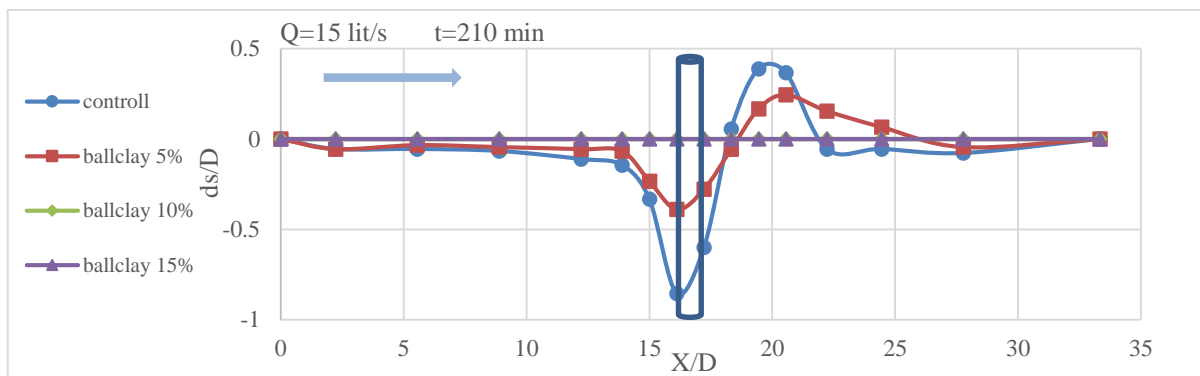
بررسی پروفیل‌های عرضی آبشستگی در حضور رس پلاستیکی (شکل‌های ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶) نشان می‌دهد که با افزایش درصد این ماده، تغییرات قابل توجهی در شکل، عمق و سطح گودال آبشستگی رخ می‌دهد. در حالت ۵ درصد، پروفیل عرضی همچنان دارای فرورفتگی در مرکز پایه است، اما نسبت به حالت شاهد عمق آن به‌طور محسوس کمی کمتر شده و شیب دیواره‌ها ملایم‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که رس پلاستیکی تا حدی توانسته مقاومت بستر را در برابر فرسایش افزایش دهد و از گسترش جانبی گودال جلوگیری کند و سطح آبشستگی را کاهش دهد. با افزایش درصد رس پلاستیکی به ۱۰ درصد، پروفیل عرضی شکل یکنواخت‌تری به خود گرفته و عمق فرورفتگی در مرکز پایه بسیار کاهش یافته است. شیب جانبی دیواره‌ها نیز کم‌شیب‌تر شده و در برخی دبی‌ها، سطح پروفیل تقریباً تخت شده است. در حالت ۱۵ درصد، وضعیت به مراتب پایدارتر است؛ پروفیل عرضی در این حالت تقریباً فاقد هرگونه گودال مشخص بوده و بستر به صورت صاف و یکنواخت باقی مانده است. این الگو نشان‌دهنده آن است که افزایش درصد رس پلاستیکی موجب افزایش چسبندگی، کاهش قابلیت شسته شدن ذرات، و در نتیجه پایداری کامل بستر در برابر جریان شده است. در مجموع، روند تغییرات پروفیل‌های عرضی به‌خوبی تأثیر مثبت رس پلاستیکی در مهار توسعه افقی آبشستگی و تثبیت بستر اطراف پایه را تأیید می‌کند.



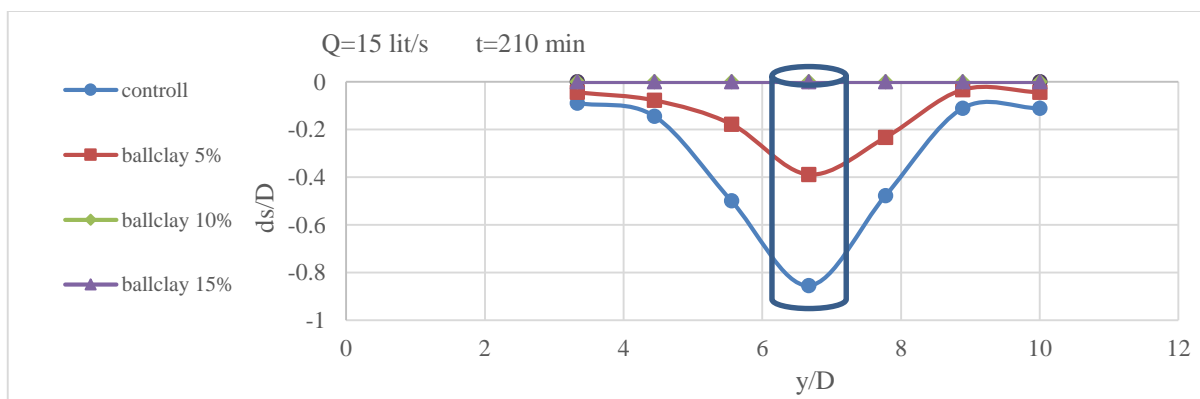
شکل ۷. پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



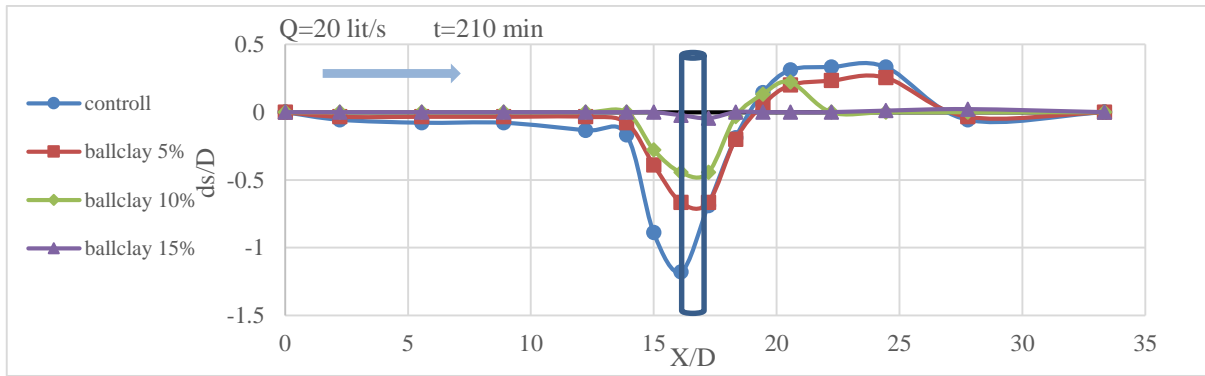
شکل ۸. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



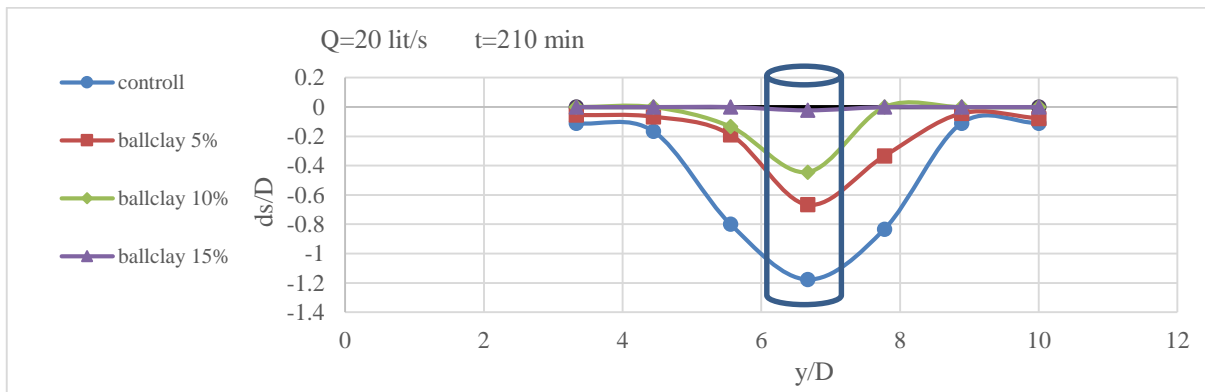
شکل ۹. پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



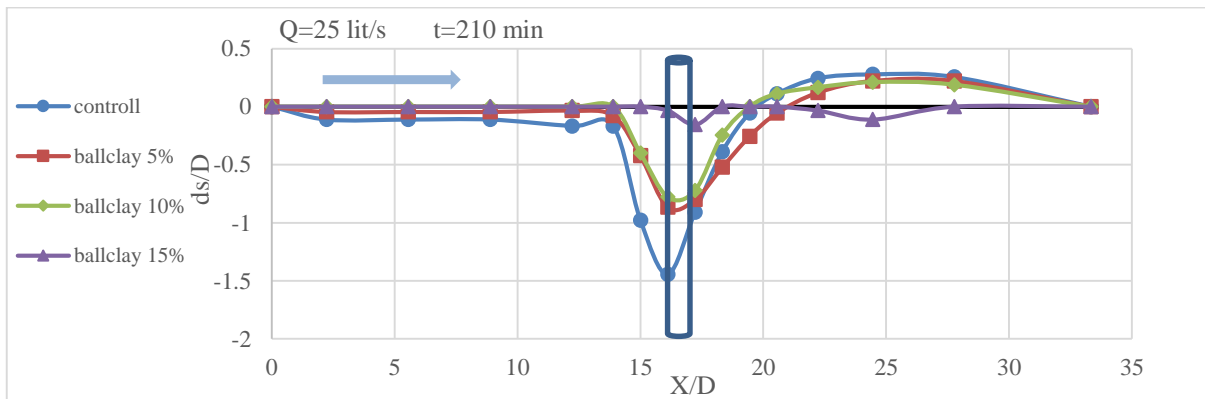
شکل ۱۰. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



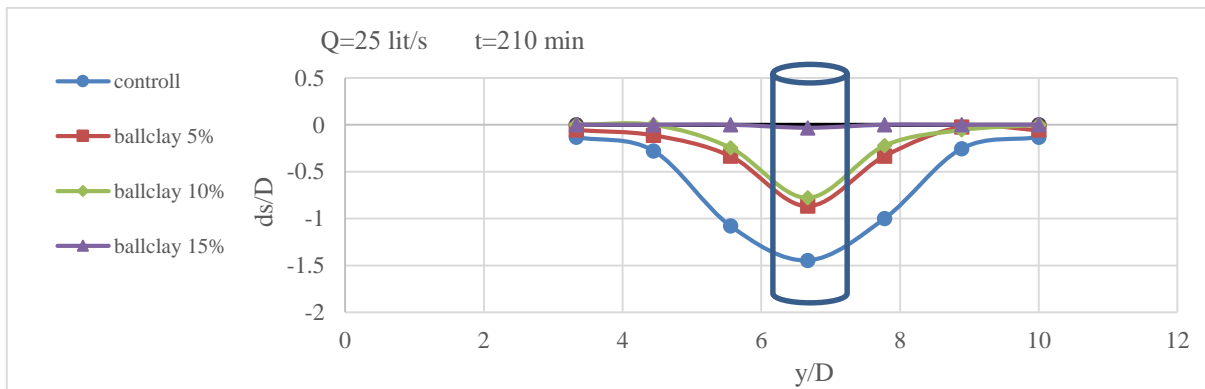
شکل ۱۱. پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



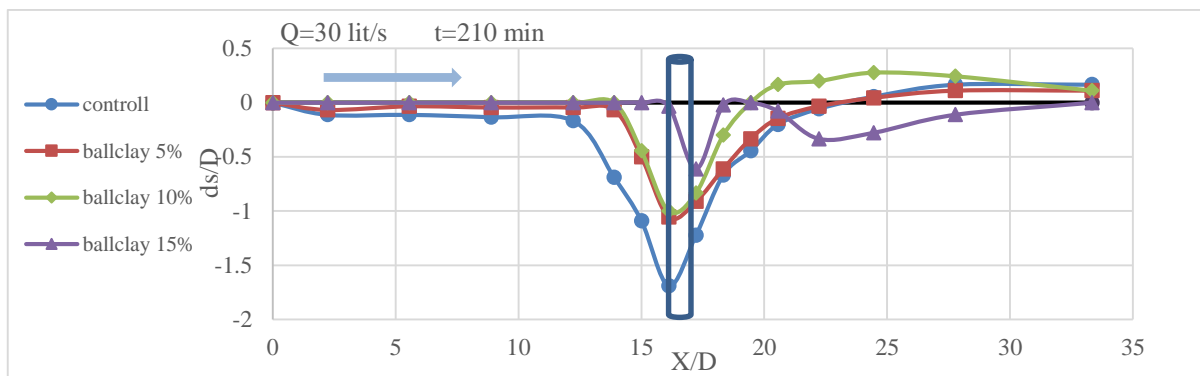
شکل ۱۲. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



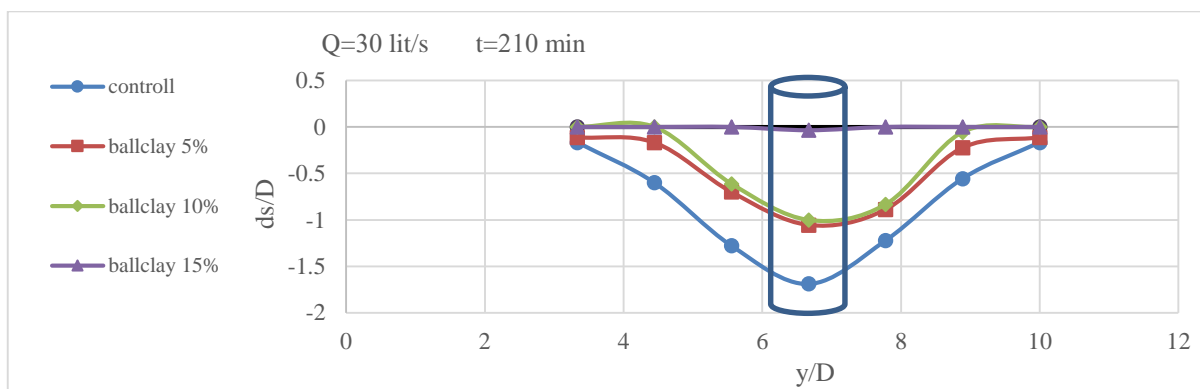
شکل ۱۳. پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



شکل ۱۴. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



شکل ۱۵. پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی



شکل ۱۶. پروفیل عرضی آبشستگی در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و زمان ۲۱۰ دقیقه تحت تأثیر درصدهای مختلف رس پلاستیکی

بررسی پشته رسوبی در پایین دست پایه

در بسیاری از آزمایش‌ها، به‌ویژه در حالت شاهد و دبی‌های بالا، تشکیل پشته‌ای از رسوبات در پایین دست پایه مشاهده شد. این پدیده ناشی از فرسایش اطراف پایه و انتقال ذرات جدا شده توسط جریان به ناحیه با سرعت کمتر در پایین دست است. با کاهش سرعت جریان و افت انرژی، ذرات حمل‌شده در این ناحیه ته‌نشین شده و موجب شکل‌گیری پشته رسوبی می‌گردند. با افزایش دبی به دلیل افزایش آبشستگی اطراف پایه پل ارتفاع پشته رسوبی نیز افزایش یافته است. با افزودن رس پلاستیکی و کاهش میزان فرسایش در اطراف پایه، مقدار ذرات جدا شده از بستر کاهش یافته و در نتیجه، اندازه و ارتفاع پشته رسوبی پایین دست نیز به‌طور محسوس کاهش یافته است. این موضوع در پروفیل‌های طولی بستر و تصاویر مربوط به توزیع رسوبات پس از آزمایش‌ها به وضوح قابل مشاهده است.

تأثیر افزودن رس پلاستیکی بر کاهش حجم آبشستگی موضعی اطراف پایه

با توجه به نتایج افزودن رس پلاستیکی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش حجم حفره آبشستگی موضعی دارد. این کاهش در تمامی دبی‌های آزمایش شده مشاهده شد و با افزایش درصد رس پلاستیکی، روندی افزایشی در میزان کاهش حجم نسبت به حالت شاهد به دست آمد. در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه، حجم آبشستگی به ترتیب با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس پلاستیکی ۴۲، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد کاهش یافت. در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه این مقادیر به ۵۵، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد رسید. برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه نیز میزان کاهش حجم به ترتیب ۴۳، ۷۸ و ۹۹ درصد بوده است. در دبی‌های بالاتر یعنی ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، تأثیر رس پلاستیکی همچنان محسوس بوده و به ترتیب ۴۰، ۴۶ و ۹۷ درصد و ۳۶، ۴۰ و ۹۰ درصد کاهش حجم نسبت به حالت شاهد ثبت شد. این نتایج بیانگر آن است که رس پلاستیکی حتی در دبی‌های بالا نیز عملکرد مؤثری در کاهش حجم حفره آبشستگی دارد و درصدهای بالاتر (به‌ویژه ۱۵ درصد) بیشترین نقش را در کنترل فرسایش موضعی ایفا کرده‌اند.

بازسازی سه‌بعدی بستر آبشستگی با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه و مقایسه پروفیل طولی (۱۵ درصد رس پلاستیکی در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه)

شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نمایی از مدل‌های تولید شده را برای حالت‌های مختلف آزمایشی (حالت شاهد و درصدهای مختلف رس پلاستیکی) نشان می‌دهند. این مدل‌ها ابزار مفیدی در تحلیل تغییرات عمق و پهنای آبشستگی و مقایسه‌ی کیفی بین روش‌های کنترل آن فراهم

ساختند. همان طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رس پلاستیکی، سطح گسترش یافته آبستتگی کاهش یافته و همچنین عمق بیشینه‌ی آبستتگی نیز کمتر شده است. این روند کاهشی به‌وضوح در نمودارهای ارائه‌شده نیز مشهود بوده و بیانگر تأثیر مثبت رس پلاستیکی در کاهش آبستتگی موضعی اطراف پایه است.

باتوجه به پروفیل شکل ۲۱، پروفیل طولی برداشت‌شده از بستر با روش دستی با پروفیلی که از مدل سه‌بعدی ساخته‌شده در نرم‌افزار Metashap استخراج شده، برای حالت ۱۵ درصد رس پلاستیکی در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تطابق کلی بین دو پروفیل بسیار خوب است و روند تغییرات عمق به‌خوبی هم‌پوشانی دارند. در صورت وجود اختلاف‌های جزئی به‌ویژه در اطراف پایه، این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از کیفیت پایین‌تر تصاویر، محدود بودن تعداد عکس‌ها، یا خطاهای احتمالی در داده‌برداری دستی باشد.



شکل ۱۷. مدل سه‌بعدی بازسازی‌شده از بستر ماسه‌ای در حالت شاهد (بدون رس پلاستیکی) با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه پس از گذشت ۲۱۰ دقیقه



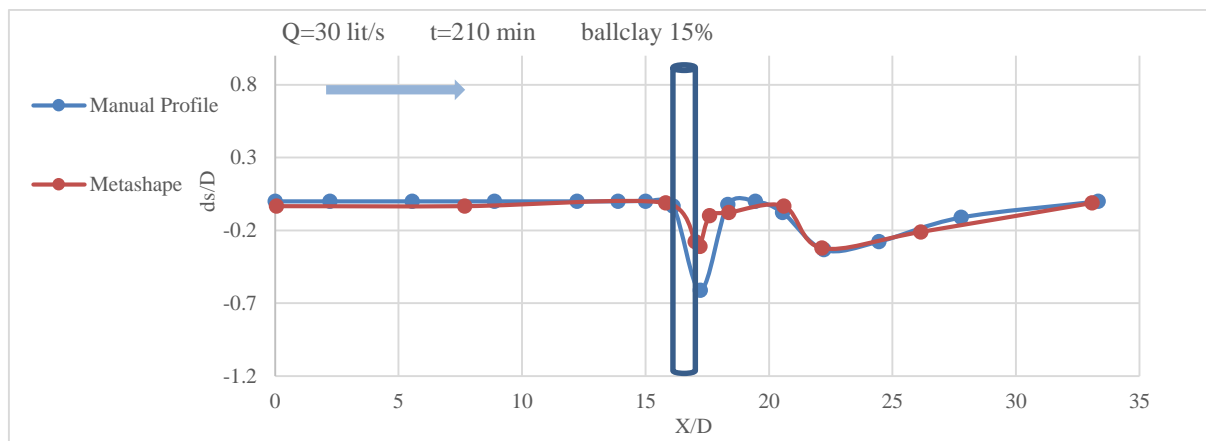
شکل ۱۸. مدل سه‌بعدی بازسازی‌شده از بستر ماسه‌ای در حالت ۵ درصد رس پلاستیکی با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه پس از گذشت ۲۱۰ دقیقه



شکل ۱۹. مدل سه‌بعدی بازسازی‌شده از بستر ماسه‌ای در حالت ۱۰ درصد رس پلاستیکی با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه پس از گذشت ۲۱۰ دقیقه



شکل ۲۰. مدل سه‌بعدی بازسازی‌شده از بستر ماسه‌ای در حالت ۱۵ درصد رس پلاستیکی با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه پس از گذشت ۲۱۰ دقیقه



شکل ۲۱. مقایسه پروفیل طولی برداشت شده از بستر با روش دستی و استخراج شده از مدل سه بعدی نرم افزار Metashape برای حالت ۱۵ درصد رس پلاستیکی در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه.

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین

یافته‌های این تحقیق در زمینه‌ی کاهش آبشستگی موضعی پایه‌های پل با استفاده از رس پلاستیکی، با نتایج مطالعات پیشین هم‌راستا بوده و آن‌ها را تأیید می‌کند. به‌عنوان نمونه، زمردیان و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که افزودن ۵ تا ۱۰ درصد خاک رس به بستر رودخانه، به‌ویژه در شرایط خاصی از نظر دبی جریان، نوع رسوبات و میزان تراکم آن‌ها، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه عمق آبشستگی و حتی در برخی موارد حذف کامل آن شود. در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که استفاده از رس پلاستیکی به‌عنوان یک افزودنی تثبیت‌کننده در بستر رسوبی، به‌ویژه در درصدهای بالاتر مانند ۱۵ درصد، توانسته است در برخی شرایط آزمایشگاهی، از وقوع آبشستگی به‌طور کامل جلوگیری کند. همچنین Dheyab & Günal (2024) در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که افزودن نانوکلی می‌تواند تا حدود ۶۸ درصد عمق آبشستگی را کاهش دهد. مقایسه دو تحقیق نشان می‌دهد که هر دو ماده‌ی رسی (نانوکلی و رس پلاستیکی) از طریق ایجاد چسبندگی در بستر ماسه‌ای، مانع از جابجایی آسان ذرات شده و در نهایت باعث کنترل آبشستگی می‌گردند. تفاوت اصلی در مقیاس و نوع ماده مورد استفاده است؛ در حالی که Dheyab & Günal (2024) در تحقیق خود از نانوکلی با اثرگذاری در مقیاس نانومتری بهره برده‌اند، در تحقیق حاضر رس پلاستیکی به‌عنوان ماده‌ای در دسترس‌تر و با هزینه‌ی کمتر به کار گرفته شده و نتایج مشابهی در کاهش آبشستگی به‌دست آمده است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از انواع مختلف مواد رسی می‌تواند رویکردی کارآمد در مدیریت آبشستگی پایه پل‌ها باشد. در جدول ۱، خلاصه نتایج کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل در تحقیق حاضر و دو تحقیق ذکر شده در بالا گزارش شده است.

جدول ۱. خلاصه نتایج کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل در تحقیق حاضر و پژوهش‌های پیشین

منبع تحقیق	نوع افزودنی	Q	fr	h/d	غلظت افزودنی	میزان کاهش عمق آبشستگی
ماجدی و قربان‌زاده (تحقیق حاضر)	بالکلی	30 lit/s	۰/۱۸	-	۱۵٪ - ۱۰٪ - ۵٪	۳۶٪ تا ۵۰٪
زمردیان و همکاران (۱۳۹۶)	خاک رس طبیعی	40 lit/s	۰/۳۱	-	۱۰٪ - ۵٪	۵۰٪ تا ۱۰۰٪
Dheyab & Günal (2024)	نانو رس	-	-	۱/۴	۰/۷۵ - ۰/۲۵	۲۸٪ تا ۶۸٪

کاربردهای عملی و پیشنهادهای پژوهشی برای بهبود پایداری بستر اطراف پایه پل با استفاده از رس پلاستیکی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزودن رس پلاستیکی به بستر رسوبی می‌تواند به‌عنوان یک روش ساده، کم‌هزینه و مؤثر برای کاهش یا جلوگیری از آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این ماده در پروژه‌های عمرانی و پل‌سازی به‌ویژه در مناطقی که خطر فرسایش بستر بالاست، می‌تواند موجب افزایش عمر مفید سازه، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقاء ایمنی پل‌ها شود. همچنین، به‌دلیل در دسترس بودن و خاصیت چسبندگی بالای رس پلاستیکی، این روش می‌تواند در کنار سایر راهکارهای تثبیت بستر مانند سنگ‌چینی یا استفاده از اجسام صلب، نقش مکمل و تقویتی ایفا کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تأثیر انواع

مختلف رس‌های طبیعی و صنعتی و شرایط مختلف هیدرولیکی بر عملکرد این روش بررسی گردد. همچنین، بررسی دوام و پایداری بلندمدت رس پلاستیکی در برابر جریان‌های متناوب و شرایط محیطی متغیر (مانند خشک و مرطوب شدن متناوب یا یخ‌زدگی) می‌تواند به بهینه‌سازی استفاده عملی از این روش کمک کند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تأثیر افزودن رس پلاستیک به بستر ماسه‌ای بر کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه استوانه‌ای، در شرایط آزمایشگاهی و در دبی‌های مختلف بررسی شد. نتایج به‌روشنی نشان داد که ترکیب ماسه با رس پلاستیکی تأثیر قابل توجهی بر پایداری بستر داشته و از توسعه گودال آبشستگی جلوگیری می‌کند. افزودن ۵ درصد رس پلاستیکی موجب کاهش عمق آبشستگی به‌طور میانگین حدود ۴۰ درصد در تمام دبی‌ها شد. در حالی که استفاده از ۱۰ درصد و به‌ویژه ۱۵ درصد پودر، کاهش‌های بسیار بالایی (تا حدود ۹۸ درصد) را ایجاد کرده و حتی در برخی دبی‌ها مانند ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه، به حذف کامل پدیده آبشستگی منجر شد. این کاهش عمدتاً ناشی از افزایش چسبندگی، کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت برشی بستر ماسه‌ای در اثر حضور ذرات ریز و پلاستیک رس پلاستیکی است. همچنین تشکیل پشته رسوبی در پایین دست پایه، که در اثر جابجایی ذرات جدا شده از اطراف پایه ایجاد شده بود، در حضور رس پلاستیکی به‌طور محسوس کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن رس پلاستیکی نه تنها عمق گودال را کاهش می‌دهد، بلکه از باز توزیع رسوبات در مسیر جریان نیز جلوگیری می‌کند. در مجموع، استفاده از رس پلاستیکی به‌عنوان یک افزودنی ساده، ارزان و زیست‌سازگار، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل در شرایط ماسه‌ای باشد. ادامه این پژوهش در شرایط جریان متغیر، بررسی دوام بلندمدت و استفاده میدانی از این روش می‌تواند چشم‌اندازهای مفیدی را برای حفاظت از سازه‌های آبی فراهم سازد.

ملاحظات اخلاقی

تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی مشخصی از سوی نهادهای تأمین‌کننده دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مهدی ماجدی اصل: ایده‌پردازی، نظارت، نگارش، بازبینی و ویرایش.

محمد قربان‌زاده: روش‌شناسی، انجام آزمایش‌های تجربی، تحلیل داده‌ها، نگارش - پیش‌نویس اولیه.

محمدحسین جهان‌پیما: پردازش داده‌ها، تحلیل نتایج، تفسیر یافته‌ها.

مهدی رضایی: بازسازی سه‌بعدی، مصورسازی، تهیه شکل‌ها و جداول، گردآوری و سامان‌دهی داده‌ها.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از نرم‌افزار [ChatGPT] به منظور [ویرایش متن] استفاده گردید. پس از استفاده از این ابزار/خدمت، نویسندگان مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند. این اعلامیه در مورد استفاده از ابزارهای کمکی برای بررسی دستور زبان، املاء، منابع و غیره اعمال نمی‌شود. اگر چیزی برای فاش کردن وجود ندارد، نیازی به افزودن اعلامیه نیست.

بیانیه دسترسی به داده

داده‌های پشتیبان نتایج این پژوهش بنا به درخواست معقول، از طریق نویسندگان مسئول قابل دسترسی خواهد بود.

قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه مراغه به‌دلیل فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی و حمایت‌های علمی در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند. همچنین از شرکت آداک تجهیز ایرانیان به‌خاطر همکاری و پشتیبانی ارزشمندشان قدردانی می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه شامل مشارکت انسان یا حیوان نبوده و بنابراین نیازمند دریافت تأییدیه اخلاقی نبوده است. نویسندگان تأیید می‌کنند که

تمامی اصول اخلاق پژوهش، از جمله پرهیز از جعل داده‌ها، دستکاری یا تحریف نتایج، و سرقت علمی، به‌طور کامل رعایت شده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

منابع

- زمردیان، سیدمحمدعلی، عرب، مرتضی، و ذوالقدر، مسیح. (۱۳۹۶). تاثیر درصد خاک رس و انرژی تراکم بر آبشستگی پایه پل در بستر رسوبی و در حضور تکیه‌گاه. مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، ۱۷(۲)، ۱۶۹-۱۷۷.
- صمیمی بهبهان ت، بارانی غ، رحیم خانی م و خانجانی م ج، (۱۳۸۵). بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل‌ها. صفحه‌های ۲۵ تا ۳۱. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۲ الی ۱۴ اردیبهشت، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ماجدی اصل، مهدی؛ دانش فراز، رسول و ولی‌زاده، سعیده (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی تأثیر برداشت مصالح در آبشستگی اطراف گروه پایه‌های مسلح‌شده. مجله پژوهش‌های خاک و آب ایران، ۵۰(۶)، ۱۳۶۳-۱۳۸۰.
- ماجدی اصل مهدی، ولیزاده سعیده. کاربرد الگوریتم SVM در پیش‌بینی عمق آبشستگی تک پایه قائم. علوم آب و خاک. ۱۳۹۸؛ ۲۳ (۴): ۱۶۵-۱۸۱
- سلطانی ستوبادی، مهدی؛ امیدپور علویان، توحید، و کاردان، نازیلا. (۱۴۰۴). پیش‌بینی عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای در بسترهای با خاک چسبنده با استفاده از روش‌های فرامدلی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۹(۲)، ۲۷۵-۲۹۰.
- منوچهر حیدرپور، حسین افصلی مهر، محسن نادری بنی. کنترل و کاهش آب شستگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف. علوم آب و خاک. ۱۳۸۲؛ ۷ (۳): ۱۳-۲۸

REFERENCES

- Abou-Seida, M. M., Elsaed, G. H., Mostafa, T. M., & Elzahry, E. F. (2012). Local scour at bridge abutments in cohesive soil. *Journal of Hydraulic Research*, 50(2), 171-180. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.654668>
- Chiew, Y. M., & Melville, B. W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 25(1), 15-26. <https://doi.org/10.1080/00221688709499285>
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., & 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.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., Desineh, M., & Ghaderi, A. (2019). The experimental study of the effects of river mining holes on the bridge piers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1619-1633.
- Daneshfaraz, R., Rezaie, M., Aminvash, E., Süme, V., Abraham, J., & Ghaderi, A. (2023). On the effect of green nonstructural materials on scour reduction downstream of grid dissipators. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(7), 1344-1357.
- Debnath, K., & Chaudhuri, S. (2010). Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds. *Engineering Geology*, 111(1-4), 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.003>
- Dheyab, A. S., & Günal, M. (2024). An experimental investigation for the determination of the optimum ratio of nano clay for reducing local scour around a cylindrical bridge pier. *Water Supply*, 24(8), 2547-2562. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.164>
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Zaerkabehc, R., & Ashkan, F. (2020). Experimental Investigation of Downstream Erosion Control of Stepped Spillways using Microsilica-Structured and Nano Materials. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(4), 827-840. DOI: 10.22060/ceej.2018.14919.5781
- Ghorbani, B., & Karimi, A. (2007). A comparison of single and double submerged vanes effect on the scour occurring at a cylindrical pier. In Proc of 6th Conf of Hydraul (pp. 260-276). <https://civilica.com/doc/71808>
- Ghorbani, B., & Kells, J. A. (2008). Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 610-619. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3003>
- Heidarpour, M., Afzalimehr, H., & Bani, M. N. (2003). Using Slot to Control and Reduce Local Scour at Round-nosed Rectangular Bridge Piers. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 7(3), 13-28. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-441-en.html>. (In persian)
- Majedi Asl, M., & Valizadeh, S. (2019). Application of SVM algorithm in predicting vertical pier scour depth. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23(4), 165-181. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3688-en.html>. (In persian)
- Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R., & Valizadeh, S. (2019). Experimental investigation of the river materials mining effect on the scouring around armed pier groups. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1363-1380.

- <http://10.22059/ijswr.2019.269942.668062>. (In persian)
- Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R., Salehi, N., & Aminvash, E. (2021). Laboratory study of the effect of sill, submerged vanes and groyne on scour depth around the piers group. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 1135-1148.
- Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of hydraulic engineering*, 109(3), 338-350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
- Rezaie, M., Qhaderi, A. and Daneshfaraz, R. (2019). Experimental Investigation of Clay and Nano-Clay Montmorillonite Effect on Scour Reduction at Downstream of Screen. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(73), 1-16. doi: 10.22092/aridse.2017.109677.1195
- Rezaie, M., Daneshfaraz, R., & Dasineh, M. (2018). Experimental investigation of adding clay and PAM on scour reduction bridge piers under the influence removal of river materials. *Journal of Hydraulics*, 13(3), 59-70. <https://sid.ir/paper/124206/en>.
- Samimiye Behbahan, T., Barani, G. H., Khanli, M., & Khanjani, M. (2006). Experimental investigation of submerged vanes effect on scouring of bridge piers. In *National Congress of Irrigation and Drainage Networks management*. Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In persian)
- Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T., & Kardan, N. (2025). Forecasting the Local Scour Depth around Cylindrical Bridge Foundations on Cohesive Soil Utilizing Meta Models. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 19(2), 275-290. (In persian)
- Ting, F. C., Briaud, J. L., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., & Wei, G. (2001). Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of hydraulic engineering*, 127(11), 969-978. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:11\(969\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(969))
- Zarrati, A. R., Gholami, H., & Mashahir, M. B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 42(1), 97-103. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641188>
- Zarrati, A. R., Nazariha, M., & Mashahir, M. B. (2006). Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), 154-162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(154))
- Zomorodian, S. M. A., Arab, M., & Zolghadr, M. (2017). Effect of Clay Content Percentage and Compaction Energy on Pier Bridge Scour in Erosive Bed and in the vicinity of abutment. <https://sid.ir/paper/256815/en>. (In persian)