



Effect of clay content on local scouring downstream of a submerged horizontal jet at maximum bed compaction

Mohsen Nasrabadi^{1✉} | Aref Jabbari-Zahra² | Javad Mozaffari³

1. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: m-nasrabadi@araku.ac.ir
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: arefjabbary@gmail.com
3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: javad_370@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 15, 2025

Revised: Sep. 6, 2025

Accepted: Sep. 24, 2025

Published online: Dec. 2025

Keywords:

*Local scouring,
Sedimentary bed compaction,
Submerged horizontal jet,
Clay content.*

ABSTRACT

Adding clay to the sediment composition downstream of hydraulic structures in rivers generally increase the soil resistance to fluid erosive forces by increasing particle adhesion, improving soil structure, reducing uncontrolled permeability, and increasing water retention capacity. In the present study, the effect of adding clay to the sediment composition as a protective approach and reducing scour downstream of a submerged horizontal jet by reaching the maximum dry density of the sediment composition has been investigated experimentally. Experiments were conducted for two Froude numbers 4 and 6 and three types of sands with average diameters of 0.63 mm (S1), 1.81 mm (S2) with uniform grain size, and 1.74 mm (S3) with non-uniform grain size in a laboratory flume with a width and depth of 80 cm and a length of 10 m. In order to achieve maximum density, natural clay was used with percentages of 5, 10, and 15. The results showed that for the Sand S1, the scour hole dimensions with the finest grain size (S1) reach zero at a Froude number of 4, and at a Froude number of 6, the scour depth, dune height, and scour hole volume decrease by 37%, 50.8%, and 56.25%, respectively. Also, for Sands S2 and S3 with the same average diameter but different grain size distribution, it was observed that particle non-uniformity under maximum density conditions has a significant effect on scour hole dimensions. The results showed that for the S2 grain size and Froude number of 4, the scour hole dimensions reach their lowest value by adding 10% clay. While for the S3 grain size, by adding 5% clay to the mixture, the hole dimensions reach zero.

Cite this article: Nasrabadi, M., Jabbari-Zahra, A., Mozaffari, J., (2025) Effect of clay content on local scouring downstream of a submerged horizontal jet at maximum bed compaction, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (10), 2655-2671. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398634.669976>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398634.669976>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Previous studies have demonstrated that the application of clay in sediment mixtures may reduce scour downstream of hydraulic structures such as bridge piers and stilling ponds. In addition, the addition of clay to sediment mixtures increases the dry specific density of the soil, improves its compaction, and increases its mechanical strength, which is of great importance in the design of foundations, embankments, and geotechnical structures. However, unlike traditional compaction methods that examine clay and sand separately, the combined compaction approach for sand and sand-clay mixtures simultaneously increases the interpenetration and adhesion of particles, leading to improved resistance to deformation and erosion, which is particularly useful for hydraulic and geotechnical applications, but has not been addressed in any laboratory study to date. For this purpose, in this research, an attempt was first made to bring three non-cohesive sediments to the maximum dry specific gravity, then experiments were conducted by adding different clay contents to the sediment mixtures.

Methodology

Experimental tests were conducted in a laboratory flume (see Fig. 1), with a rectangular cross-section, with 9 m length, 0.8 m width and a depth of 0.6 m. Walls and bottom of the flume were made from Plexy-Glass and metal, respectively, and slope was set to zero. For modeling the scour process, a sedimentation basin was built with a depth of 11.6 cm, length of 1 m and a width equal to the flume width. two uniform sands (S1 and S2) and one non-uniform sand (S3) were used. According to ASTM-D6913, sieve analysis was conducted on the samples to obtain gradation curve of the sediments. In addition, the Hydrometer Analysis was done based on ASTM-D7928 for used clays as cohesive particles.

Results and Discussion

For sand S1 and Froude number 4, the scour hole dimensions decrease with increasing clay content. So that at bed compaction of 100% and for 5% clay, the scour depth decreased by 59% compared to the control experiment. Interestingly, no measurable scour was observed in the sedimentary bed at 100% density and for 10 and 15% clay contents. Also, for experiments with Froude number 6, the scour hole dimensions decrease with increasing clay contents. So that at bed compaction of 100% and for 5% clay, the scour depth decreased by 37% compared to the control experiment. For sand S2 with Froude number 4 and with increasing clay content, the hole dimensions did not change significantly. Also, for experiments with Froude number 6, the scour hole dimensions decrease with increasing clay percentage. So that at bed compaction of 100% and 5% clay, the scour depth has decreased by 20% compared to the control experiment. For sand S3 at bed compaction of 100% and Froude number 4, no measurable scour was observed in the sedimentary bed. For experiments with Froude number 6, the scour hole dimensions decrease with increasing clay content. So that at 100% density and 5% clay, the scour depth has decreased by 57% compared to the control experiment.

Conclusions

Within the experimental conditions of this study (sediments with a diameter of less than about 2 mm and a maximum Froude number of 6), the optimal clay ratio in the sediment mixture is between 10 and 15 percent, and with this ratio, bed protection is appropriately achieved. Of course, each type of cohesive sediment has its own behavior that should be considered in future research.

Therefore, clay, as a low-cost, effective and environmentally friendly approach, plays a key role in increasing bed resistance and reducing the dimensions of the scour hole downstream of hydraulic structures by increasing the adhesion and stabilization of the sedimentary bed. It can be used as an alternative or complement to traditional scour control methods.

Author Contributions

“Conceptualization, M.N. and J.M.; methodology, A.J.Z.; experiments, A.J.Z.; validation, M.N.; formal analysis, M.N.; investigation, J.M.; resources, A.J.Z.; data curation, M.N. and A.J.Z.; writing—original draft preparation, M.N.; writing—review and editing, M.N.; supervision, M.N.;

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

اثر رس بر آبشستگی موضعی در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی پائین دست جت افقی مستغرق

محسن نصرآبادی^۱ | عارف جباری زهرا^۲ | جواد مظفری^۳^۱*. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: m-nasrabadi@araku.ac.ir^۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: arefjabbari@gmail.com^۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: javad_370@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲	
تاریخ انتشار: دی ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، تراکم بستر رسوبی، جت افقی مستغرق، درصد رس.	افزودن رس به ترکیب رسوبات در پائین دست سازه‌های هیدرولیکی در رودخانه‌ها، با افزایش چسبندگی ذرات، بهبود ساختار خاک، کاهش نفوذپذیری کنترل نشده و افزایش ظرفیت نگهداری آب، به‌طور کلی سبب افزایش مقاومت خاک در برابر نیروهای فرساینده آب خواهد شد. در تحقیق حاضر، اثر افزودن رس به ترکیب رسوبات به‌عنوان یک راهکار حفاظتی برای کاهش آبشستگی پائین دست جت افقی مستغرق با رسیدن به حداکثر جرم مخصوص خشک ترکیب رسوبات به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌هایی به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و سه نوع ماسه با قطرهای متوسط ۰/۶۳ mm (S1) و ۱/۸ mm (S2) با دانه‌بندی یکنواخت و ۱/۷۴ mm (S3) با دانه‌بندی غیریکنواخت در یک فلوم آزمایشگاهی با عرض و عمق ۸۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر انجام شد. به‌منظور دستیابی به تراکم حداکثر از رس طبیعی با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ استفاده گردید. نتایج نشان داد که برای دانه‌بندی S1 در عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبشستگی به صفر می‌رسد و در عدد فرود ۶ عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم حفره آبشستگی به‌ترتیب به‌میزان ۳۷ درصد، ۵۰/۸ درصد و ۵۶/۲۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین برای رسوبات S2 و S3 با قطر متوسط یکسان ولی توزیع دانه‌بندی متفاوت، مشاهده شد که غیریکنواختی ذرات در شرایط حداکثر تراکم تاثیر قابل توجهی در ابعاد حفره آبشستگی دارد. نتایج نشان داد که برای دانه‌بندی S2 و عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبشستگی با افزودن ۱۰ درصد رس به کمترین مقدار می‌رسد. این در حالی است که برای دانه‌بندی S3 با افزودن ۵ درصد رس در ترکیب، ابعاد حفره به صفر رسید.

استناد: نصرآبادی؛ محسن، جباری زهرا؛ عارف، مظفری؛ جواد، (۱۴۰۴) اثر رس بر آبشستگی موضعی در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی پائین دست جت افقی مستغرق،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۰)، ۲۶۷۱-۲۶۵۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398634.669976>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398634.669976>

مقدمه

آبشستگی موضعی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به فرسایش شدید و متمرکز بستر رودخانه در مجاورت یا بلافاصله پایین دست سازه‌هایی مانند سرریزها، حوضچه‌های آرامش، دریچه‌ها، پایه‌های پل، آبشکن‌ها، سدهای کوتاه یا کفبندها اشاره دارد. دلایل اصلی ایجاد آبشستگی موضعی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی شامل افزایش سرعت و تلاطم جریان، ناکافی بودن استهلاک انرژی، تغییرات ناگهانی در عمق و سرعت و جریان‌های برگشتی و گردابه‌ای می‌باشد. از سوی دیگر، این پدیده می‌تواند منجر به تخریب پی سازه، تغییرات نامطلوب رژیم رودخانه، افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سازه‌ها گردد. بنابراین پژوهشگران همواره به دنبال یافتن راهکاری برای کاهش آبشستگی و در نتیجه به حداقل رساندن عواقب این پدیده بوده‌اند و پیش‌بینی و کنترل آبشستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از مسائل ضروری در طراحی و بهره‌برداری این سازه‌ها است تا از پایداری، ایمنی و عملکرد صحیح آن‌ها در بلندمدت اطمینان حاصل شود. روش‌های سازه‌ای مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی وجود دارد، از جمله استفاده از حوضچه‌های آرامش، زبری‌ها، طوق، صفحات مستغرق، شمع‌های حفاظتی و آبشکن‌ها. افزون بر این، با استفاده از روش‌های غیرسازه‌ای و به کمک مواد افزودنی مانند الیاف، رس، افزودنی‌های شیمیایی و تثبیت بیولوژیکی مانند استفاده از پوشش گیاهی، ریشه درختان و بوته‌ها می‌توان بستر پائین دست را تثبیت نمود. این روش‌ها به‌طور کلی کم‌هزینه‌تر از روش‌ها سازه‌ای هستند (Ghassemi et al., 2022a, b).

تاکنون روش‌های متعددی برای جلوگیری از خسارات آبشستگی بر سازه‌های هیدرولیکی به کار گرفته شده است. یک راهکار محافظه کارانه افزایش مقاومت بستر در مقابل نیروی فرساینده آب است. مطالعات تاکنون نشان داده‌اند که مخلوط کردن ذرات ریزدانه با ماسه می‌تواند حالت انتقال رسوب را از حالت غیرچسبنده به چسبنده تغییر دهد و به دلیل افزایش اصطکاک داخلی بین ذرات ماسه، عمق آبشستگی موضعی را کاهش دهد. زمانی که درصد ذرات ریزدانه کم باشد، مقاومت در برابر فرسایش مخلوط ماسه و ذرات ریزدانه اهمیت بیشتری دارد (Kuti and Yen, 1976; Abt and Ruff, 1982; Denet, 1995; Mitchener and Torfs, 1996; Van Ledden et al., 2004; Debnath & Chaudhuri, 2010).

Mitchener and Torfs (1996) آبشستگی بستر متشکل از ترکیب ماسه و سیلت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ترکیب این دو نوع خاک، مقاومت در برابر فرسایش را افزایش می‌دهد و از نرخ فرسایش و آبشستگی می‌کاهد. آن‌ها خاطر نشان کردند که بیشترین تنش برشی که سبب فرسایش بستر می‌شود، در ترکیب ۳۰ تا ۵۰ درصد وزنی ماسه مشاهده شده است و به ازای ترکیب ۵۰ درصد ماسه، تنش برشی بحرانی تا ۲ برابر افزایش یافت. از سوی دیگر، افزودن ۳۰ درصد سیلت به ماسه تنش برشی بحرانی را تا ۱۰ برابر افزایش داد. همچنین افزودن حدود ۳ درصد سیلت به ماسه، نرخ فرسایش را تا پنج برابر کاهش خواهد داد و چنانچه ۲۰ درصد ماسه با سیلت ترکیب شود، نرخ فرسایش را تا ۱۰ برابر کاهش می‌دهد. Mazurek (2001) آبشستگی رسوبات چسبنده در اثر دو نوع جت عمودی و دیواره‌ای بر روی رسوباتی با ترکیب ۴۰ درصد رس، ۵۳ درصد سیلت و ۷ درصد ماسه ریز بررسی کردند. نتایج نشان داد که پس از حدود ۱۰۰ ساعت، ابعاد حفره آبشستگی به وضعیت تعادلی می‌رسد. آن‌ها با تکرار آزمایش‌های خود دریافت که اگرچه حداکثر عمق حفره در وضعیت تعادلی می‌تواند برای آزمایش‌های با شرایط هیدرولیکی یکسان مشابه باشد، اما نرخ گسترش حفره متفاوت است. همچنین وی اعلام نمود اگرچه جت افقی مورد استفاده یک جت دوبعدی بوده است، اما حفره ایجاد شده یک حفره سه بعدی بوده و در عرض کانال یکنواخت نیست و چنانچه پروفیل‌های آبشستگی نسبت به ضخامت جت بی‌بعد شوند، از یک تشابه خاص پیروی می‌کنند؛ ولی در هر حال به وضعیت تعادلی نمی‌رسند. Ansari et al. (2003) به بررسی تأثیر چسبندگی بر آبشستگی ناشی از جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق پرداختند. آن‌ها از ماسه با اندازه متوسط ۰/۲۷ میلی‌متر به عنوان مصالح پایه استفاده کردند و درصدهای مختلف رس از ۱۰ تا ۶۰ درصد را به آن اضافه نمودند. بررسی‌ها نشان داد که رفتار خمیری خاک چسبنده زمانی مشاهده می‌شود که میزان رس از ۲۰ درصد بیشتر باشد. Dey and Westrich (2003) مشخصه‌های جریان و نیز حفره آبشستگی یک نوع رسوب چسبنده با ۴۸/۸ درصد رس، در پایین دست کف‌بند را در وضعیت شبه تعادلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پروفیل‌های آبشستگی در زمان‌های مختلف، از تشابه هندسی خاصی پیروی می‌کنند. آن‌ها اذعان کرده‌اند که هر نوع رسوب چسبنده، رفتار خاص خود را دارد و بایستی آزمایش‌هایی با رسوبات مختلف و درصدهای مختلف رس انجام شود. Tan et al. (2007) تأثیر مدت زمان تحکیم و نیز اندازه ذره را بر روی نرخ فرسایش رسوبات چسبنده مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از سیلت به عنوان ماده چسبنده استفاده کردند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، چگالی خاک افزایش یافته و مقدار افزایش به اندازه ذره

بستگی دارد. همچنین مقاومت به فرسایش نیز با گذشت زمان بیشتر می‌شد. الهی (۱۳۸۷) آبخستگی مصالح چسبنده در پایین دست سرریز-های قائم را بررسی کرد. وی با استفاده از چهار میزان رس ۱۲، ۲۰، ۳۴ و ۳۷ درصد به این نتیجه رسید که با افزایش میزان رس، حداکثر عمق آبخستگی کاهش می‌یابد. همچنین وی گزارش کرده است که با افزایش میزان رس، اثر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبخستگی نیز کاهش می‌یابد. حمیدی فر و همکاران (۱۳۸۸) اثر میزان رس را در ترکیب مصنوعی رسوبات چسبنده ماسه-رس بر آبخستگی پایین دست در بچه کشویی با کفبند صلب ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها رس کائولین با درصدهای وزنی مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد را به یک نوع ماسه یکنواخت اضافه کردند و پروفیل آبخستگی حاصل از این ترکیبات رو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش میزان رس در ترکیب خاک، مقاومت بستر در برابر فرسایش افزایش می‌یابد و ابعاد حفره آبخستگی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها عنوان کردند که به ازای درصد رس بالای ۲۰ درصد، رسوبات چسبنده رفتار فرسایشی را کنترل می‌کنند، بطوریکه در درصدهای رس کمتر از ۲۰ درصد، بیشینه طول حفره آبخستگی تغییر چندانی نمی‌کند و برای با افزایش درصد رس از ۲۰ درصد، این طول به شدت کاهش می‌یابد. همچنین در درصدهای رس بالای ۲۰ درصد احتمال تشکیل تلماسه کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به صورت شکنج پس از حفره ظاهر شود. حمیدی فر و امید (۱۳۸۹) به بررسی تاثیر اندازه ذره رسوبات غیرچسبنده و نیز نوع رس در ترکیب مصنوعی رسوبات چسبنده ماسه-رس بر آبخستگی پایین دست در بچه کشویی با کفبند صلب ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود ابتدا به بررسی تغییرات ابعاد حفره آبخستگی ناشی از افزودن یک نوع رس کائولین با درصدهای وزنی مختلف به ماسه یکنواخت با دو دانه بندی مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش اندازه ذرات ماسه به ازای درصد ثابت رس، تمامی ابعاد حفره آبخستگی کاهش می‌یابد، همچنین ارتفاع تلماسه نیز کاهش می‌یابد. ولی این پژوهشگران در ادامه ذکر کردند که در درصدهای بالای رس، خواص رسوبات چسبنده بر فرآیند آبخستگی غالب شده و در اندازه ذره کمتر، گسترش حفره آبخستگی کمتر می‌شود. همچنین با افزایش درصد رس، احتمال تشکیل تلماسه کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین با بررسی تاثیر هر دو نوع رس که نوع دوم از یک نمونه خاک زراعی تهیه شده بود و دارای مقادیری ناخالصی در ترکیب خود بود، اعلام نمودند که وجود مقادیر کم ناخالصی در ترکیب رس منجر به افزایش مقاومت بستر در برابر فرسایش و کاهش مقدار آبخستگی می‌شود. (Debnath and Chaudhuri 2010) به بررسی تاثیر غلظت رسوبات معلق بر آبخستگی پایه پل در بستر با رسوبات چسبنده ماسه-رس پرداختند. آن‌ها برای بستر چسبنده از ترکیب یک نوع ماسه یکنواخت و درصدهای وزنی مختلف خاک رس کائولین استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد تاثیر بار معلق بر ابعاد حفره آبخستگی اطراف پایه پل قابل توجه بوده و با افزایش غلظت بار معلق، ابعاد حفره آبخستگی افزایش می‌یابد؛ ولی این افزایش یک مقدار بحرانی دارد و با افزایش غلظت بار معلق از این مقدار بحرانی میزان ابعاد حفره آبخستگی کاهش می‌یابد؛ ولی در محدوده مطالعاتی این تحقیق، همواره این ابعاد حفره از حالت آب زلال بیشتر است. همچنین آن‌ها سه نوع فرسایش را در آزمایش‌های خود گزارش کردند، تکه-تکه^۱ که در ابتدای آزمایش مشاهده می‌شد، توده-توده^۲ و ذره-ذره^۳ (Chaudhuri and Debnath 2013) اظهار داشتند که با افزایش نسبت رس، آبخستگی موضعی کاهش می‌یابد. با این حال، پس از رسیدن به نسبت رس ۰/۵ درصد، آبخستگی موضعی با افزایش بیشتر نسبت رس افزایش می‌یابد. (Mahalder et al. 2021) به بررسی تفاوت‌های بالقوه در توسعه حفره آبخستگی در رسوبات بستر یک رودخانه طبیعی در سرعت‌های مختلف جریان متغیر پرداختند. در این مطالعه، ۱۸ آزمایش با سرعت، مدت زمان جریان و چگالی ظاهری خاک متغیر انجام شد. نتایج نشان داد که توسعه حفره آبخستگی در ابتدا در امتداد کناره‌های استوانه پیشرفت کرد و حداکثر عمق نیز در کناره‌ها رخ داد. عمق حفره آبخستگی برای جرم مخصوص خاک بالاتر (بیشتر از ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب) در مقایسه با جرم مخصوص پایین تر کمتر بود و نرخ آبخستگی کندتر بود. (Chen et al. 2022) ویژگی‌های آبخستگی اطراف شمع در خاک سیلتی تحکیم یافته (CS) در شرایط آب زلال بررسی و با ویژگی‌های آن در سیلت روان و سست مقایسه کردند. آنها آزمایش‌هایی برای مطالعه ابعاد حفره آبخستگی تعادلی در خاک سیلتی تحکیم یافته انجام دادند و نتایج نشان داد که عمق و شعاع آبخستگی در خاک سیلتی تحکیم یافته کوچک تر از سیلت سست است، اما زاویه شیب در سیلت بزرگ تر است و عمق آبخستگی با جرم مخصوص خشک نسبت معکوس دارد. (Dheyab and Günal 2024) در یک مطالعه آزمایشگاهی از نانورس برای کاهش فرسایش پذیری بسترهای ماسه‌ای غیریکنواخت استفاده کردند. این مطالعه بستر نانورس-ماسه را در شرایط هیدرولیکی مختلف و با قطرهای مختلف پایه بررسی کرد تا نسبت بهینه نانورس را برای به حداقل رساندن آبخستگی موضعی در اطراف پایه پل استوانه‌ای تعیین کند. نتایج آنها نشان داد که نانورس با نسبت بهینه ۰/۲۵ درصد برای نسبت کم عمقی جریان ۱/۴ و نسبت بهینه ۰/۵

1 Chunk-by-chunk

2 Aggregate-by-aggregate

3 Particle-by-particle



درصد برای نسبت کم عمقی جریان بین $1/4$ و 2 می‌تواند به‌طور مؤثر برای کاهش عمق آبستگی موضعی استفاده شود. نکته قابل توجه این است که کاهش قابل توجه تا 68 درصد در عمق آبستگی موضعی در تمام آزمایش‌ها مشاهده شد.

مطالعات پیشین مؤید این نکته است که کاربرد رس در ترکیب رسوبات سبب کاهش آبستگی پائین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر پایه‌های پل و حوضچه‌های آرامش می‌شود. افزون بر این، افزودن خاک رس به ترکیب رسوبات، سبب افزایش جرم مخصوص خشک خاک، بهبود تراکم و افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌شود که این امر در طراحی پی سازه‌ها، خاکریزها و سازه‌های ژئوتکنیکی اهمیت زیادی دارد. اما برخلاف روش‌های سنتی فشرده‌سازی که خاک رس و شن را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنند، رویکرد فشرده‌سازی ترکیبی برای مخلوط‌های شن و ماسه-رس، به‌طور همزمان در هم تنیدگی و چسبندگی ذرات را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل و فرسایش می‌شود که به‌ویژه برای کاربردهای هیدرولیکی و ژئوتکنیکی مفید است، ولی تاکنون در هیچ مطالعه آزمایشگاهی در این زمینه انجام نشده است. برای این منظور، در این تحقیق ابتدا تلاش گردید سه نوع رسوب غیرچسبیده با دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت به حداکثر جرم مخصوص خشک رسانده شود، سپس آزمایشات با افزودن درصد‌های مختلف رس به ترکیب رسوبات انجام می‌شود. بنابراین، اهداف کلی این مطالعه عبارت‌اند از ۱- بررسی افزودن رس به ترکیب بار رسوبی با حداکثر تراکم بر مشخصات حفره آبستگی و ۲ تعیین میزان رس بهینه مؤثر بر افزایش مقاومت بستر رسوبی.

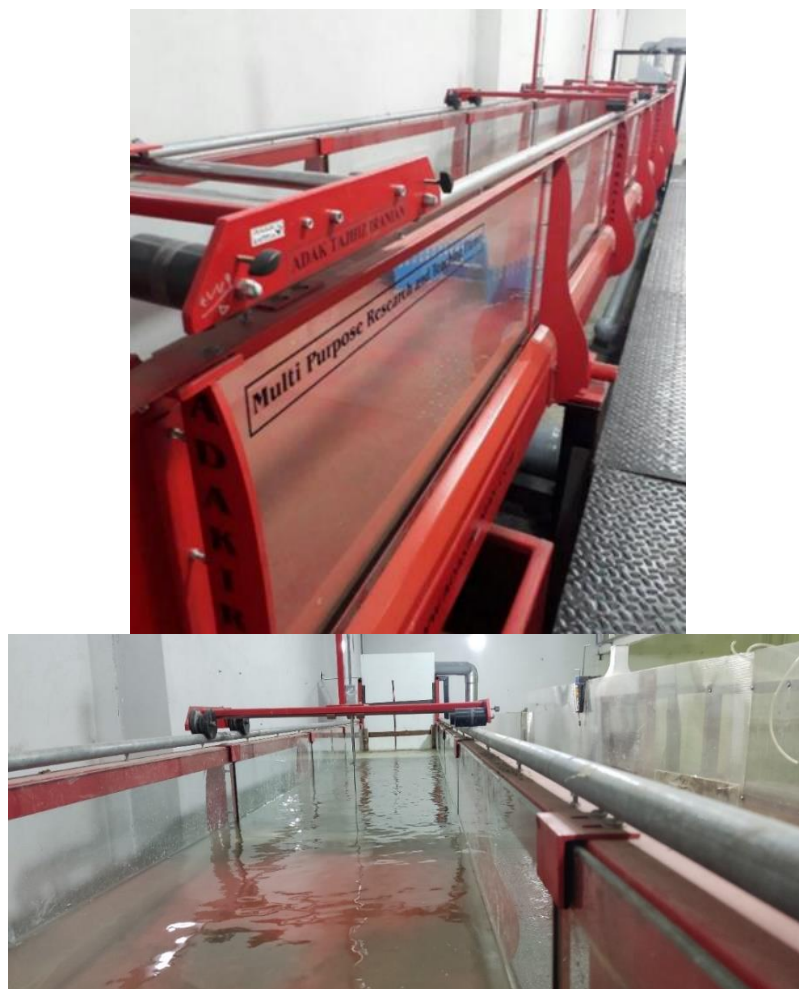
مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی و متعلقات آن

آزمایش‌های این پژوهش در یک فلوم شیشه‌ای به طول 10 متر و ارتفاع 80 سانتی‌متر و عرض 80 سانتی‌متر انجام شده است. کف فلوم از جنس فلز و دیواره‌های آن از جنس شیشه به ضخامت $1/6$ سانتی‌متر ساخته شده است. شیب کف فلوم قابل تنظیم بود و مقدار آن برابر با صفر تنظیم شده است. به‌منظور ایجاد مخزن رسوبات برای آزمایش‌های آبستگی، اقدام به بالا آوردن کف فلوم به صورت کاذب شد. جهت اطمینان از استحکام کف فلوم در مقابل فشار، ابتدا با آجرهای با ارتفاع 10 سانتی‌متر پوشانده شد و سپس صفحات پی‌وی‌سی با ضخامت 2 میلی‌متر روی آن‌ها قرار گرفت.

برای تشکیل پرش هیدرولیکی از دریچه‌ای به ضخامت $1/6$ سانتی‌متر از جنس دریچه پی‌وی‌سی و با بازشدگی ثابت 2 سانتی‌متر و لبه فارسی بر جهت ایجاد جریان فوق‌بحرانی استفاده شده است. پس از دریچه کشویی، یک کف‌بند به طول $1/2$ متر صلب نصب شد. برای محاسبه طول کف‌بند، ابتدا آزمایشی با حداکثر عدد فرود موردنظر ($Fr = 6$) در فلوم آزمایشگاهی انجام گردید و در این عدد فرود، طول پرش به اندازه 1 متر اندازه‌گیری شد. به‌منظور جلوگیری از تاثیر مستقیم جت مستغرق بر آبستگی بستر رسوبی و تشکیل پرش هیدرولیکی نوع A به‌طور کامل روی کف‌بند، طول کف‌بند با 20 درصد ضریب اطمینان برابر با $1/2$ متر در نظر گرفته شد (Nishiya et al. 1996). جهت اطمینان از افقی بودن سطح کف‌بند از تراز استفاده گردید. باتوجه‌به رابطه ارائه شده توسط Dey and Sarkar (2006) جهت محاسبه حداکثر عمق آبستگی و باتوجه‌به دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده و شرایط هیدرولیکی موردنظر، بیشینه حداکثر عمق آبستگی 10 سانتی‌متر تخمین زده شد. سپس با احتساب ضریب اطمینان و نیز در نظر گرفتن احتمال امکان نیاز به عمق مخزن بیشتر، مخزن قرارگیری رسوبات با عمقی برابر با 12 سانتی‌متر پس از کف‌بند صلب ایجاد شد. طول مخزن نیز به‌منظور قابلیت کاربرد برای عدد فرودهای بالا و نیز تغییر طول کف‌بند، 1 متر در نظر گرفته شد. به‌منظور تنظیم مناسب سطح موردنیاز آب در پایاب جهت کنترل پرش هیدرولیکی موردنظر در کف‌بند صلب و نیز نگهداشت رقوم اولیه آب در فلوم قبل از شروع آزمایش‌ها، یک سرریز لولایی با عرضی برابر با عرض فلوم آزمایشگاهی و به ارتفاع 35 سانتی‌متر در انتهای قسمت دوم فلوم نصب گردید. گفتنی است تمام آزمایش‌ها در عمق پایاب ثابت 20 سانتی‌متر انجام شده است.

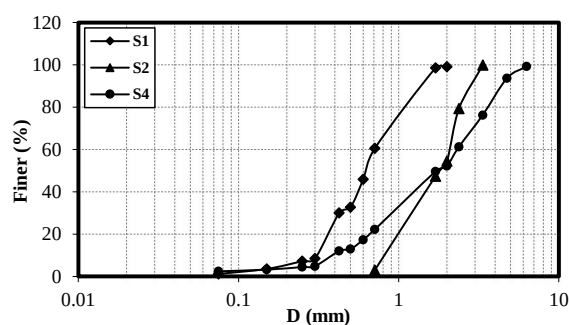
برای اندازه‌گیری دبی از دی‌سنج اولتراسونیک استفاده شده است. به‌منظور تعیین مقدار فرسایش در هر نقطه از مخزن قرارگیری رسوبات، پس از اتمام زمان آزمایش و برقراری جت افقی مستغرق بر روی بستر رسوبات، مخزن رسوبات به هفت محور در فواصل 1 ، 14 ، 26 ، 40 ، 53 و 66 سانتی‌متر تقسیم شد. در هر محور ارتفاع بستر در فواصل (X) 3 سانتی‌متر در جهت طولی با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. به این ترتیب پروفیل سه‌بعدی حفره آبستگی اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق

رسوبات مورد استفاده

در این تحقیق از دو نوع ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و یک نوع ماسه با دانه‌بندی غیریکنواخت به‌عنوان رسوبات غیرچسبنده استفاده گردید. تحلیل الک با استفاده از سری الک‌های استاندارد ASTM انجام شد. منحنی‌های دانه‌بندی مربوط در شکل ۲ و سایر اطلاعات مربوط به دانه‌بندی در جدول ۱ آورده شده است.

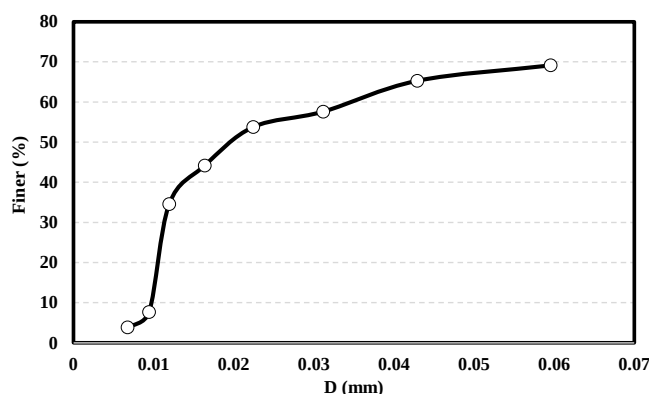


هابندی رسوبات غیرچسبنده مورد استفاده در آزمایش شکل ۲. منحنی دانه

جدول ۱. مشخصات کلی رسوبات غیرچسبنده مورد استفاده در آزمایش‌ها

Sediment Type	D ₁₀ (mm)	D ₁₆ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₉₀ (mm)	σ_g
S1	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۷۱	۱/۳۲	۱/۴۸	۱/۹۶
S2	۰/۸۷	۱	۱/۳۱	۱/۸۱	۲/۰۸	۲/۶	۲/۸۸	۱/۶۱
S3	۰/۳۹	۰/۵۷	۰/۹۹	۱/۷۴	۲/۳۳	۳/۹۷	۴/۴۶	۲/۶۴

همچنین از خاک طبیعی و زراعی به عنوان رس جهت تولید رسوب چسبنده استفاده گردید و پس از عبور ذرات خاک زراعی از الک شماره ۲۰۰، ذرات ریزدانه به عنوان رس در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه رس ابتدا خاک طبیعی داخل یک مخزن مرتفع مخلوط شد و سپس مخلوط گل به صورت دوغاب از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد سپس محلول آب و رس داخل سطل‌هایی ریخته شد به به آنها زمان داده شد تا رس محلول در دوغاب ته‌نشین شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت از هر سطل نمونه‌ای داخل آون (خشک‌کن) گذاشته می‌شد تا درصد رطوبت رس محاسبه شود هم‌زمان با نمونه‌برداری روی سطل‌ها پوشانده می‌شد تا از تبخیر و ایجاد خطا در درصد رطوبت رس جلوگیری شود. برای تعیین منحنی دانه‌بندی رسوبات چسبنده از آزمایش هیدرومتری استفاده گردید که نمودار خروجی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطر متوسط (D_{50}) رسوبات چسبنده حدود ۰/۰۲ میلی‌متر است.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی رسوبات چسبنده به روش هیدرومتری

آزمایش تراکم استاندارد و حدود اتربرگ

این آزمایش به منظور تعیین رطوبت بهینه و حداکثر جرم مخصوص خشک انجام می‌شود. برای این منظور، نمونه خاک در داخل یک قالب استوانه‌ای شکل قرار داده شد و با انرژی تراکم مشخصی که انرژی تراکم استاندارد است کوبیده می‌شود. آزمایش تراکم به آزمایش پروکتور معروف است. در این آزمایش حداکثر جرم مخصوص خشک و رطوبت بهینه برای رسیدن به حداکثر تراکم محاسبه می‌شود. همچنین در آزمایش حدود اتربرگ، محدودیت‌های رطوبتی خاک‌های ریزدانه (به ویژه خاک‌های رسی) تعیین می‌شود که نشان‌دهنده تغییر حالت خاک از جامد به نیمه‌جامد، خمیری و روان می‌باشد. این آزمایش به مهندسان کمک می‌کند تا خواص قوام و استحکام خاک را براساس درصد رطوبت آن تعیین کنند؛ رفتار مکانیکی خاک را در شرایط مختلف رطوبتی پیش‌بینی کنند؛ خاک‌های ریزدانه را طبقه‌بندی و نام‌گذاری کنند؛ و احتمال نشست، تحکیم و تغییر شکل خاک را در پروژه‌های عمرانی ارزیابی نمایند. (ASTM-D4318 و ASTM-D1557)



شکل ۴. نمایی از جک هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش تراکم پروکتور

روش انجام آزمایش‌ها

به‌طور کلی آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش را می‌توان به دو سری تقسیم نمود. سری اول، آزمایش‌های شاهد که در آن بستر رسوبی به حداکثر تراکم و فشردگی رسانده شد. به دلیل اینکه دستیابی به تراکم حداکثر (تا ۱۰۰ درصد) برای برخی از رسوبات امکان‌پذیر نبود، با افزودن درصد‌های مختلف رس (تا ۱۵ درصد) اقدام به ایجاد تراکم ۱۰۰ درصدی گردید. دو عدد فرود ۴ و ۶ نیز برای این آزمایش‌ها انتخاب شد. عدد فرود ۴ به این دلیل انتخاب شد که پرش هیدرولیکی ایجاد شده در محدوده اعداد فرود ۲/۵-۴/۵، پرش قوی نبوده و غالباً طراحی حوضچه‌های آرامش برای اعداد فرود بالاتر از ۴/۵ است (امیری تکلدانی و سیاهی، ۱۳۸۷). عدد فرود ۶ نیز بیشترین عدد فرود قابل اجرا در فلوم آزمایشگاهی، باتوجه به اندازه ریزترین رسوب موردنظر بود. جهت یکسان بودن شرایط پرش هیدرولیکی، نسبت استغراق پرش (S) در هر دو عدد فرود موردنظر یکسان و به صورت دلخواه برابر با ۱/۹ در نظر گرفته شد. پیش از شروع آزمایش‌های آبشستگی برای هر عدد فرود، ابتدا همانند آزمایش تراکم استاندارد، ترکیب رسوبات به صورت لایه لایه (لایه‌های ۵ سانتی‌متری) به درون مخزن قرارگیری رسوبات ریخته می‌شود و با چسم فلزی و مسطح (همانند کوبنده مورداستفاده در آزمایش تراکم استاندارد) ضرباتی به هر لایه از بستر رسوبی وارد می‌شد تا به حداکثر تراکم موردنظر برسد. برای جلوگیری از آبشستگی قبل از استغراق روی مخزن رسوب با پلکسی گلسی بزرگ‌تر از سطح مخزن پوشانده می‌شد. پس از اطمینان از پایدار شدن شرایط مطلوب در فلوم (تثبیت دبی و عمق پایاب)، صفحه پلکسی گلس از روی مخزن رسوب برداشته و آزمایش‌ها شروع می‌شد.

با توجه به اینکه رسیدن به درصد تراکم ۱۰۰ درصد برای رسوبات مورداستفاده (به‌ویژه ذرات درشت‌دانه S2 و S3) امکان‌پذیر نبود، آزمایش‌هایی با اضافه کردن درصد‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس به دانه‌بندی‌های موجود انجام گردید. براین اساس، اثر درصد رس در تراکم ثابت ۱۰۰ درصد بر آبشستگی موضعی بررسی گردید. درصد وزنی رس مورداستفاده برای این سری از آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف در نظر گرفته شد. برای هر آزمایش، ابتدا به میزان لازم برای پر نمودن مخزن قرارگیری رسوبات فلوم آزمایشگاهی، از رسوبات غیرچسبیده موردنظر برداشته و در یک مخزن ترکیب مجزا ریخته می‌شد. سپس باتوجه به درصد وزنی موردنظر رس، وزن رس محاسبه می‌شد و پس از آن به رسوبات درون مخزن ترکیب اضافه و سعی می‌شد به‌طور کامل با آن مخلوط شود و یک مخلوط یکنواخت به‌دست آید. سپس مخلوط تهیه شده به مخزن قرارگیری رسوبات در فلوم منتقل می‌شد و آزمایش آبشستگی در مدت‌زمان ۱۲ ساعت انجام می‌شد. پارامتر زمان از پارامترهای بسیار مهم در فرایند آبشستگی است. طبق اعلام Dey and Sarkar (2006)، برای ذرات با $D_{50} < 1/9 \text{ mm}$ پس از ۱۲ ساعت ابعاد حفره به حالت تعادل می‌رسد و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین حفره ایجاد شده در ۱۲ ساعت با ۲۴ ساعت وجود ندارد. اما بسیاری از پژوهشگران نظیر Farhodi and Smith (1985)، Kells et al. (2001) و Khalili-Shayan and Farhodi (2014) آزمایش‌های خود را در مدت‌زمان ۲۴ ساعت انجام دادند. از طرفی طبق اعلام Balachandar et al. (2000) حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبیده حتی پس از ۹۶ ساعت نیز به تعادل نمی‌رسد؛ لذا جهت اطمینان از کافی بودن مدت‌زمان در نظر گرفته شده برای فرایند آبشستگی باتوجه به محدودیت امکان استفاده مداوم از سیستم پمپاژ، آزمایش شاهد با کوچک‌ترین دانه‌بندی (S1) و بیشترین عدد فرود در زمان‌های ۳۰ ثانیه تا ۲۴ ساعت انجام شد و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت.

تحلیل ابعادی

به‌منظور شناسایی و بررسی عوامل مؤثر بر پدیده آبشستگی موضعی در بستر رسوبی پایین‌دست جت افقی مستغرق، تحلیل ابعادی با استفاده از تئوری باکینگهام (Buckingham π -theorem) انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل مشخصات سیال (جرم مخصوص سیال، ρ و لزجت دینامیکی، μ)، ویژگی‌های جریان (عمق پایاب T_w ، سرعت جت V_1 یا دبی جریان Q ، شتاب ثقل g)، مشخصات کانال (طول کف‌بند l ، بازشدگی دریچه b ، عرض آبراهه B ، شیب بستر S_0 ، ضریب زبری n ، حجم مخزن رسوب V_0) و خصوصیات رسوبات (قطر متوسط ذرات d_{50} ، جرم مخصوص ذرات رسوبی ρ_s و درصد رس C_c) و پارامترهای مربوط به مشخصات پروفیل آبشستگی (عمق بیشینه حفره آبشستگی d_{sm} ، ارتفاع تلماسه h_d و حجم حفره آبشستگی V_s) می‌باشند.

بستر کف‌بند صلب در تمام آزمایش‌ها از جنس پی‌وی‌سی با ضریب زبری ثابت و نیز شیب افقی بوده و طول آن در تمام آزمایش‌ها ثابت بوده است، در نتیجه ضریب زبری مانینگ بستر (n)، شیب بستر (S_0) و طول کف‌بند (l) به‌عنوان پارامترهای ثابت از تحلیل ابعادی کنار گذاشته می‌شوند. با توجه به این که بازشدگی دریچه (b)، عرض آبراهه (B) در تمام آزمایش‌ها ثابت نگه‌داشته شده است، لذا از تاثیر این پارامترها به‌عنوان پارامترهای ثابت آزمایشگاهی می‌توان صرف‌نظر نمود. بنابراین رابطه تابعی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d_s}{b}, \frac{h_d}{b} = f\left(\frac{V_1^2}{gb^2}, \frac{Vb}{v}, \frac{d_{50}}{b}, C_c\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

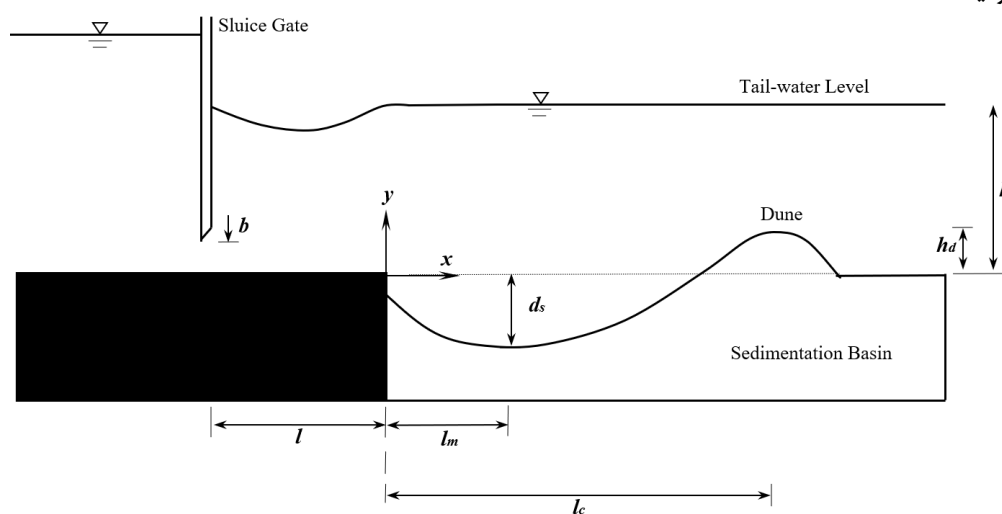
در این رابطه، نسبت $V_1^2/(gb^2)$ مربع عدد فرود، نسبت Vb/v عدد رینولدز و Δ چگالی نسبی ذرات مستغرق $(\rho_s - \rho)/\rho$ است. جریان در کانال‌های باز تقریباً همیشه کاملاً آشفته است؛ بنابراین، وابستگی به عدد رینولدز قابل چشم‌پوشی است. افزون بر این، رسوبات مورد استفاده در این مطالعه دارای چگالی نسبی ذرات مستغرق ثابت هستند، بنابراین اثر Δ در فرمول توسعه‌یافته در نظر گرفته نمی‌شود (Rajaratnam and Berry, 1977; Rajaratnam, 1981; Dey and Sarkar, 2006, Ben Meftah and Mossa, 2006). در نتیجه، با استفاده از تئوری باکینگهام، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d_s}{b}, \frac{h_d}{b} = f\left(Fr, \frac{d_{50}}{b}, C_c\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{V_e}{V_o} = f\left(Fr, \frac{d_{50}}{b}, C_c\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

برنامه انجام آزمایش‌ها

پس از به تعادل رسیدن حفره آبشستگی و انجام آزمایش‌های شاهد با دو عدد فرود ۴ و ۶، آزمایش‌ها با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس به ترکیب رسوبات غیرچسبنده نیز انجام شد. در شکل ۵ نیمرخ عمومی حفره آبشستگی و پارامترهای موردنظر نشان داده شده است. با توجه به اینکه نیمخ حفره به صورت سه‌بعدی بدست می‌آید اندازه‌گیری در سرتاسر عرض فلوم آزمایشگاهی در ۷ محور با استفاده از عمق سنج مکانیکی ثبت گردید.



شکل ۵. پارامترهای شاخص حفره آبشستگی پائین‌دست جت افقی مستغرق

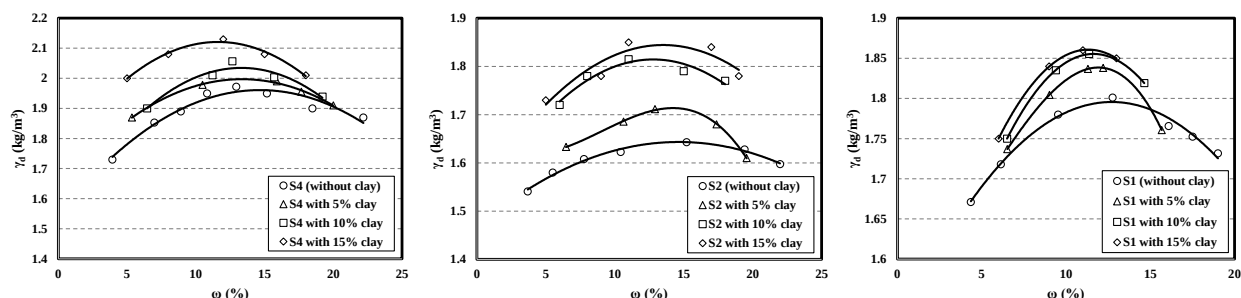
پس از ترسیم نیمرخ سه‌بعدی حفره آبشستگی، مشخصه‌های اصلی حفره شامل حداکثر عمق آبشستگی (d_s)، ارتفاع تلماسه (h_d)، و حجم کل حفره آبشستگی (V_e) محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش تراکم استاندارد و حدود اتربرگ

در شکل ۶ نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد انجام شده مطابق با استاندارد ASTM-D1557 به‌ازای درصدهای مختلف رس نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی تراکم خاک مخلوط نشان‌دهنده یک روند سهمی است که نقطه اوج آن رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر است. با افزایش درصد رس، جرم‌مخصوص خشک حداکثر ترکیب رسوبات افزایش می‌یابد، به‌دلیل اینکه زیرا ذرات رس در فضای خالی بین ذرات ماسه قرار گرفته و موجب کاهش تخلخل و افزایش جرم‌مخصوص ترکیب رسوبات خواهند شد. همچنین رطوبت بهینه تراکم نیز با افزایش درصد رس افزایش یافته است؛ زیرا رس آب بیشتری جذب می‌کند و برای رسیدن به بیشترین

تراکم نیاز به رطوبت بیشتر است.



شکل ۶. منحنی‌های تراکم به ازای درصد‌های مختلف رس

در جدول ۲ نتایج آزمایش تراکم همراه با نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد رس برای دانه‌بندی S1، حد خمیری از ۲۱ به ۲۵ درصد افزایش یافته است. علت این تغییر افزایش جذب سطحی آب توسط ذرات ریز رس است که موجب می‌شود خاک با رطوبت کمتری به حالت خمیری تبدیل شود. به عبارت دیگر، خاک رس‌دار زودتر و با رطوبت کمتر از حالت نیمه‌جامد به حالت خمیری می‌رسد. همچنین حد روانی با افزایش درصد رس برای دانه‌بندی S1 از ۲۹ به ۳۰ افزایش یافته است. در توجه این تغییر نیز می‌توان گفت که خاک‌های رسی به دلیل چسبندگی بالاتر، برای تبدیل از حالت خمیری به حالت روان به رطوبت بیشتری نیاز دارند.

جدول ۲. نتایج آزمایش حد اتربرگ (ASTM-D4318) و آزمایش پروکتور اصلاح شده (ASTM-D1557).

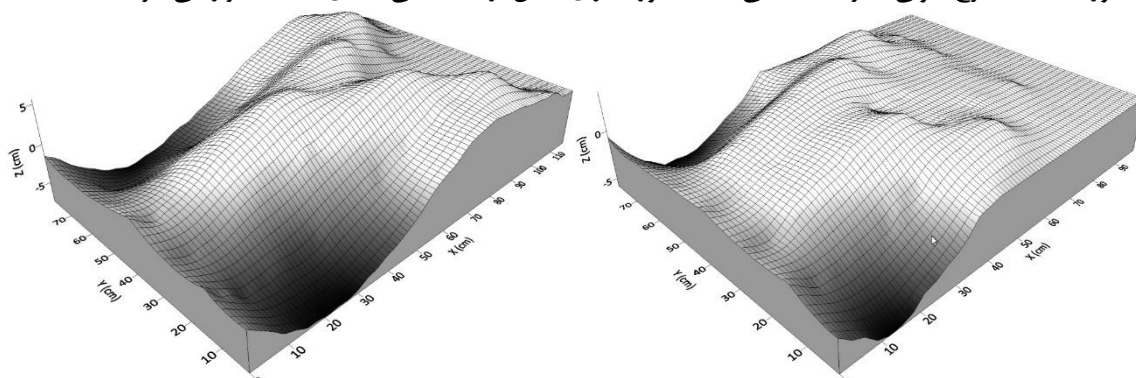
دانه‌بندی	نوع	حدروانی (درصد)	حدخمیری (درصد)	شاخص خمیری (درصد)	رطوبت بهینه (درصد)	جرم مخصوص حداکثر (kg/m³)
S1	بدون رس	۲۷	۲۱	۶	۱۳	۱/۷۹
	با ۵ درصد رس	۲۹	۲۱	۶	۱۱/۸	۱/۸۳
	با ۱۰ درصد رس	۲۹	۲۴	۹	۱۱	۱/۸۲
	با ۱۵ درصد رس	۳۰	۲۵	۹	۱۰/۵	۱/۸۶
S2	بدون رس	۱۹	۰	۰	۱۴/۱	۱/۶۳
	با ۵ درصد رس	۱۹	۰	۰	۱۳	۱/۷۱
	با ۱۰ درصد رس	۲۱	۱۷	۵	۱۲/۵	۱/۸۲
	با ۱۵ درصد رس	۲۱	۱۹	۷	۱۲/۸	۱/۸۷
S3	بدون رس	۱۸	۰	۰	۱۴/۸	۱/۹۷
	با ۵ درصد رس	۱۹/۵	۰	۰	۱۳/۳	۲
	با ۱۰ درصد رس	۲۱	۱۵	۲	۱۳/۲	۲/۰۵
	با ۱۵ درصد رس	۲۱	۱۶	۵	۱۲	۲/۱۳

نتایج آزمایش‌های شاهد (حداکثر تراکم بدون افزودن رس)

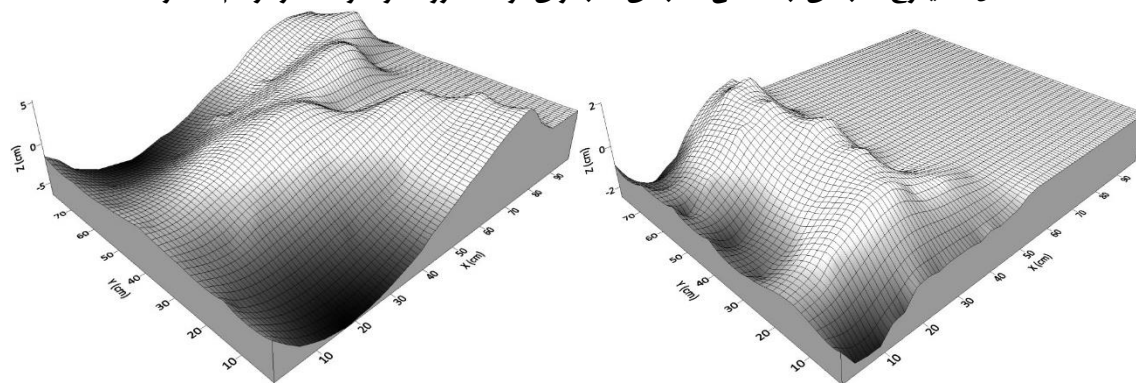
پس از انجام آزمایش تراکم، مشاهده گردید که حداکثر تراکم قابل اجرا برای دانه‌بندی‌های S1، S2 و S3 به ترتیب ۹۵، ۹۵ و ۹۰ درصد است. در شکل‌های ۷ تا ۹ نیمرخ‌های سه‌بعدی حفره آبشستگی در شرایط تراکم حداکثر (آزمایش شاهد) برای رسوبات با دانه‌بندی S2، S1 و S3 با دو عدد فرود ۴ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیمرخ‌های شکل گرفته پس از ۱۲ ساعت به صورت کامل سه‌بعدی هستند. نتیجه دیگر بررسی نیمرخ‌های سه‌بعدی حفره آبشستگی این است که حداثر عمق آبشستگی در یک محور عرضی واحد رخ نداده است و با تغییر عدد فرود و همچنین قطر ذرات، موقعیت عرضی رخداد حداکثر عمق آبشستگی متغیر است. به‌طوری که در برخی آزمایش‌ها حداکثر عمق آبشستگی در دیواره سمت چپ و در برخی آزمایش‌ها در دیواره سمت راست رخ می‌دهد. همچنین حداکثر ارتفاع تلماسه در محلی نزدیک به خط مرکزی فلووم رخ داده است. نکته دیگر این است که ابعاد حفره آبشستگی در خط مرکزی فلووم به مراتب کوچک‌تر از جداره فلووم می‌باشد ولی در مقابل، ابعاد تلماسه پس از حفره آن به مراتب بزرگ‌تر است.

دلیل کوچک‌تر بودن ابعاد حفره آبستگی در خط مرکزی فلووم نسبت به جداره‌ها به ویژگی‌های جریان و تأثیر دیواره‌های جانبی بر توزیع انرژی و سرعت مربوطه است. در ناحیه مرکزی، جریان جت افقی مستغرق دارای تمرکز انرژی و سرعت بالاتری است که موجب ایجاد حفره عمیق‌تر می‌شود؛ اما نزدیکی به دیواره‌ها، اصطکاک و اثرات جریان‌های گردابی باعث کاهش سرعت و انرژی موضعی شده و بنابراین عمق و ابعاد حفره کمتر می‌شود (Long et al., 1990; Balachandar et al., 2000; Ansari et al., 2003).

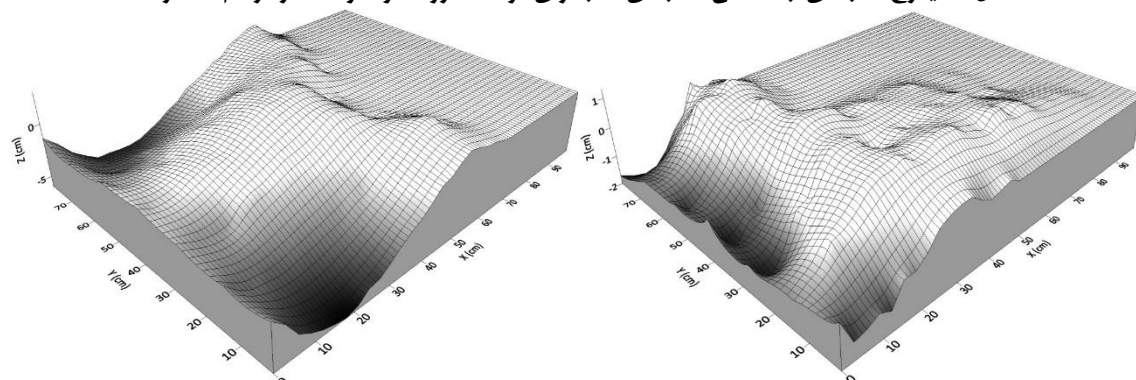
همچنین، جریان ثانویه و پیچیده در نزدیکی دیواره‌ها، توزیع تنش برشی بر بستر را تغییر داده و به ایجاد پراکندگی بیشتر انرژی منجر می‌شود که این اثر در آزمایش‌های مشابه نیز گزارش شده است (Dey and Sarkar, 2006; Chen et al., 2022). از این رو، ابعاد حفره آبستگی در حاشیه‌ها بزرگ‌تر و کم‌عمق‌تر بوده، ولی در خط مرکزی که جریان متمرکزتر است، ابعاد آن کوچک‌تر و عمق بیشتر است. گفتنی است در ادامه به منظور مقایسه نیمرخ طولی حفره آبستگی فقط محور کناری کانال آزمایشگاهی مبنای مقایسه قرار می‌گیرد.



شکل ۷. نیمرخ سه‌بعدی آبستگی دانه‌بندی S1 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و حداکثر تراکم ۹۵ درصد



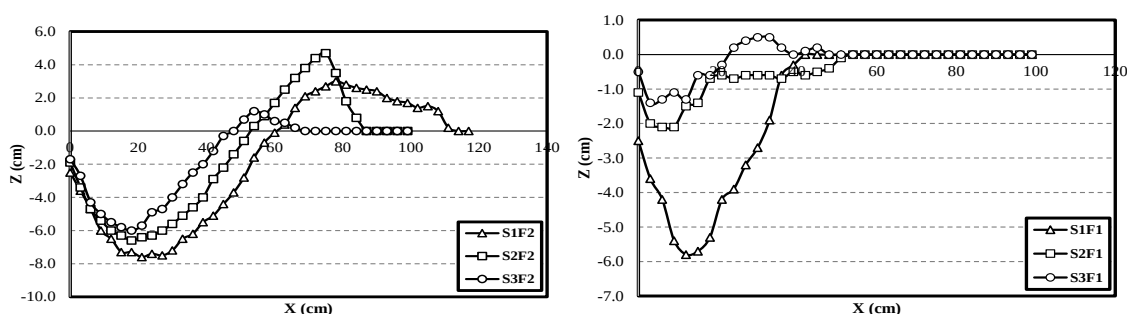
شکل ۸. نیمرخ سه‌بعدی آبستگی دانه‌بندی S2 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و حداکثر تراکم ۹۵ درصد



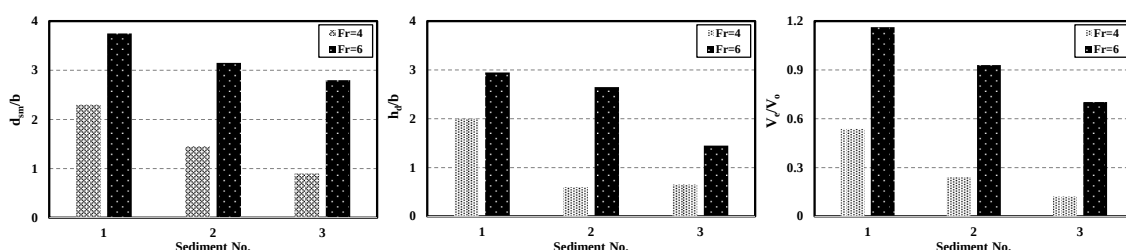
شکل ۹. نیمرخ سه‌بعدی آبستگی دانه‌بندی S3 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و حداکثر تراکم ۹۰ درصد

در شکل ۱۰ نیمرخ طولی حفره آبستگی در شرایط تراکم حداکثر بستر رسوبی به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ نشان داده شده است. همچنین به منظور مقایسه مشخصات حفره آبستگی (شامل: حداکثر عمق آبستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبستگی) در شکل ۱۱ مقادیر V_e/V_0 و h_d/b برای هر سه دانه‌بندی موردنظر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر ذرات و همچنین غیریکنواختی ذرات رسوب، هر سه مشخصه حفره آبستگی کاهش یافته‌اند. برای مثال، در عدد فرود حداکثر، عمق آبستگی بدون بعد

از (d_{sm}/b) ۳/۷۵ به ۲/۸، ارتفاع بدون بعد تلماسه (h_d/b) از ۲/۹۵ به ۱/۴۸ و میزان آبستنگی حفره (V_e/V_o) از ۱/۱۶ به ۰/۷ درصد کاهش یافته است.



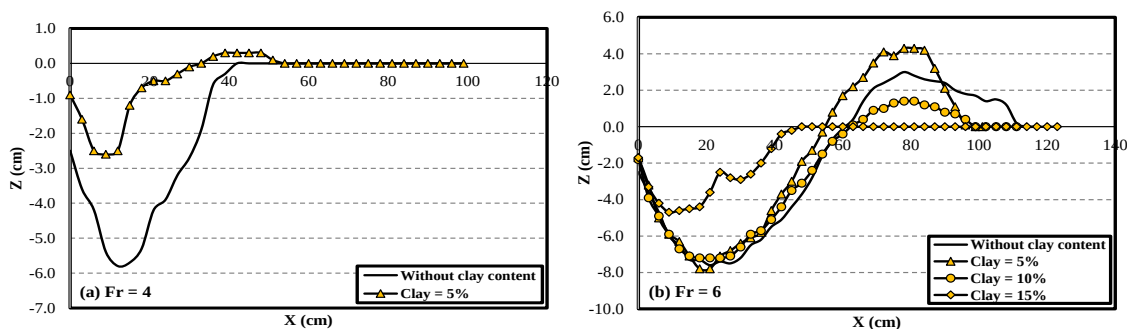
شکل ۱۰. نیمرخ طولی حفره آبستنگی دانه‌بندی‌های مختلف به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی



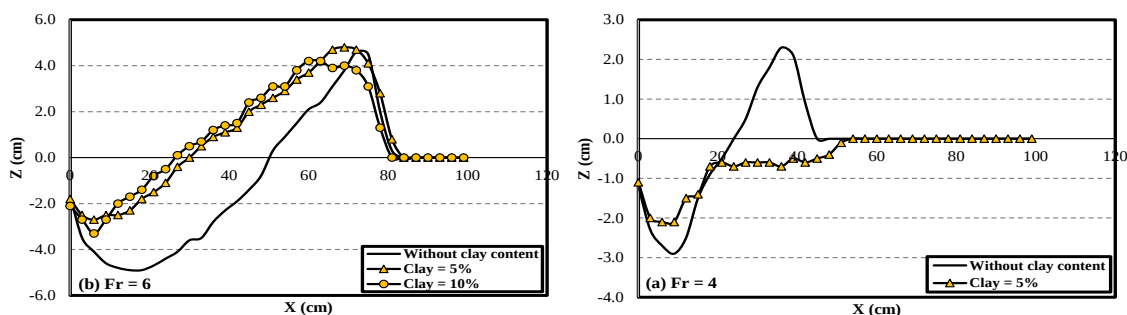
شکل ۱۱. تغییرات حداکثر عمق آبستنگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبستنگی برای هر سه دانه‌بندی مورد مطالعه

اثر رس بر مشخصات حفره آبستنگی در تراکم حداکثر

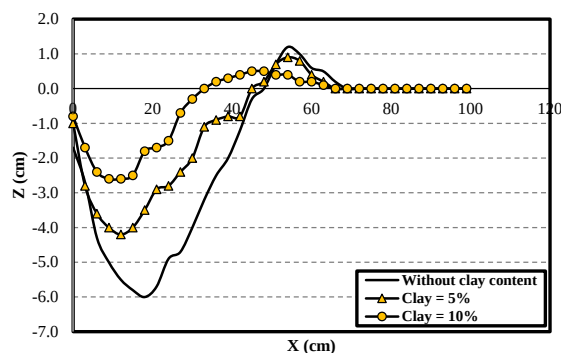
در ادامه برای رسیدن به حداکثر درصد تراکم، از رسوبات چسبیده و افزودن رس در درصدهای مختلف استفاده شده است. به این منظور، درصدهای مختلف رس (۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد) به رسوبات با دانه‌بندی S1 و S2 و S3 اضافه گردید. پس از انجام آزمایش تراکم پروکتور و دستیابی به رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به‌ازای درصدهای مختلف رس، آزمایش‌ها طبق روال مشابه با آزمایش‌های شاهد انجام گردید. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نیمرخ طولی حفره آبستنگی در جدار جانبی کانال به‌ازای اعداد فرود ۴ و ۶ برای رسوبات با دانه‌بندی S1 و S2 و S3 و درصدهای مختلف رس (۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد) ترسیم شده است.



شکل ۱۲. نیمرخ طولی حفره آبستنگی دانه‌بندی S1 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ به‌ازای درصدهای مختلف رس



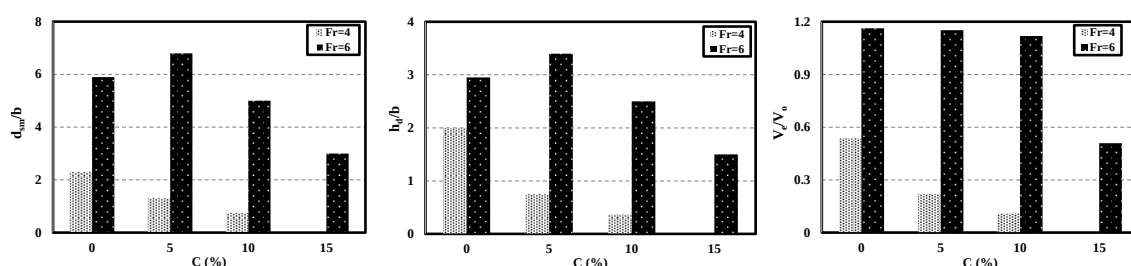
شکل ۱۳. نیمرخ طولی حفره آبستنگی دانه‌بندی S2 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ به‌ازای درصدهای مختلف رس



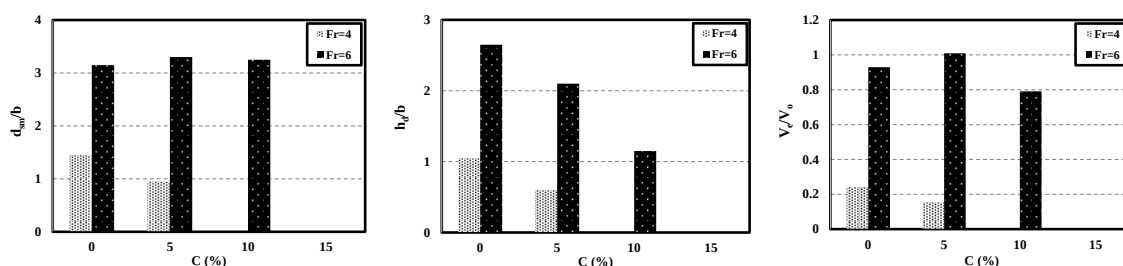
شکل ۱۴. نیمرخ طولی حفره آبخستگی دانه‌بندی S3 به‌ازای عدد فرود ۶ به‌ازای درصد‌های مختلف رس

به‌منظور بررسی دقیق میزان تاثیر رس بر مشخصات حفره آبخستگی، در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ تغییرات مشخصات حفره شامل حداکثر عمق آبخستگی، ارتفاع تلماسه و حجم کل آبخستگی (حفره ایجادشده در پائین‌دست کف‌بند) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای دانه‌بندی S1 و عدد فرود ۴ با افزایش درصد رس، ابعاد حفره آبخستگی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبخستگی نسبت به آزمایش شاهد ۵۹ درصد کاهش یافته است. نکته جالب توجه این است که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۱۰ و ۱۵ درصد هیچ‌گونه آبخستگی قابل‌اندازه‌گیری در بستر رسوبی مشاهده نشد. همچنین برای آزمایش‌ها با عدد فرود ۶ نیز ابعاد حفره آبخستگی با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبخستگی نسبت به آزمایش شاهد ۳۷ درصد کاهش یافته است. در مورد دانه‌بندی S2 با عدد فرود ۴ و با افزایش درصد رس، ابعاد حفره تغییر معناداری نداشته است. همچنین برای آزمایش‌ها با عدد فرود ۶ نیز ابعاد حفره آبخستگی با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبخستگی نسبت به آزمایش شاهد ۲۰ درصد کاهش یافته است. برای دانه‌بندی S3 در تراکم ۱۰۰ درصد و عدد فرود ۴ هیچ‌گونه آبخستگی قابل‌اندازه‌گیری در بستر رسوبی مشاهده نشد. برای آزمایش‌ها با عدد فرود ۶ با افزایش درصد رس، ابعاد حفره آبخستگی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبخستگی نسبت به آزمایش شاهد ۵۷ درصد کاهش یافته است.

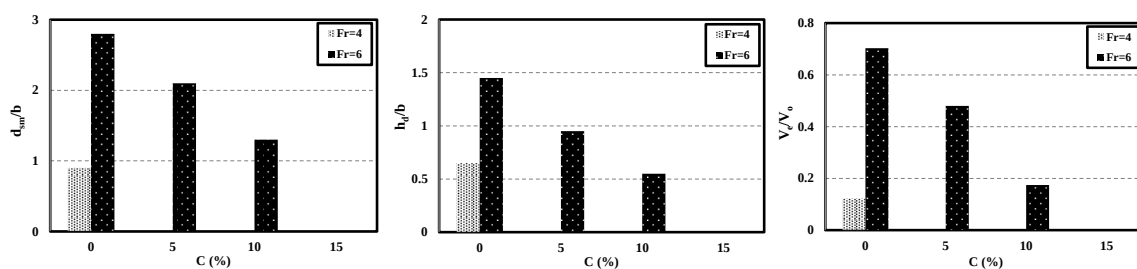
لازم به ذکر است در برخی اعداد فرود و برخی درصد‌های رس، به دلیل تراکم زیاد و مقاومت زیاد بستر رسوبی، هیچ آبخستگی مشاهده نشد و به همین دلیل نیمرخ حفره آبخستگی برای آن آزمایش ترسیم نشده است.



شکل ۱۵. تغییرات حداکثر عمق آبخستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبخستگی برای دانه‌بندی S1



شکل ۱۶. تغییرات حداکثر عمق آبخستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبخستگی برای دانه‌بندی S2



شکل ۱۷. تغییرات حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبشستگی برای دانه بندی S3

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که وجود خاک رس مونت‌موریلونیت مورد استفاده در این تحقیق، در ترکیب رسوبات در مراحل آماده‌سازی، سبب ایجاد تورم قابل ملاحظه در هنگام استغراق بستر نشده و سطح بستر رسوبی پس از تسطیح دچار تغییر نمی‌شود. همچنین در طول انجام آزمایش‌های آبشستگی، ذرات بسیار ریز خاک‌های چسبنده موجود در بستر رسوبی، در اثر فرآیند آبشستگی وارد جریان شده و باعث کدورت می‌شود، که با افزایش درصد رس در ترکیب، شدت این کدورت افزایش می‌یابد. نوع فرسایش مشاهده شده در بستر رسوبی با افزودن رس همانند اعلام (Mostafa et al. (2008)، Deb Nath and Chaudhuri (2012) و حمیدی فر (۱۳۸۸) به دو صورت کلی ذره-ذره و توده-توده بوده که نوع توده-توده در درصدهای زیاد رس مشاهده می‌شد. در فرسایش ذره-ذره که در درصد پایین رس شکل عمده فرسایش بستر بود، ذرات همانند آنچه در رسوبات غیرچسبنده رخ می‌دهد، در اثر برخورد جت افقی مستغرق از سطح بستر جدا می‌شوند. با این تفاوت که در حالت رسوبات چسبنده، ذرات درشت‌دانه به صورت بار بستر بر روی سطح بستر جابه‌جا شده و تشکیل فرم‌های بستر نظیر شکج و تلماسه می‌دهند ولی ذرات ریزدانه به صورت بار معلق وارد جریان شده و باعث کدورت آن می‌شوند. در فرسایش توده-توده که بیشتر در درصد بالای رس مشاهده شده است، تنش برشی وارده از سوی جت افقی مستغرق سبب ضعیف شدن پیوندهای بین ذرات رسوب شده و توده‌های رسوبی با اندازه‌های مختلف را از بستر جدا می‌کند. این توده‌ها به طور معمول کروی شکل بوده و ابعادی در حدود ۱ تا ۷ میلی‌متر دارند و در اثر جابجایی در داخل حفره آبشستگی و یا غلتیدن روی بستر رسوبی، متلاشی شده و ذرات آن از هم جدا می‌شوند. پس از جدا شدن ذرات توده از یکدیگر، همانند فرسایش ذره-ذره، ذرات درشت‌دانه بصورت بار بستر فرم‌های بستر را تشکیل داده و ذرات ریزدانه بصورت بار معلق وارد جریان می‌شوند. فرسایش توده-توده سبب می‌شود که سطح حفره آبشستگی در رسوبات چسبنده برخلاف رسوبات غیرچسبنده، بسیار ناهموار و دارای پستی و بلندی‌های کوچک باشد. لازم به ذکر است که حفره آبشستگی و تلماسه پس از آن، در تمامی حالت‌های آزمایش شده مشاهده شد. همچنین به دلیل اینکه ذرات ریزدانه در اثر آبشستگی بصورت بار معلق وارد جریان می‌شدند، تلماسه ایجاد شده بطور عمده از ذرات درشت‌دانه تشکیل شده و ظاهر آن بدلیل اختلاف رنگ ذرات درشت‌دانه و ریزدانه کاملاً از مصالح بستر متمایز است. در شکل ۱۸ نمایی از بستر دارای رسوبات چسبنده پس از اتمام آزمایش آبشستگی نشان داده شده است و تلماسه و اختلاف رنگ آن به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸. نمایی از بستر رسوبی با دانه بندی S1 و درصد رس ۱۵ درصد پس از اتمام آزمایش

با توجه به اینکه رسوبات S2 و S3 دارای قطر متوسط یکسان ولی دانه بندی متفاوتی هستند، می‌توان تأثیر یکنواختی و غیریکنواختی دانه بندی را نیز بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک قطر متوسط یکسان، تراکم بستر رسوبی در دانه بندی یکنواخت تأثیر ناچیزی بر ابعاد حفره آبشستگی دارد. این تأثیر با افزایش درصد رس نیز تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. دلیل این موضوع را می‌توان به درهم‌تنیده شدن ذرات با اندازه‌های مختلف در رسوبات با دانه بندی یکنواخت عنوان کرد.

نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر رس بر مشخصات حفره آبستنگی پائین دست جت افقی مستغرق و در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی بررسی گردید. نتایج آزمایش ها به طور خلاصه به شرح زیر می باشند:

با افزایش قطر ذرات و همچنین غیریکنواختی ذرات رسوب، هر سه مشخصه حفره آبستنگی کاهش یافته اند. برای مثال، در عدد فرود حداکثر، عمق آبستنگی بدون بعد (d_{sm}/b) از $3/75$ به $2/8$ ، ارتفاع بدون بعد تلماسه (h_d/b) از $2/95$ به $1/48$ و میزان آبستنگی حفره (V_e/V_o) از $1/16$ به $0/7$ درصد کاهش یافته است.

با افزودن ۱۵ درصد رس شکل حفره آبستنگی به طور کلی تغییرات قابل توجهی می کند، به طوری که در عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبستنگی با ریزترین دانه بندی (S_1) به صفر می رسد و در عدد فرود ۶ عمق آبستنگی، ارتفاع تلماسه و حجم حفره آبستنگی به ترتیب به میزان ۳۷ درصد، $50/8$ درصد و $56/25$ درصد کاهش می یابد. به طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به ازای ۵ درصد رس عمق آبستنگی نسبت به آزمایش شاهد (با تراکم معمولی) ۵۹ درصد کاهش یافته است. نکته جالب توجه این است با توجه به اینکه رسوبات S_2 و S_3 دارای قطر متوسط یکسان ($1/8$ و $1/74$ mm) ولی توزیع دانه بندی متفاوتی هستند، می توان نتیجه گیری کرد که یکنواختی و غیریکنواختی ذرات در شرایط حداکثر تراکم تاثیر قابل توجهی در ابعاد حفره آبستنگی دارد. نتایج نشان داد که برای دانه بندی S_2 و عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبستنگی با افزودن ۱۰ درصد رس به کمترین مقدار می رسد. این در حالی است که برای دانه بندی S_3 با افزودن ۵ درصد رس در ترکیب، ابعاد حفره به صفر رسید.

در محدوده شرایط آزمایشگاهی این تحقیق (رسوبات با قطر کمتر از حدود ۲ میلی متر و حداکثر عدد فرود ۶) نسبت بهینه رس در ترکیب بستر رسوبی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد است و با این نسبت ابعاد حفاظت از بستر به خوبی صورت می گیرد. البته هر نوع رسوب چسبنده رفتار خاص خود را دارد که در انجام تحقیقات آینده باید مدنظر قرار گیرد.

بنابراین، خاک رس به عنوان یک راهکار کم هزینه، مؤثر و دوست دار محیط زیست، با افزایش چسبندگی و تثبیت بستر رسوبی، نقش کلیدی در افزایش مقاومت بستر و همچنین کاهش ابعاد حفره آبستنگی پایین دست سازه های هیدرولیکی ایفا می کند و می تواند به عنوان جایگزین یا مکمل روش های سنتی کنترل آبستنگی مورد استفاده قرار گیرد.

از جمله محدودیت های این تحقیق، پایداری زمانی خاک رسوبی در شرایط میدانی است. در واقع در این شرایط، تغییرات فصلی و نوسانات سطح آب سبب خشک و مرطوب شدن بستر می شوند که می تواند بر چسبندگی و مقاومت خاک تأثیر بگذارد. همچنین در مناطق سردسیر، یخ زدگی و ذوب شدن خاک می تواند ساختار آن را تضعیف کند. از سوی دیگر، میزان و نوع رسوبات معلق در سیلاب ها و همچنین انرژی و مدت زمان سیلاب می تواند پایداری بستر را تحت تأثیر قرار دهد. از همه مهم تر، با گذشت زمان، ممکن است بستر رسوبی تحت تأثیر وزن خاک و آب به تحکیم بیشتری برسد که می تواند مقاومت آن را افزایش دهد.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

فهرست منابع

- امیری تکلدانی، ابراهیم. و سیاهی، محمد کاظم (۱۳۸۷)، طراحی کانال های آبیاری و سازه های وابسته، انتشارات دانشگاه تهران.
- حمیدی فر، حسین و امید، محمد حسین (۱۳۸۹). اثر نوع رس بر آبستنگی رسوبات چسبنده در پایین دست دریچه کشویی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد
- حمیدی فر، حسین، امید، محمد حسین و رئیس استبرق، علی (۱۳۸۸). تاثیر میزان رس بر آبستنگی ناشی از جت افقی مستغرق، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران
- الهی، مسیح (۱۳۸۷). بررسی آبستنگی مصالح چسبنده در پایین دست سرریزهای قائم. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ۱۱۵ صفحه.

REFERENCES

- Abt, S.R., & Ruff, J.F. (1982). Estimating culvert scour in cohesive material. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(1), 25-34.
- Amiri Tokaldani, I. and Siahi, M.K. (2008). *Design of Irrigation Canals and Related Structures*. University of Tehran Press. (in Persian)
- Ansari, S.A., Kothyari, U.C., & Raju, K.G.R. (2003). Influence of cohesion on scour under submerged circular

- vertical jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(12), 1014-1019.
- Balachandar, R., Kells, J. A., & Thiessen, R. J. (2000). The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(1), 138-150.
- Chaudhuri, S., & Debnath, K. (2013). Observations on initiation of pier scour and equilibrium scour hole profiles in cohesive sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 19(1), 27-37.
- Chen, X., Zhang, X., Liu, X., Zhang, F., Yan, J., & Wang, H. (2022). Experimental study of scour characteristics and scour hole dimensions in consolidated silt sediment under a current. *Ocean Engineering*, 266(2), Article 112801.
- 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.
- Debnath, K., & Chaudhuri, S. (2012). Local scour around non-circular piers in clay-sand mixed cohesive sediment beds. *Engineering Geology*, 151, 1-14.
- Dennett, K. E. (1995). Flume studies on the erosion of cohesive sediments. (ناپدید است)
- Dey, S., & Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:3\(246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:3(246))
- Dey, S., & Westrich, B. (2003). Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 44-53.
- 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>
- Elahi, M. (2008). Investigation of scour of cohesive materials downstream of vertical drop spillways (Master's thesis). Aboureyhan Campus, University of Tehran, 115 pages. (in Persian)
- Farhodi, J., & Smith, K.V. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 23(4), 343-358.
- Ghassemi, A., Nasrabadi, M., Omid, M.H., & Raeesi Estabragh, A. (2022a). Effect of synthetic fibers on resisting scour caused by horizontal jet. *Water Science and Engineering*, 15(2), 152-160.
- Ghassemi, A., Nasrabadi, M., Omid, M.H., & Raeesi Estabragh, A. (2022b). Effect of geonet on scour downstream of horizontal jets. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(10), 04022033.
- Hamidifar, H. and Omid, M.H. (2010). Effect of sediment type on scour of cohesive sediments downstream of sliding gates. Proceedings of the 5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. (in Persian)
- Hamidifar, H., Omid, M.H. and Raeesi Estabragh, A. (2009). Effect of sediment concentration on scour caused by submerged horizontal jets. Proceedings of the 8th Iranian Hydraulic Conference. (in Persian)
- Kells, J., Balachandar, R., & Hagel, K. (2001). Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 440-451.
- Kuti, E.O., & Yen, C-L. (1976). Scouring of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, 14(3), 195-206.
- Long, D., Steffler, P. M., & Rajaratnam, N. (1990). LDA study of flow structure in submerged Hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 437-460.
- Mahalder, B., Schwartz, J. S., Palomino, A. M., & Zirkle, J. (2021). Scour hole development in natural cohesive bed sediment around cylinder-shaped piers subjected to varying sequential flow events. *Water*, 13(22), 3289. <https://doi.org/10.3390/w13223289>
- Mazurek, K.A. (2001). Scour of clay by jets. University of Alberta Edmonton, Alberta, Canada. (کتاب یا گزارش)
- Mitchener, H., & Torfs, H. (1996). Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, 29(1-2), 1-25.
- Mostafa, T.S., Imran, J., Chaudhry, M.H., & Kahn, I.B. (2008). Erosion resistance of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, 46(6), 777-787.
- Nishiya, T., Makino, R., & Dang, N.V. (1996). Submerged Jumps at an Abrupt Drop. (مقاله)
- Shayan, H. K., & Farhodi, J. (2015). Local scour profiles downstream of adverse stilling basins. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 22(1), 1.
- Van Ledden, M., Van Kesteren, W., & Winterwerp, J. (2004). A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24(1), 1-11.