

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

## چکیده

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 آبخستگی 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  $(S1) 0.63 \text{ mm}$ ،  $(S2) 1.81 \text{ mm}$  با دانه‌بندی یکنواخت و  $(S3) 1.74 \text{ mm}$  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 آبخستگی به صفر می‌رسد و در عدد فرود ۶ عمق آبخستگی، ارتفاع تلماسه و حجم حفره آبخستگی 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 تأثیر قابل توجهی در ابعاد حفره آبخستگی دارد. نتایج نشان داد که برای دانه‌بندی  $S2$  و عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبخستگی 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.

کلیدواژه‌ها: آبخستگی موضعی، تراکم بستر رسوبی، جت افقی مستغرق، درصد رس.

## 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.

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

## 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 غیر سازه‌ای 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 (Chassemi et al., 2022a, b).

تاکنون روش‌های متعددی برای جلوگیری از خسارات آبشستگی بر سازه‌های هیدرولیکی به کار گرفته شده است. یک راه کار 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 در صد ذرات ریزدانه کم باشد، مقاومت در برابر فرسایش مخلوط ماسه و ذرات ریزدانه اهمیت بیشتری دارد (Kuti and Yen, 1976; Abt and Huff, 1982; Dennet, 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 بی بعد 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 مدت‌زمان تحکیم و نیز اندازه ذره را بر روی نرخ فرسایش رسوبات چسبنده مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از سیلت به‌عنوان ماده چسبنده استفاده کردند. نتایج نشان داد که باگذشت زمان، چگالی خاک افزایش یافته و مقدار افزایش به‌اندازه ذره بستگی دارد. همچنین مقاومت به فرسایش نیز باگذشت زمان بیشتر می‌شد. الهی (۱۳۸۷) آبستگی مصالح چسبنده در پایین‌دست سرریزهای 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 آبستگی کاهش می‌یابد. همچنین وی گزارش کرده است که با افزایش میزان رس، اثر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبستگی نیز کاهش می‌یابد. حمیدی‌فر و همکاران (۱۳۸۸) اثر میزان رس را در ترکیب مصنوعی رسوبات چسبنده ماسه-رس بر آبستگی پایین‌دست دریچه 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 آبستگی 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 آبستگی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها عنوان کردند که به‌ارای درصد رس بالای ۲۰ درصد، رسوبات چسبنده رفتار فرسایشی را کنترل می‌کنند، بطوریکه در درصدهای رس کمتر از ۲۰ درصد، بیشینه طول حفره آبستگی تغییر چندانی نمی‌کند و برای با افزایش درصد رس از ۲۰ درصد، این طول به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین در درصدهای رس بالای ۲۰ درصد احتمال تشکیل تلماسه کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به‌صورت شکنج پس از حفره ظاهر شود. حمیدی‌فر و امید (۱۳۸۹) به بررسی تأثیر اندازه ذره رسوبات غیرچسبنده و نیز نوع رس در ترکیب مصنوعی رسوبات چسبنده ماسه-رس بر آبستگی پایین‌دست دریچه کشویی با کف‌بند صلب ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود ابتدا به بررسی تغییرات ابعاد حفره آبستگی ناشی از افزودن یک نوع رس کائولین با درصدهای وزنی مختلف به ماسه یکنواخت با دو دانه‌بندی مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش اندازه ذرات ماسه به ازای درصد ثابت رس، تمامی ابعاد حفره آبستگی 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 آبستگی غالب شده و در اندازه ذره کمتر، گسترش حفره آبستگی کمتر می‌شود. همچنین با افزایش درصد رس، احتمال تشکیل تلماسه کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین با بررسی تأثیر 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 آبستگی می‌شود. (Debnath and Chaudhuri 2010) به بررسی تأثیر غلظت رسوبات معلق بر آبستگی 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 تأثیر بار معلق بر ابعاد حفره آبستگی اطراف پایه پل قابل توجه بوده و با افزایش غلظت بار معلق، ابعاد حفره آبستگی افزایش می‌یابد؛ ولی این افزایش یک مقدار بحرانی دارد و با افزایش غلظت بار معلق از این مقدار بحرانی میزان ابعاد حفره آبستگی 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 که در ابتدای آزمایش مشاهده می‌شد، توده-توده و ذره-ذره. (Chaudhuri and Debnath 2013) اظهار داشتند که با افزایش نسبت رس، آبستگی موضعی کاهش می‌یابد. با این حال، پس از رسیدن به نسبت رس ۰/۵ درصد، آبستگی موضعی با افزایش بیشتر نسبت رس افزایش می‌یابد. (Mahalder et al. 2021) به بررسی تفاوت‌های بالقوه در توسعه حفره آبستگی 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 آبستگی در ابتدا در امتداد کناره‌های استوانه پیشرفت کرد و حداکثر

<sup>۱</sup>Chunk-by-chunk

<sup>۲</sup>Aggregate-by-aggregate

<sup>۳</sup>Particle-by-particle

عمق نیز در کناره‌ها رخ داد. عمق حفره آبشستگی برای جرم مخصوص خاک بالاتر (بیشتر از  $1/8$  گرم بر سانتی‌مترمکعب) در مقایسه با جرم مخصوص پایین‌تر کمتر بود و نرخ آبشستگی کندتر بود. (Chen et al. (2022 ویژگی‌های آبشستگی اطراف شمع در خاک سیلتی تحکیم‌یافته (CS) در شرایط آب زلال بررسی و با ویژگی‌های آن در سیلت روان و سست مقایسه کردند. آنها آزمایش‌هایی برای مطالعه ابعاد حفره آبشستگی تعادلی در خاک سیلتی تحکیم‌یافته انجام دادند و نتایج نشان داد که عمق و شعاع آبشستگی در خاک سیلتی تحکیم‌یافته کوچک‌تر از سیلت سست است، اما زاویه شیب در سیلت بزرگ‌تر است و عمق آبشستگی با جرم‌مخصوص خشک نسبت معکوس دارد. (Dheyab and Günal (2024 در یک مطالعه آزمایشگاهی از نانورس برای کاهش فرسایش‌پذیری 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 آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل استوانه‌ای تعیین کند. نتایج آنها نشان داد که نانورس با نسبت بهینه  $0.25/0$  درصد برای نسبت کم‌عمقی جریان  $1/4$  و نسبت بهینه  $0.5/0$  درصد برای نسبت کم‌عمقی جریان بین  $1/4$  و  $2$  می‌تواند به‌طور مؤثر برای کاهش عمق آبشستگی موضعی استفاده شود. نکته قابل توجه این است که کاهش قابل توجه تا  $68$  درصد در عمق آبشستگی موضعی در تمام آزمایش‌ها مشاهده شد.

مطالعات پیشین مویده این نکته است که کاربرد رس در ترکیب رسوبات سبب کاهش آبشستگی 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 بر سر 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 غیرچسبنده با دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت به حداکثر جرم‌مخصوص 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 آبشستگی 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 آبشستگی، 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.



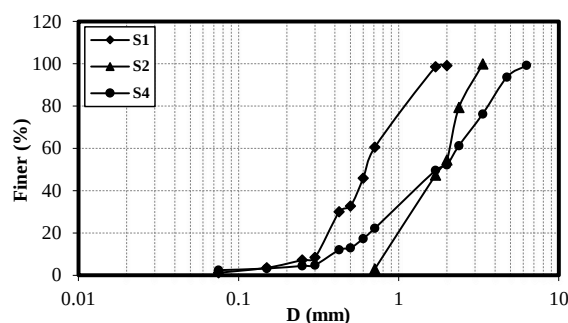
شکل ۱. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق

برای تشکیل پرش هیدرولیکی از دریچه‌ای به ضخامت  $1/6$  سانتی‌متر از جنس دریچه پی‌وی‌سی و با بارشستگی 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. به منظور جلوگیری از تاثیر مستقیم جت مستغرق بر آبشستگی بستر رسوبی و تشکیل پرش هیدرولیکی نوع A به طور 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. باتوجه به رابطه ارائه شده توسط Dey and Sarkar (2006) جهت محاسبه حداکثر عمق آبشستگی و باتوجه به دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده و شرایط هیدرولیکی موردنظر، بیشینه حداکثر عمق آبشستگی  $10$  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 به منظور قابلیت کاربرد برای عدد فرودهای بالا و نیز تغییر طول کف‌بند،  $1$  متر در نظر گرفته شد. به منظور تنظیم مناسب سطح مورد نیاز 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 دبی سنج اولترا سونیک استفاده شده است. به منظور 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 ۱، ۱۴، ۲۶، ۴۰، ۵۳، ۶۶ و ۷۹ سانتی‌متر تقسیم شد. در هر محور ارتفاع بستر در فواصل (x) ۳ سانتی‌متر در جهت طولی با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. به این ترتیب پروفیل سه‌بعدی حفره آبشستگی اندازه‌گیری شد.

### رسوبات مورد استفاده

در این تحقیق از دو نوع ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و یک نوع ماسه با دانه‌بندی غیریکنواخت به عنوان 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.



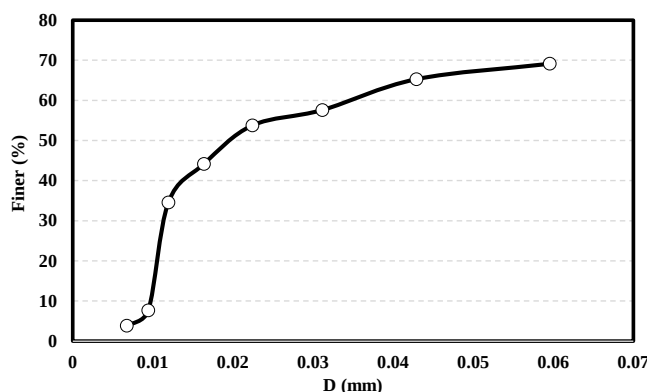
شکل ۲. منحنی دانه‌بندی رسوبات غیرچسبنده مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱. مشخصات کلی رسوبات غیرچسبنده مورد استفاده در آزمایش‌ها

| Sediment Type | D <sub>10</sub> (mm) | D <sub>16</sub> (mm) | D <sub>30</sub> (mm) | D <sub>50</sub> (mm) | D <sub>60</sub> (mm) | D <sub>84</sub> (mm) | D <sub>90</sub> (mm) | σ <sub>g</sub> |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| 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                 | ۰/۵۲                 | 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 مخلوط 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 در صد 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<sub>50</sub>) 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 استاندارد قرار داده شده 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 پرس 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 چسب فلزی و مسطح (همانند کوبنده مورد استفاده در آزمایش تراکم استاندارد) ضرباتی به هر لایه از بستر رسوبی وارد می‌شود تا به حداکثر تراکم موردنظر برسد. برای جلوگیری از آبشستگی قبل از استغراق روی مخزن رسوب با پلکسی گلسی بزرگ‌تر از سطح مخزن پوشانده می‌شود. پس از اطمینان از پایدار شدن شرایط مطلوب در فلوم (ثبیت دبی و عمق پایاب)، صفحه پلکسی گلس از روی مخزن رسوب برداشته و آزمایش‌ها شروع می‌شود. با توجه به اینکه رسیدن به درصد تراکم ۱۰۰ در صد برای رسوبات مورد استفاده (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. در صد وزنی رس مورد استفاده 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 غیرچسبنده موردنظر برداشته و در یک مخزن ترکیب مجزا ریخته می‌شود. سپس باتوجه به درصد وزنی موردنظر رس، وزن رس محاسبه می‌شود و پس از آن به رسوبات درون مخزن ترکیب اضافه و سعی می‌شود به‌طور کامل با آن مخلوط شود و یک مخلوط یکنواخت به دست آید. سپس مخلوط تهیه شده به مخزن قرارگیری رسوبات در فلوم منتقل می‌شود و آزمایش آبشستگی در مدت زمان ۱۲ ساعت انجام می‌شود.

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 Frhudi (2014) آزمایش‌های خود را در مدت زمان ۲۴ ساعت انجام دادند. از طرفی طبق اعلام Balachandrar et al. (2000) حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبنده حتی پس از ۹۶ ساعت نیز به تعادل نمی‌رسد؛ لذا جهت اطمینان از کافی بودن مدت زمان 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  $\pi$ -theorem) انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل مشخصات سیال (جرم مخصوص سیال،  $\rho$  و لزجت دینامیکی،  $\mu$ )، ویژگی‌های جریان (عمق پایاب  $T_w$ ، سرعت جت  $V_1$  یا دبی جریان  $Q$ ، شتاب ثقل  $g$ )، مشخصات کانال (طول کف‌بند  $l$ ، باز شدگی 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  $\rho_s$  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 باز شدگی دریچه ( $b$ )، عرض آبراهه ( $B$ ) در تمام آزمایش‌ها ثابت نگه‌داشته شده است،



لذا از تاثیر این پارامترها به عنوان پارامترهای ثابت آزمایشگاهی می توان صرف نظر نمود. بنابراین رابطه تابعی را می توان به صورت زیر نوشت:

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

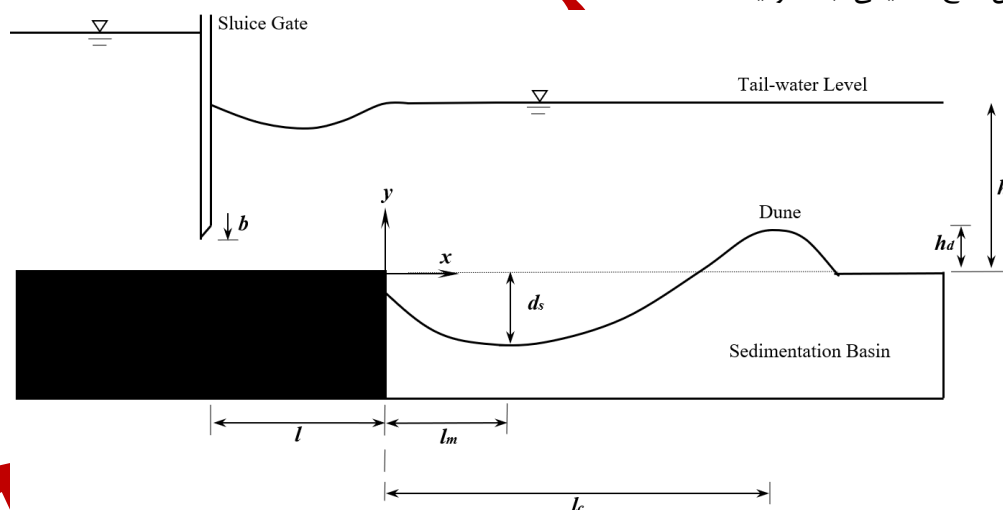
در این رابطه، نسبت  $V_1^2/(gb^2)$  مربع عدد فرود، نسبت  $Vb/v$  عدد رینولدز و  $\Delta$  چگالی نسبی ذرات مستغرق  $(\rho_s - \rho)/\rho$  است. جریان در کانال های باز تقریباً همیشه کاملاً آشفته است؛ بنابراین، وابستگی به عدد رینولدز قابل چشم پوشی است. افزون بر این، رسوبات مورد استفاده در این مطالعه دارای چگالی نسبی ذرات مستغرق ثابت هستند، بنابراین اثر  $\Delta$  در فرمول توسعه یافته در نظر گرفته نمی شود (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 می آید:

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

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

### برنامه انجام آزمایش ها

پس از به تعادل رسیدن حفره آب شستگی و انجام آزمایش های شاهد با دو عدد فرود ۴ و ۶، آزمایش ها با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ در صد رس به ترکیب رسوبات غیرچسبنده نیز انجام شد. در شکل ۵ نیم رخ عمومی حفره آب شستگی و پارامترهای مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به اینکه نیم رخ حفره به صورت سه بعدی بدست می آید اندازه گیری در سرتاسر عرض فلوم آزمایشگاهی در ۷ محور با استفاده از عمق سنج مکانیکی ثبت گردید.



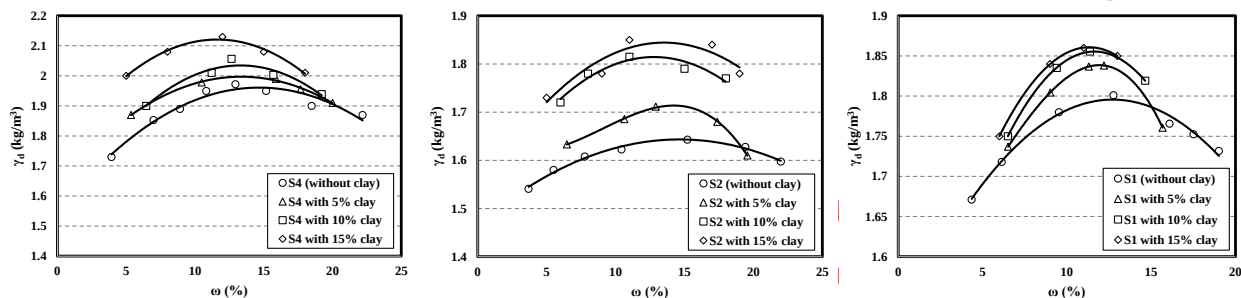
شکل ۵. پارامترهای شاخص حفره آب شستگی پائین دست جت افقی مستغرق

پس از ترسیم نیم رخ سه بعدی حفره آب شستگی، مشخصه های اصلی حفره شامل حداکثر عمق آب شستگی ( $d_s$ )، ارتفاع تلماسه ( $h_d$ )، و حجم کل حفره آب شستگی ( $V_e$ ) محاسبه می شود.

### 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، جرم مخصوص خشک حداکثر ترکیب رسوبات افزایش می‌یابد، به‌دلیل اینکه ذرات رس در فضای خالی بین ذرات ماسه قرار گرفته و موجب کاهش تخلخل و افزایش جرم مخصوص 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 به‌ازای درصدهای مختلف رس

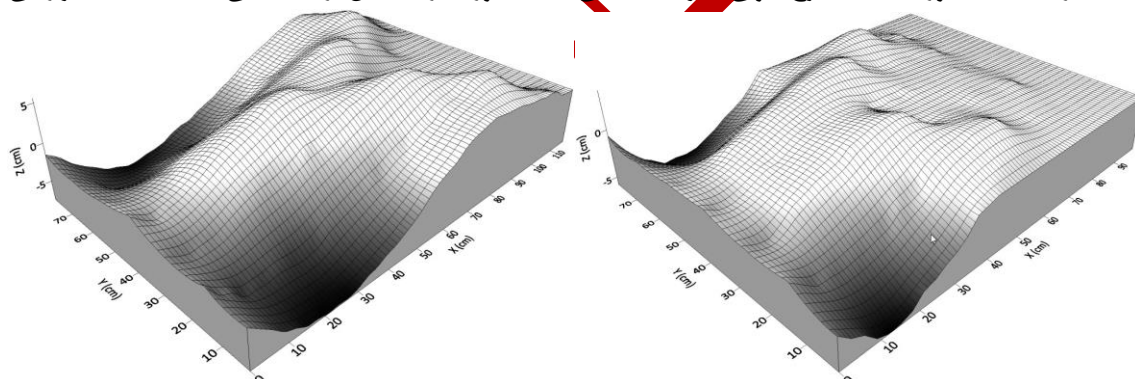
در جدول ۲ نتایج آزمایش تراکم همراه با نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد رس برای دانه‌بندی S1، حد خمیری از ۲۱ به ۲۵ درصد افزایش یافته است. علت این تغییر افزایش جذب سطحی آب توسط ذرات ریز رس است که موجب می‌شود خاک با رطوبت کمتری به حالت خمیری 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 به‌دلیل 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).

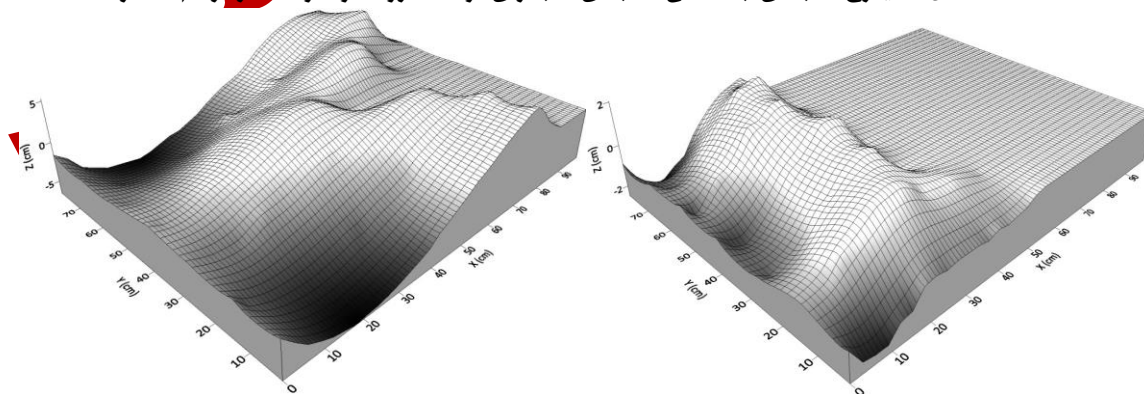
| Sand | Type          | LL (%) | PL (%) | PI (%) | $\omega_{opt}$ | $\gamma_{dmax}$ |
|------|---------------|--------|--------|--------|----------------|-----------------|
| S1   | Without clay  | 27     | 21     | 6      | 13             | 1.79            |
|      | With 5% clay  | 29     | 21     | 6      | 11.8           | 1.83            |
|      | With 10% clay | 29     | 24     | 9      | 11             | 1.82            |
|      | With 15% clay | 30     | 25     | 9      | 10.5           | 1.86            |
| S2   | Without clay  | 19     | 0      | 0      | 14.1           | 1.63            |
|      | With 5% clay  | 19     | 0      | 0      | 13             | 1.71            |
|      | With 10% clay | 21     | 17     | 5      | 12.5           | 1.82            |
|      | With 15% clay | 21     | 19     | 7      | 12.8           | 1.87            |
| S3   | Without clay  | 18     | 0      | 0      | 14.8           | 1.97            |
|      | With 5% clay  | 19.5   | 0      | 0      | 13.3           | 2               |
|      | With 10% clay | 21     | 15     | 2      | 13.2           | 2.05            |
|      | With 15% clay | 21     | 16     | 5      | 12             | 2.13            |

نتایج آزمایش‌های شاهد (حداکثر تراکم بدون افزودن رس)

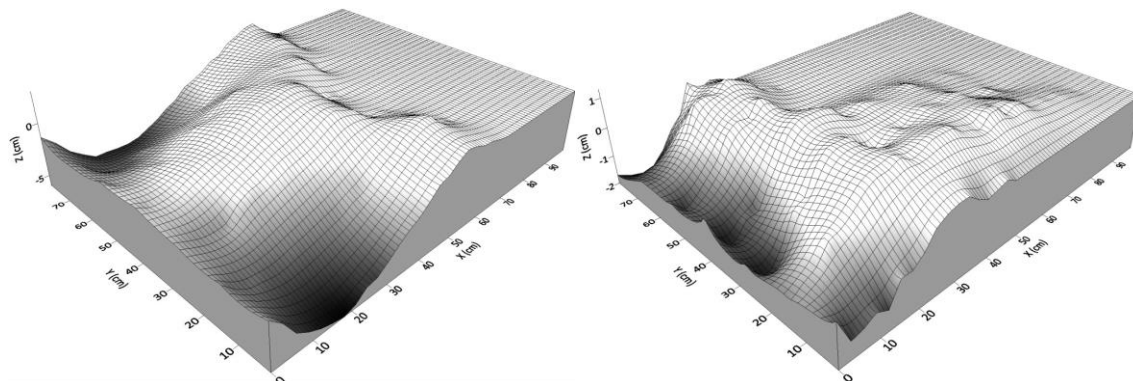
پس از انجام آزمایش تراکم، مشاهده گردید که حداکثر تراکم قابل اجرا برای دانه‌بندی‌های S1، S2 و S3 به ترتیب ۹۵، ۹۰ و ۹۰ درصد است. در شکل‌های ۷ تا ۹ نیمرخ‌های سه‌بعدی حفره آبستگی در شرایط تراکم حداکثر (آزمایش شاهد) برای رسوبات با دانه‌بندی S1، S2 و S3 با دو عدد فرود ۴ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیمرخ‌های شکل گرفته پس از ۱۲ ساعت به صورت کامل سه‌بعدی هستند. نتیجه دیگر بررسی نیمرخ‌های سه‌بعدی حفره آبستگی این است که حداث عمق آبستگی در یک محور عرضی واحد رخ نداده است و با تغییر عدد فرود و همچنین قطر ذرات، موقعیت عرضی رخداد حداکثر عمق آبستگی متغیر است. به‌طوری‌که در برخی آزمایش‌ها حداکثر عمق آبستگی 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 آبستگی 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

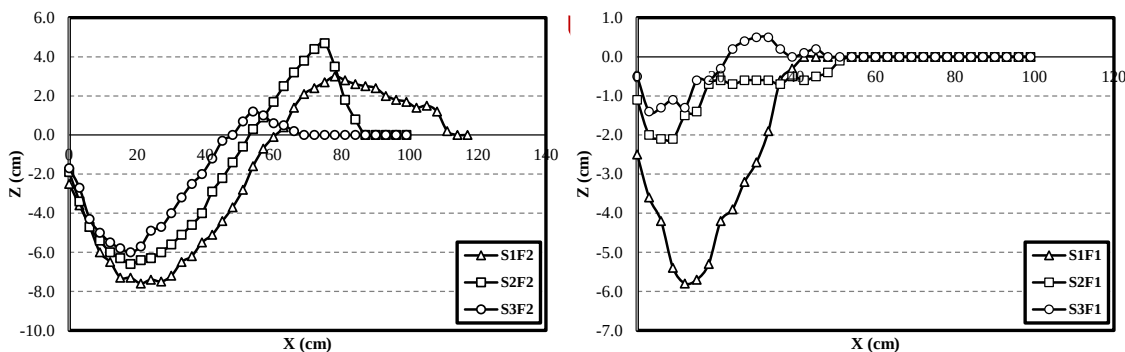


شکل ۸. نیمرخ سه‌بعدی آبستگی دانه‌بندی S2 به‌ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و حداکثر تراکم ۹۵ درصد

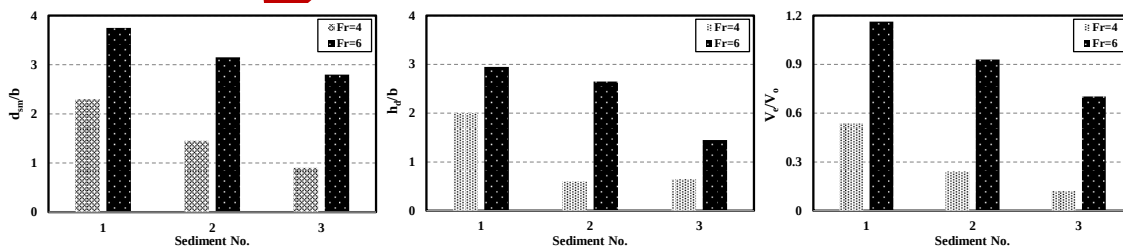


شکل ۹. نیمرخ سه بعدی آبشستگی دانه بندی S3 به ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ و حداکثر تراکم ۹۰ درصد

در شکل ۱۰ نیمرخ طولی حفره آبشستگی در شرایط تراکم حداکثر بستر رسوبی به ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ نشان داده شده است. همچنین به منظور مقایسه مشخصات حفره آبشستگی (شامل: حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبشستگی) در شکل ۱۱ مقادیر  $d_{sm}/b$ ،  $h_d/b$  و  $V_c/V_o$  برای سه دانه بندی مورد نظر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش قطر ذرات و همچنین غیریکخوانی ذرات رسوب، هر سه مشخصه حفره آبشستگی کاهش یافته اند. برای مثال، در عدد فرود حداکثر، عمق آبشستگی بدون بعد از  $3/75$  به  $2/8$ ، ارتفاع بدون بعد تلماسه  $(h_d/b)$  از  $2/95$  به  $1/48$  و میزان آبشستگی حفره  $(V_c/V_o)$  از  $1/16$  به  $0/7$  درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۰. نیمرخ طولی حفره آبشستگی دانه بندی های مختلف به ازای دو عدد فرود ۴ و ۶ در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی

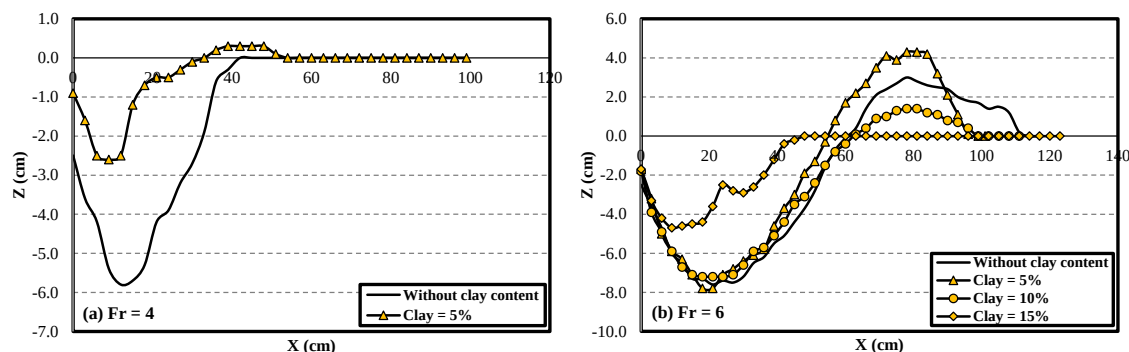


شکل ۱۱. تغییرات حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبشستگی برای هر سه دانه بندی مورد مطالعه

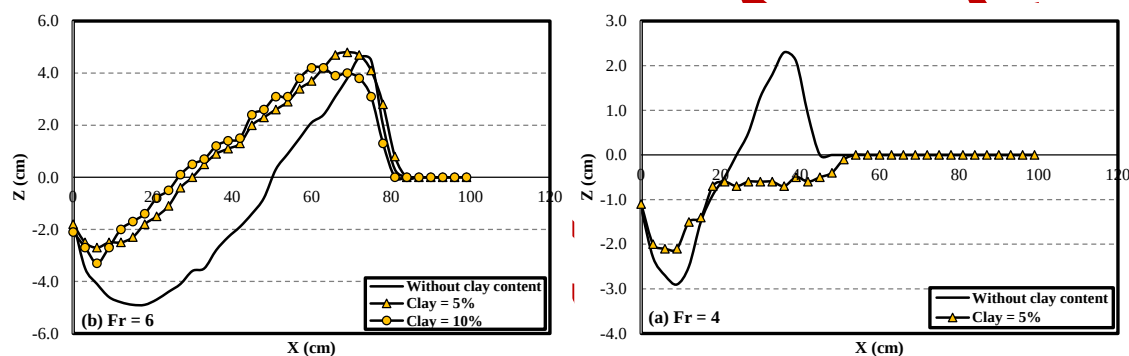
### اثر رس بر مشخصات حفره آبشستگی در تراکم حداکثر

در ادامه برای رسیدن به حداکثر درصد تراکم، از رسوبات چسبنده و افزودن رس در درصدهای مختلف استفاده شده است. به این منظور، درصدهای مختلف رس (۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد) به رسوبات با دانه بندی S1 و S2 و S3 اضافه گردید. پس از انجام آزمایش تراکم پروکتور و دستیابی به رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ازای درصدهای مختلف رس، آزمایش ها طبق روال مشابه با آزمایش های

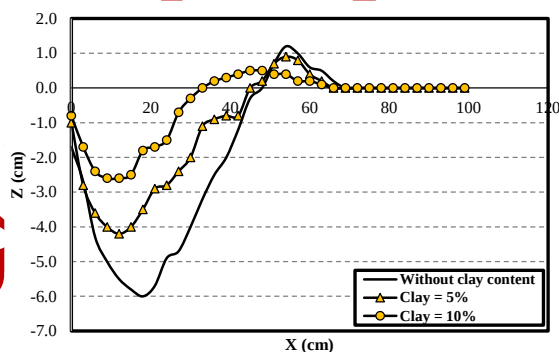
شاهد انجام گردید. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نیمرخ طولی حفره آبستگی در جدار جانبی کانال به‌ازای اعداد فرود ۴ و ۶ برای رسوبات با دانه‌بندی S1 و S2 و S3 و درصد‌های مختلف رس (۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد) ترسیم شده است.



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



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

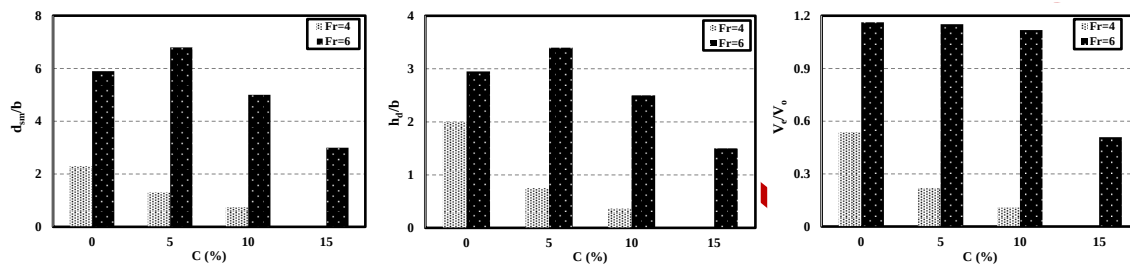


شکل ۱۴. نیمرخ طولی حفره آبستگی دانه‌بندی S3 به‌ازای عدد فرود ۶ به‌ازای درصد‌های مختلف رس

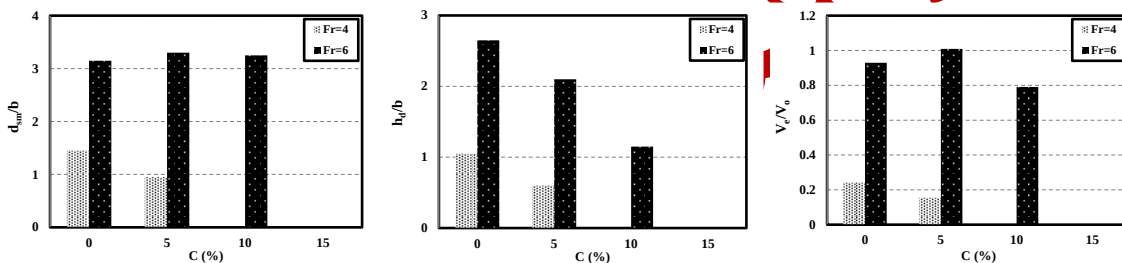
به‌منظور بررسی دقیق میزان تاثیر رس بر مشخصات حفره آبستگی، در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ تغییرات مشخصات حفره شامل حداکثر عمق آبستگی، ارتفاع تلماسه و حجم کل آبستگی (حفره ایجادشده در پائین دست کف‌بند) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای دانه‌بندی S1 و عدد فرود ۴ با افزایش درصد رس، ابعاد حفره آبستگی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبستگی 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 آبستگی قابل‌اندازه‌گیری در بستر رسوبی مشاهده نشد. همچنین برای آزمایش‌ها با عدد فرود ۶ نیز ابعاد حفره آبستگی با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبستگی 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 آبشستگی با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد ۲۰ درصد کاهش یافته است. برای دانه‌بندی S3 در تراکم ۱۰۰ درصد و عدد فرود ۴ هیچ‌گونه آبشستگی قابل اندازه‌گیری در بستر رسوبی مشاهده نشد. برای آزمایش‌ها با عدد فرود ۶ با افزایش درصد رس، ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. به‌طوری که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد رس عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد ۵۷ درصد کاهش یافته است.

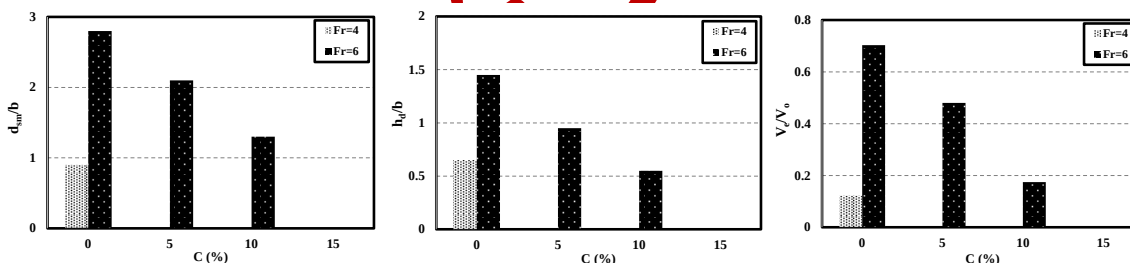
لازم به ذکر است در برخی اعداد فرود و برخی درصد‌های رس، به دلیل تراکم زیاد و مقاومت زیاد بستر رسوبی، هیچ آبشستگی مشاهده نشد و به همین دلیل نیمرخ حفره آبشستگی برای آن آزمایش ترسیم نشده است.



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



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



شکل ۱۷. تغییرات حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم آبشستگی برای دانه‌بندی 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)، Debnath and Chaudhuri (2012) و حمیدی‌فر (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 به‌صورت بار بستر بر روی سطح بستر جابه‌جا شده و



تشکیل فرم‌های بستر نظیر شکنج و تلماسه می‌دهند ولی ذرات ریزدانه به‌صورت بار معلق وارد جریان شده و باعث کدورت آن می‌شوند. در فرسایش توده-توده که بیشتر در درصد بالای رس مشاهده شده‌است، تنش برشی وارده از سوی جت افقی مستغرق سبب ضعیف‌شدن پیوندهای بین ذرات رسوب شده و توده‌های رسوبی با اندازه‌های مختلف را از بستر جدا می‌کند. این توده‌ها به‌طور 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 به‌صورت بار بستر فرم‌های بستر را تشکیل داده و ذرات ریزدانه به‌صورت 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 به‌صورت بار معلق وارد جریان می‌شدند، تلماسه ایجاد شده به‌طور 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 دانه‌بندی S1 و درصد رس ۱۵ درصد پس از اتمام آزمایش

با توجه به اینکه رسوبات S2 و S3 دارای قطر متوسط یکسان ولی دانه‌بندی متفاوتی هستند، می‌توان تأثیر یکنواختی و غیریکنواختی دانه‌بندی را نیز بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای یک قطر متوسط یکسان، تراکم بستر رسوبی در دانه‌بندی 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 دانه‌بندی یکنواخت عنوان کرد.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر رس بر مشخصات حفره آبشستگی پائین دست جت افقی مستغرق و در شرایط حداکثر تراکم بستر رسوبی بررسی گردید. نتایج آزمایش‌ها به‌طور خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

با افزایش قطر ذرات و همچنین غیریکنواختی ذرات رسوب، هر سه مشخصه حفره آبشستگی کاهش یافته‌اند. برای مثال، در عدد فرود حداکثر، عمق آبشستگی 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 آبشستگی حفره ( $V_0/V_0$ ) از  $1/16$  به  $0/7$  درصد کاهش یافته است.

✓ با افزودن ۱۵ درصد رس شکل حفره آبشستگی به‌طور کلی تغییرات قابل توجهی می‌کند، به‌طوری‌که در عدد فرود ۴ ابعاد حفره آبشستگی با ریزترین دانه‌بندی (S1) به صفر می‌رسد و در عدد فرود ۶ عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه و حجم حفره آبشستگی به ترتیب به‌میزان ۳۷ درصد،  $50/8$  درصد و  $56/25$  درصد کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در تراکم ۱۰۰ درصد و به‌ازای ۵ درصد

رس عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد (با تراکم معمولی) ۵۹ درصد کاهش یافته است. نکته جالب توجه این است با توجه به اینکه رسوبات S2 و S3 دارای قطر متوسط یکسان (۱/۸ و ۱/۲۴) ولی توزیع دانه‌بندی متفاوتی هستند، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که یکنواختی و غیریکنواختی ذرات در شرایط حداکثر تراکم تأثیر قابل‌توجهی 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.

✓ در محدوده شرایط آزمایشگاهی این تحقیق (رسوبات با قطر کمتر از حدود ۲ میلی‌متر 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 به‌خوبی صورت می‌گیرد. البته هر نوع رسوب چسبنده رفتار خاص خود را دارد که در انجام تحقیقات آینده باید مدنظر قرار گیرد.

✓ بنابراین، خاک رس به‌عنوان یک راهکار کم‌هزینه، مؤثر و دوست‌دار محیط‌زیست، با افزایش چسبندگی و تثبیت بستر رسوبی، نقش کلیدی در افزایش مقاومت بستر و همچنین کاهش ابعاد حفره آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند و می‌تواند به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های سنتی کنترل آبشستگی مورد استفاده قرار گیرد.

✓ از جمله محدودیت‌های 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 می‌شوند که می‌تواند بر چسبندگی و مقاومت خاک تأثیر بگذارد. همچنین در مناطق سردسیر، یخ‌زدگی و ذوب شدن خاک می‌تواند ساختار آن را تضعیف کند. از سوی دیگر، میزان و نوع رسوبات معلق در سیلاب‌ها و همچنین انرژی و مدت زمان سیلاب می‌تواند پایداری بستر را تحت تأثیر قرار دهد. از همه مهم‌تر، با گذشت زمان، ممکن است بستر رسوبی تحت تأثیر وزن خاک و آب به تحکیم بیشتری برسد که می‌تواند مقاومت آن را افزایش دهد.

### "هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### فهرست منابع

- امیری تکلدانی، ابراهیم. و سیاہی، محمدکاظم (۱۳۸۷)، طراحی کانال‌های آبیاری و سازه‌های وابسته، انتشارات دانشگاه تهران.
- حمیدی‌فر، حسین و امید، محمدحسین (۱۳۸۹). اثر نوع رس بر آبشستگی رسوبات چسبنده در پایین دست دریچه کشویی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد
- حمیدی‌فر، حسین، امید، محمدحسین و رئیس‌آسی استبرق، علی (۱۳۸۸). تأثیر میزان رس بر آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران
- الهی، مسیح (۱۳۸۷). بررسی آبشستگی مصالح چسبنده در پایین‌دست سرریزهای قائم. پایان‌نامه 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., Kothiyari, 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. (نابذید 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)
- Farhoudi, 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., & Farhoudi, 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.

## Extended Abstract

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

#### 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.

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

#### **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**

#### **Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

فیلد استادی