

آبشستگی رسوبهای چسبنده در پایین دست کف بند بر اثر جت افقی مستغرق

حسین حمیدی فر^۱، محمدحسین امید^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

* کرج، خیابان دانشکده، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

momid@ut.ac.ir

چکیده- با وجود آن که تعداد عوامل مؤثر بر پدیده آبشستگی موضعی در پایین دست سازه‌های آبی زیاد است، بیشتر پژوهشها در این زمینه بدون در نظر گرفتن تأثیر بسیاری از پارامترها از جمله چسبندگی خاک انجام شده است. در این تحقیق، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی و برای هفت ترکیب مختلف خاک با درصد‌های رس برابر ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد، اثر درصد رس بر آبشستگی موضعی بستر در پایین دست کف بند صلب در شرایط مختلف هیدرولیکی مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که درصد رس به صورت چشمگیری بر میزان آبشستگی اثر می‌گذارد، به گونه‌ای که در آزمایش‌های با رسوب حاوی ۴۰٪ رس، عمق آبشستگی نسبت به رسوبهای غیرچسبنده تا ۸۰٪ کاهش می‌یابد. با استفاده از تحلیل ابعادی، پارامتر بدون بعد جدیدی - که دربرگیرنده تأثیر پارامترهای هیدرولیکی (عدد فرود ذره) و مکانیکی (میزان رس) - معرفی شده است. با تحلیل داده‌های به دست آمده، مقداری بحرانی برای این پارامتر بدون بعد به دست آمد که برای مقادیر کمتر از آن هیچ فرسایشی رخ نمی‌دهد. بر این اساس، روابط و نمودارهای جدیدی برای محاسبه پارامترهای مشخصه حفره آبشستگی در خاک‌های چسبنده، شامل حداکثر عمق آبشستگی، حداکثر گسترش حفره و ارتفاع دیون ارائه شده است.

کلید واژگان: آبشستگی، رسوبهای چسبنده، درصد رس، تحلیل ابعادی، حوضچه آرامش.

۱- مقدمه

حفره آبشستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی یکی از موضوعات مهم در مهندسی هیدرولیک است. به همین دلیل، پژوهشگران جنبه‌های مختلف این پدیده پویا را مطالعه کرده‌اند.

جریان خروجی سازه‌های هیدرولیکی معمولاً انرژی زیادی داشته و توانایی بالایی در تخریب بستر فرسایش‌پذیر پایین دست دارد. پیش‌بینی شکل و ابعاد

نوع کانی رس، خواص شیمیایی سیال منفذی و سیال فرسایش دهنده، چگالی خاک و دما نیز بر این فرآیند اثر می‌گذارد. (Mitchener and Torfs, 1996; Zreik et al., 1998; Partheniades, 2007)

Kuti and Yen (1976) تأثیر نسبت تخلخل بر تغییرات زمانی حجم آبشستگی را مطالعه و مشاهده کردند که در ابتدا، نرخ تغییرات آبشستگی بسیار زیاد بوده و به تدریج کاهش می‌یابد تا به شرایط تعادلی برسد. Abt and Ruff (1982) آزمایشهایی را روی نوعی خاک چسبنده با ۵۸٪ ماسه، ۲۸٪ رس، ۱۴٪ سیلت و ۱٪ ماده آلی در انتهای نوعی کالورت دایره‌ای انجام دادند و مشاهده کردند که حتی پس از گذشت ۱۰۰۰ دقیقه، حفره آبشستگی به تعادل نمی‌رسد. آنان پروفیل‌های بی‌بعد حفره آبشستگی را ترسیم و پراکندگی قابل توجهی را در آن مشاهده کردند.

آزمایشهای Mitchener and Torfs (1996) نشان داد که افزودن ماسه به خاک چسبنده یا به‌عکس، مقاومت در برابر فرسایش را افزایش و نرخ فرسایش را کاهش می‌دهد: افزودن ۳۰٪ خاک چسبنده به ماسه می‌تواند تنش برشی بحرانی را تا ده برابر افزایش دهد. Panagiotopoulos et al. (1997) به بررسی تأثیر درصد رس بر آستانه حرکت ماسه ریزدانه پرداختند و گزارش کرده‌اند که اگر میزان مصالح چسبنده از ۳۰ درصد بیشتر شود، افزایش قابل توجهی در میزان تنش برشی بحرانی رخ می‌دهد.

Mazurek (2001) با بررسی آزمایشگاهی آبشستگی نوعی خاک با ۴۰٪ رس، ۵۳٪ لای و ۷٪ ماسه ریز، نتیجه گرفت که پس از حدود ۱۰۰ ساعت، حفره تقریباً به وضعیت تعادلی می‌رسد و به‌جز در لحظه شروع و پایان آزمایشها، رابطه‌ای خطی میان توسعه ابعاد مختلف حفره و لگاریتم زمان وجود دارد. همچنین وی گزارش کرده است که اگرچه جت افقی مورد استفاده نوعی جت دو-بعدی بوده،

علی‌رغم پیشرفت‌هایی که حاصل شده، هنوز نمونه‌هایی از تخریب و شکست بر اثر آبشستگی در نزدیکی سازه‌هایی مانند حوضچه‌های آرامش، سرریزها، شیب‌شکن‌ها و دریچه‌ها دیده می‌شود. اگرچه تحقیقات بسیاری در زمینه آبشستگی بستر در رسوبهای غیرچسبنده، توسط Laursen (1952), Rajaratnam and Berry (1977), Farhoudi and Smith (1985), Nik Hassan and Narayanan (1985), Balachandar et al. (2000), Dargahi (2003), Dey and Sarkar (2006), موسوی خندان (۱۳۷۹) و گلدی و قدسیان (۱۳۸۷) انجام شده است، اما به علت طبیعت پیچیده رس، آبشستگی رسوبهای چسبنده چندان مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالیست که بر طبق برخی پژوهشهای صورت گرفته، نرخ آبشستگی در خاکهای چسبنده می‌تواند تا ۱۰۰۰ برابر کمتر از خاکهای بدون چسبندگی باشد (Partheniades, 2007).

در گذشته، محاسبات آبشستگی در خاکهای چسبنده بر اساس روشهایی که برای خاکهای غیرچسبنده توسعه داده شده صورت می‌گرفت. اگرچه این کار ضریب اطمینان بسیار بالایی را ایجاد می‌کند، اما از دید اقتصادی، تحمیل هزینه بسیار زیادی را سبب می‌شود.

مطالعات بسیاری نشان داده است که افزایش درصد رس در خاک، به‌دلیل افزایش نیروهای بین‌ذره‌ای درون خاک، باعث افزایش تنش برشی بحرانی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌شود (Kuti and Yen, 1976; Kho et al., 2004; Jain and Kothiyari, 2008). تحقیقات Mitchener and Torfs (1996) نشان داده است که افزایش چگالی خاک باعث افزایش تنش برشی بحرانی می‌شود. این افزایش مقاومت در برابر فرسایش، به‌دلیل کاهش فاصله بین ذرات و افزایش تماس بین آنها و در نتیجه تقویت پیوندهای بین ذره‌ای ایجاد می‌شود. البته

باعث شده که مطالعه جامع و منسجمی بر روی تمامی عوامل انجام نشود و در نتیجه نتوان مشخص کرد که کدام عامل یا عوامل تأثیر بیشتری بر این فرآیند دارند. این باعث می‌شود که مقایسه تحقیقات مختلف نیز مشکل شود. همچنین باید توجه داشت که پدیده آبستگي، اغلب بر اثر عبور جریان یک جت سیال متلاطم اتفاق می‌افتد که خصوصیات آن نیز هنوز به طور کامل شناخته نشده است. در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از نوعی مدل آزمایشگاهی، تأثیر میزان رس و عوامل هیدرولیکی مختلفی مانند عدد فرود جریان ورودی بر آبستگي رسوبهای چسبنده در پایین دست پرش هیدرولیکی مطالعه شود.

۲- مواد و روشها

در مجموع ۲۸ آزمایش با هفت درصد مقدار رس برابر ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی (نسبت وزن رس به وزن مصالح غیرچسبنده) در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شد. بدین منظور از فلوم مستطیلی با طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شد که جنس دیواره و کف آن از پلاستیک فشرده بود. در این سیستم، جریان آب از طریق سامانه‌ای مدار بسته به مخزن آرام‌کننده‌ای در ابتدای کانال وارد می‌شود و پس از عبور از سرریز لبه تیز مستطیلی و اسنجی شده و بدون فشردگی جانبی - که شدت جریان به وسیله آن اندازه‌گیری می‌شود - به تبدیل همگراکننده وارد می‌شود. در ابتدای فلوم، دریچه‌ای کشویی قرار دارد که جت آب خروجی از آن با تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق بر روی کف بند صلبی به طول ۱/۰ متر توسعه می‌یابد. بازشدگی دریچه در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. طرحواره‌ای از مدل آزمایشگاهی در شکل ۱

اما حفره ایجاد شده، سه-بعدی بوده و در عرض کانال یکنواخت نیست. وی پروفیل‌های آبستگي در رسوبهای چسبنده را به چهار نوع تقسیم‌بندی و رابطه‌ای از نوع چندجمله‌ای درجه پنج را برای پیش‌بینی پروفیل نوع یک ارائه کرد. (Dey and Westrich (2003) آزمایشهایی را روی نوعی رسوب چسبنده با ۴۸/۸ درصد رس انجام داده و رابطه‌ای را برای تعیین تغییرات عمق آبستگي نسبت به زمان ارائه کردند. آنها گزارش کرده‌اند که هر نوع رسوب چسبنده، رفتار خاص خود را داشته و باید آزمایشهایی با رسوبهای مختلف و درصدهای مختلف رس انجام شود. (Ansari et al. (2003 به بررسی تأثیر چسبندگی بر آبستگي ناشی از جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق پرداختند و رابطه‌ای را به صورت زیر ارائه کردند که نشان می‌دهد حداکثر عمق آبستگي در رسوبهای چسبنده، بیشتر از رسوبهای غیرچسبنده است:

$$\frac{d_{smc}}{d_{sms}} \cong 1.5 \pm 0.3 \quad (1)$$

در این رابطه، d_{smc} و d_{sms} به ترتیب حداکثر عمق آبستگي در رسوبهای چسبنده و غیرچسبنده است. با توجه به این مطالب می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت رسوبهای چسبنده در برابر فرسایش، فرآیندی بسیار پیچیده بوده و با وجود مطالعات انجام شده و نتایج حاصل، کمی‌سازی تمامی عوامل مؤثر بر این پدیده تاکنون میسر نشده و میزان تأثیرپذیری رسوبهای چسبنده از این عوامل در شرایط مختلف، چندان مورد توجه قرار نگرفته و حتی در مواردی، با وجود شرایط یکسان در انجام آزمایشها، نتایج متناقضی به دست آمده است.

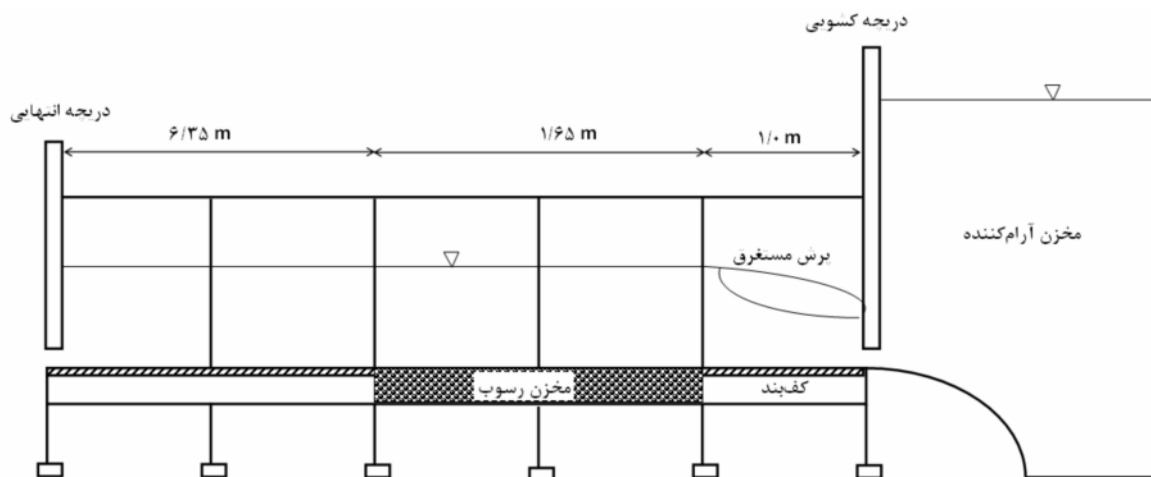
واکنش رسوبهای چسبنده در برابر آبستگي ناشی از جریان عبوری، تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد. بر همین اساس بسیاری از محققان، پژوهشهای خود را به یک یا تعداد کمی از عوامل مؤثر معطوف کرده‌اند. این

تا توزیع یکنواخت رطوبت در نمونه حاصل شود. سپس ترکیب آماده شده به درون مخزن رسوب فلوم منتقل و سطح آن صاف می‌شد. در ادامه، بستر به مدت ۱۲ ساعت به صورت مستغرق باقی می‌ماند. به منظور پیشگیری از هرگونه آبشستگی ناخواسته در آغاز آزمایش، سطح رسوبها توسط صفحه پلاستیک فشرده‌ای پوشانده و پس از تنظیم دقیق دبی و عمق پایاب، این صفحه به آرامی از انتهای رسوبها خارج می‌شد.

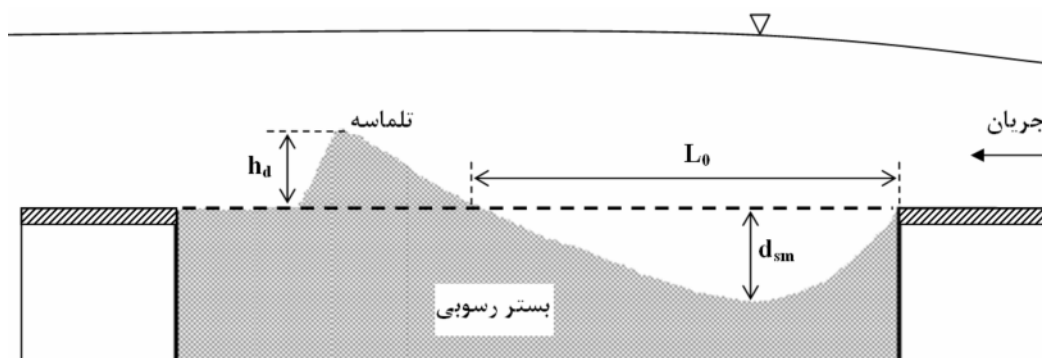
برای اطمینان از ثابت بودن پارامترهایی مانند دما، هدایت الکتریکی (EC)، pH و میزان رطوبت بستر و تأثیر نگذاشتن این پارامترها بر نتایج آزمایش‌ها، نمونه‌گیری دو بار در آغاز و پایان آزمایش انجام می‌شد. در پایان هر آزمایش، پروفیل نهایی در خط مرکزی کانال توسط دستگاه عمق‌سنج با دقت $\pm 0.1 \text{ mm}$ برداشت و بر اساس آن، پارامترهای مشخصه حفره آبشستگی شامل حداکثر عمق آبشستگی (d_{sm})، حداکثر گسترش طولی حفره آبشستگی (L_0)، حداکثر ارتفاع تلماسه (h_d) که در شکل ۲ نشان داده شده برداشت می‌شد.

نشان داده شده است. در انتهای کف‌بند، مخزنی به عمق ۰/۲ متر و طول ۱/۶۵ متر که هم‌عرض کانال است تعبیه شده که نمونه‌های رسوب مورد آزمایش پس از آماده‌سازی درون آن قرار می‌گرفت. عمق پایاب توسط دریچه‌ای کشویی در انتهای فلوم تنظیم می‌شد. مقدار عمق پایاب، ده برابر بازشدگی دریچه در نظر گرفته شد. بنابراین تمامی آزمایشها در شرایط جت کاملاً مستغرق انجام شد. رسوبهای غیرچسبنده مورد استفاده شامل ماسه با دانه‌بندی یکنواخت از جنس کوارتز با اندازه متوسط ۰/۷۳ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ۱/۱۲ بود که برای ایجاد چسبندگی، مقادیر موردنظر رس کائولین - که نوعی رس صنعتی است - به آن افزوده شده بود.

به‌منظور تهیه نمونه‌ای از رسوبهای چسبنده، پس از وزن‌کشی دقیق مقدار محاسبه شده رس و ماسه خشک، این مواد به‌خوبی مخلوط شدند. سپس مقدار مشخصی آب به آن افزوده می‌شد، به‌گونه‌ای که درصد رطوبت ترکیب حاصل در تمامی نمونه‌ها تقریباً یکسان باشد. بار دیگر رسوبها کاملاً مخلوط شده و ترکیب به‌دست آمده به مدت ۱۲ ساعت در ظرف دربسته‌ای نگهداری می‌شد.



شکل ۱ طرحواره‌ای از مجموعه آزمایشگاهی (مقیاس واقعی نیست)



شکل ۲ طرحواره‌ای از حفره آبستگي و پارامترهای مشخصه آن

$$\frac{d_{sm}}{y_1}, \frac{L_0}{y_1}, \frac{h_d}{y_1} = f_2(\chi) \quad (3)$$

که در آن $\chi = F_0/C_c$ پارامتر بدون بعد جدیدی است که دربرگیرنده پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی ذکر شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات زمانی آبستگي

برای تعیین شرایط تعادلی حفره آبستگي، آزمایشی طولانی به مدت ۴۸ ساعت انجام و روند تغییر حداکثر عمق آبستگي (d_{sm}) در شکل ۳ ترسیم شد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، حتی پس از ۴۸ ساعت نیز ابعاد حفره آبستگي به شرایط تعادل کامل نمی‌رسد، اما در پایان ۱۲ ساعت اول، نرخ تغییر حداکثر عمق آبستگي به کمتر از ۰/۶ میلی‌متر بر ساعت می‌رسد. بنابراین مدت زمان ۱۲ ساعت به‌عنوان زمان رسیدن سیستم به تعادل نسبی در نظر گرفته شد.

۳-۲- حداکثر عمق آبستگي

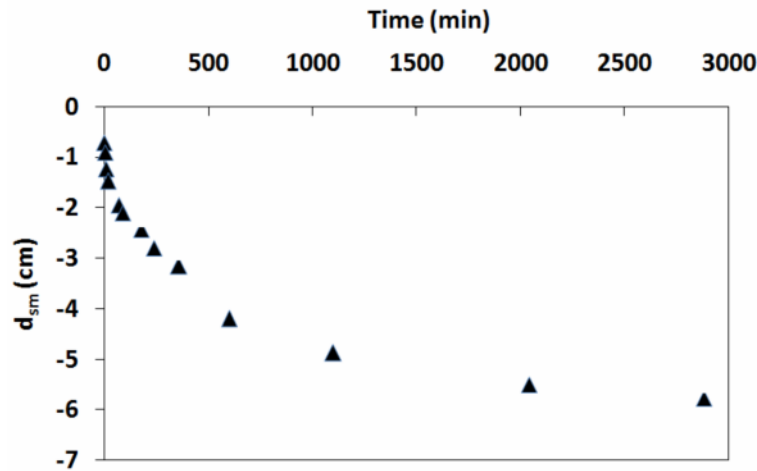
یکی از مهمترین پارامترهای مشخصه حفره آبستگي، حداکثر عمق آبستگي است.

با انجام تحلیل ابعادی با استفاده از نظریهٔ باکینگهام و با ثابت در نظر گرفتن پارامترهایی مانند عرض کانال، طول کف‌بند، زبری کف‌بند و جداره، شیب کف کانال، عمق پایاب، دما، میزان رطوبت، pH، هدایت الکتریکی، رابطه بین طولهای مشخصه گودال آبستگي و میزان رس می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{d_{sm}}{y_1}, \frac{L_0}{y_1}, \frac{h_d}{y_1} = f_1(Re, n, C_c, F_0) \quad (2)$$

که در آن، y_1 بازشدگی دریچه، h_d ارتفاع تلماسه، Re عدد رینولدز جت ورودی، n تخلخل، $F_0 = U_0 / \sqrt{gd_{50}(\rho_s / \rho_w - 1)}$ عدد فرود ذره، C_c میزان رس، U_0 سرعت جت ورودی، g شتاب ثقل، d_{50} اندازه متوسط و ρ_s جرم مخصوص رسوبهای غیرچسبنده و ρ_w جرم مخصوص آب است.

با توجه به این‌که عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ بیشتر است از تأثیر لزجت و عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. همچنین اندازه‌گیری میزان تخلخل خاک نشان داد که در محدوده درصد رس استفاده شده در این تحقیق ($C_c < 40\%$)، تخلخل خاک در محدوده ۰/۳۱ تا ۰/۲۵ تغییر می‌کند که می‌توان آنرا ناچیز فرض کرد. بنابراین رابطه (۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود:



شکل ۳ تغییرات حداکثر عمق آبشستگی با گذشت زمان

آبشستگی تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. البته با افزایش عدد فرود ذره، افزودن مقدار کمی رس چندان تأثیرگذار نخواهد بود.

۲- حالت دوم ($Cc=15\%$): در این حالت که درصد رس ۱۵ درصد است، تأثیر چسبندگی نسبت به حالت قبل کمتر می‌شود، به گونه‌ای که حتی در بعضی از آزمایشها، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به رسوبهای غیرچسبنده هم بیشتر است.

۳- حالت سوم ($Cc=20\%$): در این حالت، درصد رس برابر ۲۰ درصد بوده و تأثیر چسبندگی به عدد فرود ذره بستگی دارد. بدین صورت که برای عدد فرود ذره برابر ۷/۸، ۱۵/۷ و ۱۷/۸، با افزایش درصد رس، آبشستگی کاهش می‌یابد اما برای عدد فرود ذره برابر ۱۱/۴، با افزایش درصد رس، حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

۴- حالت چهارم ($Cc=20-40\%$): در این ناحیه که مقدار رس بین ۲۰ تا ۴۰ درصد است، به‌ازای تمامی مقادیر عدد فرود ذره، با افزایش درصد رس، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این ناحیه آن است که

این پارامتر بر کنترل گرادیان جریان نشستی از زیر سازه‌های هیدرولیکی بسیار تأثیرگذار است. تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بر حسب درصد رس و برای مقادیر مختلف عدد فرود ذره، در شکل ۴ آورده شده است. در این نمودار درصد رس برابر صفر، نشان‌دهنده رسوبهای غیرچسبنده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، تا درصد رس برابر ۲۰ درصد، اضافه شدن رس تأثیر چندان بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد. حتی در برخی موارد اضافه کردن این درصد رس، به افزایش d_{sm} منجر می‌شود. برای درک بهتر تأثیر میزان رس بر حداکثر عمق آبشستگی، درصد کاهش پارامتر d_{sm} بر اثر افزودن رس در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به این نمودار، تأثیر افزودن رس به ماسه به‌منظور کاهش آبشستگی را می‌توان به چهار حالت تقسیم کرد:

۱- حالت اول ($Cc=0\%, 10\%$): در این حالت که درصد رس کم است، افزودن هر مقداری از رس به خاک، باعث افزایش جزئی در مقاومت خاک در برابر فرسایش و در نتیجه کاهش میزان آبشستگی خواهد شد، به گونه‌ای که برای مقادیر کوچک عدد فرود ذره، حداکثر عمق

همچنین با بررسی تغییرات حداکثر عمق آبستگي در مقابل χ در شکل ۷ مشخص می‌شود که تغییرات d_{sm}/y_1 بر حسب χ از روندی خطی پیروی می‌کند که به شکل زیر است:

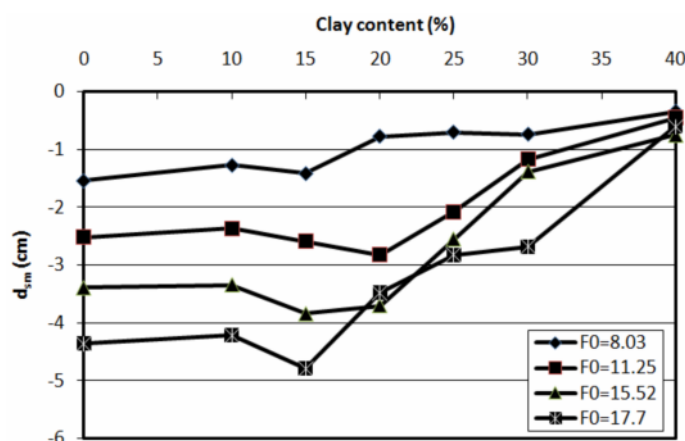
$$\frac{d_{sm}}{y_1} = 0.023\chi - 0.353 \quad (۴)$$

نکته بسیار مهم در این نمودار آن است که می‌توان مقداری بحرانی از χ را به صورت χ_c در نظر گرفت که به‌ازای آن، پارامتر d_{sm}/y_1 برابر صفر شود یا به بیانی دیگر هیچ‌گونه فرسایشی اتفاق نیافتد. بر این اساس داریم:

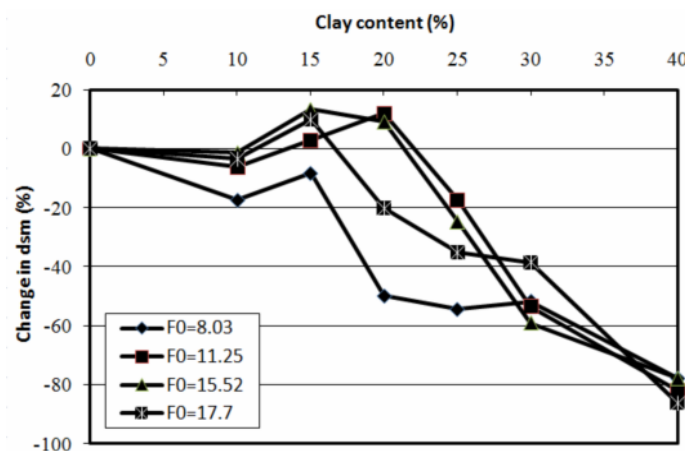
$$\frac{d_{sm}}{y_1} = 0.0 \longrightarrow \chi_c = 15.4 \quad (۵)$$

به‌ازای درصد رس برابر ۴۰٪، حداکثر عمق آبستگي چندان تحت تأثیر عدد فرود ذره نیست.

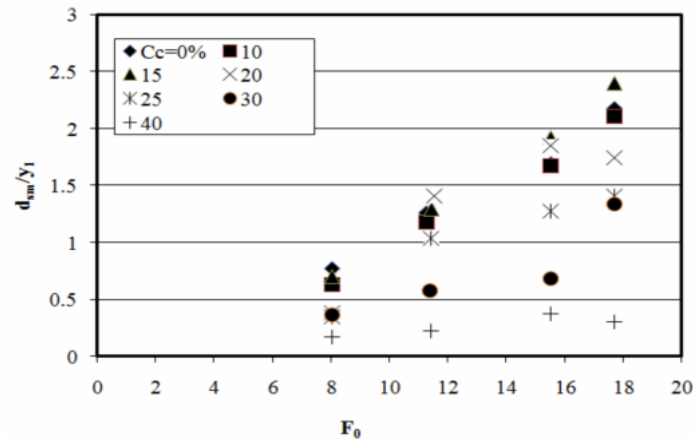
چهار وضعیت بالا در شکل ۵ به‌خوبی قابل تشخیص است. نکته دیگری که از این نمودار دریافت می‌شود آن است که اگر چه حداکثر عمق آبستگي به عدد فرود ذره بستگی دارد (شکل ۶) اما به‌ازای درصد رس بیشتر از ۳۰، میزان کاهش آبستگي مستقل از عدد فرود است، به‌گونه‌ای که برای ۴۰ درصد رس، به‌ازای تمامی اعداد فرود، پارامتر d_{sm} حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد که دستاوردی بسیار قابل‌توجه است.



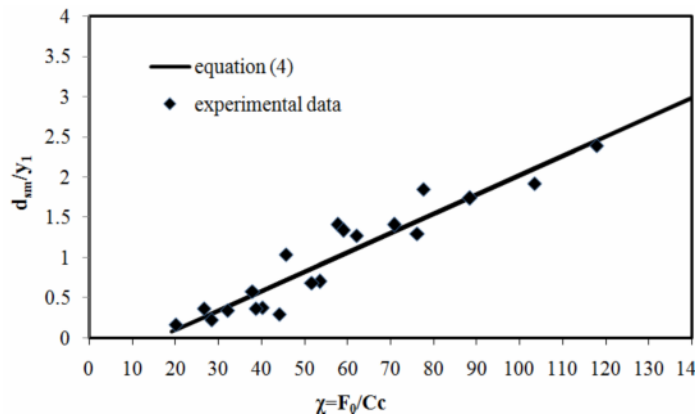
شکل ۴ تغییرات حداکثر عمق آبستگي در برابر درصد رس به‌ازای مقادیر مختلف فرود ذره



شکل ۵ درصد تغییرات d_{sm} نسبت به رسوبهای غیرچسبنده برای مقادیر مختلف درصد رس



شکل ۶ تغییرات عمق آبشستگی بدون بعد در برابر عدد فرود ذره

شکل ۷ تغییرات d_{sm}/y_1 برحسب پارامتر χ

طولی حفره است که نشان دهنده مکانی است که حفره آبشستگی به تراز اولیه بستر برخورد می‌کند. پیش‌بینی تقریبی این طول مشخصه، در انتخاب طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد به طراحان کمک می‌کند. تغییرات پارامتر بدون بعد L_0/y_1 در برابر $(\chi - \chi_c)/\chi_c$ برای رسوبهای چسبنده در شکل ۹ آورده شده که نشان می‌دهد روندی صعودی دارد. رابطه زیر از برازش تابع نمایی بر داده‌های به دست آمده حاصل می‌شود و از آن می‌توان برای محاسبه حداکثر گسترش طولی حفره آبشستگی در خاک‌های چسبنده استفاده کرد:

تغییرات d_{sm}/y_1 بر حسب پارامتر بدون بعد $(\chi - \chi_c)/\chi_c$ در شکل ۸ آورده شده است. بر این اساس می‌توان از رابطه (۶) برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در خاک‌های چسبنده تحت شرایط مختلف هیدرولیکی (عدد فرود ذره) و مکانیکی (درصد رس) استفاده کرد:

$$\frac{d_{sm}}{y_1} = 0.0484 \left(\frac{\chi - \chi_c}{\chi_c} \right)^{0.651}, R^2 = 0.85, RMSE = 0.37 \quad (6)$$

۳-۲- حداکثر گسترش طولی حفره

یکی دیگر از پارامترهای آبشستگی، حداکثر گسترش

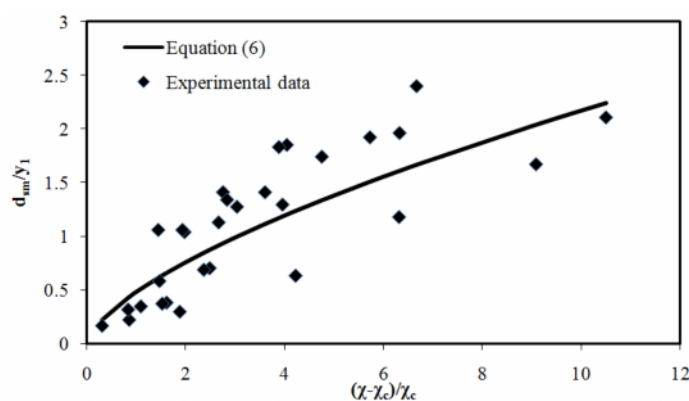
هیچگونه تلماسه‌ای تشکیل نمی‌شود. از آنجا که حضور تلماسه بر ساختار جریان در حفره آبشستگی و در نتیجه بر سازوکار آبشستگی تأثیر می‌گذارد، در این قسمت تغییرات ارتفاع تلماسه مطالعه می‌شود.

با افزایش نسبت رس، احتمال تشکیل تلماسه کاهش می‌یابد، زیرا به طور کلی هرچه نسبت رس موجود در ترکیب خاک افزایش یابد، توسعه حفره آبشستگی کمتر شده و بنابراین رسوبهای کمتری از بستر جدا می‌شوند و در نتیجه، احتمال انباشته شدن رسوبها و تشکیل تلماسه نیز کاهش می‌یابد.

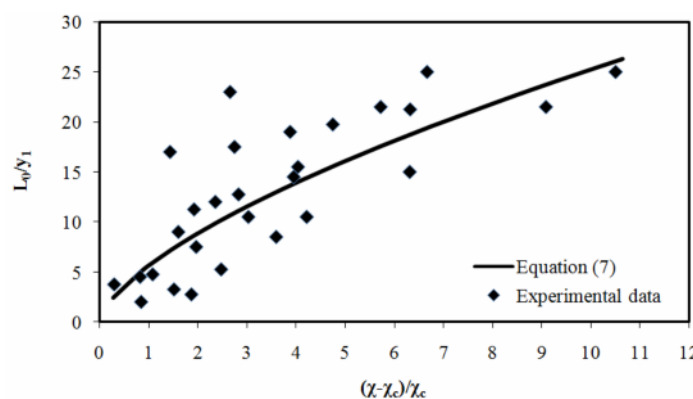
$$\frac{L_0}{y_1} = 5.633 \left(\frac{\chi - \chi_c}{\chi_c} \right)^{0.649}, R^2 = 0.86, RMSE = 4.57 \quad (7)$$

۳-۳- ارتفاع تلماسه

معمولاً در انتهای حفره آبشستگی، ذرات رسوبی که از حفره خارج شده‌اند انباشته شده و تلماسه (دیون) تشکیل می‌دهند. در رسوبهای غیرچسبنده این تلماسه در اکثر شرایط تشکیل می‌شود، اما برای رسوبهای چسبنده، تشکیل تلماسه به نوع خاک و نیز شرایط هیدرولیکی بستگی دارد، به گونه‌ای که در برخی از آزمایش‌ها



شکل ۸ تغییرات d_{sm}/y_1 بر حسب پارامتر بدون بعد $(\chi - \chi_c)/\chi_c$



شکل ۹ تغییرات L_0/y_1 بر حسب پارامتر بدون بعد $(\chi - \chi_c)/\chi_c$

می دهد که:

- حضور مواد ریزدانه چسبنده بر میزان آبشستگی تأثیر می گذارد، اما چگونگی آن به درصد رس و همچنین عدد فرود ذره بستگی دارد؛

- با افزایش میزان رس، نقش عدد فرود ذره در کاهش میزان آبشستگی کاهش می یابد، به گونه ای که برای درصد رس برابر ۴۰٪، به ازای تمامی مقادیر عدد فرود ذره در دامنه آزمایشهای این تحقیق، حداکثر عمق آبشستگی تا ۸۰٪ نسبت به رسوبهای غیرچسبنده کاهش می یابد؛

- مقداری بحرانی برای پارامتر بدون بعد معرفی شده به دست آمد و روابط و نمودارهای بدون بعد جدیدی بر مبنای آن ارائه شد که می تواند در محاسبه پارامترهای مشخصه گودال آبشستگی؛ شامل حداکثر عمق آبشستگی، حداکثر گسترش حفره و ارتفاع دیون در خاکهایی که تا ۴۰٪ رس دارند، استفاده شود؛

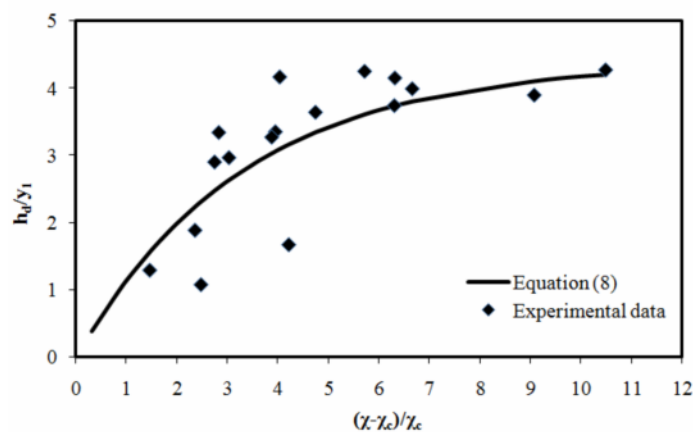
- مشاهده شد که با افزایش درصد رس، احتمال تشکیل تلماسه در انتهای حفره آبشستگی کاهش می یابد و حداکثر ارتفاع آن نیز به مقدار ثابت چهار برابر بازشدگی دریاچه میل می کند.

در آزمایشهای با نسبت رس تا ۲۰٪، تلماسه پدیدار می شود، اما در سایر موارد به جز توده هایی بسیار کوچک از ذرات رسوب غیرچسبنده که به صورت پراکنده در عرض کانال بر روی یکدیگر تجمع می یابند، اثری از تلماسه دیده نمی شود. در شکل ۱۰ تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه در برابر پارامتر $(X-X_c)/X_c$ آورده شده است. همچنین برای محاسبه h_d/y_1 رابطه ای به صورت زیر بر داده ها برازش داده شد که در شکل ۱۰ ترسیم شده است:

$$\frac{h_d}{y_1} = 1.598 \left(\frac{X - X_c}{X_c} \right)^{0.461}, R^2 = 0.75, RMSE = 0.68 \quad (8)$$

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر درصد رس بر آبشستگی بستر با رسوبهای چسبنده در پایین دست کف بند دریاچه کشویی به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. با انجام تحلیل ابعادی، پارامتر بدون بعد جدیدی که در بر گیرنده تأثیر همزمان عدد فرود ذره و درصد رس است، معرفی و بر مبنای آن آزمایشها در شرایط مختلف هیدرولیکی با استفاده از هفت ترکیب مختلف مصالح بستر انجام شد، تا درک مناسبی از این پدیده حاصل شود. نتایج نشان



شکل ۱۰ تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه در برابر پارامتر $(X-X_c)/X_c$ برای خاکهای چسبنده

Abt, S. and Ruff, J. (1982). Estimating culvert scour in cohesive material. *Journal of Hydraulic Division*, 108(HY1), pp. 25-34.

Ansari, S., Kothyari, C. and Ranga Raju, K. (2003). Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 12, pp. 1014-1019.

Balachandar, R., Kells, J. and Thiessen, R. (2000). The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, pp. 138-150.

Dargahi, B. (2003). Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 4, pp. 417-426.

Dey, S. and Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 246-257.

Dey, S. and Westrich, B. (2003). Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp. 42-53.

Farhoudi, J. and Smith, K. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 23, No. 4, pp. 343-359.

Jain, R. and Kothyari, U. (2008). Detachment and transport of clay-sand-gravel mixtures by channel flow. *River Flow Conference Proceedings*, Izmir, Turkey, Sep. 3-5.

Kho, K., Valentine, E. and Glendinning, S. (2004). An experimental study of local scour around circular bridge piers in cohesive soils. *2nd International Conference on Scour and Erosion*, Singapore.

Kuti, E. and Yen, C. (1976). Scouring of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 195-206.

Laursen, E.M. (1952). Observations on the nature of scour. *Proc. 5th Hydr. Conference*, State University of Iowa, Iowa City, Iowa, Bulletin 34, pp. 179-197.

Mazurek, K. (2001). Scour of clay by jets. *PhD Thesis in Water Resources Engineering*, University of Alberta, Canada. p. 313.

Mitchener, H. and Torfs, H. (1996). Erosion of

۵- تشکر و قدردانی

نگارندگان از گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران برای فراهم آوردن زیرساختهای انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند.

۶- فهرست علائم

d_{50}	اندازه ذره‌ای که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند
d_{sm}	حداکثر عمق حفره آبستگي
L_0	حداکثر گسترش طولی حفره آبستگي
h_d	حداکثر ارتفاع تلماسه
y_1	بازشدگی دريچه
Re	عدد رینولدز جت ورودی
$F_0 = U_0 / \sqrt{gd_{50}(\rho_s / \rho_w - 1)}$	عدد فرود ذره
C_c	درصد رس
n	تخلخل
U_0	سرعت جت ورودی
g	شتاب ثقل
ρ_s	جرم مخصوص ذرات رسوب
ρ_w	جرم مخصوص آب
$\chi = F_0 / C_c$	پارامتر
χ_c	مقدار بحرانی χ
$(\chi - \chi_c) / \chi_c$	پارامتر بدون بعد

۷- منابع

گلدی، م. و قدسیان، م. (۱۳۸۷). تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبستگي ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای، CD مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ۱۷-۱۹ اردیبهشت.

موسوی، ا. (۱۳۷۹). بررسی پروفیل آبستگي پایین دست پرش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

Partheniades, E. (2007). Engineering properties and hydraulic behavior of cohesive sediments. CRC Press, Taylor and Francis Group, p.338.

Rajaratnam, N. and Berry, B. (1977). Erosion by circular turbulent wall jets. Journal of Hydraulic Research, Vol. 15, No. 3, pp. 277-289.

Zreik, D., Krishnappan, B., Geramine, J., Madsen, O. and Ladd, C. (1998). Erosional and mechanical strengths of deposited cohesive sediments. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 11, pp. 1076-1085.

mud/sand mixtures. Coastal Engineering (29), pp. 1-25.

Nik Hassan, N. and Narayanan, R. (1985). Local scour downstream of an apron. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 11, pp. 1371-1385.

Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G. and Collins, M. (1997). The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds. Coastal Engineering (32), pp. 19-43.