نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۷، شماره ۳، ۱۳۹۴، صفحات ۲۴۰-۲۵۴

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 7, Issue 3, 2015, Pages 240-254

برآورد نیمرخ آبشستگی در پایین‌دست دریچه با وجود بستر چسبنده

فرهاد شیوا*[۱]، جلال عطاری[۲] و مجتبی صانعی[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی (شهید عباسپور)، دانشگاه شهید بهشتی،
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی (شهید عباسپور)، دانشگاه شهید بهشتی و [۳] دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۱۹

چکیده

آبشستگی پدیده‌ای است که در بعضی مواقع به تخریب سازه‌های زیربنایی منجر شده و وقایع جبران‌ناپذیری را به همراه دارد. تحقیقات معدود قبلی نشان داده که در شرایطی که بستر متشکل از ذرات ریزدانه چسبنده باشد، کاربرد معیارهای مبتنی بر رسوبات غیرچسبنده ابعاد گودال آبشستگی موضعی را بیش از واقعیت برآورد نموده و هزینه‌های گزافی را به طرح تحمیل می‌کند. بر اساس این تحقیقات، میزان و نوع رس بر آبشستگی بستر چسبنده بسیار موثر می‌باشد. در مقاله حاضر، آبشستگی موضعی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی قائم در شرایط وجود مصالح چسبنده در بستر فرسایش‌پذیر به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. در ابتدا عوامل اصلی موثر بر این پدیده شناسایی و رس بنتونیت به‌عنوان مصالح چسبنده انتخاب شد. مجموعاً ۴۸ آزمایش با در نظر گرفتن چهار میزان رس، سه بازشدگی دریچه و چهار عمق پایاب، در یک فلوم مستطیلی در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. نتایج نشان داد با افزودن رس بنتونیت به بستر فرسایش‌پذیر، اثر چسبندگی در میزان رس ۱۰ درصد نمایان شده و با افزایش میزان رس، بیشینه عمق آبشستگی کاهش چشمگیری می‌یابد. به‌نحوی که در شرایط وجود ۲۰ درصد رس بنتونیت در بستر به‌طور متوسط ۷۶ درصد کاهش در بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مصالح غیرچسبنده رخ می‌دهد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، یک رابطه کلی ارائه شد که قابلیت برآورد بیشینه عمق آبشستگی هم در شرایط وجود مصالح چسبنده و هم غیاب آن را با خطای متوسط ۱۹ درصد دارا می‌باشد. حساسیت عوامل موجود در رابطه برآورد بیشینه عمق آبشستگی سنجیده و با رابطه محقق پیشین مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر در قالب دو نوع نیمرخ برای حفره آبشستگی تعریف شد که با روابط قبلی تطبیق نسبتا مناسبی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، جت افقی، بیشینه عمق آبشستگی، رس بنتونیت، سازه‌های رودخانه‌ای

مقدمه

آبشستگی موضعی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به‌وجود می‌آید (Breusers و Raudkivi، ۱۹۹۱). تحقیق و مطالعه در مورد اثرات آبشستگی موضعی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد، چرا که در بعضی مواقع ممکن است، این پدیده به تخریب سازه‌های زیربنایی منجر شده و وقایع جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد (Annandale، ۲۰۰۶). از این‌رو، هر ساله هزینه‌های

* مسئول مکاتبات: farhad_shiva65@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

زیادی برای کنترل و جلوگیری از تخریب ناشی از آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌ها صرف می‌شود. به همین خاطر، پیش‌بینی پدیده آبشستگی موضعی قبل از اجرای پروژه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (Alihoseini و همکاران، ۲۰۰۸). یکی از عواملی که در بسترهای فرسایش‌پذیر آبشستگی موضعی ایجاد می‌کنند، جت‌های آب می‌باشند. هرگاه جریان با ضخامت کم و سرعت زیاد وارد سیالی با سرعت کمتر از خود شود، میدان حاصل از تداخل این دو جریان جت نامیده می‌شود. جت افقی یکی از انواع جت‌ها است که در امتداد جریان سیال و موازی با آن به‌وجود می‌آید (Zarrati، ۲۰۰۷). در این شرایط به‌خاطر گردابه‌های ایجاد شده، بخشی از ذرات به‌صورت معلق در آمده و به‌سمت پایین‌دست حمل می‌شوند. در ابتدا و برای مدت کوتاهی، نرخ افزایش عمق حفره آبشستگی موضعی در مقایسه با طول آن شدیدتر بوده و مصالح بیشتر به‌صورت بار بستر حرکت می‌کنند (Shafai Bajestan، ۲۰۰۸).

از آن‌جایی که خاصیت چسبندگی به خصوصیات مقاوم در برابر فرسایش خاک مربوط می‌شود، در نتیجه عامل چسبندگی نیز باید در رابطه بین نیروهای فرساینده اصلی در جریان و خصوصیات فیزیکی ذرات وارد شود. خصوصیت چسبندگی یکی از مهمترین عوامل موثر بر پدیده آبشستگی است که به‌عنوان مثال لازم است، در زیر سازه‌های کنترل و حفاظت رودخانه‌ها، سواحل و در طراحی آبراهه‌های مصنوعی در نظر گرفته شود (Omid و Nasrabadi، ۲۰۱۲). تاکنون تحقیقات بسیاری برای بررسی فرآیند آبشستگی موضعی انجام شده که در آن‌ها اغلب محققین به‌منظور سهولت، آزمایش‌های خود را بر روی رسوبات غیرچسبنده متمرکز کرده‌اند. حال آن‌که بستر رودخانه‌ها در شرایط طبیعی، متشکل از ترکیبی از رسوبات چسبنده و غیرچسبنده و دارای طیف وسیعی از ذرات با اندازه‌های مختلف هستند (Hamidifar و Omid، ۲۰۱۰). در مهندسی هیدرولیک، رسوبات چسبنده به ترکیبی شامل لای و رس با قطر ته‌نشینی کمتر از ۵۰ میکرومتر تا کسری از یک میکرومتر و نیز حاوی مقادیری از مواد آلی، اطلاق می‌شود. همچنین، این اصطلاح برای ترکیب مشابهی که دارای مقداری ماسه باشد، نیز به‌کار می‌رود (Partheniades، ۲۰۰۷). کانی‌های رسی باعث می‌شوند، دانه‌های رسوب در حالت معلق بودن، به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر یا فلوک[1] بدهند که به این فرآیند به اصطلاح فلوکوله شدن[2] می‌گویند. این فرآیند تابع غلظت اولیه رسوب و تنش برشی جریان می‌باشد (Samadi Boroujeni و همکاران، ۲۰۱۰).

در مورد آبشستگی در مصالح چسبنده، Mazurek (۲۰۰۱)، به بررسی آزمایشگاهی یک نوع رسوب چسبنده (رس طبیعی) در اثر دو نوع جت عمودی و افقی خروجی از نازل بر روی خاکی با ترکیب ۴۰، ۵۳ و هفت درصد به‌ترتیب رس، لای و ماسه ریز پرداخت. او نشان داد که تعادل حفره آبشستگی تابع مومنتوم جت، ارتفاع برخورد، ویسکوزیته و دانسیته سیال و تنش برشی بحرانی سیال می‌باشد. وی همچنین، چند نوع پروفیل حفره در شرایط مختلف تعریف نمود و در انتها یادآور شد که نتایج به‌دست آمده قابل تعمیم نبوده و بایستی آزمایش‌ها بر روی خاک‌های مختلف انجام شوند. Dey و Westrich (۲۰۰۳)، مشخصه‌های جریان و نیز گودال آبشستگی موضعی یک نوع رسوب چسبنده با ۴۸/۸ درصد رس، در پایین‌دست کف‌بند را بررسی و رابطه‌ای برای تعیین بیشینه عمق آبشستگی نسبت به زمان ارائه کردند. مصالح مورد استفاده در این تحقیق، رس طبیعی موجود در رودخانه Neckar واقع در شهر اشتوتگارت آلمان بود. ایشان در انتها نتیجه‌گیری نمودند که هر نوع رسوب چسبنده رفتار خاص خود را داشته و بایستی آزمایش‌هایی با رسوبات مختلف و درصدهای مختلف رس انجام شود. Sekine و Nishimori (۲۰۰۸)، نرخ فرسایش در مصالح چسبنده را با مدل آزمایشگاهی بررسی نمودند. Harris و همکاران (۲۰۱۰)، با ارزیابی آبشستگی در مصالح مختلط (چسبنده و غیرچسبنده) دریایی بیان نمودند که پیش‌بینی آبشستگی در این نوع مصالح، بسیار پیچیده‌تر از مصالح غیرچسبنده می‌باشد. Guang-ming و همکاران (۲۰۱۰)، در یک تحقیق آزمایشگاهی، نرخ فرسایش رسوبات چسبنده تحکیم یافته را بررسی نمودند. آن‌ها از رسوبات چسبنده

[1] Floc
[2] Flocculate

Archive of SID

www.SID.ir

موجود در رودخانه زرد در چین با نسبت اختلاط ۱/۶۶ تا ۳۳ درصد رس با مصالح غیرچسبنده استفاده نمودند. Hamidifar و Omid (۲۰۱۰)، تاثیر میزان رس بر آبشستگی موضعی ناشی از جت افق مستغرق بررسی نمودند. ایشان در آزمایش‌های خود از نسبت‌های مختلف کائولین که یک رس صنعتی می‌باشد، برای ایجاد ترکیب‌های متفاوت خاک چسبنده، استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه نمودن رس کائولین تا میزان رس ۲۰ درصد، موجب شد، بیشینه عمق آبشستگی بیشتر از بستر متشکل از رسوبات غیرچسبنده شود. اما با افزایش میزان رس کائولین، به‌طور کلی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مصالح غیرچسبنده کاهش می‌یابد. همچنین، Hamidifar و همکاران (۲۰۰۹)، اثر نوع رس بر آبشستگی موضعی رسوبات چسبنده را با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بررسی نمودند. ایشان از رس کائولین و یک نوع خاک زراعی به‌عنوان مصالح چسبنده استفاده کرده و نشان دادند که نوع رس نیز بر فرآیند آبشستگی موضعی رسوبات چسبنده موثر است.

بیشتر تحقیقات آزمایشگاهی قبلی درباره آبشستگی موضعی در رودخانه‌ها بر استفاده از رسوبات غیرچسبنده تمرکز نموده‌اند. این ساده‌سازی با شرایط بستر طبیعی رودخانه‌ها که متشکل از رسوبات متنوع اعم از چسبنده و غیرچسبنده می‌باشند، تا حدی تفاوت دارد. تحقیقات معدود قبلی نشان داده که در شرایطی که بستر متشکل از ذرات ریزدانه چسبنده باشد، کاربرد معیارهای مبتنی بر رسوبات غیرچسبنده ابعاد گودال آبشستگی موضعی را بیش از واقعیت برآورد نموده و هزینه‌های گزافی را به طرح تحمیل می‌کند (Partheniades، ۲۰۰۷). به‌عنوان مثال میزان رس در رودخانه‌های شاخه‌ای و مصب‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای بوده و در صورتی که وجود آن در بستر نادیده گرفته شود، برآورد میزان آبشستگی با خطای فاحشی مواجه شده که به طرحی نامناسب و غیر اقتصادی منجر خواهد شد (Partheniades، ۲۰۰۷). در پیشنهادهای حاصل از نتایج این نوع تحقیقات معمولا توصیه می‌شود که با توجه به منحصر به فرد بودن خصوصیات هر رسوب چسبنده، آزمایش‌ها بر روی یک نوع خاک به‌طور مجزا انجام شده و روابط مربوط به آن ارائه شود (Dey و Westrich، ۲۰۰۳). لذا در تحقیق حاضر از یک نوع رس دیگر (بنتونیت) استفاده شده که روابط آبشستگی در آن نادر است و پرداختن به این مهم یکی از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. این رس دارای فعال‌ترین کانی رسی (۷۵ درصد مونت‌موریلونیت) بوده که در واقع بیان‌گر شدیدترین خواص رسی از قبیل فعالیت زیاد و قابلیت فلوکولاسیون شدیدی می‌باشد (Partheniades، ۲۰۰۹). در واقع بنتونیت چسبنده‌ترین نوع رس موجود در طبیعت می‌باشد. در ادامه این مقاله، روابط دقیق‌تری برای برآورد ابعاد و همچنین، پروفیل گودال آبشستگی موضعی با در نظر گرفتن چسبندگی مصالح ارائه می‌شود.

عوامل شناخته شده موثر در فرسایش خاک رس بیشتر وابسته به نوع و مقدار رس می‌باشد. عمده این عوامل عبارتند از: مقاومت برشی، شاخص خمیری (PI)[1]، خواص شیمیایی مایع، چگالی خاک و دما. عواملی که به‌طور مستقل فرسایش خاک رس را کنترل می‌کنند، شامل مقدار رس، دانه‌بندی خاک، کانی‌های ذرات خاک رس و ساختار آن‌ها می‌باشند، بقیه عوامل تحت تاثیر این عوامل مستقل قرار می‌گیرند.

با افزایش میزان رس (Cc) در خاک، تنش برشی بحرانی افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ فرسایش کاهش خواهد یافت. علت افزایش مقاومت در برابر فرسایش در این خاک‌ها، افزایش نیروهای داخلی توده خاک ناشی از اضافه شدن میزان رس می‌باشد. نوع کانی‌های رسی بر مقاومت فرسایشی خاک‌های چسبنده تاثیرگذار است. یک روش برای تعریف خواص شیمیایی آب استفاده از عامل نسبت جذب سدیم (SAR) در آب می‌باشد. SAR رابطه مستقیمی با جذب نمک آب داشته و از طرفی در صورتی‌که این عامل افزایش یابد، مقاومت در برابر فرسایش افزایش می‌یابد (Mazurek، ۲۰۰۱). دما موثر در ضخامت لایه مضاعف بوده و همچنین، بر استحکام پیوند داخلی ذرات رس موثر می‌باشد. افزایش دما مستقیماً باعث

[1] Plasticity Index

Archive of SID

www.SID.ir

افزایش ضخامت لایه مضاعف شده و از طرفی باعث کاهش سطح پتانسیل و ثابت دی‌الکتریک سیال فرسایش‌دهنده خواهد شد، در نتیجه تاثیر دما بر نرخ فرسایش به‌طور واضح مشخص نیست.

صرف نظر از ویژگی‌های خاک‌های چسبنده، عوامل موثر در پدیده آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی قائم را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود.

۱- عوامل هندسی فلوم: عرض فلوم (B) و شیب طولی فلوم (S_0)؛ ۲- عوامل شرایط هیدرولیکی جریان: دبی جریان (Q)، سرعت جریان در بالادست دریچه (U)، عمق جریان در بالادست دریچه (Y_u)، عمق جریان بلافاصله بعد از دریچه (Y_1) و عمق پایاب (h_t)؛ ۳- عوامل بیان‌کننده خواص سیال: جرم مخصوص آب (ρ)، شتاب ثقل زمین (g) و لزجت سینماتیک سیال (ν)؛ ۴- عوامل ذرات بستر: قطر متوسط ذرات (d_{50})، جرم مخصوص ذره (ρ_s)، وزن مخصوص رسوبات (s)، ضریب چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ)، انحراف معیار هندسی (σ_g)، درصد رس موجود در بستر فرسایش‌پذیر (C_C)؛ ۵- عوامل جت افقی: سرعت جت (Vj)، ضخامت جت (Y_G) و عرض جت (b).

با توجه به عوامل موثر در آبشستگی مصالح چسبنده که بیان شد، می‌توان تابع f_1 را (با توجه به شاخص Φ که بیانگر ابعاد پروفیل آبشستگی می‌باشد) به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$f_1(B, S_0, Q, U, Y_u, h_t, Y_1, g, \rho, \rho_s, \mu, \nu, d_{50}, C, \varphi, \sigma_g, V_j, Y_G, b, t, C_C, T, pH, A, SAR, \emptyset) = 0 \quad (۱)$$

به‌علت ثابت بودن عرض کانال و همچنین، عرض دریچه کشویی، عوامل B و b ثابت فرض می‌شوند. به‌منظور سهولت در رسیدن به اهداف تحقیق، کانال افقی فرض شده و از عامل شیب کانال (S_0) صرف نظر شد. به‌علت ثابت بودن دبی در تمام آزمایش‌ها از عوامل Q صرف نظر شد. به‌دلیل ثابت بودن خواص سیال از عامل لزجت سینماتیک سیال (ν) صرف نظر شد. به‌دلیل ثابت بودن جنس ذرات بستر عامل φ نادیده گرفته شد. غیریکنواختی ذرات بستر (σ_g) مد نظر قرار نگرفت. از رس تحکیم نیافته استفاده شد. زمان به تعادل رسیدن حفره آبشستگی برای تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد، لذا از عامل t صرف نظر شد. از آن‌جا که از یک نوع رس در همه آزمایش‌ها استفاده شد، تاثیر بافت و ساختار کانی‌ها مد نظر قرار نگرفت. با توجه به آن‌که از یک منبع آب به‌عنوان سیال فرسایش‌دهنده استفاده شد، خواص شیمیایی آب ثابت و از عامل SAR صرف‌نظر شد. دمای آب در تمامی آزمایش‌ها نسبتا ثابت بوده و لذا اثر این عامل در نظر گرفته نشد. به‌علت آن‌که در تمامی آزمایش‌ها تغییرات pH آب ناچیز بود، از این عامل هم صرف‌نظر شد. به‌منظور بیان تاثیر چسبندگی از عامل C_C استفاده شد که بیان‌گر درصد رس موجود در نمونه مورد آزمایش بوده و در شرایط آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است. لذا از عامل C صرف‌نظر شد. برای بیان بهتر اثر اعماق آب در بالادست و پایین‌دست دریچه و پایاب، عوامل Y_1، ht و Y_u مدنظر قرار گرفتند. با توجه به موارد فوق، رابطه (۱) را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود.

$$f_1(Y_u, h_t, Y_1, Y_G, g, \mu, \rho, \rho_s, d_{50}, V_j, C_C, \emptyset)=0 \quad (۲)$$

برای تحلیل ابعادی از روش پای باکینگهام استفاده شد. با انتخاب عوامل ρ، V_j و Y_G به‌عنوان متغیرهای تکراری در هر یک از نسبت‌های بدون بعد و پس از انجام تحلیل ابعادی، رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$f_1\left(\frac{h_t}{Y_G}, \frac{Y_u}{Y_G}, \frac{Y_1}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, \frac{\rho}{\rho_s-\rho}, \frac{V_j}{\sqrt{gY_G}}, \frac{\rho V_j Y_G}{\mu}, C_C, \frac{\emptyset}{Y_G}\right) = 0 \quad (۳)$$

با ترکیب $\frac{d_{50}}{Y_G}$، $\frac{\rho}{\rho_s-\rho}$ و $\frac{V_j}{\sqrt{gY_G}}$ رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$F_0 = \frac{V_j}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho}\right)g d_{50}}} \quad (۴)$$

که در آن، F_0 همان عدد فرود ذرات می‌باشد. از طرفی $\frac{\rho V_j Y_G}{\mu}$ تعریف عدد رینولدز است. برای درک بهتر تاثیر عمق پایاب و اثر وابسته این عمق به عمق Y_1 عامل $\Delta y = h_t - Y_1$ تعریف و در روابط گنجانده می‌شود. لذا رابطه (۴) به‌صورت زیر ساده می‌شود.

$$f_1\left(\frac{h_t}{Y_G}, \frac{Y_u}{Y_G}, \frac{\Delta_y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, R_e, C_C, \frac{\emptyset}{Y_G}\right) 0 \quad (۵)$$

با توجه به این‌که تغییرات عوامل $\frac{Y_u}{Y_G}$ و R_e در نتایج آزمایش تاثیر ناچیزی داشتند، از آن‌ها صرف‌نظر و رابطه نهایی (۶) پیشنهاد می‌شود.

$$\frac{\emptyset}{Y_G} = \left(\frac{h_t}{Y_G}, \frac{\Delta_y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, , C_C\right) \quad (۶)$$

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی می‌توان ارتباط بین عوامل بی‌بعد به‌دست آمده در رابطه (۶) و ابعاد

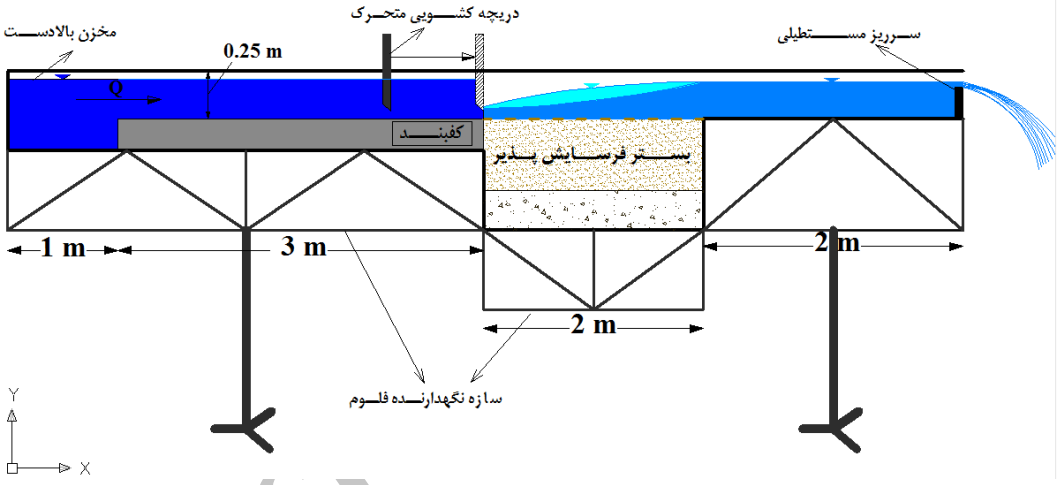
Archive of SID

www.SID.ir

پروفیل آبشستگی مانند D_{se} (بیشینه عمق آبشستگی در زمان تعادل نسبی) را به‌دست آورد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر وجود مصالح چسبنده در ابعاد حفره آبشستگی، یک جت افقی مستغرق خروجی از یک دریچه کشویی قائم مد نظر قرار گرفت. در این راستا، آزمایش‌های تحقیق حاضر در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (وابسته به وزارت جهاد کشاورزی) انجام شدند. برای این منظور، از یک فلوم موجود در آزمایشگاه استفاده شد که نمای شماتیک و اجزای آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. این فلوم شیب پذیر با طول هشت متر، عرض ۲۵/۵ سانتی‌متر و عمق ۲۵ سانتی‌متر، دیواره‌ها و کف آن از جنس پلکسی گلاس شفاف بوده و بیشینه دبی عبوری از آن هفت لیتر بر ثانیه بود. در انتهای این فلوم یک سرریز به‌منظور کنترل عمق پایاب قرار داشت. برای اندازه‌گیری عمق پایاب از ژرف‌سنج و اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه تیز استاندارد با زاویه ۹۰ درجه استفاده شد. در فلوم مورد نظر یک دریچه کشویی قایم نصب شد که جت افقی را ایجاد می‌کرد. این جت با عبور از روی بستر فرسایش‌پذیر متشکل از مصالح چسبنده گسترش یافته و پروفیل‌های طولی آبشستگی موضعی ناشی از آن بر روی کاغذ شفاف نصب شده بر روی دیواره فلوم، به تفکیک ترسیم شد.



شکل ۱- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی

مصالح مورد استفاده ماسه سیلیسی (مصالح غیرچسبنده) با قطر متوسط ذرات یک میلی‌متر به‌عنوان مبنا و رس بنتونیت (با مشخصات مندرج در جدول ۱) به‌عنوان مصالح چسبنده می‌باشد. برای بررسی تاثیر میزان رس از سه نوع نمونه با درصد چسبندگی‌های متفاوت استفاده شد. به‌نحوی که در نمونه اول ۲۰ درصد رس و در نمونه‌های بعدی ۱۵ و ۱۰ درصد رس به خاک غیرچسبنده افزوده و به کمک بتونیر با هم مخلوط شد. سپس این نمونه به ضخامت ۲۶ سانتی‌متر در فلوم ریخته شده و در آب مستغرق شد. به‌منظور انجام واکنش‌های فیزیکوشیمیایی ذرات رس، این مصالح به‌مدت ۱۲ ساعت نگهداری می‌شد. قبل از شروع هر آزمایش، سطح مصالح تسطیح می‌شد. برای انجام آزمایش پمپ روشن شده و دبی و عمق پایاب مورد نظر و بازشدگی دریچه تنظیم می‌شد. سپس پمپ خاموش شده و دوباره سطح خاک نمونه تسطیح و با روشن کردن مجدد پمپ، آزمایش شروع می‌شد.

با توجه به منحنی دانه‌بندی هر نمونه، انحراف معیار هندسی هر نمونه محاسبه و در جدول ۲ درج شده و وضعیت یکنواختی و غیریکنواختی هر نمونه مشخص شد (Shafai Bajestan، ۲۰۰۸).

www.SID.ir

جدول ۱- خصوصیات مصالح چسبنده

نوع مصالح	اندیس تورم	pH	استحکام فشاری (psi)	اندیس قابلیت ژلاتینی (٪)	گازهای نادر فرار (٪)	رطوبت (٪)	استحکام کششی ($gr.cm^{-2}$)	میزان مونت موریلونیت ($g.ml^{-1}$)
رس بنتونیت	۲۵	۹/۵	۶	۲۸	۸	۹	۲۰	۷۶

جدول ۲- مشخصات فیزیکی بستر در هر نمونه

شماره نمونه	میزان رس (٪Cc)	d_{50} (mm)	σ_g	نوع مصالح بستر
۱	۲۰	۰/۶۳	۱/۵<<	غیریکنواخت
۲	۱۵	۰/۷	۲/۶	غیریکنواخت
۳	۱۰	۰/۷۵	۲/۲	غیریکنواخت

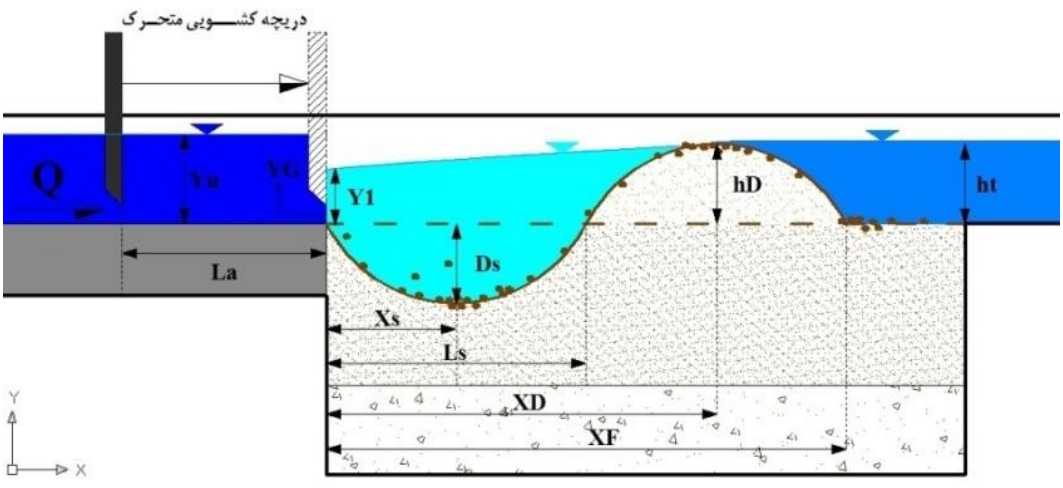
در ابتدای کار برای تعیین ظرفیت‌ها و محدودیت‌های ابعاد فلوم آزمایشگاهی، یک سری آزمایش‌های مقدماتی بر روی فلوم انجام شد تا شرایط جت افقی مستغرق و بازه تغییرات عوامل تعیین شوند. در شکل ۲، طرحی شماتیک از پروفیل تعادلی گودال آبشستگی، پرش هیدرولیکی مستغرق و جریان آشفته بعد از دریچه و عوامل هندسی مربوط به آن ارائه شده‌اند. بر این اساس مقادیر ثابت و بازه تغییرات عوامل اصلی آزمایش به‌صورت زیر تعیین شدند.

- دبی جریان (Q): دبی انتخابی برای آزمایش با توجه به ظرفیت فلوم و تولید جریان فوق بحرانی، بحرانی و زیر بحرانی سه لیتر بر ثانیه (ثابت) فرض شد.

- بازشدگی دریچه (Y_G): با توجه به دبی انتخابی و ارتفاع دیواره‌های فلوم برای تامین شرایط لازم مقادیر دو، سه و چهار سانتی‌متر انتخاب شد.

- عمق پایاب (h_t): با توجه به بازشدگی دریچه و دبی، مقادیر هفت، ۱۰، ۱۵ و ۱۹ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

- میزان رس (Cc): میزان درصد اختلاط رس با مصالح غیرچسبنده برابر صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد فرض شد.



شکل ۲- عوامل پروفیل حفره آبشستگی

برای تعیین مدت زمان انجام هر آزمایش از نتایج تحقیقات گذشته استفاده شد (Mehboudi، ۲۰۰۹). بر این اساس، در حدود ۸۳ درصد از آبشستگی در یک ساعت اولیه آزمایش اتفاق افتاده و پس از آن نرخ گسترش حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. با توجه به هدف این تحقیق، مدت هر آزمایش

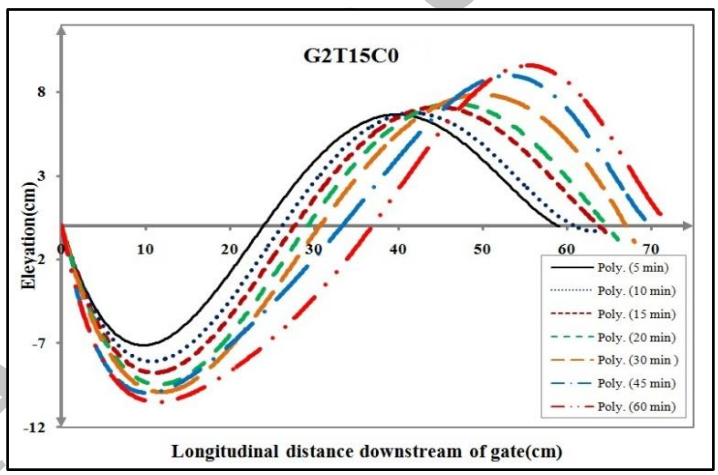
Archive of SID

www.SID.ir

همان یک ساعت انتخاب شده و پروفیل زمانی تغییرات آبشستگی در هر مرحله برداشت شد. با توجه به متغیرهای موجود، در مجموع ۴۸ آزمایش طراحی شد و با اضافه نمودن سه میزان درصد رس به مصالح غیرچسبنده، ابعاد پروفیل حفره آبشستگی در شرایط بازشدگی‌های متفاوت و عمق‌های پایاب برآورد شد. با بررسی و مقایسه نتایج با مصالح غیرچسبنده، تأثیر چسبندگی مشخص شد. برای روشن شدن آزمایش‌های مختلف، از یک عبارت اختصاری استفاده شد تا به‌وسیله آن مشخصات متغیرهای اصلی هر حالت آزمایش، بیان شود. به‌عنوان نمونه، عبارت G2T15C20 بیان‌گر آزمایش در شرایط بازشدگی دریچه (G) به اندازه دو سانتی‌متر، عمق پایاب (T) ۱۵ سانتی‌متر و میزان رس (C) ۲۰ درصد می‌باشد.

نتایج و بحث

در ابتدای این تحقیق ۱۲ آزمایش در شرایط هیدرولیکی مختلف با مصالح غیرچسبنده انجام شد تا بتوان از آن‌ها به‌عنوان مبنایی برای مقایسه با شرایط وجود مصالح چسبنده استفاده نمود. به‌عنوان نمونه، شکل ۳، تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی در یک شرایط هیدرولیکی خاص در مصالح غیرچسبنده را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، قسمت اعظم آبشستگی در پنج دقیقه ابتدایی شروع آزمایش اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان تا رسیدن به زمان تعادل نسبی، روند افزایش عمق حفره کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با گذشت زمان عمق حفره آبشستگی نیز افزایش یافته و ارتفاع سطح آب نسبت به بستر فرسایش‌پذیر بیشتر می‌شود. بنابراین، عمق جریان در محل حفره آبشستگی در مقایسه با زمان قبل از آن افزایش پیدا می‌کند. بر اساس قانون پیوستگی جریان، در دبی ثابت هرچه عمق بیشتر شود، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند. با کاهش سرعت، از مقدار تنش برشی بر روی بستر نیز کاسته شده و در نتیجه نرخ آبشستگی در هر زمان نسبت به قبل کمتر می‌شود.

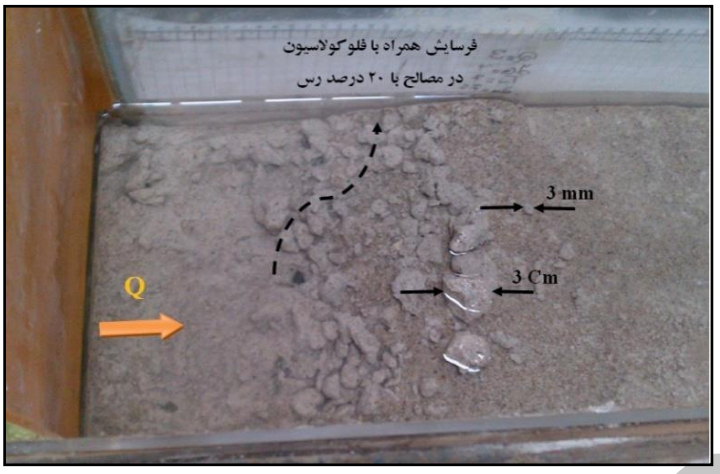


شکل ۳- تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی در مصالح غیرچسبنده

در ادامه این تحقیق به‌منظور ایجاد چسبندگی سه درصد رس بنتونیت به مصالح بستر فرسایش‌پذیر اضافه شد. در این شرایط نرخ فرسایش به‌شدت وابسته به بافت خاک رس بستر و نیروهای داخلی ذرات آن می‌باشد. اگر بافت خاک رس (مانند بنتونیت) به‌صورت فلوکوله باشد، گسستگی از قسمت‌های سست بافت آغاز می‌شود و فرسایش با فلوکوله شدن و بلوکه‌کنی همراه خواهد بود. این نوع فرسایش در آزمایش‌های تحقیق حاضر در رس ۲۰ درصد کاملاً مشهود می‌باشد (شکل ۴).

در نمونه‌های ۱۰ و ۱۵ درصد رس نیز فرسایش همراه با فلوکوله شدن همراه شده، ولی میزان فلوکولاسیون کمتر از شرایط بیشینه رس بود. همچنین، با اضافه نمودن ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد رس به مصالح غیرچسبنده بستر، به‌ترتیب ۲۸، ۵۴ و ۷۶ درصد کاهش در بیشینه عمق آبشستگی رخ داد.

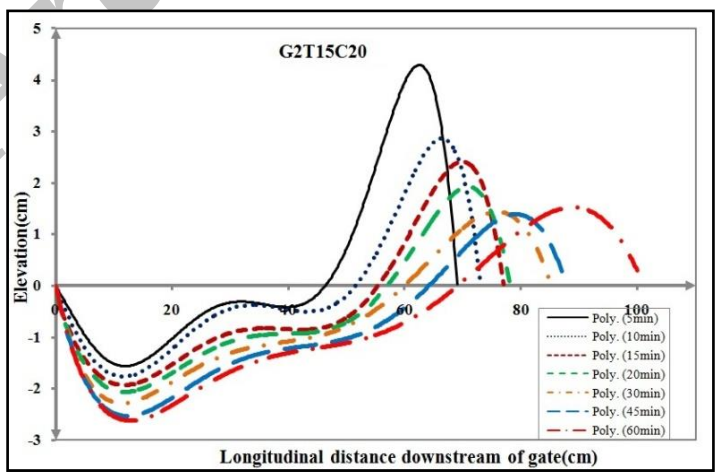
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴- نحوه فرسایش و فلوکولاسیون در مصالح با ۲۰ درصد رس بنتونیت

مطابق شکل ۴، گلوله‌شدن ناشی از فلوکولاسیون در میزان رس ۲۰ درصد شدید بوده و قطر این گلوله‌ها از چند میلی‌متر تا حدود سه سانتی‌متر متغیر می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش میزان رس در خاک، تنش برشی بحرانی و به‌عبارت دیگر مقاومت در برابر فرسایش افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ فرسایش کاهش خواهد یافت. علت افزایش مقاومت در برابر فرسایش در این خاک‌ها، افزایش نیروهای داخلی توده خاک ناشی از اضافه شدن میزان رس می‌باشد که این افزایش در رس بنتونیت بسیار شدید می‌باشد.

در این تحقیق تغییرات زمانی پروفیل حفره با اضافه نمودن رس نیز بررسی شد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که با اضافه نمودن ۱۰ درصد رس بنتونیت، اثر چسبندگی با کاهش ابعاد حفره و ایجاد نامنظمی‌ها در پروفیل طولی حفره آبشستگی نمایان شده که ناشی از بلوکه‌کنی و غلتش گلوله‌های رسی می‌باشد. به‌منظور بررسی محسوس خاصیت چسبندگی، ۲۰ درصد رس به بستر فرسایش‌پذیر اضافه شد و تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی آن به‌دست آمد (شکل ۵). چنانچه در این شکل دیده می‌شود، با افزایش میزان رس شیب بالادست و پایین‌دست حفره افزایش و پروفیل حفره تندتر می‌شود.



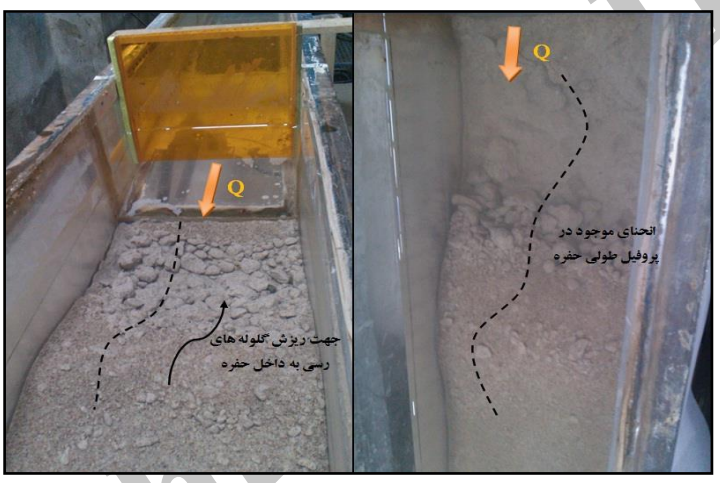
شکل ۵- تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی در شرایط اضافه نمودن ۲۰ درصد رس بنتونیت

مطابق شکل ۵، ابعاد حفره آبشستگی نسبت به مصالح غیرچسبنده (شکل ۳) در شرایط هیدرولیکی مشابه، کاهش چشم‌گیری می‌یابد. همچنین، قسمت عمده آبشستگی در پنج دقیقه ابتدایی رخ نمی‌دهد. در

Archive of SID

www.SID.ir

واقع مقاومت ناشی از چسبندگی رس بنتونیت در ابتدا زیاد بوده و با گذشت زمان نیروهای بین ذرات شکسته شده و عمق آبشستگی زیاد می‌شود. همچنین، شکل حفره آبشستگی نامنظم‌تر از شرایط مصالح غیرچسبنده می‌باشد. همچنین، مطابق این شکل برخلاف مصالح غیرچسبنده، با گذشت زمان ارتفاع تپه پایین‌دست حفره آبشستگی تقریباً کاهش می‌یابد (Shiva و همکاران، ۲۰۱۳a). علت این رفتار را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با توجه به چسبندگی زیاد بنتونیت و تورم این مصالح خاصیت فولوکوله شدن ذرات شدید بوده و ذرات به‌صورت گلوله‌های پایدار در می‌آیند. این گلوله‌ها در ابتدای آزمایش از حفره آبشستگی جدا شده و بر روی تپه پایین‌دست انباشته می‌شوند، اما به‌دلیل شسته شدن ریزدانه‌های بین گلوله‌ها به مرور زمان، این گلوله‌ها به‌سمت داخل گودال ریزش کرده و به‌صورت نامنظم در حفره (مخصوصاً بر روی شیب پایین‌دست حفره) جمع می‌شوند. انحنای موجود در شکل ۵ هم ناشی از این پدیده می‌باشد. در نهایت به مرور زمان از ارتفاع تپه پایین‌دست کاسته شده تا به شرایط تعادلی برسد. شکل ۶، تشکیل گلوله‌های رسی و ریزش نامنظم آن‌ها در حفره آبشستگی و ایجاد انحنا در پروفیل طولی را نشان می‌دهد که در طی آزمایش‌های تحقیق حاضر برداشت شده است (Shiva و همکاران، ۲۰۱۳b).



شکل ۶- تشکیل گلوله‌های رسی و غلتش آن‌ها به داخل حفره

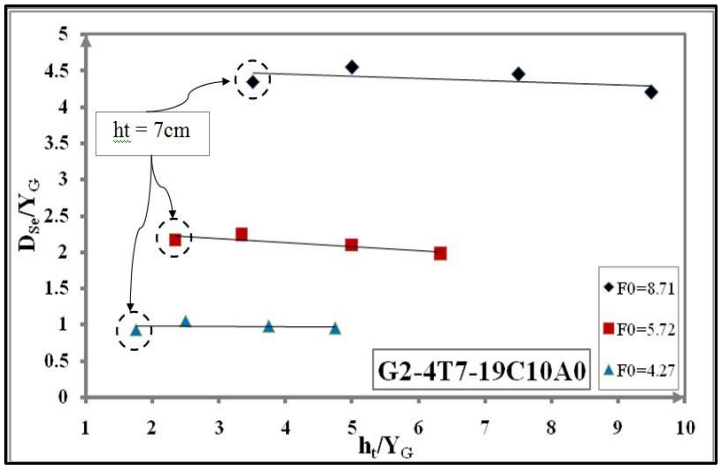
برآورد بیشینه عمق آبشستگی در زمان تعادل نسبی برای هر تحقیق آزمایشگاهی مربوط به آبشستگی موضعی با شرایط حاکم بر آن از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در ادامه در ابتدا تأثیر عوامل بی‌بعد موثر در D_{Se} (بیشینه عمق آبشستگی در زمان تعادل نسبی) به‌طور مجزا بررسی و سپس روابط بی‌بعد برای شرایط خاص تحقیق حاضر ارائه می‌شود.

با توجه به تحلیل ابعادی ارایه شده در بخش تئوری تحقیق این مقاله، رابطه کلی برآورد D_{Se} به کمک عوامل موثر بر آن را می‌توان به‌صورت زیر نوشت.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = \left(\frac{h_t}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, \frac{L_a}{Y_G}, C_C\right) \quad (۷)$$

شکل ۷، اثر عامل $\frac{h_t}{Y_G}$ را در نمونه‌ای از آزمایش‌ها نمایش می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش عامل $\frac{h_t}{Y_G}$، $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ کاهش می‌یابد. البته مطابق این شکل تحت شرایط فوق بحرانی و مصالح چسبنده این تحقیق، تغییرات $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ در بازه تغییرات $\frac{h_t}{Y_G}$ زیاد نمی‌باشد. در واقع اثر این عامل نسبت به سایر عوامل موثر در شرایط تحقیق حاضر کمتر است. در این شکل، اثر دوگانه افزایشی-کاهشی عمق پایاب در اعماق پایاب هفت سانتی‌متر دیده می‌شود. همچنین، به ازای یک مقدار ثابت $\frac{h_t}{Y_G}$، با افزایش عدد فرود ذرات (F_0)، $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ نیز افزایش چشمگیری می‌یابد. علت این امر، افزایش سرعت جت خروجی زیر دریچه و به تبع آن افزایش میزان D_{Se} و $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ می‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷- تأثیر عامل $\frac{h_t}{Y_G}$ بر $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ در F_0های متفاوت

اثر دوگانه افزایشی-کاهشی عمق پایاب ناشی از مستقل‌نبودن عمق پایاب در شرایط هیدرولیکی حاکم بر دریچه است. در صورتی می‌توان عمق پایاب را یک عامل مستقل در آبشستگی موضعی دانست که با تغییر این عامل، شرایط هیدرولیکی دیگر تغییر نکند. این در حالی است که در یک بازشدگی ثابت، با تغییر عمق پایاب، عمق بالادست دریچه (Yu) نیز تغییر می‌کند و این بیان‌گر مستقل نبودن عمق پایاب می‌باشد. همچنین، در صورتی‌که میزان بازشدگی دریچه نیز تغییر کند، عمق بالادست دریچه هم تغییر خواهد کرد که مستقیماً تحت تأثیر عمق پایاب و تغییرات بازشدگی دریچه قرار می‌گیرد، Y_1 یا همان عمق استغراق می‌باشد که با اندازه‌گیری آن تأثیر این عامل در آزمایش‌های این تحقیق بررسی شد. در این راستا، عامل Δy که بیان‌گر اختلاف ارتفاع بین عمق پایاب و عمق استغراق (h_t -Y_1) می‌باشد، تعریف شد. شکل ۸، اثر عامل $\frac{\Delta_y}{Y_G}$ بر $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ را در میزان رس ۱۰ درصد و عدد فرود ذرات مختلف نمایش می‌دهد که در آن با افزایش $\frac{\Delta_y}{Y_G}$ مقدار $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ افزایش می‌یابد. در واقع هرچه اختلاف ارتفاع عمق پایاب و عمق استغراق بیشتر شود، عاملی برای افزایش عمق آبشستگی می‌باشد.

شکل ۹، تأثیر عامل Cc بر $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ در بازشدگی‌ها و عمق پایاب متفاوت را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل به ازای یک مقدار سرعت جت، با افزایش میزان رس عامل $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علت این امر افزایش نیروی مقاوم مصالح بستر ناشی از چسبندگی رس اضافه‌شده به بستر می‌باشد. در واقع با افزایش میزان رس، مقاومت توده خاک در برابر فرسایش بالا می‌رود. این در حالی است که با افزایش میزان رس در نمونه مصالح بستر، قطر متوسط ذرات (d_{50}) کاهش می‌یابد. اما این مقدار کاهش نسبت به میزان افزایش نیروی مقاوم ناشی از چسبندگی ناچیز می‌باشد. همچنین، به ازای یک میزان رس، با افزایش سرعت جت خروجی از دریچه عامل $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ افزایش می‌یابد.

با توجه به تحلیل ابعادی و بررسی عوامل موثر در D_{Se} در شرایط وجود بستر با مصالح چسبنده و غیرچسبنده، می‌توان عامل وابسته $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ را بر اساس عوامل $\frac{h_t}{Y_G}, \frac{\Delta_y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, C_C$ به‌صورت زیر بیان نمود.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = a(F_0)^{\beta}(\frac{h_t}{Y_G})^{\gamma}(\frac{d_{50}}{Y_G})^{\lambda.C_c+\eta} \quad (۸)$$

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = a(F_0)^{\beta}(\frac{\Delta_y}{Y_G})^{\gamma}(\frac{d_{50}}{Y_G})^{\lambda.C_c+\eta} \quad (۹)$$

ضرایب ثابت a، β، γ، η و λ را می‌توان با استفاده از روش LSM[1] به‌نحوی محاسبه نمود که مقادیر عوامل مجهول به‌گونه‌ای به‌دست آیند که مجموع مربعات مقدار خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی کمینه شود. این مقدار خطا از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{M_i-C_i}{Mi}\right]^2 \quad (۱۰)$$

$$\%Error = \frac{|M-C|}{M} \times 100 \quad (۱۰\text{-}۱)$$

که در آن، E مقدار خطا، n تعداد آزمایش استفاده شده برای هر رابطه، M_i مقدار مشاهداتی در آزمایش iام، C_i مقدار محاسباتی با استفاده از رابطه پیشنهادی

[1] Least Square Method

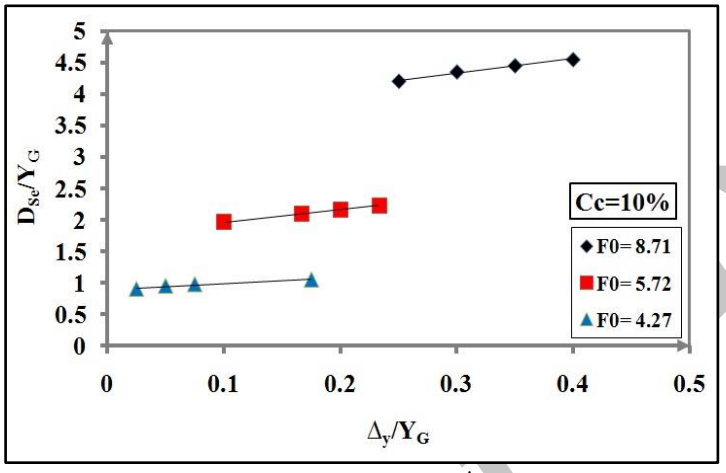
Archive of SID

www.SID.ir

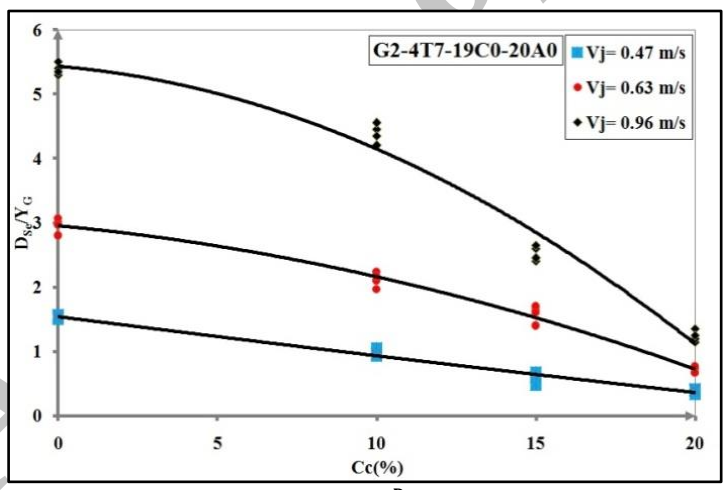
در آزمایش iام، می‌باشد. به‌منظور به‌دست آوردن رابطه‌ای کلی که بیشینه عمق آبشستگی را هم در شرایط وجود مصالح چسبنده و هم عدم وجود آن (مصالح غیرچسبنده) میسر سازد، تمامی داده‌های موجود در این دو شرایط برازش شده و رابطه کلی زیر به‌دست آمد.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 3.5(F_0)^{0.59}(\frac{h_t}{Y_G})^{0.32}(\frac{d_{50}}{Y_G})^{4.04C_c+0.09} \quad (۱۱)$$

ضریب تعیین رابطه فوق R^2=0.86، میزان میانگین خطا (رابطه ۱۱) ۲۲ درصد به‌دست می‌آید. در این حالت، محدوده کاربرد رابطه فوق در بازه زیر برای مصالح چسبنده و غیرچسبنده و بستر طبیعی پیشنهاد می‌شود (جدول ۳).



شکل ۸- تأثیر عامل $\frac{\Delta_y}{Y_G}$ بر $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ در F_0های متفاوت و میزان رس ۱۰ درصد



شکل ۹- اثر عامل Cc بر $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ در بازشدگی‌ها و اعماق پایاب مختلف

جدول ۳- محدوده کاربرد پارامترهای رابطه برآورد بیشینه عمق آبشستگی

عامل	C_c	$\frac{d_{50}}{Y_G}$	$\frac{h_t}{Y_G}$	$\frac{\Delta_y}{Y_G}$	F_0
بازه تغییرات	۰-۰/۲	۰/۰۱۶-۰/۰۵	۱/۷۵-۹/۵	۰/۰۲۵-۰/۴	۳/۶۹-۹/۵۱

شکل ۱۰، مقادیر مشاهداتی عامل $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ را در برابر مقادیر محاسباتی آن حاصل از رابطه (۱۱) در شرایط طبیعی بستر با مصالح چسبنده و غیرچسبنده نمایش می‌دهد. مطابق این شکل بیشتر داده‌ها در بازه ٪۲۵ ± خطا قرار گرفته‌اند. این خطا ناشی از طبیعت تصادفی خواص مصالح چسبنده، عدم قطعیت‌های عوامل گوناگون موثر بر فرسایش مصالح چسبنده و اثر دوگانه عمق پایاب در این پدیده می‌باشد. لذا مقدار خطای

www.SID.ir

به‌دست‌آمده با توجه به کلی بودن رابطه و ضریب تعیین آن، از دقت نسبتا مناسبی برخوردار می‌باشد.

در صورت حذف اثر عامل $\frac{h_t}{Y_G}$ و استفاده از عامل $\frac{\Delta y}{Y_G}$ در رابطه برآورد بیشینه عمق آبشستگی (رابطه ۱۱)، رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 2.84(F_0)^{0.56}(\frac{\Delta y}{Y_G})^{0.67}(\frac{d_{50}}{Y_G})^{4.26C_c-0.43} \quad (۱۲)$$

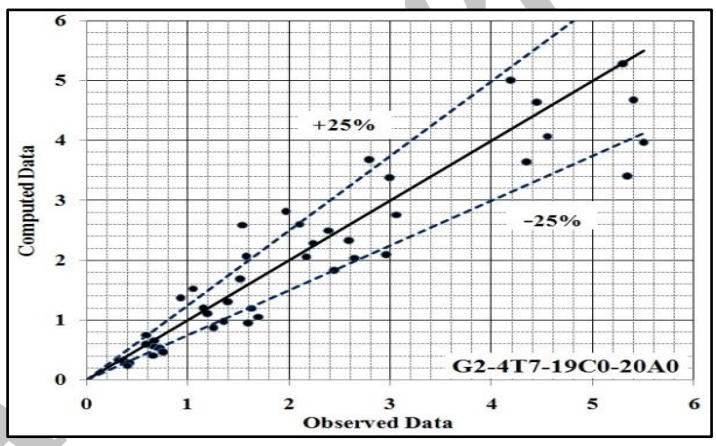
ضریب تعیین رابطه فوق R^2=0.90 و میزان میانگین خطا ۱۹ درصد به‌دست می‌آید که بیان‌گر تأثیر مثبت عامل $\frac{\Delta y}{Y_G}$ در رابطه برآورد بیشینه عمق آبشستگی می‌باشد.

نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق Hamidifar و Omid (۲۰۱۰)، مقایسه (رابطه ۱۳) و میزان میانگین خطا ۵۱ درصد به‌دست آمد. این مقدار خطا با توجه به طبیعت آبشستگی در مصالح چسبنده و همچنین، فعالیت بیشتر رس بنتونیت نسبت به رس کائولین به‌کار رفته در تحقیق مزبور، منطقی به‌نظر می‌رسد.

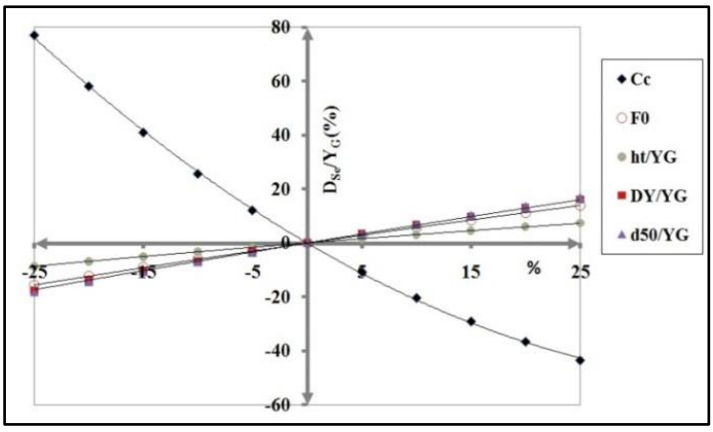
$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 0.0484\left[\frac{X-X_C}{X_C}\right]^{0.651} \quad (۱۳)$$

که در آن، $X = \frac{F_0}{C_C}$ و $X_C = 15.4$ می‌باشد.

به‌منظور حساسیت‌سنجی، عوامل موثر در رابطه برآورد پروفیل آبشستگی در محدوده کاربرد تغییر داده شد و روند نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، عوامل رابطه کلی (۱۲) برای برآورد $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ مد نظر قرار گرفتند. مطابق شکل ۱۱، با تغییر عوامل $\frac{h_t}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, C_C$ در بازه ٪۲۵± ، روند تغییرات $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ رسم شد. در این شکل به‌عنوان نمونه، با تغییر در میزان درصد رس (C_C) و ثابت فرض نمودن دیگر عوامل موثر، شدت تغییرات $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ روند تندتری نسبت به دیگر عوامل دارد. در واقع عامل C_C یکی از موثرترین عوامل در برآورد بیشینه عمق آبشستگی در شرایط خاص خود می‌باشد. هم‌چنین مطابق این شکل پارامتر $\frac{h_t}{Y_G}$ تا ۱۰ درصد تغییر در $\frac{D_{Se}}{Y_G}$ ایجاد کرده که کمترین تأثیر را دارد که با توجه به فوق بحرانی بودن جریان قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی حاصل از رابطه (۱۲) در شرایط بستر طبیعی و مصالح چسبنده و غیرچسبنده



شکل ۱۱ - تحلیل حساسیت روابط ۱۱ و ۱۲ نسبت به عوامل موثر در آن

Archive of SID

www.SID.ir

در شرایط خاص هر آزمایش، ممکن است، پروفیل‌های مختلفی در راستای طولی ایجاد شوند که دو بعدی نبوده و در راستای عرضی (مخصوصاً در بستر چسبنده) متغیر می‌باشند. در تمامی آزمایش‌ها تحقیق حاضر، پروفیل برداشت شده از جداره گودال آبشستگی به‌عنوان نماینده در نظر گرفته شد تا خطای ناشی از دو بعدی فرض نمودن پروفیل آبشستگی افزایش نیابد. در تمامی شرایط هیدرولیکی این تحقیق، پروفیل‌های حفره آبشستگی بر اساس میزان رس به دو نوع طبقه‌بندی شدند. پروفیل نوع ۱، با استفاده از ۱۰ و ۱۵ درصد رس به‌دست آمد که در آن ابعاد حفره تغییرات نامحسوس داشته و بیشتر با نامنظمی‌ها همراه بود. در واقع این پروفیل نشان‌دهنده آغاز تاثیر افزایش میزان رس بر بستر فرسایش‌پذیر می‌باشد. پروفیل نوع ۲، شامل مصالح با ۲۰ درصد رس در بستر می‌باشد. تفاوت این دو نوع پروفیل بیشتر مربوط به کشیدگی و شیب حفره ایجاد شده بود. به‌نحوی که در پروفیل نوع ۲، کشیدگی بیشتری در حفره دیده می‌شود ولی در محل بیشینه عمق آبشستگی شیب بالادست و پایین‌دست حفره افزایش یافته و این حفره در مجموع V شکل با کشیدگی در پایین‌دست خود همراه می‌باشد. پروفیل نوع ۱ به‌صورت U شکل بوده وشیب بالادست و پایین‌دست حفره کمتر نسبت به نوع ۲ بوده و مشابه تحقیق (Mazurek، ۲۰۰۱) می‌توان آن را به‌صورت صاف و گرد شده به همراه ناهمواری در انتهای آن دانست. تحقیقاتی به‌منظور بی‌بعد کردن پروفیل حفره آبشستگی در انواع مصالح انجام شده‌است (Mazurek، ۲۰۰۱؛ Alihoseini و همکاران، ۲۰۰۸؛ Hamidifar و همکاران، ۲۰۰۹). در تحقیقات مربوط به مصالح چسبنده Mazurek (۲۰۰۱) و Hamidifar و همکاران (۲۰۰۹) از عامل (B_w) برای بی‌بعد کردن راستای طولی پروفیل($\frac{X}{B_w}$) استفاده کردند. این عامل بیان‌گر فاصله بین نقطه شروع پروفیل تا نقطه‌ای است که در آن عمق آبشستگی برابر نصف بیشینه عمق آبشستگی در همان پروفیل شده و از رابطه (۱۴) قابل برآورد می‌شود. همچنین، در راستای عمق از نسبت عامل عمق آبشستگی به بیشینه عمق آبشستگی ($\frac{D_S}{D_{Se}}$) استفاده شد. با تعریف عوامل مزبور و برازش یک معادله درجه پنج بر روی داده‌های مربوط به پروفیل حفره آبشستگی در شرایط وجود مصالح چسبنده، معادله پروفیل نوع ۱ و ۲ مطابق جدول ۴ به‌دست آمد.

$$\frac{B_W}{Y_G} = 15.14\left[\frac{\rho V_j{}^2 - \lambda_c}{\lambda_c}\right]^{0.56} \quad \lambda_c = 20000pa \quad (۱۴)$$

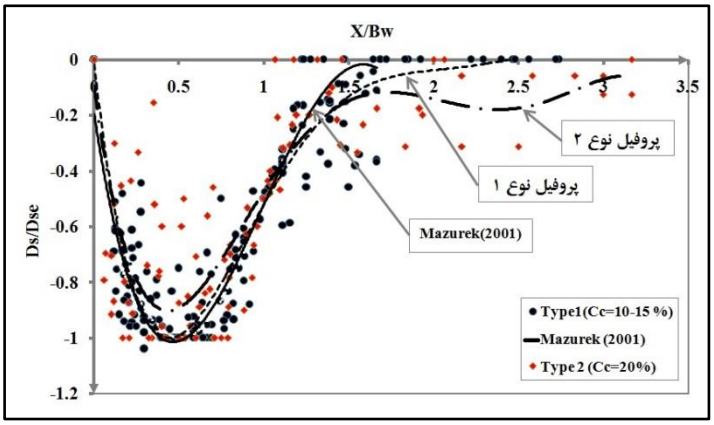
مطابق شکل ۱۲، پروفیل نوع ۱، مشابه پروفیل پیشنهادی Mazurek (۲۰۰۱)، برای حفره آبشستگی بوده و میانگین خطا نسبت به آن ۱۹ درصد می‌باشد (Shiva و همکاران، ۲۰۱۳a). با این تفاوت که پروفیل حاضر در نیمه دوم خود نسبت به پروفیل Mazurek (۲۰۰۱)، مقداری کشیده‌تر بوده که علت این امر ناشی از غلتش بیشتر گلوله‌های رس بنتونیت نسبت به رس طبیعی محقق مزبور باشد. باید توجه نمود که پروفیل نوع ۱، برای اضافه نمودن بیشینه ۱۵ درصد رس بنتونیت به مصالح بستر به‌دست آمده‌است. حال آن‌که پروفیل Mazurek (۲۰۰۱)، برای ۴۰ درصد رس طبیعی در بستر فرسایش‌پذیر توصیه شده و به این ترتیب تأثیر نوع رس مشهود می‌شود.

جدول ۳- پروفیل‌های برآورد شده در تحقیق حاضر (Mazurek، ۲۰۰۱) و در مصالح چسبنده

عنوان	فرمول	ضریب تعیین	میانگین خطا (٪)
پروفیل ۱ (با ٪۱۰ و ۱۵ رس بنتونیت)	$\frac{D_S}{D_{Se}} = -0.23\left[\frac{X}{B_W}\right]^5 + 2\left[\frac{X}{B_W}\right]^4 - 6.64\left[\frac{X}{B_W}\right]^3 + 9.76\left[\frac{X}{B_W}\right]^2 - 5.41\left[\frac{X}{B_W}\right] - 0.02$	۰/۹۱	۱۳
پروفیل ۲ (با ٪۲۰ رس بنتونیت)	$\frac{D_S}{D_{Se}} = -0.16\left[\frac{X}{B_W}\right]^5 + 1.52\left[\frac{X}{B_W}\right]^4 - 5.32\left[\frac{X}{B_W}\right]^3 + 8.05\left[\frac{X}{B_W}\right]^2 - 4.47\left[\frac{X}{B_W}\right] - 0.09$	۰/۷	۲۲
Mazurek، (۲۰۰۱)	$\frac{D_S}{D_{Se}} = +1.62\left[\frac{X}{B_W}\right]^5 - 7.45\left[\frac{X}{B_W}\right]^4 + 11.08\left[\frac{X}{B_W}\right]^3 - 4.92\left[\frac{X}{B_W}\right]^2 - 0.219\left[\frac{X}{B_W}\right] - 0.63$	۰/۹	۱۴

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۲- مقایسه پروفیل‌های حفره آبشستگی در تحقیق حاضر با Mazurek (۲۰۰۱)

پراکندگی نقاط مربوط به پروفیل نوع ۲، بیشتر بوده و خطای زیادتری را نمایش می‌دهند. علت اصلی این امر ناشی از غلتش گلوله‌های رسی ناشی از فلوکولاسیون شدید رس بنتونیت می‌باشد. به این ترتیب که گلوله‌های رسی در ابتدای آزمایش تشکیل شده و با گسترش جت هر کدام در جهت جریان حرکت کرده، بر روی نقاط مختلف پروفیل قرار می‌گیرند. در ادامه چرخش این گلوله‌ها در حفره آبشستگی نامنظمی‌های شدیدی در طول پروفیل ایجاد نموده که پیش‌بینی کشیدگی آن با خطای نسبتاً بالایی همراه خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مشخصات حفره آبشستگی موضعی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه در شرایط وجود مصالح چسبنده، مورد بررسی و برآورد قرار گرفت. اهم نتایج عبارتند از:

- فرسایش در خاک‌های چسبنده بر خلاف رسوبات غیرچسبنده که با گذشت زمان به‌صورت پروفیل‌هایی منظم در بستر توسعه می‌یابند، با نامنظمی و رفتاری تصادفی همراه می‌باشد. به‌نحوی که در شرایط تحقیق حاضر که از رس بنتونیت به‌عنوان مصالح چسبنده استفاده شد، فرسایش همراه با فلوکولاسیون و بلوکه‌کنی همراه شد. لذا صرف نظر کردن از مصالح چسبنده در بستر فرسایش‌پذیر، موجب خطا در برآوردها می‌شود.
- مشابه تحقیقات پیشین غلتش گلوله‌های رسی ناشی از فلوکولاسیون و بلوکه‌کنی باعث پروفیل‌های نامنظم در حفره آبشستگی می‌شود. این پدیده ایجاد پروفیل کشیده در راستای طولی و مقاومت ناشی از چسبندگی ایجاد پروفیل کم عمق‌تری در راستای عمق می‌کند که در رس بنتونیت به‌وضوح دیده می‌شود.
- اضافه نمودن رس به مصالح بستر باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود. به‌عنوان نمونه در اثر اضافه نمودن ۲۰ درصد رس بنتونیت در شرایط این تحقیق، عمق آبشستگی به‌طور متوسط ۷۶ درصد کاهش یافت که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.
- در این تحقیق روابطی برای برآورد بیشینه عمق آبشستگی و پروفیل حفره آبشستگی با استفاده از نوع متفاوت رس (بنتونیت) ارائه شد که با توجه به منحصر به فرد بودن خواص رس‌ها در مقایسه با تحقیقات مشابه از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

منابع مورد استفاده

1. Alihoseini, P., M. Saneie and M. Mashal. 2008. Time variation of scour profiles downstream of a submerged horizontal jet using experimental models. 8th Iranian Hydraulic Conference, Tehran (in Persian).
2. Annandale, G.W. 2006. Scour Technology. McGraw-Hill, 430 pages.
3. Breusers, H.N.C. and A.J. Raudkivi. 1991. Scouring, Balkema, Rotterdam, 142 pages.

Archive of SID

www.SID.ir

4. Dey, S. and B. Westrich. 2003. Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. Journal of Hydraulic Engineering, 129(1): 42-53.
5. Guang-ming, J., J. Lei and S. Cai-wen. 2010. Experimental study of scour rate in consolidated cohesive sediment. Journal of Hydrodynamics Engineering, 22(1): 51-57.
6. Hamidifar, H. and M.H. Omid. 2010. The consideration of type of clay on scouring in cohesive sediment downstream of sluice gate. 5th National Congress on Civil Engineering, Mashhad (in Persian).
7. Hamidifar, H., M.H. Omid and A. Raesie. 2009. The consideration of amount of clay on scour due to submerged horizontal jet. 8th Iranian Hydraulic Conference, Tehran (in Persian).
8. Harris, J.M., R.J.S. Whitehouse and J. Sutherland. 2010. Scour assessment in complex marine soils – an evaluation through case examples. 5th International Conference on Scour and Erosion, ISCE 5, USA, San FranCisco, 450-459.
9. Mazurek, K.A. 2001. Scour of clay by jets. PhD Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 185 pages.
10. Mehboudi, A. 2009. Experimental study on control of scouring in rivers due to submerged horizontal jet. MSc Thesis, 142 pages (in Persian).
11. Omid, M.H. and M. Nasrabadi. 2012. Sedimentation engineering. Tehran University, 766 pages (in Persian).
12. Partheniades, E. 2007. Engineering properties and hydraulic behavior of cohesive sediments. CRC Press, Taylor and Francis Group, 338 pages.
13. Partheniades, E. 2009. Cohesive sediments in open channels. ELSEVIER, Jordan Hill, Oxford, USA, 358 pages.
14. Samadi boroujeni, H., N. Beldaji and R. Fattahi. 2010. Ahead of settling in suspended cohesive sediment using a circular flume laboratory. Iranian Journal of Water, 6: 75-82 (in Persian).
15. Sekine, M. and K. Nishimori. 2008. Erosion rate of cohesive sediment by running water. 4th International Conference on Scour and Erosion, ISCE 4, Japan, Tokyo, 424-429.
16. Shafai Bajestan, M. 2008. Hydraulics of sediment transport. Shahid Chamran University, 549 pages (in Persian).
17. Shiva, F., J. Attari and M. Saneie. 2013a. Experimental study and control of scour due to horizontal jets with cohesive sediments. MSc Thesis, Shahid Beheshti University, 125 pages (in Persian).
18. Shiva, F., J. Attari and M. Saneie. 2013b. The consideration of bentonite clay effect on the maximum depth of scour due to jet in rivers, 9th International Seminar on River Engineering, Ahvaz (in Persian).
19. Zarrati, A. 2007. Manual of local scour calculation methods. Bulletin 318-a, Department of Energy, 112 pages (in Persian).

Archive of SID

www.SID.ir

Prediction of scour profile in cohesive beds downstream of vertical sluice gates

Farhad Shiva[*1], Jalal Attari[2] and Mojtaba Saneie[3]
[1] MSc, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, [2] Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran and [3] Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 02 May 2014 Accepted: 11 October 2014

Abstract

Scour phenomena can impair infrastructures and result in non-reparable damages. Few researches conducted so far show that application of non-cohesive criteria for situations where the bed is formed of cohesive materials, overestimates dimensions of the scour hole and will impose large costs to the project. According to the previous researches, type and content of clay also significantly affects scour in the cohesive materials. In this paper, the local scour in the cohesive bed due to a horizontal submerged jet issued from a vertical sluice gate is experimentally studied. Initially, the effective factors were identified and Bentonite clay was selected as cohesive material. A total of 48 tests, considering four different clay contents, three amounts of gate openings and four different tailwater depths, were conducted in a rectangular flume of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute laboratory. The results show that by adding Bentonite clay to the erodible bed, effect of cohesion appears in the 10% ratio and with further increase of the clay content the scour depth decreases considerably. So that in a bed containing 20% Bentonite clay the maximum scour depth reduces by 76% on average in relation with a non-cohesive bed. Based on the experimental results, a general equation for predicting the maximum scour depth valid in both conditions of presence and absence of the cohesive materials is presented. A sensitivity analysis on the existing parameters that effect on scour depth was conducted and compared with the results of previous researches. Finally, two types of scour hole profiles were defined which showed a relatively good agreement with previous empirical relationships.

Key words: Local scour, Horizontal jet, Maximum scour depth, Bentonite clay, Riverine structures

[*] Corresponding author: farhad_shiva65@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir