

پروفیل‌های آبشستگی پایین‌دست دریاچه کشویی در رسوبات چسبنده

حسین حمیدی فر^{۱*}، محمد حسین امید^۲

چکیده

در این تحقیق، تشابه هندسی پروفیل‌های حفره آبشستگی رسوبات چسبنده در پایین‌دست یک دریاچه کشویی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. اگر چه تاکنون تحقیقات زیادی برای شناخت مشخصات حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبنده انجام شده است، اما به دلیل طبیعت پیچیده رسوبات چسبنده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم مستطیلی به طول ۹/۰ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۵ متر انجام شد. شش ترکیب رسوبات بستر با نسبت‌های مختلف رس شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد تپیه و در آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که پروفیل آبشستگی در عرض حفره یکنواخت نبوده و میزان آبشستگی در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر است. اگر چه نتایج بدست آمده حاکی از وجود تشابه در پروفیل آبشستگی رسوبات چسبنده است اما برخلاف رسوبات غیرچسبنده، پروفیل بی‌بعد در رسوبات چسبنده را نمی‌توان بر حسب یک منحنی منفرد ارائه کرد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، سه نوع پروفیل تشخیص داده شد و در هر مورد روابط و نمودارهای بی‌بعد جدیدی برای تعیین شکل پروفیل ارائه گردید. همچنین رابطه جدیدی برحسب پارامترهای بدون بعد، برای محاسبه پارامتر B_w که برای بی‌بعد کردن پروفیل بکار می‌رود معرفی شده است. در نهایت، اثر تغییرات عمق پایاب بر روی شکل حفره آبشستگی در رسوبات چسبنده بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، رسوب چسبنده، تشابه هندسی، پروفیل بی‌بعد

مقدمه

یکی از عمده‌ترین مشکلات سازه‌هایی از قبیل حوضچه‌های آرامش، دریاچه‌های کشویی و سرریزها که در بالادست بسترهای فرسایش‌پذیر قرار دارند، آبشستگی در مجاورت سازه است که علاوه بر تاثیر مستقیم بر پایداری سازه، ممکن است باعث تغییر مشخصات جریان و در نتیجه تغییر در پارامترهای طراحی سازه شود. به همین دلیل، پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست این سازه‌ها از دیرباز مورد توجه محققین بوده است و به دلیل پیچیدگی موضوع، اکثر محققین آنرا به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. در حال با وجود تمام دستاوردهای مهمی که تا کنون در زمینه آبشستگی موضعی حاصل گردیده است، هنوز هم شواهد زیادی از آبشستگی‌های گسترده در پایاب حوضچه‌های آرامش، دریاچه‌های کشویی، سرریزها، شیب‌شکن‌ها، کالورت‌ها و مجاورت پایه‌های پل

وجود دارد که می‌تواند پایداری این سازه‌ها را با خطر جدی مواجه کند. پدیده آبشستگی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی جریان آب عبوری از آبراهه از میزان بحرانی شروع حرکت ذرات بستر بیشتر شود. تحقیقات نشان داده است که عوامل بسیار زیادی بر آبشستگی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش تاثیرگذار هستند که از جمله آنها می‌توان به چسبنده یا غیرچسبنده بودن خاک، اندازه و دانه‌بندی رسوبات، عمق پایاب، عدد فرود ذره، طول کف‌بند و هندسه سازه اشاره کرد (Kuti and Yen (1976), Balachandar et al. (2000), Kells et al. (2001), Lim and Yu (2002), Faruque et al. (2006), Dey and Sarkar (2006), Sarathi et al. (2008))

در کنار این عوامل، بایستی توجه داشت که پدیده آبشستگی، اغلب در اثر عبور جریان یک جت سیال متلاطم اتفاق می‌افتد که خصوصیات آن نیز هنوز بطور کامل شناخته نشده است. بنابراین تعدد عوامل موثر بر پدیده آبشستگی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش باعث شده است که هر کدام از محققین با ثابت نگه داشتن سایر عوامل، به بررسی یک یا تعداد محدودی از این عوامل بپردازند. از طرفی به علت طبیعت پیچیده رسوبات چسبنده، عمده تحقیقات با استفاده از رسوبات غیرچسبنده انجام شده است. در حالیکه برخی مطالعات نشان داده است که در خاک‌های چسبنده، نرخ فرسایش و آبشستگی

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

*-نویسنده مسئول: (Email: momid@ut.ac.ir)

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

(1982) and Ruff آزمایش‌هایی را در انتهای یک کالورت و بر روی یک نوع خاک چسبنده با ۵۸٪ ماسه، ۲۸٪ رس، ۱۴٪ سیلت و ۱٪ ماده آلی انجام دادند و در پایان ۱۰۰۰ دقیقه، با ترسیم پروفیل‌های حفره آبشستگی پراکندگی قابل‌توجهی مشاهده کردند. Mazurek (2001) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی بر روی یک نوع خاک با ۴۰٪ رس، ۵۳٪ لای و ۷٪ ماسه ریز پرداخت و نتیجه گرفت که چنانچه پروفیل‌های آبشستگی نسبت به ضخامت جت بی‌بعد شوند، از یک تشابه خاص پیروی می‌کنند.

نتایج آزمایش‌های (2003) Dey and Westrich بر روی یک نوع رسوب چسبنده با ۴۸/۸ درصد رس، نشان داد که پروفیل‌های آبشستگی در زمان‌های مختلف، از تشابه هندسی خاصی پیروی می‌کنند. در هر حال 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.

با توجه به آنچه ذکر شد، مشخص می‌شود که تشابه پروفیل‌های حفره آبشستگی در رسوبات چسبنده چندان مورد بررسی قرار نگرفته و در معدود کارهای انجام شده نیز از یک نوع رسوب چسبنده استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و با استفاده از یک فلوم با مقطع مستطیلی و به طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شدند. قسمتی از ابتدای کانال مستطیلی به طول ۳/۰ متر به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که ارتفاع کف آن نسبت به کانال مستطیلی پایین‌دست قابل تنظیم است و بدین ترتیب امکان تعبیه مخزنی جهت قراردادن رسوبات را فراهم می‌کند. طرحواره‌ای از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۱) آورده شده است. سیستم تامین آب در مجموعه آزمایشگاهی به صورت مدار بسته می‌باشد؛ بگونه‌ای که جریان آب خروجی از انتهای کانال توسط یک الکتروموتور پمپ از طریق لوله‌های از جنس پلی‌اتیلن مجدداً وارد سیستم می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به سیستم از یک سرریز مستطیلی واسنجی شده بدون فشردگی جانبی استفاده گردید. با نصب یک دریچه کشویی در ابتدای کانال، شرایط ایجاد ارتفاع اولیه و تشکیل پرش هیدرولیکی فراهم شد. بازشدگی دریچه در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

می‌تواند تا ۱۰۰۰ برابر کمتر از خاک‌های غیرچسبنده باشد (Partheniades, 2007).

مقاومت رسوبات چسبنده در برابر فرسایش، یک فرآیند بسیار پیچیده است و با وجود مطالعاتی که انجام گرفته و نتایجی که حاصل شده است، کمی‌سازی همه عوامل موثر بر این پدیده تاکنون میسر نگردیده است؛ بطوریکه در برخی موارد و با وجود شرایط یکسان انجام آزمایش‌ها، نتایج متناقضی مشاهده شده است. بطور مثال، مشاهدات آزمایشگاهی (1997) Panagiotopoulos et al. نشان داد که مصالح چسبنده، آستانه حرکت بسترهای ماسه‌ای را تا ۹۰٪ افزایش می‌دهد؛ در حالیکه (2003) Ansari et al. با مطالعه تاثیر چسبندگی بر آبشستگی ناشی از جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق در نهایت رابطه‌ای به صورت زیر ارائه کردند که نشان می‌دهد حداکثر عمق آبشستگی در رسوبات چسبنده، بیشتر از رسوبات غیرچسبنده است:

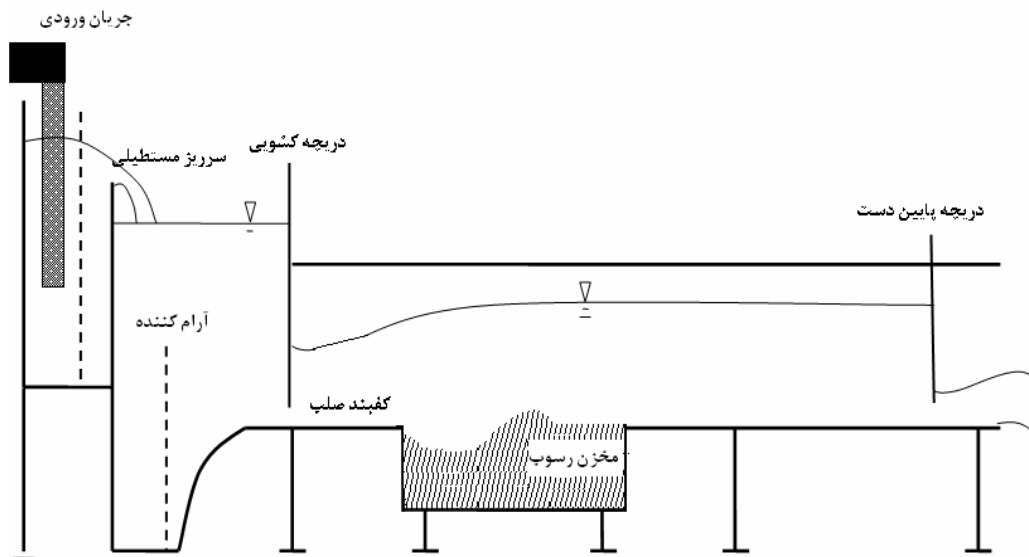
$$\frac{d_{smc}}{d_{smi}} \approx 1.5 \pm 0.3 \quad (1)$$

در این رابطه، d_{smc} و d_{smi} به ترتیب حداکثر عمق آبشستگی در رسوبات چسبنده و رسوبات غیرچسبنده است.

در هر حال، برخی تحقیقات صورت گرفته حاکی از تشابه پروفیل‌های حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبنده است. Laursen (1952) نخستین محقق است که مفهوم حفره آبشستگی را بر حسب پروفیل‌های بی‌بعد ارائه کرد. Rajaratnam and Macdougall (1983) دریافتند که وقتی پروفیل‌های آبشستگی بصورت بی‌بعد ارائه گردند با کمی پراکندگی در محل تاج پروفیل تقریباً شبیه هم می‌باشند. Farhodi and Smith (1985) نمودارهای بی‌بعدی برای تعیین پروفیل حفره آبشستگی در سه سطح عمق پایاب زیاد، متوسط و کم ارائه نمودند.

(1985) Nik Hassan and Narayanan به این نتیجه رسیدند که طول کف‌بند یک پارامتر بسیار مهم است و باعث پراکندگی داده‌ها در پروفیل بی‌بعد حفره برای طول کف‌بندهای مختلف می‌شود. (2003) Dargahi هیچگونه تشابهی بین پروفیل‌های حفره آبشستگی در انتهای کف‌بند بعد از یک سرریز مشاهده نکرد. همچنین نتایج آزمایش‌های وی، نشان‌دهنده عدم تقارن در عرض حفره آبشستگی بود. نتایج تحقیقات (2006) Dey and Sarkar نشان داد که پروفیل‌های آبشستگی در زمان‌های مختلف تشابه هندسی خاصی دارند و توسط دو چندجمله‌ای (برای قسمت حفره و تلماسه) تعریف می‌شوند. علیحسینی و همکاران (۱۳۸۷) به این نتیجه رسیدند که پروفیل بی‌بعد شده آبشستگی رسوبات غیرچسبنده در پایین دست جت افقی مستقل از زمان است.

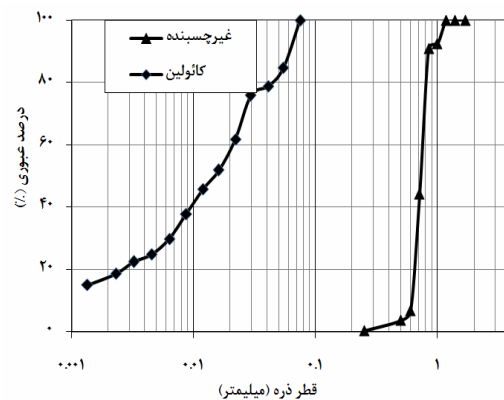
برخلاف رسوبات غیرچسبنده، تاکنون تحقیقات چندان بی‌رونی تشابه حفره آبشستگی در رسوبات چسبنده صورت نگرفته است. Abt



شکل ۱- طرحواره‌ای از مدل مورد استفاده در آزمایش‌ها

برای تهیه یک نمونه از رسوبات چسبنده، بعد از توزین مقدار مورد نیاز از خاک رس و ماسه خشک، این مواد بر روی یک صفحه پلاستیکی ریخته شده و بصورت دستی کاملاً با هم مخلوط می‌شدند. این مخلوط به درون یک ظرف پلاستیکی درب‌دار منتقل می‌شد و برای اطمینان از عدم جدا شدن ذرات درشت‌دانه و ریزدانه، مجدداً با هم مخلوط می‌شدند. از آنجا که میزان رطوبت یکی از پارامترهای بسیار مهم در میزان آبشستگی است، سعی بر این بود که در آزمایش‌های مختلف، این پارامتر ثابت نگه داشته شود. مقدار آب اضافه شده متناسب با میزان رس مصرفی بود و به طور تجربی، تقریباً معادل حجم رس در هر آزمایش، آب به ماسه و رس اضافه می‌شد و مخلوط بوسیله یک صفحه پلاستیکی مجدداً به هم زده می‌شد. ترکیب تهیه شده به مدت ۱۲ ساعت در درون ظرف بصورت دربسته نگهداری می‌شد. این ترکیب به آرامی به درون مخزن رسوبات انتقال داده شد و سطح بستر صاف و رسوبات به مدت ۱۲ ساعت مستغرق می‌شد. به منظور حصول اطمینان از ثابت بودن پارامترهای دما، pH و EC، دو مرتبه نمونه‌گیری در ابتدا و انتهای آزمایش صورت می‌گرفت. همچنین به منظور اطمینان از یکنواختی توزیع میزان رس و میزان رطوبت در نمونه‌های رسوب، چهار نمونه از خاک بستر به صورت تصادفی انتخاب و مورد آزمایش قرار می‌گرفت. به این ترتیب، شش ترکیب خاک بستر با درصدهای مختلف رس شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد به صورت مصنوعی تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. از آنجا که یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار بر فرآیند آبشستگی، عمق پایاب می‌باشد (امید و همکاران، ۱۳۸۸)، برای حذف اثر آن در آزمایش‌های این تحقیق، مقدار عمق پایاب ثابت و برابر با حداقل

جت آب خروجی از بازشدگی دریاچه کشویی با تشکیل یک پرش هیدرولیکی مستغرق، بر روی یک کف‌بند صلب به طول ۱/۰ متر توسعه یافته و پس از آن از روی یک بستر فرسایش‌پذیر به عمق رسوبات ۰/۲ متر و طول ۱/۶۵ متر عبور می‌کند. رسوبات مورد استفاده شامل ماسه غیرچسبنده با اندازه متوسط $d_{50} = 0.73$ میلی‌متر، انحراف معیار $\sigma_g = 1.12$ و زاویه ایستایی $\phi = 35.8^\circ$ می‌باشد که برای ایجاد چسبندگی لازم مقادیر مختلف از رس کائولین به آن افزوده می‌شد. با انجام آزمایش X-ray و انطباق داده‌های بدست آمده با جداول مربوطه (Moore and Reynolds, 1989) مشخص گردید که کانی‌های عمده تشکیل دهنده خاک رس، شامل کانی‌های گروه کائولین از قبیل کائولینیت، دیکتیت، متاهالوویزیت و اکریت به همراه کانی غیررسی میکروکلین از گروه فلدسپارها می‌باشند. منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها

بررسی تشابه پروفیل‌های بی‌بعد حفره آبستگي

بر اساس یافته‌های محققین پیشین برای رسوبات غیرچسبنده، چنانچه ابعاد حفره آبستگي نسبت به یک پارامتر مناسب بی‌بعد گردند، می‌توان شکل حفره را برای شرایط مختلف بر حسب یک منحنی منفرد ارائه کرد. به عبارت دیگر، حفره‌های آبستگي متشابه می‌باشند.

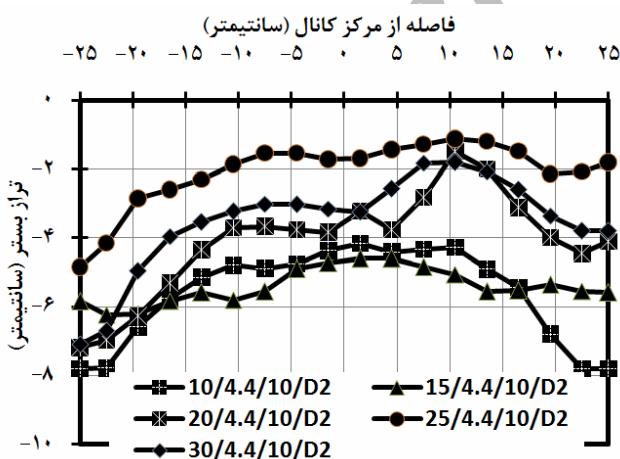
اگر چه این امر در مورد رسوبات غیرچسبنده توسط محققین مختلف بررسی و اثبات شده است اما در مورد رسوبات چسبنده تاکنون اظهار نظر جامعی در این خصوص صورت نگرفته است. علت می‌تواند این باشد که در رسوبات غیرچسبنده فقط یک نوع فرسایش اتفاق می‌افتد و طی آن ذرات منفرد از بستر جدا شده و توسط جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. اما طی فرآیند فرسایش یک خاک چسبنده، انواع مختلفی از فرسایش مانند فرسایش سطحی، توده‌ای و شیاری ممکن است رخ دهد که این مسائل بر پیچیدگی فرآیند آبستگي در رسوبات چسبنده می‌افزاید. بر اساس مشاهدات حاصل از انجام آزمایش‌ها در این تحقیق، مشخص شد که حفره آبستگي در رسوبات چسبنده وابسته به ترکیب خاک و نیز شرایط هیدرولیکی انجام آزمایش است. تاکنون محققین پیشین نیز نتوانسته‌اند شکل نهایی حفره آبستگي در هر شرایطی را بر حسب یک منحنی منفرد ارائه کنند. نکته مهم دیگر در مورد پروفیل حفره در رسوبات چسبنده این است که برای بی‌بعد کردن پارامترهای حفره آبستگي نمی‌توان از حداکثر عمق آبستگي d_{sm} ، به تنهایی به عنوان عامل بی‌بعد کننده استفاده کرد. بنابراین با آزمودن طول‌های مختلف، نهایتاً طول مشخصه B_w که توسط Mazurek (2001) معرفی شده است، برای بی‌بعد کردن گسترش طولی پروفیل بکار برده شد و در شکل (۵) نشان داده شده است.

معیار ارائه شده توسط (Lim and Yu (2002) برای جت‌های افقی کاملاً مستغرق، معادل ده برابر ضخامت جت ورودی در نظر گرفته شد. تنظیم عمق پایاب بوسیله یک دریچه کشویی که در انتهای مدل آزمایشگاهی تعبیه شده بود صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دقیق دبی و عمق پایاب، آزمایش شروع و برای حصول شرایط تعادلی به مدت ۱۲ ساعت ادامه داده می‌شد. در پایان هر آزمایش، مقدار فرسایش در هر نقطه توسط یک عمق‌سنج با دقت ± 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شد.

نتایج و بحث

تغییرات پروفیل عرضی حفره آبستگي

در مجموع ۳۶ آزمایش برای بررسی تشابه پروفیل‌های حفره آبستگي در رسوبات چسبنده انجام شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که پروفیل آبستگي در عرض کانال متغیر و به صورت سه-بعدی است. در ابتدای هر آزمایش، فرسایش بگونه‌ای بود که بلوک‌هایی از بستر کنده شده و حفره‌های موضعی در بستر بوجود می‌آمد. این فرآیند منجر به تغییر الگوی جریان از دوبعدی به سه‌بعدی و تقویت جریان‌های ثانویه و نهایتاً افزایش غیریکنواختی پروفیل در عرض کانال می‌شد. به عبارت دیگر، چنانچه آبستگي حتی برای یک لحظه به صورت غیرمتقارن شروع شود، هیچوقت به صورت متقارن در نمی‌آید. البته طبق گزارش (Mazurek (2001) حتی بعد از این تغییرات هنوز جریان در خط مرکزی کانال به صورت دوبعدی باقی می‌ماند. پروفیل در عرض کانال بگونه‌ای بود که شکل پروفیل و ابعاد حفره هر دو متغیر بودند. تغییرات عرضی پروفیل حفره آبستگي در مقطع مربوط به حداکثر عمق آبستگي برای تعدادی از آزمایش‌ها برداشت شد که در شکل (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که متغیر بودن پروفیل آبستگي، در برخی از تحقیقات قبلی که بر روی رسوبات غیرچسبنده صورت گرفته‌اند نیز گزارش شده است. بطور مثال موسوی خندان (۱۳۷۹) غیریکنواختی پروفیل در عرض حفره را به آشفته بودن جریان در پایاب پرش هیدرولیکی و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت داده است. از آنجا که برداشت پروفیل طولی حفره آبستگي برای تمام عرض کانال و با توجه به تعداد زیاد آزمایش‌های این تحقیق بسیار زمان‌بر می‌باشد، برای تعدادی از آزمایش‌ها پروفیل آبستگي در سه مقطع برداشت شد و میانگین مقادیر این سه مقطع در مقابل پروفیل خط مرکزی کانال در شکل (۴) ترسیم شد. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با وجود تغییرات پروفیل حفره آبستگي در عرض کانال، پروفیل خط مرکزی کانال می‌تواند به تنهایی شاخص خوبی از کل حفره آبستگي باشد. بر این اساس برای سایر آزمایش‌ها به برداشت پروفیل در خط مرکزی کانال اکتفا شد.

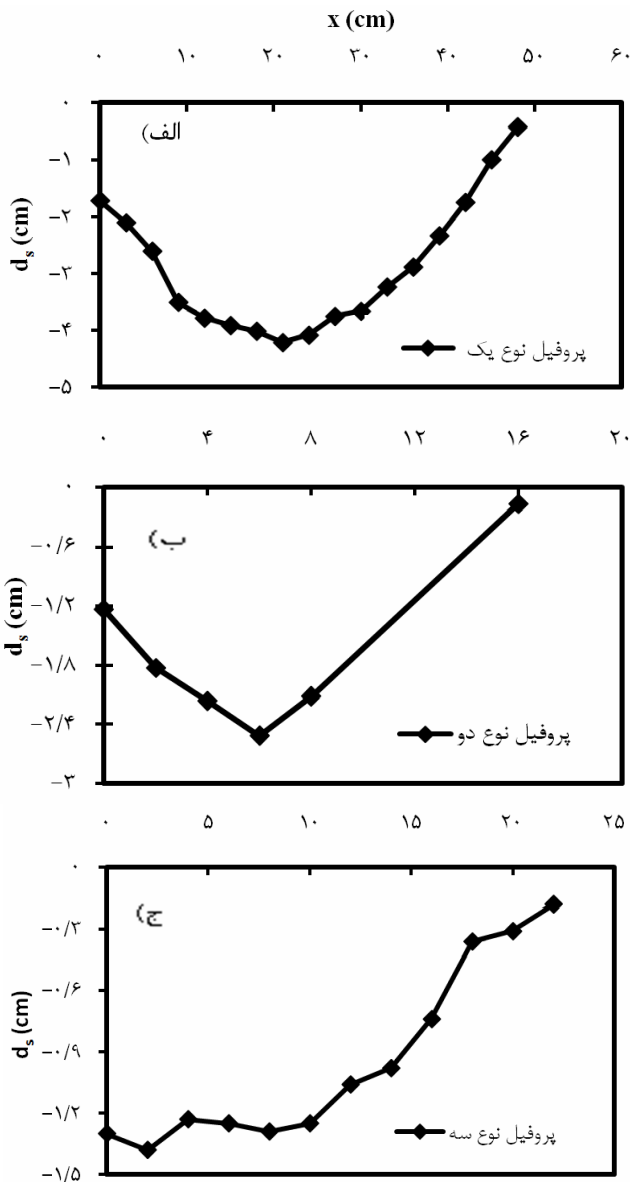


شکل ۳- تغییرات پروفیل در عرض کانال در مقطع با حداکثر عمق

آبستگي (کد آزمایش):

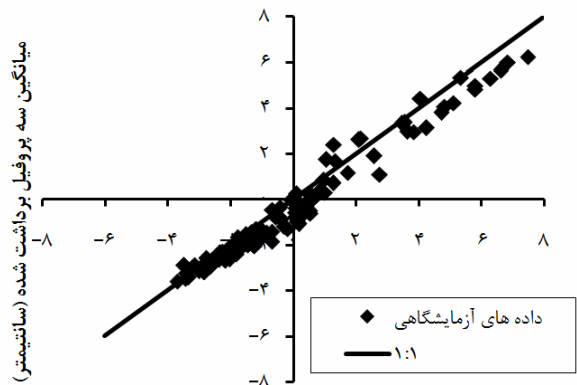
دانه‌بندی / نسبت عمق پایاب به Ft/y_1 (درصد رس)

رابطه $R^2 = 0.97$ می‌باشد. نحوه محاسبه پارامتر B_{wp} نیز در ادامه بیان خواهد شد. در شکل (۷) داده‌های آزمایشگاهی مربوط به پروفیل نوع یک در کنار رابطه (۲) ترسیم شده است که نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین آنها وجود دارد.



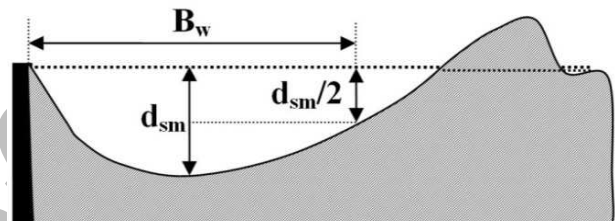
شکل ۶- انواع پروفیل حفرة در رسوبات چسبنده:

- (الف) پروفیل نوع یک در آزمایش 10/4.4/10/D2
- (ب) پروفیل نوع دو در آزمایش 20/2/10/D2
- (ج) پروفیل نوع سه در آزمایش 30/3.86/10/D2



پروفیل در خط مرکزی کانال (سانتی متر)

شکل ۴- مقایسه پروفیل در خط مرکزی کانال و میانگین سه پروفیل برداشت شده در عرض کانال



شکل ۵- طرحواره حفرة آبشستگی و طول مشخصه B_w

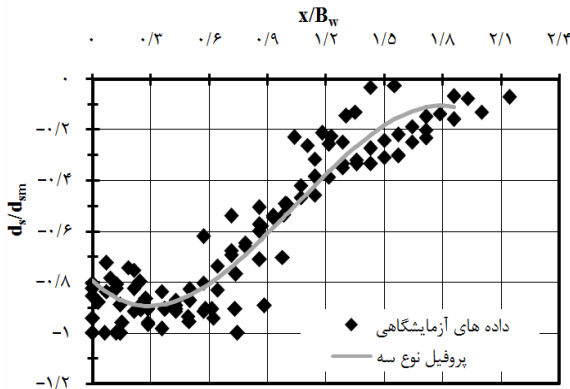
برای بررسی دقیق‌تر مساله، پروفیل‌های حفرة آبشستگی به سه نوع تقسیم شدند. البته با توجه به تغییرات عرضی پروفیل آبشستگی ممکن است برای پروفیل بستر در پایان هر آزمایش، بیش از یک نوع پروفیل وجود داشته باشد. انواع مختلف پروفیل در خط مرکزی کانال بر اساس نتایج تحقیق حاضر در شکل (۶) آورده شده‌اند.

پروفیل نوع یک

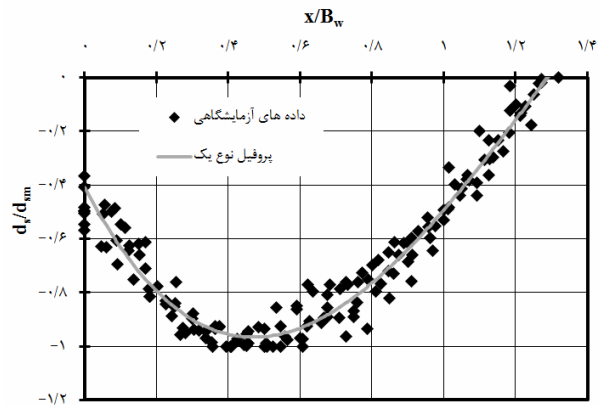
با بررسی پروفیل‌های آبشستگی رسوبات چسبنده در حالت تعادلی مشخص شد که چنانچه میزان رس کمتر از ۱۵ درصد باشد، پروفیل حفرة آبشستگی، شکلی گرد مانند دارد که تحت عنوان پروفیل نوع یک معرفی می‌شود و در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. برای پروفیل نوع یک، رابطه‌ای به شکل چندجمله‌ای درجه سه به صورت زیر بدست آمد:

$$\frac{d_s}{d_{sm}} = a + b\left(\frac{x}{B_w}\right) + c\left(\frac{x}{B_w}\right)^2 + d\left(\frac{x}{B_w}\right)^3 \quad (2)$$

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده در تحقیق حاضر، در این رابطه، d_{sm} عمق آبشستگی در فاصله x از انتهای کفبند، حداکثر عمق آبشستگی و ثابت‌های a, b, c, d به ترتیب برابر هستند با $0.0409, -2/56, 3/32$ و -0.1841 و ضریب همبستگی این



شکل ۹- پروفیل بی بعد نوع سه



شکل ۷- پروفیل بی بعد نوع یک

کف حفره آبستگي در اين نوع پروفيل مانند يك خط مورب است و حفره حاصله را مي توان با يك مثلث قائم الزاويه كه راس آن در انتهاي كفبند قرار دارد تقريب زد. گسترش طولی حفره آبستگي در اين نوع پروفيل از دو نوع قبلی بیشتر است، بگونه ای که نقطه انتهایی حفره تقریباً در فاصله دو برابر B_w از كفبند قرار دارد. با آزمودن منحنی های مختلف مشخص شد که رابطه درجه سه به شکل رابطه (۳) با ثابت های a, b, c, d به ترتیب برابر $-0.720, -0.795, -0.464$ و ضریب همبستگی $R^2 = 0.91$ ، برازش مناسبی بر داده های آزمایشگاهی مربوط به پروفیل نوع سه دارد. شکل (۹) این نوع پروفیل را نشان می دهد که رابطه مربوطه نیز در کنار آن رسم شده است. لازم به ذکر است که رابطه ذکر شده به ازای $x/B_w \leq 1/9$ صادق است. از آنجا که مقدار پارامتر B_w نیز در روابط بدست آمده در این تحقیق برای تعیین پروفیل های بی بعد آبستگي در رسوبات چسبنده مجهول است، سعی شد تا با استفاده از آنالیز ابعادی، ارتباطی بین B_w و پارامترهای بدون بعد ایجاد شود.

با آزمودن پارامترهای مختلف و ترکیب های مختلف آنها، نهایتاً برازش مناسبی بین B_w و پارامتر $\chi = F_0/C_c$ که عدد فرود ذره و C_c نسبت رس موجود در ترکیب خاک است، مشاهده شد. بر این اساس، مقدار B_w را می توان از رابطه زیر که با استفاده از یافته های تحقیق حاضر (شکل ۱۰) حاصل شده است محاسبه کرد:

$$\frac{B_w}{y_1} = a_1 \cdot \left(\frac{\chi - \chi_c}{\chi_c} \right)^{b_1} \quad (3)$$

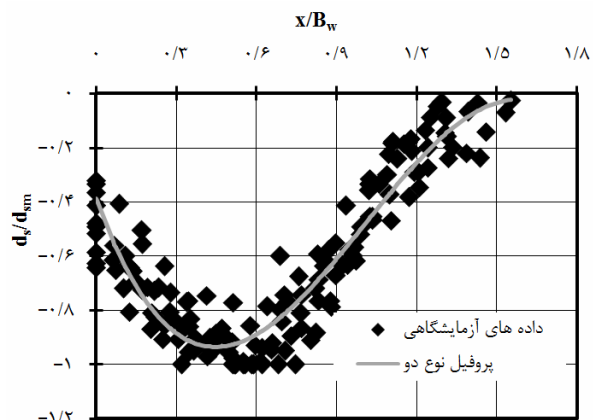
در این رابطه ثابت های a_1 و b_1 به ترتیب عبارتند از $3/281$ و 0.813 و ضریب همبستگی آن نیز $R^2 = 0.93$

پروفیل نوع دو

با افزایش میزان رس، شکل پروفیل با نوع یک متفاوت می شود و پروفیل نوع دو به صورت V-شکل ایجاد می شود که حداکثر عمق آبستگي در راس V قرار می گیرد. همانطور که از شکل (۶-ب) مشخص است، قسمت انتهایی حفره آبستگي در این نوع پروفیل با پروفیل نوع یک متفاوت است. به عبارت دیگر گسترش طولی حفره در این نوع پروفیل از پروفیل نوع یک بیشتر است. مشابه پروفیل نوع یک، در پروفیل نوع دو هم چند جمله ای درجه سه به صورت رابطه (۳) برازش مناسبی بر داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. برای پروفیل نوع دو، ثابت های a, b, c, d به ترتیب برابر هستند با $-0.389, -2/70, 3/89$ و $-1/29$ و ضریب همبستگی این رابطه نیز $R^2 = 0.94$ می باشد. رابطه مربوط به پروفیل نوع دو در شکل (۸) همراه با داده های آزمایشگاهی مربوطه ترسیم شده است.

پروفیل نوع سه

پروفیل نوع سه زمانی شکل می گیرد که حفاصل انتهایی كفبند تا نقطه حداکثر عمق آبستگي، توسط جریان شسته شده و به پایین دست منتقل گردد (شکل ۶-ج).



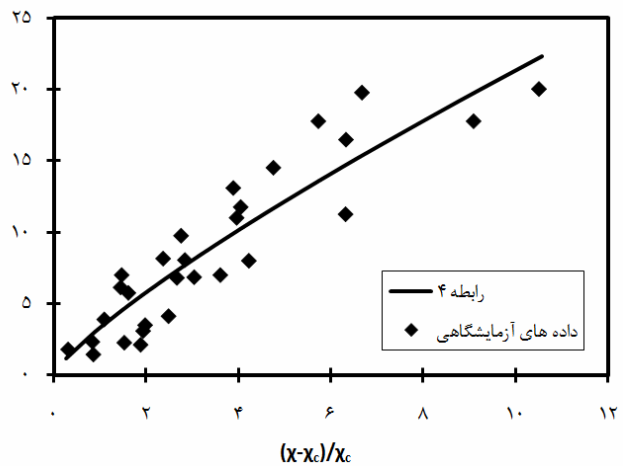
شکل ۸- پروفیل بی بعد نوع دو

می‌باشد. پارامتر χ_c مقدار بحرانی برای χ است که به ازای آن هیچ فرسایشی رخ نمی‌دهد و برای $\chi > \chi_c$ ذرات بستر شروع به حرکت می‌کنند (حمیدی‌فر، ۱۳۸۸). لازم به ذکر است که رابطه ارائه شده برای محاسبه B_w به ازای یک عمق پایاب ثابت ۲۰ سانتی‌متر $T_w/y_1=10$ است که T_w عمق پایاب و y_1 بازشدگی دریاچه است) می‌باشد و برای سایر مقادیر عمق پایاب می‌توان از شکل (۱۱) برای تعیین B_w استفاده کرد.

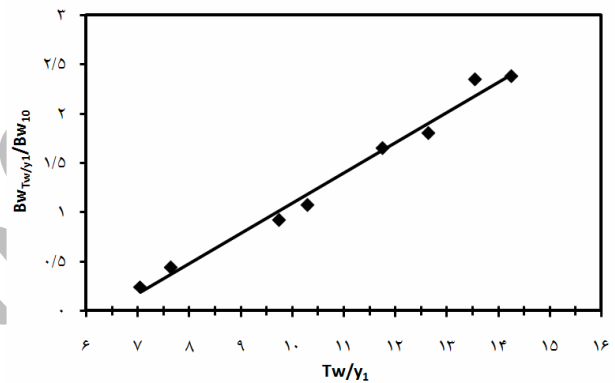
برای ارائه یک رابطه کاربردی که بتوان در شرایط مختلف جریان و مقادیر متفاوت رس در ترکیب خاک از آن استفاده کرد و شکل حفره آب‌سستگی را پیش‌بینی کرد، تمامی داده‌های حاصل از آزمایش‌های تحقیق حاضر در شکل (۱۲) ترسیم شده‌اند. بر اساس این شکل رابطه (۵) با ضریب همبستگی $R^2 = 0.91$ زیر بر داده‌ها برازش داده شد.

$$Y = \frac{a_2 + b_2 X}{1 + c_2 X + d_2 X^2} \quad (4)$$

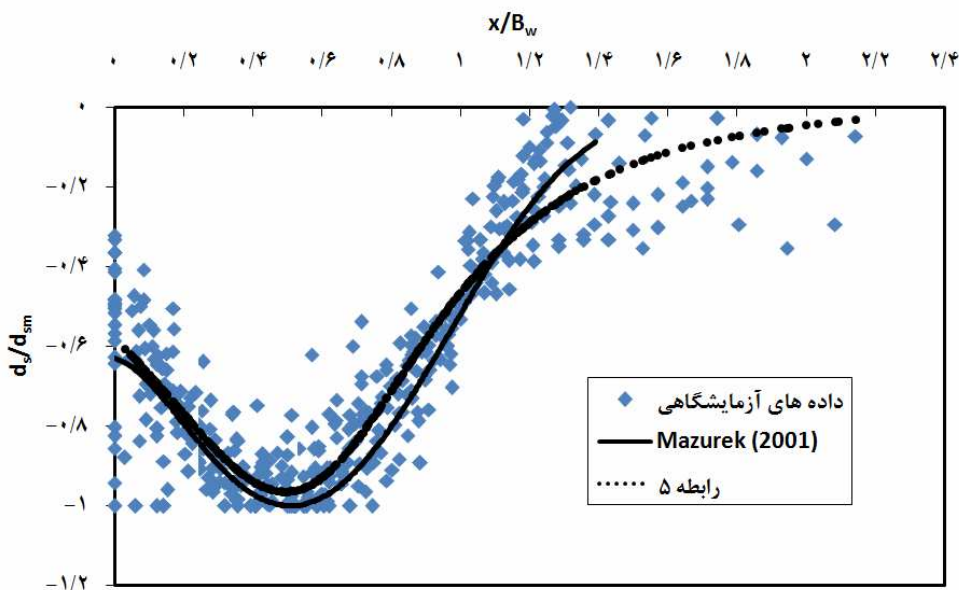
که در این رابطه، $Y = d_s/d_{sm}$ و $X = x/B_w$ و ثابت-های a_2 ، b_2 ، c_2 و d_2 به ترتیب برابر هستند با ۰/۵۷۹، ۰/۲۰۱، ۰/۱۸۲۷ و ۱/۶۳۸.



شکل ۱۰ - تغییرات B_w/y_1 بر حسب پارامتر $(\chi - \chi_c)/\chi_c$



شکل ۱۱ - پارامتر B_w/y_1 به ازای مقادیر متفاوت عمق پایاب



شکل ۱۲ - مقایسه پروفیل کلی ارائه شده در تحقیق حاضر و نتایج تحقیقات پیشین

مراجع

- حمیدی فر، ح. (۱۳۸۸). بررسی تاثیر چسبندگی بر آبشستگی موضعی بستر ناشی از جت افقی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- امید، م. ح.، حمیدی فر، ح. و رئیس، ع. (۱۳۸۸). بررسی تاثیر عمق پایاب بر هندسه گودال آبشستگی در پائین دست کف بند. DVD مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، ۲۳-۲۱ اردیبهشت.
- علیحسینی، پ.، ابراهیمی، ک.، صانعی، م. و مشعل، م. (۱۳۸۷). بررسی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی، CD مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعتی آب و برق، تهران، ۲۳-۲۱ آبان.
- موسوی خندان، ا. (۱۳۷۹). بررسی پروفیل آبشستگی پایین دست پرش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- Abt, S. and Ruff, J. (1982). Estimating Culvert Scour in Cohesive Material. *Journal of Hydraulic Division*, 108(HY1), 25-34.
- Ansari, S., Kothiyari, C. and Ranga Raju, K. (2003). Influence of Cohesion on Scour under Submerged Circular Vertical Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 12, 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, 138-150.
- Dargahi, B. (2003). Scour Development Downstream of a Spillway. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 4, 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, 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, 42-53.
- Farhoudi, J. and Smith, K. (1985). Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 23, No. 4, 343-359.
- Faruque M.A.A., Sarathi P. and Balachandar R. (2006). Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 6, 575-580.
- Kells, J., Balachandar, R. and Hagel, K. (2001). Effect of Grain size on Local Channel Scour below a Sluice Gate. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, 440-451.
- Kuti, E. and Yen, C. (1976). Scouring of Cohesive

همچنین رابطه به فرم چند جمله ای درجه پنج نیز که توسط Mazurek (2001) و برای یک میزان رس ثابت ارائه شده است در این نمودار ترسیم شده است. انطباق مناسب این رابطه و داده های تحقیق حاضر نشان می دهد که پارامتر B_w اثر بسیاری از پارامترها از قبیل طول کف بند و میزان رس را در بر می گیرد. زیرا آزمایش های (Mazurek 2001) در شرایط بدون کف بند و به ازای یک میزان رس ثابت انجام شده است.

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، تشابه هندسی پروفیل های حفره آبشستگی رسوبات چسبنده در پایین دست یک کف بند صلب، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. هفت ترکیب رسوبات بستر با درصد های مختلف رس از صفر تا ۴۰ درصد به صورت مصنوعی آماده و در آزمایش ها استفاده شدند. با انجام چند آزمایش مقدماتی مشخص شد که پروفیل حفره آبشستگی در عرض کانال متغیر بوده و میزان آبشستگی در نزدیکی دیواره ها بیشتر است؛ اما در هر حال پروفیل خط مرکزی کانال می تواند به عنوان شاخص مناسبی برای توصیف شکل حفره آبشستگی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج نشان می دهد که برخلاف آزمایش های رسوبات غیر چسبنده که در آنها شکل نهایی حفره آبشستگی را می توان بر حسب یک منحنی منفرد ارائه کرد، در رسوبات چسبنده امکان شکل گیری انواع مختلفی از پروفیل در انتهای آزمایش وجود دارد. بر این اساس مشخص شد که بر حسب شرایط هیدرولیکی جریان و ترکیب رسوبات بستر، یکی از سه نوع مختلف پروفیل معرفی شده در این تحقیق ممکن است شکل بگیرد و روابط و نمودارهای جدیدی برای تعیین شکل نهایی پروفیل حفره آبشستگی در هر حالت ارائه شد. همچنین نموداری بر حسب پارامترهای بدون بعد برای در نظر گرفتن تاثیر عمق پایاب بر روی شکل نهایی بستر ارائه گردید. با این وجود، هنوز هم امکان تشخیص دقیق نوع پروفیل بر اساس دانش موجود میسر نیست و تحقیقات بیشتری در این زمینه بایستی انجام شود. در نهایت رابطه بدون بعدی برای پیش بینی شکل حفره آبشستگی به ازای مقادیر مختلف رس و شرایط مختلف جریان ارائه گردید. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده را برای مواردی که خارج از دامنه شرایط انجام این تحقیق است بایستی با احتیاط بکار برد، زیرا هر نوع خاک چسبنده رفتار مخصوص به خود را دارد.

- Minerals. Oxford University Press, p.333.
- Nik Hassan, N. and Narayanan, R. (1985). Local Scour Downstream of an Apron. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 11, 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), 19-43.
- Partheniades, E. (2007). *Engineering Properties and Hydraulic Behavior of Cohesive Sediments*. CRC Press, Taylor and Francis Group, p.338.
- Rajaraman, N. and Macdougall, R. (1983). Erosion by Plane Wall Jets with Minimum Tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 7, 1061-1064.
- Sarathi P, Faruque M.A.A. and Balachandar R. (2008). Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 2, 158-175.
- Soils. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 14, No. 3, 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, 179-197.
- Lim, S. and Yu, G. (2002). Scouring Downstream of Sluice Gate. First International Conference on Scour of Foundation, Texas Transportation Institute, Nov. 17-20, Texas A & M University, College Station, Texas, USA.
- Mazurek, K. (2001). Scour of Clay by Jets. PhD Thesis in Water Resources Engineering, University of Alberta, Canada. p. 313.
- Mohammed T.A., Noor M.J., Huat B.K. and Yunis T.S. (2004). Effect of curvature and end sill angle on local scouring at downstream of a spillway. *International journal of engineering and technology*, Vol. 1, No. 1, 96-101.
- Moore, D. and Reynolds, R. (1989). X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay

تاریخ دریافت: ۸۸/۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۲۹

Archive of SID

Scour Hole Profiles in Cohesive Beds Downstream of Sluice Gates

H. Hamidifar¹, M.H. Omid^{2*}

Abstract

In this paper, the geometrical similarity of scour holes downstream of a sluice gate is studied experimentally. Although, nowadays a comprehensive understanding on scour of noncohesive sediments is attained, because of the complex nature of clay minerals, the scour of cohesive sediments has received less attention. 36 experiments with 12 hours run time, was carried out in a rectangular flume of 9 m length, 0.6 m height and 0.5 m width. Six mixtures of cohesive and noncohesive sediments with different fractions of clay minerals ranging from 10 to 40 percent were tested. The results show that the scour profiles are nonuniform across the flume width. Despite the noncohesive sediments, the scour hole in cohesive beds could not be introduced as a unique equation. Therefore, three different types of scour holes are distinguished and in each case, graphs and equations are presented to determine the shape of the hole. Also, a novel equation is proposed to calculate B_w parameter which is used to nondimensionalize the scour hole. Finally, the effect of tailwater depth is investigated.

Keywords: Scour, Cohesive sediment, Geometrical similarity, Dimensionless profile

Archive of SID

1- Former Graduate student of Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran

2- Associate Professor, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran

(*-Corresponding Author Email: momid@ut.ac.ir)