

## برآورد نیمرخ آبخستگی در پایین دست دریچه با وجود بستر چسبنده

فرهاد شیوا\*<sup>۱</sup>، جلال عطاری<sup>۲</sup> و مجتبی صانعی<sup>۳</sup>

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۲

### چکیده

آبخستگی 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 آبخستگی موضعی را بیش از واقعیت برآورد نموده و هزینه‌های گزافی را به طرح تحمیل می‌کند. بر اساس این تحقیقات، میزان و نوع رس بر آبخستگی بستر چسبنده بسیار موثر می‌باشد. در مقاله حاضر، آبخستگی موضعی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی قائم در شرایط وجود مصالح چسبنده در بستر فرسایش‌پذیر به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. در ابتدا عوامل اصلی موثر بر این پدیده شناسایی و رس بنتونیت به عنوان 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 آبخستگی کاهش چشمگیری می‌یابد. به نحوی که در شرایط وجود ۲۰ درصد رس بنتونیت در بستر به طور متوسط ۷۶ درصد کاهش در بیشینه عمق آبخستگی نسبت به مصالح غیرچسبنده رخ می‌دهد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، یک رابطه کلی ارائه شد که قابلیت برآورد بیشینه عمق آبخستگی 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 آبخستگی سنجیده و با رابطه محقق پیشین مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر در قالب دو نوع نیمرخ برای حفره آبخستگی تعریف شد که با روابط قبلی تطبیق نسبتاً مناسبی را نشان داد.

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

### مقدمه

مورد اثرات آبخستگی 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

آبخستگی موضعی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به وجود می‌آید (Raudkivi و Breusers, ۱۹۹۱). تحقیق و مطالعه در

ماسه باشد، نیز به کار می‌رود (Partheniades, ۲۰۰۷). کانی‌های رسی باعث می‌شوند، دانه‌های رسوب در حالت معلق بودن، به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر یا فلوک<sup>۱</sup> بدهند که به این فرآیند به اصطلاح فلوکوله شدن<sup>۲</sup> 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 به ترتیب 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 به دست 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 پایین دست 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

زیادی برای کنترل و جلوگیری از تخریب ناشی از آبشستگی موضعی در پایین دست 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 به سمت پایین دست 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

<sup>1</sup> Flocc

<sup>2</sup> Flocculate

نوع خاک به طور 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)<sup>۱</sup>، خواص شیمیایی مایع، چگالی خاک و دما. عواملی که به طور 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 صورتی که 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

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، به طور 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 به عنوان 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). به عنوان 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 پیشنهادی حاصل از نتایج این نوع تحقیقات معمولاً توصیه می‌شود که با توجه به منحصر به فرد بودن خصوصیات هر رسوب چسبنده، آزمایش‌ها بر روی یک

<sup>1</sup> Plasticity Index

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 به عنوان سیال فرسایش دهنده استفاده شد، خواص شیمیایی آب ثابت و از عامل SAR صرف نظر شد. دمای آب در تمامی آزمایشها نسبتا ثابت بوده و لذا اثر این عامل در نظر گرفته نشد. به علت آنکه در تمامی آزمایشها تغییرات pH آب ناچیز بود، از این عامل هم صرف نظر شد. به منظور بیان تاثیر چسبندگی از عامل  $C_C$  استفاده شد که بیانگر درصد رس موجود در نمونه مورد آزمایش بوده و در شرایط آزمایشگاه قابل اندازه گیری است. لذا از عامل  $C$  صرف نظر شد. برای بیان بهتر اثر اعماق آب در بالادست و پایین دست دریچه و پایاب، عوامل  $Y_1$ ،  $ht$  و  $Y_u$  مدنظر قرار گرفتند. با توجه به موارد فوق، رابطه (۱) را می توان بصورت زیر خلاصه نمود.

$$f_1(Y_u, h_p, Y_1, Y_G, g, \mu, \rho, \rho_s, d_{50}, V_j, C_C, \Phi) = 0 \quad (2)$$

برای تحلیل ابعادی از روش پای باکینگهام استفاده شد. با انتخاب عوامل  $V_j$ ،  $\rho$  و  $Y_G$  به عنوان متغیرهای تکراری در هر یک از نسبتهای بدون بعد و پس از انجام تحلیل ابعادی، رابطه (۳) به دست می آید.

$$f_1\left(\frac{ht}{Y_G}, \frac{Y_u}{Y_G}, \frac{Y_1}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, \frac{\rho}{\rho_s - \rho}, \frac{V_j}{\sqrt{gY_G}}, \frac{\rho V_j Y_G}{\mu}, C_C, \frac{\Phi}{Y_G}\right) = 0 \quad (3)$$

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

$$F_0 = \frac{V_j}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g d_{50}}} \quad (4)$$

که در آن،  $F_0$  همان عدد فرود ذرات می باشد. 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 می شود. لذا رابطه (۴) به صورت زیر ساده می شود.

$$f_1\left(\frac{ht}{Y_G}, \frac{Y_u}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, R_e, C_C, \frac{\Phi}{Y_G}\right) = 0 \quad (5)$$

با توجه به این که تغییرات عوامل  $R_e$  و  $\frac{Y_u}{Y_G}$  در نتایج آزمایش تاثیر ناچیزی داشتند، از آنها صرف نظر و رابطه نهایی (۶) پیشنهاد می شود.

$$\frac{\Phi}{Y_G} = \left(\frac{ht}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, C_C\right) \quad (6)$$

با استفاده از داده های آزمایشگاهی می توان ارتباط بین عوامل بی بعد به دست آمده در رابطه (۶) و ابعاد

افزایش ضخامت لایه مضاعف شده و از طرفی باعث کاهش سطح پتانسیل و ثابت دی الکتریک سیال فرسایش دهنده خواهد شد، در نتیجه تاثیر دما بر نرخ فرسایش به طور واضح مشخص نیست.

صرف نظر از ویژگی های خاک های چسبنده، عوامل موثر در پدیده آبهستگی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی قائم را می توان به صورت 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 بیان کننده خواص سیال: جرم مخصوص آب ( $\rho$ )، شتاب ثقل زمین ( $g$ ) و لزجت سینماتیک سیال ( $\nu$ )؛ ۴- عوامل ذرات بستر: قطر متوسط ذرات ( $d_{50}$ )، جرم مخصوص ذره ( $\rho_s$ )، وزن مخصوص رسوبات ( $s$ )، ضریب چسبندگی ( $C$ )، زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ )، انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ )، درصد رس موجود در بستر فرسایش پذیر ( $C_C$ )؛ ۵- عوامل جت افقی: سرعت جت ( $V_j$ )، ضخامت جت ( $Y_G$ ) و عرض جت ( $b$ ).

با توجه به عوامل موثر در آبهستگی مصالح چسبنده که بیان شد، می توان تابع  $f_1$  را (با توجه به شاخص  $\Phi$  که بیانگر ابعاد پروفیل آبهستگی می باشد) به صورت زیر تعریف نمود.

$$f_1(B, S_0, Q, U, Y_u, h_p, Y_1, g, \rho, \rho_s, \mu, \nu, d_{50}, C, \phi, \sigma_g, V_j, Y_G, b, t, C_C, T, pH, A, SAR, \Phi) = 0 \quad (1)$$

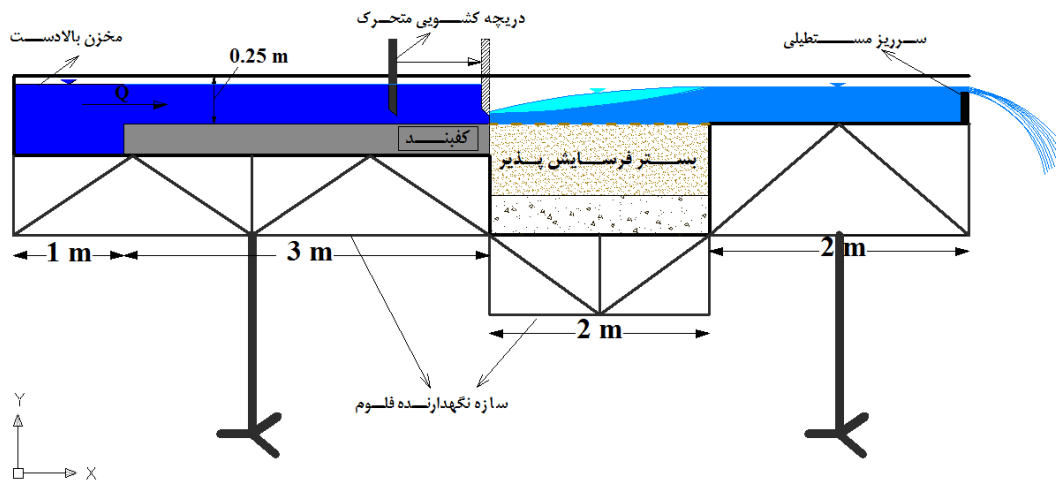
به علت ثابت بودن عرض کانال و همچنین، عرض دریچه کشویی، عوامل  $B$  و  $b$  ثابت فرض می شوند. به منظور سهولت در رسیدن به اهداف تحقیق، کانال افقی فرض شده و از عامل شیب کانال ( $S_0$ ) صرف نظر شد. به علت ثابت بودن دبی در تمام آزمایشها از عوامل  $Q$  صرف نظر شد. به دلیل ثابت بودن خواص سیال از عامل لزجت سینماتیک سیال ( $\nu$ ) صرف نظر شد. به دلیل ثابت بودن جنس ذرات بستر عامل  $\phi$  نادیده گرفته شد. غیریکنواختی ذرات بستر ( $\sigma_g$ ) مد نظر قرار نگرفت. از رس تحکیم نیافته استفاده شد. زمان به تعادل رسیدن حفره آبهستگی برای تمامی آزمایشها ثابت در نظر گرفته شد، لذا از عامل  $t$  صرف

پروفیل آبشستگی مانند  $D_{Se}$  (بیشینه عمق آبشستگی در زمان تعادل نسبی) را به دست آورد.

### مواد و روش‌ها

به منظور 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 به منظور 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 قائم نصب شد که جت افقی را ایجاد می‌کرد. این جت با عبور از روی بستر فرسایش پذیر 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

رس، این مصالح به مدت 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).

مصالح مورد استفاده ماسه سیلیسی (مصالح غیرچسبنده) با قطر متوسط ذرات یک میلی‌متر به عنوان مبنا و رس بنتونیت (با مشخصات مندرج در جدول ۱) به عنوان مصالح چسبنده می‌باشد. برای بررسی تأثیر میزان رس از سه نوع نمونه با درصد چسبندگی‌های متفاوت استفاده شد. به نحوی 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. به منظور انجام واکنش‌های فیزیکوشیمیایی ذرات

جدول ۱- خصوصیات مصالح چسبنده

نوع مصالح	اندیس تورم	pH	استحکام فشاری (psi)	اندیس قابلیت ژلاتینی (%)	گازهای نادر فرار (%)	رطوبت (%)	استحکام کششی (gr.cm <sup>-2</sup> )	میزان مونت موریلونیت (g.ml <sup>-1</sup> )
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 <sub>50</sub> (mm)	σ <sub>g</sub>	نوع مصالح بستر
۱	۲۰	۰/۶۳	۱/۵<<	غیریکنواخت
۲	۱۵	۰/۷	۲/۶	غیریکنواخت
۳	۱۰	۰/۷۵	۲/۲	غیریکنواخت

بحرانی و زیر بحرانی سه لیتر بر ثانیه (ثابت) فرض شد.

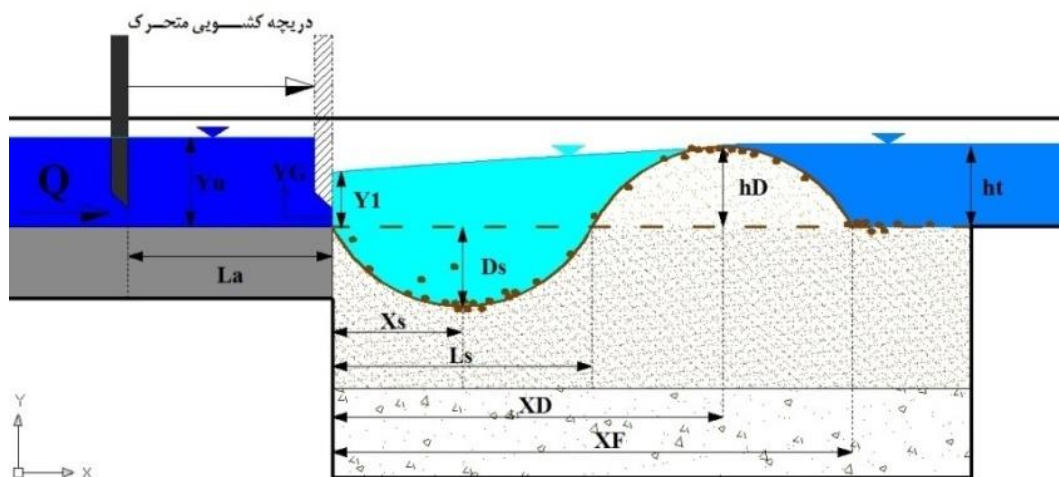
- بازشدگی دریچه ( $Y_G$ ): با توجه به دبی انتخابی و ارتفاع دیواره‌های فلوم برای تامین شرایط لازم مقادیر دو، سه و چهار سانتی‌متر انتخاب شد.

- عمق پایاب ( $h_i$ ): با توجه به بازشدگی دریچه و دبی، مقادیر هفت، ده، 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.

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 به صورت زیر تعیین شدند.

- دبی جریان ( $Q$ ): دبی انتخابی برای آزمایش با توجه به ظرفیت فلوم و تولید جریان فوق بحرانی،



شکل ۲- عوامل پروفیل حفره آبشستگی

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

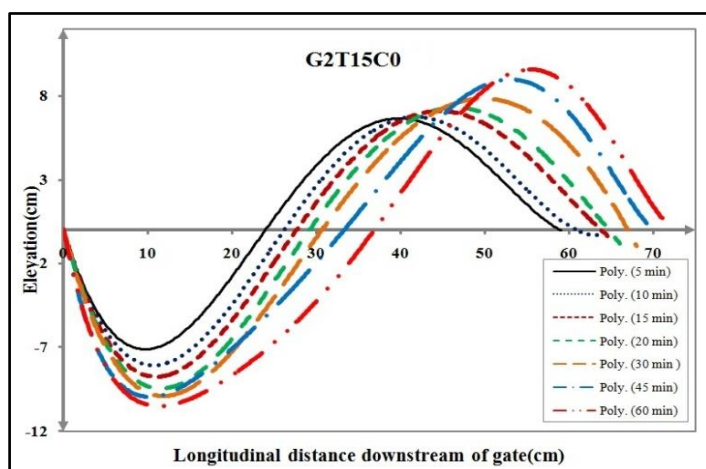
برای تعیین مدت زمان انجام هر آزمایش از نتایج تحقیقات گذشته استفاده شد (Mehboudi, ۲۰۰۹). بر این اساس، در حدود ۸۳ درصد از

بتوان از آن‌ها به‌عنوان مبنایی برای مقایسه با شرایط وجود مصالح چسبنده استفاده نمود. به‌عنوان نمونه، شکل ۳، تغییرات زمانی پروفیل آبخستگی در یک شرایط هیدرولیکی خاص در مصالح غیرچسبنده را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، قسمت اعظم آبخستگی 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 آبخستگی نیز افزایش یافته و ارتفاع سطح آب نسبت به بستر فرسایش‌پذیر بیشتر می‌شود. بنابراین، عمق جریان در محل حفره آبخستگی 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 آبخستگی در هر زمان نسبت به قبل کمتر می‌شود.

همان یک ساعت انتخاب شده و پروفیل زمانی تغییرات آبخستگی 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 آبخستگی 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 دریاچه (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



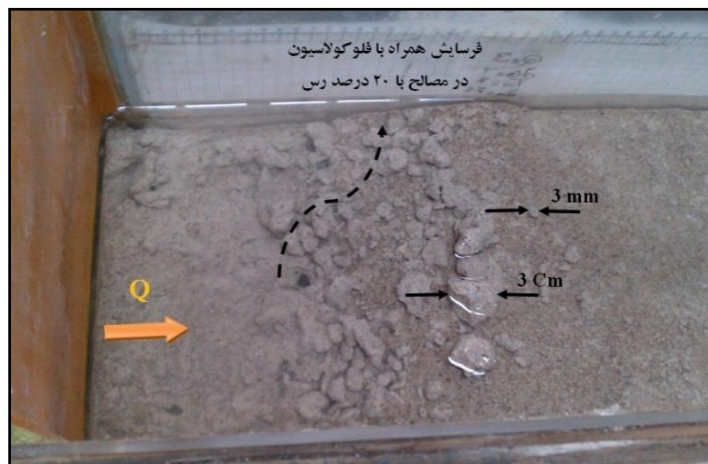
شکل ۳- تغییرات زمانی پروفیل آبخستگی در مصالح غیرچسبنده

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 آبخستگی رخ داد.

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

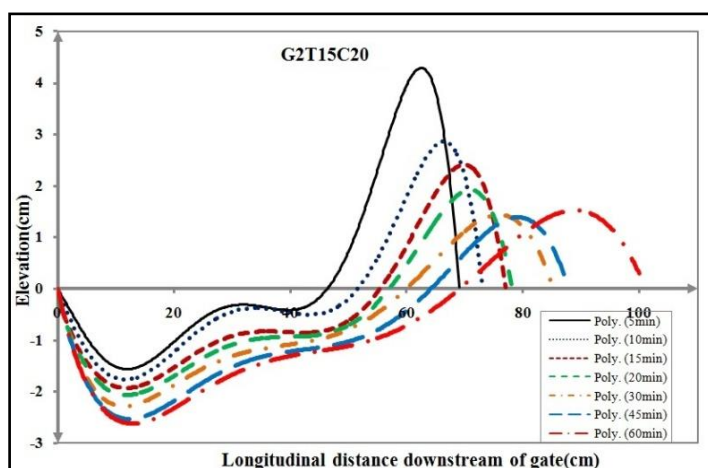




شکل ۴- نحوه فرسایش و فلوکولاسیون در مصالح با ۲۰ درصد رس بنتونیت

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.

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



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

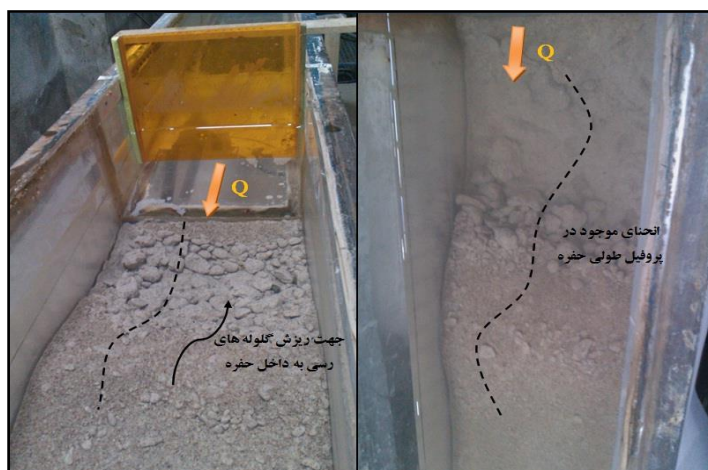
مشابه، کاهش چشم‌گیری می‌یابد. همچنین، قسمت عمده آبشستگی در پنج دقیقه ابتدایی رخ نمی‌دهد. در

مطابق شکل ۵، ابعاد حفره آبشستگی نسبت به مصالح غیرچسبنده (شکل ۳) در شرایط هیدرولیکی



حفره آبستگي جدا شده و بر روی تپه پایین دست انباشته می شوند، اما به دلیل شسته شدن ریزدانه های بین گلوله ها به مرور زمان، این گلوله ها به سمت داخل گودال ریزش کرده و به صورت نامنظم در حفره (مخصوصاً بر روی شیب پایین دست حفره) جمع می شوند. انحنای موجود در شکل ۵ هم ناشی از این پدیده می باشد. در نهایت به مرور زمان از ارتفاع تپه پایین دست کاسته شده تا به شرایط تعادلی برسد. شکل ۶، تشکیل گلوله های رسی و ریزش نامنظم آن ها در حفره آبستگي و ایجاد انحنای در پروفیل طولی را نشان می دهد که در طی آزمایش های تحقیق حاضر برداشت شده است (Shiva و همکاران، ۲۰۱۳b).

واقع مقاومت ناشی از چسبندگی رس بنتونیت در ابتدا زیاد بوده و با گذشت زمان نیروهای بین ذرات شکسته شده و عمق آبستگي زیاد می شود. همچنین، شکل حفره آبستگي نامنظم تر از شرایط مصالح غیرچسبنده می باشد. همچنین، مطابق این شکل برخلاف مصالح غیرچسبنده، با گذشت زمان ارتفاع تپه پایین دست حفره آبستگي تقریباً کاهش می یابد (Shiva و همکاران، ۲۰۱۳a). علت این رفتار را می توان این گونه توجیه نمود که با توجه به چسبندگی زیاد بنتونیت و تورم این مصالح خاصیت فولوکوله شدن ذرات شدید بوده و ذرات به صورت گلوله های پایدار در می آیند. این گلوله ها در ابتدای آزمایش از

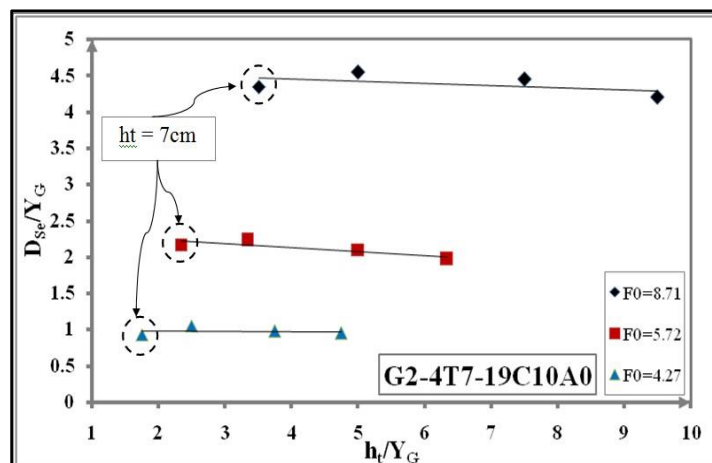


شکل ۶- تشکیل گلوله های رسی و غلتش آن ها به داخل حفره

شکل ۷، اثر عامل  $\frac{h_t}{Y_G}$  را در نمونه ای از آزمایش ها نمایش می دهد. مطابق این شکل با افزایش عامل  $\frac{h_t}{Y_G}$ ،  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  کاهش می یابد. 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 نمی باشد. 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 سانتی متر دیده می شود. 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 می یابد. علت این امر، افزایش سرعت جت خروجی زیر دریچه و به تبع آن افزایش میزان  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  و  $D_{Se}$  می باشد.

برآورد بیشینه عمق آبستگي در زمان تعادل نسبی برای هر تحقیق آزمایشگاهی مربوط به آبستگي موضعی با شرایط حاکم بر آن از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در ادامه در ابتدا تأثیر عوامل بی بعد موثر در  $D_{Se}$  (بیشینه عمق آبستگي در زمان تعادل نسبی) به طور مجزا بررسی و سپس روابط بی بعد برای شرایط خاص تحقیق حاضر ارائه می شود. با توجه به تحلیل ابعادی ارائه شده در بخش تئوری تحقیق این مقاله، رابطه کلی برآورد  $D_{Se}$  به کمک عوامل موثر بر آن را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = \left( \frac{h_t}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}, F_0, \frac{L_a}{Y_G}, C_C \right) \quad (7)$$



شکل ۷- تأثیر عامل  $\frac{ht}{Y_G}$  بر  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  در  $F_0$  های متفاوت

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 دریاچه 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  $F_0, C_c, \frac{ht}{Y_G}, \frac{\Delta y}{Y_G}, \frac{d_{50}}{Y_G}$  به صورت زیر بیان نمود.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = a(F_0)\beta\left(\frac{ht}{Y_G}\right)^\gamma\left(\frac{d_{50}}{Y_G}\right)^{\lambda.C_c+\eta} \quad (8)$$

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = a(F_0)\beta\left(\frac{\Delta y}{Y_G}\right)^\gamma\left(\frac{d_{50}}{Y_G}\right)^{\lambda.C_c+\eta} \quad (9)$$

ضرایب ثابت  $a, \beta, \gamma, \eta, \lambda$  را می‌توان با استفاده از روش LSM<sup>1</sup> به نحوی محاسبه نمود که مقادیر عوامل مجهول به گونه‌ای به دست آیند که مجموع مربعات مقدار خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی کمینه شود. این مقدار خطا از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{M_i - C_i}{M_i} \right]^2 \quad (10)$$

$$\%Error = \frac{|M-C|}{M} \times 100 \quad (10-1)$$

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

اثر دوگانه افزایشی-کاهشی عمق پایاب ناشی از مستقل نبودن عمق پایاب در شرایط هیدرولیکی حاکم بر دریاچه است. در صورتی می‌توان عمق پایاب را یک عامل مستقل در آبخستگی 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 دریاچه ( $Y_u$ ) نیز تغییر می‌کند و این بیانگر مستقل نبودن عمق پایاب می‌باشد. همچنین، در صورتی که میزان بازشدگی دریاچه نیز تغییر کند، عمق بالادست دریاچه هم تغییر خواهد کرد که مستقیماً تحت تأثیر عمق پایاب و تغییرات بازشدگی دریاچه قرار می‌گیرد، یا همان عمق استغراق می‌باشد که با اندازه‌گیری آن تأثیر این عامل در آزمایش‌های این تحقیق بررسی شد. در این راستا، عامل  $\Delta y$  که بیانگر اختلاف ارتفاع بین عمق پایاب و عمق استغراق ( $h_t - Y_l$ ) 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 آبخستگی می‌باشد.

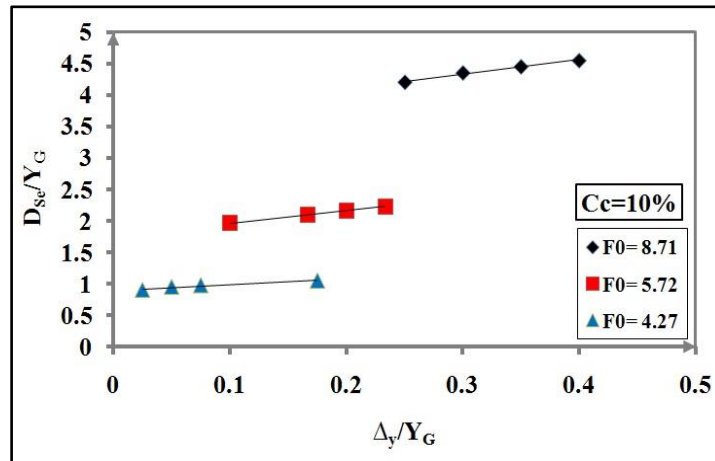
شکل ۹، تأثیر عامل  $C_c$  بر  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  در بازشدگی‌ها و عمق پایاب متفاوت را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل به ازای یک مقدار سرعت جت، با افزایش میزان رس عامل  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علت این امر افزایش نیروی مقاوم مصالح بستر ناشی از چسبندگی رس اضافه شده به بستر می‌باشد. در واقع

<sup>1</sup> Least Square Method

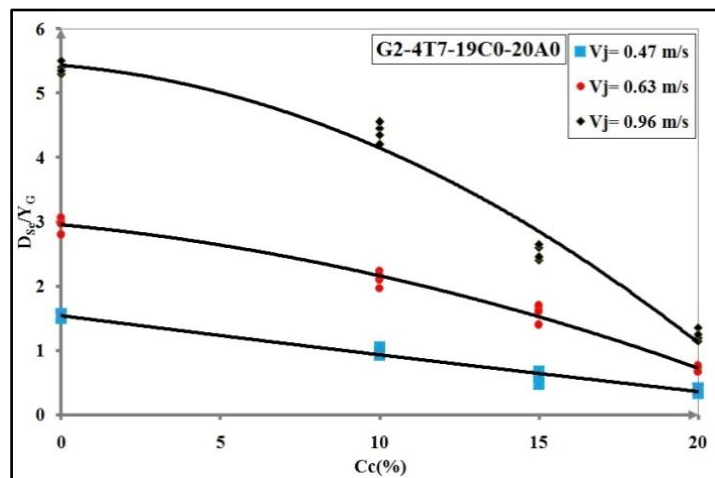
$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 3.5(F_0)^{0.59} \left(\frac{h_t}{Y_G}\right)^{0.32} \left(\frac{d_{50}}{Y_G}\right)^{4.04} C_c + 0.09 \quad (11)$$

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

در آزمایش نام، می‌باشد. به منظور به دست آوردن رابطه‌ای کلی که بیشینه عمق آبستگي 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 به دست آمد.



شکل ۸- تأثیر عامل  $\frac{\Delta_y}{Y_G}$  بر  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  در  $F_0$  های متفاوت و میزان رس ۱۰ درصد



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

جدول ۳- محدوده کاربرد پارامترهای رابطه برآورد بیشینه عمق آبستگي

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

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

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  $\pm 25\%$

که در آن،  $X = \frac{F_0}{C_c}$  و  $X_C = 15.4$  می‌باشد. به‌منظور حساسیت‌سنجی، عوامل موثر در رابطه برآورد پروفیل آبخستگی 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  $\frac{D_{Se}}{Y_G}$  در بازه  $\pm 25\%$ ، 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 آبخستگی 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.

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

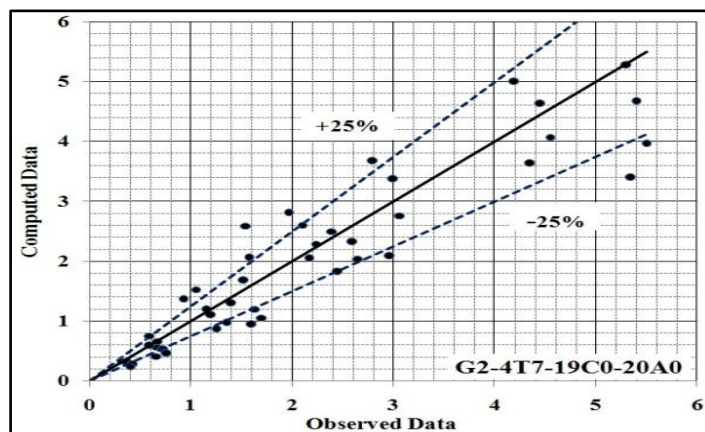
در صورت حذف اثر عامل  $\frac{h_t}{Y_G}$  و استفاده از عامل  $\frac{\Delta y}{Y_G}$  در رابطه برآورد بیشینه عمق آبخستگی (رابطه ۱۱)، رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 2.84 (F_0)^{0.56} \left(\frac{\Delta y}{Y_G}\right)^{0.67} (d_{50})^{4.26} C_c^{-0.43} \quad (12)$$

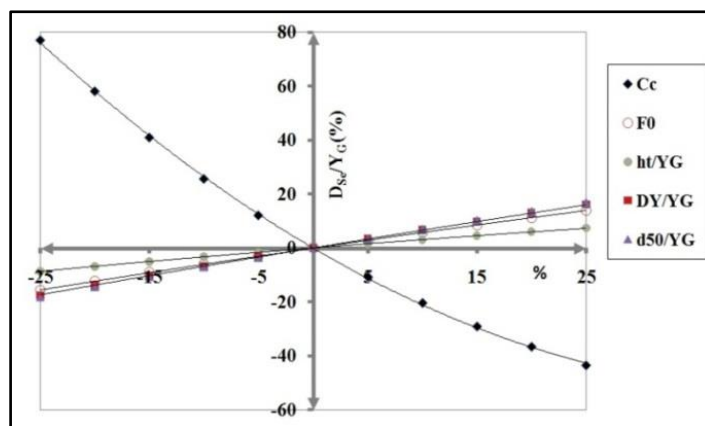
ضریب تعیین رابطه فوق  $R^2=0.90$  و میزان میانگین خطا ۱۹ درصد به‌دست می‌آید که بیان‌گر تأثیر مثبت عامل  $\frac{\Delta y}{Y_G}$  در رابطه برآورد بیشینه عمق آبخستگی می‌باشد.

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 آبخستگی در مصالح چسبنده و هم‌چنین، فعالیت بیشتر رس بنتونیت نسبت به رس کائولین به‌کار رفته در تحقیق مزبور، منطقی به‌نظر می‌رسد.

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = 0.0484 \left[\frac{X-X_C}{X_C}\right]^{0.651} \quad (13)$$



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



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

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 به دست آمد.

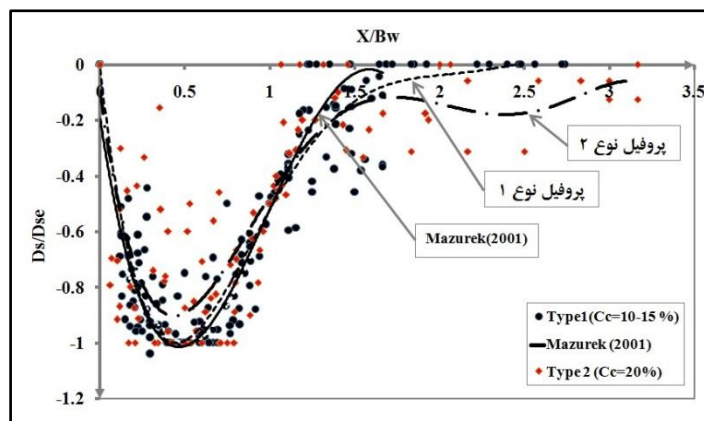
$$\frac{B_w}{Y_G} = 15.14 \left[ \frac{\rho V_l^2 - \lambda_c}{\lambda_c} \right]^{0.56} \quad \lambda_c = 20000pa \quad (14)$$

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 به دست آمده است. حال آن‌که پروفیل Mazurek (۲۰۰۱)، برای ۴۰ درصد رس طبیعی در بستر فرسایش‌پذیر توصیه شده و به این ترتیب تأثیر نوع رس مشهود می‌شود.

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 به دست آمد که در آن ابعاد حفره تغییرات نامحسوس داشته و بیشتر با نامظمی‌ها همراه بود. در واقع این پروفیل نشان‌دهنده آغاز تأثیر 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. به نحوی 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 به صورت U شکل بوده و شیب بالادست و پایین‌دست حفره کمتر نسبت به نوع ۲ بوده و مشابه تحقیق (Mazurek، ۲۰۰۱) می‌توان آن را به صورت صاف و گرد شده به همراه ناهمواری در انتهای آن دانست. تحقیقاتی به‌منظور بی‌بعد کردن پروفیل حفره آبشستگی در انواع مصالح انجام شده است (Mazurek، ۲۰۰۱؛ Alihoseini و همکاران، ۲۰۰۸؛ Hamidifar و

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

عنوان	فرمول	ضریب میانگین تعیین خطا (%)
پروفیل ۱ (با ۱۰٪ رس بنتونیت 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
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
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



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

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.

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

### 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.

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).



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

Farhad Shiva<sup>\*1</sup>, Jalal Attari<sup>2</sup> and Mojtaba Saneie<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, <sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran and <sup>3</sup> 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