



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصد رس بنتونیت موجود در مصالح بر ابعاد حفره آبستگي بعد از دريچه

\*فرشته محمدی خان‌پشتانی<sup>۱</sup>، مسعود کرباسی<sup>۲</sup> و مجتبی صانعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، آستاديار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان،

<sup>۲</sup>دانشيار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخيزداری

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از عمده‌ترین مشکلات سازه‌هایی از قبیل سرریزها، دریچه‌ها و حوضچه‌های آرامش که در بالادست بسترهای فرسایش‌پذیر قرار دارند، آبستگي در مجاورت سازه است که علاوه بر تأثیر مستقیم بر پایداری سازه، ممکن است باعث تغییر مشخصات جریان و در نتیجه تغییر در پارامترهای طراحی سازه شود. اهمیت بررسی پدیده آبستگي زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبستگي قابل ملاحظه باشد به‌گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد. این امر یک مشکل جدی در طراحی‌ها به وجود می‌آورد. اگر حداکثر عمق آبستگي قابل پیش‌بینی نباشد، طراحان سازه‌های هیدرولیکی قادر به ارائه تمهیدات لازم برای کاهش خسارات ناشی از آبستگي نیستند. بررسی دقیق این پدیده نیازمند آزمایش‌های بیشتر و دقیق‌تر است. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی تأثیر درصد کانی رس بنتونیت در میزان و شکل پروفیل مصالح بستر به‌دست آمده از پدیده آبستگي می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** بدین‌منظور ۸۷ آزمون در شرایط مختلف بر روی یک فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. برای بررسی ابعاد حفره ناشی از پدیده آبستگي در پشت دریچه ۲۹ آزمون در شرایط مختلف و دریچه‌های متفاوت به‌عنوان شاهد بر روی مصالح غیرچسبنده ماسه ریزدانه با قطر متوسط ۰/۲۱ میلی‌متر انجام شد. همچنین ۵۸ آزمون بر روی مصالح با چسبندگی ۲، ۵، ۸ و ۲۰ درصد انجام شد. سه دریچه هلال‌دار به قطرهای ۵، ۷/۴۵ و ۱۰/۸۲ سانتی‌متر، با عمق پایاب متفاوت در محدوده ۵ تا ۲۱ سانتی‌متر و چهار بازشدگی ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر، سه دبی در محدوده ۱ تا ۵ لیتر بر ثانیه انجام گردید. برای اندازه‌گیری عمق پایاب از ژرف‌سنج و اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه تیز استاندارد با زاویه ۹۰ درجه استفاده شد.

**یافته‌ها:** با بررسی پروفیل‌های طولی حاصل از پدیده آبستگي مشاهده شد پروفیل‌های بی‌بعد حفره آبستگي و تپه‌های ایجاد شده در سه دریچه هلالی به قطرهای ۵، ۷/۴۵ و ۱۰/۸۲ سانتی‌متر و کشویی ساده، که با گذشت زمان شکل خود را حفظ کرده و تقریباً برهم منطبق‌اند و دارای منحنی‌های متشابه می‌باشند. لازم به ذکر است که در پروفیل‌های آبستگي که بعد از دریچه‌های کشویی هلال‌دار در نسبت عمق پایاب به بازشدگی دریچه کشویی هلال‌دار به اندازه ۳، ۵ و ۹ ایجاد می‌شود تپه ثانویه‌ای در حفره ملاحظه شد ولی در نسبت عمق پایاب به بازشدگی

\* مسئول مکاتبه: [mohamadif1991@gmail.com](mailto:mohamadif1991@gmail.com)

دریچه بیش‌تر از ۱۰ تأثیر هلال به اندازه‌ای کم می‌شود که عملاً پروفیل ایجاد شده همانند پروفیل به‌دست آمده از آبخستگی در پشت دریچه کشویی ساده است و تپه ثانویه مشاهده نگردد. با استفاده از ژرف‌سنج ابعاد حفره برداشت شد و شکل شماتیک از سطح حفره آبخستگی با استفاده از نرم‌افزار surfer ارائه گردید. نتایج نشان دادند با افزودن درصد کانی رس بتونیت ابعاد حفره به‌دست آمده از پدیده آبخستگی کاهش یافته است. با افزایش ۵ درصدی رس بتونیت حداکثر عمق حفره آبخستگی ۸۰ درصد و با افزایش ۸ درصدی رس به مصالح بستر حداکثر عمق حفره آبخستگی به اندازه ۸۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین رابطه بی‌بعد برای پارامترهای مؤثر در پدیده آبخستگی ارائه گردید، خط لگاریتمی برازش داده شده همبستگی نسبتاً خوبی با نقاط اندازه‌گیری شده دارد و دارای ضریب همبستگی ۰/۷۶ می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان دادند که دریچه‌های هلالی تأثیر کمی بر ابعاد حفره آبخستگی دارد و در اکثر حالت‌های بررسی شده در پروفیل آبخستگی در پایین‌دست دریچه‌های هلالی تپه ثانویه دیده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آبخستگی، چسبنده، غیرچسبنده، رس بتونیت، دریچه

#### مقدمه

پی دارد (۸). کورنیاوان ملاحظه نمود که کاهش تنش برشی به مرور زمان منجر به آبخستگی تعادلی می‌شود. هم‌زمان با تغییرات پروفیل گودال آبخستگی، زاویه برخورد جت با بستر نیز تغییر می‌کند به طوری که در عمق تعادلی آبخستگی، با زاویه تقریباً ۲۵ درجه نسبت به افق در گودال منتشر می‌شود (۹). در ارتباط با آبخستگی در مصالح چسبنده، مازور (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 ۴۰ درصد رس، ۵۳ درصد لای و ۷ درصد ماسه ریز پرداخت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تعادل حفره آبخستگی تابع مومنتوم جریان جت، ارتفاع برخورد، ویسکوزیته و دانسیته سیال و تنش برشی بحرانی سیال می‌باشد. چند نوع پروفیل حفره در شرایط مختلف تعریف نمود و در انتها به این نکته اشاره دارد که نتایج به‌دست آمده قابل تعمیم نبوده و باید آزمایش‌ها بر روی خاک‌های مختلف انجام شود (۱۰).

دی و سرکار (۲۰۰۶) تشابه گودال‌های آبخستگی در شرایط مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه

آناندال (۲۰۰۶) بیان داشت که آبخستگی موضعی در رودخانه‌ها ناشی از جت‌های خروجی از سازه‌ها، پدیده مخربی است که باید تا حد لازم کاهش داده شود. در بعضی مواقع ممکن است این پدیده به تخریب سازه‌های زیر بنایی منجر شده و وقایع جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد (۱). اهمیت بررسی پدیده آبخستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبخستگی قابل ملاحظه باشد به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد. روشی که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبخستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشد (۵). بروزر (۱۹۹۱) اعلام کرد آبخستگی بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به وجود می‌آید (۲). کلز و همکاران (۲۰۰۱) مشاهده کردند، باگذشت زمان آبخستگی مصالح بستر باعث افزایش عمق و در نتیجه کاهش تنش برشی می‌شود که کاهش میزان آبخستگی را در

رسیدند که تغییرات زمانی عمق آبستگي به صورت رابطه نمایی است. این پژوهشگران همچنین مشاهده کردند که در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آبستگي مستقل از عدد فرود ذره است (۳). پارتینادز (۲۰۰۷) نشان داد، نرخ آبستگي در خاک‌های چسبنده می‌تواند تا ۱۰۰۰ برابر کم‌تر از خاک‌های بدون چسبندگی باشد (۱۱). در گذشته، محاسبات آبستگي در خاک‌های چسبنده بر اساس روش‌هایی که برای خاک‌های غیرچسبنده توسعه داده شده صورت می‌گرفت. اگرچه این کار ضریب اطمینان بسیار بالایی را ایجاد می‌کند، اما از دید اقتصادی، تحمیل هزینه زیادی را سبب می‌شود. جین و کوتیاری (۲۰۰۸) نشان دادند که افزایش درصد نیروهای بین‌ذره‌ای درون خاک، باعث افزایش تنش برشی بحرانی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌شود (۶).

گل (۲۰۱۰) بیان داشت که آبستگي در پشت دریچه به دبی و عمق پایاب و همچنین به شرایط جریان در طرف دیگر دریچه و زیر دریچه و میزان بازشدگی آن بستگی دارد. او بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی نشان داد حداکثر عمق آبستگي، میزان و حجم آبستگي و حجم رسوب آبستگي به میزان دبی عبوری، عمق پایاب و ... حساس می‌باشند (۴). حمیدی‌فر و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده کردند که در طول توسعه گودال آبستگي، یک جریان برگشتی درون حفره ایجاد می‌شود که رسوبات را به سمت بالادست جابه‌جا می‌کند. این جریان برگشتی هنگام برخورد با دیواره عمودی کفبند، رسوبات را از این ناحیه جدا کرده و منجر به از بین رفتن پوشش خاکی و آشکار شدن دیواره می‌شود که می‌تواند پایداری سازه را با خطر مواجه کند (۷). شیوا و همکاران (۲۰۱۳) ۱۲ آزمایش در شرایط هیدرولیکی مختلف با مصالح غیرچسبنده انجام دادند، آن‌ها

مشاهده کردند با گذشت زمان تا رسیدن به زمان تعادلی نسبی، روند افزایش عمق حفره کاهش می‌یابد. علت این امر را این‌گونه توجیه نمودند که با گذشت زمان حفره آبستگي نیز افزایش یافته و ارتفاع سطح آب نسبت به بستر فرسایش‌پذیر بیش‌تر می‌شود. بنابراین عمق جریان در محل حفره آبستگي 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 آبستگي در هر زمان نسبت به قبل کم‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین چگونگی تأثیر طول‌های مختلف کفبند بر آبستگي موضعی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی قائم در مصالح چسبنده (رس بتونیت) را مطالعه و با مصالح غیرچسبنده مقایسه و بررسی کردند. برای این منظور آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با استفاده از رس بتونیت، با نسبت اختلاط مصالح غیرچسبنده ۲۰ درصد انجام گردید. آن‌ها مشاهده کردند با گذشت زمان ابعاد پروفیل آبستگي افزایش یافته ولی نرخ افزایش آن کاهش می‌یابد. علت این امر را این‌گونه توجیه نمودند که با افزایش عمق جریان در حفره آبستگي، طبق قانون پیوستگی از سرعت جریان کاسته شده و در نتیجه تنش برشی کاهش می‌یابد. این مکانیسم موجب کاهش نرخ آبستگي با گذشت زمان می‌گردد که مشابه آبستگي در مصالح غیرچسبنده می‌باشد (۱۲).

پژوهش‌های زیادی در زمینه آبستگي مصالح رسوبی غیرچسبنده انجام شده، اما به علت طبیعت پیچیده رس، آبستگي در مصالح چسبنده و تأثیر شکل دریچه بر میزان پدیده آبستگي چندان مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصد کانی رس بتونیت

انجام شد. فلوم آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شد. دیواره‌ها و کف این فلوم از جنس شیشه شفاف بوده و حداکثر دبی عبوری از آن ۷ لیتر بر ثانیه می‌باشد. در انتهای فلوم تیغه‌هایی با ارتفاع قابل تنظیم به منظور کنترل عمق پایاب قرار دارد. برای اندازه‌گیری عمق پایاب از ژرف‌سنج و اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه تیز استاندارد با زاویه ۹۰ درجه استفاده شد.

و دریچه‌های کشویی ساده و هلالی بر ابعاد حفره ایجاد شده بر اثر پدیده آبستگي پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های این پژوهش، آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (وزارت جهاد کشاورزی) در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها در فلوم شیب‌پذیر به طول ۸ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۲۸ سانتی‌متر با شیب ۰/۰۰۰۷

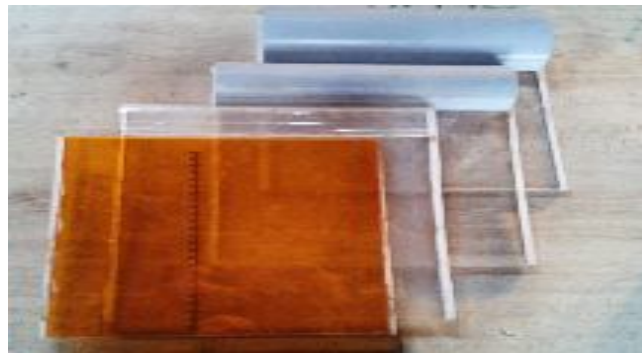


شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی.

Figure 1. Laboratory flume.

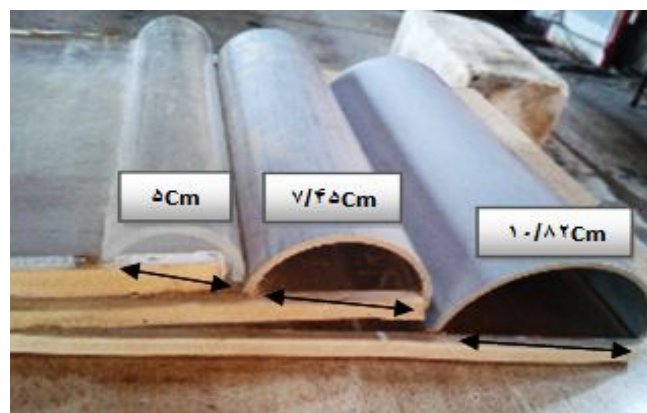
است. شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده دریچه‌های مورد بررسی می‌باشد. نمودارهای مختلف حاصل از پروفیل دوبعدی ترسیم گردید و بعد از بی‌بعدسازی پارامترهای آبستگي، تأثیر قوس لبه دریچه و پارامترهای مختلف همانند تأثیر عمق بالادست و عمق پایاب عدد فرود، عدد رینولدز، میزان بازشدگی دریچه‌ها و دبی جریان عبوری کانال و درصد رس بررسی شد. لازم به ذکر است که برای بررسی ابعاد حفره ناشی از پدیده آبستگي در پشت دریچه ۲۹ آزمون در شرایط مختلف و دریچه‌های متفاوت به‌عنوان شاهد بر روی مصالح غیرچسبنده ماسه ریزدانه با قطر متوسط ۰/۲۱ میلی‌متر و همچنین ۵۸ آزمون بر روی مصالح با چسبندگی ۲، ۵، ۸ و ۲۰ درصد انجام گردید.

در فلوم مورد نظر یک دریچه کشویی قائم ساده به‌عنوان شاهد نصب شد و از طریق چهار بازشدگی ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری جت افقی ایجاد می‌گردید. پروفیل‌های طولی آبستگي در حالت طبیعی بدون اعمال کف‌بند بررسی گشت. با استفاده از کاغذ شفاف و کاغذ کالک که به بدنه فلوم چسبانده شد. پروفیل‌ها در زمان‌های مختلف برداشت گردید. با توجه به این‌که حداکثر مقدار عمق آبستگي در پژوهش حاضر در ۱۰ دقیقه ابتدایی مشاهده شد، پدیده آبستگي به مدت ۳۰ دقیقه در همه آزمون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش از دریچه‌های هلالی در سه قطر ۵، ۷/۴۵ و ۱۰/۸۲ سانتی‌متر و یک دریچه کشویی ساده استفاده شده



شکل ۲- دریچه‌های هلال‌دار و دریچه کشویی ساده.

Figure 2. The Crescent gates and simple slide gate.



شکل ۳- سه دریچه هلال‌دار به قطرهای ۵، ۷/۴۵ و ۱۰/۸۲ سانتی‌متر.

Figure 3. Three crescent gate with 5, 7.45, 10.82 cm diameters.

جدول ۱ مشخصات رس بنتونیت مورد استفاده در آزمون‌های مرتبط ارائه شد. برای ایجاد مصالح با چسبندگی‌های متفاوت، مصالح به مقدار محاسبه شده در درون دستگاه مخلوط‌کن ریخته شد و بعد از همگن شدن مورد استفاده قرار گرفت.

در پژوهش حاضر از رس بنتونیت سدیم‌دار که از شرکت صنایع مواد کانی چاووش معدن تهیه شده بودند، استفاده گردید و این ماده به صورت فیزیکی فرآورده شده و هیچ تغییرات شیمیایی در این محصول انجام نگردیده و به صورت کاملاً طبیعی می‌باشد. در

جدول ۱- مشخصات رس بنتونیت.

Table 1. Characteristics of Bentonite clay.

میزان مونت‌موریلونیت Amount of Montmorilloniet	استحکام کششی Tensile strength	رطوبت Humidity	گازهای نادر فرار Rare gases escape	شاخص قابلیت ژلاتینی The gelatinous ability	استحکام فشاری Compressive strength	pH	شاخص تورم Inflation index	نوع مصالح Building Type
76 mg/l	20 psi	9%	8%	28%	6 psi	9.5	25	رس بنتونیت Bentonite clay

و زمان بررسی حفره آبستگي ثابت بوده، شیب کف فلوم ناچیز است.

عوامل مختلفی در پدیده آبستگي در پشت دريچه کشویی نقش داشته که می‌توان همانند رابطه ۱ بیان کرد:

### نتایج و بحث

در آزمایش‌های انجام شده، اثرات تغییرات عمق پایاب و عمق بالادست و بازشدگی دريچه همچنین تأثیر هلال پشت دريچه کشویی بررسی گشت و رابطه ۲ با استفاده از روش بی‌بعدسازی  $\pi$  باکینگام با صرف‌نظر از گروه‌های ثابت بی‌بعد به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{W} = A(Fr)^a (Re)^b \left(\frac{y_t}{y_0}\right)^g \left(\frac{D_{50}}{w}\right)^d \left(\frac{b}{w}\right)^c \left(\frac{D}{w}\right)^e \quad (2)$$

تأثیر ضرایب توان‌های  $a, b, c, d, e$  و  $g$  بررسی شد و با استفاده از روش حداقل مربعات ضرایب همبستگی آنالیز حساسیت انجام گردید و جدول ۲ بیانگر تأثیر پارامترهای بی‌بعد در پدیده آبستگي می‌باشد.

$$d_s = f(b, w, L, Q, y_0, y_t, D_{50}, \rho, \rho_s, g, t, \mu, D, S_0) \quad (1)$$

که در آن،  $b$  عرض کانال،  $w$  بازشدگی زیر دريچه،  $L$  طول کف‌بند،  $Q$  دبی جریان،  $y_0$  عمق بالادست دريچه کشویی قائم،  $y_t$  عمق پایاب،  $D_{50}$  قطر متوسط مصالح،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_s$  چگالی رسوبات،  $g$  شتاب ثقل،  $t$  زمان،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $D$  قطر هلال پشت دريچه کشویی،  $S_0$  شیب کف فلوم.

در پژوهش حاضر، آب به‌عنوان سیال انتخاب شد و ماسه ریزدانه نیز مصالح مورد استفاده بوده است. سعی بر انجام آزمایش‌ها در شرایط یکسان بوده است، بنابراین چگالی سیال، چگالی مصالح، لزجت دینامیکی

جدول ۲- بررسی تأثیر پارامترهای بی‌بعد در پدیده آبستگي.

Table 2. Effect of the dimensionless parameters in scouring.

$R^2$	A	a	b	g	c	D	e	MAE
0.912	4.917	1.694	0.634	4.014	-0.856	1.038	-0.173	0.442
0.845	1.152	1.586	0.035	3.085	0	0	-0.118	0.564
0.845	1.607	1.552	0	3.026	0	0	-0.116	0.578
0.631	1.755	0.833	0	0	0	0	-0.085	0.904
0.462	1.879	1.807	0	1.592	0	0	0	1.093
0.546	1.214	0.764	0	1.364	0.395	0.058	0	0.933

و  $n$  تعداد آزمایش‌ها می‌باشد. در جدول ۲، با استفاده از آنالیز حساسیت که از طریق Solver در نرم‌افزار Excel انجام گردید، تأثیر پارامترهای عمق بالادست و عمق پایین‌دست و تأثیر عدد فرود و هلال پشت دريچه با توجه به توان‌هایشان به وضوح مشاهده شد و لازم به ذکر است تأثیر قطرهای هلالی در پشت دريچه تأثیر به‌سزایی در حداکثر عمق آبستگي دارد.

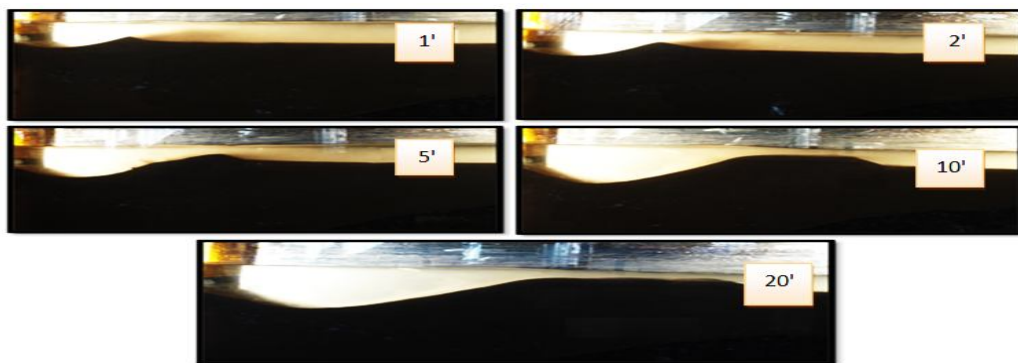
رابطه ۳ بیانگر MAE می‌باشد:

$$MAE = \frac{\sum \left| \left( \frac{d_s}{w} \right)_{obs} - \left( \frac{d_s}{w} \right)_{cal} \right|}{n} \quad (3)$$

که در آن،  $\left( \frac{d_s}{w} \right)_{obs}$  عمق بی‌بعد آبستگي مشاهده شده و  $\left( \frac{d_s}{w} \right)_{cal}$  عمق بی‌بعد آبستگي محاسبه شده

حاضر تقریباً بیشتر از پارامترهای دیگر بوده است. پژوهشگران بسیاری مشاهده کردند بیشترین حجم آبستگي در دقایق ابتدایی شروع پدیده اتفاق می افتد و با گذشت زمان تپه ایجاد شده به سمت پایین دست حرکت می کند و مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به تعادل نسبی را نمی توان به طور دقیق مشخص کرد (۷، ۳).

در آزمایش های انجام شده بر روی دریچه های کشویی و هلالی نتایج ذکر شده مشاهده گردید. شکل ۴ تصاویر پروفیل آبستگي و حرکت تپه ایجاد شده به سمت پایین دست را در زمان های ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه نشان می دهد.



شکل ۴- پروفیل های آبستگي در پایین دست دریچه کشویی ساده در پنج زمان ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه.

Figure 4. Downstream scour profiles of simple sliding gates in five times (1, 2, 5, 10, 20 minutes).

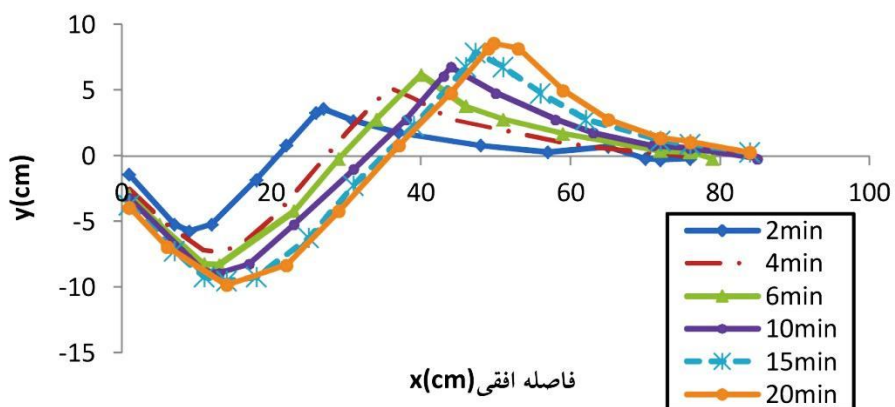
بی بعدسازی تقریباً برهم منطبق اند و دارای منحنی های مشابه می باشند. لازم به ذکر است در پروفیل های آبستگي که بعد از دریچه های کشویی هلال دار ایجاد می شود تپه ثانویه ای در حفره ملاحظه شد ولی در نسبت عمق پایاب به باز شدگی دریچه بیشتر از ۱۰ تأثیر هلال به اندازه ای کم می شود که عملاً پروفیل ایجاد شده همانند پروفیل به دست آمده از آبستگي در پشت دریچه کشویی ساده است و تپه ثانویه مشاهده نگردید. در شکل ۷ در زمان ۲۳ دقیقه به وضوح تپه ثانویه دیده می شود.

رابطه ۴ را در محدوده پژوهش این پژوهش می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{d_s}{W} = 1.607(Fr)^{1.552} \left(\frac{y_L}{y_0}\right)^{3.026} \left(\frac{W}{D}\right)^{0.116} \quad (4)$$

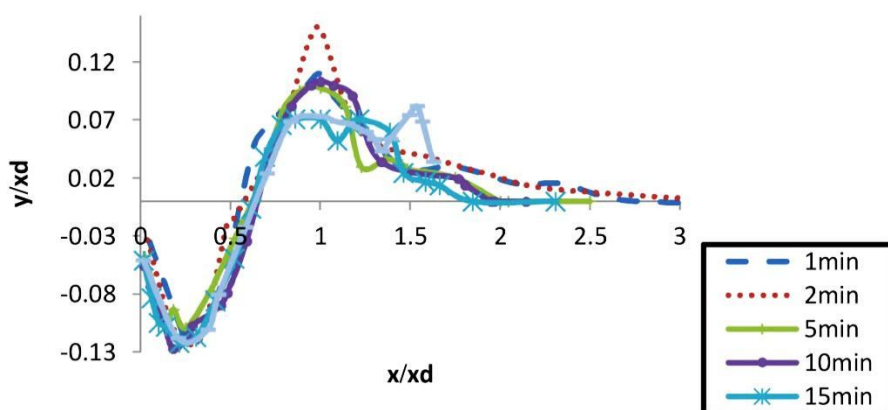
همان طور که از آنالیز حساسیت قابل مشاهده است رابطه معناداری بین میزان عمق حفره آبستگي و نسبت عمق پایاب به عمق بالادست و همچنین هلال پشت دریچه کشویی وجود دارد و ضریب همبستگی برابر ۰/۸۴۵ و همچنین MAE برابر ۰/۵۷۸ در محدوده بررسی از خود نشان دادند. می توان بیان کرد تأثیر نسبت عمق پایاب به عمق بالادست بر روی حفره آبستگي در محدود مورد بررسی پژوهش

آزمون ها در زمان های مختلف نشان داد، شکل حفره آبستگي در پشت دریچه کشویی و هلالی در بستر غیرچسبنده تقریباً ثابت است. شکل نمودارهای ۵ و ۶ نشان دهنده پروفیل ها می باشد.  $X_d$  بیانگر حداکثر فاصله افقی تپه آبستگي در پایین دست،  $X$  فاصله افقی پایین دست از دریچه،  $Y$  فاصله عمودی نقاط پروفیل از بستر اولیه می باشد. با بررسی پروفیل های بی بعد حفره آبستگي و تپه های ایجاد شده در سه دریچه هلالی به قطرهای ۵، ۷/۴۵، ۱۰/۸۲ سانتی متر نتیجه گرفته شد که با گذشت زمان حفره آبستگي شکل پروفیل خود را حفظ کرده و در اثر



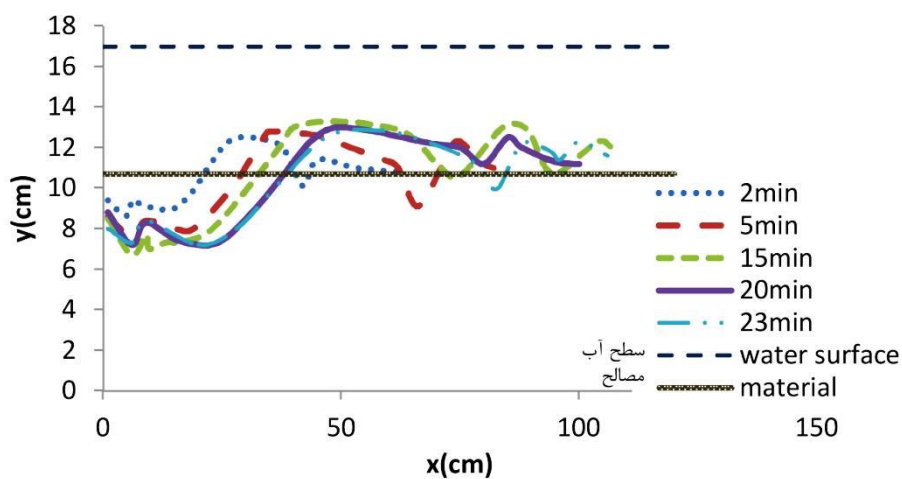
شکل ۵- پروفیل آبشستگی در پایین دست دریچه کشویی ساده در زمان‌های مختلف.

Figure 5. Dimensionless profiles scour after the simple slide gate.



شکل ۶- پروفیل بی بعد آبشستگی در پایین دست دریچه کشویی هلالی.

Figure 6. Dimensionless profiles scour after the crescent gate.



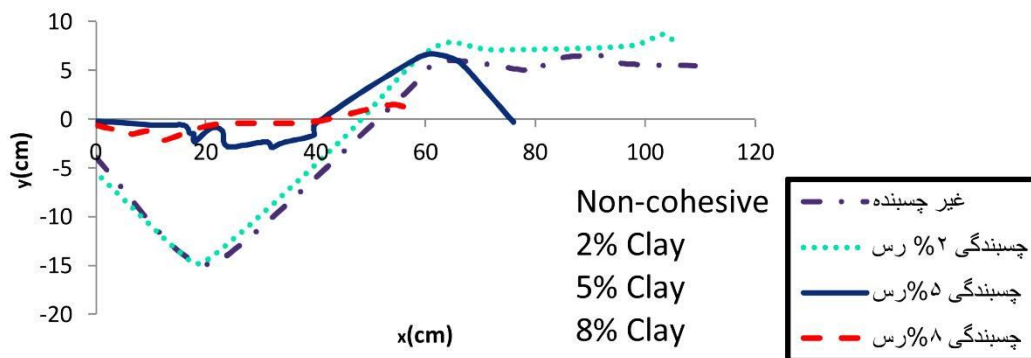
شکل ۷- پروفیل آبشستگی در پایین دست دریچه کشویی هلال دار با قطر ۷/۴۵ سانتی متر و بازشدگی ۲ سانتی متر.

Figure 7. Scour profiles after the crescent gate with a diameter of 7.45 and the 2 cm gate opening.



با افزایش ۵ درصدی رس بنتونیت حداکثر عمق حفره آبستگي ۸۰ درصد و با افزایش ۸ درصدی رس به مصالح بستر حداکثر عمق حفره آبستگي به اندازه ۸۴ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ۲۰ درصدی رس تغییرات سطح بستر بسیار جزئی بود. همچنین حفره آبستگي در زمان‌های مختلف در مصالح غیرچسبنده از شکل واحدی برخوردارند ولی در مصالح با مواد چسبنده به علت فولکوله شدن ذرات بستر ناهمواری‌هایی در سطح حفره به وجود می‌آید.

آزمون‌های متعددی به منظور بررسی میزان تأثیر رس بر ابعاد حفره آبستگي انجام گردید. ۲، ۵، ۸ و ۲۰ درصد رس بنتونیت با مصالح غیرچسبنده توسط میکسر مخلوط گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار رس از میزان آبستگي کاسته می‌شود (شکل ۸). پروفیل آبستگي مصالح با چسبندگی ۲ درصد نسبت به پروفیل مصالح غیرچسبنده تفاوت چندانی در پروفیل آبستگي ایجاد نکرد. بنابراین ۲ درصد رس بنتونیت در ابعاد و شکل حفره آبستگي تأثیر به‌سزایی ندارد. در این پژوهش



شکل ۸- نمودار تأثیر مصالح غیرچسبنده و با چسبندگی ۲، ۵ و ۸ درصد رس بنتونیت بر ابعاد آبستگي بستر.

Figure 8. Effect of non-cohesive materials and Bentonite clay percent of 2, 5, 8 on the bed scour.

عمق بالادست و ( $y_t$ ) عمق پایاب. لازم به ذکر است محدوده بررسی برای دریچه‌های هلالی و مصالح چسبنده می‌باشد. رابطه ۵ فرمول بی‌بعد ارائه شده است؛

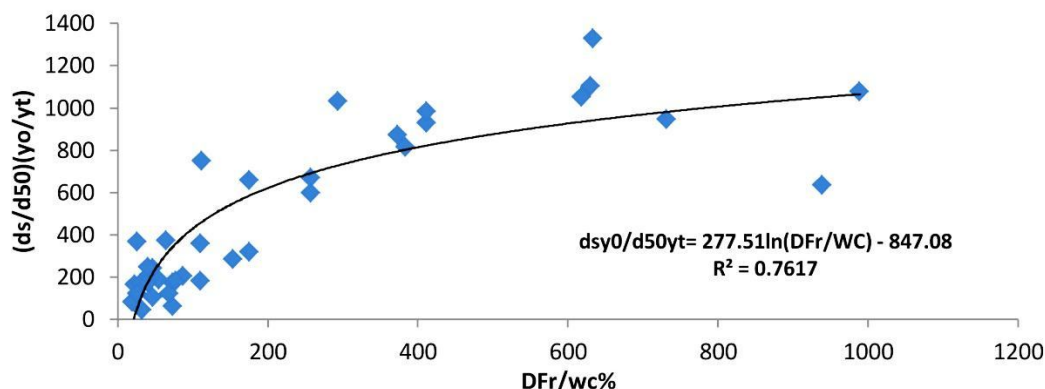
$$\frac{ds}{d50} \frac{y_0}{yt} = 277.51 \ln \left( \frac{DFr}{WC} \right) - 847.08 \quad (5)$$

خط لگاریتمی برازش داده شده همبستگی نسبتاً خوبی با نقاط برداشتی داراست و دارای ضریب همبستگی ۰/۷۶ و مجموع مربعات خطا (RMSE) ۰/۳۸ می‌باشد. برای مشاهده تأثیر هر یک از پارامترها باید سایر پارامترهای مطرح شده ثابت بماند و پارامتر متغیر همان پارامتر مدنظر باشد. به‌عنوان مثال برای

پروفیل‌های حفره آبستگي با گذشت زمان در شرایط مختلف از دانه‌بندی ذرات بستر، عمق پایاب، عمق بالادست و بازشدگی دریچه و شکل دریچه به جهت شکل و ابعاد تغییر می‌کنند. چنان‌چه پروفیل آبستگي و پارامترهای مؤثر در تشکیل این پدیده در محدوده مورد بررسی به‌صورت بی‌بعد ارائه گردد می‌توان نتایج ارزشمندی به‌دست آید. با بررسی‌های متعدد نمودار بی‌بعد به‌صورت شکل ۹ ارائه گردید. پارامترهای مؤثر موردنظر در نمودار عبارتند از ( $D$ ) قطر هلال روی دریچه کشویی، ( $Ft$ ) عدد فرود، ( $C\%$ ) درصد رس بنتونیت، ( $w$ ) بازشدگی دریچه، ( $d_s$ ) حداکثر عمق آبستگي، ( $d_{50}$ ) متوسط دانه‌بندی،

بازشدگی از مقدار آبستگی کاهش می‌یابد و علت را می‌توان در کاهش شدت و سرعت جت خروجی از دریچه بیان داشت.

بررسی تأثیر بازشدگی نسبت به عمق آبستگی، از نمودار ارائه شده برداشت می‌شود که بازشدگی با میزان آبستگی رابطه عکس دارد یعنی با افزایش

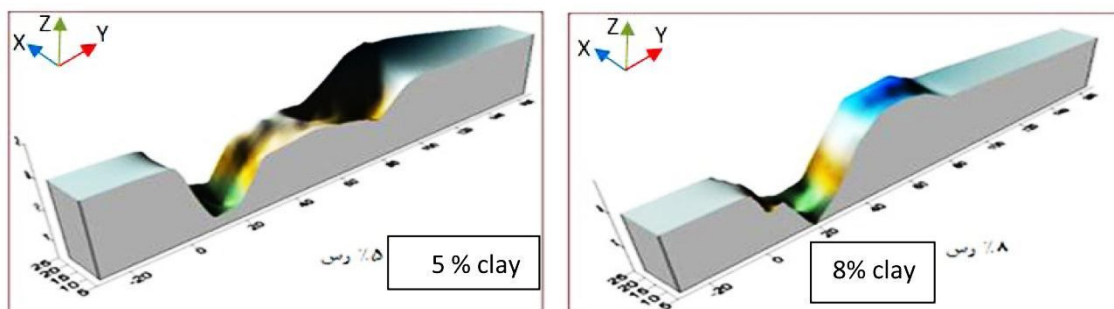


شکل ۹- نمودار بی‌بعد در محدوده آزمون‌های انجام‌شده بر روی مصالح چسبنده و دریچه‌های هلال‌دار.

Figure 9. Dimensionless diagram in the range of tests on materials cohesive and the crescent gate.

درصد میزان عمق و ابعاد حفره آبستگی به صورت چشم‌گیری کاسته گردید. لازم به ذکر است دریچه مورد بررسی در این تصویر، دریچه کشویی ساده می‌باشد و از تأثیر هلال در این بخش صرف‌نظر گردید. شرایط آزمایش در جدول ۳ بیان شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ محور در جهت Y فاصله افقی از پایین‌دست دریچه تا انتهای کانال بر حسب سانتی‌متر و محور در جهت X بیانگر عرض فلوم بر حسب سانتی‌متر و محور Z فاصله عمودی از زیر پایین‌دست دریچه تا کف فلوم آزمایشگاهی می‌باشد.

با استفاده از اندازه‌گیری نقاط به وسیله Point gage و نرم‌افزار surfer، سطح حفره آبستگی بر مصالح بستر با چسبندگی‌های مختلف نمایش داده شود (شکل ۱۰). این نرم‌افزار دارای قابلیت منطبق کردن چند پروفیل بر هم می‌باشد. در این قسمت از قابلیت مذکور برای مقایسه تأثیر درصد رس بر میزان و شکل آبستگی مصالح در شرایط تقریباً یکسان استفاده شد. شکل ۱۱ مقایسه پروفیل آبستگی در مصالح با چسبندگی ۲ درصد و ۸ درصد رس بنتونیت می‌باشد. در اثر افزایش مقدار رس بنتونیت از ۲ درصد به ۸



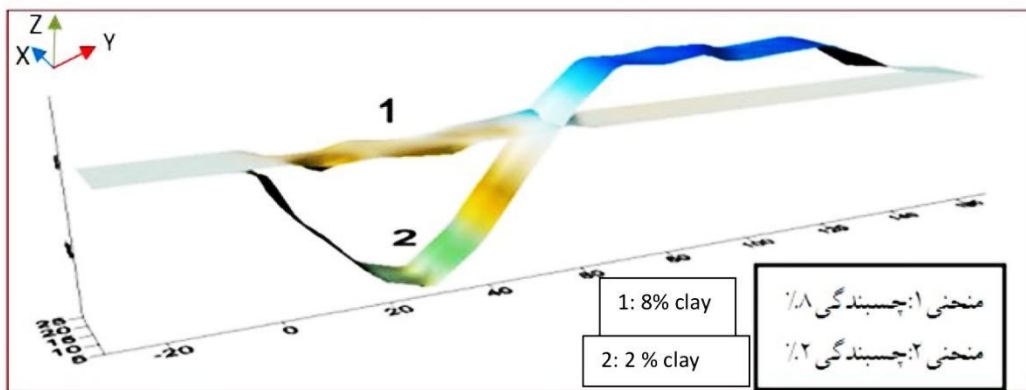
شکل ۱۰- پروفیل برداشتی برای مصالح با چسبندگی ۵ و ۸ درصد.

Figure 10. Taken profiles for clay percent of 8 and 5.

جدول ۳- شرایط آزمون‌های اجرا شده برای دو پروفیل ۱ و ۲.

Table 3. The test conditions for two profiles 1 and 2.

درصد رس % Clay percent	W(cm) بازشدگی Opening	y <sub>v</sub> (cm) عمق پایین دست Downstream depth	Y <sub>0</sub> (cm) عمق بالادست Upstream depth	Q(lit/s) بده عبوری Discharge	NO.
8	4	11.30	13.43	4.10	پروفیل ۱ Profile 1
2	2	9.50	15.53	4.00	پروفیل ۲ Profile 2



شکل ۱۱- تأثیر درصد رس چسبنده بر پروفیل آبشستگی برای دریچه کشویی ساده.

Figure 11. The effect of materials cohesive on scour profiles for simple slide gate.

حجم آبشستگی حدود ۷۴۰/۴۳ سانتی مترمکعب  
بیش تر است (جدول ۴).

اختلاف حجم بین دو پروفیل آبشستگی در مصالح  
با چسبندگی ۲ و ۸ درصد محاسبه شد و همچنین  
مشاهده گردید در مصالح با چسبندگی ۲ درصد میزان

جدول ۴- اختلاف مقدار حجم و مساحت آبشستگی بین دو پروفیل ۱ و ۲ در مصالح با چسبندگی ۲ و ۸ درصد رس.

Table 4. Difference volume and area of the scour between the two profiles 1 and 2 of cohesion 2 and 8 percent of clay.

اختلاف حجم با درصد ۲ و ۸ Volumes of 2% and 8%	
اختلاف حجم کلی Total Volumes by (cm <sup>3</sup> ):	قانون ذوزنقه‌ای Trapezoidal Rule: 740.43
	قانون سیمپسون Simpson's Rule: 769.71
	حجم مثبت (برداشت شده) Positive Volume [Cut]: 10270.64
حجم حفر شده و پر شده Cut & Fill Volumes (cm <sup>3</sup> ):	حجم منفی (پر شده) Negative Volume [Fill]: 9530.21
	حجم خالص (اختلاف بین حجم برداشت شده و پر شده) Net Volume [Cut-Fill]: 740.44

ادامه جدول ۴-

Continue Table 4.

اختلاف حجم با درصد ۲ و ۸ Volumes of 2% and 8%	
Areas of 2% and 8%	اختلاف مساحت بین دو پروفیل با درصد ۲ و ۸
مساحت پلان Planar Areas (cm <sup>2</sup> )	مساحت مثبت پلان (برداشت‌شده) Positive Planar Area [Cut]: 1373.64 مساحت منفی پلان (پر شده) Negative Planar Area [Fill]: 1761.72
مساحت رویه Surface Areas (cm <sup>2</sup> )	مساحت مثبت رویه (برداشت‌شده) Positive Surface Area [Cut]: 1527.91 مساحت منفی رویه (پر شده) Negative Surface Area [Fill]: 1808.46

### نتیجه‌گیری

زمان‌های مختلف در مصالح غیرچسبنده از شکل واحدی برخوردارند. ولی در مصالح با چسبندگی‌های مختلف پروفیل طولی جداره فلوم نمی‌تواند بیانگر کل سطح به‌دست آمده از آبشستگی باشد. به‌علت وجود مواد چسبنده و ایجاد فولکوله در حفره آبشستگی سطح ناهمواری ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد با افزایش ۵ درصدی رس بنتونیت حداکثر عمق حفره آبشستگی ۸۰ درصد و با افزایش ۸ درصدی رس به مصالح بستر حداکثر عمق حفره آبشستگی به اندازه ۸۴ درصد کاهش می‌یابد.

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان دادند که دریچه‌های هلالی تأثیر کمی بر ابعاد حفره آبشستگی دارد و در اکثر حالت‌های بررسی شده در پروفیل آبشستگی در پشت دریچه‌های هلالی تپه ثانویه دیده می‌شود. لازم به ذکر است در نسبت عمق پایاب به بازشدگی دریچه کشویی هلال‌دار به اندازه ۳،۵۰۹ تپه ثانویه به وضوح قابل رویت است ولی در نسبت‌های عمق پایاب به بازشدگی زیر دریچه هلالی، ۱۰ و بیش‌تر تپه ثانویه پایین‌دست تشکیل نمی‌شود. پروفیل‌های طولی به‌دست آمده از پدیده آبشستگی برداشت‌شده نشان داد حفره‌های ایجادشده در

### منابع

- Annandale, G.W. 2006. Scour Technology. McGraw-Hill, New York, 430p.
- Breusers, H.N.C., and Raud KiVi, A.J. 1991. Scouring hydraulic structures design manual. Volume Balkema, Rotterdam.
- Dey, S., and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. J. Hydr. Engin. 132: 3. 246-257.
- Goel, A. 2010. Scour investigation behind a vertical sluice gate without apron. The Pacific J. Sci. Technol. 11: 2.
- Guide to scour calculation methods. 2012. Publication No. 549, Department of Energy, Office and Technical measures of Water and Abfa. VP of strategic monitoring, technical systems executive office. (In Persian)
- Jain, R., and Kothyari, U. 2008. Detachment and transport of clay-sand-gravel mixtures by channel flow conference proceedings. Izmir, Turkey, sep. 3-5.

7. Hamidi Far, H., and Omid, M.H. 2010. Experimental Study of cohesion less sediments in downstream of apron. J. Agric. Engin. Res. 11: 2. 28-17. (In Persian)
8. Kells, J.A., Balachandar, R., and Hagel, K.P. 2001. Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. Can. J. Civil Engin. 28: 440-451.
9. Kurniawan, A., Altinakar, M.S., and Graf, W.H. 2001. Flow pattern of an eroding jet. Proceedings of XXIXAHR Congress. Beijing. China. Pp: 537-544.
10. Mazure, K. 2001. Scour of clay by jets. PhD Thesis in water Resources Engineering, University of Alberta, Canada. 313p.
11. Partheniades, E. 2007. Engineering properties and hydraulic behavior of cohesive sediments. CRC Press, Taylor and Francis Group, 338p.
12. Shiva, F., Attary, C., and Saneie, M. 2014. Effect of the parameters from bentonite clay scour after river Structures. Civil Seventh Congress, Zahedan. (In Persian)



## **Experimental Study on the effect of Percent of Bentonite on the Scour hole rate in downstream of gate**

**\*F. Mohammadi Khanaposhtani<sup>1</sup>, M. Karbasi<sup>2</sup> and M. Saneie<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate of Hydraulic Structures, Dept. of Water Engineering, University of Zanjan,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Zanjan,

<sup>3</sup>Associate Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Received: 08/31/2015; Accepted: 07/19/2016

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Local Scour phenomenon in downstream of hydraulic structures such as spillway, gate, stilling basin is one of the most important issue. Scour around the structures in addition to an important impact on the stability of the structure, may change the flow characteristics and the result of changes in the structural design parameters. Reveals the importance of scouring time that the scour depth is considerable, so that the depth of the river is the foundation structures and stability of these structures are at risk. If the maximum scour depth is not anticipated, it creates a serious problem in design. Hydraulic structure designers aren't able to provide the necessary measures to reduce damage caused by scour. Careful examination of the claim requires more tests and more accurate. The aim of this study is to investigate the effect of Bentonite clay in the form of the bed scouring.

**Materials and Methods:** For this purpose, 87 tests were conducted in different laboratory conditions on flume of Hydraulic laboratory which Situated in Research Institute of Soil Conservation and Watershed Management. Studies were conducted on 29 tests of non cohesive materials with average of 0.2 mm diameter as an evidence and 58 tests on materials with a viscosity of 2%, 5%, 8% and 20%. three crescent gate with 5, 7.45, 10.82 cm diameters, with the different tail water within 5 cm to 21 cm and four gate openings of 1, 2, 3 and 4 centimeters, three discharges about 1 to 5 liters per second. To measure tail water depth and measure flow discharge used a standard sharp edge triangular weir with 90 degrees.

**Results:** By examining the longitudinal profile of scouring was found dimensionless scour hole profiles and hills created with three curve edge sluice gates diameters 5, 7.45, 10.82 cm and a simple slider, that retains its shape over time and They almost overlap and the curves are similar and stylish. It is worth mentioning scour profiles that were created after curve edge sluice gates was observed secondary hill in the ratio of tail water to opening of gate size 3, 5, 9 but the ratio of more than 10 in its impact will be low enough. As a result of scour profiles behind the slide gate is simple and there was no secondary hill. With using point gage took hole dimensions and the diagram of the scour hole was presented with software surfer. The results showed that the addition of Bentonite clay minerals is reduced scouring hole size. It was also observed an increase of 5% Bentonite clay is reduced 80.61 percent and about 8 percent rise is reduced 84.82 percent scour depth. Dimensionless relationship was presented for effective parameters. Logarithmic line fitted with the interpretation is fairly good correlation with a correlation coefficient of 0.76.

**Conclusion:** Studies in this research showed that the crescent gate has impact on the scour hole and in the majority of cases examined scour profiles after the crescent gate can be seen secondary hills.

**Keywords:** Scour, Non-cohesive materials, Cohesive materials, Bentonite clay, Gate

---

\* Corresponding Author; Email: mohamadif1991@gmail.com