

بررسی آزمایشگاهی کنترل فرسایش در پایین دست سرریزهای پلکانی با استفاده از ساختار میکروسیلیس و نانو مواد

امیر قادری^۱، رسول دانشفراز^{۲*}، رضا زایرکعبه^۳، فروغ اشکان^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۰۹

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۷-۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

تثبیت بستر

تعداد پله

آبستنگی پایین دست سرریز پلکانی

میکروسیلیس

نانورس مونت موریلونیتی

خلاصه: مواد نانو ساختار به دلیل دارا بودن خاصیت ضد آب، می توانند برای کاهش آبستنگی بستر رسوبی کاربرد داشته باشند. در این پژوهش تاثیر افزودن رس و نانومواد و میکروسیلیس به مصالح بستر رسوبی پایین دست سرریز پلکانی در کنترل فرسایش و آبستنگی آن به عنوان یک راه حل غیرسازه ای بررسی شده است. در گام نخست به ارزیابی تاثیر تعداد پله ها و رژیم جریان ایجاد شده بر روی پله ها در میزان آبستنگی پایین دست پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پله در شیب شوت یکسان و در رژیم جریان غیرریزشی ایجاد شده بر روی پله ها مقدار عمق و طول آبستنگی در پایین دست سرریز پلکانی افزایش می یابد. در گام بعدی تاثیر افزودنی های تزریق شده به بستر رسوبی پایین دست سرریز در این تعداد پله از سرریز پلکانی و رژیم جریان غیر ریزشی بررسی گردید. نتایج آزمایش ها از تاثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانورس و میکروسیلیس در بهبود و کاهش پروفیل آبستنگی در پایین دست سرریز پلکانی حکایت دارد. بهترین عملکرد از بین ۳ نوع ترکیب مختلف مربوط به ترکیب رس به همراه نانورس و میکروسیلیس بوده که نسبت به مدل شاهد در کاهش عمق و طول آبستنگی به ترتیب ۴۸/۷۴ و ۴۶/۳۸ درصد سهم داشتند. در تزریق رس به بستر رسوبی، عمق و طول آبستنگی به ترتیب ۳۵/۶۳ و ۲۰/۸۸ درصد و برای ترکیب رس به همراه نانورس به ترتیب ۴۱/۴۱ و ۳۷/۷۵ درصد کاهش داشتند. این نتایج می تواند بیانگر تاثیر مثبت و قابل ملاحظه رس و نانورس و میکروسیلیس در کنترل مکانیسم آبستنگی بستر پایین دست سازه های هیدرولیکی به ویژه در دبی های سیلابی باشد.

۱- مقدمه

مواد بستری قابل ملاحظه باشد، به گونه ای که پی سازه ظاهر گردد و پایداری این سازه ها را در معرض خطر قرار دهد. تحقیقات متعددی در زمینه آبستنگی پایین دست سازه های هیدرولیکی توسط محققین انجام و راهکارهایی برای کاهش میزان آبستنگی پایین دست ارائه شده است [۱-۵]. اما استفاده از این روش ها باعث ایجاد مشکلاتی مانند ناپایداری سازه، اختلال در شرایط هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه و مهم تر از آن اختلال در محیط زیست رودخانه خواهند شد. یکی از راهکارهای کنترل آبستنگی پایین دست سازه های هیدرولیکی استفاده از روش هایی برای تثبیت بستر رسوبی می باشد که به عواملی چون جنس بستر رسوبی، شرایط محیطی، هدف از تثبیت، مسائل اقتصادی و تاثیرات زیست محیطی بستگی دارند [۶]. با این حال

امروزه سرریزهای پلکانی به عنوان یک راهکار مناسب برای استهلاک انرژی مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. لذا در پایین دست سرریزهای پلکانی می توان حوضچه آرامش را با طول مناسبی احداث کرد. بخشی از انرژی جنبشی رسیده به پایین دست بر اثر پرش هیدرولیکی ایجاد شده روی حوضچه آرامش و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی تلف می شود. با وجود شرایط فوق، هنوز انرژی باقی مانده در جریان ورودی به پاشنه سرریز قادر به ایجاد حفره آبستنگی در پایین دست سازه می باشد [۱]. اهمیت بررسی پدیده آبستنگی زمانی آشکار می گردد که عمق آبستنگی و برداشت

* نویسنده عهده دار مکاتبات: daneshfaraz@yahoo.com



$$d_s = f_1(q, H_s, h, l, \theta, d_{50}, g, \rho_s, \rho_w, \mu, L_b, t, t_0) \quad (1)$$

که در رابطه فوق q دبی در واحد عرض، H_s ارتفاع سرریز پلکانی، h ارتفاع هر پله سرریز پلکانی، L طول هر پله سرریز پلکانی، θ زاویه شوت سرریز، d_{50} قطر ذرات رسوبی، g شتاب گرانش زمین، ρ_s ویسکوزیته حجمی ذرات رسوبی، ρ_w ویسکوزیته حجمی آب، μ ویسکوزیته دینامیکی، L_b طول حوضچه آرامش، t مدت زمان از شروع آبشستگی و t_e مدت زمان تعادل آبشستگی می‌باشد. در بحث اندرکنش رسوبات و جریان آب، از ترکیب ρ_s و ρ_w پارامتری به نام Δ را معرفی کردند که برابر $\Delta = S - 1$ بوده و S نسبت چگالی رسوبات ρ_s / ρ_w می‌باشد [۱۳]، بنابراین پارامترهای موثر بر آبشستگی به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$d_s = f_2(q, H_s, h, l, \theta, d_{50}, g, \Delta, \mu, L_b, t, t_e) \quad (2)$$

با استفاده از روش باکینگهام پارامترهای مستقل بی‌بعد موثر و پارامتر وابسته به صورت زیر تعریف شد.

$$\frac{d_s}{H_s} = f_3(Fr_d, \frac{h}{H_s}, \frac{d_{50}}{H_s}, \frac{L_b}{l}, \frac{t}{t_e}, \theta, Re) \quad (3)$$

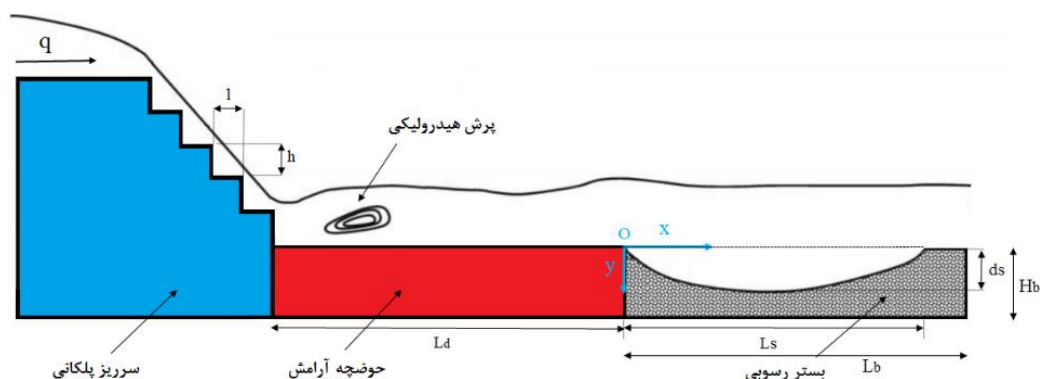
در این رابطه $Fr_d = q / (g \Delta d_{50})^{0.5} d_{50}$ عدد فرود ذره می‌باشد. به دلیل ثابت بودن ρ و w در آزمایش‌ها، و زاویه شوت سرریز یکسان برای سرریزهای پلکانی مورد مطالعه و همچنین اثر عدد رینولدز Re به علت آشفته بودن جریان در پایاب سرریز ($4000 < Re$) می‌توان صرف نظر کرد. بنابراین رابطه (۳) به صورت زیر قابل خلاصه است.

$$\frac{d_s}{H_s} = f_4(Fr_d, \frac{h}{H_s}, \frac{d_{50}}{H_s}, \frac{L_b}{l}, \frac{t}{t_e}) \quad (4)$$

افزودنی‌های کم‌هزینه موثرتر بوده و می‌تواند جایگزین سایر روش‌ها گردد. تثبیت بستر رسوبی غیرچسبنده با مخلوط کردن مقداری خاک رس در حالت اشباع امکان‌پذیر است [۷]. خاک رس با توجه به گستردگی آن در طبیعت و نزدیکی به محل‌های مصرف، یکی از روش‌های موثر در تثبیت بستر رسوبی محسوب می‌شود [۸ و ۹]. هم‌چنین مواد نانو ساختار به دلیل خاصیت آب‌گریزی می‌توانند در کاهش آبشستگی و فرسایش بستر رسوبی موثر باشند [۱۰]. از طرفی استفاده از برخی مصالح نظیر بتن به منظور تثبیت بستر، می‌تواند تاثیرات مخرب زیست‌محیطی را نیز به همراه داشته‌باشد. هم‌چنین بهره‌گیری از راه‌حل‌های نوین در سالیان اخیر، برای مدیریت و حفاظت منابع آب و خاک با بهره‌گیری از افزودنی‌های سازگار با محیط‌زیست و متناسب با ساختار خاک، جهت اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی، کمک شایانی در امر تثبیت بستر رسوبی انجام می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. بر این اساس در پژوهش حاضر سعی شده‌است راه‌حل مناسبی به منظور کاهش این مشکلات با استفاده از مصالح سازگار با طبیعت و اکولوژی رودخانه و با هدف کاهش عمق آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی ارائه شود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن رس و ترکیب رس و نانورس مونت‌موریلونیتی و هم‌چنین ترکیب رس و نانورس به همراه میکروسیلیس در مصالح بستر پایین‌دست سرریز پلکانی به منظور کاهش ابعاد آبشستگی در دبی‌های مختلف پرداخته شده‌است.

۲- آنالیز ابعادی

در بررسی پدیده آبشستگی مطابق شکل ۱، حداکثر عمق آبشستگی را می‌توان تابعی از متغیرهای زیر در نظر گرفت:



شکل ۱. شماتیکی از مشخصات آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی و عوامل موثر بر آن

Fig.1. Schematic effective parameters of scouring of stepped spillway downstream

۳- مواد و روش

۳-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه و در یک کانال با مقطع مستطیلی شکل به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۳، ۰/۴۵ متر انجام گردید. برای اینکه سطحی صاف و با کمترین زبری در اختیار باشد، کف و دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلس ساخته شد. جریان کانال توسط دو پمپ هرکدام با حداکثر دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه توسط دو شیر متصل به دو روتامتر با دقت $\pm 2\%$ درصد، نصب شده در خروجی پمپ‌ها تامین و اندازه‌گیری گردید. در قسمت ورودی کانال، صفحه مشبکی وجود دارد که آشفتگی جریان را از بین برده و جریان آرامی وارد فلوم آزمایشگاهی می‌گردد. برای ایجاد بستر متحرک با در نظر گرفتن فاصله مناسب جهت توسعه آبستتگی طول بستر ۱ متر و با احتمال جلوگیری و کاهش از کف‌کنی توسط جریان، ضخامت ۱۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. طول کف‌بند اول قبل از بستر متحرک ۱۵۰ سانتی‌متر بوده که ۸۰ سانتی‌متر آن به‌عنوان حوضچه آرامش بعد سرریز پلکانی انتخاب شده است. کف‌بند دوم بعد از بستر متحرک و به طول ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد (شکل ۲).



شکل ۲. نمایی از قرارگیری سرریز پلکانی، حوضچه آرامش و بستر متحرک در فلوم آزمایشگاهی

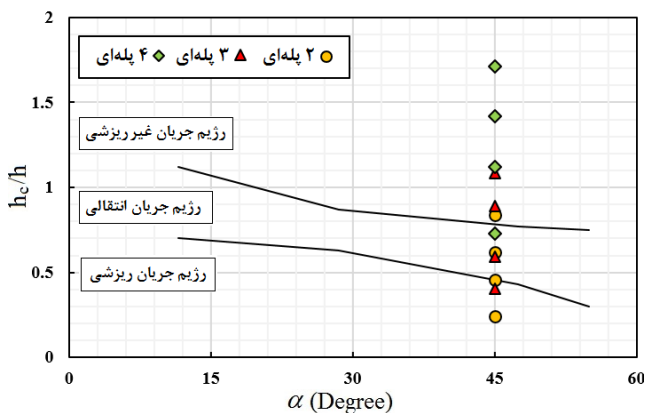
Fig.2. View of the stepped spillway, stilling basin, unstable bed in laboratory flume

۳ مدل سرریز پلکانی با تعداد پله ۲، ۳ و ۴ عدد در ارتفاع و زاویه شوت سرریز یکسان و ۴۵ درجه انتخاب شده است. جنس مدل‌های سرریز پلکانی از صفحات پلی‌اتیلن فشرده شده می‌باشد. جدول ۱ شرایط هندسی و هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر برای مشخص کردن نوع رژیم‌های ایجاد شده بر روی سرریز پلکانی از روابط زیر استفاده شده است [۱۴]. روابط ارائه شده براساس نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله سرریز پلکانی می‌باشند.

$$\left(\frac{h}{h_c}\right)_N = 0.57(\tan \alpha)^3 + 1.3 \text{ for } 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \quad (5)$$

$$\left(\frac{h}{h_c}\right)_S = 1.16(\tan \alpha)^{0.165} \text{ for } 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \quad (6)$$

در روابط فوق h ارتفاع پله و h_c عمق بحرانی جریان قبل سرریز پلکانی می‌باشد. شکل ۳ نوع رژیم‌های جریان ایجاد شده بر روی سرریزهای پلکانی را نشان می‌دهد.



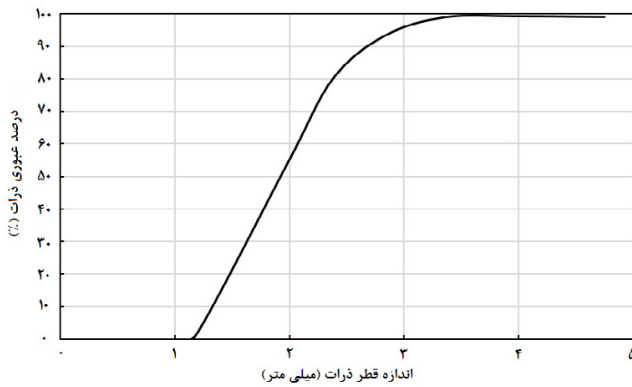
شکل ۳. تعیین محدوده رژیم‌های ایجاد شده بر روی سرریز پلکانی تحقیق حاضر

Fig.3. Determine flow regimes created on the stepped spillway of this study

جدول ۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی در نظر گرفته شده در آزمایش‌ها

Table 1. Specifications of geometric and hydraulic experimental parameters

Q(lit/s)	α°	h_c (cm)	l(cm)	h(cm)	L_d (cm)	H_s (cm)
۳	۴۵	۲/۱	۳، ۴، ۶	۳، ۴، ۶	۸۰	۱۲
۷	۴۵	۳/۸	۳، ۴، ۶	۳، ۴، ۶	۸۰	۱۲
۱۱	۴۵	۵/۱	۳، ۴، ۶	۳، ۴، ۶	۸۰	۱۲
۱۵	۴۵	۶/۳	۳، ۴، ۶	۳، ۴، ۶	۸۰	۱۲



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر (درشت‌دانه)

Fig.4. Curve sediment grain size (Coarse grain)

این حالت هم حداکثر مقدار آبخستگی به دست می‌آید و هم از ایجاد ریپل جلوگیری می‌شود. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر در شکل ۴ و مشخصات مکانیکی رسوبات بستر در جدول ۲ ارائه شده‌است. لازم‌به‌ذکر است، ضریب یکنواختی ذرات ($C_u = 1/56$) محاسبه شده و چون دارای مقدار کمتر از ۲ می‌باشد، مصالح مورد استفاده را می‌توان به‌عنوان ذرات یکنواخت در نظر گرفت [۱۸].

۳-۳- خواص و ویژگی رس و نانورس و میکروسیلیس

خاک ریزدانه موجود در بستر درشت‌دانه که حدود ۱۰٪ کل آن را تشکیل می‌دهد، بر اساس آزمایش‌های تعیین حد روانی (WL) و خمیری (WP) براساس استاندارد ASTM D4318-87 و نیز آزمایش هیدرومتری براساس استاندارد ASTM D421-58 بر اساس جدول ۳ رده‌بندی گردید. منحنی دانه‌بندی ریزدانه در شکل ۵ ارائه گردیده‌است.

نانورس اضافه شده به بستر، نانورس مونت‌موریلونیتی است. نانورس‌های مونت‌موریلونیتی گروهی از کانی‌های رس معدنی هستند که ساختار آن‌ها از یک ورق گیپسیت محصور با ورق‌های سیلیکا در بالا و پایین و با پیوندهای واندروالسی تشکیل شده‌است. طول و عرض این ذرات در حد چند دهم میکرون تا ۱/۵ میکرون و بعد سوم آن‌ها

مشاهده گردید که با کاهش تعداد پله‌ها و کاهش دبی جریان عبوری از روی سرریز، رژیم جریان از نوع انتقالی بوده و متمایل به رژیم، جریان ریزشی است. با افزایش تعداد پله‌ها و کاهش ارتفاع آن‌ها در زاویه شوت ثابت، رژیم جریان از نوع غیرریزشی می‌باشد. با توجه به تغییرات عمق آبخستگی نسبت به زمان در زمان‌های اولیه، مدت زمان لازم برای هر آزمایش که در آن حداکثر عمق آبخستگی بستر ثابت می‌ماند، ۲ ساعت در نظر گرفته شد. بدین صورت که برای دوره ۲۰ دقیقه‌ای اول (۱۰ برداشت) برای ۵ دوره ۲۰ دقیقه‌ای بعدی (۵ برداشت) عمق و طول حفره آبخستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در فواصل زمانی مشخص تا پایان مدت آزمایش اندازه‌گیری شد. این روند برای هر آزمایش در زمان‌های ۲۰ دقیقه‌ای با تکرار ۳۵ انجام شده‌است. برای تعیین نحوه گسترش طولی و عمقی حفره آبخستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در انتهای هر آزمایش تمام پروفیل بستر با استفاده از دستگاه ترازسنج میله‌ای و عکس‌برداری دیجیتال تهیه گردید.

۲-۲- مشخصات ذرات رسوبی بستر

در این تحقیق برای در دست داشتن معیار مجاز جهت تعیین قطر ذرات از روابط ارائه‌شده در مطالعات پیشین استفاده شده‌است [۱۵]. هم‌چنین مطابق تحقیقات انجام‌یافته [۱۶]، به‌منظور جلوگیری از تشکیل ریپل و نیز حذف تاثیر چسبندگی ذرات رسوبی بر فرایند آبخستگی، اندازه میانگین قطر ذرات رسوبی باید بزرگتر از 0.7 میلی‌متر اختیار شود. اگر انحراف معیار رسوبات $\sigma_g = (d_{84})^{0.5}$ کمتر از $1/3$ باشد، مصالح یکنواخت بوده و اگر بزرگتر از $1/3$ باشد، مصالح به‌صورت غیریکنواخت است. عمق آبخستگی در رسوبات غیریکنواخت کمتر از رسوبات یکنواخت بوده و با افزایش انحراف معیار رسوبات، عمق آبخستگی کاهش می‌یابد [۱۷]. در این مطالعه با توجه مطالب فوق و رعایت معیارها و روابط مجاز، ذره با قطر متوسط $1/8$ میلی‌متر با انحراف معیار $1/26$ انتخاب گردید. در

جدول ۲. مشخصات مکانیکی رسوبات بستر

Table 2. Sediment Properties

	D_{10} (میلی‌متر)	D_{30} (میلی‌متر)	D_{60} (میلی‌متر)	σ_g	C_u	C_c
ذرات بستر	۱/۳	۱/۷	۲/۱	۱/۲۶	۱/۵۶	۰/۶۷

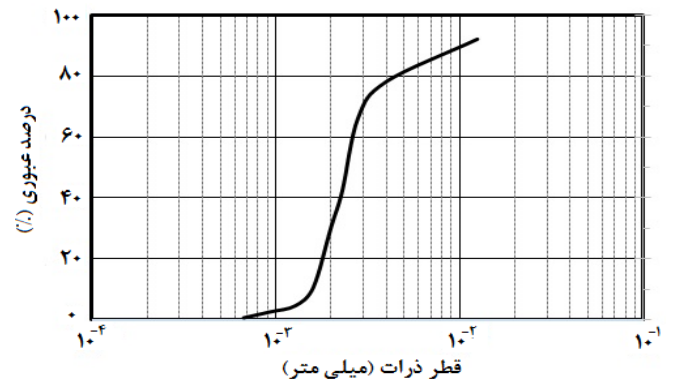
جدول ۳. مشخصات رس افزوده شده به بستر

Table 3. Specifications of clay added to the movable bed

گروه بندی	شاخص خمیری	حد خمیری	حد روانی	وزن مخصوص
CH	%۲۳/۳	%۲۶/۹	%۵۰/۲	$G_s = ۲/۷۵$

و یک درصد در روش تر سبب بهبود قابل توجه مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری آن (به میزان ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر) می‌شود [۲۰]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورس مونت‌موریلونیتی مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده است:

نانورس مورد استفاده در این پژوهش به روش تر و برای توزیع یکنواخت نانورس در مخلوط از دستگاه التراسونیک استفاده گردیده است. بدین صورت که سنگدانه‌ها به صورت خشک تهیه شده و برای رسیدن به حالت اشباع با آب محلول حاوی نانو مواد (سوسپانسیون حاوی ۱٪ نانورس مونت‌موریلونیت) که از دستگاه التراسونیک به دست آمد ترکیب می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که قسمت عمده افزایش مقاومت برشی خاک ($c = \sigma + \tan(\phi)$) به دلیل افزایش مقدار چسبندگی خاک بوده و مقدار بیشینه افزایش در ۱٪ ملاحظه شده است [۲۱ و ۲۲]. این پدیده و نیز کاهش نفوذپذیری باعث کاهش مقدار آبستگي مورد بحث است. همچنین میکروسیلیس استفاده شده برای تثبیت بستر رسوبی پایین دست سرریز پلکانی با ساختار غیرمتبلور (آمورف) به مقدار ۵ درصد وزنی بستر درشت‌دانه و به همراه رس می‌باشد. میکروسیلیس حاوی سیلیس غیر کریستالی



شکل ۵. منحنی دانه بندی رسوبات بستر (ریزدانه)

Fig.5. Curve sediment grain size (Fine grain)

با تفاوت چشمگیری از طول و عرض آن به اندازه یک نانومتر است [۱۹]. این محصول پس از افزوده شدن به خاک‌های ریزدانه به روش تر یا خشک، با ایجاد واکنش شیمیایی و فیزیکی و از طریق مبادله کاتیونی و آنیونی و با اتصال ایجاد می‌شود بین نانو ذرات و دیگر ذرات خاک سبب بهبود پارامترهای فیزیکی چون افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانورس مونت‌موریلونیتی تا مقدار یک و نیم درصد در روش خشک

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورس مونت‌موریلونیتی

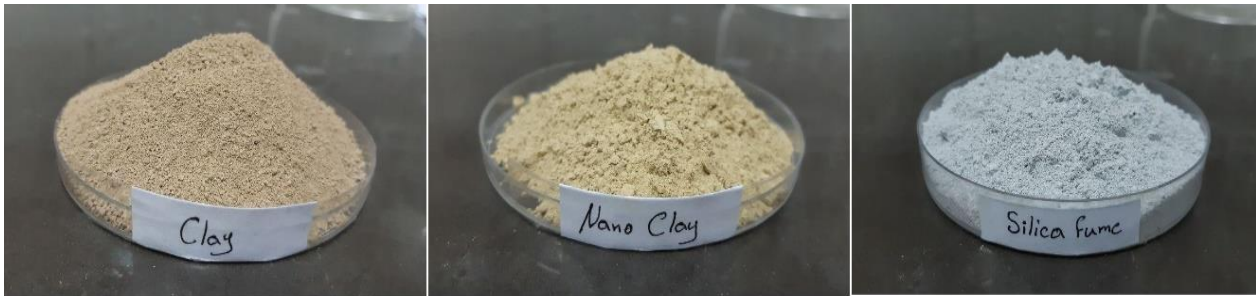
Table 4. Physical and chemical properties of Nano-clay

نوع کانی	اندازه ذرات (nm)	pH	ضریب تبادل یونی	مساحت ویژه (m ² /gr)	چگالی (gr/cm ³)	رنگ	رطوبت
مونت‌موریلونیت	۱/۲۲	۷/۲	۴۸meq/۱۰۰gr	۲۶۰	۰/۷	زرد کم رنگ	۱/۷

جدول ۵. مشخصات میکروسیلیس مصرفی

Table 5. Specifications of Micro-silica

مشخصه	ساختار	شکل ذرات	قطر تقریبی	سطح مخصوص (m ² /gr)	وزن مخصوص فله‌ای (kg/m ³)	رنگ
میکروسیلیس از نا لرستان	غیرمتبلور (آمورف)	کروی	۰/۱ میکرون	۲۰	۲۵۰	خاکستری روشن



شکل ۶. مواد افزودنی به بستر رسوبی پایین دست سرریز پلکانی

Fig. 6. Additional materials to the movable bed of downstream of stepped spillway

غیرریزشی مناسب تر می باشد. لذا هر چقدر میزان استهلاک انرژی توسط سازه مستهلک کننده بیشتر باشد، پیش بینی می شود که در کاهش میزان آبشستگی پایین دست تاثیر گذار باشد. شکل ۷ پروفیل گودال آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی را به ازای سه نوع تعداد پله ۲، ۳ و ۴ و دبی های مختلف را نشان می دهد.

مشاهده گردد که به ازای شرایط یکسان جریان، با افزایش تعداد پله و کاهش ارتفاع آن، مقدار آبشستگی بیشتر می شود. با توجه به اینکه نتایج به دست آمده حاکی از آبشستگی کم در سرریز پلکانی با تعداد پله کم می باشد و این نشان دهنده استهلاک بیشتر در سرریز پلکانی با ارتفاع پله بیشتر (سرریز پلکانی ۲ پله ای و با ارتفاع ۶ سانتی متر) بوده، لذا نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج پژوهش های محققین پیشین دارد [۲۵ و ۲۶]. هم چنین در مقایسه با رژیم های جریان غیرریزشی و انتقالی، کمترین عمق آبشستگی برای جریان ریزشی مشاهده گردید. لذا می توان گفت نتایج این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی پژوهشگران قبلی را نیز تأیید می نماید [۵]. هم چنین با مقایسه شکل های بالا مشاهده می شود که با افزایش دبی، طول و عمق پروفیل گودال آبشستگی افزایش یافته است.

بوده که یک محصول جانبی تولید شده در صنایع الکتریکی می باشد. اثر افزودن میکروسیلیس بر رفتار خاک رس تحت عنوان کاهش تورم لایه های تثبیت شده و افزایش چسبندگی خاک و افزایش مقاومت فشاری و کاهش ترک های ایجاد شده به هنگام سخت شدن در حجم بالایی از رس در مطالعات دانشمندان گنجانده شده است [۲۳ و ۲۴]. میکروسیلیس مورد استفاده به صورت پودری و همراه با رس ترکیب کرده و به بستر رسوبی اضافه شد. مشخصات میکروسیلیس مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۵ ارائه شده است:

شکل ۶ مواد افزودنی به بستر رسوبی پایین دست سرریز پلکانی را نشان می دهد. هم چنین در جدول ۶ خلاصه ای از مشخصات مدل ها و آزمایش های انجام یافته، ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

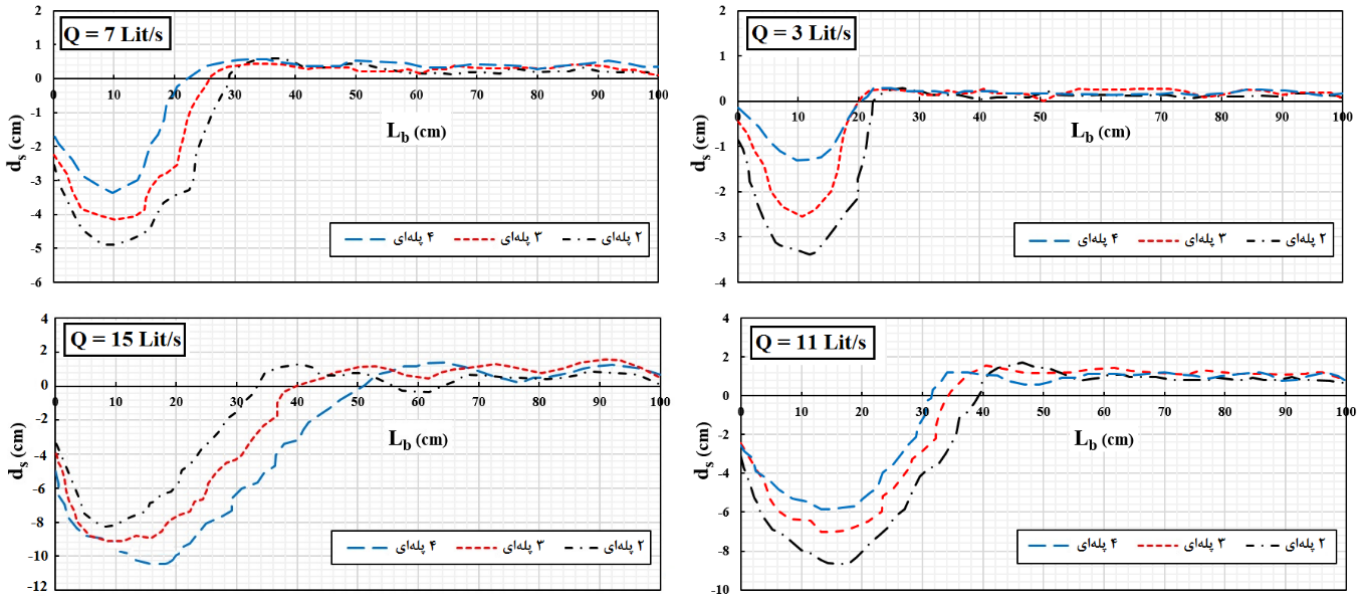
۴-۱- تأثیر تعداد پله سرریز پلکانی بر روی آبشستگی پایین دست در آزمایش شاهد

طبق مطالعات انجام شده [۲۵]، در فلوم ها رفتار رژیم جریان ریزشی در میزان استهلاک انرژی بیشتر، نسبت به رژیم جریان

جدول ۶. مشخصات مدل ها و حالات مختلف آزمایش ترکیب مصالح افزوده به مصالح بستر رسوبی پایین دست سرریز پلکانی

Table 6. Specifications of models and different conditions of the experiments with the additional materials to the movable bed at the downstream of the stepped spillway

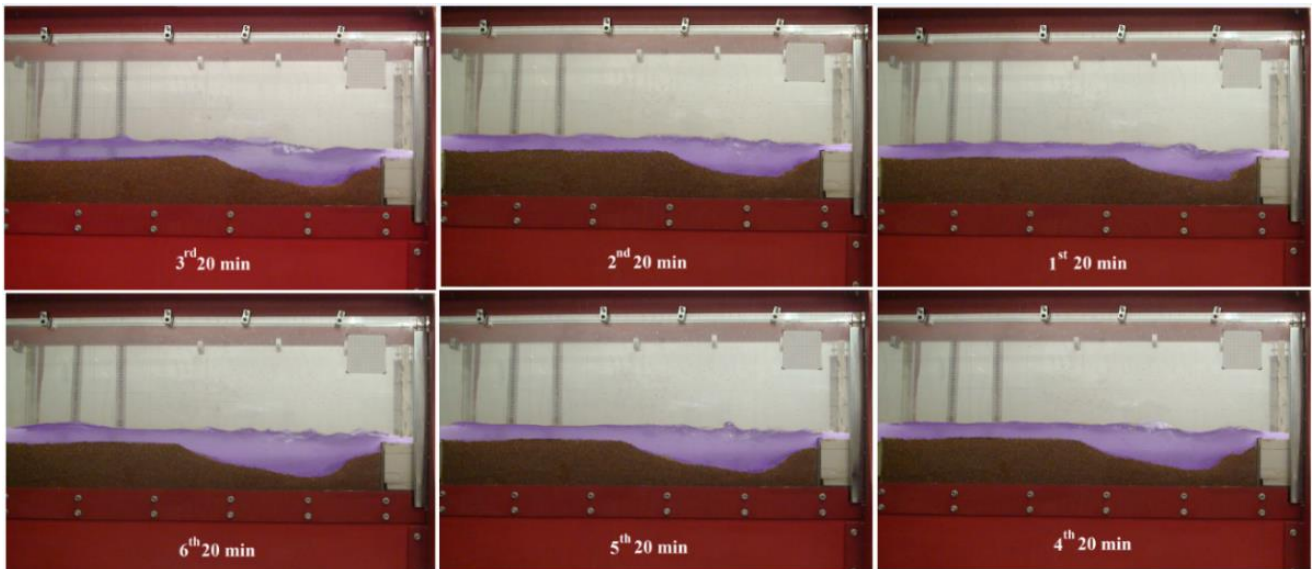
آزمایش	درصد بستر	درصد رس	درصد نانورس	درصد میکروسیلیس	Q (lit/s)	h _b (cm)	L _b (cm)
A	%۱۰۰	-	-	-	۳, ۷, ۱۱, ۱۵	۱۲	۱۰۰
B	%۹۰	%۱۰	-	-	۳, ۷, ۱۱, ۱۵	۱۲	۱۰۰
C	%۸۹	%۱۰	%۱	-	۳, ۷, ۱۱, ۱۵	۱۲	۱۰۰
D	%۸۹	%۵	%۱	%۵	۳, ۷, ۱۱, ۱۵	۱۲	۱۰۰



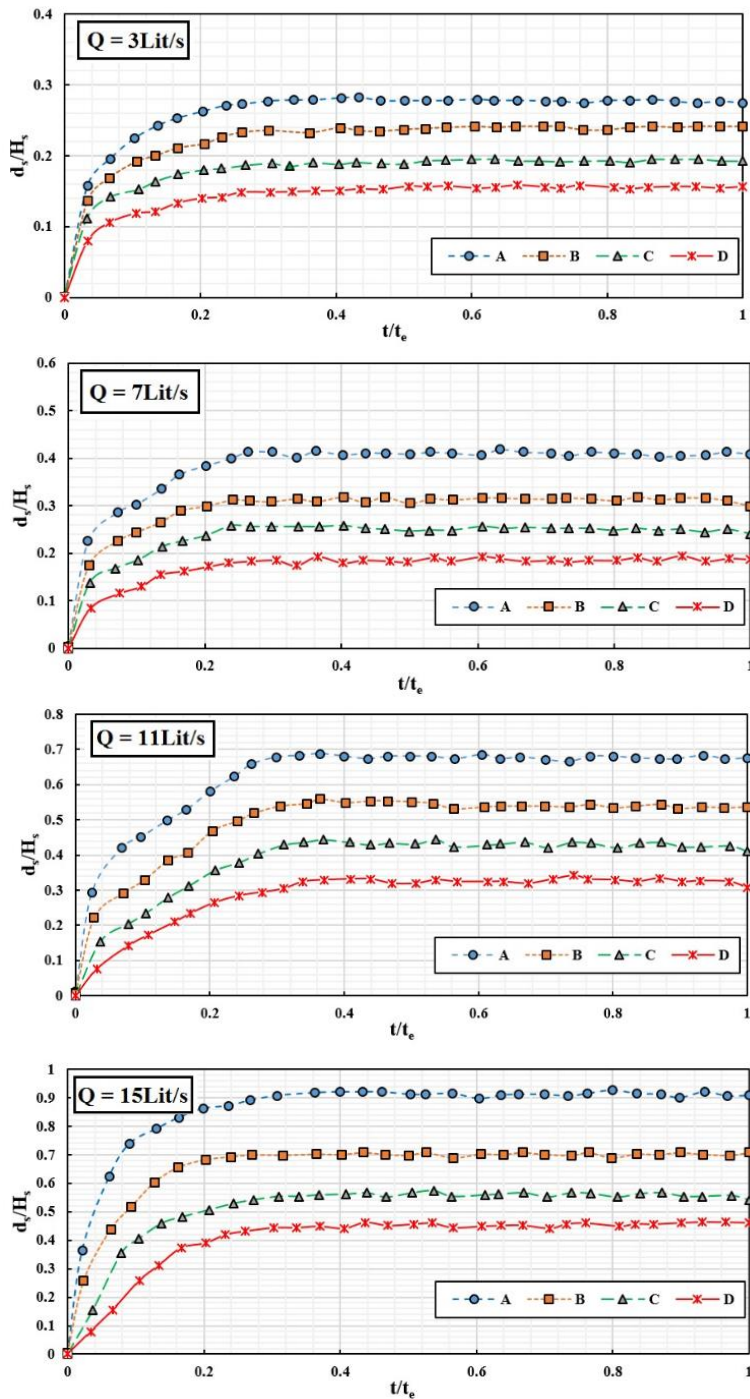
شکل ۷. پروفیل گودال آبشستگی پایین دست به ازای تعداد پله متفاوت و دبی های مختلف
 Fig. 7. The downstream scouring hole profile for different number of steps and discharges

بررسی خواهد شد. شکل ۸ پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی با ارتفاع پله ۳ سانتی متر و به ازای دبی ۷ لیتر بر ثانیه را در آزمایش شاهد نشان می دهد. شکل ۹ تغییرات عمق نسبی آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی با وجود اضافه شدن رس و نانورس و میکروسیلیس مطابق جدول ۶ به مصالح رسوبی را برای ۴ دبی جریان مختلف نشان می دهد. در این شکل، محور قائم نسبت بی بعد عمق آبشستگی به ارتفاع سرریز

۲-۴- تأثیر استفاده از میکروسیلیس و مواد نانو ساختار در عمق و طول آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی
 با توجه به اینکه بیشترین میزان پروفیل آبشستگی به دست آمده در پایین دست سرریز پلکانی مربوط به سرریز پلکانی با ۴ پله و ارتفاع پله ۳ سانتی متر و در رژیم جریان غیرریزشی اتفاق افتاده است، لذا تأثیر استفاده توام رس و میکروسیلیس و مواد نانو ساختار در آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی بر روی این سرریز و رژیم جریان غیرریزشی



شکل ۸. پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی با ارتفاع پله ۳ سانتی متر و به ازای دبی ۷ لیتر بر ثانیه
 Fig. 8. Longitudinal scouring profiles with steps of 3cm height and discharge of 7 lit/s



شکل ۹. تغییرات زمانی عمق آبشستگی با اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانورس مونت موریلونیتی و میکروسیلیس
Fig. 9. Time-changes scour depth with additional materials

بیشتر شده و آب توانایی حمل ذرات بیشتری از رسوبات بستر را پیدا می‌کند. رس به دلیل خاصیت چسبندگی و ترکیب موفق رس به همراه نانورس به دلیل افزایش چشمگیر در خاصیت چسبندگی بستر رسوبی و نقش موثر ترکیب آن‌ها با میکروسیلیس از طریق افزایش مقاومت برشی بین ذرات بستر رسوبی و قدرت چسبندگی بیشتر و کاهش

پلکانی و محور افقی نسبت بی بعد زمان موردنظر به زمان کل آزمایش است. مشاهده می‌گردد که در تمامی دبی‌ها با افزایش زمان تغییرات، عمق آبشستگی افزایش یافته و بعد از مدتی ثابت می‌ماند، همچنین با افزایش دبی عمق آبشستگی بیشتر شده است. بدین صورت که با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش یافته و به تبع آن انرژی جنبشی

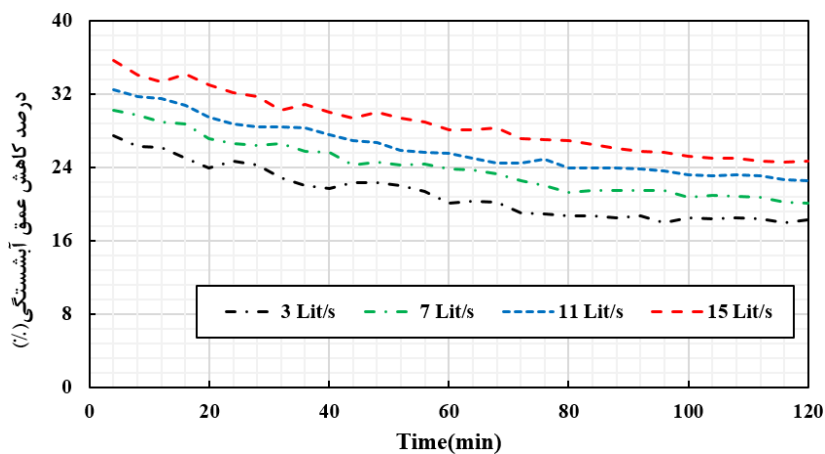
جدول ۷. مقادیر حداکثر عمق و طول آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی

Table 7. The maximum scouring depth and length at the downstream of stepped spillway

آزمایش	Q(Lit/s)	d _{smax} (mm)	L _{smax} (mm)	درصد کاهش حداکثر	
				عمق آبشستگی	طول آبشستگی
A	۳	۳۳/۴۰	۲۱۰/۵۳	-	-
	۷	۴۹/۵۰	۲۸۸/۲۹	-	-
	۱۱	۸۲/۳۰	۳۶۹/۶۱	-	-
	۱۵	۱۱۰/۸۰	۵۲۹/۴۸	-	-
B	۳	۲۴/۲۰	۱۸۳/۱۱	۲۷/۵۴	۱۳/۰۲
	۷	۳۴/۵۶	۲۳۶/۵۳	۳۰/۱۷	۱۷/۹۵
	۱۱	۵۵/۶۲	۲۹۷/۵۷	۳۲/۴۱	۱۹/۴۸
	۱۵	۷۱/۳۲	۴۱۸/۹۱	۳۵/۶۳	۲۰/۸۸
C	۳	۲۱/۸۷	۱۴۷/۵۸	۳۴/۵۲	۲۹/۹۰
	۷	۳۱/۱۱	۱۹۲/۸۸	۳۷/۱۵	۳۳/۰۹
	۱۱	۵۰/۴۹	۲۳۲/۱۴	۳۸/۶۵	۳۷/۱۹
	۱۵	۶۴/۹۱	۳۲۹/۵۵	۴۱/۴۱	۳۷/۷۵
D	۳	۱۹/۴۰	۱۲۸/۱۱	۴۱/۹۱	۳۹/۱۴
	۷	۲۷/۶۷	۱۶۷/۸۱	۴۴/۱۰	۴۱/۷۹
	۱۱	۴۴/۲۵	۲۰۷/۷۶	۴۶/۲۳	۴۳/۷۸
	۱۵	۵۶/۷۹	۲۸۳/۸۹	۴۸/۷۴	۴۶/۳۸

ترکیبات مواد با بستر رسوبی با افزایش دبی جریان، افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج محققین دیگر دارد [۲۷]. تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانورس مونت موریلونیتی و میکروسیلیس برای ۴ دبی آزمایش شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که

عمق آبشستگی بویژه در دبی‌های بالا کاملاً مشهود می‌باشد. مقادیر حداکثر عمق و طول آبشستگی و درصد کاهش حداکثر عمق و طول آبشستگی در آزمایش شاهد و در آزمایش حضور رس و مواد نانورس و میکروسیلیس در جدول ۷ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که درصد کاهش حداکثر عمق و طول آبشستگی ناشی از



شکل ۱۰. درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از اضافه شدن رس به همراه مواد نانورس و میکروسیلیس

Fig. 10. Reduction percent of scouring depth due to the addition of clay with Nano-clay and Micro-silica

از حدود ۵۲/۹۴ سانتی‌متر به ۴۱/۸۹، ۳۲/۹۵ و ۲۸/۳۸ سانتی‌متر در آزمایش‌های دوم تا چهارم محدود شده‌است. مشاهده می‌شود بیشترین تاثیر در تثبیت بستر مربوط به ترکیب رس به همراه نانورس و میکروسیلیس می‌باشد.

شکل ۱۲ پروفیل طولی آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی، برای هر ۴ آزمایش و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در این شکل هم‌چنین می‌توان تاثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانورس و میکروسیلیس را در کاهش عمق و طول پروفیل آبشستگی به وضوح مشاهده کرد.

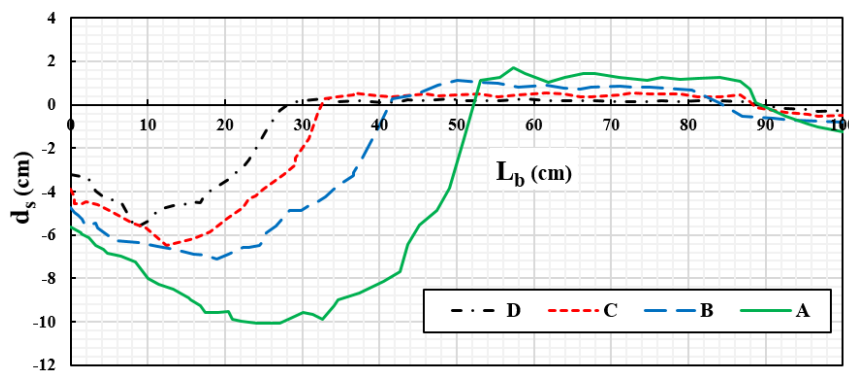
با توجه به نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر، موفقیت قابل‌ملاحظه مواد نانو ساختار و میکروسیلیس در کنترل مکانیسم آبشستگی به ویژه در دبی‌های بالا (سیلابی) در پایین دست سرریز پلکانی کاملاً مشهود بود. هم‌چنین نظر به اینکه رس و نانورس از جنس خاک و سازگار با محیط‌زیست بوده و میکروسیلیس از نظر اقتصادی و قابلیت دسترسی، سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن دارد. از اینرو استفاده از ترکیب رس و نانورس مونت‌موریلونیتی به‌همراه میکروسیلیس در کنترل فرسایش و آبشستگی پایین‌دست، و در مواردی که از دیدگاه عملی نظیر رودخانه‌ها که امکان محافظت از بستر با مصالحی نظیر بتن وجود ندارد، می‌تواند بسیار مفید واقع گردد.

۵- نتیجه‌گیری

مساله آبشستگی یکی از موضوعاتی است که همواره در طراحی انواع مختلف سازه‌های هیدرولیکی اهمیت دارد. از جمله این سازه‌ها

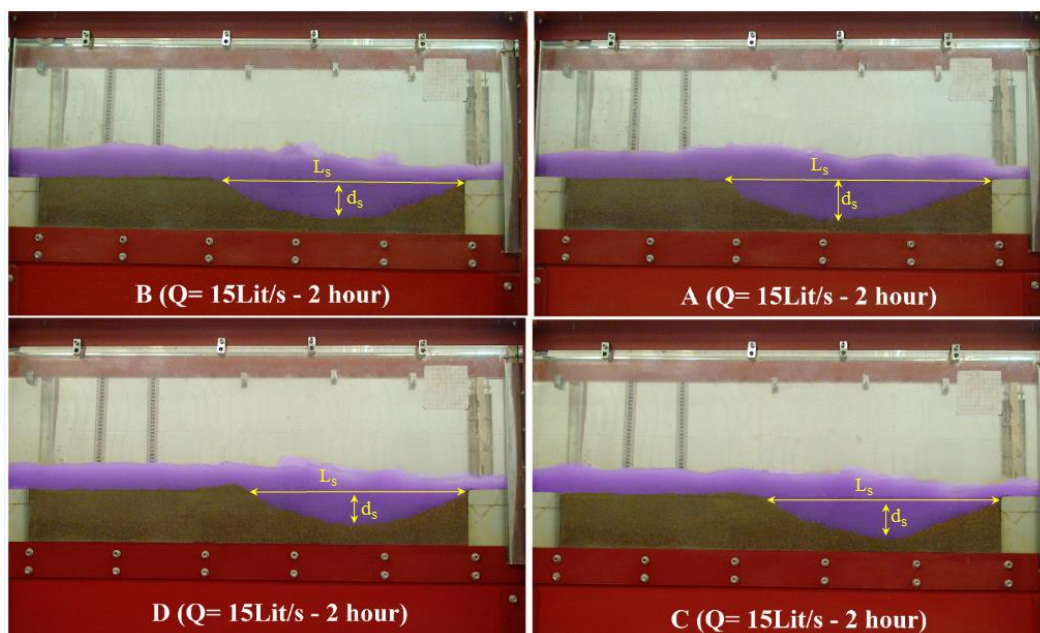
بیشترین درصد کاهش عمق و طول آبشستگی نسبت به دبی‌های دیگر، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده‌است. هم‌چنین تاثیر مثبت ترکیب رس و نانورس به‌همراه اضافه شدن ۵ درصد وزنی بستر رسوبی میکروسیلیس به آن، به‌ترتیب در کاهش عمق و طول آبشستگی به‌خصوص در دبی حداکثر به مقدار ۴۸/۷۴ و ۴۶/۳۸ درصد مشهود است. به‌طوریکه عمده کاهش در دبی حداکثر و در آزمایش چهارم اتفاق افتاده‌است. در آزمایش چهارم میزان کاهش عمق آبشستگی ۴۸/۷۴ درصد در زمان‌های اول آزمایش و ۴۰/۸۳ درصد در آخرین زمان برداشت داده‌های آزمایشگاهی (۲ ساعت)، برداشت گردید. کمترین تاثیر کاهش در عمق و طول آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی در حداقل دبی جریان (یعنی ۳ لیتر بر ثانیه) و با اضافه شدن رس به ذرات رسوبی اتفاق افتاده که به‌ترتیب حدود ۲۷/۵۴ و ۱۳/۰۲ درصد بوده‌است. به‌بیان دیگر می‌توان گفت که استفاده از ترکیب رس و نانورس به‌همراه میکروسیلیس در مواقع دبی‌های سیلابی و در پایین‌دست سرریز پلکانی بخصوص در مناطقی که هر لحظه امکان وقوع بارش‌های باران زیاد و وقوع سیلاب در آن محل‌ها محتمل‌تر است، می‌تواند در کاهش بیشتر فرسایش و آبشستگی پایین‌دست این گونه از سازه‌ها، مفید واقع گردد.

در شکل ۱۱ وضعیت پروفیل آبشستگی بستر پایین‌دست سرریز پلکانی در چهار آزمایش ذکر شده، برای دبی حداکثر جریان (دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه) ارائه شده‌است. مشاهده می‌شود در آزمایش دوم تا چهارم و در آخرین زمان برداشت (۲ ساعت)، عمق آبشستگی به‌ترتیب از حدود ۱۰/۸۰ سانتی‌متر به ۷/۱۳، ۶/۴۹ و ۵/۶۷ سانتی‌متر کاهش یافته‌است. هم‌چنین طول آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی نیز



شکل ۱۱. مقایسه پروفیل طولی آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه بعد از گذشت ۲ ساعت از آزمایش

Fig. 11. Comparison of longitudinal scouring profiles with the discharge of 15 lit/s after 2 hours of the experiment



شکل ۱۲. نمایی از پروفیل طولی آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی برای ۴ حالت مختلف آزمایش

Fig. 12. A view of longitudinal scour profiles of a stepped spillway for 4 different conditions of experiments

تاثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانورس و میکروسیلیس در کاهش گسترش گودال آبشستگی نیز مثبت بوده به‌طوری‌که طول آبشستگی از ۵۲/۹۴ به ۲۸/۳۸ سانتی‌متر (۴۶/۳۸ درصد) کاهش یافته‌است. این نتایج می‌تواند بیانگر اثرات قابل قبول رس و نانورس و میکروسیلیس در کنترل مکانیسم آبشستگی و فرسایش بستر پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به ویژه در دبی‌های بالا و سیلابی باشد.

مراجع

- [1] Aminpour Y. Farhodi J. and Roushan R. (2014) "Investigation of Local Scour Phenomenon Downstream of Stilling Basins in the Presence of Stepped Spillway", Journal of Hydraulics, 9(4) 25-38 (in Persian).
- [2] Abdelhaleem F.S.F. (2013) "Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs", Ain Shams Engineering Journal, 4(4) 675-684.
- [3] Elnikhely E. (2016) "Minimizing scour downstream of spillways using curved vertical sill", Nineteenth International Water Technology Conference, Sharm ElSheikh, Egypt.
- [4] Tuna M. and Emiroglu M. (2011) "Scour profiles at downstream of cascades", Scientia Iranica, 18(3) 338-347.
- [5] Tuna, M.C. and Emiroglu, M.E. (2013) "Effect of step

سرریز پلکانی است. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن رس و ترکیب آن با مواد نانو ساختار و میکروسیلیس به مصالح بستر رسوبی پایین‌دست سرریز پلکانی در کنترل فرسایش و آبشستگی و تثبیت آن پرداخته‌شد. در این تحقیق، ابتدا ارزیابی تاثیر تعداد پله‌ها و رژیم جریان ایجادشده بر روی پله‌ها در میزان آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی آنالیز شد و نتایج نشان داد که بیشترین مقدار پروفیل آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با تعداد پله بیشتر و ارتفاع پله کمتر و در رژیم جریان غیرریزشی در شیب شوت سرریز یکسان اتفاق می‌افتد. در مرحله بعدی تاثیر افزودنی‌های تزریق شده به بستر متحرک پایین‌دست سرریز در تعداد پله از سرریز پلکانی و رژیم جریان غیرریزشی بررسی گردید. نتایج حاکی از تاثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانورس و میکروسیلیس در بهبود و کاهش عمق و طول آبشستگی به‌ویژه در زمان‌های اولیه برداشت در پایین‌دست سرریز پلکانی است. هم‌چنین با افزایش مقدار دبی، بیشترین درصد کاهش عمق و طول آبشستگی اتفاق افتاده‌است. به‌عبارت‌دیگر در دبی حداکثر یعنی ۱۵ لیتربرثانیه و بعد از گذشت ۲ ساعت از روند آزمایش، حداکثر عمق آبشستگی از حدود ۱۱/۰۸ سانتی‌متر در آزمایش اول (شاهد) و با اضافه شدن رس و ترکیب رس با نانورس مونت‌موریلونیتی و میکروسیلیس، به‌ترتیب به حدود ۷/۱۲، ۶/۴۹ و ۵/۶۷ سانتی‌متر (۳۵/۶۳، ۴۱/۴۱ و ۴۸/۷۴ درصد) کاهش یافت.

- [15] Yalin M.S. (1971) "Theory of hydraulic models", Associated companies in New York, London, Macmillan. 266.
- [16] Raudkivi A.J. and Ettema R. (1983) "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3) 338-350.
- [17] Melville B.W. (1997) "Pier and abutment scour: integrated approach", *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2) 125-136.
- [18] Lambe T.W. and Whitman R.V. (2008) "Soil mechanics SI version", John Wiley & Sons.
- [19] Uddin F. (2008) "Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12) 2804-2814.
- [20] Zhang G. (2007) "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", In *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior*. 1-13.
- [21] Majeed Z.H., Taha M.R. and Jawad I.T. (2014) "Stabilization of soft soil using nanomaterials", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4) 503-509.
- [22] Mohammadi M. and Niazi M. (2013) "Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay", *Journal of Advanced Science and Technology*, 3(3) 37-46.
- [23] Negi, C. Yadav R. and Singhai A. (2013) "Effect of silica fume on index properties of black cotton soil", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(8) 828-833.
- [24] Nematzadeh M., Zarfam P. and Nikoo M. (2017) "Investigating laboratory parameters of the resistance of different mixtures of soil-lime-fume using the curing and administrative method", *Case studies in construction materials*, 7 263-279.
- [25] Chanson H. (1994) "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes", *Journal of hydraulic research*, 32(2) 213-218.
- [26] Ghaderi A. (2016) "The Experimental investigation of the effect of Labyrinth Weir geometric parameters with energy dissipater on the scour of downstream", M.Sc. Thesis, University of Maragheh, Maragheh, Iran. (in Persian).
- [27] Daneshfaraz R. Rezaie M. and Ghaderi A. (2019). geometry on local scour downstream of stepped chutes", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3) 579-588.
- [6] Tingle J. (2004) "Emulsion polymers for soil stabilization", In *Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer conference*, Atlantic city, New jersey, USA.
- [7] Zomorodian S.M.A. Arab, M. and Zolghadr M. (2017) "Effect of Clay Content Percentage and Compaction Energy on Pier Bridge Scour in Erosive Bed and in the vicinity of abutment", *Modares Civil Engineering Journal*, 17(2) 167-177 (in Persian).
- [8] Goodarzi A. Goodarzi, S. and Akbari, H. (2015) "Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste", *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 39 333-350.
- [9] Goodarzi A., Goodarzi S. and Akbari H. (2015) "Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste", *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*,. 39 333-350.
- [10] Moayed R.Z. and Allahyari F. (2012) "Determination of required ion exchange solution for stabilizing clayey soils with various PI", In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 61 1098-1102.
- [11] Gasemi E. Zahiri, A. Meftah M. and. Dehghani A.A (2017) "Controlling Local Scouring Around Bridge Pier using Nano-Structured Material", *Water and Soil Science*, 27(3) 79-91 (in Persian).
- [12] Transportation Research Board, (2016) "National Research Council, NCHRP Project 24- 15(2)", Pier and contraction scour in cohesive soil, USA, 136.
- [13] Dey S. and Raikar R.V. (2007) "Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4) 399-413.
- [14] Baylar A. Bagatur T. and. Emiroglu, M.E. (2007) "Prediction of oxygen content of nappe, transition, and skimming flow regimes in stepped-channel chutes", *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(2) 201-208.

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research,
2019. 19(73) 1-16. (in Persian)

“Experimental Investigation of Nano-clay Montmorillonite
Cay Effect on Scour Reduction at Downstream of Screen”

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ghaderi, R. Daneshfaraz, R. Zaerkabeh, F. Ashkan, *Experimental Investigation of Downstream Erosion Control of Stepped Spillways using Microsilica- Structured and Nano Materials, Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 827-840.*

DOI: [10.22060/ceej.2018.14919.5781](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14919.5781)



