



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر رس و نانو رس مونت موریلونیتی بر کاهش آبشستگی در پایین دست صفحات مشبک

مهدی رضایی<sup>۱</sup>، امیر قادری<sup>۲</sup> و رسول دانشفراز<sup>۳\*</sup>

۱ و ۳- به ترتیب: مربی؛ و دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
۲- دانشجوی دکتری عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۳

### چکیده

در این پژوهش از یک راه‌حل غیر سازه‌ای و دوستدار محیط زیست برای کاهش عمق آبشستگی پایین دست صفحات مشبک استفاده شده است. بالادست صفحات مشبک که حوضچه آرامش نامیده می‌شود، به طور کلی در برابر فرسایش محافظت می‌شود ولی پایین دست صفحات همواره در معرض آبشستگی جریان قرار دارد. از آنجا که رس و ماده نانو ساختار رس از نظر زیست‌محیطی قابلیت سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن دارد، رسوب بستر پایین دست صفحات مشبک با رس و ماده نانو ساختار رس مخلوط و پس از تزریق، تأثیر آن در کاهش آبشستگی سه نوع جریان مختلف ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها از تأثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانو رس در کاهش عمق آبشستگی پایین دست صفحات مشبک حکایت دارد. بهترین عملکرد به هنگام ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی اتفاق افتاده است که با به کارگیری آن، طول آبشستگی ۳۳ درصد کاهش یافته است. همچنین، با افزودن رس و ترکیب رس - نانو مونت موریلونیت، کاهش میانگین به ترتیب ۳۹ و ۴۶ درصد در عمق آبشستگی نیز دیده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان گفت که استفاده از ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی تأثیری مثبت در کنترل آبشستگی دارد و در مواردی می‌تواند بسیار مفید باشد که از دیدگاه عملی، از جمله در رودخانه‌ها، نتوان با مصالحی نظیر بتن از بستر آنها محافظت کرد.

### واژه‌های کلیدی

آبشستگی پایین دست، مدل آزمایشگاهی، مواد نانو ساختار مونت موریلونیتی

### مقدمه

مشبک که حوضچه آرامش نامیده می‌شود، اتفاق می‌افتد. جریان، پس از خروج از حوضچه آرامش، به ناحیه‌ای محافظت نشده‌ای وارد خواهد شد که کاهش طول و عمق گودال آبشستگی در این ناحیه از هدف‌های این بررسی است. اهمیت بررسی آبشستگی زمانی آشکار می‌شود که عمق آبشستگی چشمگیر باشد، به گونه‌ای که این آبشستگی به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد یا در جهت جریان یا خلاف آن حرکت کند و پایداری این سازه‌ها را

تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از صفحات مشبک عمود بر مسیر جریان فوق بحرانی می‌تواند انرژی جریان را مستهلک کند (Rajaratnam & Hurtig, 2000; Bozkus et al., 2007; Sadeghfam et al., 2014). در مقیاس آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی از طریق دریچه مولد جریان فوق بحرانی ایجاد می‌شود. استهلاک انرژی و پرش هیدرولیکی در فاصله بین دریچه و صفحات

در محل و نزدیک به محل وقوع آبشستگی و از طریق تغییر الگوی جریان‌های مخرب بوده است. روش پیشنهادی این تحقیق روشی است نوین در کنار سایر روش‌ها که اختلالی در محیط زیست رودخانه ایجاد نخواهد کرد. در این پژوهش سعی شده است راه‌حلی مناسب به منظور کاهش مشکلات گفته شده با استفاده از مصالح سازگار با طبیعت و اکولوژی رودخانه و با هدف کاهش عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی ارائه شود. از طرفی طول و عمق آبشستگی در پایین دست صفحات مشبک - که اخیراً مورد استفاده قرار گرفته - تاکنون به‌طور کامل ارزیابی نشده و ضرورت مطالعه آن توسط نویسندگان مطالعه حاضر احساس شده است.

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی به مصالح رسوبی پایین دست صفحات مشبک به منظور کاهش عمق و طول آبشستگی در دبی‌های مختلف پرداخته شده است. برای وارد کردن رس یا مخلوط رس و نانو رس مونت موریلونیتی، از روش تزریق<sup>۱</sup> در عمق حداکثر معادل آبشستگی در لایه فاقد رس و یا مخلوط رس و نانو رس استفاده شده است. برای تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر در این مطالعه از روش پی باکینگهام استفاده شده است. در بررسی آبشستگی، می‌توان عمق و طول آبشستگی را تابعی از متغیرهای زیر در نظر گرفت (روابط ۱ و ۲):

$$D_{\max} = f_1(q, d, B, d_s, y_A, y_D, y_E, x, x_g, n, t, g, \rho, \rho_s, \mu) \quad (1)$$

$$L_{\max} = f_2(q, d, B, d_s, y_A, y_D, y_E, x, n, t, \rho, \rho_s, g, \mu) \quad (2)$$

دریچه؛  $y_D$  = عمق اولیه بعد از صفحات مشبک؛  
 $y_E$  = عمق ثانویه بعد از صفحات مشبک؛  $x$  = فاصله  
 بین صفحات مشبک و دریچه؛  $x_g$  = فاصله دریچه کشوی از  
 ورودی کانال؛  $n$  = درصد روزنه صفحات مشبک؛

در معرض خطر قرار دهد. از طرفی، استفاده از برخی مصالح ساختمانی مانند بتن برای تثبیت بستر، می‌تواند تأثیرات مخرب زیست‌محیطی نیز به همراه داشته باشد.

تحقیقات متعددی در زمینه آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی توسط محققانی چون چابرت و انگل‌دینگر (Chabert & Engeldinger, 1956)، لی و همکاران (Lee et al., 1961)، چو (Chiew, 1992)، زراتی و همکاران (Zarrati et al., 2004)، سنوسی و حبیب (Sanoussi & Habib, 2008)، کریمایی و زراتی (Karimae & Zarrati, 2011)، سینگ و میاتی (Singh & Maiti, 2012)، السبایی (Elsebaie, 2013)، نصرالله و همکاران (Nasr-Allah et al., 2016) انجام شده است. تونا و امیراوغلو (Tuna & Emiroglu, 2011; 2013)، عبدالهالم (Abdelhaleem, 2013)، ایلنیکهلی (Elnikhely, 2016)؛ آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی و سایر سرریزها و تأثیر عمق پایاب و شرایط هیدرولیکی جریان بر میزان آبشستگی پایین دست را مورد بررسی قرار دادند. گوئل (Goel, 2010) آبشستگی در اطراف پایه‌های پل و تغییرات هندسی آبشستگی (طول، عمق و حجم) را مورد بررسی قرار داد.

نتایج حاکی از افزایش پارامترهای هندسی آبشستگی با افزایش دبی بود. روش‌هایی که محققان برای جلوگیری از آبشستگی ارائه داده‌اند بیشتر به صورت ایجاد سازه‌هایی

که در آنها،

$D_{\max}$  = حداکثر عمق آبشستگی؛  $L_{\max}$  = حداکثر طول  
 حفره آبشستگی؛  $q$  = دبی واحد عرض؛  $d$  = بازشدگی  
 دریچه؛  $B$  = عرض کانال؛  $y_A$  = عمق اولیه بعد از

$t_s$  = ضخامت صفحات مشبک؛  $s$  = چگالی ذرات رسوبی؛ با استفاده از روش پی باکینگهام و در نظر گرفتن  $\rho$  = چگالی آب؛  $d_s$  = اندازه ذره رسوبی؛  $g$  = شتاب گرانش؛ متغیرهای تکراری  $d_s, \rho, g$  پارامترهای بدون بعد زیر  $\mu$  = ویسکوزیته دینامیکی و  $\rho$  = جرم مخصوص آب. به دست می آیند (روابط ۳ و ۴):

$$\frac{d_s}{D_s} = f_1(Fr_D, \frac{d}{d_s}, \frac{B}{d_s}, \frac{y_A}{d_s}, \frac{y_D}{d_s}, \frac{y_E}{d_s}, \frac{x}{d_s}, \frac{x_g}{d_s}, \frac{\rho_s y_D}{\rho d_s}, \frac{t_s}{d_s}, n, \frac{\mu}{\rho d_s^2 g^2} = Re_*) \quad (3)$$

$$\frac{d_s}{L_s} = f_1(Fr_D, \frac{d}{d_s}, \frac{B}{d_s}, \frac{y_A}{d_s}, \frac{y_D}{d_s}, \frac{y_E}{d_s}, \frac{x}{d_s}, \frac{x_g}{d_s}, \frac{\rho_s y_D}{\rho d_s}, \frac{t_s}{d_s}, n, \frac{\mu}{\rho d_s^2 g^2} = Re_*) \quad (4)$$

با فرض ثابت بودن مقادیر  $d_s, B, d, t_s, \alpha, n$  و  $\rho_s$  همچنین تأثیر ناچیز پارامترهای  $y_A$  و  $y_E$  و  $Re_*$  روی حداکثر عمق و طول آبشستگی، دو رابطه فوق به صورت زیر خلاصه می شوند (روابط ۵ و ۶):

$$\frac{d_s}{D_s} = f_1(Fr_D, \frac{y_D}{d_s}, \frac{t_s}{d_s}) \quad (5)$$

$$\frac{d_s}{L_s} = f_2(Fr_D, \frac{y_D}{d_s}, \frac{t_s}{d_s}) \quad (6)$$

عبارت  $Fr_D$  عدد فرود جریان در مقطع  $D$  (پایین دست صفحات مشبک) است. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی به مصالح رسوبی پایین دست صفحات مشبک به منظور کاهش پروفیل آبشستگی مطابق شرایط آزمایشگاهی جدول (۱) پرداخته شده است. با توجه به محدودیت های آزمایشگاهی و کف کنی بستر رسوبی و بررسی قطرهای مختلف سنگدانه در بستر کانال، با آزمایش های اولیه مشخص گردید که ماسه با قطر متوسط ۱/۸ میلی متر و انحراف معیار ۱/۲۸، منطبق بر دانه بندی معرفی شده مناسب برای جریان فوق بحرانی بعد از اسکرین خواهد بود.

که در آنها،

جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر

تعداد	دبی	محدوده اعداد فرود	محدوده عمق جریان بعد در بچه	نوع آزمایش
برداشت	(لیتر بر ثانیه)	بعد در بچه	(سانتی متر)	
۱۸	۶/۲۵، ۵، ۳	$5/13 \leq Fr \leq 5/5$	$0/0 \leq y \leq 7/62$	آزمایش شاهد
۱۸	۶/۲۵، ۵، ۳	$5/13 \leq Fr \leq 5/5$	$0/0 \leq y \leq 7/62$	آزمایش با ترکیب رس به بستر رسوبی
۱۸	۶/۲۵، ۵، ۳	$5/13 \leq Fr \leq 5/5$	$0/0 \leq y \leq 7/62$	آزمایش با ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی

آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه استفاده گردید. برای اینکه سطحی صاف و با کمترین زبری در اختیار باشد، کف و دیواره های کانال از جنس پلکسی گلس ساخته شده است. جریان کانال با دو پمپ هر یک با حداکثر دبی ۷/۵ لیتر بر

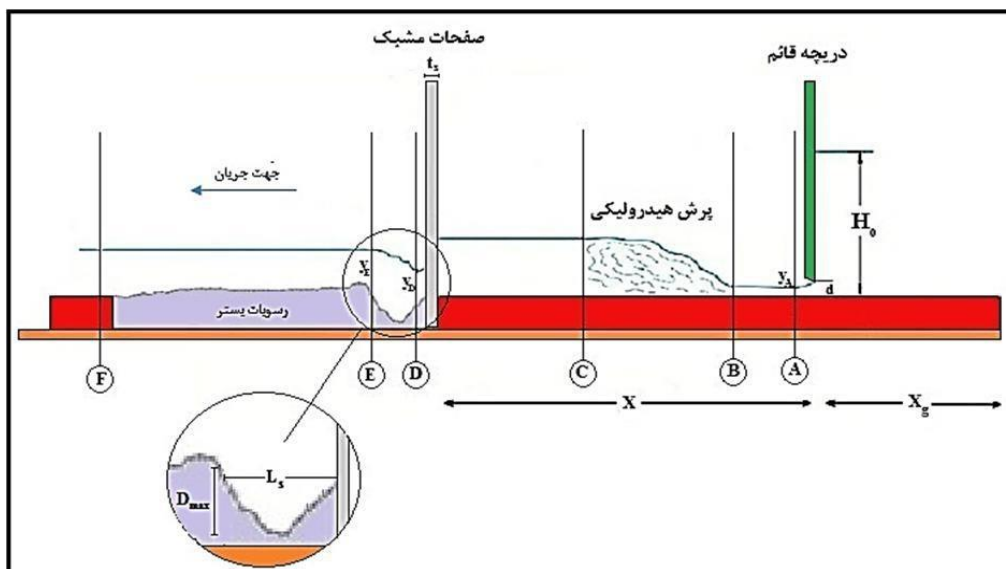
## مواد و روشها

### تجهیزات آزمایشگاهی

برای اجرای آزمایشها از یک کانال با مقطع مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ متر در

نتایج حاصل از آزمایش اولیه نشان داد که طول حفره آبشستگی تا انتهای ۱ متر در دبی‌های بالا افزایش می‌یابد. همچنین عمق حفره تا آستانه کف‌کنی پیشروی می‌کند. بر این اساس طول بستر رسوبی ۱/۳ متر با در نظر گرفتن فاصله مناسب جهت توسعه طول حفره آبشستگی و ضخامت بستر ۱۱/۴ سانتی‌متر، با در نظر گرفتن عمق مناسب برای کاهش احتمال کف‌کنی بر اثر جریان، تعیین گردید. برای ایجاد بستر رسوبی با ضخامت مشخص در کانال، از دو کف‌بند از جنس پلی‌اتیلن به دلیل زبری پایین و نزدیک به زبری پلکسی‌گلس با ارتفاع ۱۱/۴ سانتی‌متر از کف کانال استفاده شد. طول کف‌بند اول ۲/۵ متر از ورودی کانال تا صفحات مشبک (ناحیه حوضچه آرامش) و طول کف‌بند دوم نیز ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در فاصله ۱/۳ متری بعد از صفحه صفحات مشبک نصب شده است (شکل ۱).

ثانیه، متصل به یک مخزن کوچک در ابتدای کانال، تأمین شده است. دبی جریان نیز با دو شیر متصل به دو روتامتر نصب شده در خروجی پمپ‌ها اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد جریان فوق بحرانی، از یک دریچه کشوی استفاده شد که به فاصله ۱ متر از ورودی کانال نصب شده است. فاصله دریچه تا صفحات مشبک نیز ۱/۵ متر و میزان بازشدگی آن به اندازه ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در خلال آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شده است. طول و ضخامت بستر رسوبی با توجه به مشخصات جریان بعد از صفحات مشبک و میزان آبشستگی به دست آمده از آزمایش اولیه به صورت تجربی مشخص گردید. به این ترتیب که ذرات رسوبی اولیه با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، بعد از صفحات مشبک به طول ۱ متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با شدت جریان‌های ۳، ۵ و ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۱- نمای کلی از تجهیزات و کانال آزمایشگاهی مورد استفاده

در شکل ۱، مقطع A نقطه شروع جریان فوق بحرانی انقباض یافته، مقطع B محل شروع پرش هیدرولیکی، مقطع C عمق جریان در انتهای پرش، مقطع D شروع جریان و عمق اولیه پرش هیدرولیکی بعد از صفحات

مشبک، مقطع E انتهای پرش هیدرولیکی بعد از صفحات مشبک و مقطع F عمق پایاب را نشان می‌دهد. عمق حفره آبشستگی در پایین دست صفحات مشبک در فواصل زمانی مشخص تا پایان آزمایش اندازه‌گیری شده است. با توجه به

متحرک، با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer تصویر لحظه پایانی آزمایش به‌عنوان داده ملاک محاسبات و تصاویر لحظات قبلی جهت مقایسه زمانی پیشرفت حفره آبستگي پردازش و مشخصات حفره آبستگي و عمق‌های جریان مورد نیاز برداشت گردید. همچنین، جهت کالیبره کردن نقاط در نرم‌افزار Plot Digitizer از صفحه میلی‌متری بسیار ریز رایانه‌ای نصب شده بر دیواره کانال استفاده شد.

شکل ۲ صفحات مدرج روی دیواره کانال (الف)، روتامترهای نصب شده روی پمپ‌ها برای اندازه‌گیری دبی جریان (ب) و ترازسنج میله‌ای استفاده شده (ج) در این تحقیق را نشان می‌دهد.

تغییرات شدید عمق آبستگي نسبت به زمان در زمان‌های اولیه آزمایش، برداشت‌ها در فواصل زمانی کوتاه ۳۰ ثانیه‌ای (۱۰ برداشت)، ۵ دقیقه‌ای (۴ برداشت)، ۱۰ دقیقه‌ای (۲ برداشت) به مدت ۳۰ دقیقه ثبت شدند. برای تعیین نحوه گسترش طولی و عمقی حفره آبستگي در پایین دست صفحات مشبک، در انتهای هر آزمایش با استفاده از ترازسنج میله‌ای و یک دوربین عکاسی دیجیتال با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer تمام پروفیل بستر تهیه گردید. به این ترتیب که از لحظه عبور جریان از اسکرین و ورود به بستر متحرک طی زمان‌بندی‌های مشخص، تصویری از دیواره کانال ثبت شد. در پایان آزمایش با متوقف شدن پیشرفت آبستگي در بستر



شکل ۲- روتامترهای تنظیم کننده دبی پمپ جریان و ترازسنج میله‌ای

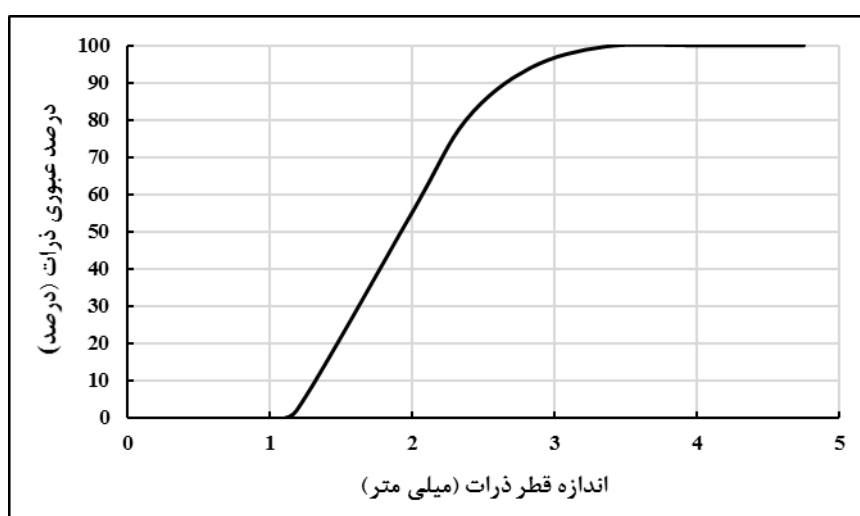
معیار رسوبات ( $\sigma_g = \left( \frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{0.5}$ ) کمتر از ۱/۳ باشد، مصالح یکنواخت و اگر بزرگ‌تر از ۱/۳ باشد، مصالح غیر یکنواخت است. عمق آبستگي در رسوبات غیر یکنواخت کمتر از عمق آبستگي در رسوبات یکنواخت است و با افزایش انحراف معیار رسوبات، عمق آبستگي کاهش می‌یابد (Melville, 1997). برای دستیابی به دانه‌بندی یکنواخت در رسوبات به کار رفته در آزمایش‌ها، دانه‌بندی

### مشخصات ذرات رسوبی بستر

در این تحقیق برای در دست داشتن معیار مجاز جهت تعیین قطر ذرات از روابطی استفاده شد که یالین (Yalin, 1971) ارائه داده است. برابر تحقیقات رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983)، برای جلوگیری از تشکیل ریپل در بستر آبرفتی کانال و نیز برای حذف تأثیر چسبندگی ذرات رسوبی بر فرایند آبستگي، اندازه میانه قطر ذرات باید بزرگ‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد. اگر انحراف

در شکل ۳ و مشخصات مکانیکی رسوبات بستر در جدول ۲ برای تحقیق حاضر ارائه شده است. لازم است یادآوری شود که در آزمایش‌های دوم و سوم حدود ۹۰ درصد از ذرات رسوبی بستر ماسه مانده از الک ۱۶ با دانه‌بندی مشخص شده در شکل ۳ و بقیه ذرات ریز مخلوط با رس با دانه‌بندی مشخص شده مطابق شکل ۴ است.

ذرات معمولاً در قالب درصد وزنی نمونه عبور کرده از الک‌های استاندارد بیان می‌شود. در این مطالعه با توجه به مطالب فوق و رعایت معیارها و روابط مجاز، ماسه با قطر متوسط ۱/۸ میلی‌متر با انحراف معیار ۱/۲۸ انتخاب گردید. در این حالت، هم حداکثر مقدار آبشستگی به دست می‌آید و هم از ایجاد ریپل جلوگیری می‌شود. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر (درشت‌دانه)

جدول ۲- مشخصات مکانیکی رسوبات بستر

$C_c$	$C_u$	$\sigma_g$	$D_{60}$ (میلی‌متر)	$D_{30}$ (میلی‌متر)	$D_{10}$ (میلی‌متر)	
۰/۶۹	۱/۶۱	۱/۲۸	۲/۱	۱/۷	۱/۳	ذرات بستر

به ۱۰ درصد کل آن را تشکیل می‌دهد، بر مبنای آزمایش‌های تعیین حد روانی (WL) و خمیری (WP) به روش استاندارد ASTM D4318-87 و نیز آزمایش هیدرومتری پیشنهادی استاندارد ASTM D421-58 بر اساس جدول ۳ رده‌بندی گردید. منحنی دانه‌بندی ریزدانه در شکل ۴ ارائه گردیده است.

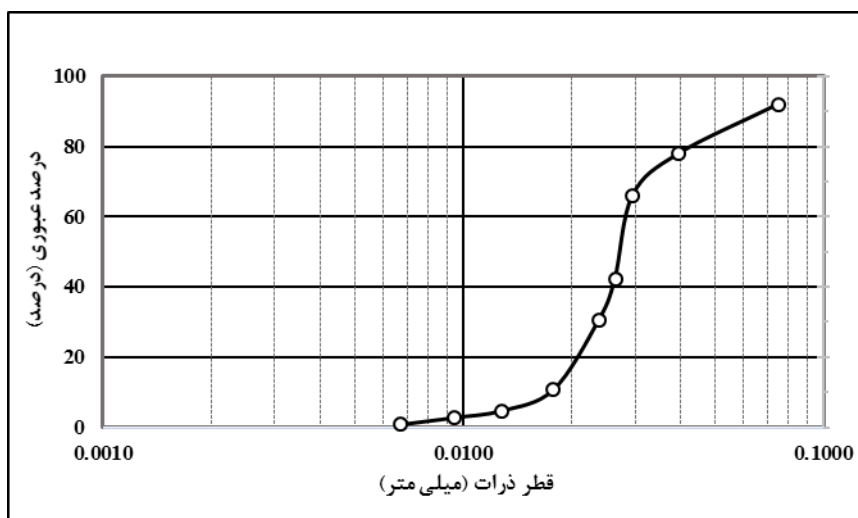
گفتنی است که چون ضریب یکنواختی ذرات ( $C_u = 1/61$ ) محاسبه شده کمتر از ۲ است می‌توان مصالح مورد استفاده را به‌عنوان ذرات یکنواخت در نظر گرفت (Lambe & Whitman, 1969).

#### ویژگی رس و نانو رس

خاک ریزدانه موجود در بستر درشت دانه که نزدیک

جدول ۳- مشخصات رس افزوده شده به بستر

گروه بندی	شاخص خمیری	حد خمیری	حد روانی	وزن مخصوص
CH	٪۲۳/۳	٪۲۶/۹	٪۵۰/۲	Gs=2.75



شکل ۴- منحنی دانه بندی رسوبات بستر (ریزدانه)

کاتیونی و آنیونی و با قید و بند و اتصال ایجاد می بین نانو ذرات و دیگر ذرات خاک سبب بهبود پارامترهای فیزیکی خاک می شود. تحقیقات نشان داده است که افزودن نانو رس مونت موریلونیتی تا مقدار یک درصد در روش خشک و نیم درصد در روش تر سبب بهبود قابل توجه مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری آن (به میزان ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر) می شود (Zhang, 2007).

مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو رس مونت موریلونیتی مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده است.

نانو رس اضافه شده به بستر کانال، نانو رس مونت موریلونیتی است. نانو رس های مونت موریلونیتی گروهی از کانی های رس معدنی هستند که ساختار آنها از یک ورق گیسپیت محصور با ورق های سیلیکا در بالا و پایین و با پیوندهای واندروالسی تشکیل شده است. طول و عرض این ذرات در حد چند دهم تا ۱/۵ میکرون و بعد سوم آنها با تفاوت چشمگیری از طول و عرض آن به اندازه یک نانومتر است (Uddin, 2008). این محصول پس از افزوده شدن به خاک های ریزدانه به روش تر یا خشک، با ایجاد واکنش شیمیایی و فیزیکی و از طریق مبادله

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو رس مونت موریلونیتی

نوع کانی	اندازه ذرات (نانو متر)	ضریب تبادل یونی (میلی اکی والان بر ۱۰۰ گرم)	مساحت ویژه (متر مربع بر گرم)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	رنگ	رطوبت (درصد)
مونت موریلونیت	۱/۱۸	۴۸	۲۵۰	۰/۶	زرد کم رنگ	۱/۵

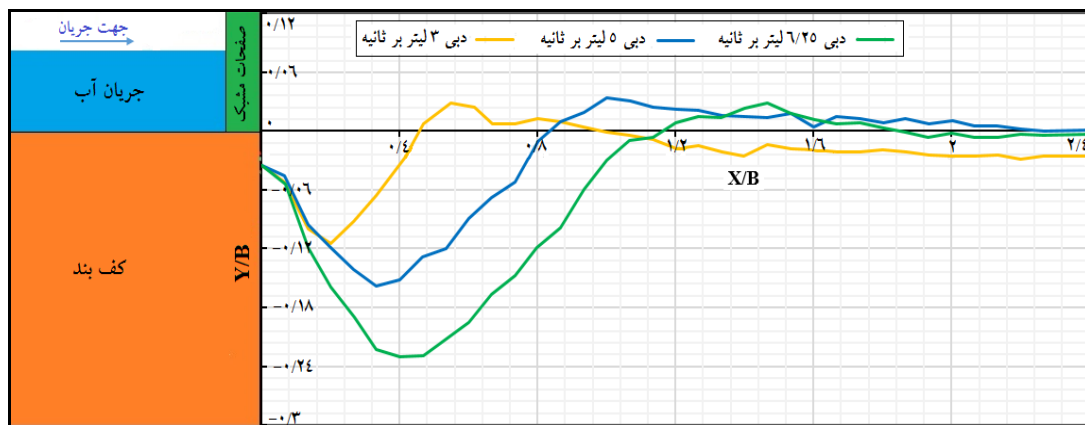


چسبندگی باعث کاهش مقاومت برشی خاک است. کاهش نفوذپذیری خاک باعث تماس کمتر آب با مواد سیمانی اطراف ذرات خاک می‌شود و ضمن جلوگیری از زوال مقاومت برشی، به کاهش طول و عمق آبشستگی، در مقایسه با حالت تراوا، می‌انجامد.

### نتایج و بحث

شکل ۵ پیشرفت پروفیل طولی آبشستگی در پایین- دست صفحات مشبک را در ۳ دبی جریان مختلف بدون افزودن رس در بستر نشان می‌دهد. در این شکل، محور قائم نسبت بی‌بعد عمق آبشستگی به عرض کانال و محور افقی نسبت بی‌بعد طول آبشستگی به عرض کانال است. مشاهده می‌شود که افزایش دبی جریان عبوری از صفحات مشبک باعث افزایش عمق و طول آبشستگی پایین‌دست شده است، به طوری که تقریباً با دو برابر شدن شدت جریان، عمق و طول آبشستگی به ترتیب ۲/۶ و ۲/۳ برابر افزایش یافته است.

نانو رس مورد استفاده در این پژوهش به روش تر با مقدار آب مورد نیاز و با دستگاه مخلوط‌کن با دور گردش بالا مخلوط و سوسپانسیون حاوی ۱ درصد نانو رس مونت موریلونیت به خاک به صورت یکنواخت اضافه شد. تحقیقات نشان می‌دهد که قسمت عمده افزایش مقاومت برشی خاک ( $c = \sigma + \tan(\phi)$ ) به دلیل افزایش چسبندگی خاک است و مقدار بیشینه افزایش در ۱ درصد مشاهده شده است (Mohammadi & Niazian, 2013; Zaid *et al.*, 2014). این پدیده و نیز کاهش نفوذپذیری باعث کاهش مقدار آبشستگی مورد بحث است. یادآوری می‌شود که مقاومت برشی خاک تابعی از زاویه اصطکاک و سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک است و هر روش بهسازی، نظیر تراکم یا تثبیت، بر اصلاح و بهبود یکی از آن پارامترها متمرکز است. برخلاف روش‌های تراکم که بر افزایش  $\phi$  منجر می‌شود، روش‌های تثبیت عمدتاً بر بهبود سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک تأکید دارد. تضعیف هر یک از پارامترهای مؤثر زاویه اصطکاک و



شکل ۵- پیشرفت پروفیل طولی آبشستگی بعد از صفحات مشبک در سه دبی جریان و محدوده  $0.5 \leq Fr \leq 0.13$

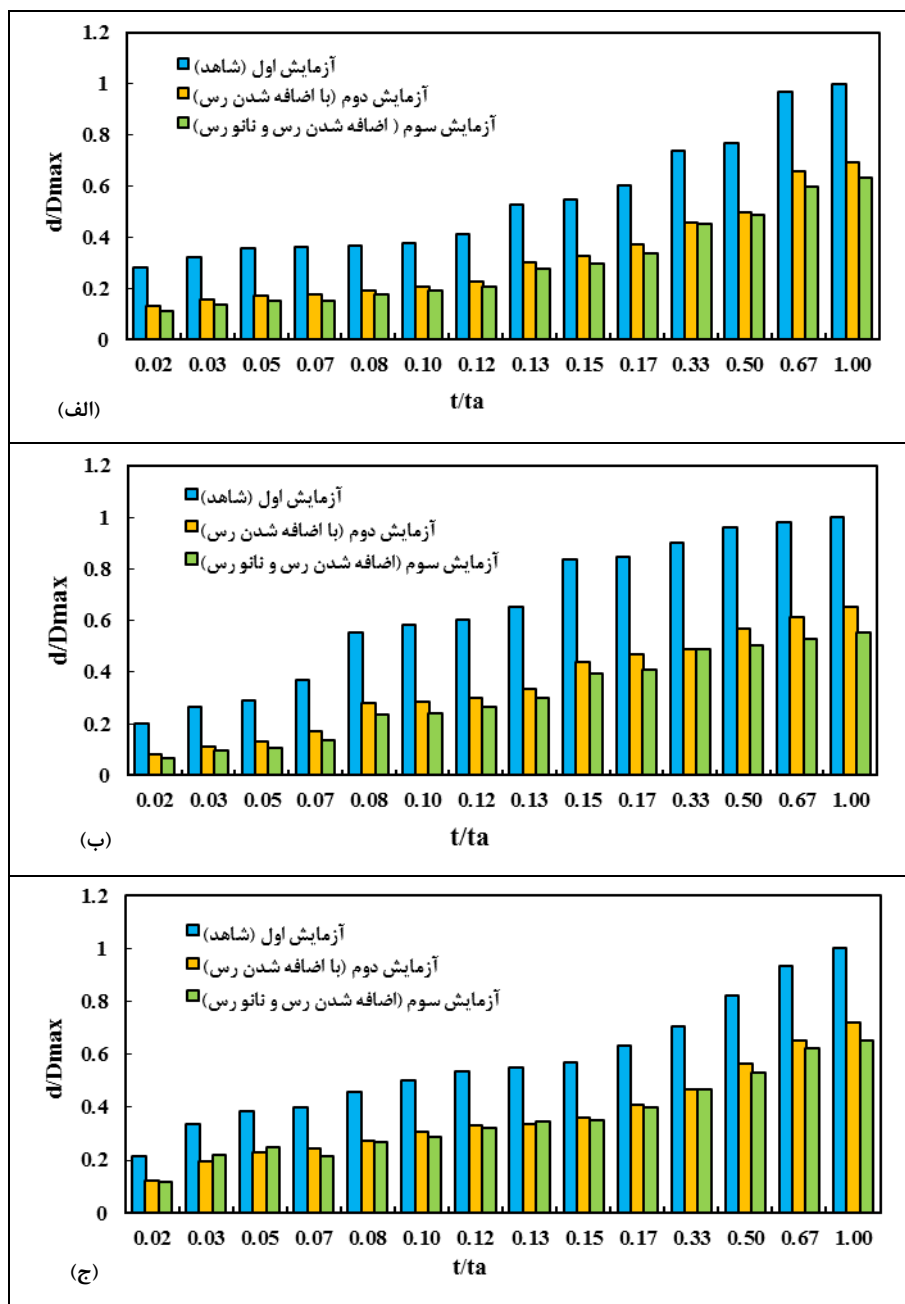
بی‌بعد زمان موردنظر به زمان کل آزمایش است. مشاهده می‌شود در دبی‌های مورد آزمایش حداکثر عمق آبشستگی در زمان  $t/t_a$  معادل یک اتفاق می‌افتد. همچنین با اضافه شدن ۱۰ درصد رس معرفی شده برای آزمایش دوم و نیز اضافه شدن ۱ درصد وزنی رس به‌عنوان درصد نانو رس

شکل ۶ تغییرات عمق نسبی آبشستگی پایین‌دست صفحات مشبک را با اضافه شدن رس و نانو رس به مصالح رسوبی، در سه دبی مختلف، نشان می‌دهد. در این شکل، محور قائم نسبت بی‌بعد عمق آبشستگی به عمق بیشینه آبشستگی به‌دست آمده در آزمایش و محور افقی نسبت



مقاومت برشی خاک از طریق چسبندگی بیشتر دانه‌های رسوبی در اثر اضافه شدن رس به ذرات است. در این شکل، تأثیر بیشتر نانو رس در افزایش قدرت چسبندگی ذرات رسوبی و کاهش میزان آبستگي آن در اثر ترکیب با رس و اضافه شدن به ذرات رسوبی، به‌خصوص در دبی بالا، مشهود است.

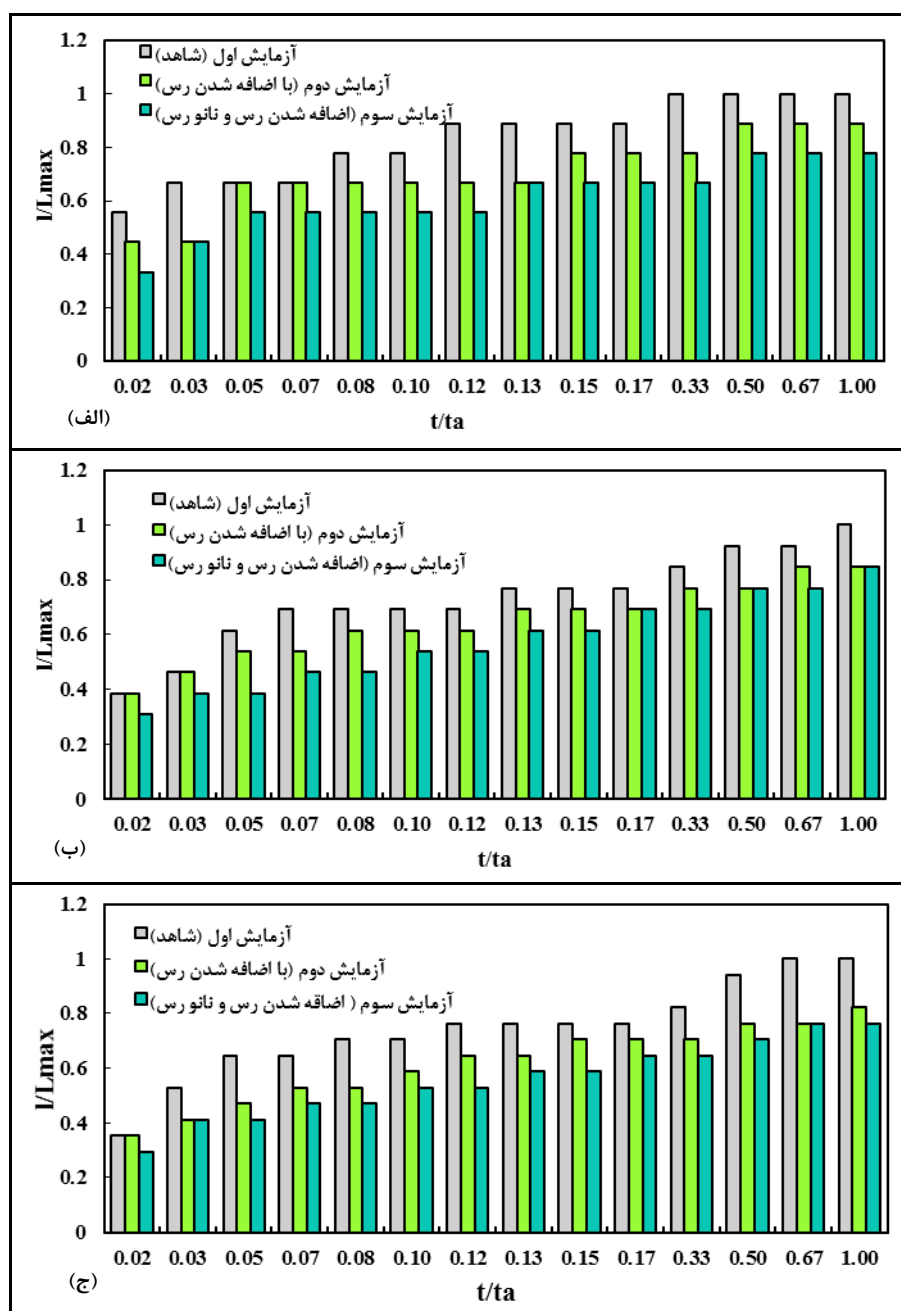
مونت موریلونیتی در آزمایش سوم، عمق آبستگي در تمامی زمان‌های آزمایش کاهش یافته است. همچنین، تأثیر رس و ترکیب آن با نانو رس با افزایش دبی جریان بیشتر شده است به‌طوری‌که در بحرانی‌ترین زمان آزمایش (۳۰ دقیقه)، بیشترین کاهش عمق آبستگي در دبی ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده است که دلیل آن افزایش



شکل ۶- تغییرات زمانی عمق نسبی آبستگي با اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی (الف)  $Fr=5/5$ ، (ب)  $Fr=10/85$  و (ج)  $Fr=13/5$

نتایج عمق آبشستگی، مشاهده می‌شود که اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانو رس باعث کاهش طول آبشستگی در تمامی زمان‌های آزمایش شده است. تأثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی در کاهش گسترش طول آبشستگی نیز مشهود و در اثر به‌کارگیری آن، طول آبشستگی ۳۳ درصد کاهش یافته است.

شکل ۷ تغییرات طول نسبی آبشستگی پایین دست صفحات مشبک را با وجود اضافه شدن رس و نانو رس به مصالح رسوبی، در سه دبی مختلف، نشان می‌دهد. در این نمودارها، محور قائم نسبت بی‌بعد طول آبشستگی به بیشترین طول آبشستگی به دست آمده و محور افقی نسبت بی‌بعد زمان موردنظر به زمان کل آزمایش است. همانند



شکل ۷- تغییرات زمانی طول نسبی آبشستگی با اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی

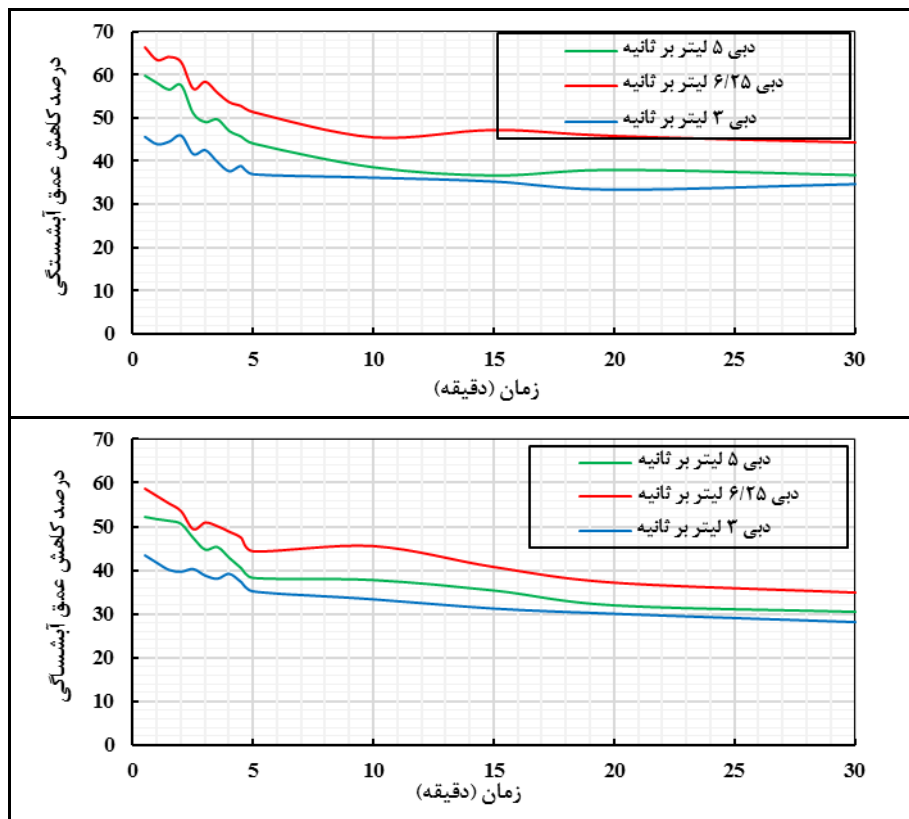
(الف)  $Fr=5/5$ ، (ب)  $Fr=10/85$  و (ج)  $Fr=13/5$

حداکثر مشهود است، به طوری که بیشترین کاهش در دبی حداکثر در آزمایش سوم اتفاق افتاده است، در آزمایش سوم، میزان کاهش عمق آبشستگی ۶۶/۳ درصد در زمان‌های اول آزمایش و ۴۴/۴ درصد در آخرین زمان برداشت داده‌های آزمایشگاهی (۳۰ دقیقه)، ثبت شده است. کمترین تأثیر کاهش در عمق آبشستگی پایین دست صفحات مشبک در حداقل دبی جریان (یعنی در ۳ لیتر بر ثانیه) و با اضافه شدن رس به ذرات رسوبی نزدیک به ۲۸/۲ درصد بوده است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که استفاده از ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی در دبی‌های سیلابی و در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، به خصوص در مناطقی که هر لحظه امکان وقوع بارش‌های شدید و وقوع سیلاب در آن محل‌ها بالاست، می‌تواند در کاهش بیشتر فرسایش و آبشستگی پایین دست این گونه از سازه‌ها مفید باشد.

همچنین، با افزودن رس و ترکیب رس و نانو مونت موریلونیت، در عمق آبشستگی به طور میانگین ۳۹ و ۴۶ درصد کاهش دیده می‌شود. این بهبود و تأثیر مثبت رس و به خصوص ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی در افزایش قدرت چسبندگی ذرات رسوبی و افزایش مقاومت برشی ذرات، در دبی‌های بالا مشهودتر است.

برای تحلیل بهتر نتایج فوق، تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی برای سه دبی آزمایش شده، در شکل ۸ ارائه شده است.

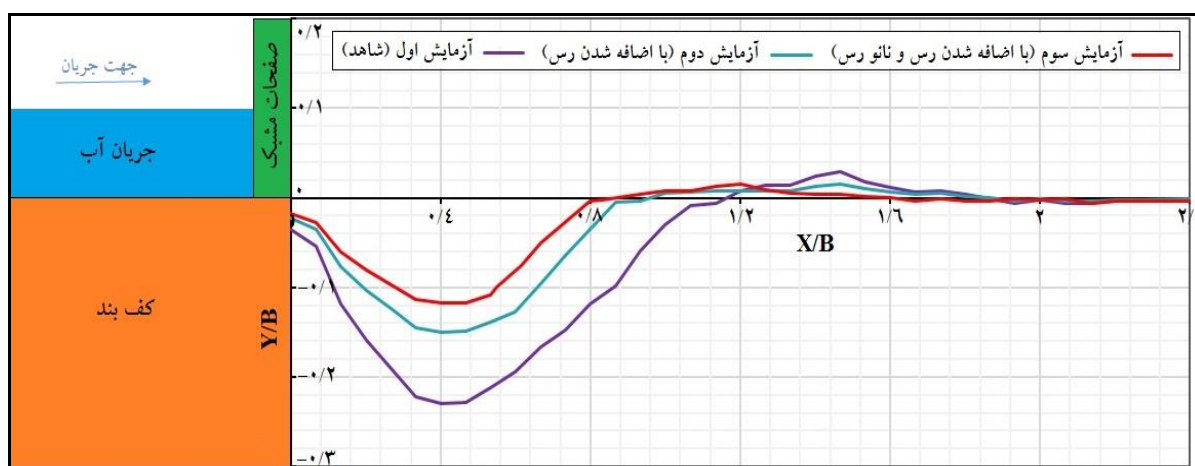
در دو نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش آبشستگی در دبی حداکثر جریان (۶/۲۵ لیتر بر ثانیه) اتفاق افتاده است. همچنین، تأثیر مثبت ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی نسبت به اضافه شدن رس به ذرات رسوبی، در کاهش آبشستگی، به خصوص در دبی



شکل ۸- نمودار تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از اضافه شدن (الف) رس به ذرات رسوبی و (ب) ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی به ذرات رسوبی

به ترتیب از حدود ۶/۹۱ سانتی‌متر به حدود ۴/۵ و ۳/۵۲ سانتی‌متر کاهش یافته است. همچنین طول آبشستگی در پایین دست صفحات مشبک نیز از حدود ۳۶ سانتی‌متر به ۲۸ و ۲۴ سانتی‌متر در آزمایش‌های دوم و سوم محدود شده است.

در شکل ۹ وضعیت پروفیل عمق آبشستگی بستر کانال در سه آزمایش ذکر شده، برای دبی حداکثر جریان (دبی ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه)، ارائه شده است. در اینجا مشاهده می‌شود که در آزمایش دوم و سوم، در آخرین زمان برداشت (۳۰ دقیقه)، عمق آبشستگی



شکل ۹- مقایسه پروفیل طولی آبشستگی در صورت اضافه شدن رس و ترکیب آن با نانو رس (در دبی جریان ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه و  $Fr=13/5$ ) و ۳۰ دقیقه بعد آزمایش

ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل همچنین می‌توان تأثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانو رس را در کاهش عمق و طول پروفیل آبشستگی به وضوح مشاهده کرد.

شکل ۱۰ پروفیل طولی آبشستگی مصالح بعد صفحات مشبک در شرایط بدون استفاده از رس و نانو رس مونت موریلونیتی و با اضافه شدن آنها را در دبی ۶/۲۵ لیتر بر



شکل ۱۰- نمایی از پروفیل طولی آبشستگی

(الف) بدون استفاده از رس و نانو رس مونت موریلونیتی، (ب) با اضافه شدن رس و (ج) با اضافه شدن ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی

### نتیجه گیری

گسترش گودال آبشستگی نیز مثبت است به طوری که طول آبشستگی اولیه (۳۶ سانتی متر) با اضافه شدن رس و ترکیب رس با نانو رس مونت موریلونیتی، به ترتیب در حدود ۱۹/۵ درصد و ۳۳ درصد کاهش یافت. این نتایج می تواند بیانگر موفقیت چشمگیر رس و نانو رس در کنترل مکانیسم آبشستگی فرسایش بستر پایین دست سازه های هیدرولیکی به ویژه در دبی های سیلابی باشد. با توجه به اینکه رس و نانو رس با محیط زیست سازگارند و از نظر اقتصادی و قابلیت دسترسی، سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن داشته و کاربرد آن در سیستم به کارگیری صفحات مشبک به محققان، بهره برداران و طراحان توصیه می گردد. همچنین انتظار می رود با افزایش غلظت مواد نانو رس در بستر آبراهه، بتوان کارایی بهتری از این مواد را در کاهش عمق بیشینه آبشستگی در محل سازه های هیدرولیکی، مخصوصاً در پایین دست صفحات مشبک و در مواقع سیلابی شاهد بود.

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی به مصالح ساختمانی پایین دست سازه مستهلک کننده انرژی (صفحات مشبک)، در کاهش عمق و طول آبشستگی پرداخته شد.

نتایج آزمایشگاهی حاکی از تأثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانو رس در بهبود و کاهش عمق و طول آبشستگی، به ویژه در زمان های اولیه برداشت در پایین دست صفحات مشبک است. همچنین با افزایش دبی، بیشترین درصد کاهش عمق و طول آبشستگی اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر، در دبی حداکثر یعنی ۶/۲۵ لیتر بر ثانیه و در آخرین زمان برداشت (۳۰ دقیقه)، عمق بیشینه آبشستگی از حدود ۶/۹۱ سانتی متر در آزمایش اول و با اضافه شدن رس و ترکیب رس با نانو رس مونت موریلونیتی، به ترتیب حدود ۳۵ و ۴۹ درصد کاهش یافته است. تأثیر مثبت رس و ترکیب آن با نانو رس مونت موریلونیتی در کاهش

### مراجع

- Abdelhaleem, F. S. F. 2013. Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Eng. J.* 4(4): 675-684.
- Bozkus, Z., Çakır, P. and Ger, M. 2007. Energy dissipation by vertically placed screens. *Can. J. Civil Eng.* 34(4): 557-564.
- Chabert, J. and Engeldinger, P. 1956. Etude des affouillements autour des piles de points (Study of scour at bridge piers). Bureau Central d'Etudes les Equipment d'Outre-Mer. Laboratoire National d'Hydraulique, France.
- Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.* 118(9): 1260-1269.
- Elnikhely, E. A. 2016. Minimizing scour downstream of spillways using curved vertical sill. Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Water Technology Conference. Apr. 21-23. Sharm El Sheikh, Egypt.
- Elsebaie, H. I. 2013. An experimental study of local scour around circular bridge pier in sand Soil. *Int. J. Civil Environ. Eng.* 13(1): 23-28.

- Goel, A. 2010. Scour investigations behind a vertical sluice gate without apron. *Pac. J. Sci. Technol.* 11(2): 59-65.
- Karimae, M. and Zarrati, A. R. 2011. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers. *Int. J. Eng.* 25(1): 11-16.
- Lambe, T. W. and Whithman, R. V. 1969. *Soil Mechanics*. SI Version. John Wiley, New York.
- Lee, S. O., Seungh, K. and Sturm T. W. 1961. Comparison of laboratory and field measurements of bridge pier scour. U.S. Geological Survey, USA.
- Melville, B. W. 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. *J. Hydraul. Eng.* 123(2): 125-136.
- Mohammadi, M. and Niaziyan, M. 2013. Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. *Int. J. Adv. Sci. Technical Res.* 3(3): 37-46.
- Nasr-Allah, H. T., Yasser A. M., Mohamed, A. G. and Shawky, A. 2016. Experimental and numerical simulation of scour at bridge abutment provided with different arrangements of collars. *Alex. Eng. J.* doi:10.1016/j.aej.2016.01.021. (in Press)
- Rajaratnam, N., and Hurtig, K. I. 2000. Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *J. Hydraul. Eng.* 126(4): 310-312.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 109(3): 338-350.
- Sadeghfam, S., Akhtari, A. A., Daneshfaraz, R. and Tayfur, G. 2014. Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.* 38(2): 126-138.
- Sanoussi, A. A. and Habib E. A. 2008. Local scour at rounded and sloped face with skew angles. *Proceedings of the International Conference on Construction and Building Tecnology.* June 16-20. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Singh, S. M. and Maiti. P. R. 2012. Local scour around a circular pier in open channel. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2(5): 454-458.
- Tuna, M. C. and Emiroglu, M. E. 2011. Scour profiles at downstream of cascades. *Sci. Iranica.* 18(3): 338-47.
- Tuna, M. C. and Emiroglu, M. E. 2013. Effect of step geometry on local scour downstream of stepped chutes. *Arab. J. Sci. Eng.* 38(3): 579-88.
- Uddin, F. 2008. Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metall. Mater. Trans. A.* 39(12): 2804-2814.
- Yalin, M. S. 1971. *Theory of Hydraulic Models*. Macmillan, London.
- Zaid, H. M., Mohd, R. T. and Ibtehaj T. J. 2014. Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*

Zarrati, A. R., Gholami, H. and Mashahir M.B. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *J. Hydraul. Res.* 42(1): 97–103.

Zhang, G. 2007. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. *Geo-Denver Congress: New Peaks in Geotechnics*. Feb. 18-21. Denver, Colorado, United States.



## **Experimental Investigation of Clay and Nano-Clay Montmorillonite Effect on Scour Reduction at Downstream of Screen**

**M. Rezaie, A. Ghaderi and R. Daneshfaraz\***

\*Corresponding Author: Associated Professor, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: daneshfaraz@yahoo.com

Received: 19 February 2017, Accepted: 24 June 2017

### **Abstract**

In this study, a non-structural and eco-friendly solution has been used to reduce scouring at downstream of screens. The upstream of screen which are known as stilling basin, are protected against scouring but the downstream of screens always are subjected to the flow scouring. Since clay and nanostructured-clay has suitable compatibility with river system and ecology as a view of the environment, the bed sediment at the downstream of the screen have been admixed with clay and nanostructured-clay, after grouting its effect on scour reduction have been evaluated in the three different flow. The experimental results indicate the positive effect of clay and nanoclay on scour depth reduction at the downstream of screens. The best performance has been occurred for clay and nano-montmorillonite clay mixture. The positive effect of clay and nano-montmorillonite clay mixture for scour length reduction is observable, and by utilizing this mixture, the length of scouring has been decreased 33 percent. Furthermore by addition of clay and nano-montmorillonite clay mixture, the scour depth reduced up to 39 and 46 percent. According to the result, utilizing clay and nano-montmorillonite clay mixture has a positive effect on scouring control, and as a practical view, it could be very useful for some cases such as rivers which bed protection by some materials such as concrete is not possible.

**Key Words:** Downstream Sourcing, Experimental Model, Nano Structured-Montmorillonite Material