

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و پلی اکریل آمید کاتیونی بر آبشستگی پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای

مهدی رضایی^{1*}، رسول دانشفراز² و مهدی دسینه³

1- عضو هیات علمی گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه مراغه

2- دانشیار، سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه مراغه

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه مراغه

* mehdi_rezaie@maragheh.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/10/25؛ پذیرش مقاله: 97/4/18)

چکیده - از آبشستگی پایه پل‌ها به‌عنوان مهمترین دلیل تخریب پل‌ها یاد می‌شود که روش‌های هیدرولیکی و غیرهیدرولیکی برای غلبه بر آن مورد اهتمام محققین است. در این تحقیق، از روش نوین و سازگار با محیط زیست برای کاهش طول و عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل و حجم گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای استفاده شده است. نظر بر سازگاری مناسب رس و پلی اکریل آمید کاتیونی، با سیستم رودخانه‌ای و اکولوژی آن، در این مقاله رسوب بستر متحرک در دو دانه‌بندی مختلف، با پلی‌اکریل آمید کاتیونی تزریق شده به رس، ترکیب و نتایج آن‌ها در کاهش آبشستگی در چهار دبی مختلف و با سه عمق گودال بررسی شده است. نتایج حاکی از تأثیر مثبت رس و پلی‌اکریل آمید کاتیونی در کاهش طول و عمق آبشستگی می‌باشد. بهترین عملکرد در مطالعه حاضر مربوط به مخلوط رس و ده درصد پلی اکریل آمید کاتیونی است که عمق آبشستگی را نسبت به مدل شاهد به ترتیب به مقدار 27/24% و 46/78% برای دانه‌بندی 0/6 میلی‌متری و 26/9% و 45/18% برای دانه‌بندی 0/15 میلی‌متری کاهش می‌دهد. همچنین طول آبشستگی برای دانه‌بندی‌های فوق به مقدار 17/73% و 31/22% نسبت به وضعیت اولیه کاهش پیدا کرده است. این مطالعه نشان می‌دهد افزودن رس و پلی اکریل آمید کاتیونی در کاهش میزان آبشستگی پایه پل‌ها مؤثر است.

کلیدواژه‌گان: آبشستگی، رس، پلی اکریل آمید کاتیونی، گودال، پایه‌های پل.

1- مقدمه

اهمیت این امر، بررسی و استنتاج راهکارهای نوین کاهش و به حداقل رساندن آن مد نظر محققین است. در حالت کلی دو روش اصلی برای کنترل آبشستگی وجود دارد، روش‌های غیرهیدرولیکی که با حفاظت از بستر، آبشستگی را کنترل می‌کنند و دیگری روش‌های هیدرولیکی که با منحرف کردن جریان اطراف پایه پل‌ها، از آن‌ها در مقابل

یکی از آثار منفی و محسوس برداشت مصالح از رودخانه‌ها، صدمات جبران‌ناپذیری است که به تأسیسات و سازه‌های موجود در مسیر رودخانه (از جمله پل‌ها) وارد می‌شود. وقوع پدیده آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها از مهمترین دلایل تخریب آن‌ها بشمار می‌آید. نظر به پیچیدگی و

گسترده‌گی گودال آبخستگی اطراف پایه پل می‌شود. (Beg, 2014) & Beg, (2014) به مطالعه آزمایشگاهی اثرات گروه پایه - پل با اندازه‌های مختلف و آرایش متوالی، بر آبخستگی و گودال آبخستگی در یک کانال مستقیم پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که وجود گروه پایه پل در کاهش آبخستگی نقش مؤثرتری دارد. (Vaghefi et al., 2015) به مطالعه آبخستگی اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل با قطر و دبی و زوایای چرخشی مختلف در پایین دست جریان پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش زوایای چرخش، باعث کاهش قابل توجهی در عمق آبخستگی، ابعاد برآمدگی رسوب و گودال آبخستگی می‌شود. (Al-Shukur and Obeid, 2016) به مطالعه آزمایشگاهی حداقل آبخستگی موضعی با اشکال مختلف پایه‌های پل، سرعت و دبی‌های متفاوت پرداختند. آنها نشان دادند که بیشترین آبخستگی مربوط به پایه پل مستطیلی شکل و کمترین آن در پایه پل عدسی شکل در مقایسه با انواع دیگر می‌باشد. (Fouli & Elsebaei., 2016) به مطالعه کاهش آبخستگی موضعی در پایه‌های پل دایره‌ای شکل با قرار دادن یک ستون مثلثی فرعی در بالادست پایه پل پرداختند. آنها با تغییر هندسه پایه پل‌ها توانستند عمق آبخستگی را کاهش دهند. (Khajeh et al., 2017) به بررسی آبخستگی ناشی از پایه کج و عمودی در قوس 180 درجه پرداختند. نتایج نشان داد که حداکثر آبخستگی در پایه کج نسبت به پایه عمودی تحت تأثیر قوس ایجاد شده، افزایش یا کاهش داشته است. بروغنی و همکاران (1393) کاربرد پلی اکریل آمید در کنترل فرسایش پاشمانی بر روی خاک‌های ماری را در شدت بارندگی 95 و 120 میلی‌متر در ساعت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن 0/6 گرم پلی اکریل آمید در متر مربع خاک باعث کاهش حداقلی 28 درصدی در مقدار فرسایش مذکور می‌شود. صادقی و همکاران (1392) به مطالعه روند تغییرات هدر رفت خاک و غلظت رسوب بر اثر استفاده از پلی اکریل آمید پرداختند. آنها درصدهای مختلفی از پلی اکریل آمید را در یک مترمربع از خاک افزوده و تحت بارشی با شدت 1/2 میلی‌متر در ساعت و دوام نیم ساعت، مقدار هدر رفت خاک و غلظت رسوب حاصل را اندازه‌گیری نمودند.

آبخستگی محافظت می‌کند (Melville et al., 1989). روش‌های هیدرولیکی به منظور تغییر الگوی جریان و کاهش شدت گرداب‌های ایجاد شده در اطراف پایه پل‌ها مورد استفاده است که جریان رو به پایین، گرداب نعل‌اسبی و گرداب‌های برخاستگی از آن جمله می‌باشند (Tafarojnoruz et al., 2012). براساس مطالعات انجام یافته، گرداب نعل‌اسبی نقش مؤثری در آبخستگی اطراف پایه پل ایفا می‌نماید. تشکیل گرداب نعل‌اسبی در پایه‌های دماغه پهن و دماغه نیم پهن گزارش شده است این در حالی است که امکان تشکیل گرداب نعل‌اسبی در دماغه‌های نیز با توجه به وضعیت آیرودینامیکی و ایجاد میدان فشار ممکن نیست. (Singh et al., 2001) به مطالعه عملکرد طوق‌ها در کاهش عمق آبخستگی پرداختند. آنها نشان دادند که در صورت افزایش فاصله تراز بستر و تراز نصب طوق، حداکثر عمق آبخستگی افزایش می‌یابد. (Zarrati et al., 2004) نیز به بررسی عملکرد طوق در کنترل آبخستگی اطراف پایه پل مستطیلی شکل پرداختند. آنها بیان کردند که میزان اثرگذاری طوق در تراز بستر بیشتر می‌باشد و نصب طوق در تراز زیر بستر، کارایی آن را افزایش نمی‌دهد. (Haque et al., 2007) به بررسی اثر شمع‌ها یا پایه‌های کمکی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که می‌توان با انحراف جریان و ایجاد یک ناحیه با سرعت پایین در جلوی پایه و همچنین با کم کردن پتانسیل فرساینده‌گی جریان، از پایه پل در برابر آبخستگی محافظت کرد. (Bozkus and Cesme, 2010) به بررسی اثرات پایه‌های پل کج دوتایی بر عمق آبخستگی موضعی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق آبخستگی اطراف پایه‌های پل کج نسبت به پایه‌های پل عمودی کمتر است. همچنین آنها ثابت کردند که عمق آبخستگی در پایه‌های پل کج دوتایی در مقایسه با پایه‌های کج منفرد، کاهش پیدا می‌کند. (Karimae and Zarrati., 2012) به مطالعه آزمایشگاهی توسعه زمانی و گسترده‌گی حفره آبخستگی در اطراف پایه پل استوانه‌ای شکل پرداختند. به این منظور آزمایش‌هایی بر روی پایه پل محافظت نشده و محافظت شده با طوق انجام شد. آنها نشان دادند که استفاده از طوق باعث کاهش عمق آبخستگی و در عین حال افزایش

عمق آبستگي D_{max} در زمان t تابعی بصورت رابطه (1) تعريف شد:

$$D_{max} = f_1(W, B, H, L, D, g, y, V, u_{*cr}, a_{sr}, \gamma_w, \gamma_s, d, v, t) \quad (1)$$

در این آزمایش‌ها از آن جایی که عرض کانال W مورد آزمایش با عرض گودال ایجاد شده B برابر است، از این متغیرها صرف‌نظر شده و رابطه (2) بدست می‌آید:

$$D_{max} = f_2(H, L, D, g, y, V, u_{*cr}, a_{sr}, \gamma_w, \gamma_s, d, v, t) \quad (2)$$

با استفاده از روش پی باکینگهام نسبت $\frac{D_{max}}{D}$ بر حسب کمیت‌های بدون بعد بصورت رابطه (3) محاسبه شد:

$$\frac{D_{max}}{D} = f_3\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{D}{y}, \frac{gy}{V^2}, \frac{u_{*cr}}{V}, a_{sr}, \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G_s, \frac{d}{y}, \frac{v}{Vy}, \frac{Vt}{y}\right) \quad (3)$$

در رابطه (3) عبارت $\frac{d}{y}$ به دلیل ناچیز بودن مقدار d در

مقایسه با y و آشفتگی جریان عبارت $\frac{v}{Vy}$ که از لحاظ

ابعادی نیز معادل $\frac{1}{Re}$ است صرف‌نظر و به شکل رابطه (4)

خلاصه شد:

$$\frac{D_{max}}{D} = f_4\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{D}{y}, Fr^2, \frac{u_{*cr}}{V}, a_{sr}, G_s, \frac{Vt}{y}\right) \quad (4)$$

و با روشی مشابه برای حداکثر طول آبستگي (L_{max}) می‌توان رابطه (5) را نوشت:

$$\frac{L_{max}}{D} = f_5\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, Fr^2, \frac{D}{y}, \frac{u_{*cr}}{V}, a_{sr}, G_s, \frac{Vt}{y}\right) \quad (5)$$

2-2- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها، از یک کانال با بستر متحرک و مقطع مستطیلی شکل به طول 5 متر، عرض 0/3 متر و ارتفاع 0/45 متر با آب زلال استفاده شد. برای ایجاد سطحی صاف با کمترین زبری، کف و دیواره‌های کانال از جنس پلگسی گلس انتخاب گردید. جریان در کانال توسط دو پمپ که هر کدام با حداکثر دبی 7/5 لیتر بر ثانیه متصل به یک مخزن در ابتدای کانال است تأمین گردید. دبی جریان نیز بوسیله شیرهای متصل به دو روماتر منسوب در خروجی پمپ‌ها اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا در کف فلوم دو کف‌بند از جنس پلی اتیلن با زبری نزدیک به پلگسی گلس با ارتفاع 12/6 سانتی‌متر و فاصله 147 سانتی‌متر از همدیگر ایجاد شد. سپس ما بین این دو کف‌بند با استفاده از سنگدانه‌هایی با

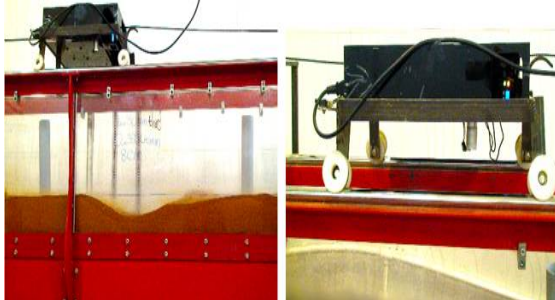
مشاهده می‌شود پژوهش‌هایی که تاکنون توسط محققان انجام شده بیشتر متمرکز بر شناخت پدیده آبستگي و استفاده از راه حل‌های هیدرولیکی و غیرهیدرولیکی می‌باشد. همان‌طور که پیشتر ذکر شد یکی از فن‌آوری‌های نوین در سالیان اخیر، برای مدیریت و حفاظت منابع آب و خاک استفاده از افزودنی‌های پلیمری متناسب به خاک جهت اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی آن است. با توجه به اینکه جنبه‌های مختلف کاربرد این افزودنی پلیمری در آبستگي پایه‌های پل قبلاً مطالعه نشده است، تحقیق پیش رو به ارزیابی کمی و کیفی اثرات رس و مخلوط رس و پلی اکریل آمید کاتیونی در آبستگي پایه پل دایره‌ای شکل با دانه‌بندی‌های مختلف بستر و تحت تأثیر دبی‌های متفاوت با ایجاد گودال‌هایی با ارتفاع‌های گوناگون پرداخته است. نتایج بدست آمده مؤید تأثیر معنی‌دار این ماده در کاهش آبستگي در پایه پل و گودال‌های ایجاد شده در تمام آزمایش‌های مد نظر است. استفاده از پلیمر پیشنهادی سازگاری مناسبی نیز با اکولوژی رودخانه داشته و باعث تقویت و تثبیت خاک اراضی تحت آبیاری با آب رودخانه نیز خواهد شد.

2- مواد و روش

2-1- آنالیز ابعادی

برای بیان موقعیت‌ها و ابعاد گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه و اثرات آن بر روی پایه‌های پل، حداکثر عمق و طول آبستگي به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شد. متغیرهای مستقل نیز عبارتند از: مشخصات هندسی گودال و پایه‌های پل شامل $D, H, L, B, W, a_{sr}, u_{*cr}, V, y, g$ و مشخصات مربوط به آب و رسوب شامل v, d, γ_s, γ_w می‌باشد. که عرض کانال مورد آزمایش، B عرض گودال ایجاد شده، L طول گودال، H عمق گودال، D قطر پایه‌های پل دایره‌ای شکل، g شتاب گرانش، y عمق جریان، v سرعت جریان، v_{*cr} سرعت برشی بحرانی ذرات رسوبی، a_{sr} شیب جانبی مصالح داخل آب، γ_w وزن مخصوص آب، γ_s وزن مخصوص ذرات رسوبی، d قطر ذرات رسوبی و v لزجت سینماتیکی آب می‌باشد. لذا برای محاسبه ماکزیمم

و هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. y_n در جدول فوق بیانگر عمق نرمال بر روی کفبند است.



شکل 1 اسکنر سه بعدی لیزری

جدول 1 شرایط هیدرولیکی و هندسی تحقیق حاضر

Q	y_n (cm)	Fr	L (cm)	B (cm)	H (cm)
180	3	0/61	22	30	4,8,12
240	3/2	0/74	22	30	4,8,12
300	3/6	0/78	22	30	4,8,12
360	4/1	0/77	22	30	4,8,12

2-3- مدل پایه پل

در این تحقیق، از یک مدل پایه پل دایره‌ای شکل به قطر 3 سانتی‌متر و با طول پایه 48 سانتی‌متری استفاده شد. جنس پایه پل به دلیل نزدیکی به زبری پلگسی گلس از PVC انتخاب شده است. قطر پایه پل نباید بیشتر از 10 درصد عرض کانال باشد تا از اثرات دیواره بر روی آبشستگی جلوگیری نماید (Chiew and Melville, 1987). در مطالعه حاضر، عرض کانال مورد آزمایش 10 برابر بزرگتر از قطر پایه پل است تا تمام ضوابط معرفی شده توسط محققین را برآورده نماید. در شکل‌های 2 و 3 گودال، جهت جریان و همچنین نحوه قرار گیری پایه‌های پل در بستر متحرک مشخص است.

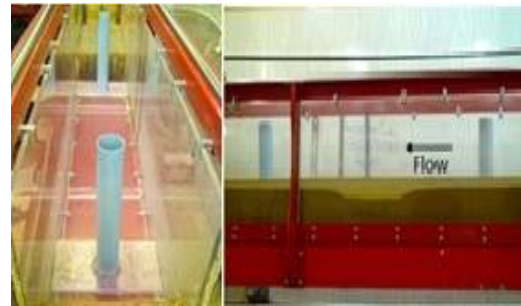
2-4- مشخصات ذرات رسوبی تشکیل دهنده بستر

شکل 4 منحنی دانه‌بندی برای دو نوع دانه‌بندی S_1 و S_2 با حداکثر قطر 0/15 و 0/6 میلی‌متری را نشان می‌دهد. انحراف معیار یکنواختی اندازه دانه‌ها با توجه به رابطه $\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0.5}$ برای دانه‌بندی‌های فوق‌الذکر به ترتیب برابر 1/93 و 1/37 می‌باشد.

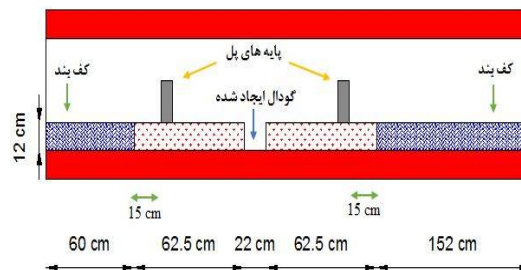
ذرات رسوبی 0/15 و 0/6 میلی‌متر، بستر متحرک ایجاد شد. پایه‌های دایره‌ای پل در فاصله 15 سانتی‌متری از بالادست و پایین‌دست بستر متحرک قرار گرفت. در سطح این بستر گودال‌هایی به شکل مستطیل به ارتفاع‌های 4، 8 و 12 سانتی‌متر و به طول 22 سانتی‌متر و هم‌عرض با عرض کانال (30 سانتی‌متر) برای بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر روی پایه‌های پل دایره‌ای شکل و گسترش و پیشروی گودال‌ها، حفر شد تا اثرات عبور جریان با دبی‌های 180، 240، 300 و 360 لیتر بر دقیقه در حالت جریان زیر بحرانی برای آبشستگی اطراف پایه‌های پل در بالادست و پایین‌دست بستر متحرک و همچنین گودال‌های ایجاد شده بررسی گردد.

تغییرات عمق آب نیز برای نقاط مختلف پایه‌های پل در بالادست و پایین‌دست بستر متحرک و از جمله در اطراف گودال‌ها برای هر دو دانه‌بندی قرائت و مدت زمان لازم برای هر آزمایش 2/5 ساعت در نظر گرفته شد. بدین صورت که برای هر دوره 30 دقیقه‌ای عمق آب در نقاط مختلف ثبت و بعد از قطع جریان آب، اسکن برداری از پروفیل بستر با استفاده از اسکنر سه بعدی شروع می‌شود. این روند برای هر آزمایش در زمان‌های 30 دقیقه‌ای با تکرار 5 انجام شده است. برای مقایسه تغییرات عمق گودال در زمان‌های مختلف ابتدا برای زمان $t=0$ قبل ایجاد جریان در کانال اسکن برداری انجام گرفت. اسکنر سه بعدی شامل یک سنسور لیزری و یک سنسور تراسونیک است. سنسور لیزری می‌تواند فاصله 200 الی 10000 میلی‌متری را با دقت یک میلی‌متری اندازه‌گیری نماید. این سنسور دارای یک خروجی آنالوگ 4-20 میلی‌آمپر می‌باشد که بازه خروجی 4 میلی‌آمپر الی 20 میلی‌آمپر را می‌توان برحسب نیاز تنظیم کرد. این سنسور با سرعت 250 نمونه در ثانیه قادر است داده‌های مربوط به ارتفاع اندازه‌گیری شده را به خروجی ارسال نماید. سیستم تراسونیک نیز بر اساس زمان ارسال و دریافت امواج تراسونیک اقدام به فاصله سنجی می‌نماید. این سنسور نیز می‌تواند فاصله 25 سانتی‌متری الی 10 متری را اندازه‌گیری نماید. عملکرد این سنسور برای اندازه‌گیری تغییرات سطح بستر در اثر جریان آب می‌باشد. شکل 1 اسکنر سه بعدی مورد استفاده و جدول 1 شرایط هندسی

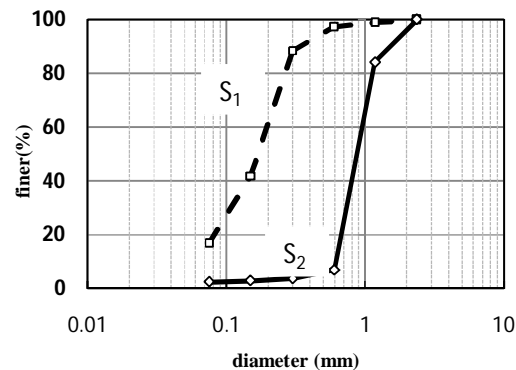
روی عمق آبشستگی اثر نمی‌گذارد (Mellville, 1997). در این آزمایش‌ها، نسبت یاد شده برای دانه‌بندی‌های 0/15 میلی‌متر و 0/6 میلی‌متر به ترتیب 200 و 50 می‌باشد که شرایط گفته شده توسط محققان را برآورده می‌کند. ضریب یکنواختی و ضریب انحنای برای دانه‌بندی‌های 0/15 میلی‌متری و 0/6 میلی‌متری به ترتیب برابر 3/077 و 1/5 و همچنین 1/11 و 0/924 می‌باشد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که هر دو دانه‌بندی بصورت غیریکنواخت می‌باشند.



شکل 2 گودال، جهت جریان و قرار گیری پایه‌های پل در بستر متحرک



شکل 3 طرح شماتیک از گودال‌های ایجاد شده در کف بستر



شکل 4 منحنی دانه‌بندی رسوبات تشکیل دهنده بستر

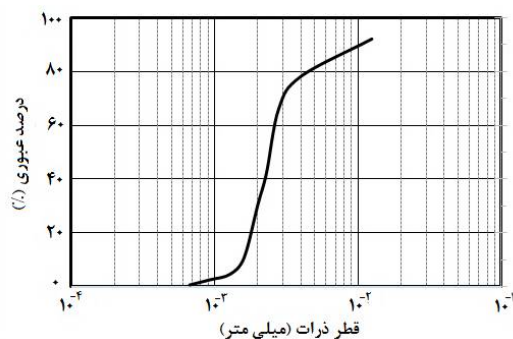
2-5- خواص و ویژگی‌های رس و پلی‌اکریل آمید کاتیونی

2-5-1- خواص رس

خاک ریزدانه موجود در بستر درشت‌دانه که حدود 10% کل آن را تشکیل می‌دهد، بر اساس آزمایش‌های تعیین حد روانی (W_L) و حد خمیری (W_P) براساس استاندارد ASTM D4318-87 و نیز آزمایش هیدرومتری براساس استاندارد ASTM D421-58 بر اساس جدول 2 رده‌بندی گردید. منحنی دانه‌بندی ریزدانه در شکل 5 ارائه گردیده است. با توجه به محلول بودن PAM در آب، افزودن آن به خاک رسی به سهولت با روش تزریق امکان پذیر خواهد بود.

جدول 2 مشخصات رس افزوده شده به بستر متحرک سازگار

گروه	شاخص	حد	حد روانی	وزن
بندی	خمیری	خمیری		مخصوص
CH	%23/3	%26/9	%50/2	$G_s=2/75$



شکل 5 منحنی دانه‌بندی رسوبات ریزدانه بستر (رس)

با توجه به این رابطه، اگر انحراف معیار استاندارد هندسی کوچکتر از 1/3 باشد مصالح بصورت یکنواخت و اگر بزرگتر از 1/3 باشد مصالح بصورت غیریکنواخت محسوب می‌شود. لذا در این آزمایش‌ها مصالح بکار رفته بصورت غیریکنواخت است. قطر پایه‌های پل نیز باید به دقت انتخاب شود تا اندازه رسوبات اثر ناچیزی بر روی عمق آبشستگی داشته باشد. اگر نسبت عرض پایه پل به اندازه دانه‌ها از یک مقدار مشخصی در حدود 25 تجاوز کند مشخص است که اندازه دانه‌های تشکیل دهنده بستر بر

2-5-2- خواص پلی اکریل آمید

پلی اکریل آمید (PAM) یا رزین اکریلیک ماده‌ای با رنگ سفید جامد بلوری و بی‌بو با فرمول شیمیایی C_3H_5NO است که در صنعت و کشاورزی کاربردهای ویژه‌ای دارد. این ماده محلول در آب که به عنوان منعقدکننده پساب‌های صنعتی با آب مورد استفاده است در 3 نوع کاتیونیک (مثبت)، آنیونیک (منفی) و نانویونیک (بدون بار) وجود دارد. در واقع پلی اکریل آمید کاتیونی، کوپلیمرهای اکریل آمید به همراه مونومرهای کاتیونی است که پس از انحلال در آب به آن خاصیت بازی می‌دهد و استفاده از آن در خاک‌های اسیدی مؤثر خواهد بود، همان‌طور که استفاده از نوع آنیونی آن، مخصوص خاک‌های بازی است. نوع کاتیونی و آنیونی آن در بیابان زدایی مورد استفاده است و بدلیل جذب آب زیاد و افزایش ضریب جذب آب باعث تقویت خاک و جلوگیری از فرسایش آن در اراضی مسطح و شیب‌دار در صنعت کشاورزی می‌شود. تجزیه‌پذیری پلی اکریل آمید نیز فرایند دیرگذر و در حدود 10 درصد در سال است که باعث ماندگاری اثر آن حداقل به مدت 10 سال است. مطالعات نشان می‌دهد که ذرات رسی بواسطه حضور اندک نمک‌ها در خاک به همدیگر نزدیک می‌شوند و PAM چند عدد از این ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و رشته آن بلندتر از خاک تشکیل می‌شود. در نتیجه اسکلت خاک بواسطه چسبندگی بیشتر ایجاد شده توسط رزین اکریلیک و وزن بیشتر نسبت به حالت تک ذره‌ای در مقابل هرگونه فرسایش ناشی از حرکت آب مقاومت بیشتری را نسبت به حالت قبل از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در صورت وجود خاک رس در ترکیب خاک می‌توان با تزریق متناسب پلی اکریل آمید غیرسمی و سازگار با محیط زیست از آبشستگی آن جلوگیری نمود. استفاده از این ماده در تثبیت خاک، جلوگیری از فرسایش خاک، افزایش پتانسیل در ادبیات فنی و مطالعات محققان بکررات انجام یافته است. جدول 3 مشخصات پلی اکریل آمید مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

در جدول 4 مدل‌های آزمایش چهارگانه انجام یافته برای

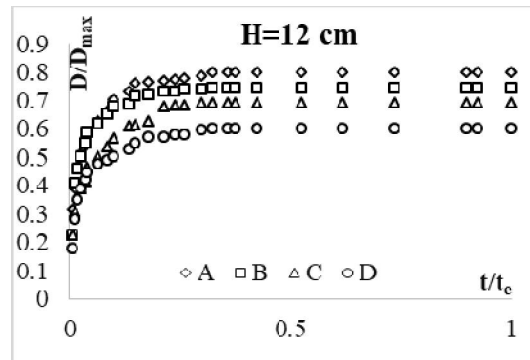
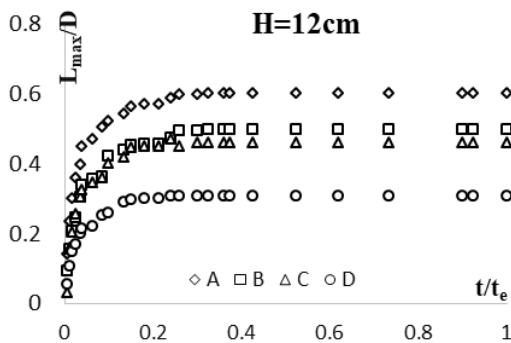
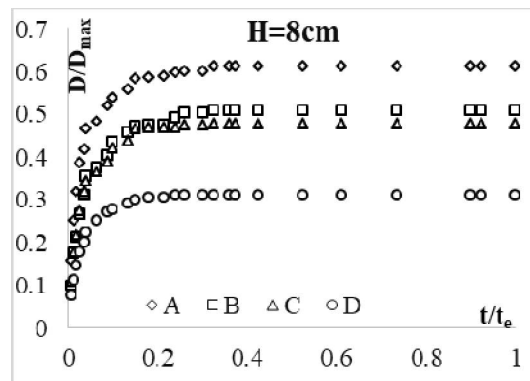
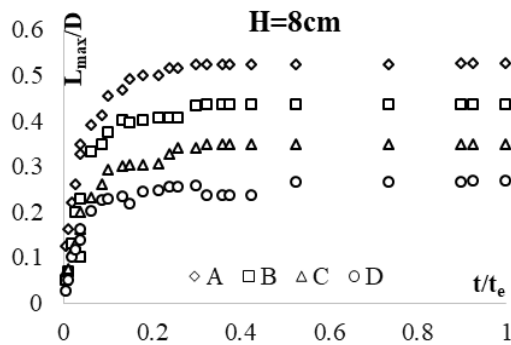
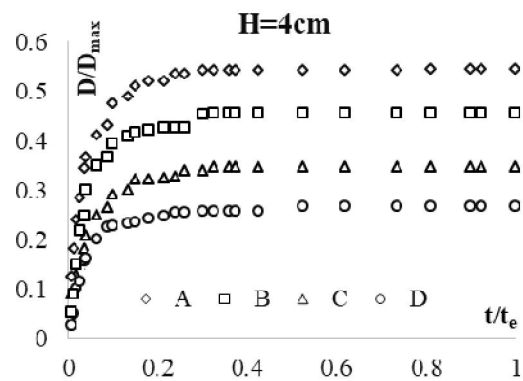
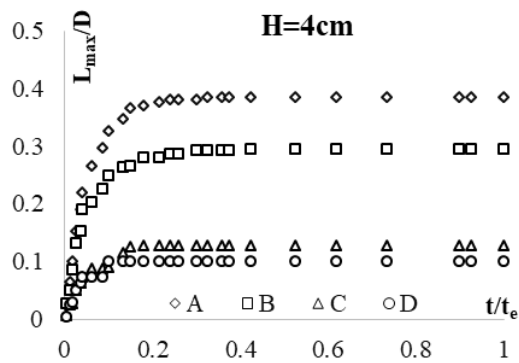
دو نوع دانه‌بندی 0/6 و 1/5 میلی‌متری مصالح بستر بصورت خلاصه ارائه شده است. آزمایش‌های انجام یافته با درصدهای مختلف جایگزینی PAM و در دبی‌های ذکر شده در جدول 4 انجام یافته و تغییرات عمق آبشستگی بیشینه و نیز طول آبشستگی در گذر زمان ثبت شده است. شکل 6 تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی را در 4 دبی جریان مختلف برای 3 عمق گودال متفاوت نشان می‌دهد. در این اشکال، محور عمودی نسبت بی‌بعد حداکثر عمق آبشستگی به قطر پایه پل و محور افقی نیز نسبت بی‌بعد زمان مورد نظر به زمان تعادل آزمایش می‌باشد. مشاهده می‌شود حداکثر عمق آبشستگی مربوط به دبی حداکثر 360 لیتر بر دقیقه در عمق گودال ایجاد شده 12 سانتی‌متری در زمان بحرانی 150 دقیقه برای دانه‌بندی 0/6 میلی‌متری می‌باشد. به بیان دیگر، هر چه قدر دبی جریان بیشتر و عمق گودال ایجاد شده زیاد باشد، با گذشت زمان، عمق آبشستگی ابتدا افزایش و بعد از مدتی ثابت می‌ماند. بدین صورت که با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش یافته و به تبع آن انرژی جنبشی بیشتر شده و آب توانایی حمل ذرات بیشتری از رسوبات بستر را پیدا می‌کند. رس به دلیل خاصیت چسبندگی و پلی اکریل آمید کاتیونی به دلیل افزایش سرعت ته‌نشینی ذرات معلق و همچنین ایجاد سطوح لغزنده برای عبور جریان آب از روی بستر متحرک و مقاومت برشی بیشتر، اثرات چشم‌گیری برای کاهش عمق آبشستگی بویژه در دبی‌های بالا از خود نشان می‌دهند.

جدول 3 مشخصات پلی‌اکریل آمید کاتیونی مورد استفاده

چگالی	pH	رنگ	وزن مولی	درجه	درصد غیرمحلول
g/cm^3			g/mol	یون	در آب
0/6	5-6	سفید	9	18%	< 0/1

جدول 4 مدل‌های مورد آزمایش

نام آزمایش	A	B	C	D	
ترکیب مصالح در کف	Bed	100	90	89/5	89
کانال (نسبت به مصالح)	Clay	0	10	10	10
بستر رودخانه) به درصد	PAM	0	0	0/5	1
Q (L/min)		180,240,300,360			
H (cm)		4,8,12			
L (cm)		22			
B (cm)		30			



شکل 7 تغییرات زمانی حداکثر طول آبشستگی با اضافه شدن رس و پلی اکریل آمید کاتیونی

شکل 6 تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی با اضافه شدن رس و پلی اکریل آمید کاتیونی

حداکثر عمق آبشستگی در اثر استفاده از رس به ترتیب به 22/36% برای دانه بندی 0/6 میلی متری و 21/53% برای دانه بندی 0/15 میلی متری و همچنین با استفاده از مخلوط رس و پلی آکریل آمید کاتیونی و افزایش درصدهای پلی اکریل آمید کاتیونی در رس به ترتیب به مقادیر 45/18% و 26/9% برای دانه بندی 0/15 میلی متری و 46/78% و 27/24% برای دانه بندی 0/6 میلی متری کاهش پیدا کرده است. شکل (7) تغییرات طول

همچنین با توجه به نمودارها، می توان گفت در زمان های ابتدایی آزمایش، عمق آبشستگی در هر سه حالت $H=4,8,12$ به حداکثر مقدار خود رسیده است این در حالی است که برای حالت $H=12$ سانتی متری این عمق حداکثر، بیشتر از حالت های دیگر مخصوصاً در دبی های بالا می باشد. این عمق حداکثر تا جایی ادامه پیدا می کند که میزان رسوب ورودی با میزان رسوب خروجی برابر شود و از این مرحله به بعد، عمق آبشستگی با گذشت زمان تغییر نمی کند.

جدول 5 نسبت حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال و پایه‌های پل

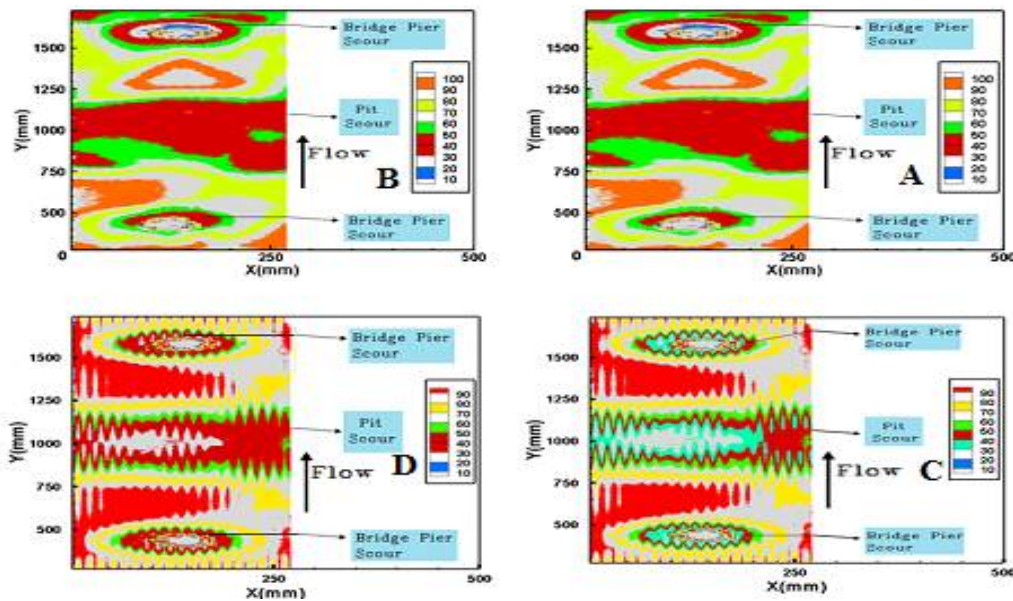
نسبت حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال و پایه‌های پل در $t/t_c = 1$					
test		A	B	C	D
دانه‌بندی	H (cm)				
0/15	4	0/499	0/438	0/328	0/153
0/15	8	0/567	0/377	0/388	0/278
0/15	12	0/700	0/644	0/579	0/489
0/6	4	0/544	0/454	0/384	0/267
0/6	8	0/612	0/508	0/478	0/310
0/6	12	0/800	0/745	0/688	0/598
0/15	4	0/293	0/200	0/867	0/098
0/15	8	0/492	0/378	0/279	0/184
0/15	12	0/579	0/392	0/369	0/284
0/6	4	0/384	0/294	0/128	0/100
0/6	8	0/524	0/435	0/348	0/267
0/6	12	0/601	0/496	0/459	0/308

مشاهده می‌شود که حداکثر طول و عمق آبشستگی تابعی از مشخصات هندسی گودال‌ها و پایه‌های پل و همچنین مشخصات هیدرولیکی بحث شده در آنالیز ابعادی (رابطه‌های 4 و 5) می‌باشد، هرگاه عمق گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه، افزایش و دبی رها شده نیز افزایش یابد، سرعت جریان افزایش یافته و به تبع آن انرژی جنبشی بیشتر شده و جریان آب قابلیت حمل رسوبات بیشتری را از سطح بستر دارا خواهد بود که این رویه در زمان‌های ابتدایی بیشتر مشاهده می‌گردد ولی با گذشت زمان به حالت تعادل خود رسیده و ثابت می‌مانند. این در حالی است که با استفاده رس و مخلوط رس و پلی اکریل آمید کاتیونی، به دلیل مقاومت برشی زیاد، چسبندگی بیشتر ایجاد شده توسط رزین اکریلیک و وزن بیشتر نسبت به حالت تک ذره‌ای در مقابل هرگونه فرسایش ناشی از حرکت آب مقاومت بیشتری را نسبت به حالت قبل از خود نشان می‌دهد. همین امر باعث کاهش حداکثر طول و عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل در بالادست و پایین دست و همچنین گودال‌های ایجاد شده مشاهده می‌شود که حداکثر طول و عمق آبشستگی تابعی از مشخصات هندسی گودال‌ها و پایه‌های پل و همچنین مشخصات هیدرولیکی بحث شده در آنالیز ابعادی (رابطه‌های 4 و 5) می‌باشد.

آبشستگی اطراف پایه پل و گودال‌های ایجاد شده را در 4 دبی جریان مختلف با 3 عمق گودال متفاوت در دبی 360 لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد. مدل‌های مورد آزمایش در جدول 4 نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، محور عمودی نسبت بی بعد حداکثر طول آبشستگی به قطر پایه پل و محور افقی نیز نسبت بی بعد زمان (t) مورد نظر به زمان تعادل آزمایش (t_c) است. اثرات چشمگیر استفاده از رس و پلی اکریل آمید کاتیونی برای کاهش طول آبشستگی در دانه‌بندی 0/6 میلی‌متری همانند نتایج بدست آمده برای عمق آبشستگی مشهود است. دلیل این امر داشتن خاصیت چسبندگی رس و افزایش سرعت ته‌نشینی ذرات معلق و ایجاد سطوح لغزنده بر روی بستر متحرک و همچنین مقاومت برشی بیشتر در اثر استفاده از پلی اکریل آمید کاتیونی می‌باشد.

با توجه به نمودارها، مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان و در ابتدای زمان‌های آزمایش، همانند نمودارهای مربوط به عمق آبشستگی، طول آبشستگی در هر سه حالت $H=4,8,12$ سانتی‌متری به حداکثر مقدار خود رسیده است این در حالی است که برای حالت $H=12$ سانتی‌متری، طول حداکثر، بیشتر از حالت‌های دیگر می‌باشد. این طول حداکثر تا جایی ادامه پیدا می‌کند که میزان رسوب ورودی با میزان رسوب خروجی یکسان شود و از این مرحله به بعد، طول آبشستگی با گذشت زمان تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند. حداکثر طول آبشستگی در اثر استفاده از رس به مقدار 16/22% برای هر دو دانه‌بندی و برای مخلوط رس و پلی اکریل آمید کاتیونی و همچنین افزایش درصد پایه پلی اکریل آمید کاتیونی در رس به ترتیب 17/73% برای دانه‌بندی 0/15 میلی‌متری و 31/22% برای دانه‌بندی 0/6 میلی‌متری کاهش پیدا کرد. جدول 5 نشان دهنده نسبت حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال و پایه‌های پل برای دانه‌بندی 0/15 میلی‌متری و 0/6 میلی‌متری می‌باشد. شکل 8 تغییرات دو بعدی عمق و طول آبشستگی را در اطراف پایه‌های پل و گودال ایجاد شده نشان می‌دهد.

در این شکل‌ها، راستای X عرض کانال مورد آزمایش و راستای Y نیز طول بستر متحرک ایجاد شده ما بین دو کف بند در کانال می‌باشد.



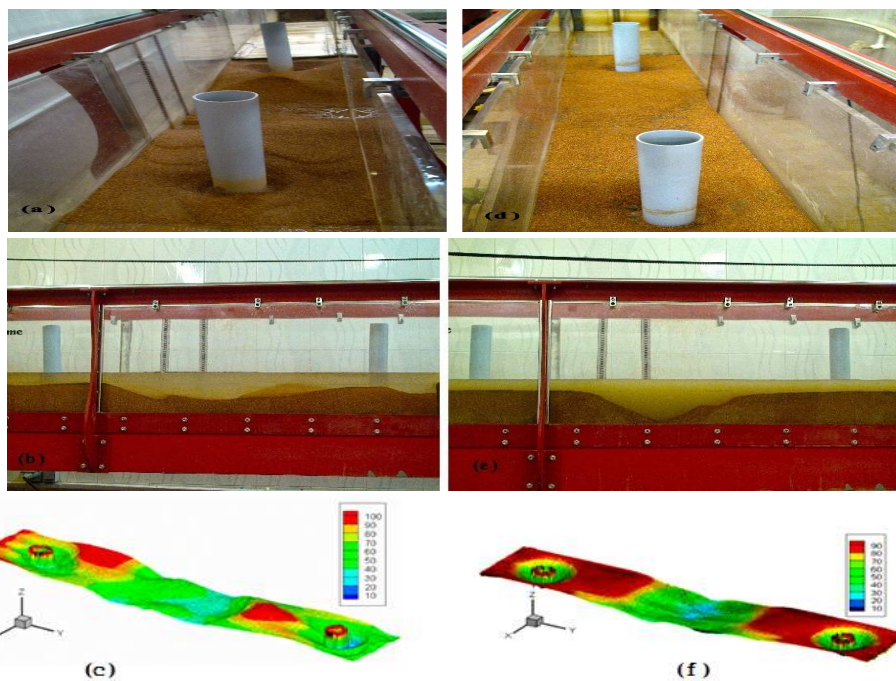
شکل 8 تغییرات دو بعدی عمق و طول آبشستگی در اطراف پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده

می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که برای رسوبات با $d_{50} < 0.7$ فرم بستر ریپل تشکیل می‌گردد در حالیکه برای رسوبات با $d_{50} > 0.7$ فرم بستر تشکیل نمی‌گردد. یکی از مزایای استفاده از رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، کاهش تشکیل ریپل در دانه‌بندی‌هایی با اندازه متوسط کمتر از $0/7$ می‌باشد. شکل 10 پروفیل طولی آبشستگی مصالح در اطراف پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه در شرایط استفاده از رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در دبی 360 لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد در قسمت (a) مربوط به آزمایش شاهد، با عبور جریان آب از روی بستر متحرک با افزایش دبی، سرعت افزایش یافته و آب قابلیت حمل رسوبات بیشتری را از بستر متحرک دارا می‌شود، بطوریکه با گذشت زمان و رسیدن به حالت تعادل این شستگی در زمان‌های ابتدایی بیشتر بوده ولی با گذشت زمان به مقدار ثابتی می‌رسد و از این مرحله به بعد تغییر نمی‌کند (اشکال a-1 تا a-5).

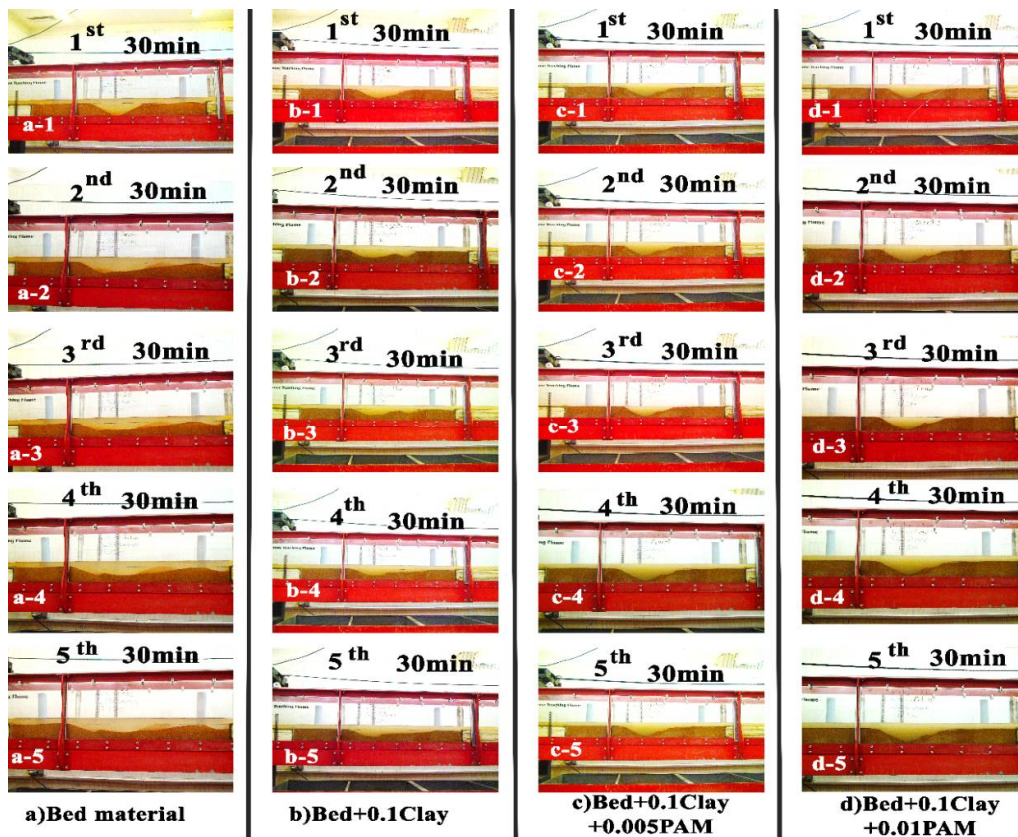
در قسمت (b)، 10 درصد رس به بستر متحرک تزریق شده است. رس به دلیل خاصیت چسبندگی و مقاومت برشی زیاد در ترکیب با بستر متحرک عملکرد قابل قبول و منسجمی از خود نشان می‌دهد.

هرگاه عمق گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه، افزایش و دبی رها شده نیز افزایش یابد، سرعت جریان افزایش یافته و به تبع آن انرژی جنبشی بیشتر شده و جریان آب قابلیت حمل رسوبات بیشتری را از سطح بستر دارا خواهد بود که این رویه در زمان‌های ابتدایی بیشتر مشاهده می‌گردد ولی با گذشت زمان به حالت تعادل خود رسیده و ثابت می‌مانند. این در حالی است که با استفاده از رس و مخلوط رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، به دلیل مقاومت برشی زیاد، بیشتر نسبت به حالت تک ذره‌ای در مقابل هرگونه فرسایش ناشی از حرکت آب مقاومت بیشتری را نسبت به حالت قبل از خود نشان می‌دهد.

همین امر باعث کاهش حداکثر طول و عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل در چسبندگی بیشتر ایجاد شده توسط رزین اکریلیک و وزن بالادست و پایین‌دست و همچنین گودال‌های ایجاد شده می‌گردد. شکل 9، تغییرات عمق و طول آبشستگی را برای حالت‌های نما از بالا، روبرو و حالت سه بعدی نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها، مشاهده می‌گردد که در شکل‌های a، b و c تشکیل ریپل نسبت به شکل‌های d، e و f که در آن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به طور همزمان بکار گرفته شده است مشهودتر



شکل 9 تغییرات طول و عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده - a, d - نما از بالا، e, b - نما از روبرو، c, f - نمای سه بعدی



شکل 10 پروفیل های طولی آبشستگی

بالادست در اثر گودال پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشانگر اثرات مثبت رس و پلی اکریل آمید کاتیونی در کاهش عمق و طول آبشستگی و به حداقل رساندن تشکیل فرم بستر ریپل در دانه بندی های با اندازه متوسط کمتر از 0/7 می باشد. بدین صورت که در دبی حداکثر 360 لیتر بر دقیقه که بیشترین عمق و طول آبشستگی در زمان 150 دقیقه و در عمق گودال 12 سانتی متری رخ می دهد. مقدار حداکثر عمق آبشستگی با استفاده از 10% رس به ترتیب 22/36% برای دانه بندی 0/6 میلی متری و 21/53% برای دانه بندی 0/15 میلی متری، همچنین با استفاده از 5% و 10% پلی اکریل آمید کاتیونی در 10% رس به ترتیب 27/24% و 46/78% برای دانه بندی 0/6 میلی متری و به 26/9% و 45/18% برای دانه بندی 0/15 میلی متری کاهش یافت. همچنین حداکثر طول آبشستگی برای حداکثر دبی یاد شده در بالا با عمق گودال 12 سانتی متری در زمان 150 دقیقه که در آزمایش شاهد برای هر دو دانه بندی با اضافه کردن رس به 16/22% و با اضافه کردن پلی اکریل آمید کاتیونی به رس به 17/73% و 31/22% کاهش پیدا کرد. این نتایج می تواند بیانگر اثرات چشمگیر استفاده از رس و پلی اکریل آمید کاتیونی بویژه در اطراف پایه های پل و موقع برداشت مصالح از بستر رودخانه ها برای به حداقل رساندن افزایش طول و عمق آبشستگی باشد. با توجه به اینکه رس و پلی اکریل آمید کاتیونی با محیط زیست سازگار است و از پلی اکریل آمید کاتیونی در تصفیه آب نیز استفاده می شود سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن خواهد داشت. انتظار می رود با افزایش درصد رس و پلی اکریل آمید کاتیونی بتوان عملکرد بهتری از این مواد در کاهش حداکثر عمق و طول آبشستگی شاهد بود.

5- فهرست علائم

a_{sr}	شیب جانبی
B	عرض گودال
D	قطر پایه
D_{max}	حداکثر عمق آبشستگی
d	قطر ذرات رسوبی
d_{84}	قطر ذرات رسوبی

با گذشت زمان همانند قسمت (a) با رسیدن به حالت تعادل، آبشستگی ثابت می ماند و دچار تغییر نمی شود منتهی با یک تفاوت اساسی، در این قسمت برعکس قسمت قبلی، آب با انرژی جنبشی زیاد به دلیل ایجاد چسبندگی بین ذرات توسط رس و سنگین شدن ذرات، توانایی حمل ذرات رسوبی زیادی را ندارد که همین امر از تأثیر مثبت رس در کاهش آبشستگی حکایت می کند (اشکال b-1 تا b-5).

در قسمت (c)، پلی اکریل آمید کاتیونی 5 درصدی به رس تزریق و با بستر متحرک مخلوط گردید. پلی اکریل آمید کاتیونی به دلیل چسبندگی بیشتر توسط رزین اکریلیک و داشتن وزن بیشتر نسبت به حالت تک ذره ای در مقابل هرگونه فرسایش ناشی از حرکت آب، مقاومت برشی بیشتری را از خود نشان می دهد. همانند قسمت های قبلی در این مرحله نیز آبشستگی بعد از رسیدن به حالت تعادل (رسوب ورودی و خروجی با هم برابر شوند)، ثابت می ماند. در این قسمت آب، قابلیت حمل رسوبات کمتری را با توجه به دلایل بالا دارد که از تاثیر مثبت مخلوط رس و پلی اکریل آمید کاتیونی در کاهش آبشستگی در اطراف پایه های پل و گودال های ایجاد شده حکایت می کند (اشکال c-1 تا c-5).

در قسمت (d)، پلی اکریل آمید کاتیونی 10 درصدی به رس تزریق و با بستر متحرک مخلوط گردید. مشاهده می گردد که با افزایش درصدهای پلی اکریل آمید کاتیونی از 5 درصد به 10 درصد، آبشستگی کمتری در اطراف گودال های ایجاد شده و پایه های پل بنا به دلایل ذکر شده در بالا اتفاق می افتد (اشکال d-1 تا d-5). مقایسه اشکال بالا در زمان های مختلف حاکی از تأثیر مثبت استفاده از رس و پلی اکریل آمید کاتیونی در کاهش آبشستگی اطراف پایه های پل و همچنین گودال های ایجاد شده می باشد.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اثرات رس و پلی اکریل آمید کاتیونی برای کاهش عمق و طول آبشستگی در اطراف پایه های پل دایره ای شکل در پایین دست و

scouring depth by using inclined piers". J. Civil Eng. 37(12), pp. 1621-1630.	d_{50}	قطر ذرات رسوبی
Chiew, Y. M. and Melville, B. M. (1987). "Local scour around bridge piers", J. Hydraul. Res. 25(1), pp. 15-26.	d_{16}	قطر ذرات رسوبی
Fouli, H., and Elsebaie, I. H. (2016). "Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar". Arabian Journal of Geosciences, 9(12), pp.1-8.	F_r	عدد فرود
Haque, M. A. Rahman, M. M. Islam, G. M. T. and Hussain, M. A. (2007). "Scour mitigation at bridge piers using sacrificial pile". International Journal of Sediment Research, 22(1), pp. 49-59.	G_s	وزن مخصوص نسبی
Karimae Tabarestani, M. and Zarrati, A. R. (2012). "Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge pier". Int. J. Eng, Transactions C, 25(1), pp. 11-16.	g	شتاب ثقل
Khajeh, S.B.M. Vaghefi, M. and Mahmoudi, A. (2017). "The scour pattern around an inclined cylindrical pier in a sharp 180-degree bend: an experimental study". International J. of River Basin Management. 15(2), pp. 207-218.	H	عمق گودال
Melville, B. W. and Sutherland, A. J. (1989). "Design method for local scour at bridge pier". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), pp. 22-30.	L	طول گودال
Melville, B.W. (1997). "Pier and Abutment Scour: Integrated Approach". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), pp.125-136.	L_{max}	حداکثر طول آبخستگی
Singh, C.P., Setia, B. and Verma, D.V.S. (2001). "Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier". Proc of Theme D,29 th Congress on Hydraulics of Rivers, Water works and Machinery, Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing, China.	Q	دبی
Tafarojnoruz, A. Gaudio, R. and Calomino, F. (2012). "Evaluation of flow-altering counter measure against bridge pier scour". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 138(3), pp. 297-305.	R_e	عدد رینولدز
Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. (2015). "Scour formation due to laterally inclined circular pier". Arabian Journal for Science and Engineering, 41(4), pp.1311-1318.	t	زمان
Zarrati, A., Gholami, H. and Mashahir, M. (2004). "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers". Journal of Hydraulic Research, 42(1), pp. 97-103.	t_e	زمان تعادل آزمایش
	u_{*cr}	سرعت برشی بحرانی
	V	سرعت جریان
	W	عرض کانال
	y	عمق جریان
	W_L	حد روانی رس
	W_P	حد پلاستیک رس
	σ_g	انحراف معیار هندسی خاک
	ν	لزجت سینماتیکی
	γ_s	چگالی ذرات جامد خاک
	γ_w	چگالی آب

6- منابع

- بروغنی، م؛ حیای، ف. (1390). "کاربرد پلی اکریل آمید در کنترل فرسایش پاشمانی بر روی خاکهای ماری"، پژوهش‌های فرسایش محیطی، جلد 3، ص.ص. 31-44.
- صادقی، س.ح؛ حزباوی، ز؛ یونسی، ح. و بهزادفر، م. (1392). "روند تغییرات هدر رفت خاک و غلظت رسوب بر اثر کاربرد پلی اکریل آمید"، حفاظت منابع آب و خاک، سال 2، شماره 4، ص.ص. 53-67.
- Al-Shukur, A.H.K., and Obeid, Z. H. (2016). "Experimental Study of Bridge Pier Shape to Minimize Local Scour". International J. of Civil Engineering and Technology. 7(1), pp. 162-171.
- Beg, M. and Beg, S. (2014). "Scour hole characteristics of two unequal size bridge piers in tandem arrangement". J. Hydraulic Eng. 21(1), pp. 85-96.
- Bozkus, Z. and Cesme, M. (2010). "Reduction of