

بررسی آبشستگی موضعی گروه پایه پل در خاک چسبنده

حمیده غفاری و سید محمدعلی زمردیان^{*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۳)

چکیده

آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل از دلایل اصلی تخریب و شکست پل است. در طراحی پل‌ها به دلایل اقتصادی و ژئوتکنیکی از گروه پایه استفاده می‌شود که مکانیسم آبشستگی آن پیچیده و با تک‌پایه متفاوت است. در این پژوهش میزان آبشستگی در گروه پایه با سه پایه استوانه‌ای و با دو آرایش ۱×۳ در امتداد جریان و ۳×۱ در جهت عمود بر جریان، در خاک ماسه‌ای و خاک مخلوط ماسه + رس بتونیت در درجه تراکم ۹۰ درصد و رطوبت بهینه، با تغییر فاصله بین پایه‌ها و درصد رس بتونیت، بررسی شده است. همچنین تأثیر نوع کانی رس با استفاده از رس کائولین نشان داده شده است. نتایج نشان داد که میزان آبشستگی در دو خاک چسبنده و غیرچسبنده با توجه به نوع کانی رس متفاوت است. به گونه‌ای که استفاده از ۱۰ درصد رس بتونیت به صورت مخلوط با خاک ماسه باعث کاهش بیش از ۹۰ درصد آبشستگی نسبت به ماسه می‌شود در صورتی که استفاده از ۱۵ درصد کائولین در شرایط مشابه تقریباً ۳۰ درصد کاهش در آبشستگی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، گروه پایه، خاک چسبنده، بتونیت، کائولین

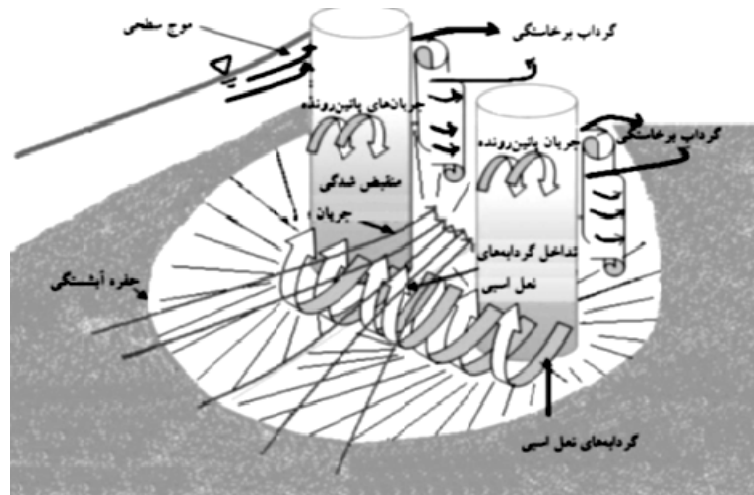
۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mzomorod@shirau.ac.ir

مقدمه

به دلایل اقتصادی و ژئوتکنیکی در ساخت پل استفاده از گروه پایه به جای تک پایه رایج تر است و کاربرد آن به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. از موارد عمده تهدید کننده ایمنی پل‌ها آبشستگی موضعی اطراف پایه‌ها است. این گونه آبشستگی به واسطه اندرکنش جریان آب و پایه پل و تشکیل سیستم گردابی پیچیده در اطراف پایه‌ها که از مهم‌ترین آنها سیستم جریان‌های رو به پایین، گرداب‌های نعل اسبی و گرداب‌های برخاستگی است، ایجاد می‌شود. پدیده آبشستگی پتانسیل تخریب تمامیت سازه پل را دارد بنابراین بررسی و تخمین نسبتاً دقیق از ابعاد و گودال آبشستگی در مجاورت پایه‌ها و ارائه تکنیک‌های مقابله با آن ضروری به نظر می‌رسد. با برخورد جریان به پایه پل به دلیل گرادیان فشار در جهت قائم، جریان به بستر منحرف می‌شود و با برخورد به بستر یک سیستم جریان‌های چرخشی شکل می‌گیرد که دارای سرعت بالایی است و ضمن حفر بستر به اطراف پراکنده می‌شود و به دلیل اینکه در پلان شبیه نعل اسب هستند به گرداب نعل اسبی معروف هستند. در پشت پایه به دلیل کاهش فشار و گرادیان فشار معکوس، جریان‌های برخاستگی تشکیل می‌شود که دارای محور چرخش قائم بوده و ذرات را از بستر جدا می‌کنند و در معرض جریان قرار می‌دهند (۱۰). علاوه بر این موارد، مکانیسم‌های دیگری در آبشستگی گروه پایه دخیل هستند که باعث پیچیدگی آن نسبت به تک پایه شده است که از مهم‌ترین آنها، عامل تقویت‌کننده و عامل حفاظ بودن است. عامل تقویت‌کنندگی باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود و عامل حفاظ بودن به این معناست که وجود پایه بالادست سبب کاهش سرعت جریان و در نهایت کاهش آبشستگی در پایه پایین دست می‌شود (۱۱). در شکل (۱) به صورت شماتیک مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه‌های دوتایی عمود بر جریان نشان داده شده است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه آبشستگی در اطراف یک پایه منفرد به خصوص در خاک‌های دانه‌ای صورت گرفته است اما با توجه به کاربرد

وسیع گروه پایه در طراحی پل‌ها، مطالعات بیشتر به منظور شناخت بیشتر مکانیسم آبشستگی و تخمین حداکثر عمق آبشستگی به منظور طراحی بهینه فونداسیون ضروری به نظر می‌رسد. از جمله مطالعاتی که در زمینه آبشستگی پیرامون گروه پایه در خاک‌های دانه‌ای صورت گرفته است می‌توان به مطالعات هتا (۵) روی آبشستگی گروه پایه استوانه‌ای دوتایی اشاره کرد که با بررسی آبشستگی این گونه پایه‌ها در امتداد جریان به این نتیجه رسید که با افزایش فاصله بین پایه‌ها تا $D/2.5$ ، آبشستگی افزایش می‌یابد و تأثیر عامل تقویت‌کنندگی در فاصله $D/2.5$ ماکزیمم است و در فواصل بیشتر از این مقدار آبشستگی روند کاهشی دارد تا اینکه در فواصل بیشتر از $D/11$ ، میزان آبشستگی برابر با حالت تک پایه می‌شود. هتا (۵) همچنین با بررسی آبشستگی این گونه پایه‌ها در حالت عمود بر جریان نشان داد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها از میزان آبشستگی کاسته می‌شود تا اینکه برابر با حالت تک پایه می‌شود. سلیم و جونز (۱۲) نشان دادند که عمق آبشستگی با افزایش فاصله بین پایه‌ها کاهش می‌یابد. عطایی آشتیانی و بهشتی (۲) با بررسی آبشستگی در گروه پایه با فواصل و آرایش مختلف نشان دادند که میزان آبشستگی بستگی به تعداد پایه‌ها و فواصل بین آنها دارد. به طوری که در آرایش 1×2 ، در فاصله $2D$ ، تأثیر عامل تقویت‌کنندگی ماکزیمم است و در فواصل کمتر از $D/15$ ، گروه پایه به صورت یک پایه منفرد عمل می‌کند. در پایه‌های با آرایش 2×1 ، ماکزیمم آبشستگی $1/5$ برابر حالت تک پایه است که در فاصله $D/2.5$ ، رخ می‌دهد. سومر و همکاران (۱۴) با بررسی آبشستگی در گروه پایه به این نتیجه رسیدند که دو الگوی آبشستگی در مجاورت گروه پایه رخ می‌دهد، الگوی اول آبشستگی موضعی در اطراف تک پایه‌ها است و الگوی دوم آبشستگی عمومی در اطراف گروه پایه‌ها است و میزان آبشستگی عمومی بستگی به تغییرات سرعت بین پایه‌ها و همچنین تلاطم ایجاد شده توسط تک تک پایه‌ها دارد. همچنین بیان نمودند که ماکزیمم عمق آبشستگی بستگی به تعداد پایه‌های موجود در مسیر جریان دارد که با افزایش تعداد پایه‌ها



شکل ۱. میدان جریان اطراف پایه‌های دوتایی عمود بر مسیر جریان (۸)

فیزیکی - شیمیایی خاک و مقاومت ناشی از چسبندگی در مقابل فرسایش هستند، عواملی که در رسوبات غیرچسبنده وجود ندارند. در رسوبات چسبنده فرسایش زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی سیال به مجموع مقاومت کششی مصالح بستر و وزن واحد حجم اشباع رسوبات فایق آید. در حالی که در رسوبات غیرچسبنده فرسایش زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی سیال بیش از تنش برشی بحرانی یا تنش برشی لازم برای به حرکت درآوردن ذرات رسوب شود (۹). هر چند که رسوبات بستر رودخانه عمدتاً غیر چسبنده هستند ولی سواحل رودخانه‌ها ممکن است از رسوبات چسبنده تشکیل شده باشند و یا مسیر کانال‌های خاکی از محدوده خاک‌های چسبنده عبور کنند (۱۳). بنابراین با توجه به ضرورت بررسی آبستگی در مصالح چسبنده و با توجه به اینکه بستر رودخانه‌ها در حالت طبیعی ترکیبی از رسوبات دانه‌ای و چسبنده است (نمونه بارز آن در رودخانه‌های شمال کشور گزارش شده است) در پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی آبستگی گروه پایه در خاک مخلوط ماسه + رس بتونیت مورد بررسی قرار داده و با تغییر درصد رس، آرایش و فاصله بین پایه‌ها آبستگی گروه پایه در خاک چسبنده را با خاک غیر چسبنده مقایسه شده و همچنین با بررسی این پدیده در خاک مخلوط ماسه + رس کائولین، تأثیر نوع کانی رسی در کاهش آبستگی

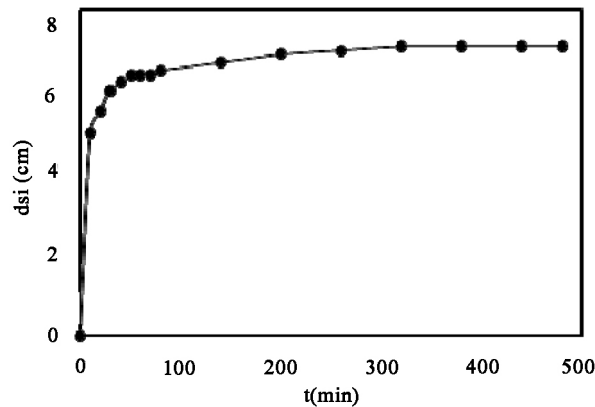
به پنج پایه، عمق آبستگی افزایش می‌یابد و بیشتر از این تعداد تأثیری بر ماکزیم عمق آبستگی ندارد. خواجه‌نوری (۶) با مطالعه ساختار جریان متلاطم اطراف پایه‌های پل و بررسی سه مدل تک پایه، گروه پایه دوتایی با فاصله پایه برابر $4D$ و $6D$ ، به این نتیجه رسید که در حالت گروه پایه، پایه دوم اثر قابل توجهی روی توزیع سرعت و عمق و عرض حفره آبستگی دارد که این اثر در فاصله $4D$ بیشتر است و باعث تشدید آبستگی در این مدل نسبت به دو مدل دیگر شده است. عقلی و زمردیان (۱) با بررسی و کنترل آبستگی گروه پایه سه‌تایی در قوس رودخانه و در سه فاصله D ، $2D$ و $3D$ ، در حالتی که پایه‌ها در عرض رودخانه قرار دارند، بیشترین آبستگی را در فاصله D مشاهده کردند و در حالتی که پایه‌ها در امتداد جریان هستند، بیشترین آبستگی را در پایه جلویی و در فاصله D مشاهده کردند. تاکنون مطالعات صورت گرفته در زمینه آبستگی گروه پایه در خاک‌های دانه‌ای تمرکز داشته است و به دلیل طبیعت پیچیده رس‌ها و آسان نبودن شرایط انجام آزمایش‌ها در این‌گونه خاک‌ها، آبستگی در حالت گروه پایه در خاک‌های چسبنده انجام نگرفته است و این در حالی است که مکانیسم آبستگی در خاک‌های چسبنده با خاک‌های غیرچسبنده متفاوت است. عوامل اصلی که باعث پیچیدگی فرسایش در مصالح چسبنده می‌شوند شامل ویژگی‌های

نشان داده شده است. در پایان هدف از پژوهش حاضر ارزیابی راهکار اضافه کردن بنتونیت به رسوبات بستر به‌عنوان یک تکنیک مقاوم‌سازی بستر به منظور مقابله با پدیده آبشستگی در مجاورت پایه‌های پل است که بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز انجام شد. آزمایشگاه مجهز به یک کانال با کف بتنی و دیواره‌های فلزی است که دارای دو قسمت مناندری و مستقیم است. کلیه آزمایش‌ها در قسمت مستقیم که دارای طول ۱۸ متر، شیب طولی ۰/۰۰۱، ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و عرض ۱۲۰ سانتی‌متر است انجام گرفت. به‌منظور اضافه شدن سرعت جریان و شرایط هیدرولیکی مطلوب، با قرار دادن ورق‌های فلزی، عرض کانال به ۸۰ سانتی‌متر کاهش داده شد. مقطع آزمایشی به طول ۲ متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد که با بالا آوردن کف کانال در قسمت بالادست و پایین‌دست مقطع آزمایش، ایجاد و با رسوبات ماسه‌ای پر شد. به‌منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از مقطع آزمایشی طول سکوی بتنی بالادست ۹ متر انتخاب شد که در بالادست با یک شیب ملایم کاهش ارتفاع می‌دهد. به‌منظور تأثیر نداشتن جریان خروجی روی آبشستگی، طول سکوی بتنی پایین‌دست ۴ متر در نظر گرفته شد. سیستم تأمین آب به‌صورت گردشی بود که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای زمان طولانی فراهم می‌کرد. به این صورت که آب از یک مخزن زیرزمینی به حجم تقریبی ۱۰۰ مترمکعب توسط سه پمپ سانتریفیوژ به درون یک تانک استاتیکی به حجم ۱۲ مترمکعب به‌منظور تأمین هد، پمپ می‌شد. با باز کردن شیر ورودی، آب از طریق لوله به درون یک حوضچه که در ابتدای کانال قرار داشت وارد می‌شد و اغتشاشات سطحی آن توسط توری فلزی گرفته می‌شد. به‌منظور کنترل عمق جریان از یک دریچه کشویی که در انتهای کانال قرار داشت استفاده می‌شد و همچنین از یک دبی‌سنج خودکار الکتریکی برای کنترل دبی جریان استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها

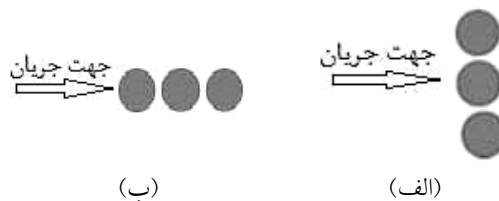
در شرایط آب زلال انجام گرفت و پارامترهایی از قبیل سرعت جریان (v)، عمق جریان (y) و اندازه رسوبات بستر (d_{50}) به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تأثیر آنها بر آبشستگی حذف شود و حداکثر آبشستگی ایجاد شود. بدین‌منظور از معیارهایی که توسط محققین ارائه شده است استفاده شد. از جمله، برای از بین بردن تأثیر دیواره کانال بر میزان آبشستگی، نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه باید بزرگ‌تر از $6/25$ باشد (۱۰). بنابراین با توجه به عرض کانال از پایه‌های استوانه‌ای به قطر $3/5$ سانتی‌متر استفاده شده است که این نسبت حداقل برابر با ۸ (در حالتی که سه پایه عمود بر جریان و فاصله بین آنها برابر با $2/5 D$ است) در نظر گرفته شده است. رسوبات پایه‌ای مورد استفاده در آزمایش از نوع ماسه ریز و دارای دانه‌بندی یکنواخت است. برای جلوگیری از تشکیل ریپل در سطح رسوبات قطر متوسط ذرات بایستی از $0/7$ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد و برای حذف تأثیر اندازه رسوبات بر آبشستگی قطر متوسط ذرات باید در شرط $20-25 > D/d_{50}$ (قطر پایه) صدق کند (۱۰). از آنجایی که غیریکنواختی رسوبات باعث کاهش آبشستگی می‌شود بنابراین از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد و در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از $1/3$ باشد ($\sigma_g < 1/3$) شرط یکنواخت بودن ذرات برقرار است (۱۳). بنابراین برای مطابقت با شرایط مذکور از ماسه با $d_{50} = 0/78$ میلی‌متر و $\sigma_g = 1/25$ استفاده شد. چپو و ملویل (۳) به این نتیجه رسیدند که اگر عمق جریان نسبت به قطر پایه به اندازه کافی بزرگ باشد ($y/D > 3/5$) عمق جریان تأثیری بر آبشستگی موضعی اطراف پایه ندارد. همچنین رادکیوی (۱۱) شرط تشکیل حداکثر عمق آبشستگی در آب زلال را $V \leq 0/95 V_c$ می‌داند. V_c سرعت آستانه حرکت ذرات است. بنابراین با سعی و خطا، دبی جریان 34 لیتر بر ثانیه، عمق جریان 13 سانتی‌متر، سرعت جریان برابر $0/33$ متر بر ثانیه و $V = 0/94 V_c$ به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن زمان تعادل از معیار کومار و همکاران (۷) استفاده شد و آن مدت زمانی است که تغییرات آبشستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک



شکل ۲. منحنی تغییرات عمق آبشستگی در برابر زمان

جدول ۱. شرایط جریان در آزمایش‌های انجام شده

d_{50} (m)	D_{50}/d	y (m)	V_c (m/s)	y/D	V/V_c	Fr
۰/۷۸	۴۴/۸۷	۰/۱۳	۰/۳۵	۳/۷	۰/۹۴	۰/۲۹۲



شکل ۳. آرایش گروه پایه: الف) گروه پایه عمود بر جریان و ب) گروه پایه در جهت جریان

شد. آماده‌سازی نمونه خاک به این صورت بود که ابتدا بر اساس ابعاد آبشستگی صورت گرفته در نمونه شاهد (ماسه) و با احتساب ضریب اطمینان، از جعبه‌ای فلزی به ابعاد $۶۰ \times ۵۰ \times ۱۴$ سانتی‌متر استفاده شد که در تراز وسط رسوبات ماسه‌ای بستر قرار می‌گرفت. سپس بر اساس حجم جعبه، درجه تراکم ۹۰ درصد، منحنی تراکم حداکثر ($\gamma_d \max$, W_{opt}) و همچنین میزان رطوبت بهینه، نمونه خاک مخلوط رس + ماسه آماده می‌شد. به این صورت که ابتدا ماسه و رس با درصد‌های وزنی ذکر شده به صورت یکنواخت اختلاط داده می‌شد و پس از اضافه کردن درصد آب مورد نظر (رطوبت بهینه) و اختلاط کامل، مخلوط در کیسه‌های نایلونی به مدت حداقل ۱۶ ساعت به منظور یکنواخت شدن رطوبت و انجام واکنش‌های شیمیایی در رس نگهداری می‌شد. پس از این مدت خاک مخلوط مد

میلی‌متر نباشد. بدین‌منظور آزمایشی بدون محدودیت زمانی در شرایط ذکر شده و در رسوبات شاهد (ماسه) انجام گرفت و با ثبت تغییرات آبشستگی نسبت به زمان، زمان تعادل شش ساعت به دست آمد که در شکل (۲) نشان داده شده است. جدول (۱) شرایط جریان را در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در این جدول Fr عدد فرود جریان است و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. در این پژوهش از گروه پایه با سه پایه استوانه‌ای و با آرایش ۳×۱ در جهت عمود بر جریان و آرایش ۱×۳ در امتداد جریان و با فاصله‌های D ، $۲D$ و $۲/۵D$ استفاده شده است (شکل ۳).

آماده‌سازی رسوبات چسبنده

در پژوهش حاضر از رس بنتونیت به صورت مخلوط با ماسه به میزان ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد به صورت وزنی استفاده

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک

نوع خاک	W _{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	pL (%)	LL (%)	PI (%)	LI (%)	طبقه‌بندی خاک (USCS)
ماسه + ۵ درصد بنتونیت	۲۰	۱/۶۵	۱۶	۴۹/۳۲	۲۹/۰۲	۰/۱۲	SP-SC
ماسه + ۱۰ درصد بنتونیت	۱۸/۱	۱/۷۳	۱۲	۶۶	۵۴	۰/۱۱	SP-SC
ماسه + ۱۵ درصد کائولین	۱۵/۱۷	۱/۸۱					

جدول ۳. نتایج مربوط به دستگاه برش پره‌ای

نوع خاک	وزن مخصوص خشک (g/cm ³)	مقاومت برشی پره‌ای (kpa)
ماسه	۱/۴۶	-
ماسه + ۵ درصد بنتونیت	۱/۴۸۸	۷/۴۵
ماسه + ۱۰ درصد بنتونیت	۱/۵۷۱	۱۴/۵۲
ماسه + ۱۵ درصد کائولین	۱/۶۳	۴/۵۱

قسمت مستقیم شود و سطح رسوبات به هم ریخته نشود. سپس به آرامی شیر آب بازتر می‌شد تا پشت دریچه از آب پر شود و هم‌زمان دبی جریان کنترل می‌شد. پس از آن دریچه کشویی به آرامی باز می‌شد تا عمق ۱۳ سانتی‌متر و دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه تأمین شود. پس از اطمینان از شروع جریان یکنواخت زمان آزمایش‌ها به مدت شش ساعت آغاز می‌شد. پس از اتمام آزمایش‌ها، شیر آب به آرامی بسته و دریچه کشویی به آرامی پایین آورده می‌شد تا از شسته شدن رسوبات و وارد شدن به گودال آبشستگی جلوگیری شود. پس از خارج شدن آب از کانال و قبل از فروکش کردن آب، با استفاده از دستگاه برش پره‌ای در چندین نقطه مقاومت برشی قرائت می‌شد (جدول ۳). پس از خارج کردن آب از گودال از طریق مکش آب، با استفاده از یک متر لیزری که روی یک ریل قرار می‌گرفت، پروفیل گودال آبشستگی به صورت شبکه ۲×۲ سانتی‌متر و در نقاط با شیب تندتر به صورت شبکه ۱×۱ سانتی‌متر برداشت می‌شد. در شکل (۴) کانال آزمایش نشان داده شده است.

بحث و نتایج

آبشستگی گروه پایه در حالت عمود بر جریان در رسوبات ماسه همان‌گونه که در مطالعات گذشته توسط محققین بررسی شده بود در حالت گروه پایه میزان آبشستگی بیشتر از تک‌پایه است

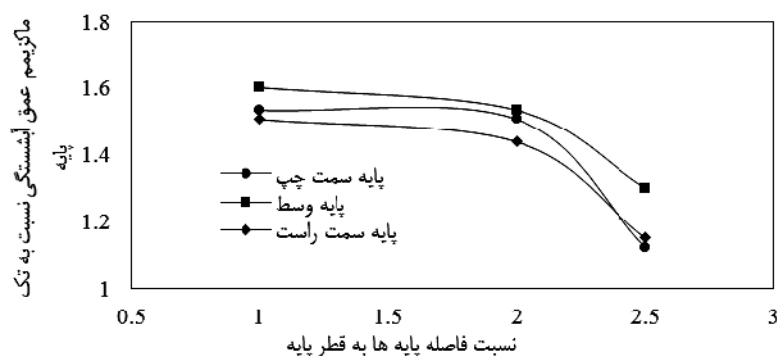
نظر در هفت قسمت وزنی برابر در هفت لایه دو سانتی‌متری در جعبه موجود در کانال پس از قرار دادن گروه پایه در جعبه با استفاده از ضربه متراکم می‌شد. لازم به ذکر است که به دلیل آبشستگی عمومی و اثر نداشتن لبه فوقانی جعبه در آبشستگی، دو سانتی‌متر فوقانی جعبه که از قبل برش خورده بود، پس از تراکم از روی جعبه برداشته می‌شد و هم‌تراز با رسوبات ماسه‌ای تسطیح می‌شد. پس از اشباع نگه‌داشتن خاک به مدت ۲۴ ساعت آزمایش‌های مربوط به آبشستگی شروع می‌شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد آزمایش، شامل تست تراکم استاندارد و حدود ات‌برگر، به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D ۶۹۸-۹۱ و ASTM D ۴۳۱۸-۱۰ در آزمایشگاه مکانیک خاک بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز انجام شده است که در جدول (۲) ارائه شده است.

راه‌اندازی آزمایش‌ها

انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا پس از اطمینان از تراز بودن پایه‌ها، سطح رسوبات با استفاده از ترازسنج تسطیح و هم‌تراز سکوی بالادست می‌شد. پس از روشن شدن پمپ، شیر آب کاملاً باز نگه‌داشته و پس از بالا آمدن سطح آب در قسمت مناندردی کانال، دریچه کشویی پایین‌دست پایین نگه‌داشته می‌شد و شیر آب به آرامی بسته می‌شد تا آب به آرامی وارد



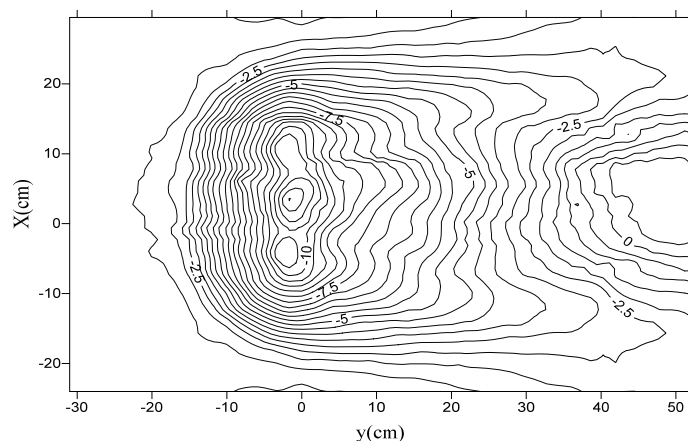
شکل ۴. نمایی از کانال آزمایش



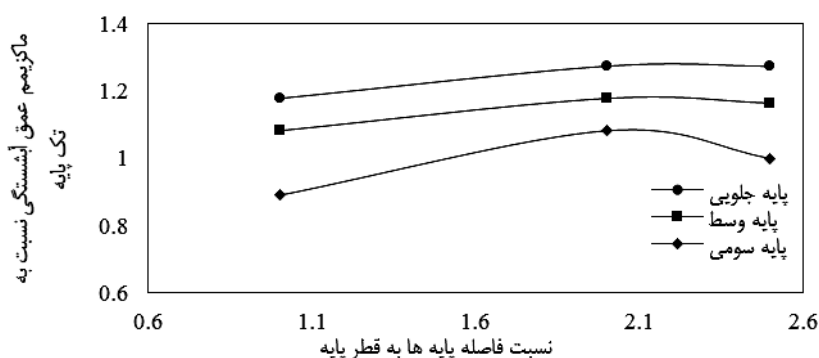
شکل ۵. تغییرات آبشستگی در رسوبات ماسه‌ای در گروه پایه در جهت عمود بر جریان نسبت به تک پایه

آشتیانی و بهشتی (۲)، با مطالعه آبشستگی روی گروه پایه دوتایی (۲×۱) ماکزیمم آبشستگی را در فاصله $D/25$ به دست آوردند که در این حالت عمق آبشستگی با ضریب $1/5$ نسبت به تک پایه افزایش می‌یابد و همچنین بیان نمودند که در فواصل کمتر از این مقدار گروه پایه مانند یک تک پایه عمل می‌کند. عطایی آشتیانی و بهشتی (۲) همچنین با مطالعه گروه پایه با آرایش 2×4 ماکزیمم آبشستگی را در فاصله $D/25$ و با افزایش ضریب ۲ نسبت به تک پایه مشاهده کردند. هنا (۵) این فاصله را برابر با D ذکر کرد. در شکل (۵) تغییرات آبشستگی در هر سه پایه نسبت به فاصله بین پایه‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشهود است میزان آبشستگی در پایه وسط بیشتر از دو پایه کناری به دست آمده است که می‌تواند به دلیل بیشتر بودن سرعت جریان در ناحیه مرکزی کانال باشد و همچنین به دلیل اینکه گودال حاصل از آبشستگی دو پایه کناری روی گودال آبشستگی پایه وسط می‌افتد میزان آبشستگی در این

و به این علت است که در این حالت دو گونه آبشستگی رخ می‌دهد: ۱- آبشستگی موضعی اطراف تک پایه‌ها ۲- آبشستگی عمومی اطراف گروه پایه. که در این پژوهش نیز میزان آبشستگی در گروه پایه بیشتر از تک پایه به دست آمده است و بیشترین مقدار آبشستگی در فاصله D مشاهده شد که در پایه وسط به میزان ۶۰ درصد بیشتر از تک پایه به دست آمده است. علت آن را می‌توان این گونه بیان کرد که هر چه فاصله پایه‌ها کمتر باشد، گرداب‌های نعل اسبی از لحاظ اندازه بزرگ‌تر می‌شوند و به دلیل سرعت زیاد آنها باعث افزایش یافتن آبشستگی می‌شوند. همچنین در فواصل کم به دلیل تغییرات سرعت و افزایش یافتن آن در بین پایه‌ها میزان آبشستگی بیشتر است. در فواصل خیلی کم ($D/15$) مطابق با عطایی آشتیانی و بهشتی (۲) گروه پایه مانند یک تک پایه منفرد با ضخامت بیشتر عمل می‌کند که در این حالت فقط آبشستگی موضعی اطراف یک تک پایه با ضخامت بیشتر مشاهده می‌شود. عطایی



شکل ۶: تغییرات توپوگرافی گودال آبشستگی در ماسه در حالت گروه پایه عمود بر جریان در فاصله D

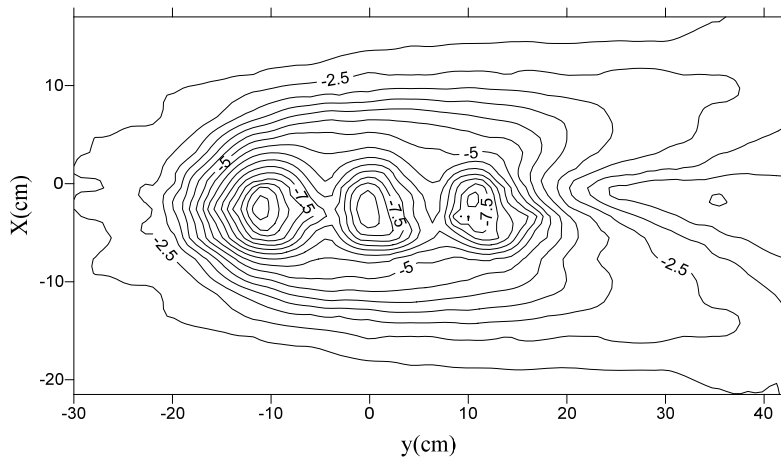


شکل ۷: تغییرات آبشستگی در گروه پایه نسبت به تک پایه در امتداد جریان نسبت به فاصله بین پایه‌ها در رسوبات ماسه‌ای

جریان باعث افزایش سرعت جریان و در نهایت افزایش آبشستگی می‌شود. همچنین با مقایسه ماکزیمم عمق آبشستگی در فواصل D، ۲ D و ۲/۵ D، میزان آبشستگی در فاصله ۲ D بیشتر از دو فاصله دیگر به دست آمده است و در فاصله‌های کمتر از ۲ D آبشستگی روند افزایشی دارد (شکل ۷). که به این علت است که در این فواصل، پایه‌ها روی هم تأثیر می‌گذارند و با تداخل گرداب‌های ناشی از تک تک پایه‌ها روی هم و افزایش یافتن اندازه گرداب‌ها و در نهایت افزایش تلاطم، آبشستگی افزایش می‌یابد که در فاصله ۲ D بیشترین تأثیر مشاهده می‌شود و در فواصل بیشتر از ۲ D، به دلیل نداشتن گرداب‌ها روی هم، گودال آبشستگی در اطراف هر پایه و پایه پشتی با هم تداخل ندارند و این باعث می‌شود که آبشستگی روند کاهش‌ی داشته باشد. هنا (۵) و عطایی‌آشتیانی و بهشتی (۲)، ماکزیمم آبشستگی را به ترتیب در فاصله ۲/۵ D و ۲ D مشاهده کردند و

پایه بیشتر است. میزان آبشستگی در دو پایه کناری برخلاف انتظار یکسان نشده است و به صورت جزئی با هم اختلاف دارند که می‌تواند ناشی از طبیعت تصادفی حرکت ذرات ماسه و یا همچنین خطای قرائت داده‌های آبشستگی باشد. توپوگرافی بستر در این حالت در فاصله D در شکل (۶) ترسیم شده است. تداخل گودال‌های آبشستگی در اطراف سه پایه در این شکل نشان داده شده است. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود عمق آبشستگی در پایه وسط به میزان بیشتری اتفاق افتاده است.

عمق آبشستگی گروه پایه در امتداد جریان در رسوبات ماسه
در این حالت ماکزیمم عمق آبشستگی به دست آمده در پایه‌ها در هر سه فاصله D، ۲ D و ۲/۵ D کمتر از حالتی است که پایه‌ها عمود بر جریان هستند، که به این علت است که در حالت عمود بر جریان در این فواصل ضخامت پایه‌ها در برابر



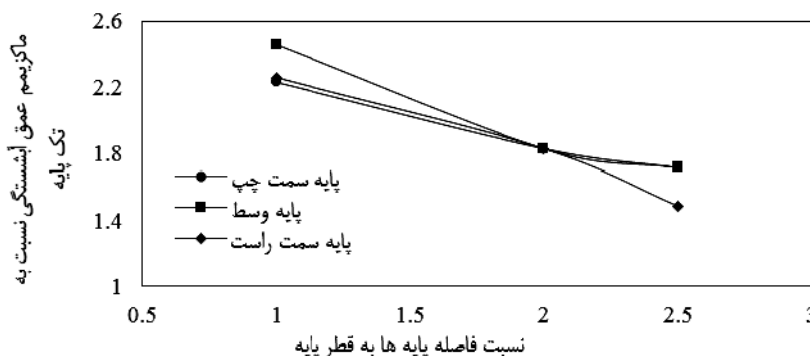
شکل ۸. پروفیل گودال آبشستگی در ماسه در حالت گروه پایه در امتداد جریان با فاصله پایه‌ها برابر $2D$

کاهش یافته بستگی به فاصله بین پایه‌ها دارد. مشابه با آبشستگی گروه پایه در ماسه، مشاهده می‌شود که در خاک چسبنده نیز آبشستگی در حالت گروه پایه نسبت به تک پایه بیشتر است و در این حالت نیز بیشترین مقدار آبشستگی در حالتی اتفاق افتاده است که فاصله بین پایه‌ها برابر با D است و با افزایش فاصله از میزان آبشستگی کاسته شده است (شکل ۹). نکته‌ای که قابل ذکر است این است که شیب منحنی‌های آبشستگی پایه‌ها نسبت به فاصله پایه‌ها که در شکل (۹) نشان داده شده است نسبت به شکل (۵) که مربوط به خاک ماسه است، تندتر است که این به دلیل تفاوت مکانیسم آبشستگی در خاک چسبنده است. در خاک‌های دانه‌ای است. در خاک‌های دانه‌ای مکانیسم فرسایش به صورت جدا شدن انفرادی ذرات از بستر به صورت تک ذره است اما در خاک‌های چسبنده این مکانیسم به صورت جدا شدن احتمالی توده‌هایی از خاک و همچنین مکانیسم ذره به ذره است که باعث شده است تغییرات آبشستگی در خاک چسبنده نسبت به خاک دانه‌ای بیشتر باشد اما با این حال میزان آبشستگی نسبت به خاک ماسه‌ای کمتر به دست آمده است. البته عامل دیگری که در میزان فرسایش خاک‌های چسبنده بسیار مهم است پارامتر زمان است زیرا خاک‌های چسبنده در مدت زمان طولانی تری نسبت به خاک‌های دانه‌ای دچار فرسایش می‌شوند که باید بیشتر مورد مطالعه قرار بگیرد. توپوگرافی بستر در این حالت در فاصله D در شکل (۱۰) ترسیم شده است. در

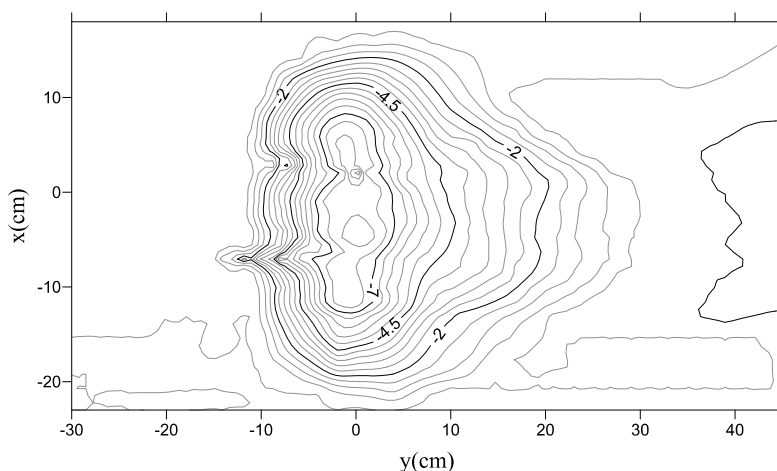
بیان کردند که در فواصل خیلی زیاد، بیشتر از $10D$ ، گروه پایه مانند تک پایه عمل می‌کند و ماکزیمم آبشستگی برابر با حالت تک پایه می‌شود. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان آبشستگی در پایه جلویی نسبت به پایه پشتی بیشتر شده است که به دلیل تأثیر عامل تقویت‌کنندگی است. همچنین با افزایش فاصله بین پایه‌ها، نقش پدیده حفاظت کننده در پایه‌های پشتی افزایش پیدا می‌کند که این باعث شده است که در پایه آخری در دو فاصله D و $2/5D$ میزان آبشستگی نسبت به حالت تک پایه کاهش پیدا کند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و مطالعات پیشین می‌توان نتیجه گرفت که میزان آبشستگی در حالت گروه پایه در رسوبات دانه‌ای، بستگی به تعداد، آرایش و فاصله بین پایه‌ها دارد. توپوگرافی بستر در این حالت در فاصله $2D$ در شکل (۸) ترسیم شده است. همان‌گونه که مشخص است حجم گودال آبشستگی در اطراف پایه جلویی به دلیل تأثیر عامل تقویت‌کنندگی بیشتر از دو پایه پشتی به دست آمده است.

آبشستگی گروه پایه در حالت عمود بر جریان در خاک ماسه + پنج درصد رس بتونیت

مطابق با مطالعات غفاری (۴)، با اضافه کردن بتونیت به خاک ماسه‌ای در حالت تک پایه، میزان آبشستگی کاهش پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر هم اضافه شدن پنج درصد بتونیت به ماسه، باعث کاهش آبشستگی در گروه پایه شده است که این مقدار



شکل ۹. تغییرات آبهستگی در رسوبات رسی پنج درصد در گروه پایه در جهت عمود بر جریان نسبت به تک پایه



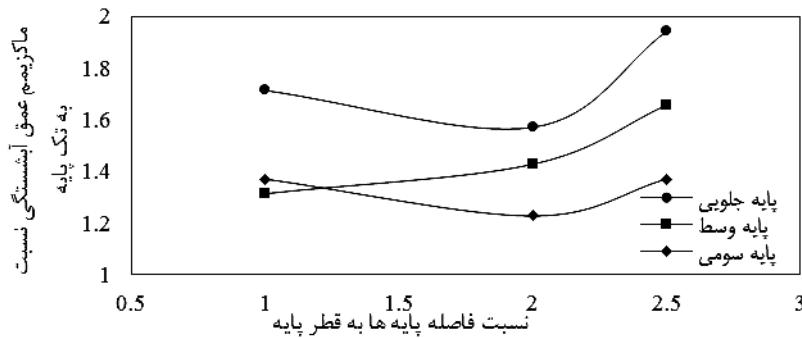
شکل ۱۰. تغییرات توپوگرافی گودال آبهستگی در ماسه + پنج درصد بتونیت در حالت گروه پایه عمود بر جریان با فاصله پایه‌ها برابر D

استفاده از ۵ درصد بتونیت باعث کاهش آبهستگی گروه پایه نسبت به خاک ماسه‌ای در همه فاصله‌ها شده است. همچنین میزان آبهستگی در پایه جلویی نسبت به پایه پشتی بیشتر است که به دلیل تأثیر عامل تقویت‌کنندگی است. در خاک ماسه‌ای مشاهده شد که در فاصله ۲ D ماکزیمم آبهستگی رخ می‌دهد که در خاک چسبنده این نتیجه مشاهده نشده است و در هر سه پایه بیشترین آبهستگی در فاصله ۲/۵ D اتفاق افتاده است. گودال آبهستگی ایجاد شده به دلیل چسبندگی ناشی از وجود بتونیت، دارای شکل و هندسه منظمی نیست بنابراین در فاصله ۲/۵ D آبهستگی به میزان بیشتری مشاهده شده است. همچنین میزان آبهستگی در پایه‌های پشتی بیشتر از تک‌پایه اتفاق افتاده است که این در خاک ماسه کمتر مشاهده شد که به دلیل مکانیسم فرسایش توده‌ای جدا شدن خاک چسبنده تحت تنش‌های بیشتر

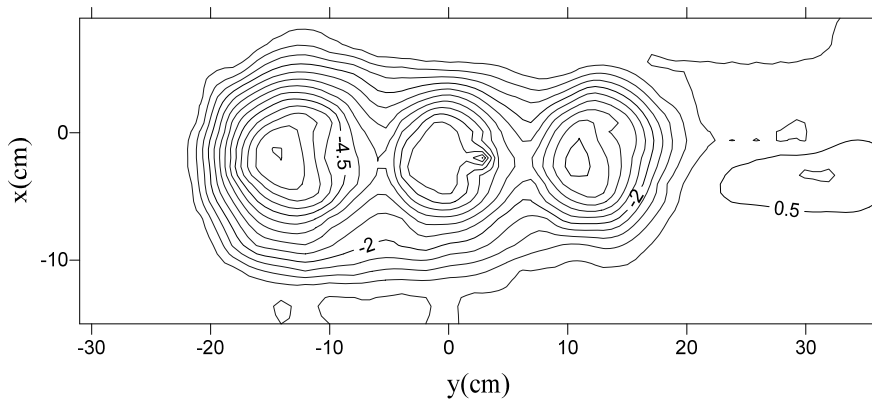
مقایسه با پروفیل گودال آبهستگی در خاک ماسه که در شکل (۶) نشان داده شده است همان‌گونه که مشاهده می‌شود گودال آبهستگی دارای گستردگی طولی و عرضی کمتری و همچنین حجم کمتری است. در واقع با اضافه شدن بتونیت به ماسه به دلیل افزوده شدن چسبندگی خاک به دلیل وجود کانی مونت‌موریلونیت، مقاومت برشی خاک در برابر قدرت فرساینده‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین آبهستگی موضعی در اطراف پایه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

آبهستگی گروه پایه در امتداد جریان در خاک ماسه + پنج درصد رس بتونیت

در این حالت هم مطابق با خاک ماسه میزان آبهستگی در حالت گروه پایه بیشتر از تک‌پایه به دست آمده است (شکل ۱۱)، و



شکل ۱۱. تغييرات آبستگي گروه پايه در امتداد جريان نسبت به تک پايه در رسوبات ماسه با رس پنج درصد

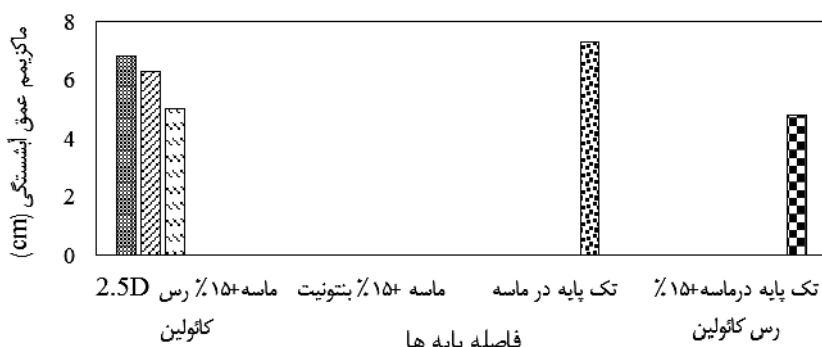


شکل ۱۲. تغييرات توپوگرافي گودال آبستگي در ماسه + پنج درصد بنتونيت در حالت گروه پايه در امتداد جريان با فاصله پايه ها برابر ۲/۵ D

در حالت عمود بر جريان در هيچ کدام از فاصله هاي D ، $2D$ و $۲/۵ D$ آبستگي مشاهده نشده است. بنابر اين در فاصله $۰/۵ D$ آزمايشي انجام گرفت. نتايج نشان داد که به اندازه هشت ميلي متر آبستگي در اطراف پايه ها ايجاد مي شود. و اين در حالي است که مطابق با مطالعات غفاري (۴) در حالت تک پايه در رسوبات ماسه + ۱۰ درصد بنتونيت هيچ گونه آبستگي ايجاد نشده است. بنابر اين استفاده از ۱۰ درصد بنتونيت به خاک ماسه اي در تراکم ۹۰ درصد و رطوبت بهينه ميزان آبستگي در فاصله $۰/۵ D$ به اندازه ۹۳ درصد کاهش يافته است که اين کاهش در حالت تک پايه، ۱۰۰ درصد مشاهده شده است. همچنين در حالت گروه پايه در امتداد جريان در هيچ کدام از فاصله هاي $۰/۵ D$ ، D و $۲D$ آبستگي مشاهده نشده است. علت اين امر را مي توان اين گونه ذکر کرد که اضافه کردن ۱۰ درصد بنتونيت به خاک باعث افزايش مقاومت برشي بستر در برابر گرداب هاي ناشي از حضور پايه و تنش هاي برشي ناشي از

وارد شده به خاک ناشي از وجود گروه پايه، نسبت به تک پايه است. توپوگرافي بستر در فاصله $۲/۵ D$ در شکل (۱۲) ترسيم شده است. همان گونه که مشاهده مي شود به دليل تاثير عامل تقويت کنندگي ميزان آبستگي در پايه جلوبي نسبت به دو پايه پشتي بيشتري شکل گرفته است. همچنين تداخل گودال هاي ايجاد شده در اطراف هر پايه در اين شکل نشان داده شده است. در مورد رسوبات چسبنده نکته اي که حائز اهميت است تراکم خاک است که بايد به طور يکنواخت صورت بگيرد و عدم رعايت آن باعث خطا در نتايج حاصل مي شود. اين مسئله مي تواند از منابع خطا در پژوهش حاضر باشد. بنابر اين مطالعات بيشتري در اين زمينه توصيه مي شود.

آبستگي گروه پايه در رسوبات ماسه + ۱۰ درصد بنتونيت
با اضافه شدن ۱۰ درصد بنتونيت به رسوبات ماسه به دليل افزايش مقاومت برشي بستر ناشي از افزايش چسبندي خاک

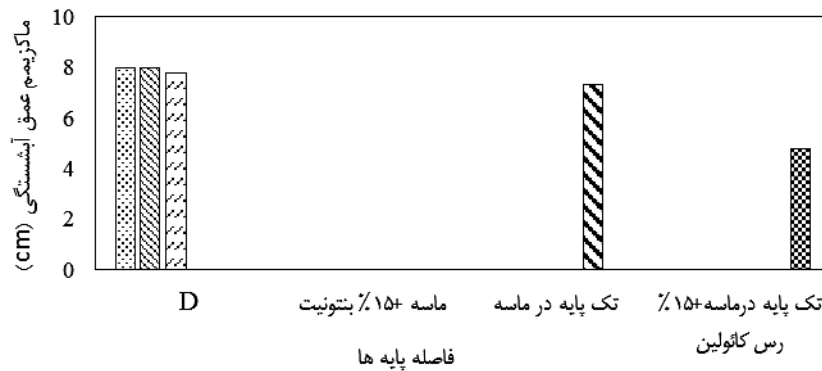


شکل ۱۳. تغییرات آبهستگی در مخلوط ماسه ۱۵+ درصد کائولین در گروه پایه با فاصله D ۲/۵ در امتداد جریان

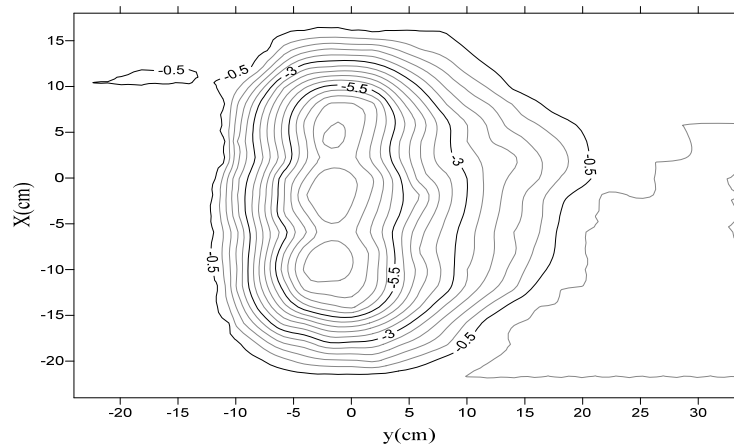
که استفاده از ۱۵ درصد بنتونیت باعث کاهش آبهستگی به میزان ۱۰۰ درصد شده است. در حالت گروه پایه عمود بر جریان با فاصله D در مخلوط ماسه + ۱۵ درصد رس کائولین ماکزیمم عمق آبهستگی در پایه وسط برابر ۸ سانتی‌متر و در پایه سمت راست ۸ سانتی‌متر و در پایه سمت چپ برابر ۷/۸ سانتی‌متر به دست آمد که نسبت به شرایط مشابه در ماسه، آبهستگی در پایه وسط ۳۲ درصد و در پایه سمت راست ۲۷ درصد و در پایه سمت چپ ۳۰ درصد کاهش دارد (شکل ۱۴). با اضافه شدن ۱۵ درصد کائولین مقاومت برشی بستر مطابق با جدول ۳ برابر ۴/۵۱ کیلوپاسکال به دست آمده است که نسبت به ۵ درصد بنتونیت حدوداً ۴۰ درصد کاهش مقاومت برشی نشان داده است بنابراین میزان آبهستگی بیشتری با اضافه شدن ۱۵ درصد کائولین به خاک نسبت به ۵ درصد بنتونیت ایجاد شده است که نشانگر تأثیر و اهمیت نوع کانی موجود در خاک بستر بر میزان آبهستگی است که باید مورد توجه محققین در بررسی میزان آبهستگی در خاک‌های چسبنده باشد. توپوگرافی بستر در حالت گروه پایه عمود بر جریان با فاصله D در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نکته‌ای که در این شکل مشاهده می‌شود هندسه منظم گودال آبهستگی در اطراف پایه‌ها است که ناشی از فرسایش ذره به ذره رسوبات بستر ناشی از چسبندگی کم خاک است و برخلاف رسوبات چسبنده بنتونیتی که مکانیسم فرسایش در آنها به صورت جدا شدن توده‌های کوچکی از خاک است.

آنها به بستر می‌شود که مقاومت برشی بستر در این حالت مطابق با جدول (۳) برابر ۱۴/۵۲ کیلوپاسکال به دست آمده است که در مقایسه با ۵ درصد بنتونیت مقاومت برشی به میزان ۹۵ درصد افزایش یافته است. در فاصله D ۲/۵، در پایه جلویی به اندازه ۱/۳ سانتی‌متر، در پایه وسط به اندازه ۰/۸ سانتی‌متر و در پایه پشتی ۰/۵ سانتی‌متر آبهستگی مشاهده شده است.

آبهستگی گروه پایه در مخلوط ماسه + ۱۵ درصد رس کائولین
با اضافه کردن ۱۵ درصد بنتونیت به ماسه هیچ‌گونه آبهستگی در اطراف هر دو گروه پایه عمود بر جریان و همچنین در امتداد جریان در همه فواصل مشاهده نشد. به منظور نشان دادن تأثیر نوع کانی رس در میزان آبهستگی صورت گرفته در اطراف پایه‌ها، آزمایشی به این منظور در خاک مخلوط ماسه با ۱۵ درصد رس کائولین انجام گرفت. نتایج نشان داد که در این حالت میزان آبهستگی بیشتر از حالتی است که از ۱۵ درصد بنتونیت به صورت مخلوط با رسوبات بستر استفاده شده است. به گونه‌ای که در حالت گروه پایه در امتداد جریان با فاصله D ۲/۵ در مخلوط ماسه + ۱۵ درصد رس کائولین ماکزیمم عمق آبهستگی در پایه وسط برابر ۶/۳ سانتی‌متر و در پایه جلویی ۶/۸ سانتی‌متر و در پایه پشتی برابر ۵ سانتی‌متر به دست آمد که نسبت به شرایط مشابه در ماسه، آبهستگی در پایه وسط ۲۶ درصد و در پایه جلویی ۲۷ درصد و در پایه پشتی ۳۱ درصد کاهش دارد (شکل ۱۳). این در حالی است



شکل ۱۴. تغییرات آبهستگی در مخلوط ماسه ۱۵+ درصد کائولین در گروه پایه با فاصله D در جهت عمود بر جریان



شکل ۱۵. تغییرات توپوگرافی گودال آبهستگی در ماسه + ۱۵ درصد کائولین در حالت گروه پایه عمود بر جریان با فاصله پایه‌ها برابر D

می‌دهد و در آرایش ۱×۳ در فاصله ۲/۵ D بیشترین آبهستگی رخ داده است. مطالعات بیشتر در این حالت توصیه می‌شود. ۳- اضافه کردن ۱۰ درصد رس بنتونیت به خاک ماسه‌ای باعث کاهش ۹۳ درصد در آبهستگی در گروه پایه عمود بر جریان و فاصله ۵/۵ D، شده است و این در حالی است که در سه فاصله D، ۲ D و ۲/۵ D، آبهستگی به میزان ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. و در حالتی که پایه‌ها در امتداد جریان هستند در فاصله‌های کمتر از ۲/۵ D، میزان آبهستگی ۱۰۰ درصد کاهش یافته است اما در فاصله ۲/۵ D، آبهستگی به میزان ناچیزی اتفاق افتاده است به گونه‌ای که ۸۶ درصد کاهش آبهستگی در پایه جلویی نسبت به نمونه شاهد اتفاق افتاده است.

نتیجه‌گیری

۱- میزان آبهستگی در گروه پایه بستگی به تعداد پایه‌ها، آرایش و فاصله بین آنها دارد و با تغییر این پارامترها، مکانیسم و ماکزیمم آبهستگی متفاوت است. در ماسه با آرایش ۳×۱ با افزایش فاصله ماکزیمم آبهستگی کاهش پیدا می‌کند به گونه‌ای که در فاصله D، بیشترین آبهستگی رخ می‌دهد و در آرایش ۱×۳ میزان آبهستگی در فاصله‌های کمتر از ۲ D، روند افزایشی دارد به گونه‌ای که در فاصله ۲ D، ماکزیمم آبهستگی اتفاق افتاده است.

۲- با اضافه کردن ۵ درصد رس بنتونیت به خاک ماسه‌ای در گروه پایه با آرایش ۳×۱، میزان آبهستگی در هر سه پایه کاهش پیدا می‌کند که در فاصله D بیشترین آبهستگی رخ

شاهد کاهش داشته است که این در گروه پایه موجود در امتداد جریان در فاصله $D/5$ ، آبخستگی به میزان ۲۷ درصد، در پایه جلویی نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است.

۵- جامع‌ترین نتیجه‌گیری که از پژوهش حاضر به دست آمد این است که استفاده از ۱۵ درصد بنتونیت به صورت اختلاط با خاک بستر در محدوده پایه‌های پل، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی در جهت مقابله با آبخستگی استفاده شود.

۴- نوع کانی رسی موجود در خاک چسبنده تأثیر مهمی بر کاهش میزان آبخستگی دارد. استفاده از ۱۵ درصد رس بنتونیت میزان آبخستگی در هر سه پایه موجود در امتداد جریان و عمود بر جریان در همه فاصله‌ها به میزان ۱۰۰ درصد کاهش پیدا کرده است و این در حالی است که استفاده از رس کائولین به همین مقدار در حالتی که گروه پایه عمود بر جریان است، آبخستگی به میزان ۳۲ درصد در پایه وسط نسبت به نمونه

منابع مورد استفاده

1. Aghli, M. and S. M. A. Zomorodian. 2014. Effect of Combination Wrapping Cable and Collar on Depth of Scour around Cylindrical Bridge Pier Groups on Rivers Meander. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 45(1): 1-10. (In Farsi).
2. Ataei-Ashtiani, B. and A. A. Beheshti. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 132(10): 1100-1104.
3. Chiew, Y. M. and B. W. Mellville. 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 15-26.
4. Ghaffari, H. 2016. *Local Scour at Bridge Piers in Cohesive Soils*. MS Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi).
5. Hannah, C. R. 1978. Scour at pile groups. Research Rep. No. 28-3, Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
6. Khajehnouri, L. 2006. Investigation of flow characteristics around bridge Piers. MSc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi).
7. Kumar, V., K. G. Rang Raju and N. Vittal. 1999. Redaction of local scour around bridge pier using slots and collar. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 125(2): 132-135.
8. Movahedi, N., A. A. Dehghani, M. J. Aarabi and A. R. Zahiri. 2014. Experimental study of local scouring around two side-by-side piers with raft footing. *Journal of Water and Soil Conservation* 21(1): 199-215. (In Farsi).
9. Najafzadeh, M., Gh. A. Barani and M. R. Kermani. 2013. GMDH based back propagation algorithm to predict abutment scour in cohesive soils. *Journal of Ocean Engineering* 59: 100-106.
10. Raudkivi, A. J and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
11. Raudkivi, A. J. 1998. Loose boundary hydraulics. A. A. Balkema. Rotterdam, the Netherland.
12. Salim, M. and J. S. Jones. 1998. Scour around exposed pile foundations. Compilation of Conf. Scour Papers (1991-1998), ASCE, Reston, Va.
13. Shafaei-Bejestan, M. 2011. *Hydraulic of Sediment Transport* (2th ed). Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran, (In Farsi).
14. Sumer, B. M., K. Bundgaard and J. Fredsøe. 2005. Global and local scour at pile groups. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 15(3): 204-209.

Investigating the Local Scour around Group Bridge Piers in Cohesive Soils

H. Ghaffari and S. M. A. Zomorodian^{1*}

(Received: December 25-2017 ; Accepted: August 14-2018)

Abstract

One of the main reasons for bridge failure is the local scour around the pier. Pier groups are popular in the structural designs due to economical and geotechnical reasons. The mechanism of scouring at the pier groups is more complicated than the single one. In this study, the scour around group piers in the sandy soil and a mixture of sand and clay in some relative compaction equal to 90% and the optimum moisture was studied. The arrangement of the group piers was 1 pier * 3 pier and 3 pier * 1 pier along and transverse of the flow direction, respectively, at the interval space of D, 2D and 2.5D intervals. The effect of the Bentonite clay content was investigated. Finally, by using Kaolinite clay, the effect of the clay mineral was studied. The results showed that the scouring depth was different not only in cohesive and non-cohesive soils, but also according to the type of the clay mineral. The use of 10% bentonite clay mixed with sand reduced scour more than 90%, as compared to the sandy soil. On the other hand, using 15% of kaolin in the similar conditions reduced scour depth by only a 34%, in comparison to the sandy soil.

Keywords: Local scour, Bridge group pier, Cohesive soils, Bentonite, Kaolin

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mzomorod@shirazu.ac.ir