

یادداشت تحقیقاتی

بررسی آبخستگی موضعی پایه پل در خاک چسبنده

حمیده غفاری^۱، سیدمحمدعلی زمردیان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

*mzomorod@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۰/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۵/۵/۱۲]

چکیده

از دلایل اصلی تخریب پل‌ها آبخستگی موضعی اطراف پایه است که با گذشت زمان و عدم کنترل آن پایداری سازه را به مخاطره می‌اندازد. تاکنون پژوهشگران بسیاری آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل را بررسی کردند و روش‌های مناسبی را برای کنترل و کاهش آبخستگی ارائه داده‌اند که شامل روش‌های اصلاح الگوی جریان در این نواحی و همچنین روش‌های مقاوم‌سازی بستر است. در این پژوهش به بررسی آبخستگی موضعی پایه پل در خاک‌های چسبنده پرداخته شده است و استفاده از خاک چسبنده رسی از نوع رس بتونیت به صورت اختلاط با خاک بستر، به عنوان راهکاری برای مقاوم‌سازی بستر در برابر تنش‌های وارد شده و کنترل آبخستگی بررسی شده است. اهداف دنبال شده در این پژوهش شامل تعیین بهترین شرایط تراکمی (میزان رطوبت و درجه تراکم)، میزان بهینه رس استفاده شده و همچنین تأثیر مقاومت برشی بستر در میزان آبخستگی است. نتایج نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد رس بتونیت به صورت اختلاط با خاک ماسه‌ای بستر در درجه تراکم ۹۰ درصد و رطوبت بهینه تراکم، باعث کاهش آبخستگی به میزان ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که رس بتونیت تأثیر بیشتری در کاهش آبخستگی نسبت به رس کائولین دارد.

واژگان کلیدی: آبخستگی موضعی، پایه پل، خاک چسبنده، بتونیت، کائولین.

۱- مقدمه

مخروط وارونه می‌شود و همچنین روابطی را برای تخمین عمق آبخستگی ارائه دادند [3]. تینگ و همکاران، آبخستگی موضعی پایه پل را در سه خاک چسبنده بدون ماسه، آرمستون (نوعی خاک رسی)، پورسلین (با کانی کائولینیت) و بتونیت (با کانی مونت موریلونیت) و دو خاک ماسه بررسی کردند و مشاهده نمودند که در مقادیر کم عدد رینولدز، میزان آبخستگی در اطراف پایه یکسان است اما در مقادیر زیاد، آبخستگی بیشتر در پایین دست پایه و به میزان کمی در جلوی پایه رخ می‌دهد و رابطه زیر را برای تخمین آبخستگی بر اساس عدد رینولدز پایه (R) ارائه دادند [4]:

$$d_{sec} = 0.12 R^{0.682} \quad (1)$$

موضوع پایداری پل‌ها در برابر عوامل خارجی به ویژه عوامل هیدرولیکی از اهمیت به سزایی برخوردار است. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه آبخستگی پایه پل در خاک‌های دانه‌ای صورت گرفته است اما به دلیل طبیعت پیچیده رس‌ها و آسان نبودن شرایط انجام آزمایش‌ها، مطالعات اندکی در زمینه آبخستگی پایه پل در خاک چسبنده انجام گرفته است که از جمله می‌توان به نتایج [1-9] اشاره کرد. دینت و چادوری با مطالعه آبخستگی پایه پل در خاک مخلوط ماسه + رس کائولین ($Cc = 0-40\%$) مشاهده کردند که با افزایش درصد رس اندازه گودال آبخستگی کوچکتر و شبیه به یک

است و به رس بتونیت کمتر پرداخته شده است پس در این پژوهش با استفاده از رسوبات مخلوط رس بتونیت و ماسه ریز، آبهستگی موضعی پایه پل بررسی شده است و در نهایت به منظور نشان دادن اثر نوع کانی رسی مورد استفاده در خاک، آزمایشی در خاک مخلوط ماسه و رس کائولین انجام گرفته است و تأثیر همزمان نوع کانی رسی و تراکم بستر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

مطالعات در کانالی به طول ۱۸ متر، شیب طولی ۰/۰۰۱، ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر انجام گرفت. مقطع آزمایشی به طول ۲ متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر با رسوبات ماسه‌ای پر شد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفته است. پارامترهایی از قبیل سرعت جریان، عمق جریان، اندازه رسوبات بستر و قطر پایه پل در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده‌اند و در تعیین مقادیر آن‌ها از معیارهایی که توسط پژوهشگران پیشین ارائه شده، استفاده شد. به گونه‌ای که شرایط برای تشکیل بیشینه آبهستگی موضعی ناشی از پایه پل فراهم باشد. از جمله، برای از بین بردن تأثیر دیواره کانال بر میزان آبهستگی، نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه باید بزرگ‌تر از ۶/۲۵ باشد [12]، بنابراین با استفاده از پایه استوانه‌ای به قطر ۳/۵ سانتی‌متر، این نسبت برابر ۲۲/۸ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که گیریکناختی رسوبات باعث کاهش آبهستگی می‌شود بنابراین از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد که در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد ($\sigma_g < 1.3$) شرط یکنواخت بودن ذرات برقرار است [13]. برای جلوگیری از تشکیل رپیل در سطح رسوبات قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد و برای حذف تأثیر اندازه رسوبات بر آبهستگی قطر متوسط ذرات باید در شرط $D/d_{50} > 20 - 25$ صدق کند [12]. بنابراین برای مطابقت با شرایط مذکور از ماسه با $d_{50} = 0.78$ میلیمتر و $\sigma_g = 1.25$ استفاده شد. همچنین اگر عمق جریان نسبت به قطر پایه به اندازه کافی بزرگ باشد ($y/D > 3.5$) عمق جریان تأثیری بر آبهستگی موضعی اطراف پایه ندارد [14]. همچنین شرط تشکیل بیشینه عمق آبهستگی در آب زلال $V \leq 0.95V_c$ است [15]. V_c سرعت آستانه حرکت ذرات

نجف زاده با بررسی آبهستگی موضعی پایه پل در رسوبات چسبنده با ۳ میزان درصد رس (۵۲، ۴۱، ۳۴) رابطه زیر را برای تخمین عمق آبهستگی نهایی پایه پل در رسوبات چسبنده ارائه داد [7]:

$$\frac{d_{sec}}{y} = \left(\frac{C_u}{\gamma \cdot y}\right)^{-0.982} \cdot (R)^{0.718} \cdot (Fr)^{-0.722} \quad (2)$$

در این رابطه x_u مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، y عمق جریان، γ وزن مخصوص خاک، و Fr عدد فرود جریان.

لینک و همکاران [8] تأثیر تراکم را بر آبهستگی پایه پل در رسوبات چسبنده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک انرژی تراکمی ثابت، عمق آبهستگی در ابتدا با افزایش w (نسبت رطوبت موجود در خاک به رطوبت بهینه) تا $w = 2.5$ کاهش پیدا می‌کند و برای مقادیر $w > 2.5$ عمق آبهستگی افزایش می‌یابد. مولیناز و همکاران [9] به این نتیجه رسیدند که شیب گودال آبهستگی در بستر چسبنده در مقایسه با بستر غیر چسبنده، تندتر می‌باشد که با افزایش انرژی تراکم، این شیب افزایش می‌یابد. همچنین بیان نمودند که با کاهش تراکم در مخلوط چسبنده غیر اشباع، گودال آبهستگی مشابه با خاک غیر چسبنده است. عوامل اصلی که باعث پیچیدگی فرسایش در مصالح چسبنده نسبت به دانه‌ای می‌شود شامل ویژگی‌های 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 حالیکه 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 باشد [10]. همچنین در خاک‌های چسبنده نوع و درصد کانی رس موجود در خاک، تأثیر مهمی بر سازوکار و میزان آبهستگی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با توجه به نوع کانی رس موجود در خاک در شرایط یکسان، میزان فرسایش متفاوت است [11]. در آزمایش‌هایی که روی رسوبات چسبنده صورت گرفته است به دلیل آسان نبودن آزمایش‌ها در رسوبات حاوی رس بتونیت به دلیل قدرت تورم زایی بالا (پتانسیل تورمی آن‌ها برابر ۵۱/۷٪ است)، بیشتر مطالعات صورت گرفته روی رس کائولین به دلیل خواص پایدار این نوع کانی رسی متمرکز شده

در این پژوهش از رس بتونیت به صورت مخلوط با ماسه به میزان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزن خشک استفاده شد. آماده‌سازی نمونه خاک‌ها به این صورت بود که ابتدا بر اساس ابعاد آبهستگی صورت گرفته در ماسه و با احتساب ضریب اطمینان، از جعبه‌ای فلزی به ابعاد ۶۰ * ۵۰ * ۱۴ سانتی‌متر استفاده شد که در وسط رسوبات ماسه‌ای بستر قرار می‌گرفت. سپس بر اساس حجم جعبه و درجه تراکم‌های ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ و منحنی تراکم حداکثر (γ_{dmax} ، ω_{opt}) و همچنین میزان رطوبت تراکم بهینه، رطوبت بهینه ۳٪+ و رطوبت بهینه ۳٪-، نمونه خاک‌های مخلوط ماسه + رس آماده می‌شد. به این صورت که ابتدا درصد‌های ماسه، رس و آب موردنظر به صورت یکنواخت اختلاط و در کیسه‌های نایلونی به مدت حداقل ۱۶ ساعت برای یکنواخت شدن رطوبت و انجام واکنش‌های شیمیایی در رس نگهداری می‌شد. سپس خاک مخلوط به کانال انتقال و در لایه‌های مساوی متراکم شد. پس از اشیاع نگه‌داشتن خاک به مدت ۲۴ ساعت آزمایش‌های مربوط به آبهستگی آغاز شد. سیستم تأمین آب به صورت گردشی بود که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای زمان طولانی فراهم می‌کرد. ابتدا جریان آب وارد حوضچه‌ای که در ابتدای کانال قرار داشت می‌شد و اغتشاشات سطحی آن توسط توری فلزی گرفته می‌شد.

شکل ۲. نمایی از کانال آزمایش



Fig. 2. Photograph of experimental flume

عمق جریان با استفاده از یک دریچه کشویی و دبی جریان با استفاده از یک دبی‌سنج خودکار الکتریکی کنترل شد. پس از ایجاد عمق ۱۳ سانتی‌متر و دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه و اطمینان از شروع جریان یکنواخت، آزمایش‌ها به مدت ۶ ساعت آغاز می‌شد.

است. بنابراین با سعی و خطا، دبی جریان ۳۴ lit/s، عمق جریان ۱۳ cm و $V = 0.94 V_c$ به دست آمد. شرایط جریان در آزمایش‌ها در جدول (۱) آورده شده است. زمان رسیدن به تعادل در خاک‌های چسبیده بیشتر از خاک‌های دانه‌ای گزارش شده است به گونه‌ای که ممکن است در مدت زمان چند روز تنها بخش کوچکی از بیشینه عمق آبهستگی رخ دهد و در برخی موارد نیز ممکن است آبهستگی به حالت تعادل نرسد [16]. در مطالعاتی که توسط پژوهشگران پیشین روی آبهستگی پایه پل در رسوبات چسبیده صورت گرفته است مدت زمان آزمایش‌ها متفاوت است. به عنوان نمونه مدت زمان انجام آزمایش‌های دینت و چادوری [3] در محدوده ۴۸ - ۸۰ ساعت، ابوسیدا و همکاران [17] در محدوده ۵/۰ - ۴۸ ساعت، انصاری و همکاران [1] در محدوده ۶ - ۶۰ ساعت، رامبابو و همکاران [5] ۴ ساعت و نجف زاده [7] ۴ ساعت در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های موجود در انجام آزمایش‌های با مدت زمان طولانی از معیار کومار و همکاران [18] استفاده شده است و آن مدت زمانی است که تغییرات آبهستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد. بدین منظور آزمایشی بدون محدودیت زمانی در شرایط ذکر شده و در رسوبات غیر چسبیده (ماسه) انجام گرفت و با ثبت تغییرات آبهستگی نسبت به زمان، زمان تعادل ۶ ساعت به دست آمد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. منحنی تغییرات عمق آبهستگی در برابر زمان

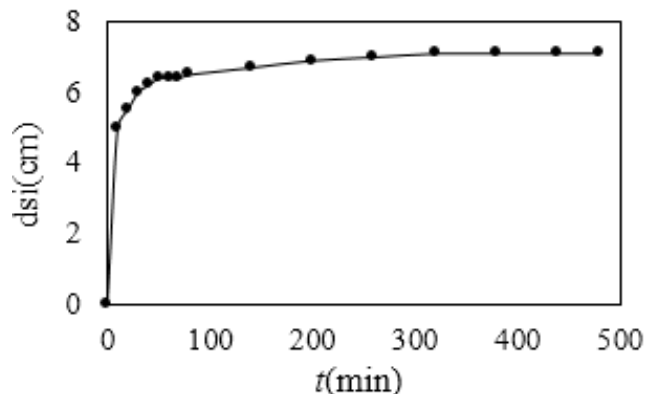


Fig. 1. Time development of scouring depth

۲-۲- روش انجام آزمایش

جدول ۱. شرایط جریان در آزمایش‌ها

d_{50} (mm)	D/d_{50}	y (m)	V_c (m/s)	y/D	V/V_c	Fr
0.78	44.87	0.13	0.35	3.7	0.94	0.292

Table 1. Properties of flow and sediment used in experiments

جدول ۲. نتایج مربوط به تست تراکم و حدود اتربرگ خاک‌های استفاده شده

Soil	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	PL (%)	LL (%)	PI (%)	LI (%)	type soil (USCS)
Sand+ (5%) bentonite	20	1.65	16	49.32	29.02	0.12	SP-SC
Sand+ (10%) bentonite	18.1	1.73	12	66	54	0.11	SP-SC
Sand+ (15%) kaoline	15.17	1.81					

Table 2. Atterberg Limits and properties of sediments used in experiments

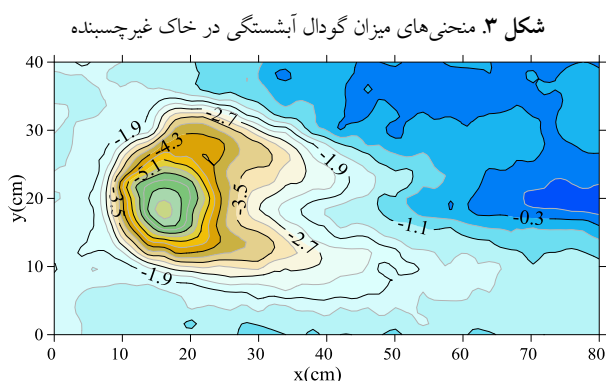


Fig. 3. Contours of scour hole for non-cohesive sediment

پس از اتمام آزمایش‌ها، با استفاده از دستگاه برش پره‌ای در چندین نقاط مقاومت برشی قرائت می‌شد و همچنین با استفاده از یک متر لیزری پروفیل گودال آبشستگی به صورت شبکه ۲×۲ سانتی‌متر و در نقاط با شیب تندتر به صورت شبکه ۱×۱ سانتی‌متر برداشت می‌شد. نمایی از کانال آزمایش در شکل (۲) آورده شده است. اندازه‌گیری‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های آزمایش، شامل حدود اتربرگ و تست تراکم به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D698-91 و ASTM D4318-10 انجام شده است که در جدول (۲) آورده شده است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- میزان آبشستگی در خاک غیرچسبنده

آزمایشی در وزن مخصوص خشک ۱/۴۶ کیلوگرم بر سانتی-مترمربع در ماسه انجام پذیرفت. مشاهده شد که آبشستگی از جلو و اطراف پایه به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع شده و مواد رسوبی به صورت پشته در پشت پایه جمع می‌شوند و به تدریج به طرف پایین دست انتقال می‌یابند. ماکزیمم عمق آبشستگی در این حالت ۷/۳ سانتی‌متر در جلوی پایه مشاهده شد. منحنی‌های میزان گودال آبشستگی در شکل (۳) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ماکزیمم عمق آبشستگی در جلوی پایه رخ داده است و در پشت پایه به دلیل تجمع رسوب در محور طولی پایه، عمق آبشستگی کمتر است. در این حالت گودال آبشستگی در پشت پایه در فاصله‌ای به طول بیشتر از ۶۰ سانتی‌متر گسترش یافته است که این فاصله در جلوی پایه به طول ۲۰ سانتی‌متر است. همچنین گودال آبشستگی در جهت عرضی کانال در فاصله‌ای به طول ۴۰ سانتی‌متر در دو طرف پایه گسترش یافته است.

۳-۲- نتایج آبشستگی با اضافه کردن ۵٪ بنتونیت به ماسه با اضافه شدن ۵٪ بنتونیت به خاک غیرچسبنده همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است با افزایش درجه تراکم از ۸۰٪ به ۹۰٪، ماکزیمم عمق آبشستگی به اندازه ۲۳٪ در رطوبت بهینه کاهش پیدا کرده است. در تراکم ۸۰٪ تغییرات ۳ درصدی رطوبت تأثیری بر ماکزیمم عمق آبشستگی شکل گرفته اطراف پایه نداشته است که ناشی از کم بودن میزان تراکم و چسبندگی و اختلاف ناچیز مقاومت برشی در هر سه رطوبت است (شکل ۵). در تراکم ۹۰٪ تغییرات ۳ درصدی رطوبت به میزان ناچیزی روی ماکزیمم عمق آبشستگی تأثیر گذاشته است به گونه‌ای که ماکزیمم عمق آبشستگی در رطوبت بهینه نسبت به دو رطوبت بیشتر و کمتر از بهینه به میزان بیشتری کاهش پیدا کرده است. همچنین میزان کاهش آبشستگی در رطوبت بیشتر از بهینه نسبت به رطوبت کمتر از بهینه بیشتر است که به دلیل بیشتر بودن مقاومت برشی در این حالت است که در شکل (۵) مشهود است. گودال آبشستگی ایجاد شده در این خاک از نظر هندسی مشابه با همان در خاک غیرچسبنده مشاهده شد که به

شکل ۷. پروفیل‌های طولی آبستگي اطراف پایه در خاک ماسه + ۰.۵٪ رس بتونیت در درجه تراکم ۹۰٪ و در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه

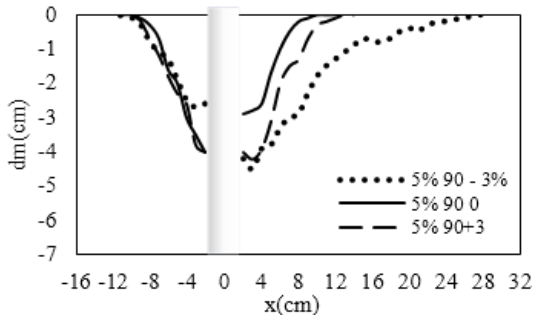


Fig. 7. Longitudinal scour profiles for sand + (5%) bentonite compacted with $Dr = 90\%$ and $Wc = w_{opt}, w_{opt} + 3\%, w_{opt} - 3\%$

در شکل‌های (۶ و ۷) به صورت شماتیک پروفیل‌های طولی آبستگي در خاک ماسه + ۰.۵٪ بتونیت در درجه تراکم ۸۰ و ۹۰ درصد و در رطوبت‌های بهینه، بهینه + ۳٪ و بهینه - ۳٪ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ایجاد درجه تراکم ۷۰٪ در این گونه خاک ممکن نشده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تراکم ۸۰ درصد گستردگی طولی آبستگي در هر سه میزان رطوبت تقریباً مشابه است اما در تراکم ۹۰ درصد، توسعه طولی آبستگي در پشت پایه در رطوبت بهینه - ۳ درصد، بیشتر به دست آمده است و در رطوبت بهینه کمترین مقدار است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درجه تراکم گستردگی طولی آبستگي کاهش یافته است. در مقایسه با خاک غیرچسبنده مشاهده می‌شود که در تراکم ۹۰ درصد در رطوبت بهینه گستردگی طولی آبستگي به میزان بیشتر از ۷۸ درصد کاهش یافته است. همچنین پروفیل‌های عرضی گودال آبستگي در این حالت در شکل‌های (۸ و ۹) آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها نشان داده شده است با افزایش تراکم توسعه عرضی گودال آبستگي در هر سه رطوبت کاهش پیدا کرده است که در هر سه میزان رطوبت تقریباً یکسان به دست آمده است. بنابراین با اضافه شدن ۵ درصد بتونیت به ماسه در درجه تراکم ۹۰ درصد و رطوبت بهینه تراکم، به میزان بیشتر از ۶۰ درصد توسعه عرضی گودال آبستگي کاهش یافته است. در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) به صورت شماتیک منحنی‌های میزان گودال آبستگي در رطوبت بهینه تراکم در دو درجه تراکم ۸۰ و ۹۰ درصد به عنوان نمونه آورده شده است.

صورت متقارن در اطراف پایه شکل می‌گیرد اما دارای عمق، حجم و گستردگی به نسبت کمتری نسبت به خاک غیرچسبنده است که کمترین حجم گودال آبستگي در میزان رطوبت بهینه + ۳ درصد و بیشترین حجم گودال در میزان رطوبت بهینه - ۳ درصد به دست آمده است. همچنین مشابه با خاک غیرچسبنده در این گونه خاک نیز ماکزیمم عمق آبستگي در جلوی پایه ایجاد شده است.

شکل ۴. تغییرات آبستگي نسبت به تراکم و رطوبت در ماسه + ۰.۵٪ بتونیت

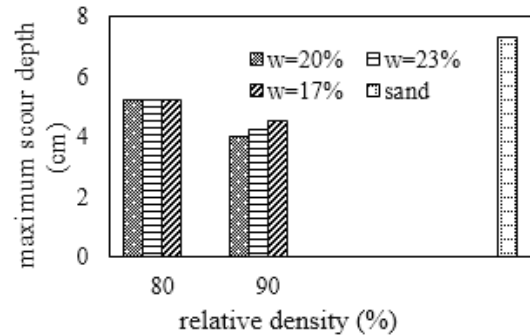


Fig. 4. Variation of maximum scour depth versus relative density and water content for sand + (5%) bentonite

شکل ۵. تغییرات مقاومت برشی به درصد تراکم و رطوبت (ماسه + ۰.۵٪ بتونیت)

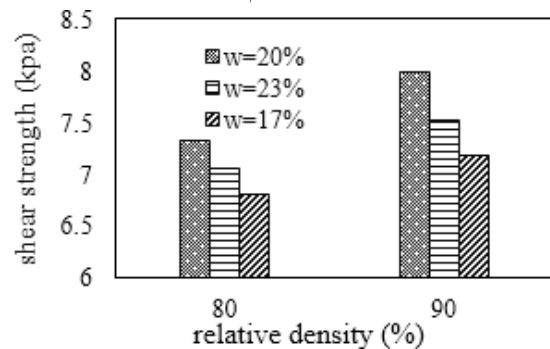


Fig. 5. Variation of shear strength versus relative density and water content for sand + (5%) bentonite

شکل ۶. پروفیل‌های طولی آبستگي اطراف پایه در خاک ماسه + ۰.۵٪ رس

بتونیت در درجه تراکم ۸۰٪ و در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه

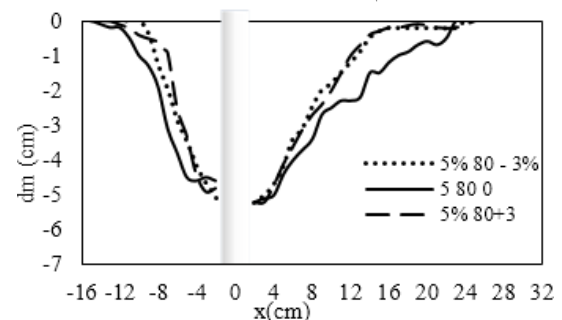


Fig. 6. Longitudinal scour profiles for sand + (5%) bentonite compacted with $Dr = 80\%$ and $Wc = w_{opt}, w_{opt} + 3\%, w_{opt} - 3\%$

۳-۳- میزان آبهستگی در ماسه + ۱۰٪ رس بتونیت

با اضافه شدن ۱۰٪ رس بتونیت به خاک غیرچسبنده گودال آبهستگی ایجاد شده در اطراف پایه نسبت به خاک غیرچسبنده دارای شکل و هندسه منظم و متقارن نیست که ناشی از متفاوت بودن سازوکار آبهستگی در این دو گونه خاک است به گونه‌ای که در خاک غیرچسبنده آبهستگی به صورت جدا شدن انفرادی ذرات از بستر است که این در خاک چسبنده به صورت جدا شدن توده-هایی از خاک است که باعث عدم تقارن و یکسان بودن گودال آبهستگی در اطراف پایه می‌شود البته عدم تراکم یکنواخت خاک بستر در اطراف پایه، این مسئله را تشدید می‌کند که می‌تواند باعث ایجاد خطا در آزمایش‌ها شود. بنابراین در این گونه خاک ماکزیمم عمق آبهستگی در مکان ثابتی نسبت به پایه رخ نمی‌دهد. اما بیشتر ماکزیمم عمق آبهستگی در جلوی پایه مشاهده شده است. در این گونه خاک نیز با افزایش درجه تراکم میزان آبهستگی کاهش پیدا کرده است (شکل ۱۲)، که ناشی از بیشتر شدن چسبندگی و مقاومت برشی ناشی از آن است که باعث می‌شود فرسایش‌پذیری خاک در برابر قدرت فرساینده‌گری گردابه‌ها و تنش برشی حاصل از آن‌ها، کاهش یابد به گونه‌ای که در تراکم ۹۰٪ در رطوبت بهینه و بیشتر از بهینه، مقاومت برشی خاک بیشتر از قدرت گردابه‌ها شده است که این باعث شده که در این میزان تراکم، مقدار آبهستگی به صفر برسد. همچنین با مقایسه میزان مقاومت خاک در ۲ رطوبت بیشتر از بهینه و کمتر از بهینه، مشاهده می‌شود که مقاومت برشی خاک در رطوبت بیشتر از بهینه مقدار بیشتری دارد (شکل ۱۳). بنابراین آبهستگی در این حالت نسبت به رطوبت کمتر از بهینه، کمتر اتفاق افتاده است اما با این حال مقادیر به هم نزدیک است به گونه‌ای که در تراکم ۹۰٪، در رطوبت بیشتر از بهینه آبهستگی به صفر رسیده است اما در رطوبت کمتر از بهینه، شاهد آبهستگی به اندازه ۵ میلی‌متر هستیم. لازم به ذکر است که این نتیجه در مدت زمان ۲۴ ساعت نیز بررسی شد و مشاهده شد که با گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت از شروع آزمایش هیچ گونه آبهستگی در درجه تراکم ۹۰٪ و رطوبت بهینه ایجاد نمی‌شود.

شکل ۸. پروفیل‌های عرضی آبهستگی اطراف پایه در خاک ماسه + ۵٪ رس

بتونیت در درجه تراکم ۸۰٪ و در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه

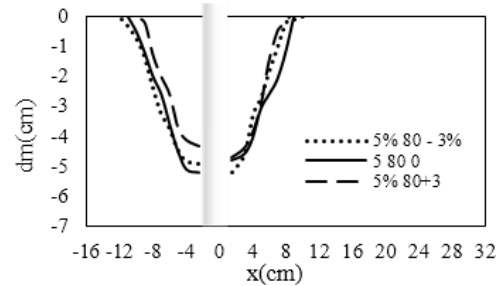


Fig. 8. Transverse scour profiles for sand + (5%) bentonite compacted with $Dr = 80\%$ and $Wc = W_{opt}, W_{opt} + 3\%, W_{opt} - 3\%$

شکل ۹. پروفیل‌های عرضی آبهستگی اطراف پایه در خاک ماسه + ۵٪ رس

بتونیت در درجه تراکم ۹۰٪ و در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه

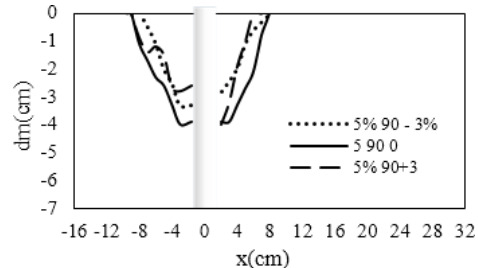


Fig. 9. Transverse scour profiles for sand + (5%) bentonite compacted with $Dr = 90\%$ and $Wc = W_{opt}, W_{opt} + 3\%, W_{opt} - 3\%$

شکل ۱۰. منحنی‌های میزان گودال آبهستگی اطراف پایه در خاک ماسه + ۵٪ رس

بتونیت در درجه تراکم ۸۰٪ و رطوبت بهینه

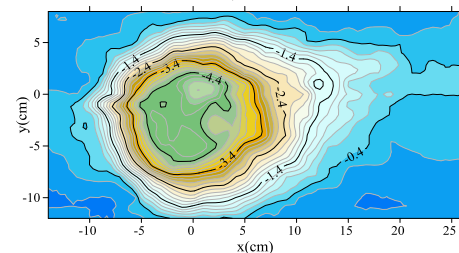


Fig. 10. Contour of scour hole for sand + (5%) bentonite, $Dr=80\%$, $Wc=W_{opt}$

شکل ۱۱. منحنی‌های میزان گودال آبهستگی اطراف پایه در خاک ماسه + ۵٪ رس

بتونیت در درجه تراکم ۹۰٪ و رطوبت بهینه

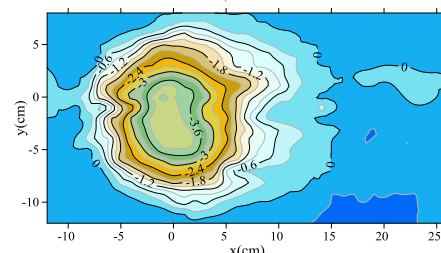


Fig. 11. Contour of scour hole for sand + (5%) bentonite, $Dr=90\%$, $Wc=W_{opt}$

در شکل‌های (۱۴ و ۱۵ الف و ب) به ترتیب پروفیل‌های طولی و عرضی گودال آبستنگی در خاک مخلوط ماسه + ۱۰٪ بنتونیت در تراکم‌های ۷۰ و ۸۰ درصد و در رطوبت‌های بهینه، (بهینه + ۳٪ و بهینه - ۳٪) آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود میزان توسعه طولی گودال آبستنگی در هر دو درجه تراکم ۷۰ و ۸۰ درصد مشابه است. در هر دو درجه تراکم در رطوبت کمتر از بهینه، میزان گستردگی طولی آبستنگی نسبت به دو میزان دیگر به میزان بیشتری ایجاد شده است که این در هر دو میزان رطوبت بهینه و ۳ درصد بیشتر از بهینه تقریباً یکسان به دست آمده است. همچنین همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود توسعه عرضی گودال آبستنگی در این حالت در هر دو درجه تراکم ۷۰ و ۸۰ درصد در کلیه رطوبت‌ها تقریباً یکسان به دست آمده است. با این حال کمترین حجم گودال آبستنگی ایجاد شده در اطراف پایه در تراکم با میزان رطوبت بهینه + ۳٪ نتیجه شده است. در شکل (۱۶) الف و ب) منحنی‌های میزان گودال آبستنگی شکل گرفته اطراف پایه در دو درجه تراکم ۷۰ و ۸۰ درصد در میزان رطوبت بهینه به عنوان نمونه آورده شده است.

شکل ۱۵. پروفیل‌های عرضی آبستنگی پایه در خاک ماسه + ۱۰٪ بنتونیت در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه، الف) تراکم ۷۰٪، ب) تراکم ۸۰٪

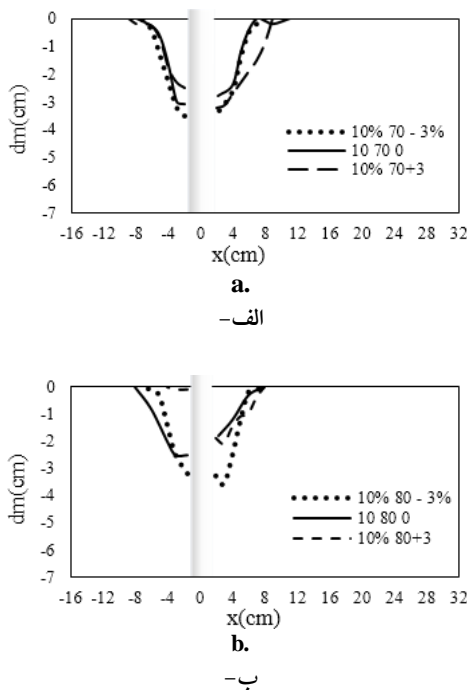


Fig. 15. Transverse scour profiles for sand + (10%) bentonite compacted with $W_c = w_{opt}, w_{opt} + 3\%, w_{opt} - 3\%$, a) $Dr = 70\%$ b) $Dr = 80\%$

شکل ۱۲. تغییرات آبستنگی نسبت به تراکم و رطوبت در ماسه + ۱۰٪ بنتونیت

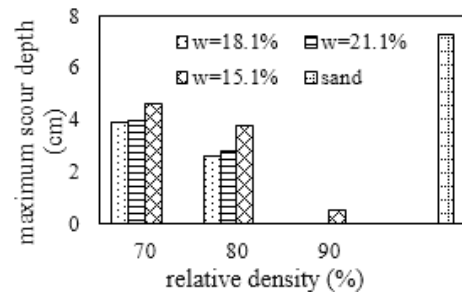


Fig. 12. Variation of maximum scour depth versus relative density and water content for sand + (10%) bentonite

شکل ۱۳. تغییرات مقاومت برشی نسبت به درصد تراکم و میزان رطوبت در خاک مخلوط ماسه + ۱۰٪ بنتونیت

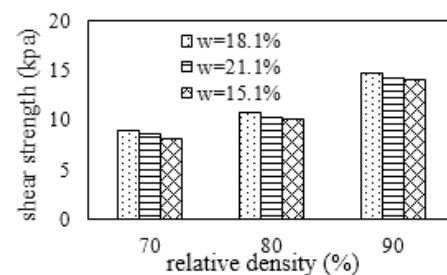


Fig. 13. Variation of shear strength versus relative density and water content for sand + (10%) bentonite

شکل ۱۴. پروفیل‌های طولی آبستنگی پایه در خاک ماسه + ۱۰٪ رس بنتونیت در رطوبت بهینه، بیشتر و کمتر از بهینه، الف) تراکم ۷۰٪، ب) تراکم ۸۰٪

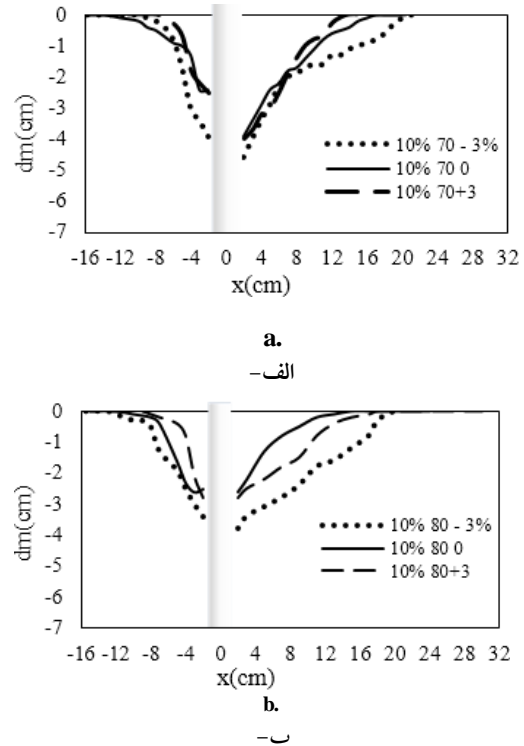


Fig. 14. Longitudinal scour profiles for sand + (10%) bentonite compacted with $W_c = w_{opt}, w_{opt} + 3\%, w_{opt} - 3\%$, a) $Dr = 70\%$ b) $Dr = 80\%$

تأثیر نوع کانی رسی بر میزان آبهستگی، از ۱۵٪ رس کائولین به صورت مخلوط با ماسه و با درجه تراکم ۹۰٪ در رطوبت بهینه استفاده شد. نتایج حاکی از کاهش ۳۴ درصدی عمق آبهستگی نسبت به خاک غیرچسبنده است. کم بودن چسبندگی و مقاومت برشی در این خاک (۴/۵۱ کیلوپاسکال) دلیلی بر توجیه آن است. مشابه با خاک غیرچسبنده در این گونه خاک، روند آبهستگی به صورت جدا شدن انفرادی ذرات ماسه و رس از بستر مشاهده شد. بنابراین پروفیل گودال آبهستگی به صورت متقارن نسبت به پایه شکل گرفته است. پروفیل‌های طولی و عرضی گودال آبهستگی در این حالت در شکل‌های (۱۷ و ۱۸) نشان داده شده است. در مقایسه با خاک غیرچسبنده مشاهده شد که اضافه شدن ۱۵٪ رس کائولین باعث کاهش طول آبهستگی به میزان ۶۲ درصد می‌شود که این در حالت عرضی برابر با ۵۰ درصد است. منحنی‌های میزان گودال آبهستگی در این گونه خاک در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

شکل ۱۶. منحنی‌های میزان آبهستگی اطراف پایه در خاک ماسه + ۱۰٪ رس بتونیت در رطوبت بهینه. الف- درجه تراکم ۸۰، ب- درجه تراکم ۹۰

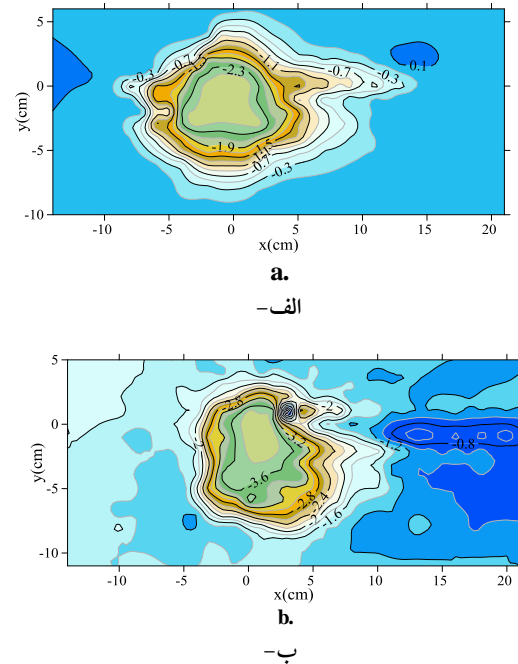


Fig. 16. Contour of scour hole for sand + (10%) bentonite, $W_c = W_{opt}$, a) $Dr=80\%$, b) $Dr=90\%$

شکل ۱۹. منحنی‌های میزان آبهستگی پایه در خاک ماسه + ۱۵٪ رس کائولین

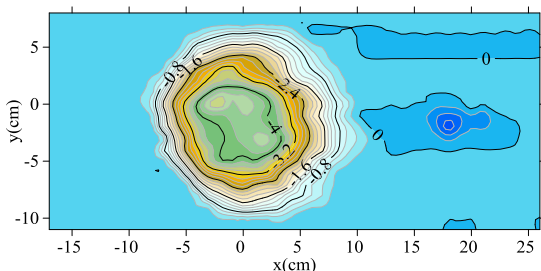


Fig. 19. Contour of scour hole for sand + (15%) kaoline, $Dr=90\%$, $W_c = W_{opt}$

شکل ۱۷. پروفیل طولی آبهستگی پایه در خاک ماسه + ۱۵٪ رس کائولین

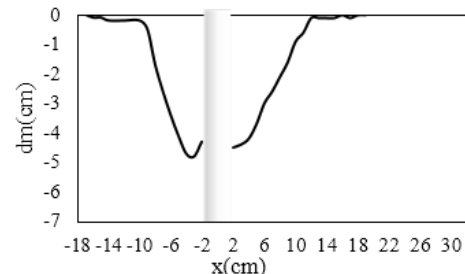


Fig. 17. Longitudinal scour profile for sand + (15%) kaolin compacted with $Dr = 90\%$ and $W_c = w_{opt}$

شکل ۱۸. پروفیل عرضی آبهستگی پایه در خاک ماسه + ۱۵٪ رس کائولین

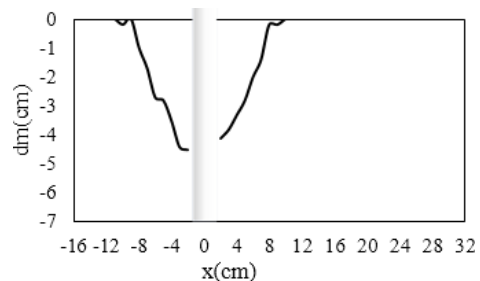


Fig. 18. Transverse scour profile for sand + (15%) kaolin compacted with $Dr = 90\%$ and $W_c = w_{opt}$

۴- بررسی روابط موجود در تخمین آبهستگی

بسیاری از روابطی که بر اساس آبهستگی موضعی پایه پل در خاک‌های دانه‌ای موجود است برای تخمین عمق آبهستگی کلیه خاک‌ها تعمیم داده شده است و این در حالی است که سازوکار فرسایش در خاک‌های چسبنده با توجه به نوع کانی رس موجود، با خاک‌های دانه‌ای متفاوت، و سرعت فرسایش در این دو گونه خاک متفاوت است. همچنین تعداد محدودی از روابط بر اساس آبهستگی موضعی در خاک‌های چسبنده توسط پژوهشگران ارائه شده است که در این روابط غالباً نوع کانی رسی و تراکم بستر در نظر گرفته نشده است. بنابراین همان‌گونه که در جدول (۳) نشان داده شده است نتایج متفاوتی از عمق آبهستگی به دست آمده است

۳-۴- میزان آبهستگی در ماسه + ۱۵٪ رس کائولین

با اضافه شدن ۱۵٪ بتونیت به ماسه در کلیه تراکم‌ها هیچ‌گونه آبهستگی مشاهده نشده است بنابراین به منظور بررسی و مشاهده

که با نتایج حاصل از این پژوهش متفاوت می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف با پژوهش حاضر

Researcher	Equation	maximum scour depth (cm)
Briaud et al. [19]	$d_{sec}(mm) = 0.18R^{0.625}$	6.23
Khassaf [6]	$\frac{d_{sec}}{y} = 2.6 Fr^{0.4}$	158.9
Ting et al. [4]	$d_{sec} = 0.12 R^{0.682}$	7.08
Rambabo et al. [20]	$(d_{sec}/D) = K[(U_*/U_{*cr}) + (-0.474)]$	3.225
Debnath and Chauduri [3]	$d_{sec} = 2.05 Fr_p^{1.72} C^{-1.29} \hat{t}_s^{-0.37}$	236.83
Najafzadeh [7]	$\frac{d_{sec}}{y} = \left(\frac{C_u}{\gamma \cdot y}\right)^{-0.982} \cdot (R)^{0.718} \cdot (Fr)^{-0.722}$	7800

Table 3. Comparison of the present study with the calculated ones by other researcher equation

می‌شود که رطوبت‌های تراکم بیشتر از این مقادیر، تأثیر قابل‌توجهی بر میزان آبستگي داشته باشد.

۳- مقاومت برشی رسوبات بستر متراکم شده در رطوبت بهینه، بیشتر از مقاومت برشی رسوبات متراکم شده در رطوبت‌های کمتر و بیشتر از بهینه به دست آمد، بنابراین میزان آبستگي صورت گرفته در رطوبت تراکم بهینه، کمتر از میزان آبستگي در رطوبت‌های بیشتر و کمتر از بهینه به میزان ۳٪ می‌باشد.

۴- نوع کانی رس در خاک چسبنده تأثیر زیادی بر میزان آبستگي پایه پل نشان داد به گونه‌ای که با اضافه کردن ۱۵ درصد رس کائولین به خاک ماسه‌ای در شرایط بهینه، میزان آبستگي به میزان ۳۴ درصد نسبت به خاک غیرچسبنده کاهش پیدا کرده است و این در حالی است که با اضافه شدن ۱۰٪ رس بتونیت در شرایط مشابه، میزان آبستگي به میزان ۱۰۰٪ نسبت به خاک غیرچسبنده کاهش پیدا کرده است.

۶- واژگان لاتین

ρ	چگالی جریان
σ_g	انحراف معیار ذرات خاک
γ	وزن مخصوص خاک
\hat{t}_s	مقاومت برشی بستر به صورت بی‌بعد
C_c	درصد رس در خاک
C_u	مقاومت برشی زهکشی نشده خاک
D	قطر پایه
\hat{d}_{sec}	عمق تعادل آبستگي به صورت بی‌بعد
d_{si}	عمق آبستگي نسبت به زمان
Dr	تراکم نسبی
d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر

در جدول (۳) تعدادی از روابط که بر اساس آبستگي در خاک‌های چسبنده توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج متفاوت و غیر قابل اعتمادی از ماکزیمم عمق آبستگي ارائه داده‌اند. ماکزیمم عمق آبستگي که در پژوهش حاضر مشاهده شد در محدوده ۰-۵/۲ سانتی‌متر به دست آمد که حاکی از غیرواقعی بودن نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران به صورت کلی است. از بین روابط ارائه شده، رابطه رامبابو و همکاران و سپس بریود و همکاران به نتایج حاصل از این پژوهش نزدیکتر است.

۵- نتیجه‌گیری

۱- در این پژوهش از رس بتونیت به صورت مخلوط با ماسه استفاده شد و مشاهده شد که با افزایش درجه تراکم و میزان رس، آبستگي کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در میزان رس بتونیت ۱۰٪ و درجه تراکم ۹۰٪ در رطوبت بهینه و ۳٪ بیشتر از بهینه، آبستگي رسوبات بستر به صفر می‌رسد و با اضافه شدن ۱۵٪ رس بتونیت به ماسه در کلیه درجه تراکم‌ها هیچ گونه آبستگي ایجاد نمی‌شود. کمترین حجم گودال آبستگي در تراکم با میزان رطوبت بهینه + ۳٪ به دست آمد و بیشترین توسعه عرضی و طولی گودال آبستگي در تراکم با میزان رطوبت بهینه - ۳٪ به دست آمد.

۲- میزان آبستگي در رطوبت‌های جهت تر منحنی تراکم، کمتر از جهت خشک منحنی تراکم به دست آمد اما مقادیر اندازه‌گیری شده به هم نزدیک است که حاکی از تأثیر ناچیز تغییرات ۳ درصدی رطوبت تراکم نسبت به رطوبت بهینه بر میزان حداکثر عمق آبستگي می‌باشد. به گونه‌ای که در میزان ۵٪ رس بتونیت، رطوبت تراکم تأثیر ناچیزی بر میزان آبستگي داشته است. پیش‌بینی

soils on equilibrium scour depth. *Tikrit Journal of Engineering Science*, 14(2), 73-85.

[7] Najafzadeh M. 2009 *Experimental and numerical study of local scour around a vertical pier in cohesive soils*. MS Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. (In Persian)

[8] Link O., Klischies K., Montalva G. & Dey S. 2013 Effects of Bed Compaction on Scour at Piers in Sand-Clay Mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1013-1019.

[9] Molinas A., Jones S. & Hosny M. 1999 Effects of cohesive material properties on local scour around piers. *Journal of the Transportation Research Board*, 1690, 164-174.

[10] Najafzadeh M., Barani Gh.A. & Kermani M.R. 2013 GMDH based back propagation algorithm to predict abutment scour in cohesive soils. *Journal of Ocean Engineering*, 59, 100-106.

[11] Wan C. & R Fell. 2004 Investigation of Rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotec ring*, 30(4).

[12] Raudkivi A.J. & Ettema R. 1983 Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.

[13] Shafaei - Bejestan M. 2011 *Hydraulic of sediment transport* (2th ed). Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran. (In Persian)

[14] Chiew Y.M. & Mellville B.W. 1987 Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.

[15] Raudkivi A.J. 1998 *Loose Boundary Hydraulics*. A. A. Balkema. Rotterdam, The Netherland.

[16] Partheniades E. 2007 *Engineering Properties and Hydraulic Behavior of Cohesive Sediments*. CRC Press, Taylor and Francis Group, p.338.

[17] Abou-seida M.M., Elsaheed G.H., Mostafa T.M. & Elzahry E.F.M. 2012 Local scour at bridge abutments in cohesive soil. *Journal of Hydraulic Research, iFirst*, 50(2), 171-180.

[18] Kumar V., Rang Raju K.G. & Vittal N. 1999 Redaction of local scour around bridge pier using slots and collar. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE 125(2), 132-135.

[19] Briaud J.L., Ting F.C.K., Chen H.C., Gudavalli R., Perugu S. & Wei G. 1999 SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (4), 237-246.

[20] Rambabu M., Narasimha. Rao S. & Sundar V. 2003 Current- induced Scour around a Vertical pile in cohesive soil. *Journal of Ocean Engineering*, 30(7), 893-920.

Fr	عدد فرود جریان
Fr_p	عدد فرود پایه
G	شتاب ثقل
LI	نشانه مایع خاک
PI	شاخص خمیری خاک
LL	حد روانی خاک
PL	حد خمیری خاک
R	عدد رینولدز پایه
T	زمان
V	سرعت متوسط جریان
V_c	سرعت بحرانی
W	درصد رطوبت اولیه خاک
Y	عمق جریان در بالادست پایه
w_{opt}	رطوبت بهینه خاک
U_*	سرعت برشی

References

۷- مراجع

[1] Ansari S.A., Kothiyari U.C. & Ranga Raju K.G. 2002 Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 717-729.

[2] Briaud J.L., Ting F.C.K., Chen H.C., Gudavalli R., Perugu S. & Wei G. 1999 SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (4), 237-246.

[3] Debnath K. & Chauduri s. 2010 Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds. *Engineering Geology*, 111(1-4), 51-61.

[4] Ting F.C.K., Briaud J.L., Chen H.C., Gudavalli R., Perugu S. & Wei G. 2001 Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (11), 969-978.

[5] Rambabu M., Narasimha. Rao S. & Sundar V. 2002 A simplified instrumentation for measuring scour in silty clay around a vertical pile. *Journal of Applied Ocean Research*, 24(6), 355-360.

[6] Khassaf S.I. 2007 Effect of cohesive and noncohesive

Assessment of Local Scour at Bridge Piers in Cohesive Soils

H. Ghaffari¹, S. M. A. Zomorodian^{2*}

1- M.Sc. Student Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran.

2- Associate Professor of water engineering, Shiraz University, Iran. (Corresponding Author)

*mzomorod@shirazu.ac.ir

Abstract

The main reasons of bridge failure are local scour around the piers. In fact, they will be appeared as a scour hole in the river bed. Moreover, lack of control during the time, local scouring will threaten stability of structure. Therefore, determining of depth and dimension of the scour hole, also finding effective factors on scouring are important. Lots of researchers have studied the local scour around the bridge piers. Actually, they have proposed lots of appropriate techniques to control and to reduce scour around piers and bridge abutments. These proposed approaches are divided into two methods which are altering the flow and bed-armoring. In this research, the local scour around the bridge piers in a cohesive soils have studied. Particularly, the cohesive soils in form of mixture of Bentonite (montmorillonitic clay from 0 to 15%) and bed sediment (fine sand) used. In fact, this approach is a solution to challenge bed-armoring against existence shear stress. As a result, the proposed method will be used for controlling the scour. The experiments were carried out at the Hydraulic Laboratory of the Water Engineering Department, at Shiraz University, Iran. The laboratory flume was a rectangular cross section with 18 m length, 1.2 m wide and 0.4 m deep. According to channel geometry, the discharge and the depth of flow were determined to be $0.034 \text{ m}^3/\text{s}$ and 13 cm, respectively. In all experiments, the discharge and flow depth were constant. This study focused on the best compaction conditions, optimum clay content and the bed shear strength. The undrained shear strength of the soil was measured using an in situ miniature van shear apparatus. The best compaction conditions including optimum moisture and compaction energy. From standard Proctor test, the optimum initial water content W_{opt} and the optimum dry density ρ_{dopt} was determined. The compaction was expressed as the ratio of dry density ρ_d to maximum dry density ρ_{dopt} of the mixture. Therefore three relative compaction equal to 70%, 80% and 90% used. Also, three water content optimum initial water content, optimum initial water content – 3% and optimum initial water content + 3% are used. The results indicate that for smaller clay content (5%) the shape of the scour hole was similar to that in sand sediment and is regular and symmetrical. For clay content equal to 10%, scour hole is geometrically much irregular compared to that observed in sand bed and it is observed that a steeper slope of the scour hole in sediment mixture. The slope became steeper with an increase in relative compaction. In fact, the higher relative compaction and the higher clay content increases shear strength and decreases the maximum scour depth. The samples compacted at optimum water content creates a structure with the most resistant to scour. The erodibility of samples compacted dry of optimum water content is less than samples compacted on the wet side of optimum. The results showed that under conditions which the amount of Bentonite equals at least 10% of dry weight in the mixture (Bentonite and sand sediment), relative compaction equal to 90% and water content equals to optimum moisture simultaneously, the local scour reduces by 100% in single pier. In addition, the influence of the compaction and type of clay mineral was investigated. The results show that Bentonite was more effective than Kaolin. If the 15% of dry weight Kaolin clay mixed with bed sand sediment to be used and relative compaction equal to 90% and water content equals to optimum moisture, simultaneously, the maximum scour hole was reduced only by 34%.

Key word: Local scour, Bridge pier, Incohesive soils, Bentonite, Kaolin.