

بررسی تأثیر افزودن آهک بر پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک رس - ژئوسنتیک

نازنین محبوبی مطلق^۱ و احمدرضا محبوبی اردکانی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۱

چکیده

روش‌های گوناگونی برای اصلاح مشخصات فنی خاک‌های مسئله‌دار وجود دارد. از جمله تکنیک‌های بهسازی خاک‌ها می‌توان به تثبیت با آهک و تسلیح با المان‌هایی با مقاومت کششی بالا اشاره کرد. تثبیت با آهک سبب انجام واکنش‌هایی می‌شود که منجر به بهبود خواص اولیه خاک رس می‌شوند. امروزه استفاده از ژئوسنتیک‌ها برای بهبود ویژگی‌های مهندسی انواع مختلف خاک‌ها به خوبی پذیرفته شده است. اکثر مطالعات محدود به خاک‌های درشت‌دانه بوده و تحقیقات و مطالعات اندکی در خصوص امکان پذیری استفاده از مسلح‌کننده‌ها در خاک‌های چسبنده انجام یافته است. با توجه به اثرات مثبت افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه و تسلیح این خاک‌ها توسط ژئوسنتیک، اثرات توأم این روش‌ها احتمالاً بتواند کاربردهای خاک‌های ریزدانه را گسترده‌تر کند. در این پژوهش خاک‌های رسی با درصدهای مختلف آهک (۰، ۲، ۴، ۶) تثبیت و با ژئوسنتیک (ژئوتکستایل و ژئوگرید) مسلح شده و پس از ۱ و ۷ روز عمل‌آوری تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. برای حصول پارامترهای فصل مشترک خاک - ژئوسنتیک و بازده مسلح‌سازی، آزمایش‌ها در دو گروه نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید و بدون اعضای متقاطع عرضی آن و همچنین مسلح شده با ژئوتکستایل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تثبیت با آهک، مقاومت برشی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و با افزایش زمان عمل‌آوری بر این مقاومت افزوده می‌شود. مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده در مقایسه با نمونه‌های غیر مسلح بیشتر بوده و در یک تنش قائم یکسان، مقاومت نمونه‌های رس - ژئوگرید بیش از رس - ژئوتکستایل است. در زمان عمل‌آوری یکسان، بیشترین مقاومت برشی و بازده مسلح‌سازی در نمونه‌های مسلح و تثبیت شده با ۴٪ آهک به دست آمده و این مقاومت و بازده با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: پارامترهای مقاومت برشی، خاک رس، آهک، ژئوسنتیک، آزمایش برش مستقیم.

E-mail: nazaninmahbobimotlagh@gmail.com

*نویسنده مسئول: نازنین محبوبی مطلق

۱- پیش‌نوشتار

۱-۱. تثبیت خاک ریزدانه با آهک

بهسازی و بهبود خواص مکانیکی خاک با استفاده از مواد و مصالحی که موجب تقویت مشخصه‌های آن شود؛ از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. بسیاری از محققین دریافتند که رفتار مقاومتی خاک‌ها به‌طور گسترده‌ای پس از اصلاح با آهک بهبود می‌یابد (Locat et al., 1990).

زمانی که آهک به خاک مرطوب اضافه می‌شود؛ دو دسته واکنش رخ می‌دهد: (۱) واکنش کوتاه‌مدت و (۲) واکنش بلندمدت. واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی، لخته شدن (Flocculate) و کربناسیون و واکنش‌های بلندمدت شامل واکنش‌های پوزولانی و مقاومتی است. تبادل کاتیونی بین یون کلسیم آهک و کاتیون‌های مختلف جمع شده در سطح خاک اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن ذرات رس به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند که این روند را لخته شدن می‌نامند. دسته دوم واکنش‌ها یعنی واکنش‌های بلندمدت (پوزولانی)، موجب بالا رفتن مقاومت خاک‌های رسی می‌شوند (اسکندری و هدهدی، ۱۳۹۳).

مقاومت برشی ایجاد شده در ساختار رس‌ها بیشتر به دلیل وجود چسبندگی در بین ذرات رس بوده و این در حالی است که عامل به وجود آورنده مقاومت برشی در ساختار خاک‌های درشت‌دانه، اصطکاک بین ذرات است؛ بنابراین هر عاملی که باعث تغییر در ساختار ذرات رسی شود؛ می‌تواند باعث تغییر در پارامترهای مقاومت برشی شود که به دلیل تغییراتی که در ساختار کانی‌های خاک رس به دلیل اضافه نمودن آهک به وجود می‌آید؛ می‌توان انتظار داشت که در پارامترهای مقاومت برشی تغییر محسوسی اتفاق بیفتد. محققین با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی روی خاک رس تثبیت شده با آهک نشان دادند. در صورتی که آهک مورد نیاز و زمان عمل‌آوری کافی فراهم شود؛ مقاومت برشی می‌تواند افزایش یابد؛ حتی اگر درصد رطوبت خاک بالاتر از حد روانی خاک رس باشد (تائبی و همکاران، ۱۳۹۴).

افزودن آهک تا یک درصد معین باعث کاهش پتانسیل تورم، حد روانی، شاخص

خمیری و وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش میزان رطوبت بهینه، حد انقباض و مقاومت می‌شود (Croft, 1996).

لازم به ذکر است که تثبیت خاک با آهک باعث افزایش تردی مخلوط می‌شود که برای رفع این مشکل باید تدابیری اندیشید.

۱-۲. تسلیح خاک با ژئوسنتیک

در سال‌های اخیر استفاده از محصولات ژئوسنتیک به عنوان عنصری مؤثر در بسیاری از زمینه‌ها مانند حمل و نقل، ژئوتکنیک، محیط زیست و هیدرولیک رو به افزایش است. استفاده از ژئوسنتیک‌ها به عنوان عناصر تسلیح در خاک، محیط مرکبی ایجاد می‌کند که در آن خاک، تنش‌های فشاری را تحمل می‌کند و عناصر تسلیح نیز وظیفه تحمل تنش‌های کششی را دارند و درگیری عناصر تسلیح با خاک موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری مجموعه می‌شود. مکانیزم عمل انتقال تنش مبنی بر اندرکنش بین خاک و المان تسلیح است. بر این اساس یکی از مسائل مهم و اساسی در تحلیل و طراحی سازه‌های خاک مسلح، تعیین پارامترهای اصطکاک اندرکنش خاک - ژئوسنتیک است.

بسیاری از محققین برای مطالعه پارامترهای اندرکنش خاک - ژئوسنتیک از آزمایش برش مستقیم استفاده کردند (Lee and Manjunath., 2000; Bergado et al., 1995; Abu-Farsakh et al., 2007; El Sawwaf, 2007; Coronel, 2006).

مکانیزم فصل مشترک خاک - ژئوسنتیک به خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها (چگالی، شکل و اندازه دانه‌ها، توزیع دانه‌ها و درصد رطوبت) و خواص مکانیکی ژئوسنتیک‌ها (مقاومت کششی، شکل و هندسه ژئوسنتیک‌ها) بستگی دارد (Lopes, 2002).

اندرکنش بین خاک و مسلح‌کننده‌های شبکه‌ای (ژئوگرید) خیلی پیچیده‌تر از مسلح‌کننده نواری یا صفحه‌ای (ژئوتکستایل) است. در مکانیزم برش مستقیم،

پارامتری به نام ضریب اندرکنش (Interaction coefficient) به صورت رابطه ۲ برای خاک‌های چسبنده تعریف شده است (Cowell and Sprague, 1993). این پارامتر در سایر مراجع، با نام‌های ضریب اتصال (Bond coefficient) یا بازده مسلح‌سازی (Reinforcement efficiency) نیز بیان شده است:

$$C_i = (C_a + \sigma_n \tan \delta) / (C + \sigma_n \tan \phi) \quad (2)$$

که در آن C_i ضریب اندرکنش، C_a چسبندگی فصل مشترک خاک-ژئوستنتیک، σ_n تنش نرمال در صفحه برش، δ زاویه اصطکاک فصل مشترک خاک-ژئوستنتیک، C چسبندگی خاک و Φ زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

ضریب اندرکنش بیش از واحد بیانگر چسبندگی کارآمد بین خاک و ژئوستنتیک و مقاومت برشی فصل مشترک خاک-مسلح کننده بیشتر از مقاومت برشی خاک است. همچنین ضریب اندرکنش کمتر از ۰/۵ چسبندگی ضعیف بین خاک و ژئوستنتیک یا شکست در لایه ژئوستنتیک را نشان می‌دهد (Tatlisoz et al., 1998).

به منظور بهبود رفتار شکننده خاک‌های تثبیت شده با آهک و افزایش شکل‌پذیری، در تحقیق حاضر تثبیت با آهک و تسلیح با ژئوستنتیک (ژئوتکتایل و ژئوگرید) به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مصالح

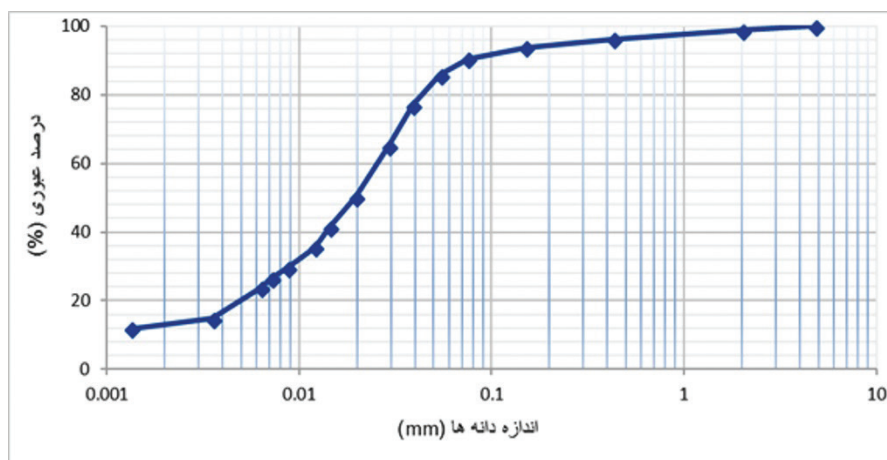
برای انجام آزمایش‌ها از خاک رسی منطقه جنوب تهران استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن که بر اساس استانداردهای ASTM مربوطه تعیین شده، در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

مقاومت برشی کل ناشی از مقاومت برشی سطح تماس مسلح کننده و خاک در صفحه مسلح کننده و مقاومت برشی خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید است. همچنین اعضای متقاطع عرضی تا حدودی تأثیرگذار بوده و مقداری مقاومت باربری (Bearing resistance) تولید می‌کند (Farrag and Griffin, 1993). در همین راستا Liu et al. (2009) رابطه ۱ را بیان کردند که نشان می‌دهد مقاومت برشی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم ترکیبی از مقاومت برشی خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید، مقاومت اصطکاکی فصل مشترک خاک-ژئوگرید و مقاومت باربری ایجاد شده توسط نوارهای عرضی است (Liu et al., 2009).

$$F_{DST} = (A_T - A_{LG} - A_{TG})\tau_{soil} + (A_{LG} + A_{TG})\tau_{s-g} + F_B \quad (1)$$

که در آن F_{DST} مقاومت برشی کل در آزمایش برش مستقیم، A_T مساحت کل جعبه برش، A_{LG} مساحت اعضای طولی ژئوگرید، A_{TG} مساحت اعضای عرضی ژئوگرید، τ_{soil} مقاومت برشی خاک، τ_{s-g} مقاومت برشی در سطح تماس ژئوگرید با خاک و F_B مقاومت باربری ایجاد شده توسط نوارهای عرضی است. آنها با انجام آزمایش برش روی انواع مختلف خاک‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت باربری ایجاد شده توسط المان‌های متقاطع عرضی ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های 7×7 میلی‌متر برای خاک‌های ریزدانه بیش از درشت‌دانه است.

برای تعیین سهم مقاومت باربری ناشی از اعضای متقاطع عرضی ژئوگرید در مقاومت برش مستقیم کل برای خاک ماسه‌ای، یک سری آزمایش با اعضا متقاطع عرضی و یک سری دیگر با حذف اعضا متقاطع عرضی انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، لازم است در طراحی سازه‌های خاک مسلح، سهم اعضای متقاطع عرضی نیز منظور شود (عبدی و ارجمند، ۱۳۹۰).



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک.

جدول ۱- مشخصات خاک.

مقدار	استاندارد مربوطه	مشخصات
۲۸/۳	ASTM D-4318	حد روانی (%)
۱۷	ASTM D-4318	حد خمیری (%)
۱۱/۳	ASTM D-4318	دامنه خمیری (%)
۲/۵۸۶۲	ASTM D-854	G_s
۱۸/۳	ASTM D-698	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
۱۵/۳	ASTM D-698	درصد رطوبت بهینه (%)
۲۷/۵	ASTM D-3080	چسبندگی (kPa)*
۲۴/۸	ASTM D-3080	زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)*
CL	ASTM D-2487	طبقه خاک

در جدول ۲ و ۳ بیان شده است. آهک مورد استفاده از شرکت پترو کیمیای آکام تهیه شده که مشخصات اجزای تشکیل دهنده آن در جدول ۴ مطابق اعلام شرکت آمده است.

لازم به ذکر است که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به کمک آزمایش برش مستقیم به دست آمده است. خصوصیات ژئوگریدهای و ژئوتکستایل های مورد استفاده به منظور تسلیح خاک

جدول ۲- مشخصات ژئوگریدها.

نوع ژئوگرید	اندازه چشمه ها (mm)	مقاومت کششی (kN/m)	ازیاد طول در مقاومت کششی مشخصه (%)
دو محوره	۴×۴	۱۰	۱۱
دو محوره	۱۰×۱۰	۶	۱۱

جدول ۳- مشخصات ژئوتکستایل ها.

نوع ژئوتکستایل	جنس الیاف	جرم واحد سطح (g/m ²)	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (kN/m)	حداکثر کشش طولی (%)
نیافته	پلی استر	۲۰۰	۱/۵	۵/۵	۵۵
نیافته	پلی استر	۴۰۰	۳	۱۲	۵۵

جدول ۴- مشخصات آهک.

عنصر	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O
درصد وزنی	۷۲/۸	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۴۵	-	۲/۲	۲۲/۴

۳- روش آزمایش

در این پژوهش ۳ گروه نمونه به شرح زیر تهیه و آزمایش شده است:

۱) نمونه های تثبیت شده با ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و عمل آوری شده به مدت ۱ و ۷ روز؛ ۲) نمونه های تسلیح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید؛ ۳) نمونه های تثبیت شده با ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و مسلح شده با ژئوسنتتیک (ژئوتکستایل و ژئوگرید در دو گروه با و بدون المان های متقاطع عرضی آن) برای زمان های عمل آوری فوق الذکر.

۴- آزمایش ها

۴-۱. تراکم

قبل از اقدام به انجام آزمایش های برش مستقیم، با انجام آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D-698، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر برای مخلوط خاک با درصد های مختلف آهک به دست آمد. نتایج آزمایش در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش تراکم استاندارد.

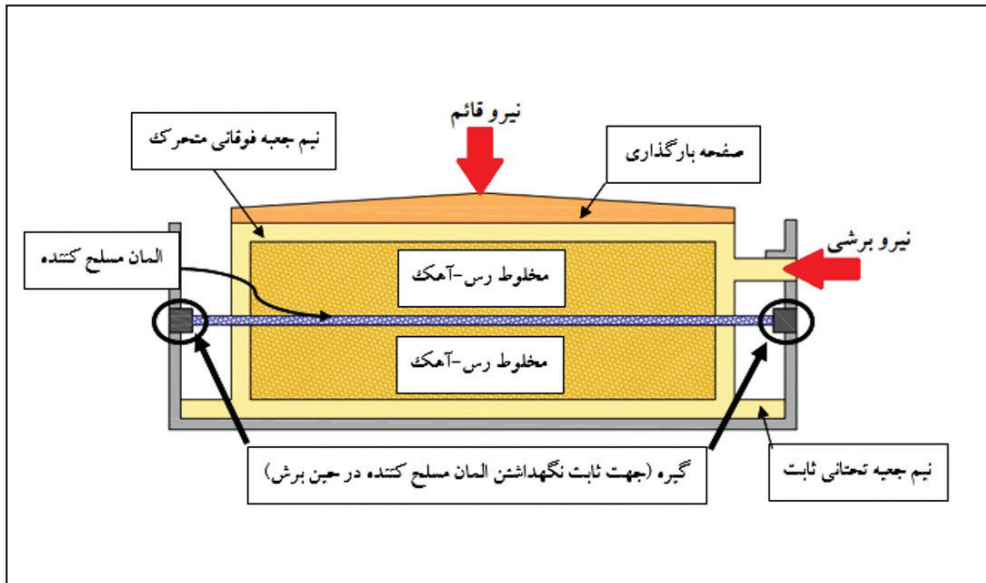
ترکیب	درصد رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m ³)
خاک رس	۱۵/۳	۱/۸۳
خاک رس + ۲% آهک	۱۸	۱/۷۶
خاک رس + ۴% آهک	۱۸/۵	۱/۷۴
خاک رس + ۶% آهک	۱۹	۱/۷۲

۴-۲. آزمایش برش مستقیم

به منظور بررسی اندرکنش خاک- ژئوسنتتیک از آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D-5321 استفاده شده است.

ابتدا مقدار مورد نیاز خاک رس و آهک به ازای حجم جعبه برش توزین و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفت. پس از این مدت، خاک رس خشک با آهک (در درصد های ۰، ۲، ۴ و ۶) با رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد (متناظر با هر ترکیب خاک- آهک) به خوبی مخلوط شد. نیمی از مخلوط در نیم جعبه تختانی برش ریخته و تا رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر خود تراکم

شد. سپس المان مسلح کننده (ژئوتکستایل یا ژئوگرید) در مرز مشترک بخش های تختانی و فوقانی جعبه قرار گرفت. در نهایت نیم جعبه فوقانی نیز مانند نیم جعبه تختانی با نصف دیگر مخلوط خاک- آهک متراکم شد (شکل ۲). سپس نمونه های تهیه شده از قالب خارج شد و جهت حفظ رطوبت در زمان های عمل آوری ۱ و ۷ روز در کیسه پلاستیکی قرار گرفت. پس از سپری شدن زمان های مذکور برای نمونه ها، آزمایش برش مستقیم با سرعت ۱ mm/min و بار عمودی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ kPa انجام شد.



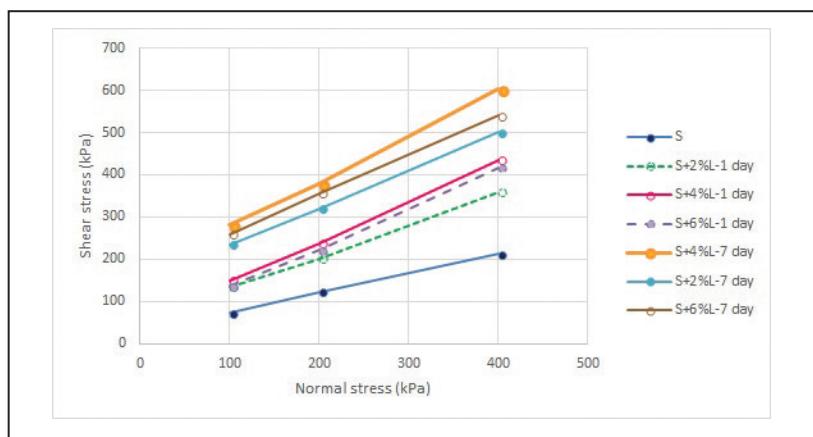
شکل ۲- نحوه قرارگیری نمونه‌های مسلح شده در دستگاه برش مستقیم.

۵- نتایج

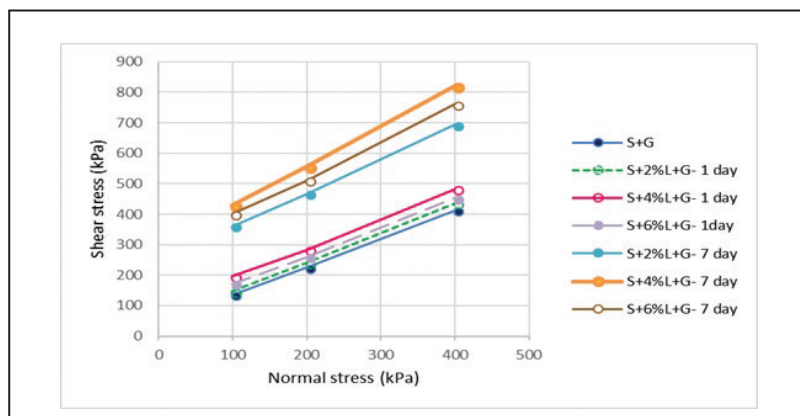
۵-۱. نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید

در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه در شرایط غیر مسلح، مسلح شده با ژئوگرید با و بدون المان‌های متقاطع عرضی برای ژئوگریدهای با ابعاد چشمه‌های ۴×۴ و ۱۰×۱۰ میلی‌متر در شکل‌های ۳ تا ۷ نشان داده شده است.

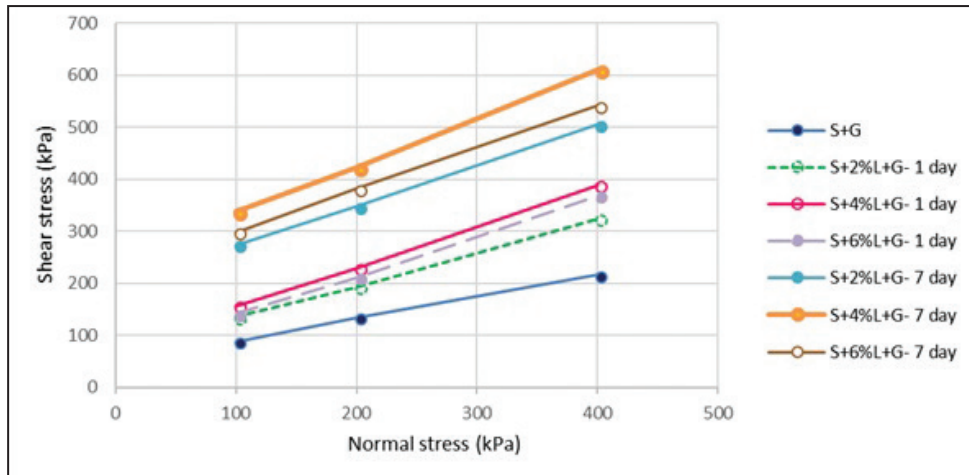
نمودارهای پوش گسیختگی مربوط به خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک



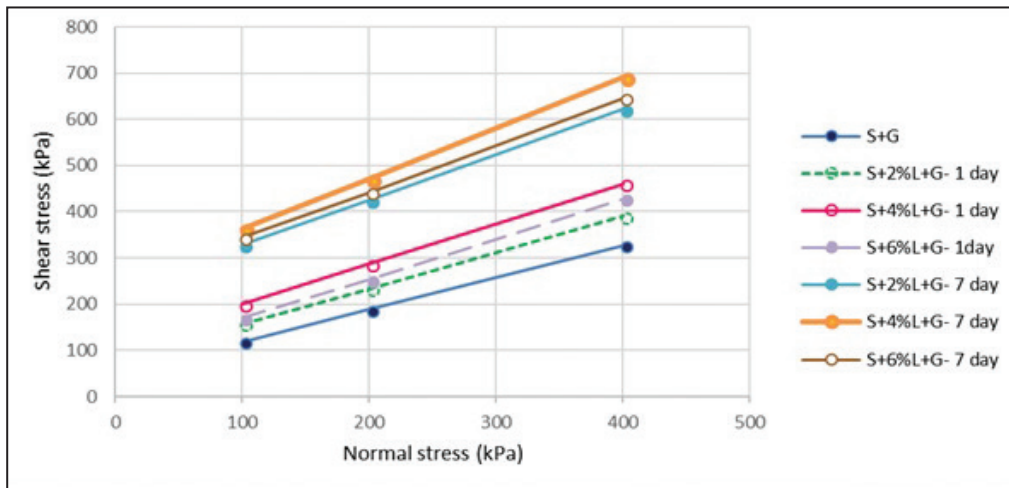
شکل ۳- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل‌آوری و غیر مسلح.



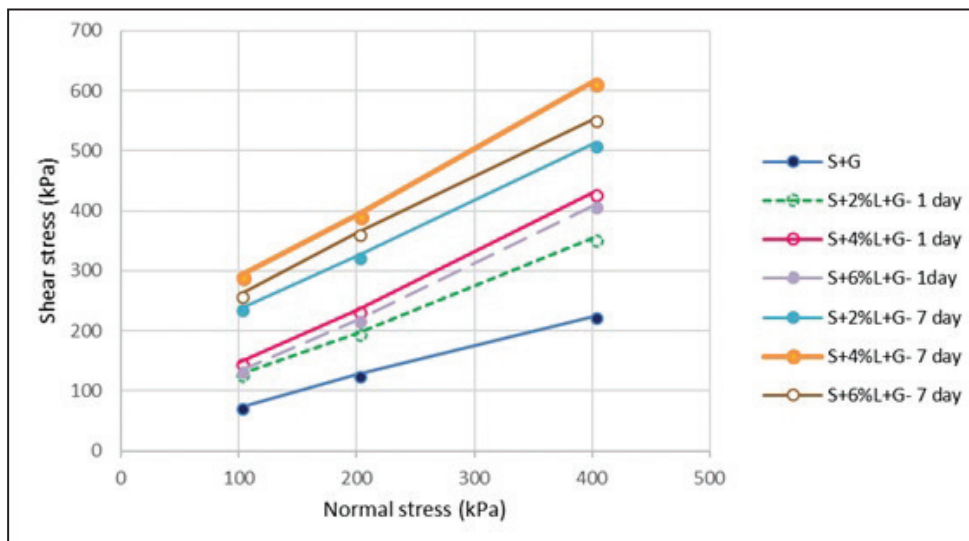
شکل ۴- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل‌آوری و مسلح شده با ژئوگرید ۴×۴ میلی‌متر.



شکل ۵- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل آوری و مسلح شده با ژئوگرید ۴×۴ میلی متر بدون المان‌های متقاطع عرضی.



شکل ۶- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل آوری و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی متر.

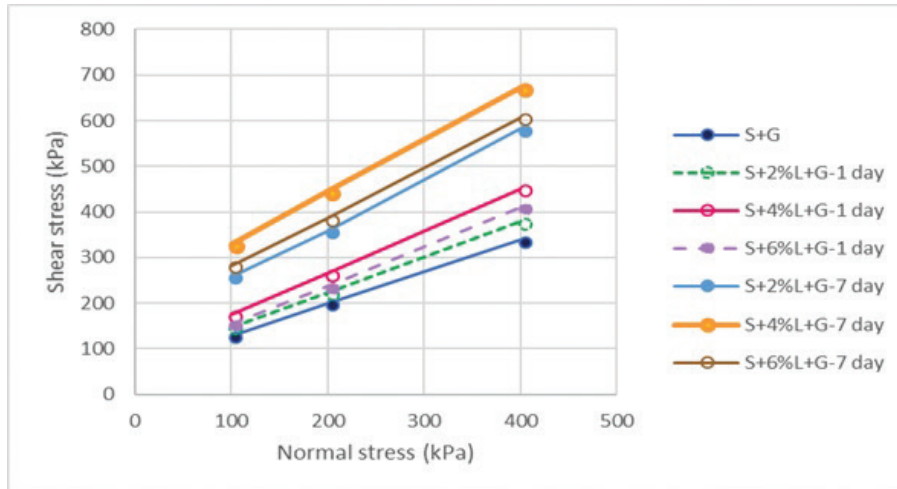


شکل ۷- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل آوری و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی متر بدون المان‌های متقاطع عرضی

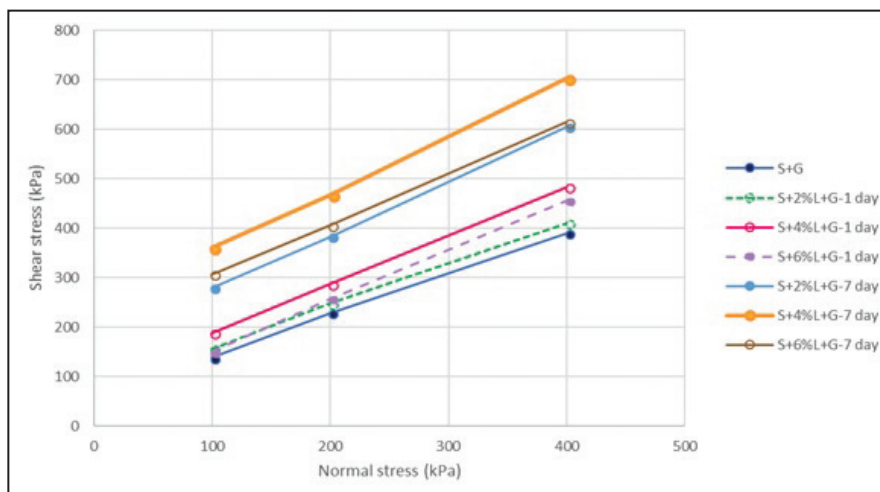
۵-۲. نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل

در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه و مسلح شده با ژئوتکستایل‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ گرمی در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است.

نمونه‌های پوش گسیختگی مربوط به خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک



شکل ۸- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل‌آوری و مسلح شده با ژئوتکستایل ۲۰۰ گرمی.



شکل ۹- پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک با ۱ و ۷ روز عمل‌آوری و مسلح شده با ژئوتکستایل ۴۰۰ گرمی.

۶- تفسیر نتایج
۶-۱. تأثیر آهک

آلومینات کلسیم هیدراته (CSH و CAH) را تشکیل می‌دهد که موجب سیمانته شدن و افزایش مقاومت می‌شود. این واکنش‌ها تابع زمان است و تا هنگامی که سیلیکات و آلومینات کلسیم هیدراته موجود باشند؛ ادامه می‌یابد. در نتیجه این واکنش‌ها، تولید ترکیبات سیمانی گسترش می‌یابد و موجب افزایش مقاومت مخلوط خاک- آهک می‌شود. مقاومت کوتاه‌مدت خاک تثبیت شده با آهک ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی و مقاومت بلندمدت ناشی از واکنش‌های پوزولانی است. با افزودن آهک به خاک تا حد درصد بهینه، حداکثر تغییرات در کانی‌های رسی به دلیل انجام واکنش‌های سیماناسیون و پوزولانی ایجاد می‌شود و همین موضوع باعث افزایش زاویه اصطکاک و به تبع آن افزایش مقاومت برشی می‌شود. کاهش مقاومت در اثر افزودن آهک به خاک بیش از درصد وزنی بهینه به یکی از دلایل زیر ممکن است رخ دهد: (۱) متوقف شدن واکنش پوزولانی به علت اتمام واکنش دهنده‌ها در طول واکنش؛ (۲) به سختی منتشر شدن محلول آب و آهک در بافت سیمانته شده خاک.

با توجه به نمودارهای فوق نتیجه می‌شود که حداکثر مقاومت برشی در نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ آهک به دست آمده و این موضوع بیانگر این مطلب است که درصد بهینه این نوع آهک برای تثبیت خاک مورد آزمایش، ۴ درصد وزنی خاک خشک است. در پژوهش‌های قبلی نیز به درصد آهک بهینه اشاره شده است (تائبی و همکاران، ۱۳۹۴) بنابراین یک درصد وزنی بهینه از آهک وجود دارد که در آن مقاومت برشی بیشینه می‌شود؛ به طوری که در صورت افزودن آهک به خاک بیش از درصد وزنی بهینه، به دلیل اشباع شدن مخلوط از آهک، نه تنها افزایش مقاومت به همراه ندارد بلکه منجر به کاهش مقاومت نیز خواهد شد. علت این پدیده را باید در سازوکار واکنش آهک با ذرات خاک رسی بررسی کرد. بدین صورت که آهک پس از اضافه شدن به خاک مرطوب به یون‌های کلسیم و هیدروکسید تجزیه می‌شود. یون‌های سیلیسیم و آلومینیم حاصل از حل شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌های رس با یون هیدروکسید و کلسیم آهک ترکیب می‌شود و سیلیکات و

برشی بیشتری را تحت تنش‌های قائم مشابه از خود نشان می‌دهد. همچنین رس مسلح شده با ژئوگرید نسبت به رس مسلح شده با ژئوتکستایل مقاومت برشی بیشتری دارد؛ زیرا تسلیح با ژئوگرید حرکت دانه‌های خاک را محدود می‌کند که باعث افزایش مقاومت اصطکاکی بسیج شده در نقاط تماس دانه‌ها و بنابراین افزایش مقاومت مجموعه خاک مسلح می‌شود؛ این وظیفه را ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های کوچک‌تر (ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های ۴×۴ میلی‌متر) بهتر انجام می‌دهد. تحلیل بیان شده در نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۷ روز مشهودتر است.

۶-۴. ارزیابی پارامترهای فصل مشترک خاک تثبیت شده-ژئوسنتتیک

همان‌طور که قبلاً ذکر شد؛ در مکانیزم برش مستقیم، مقاومت برشی کل خاک مسلح شده با ژئوگرید از مقاومت خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید، مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک و مسلح کننده و مقاومت باربری توسعه یافته در بین المان‌های عرضی حاصل می‌شود. تفاضل بین مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با و بدون المان‌های متقاطع عرضی، میزان سهم این اعضا در مقاومت برشی کل را مشخص می‌کند. با توجه به رابطه ۱ و نمودارهای فوق، مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک تثبیت شده-ژئوگرید برای زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز محاسبه و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است.

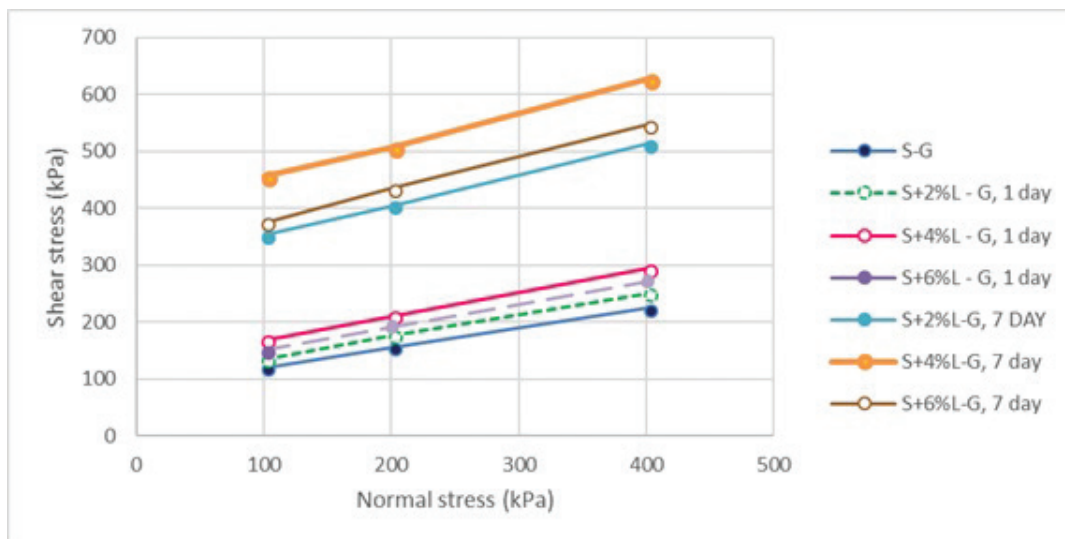
۶-۲. تأثیر زمان عمل‌آوری

اکثر مقاومت کسب شده در نمونه‌های رسی تثبیت شده با آهک ناشی از ایجاد و گسترش پیوندهای بین ذره‌های ناشی از واکنش پوزولانی است که تابعی از میزان آهک، سیلیکا و آلومینای موجود در ترکیب و زمان عمل‌آوری است. واکنش‌های پوزولانی باعث تغییر در بافت کریستالی خاک رس می‌شود و در نتیجه تغییرات عمده‌ای در خواص فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک به وجود می‌آورد. این واکنش در طول زمان انجام می‌شود؛ بنابراین مقاومت کسب شده با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

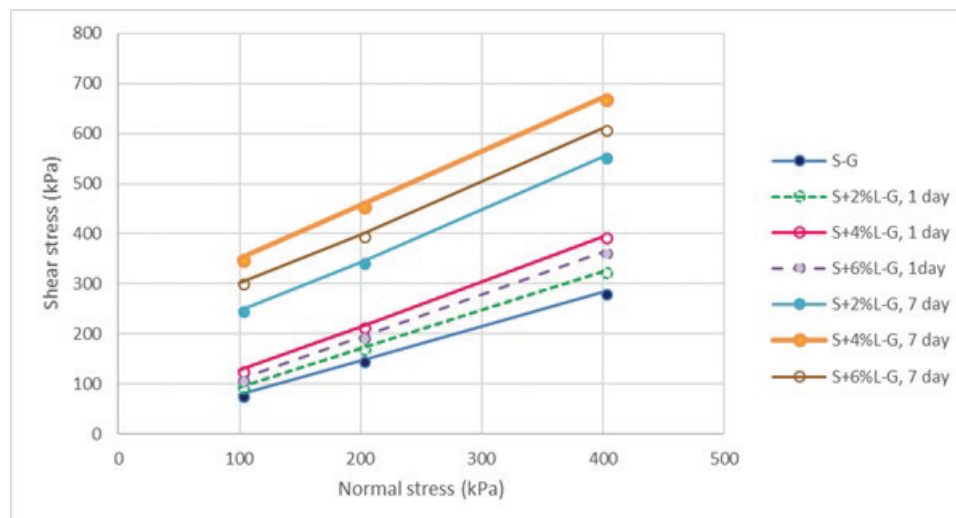
۶-۳. تأثیر عامل تسلیح

به کارگیری مسلح کننده‌ها باعث افزایش نیروی مقاوم در توده خاک به دلیل فراهم شدن نیروی کششی ناشی از مسلح کننده می‌شود. بدین صورت که تنش‌های فشاری اعمال شده بر محیط مرکب خاک مسلح با ایجاد تغییرشکل در المان‌های تسلیح سبب بسیج تنش‌های برشی در فصل مشترک خاک و المان می‌شود. عکس‌العمل این تنش‌ها موجب ایجاد تنش‌های کششی در المان می‌شود. این پدیده باعث افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری سیستم می‌شود.

نمونه‌های رس-ژئوتکستایل و ژئوگرید در مقایسه با نمونه‌های رس، مقاومت



شکل ۱۰- مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ و ۷ روز و ژئوگرید ۴×۴ میلی‌متر.



شکل ۱۱- مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ و ۷ روز و ژئوگرید

۱۰×۱۰ میلی‌متر.

پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه- ژئوتکستایل ۲۰۰ و ۴۰۰ گرمی به ترتیب در جدول‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

چسبندگی فصل مشترک خاک تثبیت شده با آهک در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت و مسلح شده با ژئوسنتتیک با افزایش درصد آهک تا ۴٪ که به عنوان درصد بهینه در این پژوهش گزارش شده است؛ افزایش می‌یابد و پس از آن روند کاهشی دارد. در مورد زاویه اصطکاک فصل مشترک نیز باید گفت که به علت تغییرات ساختاری که در اثر واکنش‌های خاک- آهک در ذرات رسی ایجاد می‌شود؛ با افزودن آهک تا ۴٪، زاویه اصطکاک افزایش و پس از آن به میزان اندکی کاهش می‌یابد که این میزان در اکثر موارد قابل اغماض است. فقط در یک مورد، تحلیل بیان شده نقص می‌شود که ممکن است به علت خطای دستگاه یا خطای انسانی در حین انجام آزمایش باشد.

از جداول نتیجه می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری، پارامترهای فصل مشترک (چسبندگی و زاویه اصطکاک) برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

به عنوان مثال، محاسبات برای خاک تثبیت شده با ۴٪ آهک در زمان عمل‌آوری ۱ روزه و مسلح شده با ژئوگرید ۴×۴ میلی‌متر در تنش قائم 4 kg/cm^2 انجام می‌شود. با توجه به رابطه ۱ و شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به صورت زیر عمل می‌شود:

$$F_{DST} = (A_T - A_{LG} - A_{TG})\tau_{soil} + (A_{LG} + A_{TG})\tau_{s-g} + F_B$$

$$F_B = \tau_B * (n.W.d) = (482 - 287) \times (0.4 \times 0.06 \times 0.023) = (95 \text{ kPa}) \times (0.02 \text{ m}^2) = 0.19 \text{ kN}$$

که در آن، n تعداد نوارهای متقاطع عرضی در سطح برش، W عرض نوار و ضخامت نوار است.

$$482 \times 0.06 \times 0.06 = (2/77 \times 3 - 10 \times 436) + (1/19 \times 3 - 10 \times \tau_{s-g}) + (0.19 \times \tau_{s-g} = 290 \text{ kPa}$$

با انجام محاسبات مشابه برای سایر تنش‌های قائم (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، می‌توان چسبندگی و زاویه اصطکاک فصل مشترک خاک- ژئوگرید را به دست آورد. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه- ژئوگرید ۴×۴ و ۱۰×۱۰ میلی‌متر به ترتیب در جدول‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ آورده شده است.

جدول ۶- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ روز و ژئوگرید ۴×۴ میلی‌متر.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۱۹	۸۶/۶
۲	۲۱	۹۷/۹
۴	۲۲/۶	۱۲۶/۸
۶	۲۲	۱۱۰/۷

جدول ۷- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز و ژئوگرید ۴×۴ میلی‌متر.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۲	۲۸/۱	۲۹۹
۴	۲۹/۸	۳۹۶/۳
۶	۲۹/۶	۳۱۹/۵

جدول ۸- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ روز و ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۳۴/۳	۱۰
۲	۳۷/۶	۱۷/۳
۴	۴۱/۷	۳۷/۳
۶	۴۰/۴	۲۳/۳

جدول ۹- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز و ژئوتکستایل 10×10 میلی‌متر.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۲	۴۵/۸	۱۴۱/۶
۴	۴۷	۲۴۲/۵
۶	۴۶	۱۹۵/۲

جدول ۱۰- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ روز و ژئوتکستایل ۲۰۰ گرمی.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۳۴/۸	۶۰
۲	۳۷/۵	۷۰/۵
۴	۴۲/۵	۸۲/۵
۶	۴۰/۵	۶۸

جدول ۱۱- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز و ژئوتکستایل ۲۰۰ گرمی.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۲	۴۷/۳	۱۴۷
۴	۴۸/۸	۲۱۶/۵
۶	۴۸	۱۷۲

جدول ۱۲- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۱ روز و ژئوتکستایل ۴۰۰ گرمی.

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۳۹/۹	۵۷/۵
۲	۴۰/۱	۷۵
۴	۴۴/۵	۹۰
۶	۴۵/۴	۵۱

جدول ۱۳- پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک در زمان عمل آوری ۷ روز و ژئوتکستایل ۴۰۰ گرمی.

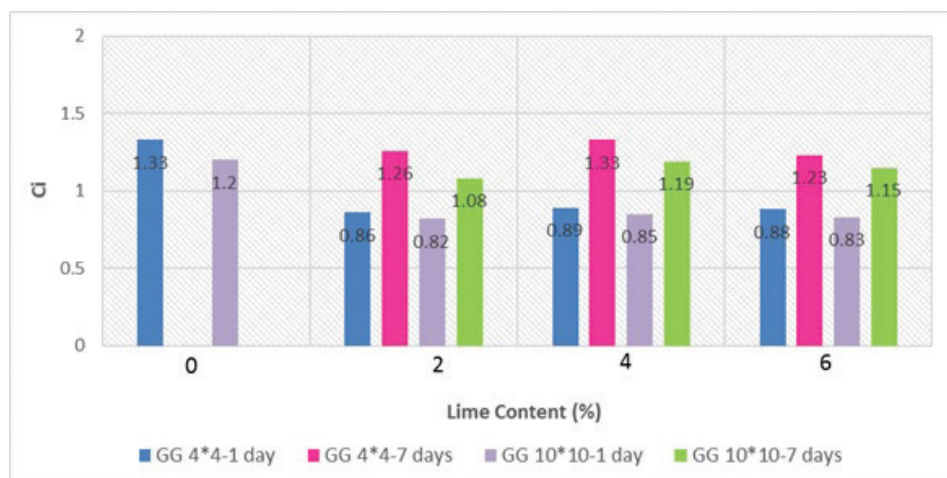
درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۲	۲۱	۹۷/۹
۴	۲۲/۶	۱۲۶/۸
۶	۲۲	۱۱۰/۷

۵-۶. پارامتر Ci

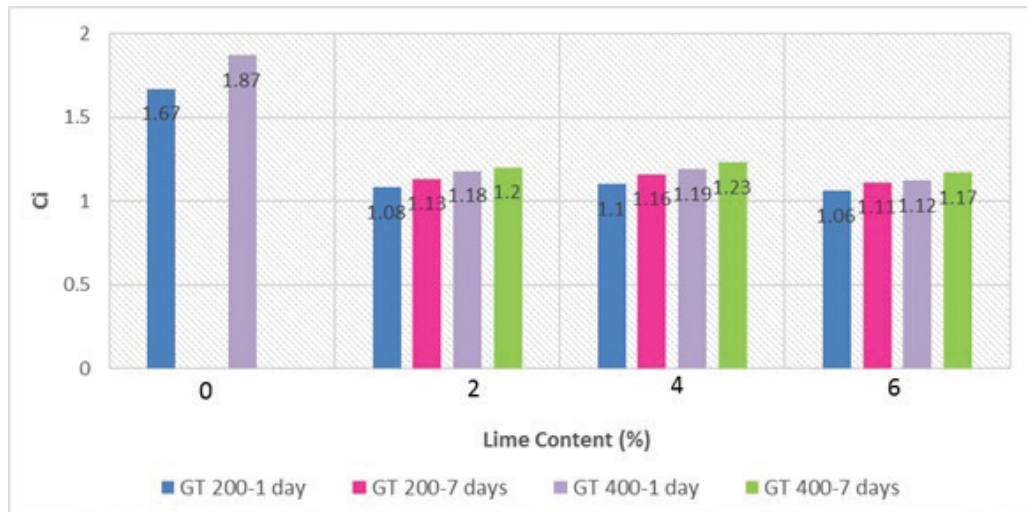
پارامتر Ci نشان‌دهنده بازده فصل مشترک یا بازده مسلح‌سازی است که به کمک رابطه ۲ (نسبت مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک- ژئوسنتتیک به مقاومت برشی خاک) و نمودارهای فوق تعیین شده و برای همه نمونه‌های مسلح شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

نمونه‌های تثبیت شده در مقایسه با تثبیت نشده‌ها بازده کمتری دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که اگر چه تثبیت خاک رسی با آهک تا درصد بهینه آن (۴٪) باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود؛ ولی به علت تغییرات ساختاری که در ذرات رس در اثر افزودن آهک اتفاق می‌افتد؛ قفل و بست دانه‌ها در بین چشمه‌های ژئوگریدها و الیاف ژئوتکستایل‌ها کمتر و در نهایت اندرکنش ایجاد شده بین مخلوط خاک- آهک و ژئوسنتتیک ضعیف می‌شود. در مقایسه بین نمونه‌های تثبیت شده در زمان عمل آوری یکسان، نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ آهک (درصد آهک بهینه که حداکثر مقاومت برشی را ایجاد می‌کند) دارای بیشترین بازده است. قابل ذکر است که با افزایش زمان عمل آوری این بازده افزایش پیدا می‌کند و اتصال قوی‌تری بین خاک و ژئوسنتتیک ایجاد می‌شود.

از شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که تمامی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌هایی به ابعاد ۴×۴ میلی‌متر (تثبیت شده و نشده) قفل و بست بهتری را ایجاد می‌کند و اندرکنش قوی‌تری نسبت به ژئوگرید با چشمه‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر دارد؛ این موضوع در نمونه‌های تثبیت شده با آهک در ۷ روز عمل آوری به وضوح نمایان است. خاک مسلح، رفتار برتر خود را ناشی از انتقال تنش از خاک به مسلح کننده در سطح تماس کسب می‌کند؛ بنابراین بروز چنین رفتاری به یک اندرکنش مناسب در سطح تماس خاک- مسلح کننده نیاز دارد که این نیاز برای خاک مورد آزمایش با ژئوگرید با چشمه‌های ۴×۴ میلی‌متر مرتفع شده و کارایی مجموعه خاک مسلح افزایش یافته است. از آنجایی که به کارگیری مسلح کننده‌ها باعث افزایش نیروی مقاوم در توده خاک به دلیل نیروی کششی ناشی از مسلح کننده می‌شود و ژئوتکستایل ۴۰۰ گرمی مقاومت کششی بالاتری نسبت به ژئوتکستایل ۲۰۰ گرمی دارد؛ در نتیجه در زمان عمل آوری یکسان، بازده مسلح‌سازی نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل با مقاومت کششی بالاتر بیشتر است که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲- پارامتر Ci برای کلیه نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید.



شکل ۱۳- پارامتر Ci برای کلیه نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل.

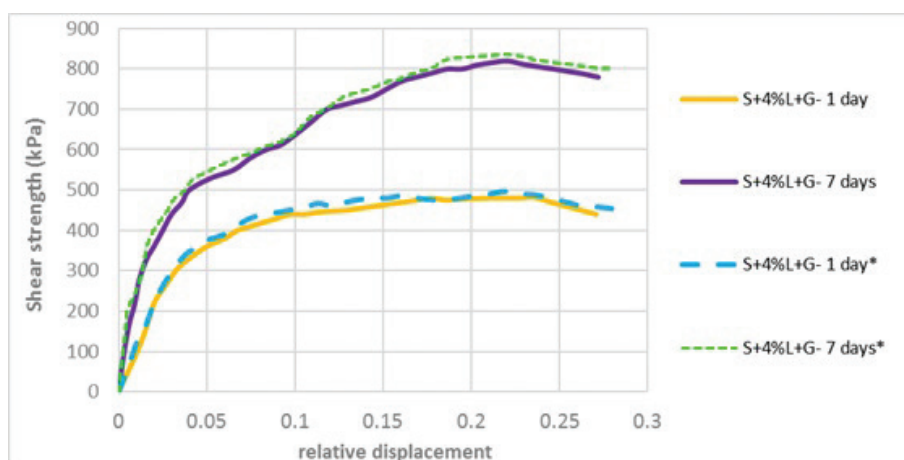
۶-۶. بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های انجام شده

تکرارپذیری (Repeatability) و تجدیدپذیری (Reproducibility) معیارهایی برای بیان صحت روش آزمایش محسوب می‌شوند. بررسی تکرارپذیری یکی از گام‌های اولیه در کنترل یک روش آزمایشگاهی است و به منظور تخمین میزان عدم دقت یا خطای اتفاقی آزمایش به کار می‌رود. آزمایشگاه‌ها برای اطمینان از دقت و مناسب بودن وضعیت عوامل تأثیرگذار تصادفی و پراکنندگی مناسب نتایج اندازه‌گیری‌های خود در طول زمان کاری و همچنین اختلاف قابل قبول نتایج حاصل استفاده از روش‌ها، تجهیزات، نفرات، مکان‌ها و همچنین زمان‌های کاری مختلف، نیاز به تکرارپذیری و تجدیدپذیری دارند. این کار با استفاده از تکرار مجدد یک آزمون قابل انجام است. در صورتی که با یک احتمال معین (مثلاً ۹۵٪)، قدر مطلق اختلاف بین دو

نتیجه آزمون انفرادی حاصل از اندازه‌گیری روی یک نمونه یکسان (ثابت) با روش اندازه‌گیری یکسان در شرایط مشابه (مجری یکسان، دستگاه یکسان، آزمایشگاه یکسان و فاصله زمانی کوتاه بین آزمون‌ها) از مقدار معینی (مثلاً ۵٪) کوچک‌تر باشد؛ آن آزمایشات را تکرارپذیر می‌گویند. تکرارپذیری شاخص اصلی دقت در یک دستگاه یا روش آزمایشگاهی است.

چندین آزمایش به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایشات انجام شده تکرار شد که نمودار تنش برشی - جابه‌جایی نسبی دو نمونه (به عنوان مثال) در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که آزمایش‌ها با دقت مناسبی در آزمایشگاه انجام شده و نتایج مستخرج از آزمایش‌ها مصون از خطاهای مربوط به مراحل تهیه نمونه، عمل‌آوری و آزمون بوده و قابل اعتماد است.



شکل ۱۴- نمودارهای تنش برشی - جابه‌جایی نسبی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده در دو آزمایش یکسان جهت بررسی تکرارپذیری.

۷- نتیجه‌گیری

بین خاک و مسلح کننده و مقاومت باربری توسعه یافته در بین المان‌های عرضی حاصل می‌شود. به منظور ارزیابی سهم مقاومت باربری نوارهای عرضی در مقاومت برشی کل، آزمایش‌ها در دو گروه مسلح شده با ژئوگرید با و بدون المان‌های متقاطع عرضی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که حذف المان‌های عرضی باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت برشی کل خاک مسلح شده است.

تمامی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌هایی به ابعاد 4×4 میلی‌متر فقل و بست بهتری ایجاد می‌کنند و اندرکنش قوی‌تری نسبت به ژئوگرید با چشمه‌های 10×10 میلی‌متر دارند؛ این موضوع در نمونه‌های تثبیت شده با آهک در ۷ روز عمل‌آوری به وضوح نمایان است.

ژئوتکستایل ۴۰۰ گرمی مقاومت کششی بالاتری نسبت به ژئوتکستایل ۲۰۰ گرمی دارد؛ در نتیجه در زمان عمل‌آوری یکسان، بازده مسلح‌سازی نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل با مقاومت کششی بالاتر بیشتر است.

در مقایسه بین نمونه‌های تثبیت شده، بازده مسلح‌سازی نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک بیشترین مقدار را دارد.

بازده مسلح‌سازی با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های رس مسلح و غیر مسلح و همچنین رس تثبیت شده با آهک در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه به صورت مسلح و غیر مسلح انجام شد. برای تمامی نمونه‌ها، استفاده از المان مسلح کننده باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود. همچنین رس مسلح شده با ژئوگرید نسبت به رس مسلح شده با ژئوتکستایل مقاومت برشی بیشتری را در همان تنش قائم نشان می‌دهد؛ زیرا تسلیح با ژئوگرید حرکت دانه‌های خاک را محدود می‌کند که باعث افزایش مقاومت اصطکاکی بسیج شده در نقاط تماس دانه‌ها و بنابراین افزایش مقاومت مجموعه خاک مسلح می‌شود. تثبیت خاک رسی با آهک نیز منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود و با افزایش زمان عمل‌آوری به علت انجام واکنش‌های بلندمدت خاک-آهک (واکنش پوزولانی) این مقاومت افزایش می‌یابد.

نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ آهک بیشترین مقاومت برشی را در شرایط مسلح و غیر مسلح کسب کردند که نشان می‌دهد درصد آهک بهینه در این پژوهش ۴٪ وزن خاک خشک است که صرف اقتصادی نیز دارد.

در مکانیزم برش مستقیم، مقاومت برشی کل خاک مسلح شده با ژئوگرید از مقاومت خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید، مقاومت اصطکاکی بسیج شده

کتابنگاری

- اسکندری، ع. و هدهدی، م.، ۱۳۹۳- بررسی اثر تثبیت خاک رس با آهک، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.
- تائبی، و.، حاجی‌ستوده، م. و محبویی اردکانی، ا. ر.، ۱۳۹۴- بررسی تأثیر نحوه آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد نهم (شماره ۱): صص. ۲۶۱۵ تا ۲۶۳۲.
- عبدی، م. ر. و ارجمند، م. ع.، ۱۳۹۰- تعیین سهم مقاومت مقاوم اعضای متقاطع عرضی ژئوگرید در اندرکنش خاک-ژئوگرید، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران: دانشگاه سمنان.

References

- Abu-Farsakh, M., Coronel, J. and Tao M., 2007- Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(7): 540-549.
- Bergado, D. T., Alfaro, M. C. and Miura, N., 1995- Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests.
- Coronel, J., 2006- Frictional interaction properties between geomaterials and geosynthetics, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering In The Department of Civil and Environmental Engineering by Julian Coronel BE, Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Cowell, M. J. and Sprague, C. J., 1993- Comparison of pull-out performance of geogrids and geotextiles. In *Proceedings of Geosynthetics' 93 Conference, Vancouver, Canada, Vol. 2, pp. 579-592.*
- Croft, J. B., 1996- The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization *Geotechnique*. 17.
- El Sawwaf, M. A., 2007- Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (1): 50-60.
- Farrag, K. A. and Griffin, P., 1993- Pull-out Testing Of Geogrids in Cohesive Soils, in *Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures.*, ASTM International.
- Lee, K. and Manjunath, V., 2000- Soil-geotextile interface friction by direct shear tests. *Canadian Geotechnical Journal.*, 37(1): 238-252.
- Liu, C. N., Ho Y. H. and Huang J. W., 2009- Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1): 19-30.
- Locat, J., Berube M. and Choquete M., 1990- Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays ; shear strength development, in 40th Canadian Geotechnical Conference.
- Lopes, M., 2002- Soil-geosynthetic interaction. *Geosynthetics and their applications.*: 55-62.
- Tatlisoz, N., Edil, T. B and Benson, C. H., 1998- Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(11): 1109-1119.

Evaluation of the effect of adding lime to shear strength parameters of clay- geosynthetic interface

N. Mahbubi Motlagh^{1*} and A. R. Mahboubi Ardakani²

¹M.Sc. Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017 April 13

Accepted: 2017 August 23

Abstract

There are different methods to improve the technical characteristic of problematic soils. Stabilizing with lime and reinforcing by high tensile strength elements are among the improvement techniques. The use of geosynthetics to improve the engineering properties of various types of soil is well accepted now. Most of the studies have been limited to coarse-grained soils and few studies has been done on the feasibility of geosynthetic reinforcement on cohesive soils. Due to the positive effects of adding lime to fine-grained soils and their reinforcement by geosynthetic, concurrent effects of these methods can develop the usage of fine-grained soils. In the current research, clay samples have been stabilized with 0, 2, 4 and 6 % of lime and reinforced with geosynthetic (geotextile and geogrid) and cured for 1 and 7 days and then subjected to direct shear test. To investigate the soil-geosynthetic interface parameters and reinforcement efficiency, the direct shear tests were done on reinforced samples with geotextile and two groups of reinforced samples with and without transverse members of geogrids. The test results reveal that stabilization with lime increases shear strength and it is also increased with curing time. The shear strength of reinforced samples is higher than that of unreinforced samples, and under the same normal stress the shear resistance of the soil reinforced by geogrid is higher than of that reinforced by geotextile. Under the same curing time, the highest shear strength and reinforcement efficiency is achieved in samples reinforced and stabilized with 4% of lime and they are also increased with increasing curing duration.

Keywords: Shear strength parameters, Clay, Lime, Geosynthetic, Direct shear test.

For Persian Version see pages 281 to 292

*Corresponding author: N. Mahbubi Motlagh; E-mail: nazaninmahbobimotlagh@gmail.com