ارزیابی تأثیر رطوبت بر پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک رسی تثبیت شده با آهک-ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های متفاوت

نازنین محبوبی مطلق*، احمدرضا محبوبی اردکانی؛
دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۲/۰۹ پذیرش ۹۶/۰۶/۰۵

چکیده

از روش‌های به‌سازی خاک می‌توان به تثبیت با مواد افزودنی و تسلیح با المان‌هایی با مقاومت کششی زیاد اشاره کرد. از مهم‌ترین موادی که برای تثبیت خاک‌های ریزدانه به‌کار می‌رود، آهک است. اضافه کردن آهک به خاک رس سبب انجام واکنش‌هایی می‌شود که منجر به بهبود خواص اولیه خاک می‌شوند. امروزه استفاده از ژئوگریدها برای بهبود ویژگی‌های مهندسی انواع مختلف خاک‌ها به‌خوبی پذیرفته شده است. اکثر پژوهش‌ها در گذشته محدود به خاک‌های درشت‌دانه بوده است و تحقیقات و بررسی‌های اندکی در خصوص امکان‌پذیری استفاده از این مسلح‌کننده در خاک‌های چسبنده انجام شده است. با توجه به اثرات مثبت تثبیت خاک‌های ریزدانه با آهک و هم‌چنین تسلیح این خاک‌ها به‌وسیلهٔ ژئوگرید، بررسی اثرات توأم این روش‌ها احتمالاً بتواند کاربردهای مهندسی خاک‌های ریزدانه را گسترده‌تر نماید. از آن‌جاکه تغییرات فصلی، درصد رطوبت خاک‌ها را تغییر می‌دهد و این تغییرات در مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید تأثیرگذار است، از این رو، آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ۲ نوع ژئوگرید در دو حالت درصد رطوبت بهینه و درصد رطوبتی بیش‌تر از آن انجام شد تا تأثیر رطوبت بر پارامترهای مقاومتی فصل مشترک (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک) تعیین شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش رطوبت منجر به کاهش تنش‌های مؤثر، مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده و بازده مسلح‌سازی می‌شود. قفل و بست بین دانه‌های خاک و المان تسلیح در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های کوچک‌تر بهتر است و اندرکنش قوی‌تری را ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: درصد رطوبت، پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک، خاک رس، آهک، اندازه چشمه‌های ژئوگرید، آزمایش برش مستقیم.

***نویسنده مسئول** nnazaninmahbubimotlagh@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

مقدمه

از جمله روش‌هایی که برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی کاربرد دارد، تثبیت با آهک است. بررسی‌های بسیاری نشان داده است که تثبیت خاک با آهک می‌تواند باعث افزایش مقاومت و سختی خاک‌های چسبنده شود که میزان افزایش این پارامترها به عواملی مانند زمان عمل‌آوری، مقدار آهک، کانی‌های رسی، اندازه ذرات خاک و درصد رطوبت وابسته است [۱]، [۲]، [۳].

زمانی که آهک به خاک مرطوب اضافه می‌شود، دو دسته واکنش رخ می‌دهد: ۱. واکنش کوتاه‌مدت، ۲. واکنش بلندمدت. واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی، لخته شدن[1] و کربناسیون است و واکنش‌های بلند مدت شامل واکنش‌های پوزولانی می‌شود. [٤].

مقاومت برشی ایجاد شده در ساختار رس‌ها عمدتاً به‌دلیل وجود چسبندگی در بین ذرات است، در حالی که عامل به‌وجود آورندهٔ مقاومت برشی در خاک‌های درشت دانه، اصطکاک بین ذرات است؛ تغییراتی که در ساختار کانی‌های رس به‌دلیل انجام واکنش با آهک به‌وجود می‌آید، می‌تواند در پارامترهای مقاومت برشی آن تغییرات محسوسی ایجاد کند [۵].

امروزه میزان استفاده از مسلح کننده‌های پلیمری (ژئوگریدها) در سازه‌های خاکی افزایش چشم‌گیری داشته است؛ این امر به‌دلیل مزیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی این نوع مسلح کننده‌ها در پروژه‌ها است. استفاده از ژئوگریدها به‌عنوان عناصر تسلیح در خاک، محیط مرکبی ایجاد می‌کند که در آن، خاک، تنش‌های فشاری را تحمل کرده و عناصر تسلیح نیز وظیفه تحمل تنش‌های کششی را دارند و درگیری عناصر تسلیح با خاک موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری مجموعه می‌شود. مکانیسم 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 مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک-ژئوگرید (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک) است که در این تحقیق به آن می‌پردازیم.

پایداری و کارایی سازه‌های خاک مسلح به‌صورت چشم‌گیری به رفتار برشی فصل مشترک خاک–ژئوگرید در شرایط مختلف آب و هوایی وابسته است. عواملی مانند بارندگی، تراوش

1. Flocculate

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

آب‌های زیرزمینی و تغییرات فصلی بر درصد رطوبت خاک مؤثر هستند. تغییر در درصد رطوبت یا چگالی خشک خاک، تغییراتی را در مقاومت فصل مشترک خاک-ژئوگرید ایجاد می‌کند [٦].

در این پژوهش از خاک رسی با دامنهٔ خمیری اندک (CL)، آهک هیدراته برای تثبیت خاک و ۲ نوع ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های متفاوت برای مسلح‌سازی استفاده شد. به‌منظور بهبود رفتار شکننده خاک‌های تثبیت شده با آهک و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها، در تحقیق حاضر، تثبیت با آهک و تسلیح با ژئوگرید به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است. به‌کمک آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید و بازده مسلح‌سازی تعیین شد. علاوه بر این، برای بررسی تأثیر درصد رطوبت روی مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید، همهٔ نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه و رطوبت بیش‌تر از آن تحت آزمایش برش قرار گرفتند تا عملکرد بلندمدت خاک‌های چسبنده مسلح شده که در معرض تغییرات فصلی قرار دارند، ارزیابی شود.

مروری بر ادبیات فنی

محققان با انجام آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های رسی تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری و درصدهای رطوبت متفاوت دریافتند که در رطوبت ۱۳٪ که حدود ۰/۵٪ بیش‌تر از درصد رطوبت بهینه خاک بدون آهک است، حداکثر مقاومت به‌دست آمده است [۵]. در حقیقت بر اثر افزودن رطوبت به خاک بدون آهک، به‌دلیل ایجاد روغن‌کاری بین ذرات، مقاومت برشی تا حدی افزایش و با افزودن بیش‌تر رطوبت، مقاومت کاهش می‌یابد. برای خاک تثبیت شده با آهک نیز همین رفتار وجود دارد با این تفاوت که مقداری از رطوبت، صرف انجام واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی می‌شود.

بسیاری از محققان برای بررسی پارامترهای اندرکنش خاک- ژئوسنتتیک از آزمایش برش مستقیم استفاده کردند [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰]. در مکانیزم برش مستقیم، مقاومت برشی کل نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید ناشی از مقاومت برشی سطح تماس مسلح کننده و خاک در صفحه مسلح‌کننده و مقاومت برشی خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید است. هم‌چنین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

اعضای متقاطع عرضی ژئوگرید تا حدودی تأثیرگذار بوده است و مقداری مقاومت باربری[1] تولید می‌کند [۱۱]. در این راستا، لویی[2] و همکاران (۲۰۰۹) رابطهٔ (۱) را بیان کردند که نشان می‌دهد مقاومت برشی به‌دست آمده از آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید، ترکیبی از مقاومت برشی خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید، مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک–ژئوگرید و مقاومت باربری ایجاد شده توسط نوارهای عرضی است [۱۲].

$$F_{DST} = (A_T - A_{LG} - A_{TG})\tau_{soil} + (A_{LG} + A_{TG})\tau_{s-g} + F_B \qquad (۱)$$

که در آن F_{DST}: مقاومت برشی کل در آزمایش برش مستقیم؛ A_T: مساحت کل صفحه برش؛ A_{LG}: مساحت اعضای طولی ژئوگرید؛ A_{TG}: مساحت اعضای عرضی ژئوگرید؛ τ_{soil}: مقاومت برشی خاک؛ τ_{s-g}: مقاومت برشی سطح تماس ژئوگرید با خاک و F_B: مقاومت باربری ایجاد شده به‌وسیلهٔ نوارهای عرضی است.

پارامتری به نام ضریب اندرکنش[3] (ضریب اتصال[4]، بازده مسلح سازی[5]) به‌صورت رابطهٔ (۲) برای خاک‌های چسبنده تعریف شده است [۱۳].

$$C_i = (C_a + \sigma_n \tan\delta)/(C + \sigma_n \tan\Phi) \qquad (۲)$$

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

ضریب اندرکنش بیش از واحد بیان‌گر چسبندگی کارآمد بین خاک و ژئوسنتتیک است و هم‌چنین ضریب اندرکنش کم‌تر از ۰/۵ چسبندگی ضعیف بین خاک و ژئوسنتتیک یا شکست در لایه ژئوسنتتیک را نشان می‌دهد [۱٤].

عبدی و اتفاق (۱۳۹۲) با انجام آزمایش برش مستقیم روی ۳ نوع خاک درشت دانه مسلح شده با ٤ نوع ژئوگرید با جنس یک‌سان و ابعاد چشمه‌های مختلف و محاسبه بازده

1. Bearing resistance
2. Liu
3. Interaction coefficient
4. Bond coefficient
5. Reinforcement efficiency

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

مسلح‌سازی نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که برای هر خاک با دانه‌بندی مشخص، یک ژئوگرید با اندازه چشمه بهینه وجود دارد [۱۵].

میتشل[1] و همکاران (۱۹۹۰) از آزمایش برش مستقیم برای ارزیابی تأثیر تر و خشک بودن فصل مشترک روی مقاومت اصطکاکی بین سطح المان پلی‌پروپیلن با چگالی زیاد (HDPE[2]) و خاک رس متراکم شده استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که مقاومت برشی فصل مشترک HDPE و خاک رس در درصد رطوبت بهینه، حدود ۹۵/۸ کیلوپاسکال است و در حالت اشباع به ٤٣/١ کیلوپاسکال تقلیل می‌یابد [١٦]. در خاک‌های چسبنده مسلح شده با ژئوگرید، افزایش درصد رطوبت منجر به کاهش مقاومت بیرون کشش می‌شود [۱۷].

برگادو[3] و همکاران در سال ۲۰۰٦ پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوسنتتیک را در دو حالت خشک و تر به‌کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس ارزیابی کردند. نتایج حاکی از آن است که زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک در حالت تر ۲۲٪ کم‌تر از حالت خشک است [۱۸].

ابوفرسخ[4] و همکاران (۲۰۰۷) روی تأثیر درصد رطوبت و چگالی خشک خاک روی اندرکنش خاک چسبنده- ژئوسنتتیک با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس پژوهشی انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش درصد رطوبت، تنش‌های مؤثر و مقاومت برشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۱۰].

زنگ[5] و همکارانش (۲۰۱۲) تعدادی آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس روی خاک مسلح مسلح شده با ژئوگرید به‌منظور بررسی تأثیر رطوبت روی پارامترهای مقاومتی فصل مشترک انجام دادند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که افزایش اندک در رطوبت خاک رسی باعث کاهش چشم‌گیری در چسبندگی فصل مشترک می‌شود ولی زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک برای درصدهای رطوبت مختلف تابت باقی می‌ماند [۱۹].

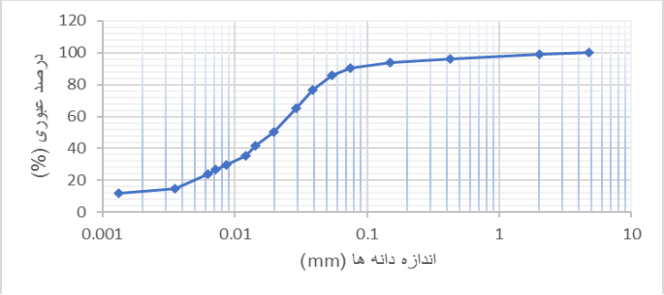
1. Mitchel
2. High-density polyethylene
3. Bergado
4. Abu-Farsakh
5. Zhang

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

مواد و روش‌ها

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 است، در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

خصوصیات ژئوگرید استفاده شده به‌منظور تسلیح خاک در جدول ۲ بیان شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک

جدول ۱. مشخصات خاک

مشخصات	استاندارد مربوطه	مقدار
حد روانی (٪)	ASTM D-4318	۲۸/۳
حد خمیری (٪)	ASTM D-4318	۱۷
دامنهٔ خمیری (٪)	ASTM D-4318	۱۱/۳
G_s	ASTM D-854	۲/۵۸
وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	ASTM D-698	۱۸/۳
درصد رطوبت بهینه (٪)	ASTM D-698	۱۵/۳
چسبندگی (kPa)*	ASTM D-3080	۲۷/۵
زاویهٔ اصطکاک داخلی (°)*	ASTM D-3080	۲٤/۸
طبقه‌بندی خاک	ASTM D-2487	CL
	ASTM D-3282	A-6

***لازم به ذکر است که چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک به‌کمک آزمایش برش مستقیم به‌دست آمده است.**

جدول ۲. مشخصات ژئوگرید

نوع ژئوگرید	ابعاد چشمه‌ها (mm*mm)	مقاومت کششی (kN/m)	ازدیاد طول در مقاومت کششی مشخصه (٪)	نام اختصاری
دو محوره	٤×٤	۱۰	۱۱	ژئوگرید ۱
دو محوره	۱۰×۱۰	٦	۱۱	ژئوگرید ۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

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

جدول ۳. مشخصات آهک

عناصر	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	SO_3	P_2O_5	CO_2	H_2O
درصد وزنی	۷۲/۸	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/٤	۰/٤٥	–	۲/۲	۲۲/٤

آزمایش تراکم

قبل از اقدام به انجام آزمایش‌های 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 درصدهای مختلف آهک به‌دست آمد.

آزمایش برش مستقیم

در شرایطی که امکان لغزش تودهٔ خاک روی مسلح‌کننده وجود دارد، آزمایش برش مستقیم مناسب‌ترین روش آزمایش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوسنتتیک است [۲۰].

در این پژوهش ۳ گروه نمونه بدین‌شرح تهیه و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته است:

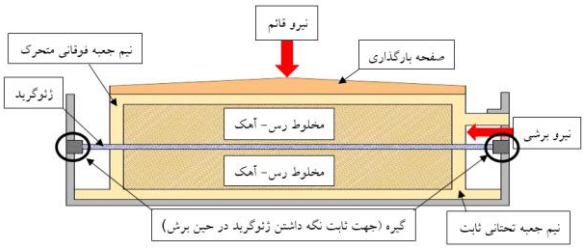
- نمونه‌های تثبیت شده با ۰، ۲، ٤، ٦ درصد آهک و عمل‌آوری شده به‌مدت ۷ روز
- نمونه‌های تسلیح شده با ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های ٤×٤ و ۱۰×۱۰ میلی‌متر (به دو صورت با و بدون المان‌های متقاطع عرضی ژئوگریدها)
- نمونه‌های تثبیت شده با ۰، ۲، ٤، ٦ درصد آهک و مسلح شده با ژئوگریدهای مذکور (به دو صورت با و بدون المان‌های متقاطع عرضی ژئوگریدها)

روش تهیهٔ نمونه‌ها بدین‌صورت است که ابتدا مقدار مورد نیاز خاک رس و آهک به‌ازای حجم جعبه برش توزین و به‌مدت ۲٤ ساعت در گرمخانه قرار گرفت. سپس، به‌منظور تهیه نمونه‌های تثبیت شده، خاک رس خشک با آهک (در درصدهای۰، ۲، ٤ و ٦) با رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد (متناظر با هر ترکیب خاک-آهک)، به‌خوبی مخلوط شد. مخلوط حاصل در ۳ لایه در جعبه برش مستقیم ریخته و تا رسیدن به وزن مخصوص

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

خشک حداکثر خود متراکم شد. سپس نمونه‌های تهیه شده از قالب خارج شده و برای حفظ رطوبت، به‌مدت ۷ روز در کیسه پلاستیکی قرار گرفتند. پس از ۷ روز، آزمایش برش مستقیم با سرعت ۱mm/min و بارهای عمودی kPa ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ انجام شد. برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده از آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM-D 3080 استفاده شد.

به‌منظور بررسی پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک- ژئوگرید از آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D-5321 استفاده شده است. بدین‌ترتیب که نیمی از مخلوط رس-آهک-آب (تهیه شده در درصد رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد متناظر با ترکیب مورد نظر) در نیم جعبه تحتانی برش ریخته و تا رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر خود متراکم شد. سپس المان مسلح‌کننده (ژئوگرید) در مرز مشترک بخش‌های تحتانی و فوقانی جعبه قرار گرفت. در نهایت نیم جعبه فوقانی نیز مانند نیم جعبه تحتانی با نصف دیگر مخلوط خاک مرطوب-آهک متراکم شد. سپس نمونه‌های تهیه شده از قالب خارج شده و برای حفظ رطوبت در زمان عمل‌آوری ۷ روز در کیسه پلاستیکی قرار گرفتند. پس از سپری شدن زمان مذکور، نمونه‌ها در داخل دستگاه برش قرار گرفته و سپس ژئوگرید به‌کمک گیره‌های تعبیه شده مطابق شکل ۲ در محل مورد نظر ثابت شد (گیره‌ها برای جلوگیری از لغزش و چین‌خوردگی ژئوگرید در حین برش طراحی شد). با استقرار صفحه بارگذاری روی نمونه‌ها و اعمال تنش‌های قائم مذکور اقدام به برش با نرخ mm/min ۱ شد.



شکل ۲. نحوهٔ قرار گیری نمونه‌های مسلح شده در دستگاه برش مستقیم

برای تهیه نمونه‌ها در درصد رطوبت بیش‌تر از رطوبت بهینه، پس از تهیه نمونه‌ها و عمل‌آوری در ۷ روز (در بالا توضیح داده شد)، به‌مدت ۱ روز در آب قرار گرفتند (شکل ۳) و

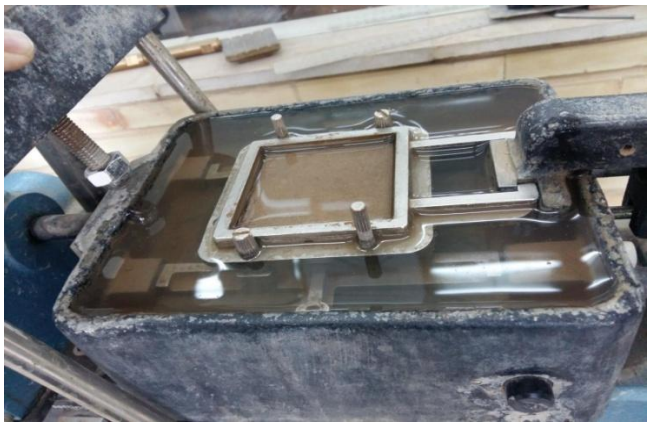
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

سپس آزمایش برش مستقیم با سرعت و بارهای عمودی ذکر شده روی آن‌ها انجام شد.

آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده در جدول ٤ خلاصه شده است.

جدول ٤. آزمایش‌های برش مستقیم

نمونه	درصد آهک	مدت زمان عمل‌آوری (روز)	المان مسلح کننده	درصد رطوبت	تنش قائم (kPa)	میزان برش (mm/min)
A	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ندارد	بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
B	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ندارد	بیش از بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
C	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۱	بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
D	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۱	بیش از بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
E	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۱ بدون المان‌های متقاطع عرضی	بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
F	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۱ بدون المان‌های متقاطع عرضی	بیش از بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
G	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۲	بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
H	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۲	بیش از بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
I	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۲ بدون المان‌های متقاطع عرضی	بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱
J	۰، ۲، ٤ و ٦	۷	ژئوگرید ۲ بدون المان‌های متقاطع عرضی	بیش از بهینه	۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰	۱



شکل ۳. نحوهٔ قرار گیری نمونه غیرمسلح در داخل آب در دستگاه برش مستقیم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

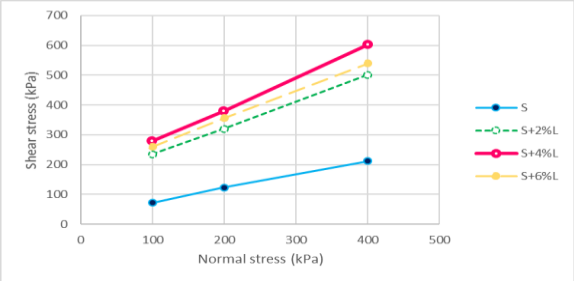
بیان نتایج و بحث

نتایج آزمایش تراکم استاندارد انجام شده برای خاک با درصدهای مختلف آهک در جدول ۵ بیان شده است.

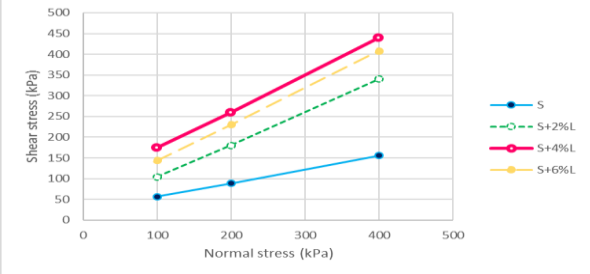
جدول ۵. نتایج آزمایش تراکم استاندارد

ترکیب	درصد رطوبت بهینه (٪)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
خاک رس	۱۵/۳	۱/۸۳
خاک رس + ۲٪ آهک	۱۸	۱/۷٦
خاک رس + ٤٪ آهک	۱۸/۵	۱/۷٤
خاک رس + ٦٪ آهک	۱۹	۱/۷۲

نمودارهای پوش گسیختگی مربوط آزمایش برش مستقیم روی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روزه در شرایط غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگریدهای ٤×٤ و ۱۰×۱۰ میلی‌متر به دو صورت با و بدون المان‌های متقاطع عرضی آن در درصد رطوبت بهینه و درصد رطوبت بیش‌تر از آن در شکل‌های ٤ تا ۱۳ نشان داده شده است.

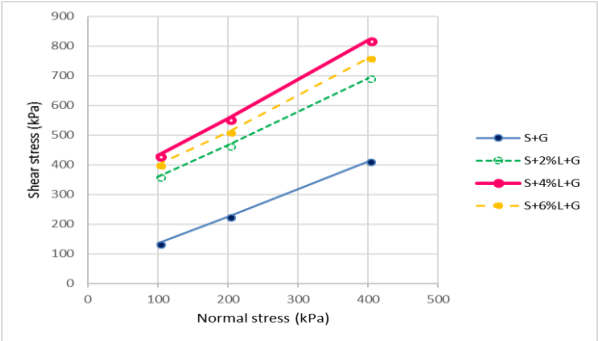


شکل ٤. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و غیرمسلح در درصد رطوبت بهینه

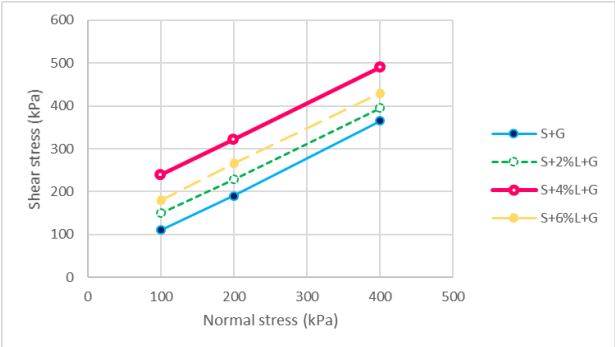


شکل ۵. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و غیرمسلح در درصد رطوبت بالاتر از بهینه

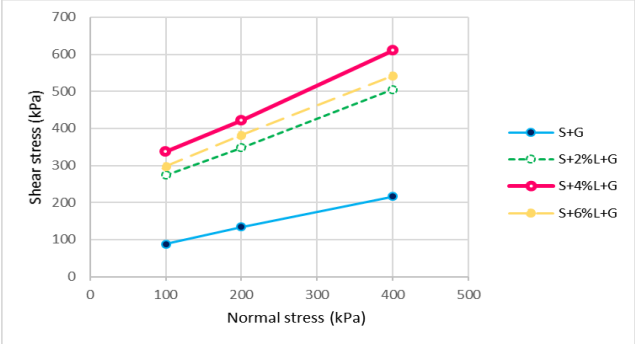
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]



شکل ٦. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

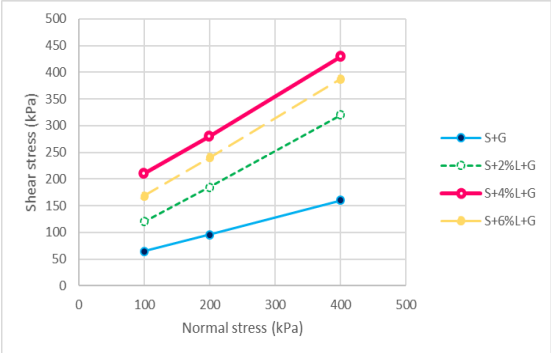


شکل ۷. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بالاتر از بهینه

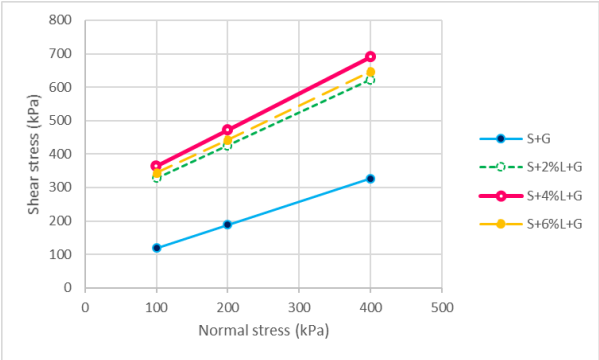


شکل ۸. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر بدون المان‌های متقاطع عرضی در درصد رطوبت بهینه

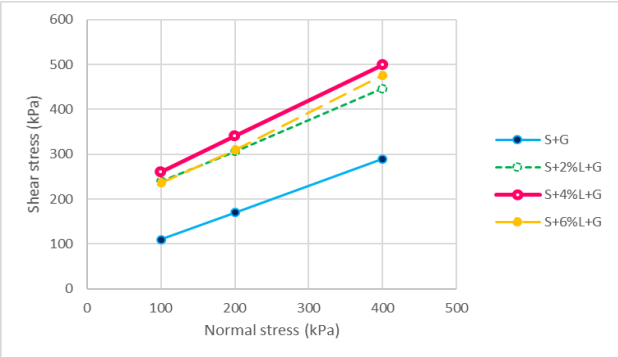
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]



شکل ۹. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر بدون المان‌های متقاطع عرضی در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه

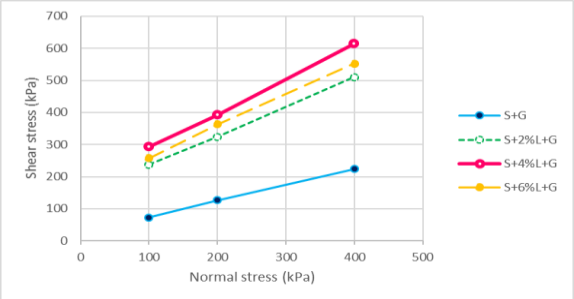


شکل ۱۰. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

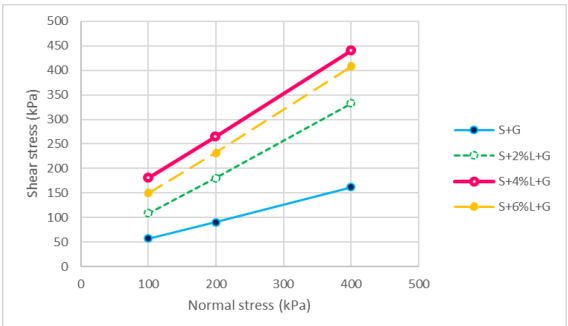


شکل ۱۱. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بالاتر از بهینه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]



شکل ۱۲. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر بدون المان‌های متقاطع عرضی در درصد رطوبت بهینه



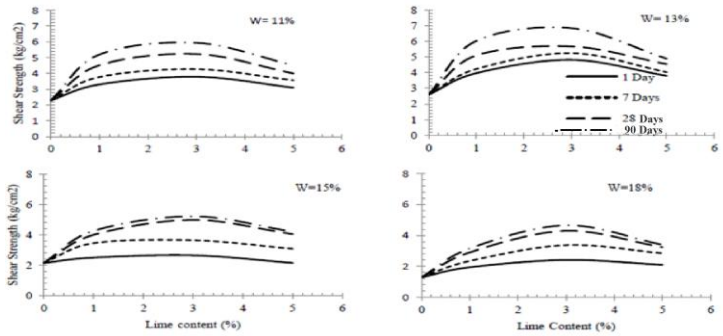
شکل ۱۳. پوش گسیختگی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و مسلح شده با ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر بدون المان‌های متقاطع عرضی در درصد رطوبت بالاتر از بهینه

تأثیر آهک

با توجه به نمودارهای فوق نتیجه می‌شود که حداکثر مقاومت برشی در نمونه‌های رسی تثبیت شده با ٤٪ آهک به‌دست آمده و این موضوع بیان‌گر این مطلب است که درصد بهینه این نوع آهک برای تثبیت خاک آزمایش شده، ٤ درصد وزنی خاک خشک است. شایان ذکر است که در پژوهش‌های قبلی نیز به درصد آهک بهینه اشاره شده است [۵] و [۲۱]. تائبی و همکاران به بررسی اثر افزودن آهک به خاک روی مقاومت برشی آن پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش برش مستقیم روی خاک رسی (CL) تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در زمان‌های عمل‌آوری و درصدهای رطوبت متفاوت دریافتند که افزودن آهک به خاک تا ۳٪ منجر به افزایش مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

می‌شود (شکل ١٤) اما با افزودن بیش‌تر آهک، روند کاهشی در مقاومت دیده می‌شود [۵]. در این پژوهش افزایش مقاومت تا افزودن ٤٪ آهک به خاک به‌دست آمد.



شکل ١٤. تغییرات مقاومت برشی بر حسب درصد آهک در زمان‌های عمل‌آوری و درصد رطوبت متفاوت

بنابراین یک درصد وزنی بهینه از آهک وجود دارد که در آن مقاومت برشی بیشینه می‌شود، به‌طوری‌که در صورت افزودن آهک به خاک بیش از این درصد، به‌دلیل اشباع شدن مخلوط از آهک، نه تنها افزایش مقاومت به همراه ندارد بلکه منجر به کاهش مقاومت نیز می‌شود. علت این پدیده را باید در مکانیزم واکنش آهک با ذرات خاک رسی بررسی کرد، بدین‌صورت که آهک پس از اضافه شدن به خاک مرطوب به یون‌های کلسیم و هیدروکسید تجزیه می‌شود. یون‌های سیلیسیم و آلومینیوم حاصل از حل شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌های رس با یون هیدروکسید و کلسیم آهک ترکیب شده و سیلیکات کلسیم هیدراته و 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 کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته موجود باشند، ادامه می‌یابد. در نتیجه این واکنش‌ها، تولید ترکیبات سیمانی گسترش یافته 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 آن، حداکثر تغییرات در کانی‌های رسی به‌دلیل انجام واکنش‌های سیمانتاسیون و پوزولانی ایجاد می‌شود و همین موضوع باعث افزایش زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی و به تبع آن افزایش مقاومت برشی می‌شود. کاهش مقاومت در اثر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

افزودن آهک به خاک بیش از درصد وزنی بهینه، ممکن است به این دلایل رخ دهد: ۱. متوقف شدن واکنش پوزولانی به‌علت اتمام واکنش دهنده‌ها در طول واکنش و ۲. به سختی منتشر شدن محلول آب و آهک در بافت سیمانته شده خاک.

تأثیر عامل تسلیح (ژئوگرید)

به‌کارگیری مسلح کننده‌ها به‌دلیل فراهم کردن نیروهای کششی، منجر به افزایش نیروی مقاوم در تودهٔ خاک مسلح می‌شود. بدین‌صورت که تنش‌های فشاری اعمال شده به 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 شده است که با نتایج به‌دست آمدهٔ سایر محققان هم‌خوانی دارد [۲۲]. در واقع نمونه‌های رس- ژئوگرید در مقایسه با نمونه‌های رس مقاومت برشی بیش‌تری را تحت تنش‌های قائم مشابه از خود 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. تحلیل بیان شده مطابق با تحلیل ایندرارتنا[1] (۲۰۱۱) در مورد رفتار خرده سنگ[2] مسلح شده با ژئوگرید قرار گرفته تحت ترازهای مختلف رسوب[3] است [۲۳].

افزایش مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید در تنش‌های قائم بالاتر بیش‌تر است [۲٤]. این موضوع به‌وضوح در شکل‌های ٦ و ۱۰ دیده می‌شود.

با مشاهده نمودارهای مربوط به نمونه‌های مسلح شده نتیجه می‌شود که خاک‌های چسبنده می‌توانند با انواع مختلف ژئوگریدها به‌طور موفقیت‌آمیزی مسلح شوند که با نتایج پژوهش‌های ابوفرسخ و همکاران در سال ۲۰۰۷ سازگار است [۱۰].

دیوارهای حائل با خاکریز چسبنده تثبیت شده با آهک و مسلح شده با ژئوگرید در چین به‌طور گسترده‌ای کاربرد دارد [۲۵]. به‌منظور مشخص کردن رفتار این نوع سازه‌ها تحت بارگذاری، یک دیوار حائل مسلح به ارتفاع ٦ متر برای مدت ۲ سال در حین و پس از ساخت

1. Indraratna
2. Ballast
3. Fouling

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

ابزاربندی و کنترل[1] شد. نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از بارهای ثقلی را خاکریز چسبنده اصلاح شده با آهک تحمل می‌نماید اما ژئوگرید به‌عنوان عامل تسلیح موجب یک‌پارچگی و پایداری سازه خاکی می‌شود. از قرائت ابزار دقیق‌های نصب شده در قسمت‌های مختلف دیوار استنتاج می‌شود که در هنگام بارگذاری، خاکریز چسبنده تثبیت شده با آهک نقش اساسی و اولیه و تسلیح با ژئوگرید نقش ثانویه را در پایداری دیوار به‌عهده دارد درحالی‌که در هنگام زلزله تأثیر مسلح سازی با ژئوگرید بیش‌تر نمایان می‌شود. مطابق نمودارهای شکل ٤ و ٦ مشخص می‌شود، برای مثال در تنش قائم kPa ٤٠٠، مقاومت برشی خاک رسی kPa ٢٠٠، خاک تثبیت شده با ٤٪ آهک kPa ٦٠٠ و خاک مسلح شده با ژئوگرید نوع ١ kPa ٤٢٠ است. این موضوع نشان می‌دهد که تثبیت با ٤٪ آهک موجب افزایش kPa ٤٠٠ در مقاومت برشی نمونه شده در حالی‌که تسلیح با ژئوگرید حدود kPa ٢٢٠ مقاومت را افزایش داده است؛ درنتیجه تثبیت با آهک در مقایسه با تسلیح با ژئوگرید در افزایش مقاومت خاک مورد نظر تأثیر بیش‌تری دارد.

ارزیابی پارامترهای فصل مشترک خاک تثبیت شده-ژئوسنتتیک

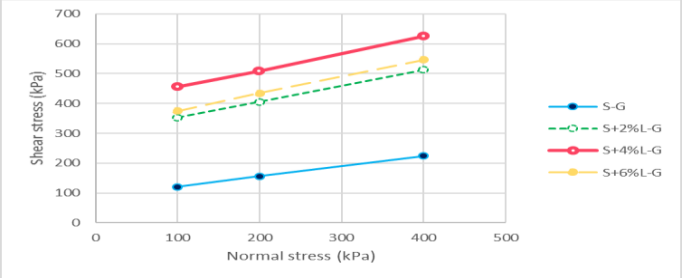
چنان‌که قبلاً بیان شد، در مکانیزم برش مستقیم، مقاومت برشی کل خاک مسلح شده با ژئوگرید از مقاومت خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید، مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده و مقاومت باربری توسعه یافته در بین المان‌های عرضی ژئوگرید حاصل می‌شود. تفاضل بین مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید در دو حالت با و بدون المان‌های متقاطع عرضی، میزان سهم این اعضا در مقاومت برشی کل را مشخص می‌کند. با توجه به رابطهٔ ١ و نمودارهای موجود، مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک- ژئوگرید محاسبه و در شکل‌های ١٥ و ١٦ برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های ٤×٤ میلی‌متر و در شکل‌های ١٧ و ١٨ برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های ١٠×١٠ میلی‌متر ترسیم شده است.

پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک- ژئوگرید (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک) در درصد رطوبت بهینه و درصد رطوبت بیش‌تر از آن

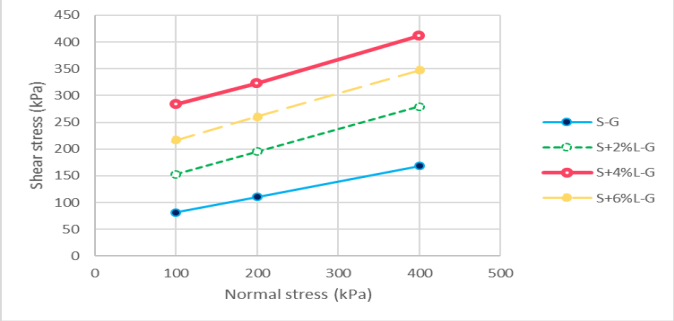
4. Monitoring

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

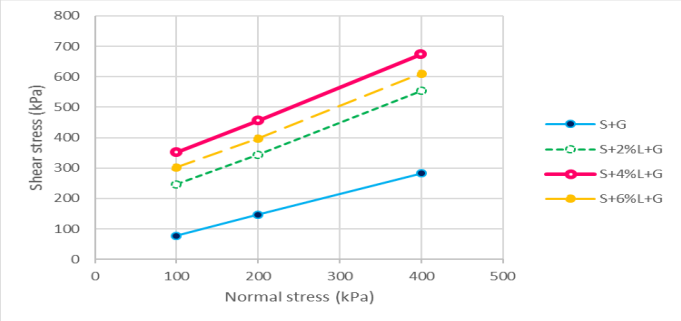
که از نمودارهای شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ به‌دست آمده به‌ترتیب در جدول‌های ٦ الی ۹ خلاصه شده است.



شکل ۱۵. مقاومت اصطکاکی بسیج شده درفصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک- ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

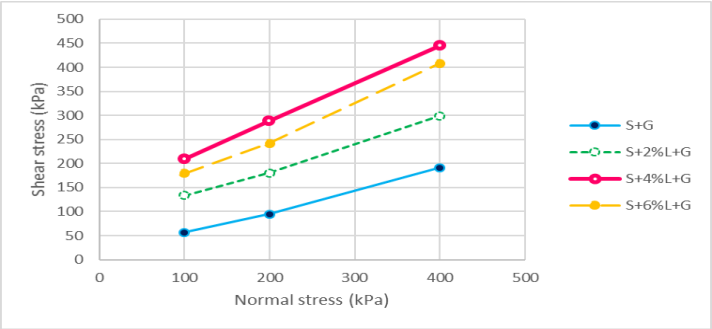


شکل ١٦. مقاومت اصطکاکی بسیج شده در فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک- ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه



شکل ۱۷. مقاومت اصطکاکی بسیج شده درفصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]



شکل ۱۸. مقاومت اصطکاکی بسیج شده درفصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه

جدول ٦-. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۱۹	۸٦/٦
۲	۲۸/۱	۲۹۹
٤	۲۹/۸	۳۹٦/۳
٦	۲۹/٦	۳۱۹/۵

جدول ۷. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ٤×٤ میلی‌متر در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۱٦	۵۲/۳
۲	۲۲/۹	۱۱۰/٤
٤	۲۳/۳	۲۳۸/۵
٦	۲۳/۵	۱۷۳/۲

جدول ۸. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۳٤/۳	۱۰
۲	٤۵/۵	۱٤۱/٦
٤	٤۷	۲٤۲/۵
٦	٤٦	۱۹۵/۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

جدول ۹. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک-ژئوگرید ۱۰×۱۰ میلی‌متر در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه

درصد آهک	δ (°)	Ca (kPa)
۰	۲۵/٤	۵/۹
۲	۳۰	۷٤
٤	۳۸	۱۳۱
٦	۳۷/۷	۹٦/۲

چسبندگی فصل مشترک خاک تثبیت شده با آهک-ژئوگرید با افزایش درصد آهک تا ٤٪ که به‌عنوان درصد بهینه در این پژوهش گزارش شده است (حداکثر مقاومت برشی در نمونه‌های تثبیت شده با ٤٪ آهک ایجاد می‌شود)، افزایش می‌یابد و پس از آن روند کاهشی دارد. در مورد زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک نیز باید گفت که به‌علت تغییرات ساختاری که در اثر واکنش‌های خاک-آهک در ذرات رسی ایجاد می‌شود، با افزودن آهک تا ٤٪ وزن خشک خاک، زاویهٔ اصطکاک افزایش و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند.

عبدی و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که حذف اعضای متقاطع ژئوگرید باعث کاهش مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای مسلح شده به‌میزان ۱۰٪ نسبت به نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با اعضای متقاطع می‌شود [۲٦]. موراسی[1] و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که سهم مقاومت باربری ایجاد شده با نوارهای عرضی ژئوگرید برای نمونه‌هایی که در آن اندازه ذرات خاک از ابعاد چشمه‌های ژئوگرید کوچک‌ترند، بیش‌تر است [۲۰]. هم‌چنین لویی (۲۰۰۹) نیز این مقدار را برای خاک رسی با دامنهٔ خمیری زیاد (CH) بیش از ۱۰٪ اعلام کرده است [۱۲] که در این پژوهش این میزان برای نمونه‌های رسی مسلح شده با ژئوگرید ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر ٤۰٪ و ۳٤٪ گزارش شده و هم‌چنین برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک و مسلح شده با ژئوگرید ۱ و ۲ حدود ۲۵٪ و ۱۸٪ به‌دست آمده است.

تأثیر رطوبت بر مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده

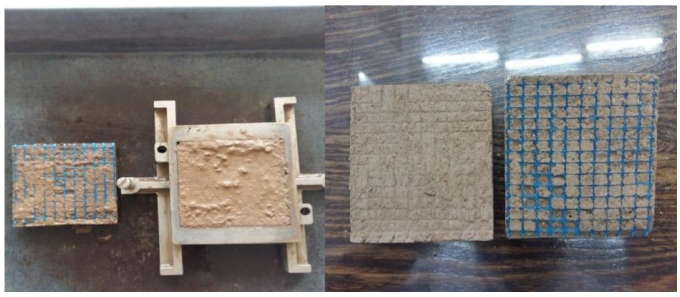
تغییر در درصد رطوبت و چگالی خشک خاک می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید شود. از آن‌جاکه در ساختگاه، تغییرات فصلی وجود دارد و

1. Moraci

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

این تغییرات بر درصد رطوبت و چگالی خشک خاک محل تأثیرگذارند، در نتیجه باید چگونگی تغییراتی که در مقاومت برشی و بازده مسلح‌سازی با ژئوگرید در انواع خاک‌ها (به‌علت تغییر درصد رطوبت و چگالی خشک خاک) ایجاد می‌شود را ارزیابی کرد.

از مقایسهٔ جداول ٦ الی ۹ دریافت می‌شود که چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک خاک-ژئوگرید با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابند که مطابق با نتایج به‌دست آمدهٔ ابوفرسخ است [۱۰]، زیرا آب، ذرات مخلوط رس-آهک را احاطه کرده که باعث کاهش چسبندگی بین المان مسلح‌کننده و مخلوط خاک و هم‌چنین سهولت بخشیدن به حرکت ذرات روی صفحه مسلح‌کننده می‌شود (شکل ۱۹).



شکل ۱۹. نمونه‌های مسلح‌شده پس از انجام آزمایش (سمت راست: در درصد رطوبت بهینه و سمت چپ: در درصد رطوبت بیش‌تر از بهینه)

با توجه به این‌که که خاک رس ریزدانه است و مخلوط رس-آهک در حداکثر چگالی خشک خود در جعبه برش متراکم شده‌اند، از این رو، با قرارگیری نمونه‌ها به‌مدت یک روز در آب، به حالت اشباع نرسیده و فقط می‌توان گفت که در رطوبتی بیش‌تر از رطوبت بهینه خود تحت آزمایش برش قرار گرفتند.

با افزایش درصد رطوبت در نمونه‌ها، تنش‌های مؤثر و مقاومت برشی کاهش می‌یابد [۱۰]. این کاهش می‌تواند به‌علت کاهش در مکش خاک در اثر افزایش درصد رطوبت و امکان توسعه فشار آب حفره‌ای اضافی در حالت نزدیک به اشباع برای رس‌ها باشد. فلمینگ[1] و همکاران (۲۰۰٦) و خوری[2] و همکاران (۲۰۱۱) نیز با کنترل مکش در طول آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های مسلح شده، تحلیل فوق را تأیید کردند [۲۷]، [۲۸].

1. Fleming
2. Khoury

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

نتایج آزمایش‌های اسماعیلی و همکاران (۲۰۱٤)، بیان می‌کند که تغییر در مکش خاک که نتیجه تغییر در درصد رطوبت است، می‌تواند باعث تغییرات چشم‌گیری در مقاومت فصل مشترک خاک-ژئوتکستایل شود [۲۹]. فری‌یرا[1] (۲۰۱۵) نیز به این نتیجه رسید که مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید برای نمونه‌ها در رطوبتی معادل ۱/۵ برابر رطوبت بهینه، حدود ۲۷٪ کم‌تر از نمونه‌های تهیه شده در درصد رطوبت بهینه است [۳۰].

در نتیجه در طراحی سیستم خاک‌های چسبنده مسلح شده با ژئوگرید به‌منظور تقویت کردن اثر مسلح‌سازی (افزایش بازده مسلح‌سازی) باید سیستم زهکشی اجرا شود. عدم زهکشی مناسب باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه کاهش بیش‌تر در مقاومت برشی فصل مشترک در نمونه‌های نزدیک به اشباع می‌شود.

بازده مسلح‌سازی (پارامتر C_i)

پارامتر Ci نشان‌دهندهٔ بازده فصل مشترک یا بازده مسلح‌سازی است که به‌کمک رابطهٔ (۲) و نمودارهای فوق تعیین شده و برای همهٔ نمونه‌های مسلح شده در شکل ۲۰ آورده شده است. بسیاری از محققان از c_i به‌عنوان یک پارامتر اساسی در طراحی سازه‌های خاکی مسلح با ژئوگرید یاد کردند [۱۳]، [۱٤].

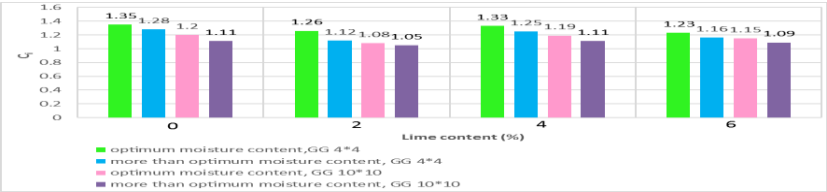
در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که نمونه‌های تثبیت شده در مقایسه با نمونه‌های تثبیت نشده، بازده کم‌تری دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه تثبیت خاک رسی با آهک باعث افزایش مقاومت برشی آن می‌شود ولی به‌علت تغییرات ساختاری که در ذرات رس در اثر افزودن آهک اتفاق می‌افتد، قفل و بست دانه‌ها در بین چشمه‌های ژئوگرید کم‌تر شده و در نهایت اندرکنش ایجاد شده بین مخلوط خاک-آهک و ژئوگرید ضعیف می‌شود. در مقایسه بین نمونه‌های تثبیت شده، نمونه‌های تثبیت شده با ٤٪ آهک دارای بیش‌ترین بازده هستند.

برگادو و همکارانش (۱۹۹۳) گزارش کردند که بازدهٔ مسلح‌سازی خاک‌های چسبنده مسلح شده با ژئوگریدهای متفاوت در محدود ۱ الی ۱/۲ قرار دارد در حالی‌که این محدوده در پژوهش حاضر بین ۱ الی ۱/۳۵ متغیر است [۲۲].

با افزایش در درصد رطوبت یا کاهش در چگالی خشک خاک، بازده فصل مشترک کاهش می‌یابد که در تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های ابوفرسخ است [۱۰].

1. Ferreira

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]



شکل ۲۰. پارامتر C_i برای همهٔ نمونه‌های مسلح شده

توصیه شده است که برای حفظ کیفیت سازه‌های خاکی متراکم شده در محل، به تراکمی برابر یا بیش‌تر از ۹۵٪ چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت ۲٪ ± رطوبت بهینه نیاز است [۱۰].

تأثیر اندازهٔ چشمه‌های ژئوگرید

در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که بازده مسلح‌سازی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌هایی به ابعاد ٤×٤ میلی‌متر در همهٔ حالات (تثبیت شده و نشده) در درصد رطوبت بهینه و بیش‌تر از آن، بیش از نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که قفل و بست بهتری بین دانه‌های خاک و ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های کوچک‌تر ایجاد شده و اندرکنش قوی‌تری فراهم شده است. در نتیجه ژئوگرید با چشمه‌های کوچک‌تر و مقاومت کششی بیش‌تر برای مسلح‌سازی خاک مورد آزمایش مناسب‌تر است که این موضوع با نتایج پژوهش‌های لویی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

جداول ٦ الی ۹ بیان‌گر این است پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک تثبیت شده با آهک-ژئوگرید با چشمه‌های ٤×٤ میلی‌متر نسبت به خاک تثبیت شده با آهک-ژئوگرید با چشمه‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر(δ و C_a) در درصد رطوبت بهینه و رطوبت بالاتر از آن بیش‌تر است که نشان می‌دهد خاک رسی مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های کوچک‌تر عملکرد بهتری دارد.

از آن‌جاکه خاک رسی نفوذپذیری کمی دارد و سطح تماس خاک- خاک در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر بیش‌تر است؛ خاک مانع از زهکشی شده، در نتیجه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد و مقاومت فصل مشترک در این گونه نمونه‌ها (مسلح شده با ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های بزرگ‌تر) با افزایش رطوبت، بیش‌تر کاهش می‌یابد.

نتیجه آزمایش برش مستقیم خاک رس مسلح شده با دو نوع ژئوگرید با ابعاد چشمه‌های متفاوت انجام شده به‌وسیلهٔ ابوفرسخ و همکاران (۲۰۰۷) در جدول ۱۰ آورده شده است [۱۰].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

جدول ۱۰. پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید و بازده مسلح‌سازی به‌دست آمده به‌وسیلهٔ ابوفرسخ و همکاران (۲۰۰۷)

	ژئوگرید با ابعاد چشمه ۲۵/٤ ×۲۵/٤ میلی‌متر			ژئوگرید با ابعاد چشمه ۳٦/۵ ×۳۰/۲ میلی‌متر		
	δ (°)	C_a (kPa)	C_i	δ (°)	C_a (kPa)	C_i
خاک رس	۳۰/۷	۱۲/۷	۱/۰۵	۲۱/٤	۸/۹	۰/۷۱

چنان‌که در جدول ۱۰ مشخص است، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک خاک رس- ژئوگرید با افزایش ابعاد چشمه‌های ژئوگرید کاهش می‌یابد که مطابق با دست‌آوردهای این پژوهش است. بازده مسلح‌سازی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید دارای چشمه‌های کوچکتر نیز بیش‌تر است.

بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های انجام شده

تکرارپذیری[1] و تجدیدپذیری[2] معیارهایی برای بیان صحت روش آزمایش محسوب می‌شوند.

بررسی تکرارپذیری یکی از گام‌های اولیه در کنترل یک روش آزمایشگاهی است. آزمایشگاه‌ها برای اطمینان از دقت و مناسب بودن وضعیت عوامل تأثیرگذار تصادفی و پراکندگی 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 دارند. این کار با استفاده از تکرار مجدد یک آزمون قابل انجام است.

در صورتی که با یک احتمال معین (مثلاً ۹۵٪)، قدرمطلق اختلاف بین دو نتیجه آزمون انفرادی حاصل از اندازه‌گیری برروی یک نمونه یک‌سان (ثابت) با روش اندازه‌گیری یک‌سان در شرایط مشابه (مجری، دستگاه وآزمایشگاه یک‌سان و فاصلهٔ زمانی کوتاه بین آزمون‌ها) از آن کوچک‌تر باشد، آن آزمایش‌ها را تکرارپذیر می‌گویند. تکرارپذیری شاخص اصلی دقت در یک دستگاه یا روش آزمایشگاهی است.

چندین آزمایش به‌منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های انجام شده تکرار شد که نتایج آن در جدول ۱۱ آورده شده است.

با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۱۱ و جدول‌های ٦ الی ۹ مشاهده می‌شود که

1. Repeatability
2. Reproducibility

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

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.

جدول ۱۱. نتایج آزمایش‌های تکرار شده به‌منظور بررسی تکرارپذیری

درصد آهک	ابعاد چشمه‌های ژئوگرید مسلح کننده (mm×mm)	درصد رطوبت	δ (°)	Ca (kPa)
٤	٤×٤	بهینه	۲۹	٤٠٤
٤	٤×٤	بالاتر از بهینه	۲۲/۹	۲۳۰
٤	۱۰×۱۰	بهینه	٤٦	۲۳٦/٦
٤	۱۰×۱۰	بالاتر از بهینه	۳۸/۸	۱۳۸

نتیجه‌گیری

آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های رس مسلح و غیرمسلح و هم‌چنین رس تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک به‌صورت مسلح و غیرمسلح در دو گروه درصد رطوبت بهینه و درصد رطوبتی بیش‌تر از آن انجام شد. هدف از انجام آزمایش‌ها به‌دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک)، بازده مسلح‌سازی و تأثیر رطوبت بر مقاومت فصل مشترک بوده است. نتایج این پژوهش عبارتند از:

- مقاومت برشی نمونه‌های رسی تثبیت شده با آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، به‌علت انجام واکنش‌های بلندمدت خاک- آهک (واکنش پوزولانی) افزایش می‌یابد.
- مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید نسبت به نمونه‌های غیرمسلح افزایش یافته است، 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.
- نمونه‌های تثبیت شده با ٤٪ آهک، بیش‌ترین مقاومت برشی را در شرایط مسلح و غیرمسلح کسب کردند که نشان می‌دهد درصد آهک بهینه در این پژوهش ٤٪ است که صرف اقتصادی نیز دارد.
- در مکانیسم 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 مسلح‌کننده و مقاومت باربری توسعه یافته در بین المان‌های عرضی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

حاصل می‌شود. به‌منظور 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 توجه مقاومت برشی کل خاک مسلح شده است.

- افزایش رطوبت منجر به کاهش چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک فصل مشترک خاک تثبیت شده-ژئوگرید می‌شود.
- با افزایش در درصد رطوبت یا کاهش در چگالی خشک خاک، بازده مسلح‌سازی کاهش می‌یابد.
- تمامی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌هایی به ابعاد ٤×٤ میلی‌متر (تثبیت شده و نشده) قفل و بست بهتری داشته و اندرکنش قوی‌تری را نسبت به ژئوگرید با چشمه‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر فراهم می‌کنند.

منابع

1. Consoli N. C., Lopes Jr., Heineck K. S., "Key parameters for the strength control of lime stabilized soils", Journal of materials in Civil Engineering,Vol. **21**. No. 5.(2009) 210-216.
2. Consoli N. C., Loped Jr., Prietto P. D. M., Festugato L., Cruz R. C., "Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils" Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 137. No. 6. (2010) 628-632.
3. Tang A. M., Vu M., Cui Y. J., "Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil", Géotechnique, Vol. 61. No. 5 (2011) 421-429.

٤. اسکندری ع. هدهدی م.، "*بررسی اثر تثبیت خاک رس با آهک*»، اولین کنفرانس ملّی مکانیک خاک و مهندسی پی"، دانشکد؛ مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی(۱۳۹۳).

۵. تائبی و.، حاجی ستوده م. ح.، محبوبی اردکانی ا. ر.، "*بررسی تأثیر نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی*"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد نهم، شمارهٔ ۱ (۱۳۹٤) ۲٦۱۵-۲٦۳۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

6. Hatami K., Granados J., Esmaili D., Miller G., "Reinforcement pullout capacity in mechanically stabilized earth walls with marginal-quality soils", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2363 (2013) 66-74.
7. Bergado D. T., Alfaro M. C., Miura N., "Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests", Geotechnical Testing Journal, Vol. 18. No. 2 (1995) 157-167.
8. Lee K., Manjunath V., "Soil-geotextile interface friction by direct shear tests", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37. No. 1 (2000) 238-252.
9. Coronel J., "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 (2006).
10. Abu-Farsakh M., Coronel J. Tao M., "Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19. No. 7. (2007) 540-549.
11. Farrag K. A., Griffin P., "Poll-out Testing Of Geogrids in Cohesive Soils", Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures, ASTM International (1993).
12. Liu C. N., Ho Y. H., Huang J. W., "Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27. No.1 (2009) 19-30.
13. Cowell M., Sprague C., "Comparison of pull-out performance of geogrids and geotextiles", Proceedings of Geosynthetics. Vol. 2 (1993) 579-592.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

14. Tatlisoz N., Edil T. B., Benson C. H., "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124. No. 11 (1998) 1109-1119.

۱۵. عبدی م. ر. اتفاق م.، "*تأثیر اندازه ذرات خاک و ابعاد چشمه‌های ژئوگرید بر اندرکنش خاک - ژئوگرید*"، نشریهٔ علمی پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، جلد ۱، شمارهٔ ۱ (۱۳۹۲) ٦٤-۵۷.

16. Mitchell J. K., Seed R. B., Seed H. B., "Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner-system properties", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116. No. 4 (1990) 647-668.

17. Farrag K., "Evaluation of the effect of moisture content on the interface properties of geosynthetics" (1995).

18. Bergado D., Ramana G., Sia H., "Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 24. No. 6. (2006) 371-393.

19. Zhang J., Zou W., Zhuang Y., Wen J., Wang X., "Geogrid-soil interface characteristics in large scale direct shear tests", EUROGEO (2012).

20. Moraci N., Cardile G., Gioffre D., Mandoglio M. C., Calvarano L. S., Carbone L., "Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis", Transportation Infrastructure Geotechnology, Vol. 1. No. 2 (2014) 165-227.

21. Locat J., Berube M., Choquete M., "Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays, shear strength development", 40th Canadian Geotechnical Conference (1990).

22. Bergado D., Chia J. C., Abiera H. O., Alfaro MC., Balasubramaniam A. S., "Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 12. No. 4 (1993). 327-349.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]

23. Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C., "Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling", Geotextiles and geomembranes, Vol. 29. No. 3 (2011) 313-322.
24. Kamalzare M., Ziaie-Moayed R., "Influence of geosynthetic reinforcement on the shear strength characteristics of two-layer sub-grade" Acta Geotechnica Slovenica, Vol.1 (2011) 39-49.
25. Yang G., Liu H., Lv P., Zhang B., "Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 35 (2012) 112-118.
26. Abdi M., Arjomand M., "Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 29. No. 6 (2011) 588-595.
27. Fleming I., Sharma J., Jogi M., "Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 24. No. 5 (2006) 274-284.
28. Khoury C. N., Miller G. A., Hatami K., "Unsaturated soil–geotextile interface behavior", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 29. No. 1 (2011) 17-28.
29. Esmaili D., Hatami K., Miller G. A., "Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 42. No. 2 (2014) 139-153.
30. Ferreira F., Vieira C. S., Lopes M., "Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type", Geosynthetics International, Vol. 22. No. 3 (2015) 257-272.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.6.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.515]