تأثیر اختلاط دانه‌های ژئوفوم و خاک بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش برش مستقیم

مهدی محمد جعفری، مریم یزدی*،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۷/۲٤ پذیرش ۹۷/۱۰/۰٤

چکیده

استفاده از مخلوط دانه‌های ژئوفوم در ترکیب با خاک از موضوعات اخیر مورد توجه محققان بوده است. این امر موجب کاهش محسوس وزن مخصوص خاک شده و فشار محرک دیوارهای حائل را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از این ترکیب در مناطق لرزه‌خیز اهمیت دارد. در این مقاله به بررسی تأثیر اختلاط ژئوفوم و۳ نوع خاک ماسه‌ای بر وزن مخصوص و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها پرداختیم. خاک‌های استفاده شده، ماسه ۱٦۱ فیروزکوه، ماسه ۱٦۱ فیروزکوه با ۱۰ درصد لای و ماسه ۱٦۱ فیروزکوه با ۲۰ درصد لای است. دانه‌های ژئوفوم همگی ریزدانه است که از الک شمارهٔ ۱۰ عبور کرده‌اند و مقادیر وزنی اضافه شده آن‌ها به خاک ۰، ۰/۲، ۰/٤، ۰/٦ درصد وزنی خاک است. آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم ۱۰×۱۰ سانتی‌متر تحت سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شدند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش درصد وزنی ژئوفوم، زاویهٔ اصطکاک داخلی در ماسه کاهش و چسبندگی ظاهری در مخلوط خاک-ژئوفوم افزایش می‌یابد. با افزایش تنش‌های قائم در مخلوط ماسه و ژئوفوم (با درصد وزنی یک‌سان ژئوفوم) مقاومت برشی افزایش می‌یابد. هرچه میزان چسبندگی طبیعی خود خاک کم‌تر باشد تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش چسبندگی خاک بیش‌تر است. هم‌چنین در اختلاط حدود ۰/٤ درصد ژئوفوم با خاک، نرخ رشد چسبندگی خاک‌ها با سرعت کندتری افزایش یافته و نرخ کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی نیز کندتر می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌های آزمایش شده را در صورت اختلاط با درصدهای دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: دانه‌های ژئوفوم، زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی، آزمایش برش مستقیم

*نویسنده مسئول mar.yazdi@iauctb.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

مقدمه

ژئوفوم‌ها، پرکننده‌های سبک‌وزنی هستند که برای بهبود برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها نظیر تورم‌زایی، کاهش وزن‌مخصوص و غیره استفاده می‌شوند. ژئوفوم‌ها به‌عنوان ماده‌ای پرکننده سبک‌وزن در مکان‌هایی که قرضهٔ خاک از نظر مهندسی و اقتصادی مقرون به صرفه نباشد، استفاده می‌شوند. از آن‌جاکه ژئوفوم‌ها از پلی استایرن منبسط شونده (EPS) ساخته می‌شوند، دارای وزن مخصوص اندکی هستند و در گروه مواد ژئوتکنیکی سبک وزن قرار می‌گیرند. به‌طورکلی ژئوفوم به‌دلیل وزن سبک، عدم تغییر حجم در برابر آب، نفوذپذیری کمی و مقاومت نسبتاً مناسب قابلیت زیادی برای رفع مشکلات ژئوتکنیکی دارد. از ژئوفوم‌ها در خاکریزها، دیوارهای حائل، پایدارسازی شیب‌ها و بتن‌های سبک وزن استفاده می‌شود. نخستین بار سال ۱۹۷۰ در نروژ، ژئوفوم‌ها برای بازسازی خاکریز پایه یک پل به‌کار گرفته شدند [۱].

دامنهٔ تغییرات مقاومت فشاری این مواد ۷۰ تا ۳۵۰ کیلوپاسکال است. چگالی ژئوفوم، پایین و حدود یک درصد چگالی خاک است. بر اساس استاندارد ASTM D6817، حدود چگالی ژئوفوم بین ۱۱/۲ تا ٤٥/۷ کیلوگرم بر مترمکعب است و بیشینهٔ مقاومت فشاری این مواد در کرنش‌های ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ به‌ترتیب برابر با ۱۲۸، ۳۰۰ و ۳٤٥ کیلوپاسکال در دانسیته kg/m^3 ٤٥/۷ است. ژئوفوم‌ها به‌دلیل قابلیت اشتعال، در دماهای بالا نیاز به مراقبت دارند. ژئوفوم‌ها غالباً با عرض ۱/۲۵ متر و در ضخامت‌های متنوع از ۰/۱ متر تا ۱ متر و هم‌چنین طول‌های ۰/۵ تا ۵/٦ متر تولید می‌شوند. ویژگی‌های ذاتی ژئوفوم‌ها از جمله چگالی، مدول کشسانی، رفتار تحت بارهای فشاری و هم‌چنین استفاده از آنها در بتن‌های سبک وزن و خاک‌های منبسط شونده به‌وسیلهٔ پژوهش‌گران مختلف بررسی شده است.

میکی[1] در سال ۱۹۹٦رفتار برشی سطح مشترک ژئوفوم به ژئوفوم و ژئوفوم به ماسه را با ژئوفوم‌های با چگالی $۲۱kg/m^3$، و در دستگاه برش مستقیم بررسی کرد. وی زاویهٔ اصطکاک سطوح مشترک ژئوفوم به ژئوفوم، ژئوفوم به لایه نازک ماسه و ژئوفوم به لایه ضخیم‌تر ماسه را به‌ترتیب حدود ۳۳ درجه، ۳۵ درجه و۲۹ درجه به‌دست آورد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که وجود ژئوفوم باعث بهبود مشکلات ناشی از متورم شوندگی خاک‌های رس می‌شود [۲].

1. Miki, G

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

نگوسی[1] (۲۰۰۷) با انجام آزمایش‌های فشاری محصور نشده روی نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری، مشاهده کرد که با افزایش دانسیته، مقاومت فشاری و مدول کشسانی ژئوفوم افزایش می‌یابد . باتوجه به آن که با افزایش سطح کرنش در یک دانسیتهٔ ثابت، مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، نگوسی رابطه‌ای بین مقاومت و دانسیته در سطح کرنش‌های گوناگون ارائه داد [۳].

ایلاری[2] (۲۰۰۷) مقاومت برشی مخلوط ماسه-بنتونیت-خرده‌های بازیافتی ژئوفوم را با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم نشده زهکشی نشده و برش مستقیم بررسی کرد. وی برای دیدن تأثیر پلاستیسیته کم، متوسط و زیاد در خاک، از سه مخلوط با نسبت‌های ۱۶، ۲۴، ۳۲ درصد بنتونیت استفاده کرد. مخلوط‌های یاد شده، سپس با نسبت‌های مختلف وزنی ژئوفوم به خاک در حالت خشک به‌صورت همگن و در رطوبتی برابر رطوبت بهینه مخلوط شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهندهٔ کاهش مقاومت مخلوط با افزایش درصد ژئوفوم و رفتار اتساعی مخلوط در تنش‌های قائم بالا بود. نوآوری عمده این پژوهش نسبت به کارهای پیشین، تفاوت در نوع خاک و هم‌چنین استفاده از دانه‌های ژئوفوم استاندارد و گرد گوشه بود [۴].

آیتکین و همکاران[3] (۲۰۰۸)با آزمایش خاک متورم‌شونده بدون ژئوفوم و با وجود رول‌های ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف، فشار تورم جانبی و قائم را به‌دست آوردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهندهٔ نقش مؤثر ژئوفوم در کاهش فشار جانبی خاک رس بر دیوار حائل است [۵].

دنگ و ژیائو[4] در سال ۲۰۰۸ یک سری آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده و برش مستقیم روی ماسه خالص و مخلوط ماسه و دانه‌های ژئوفوم با درصدهای وزنی مختلف انجام دادند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که وجود دانه‌های ژئوفوم در کنار ماسه باعث کاهش زاویهٔ اصطکاک مخلوط به‌ویژه در نسبت‌های وزنی پایین ژئوفوم می‌شود [۶].

هونگمی گا و همکاران[5] (۲۰۱۱) به بررسی خواص خاک کامپوزیتی پلی استایرن انبساط

1. Negussey, D
2. Illuri, H. K
3. Aytekin, M., Banu Ikizler, S. and Nas, E
4. Deng, A.,Xiao
5. Hongmei Gao et al.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

یافته با انجام آزمایش‌های متعدد پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهش‌گران نشان داد که خاک کامپوزیتی پلی استایرن انبساط‌یافته به‌طور چشم‌گیری باعث کاهش فشار جانبی زمین می‌شود. آنها نشان دادند که ویژگی‌های منحصر به‌فرد این ماده، از جمله وزن کم واحد و سختی زیاد، باعث مقاومت در برابر ارتعاشات ناشی از حرکت وسایل تقلیه می‌شود [۷].

گلپذیر و فرهنگ در سال ۱۳۹۳ به بررسی تأثیر استفاده از مخلوط خاک و ژئوفوم در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوارهای حائل پرداختند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که استفاده از مخلوط خاک-ژئوفوم سبب کاهش فشار جانبی و افزایش پایداری دیوار می‌شود. هم‌چنین افزایش درصد وزنی ژئوفوم سبب افزایش پایداری سازه‌های نگهبان در برابر لغزش و واژگونی می‌شود [۸].

باغانیان و آروین در سال ۱۳۹۳ به بررسی پایداری دیوارهای حائل وزنی با پشت ریز مخلوط ماسه-دانه‌های ژئوفوم پرداختند. نتایج این پژوهش‌گران نشان‌دهندهٔ افزایش قابل توجه همهٔ ضریب اطمینان‌ها با افزایش درصد وزنی ژئوفوم به ماسه است. نتایج آنها هم‌چنین نشان داد که تأثیر مثبت افزودن دانه‌های ژئوفوم به ماسه، با کاهش ارتفاع دیوار، افزایش می‌یابد [۹].

نژاد شیرازی و همکاران در سال ۱۳۹٤ به بررسی رفتار مقاومتی مخلوط خاک و ژئوفوم با درصدهای وزنی و اندازه‌های مختلف ژئوفوم با استفاده از آزمایش برش مستقیم و تک محوری پرداختند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که با افزایش درصد وزنی ژئوفوم، زاویهٔ اصطکاک داخلی در ماسه و مقاومت تک‌محوری رس کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش تنش‌های قائم در مخلوط ماسه و ژئوفوم مقاومت برشی افزایش یافته و اتساع کاهش می‌یابد [۱۰].

عباسی و کریمی‌پورفرد (۱۳۹۵) به بررسی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه پلی‌استایرن انبساط یافته با استفاده از آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده پرداختند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که استفاده از دانه‌های ژئوفوم در ترکیب با ماسه رفتار آن را پیچیده کرده است و هم‌چنین باعث افزایش چسبندگی و کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک می‌شود [۱۱].

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

به‌دلیل مزایای زیاد استفاده از ژئوفوم در ترکیب با خاک، این تحقیق به‌دنبال تعیین وزن مخصوص و خصوصیات مقاومت برشی سه نوع خاک ماسه‌ای مخلوط شده با دانه‌های ژئوفوم است تا راهگشای پژوهش‌های آینده در زمینه‌های مدل‌سازی‌های عددی و یا فیزیکی دیوارهای حائل و سایر سازه‌های ژئوتکنیکی قرار گیرد. در تحقیق حاضر از ۳ نوع خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده و ٤ درصد اختلاط مختلف ژئوفوم استفاده شده است. نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیق‌های گذشته تغییر نوع خاک و استفاده از خاک ماسه بد دانه‌بندی شده، جدا کردن اندازه‌های دانه‌های ژئوفوم بر حسب قطر آن‌ها و بررسی تأثیر اضافه کردن درصدهای مختلف ژئوفوم بر بهبود خصوصیات خاک ماسه بد دانه‌بندی شده است که برای اولین بار در این تحقیق انجام شده است.

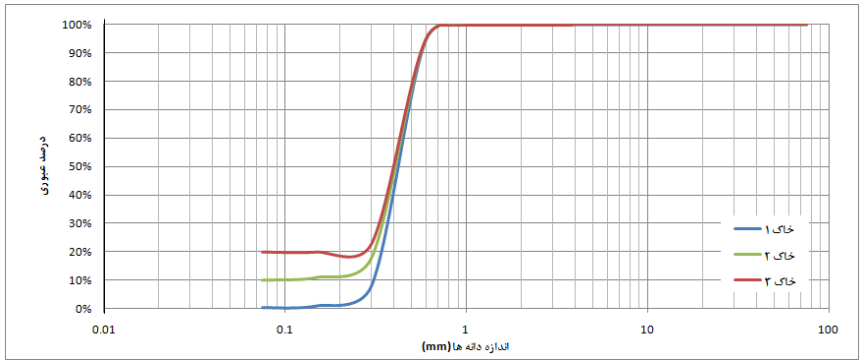
برنامهٔ آزمایش‌ها

در تحقیق حاضر به تأثیر افزودن درصدهای مختلف دانه‌های ژئوفوم به سه نوع خاک ماسه‌ای مختلف و بررسی تأثیر آن بر وزن مخصوص و پارامترهای مقاومت برشی خاک پرداخته شده است. در این پژوهش از دستگاه برش مستقیم ۱۰×۱۰ سانتی‌متر برای آزمایش روی نمونه‌های ماسه‌ای استفاده شده است. این آزمایش‌ها مطابق استاندارد ASTM D3080-98 انجام شده است. سرعت آزمایش‌ها برش مستقیم در نمونه‌ها برابر ۱ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. اولین نوع خاک، ماسه ۱٦۱ فیروزکوه با چگالی ۲/٦٥ بوده است که طبق طبقه‌بندی به‌روش متحده و استاندارد ASTM D2487 خاکی بد دانه‌بندی شده (SP) است. خاک دوم، مخلوط ماسه و ۱۰ درصد لای (SM-SP) است و خاک نوع سوم، ماسه دارای ۲۰ درصد لای (SM) است.

دانه‌بندی سه نوع خاک مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خاک ماسه ۱٦۱ فیروزکوه با نام خاک ۱، ماسه ۱٦۱ فیروزکوه و ۱۰ درصد لای با نام خاک ۲ و ماسه ۱٦۱ فیروزکوه و ۲۰ درصد لای با نام خاک ۳ نام‌گذاری شده‌اند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]



شکل ۱. دانه‌بندی خاک‌های آزمایش شده

فوم پلی‌استایرن دارای وزن مخصوص ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. در این پژوهش دانه‌های ژئوفوم با نسبت‌های وزنی ۰، ۰/۲، ۰/٤، ۰/٦ درصد و با اندازهٔ ریز (۲ میلی‌متر) با خاک مخلوط شده است. تمامی آزمایش‌ها با رطوبت بهینه مخلوط خاک و ژئوفوم انجام شده است. از آن‌جاکه نوع خاک‌ها و نسبت‌های اختلاط ژئوفوم با خاک‌ها متفاوت است، برای هر نمونه آزمایش برش مستقیم، آزمایش تراکم برای تعیین رطوبت بهینه انواع اختلاط‌ها انجام شده است. همه نمونه‌ها در سه لایه متراکم و کوبیده شده‌اند.

تأثیر افزودن ژئوفوم روی کاهش وزن‌مخصوص خاک

جدول ۱ نشان‌دهندهٔ وزن‌مخصوص خشک هر سه نوع خاک آزمایش شده در اختلاط با ژئوفوم است. همهٔ آزمایش‌های تراکم خاک طبق استاندارد ASTM D698 انجام شده‌اند. هم‌چنین در جدول ٤ میزان رطوبت بهینه برای هر خاک و اختلاط که از نتایج آزمایش‌های تراکم به‌دست آمده، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دانه‌های ژئوفوم در کاهش وزن‌مخصوص خاک بسیار چشم‌گیر و محسوس است. این کاهش وزن‌مخصوص در اثر افزودن درصدهای بیش‌تر ژئوفوم به خاک محسوس‌تر است. هم‌چنین به‌دلیل جذب آب به‌وسیلهٔ دانه‌های ژئوفوم با افزایش مقدار ژئوفوم در مخلوط خاک و ژئوفوم میزان رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

جدول ۱. تغییرات وزن مخصوص خشک خاک‌های مختلف مخلوط شده با ژئوفوم

نوع خاک	درصد ژئوفوم	رطوبت بهینه(%)	وزن مخصوص خشک(gr/cm^3)
خاک ۱	۰	۱۵/۵۰	۱/۶۶
	۰/۲	۱۵/۹۰	۱/۵۵
	۰/۴	۱۶/۰۵	۱/۳۸
	۰/۶	۱۷/۲۰	۱/۲۰
خاک ۲	۰	۱۲/۰۰	۱/۷۰
	۰/۲	۱۲/۹۰	۱/۶۰
	۰/۴	۱۳/۵۰	۱/۴۴
	۰/۶	۱۵/۵۰	۱/۳۰
خاک ۳	۰	۹/۶۰	۱/۸۹
	۰/۲	۱۵/۵۰	۱/۸۰
	۰/۴	۱۱/۷۰	۱/۶۴
	۰/۶	۱۲/۹۰	۱/۴۴

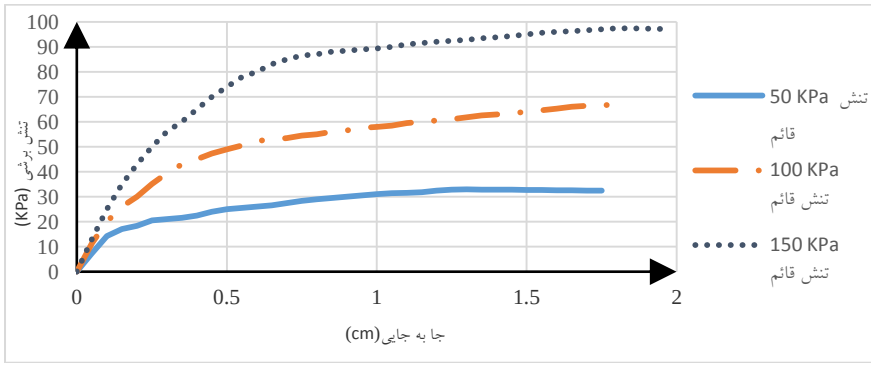
ویژگی‌های مقاومتی مخلوط خاک-ژئوفوم

شکل‌های ۲ تا ٤ نمودارهای تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک و ژئوفوم را برای سه نوع خاک آزمایش شده در اختلاط با ۰/۲ درصد وزنی ژئوفوم تحت سربارهای قائم ۵۰،۱۰۰،۱۵۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهند. مطابق این اشکال در یک جابه‌جایی برشی با افزایش تنش های قائم، تنش برشی افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان مشاهده کرد نمودارها به سه قسمت تقسیم شده‌اند، که شامل ناحیهٔ الاستیک اولیه، ناحیهٔ تسلیم و ناحیهٔ گسیختگی هستند. در ناحیهٔ اولیه، روابط بین تنش برشی و جابه‌جایی برشی تقریباً خطی است. در ناحیه تسلیم، هنگامی که جابه‌جایی برشی از مقدار بیشینهٔ جابه‌جایی برشی الاستیک بیش‌تر شد، نمودار به‌سمت محدب شدن پیش می‌رود. در ناحیهٔ گسیختگی، هم جابه‌جایی برشی و هم تنش برشی پیوسته به‌آرامی افزایش می‌یابند. لازم به ذکر است این نواحی در تحقیقات آیتکین و همکاران آیتکین و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز بررسی شده‌اند.

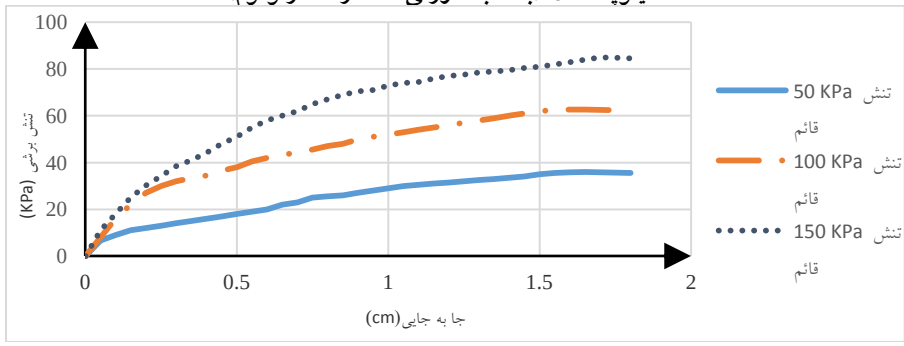
در شکل‌های ۵ تا ۷ نمودارهای مقایسه‌ای مقاومت برشی برای مخلوط سه نوع خاک و درصدهای وزنی متفاوت درتنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. نتایج حاکی از

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

آن است که با افزایش درصد ژئوفوم در خاک، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. این روند روی هر سه نمونه خاک قابل مشاهده است. از آن‌جاکه دانه‌های ژئوفوم صلبیت کم‌تری در مقایسه با دانه‌های ماسه دارند، قفل و بست و اصطکاک دانه‌های ماسه و ژئوفوم نسبت به دانه‌های ماسه به ماسه کم‌تر است و در نتیجه مقاومت برشی کاهش یافته است. نکته‌ای که در این‌جا باید به آن توجه نمود این است که میزان کاهش مقاومت برشی خاک‌های حاوی درصدهای مختلف ژئوفوم در مقایسه با خاک تنها چندان محسوس نیست و در بدترین حالت حدود ۱۲ درصد است.

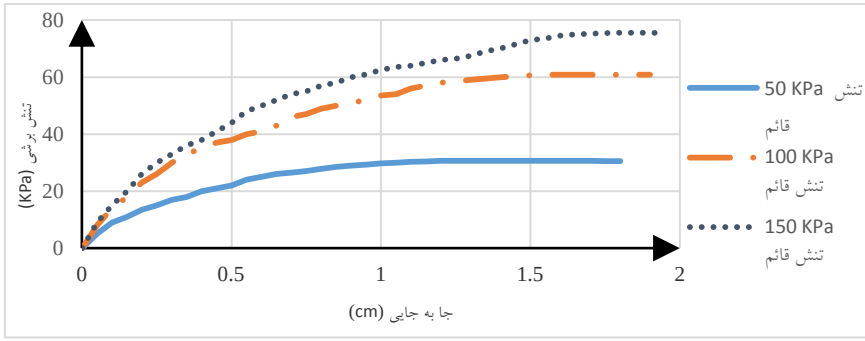


شکل۲. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۱ و ژئوفوم در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال (با نسبت وزنی۰/۲ درصد ژئوفوم)

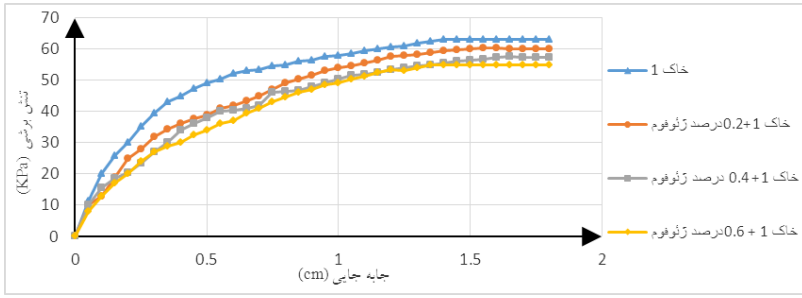


شکل۳. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۲ و ژئوفوم در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلو پاسکال (با نسبت وزنی۰/۲ درصد ژئوفوم)

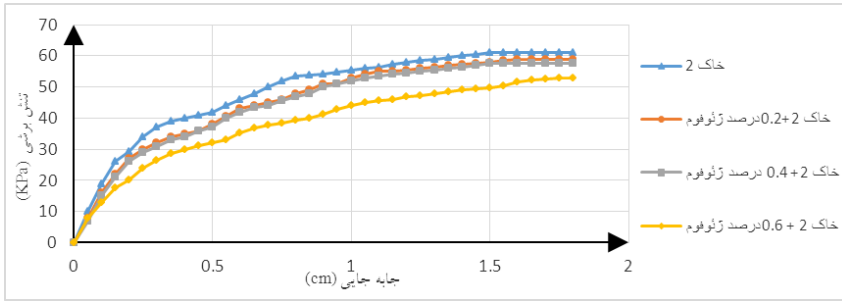
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]



شکل٤. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۳ و ژئوفوم در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلو پاسکال (با نسبت وزنی ۰/۲ درصد ژئوفوم)

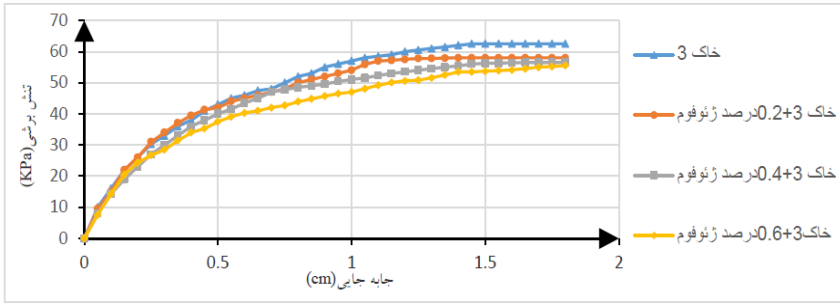


شکل٥. نمودار تنش برشی برحسب جابه‌جایی برای مخلوط خاک ۱ و ژئوفوم در درصدهای وزنی مختلف تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل٦. نمودار تنش برشی برحسب جابه‌جایی برای مخلوط خاک ۲و ژئوفوم در درصدهای وزنی مختلف تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]



شکل۷. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی برای مخلوط خاک ۳ و ژئوفوم در درصدهای وزنی مختلف تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال

جدول ۲ مقادیر ضریب چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های مخلوط شده با ژئوفوم را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان مشاهده کرد که با افزودن دانه‌های ژئوفوم به هر سه نوع خاک چسبندگی ظاهری مخلوط افزایش و زاویهٔ اصطکاک داخلی مخلوط کاهش یافته است. علاوه بر آن با بیش‌تر شدن درصدهای اختلاط، میزان افزایش چسبندگی ظاهری مخلوط و کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی بیش‌تر است.

جدول ۲. پارامترهای مقاومت برشی سه خاک آزمایش شده با درصدهای مختلف ژئوفوم

نوع خاک	درصد ژئوفوم	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک داخلی(درجه)
خاک ۱	۰	۰/۰۰۸	۳۳/۱۰
	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰/٤۱
	۰/٤	۰/۰۵۵	۲۸/۱۵
	۰/٦	۰/۰۷۳	۲۷/۰۷
خاک ۲	۰	۰/۰۲۱	۳۱/۳٤
	۰/۲	۰/۰۵۱	۲۸/۹۰
	۰/٤	۰/۰۷۱	۲۷/٤۳
	۰/٦	۰/۰۸۵	۲٦/۳۸
خاک ۳	۰	۰/۰٤۹	۳۰/۲۰
	۰/۲	۰/۰۷۰	۲۸/۰۱
	۰/٤	۰/۰۹۰	۲٦/۱۰
	۰/٦	۰/۱۰۳	۲۵/٦٤

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

تحلیل نتایج

در شکل ۸ نمودار مقایسه ای چسبندگی خاک (c) بر حسب درصد اختلاط ژئوفوم برای هر سه نوع خاک ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که در درصد اختلاط حدود ٤۰/٤، نرخ رشد چسبندگی خاک‌ها با سرعت کندتری افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر تأثیر چشم‌گیر اختلاط ژئوفوم و خاک ۱ در افزایش چسبندگی خاک به بیش از ۹ برابر است، به‌طوری که این افزایش چسبندگی در مورد خاک ۲ حدود ٤ برابر و برای خاک ۳ حدود ۲ برابر است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر چه میزان چسبندگی طبیعی خود خاک کم‌تر باشد تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش چسبندگی خاک بیش‌تر است.

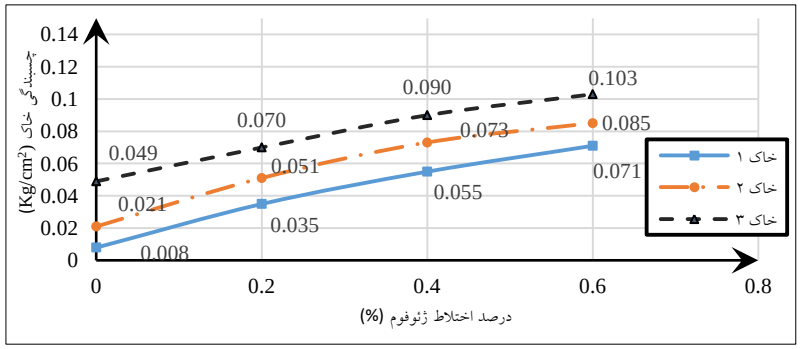
در شکل ۹ نیز نمودار زاویهٔ اصطکاک داخلی بر حسب درصد اختلاط ژئوفوم برای خاک‌های آزمایش شده نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل پیدا است با افزایش مقدار ژئوفوم میزان زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. نکتهٔ قابل تأمل کاهش شیب نمودارها در درصد اختلاط ۰/٤ درصد است. چنان‌که از شکل پیدا است پس از این درصد اختلاط، سرعت کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌ها کندتر شده است. هم‌چنین با توجه به این شکل میزان زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های ۱ و ۲ و ۳ با افزودن بیش‌ترین میزان ژئوفوم (۰/٦ درصد) به‌ترتیب ۱۵٪، ۱٦٪ و ۱۸ ٪ کاهش داشته است. با توجه به کاهش قابل قبول زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک مخلوط با ژئوفوم و در عوض افزایش چسبندگی و کاهش محسوس وزن‌مخصوص خاک، می‌توان از مخلوط دانه‌های ژئوفوم با خاک در ساخت خاکریزها، دیوارهای حائل و سایر سازه‌های خاکی به‌طور مناسبی بهره برد. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ هم‌چنین می‌توان به پیش‌بینی مقادیر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در صورت استفاده از درصدهای دیگر اختلاط ژئوفوم، با تقریب مناسبی دست یافت.

مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر و پژوهش‌های گذشته

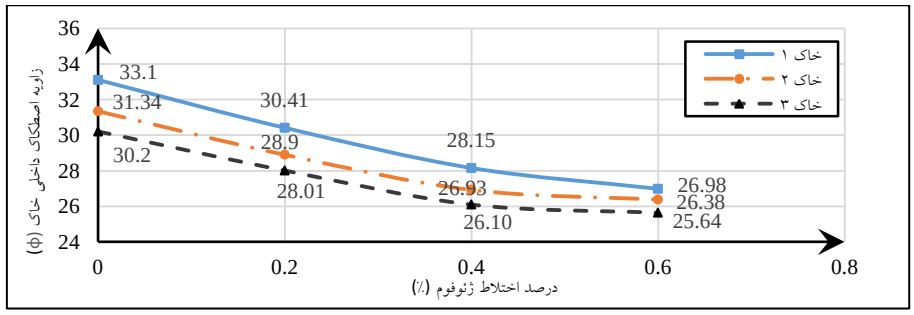
با مقایسه نتایج تحقیق حاضر و برخی پژوهش‌های پیشین می‌توان به اطلاعات جامع‌تری در زمینهٔ تأثیر دانه‌های ژئوفوم بر مشخصات خاک‌ها دست یافت.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]



شکل ۸ نمودار چسبندگی خاک (c) بر حسب درصد برای خاک‌های اختلاط ژئوفوم آزمایش شده



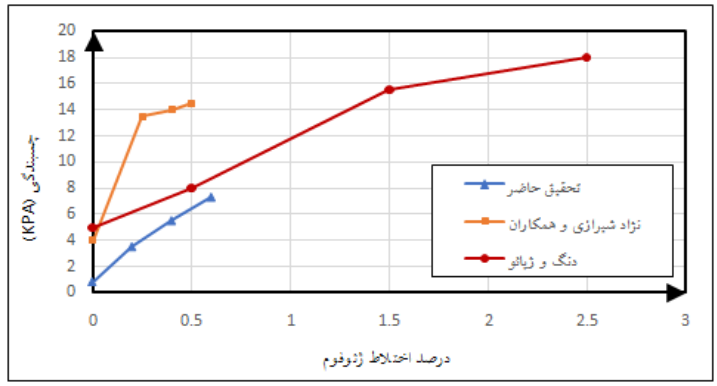
شکل ۹. نمودار زاویهٔ اصطکاک داخلی بر حسب درصد اختلاط ژئوفوم برای خاک‌های آزمایش شده

چنان‌که قبلاً بیان شد، دنگ و ژیائو [٦] با انجام چندین آزمایش سه‌محوری زهکشی شده و برش مستقیم روی ماسه خالص و مخلوط ماسه و دانه‌های ژئوفوم با درصدهای وزنی مختلف، به بررسی تأثیر پلی‌استایرن انبساط‌پذیر پرداختند. خاک آزمایش شده در تحقیق آنها از نوع ماسه خالص خوب دانه‌بندی شده با چگالی ویژه ۲/٦۲ بوده است و از درصدهای اختلاط ۰، ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ ژئوفوم استفاده شده است. نژادشیرازی و همکاران [۱۰] نیز به بررسی رفتار مقاومتی مخلوط خاک و ژئوفوم با درصدهای وزنی و اندازه‌های مختلف ژئوفوم پرداختند. آنها از درصدهای اختلاط ژئوفوم ۰، ۰/۲۵، ۰/٤و ۰/۵ بهره گرفته‌اند. خاک آزمایش شدهٔ آنها از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده با چگالی ویژه ۲/۷۰ بوده است.

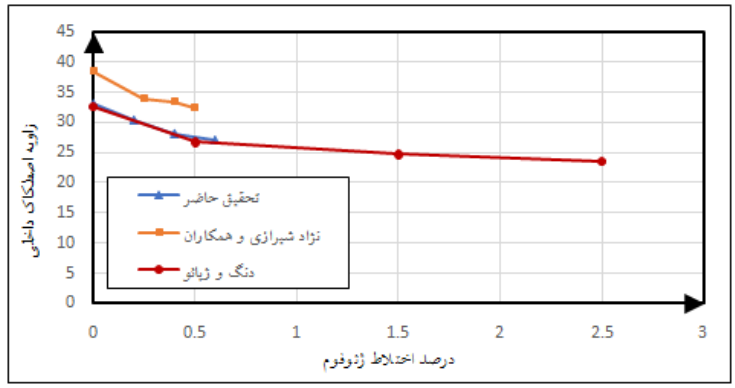
با توجه به این نکته که خاک استفاده شده در تحقیق حاضر ماسه بد دانه‌بندی شده با چگالی ویژه ۲/٦۵ بوده است، مقایسهٔ بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج دو تحقیق مذکور می‌توان به بررسی اثر نوع دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای پرداخت. مقایسهٔ بین نتایج این محققان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

و تحقیق حاضر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای مقایسه، تنها به مقایسهٔ نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم در همهٔ تحقیقات پرداخته شده است.



شکل ۱۰. مقایسهٔ نتایج چسبندگی بین تحقیق حاضر و پژوهش‌های گذشته



شکل ۱۱. مقایسهٔ نتایج زاویهٔ اصطکاک داخلی بین تحقیقات گذشته

مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که در هر سه تحقیق میزان ضریب چسبندگی خاک با اضافه شدن مقدار ژئوفوم افزایش یافته و هم‌چنین مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی مخلوط با افزایش درصد وزنی ژئوفوم کاهش می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که سرعت تغییرات در تحقیقات مذکور با یک‌دیگر متفاوت است که این تفاوت‌ها ناشی از تغییر در نوع خاک‌ها و هم‌چنین درصدهای اختلاط ژئوفوم بوده است.

با توجه به شکل ۱۰ که در آن به مقایسه تغییرات ضریب چسبندگی در تحقیق حاضر و دو تحقیق دیگر پرداخته شده است، می‌توان نتیجه گرفت اگرچه افزودن درصدهای بیش‌تر

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

ژئوفوم باعث افزایش چسبندگی خاکهای ماسه‌ای می‌شود ولی میزان افزایش در خاک‌های مختلف متفاوت است. ضریب چسبندگی در تحقیقات دنگ و ژیائو به‌ازای افزودن ۲/۵ درصد ژئوفوم به خاک حدود ۳/۵ برابر و در تحقیقات نژاد شیری و همکاران به‌ازای افزودن ۰/۵ درصد ژئوفوم به خاک حدود ۳/٦ برابر شده است. این در حالی است که در خاک ماسه بد دانه‌بندی شده تحقیق حاضر به‌ازای افزایش ۰/٦ درصد ژئوفوم به خاک، ضریب چسبندگی خاک حدود ۹ برابر شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که هرچه چسبندگی اولیه خاک ماسه‌ای کم‌تر و دارای دانه‌بندی یک‌نواخت‌تری باشد، تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش ضریب چسبندگی خاک بیش‌تر است. نکتهٔ قابل توجه دیگر در این شکل این است که در هر سه تحقیق با بیش‌تر شدن درصدهای افزایش ژئوفوم به خاک، سرعت افزایش چسبندگی خاک‌ها کاهش یافته است.

در شکل ۱۱ به مقایسهٔ تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های ماسه‌ای مختلف در اثر اضافه کردن دانه‌های ژئوفوم پرداخته شده است. با مقایسه نمودارهای این شکل مشاهده می‌شود که میزان زاویهٔ اصطکاک داخلی در هر سه خاک کاهش یافته است. نکته قابل توجه که در هر سه نمودار به چشم می‌خورد این است که سرعت کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌ها با افزودن درصدهای بیش‌تر ژئوفوم به خاک کاهش یافته است. نکته مهم دیگر این است که در هر سه نوع خاک به‌ازای افزایش حدود ۰/۵ درصد ژئوفوم، زاویهٔ اصطکاک خاک حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که روند کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی برای خاک‌های ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده و بد دانه‌بندی شده تقریباً مشابه است.

نتیجه‌گیری

۱. با افزودن دانه‌های ژئوفوم به خاک، چسبندگی ظاهری خاک‌های آزمایش شده افزایش و زاویهٔ اصطکاک داخلی آنها کاهش می‌یابد. هم‌چنین افزودن درصدهای بیش‌تر ژئوفوم به خاک موجب افزایش بیش‌تر چسبندگی ظاهری و کاهش بیش‌تر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک خواهد شد.

۲. استفاده از دانه‌های ژئوفوم باعث کاهش وزن مخصوص خاک‌ها شده است. این کاهش وزن مخصوص در اثر افزودن درصدهای بیش‌تر ژئوفوم به خاک محسوس‌تر است. هم‌چنین به‌دلیل جذب آب به‌وسیلهٔ دانه‌های ژئوفوم با

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

افـزایش مقـدار ژئوفـوم در مخلـوط خـاک و ژئوفـوم میـزان رطوبـت بهینـه افـزایش می‌یابد.

۳. با افزایش تنش‌های قـائم در یـک جابـه‌جـایی برشـی، مقاومـت برشـی مخلـوط خـاک و ژئوفوم افزایش می‌یابـد. هـم‌چنـین بـا افـزایش درصـد ژئوفـوم در خـاک، مقاومـت برشـی خـاک کـاهش مـی‌یابـد. میـزان کـاهش مقاومـت برشـی خـاک‌هـای حـاوی درصدهای مختلف ژئوفـوم در مقایسـه بـا خـاک تنهـا چنـدان محسـوس نبـوده و در بدترین حالت حدود ۱۲ درصد است.

٤. درصـورت افـزایش درصـد اخـتلاط از حـدود ۰/٤ درصـد سـرعت کـاهش زاویـهٔ اصطکاک داخلی خاک‌ها کاهش می‌یابد.

۵. بـا اسـتفاده از آزمـایش‌هـای انجـام شـده مـی‌تـوان مقـادیر چسـبندگی و زاویـهٔ اصطکاک داخلـی خـاک‌هـای آزمـایش شـده را در صـورت اخـتلاط بـا درصـدهـای دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد.

٦. با مقایسهٔ نتایج محققان مختلـف بـا تحقیـق حاضـر مـی‌تـوان متوجـه شـد کـه هرچـه چسـبندگی اولیـه خـاک‌هـای ماسـه‌ای کـم‌تـر و دارای دانـه‌بنـدی یـک‌نواخـت‌تـری باشد، تـأثیر افـزودن ژئوفـوم در افـزایش ضـریب چسـبندگی خـاک بـیش‌تـر خواهـد بود.

۷. رونـد کـاهش زاویـهٔ اصـطکاک داخلـی بـرای خـاک‌هـای ماسـه‌ای خـوب دانـه‌بنـدی شده و بد دانه‌بندی شده تقریباً مشابه است.

۸. بـا توجـه بـه تـأثیر اسـتفاده از دانـه‌هـای ژئوفـوم در کـاهش وزن مخصـوص خـاک، افـزایش چسـبندگی خـاک و هـم‌چنـین تـأثیر نـه‌چنـدان محسـوس آن در کـاهش زاویـهٔ اصـطکاک داخلـی خـاک مـی‌تـوان از ایـن ترکیـب در سـاخت خـاکریزهـا و دیوارهای حائل و سایر سازه‌های ژئوتکنیکی استفاده کرد.

منابع

1. Frydenlund T. E., Aaboe R., "Expanded Polystyrene the Light Solution", proceedings of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, Japa.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]

2. Miki G., "Ten Year History of EPS Method in Japan and is future Challenges". Proceedings Of International Symposium On Eps Construction Method, Tokyo (1996).
3. Negussey D., "Design Parameters For EPS Geofoam", Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 47, No. 1 (2007) 161-170.
4. Illuri, H. K., "Development of soil-EPS mixes for geotechnical applications", Ph.D thesis, Queensland University of Technology, Australia (2007).
5. Aytekin M., Banu Ikizler S., Nas E., "Laboratory Study of Expanded polystyrene (EPS) geofoam used with expansive soils", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26 (2008) 189-195.
6. Deng A., Xiao Y., "Shear Behavior of Sand-Expanded PolyStyrene Beads Lightweight Fills" Jcent. South univ. Technoul, 15 (2) (2008) 174-179.
7. Gao H., Liu J., Liu H., "Geotechnical properties of EPS composite soil", International Journal of Geotechnical Engineering (2011) 69-77.

۸. گلپذیر ا.، فرهنگ ب.، "تأثیر استفاده از مخلوط خاک و ژئوفوم در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوارهای حائل"، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی دانشکدهٔ مهندسی عمران.دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران (۱۳۹۳).

۹. باغانیان س.، آروین م.، "بررسی پایداری دیوارهای حائل وزنی با پشت ریز مخلوط ماسه–دانه‌های ژئوفوم"، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور. دانشگاه ارومیه (۱۳۹۳).

۱۰. نژادشیرازی ع.، حیدریان ه.، جم م.، "بررسی رفتار مقاومتی مخلوط خاک و ژئوفوم با درصدهای وزنی و اندازه‌های مختلف ژئوفوم با استفاده از آزمایش برش مستقیم و تک محوری"، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (۱۳۹٤).

۱۱. عباسی ف.، کریمپور فرد،ک.، "بررسی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و ژئوفوم در آزمایش سه محوری"، اولین مسابقه کنفرانس بین المللی جامع علوم مهندسی ایران. بندر انزلی (۱۳۹۵).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-05-15]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.2.0]