

# 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 ۹۷/۰۷/۲۴ پذیرش ۹۷/۱۰/۰۴

## 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 و ۳ نوع خاک ماسه‌ای بر وزن مخصوص و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها پرداختیم. خاک‌های استفاده شده، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ۱۰ درصد لای و ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ۲۰ درصد لای است. دانه‌های ژئوفوم همگی ریزدانه است که از الک شماره ۱۰ عبور کرده‌اند و مقادیر وزنی اضافه شده آن‌ها به خاک ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ 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، زاویه 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 ۰/۴ درصد ژئوفوم با خاک، نرخ رشد چسبندگی خاک‌ها با سرعت کندتری افزایش یافته و نرخ کاهش زاویه اصطکاک داخلی نیز کندتر می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌های آزمایش شده را در صورت اختلاط با درصد‌های دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد.

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

### مقدمه

ژئوفوم‌ها، پرکننده‌های سبک‌وزنی هستند که برای بهبود برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها نظیر تورم‌زایی، کاهش وزن مخصوص و غیره استفاده می‌شوند. ژئوفوم‌ها به‌عنوان ماده‌ای پرکننده سبک‌وزن در مکان‌هایی که قرضه 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].

دامنه 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 ۴۵/۷ کیلوگرم بر مترمکعب است و بیشینه مقاومت فشاری این مواد در کرنش‌های ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ به‌ترتیب برابر با ۱۲۸، ۳۰۰ و ۳۴۵ کیلوپاسکال در دانسیته  $45/7 \text{ kg/m}^3$  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 ۵/۶ 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 به‌وسیله پژوهش‌گران مختلف بررسی شده است.

میکی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۶ رفتار برشی سطح مشترک ژئوفوم به ژئوفوم و ژئوفوم به ماسه را با ژئوفوم‌های با چگالی  $21 \text{ kg/m}^3$ ، و در دستگاه برش مستقیم بررسی کرد. وی زاویه اصطکاک سطوح مشترک ژئوفوم به ژئوفوم، ژئوفوم به لایه نازک ماسه و ژئوفوم به لایه ضخیم‌تر ماسه را به‌ترتیب حدود ۳۳ درجه، ۳۵ درجه و ۲۹ درجه به‌دست آورد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که وجود ژئوفوم باعث بهبود مشکلات ناشی از متورم شونده‌گی خاک‌های رس می‌شود [۲].

1. Miki, G

نگوسی<sup>۱</sup> (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. با توجه به آن که با افزایش سطح کرنش در یک دانسیته ثابت، مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، نگوسی رابطه‌ای بین مقاومت و دانسیته در سطح کرنش‌های گوناگون ارائه داد [۳].

ایلاری<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) مقاومت برشی مخلوط ماسه-بتونیت-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 بتونیت استفاده کرد. مخلوط‌های یاد شده، سپس با نسبت‌های مختلف وزنی ژئوفوم به خاک در حالت خشک به صورت همگن و در رطوبتی برابر رطوبت بهینه مخلوط شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده 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<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) با آزمایش خاک متورم‌شونده بدون ژئوفوم و با وجود رول‌های ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف، فشار تورم جانبی و قائم را به دست آوردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده نقش مؤثر ژئوفوم در کاهش فشار جانبی خاک رس بر دیوار حائل است [۵].

دنگ و ژیانو<sup>۴</sup> 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 زاویه اصطکاک مخلوط به‌ویژه در نسبت‌های وزنی پایین ژئوفوم می‌شود [۶].

هونگمی گا و همکاران<sup>۵</sup> (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.

یافته با انجام آزمایش‌های متعدد پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهش‌گران نشان داد که خاک کامپوزیتی پلی استایرن انبساط یافته به‌طور چشم‌گیری باعث کاهش فشار جانبی زمین می‌شود. آنها نشان دادند که ویژگی‌های منحصر به فرد این ماده، از جمله وزن کم واحد و سختی زیاد، باعث مقاومت در برابر ارتعاشات ناشی از حرکت وسایل نقلیه 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 نگهدارنده 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 نشان‌دهنده افزایش قابل توجه همه 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 ۱۳۹۴ 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، زاویه 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].

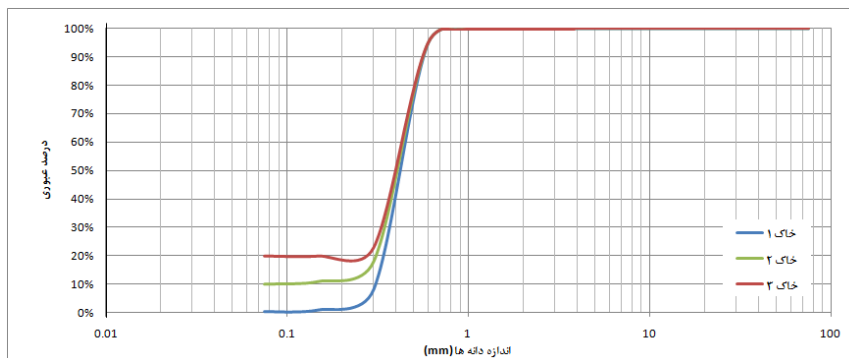
عباسی و کریمی‌پورفرد (۱۳۹۵) به بررسی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه پلی‌استایرن انبساط یافته با استفاده از آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده پرداختند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که استفاده از دانه‌های ژئوفوم در ترکیب با ماسه رفتار آن را پیچیده کرده است و هم‌چنین باعث افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک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

به دلیل مزایای زیاد استفاده از ژئوفوم در ترکیب با خاک، این تحقیق به دنبال 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 بدانه‌بندی شده و ۴ درصد اختلاط مختلف ژئوفوم استفاده شده است. نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیق‌های گذشته تغییر نوع خاک و استفاده از خاک ماسه بدانه‌بندی شده، جدا کردن اندازه‌های دانه‌های ژئوفوم بر حسب قطر آن‌ها و بررسی تأثیر اضافه کردن درصد‌های مختلف ژئوفوم بر بهبود خصوصیات خاک ماسه بدانه‌بندی شده است که برای اولین بار در این تحقیق انجام شده است.

### برنامه 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  $10 \times 10$  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 ۱۶۱ فیروزکوه با چگالی  $2/65$  بوده است که طبق طبقه‌بندی به روش متحده و استاندارد ASTM D2487 خاکی بدانه‌بندی 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 ۱۶۱ فیروزکوه با نام خاک ۱، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ۱۰ درصد لای با نام خاک ۲ و ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ۲۰ درصد لای با نام خاک ۳ نام‌گذاری شده‌اند.



شکل ۱. دانه‌بندی خاک‌های آزمایش شده

فوم پلی‌استایرن دارای وزن مخصوص ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در این پژوهش دانه‌های ژئوفوم با نسبت‌های وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ درصد و با اندازه 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 وزن مخصوص خاک

جدول ۱ نشان‌دهنده وزن مخصوص خشک هر سه نوع خاک آزمایش شده در اختلاط با ژئوفوم است. همه آزمایش‌های تراکم خاک طبق استاندارد ASTM D698 انجام شده‌اند. هم‌چنین در جدول ۴ میزان رطوبت بهینه برای هر خاک و اختلاط که از نتایج آزمایش‌های تراکم به دست آمده، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دانه‌های ژئوفوم در کاهش وزن مخصوص خاک بسیار چشم‌گیر و محسوس است. این کاهش وزن مخصوص در اثر افزودن درصد‌های بیش‌تر ژئوفوم به خاک محسوس‌تر است. هم‌چنین به دلیل جذب آب به وسیله دانه‌های ژئوفوم با افزایش مقدار ژئوفوم در مخلوط خاک و ژئوفوم میزان رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

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

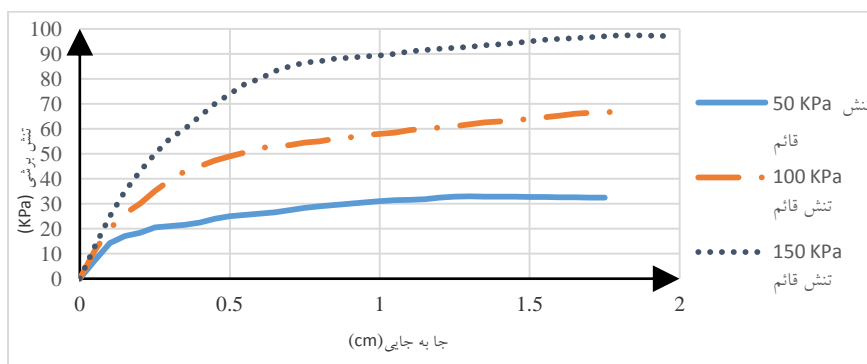
وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	رطوبت بهینه (%)	درصد ژئوفوم	نوع خاک
۱/۶۶	۱۵/۵۰	۰	خاک ۱
۱/۵۵	۱۵/۹۰	۰/۲	
۱/۳۸	۱۶/۰۵	۰/۴	
۱/۲۰	۱۷/۲۰	۰/۶	
۱/۷۰	۱۲/۰۰	۰	خاک ۲
۱/۶۰	۱۲/۹۰	۰/۲	
۱/۴۴	۱۳/۵۰	۰/۴	
۱/۳۰	۱۵/۵۰	۰/۶	
۱/۸۹	۹/۶۰	۰	خاک ۳
۱/۸۰	۱۵/۵۰	۰/۲	
۱/۶۴	۱۱/۷۰	۰/۴	
۱/۴۴	۱۲/۹۰	۰/۶	

## ویژگی‌های مقاومتی مخلوط خاک-ژئوفوم

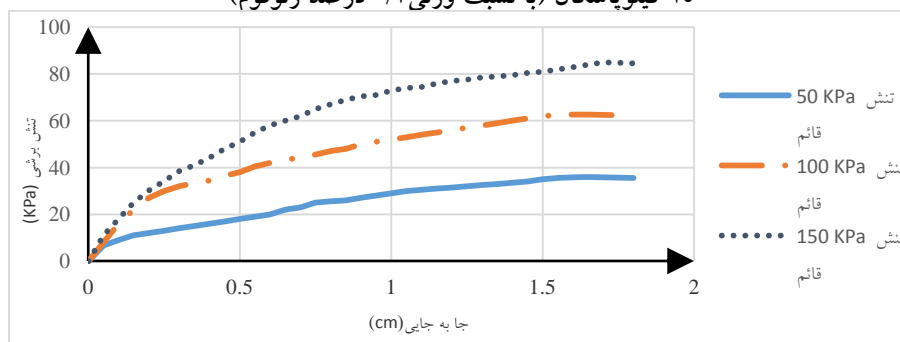
شکل‌های ۲ تا ۴ نمودارهای تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک و ژئوفوم را برای سه نوع خاک آزمایش شده در اختلاط با ۰/۲ درصد وزنی ژئوفوم تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهند. مطابق این اشکال در یک جابه‌جایی برشی با افزایش تنش‌های قائم، تنش برشی افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان مشاهده کرد نمودارها به سه قسمت تقسیم شده‌اند، که شامل ناحیه الاستیک اولیه، ناحیه تسلیم و ناحیه گسیختگی هستند. در ناحیه اولیه، روابط بین تنش برشی و جابه‌جایی برشی تقریباً خطی است. در ناحیه تسلیم، هنگامی که جابه‌جایی برشی از مقدار بیشینه جابه‌جایی برشی الاستیک بیش‌تر شد، نمودار به سمت محدب شدن پیش می‌رود. در ناحیه گسیختگی، هم جابه‌جایی برشی و هم تنش برشی پیوسته به آرامی 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 در تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. نتایج حاکی از

آن است که با افزایش درصد ژئوفوم در خاک، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. این روند روی هر سه نمونه خاک قابل مشاهده است. از آن‌جا که 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.

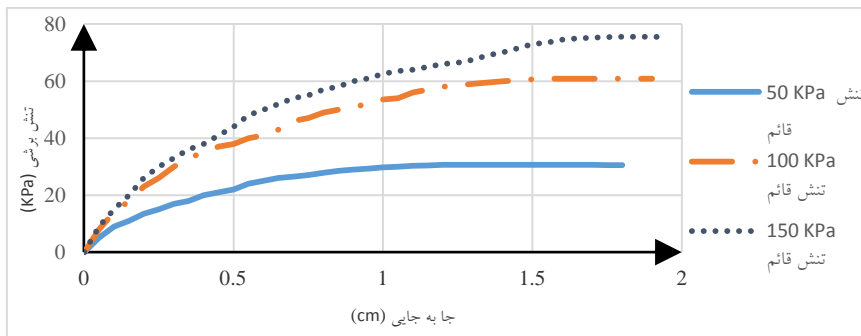


شکل ۲. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۱ و ژئوفوم در تنش‌های ۱۰۰، ۵۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال (با نسبت وزنی ۰/۲ درصد ژئوفوم)

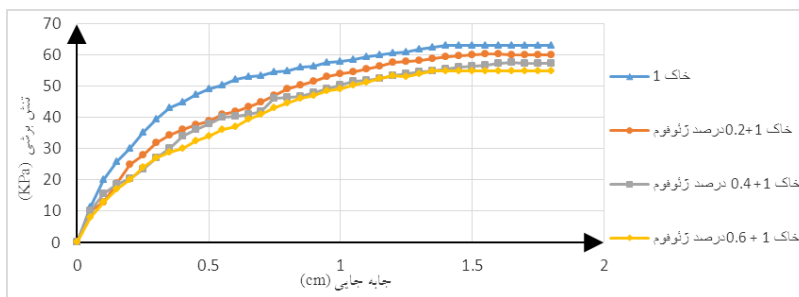


شکل ۳. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۲ و ژئوفوم در تنش‌های ۱۰۰، ۵۰، ۱۵۰ کیلو پاسکال (با نسبت وزنی ۰/۲ درصد ژئوفوم)

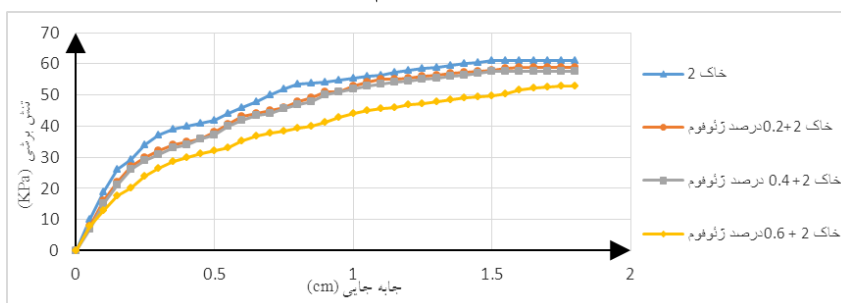




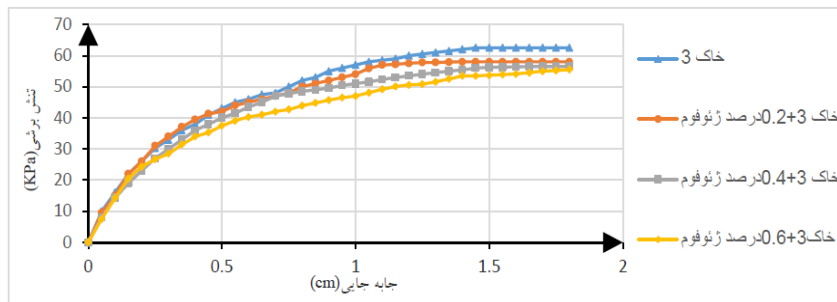
شکل ۴. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی مخلوط خاک ۳ و ژئوفوم در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلو پاسکال (با نسبت وزنی ۰/۲ درصد ژئوفوم)



شکل ۵. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی برای مخلوط خاک ۱ و ژئوفوم در درصد‌های وزنی مختلف تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال



شکل ۶. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی برای مخلوط خاک ۲ و ژئوفوم در درصد‌های وزنی مختلف تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال



شکل ۷. 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 زاویه 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 زاویه اصطکاک داخلی مخلوط کاهش یافته است. علاوه بر آن با بیش‌تر شدن درصد‌های اختلاط، میزان افزایش چسبندگی ظاهری مخلوط و کاهش زاویه اصطکاک داخلی بیش‌تر است.

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

نوع خاک	درصد ژئوفوم	چسبندگی ( $\text{kg/cm}^2$ )	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
خاک ۱	۰	۰/۰۰۸	۳۳/۱۰
	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰/۴۱
	۰/۴	۰/۰۵۵	۲۸/۱۵
	۰/۶	۰/۰۷۳	۲۷/۰۷
خاک ۲	۰	۰/۰۲۱	۳۱/۳۴
	۰/۲	۰/۰۵۱	۲۸/۹۰
	۰/۴	۰/۰۷۱	۲۷/۴۳
	۰/۶	۰/۰۸۵	۲۶/۳۸
خاک ۳	۰	۰/۰۴۹	۳۰/۲۰
	۰/۲	۰/۰۷۰	۲۸/۰۱
	۰/۴	۰/۰۹۰	۲۶/۱۰
	۰/۶	۰/۱۰۳	۲۵/۶۴

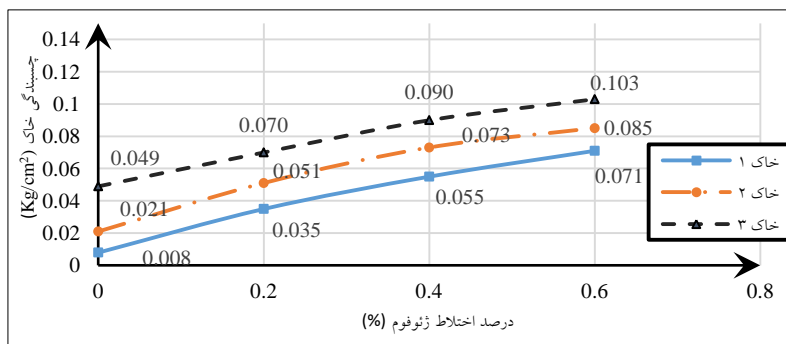
## تحلیل نتایج

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 ۴۰/۴، 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، به طوری که این افزایش چسبندگی در مورد خاک ۲ حدود ۴ 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.

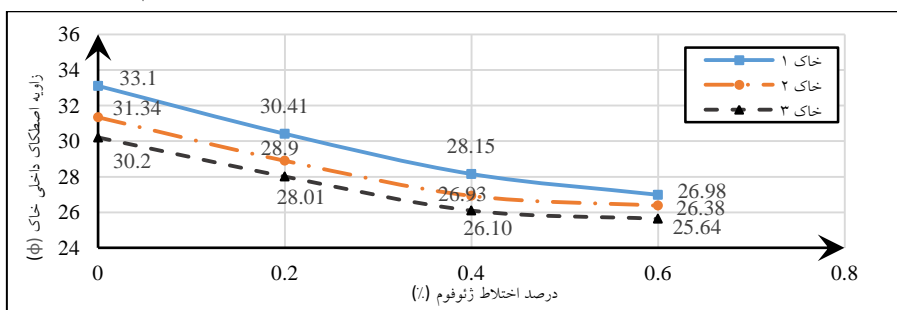
در شکل ۹ نیز نمودار زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درصد اختلاط ژئوفوم برای خاک‌های آزمایش شده نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل پیدا است با افزایش مقدار ژئوفوم میزان زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. نکته قابل تأمل کاهش شیب نمودارها در درصد اختلاط ۰/۴ درصد است. چنان‌که از شکل پیدا است پس از این درصد اختلاط، سرعت کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها کندتر شده است. هم‌چنین با توجه به این شکل میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های ۱ و ۲ و ۳ با افزودن بیش‌ترین میزان ژئوفوم (۰/۶ درصد) به ترتیب ۱۵٪، ۱۶٪ و ۱۸٪ کاهش داشته است. با توجه به کاهش قابل قبول زاویه اصطکاک داخلی خاک مخلوط با ژئوفوم و در عوض افزایش چسبندگی و کاهش محسوس وزن مخصوص 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 زاویه اصطکاک داخلی خاک در صورت استفاده از درصدهای دیگر اختلاط ژئوفوم، با تقریب مناسبی دست یافت.

## مقایسه نتایج تحقیق حاضر و پژوهش‌های گذشته

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



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

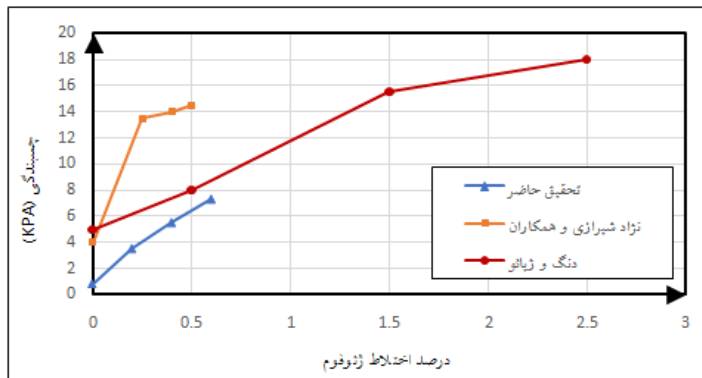


شکل ۹. نمودار زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درصد اختلاط ژئوفوم برای خاک‌های آزمایش شده

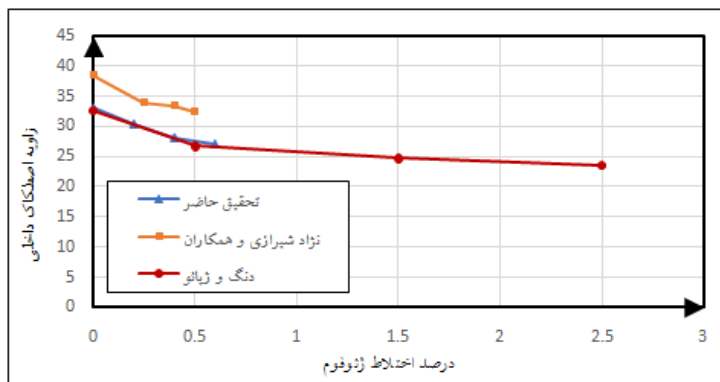
چنان‌که قبلاً بیان شد، دنگ و ژیانو [۶] با انجام چندین آزمایش سه‌محوری زهکشی شده و برش مستقیم روی ماسه خالص و مخلوط ماسه و دانه‌های ژئوفوم با درصدهای وزنی مختلف، به بررسی تأثیر پلی‌استایرن انبساط‌پذیر پرداختند. خاک آزمایش شده در تحقیق آنها از نوع ماسه خالص خوب دانه‌بندی شده با چگالی ویژه  $2/62$  بوده 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، ۰/۴ و ۰/۵ بهره گرفته‌اند. خاک آزمایش شده آنها از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده با چگالی ویژه  $2/70$  بوده است.

با توجه به این نکته که خاک استفاده شده در تحقیق حاضر ماسه بد دانه‌بندی شده با چگالی ویژه  $2/65$  بوده است، مقایسه بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج دو تحقیق مذکور می‌توان به بررسی اثر نوع دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای پرداخت. مقایسه بین نتایج این محققان

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



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



شکل ۱۱. مقایسه نتایج زاویه 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 زاویه 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 تفاوت 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

ژئوفوم باعث افزایش چسبندگی خاکهای ماسه‌ای می‌شود ولی میزان افزایش در خاک‌های مختلف متفاوت است. ضریب چسبندگی در تحقیقات دنگ و ژیانو 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 ۳/۶ برابر شده است. این در حالی است که در خاک ماسه بد دانه‌بندی شده تحقیق حاضر به‌ازای افزایش ۰/۶ درصد ژئوفوم به خاک، ضریب چسبندگی خاک حدود ۹ برابر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچه چسبندگی اولیه خاک ماسه‌ای کم‌تر و دارای دانه‌بندی یک‌نواخت‌تری باشد، تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش ضریب چسبندگی خاک بیش‌تر است. نکته 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 مقایسه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های ماسه‌ای مختلف در اثر اضافه کردن دانه‌های ژئوفوم پرداخته شده است. با مقایسه نمودارهای این شکل مشاهده می‌شود که میزان زاویه 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 زاویه 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، زاویه اصطکاک خاک حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که روند کاهش زاویه 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 زاویه اصطکاک داخلی آنها کاهش می‌یابد. همچنین افزودن درصدهای بیش‌تر ژئوفوم به خاک موجب افزایش بیش‌تر چسبندگی ظاهری و کاهش بیش‌تر زاویه 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 به‌وسیله دانه‌های ژئوفوم با

افزایش مقدار ژئوفوم در مخلوط خاک و ژئوفوم میزان رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش تنش‌های قائم در یک جابه‌جایی برشی، مقاومت برشی مخلوط خاک و ژئوفوم افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش درصد ژئوفوم در خاک، مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. میزان کاهش مقاومت برشی خاک‌های حاوی درصدهای مختلف ژئوفوم در مقایسه با خاک تنها چندان محسوس نبوده و در بدترین حالت حدود ۱۲ درصد است.

۴. در صورت افزایش درصد اختلاط از حدود ۰/۴ درصد سرعت کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها کاهش می‌یابد.

۵. با استفاده از آزمایش‌های انجام شده می‌توان مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های آزمایش شده را در صورت اختلاط با درصدهای دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد.

۶. با مقایسه نتایج محققان مختلف با تحقیق حاضر می‌توان متوجه شد که هرچه چسبندگی اولیه خاک‌های ماسه‌ای کم‌تر و دارای دانه‌بندی یک‌نواخت‌تری باشد، تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش ضریب چسبندگی خاک بیش‌تر خواهد بود.

۷. روند کاهش زاویه اصطکاک داخلی برای خاک‌های ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده و بد دانه‌بندی شده تقریباً مشابه است.

۸. با توجه به تأثیر استفاده از دانه‌های ژئوفوم در کاهش وزن مخصوص خاک، افزایش چسبندگی خاک و هم‌چنین تأثیر نه‌چندان محسوس آن در کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌توان از این ترکیب در ساخت خاکریزها 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.

2. Miki G., "Ten Year History of EPS Method in Japan and its future Challenges". Proceedings Of International Symposium On Eps Construction Method, Tokyo (1996).
3. Negussey D., "Design Parameters For EPS Geofom", 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. Aytakin M., Banu Ikizler S., Nas E., "Laboratory Study of Expanded polystyrene (EPS) geofom 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 دانشکده 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 بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (۱۳۹۴).
۱۱. عباسی ف.، کریمیپور فرد ک.، "بررسی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و ژئوفوم در آزمایش سه محوری"، اولین مسابقه کنفرانس بین‌المللی جامع علوم مهندسی ایران. بندرانزلی (۱۳۹۵).