

# بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس مخلوط شده با ذرات ژئوفوم

۱- سپهر ساعدی: گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران. [saedi.sepehr@gmail.com](mailto:saedi.sepehr@gmail.com)

۲- روزبه دبیری: (نویسنده مسئول) گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران. [rouzbeh\\_dabiri@iaut.ac.ir](mailto:rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir)

۳- لاریسا خدادادی

استادیار، گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[Lkhodadadi@iaut.ac.ir](mailto:Lkhodadadi@iaut.ac.ir)

## چکیده

امروزه استفاده از مواد نوین و جدید جهت بهبود ظرفیت باربری خاک کاربرد فراوانی دارد. نوعی از مصالح جدید مورد استفاده در این زمینه ژئوسنتتیک ها است. هدف اصلی در تحقیق حاضر بررسی تاثیر میزان ذرات ژئوفوم و تغییرات رطوبت بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک رسی است. میزان ذرات ژئوفوم ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی بوده و تغییرات رطوبت در خاک مورد مطالعه ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی میزان تاثیر گذاری ذرات ژئوفوم بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رسی مخلوط شده با ژئوفوم آزمایشگاهی تراکم، مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم و نفوذ پذیری انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق نشان دهنده آن است که در حالت کلی با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی ژئوفوم به خاک رس به همراه رطوبت ۱۴٪ سبب بهبود وزن مخصوص خشک حداکثر، کاهش نفوذپذیری و افزایش توانایی برابری خاک مخلوط شده است.

## کلمات کلیدی:

رس، ژئوفوم، بهسازی، رطوبت، خاصیت خمیری.

## **Study of Geotechnical Properties of Clay mixed with Geofom Particles**

### **Abstract**

Nowadays new materials for improving bearing capacity of soils are widely used. Kind of new materials used in this regard are geosynthetics. Geofom panel type of geosynthetic materials is useful and alternative for backfill in retaining wall or pavement layers. Main idea in this research is study geofom particles and moisture effects on improvement bearing capacity of clayey soil. Geofom particles effects on clay in 0.05, 0.1, 0.2, and 0.3% percent were considered. Also, moisture were changed in 10, 12, 14, 16, 18 and 20 percent in specimens. In order to evaluating geofom particles influence in geotechnical properties of clayey soil some laboratory tests such as compaction, uniaxial strength, direct shear and permeability tests were performed. Results of this study showed that clay specimens with 0.05% geofom particles along with 14 % water content have optimum geotechnical behavior. As, maximum dry density went up, permeability decreased and shear strength of specimens increased.

**Keywords:** Clay, Geofom, Improvement, Moisture, Plasticity properties.

## ۱- مقدمه

ژئوفوم آن دسته از مصالح ژئوسنتتیک بوده که از فوم تشکیل شده است. بلوکهای ژئوفوم به عنوان یکی از مصالح ژئوسنتتیک به دلیل وزن حجمی ناچیز در برابر وزن حجمی خاک و همچنین تراکم‌پذیری بالا، اجرای سریع و آسان، عایق حرارت، مقاوم در برابر جذب آب [۱] قابلیت کاربرد بالایی در مهندسی ژئوتکنیک دارد که می‌توان از آن‌ها در دیوارهای حائل، پروژه‌های راه‌سازی به عنوان یک پرکننده سبک، کاهش تنش‌های ناشی از بارهای قائم در لایه‌های زیرین استفاده نمود [۱]. [۲]. در زمینه کاربرد ژئوفوم بصورت دانه‌ای و یا بلوک جهت بهسازی خاک و ابنیه‌های ژئوتکنیکی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. اولین استفاده از ژئوفوم بعنوان خاکریز سبک در ژاپن به سال ۱۹۸۵ مربوط می‌شود و این کشور در این زمینه تقریباً ۵۰ درصد از کل مصرف جهان را به خود اختصاص داده است. استفاده از مصالح خاکریز سبک ژئوفومی به عنوان یک گزینه برای اصلاح خاک بستر از سال ۱۹۹۰ میلادی به دلایل موجود مورد توجه قرار گرفته است: اولاً، زمان کوتاه ساخت خاکریزهای سبک نسبت به روشهای دیگر تثبیت بستر. ثانیاً، کاهش نشست بستر و افزایش ظرفیت باربری آن در مقایسه با استفاده از مصالح دیگر جهت ساخت خاکریزها [۳]. یکی از مهمترین تحقیقات در این زمینه در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط هورواث انجام شد. وی بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش مصالح ژئوفوم

را به چهار بخش خطی و الاستیک، بخش پلاستیک با مقاومت فشاری تسلیم مشخص، بخش خطی و سخت شونده، بخش غیر خطی و سخت شونده تقسیم بندی نمود [۴]. برای بررسی رفتار ژئوفوم‌ها با دانسیته، اندازه و شکل‌های مختلف آن، تحقیقات ال‌راگی در سال ۲۰۰۰ نشان دهنده آن است که با افزایش اندازه‌ی بلوکهای ژئوفوم، مدول الاستیسیته آن افزایش یافته و رفتار نمونه‌های بزرگتر مقاوم تر از نمونه‌های کوچکتر می‌باشد. [۵]. هازاریکا در تحقیقات خود مشاهده نمود که در دانسیته یکسان با افزایش اندازه بلوک ژئوفوم مقاومت فشاری آن افزایش یابد [۶]. سارادهی بابو و همکاران با انجام آزمایش بر روی بتن‌های سبک وزن نشان دادند که با افزایش دانسیته ژئوفوم، مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی دانه‌های ژئوفوم افزایش می‌یابد [۷]. نگوسی نشان داد که در آزمایش‌های فشاری محصور نشده، با افزایش دانسیته ژئوفوم، مقاومت و مدول بلوکهای ژئوفوم افزایش می‌یابد [۸]. ایلاری با انجام یک سری آزمایشات برش مستقیم و سه محوری رفتار مکانیکی مخلوط ژئوفوم-خاک و تاثیر آن بر کاهش پتانسیل تورم و کاهش حجم خاکهای متورم شونده را ارزیابی نمود. این مطالعات بر روی ماسه و بنتونیت با نسبت‌های اختلاط گوناگون صورت گرفت و خرده ژئوفوم با درصدهای اختلاط وزنی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد به خاک افزوده شد. نتایج آزمایشات برش مستقیم نشان داد که در مخلوط‌های با بنتونیت کمتر، با ازدیاد درصد وزنی ژئوفوم تنش برشی ماکزیمم قابل تحمل افزایش می‌یابد. لیکن در

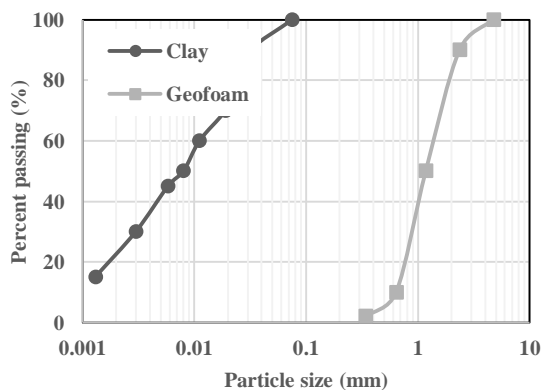
خاکهای خمیری تر عکس این قضیه برقرار است [۹]. آیتکین و همکاران بر روی یک خاک منبسط شونده بدون ژئوفوم و همین خاک با مقدارهای مختلف رول های ژئوفوم آزمایش کردند و فشار تورم جانبی و قائم را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۰]. دنگ و ژیاو ویژگیهای تنش-کرنش مخلوط ماسه-ژئوفوم را با انجام آزمایشهای برش مستقیم و سه محوری استاتیکی بررسی نمودند. آنها تاثیر نسبت اختلاط و فشار محدود کننده را بر رفتار مخلوط خاک دانه ای و ژئوفوم مطالعه کردند. نتایج آزمایشهای سه محوری بر روی سه نسبت اختلاط مختلف (۰/۵٪، ۱/۵٪ و ۲/۵٪) نشان داد که افزایش درصد اختلاط ژئوفوم سبب کاهش مقاومت برشی و افزایش کرنش های حجمی می-گردد. فشار محدود کننده نیز با مقاومت مخلوط رابطه مستقیم دارد. آنها نسبت ۰/۵ درصد را به عنوان درصد اختلاط بهینه پیشنهاد نمودند [۱۱]. نجم الدین و چاناکچی تاثیر افزودن ژئوفوم های پلی استایرن انبساطی اصلاح شده (MEPS) به خاک را بر شاخصهای آزمایش تراکم نظیر درصد رطوبت بهینه و بیشترین دانسیته خشک بررسی نمودند [۱۲]. اصلاح حرارتی ژئوفوم ها، روش جدیدی است که توسط کان و دمیر بوغا برای دستیابی به فوم هایی با دوام، دانسیته و مقاومت بیشتر ارائه گردیده است. نتایج تحقیقات کان و دمیر بوغا نشان داد که با افزایش درصد وزنی ژئوفوم، ماکزیمم وزن مخصوص خشک در هر دو آزمایش ترکم به صورت خطی کاهش می یابد [۱۳]. در زمینه کاربرد ژئوفوم در بهسازی مصالح خاکی در ایران می توان به

مطالعات مختلفی اشاره نمود. بطوریکه در تحقیقات صورت گرفته توسط حیدریان، نژادشیرازی و ناصحی، ذرات ژئوفوم به میزان ۰/۲۵، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی به خاکهای ماسه ای و ۰/۰۲ و ۰/۰۳ درصد به خاک رس افزودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با افزایش درصد ژئوفوم در خاک ماسه ای زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته و میزان چسبندگی ظاهری افزایش یافته است. همچنین در خاک رسی مقاومت فشاری تک محوری با افزایش ژئوفوم روند صعودی از خود نشان می دهد [۱۴]. در تحقیقات صورت گرفته توسط نژادشیرازی، حیدریان و جم، تاثیر ذرات ژئوفوم را بر روی مصالح درشت دانه (مانده روی الک ۴) و ریزدانه (عبوری از الک ۴) صورت گرفت. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با افزایش درصد ژئوفوم در خاک ماسه ای زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته و میزان چسبندگی ظاهری افزایش یافته است. همچنین در خاک رسی مقاومت فشاری تک محوری با افزایش ژئوفوم روند صعودی از خود نشان می دهد [۱۵]. حسن پوری نوتاش و دبیری تاثیر ضخامت، چگالی، ارتفاع و تعداد بلوکهای ژئوفوم در بر روی میزان فشار جانبی وارده بر روی دیوارهای حائل سنگی و طره ای در شرایط بارگذاری استاتیکی مطالعه نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است که قرارگیری بلوکهای ژئوفوم بطور قابل ملاحظه ای می تواند میزان فشار جانبی توده خاک موثر بر دیوار را کاهش دهد [۱۶] [۱۷]. عطری و دبیری در سال ۱۳۹۷، تاثیر ذرات ژئوفوم را بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک مخلوط

باشد. میزان چگالی ویژه مصالح مخلوط مورد مطالعه براساس استاندارد ASTM D854 [۲۴] اندازه گیری شده و برابر ۲/۶۵ است.



شکل (۱): خاک رس مورد مطالعه از منطقه کوی نصر در شرق شهر تبریز.



شکل (۲): منحنی دانه بندی خاک رس و ذرات ژئوفوم مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

نتایج تجزیه شیمیایی خاک رس مورد مطالعه و ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده آن با توجه به آزمون XRF انجام یافته در سازمان زمین شناسی شمال غرب کشور در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی و درصد کانی خاک رسی مورد مطالعه.

ماسه-رس (با درصدهای ۵، ۱۰ و ۳۰) مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که ۰/۰۵ درصد وزنی ژئوفوم سبب بهبود ویژگی های رفتاری شده است [۱۸]. آذری و دبیری در سال ۲۰۱۹، مطالعاتی را در زمینه تاثیر ذرات ژئوفوم را بر روی خاکهای ماسه ای تیز گوشه و گرد گوشه انجام دادند. نتایج نشان داده است ۱۵ درصد وزنی ژئوفوم خصوصیات رفتاری خاک ماسه ای را بهتر نموده است. بویژه این اثر بر روی خاکهای ماسه ای تیز گوشه بیشتر بوده است [۱۹]. همچنین، پیمانیا و دبیری در سال ۲۰۲۰ اثر ذرات ژئوفوم را بر روی خاکهای مخلوط رس-ماسه بادی (با درصدهای ۱۵، ۳۰ و ۵۰) ارزیابی نمودند. مطالعات نشان داد که حضور ۰/۵ درصد وزنی در خاک مخلوط توانایی باربری را افزایش داده است [۲۰]. با مشاهده تحقیقات صورت گرفته می توان دریافت که تاثیر ذرات ژئوفوم بر روی خاک رس با خاصیت خمیری بالا تاکنون انجام نیافته است که از نوع آوری های مطالعه حاضر می باشد. که در ادامه، به شرح آن پرداخته می شود.

## ۲- مواد و مصالح

در تحقیق حاضر، خاک رسی مورد مطالعه از منطقه کوی نصر در شرق شهر تبریز بدلیل خاصیت خمیری نسبتا بالا تهیه گردید (شکل ۱). منحنی دانه بندی خاک طبق استاندارد ASTM D421 [۲۱] و ASTM D422 [۲۲] برآورده شد که مطابق شکل (۲) قابل مشاهده است. طبق طبقه بندی متحد (Unified) خاک رس مورد مطالعه از نوع CH بوده و میزان شاخص خمیری آن طبق استاندارد ASTM D4318-95a [۲۳] ارزیابی شده است که برابر ۳۶ می

شکل (۳): ذرات ژئوفوم مورد استفاده در تحقیق حاضر.

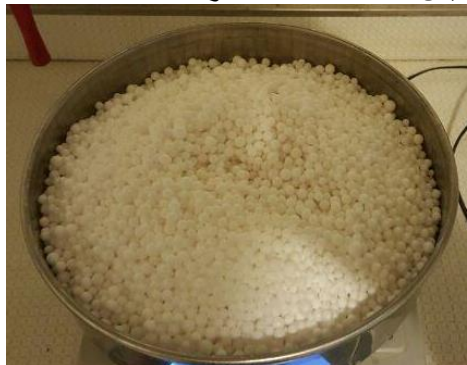
از آنجائیکه ذرات ژئوفوم بصورت پلی استایرن (EPS) باتوجه به نوع کاربردهای آن طیف فرآیندهای مشخص با چگالی ها و شکل های مختلف تولید می شوند، بنابراین چگالی ژئوفوم می تواند به عنوان یک شاخص اصلی در مسائل مربوطه به طراحی و بهسازی خاک مطرح شود. بنابراین مقاومت فشاری، برشی، پیچشی، خمشی، سختی، رفتار خزشی و دیگر خواص مکانیکی ژئوفوم وابسته به چگالی می باشد. مشخصات ذرات ژئوفوم مورد استفاده از نوع EPS15 بوده که از تولیدات کارخانه اپکو (EPCO) هست [۲۵]. مشخصات فنی آن طبق جدول (۳) ارائه شده است. لازم بذکر است که میزان ذرات ژئوفوم افزوده شده به مصالح مورد مطالعه ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد وزنی است.

ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی موجود در خاک
SiO <sub>2</sub>	۵۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۸
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۶۵
CaO	۱/۳
MgO	۰/۵
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۴
Na <sub>2</sub> O	۰/۱
K <sub>2</sub> O	۰/۲
SO <sub>3</sub>	۵/۲
سایر	۱۱/۱

جدول ۲: درصد کانی‌ها در خاک رس مورد مطالعه.

عناصر	درصد وزنی
کوارتز	۲۲
کلسیت	۴۱
دولومیت	۱۳
فلدسپار	۸
هماتیت	۳
گچ	۴
سایر مواد معدنی رس	۷

با توجه به اینکه هدف تحقیق حاضر بررسی تاثیر تغییر رطوبت بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با ذرات ژئوفوم می باشد، ذرات مورد استفاده مطابق شکل (۳) قابل مشاهده بوده و منحنی دانه بندی ذرات ژئوفوم مطابق شکل (۲) ارائه شده است.



جدول (۳): مشخصات فنی ذرات ژئوفوم کارخانه اپکو [۲۵].

استاندارد ASTM D6812 [۲۷]				واحد	خاصیت
EPS2 2	EPS1 9	EPS1 5	EPS1 2		
۲۱/۶	۱۸/۴	۱۴/۴	۱۱/۲	kG/m <sup>3</sup>	چگالی
۵۰	۴۰	۲۵	۱۵	kPa	مقاومت فشاری
۵۰۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰۰	۱۵۰۰	kPa	مدول الاستیسیت

مقاومت خمشی	kPa	۶۹	۱۷۲	۲۰۷	۲۷۶
نسبت جذب آب به غوطه وری	%	۴	۴	۳	۳
نیروی بایانسی	kg/m <sup>3</sup>	۹۹۰	۹۸۰	۹۸۰	۹۸۰

### ۳- کارهای آزمایشگاهی

همانگونه که در بخش گذشته ذکر گردید هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر تغییرات رطوبت در بهبود توانایی باربری و مشخصات فنی خاک رس تثبیت شده با ذرات ژئوفوم می باشد. در این مطالعه، ابتدا خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس مورد مطالعه در حالت تثبیت نشده مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس، نمونه خاک رس در گرمخانه خشک شده و بعد به آن ذرات ژئوفوم به میزان ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی اضافه شده است. بعد مقدار رطوبت نمونه های مخلوط به اندازه های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد وزنی تغییر داده شده است. در هر مرحله یک روز عمل آوری در شرایط دمای محیط صورت گرفته است. بمنظور آماده سازی نمونه های مخلوط یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی از استاندارد ASTM C305-14 [۲۶] استفاده شد. بطوریکه، ابتدا ذرات ژئوفوم و آب (با توجه به مقدار رطوبت بهینه) با یکدیگر در داخل میکسر (مخلوط کن) مخلوط شدند. سپس اندکی صبر شده تا مقداری آب توسط ذرات ژئوفوم جذب شده تا بتواند چسبندگی بهتری با خاک پیدا بکند. در ادامه، ذرات خاکی مخلوط مورد مطالعه در حالت خشک

به طور آرام به آن افزوده شد. طبق استاندارد ۳۰ ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را جذب نمایند. در انتها، عملیات مخلوط کردن مصالح خاکی و ذرات ژئوفوم به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند، ۱۵ ثانیه تمیزکاری و ۶۰ ثانیه با دور متوسط انجام گرفت. جهت برآورد خصوصیات مکانیکی و باربری خاک رس تثبیت شده ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 [۲۷] انجام گرفت. در ادامه، جهت تعیین میزان توانایی باربری نمونه های تثبیت شده آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری براساس استاندارد ASTM D2166 [۲۸] و برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080 [۲۹] بر روی نمونه های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع به صورت کنترل کرنش انجام پذیرفت. در آزمون برش مستقیم در تنش های قائم برابر ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ میلیمتر بر دقیقه آزمایش انجام گرفت. در انتها، بمنظور بررسی تاثیر ذرات ژئوفوم بر روی میزان زهکشی خاک رس مورد مطالعه آزمون نفوذ پذیری برا ارتفاع متغیر طبق استاندارد ASTM D5084 [۳۰] انجام گرفته است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه مطابق جدول (۴) است. شایان ذکر است که ۲۵٪ از مجموع آزمایش های انجام یافته جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده دوباره تکرار شده است.

جدول ۴: برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

برنامه ریزی			درصد رطوبت					مصالح				
ردی	نام	متری	درصد	۱	۱	۱	۱	۲	تراک	تک	برش	نفوذ

ف	نمون ه	س خاک	ژئوفوم م	۰	۲	۴	۶	۸	۰	م	محور ی	مستقی م	پذیر ی
۱	C-0	رس	۰	-	-	-	-	-	-	*	*	*	*
۲	C- GP05	رس	۰/۰۵	×	×	×	×	×	×	*	*	*	*
۳	C- GP10	رس	۰/۱	×	×	×	×	×	×	*	*	*	*
۴	C- GP20	رس	۰/۲	×	×	×	×	×	×	*	*	*	*
۵	C- GP30	رس	۰/۳	×	×	×	×	×	×	*	*	*	*

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم مطابق شکل (۴-الف و ب) نشان می دهد مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک رس در حالتیکه ذرات ژئوفوم به آن اضافه نشده است به ترتیب برابر با ۱/۲۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ۲۵ درصد می باشد. زمانی که به خاک رس مورد مطالعه ذرات ژئوفوم افزوده می شود، طبق شکل (۴-الف) دیده می شود نمونه هایی که دارای ۰/۰۵٪ ژئوفوم بوده و با رطوبت ۱۴٪ در شرایط دمایی محیط عمل آوری شده اند دارای بالاترین میزان وزن مخصوص خشک حداکثر هستند. مقدار افزایش برابر با ۲۸/۶ درصد است. همچنین در نمودارهای شکل (۴-ب) تغییرات رطوبت بهینه در نمونه های عمل آوری شده قابل مشاهده است. بطوریکه، در نمونه تثبیت شده مقدار رطوبت بهینه به مقدار ۴۵/۲ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده کاهش یافته است. در ادامه، با ارزیابی نتایج بدست آمده دیده می شود افزایش میزان حضور ذرات ژئوفوم به همراه تغییر رطوبت در نمونه ها باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش مقدار رطوبت بهینه گردیده است. این شرایط را می توان طبق

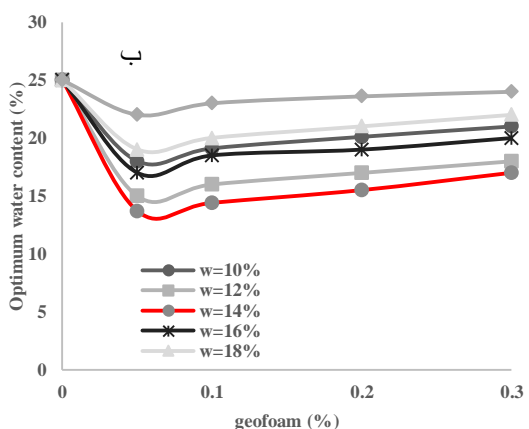
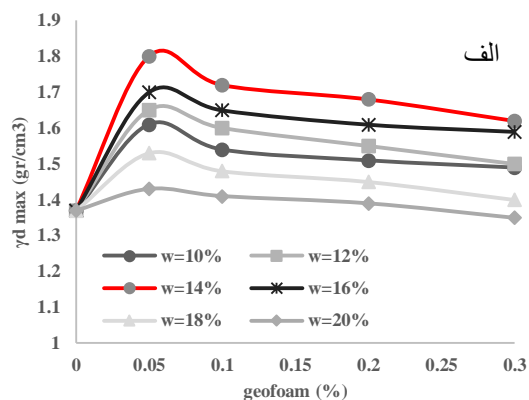
نمودار های شکل (۵) براساس تغییرات میزان نسبت تخلخل حداقل تفسیر و بیان نمود. هنگامیکه ۰/۰۵ درصد ژئوفوم به ذرات خاک رس اضافه شد و نمونه ها با رطوبت ۱۴٪ به مدت یک روز در شرایط دمای محیط عمل آوری شده مشاهده گردید میزان نسبت تخلخل حداقل کاهش یافته که بیان کننده بهبود نسبی در میزان تراکم است. البته لازم بذکر است انعطاف پذیری نسبی موجود در ذرات ژئوفوم به همراه بالا بودن سطح ویژه ذرات باعث تراکم پذیری بیشتر در خاک رس تثبیت شده گردیده است. در ادامه، با افزایش درصد ذرات ژئوفوم و رطوبت در نمونه های حاکی عمل آوری شده مورد مطالعه دیده می شود فضای خالی بین ذرات افزایش یافته و ناپیوستگی در ساختار ذرات نمونه های حاکی بوجود آمده است که سبب بالا رفتن نسبت تخلخل در بین ذرات خاک و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش مقدار رطوبت بهینه شده است. این روند در مطالعات انجام یافته توسط عطری و دبیری (۱۳۹۷) و پیمانیان و دبیری در سال ۲۰۲۰ بر روی خاک رس با خاصیت خمیری کم نیز مشاهده شده است.



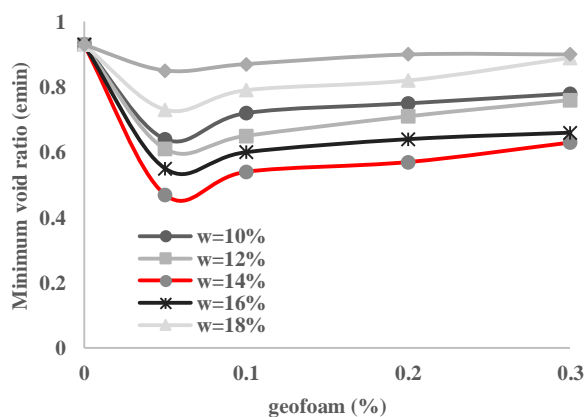
#### ۴-۲- نتایج حاصل از آزمایش تک

##### محوری

تأثیر ذرات ژئوفوم بر روی خاک رس در مقادیر رطوبت مختلف بر روی نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق نمودارهای شکل (۶-الف، ب و ج) قابل مشاهده است. نمونه خاک رس با رطوبت بهینه و در حالت تثبیت نشده دارای مقاومت فشاری تک محوری و کرنش محوری در لحظه گسیختگی به ترتیب برابر با ۳/۸۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ۴ درصد است. همچنین مقدار مدول سکانت ( $E_{50}$ ) برابر با ۱۸/۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. با توجه به شکل (۶-الف)، زمانیکه ۰/۰۵٪ ژئوفوم به نمونه خاک رس با رطوبت ۱۴٪ افزوده می شود، پس از یکروز عمل آوری در شرایط محیط مشاهده می گردد مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی ۵۵ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش یافته است. همچنین، با توجه به نمودارها می توان دریافت افزودن مقدار ذرات ژئوفوم و بالا رفتن مقدار رطوبت در خاک مورد مطالعه سبب کاهش میزان توانایی باربری شده است. شکل (۶-ب) نشان می دهد ذرات ژئوفوم به همراه رطوبت بر روی کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک رس تثبیت شده مورد مطالعه تأثیر گذار است. بطوریکه مخلوط کردن ۰/۰۵ درصد ذرات ژئوفوم با خاک رس و افزودن ۱۴٪ رطوبت به آن میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی را به کمترین میزان می رساند. بعبارت دیگر رفتار خاک تثبیت شده بصورت ترد (شکننده) بوده و دارای شکل پذیری نمی باشد. در حالیکه، افزایش مقادیر رطوبت و ژئوفوم باعث

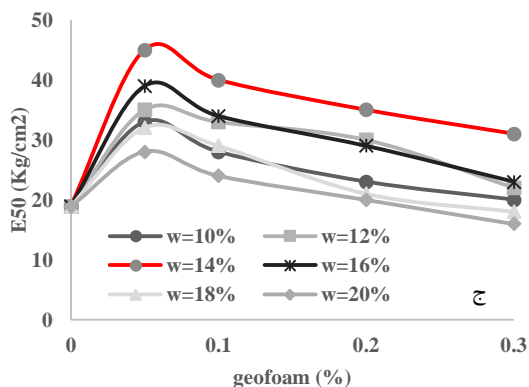


شکل (۴): تأثیر تغییر رطوبت و ذرات ژئوفوم بر نتایج حاصل از آزمایش تراکم، الف-وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.



شکل (۵): تأثیر تغییر رطوبت و ذرات ژئوفوم بر مقادیر نسبت تخلخل حداقل نمونه های مورد مطالعه.

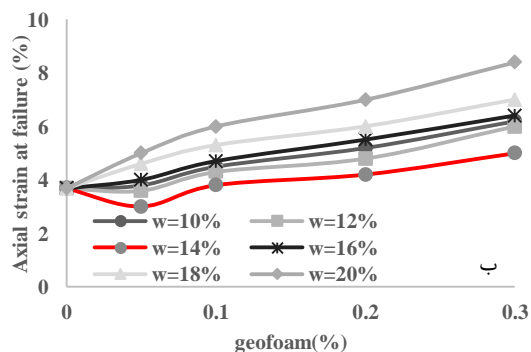
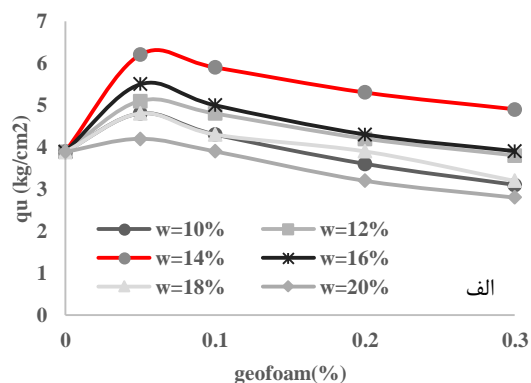
بالا رفتن مقدار شکل پذیری می گردد. در انتها، میزان تغییرات مدول سکانت ( $E_{50}$ ) تحت اثر ذرات ژئوفوم و رطوبت در نمونه های مورد مطالعه در شکل (۶-ج) ارائه شده است. با توجه به نمودارها می توان دریافت موجود بودن  $0/05$  درصد ژئوفوم به همراه  $14\%$  رطوبت در خاک رس مقدار مدول الاستیسیته را  $1/38$  برابر نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می دهد که تایید کننده رفت ترد و شکننده است. با مقایسه نمودارهای شکل های (۶-ب) و (۶-ج) دیده می شود روند تغییرات دو پارامتر مدول تغییر شکل سکانت و کرنش محوری در لحظه گسیختگی برعکس هم می باشند که نشان از صحت نتایج دارد.

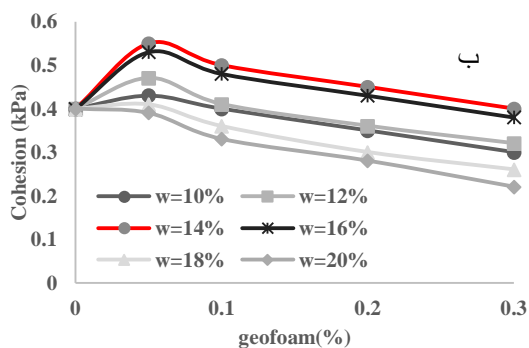


شکل (۶): نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه های مورد مطالعه، الف- مقاومت فشاری، ب- کرنش محوری در لحظه گسیختگی، ج- مدول الاستیسیته.

#### ۳-۴- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

بمنظور بررسی تاثیر ذرات ژئوفوم بر میزان توانایی باربری و مقاومت برشی نمونه های مورد مطالعه، آزمون برش مستقیم در مقادیر رطوبت های بهینه تحت تنش های قائم ۱، ۲، ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و با سرعت کند انجام گرفته است. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه های خاکی به ترتیب در نمودارهای شکل (۷-الف و ب) ارائه گردیده است. با توجه به شکل (۷-الف) می توان مشاهده نمود هنگامیکه به خاک رس  $0/05$  درصد افزوده شده و به مدت یک روز با رطوبت  $14\%$  درجه حرارت محیط عمل آوری می گردد زاویه اصطکاک داخلی بطور قابل توجه به مقدار  $1/5$  برابر افزایش می یابد. اگرچه در همان درصد ژئوفوم

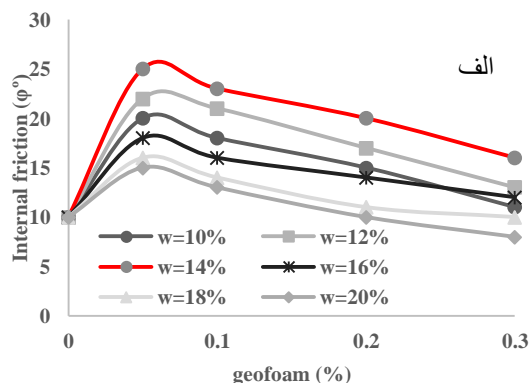




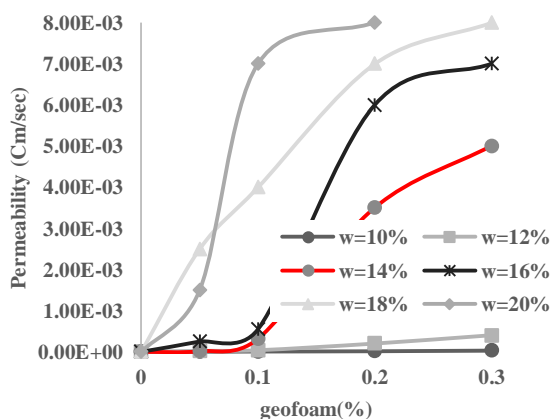
شکل (۷): تاثیر ذرات ژئوفوم بر نتایج حاصل از آزمون برش مستقیم بر روی نمونه های مورد مطالعه، الف- زاویه اصطکاک داخلی، ب- چسبندگی.

میزان تغییرات مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در نمونه های مورد مطالعه در نمودارهای شکل (۸-الف، ب و ج) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده می توان دریافت در تمامی مقادیر تنش قائم، میزان مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد ژئوفوم به همراه ۱۴ درصد رطوبت نسبت به حالت تثبیت نشده بطور میانگین ۸۲٪ افزایش داده است که بیان کننده بهبود توانایی باربری خاک تثبیت شده می باشد.

مشابه با بالا رفتن میزان رطوبت مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاسته می شود. همچنین بالا رفتن میزان درصد ذرات ژئوفوم سبب کاسته شدن تماس ذرات با یکدیگر شده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی در نمونه های تثبیت شده یک روند کاهندگی را طی می نمایند. همچنین، در شکل (۷-ب) می توان دریافت حضور ذرات ژئوفوم در خاک رس به همراه تغییر رطوبت پس از یکروز عمل آوری در شرایط محیط بر مقدار چسبندگی نمونه های مخلوط تاثیر گذار می باشد. بطوریکه نمونه خاک رس مخلوط با ۰/۰۵ درصد ژئوفوم و رطوبت ۱۴٪ مقدار چسبندگی را ۳۷/۵ درصد افزوده است. ولی مشابه با تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، بالا رفتن مقدار رطوبت و درصد ذرات ژئوفوم باعث کاهش در مقدار پارامتر چسبندگی و تماس بین ذرات شده است. این روند در مطالعات انجام یافته توسط عطری و دبیری (۱۳۹۷)، پیمانیان و دبیری در سال ۲۰۲۰ بر روی خاک رس با خاصیت خمیری کم نیز مشاهده شده است.



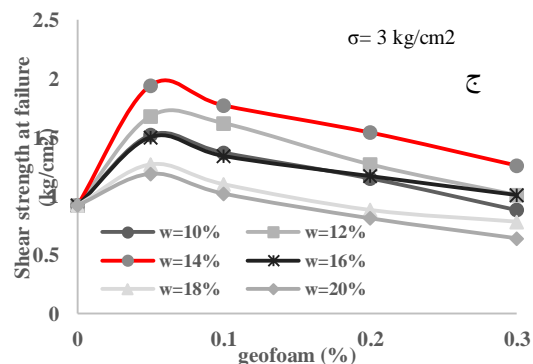
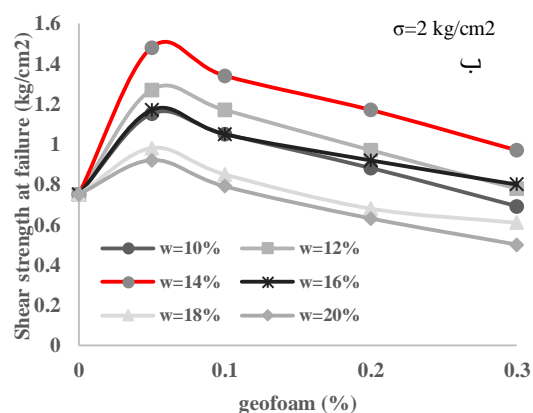
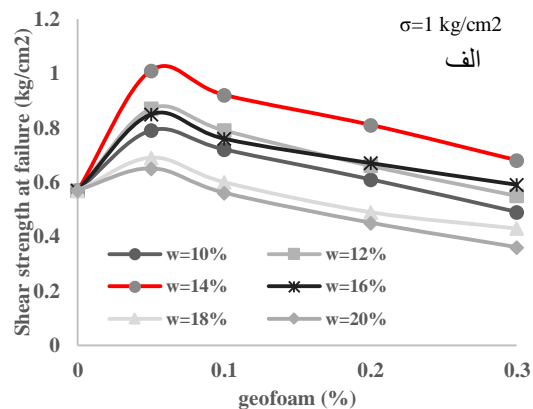
یکی از موضوعات مهم در خاک‌های ریزدانه رسی، ارزیابی رفتار آنها تحت اثر جریان آب و برآورد میزان نفوذپذیری است. در تحقیق حاضر، تأثیر ذرات ژئوفوم بر روی میزان نفوذپذیری خاک رسی در رطوبت‌های مختلف پس از یک روز عمل آوری مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود با افزایش درصد ذرات ژئوفوم و مقدار رطوبت در نمونه‌های خاک رس مورد مطالعه مقدار ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. این روند در مطالعات انجام یافته توسط عطری و دبیری (۱۳۹۷) و پیمانیان و دبیری (۲۰۲۰) بر روی خاک رس با خاصیت خمیری کم نیز مشاهده شده است.



شکل (۹): تأثیر ذرات ژئوفوم و رطوبت بر میزان تغییرات نفوذپذیری نمونه‌های تثبیت شده.

#### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

باتوجه به اینکه خاک یک محیط غیر یکپارچه و سمنته نشده می‌باشد و بدلیل وجود فضای خالی بین ذرات حالت تراکم پذیری دارد بنابراین می‌تواند در شرایط طبیعی دارای میزان توانایی باربری کمتری است.



شکل (۸): تأثیر ذرات ژئوفوم بر مقادیر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در نمونه‌های مورد مطالعه، الف-  $\sigma=1 \text{ kg/cm}^2$ ، ب-  $\sigma=2 \text{ kg/cm}^2$ ، ج-  $\sigma=3 \text{ kg/cm}^2$

#### ۴-۴- نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

نتیجتاً مقاومت برشی کاهش می یابد. همچنین، ذرات ژئوفوم می توانند در میزان مقاومت فشاری تک محوری، کرنش برشی در لحظه گسیختگی و مدول سکانت تأثیر گذار باشند. بطوریکه درصد های ذکر شده باعث افزایش ۵۵ درصد میزان توانایی باربری و ۱/۳۸ برابر مدول الاستیسیته شده و مقدار کرنش محوری در لحظه گسیختگی را کاهش داده و رفتار ترد و شکننده ارائه می کند. این شرایط بیان گر آن است که این میزان ژئوفوم محیط خاک مخلوط را تراکم پذیر کرده و باعث افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش فضای خالی بین ساختار ذرات خاک می گردد. همچنین با بررسی تأثیر ذرات ژئوفوم بر میزان نفوذ پذیری نمونه های خاکی مورد مطالعه مشاهده شد که ژئوفوم یک افزودنی مناسب برای خاک بوده که می تواند شرایط زهکشی و نفوذپذیری را بهبود بخشد بگونه ای که در تحقیق حاضر مشاهده شد که با افزایش درصد ژئوفوم در نمونه های مورد مطالعه ضریب نفوذ پذیری یک روند افزایشی از خود نشان داده است. به عبارت دیگر می توان نتیجه گرفت که وجود ۰/۰۵ درصد ژئوفوم در نمونه های مورد مطالعه جهت تثبیت مناسب بوده ولی بهینه نبوده و بایستی مقدار بیشتری از آن در نظر گرفته شود ولی مسلماً مقادیر بیشتر از ۰/۱ درصد ژئوفوم تأثیر منفی بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک خواهد داشت. در ادامه پیشنهاد می گردد در تحقیقات آتی بمنظور بررسی دقیق رفتار مناسب تأثیر ذرات ژئوفوم بر روی ذرات میزان نسبت میرایی و مدول برشی ارزیابی شود.

امروزه استفاده از مصالح نوین در بهبود و افزایش و بهبود باربری خاک کاربرد بسیاری داشته، یکی از مواد پرکاربرد در این زمینه ژئوفوم ها از خانواده ژئوسنتتیک ها بوده که کارایی بسیار مهمی در علم و صنعت دارند از جمله در خاکریزهای پشت دیوارهای حائل و یا لایه های روسازی راه. بطور کلی ژئوفوم بدلیل وزن سبک، عدم تغییر حجم در برابر آب، نفوذ پذیری پایین و مقاومت نسبتاً مناسب، قابلیت بسیاری برای رفع مشکلات ژئوتکنیکی دارد. در این تحقیق، تأثیر ذرات ژئوفوم با درصدهای ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۳ درصد با خاک رس منطقه کوی نصرشهر تبریز با رطوبت های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد مخلوط شده و به مدت یک روز در شرایط دمای محیط عمل آوری شدند. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر نشان داد مقدار مناسب ذرات ژئوفوم و رطوبت به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۱۴ درصد می باشد. با توجه به اندرکنشی که بین مصالح خاکی و ذرات ژئوفوم بوجود می آید سبب کاهش میزان نسبت تخلخل حداقل شده و در نتیجه میزان مقاومت برشی با توجه به نتایج برش مستقیم در حالت خشک به اندازه ۸۲ درصد افزایش می یابد. اگرچه با افزایش میزان ژئوفوم و رطوبت در نمونه های خاکی مورد مطالعه میزان توانایی باربری در حالت عمومی یک روند کاهشی را ارائه می نماید و علت آن با توجه به میزان نسبت تخلخل حداقل قابل بیان است بطوریکه با افزایش ذرات ژئوفوم به بیش از ۰/۰۵ درصد فضای خالی بین ذرات افزایش می یابد و در نتیجه تماس بین آنها کاهش یافته و

8-Negussey, D. (2007). Design Parameters for EPS Geofoam, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 47(1), 161-170.

9-Illuri, H. K. (2007). Development of soil-EPS mixes for geotechnical applications, Ph.D Thesis, Queensland University of Technology, Australia.

10-Aytekin, M., Banu, Ikizler S. and Nas, E. (2008). Laboratory Study of Expanded Polystyrene (EPS) geofoam used with expansive soils, Geotextiles and Geomembranes, 26, 189-195.

11-Deng, A. and Xiao, Y. (2010). Measuring and Modeling Proportion-Dependent Stress-Strain Behavior of EPS-Sand Mixture, International Journal of Geomechanics, ASCE, 10, 214-222.

12-Najmaddin, D. Y. and Canakci, H. (2013). Compaction properties of sand mixed with modified waste EPS, Geotechnical and Geological Engineering, 31, 305-318.

13-Kan, A. and Demirboga, R. (2009). A new technique of processing for waste expanded polystyrene foams as aggregates, Journal of Material Processing Technology, 20, 2994-3000.

14-Heydarian, H., Nejad Shirazi, A. and Nasehi A. (2012), Study of Geofoam Weight Percent Effects on Bearing Capacity of Lighted Soil by Geofoam, Proc. 1st National Conference on Civil Engineering, Zibakenar, Iran, February, 1-6, (In Persian).

15-Nejad Shirazi, A., Heydarian, H. and Jam, M. R. (2015). Study Strength Behavior of Soil and Geofoam Mixture

1- Stark, T., Bartlett S. and Arellano D. (2012). Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Applications & Technical Data, EPS Industry Alliance, Crofton, MD, Available at <http://www.geofoam.com>

2- Koerner, R. M. (2005), Designing with geosynthetics, Pearson Education, Inc., 5th edition.

3- Krishnaswamy, N. R. and Sudhaker S. (2004) Application of Geosynthetics for the improvement of soft subgrade soils in road construction, Proc. of International e-conference on modern trends in foundation engineering conducted by IIT Madras, Chennai, India, January 26-30, 2004, available at <http://www.ecfg.iitm.ac.in>

4-Horvath, J. S. (1995). Geofoam Geosynthetic, Horvath Engineering, P.C., Scarsdale, NY, pp.229.

5- Elragi, A. (2000), Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam, Ph.D. Thesis, State University of New York, Syracuse, N.Y.

6-Hazarika, H. (2006). Stress-Strain Modeling of EPS Geofoam for Large-Strain Applications, Geotextiles and Geomembranes, 24, 79-90.

7- Saradhi, B. D., Ganesh, B. K. and Tiong H. W. (2006). Effect of Polystyrene Aggregate Size on Strength and Moisture Migration Characteristics of Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 5, 520-527.

- 22-ASTM D422-63. (1963). Standard Test Method for particle-Size Analysis of Soils, Annual book of ASTM standards (reapproved 1998).
- 23- ASTM D 4318-95a. (1995). Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils. Annual book of ASTM standards.
- 24- ASTM D 854-02, 2003, Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards.
- 25- Paye Imen Pars (EPCO), manufacturer of Geofoam panel, web site address: [www.epco-panel.com](http://www.epco-panel.com)
- 26- ASTM C305-14. (2016). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual book of ASTM standards.
- 27- ASTM-D 698-00. (2000). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), Annual book of ASTM standards.
- 28-ASTM D2166-16. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual book of ASTM standards.
- 29- ASTM D3080-11. (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual book of ASTM standards.
- 30- ASTM D 5084-03. (2003). "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials with Several Weight Percent and Size of Geofoam, Proc. 10th International Conference on Civil Engineering, Tabriz, Iran, 15-22, (In Persian).
- 16-Hasanpouri, N. N. and Dabiri R. (2018). Effects of Geofoam Panels on Static Behavior of Cantilever Retaining Wall, Advances in Civil Engineering, pp.1-18, 2018.
- 17-Hasanpouri, N. N. and Dabiri, R. (2018). Effects of Geofoam Panels on Statically Behavior of Gravity Retaining Wall, Tarbiat Modares Journal of Civil Engineering, 18(5), 31-44. (In Persian).
- ۱۸- عطری، ع. و دبیری، ر. (۱۳۹۷). بررسی تاثیر ذرات ژئوفوم در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی مخلوط ماسه-رس، فصلنامه علمی-پژوهشی اساس، دوره ۲۰، شماره ۵۰، ص ۴۳-۵۷.
- 19- Tofigh Azari, F., and Dabiri, R., (2019). Geofoam particles effects on geotechnical properties of sandy soils. Journal of New Approaches in Civil Engineering, 2(4), 83-93 (In Persian).
- 20- Peymanian, B., Dabiri, R. (2020). Effects of geofoam particles on geotechnical properties of clay-dune sand. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 8(2), 166-183.
- 21-ASTM D421-85. (1985). Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998).

using flexible wall permeameter”. Annual book of ASTM standards.