

# بررسی آزمایشگاهی کاهش فشارهای جانبی بر دیوارهای حائل با استفاده از دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده (ژئوفوم)

حسین جمالی باقلعه (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مجتبی جهان‌اندیش\* (استاد)

بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۳/۲، ص. ۵۷-۴۹، پژوهشی)

یکی از موارد کاربرد ژئوفوم‌ها، استفاده از آن‌ها در پشت دیوارهای حائل به منظور کاهش فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار است. ژئوفوم‌ها با توجه به داشتن خصوصیات مکانیکی مشابه خاک‌ها و همچنین داشتن خصوصیت فشردگی‌پذیری در ذات خود می‌توانند باعث کاهش فشارهای جانبی بر دیوارهای حائل شوند. در پژوهش حاضر، از دو نوع ژئوفوم به صورت دانه‌بندی و صفحه‌بندی بین خاکریز و دیوار استفاده شده است. با استفاده از مدل ابزاربندی شده‌ی آزمایشگاهی از دیوار حائل، تأثیر استفاده از ژئوفوم‌ها، بین دیوار و خاکریز پشت دیوار بررسی و مشاهده شد که استفاده از آن‌ها به عنوان مصالح پرکننده بین دیوارهای حائل و خاکریز، به علت سختی کم، وزن بسیار کم و فشردگی‌پذیری بیشتری که در مقایسه با خاک‌ها دارند، باعث کاهش چشمگیر فشارهای جانبی بر دیوارهای حائل می‌شود. همچنین مشاهده شد که استفاده از کیسه‌های پر شده از ژئوفوم‌های دانه‌بندی نسبت به استفاده از صفحات ژئوفوم، تأثیر چشمگیری در کاهش فشارهای جانبی در دیوارهای حائل دارد.

واژگان کلیدی: پلی‌استایرن منبسط، دیوار حائل، ژئوستتیک، ژئوفوم، ژئوفوم دانه‌بندی، کاهش فشار جانبی.

## ۱. مقدمه

دیوارهای حائل صلب، از قبیل: دیوارهای حائل وزنی، نیمه‌وزنی، طره‌بندی و پشت‌بنددار هستند که نمی‌توانند رفتار مکانیکی خاک محیط اطراف خود، مانند نشست موضعی خاک میزبان وفق دهند. در حال حاضر، دیوارهای حائل صلب در پروژه‌های ژئوتکنیکی، از قبیل: فونداسیون‌ها و بزرگراه‌ها کاربرد وسیعی دارند.<sup>[۱]</sup> بنابراین انتخاب مصالح مناسب به عنوان لایه‌ی رابط بین خاکریزها و دیوارها جهت کاهش فشارهای جانبی واقع بر دیوار ضروری است. مصالحی از قبیل ژئوفوم که چگالی کمتری نسبت به خاک دارند و رفتار مکانیکی آن‌ها شبیه به خاک است، می‌توانند به عنوان پرکننده‌های فشرده‌شونده بین دیوارها و خاکریزها استفاده شوند.<sup>[۱۵-۲]</sup> ژئوفوم‌ها می‌توانند با فشردگی و تغییر فرم خود، پارامترهای مقاومت برشی خاک را از قبیل چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در پشت دیوار حائل بهتر بسنج کنند. همچنین به دلیل داشتن خصوصیات، از قبیل: وزن فوق‌العاده سبک و فشردگی‌پذیری زیاد نسبت به خاک‌ها می‌توانند باعث کاهش فشارهای جانبی وارده بر دیوارها

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۲/۲۵

DOI:10.24200/J30.2021.56411.2826

جهان‌اندیش و نگوسی بررسی و نشان داده شد که رفتار ژئوفوم در فشرده‌گی پذیری، شبیه به رس هاست و EPS در کاهش انتقال فشار جانبی نقش بسزایی دارد. [۳۲] ژئوفوم‌ها مزایایی مانند وزن فوق‌العاده سبک، اجرای سریع و استفاده در شرایط آب و هوایی گوناگون دارند. البته ژئوفوم‌ها معایبی هم مانند حساس بودن به اشعه‌ی UV، نفوذ مشتقات نفتی و غوطه‌وری دارند که در مقابل مزایای آن‌ها، ناچیز هستند و می‌توان معایب اشاره شده را با راه‌حل‌های مناسب، در طراحی و اجرا برطرف کرد. [۱۷۳]

کاربرد بلوک‌های EPS در مهندسی عمران، به‌خصوص در مهندسی ژئوتکنیک، [۱۸] شامل: کاهش فشار تورم در خاک‌های متورم‌شونده، [۱۹-۲۱] پایدارسازی شیب‌های خاکی، [۲۲-۲۶] پرکردن خاکریزها با ژئوفوم جهت کاهش نشست، [۲۷-۳۱] کاهش فشارهای جانبی روی سازه‌های حائل، [۳-۱۵] تکیه‌گاه‌های پل‌ها، [۳۲-۳۴] کاهش تنش وارده بر لوله‌های مدفون شده [۳۵-۳۸] و کاهش آثار ناشی از انفجار، است. [۴۰] همچنین کاربرد دانه‌های EPS در مهندسی ژئوتکنیک، شامل بررسی کاهش فشار تورم در خاک‌های متورم‌شونده [۴۱] و کاهش فشارهای جانبی روی سازه‌های حائل، [۴۲، ۴۳] بوده است. قبلاً نیز پژوهش‌هایی در رابطه با بلوک‌های ژئوفوم که به‌عنوان مصالح فشرده‌شونده‌ی پرکننده بین خاکریز و دیوار قرار داده شده بودند، انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. برخی پژوهشگران، [۴-۸] اثر بلوک‌های ژئوفوم با ضخامت‌های متفاوت را در کاهش فشار جانبی استاتیکی روی دیوار حائل صلب به‌وسیله‌ی آزمایش‌های آزمایشگاهی و آنالیزهای عددی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش ضخامت بلوک‌های ژئوفوم به‌عنوان لایه‌ی بین دیوار و خاکریز، فشارهای جانبی کمتری به دیوار وارد می‌شود. همچنین ارطغرل<sup>۲</sup> و تراندافیر<sup>۳</sup> (۲۰۱۲)، [۹] پتانسیل کاهش فشارهای جانبی بر دیوارهای حائل انعطاف‌پذیر (ملاک انعطاف‌پذیری و صلب بودن،  $d_w$  انعطاف‌پذیری نسبی است) را از طریق دو نوع بلوک ژئوفوم EPS و XPS<sup>۴</sup> و با دو ضخامت مختلف برای هر نوع ژئوفوم بررسی کردند و دریافتند در صورتی که از دیوار انعطاف‌پذیر استفاده شود، تأثیر بلوک‌های ژئوفوم در کاهش فشار جانبی کمتر می‌شود و همچنین با افزایش ضخامت بلوک‌های ژئوفوم به‌عنوان لایه‌ی بین دیوار و خاکریز، فشارهای جانبی کمتری به دیوار وارد می‌شود. همچنین نی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ی مکانیزم اندرکنش بین خاک، ژئوفوم و دیوارهای صلب، از بلوک‌های ژئوفوم با ضخامت‌های متغیر به‌عنوان لایه‌ی فشرده‌گی‌پذیر بین دیوار حائل و خاکریز استفاده کردند و نشان دادند که ضخامت نسبی ( $t$ ) از بلوک‌های ژئوفوم مستقیماً به سختی مصالح  $K = \frac{E}{t}$  مربوط و افزایش ضخامت در بلوک ژئوفوم باعث کاهش سختی آن‌ها می‌شود؛ بنابراین بلوک‌های ژئوفوم می‌توانند فشرده‌گی بیشتری در برابر فشارهای جانبی داشته باشند که باعث بروز جابه‌جایی‌های بیشتر در خاکریز و نزدیک شدن به حالت فعال می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، باعث کاهش در فشارهای جانبی بر دیوار می‌شود. [۱۰]

با استفاده از دانه‌های ژئوفوم نیز پژوهش‌هایی جهت کاهش فشار جانبی روی سازه‌های حائل انجام شده است، مانند رضائی و همکاران (۲۰۱۹)، که با ترکیب درصد‌های وزنی مختلف از دانه‌های ژئوفوم با خاک ماسه‌ی  $(D_{50} = 0/21 \text{ mm})$ ، تأثیر استفاده از دانه‌های ژئوفوم مخلوط با خاک را در کاهش نیروی جانبی وارد شده به دیوار بررسی کردند و دریافتند که هر چه نسبت وزنی دانه‌های ژئوفوم مخلوط با خاک بیشتر شود، فشار جانبی روی دیوار بیشتر کاهش می‌یابد که علت اصلی کاهش فشار را جذب اثر نیرو توسط دانه‌های EPS و فشرده شدن دانه‌های ژئوفوم دانسته‌اند. [۴۴]

در مطالعه‌ی حاضر، کیسه‌های پر شده از دانه‌های ژئوفوم به‌عنوان مصالح فشرده‌گی‌پذیر بین خاکریز و دیوار جایگزین بلوک‌های ژئوفوم و تأثیر آن‌ها در کاهش

فشارهای جانبی وارده بر دیوارهای حائل بررسی شده است. همچنین در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است میزان تأثیر استفاده از ژئوفوم‌ها به صورت دانه‌ی و بلوک، در کاهش فشارهای جانبی وارده بر دیوار با یکدیگر مقایسه شود.

## ۲. مشخصات ماسه‌ی استفاده شده

در پژوهش حاضر، از ماسه‌ی رودخانه‌ی قره‌آغاج در ۴۸ کیلومتری شمال‌غربی شیراز، نزدیکی شهر خان‌زینان استفاده شده است. مشخصات و نمودار دانه‌بندی ماسه با انجام آزمایش‌های استاندارد، [۲۴-۲۸] به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ مشاهده می‌شود که با توجه به نتایج آزمایش‌های مذکور، طبق طبقه‌بندی یونیفاید ASTM D۲۴۸۷-۱۷ (USCS) [۲۴] رده‌ی خاک آزمایشی، خاک ماسه‌ی با دانه‌بندی ضعیف (SP) بوده است.

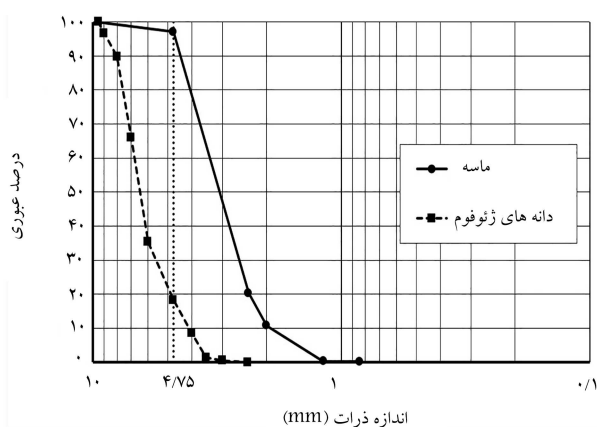
## ۳. مشخصات ژئوفوم

ژئوفوم استفاده شده به‌عنوان پرکننده‌های بین دیوار و خاکریز از نوع دانه‌ی و صفحاتی از بلوک‌های EPS بودند. مشخصات فیزیکی، نمودار دانه‌بندی، و نمودار تغییرات فشار به کرنش دانه‌های ژئوفوم به ترتیب در جدول ۲ و شکل‌های

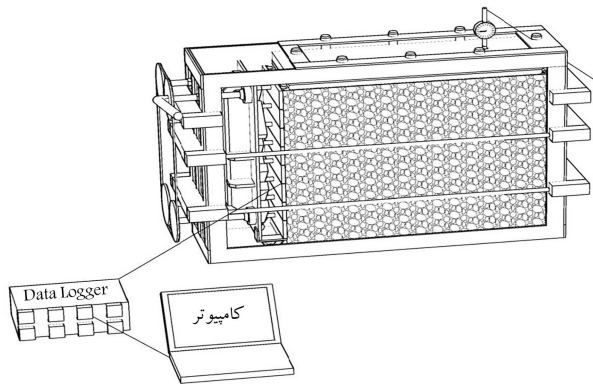
جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی قره‌آغاج.

مشخصات	مقدار	استاندارد
$(G_s)$ چگالی ویژه خاک	۲/۶۶	ASTM D۸۵۴
بیشترین وزن مخصوص خاک $(\frac{kN}{m^3})(\gamma_{max})$	۱۶/۴۴	ASTM D۴۲۵۳
کمترین وزن مخصوص خاک $(\frac{kN}{m^3})(\gamma_{min})$	۱۴/۹۹	ASTM D۴۲۵۴
چگالی نسبی $(D_r)$	٪۷۰	ASTM D۴۲۵۴
$(\frac{kN}{m^3})(\gamma(D_r = \gamma_0))$	۱۵/۹۸	ASTM D۷۲۶۳
USCS طبقه‌بندی خاک	SP	ASTM D۲۴۸۷
$(\varphi_{D_r = \gamma_0})$ زاویه اصطکاک داخلی خاک	۴۳/۸	ASTM D۳۰۸۰
ضریب یکنواختی خاک $(C_u)$	۱/۷۵۵	ASTM D۲۴۸۷
ضریب انحنای خاک $(C_c)$	۱/۰۰۷	ASTM D۲۴۸۷

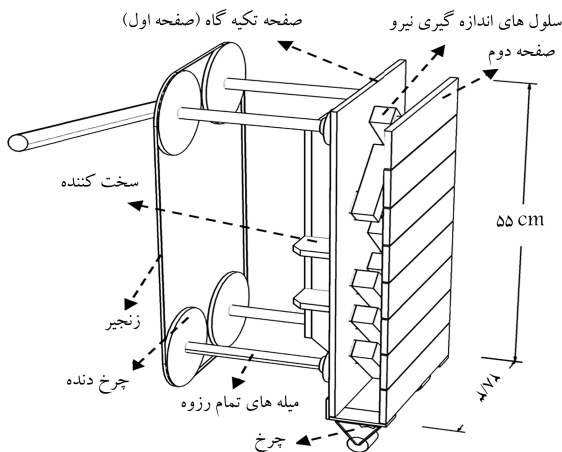
\* تمامی مشخصات بالا برای خاک در حالت خشک است.



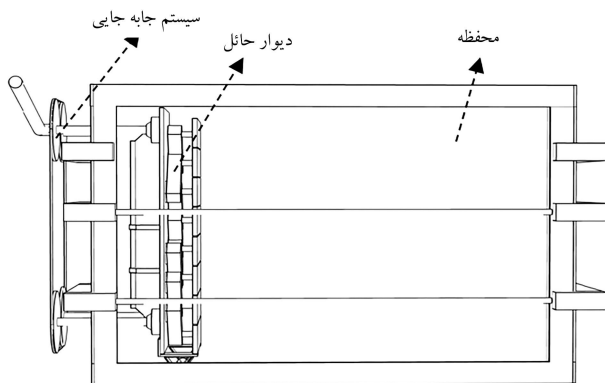
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه و دانه‌های ژئوفوم استفاده شده.



شکل ۳. نمای کلی مدل آزمایشگاهی جعبه‌ی نگهداری خاک و دیوار حائل ابزار بندی شده.



شکل ۴. نمای کلی از مدل دیوار حائل.

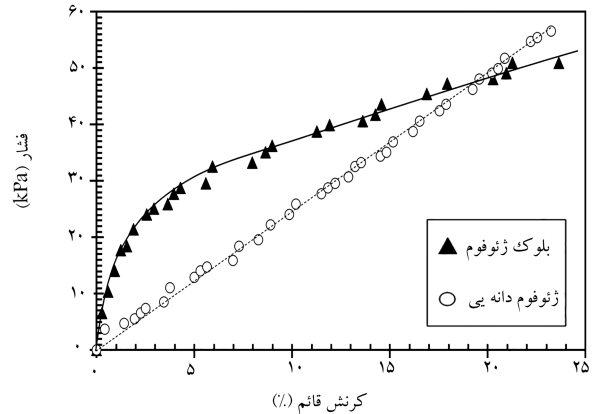


شکل ۵. نمای روبرو از مدل آزمایشگاهی.

دیوار در عمق مرکز هر صفحه به دست آمده است. صفحه‌ی تکیه‌گاهی و نیروسنج‌ها و صفحات روی آن‌ها، در پایین به دو چرخ متصل شده بودند که بر کف محفظه قرار داشتند. همچنین جهت صلبیت بیشتر صفحه‌ی تکیه‌گاهی (دیوار)، صفحات دیگری به آن جوش داده شده بود. بنابراین دیوار حائل مذکور، تقریباً صلب بوده است. تشکیلات دیوار حائل به ۴ پایه‌ی افقی و میله‌های تمام رزوه که نسبت به دیواره‌ی محفظه، قابلیت جابه‌جایی داشتند، متصل بودند که با حرکت میله‌ها به سمت خاکریز یا دورشدن از آن، حالت‌های غیرفعال و فعال فشار خاک ایجاد می‌شد (شکل‌های ۳ الی ۵).

جدول ۲. خصوصیات دانه‌های ژئوفوم.

مشخصات	مقدار
چگالی ویژه ( $G_s$ )	۰/۰۲۱
وزن مخصوص ( $\frac{kN}{m^3}$ )	۰/۱۲۶
قطر متوسط دانه‌ها (mm)	۶/۴۵



شکل ۲. نمودار تغییرات فشار - کرنش ژئوفوم دانه‌یی و بلوک ژئوفوم.

۱ و ۲ مشاهده می‌شود. همچنین دانه‌های ژئوفوم ( $\frac{kN}{m^3}$  ۰/۱۲۶) برای اجرای راحت‌تر و جلوگیری از مخلوط شدن آن‌ها با خاکریز و حفظ محیط زیست، درون کیسه‌های پلاستیکی ریخته شدند. بلوک‌های ژئوفوم با وزن مخصوص  $\frac{kN}{m^3}$  ۰/۱۱۸، که خصوصیت‌های فیزیکی آن‌ها در دستورالعمل‌های ۱۳-۵۷۸-۰۱ ASTM [۴۹] و ASTM D۶۸۱۷ [۵۰] و نمودار تغییرات فشار به کرنش با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری محصور شده‌ی آن نیز در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده شده است. ژئوفوم مذکور با توجه به آنچه توسط دستورالعمل ASTM ذکر شده است، در دسته‌ی XI قرار دارد.

#### ۴. مدل‌سازی آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی ابزاربندی شده از دیوار حائل که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شامل محفظه‌ی نگهداری خاک، دیوار حائل و سیستم جمع‌آوری داده‌ها بوده است که در ادامه، هر کدام از آن‌ها تشریح شده‌اند.

##### ۱.۴. مدل دیوار حائل

مدل دیوار حائل شامل دو صفحه‌ی فولادی و موازی هم به فاصله‌ی حدود ۸ سانتی‌متر از یکدیگر و از جنس فولاد ST-۳۷ به ابعاد: ارتفاع ۵۵ و عرض ۲۸/۳ سانتی‌متر بوده است. صفحه‌ی اول یا همان صفحه‌ی تکیه‌گاهی<sup>۶</sup> به ضخامت ۸cm بوده است، که پایه‌ی نیروسنج‌ها به آن متصل شده بودند. صفحه‌ی دوم، به ضخامت ۱cm، به ۸ قطعه‌ی مستطیلی به ارتفاع ۶/۶ و عرض ۲۸/۳ سانتی‌متر برش داده شده بود که در ارتفاع دیوار به فاصله‌ی تقریباً ۲ میلی‌متر بالای هم قرار گرفته و هر کدام متکی بر نیروسنجی بودند که روی صفحه‌ی تکیه‌گاهی نصب شده بود ۴ نیروسنج بالای دیوار، ۱۰ کیلوگرم و ۴ نیروسنج پایین آن، ۲۵۰ کیلوگرم ظرفیت داشتند. با اندازه‌گیری نیرو و تقسیم آن بر مساحت هر صفحه، فشار جانبی وارده به



شکل ۶. کیسه‌ی پر شده با دانه‌های ژئوفوم.



شکل ۷. قطعه برش داده شده از بلوک‌های ژئوفوم.

## ۲.۴. محفظه‌ی نگهدارنده‌ی خاک

در پژوهش حاضر، جهت انجام آزمایش‌های لازم از محفظه‌ی بی با قاب فولادی ST-۳۷ به طول ۱۰۵، عرض ۲۸/۵ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده و جهت تأمین صلبیت کافی برای آن، سخت‌کننده‌هایی روی دیواره‌های محفظه نصب شده بود (شکل ۵). دیوار حائل برای پایدار نگه داشتن خاکریز، درون محفظه قرار گرفته و به وجه پشتی محفظه، که موازی با محور دیوار بود، از طریق میله‌های تمام رزوه متصل شده بود. قسمتی از محفظه، که ماسه درون آن قرار داشت، به طول ۷۸، عرض ۲۸/۵ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بوده است. نکته‌ی قابل توجه در مورد نحوه‌ی اتصال دیوار به محفظه آن است که دیوار حائل با دیواره‌های محفظه که عمود بر محور دیوار حائل بودند، هیچ گونه تماسی که ایجاد اصطکاک کند، نداشته است.

## ۳.۴. سیستم جابه‌جایی

برای جابه‌جایی افقی دیوار درون محفظه، از ۴ میله‌ی تمام رزوه استفاده شده است که از یک سر به دیوار متصل بودند. سر دیگر میله‌ها از مهره‌ی که به بدنه‌ی محفظه جوش داده شده بود، عبور داده شده و سپس جهت ایجاد هماهنگی و چرخش هم‌زمان و یکسان میله‌ها با هم، چرخ دنده‌ی به هر یک از میله‌ها جوش داده شده بود. با استفاده از زنجیری که به دور چرخ‌دنده‌ها انداخته شده بود، این امکان به اپراتور داده شده بود که در صورت چرخاندن یکی از میله‌ها، همه‌ی چرخ‌دنده‌ها هم‌زمان به جلو و یا عقب حرکت کنند و باعث جابه‌جایی افقی تحت کنترل شود (شکل‌های ۴ و ۵).

## ۴.۴. کیسه‌های ژئوفوم

استفاده‌ی مستقیم از دانه‌های ژئوفوم ( $\frac{kN}{m^2} / 126^\circ$ ) (بدون استفاده از کیسه) به عنوان پرکننده بین دیوار و خاکریز، به دلیل کمتر بودن چگالی آن‌ها نسبت به خاک، بسیار سخت است؛ لذا از این جهت می‌توان دانه‌های ژئوفوم ( $\frac{kN}{m^2} / 126^\circ$ ) را درون کیسه‌هایی ریخت و سپس در پشت دیوار قرار داد. استفاده از این روش علاوه بر اینکه در بحث اجرا، بسیار راحت‌تر و سریع‌تر است، از مخلوط شدن دانه‌های ژئوفوم با خاک نیز جلوگیری می‌کند و در صورتی که در آینده تصمیم به حذف ژئوپلیمرهای مذکور از خاک گرفته شود، می‌توان کیسه‌های ژئوفوم دانه‌ی را در عملیات خاک‌برداری از پشت دیوار خارج کرد. کیسه‌ها از جنس پلاستیک پلی‌اتیلن به ابعاد  $5 \text{ cm} \times 6/5 \times 28/3$  سانتی‌متر بودند که دانه‌های EPS با وزن مخصوص  $\frac{kN}{m^2} / 126^\circ$  درون آن‌ها ریخته شده بودند (شکل ۶).

## ۵.۴. بلوک‌های ژئوفوم

برای بررسی و مقایسه‌ی تأثیر استفاده‌ی بلوک EPS در کاهش فشارهای جانبی وارده به دیوار حائل نسبت به دانه‌های ژئوفوم از قطعات بریده‌شده‌ی بلوک‌های ژئوفوم با وزن مخصوص  $\frac{kN}{m^2} / 118^\circ$  استفاده شده است. قطعات استفاده‌شده به ابعاد  $5 \text{ cm} \times 6/5 \times 28/3$  سانتی‌متر و با استفاده از سیم نیکل - کروم داغ، برش داده شده بودند (شکل ۷).

## ۶.۴. روش پژوهش

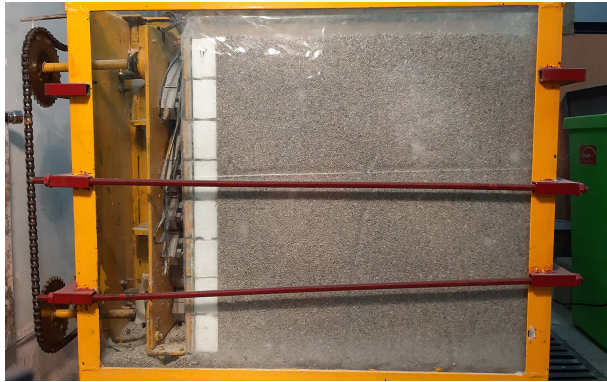
قبل از انجام آزمایش‌های تعیین فشار جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار، با سری کردن هر کدام از نیروسنج‌ها با رینگ اندازه‌گیری نیرو، از صحت کالیبراسیون آن‌ها اطمینان

حاصل شده بود. در مطالعه‌ی حاضر، برای تعیین توزیع فشارهای جانبی بر حسب عمق، سه مجموعه آزمایش انجام شده است که شامل ۱. بدون استفاده از ژئوفوم، ۲. با استفاده از کیسه‌های پر شده از دانه‌های ژئوفوم و ۳. با استفاده از قطعات بریده شده از بلوک‌های ژئوفوم به عنوان پرکننده‌های فشرده‌شونده بین دیوار و خاکریز بودند. نتایج مجموعه‌ی اول آزمایش‌ها به‌عنوان مبنایی جهت تعیین میزان کاهش فشارهای جانبی بر دیوار در آزمایش‌های مجموعه‌های دوم و سوم استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا شرایط کرنش صفحه‌ی با استفاده از صفحات پلاستیکی پلی‌اتیلنی بین ماسه و دیواره‌های جانبی محفظه در دیواره‌های آن ایجاد شده است. این روش به‌طور قابل‌توجهی اصطکاک بین دانه‌های ماسه و دیواره‌های محفظه را کاهش داده است، به طوری که فرض شد دانه‌های ماسه در تماس با دیواره‌های محفظه، تقریباً بدون اصطکاک هستند.

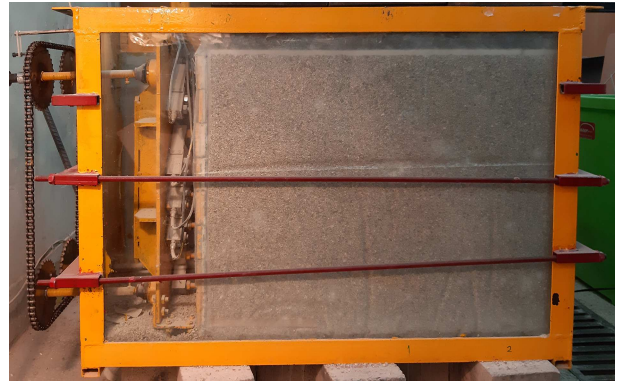
به منظور آماده‌سازی خاکریز پشت دیوار حائل با چگالی نسبی تقریبی ۷۰٪ در همه‌ی لایه‌های خاک در حالت غیرمتراکم، از روش بارش استفاده شده است. جهت حصول اطمینان از تراکم یکسان ماسه با روش اخیر، چندین نمونه‌گیر استوانه‌ی کوچک در جاهای مختلف خاکریز قرار داده شد. وزن ماسه‌ی جمع شده در استوانه‌ها، صحت روش را تأیید کرد. سپس آزمایش‌های اصلی، در سه حالت، یعنی: حالت‌های سکون، دور شدن تدریجی دیوار از خاکریز (نزدیک به حالت فعال) و جابه‌جایی تدریجی دیوار به سمت خاکریز (نزدیک به حالت مقاوم) انجام شده است.

## ۱.۶.۴. مجموعه‌ی اول آزمایش‌ها

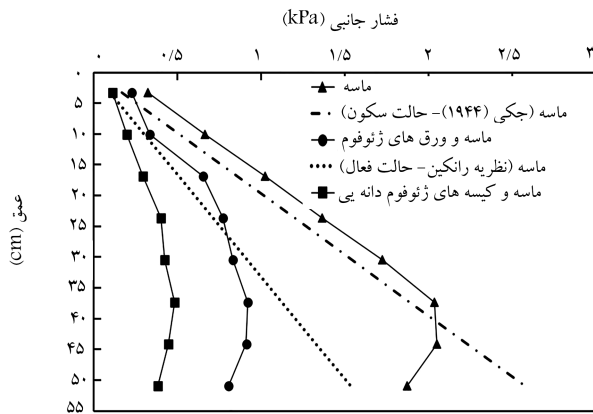
جهت انجام مجموعه‌ی اول آزمایش‌ها، فقط ماسه و با استفاده از روش بارش با چگالی نسبی ۷۰٪ درون محفظه ریخته شد. سپس سطح خاکریز کاملاً صاف و تراز شد و از طریق سیستم جمع‌آوری داده‌ها، فشارهای وارده به هر مقطع از دیوار



شکل ۱۰. آماده‌سازی آزمایش مجموعه‌ی سوم (استفاده از بلوک‌های ژئوفوم).



شکل ۸. آماده‌سازی آزمایش مجموعه‌ی اول (بدون استفاده از ژئوفوم).



شکل ۱۱. مقایسه‌ی توزیع فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار در حالت سکون.

کاهش فشارهای جانبی با استفاده از صفحات ژئوفوم تعیین شد که در بخش بعد ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، برای مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی، از رابطه‌ی جکی  $k_0 = 1 - \sin \phi$  [51] جهت نتایج عددی در حالت سکون و در حالت فعال و مقاوم از نظریه‌ی رانکین استفاده شده است.

## ۵. بحث و نتایج

در بخش کنونی، نتایج آزمایش‌های سه مجموعه (بدون استفاده از ژئوفوم، با استفاده از ژئوفوم دانه‌یی، یا قطعات بریده‌شده از بلوک EPS) و در سه حالت قرارگیری دیوار (سکون، فعال و مقاوم) که در بخش قبل به آن اشاره شده است، تشریح شده‌اند.

### ۱.۵. حالت سکون

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، مصالحی مانند دانه‌های ژئوفوم و بلوک‌های ژئوفوم هر کدام به‌طور جداگانه به‌عنوان مصالح پرکننده بین خاکریز و دیوار حائل در حالت سکون قرار داده شده و سپس مقایسه‌ی بین توزیع فشارهای جانبی آن‌ها با خاکریز بدون استفاده از پرکننده‌های فشرده‌شده صورت گرفته است (شکل ۱۱).

مطابق شکل ۱۱ نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از کیسه‌های پر شده از دانه‌های ژئوفوم ( $\frac{k_0 N}{m^2} = 0$ ) و بلوک‌های ژئوفوم بین دیوار و خاکریز باعث می‌شود که در



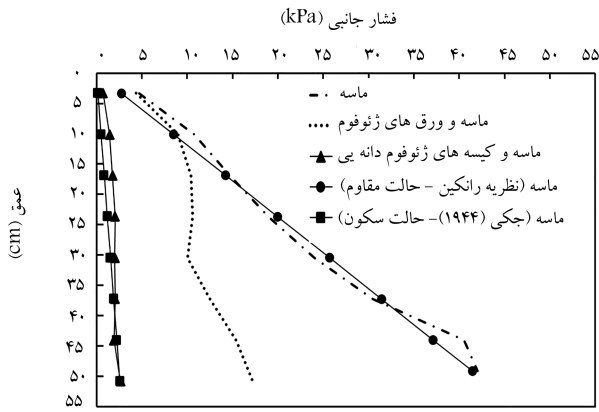
شکل ۹. آماده‌سازی آزمایش مجموعه‌ی دوم (استفاده از کیسه‌های پر شده از دانه‌های ژئوفوم).

در حالت سکون ثبت شدند (شکل ۸). پس از برداشت نتایج در حالت سکون، مانند قبل آماده‌سازی انجام شد. سپس با حرکت دادن دیوار در جهت مناسب، نتایج مربوط به حالت‌های نزدیک به حالت فعال یا مقاوم نیز برداشت شدند و جهت مقایسه و تعیین میزان کاهش فشارهای جانبی اندازه‌گیری شده بر دیوار در آزمایش‌های مجموعه دوم و سوم از آن‌ها استفاده شد.

### ۲.۶.۴. مجموعه‌های دوم و سوم آزمایش‌ها

در مجموعه‌ی دوم آزمایش‌ها، ۸ کیسه‌ی ژئوفوم دانه‌یی به ابعاد  $28/3 \times 6/5 \times 5 \text{ cm}$  سانتی‌متر (ضخامت نسبی  $\frac{t}{H} = 0/09$ ) در پشت دیوار حائل به‌صورت افقی بر روی یکدیگر قرار گرفتند. سپس خاکریز ماسه‌یی مانند مجموعه‌ی اول با استفاده از روش بارش و چگالی نسبی ۷۰٪ درون محفظه اجرا و سطح خاکریز کاملاً صاف و تراز شده است. در نهایت نیز فشارهای جانبی وارد شده به هر سلول اندازه‌گیری فشار در عمق دیوار با استفاده از سیستم جمع‌آوری داده<sup>۸</sup> در حالت سکون ثبت شدند (شکل ۹). پس از برداشت نتایج در حالت سکون، آماده‌سازی آزمایش مانند قبل انجام شد و نتایج مربوط به حالت‌های نزدیک به حالت فعال و نزدیک به حالت مقاوم نیز برداشت شدند. با استفاده از نتایج مجموعه‌های دوم و اول، میزان کاهش فشارهای جانبی با استفاده از کیسه‌های ژئوفوم دانه‌یی تعیین شد، که در بخش بعد ارائه شده است.

مجموعه‌ی سوم آزمایش‌ها مانند مجموعه‌ی دوم بود، با این تفاوت که ۸ قطعه مکعب‌مستطیل برش داده‌شده از بلوک‌های ژئوفوم با ابعاد مشابه با کیسه‌های ژئوفوم دانه‌یی استفاده شده است. قطعات مذکور به‌صورت افقی بین خاکریز و دیوار قرار داده شده بودند (شکل ۱۰). با استفاده از نتایج مجموعه‌های سوم و اول، میزان



شکل ۱۳. توزیع فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار در حالتی که دیوار به اندازه  $1/75 mm$  ( $\Delta H = 0/0032$ ) به سمت خاکریز جابه جا شده است.

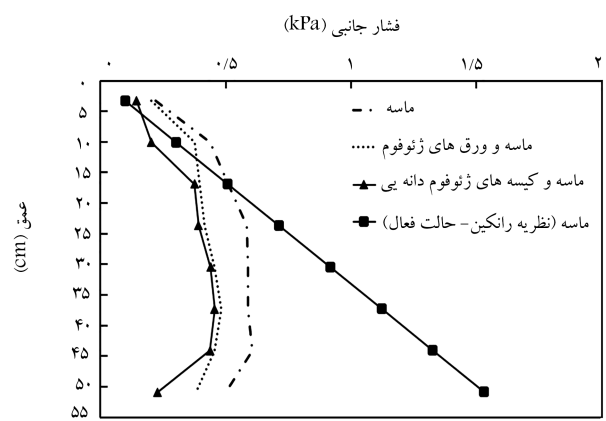
جدول ۳. مقایسه‌ی درصد کاهش فشارهای جانبی وارده بر دیوار حائل با استفاده از ژئوفوم دانه‌یی و بلوک ژئوفوم.

درصد کاهش	مصلح بین دیوار و خاکریز	دیوار	
		میزان جابه جایی	حالت قرارگیری
۷۰		$\frac{\Delta H}{H} = 0$	بدون جابه جایی
۳۶	استفاده از کیسه های ژئوفوم دانه یی	$\frac{\Delta H}{H} = 0/0005$	دور شدن از خاکریز
۸۹	$0/126 \frac{kN}{m^2}$	$\frac{\Delta H}{H} = 0/003$	جابه جایی به سمت خاکریز
۴۵	استفاده از قطعات	$\frac{\Delta H}{H} = 0$	بدون جابه جایی
۱۷	برش داده شده از بلوک های ژئوفوم	$\frac{\Delta H}{H} = 0/0005$	دور شدن از خاکریز
۳۷	$0/118 \frac{kN}{m^2}$	$\frac{\Delta H}{H} = 0/003$	جابه جایی به سمت خاکریز

از مصالح ژئوفوم دانه‌یی نسبت به استفاده از صفحات ژئوفوم بیشترین تأثیر را در کاهش فشارهای جانبی داشته است.

## ۶. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی ابرار بندی شده، کاهش فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار حائل با استفاده از پرکننده های ژئوفوم، نظیر کیسه های ژئوفوم دانه یی ( $0/126 \frac{kN}{m^2}$ ) و قطعات بریده از بلوک ژئوفوم ( $0/118 \frac{kN}{m^2}$ ) بررسی شده است. مدل ابرار بندی شدهی آزمایشگاهی، شامل: محفظه ی فولادی، دیوار حائل صلب تقویت شده به ابعاد  $0/8 \times 28/3 \times 54/2$  سانتی متر از جنس فولاد ST-۳۷، سیستم جابه جایی دیوار و سیستم جمع آوری داده بوده است که فشارهای جانبی بر دیوار را در مقاطع مختلف از عمق دیوار در سه حالت قرارگیری دیوار با کنترل بر میزان جابه جایی دیوار اندازه گیری کرده است. جهت بررسی کاهش فشارهای جانبی بر دیوار با استفاده از مصالح ژئوفوم، ابتدا کیسه های پر شده از دانه های ژئوفوم



شکل ۱۲. مقایسه‌ی توزیع فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار در حالتی که دیوار به اندازه  $0/311 mm$  ( $\Delta H = 0/0006$ )<sup>[۱]</sup> از سمت خاکریز دور شده است.

ثلث میانی دیوار، فشارهای جانبی در حالت سکون نسبت به ماسه به ترتیب تا ۷۰ و ۴۵ درصد کاهش پیدا کنند.

## ۲.۵. حالت دور شدن تدریجی دیوار از سمت خاکریز

در حالتی که دیوار از حالت سکون به اندازه  $0/311 mm$  ( $\Delta H = 0/0006$ )<sup>[۱]</sup>، جابه جایی از خاکریز دور شده بود، فشارهای جانبی وارد شده بر دیوار با استفاده از ژئوفوم و بدون استفاده از ژئوفوم، ثبت و با یکدیگر مقایسه و نمودارهای توزیع فشار در حالت اخیر، در شکل ۱۲ نشان داده شده اند. کاهش فشارهای جانبی ناشی از خاکریز بر دیوار با استفاده از کیسه های پر شده از دانه های ژئوفوم ( $0/126 \frac{kN}{m^2}$ ) و بلوک های EPS ( $0/118 \frac{kN}{m^2}$ ) به عنوان مصالح فشرده شونده، نسبت به حالتی که در مدل آزمایشگاهی از مصالح فشرده شونده ی پرکننده بین دیوار و خاکریز استفاده نشده بود، در این حالت از قرارگیری دیوار، به ترتیب به مقدار ۲۵ و ۲۴ درصد بوده است (شکل ۱۲).

## ۳.۵. نزدیک شدن تدریجی دیوار به سمت خاکریز

بعد از آماده سازی آزمایش، فشارهای جانبی بر دیوار در حالتی که دیوار ( $1/75 mm$ ) ( $\Delta H = 0/0032$ ) نسبت به حالت سکون به سمت خاکریز جابه جا شده بود، اندازه گیری شده اند. مقایسه بین فشارهای جانبی در هنگامی که مصالح ژئوفوم بین دیوار و خاکریز قرار داشتند و حالتی که از آنها استفاده نشده بود، در شکل ۱۳ مشاهده می شود که مطابق آن، در حالتی که دیوار به اندازه  $1/75 mm$  ( $\Delta H = 0/0032$ ) به سمت خاکریز جابه جا شده است؛ استفاده از کیسه های پر شده از دانه های ژئوفوم و بلوک های ژئوفوم بین دیوار و خاکریز نسبت به ماسه در ثلث میانی دیوار، فشارهای جانبی را به ترتیب به مقدار  $93/8\%$  و  $56/8\%$  درصد کاهش داده است.

## ۴.۵. مقایسه

در جدول ۳، مقایسه ی بین سه حالت قرارگیری دیوار و استفاده از مصالح ژئوفوم دانه یی و قطعات بلوک ژئوفوم از لحاظ کاهش فشارهای جانبی بر دیوار نسبت به مجموعه ی اول آزمایش ها ارائه شده است؛ که با توجه به آن می توان گفت که استفاده

شوند، می‌توانند فشارهای جانبی روی دیوار در حالت سکون ( $1/23 \text{ kPa}$ ) را حتی از حالت نزدیک به حالت محرک ( $\frac{\Delta}{H} = 0/0005$ ) بدون استفاده از ژئوفوم هم کمترکنند ( $3/2 \text{ kPa}$ ) و باعث کاهش چشمگیر فشارهای جانبی بر دیوار شوند.

۳. با توجه به جدول ۳، مقادیر فشار جانبی بر دیوار در حالت سکون با استفاده از مصالح ژئوفوم دانه‌یی و ورق‌های بلوک ژئوفوم به ترتیب برابر با  $1/23$  و  $3/56$  کیلوپاسکال است. بنابراین، استفاده از دانه‌های ژئوفوم بین دیوار و خاکریز به دلیل داشتن فشردگی پذیری (سختی کمتر) و جذب انرژی بیشتر نسبت به ورق‌های بلوک‌های ژئوفوم ارجحیت دارد؛ چرا که می‌توانند فشارهای جانبی را به مقدار بیشتری کاهش دهند.

۴. از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان نتیجه‌ی کاربردی مهمی گرفت: به کار بردن مصالح فشردگی‌پذیر ذکر شده، باعث کاهش نسبتاً قابل ملاحظه‌یی در فشار جانبی در حالت‌های فعال و مقاوم می‌شود. به‌هنگام زلزله، در دیوار زیرزمین و پارکینگ‌های تراز منفی آپارتمان‌ها، در یک سمت، حالت فعال و در سمت دیگر حالت مقاوم به‌وجود می‌آید و استفاده از ژئوفوم باعث کم‌شدن نیروی حالت فعال و مقاوم در هر دو سمت می‌شود. در حال حاضر که بلندمرتبه‌سازی باعث شده است تا تعداد طبقات منفی و گودبرداری‌های بیشتر شود، استفاده از ژئوفوم برای کاهش ابعاد دیوار حائل و میلگردهای آن بسیار کارساز است.

وزن مخصوص  $\frac{kN}{m^3}$   $126/0$  یا قطعات بلوک ژئوفوم با وزن مخصوص  $\frac{kN}{m^3}$   $118/0$  بین خاکریز و دیوار قرار گرفته و سپس خاکریز ماسه‌یی اجرا شده است. پس از آماده‌سازی هر آزمایش، اندازه‌گیری فشارهای جانبی در حالت سکون انجام شده است. سپس برای ایجاد حالت‌های مقاوم یا فعال، دیوار به سمت خاکریز حرکت داده شده یا از آن دور شده است و فشارها اندازه‌گیری شدند. با بررسی داده‌ها، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. استفاده از دانه‌های ژئوفوم، هنگامی‌که درون کیسه‌ها ریخته و سپس در پشت دیوار قرار داده شوند، نسبت به استفاده‌ی مستقیم از دانه‌های ژئوفوم در پشت دیوار، مزایایی، از قبیل: اجرای سریع‌تر، راحت‌تر و جلوگیری از مخلوط شدن دانه‌های ژئوفوم با خاک دارد. چنانچه در آینده تصمیم به حذف ژئوپلیمرهای مذکور از خاک گرفته شود، می‌توان کیسه‌های ژئوفوم دانه‌یی را در عملیات خاک‌برداری از پشت دیوار خارج کرد.

۲. با توجه به جدول ۳، استفاده از مصالح پلی‌استایرن منبسط شده (ژئوفوم) بین دیوار حائل و خاکریز پشت دیوار به دلیل داشتن فشردگی‌پذیری و وزن فوق‌العاده سبک، می‌تواند فشارهای جانبی بر دیوار را نسبت به مصالح فشردگی‌ناپذیر، مانند ماسه به مقادیر قابل توجهی کاهش دهد. به عبارت دیگر، این نوع مصالح با داشتن خاصیت فشردگی‌پذیری و جذب انرژی، در صورتی که در پشت دیوار استفاده

## پانویس‌ها

1. expanded polystyrene
2. Ertugrul
3. Trandafir
4. extruded polystyrene
5. Ni
6. Support plate
7. mounting
8. data logger
9. Jaky

## منابع (References)

1. Das, B. and Sobhan, K. "Principles of geotechnical engineering 8th Ed.", Cengage Learning (2016).
2. Negussey, D. and Jahanandish, M. "Comparison of some engineering properties of expanded polystyrene with those of soils (with discussion and closure)", *Transportation Research Record*, **1418**, pp. 43-50 (1993).
3. Jahanandish, M. "At rest lateral stresses in normal soils, loess and soil substitute materials", PhD dissertation, Syracuse Univ. Syr. NY 193 P. Chapter 6, Compressive Behavior of Geofom, pp. 128-150 (1994).
4. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Kon, H. and et al. "Use of compressible expanded polystyrene blocks and geogrids for retaining wall structures", *Soils and Foundations*, **42**(4), pp. 29-41 (2002).
5. Ertugrul, O.L. and Trandafir, A.C. "Reduction of lateral earth forces acting on rigid nonyielding retaining walls by EPS geofom inclusions", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(12), pp. 1711-1718 (2011).
6. Ertugrul, O.L. and Trandafir, A.C. "Lateral earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable geofom inclusions", *Engineering Geology*, **158**, pp. 23-33 (2013).
7. Dasaka, S.M., Dave, T.N., Gade, V.K. and et al. "Seismic earth pressure reduction on gravity retaining walls using EPS geo-foam", *Proceedings of 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia, pp. 1025-1030 (2014).
8. AbdelSalam, S.S. and Azzam, S.A. "Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofom inclusion", *Geosynthetics Int*, **23**(6), pp. 395-407 (2016).
9. Ertugrul, O.L. and Trandafir, A.C. "Reduction of lateral earth forces on yielding flexible retaining walls by EPS geofom inclusions", *GeoCongress: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, pp. 2068-2077 (2012).
10. Ni, P., Mei, G. and Zhao, Y. "Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geofom inclusions: Physical modeling and analytical solutions", *International Journal of Geomechanics*, **17**(6), pp.1-13 (2017).
11. Bathurst, R.J., Zarnani, S. and Gaskin, A. "Shaking table testing of geofom seismic buffers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(4), pp. 324-332 (2007).

12. Zarnani, S. and Bathurst, R.J. "Experimental investigation of EPS geofam seismic buffers using shaking table tests", *Geosynthetics International*, **14**(3), pp. 165-177 (2007).
13. Zarnani, S. and Bathurst, R.J. "Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table tests", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(5), pp. 371-383 (2008).
14. Ertugrul, O.L., Trandafir, A.C. and Ozkan, M.Y. "Reduction of dynamic earth loads on flexible cantilever retaining walls by deformable geofam panels", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **92**, pp. 462-471 (2017).
15. Hasanpouri Notash, N. and Dabiri R. "Effects of geofam panels on static behavior of gravity retaining wall", *Civil Engineering Modares, IQBQ*, **18**(5) pp. 31-44 (in Persin) (2019).
16. Koerner, R.M., *Designing with Geosynthetics (Vol. 2)*, Xlibris Corporation, Chapter 8: Designing with Geofam, pp. 715-735 (2012).
17. Jahanandish, M. and Jamalipaghale, H. "Advantages of using geofam instead of soils in geotechnical Engineering projects", *3rd International Conference on New Findings of Civil, Architectural and Iran Building Industry*, Tehran, University of Tehran, Iran, Civ\_13210220 (4-5 July, 2018).
18. Horvath, J.S. "The compressible inclusion function of EPS geofam", *Geotextiles and Geomembranes*, **15**(1-3), pp. 77-120 (1997).
19. Ikizler, S.B., Aytakin, M. and Nas, E. "Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofam used with expansive soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(2), pp. 189-195 (2008).
20. Ikizler, S.B., Aytakin, M. and Vekli, M. "Reductions in swelling pressure of expansive soil stabilized using EPS geofam and sand", *Geosynthetics International*, **16**(3), pp. 216-221 (2009).
21. Selvakumar, S. and Soundara, B. "Expanded polystyrene (EPS) geofam columns in expansive soil: Preliminary swelling characteristics evaluation", *5th International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications*, pp. 331-338. Springer, Cham (2019).
22. Ozer, A.T., Akay, O., Fox, G.A. and et al. "A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofam", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(2), pp. 166-180 (2014).
23. Jutkofsky, W.S., Teh Sung, J. and Negussey, D. "Stabilization of embankment slope with geofam", *Transportation Research Record*, **1736**(1), pp. 94-102 (2000).
24. Mann, G. and Stark, T.D. "Slope stabilization using geofam", In *Embankments, Dams, and Slopes: Lessons from the New Orleans Levee Failures and other Current Issues*, pp. 1-9 (2007).
25. Akay, O., Ozer, A.T., Fox, G.A. "Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofam under seepage flow", *Geotextiles and Geomembranes*, **37**, pp. 81-98 (2013).
26. Akay, O. "Slope stabilisation using EPS block geofam with internal drainage system", *Geosynthetics International*, **23**(1), pp. 9-22 (2016).
27. Aaboe, R. "Evidence of EPS long term performance and durability as a light weight fill", *Vegteknisk Avdeling, Intern rapport No. 2139; Norwegian PublicRoads Administration: Oslo, Norway* (2000).
28. Stark, T., Bartlett, S. and Arellano, D. "Expanded Poly Styrene (EPS) geofam applications & technical data", *EPS Industry Alliance* (2012).
29. Ozer, A.T. "Laboratory study on the use of EPS-block geofam for embankment widening", *Geosynthetics International*, **23**(2), pp. 71-85 (2016).
30. Puppala, A.J., Ruttanaporamakul, P. and Congress, S.S.C. "Design and construction of lightweight EPS geofam embedded geomaterial embankment system for control of settlements", *Geotextiles and Geomembranes*, **47**(3), pp. 295-305 (2019).
31. Stark, T.D., Arellano, D., Horvath J.S. and et al. "Geofam applications in the design and construction of highway embankments", *NCHRP Web Document*, **65**, p. 792 (2004).
32. Snow, C.L. and Nickerson, C.R. "Case study of EPS geofam lightweight fill for settlement control at bridge approach embankment", In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, pp. 580-589 (2004).
33. Stuedlein, A.W. and Negussey, D. "Use of EPS geofam for support of a bridge", *Sound Geotechnical Research to Practice: Honoring Robert D. Holtz II*, pp. 333-344 (2013).
34. Vaslestad, J., Bartlett, S.F., Aaboe, R. and et al. "Bridge foundations supported by EPS geofam embankments on soft soil", *5th International Conference on Geofam pp. 281-294, Springer, Cham Blocks in Construction Applications*, (2019).
35. Witthoef, A.F. and Kim, H. "Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofam compressible inclusions", *Geosynthetics International*, **23**(4), pp. 287-300 (2016).
36. Meguid, M.A. and Hussein, M.G. "A numerical procedure for the assessment of contact pressures on buried structures overlain by EPS geofam inclusion", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(2), pp. 1-14 (2017).
37. Azizian, M. and Moghaddas Tafreshi, S.N. "Laboratory tests of EPS block influence on behavior of buried pipe under repeated load", *Journal Sharif.ir*, **35-2**(3.2), pp. 61-70 (in Persin) (2019).
38. Santos, R.R.V., Kang, J. and Park, J.S. "Effects of embedded trench installations using expanded polystyrene geofam applied to buried corrugated steel arch structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **98**, pp.1-9 (2020).
39. Tafreshi, S.M., Darabi, N.J. and Dawson, A.R. "Combining EPS geofam with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting", *Geotextiles and Geomembranes*, **48**(3), pp. 400-418 (2020).
40. Mohammad Momeni, R. and Khodaparast, M. "Numerical investigation of the effect of reinforcement soil by geofam on reducing the effects of explosion loading", *Journal Sharif.ir*, **35-2**(4.1), pp. 81-91 (in Persian) (2018).



41. Selvakumar, S. and Soundara, B. "Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofom granules column inclusion", *Geotextiles and Geomembranes*, **47**(1), pp. 1-11 (2019).
42. Rezaei, B., Jamshidi chenari, R. and Veis Karami, M. "Evaluation of lateral pressure of sand, geofom (EPS) and cement mixtures using laboratory model", Thesis (in Persian) (1397).
43. Rezaei, B., Jamshidi chenari, R. and Veis Karami, M. "Evaluation of the effect of geofom (EPS) on lateral earth pressures on the retaining wall by physical model", *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management*, in Iran, Tehran (in Persian) (2018).
44. ASTM D2487-17, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
45. ASTM D854-14, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA (2014).
46. ASTM, D 4253-00, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", American Society for Testing and Materials (2000).
47. ASTM D7263-09, "Standard test methods for laboratory determination of density (Unit Weight) of soil specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA (2018).
48. ASTM D3080-04, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA (2004).
49. ASTM C578-17, "Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
50. ASTM, D6817M-17, "Standard specification for rigid cellular polystyrene geofom", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
51. Jaky, J. "Earth pressure in silos", *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, pp. 103-107 (1948).