

بررسی آزمایشگاهی رفتار مخلوط خاک - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی

امیر فرهنگ احمدیان (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس قزوینی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران تهرانیف، (بهار ۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۱، ص. ۶۸-۵۷

استفاده از مصالح مختلف در ترکیب با خاک، جهت بهبود رفتار یا سبک‌سازی آن در حال توسعه است. یکی از انواع مصالح اشاره شده جهت اختلاط با خاک و سبک‌سازی آن، دانه‌های پلی استایرن منبسط شده (EPS) است. در نوشتار حاضر، جهت بررسی رفتار مخلوط خاک - دانه‌های EPS و همچنین تأثیر لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در مقاومت آن، تعداد ۳۴ آزمایش سه محوری استاندارد انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که اگرچه دانه‌های EPS سبب سبک شدن مخلوط می‌شوند، اما صلیبیت کم آن‌ها سبب افت مقاومت مخلوط نسبت به فقط خاک می‌شوند. جهت ایجاد تعادل بین کاهش وزن مخصوص و عدم افت زیاد مقاومت مخلوط، مقدار ۵٪ جرمی دانه‌های EPS در مخلوط مناسب به نظر می‌رسد. استفاده از ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل محصور در ۴ لایه‌ی لنز ماسه‌یی در نمونه، ضمن کاهش ۲۵٪ در وزن مخصوص مخلوط، سبب افزایش مقاومت آن در کرنش ۳٪ به میزان ۱۲۳٪ نسبت به حالت مخلوط غیرمسلح می‌شود.

واژگان کلیدی: آزمایش سه محوری، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، تسلیح، ژئوتکستایل، لنز ماسه‌یی.

fahmadian@mail.kntu.ac.ir
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

وزن مخصوص بسیار کم به‌عنوان ویژگی منحصر به فرد پلی استایرن، آن را از دیگر مصالح متمایز ساخته است. قابلیت فشرددگی، میرایی، عایق صوت و دما و یکپارچگی از دیگر ویژگی‌های EPS است.^[۱] از این رو پژوهشگران و مهندسان ژئوتکنیک با توجه به ویژگی‌های EPS به فکر استفاده از آن برای بهبود سبک‌سازی خاک و رفتار سازه‌ی ژئوتکنیکی افتادند. استفاده از بلوک EPS به‌عنوان پرکننده در خاکریزها به منظور پایدارسازی شیروانی‌ها، افزایش ضریب اطمینان استاتیکی و دینامیکی، کاهش نشست ناشی از بار خاکریز، کاهش زمان ساخت و همچنین استفاده از بلوک روی لوله‌های مدفون به منظور کاهش تنش ناشی از سربار روی لوله، از جمله مصارف کاربردی بلوک EPS است.^[۲] همچنین در مواردی از مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، سیمان - مخلوط خاک و کف - EPS سیمان به‌عنوان خاکریز بستر راه در بنادر و فرودگاه‌های مناطق ساحلی در کشورهای چین و ژاپن استفاده شده است.^[۳] در این راستا، مطالعات فراوانی بر روی مخلوط خاک با دانه‌های EPS به همراه مواد پایدارکننده، نظیر سیمان و آهک و یا بدون آن‌ها انجام شده است.^[۴-۹]

دنگ و ژیا^[۱۰] (۲۰۱۰)، به بررسی تأثیر میزان دانه‌های EPS در رفتار تنش - کرنش مخلوط ماسه و دانه‌های EPS با آزمایش سه محوری فشاری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده روی مخلوط پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن دانه‌های

احداث خاکریز روی بستر خاک نرم، ساخت دیوار حائل با خاکریزی مرتفع، و اجرای خطوط لوله در عمق کم، به‌عنوان نمونه‌هایی از سازه‌های ژئوتکنیکی همواره به‌عنوان مسائل چالش برانگیز در مهندسی عمران مطرح بوده‌اند. جهت اجرای سازه‌های مذکور می‌توان به روش‌هایی از قبیل: اصلاح، تثبیت و تسلیح خاک اشاره کرد. راهکارهای ذکر شده با توجه به حجم و نوع خاک ممکن است پرهزینه، زمان‌بر و غیرعملی باشند.

یکی دیگر از راهکارها می‌تواند جایگزینی خاکریز با خاک سبک‌سازی شده (LWTS)^۱ یا مصالح سبک باشد. از جمله مصالح سبک می‌توان به مخلوط خاک با خرده لاستیک، خرده چوب، پوک‌های معدنی، دانه‌های پلی استایرن منبسط شده (EPS)^۲، کف EPS و یا بلوک EPS اشاره کرد. در بین مصالح اخیر، EPS به‌عنوان یکی از مصالح پرکننده‌ی سبک از خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها با ساختار سلولی بسته جهت اجرای سازه‌های خاکی مطرح بوده است.^[۱] با اختراع EPS در سال ۱۹۵۰، استفاده از آن در بیشتر کشورها و در صنایع مختلف، از جمله مهندسی عمران به‌صورت کف، دانه و بلوک توسعه یافته است.

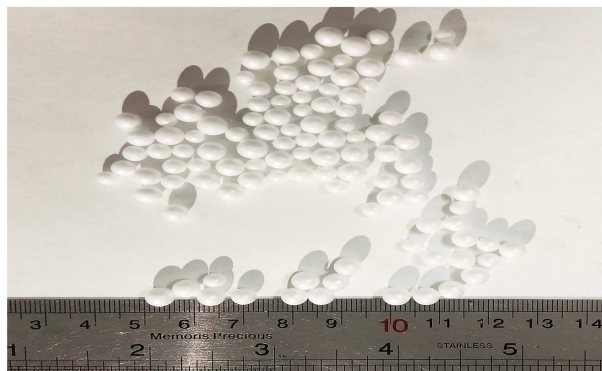
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۱۶، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2018.50325.2299

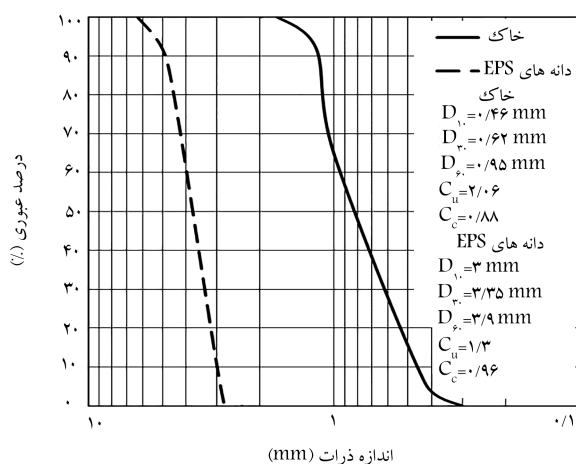


الف) ماسه سیلیسی با دانه های یکنواخت؛



ب) دانه های کروی EPS.

شکل ۱. تصویر مصالح مصرفی.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک و دانه‌های EPS موردنظر.

آزمایش‌های سه‌محوری روی ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS از همگن بودن نمونه‌ها اطمینان حاصل کرد (شکل ۱ الف). منحنی دانه‌بندی خاک و مشخصات آن مطابق شکل ۲ است. بر اساس طبقه‌بندی سیستم متحد^۵ (ASTM D۲۴۸۷ - ۱۱)^[۱۳] خاک ذکر شده در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP)^۶ قرار می‌گیرد.

توده‌ی ویژه‌ی خاک در آزمایشگاه بر اساس روش تعریف شده در استاندارد (ASTM D۸۵۴ - ۱۴)^[۱۴] برابر $G_s = 2/63$ و مقادیر وزن مخصوص خشک و کمینه و بیشینه‌ی ماسه‌ی سیلیسی بر اساس استاندارد (ASTM D۴۲۵۴ - ۱۴) و (ASTM D۴۲۵۳ - ۱۴)^[۱۴] به ترتیب ۱۴/۱ و ۱۷ کیلونیوتن بر مترمکعب (میانگین ۳ بار اندازه‌گیری) اندازه‌گیری شدند. مقادیر تخلخل بیشینه و کمینه‌ی خاک با توجه به مقادیر بیشینه و کمینه‌ی چگالی آن به ترتیب ۰/۸۶۵ و ۰/۵۴۷ هستند.

EPS به ماسه، ضمن تغییر رفتار نمونه از رفتار ماسه‌ی متراکم به رفتار ماسه‌ی سست، تنش انحرافی قابل تحمل نمونه کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات دیگر ایشان (۲۰۰۸)^[۱۰]، روی رفتار برشی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS با استفاده از آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که با افزایش درصد دانه‌های EPS در مخلوط، مقدار تنش برشی کاهش می‌یابد. در واقع، صلبیت کمتر دانه‌های EPS نسبت به دانه‌های ماسه موجب کاهش قفل‌شدگی و اصطکاک بین دانه‌ها و در نتیجه کاهش تنش برشی می‌شود.

چناری و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۱] در مطالعات خود بیان کردند که افزایش دانه‌های EPS در مخلوط، باعث افزایش ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون (k_0) یا به عبارتی کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن می‌شود. همچنین علایی و چناری (۲۰۱۸)^[۱۲] با انجام آزمایش برش مستقیم نتیجه گرفتند که افزودن دانه‌های EPS به ماسه‌ی مسلح با ژئوگرید، علی‌رغم کاهش سختی برشی آن، موجب بهبود خاصیت میرایی در بارگذاری‌های دینامیکی می‌شود. ادینکلیر^۴ و آزر (۲۰۱۴)^[۱] به بررسی اثر اندازه‌ی دانه‌های EPS در رفتار مخلوط با استفاده از آزمایش سه محوری فشاری UU پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از دانه‌های EPS در مخلوط با ماسه، سبب کاهش تنش انحرافی و پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده مبین رفتار سخت شونده‌ی مخلوط ماسه و دانه‌های EPS در دو فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال است. دلیل رفتار اخیر، کرنش حجمی بالای دانه‌های EPS در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا و غلبه‌ی رفتار دانه‌های EPS در رفتار ماسه است.

اگرچه جایگزینی بستر حاوی خاک متراکم با مخلوط خاک و دانه‌های EPS موجب کاهش مقاومت بستر می‌شود،^[۱۰] اما این امر از یک طرف موجب کاهش چشم‌گیر وزن مخلوط در مقایسه با فقط خاک و کاهش نیروهای ناشی از وزن آن بر سازه‌هایی نظیر دیوارهای حائل و لوله‌های مدفون می‌شود. همچنین از طرف دیگر، برای جبران افت مقاومت ناشی از افزودن دانه‌های EPS به خاک، می‌توان از تسلیح آن با ژئوستتیک‌ها، نظیر ژئوتکستایل و ژئوگرید به عنوان یک راهکار مناسب و عملی استفاده کرد.

از این رو در پژوهش حاضر به منظور بررسی امکان جبران افت مقاومت ناشی از وجود دانه‌های EPS در مخلوط، استفاده از تسلیح با لایه‌های ژئوتکستایل و همچنین لایه‌های لنز ماسه‌یی با انجام آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده (CU) روی نمونه‌های با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر در شرایط مختلف مد نظر است. در آزمایش‌های مذکور، اثر این عوامل در رفتار تنش - کرنش نمونه‌ها بررسی شده است:

- درصد دانه‌های EPS در مخلوط با خاک؛
- تسلیح با ژئوتکستایل و تعداد لایه‌های آن؛
- لنز ماسه‌یی و تعداد لایه‌های آن؛
- لایه‌ی تسلیح محصور در لنز ماسه‌یی و تعداد لایه‌های آن.

۲. مصالح مصرفی

۲.۱. خاک

در پژوهش حاضر، از یک نوع ماسه‌ی سیلیسی (محصول شرکت تأمین ماسه‌ی ریخته‌گری فیروزکوه) کاملاً یکنواخت استفاده شده است، تا بتوان در هنگام انجام

۲.۲. دانه‌های EPS

دانه‌های EPS مورد استفاده در آزمایش‌ها از کارخانه‌ی محلی تولید بلوک‌های ژئوفوم به نام یکتا فوم واقع در حومه‌ی شهر قم دارای پروانه‌ی استاندارد ملی ایران تهیه شدند. دانه‌های EPS سفید، کروی و با قطر ۲/۷۵-۶ میلی‌متر بودند (شکل ۱ ب) برای اندازه‌گیری وزن مخصوص خشک و توده‌ی ویژه‌ی دانه‌های EPS، بنا به پیشنهاد دنگ و ژیا^[۷]، از استاندارد (ASTM C۱۲۸)^[۱۷] استفاده شد. بر این اساس وزن مخصوص خشک و توده‌ی ویژه‌ی دانه‌های EPS به ترتیب ۰/۱۱ کیلو نیوتن بر متر مکعب و ۰/۰۲ اندازه‌گیری شدند. منحنی دانه‌بندی EPS و مشخصات فیزیکی دانه‌های EPS در شکل ۲ مشاهده می‌شوند.

۳.۲. ژئوتکستایل

ژئوتکستایل مورد استفاده به صورت بافته نشده از جنس پلی‌پروپیلن ساخت شرکت هایتکس انگلستان با مشخصات مورد نظر در جدول ۱ است. با توجه به مطالعات کورنر^[۱۸] (۲۰۰۵)، مقاومت کششی ژئوتکستایل بافته نشده با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد. با توجه به انجام تعدادی آزمایش اولیه روی چند نوع ژئوتکستایل با ضخامت‌های مختلف، ژئوتکستایل ذکر شده با ضخامت حدود ۳/۵ میلی‌متر به دلیل کارایی مناسب در بهبود رفتار خاک و دانه‌های EPS انتخاب شده است.

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکستایل.

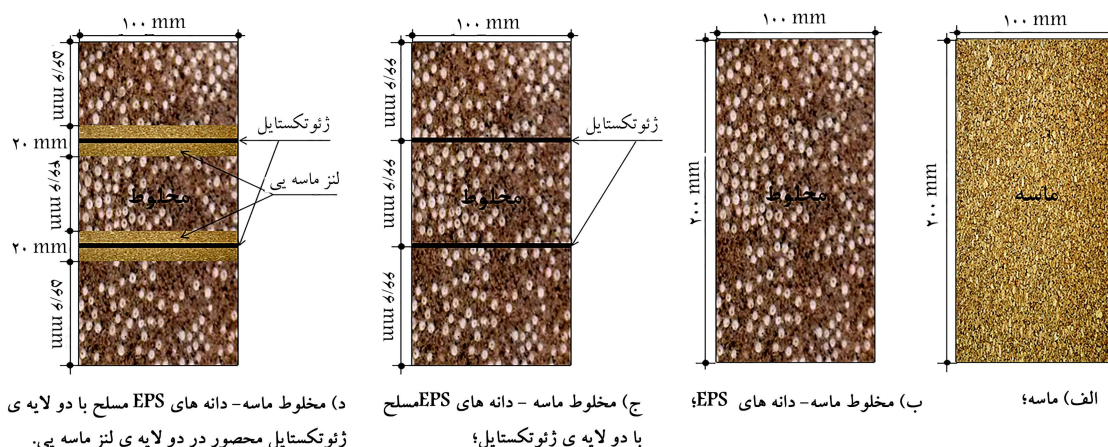
پارامتر	مقدار
مقاومت کششی در جهت ماشین (MD) (kN/m)	۱۶
مقاومت کششی در جهت مقابل ماشین (CD) (kN/m)	۱۳
مقاومت در برابر سوراخ شدگی استاتیکی (CBR) (kN)	۲/۱
حد نفوذ در برابر سوراخ شدگی استاتیکی (mm)	۱۴/۵
ازیاد طول (%)	۵۰
ضخامت (mm)	۳/۵
نفوذپذیری (m/s)	۰/۰۶

۳. برنامه‌ی آزمایش‌ها

برنامه‌ی آزمایش‌ها جهت بررسی عوامل مؤثر در رفتار خاک و مخلوط خاک - دانه‌های EPS تنظیم شد. به منظور بررسی عوامل اخیر، تعداد ۳۴ آزمایش مستقل سه‌محوری (مطابق جدول ۲) و تعداد ۷ آزمایش تکراری نیز جهت کنترل نتایج آزمایش‌ها انجام شدند، که روی فقط ماسه، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS با لنز ماسه‌یی به ضخامت ۲ سانتی‌متر و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی به ضخامت ۲ سانتی‌متر انجام شده‌اند. مطابق جدول ۳، آزمایش‌های اخیر در سه فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال، سه درصد جرمی ۰/۵، ۱ و ۲ از دانه‌های EPS مخلوط با خاک، ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه‌ی تسلیح با ژئوتکستایل و ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه‌ی لنز ماسه‌یی مد نظر هستند. لازم به ذکر است که در نمونه‌های حاوی N لایه‌ی ژئوتکستایل و N_L لایه‌ی لنز ماسه‌یی ($N = N_L$) لایه‌های ژئوتکستایل دقیقاً در مرکز لایه‌ی لنز قرار می‌گیرند. شکل ۳، تصویر شماتیک از هندسه‌ی نمونه‌ی ماسه، نمونه‌ی مخلوط ماسه و دانه‌های EPS و نمونه‌های مخلوط ماسه و دانه‌های EPS با ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل ($N = 2$) یا ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی ($N = N_L = 2$) را نشان می‌دهد.

۴. نحوه‌ی انجام آزمایش سه‌محوری (ساخت نمونه و بارگذاری آن)

آزمایش‌های سه‌محوری روی نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر در محل آزمایشگاه ژئوتکنیک شرکت ماندرو انجام شده‌اند. مطابق استاندارد (ASTM D۲۸۵۰ - ۰۳)^[۱۹]، بزرگ‌ترین اندازه‌ی دانه‌ها نباید از $\frac{1}{5}$ قطر نمونه‌ی سه‌محوری تجاوز کند، که با توجه به منحنی دانه‌بندی و نوع مصالح (شکل ۲)، شرط مذکور برقرار است. لذا جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، با توجه به حجم و چگالی مورد نظر برای لایه‌های مختلف نمونه، اقدام به آماده‌سازی آن‌ها در حالت‌های مختلف (ماسه، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی) شده است. در تمامی حالت‌ها، درصد رطوبت نمونه حدود ۸٪ بوده است، که آب مورد نظر به منظور انجام عملیات اختلاط ماسه و دانه‌های EPS و سهولت در انجام عملیات تراکم به تمامی نمونه‌ها افزوده شده است.^[۲۰]



جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری.

نمونه	درصد جرمی دانه‌های EPS $\eta(\%)$	تعداد لایه‌های ژئوتکستایل (N)	تعداد لایه‌های لنز ماسه‌یی (N_L)	فشار همه‌جانبه $\sigma_3(kPa)$	چگالی نسبی $D_r(\%)$	تعداد آزمایش
ماسه	-	-	-	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰	۵۵ و ۷۰	۶
	۱، ۰، ۵	-	-	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰	۵۵	۹
		-	-	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰		۳
		۳ و ۲، ۱	-	۲۰۰		۳
		۴	-	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰		۳
مخلوط ماسه - دانه‌های EPS						
	۰، ۵	۱	۱	۲۰۰	۷۰	۴
		۲	۲			۱
		۳	۳			۱
		۴	۴	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰		۳

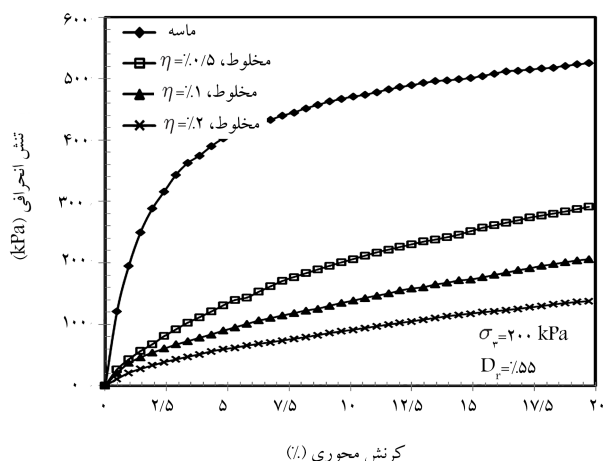
جدول ۳. تغییرات وزن مخصوص نمونه‌های مورد آزمایش.

نمونه	چگالی نسبی (D_r)(%)	وزن مخصوص نمونه (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	کاهش وزن مخصوص مخلوط نسبت به وزن مخصوص ماسه (%)
ماسه	۵۵	۱۶، ۸	-
مخلوط (۵٪)	۵۵	۹، ۷	۴۲
مخلوط (۱٪)	۵۵	۷، ۱	۵۷
مخلوط (۲٪)	۵۵	۴، ۷	۷۲
ماسه	۷۰	۱۷، ۳	-
مخلوط (۵٪)	۷۰	۱۰، ۵	۳۹



شکل ۴. دستگاه آزمایش سه‌محوری در حال انجام آزمایش.

برای ساخت نمونه‌های حاوی لایه‌های مخلوط، ابتدا ماسه، دانه‌های EPS و آب به مقدار مشخص وزن شدند. سپس جهت اختلاط، مصالح ذکر شده در یک ظرف پلاستیکی و به مدت چند دقیقه هم زده شدند، تا ضمن اختلاط کامل دانه‌های EPS و ماسه، مخلوطی کاملاً همگن به دست آید. با توجه به عدم وجود چسبندگی در ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، برای ساخت نمونه از قالب دو تکه استفاده شده است. به این منظور غشاء لاستیکی در داخل قالب کشیده و دور آن برگردانده شد. پس از تهیه‌ی مخلوط خاک - دانه‌های EPS به میزان مورد نیاز برای ساخت نمونه، با توجه به تراکم نسبی و حجم لایه و در صورت لزوم استفاده از ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی، مصالح مورد نظر به ترتیب در داخل قالب ریخته و با استفاده از کوبه و دقت زیاد تا رسیدن به ارتفاع مشخص در شاخص متراکم شدند. در انتها و پس از آماده شدن نمونه‌ی سه محوری و قرار دادن آن داخل سلول، نمونه آماده‌ی انجام آزمایش شد. با قرار دادن سلول روی جک سه محوری مطابق شکل ۴ و اعمال فشار همه‌جانبه‌ی مورد نظر، بار قائم (تنش انحرافی) با حرکت رو به بالای صفحه‌ی بارگذاری با سرعت ۱/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه اعمال و تغییرات تنش - کرنش



شکل ۵. تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه و مخلوط ماسه با ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ دانه‌های EPS (۲٪، ۱٪ و ۰/۵٪) در فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال.

۳.۵. تأثیر درصد جرمی دانه‌های EPS در مخلوط با ماسه در مقاومت نمونه

در شکل ۵، تأثیر درصد دانه‌های EPS در رفتار مخلوط در فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، که مطابق آن وجود دانه‌های EPS در مخلوط با ماسه سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت نمونه می‌شود، به‌طوری که افزودن ۵٪ EPS به ماسه، کاهش ۵۰٪ در مقاومت نمونه (در ۱۵٪ کرنش) را نسبت به فقط ماسه در بردارد. در این حالت وزن مخصوص نمونه با افزودن ۵٪ EPS به ماسه، ۴۲٪ کاهش یافته است (جدول ۳). همچنین با افزایش مقدار EPS، افت مقاومت مخلوط نسبت به فقط ماسه افزایش می‌یابد، به‌طوری که با افزودن ۱٪ و ۲٪ EPS به ماسه، مقاومت مخلوط در کرنش ۱۵٪ نسبت به فقط ماسه، به ترتیب ۶۵٪ و ۷۸٪ افت می‌کند. با توجه به شکل ۵، افزایش مقدار دانه‌های EPS سبب کاهش مدول کشسانی اولیه می‌شود، که این امر حاکی از کاهش صلبیت نمونه‌ی مخلوط است. کاهش مقاومت مخلوط ماسه - دانه‌های EPS را می‌توان به صلبیت پایین و قابلیت فشردگی دانه‌های EPS و همچنین اصطکاک کم بین دانه‌های EPS و ماسه، ناشی از غلبه‌ی بیشتر رفتار دانه‌های EPS در رفتار ماسه با افزایش درصد دانه‌های EPS نسبت داد. ادینکلیر و از (۲۰۱۴)^[۱] نیز در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که افزودن ۵٪ جرمی دانه‌های EPS به ماسه، سبب کاهش ۴۹٪ مقاومت نمونه و تغییر رفتار تنش - کرنش ماسه به رفتار سخت‌شونده می‌شود. بنابراین جهت استفاده از دانه‌های EPS در مخلوط با خاک، باید توازنی میان افت وزن مخصوص مخلوط به‌عنوان عاملی مثبت و افت مقاومت مخلوط به‌عنوان عامل منفی برقرار کرد. دنگ و ژیا (۲۰۱۰)^[۷] میزان ۵٪ EPS جهت اختلاط با خاک برای تأمین دو عامل اخیر را توصیه کرده‌اند. از این رو در ادامه‌ی بررسی‌ها (بررسی عوامل دیگر، نظیر وجود تسلیخ و لنز ماسه‌یی) از میزان ۵٪ جرمی دانه‌های EPS در مخلوط با خاک استفاده شده است. لازم به ذکر است که مخلوط خاک و دانه‌های EPS، بدون در نظر گرفتن تهیدات لازم جهت جبران مقاومت آن، قابلیت استفاده در خاکریزهای تحت تنش زیاد را ندارد. به هر حال از این مخلوط می‌توان در خاکریزهایی نظیر خاکریز روی لوله‌ها، ترانشه‌های خدماتی و پشت دیوارهای حائل به منظور ایجاد خاکریز سبک در حالت عدم اعمال تنش زیاد بر آن‌ها بهره برد. همچنین به دلیل وزن سبک مخلوط و خصوصیت میرایی

نمونه تا لحظه‌ی گسیختگی آن اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که چگالی نسبی موردنظر نمونه‌ها، مربوط به قبل از شروع آزمایش بوده و مقدار آن بعد از اعمال تنش همه‌جانبه و تحکیم اندازه‌گیری نشده است.

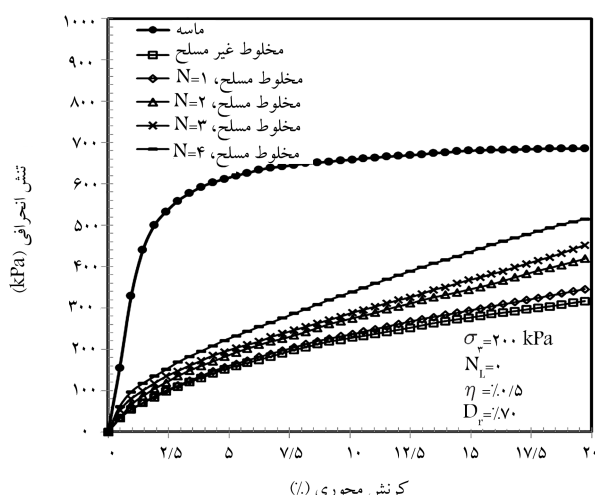
۵. نتایج

۱.۵. تکرارپذیری و کنترل صحت نتایج

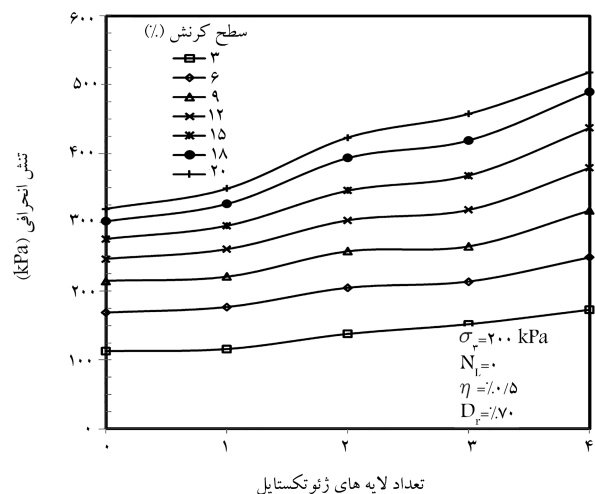
تکرارپذیری نتایج از جمله مسائل مهم در حصول اطمینان از صحت عملکرد سیستم آزمایش و نتایج حاصل در مطالعات آزمایشگاهی است. اگرچه استفاده از ماسه و دانه‌های EPS با دانه‌بندی یکنواخت، درصد خطای ناشی از آماده‌سازی نمونه‌ها را به میزان کمیته می‌رساند، اما جهت اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، تعدادی از آن‌ها ۲ یا ۳ بار تکرار شدند. نتایج حاصل مبین اختلاف بین ۳٪ تا ۵٪ بین آزمایش‌های تکراری است، به‌طوری که این مقدار خطا در محدوده‌ی مطالعات آزمایشگاهی قابل قبول و نمایانگر دقت مناسب در آماده‌سازی لایه‌های مختلف از مخلوط ماسه و دانه‌های EPS، مسلح‌کننده و لنزهای ماسه‌یی، انجام روند آزمایش‌ها و دقت در اندازه‌گیری‌هاست. به هر حال اختلاف بین نتایج دو آزمایش را می‌توان به عواملی از قبیل: نحوه‌ی تراکم لایه‌ها، یکسان نبودن چگالی نسبی لایه‌ها و خطای احتمالی در اندازه‌گیری تنش و کرنش نمونه توسط حس‌گرها نسبت داد. اگرچه اختلاف بین چگالی نسبی واقعی نمونه‌ها با چگالی نسبی موردنظر در آزمایش (۵۵٪) یا ۷۰٪ محتمل است، اما اختلاف اندک بین نتایج آزمایش‌های تکراری مبین دقت در آماده‌سازی نمونه‌ها و تغییر ناچیز چگالی نسبی نمونه‌ها نسبت به چگالی نسبی موردنظر است.

۲.۵. تأثیر درصد جرمی دانه‌های EPS در وزن مخصوص مخلوط ماسه و دانه‌های EPS

در جدول ۳، وزن مخصوص نمونه‌های مورد آزمایش با توجه به میزان چگالی نسبی آن‌ها ارائه شده است، که مطابق آن افزودن دانه‌های EPS به خاک، علی‌رغم ثابت نگه‌داشتن چگالی نسبی مخلوط، سبب کاهش وزن مخصوص و در نتیجه سبک شدن آن می‌شود. این تذکر لازم است که با افزایش چگالی نسبی، تأثیر سبک شدن مخلوط به وسیله‌ی دانه‌های EPS کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، با افزودن ۵٪ دانه‌های EPS به خاک، وزن مخصوص مخلوط نسبت به وزن مخصوص فقط خاک، در دو چگالی نسبی ۵۵٪ و ۷۰٪ به ترتیب ۴۲٪ و ۳۹٪ کاهش یافته است. روند تأثیر درصد جرمی EPS در وزن مخصوص مخلوط از نظر کیفی و کمی سازگاری خوبی با نتایج ادینکلیر و از (۲۰۱۴)^[۱] دارد. آن‌ها نیز گزارش کردند که استفاده از ۵٪ جرمی دانه‌های EPS در مخلوط با خاک در چگالی نسبی ۶۵٪، سبب کاهش وزن مخصوص به مقدار ۴۲٪ نسبت به فقط خاک می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که نرخ کاهش در میزان وزن مخصوص مخلوط با افزایش درصد EPS به خاک کاهش یافته است. به‌عنوان نمونه با ۲ برابر شدن درصد جرمی EPS (تغییر از ۵٪ به ۱۰٪ جرمی EPS) فقط ۱۵٪ کاهش بیشتر در وزن مخصوص مخلوط حاصل می‌شود. بنابراین با توجه به مشکلات در اختلاط خاک و دانه‌های EPS با بیش از ۵٪ جرمی و همچنین عدم تأثیر زیاد در سبک‌سازی مخلوط، استفاده از EPS به مقدار ۵٪ جهت سبک‌سازی منطقی به نظر می‌رسد.



شکل ۶. تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در حالت غیرمسلح و مسلح با ۱ الی ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۷. تغییرات تنش انحرافی در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح در سطوح مختلف کرنش تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال.

دانه‌های EPS و اصطکاک کم بین دانه‌های EPS و ژئوتکستایل (در مقایسه با اصطکاک خاک با ژئوتکستایل) قادر به جبران افت مقاومت مخلوط و رسیدن به مقاومت فقط خاک نیست. از این رو جهت افزایش مقاومت مخلوط باید از روش‌های دیگری نیز استفاده کرد. لذا در بخش‌های آتی جهت افزایش اصطکاک و اندرکنش بین لایه‌ی تسلیح و مصالح بالا و پایین آن و در نتیجه بهبود رفتار و عملکرد مخلوط، استفاده از لنز ماسه‌یی و محصور کردن لایه‌ی تسلیح محصور در لنز ماسه‌یی بررسی شده است.

۵.۵. اثر لنز ماسه‌یی در رفتار مخلوط ماسه - دانه‌های EPS

جهت افزایش مقاومت مخلوط خاک و دانه‌های EPS به جای تسلیح نمونه با لایه‌های ژئوتکستایل، از لایه‌های لنز ماسه‌یی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل ۸، منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی فقط ماسه، مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در حالت غیرمسلح و در حالت وجود ۱ الی ۴ لایه‌ی لنز ماسه‌یی مشاهده می‌شود، که مطابق آن استفاده از لایه‌های لنز ماسه‌یی موجب افزایش

انرژی دانه‌های EPS، امکان عملکرد مناسب آن به‌عنوان خاکریز پشت دیوارهای حائل به‌خصوص در مناطق زلزله‌خیز، به منظور کاهش نیروی زلزله‌ی وارد بر دیوار وجود دارد. اما به هر حال در صورت عدم تأمین مقاومت موردنیاز توسط مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، باید مقاومت آن را به گونه‌یی مناسب افزایش داد. از این رو در بخش‌های آتی، تسلیح مخلوط ماسه - دانه‌های EPS و کاربرد لنز ماسه‌یی جهت بهبود رفتار تنش - کرنش مخلوط بررسی شده است.

۴.۵. تأثیر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل در رفتار مخلوط ماسه -

دانه‌های EPS

همان‌طور که ملاحظه شد، اگرچه استفاده از دانه‌های EPS در مخلوط با خاک امکان کاهش قابل توجه وزن مخصوص مخلوط را به‌عنوان یک عامل مثبت فراهم می‌کند، اما در مقابل موجب افت مقاومت مخلوط در مقایسه با فقط خاک می‌شود. در بخش حاضر، اثر تسلیح با لایه‌های ژئوتکستایل به‌عنوان یک راه حل، جهت جبران کاهش مقاومت مخلوط خاک - دانه‌های EPS در کنار مزیت سبک شدن آن بررسی شده است. شکل ۶، تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه، مخلوط غیرمسلح ماسه - دانه‌های EPS و مخلوط مسلح با ۱ الی ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با تسلیح مخلوط و افزایش تعداد لایه‌های تسلیح، مقاومت آن نسبت به نمونه‌ی مخلوط بدون تسلیح افزایش می‌یابد، اما مقاومت آن همچنان از فقط خاک کمتر است.

شکل ۷، نمودار تغییرات تنش انحرافی را در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح در ترازهای کرنش ۳٪، ۶٪، ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪، ۱۸٪ و ۲۰٪ نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، تسلیح مخلوط با لایه‌های ژئوتکستایل صرف‌نظر از تراز کرنش موجب افزایش مقاومت نمونه شده است. به‌طور مثال، در تراز کرنش ۳٪ مقاومت نمونه‌ی مخلوط غیرمسلح از مقدار ۱۱۳ کیلوپاسکال به مقدار ۱۷۳ کیلوپاسکال برای نمونه‌ی مخلوط با ۴ لایه‌ی تسلیح (۵۳٪ افزایش) می‌رسد. همچنین ملاحظه می‌شود، تسلیح با یک لایه‌ی ژئوتکستایل در وسط نمونه، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در افزایش مقاومت نمونه (به‌خصوص در کرنش‌های پایین) ندارد. علت این امر عدم به‌کار افتادن (ایجاد کشش) لایه‌ی تسلیح در کرنش‌های پایین و در نتیجه عدم تأثیر قابل توجه در مقاومت مخلوط است. بنابراین تأثیر مثبت لایه‌های ژئوتکستایل در افزایش مقاومت مخلوط در تعداد بیشتر لایه‌های تسلیح و ترازهای کرنش بالا رخ می‌دهد. این امر مبین لزوم بروز کرنش محوری در نمونه و در نتیجه بروز کرنش در لایه‌های تسلیح جهت فعال شدن مقاومت کششی لایه‌ها و عملکرد غشایی آن‌ها جهت افزایش مقاومت مخلوط است. بر این، در ترازهای کرنش بالا، به دلیل افزایش تراکم مخلوط و افزایش اصطکاک بین سطح تماس لایه‌های ژئوتکستایل و مخلوط، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، بروز کشش در لایه‌های ژئوتکستایل باعث ایجاد محصورکنندگی داخلی در نمونه و افزایش مقاومت نمونه می‌شود.^[۲۰] همچنین مطابق شکل ۷، استفاده از ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل با فاصله‌ی ۱/۵ ارتفاع نمونه از همدیگر، بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت مخلوط را دارد. دلیل این امر کاهش ضخامت لایه‌های مخلوط و محصورشدگی آن‌ها بین لایه‌های تسلیح و قطع صفحات گسیختگی محتمل توسط لایه‌های تسلیح است. این امر با نتایج دیگر پژوهش‌گران در خصوص بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح در خاک ماسه‌یی توسط آزمایش سه‌محوری مطابقت خوبی دارد.^[۲۱،۲۰،۱۸]

اگرچه نتایج حاصل از نمونه‌های مسلح مبین اثر تسلیح در بهبود مقاومت مخلوط خاک - دانه‌های EPS است، اما تسلیح مخلوط نیز به دلیل صلبیت کم

جدول ۴. تغییرات IF_1 با تعداد لایه‌های ژئوتکستایل در سطوح مختلف کرنش.

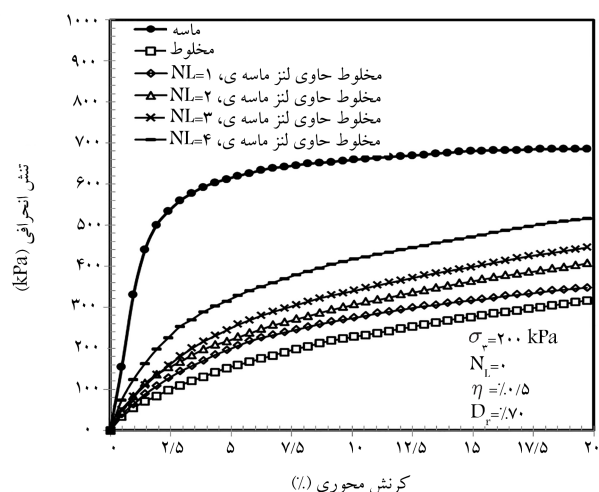
کرنش محوری (%)	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
۳	۱/۰۲۶	۱/۰۲۲	۱/۰۳۴۵	۱/۰۵۳۰
۶	۱/۰۴۷	۱/۰۲۱۰	۱/۰۲۶۶	۱/۰۴۷۳
۹	۱/۰۲۸	۱/۰۲۰۰	۱/۰۲۳۲	۱/۰۴۷۴
۱۲	۱/۰۵۶	۱/۰۲۲۶	۱/۰۲۸۷	۱/۰۵۳۴
۱۵	۱/۰۶۸	۱/۰۲۵۳	۱/۰۳۳۳	۱/۰۵۸۳
۱۸	۱/۰۸۳	۱/۰۳۰۴	۱/۰۳۸۹	۱/۰۶۲۳
۲۰	۱/۰۹۱	۱/۰۳۲۴	۱/۰۴۳۱	۱/۰۶۲۱

در جدول‌های ۴ و ۵، به ترتیب مقادیر IF_1 و IF_2 برای تعداد لایه‌های تسلیج (N) و تعداد لایه‌های لنز (N_L) در ترازهای مختلف کرنش ارائه شده است، که با توجه به آن‌ها می‌توان گفت که اگر چه مخلوط حاوی لنز ماسه‌یی در تمامی ترازهای کرنش، تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت مخلوط نسبت به حالت تسلیج با ژئوتکستایل دارد ($IF_2 > IF_1$)، اما استفاده از لنزهای ماسه‌یی سبب کاهش تأثیر سبک‌سازی مخلوط می‌شود. به عنوان مثال، ۴ لایه لنز ماسه‌یی موجب افزایش وزن مخصوص مخلوط به میزان ۲۴٪ نسبت به حالت عدم وجود لنز شده است. با دقت در جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که در کرنش‌های پایین (کمتر یا مساوی ۹٪)، تأثیر لایه‌های لنز ماسه‌یی در افزایش مقاومت نمونه به میزان قابل توجهی بیشتر از لایه‌های ژئوتکستایل بوده است، اما با افزایش تراز کرنش، اختلاف تأثیر وجود لایه‌های لنز یا تسلیج کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که در کرنش‌های پایین، اثر محصورکنندگی به وسیله لنز ماسه‌یی و در کرنش‌های بالا، بروز کشش در لایه‌های ژئوتکستایل حاکم بر بهبود رفتار و مقاومت نمونه هستند. بنابراین می‌توان برای بهره‌مندی از دو ویژگی ذکر شده در بهبود مقاومت نمونه، به طور هم‌زمان از لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لایه‌های لنز ماسه‌یی در مخلوط خاک و دانه‌های EPS استفاده کرد.

۶.۵. اثر ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در مقاومت نمونه

در بخش‌های قبل، اثر لایه‌های ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی در افزایش مقاومت مخلوط خاک و دانه‌های EPS به طور جداگانه بررسی شده‌اند. به منظور بررسی هم‌زمان تأثیر دو عامل ذکر شده، تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه، مخلوط غیرمسلح و مخلوط مسلح با لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در شکل ۹ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی به طور هم‌زمان سبب افزایش مقاومت مخلوط به میزان قابل توجهی شده است. به طور مثال، استفاده از ۴ لایه ژئوتکستایل ($N = 4$) محصور در ۴ لایه لنز ماسه‌یی ($N_L = 4$) در کرنش ۳٪ سبب افزایش مقاومت مخلوط به مقدار ۱۴۸ کیلوپاسکال یا ۱۲۳٪ نسبت به حالت مخلوط غیرمسلح شده است.

از عوامل مؤثر در افزایش مقاومت مخلوط به واسطه وجود لنز می‌توان به افزایش اصطکاک بین سطح ژئوتکستایل و مصالح بالا و پایین خود، یعنی لایه‌های لنز ماسه‌یی اشاره کرد. به عبارتی دیگر، با توجه به سطح نسبتاً صاف دانه‌های EPS، اصطکاک مخلوط با لایه‌های ژئوتکستایل کم است و با بهره‌گیری از لنزهای ماسه‌یی و قراردادن لایه‌های ژئوتکستایل بین آن‌ها، ضمن استفاده از ویژگی لایه‌های لنز ماسه‌یی، اصطکاک و اندرکنش خاک - ژئوتکستایل افزایش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۹،



شکل ۸. تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در حالت بدون و با ۱ الی ۴ لایه لنز ماسه‌یی تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال.

مقاومت نمونه می‌شود، به طوری که استفاده از ۴ لایه لنز در تراز کرنش ۱۵٪، سبب افزایش مقاومت نهایی به میزان ۱۹۵ کیلوپاسکال یا به عبارتی، به میزان ۷۰٪ نسبت به مخلوط بدون لایه لنز می‌شود؛ که دلیل افزایش ذکر شده مقاومت را می‌توان به افزایش صلبیت نمونه به علت سختی بیشتر لایه‌های نازک ماسه نسبت به مخلوط، محصورشدگی مخلوط بین لایه‌های لنز ماسه‌یی و همچنین بیشتر بودن مقاومت برشی لایه‌های لنز در مقایسه با مقاومت برشی مخلوط نسبت داد. به هر حال باید توجه کرد که استفاده از لنزهای ماسه‌یی سبب کاهش تأثیر سبک‌سازی به وسیله دانه‌های EPS می‌شود. با توجه به جدول ۳، در چگالی نسبی ۷۰٪، استفاده از ۵٪ دانه‌های EPS در مخلوط با ماسه، سبب کاهش وزن مخصوص به میزان ۳۹٪ می‌شود، در حالی که استفاده از ۴ لایه لنز ماسه‌یی ($N_L = 4$) به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در فقط مخلوط، موجب کاهش وزن مخصوص نمونه به میزان ۲۴٪ می‌شود.

به منظور مقایسه‌ی عملکرد تسلیج با لایه‌های ژئوتکستایل و لایه‌های لنز ماسه‌یی در بهبود رفتار ماسه - دانه‌های EPS (با توجه به میزان سبک‌سازی هر یک)، دو ضریب IF_1 و IF_2 مطابق روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند:

$$IF_1 = \frac{(q_{rein.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}}{(q_{unrein.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}} \quad (1)$$

$$IF_2 = \frac{(q_{lens.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}}{(q_{unrein.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}} \quad (2)$$

که در آن‌ها:

$(q_{rein.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}$: مقاومت نمونه‌ی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل در تراز کرنش ε_i ؛

$(q_{unrein.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}$: مقاومت نمونه‌ی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در تراز کرنش ε_i ؛

$(q_{lens.})_{\varepsilon=\varepsilon_i}$: مقاومت نمونه‌ی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS با لنز ماسه‌یی در تراز کرنش ε_i ؛

IF_1 : ضریب بهبود رفتار نمونه‌ی مخلوط مسلح با ژئوتکستایل نسبت به نمونه‌ی مخلوط غیرمسلح در تراز کرنش ε_i ؛

IF_2 : ضریب بهبود رفتار نمونه‌ی مخلوط با لنز ماسه‌یی نسبت به نمونه‌ی مخلوط غیرمسلح در تراز کرنش ε_i .

جدول ۵. تغییرات IF_r با تعداد لایه‌های لنز ماسه‌یی در سطوح مختلف کرنش.

کرنش محوری (%)	$N_L = 1$	$N_L = 2$	$N_L = 3$	$N_L = 4$
۳	۱,۲۹۲	۱,۵۰۴	۱,۶۲۸	۲,۲۷۴
۶	۱,۳۰۷	۱,۴۲۶	۱,۶۲۱	۲,۰۴۱
۹	۱,۲۱۸	۱,۳۴۸	۱,۵۱۶	۱,۸۶۵
۱۲	۱,۱۸۶	۱,۳۳۱	۱,۴۷۳	۱,۷۷۷
۱۵	۱,۱۴۵	۱,۳۱۵	۱,۴۴۵	۱,۷۱۰
۱۸	۱,۱۲۰	۱,۲۹۵	۱,۴۲۵	۱,۶۷۰
۲۰	۱,۰۸۹	۱,۲۸۲	۱,۴۰۰	۱,۶۲۰
درصد افزایش وزن مخصوص	۶	۱۲	۱۹	۲۴
نسبت حالت بدون لنز ماسه‌یی				

با لنز ماسه‌یی دارد. این امر به دلیل فعال نشدن لایه‌ی ژئوتکستایل در کرنش‌های پایین است، به‌طوری‌که با افزایش کرنش و ایجاد کشش در لایه‌ی ژئوتکستایل، تأثیر استفاده از ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی در مخلوط ماسه - دانه‌های EPS افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود لنز ماسه‌یی سبب می‌شود که لایه‌ی ژئوتکستایل در کرنش کمتری نسبت به حالت مسلح با ژئوتکستایل بدون لنز ماسه‌یی به کار افتد. این امر به دلیل افزایش اصطکاک میان سطح ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی و ایجاد کشش در ژئوتکستایل در مقایسه با اصطکاک سطح ژئوتکستایل با مخلوط ماسه - دانه‌های EPS است.

به منظور روشن شدن عملکرد ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در جبران مقاومت نسبت به نمونه‌ی خاک، ضریب IF_r مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$IF_r = \frac{(q_{rein.+lens})_{\varepsilon=\varepsilon_i}}{(q_{sand})_{\varepsilon=\varepsilon_i}} \quad (3)$$

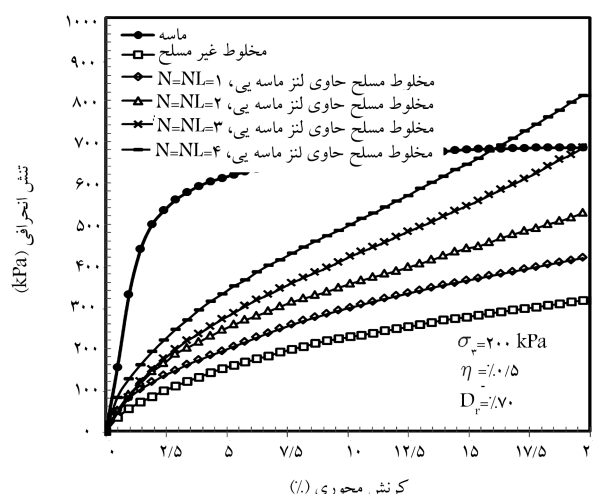
که در آن:

$(q_{rein.+lens})_{\varepsilon=\varepsilon_i}$: مقاومت نمونه‌ی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در تراز کرنش ε_i ؛

$(q_{sand})_{\varepsilon=\varepsilon_i}$: مقاومت نمونه‌ی فقط ماسه در تراز کرنش ε_i ؛

IF_r : ضریب بهبود رفتار نمونه‌ی مخلوط مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی نسبت به نمونه‌ی فقط ماسه در تراز کرنش ε_i .

همچنین در شکل ۱۱، نمودار تغییرات IF_r در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح در ترازهای کرنش ۳٪، ۶٪، ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪، ۱۸٪ و ۲۰٪ مشاهده می‌شود. ضریب IF_r نشان می‌دهد که استفاده‌ی هم‌زمان ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در افزایش مقاومت مخلوط ماسه - دانه‌های EPS دارد. برای نمونه‌ی حاوی ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی، مقاومت در دو تراز کرنش ۳٪ و ۱۵٪ به ترتیب به ۵۲٪ و ۹۵٪ مقاومت نمونه‌ی فقط خاک می‌رسد. در این حالت وزن مخصوص نمونه، ۲۵٪ کمتر از فقط ماسه است. اگر چه مخلوط ماسه - دانه‌های EPS مسلح با ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی همچنان مقاومت کمتری نسبت به فقط خاک دارد؛ اما با توجه به کاهش ۲۵ درصدی در وزن مخصوص، می‌تواند جایگزین مناسبی برای خاکریز پشت دیوارهای حائل، خاکریز روی لوله‌های مدفون و پروژه‌هایی از این قبیل باشد. این امر می‌تواند موجب کاهش تنش‌های وارد به سازه‌ی مورد نظر، به علت وزن کمتر مصالح جایگزین نسبت به خاک، به خصوص تحت بارهای ناشی از زلزله شود.



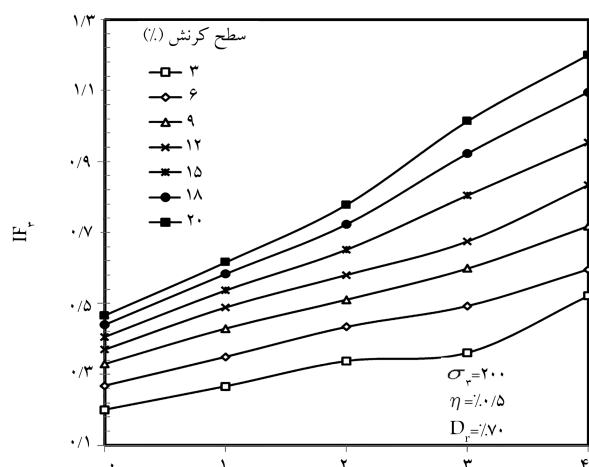
شکل ۹. تغییرات تنش - کرنش فقط ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در حالت غیرمسلح و مسلح با ۱ الی ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال.

با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی، شیب اولیه‌ی نمودار یا مدول کشسانی مخلوط افزایش یافته است. به بیان دیگر، وجود لایه‌های لنز و ژئوتکستایل در ارتفاع نمونه موجب افزایش محصورشدگی نمونه (محدودکنندگی داخلی) و کاهش تغییر شکل و حرکت جانبی آن در مقایسه با نمونه‌ی حاوی یک لایه‌ی ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی شده است.

۷.۵. مقایسه‌ی روش‌های مختلف بهبود رفتار مخلوط ماسه -

دانه‌های EPS

در شکل ۱۰، تغییرات تنش - کرنش حالت‌های مختلف، از جمله: تسلیح با ژئوتکستایل، استفاده از لنز ماسه‌یی و تسلیح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی با ۱ الی ۴ لایه مشاهده می‌شود، که مطابق آن استفاده از لنز ماسه‌یی در مقایسه با ژئوتکستایل در تعداد لایه‌ی یکسان از هر یک، صرف‌نظر از تراز کرنش تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت مخلوط داشته است. این امر را می‌توان به علت مقاومت برشی بیشتر لایه‌ی لنز در مقایسه با مخلوط و اصطکاک کم لایه‌ی تسلیح با مخلوط دانست. نمونه‌ی مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ماسه‌یی در کرنش‌های پایین، رفتاری شبیه به نمونه‌ی



تعداد لایه های ژئوتکستایل محصور در لنت ماسه بی

شکل ۱۱. تغییرات IF_2 در مقابل تعداد لایه های ژئوتکستایل محصور در لنت ماسه بی در سطوح مختلف کرنش.



شکل ۱۲. تصویری از فرورفتن دانه های خاک در دانه های EPS (بعد از اتمام آزمایش).

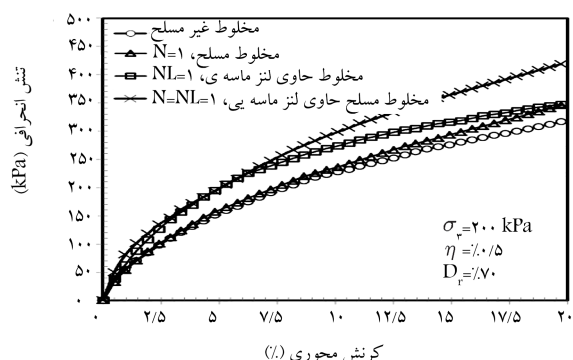
جدول ۶. مقادیر زاویه ی اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی ظاهری (C) در مصالح مختلف ($D_r = 55\%$ و $\eta = 0.5\%$).

نمونه	زاویه ی اصطکاک داخلی، ϕ (درجه)	چسبندگی ظاهری، C (کیلو پاسکال)
ماسه	۳۶	۰
مخلوط ($\eta = 0.5\%$)	۲۱	۵
مخلوط ($\eta = 1\%$)	۱۶	۹
مخلوط ($\eta = 2\%$)	۸.۵	۱۸

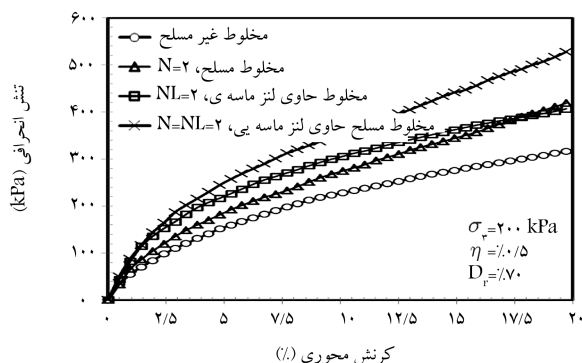
۸.۵. ارزیابی چسبندگی ظاهری و زاویه ی اصطکاک داخلی در

شرایط مختلف

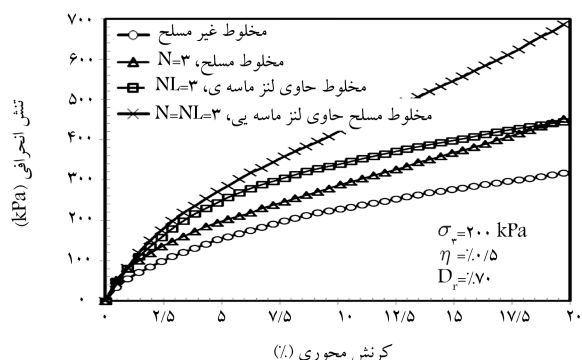
در جدول ۶، زاویه ی اصطکاک داخلی و چسبندگی ظاهری فقط ماسه و مخلوط ماسه - دانه های EPS در درصد های جرمی ۰.۵، ۱ و ۲ ($\eta = 0.5\%, 1\%, 2\%$) چگالی نسبی ۵۵٪ ارائه شده است، که مطابق آن، افزایش درصد دانه های EPS در مخلوط سبب افزایش چسبندگی ظاهری شده است. دلیل این امر آن است



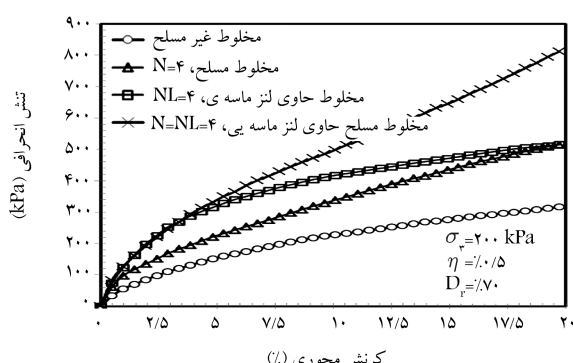
الف) یک لایه؛



ب) دو لایه؛



ج) سه لایه؛



د) چهار لایه.

شکل ۱۰. تغییرات تنش - کرنش در حالت های مختلف از لایه های ژئوتکستایل و لنت ماسه بی.

جدول ۷. مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی ظاهری (C) در حالت‌های مختلف ($D_r = 70\%$ و $\eta = 5\%$).

نمونه	زاویه‌ی اصطکاک داخلی، φ (درجه)	چسبندگی ظاهری، C (کیلوپاسکال)
ماسه	۳۸	۰
مخلوط	۲۲٫۵	۱۴
مخلوط مسلح با ژئوتکستایل ($N = 4$)	۲۳٫۵	۴۰
مخلوط مسلح با ژئوتکستایل محصور در لنز ($N = N_L = 4$)	۲۳	۳۵

جایگزین با یکدیگر دانست. همچنین استفاده از لنز ماسه‌یی در اطراف لایه‌ی تسلیح، سبب کاهش چسبندگی ظاهری نسبت به حالت عدم وجود لنز می‌شود، که دلیل آن کاهش مقدار دانه‌های EPS در نمونه است.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در خصوص تأثیر تسلیح با ژئوتکستایل و لنز ماسه‌یی در رفتار مخلوط خاک و دانه‌های EPS، این نتایج به دست آمده است:

- استفاده از دانه‌های EPS در مخلوط با ماسه سبب کاهش وزن مخصوص و در نتیجه سبک شدن آن می‌شود.
- مخلوط ماسه - دانه‌های EPS، مقاومت کمتری نسبت به فقط ماسه از خود نشان می‌دهد.
- جهت ایجاد تعادل بین کاهش وزن مخصوص مخلوط و افت مقاومت آن، $5\% \eta$ جرمی EPS جهت اختلاط با ماسه مناسب است.
- تأثیر استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل با افزایش تراز کرنش و بسیج بیشتر اصطکاک دانه‌ها با سطح لایه‌های تسلیح افزایش می‌یابد.
- استفاده از لایه‌های لنز ماسه‌یی به‌خصوص در تراز کرنش‌های پایین، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت مخلوط ماسه - دانه‌های EPS دارد.
- جهت بهره‌برداری از اثر هم‌زمان لایه‌های لنز ماسه‌یی و لایه‌های ژئوتکستایل در مقاومت نمونه، قرار دادن لایه‌ی ژئوتکستایل در وسط لایه‌ی لنز ماسه توصیه می‌شود.
- با افزایش درصد جرمی دانه‌های EPS در مخلوط، مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه کاهش و چسبندگی ظاهری آن افزایش می‌یابد.
- تسلیح مخلوط ماسه - دانه‌های EPS با ژئوتکستایل برخلاف تسلیح فقط ماسه، تأثیر محسوسی در افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط ندارد.
- استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لایه‌های لنز ماسه‌یی، سبب افزایش قابل توجه زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط می‌شود.

در مجموع استفاده از مخلوط خاک - دانه‌های EPS در خاکریزها، همراه با تسلیح مخلوط با لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لایه‌های نازک ماسه‌یی و انجام عملیات پیش بارگذاری جهت ایجاد کشش در لایه‌های تسلیح توصیه می‌شود. این تذکر لازم است که اگرچه مخلوط خاک و دانه‌های EPS موجب کاهش وزن مخصوص مخلوط می‌شود و جبران مقاومت آن با استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل

که به علت سختی بالای دانه‌های ماسه نسبت به دانه‌های EPS و با اعمال نیرو و افزایش تراکم نمونه، بخشی از دانه‌های ماسه داخل دانه‌های EPS فرو می‌روند، که این امر سبب افزایش طول در جهت عمود بر امتداد ارتفاع نمونه، ایجاد بروز محدودشدگی داخلی و در نتیجه بروز چسبندگی ظاهری می‌شود. شکل ۱۲، تصویری از فرورفتن دانه‌های ماسه در دانه‌های EPS را نشان می‌دهد. همچنین مطابق جدول ۶، افزودن دانه‌های EPS به خاک سبب کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی شده است. زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌ی فقط ماسه ناشی از اصطکاک دانه‌های ماسه با هم است، اما با افزودن دانه‌های EPS به خاک، علاوه بر اصطکاک دانه‌های ماسه با هم، اصطکاک دانه‌های ماسه با دانه‌های EPS نیز وارد عمل می‌شوند. لذا به دلیل صلیبیت کم و صیقلی بودن دانه‌های EPS، اصطکاک مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در مقایسه با اصطکاک نمونه‌ی فقط خاک کاهش می‌یابد. نتایج مشابه در این خصوص نیز توسط ادینکلیار و آزر (۲۰۱۴)،^[۱] دنگ و ژیا^[۱۰]، (۲۰۰۸)،^[۱۱] و چناری و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۱] گزارش شده است.

در جدول ۷، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی ظاهری فقط ماسه و مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در درصد جرمی $5\% \eta$ در حالت غیرمسلح و مسلح با ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل ($N = 4$) غیرمحصور و محصور در لنز ماسه‌یی ($N = N_L = 4$) در چگالی نسبی $70\% D_r$ ارائه شده است، که مطابق آن، مانند قبل با افزودن دانه‌های EPS به خاک، ضمن کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط از ۳۸ به ۲۲٫۵ درجه، چسبندگی ظاهری به میزان ۱۴ کیلوپاسکال ایجاد می‌شود. با تسلیح مخلوط با ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل، زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ی مخلوط تغییر چندانی ندارد (فقط حدود یک درجه)، در صورتی که مقدس تفرشی و عساکره (۲۰۰۷)،^[۱۲] و حائری و همکاران (۲۰۰۰)،^[۱۳] افزایش قابل ملاحظه‌یی در زاویه‌ی اصطکاک داخلی با تسلیح خاک فقط ماسه با ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل گزارش کرده‌اند (۱۲ درجه)؛ که تفاوت مذکور به علت صلیبیت کم دانه‌های EPS در مقایسه با خاک و همچنین اصطکاک کم آن‌ها با دانه‌های خاک و سطح لایه‌ی تسلیح است. در این حالت علی‌رغم کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی ظاهری مخلوط به دلیل فرورفتن دانه‌های ماسه و EPS در لایه‌های ژئوتکستایل افزایش قابل توجهی یافته است.

در حالت استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل محصور در لایه‌های لنز ماسه‌یی، افزایش چشم‌گیری در زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه در مقایسه با مخلوط غیرمسلح مشاهده می‌شود (حدود $10\% \eta$ درجه). افزایش پارامتر مذکور را می‌توان از طرفی به علت جایگزینی مخلوط ماسه و دانه‌های EPS با فقط ماسه در اطراف لایه‌ی ژئوتکستایل دانست و از طرف دیگر، به علت اصطکاک دانه‌های لایه‌ی ماسه‌ی

مسلح با ژئوتکستایل و لنز ماسه‌بی می‌تواند بر شناخت دقیق‌تر عملکرد مخلوط بر کاهش فشار روی دیوار، لوله‌ی مدفون و میزان نشست سطح خاکریز در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

اگرچه نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند جنبه‌هایی از کاربرد دانه‌های EPS در مخلوط با خاک را روشن کند، اما با توجه به استفاده از فقط یک نوع و اندازه از خاک، یک اندازه از دانه‌های EPS و یک نوع ژئوتکستایل در پژوهش حاضر، به منظور درک بیشتر رفتار مخلوط خاک و دانه‌های EPS انجام آزمایش با انواع دیگر مصالح (دانه‌های EPS، خاک و ژئوتکستایل)، در مطالعات آتی مناسب خواهد بود.

محصور در لایه‌های لنز ماسه‌بی میسر است، به هر حال بررسی اقتصادی در این زمینه برای دست‌یابی به یک طرح مناسب و همچنین انجام یک مقایسه‌ی اقتصادی بین مخلوط خاک و دانه‌های EPS با مخلوط خاک با سایر افزودنی‌ها، نظیر خرده‌لاستیک‌ها و فایبرها ضروری است.

اگرچه نتایج آزمایش‌ها از یک طرف مبین کاهش قابل توجه وزن مخصوص مخلوط ماسه - دانه‌های EPS در مقایسه با وزن مخصوص فقط خاک و از طرف دیگر، تسلیح با ژئوتکستایل و لنز ماسه‌بی نیز مبین افزایش مناسب مقاومت مخلوط است؛ با این حال انجام مطالعات عددی بر روی پروژه‌هایی نظیر خاکریز پشت دیوارهای حائل و خاکریز روی لوله‌های مدفون حاوی مخلوط ماسه - دانه‌های EPS

پانویس‌ها

1. light weight treated soil
2. expanded polystyrene soil
3. Xiao
4. Edinçliler
5. unified classification system
6. poorly graded sand
7. Hytex

منابع (References)

1. Edinçliler, A. and Özer, A.T. "Effects of EPS bead inclusions on stress-strain behaviour of sand", *Geosynthetics International*, **21**(2), pp. 89-102 (2014).
2. Elragi, A.F. "Selected engineering properties and applications of EPS geofom", Ph.D. Dissertation, Syracuse University, Syracuse, NY, USA (2000).
3. Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L. and et al. "Expanded polystyrene geofom in pavement construction", *Construction and Building Materials*, **157**, pp. 438-448 (2017).
4. Tsuchida, T. and Egashira, K. "The lightweight treated soil method: new geomaterials for soft ground engineering in coastal areas", CRC Press (2004).
5. Miao, L., Wang, F., Han, J. and et al. "Properties and applications of cement-treated sand-expanded polystyrene bead lightweight fill", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**(1), pp. 86-93 (2012).
6. Liu, H.L., Deng, A. and Chu, J. "Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(6), pp. 331-338 (2006).
7. Deng, A. and Xiao, Y. "Measuring and modeling proportion-dependent stress-strain behavior of EPS-sand mixture", *International Journal of Geomechanics*, **10**(6), pp. 214-222 (2010).
8. Gao, H., Bu, C., Wang, Z. and et al. "Dynamic characteristics of expanded polystyrene composite soil under traffic loadings considering initial consolidation state", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **102**, pp. 86-98 (2017).
9. Zhu, W., Li, M., Zhang, C. and et al. "Density and strength properties of sand-expanded polystyrene beads mixture", In *GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems*, pp. 36-43 (2008).
10. Deng, A. and Xiao, Y. "Shear behavior of sand-expanded polystyrene beads lightweight fills", *Journal of Central South University of Technology*, **15**, pp. 174-179 (2008).
11. Chenari, R.J., Fard, M.K., Maghfariati, S.P. and et al. "An investigation on the geotechnical properties of sand-EPS mixture using large oedometer apparatus", *Construction and Building Materials*, **113**, pp. 773-782 (2016).
12. Alaie, R. and Chenari, R.J. "Cyclic and post-cyclic shear behaviour of interface between geogrid and EPS beads-sand backfill", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**(9), pp. 3340-3357 (2018).
13. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2487-11 (2011).
14. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D854-14 (2014).
15. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D4253-14 (2014).
16. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D4254-14 (2014).
17. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard test method for relative density (Specific Gravity) of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2922-14 (2014).

- Gravity) and absorption of fine aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM C128-15 (2015).
18. Koerner, R.M., *Designing With Geosynthetics*, 5th ed, Prentice-Hall (2005).
19. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, "Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2850-03 (2003).
20. Haeri, S.M., Noorzad, R. and Oskoorouchi, A.M. "Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **18**(6), pp. 385-402 (2000).
21. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Asakereh, A. "Strength evaluation of wet reinforced silty sand by triaxial test", *International Journal of Civil Engineering*, **5**(4), pp. 274-283 (2007).