

# ارزیابی آزمایشگاهی مقادیر CBR در خاک های ماسه‌ای مسلح شده با Geopet : مدل سازی باروش

## RSM

محمدرضا کرمی<sup>۱</sup>، محسن کرامتی<sup>\*</sup>، مصطفی ابراهیمی<sup>۱</sup>، حسین مرادی مقدم<sup>۲</sup>، رضا معادی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران،

۳- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\* (ایمیل نویسنده مسئول) [keramati@sharoodut.ac.ir](mailto:keramati@sharoodut.ac.ir)

### چکیده

تولید روزافزون پسماندهای جامد به دغدغه بین‌المللی مهندسی تبدیل شده است یکی از راهکارهای مفید، استفاده مجدد از پسماندهای جامد جهت بهسازی ساخت‌گاه‌ها و خاک‌های سست است. یکی از روش‌های تسلیح یا تثبیت خاک استفاده از ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) و خاکستر بادی (FA) است که از ضایعات صنعتی و شهری می‌باشند. در این مطالعه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی ماسه بندر انزلی مسلح نشده و مسلح شده با Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی‌متر و همچنین تثبیت شده با خاکستر بادی با درصد وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال کننده خاکستر بادی انجام شده و همچنین در تحلیل فعلی، روش سطح پاسخ (RSM) نیز برای تعیین روابط موثر درصد خاکستر بادی، لایه‌های Geopet و همچنین برهم کنش آنها بر روی CBR استفاده شده است و در نهایت، از RSM می‌توان برای ارزیابی CBR در این مطالعه به شیوه‌ای سازگار و موثر استفاده کرد. مقدار P-Value در مدل استفاده شده کمتر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد که کارایی مدل استفاده شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد حالت بهینه استفاده از Geopet با اندازه چشمه ۱×۱ به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی است که در این حالت مقدار CBR افزایش ۲/۷ برابری نسبت به حالت مسلح نشده داشته است.

کلمات کلیدی: ماسه بندر انزلی، Geopet، خاکستر بادی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، روش سطح پاسخ (RSM)

اکثر خاک‌ها از دید مهندسی به دلیل ظرفیت باربری و مقاومت برشی کم، ضعیف می‌باشند. این خاک‌ها می‌توانند در ساخت و سازهای عمرانی مانند فونداسیون، سد، راه و غیره مشکلاتی را به وجود آورند. عدم توجه کافی به این مسائل، ممکن است خطرات زیادی را ایجاد کند. علاوه بر این، به جهت بالا رفتن سطح کیفیت زندگی مردم و افزایش جمعیت، مهندسی برای استفاده از حداکثر ظرفیت اراضی و اجرای پروژه‌های عمرانی، با خاک‌هایی با ظرفیت باربری پایین رو به رو ساخته است [۱-۵].

روش‌های مکانیکی و مواد طبیعی و مصنوعی زیادی برای بهبود رفتار خاک وجود دارند که انتخاب آنها به عواملی همچون ملاحظات زیست محیطی و جنبه‌های اقتصادی و ساختاری بستگی دارد [۶]. یکی از روش‌های بهسازی خاک، تسلیح با استفاده از الیاف و رشته‌ها است. از آنجا که دفع زباله‌های پلاستیکی بدون آسیب رساندن به اکوسیستم بسیار چالش برانگیز شده است [۷] استفاده مجدد از ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) در تثبیت خاک می‌تواند اثرات زیست محیطی آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۸، ۹]. افزایش ظرفیت باربری خاک با استفاده از الیاف طبیعی یا مصنوعی، روشی مناسب برای تقویت و بهسازی خاک است [۱۰]. پلاستیک نوعی رشته مصنوعی است که همواره برای تقویت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آندرسلند<sup>۱</sup> [۱۱] برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ برای تقویت خاک اشباع کائولینیت از پالپ فشرده استفاده کرد و بعد از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نتیجه گرفت افزودن این ماده باعث افزایش کرنش محوری و مقاومت فشاری می‌گردد. آیرم<sup>۲</sup> و همکاران [۱۲] با استفاده از نوارهایی از جنس ضایعات پلاستیکی PET با درصدهای مختلف وزنی، خاک رس کائولین تثبیت شده با درصد مختلف سیمان را تقویت کردند. برای بررسی تاثیر درصدهای مختلف PET و سیمان از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد افزایش درصد سیمان و افزایش زمان عمل‌آوری هر یک باعث افزایش مقاومت می‌گردد، همچنین افزایش درصد نوارهای پلاستیکی باعث شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها می‌گردد. پدیا<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] با افزودن خرده PET به خاک لای دار با درصدهای مختلف وزنی به ابعاد ۱/۵×۲/۵ سانتی‌متر مربع پارامترهای مقاومتی خاک با آزمایش CBR بررسی نمودند و نتیجه گرفتند افزودن خرده PET موجب افزایش مقدار CBR می‌گردد. حاجیان‌نژاد و همکاران [۱۴] ماسه بندر انزلی تسلیح شده با خرده PET (۱×۱ سانتی‌متر)، نوارهای PET (۱×۵ سانتی‌متر) و الیاف PET با درصدهای مختلف وزنی تحت آزمایش برش مستقیم قرار دادند و نتیجه گرفتند ماسه تسلیح شده با الیاف PET مقاومت بیشتری نسبت به ماسه تسلیح شده با خرده PET یا تسلیح شده با نوار PET دارد. همچنین تسلیح خاک با استفاده از الیاف PET موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۹۱ درصد شده است. همچنین نتیجه گرفتند استفاده از نوار، الیاف و خرده PET موجب شکل‌پذیری بیشتر ماسه بندر انزلی می‌شود. افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک اغلب از طریق تراکم کنترل شده یا ترکیب یک مخلوط، تکنیکی است که به طور گسترده برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵، ۱۶]. کرمی و همکاران [۱۷] خاک متورم شونده رس با پلاستیسیته کم (CL) از منطقه‌ای در شهر ملبورن را با خاکستر بادی کلاس F به عنوان افزودنی اصلی به همراه چهار افزودنی دیگر (آهک، سیمان<sup>۴</sup> CSA، آنزیم و پلیمر) تحت آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR قرار داد و نتیجه گرفت افزودن خاکستر بادی باعث کاهش رطوبت بهینه و افزایش حداکثر چگالی خشک خاک می‌گردد. همچنین افزودن خاکستر بادی به تنهایی باعث افزایش ناچیزی در مقدار CBR می‌گردد، اما در صورت اضافه کردن افزودنی ثانویه مقدار CBR به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. آرورا<sup>۵</sup> و همکاران [۱۸] خاکستر بادی کلاس F را به خاک اضافه کردند و از آهک و سیمان به عنوان فعال‌کننده استفاده نمودند. بعد از عمل‌آوری به مدت چهار هفته و انجام آزمایش، مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با سیمان را ۱۲ برابر بیشتر از

<sup>1</sup> O. B. Andersland

<sup>2</sup> Irem

<sup>3</sup> S. Peddaiah

<sup>4</sup> Calcium Sulfoaluminate Cement

<sup>5</sup> S. Arora

نمونه‌ای که با آهک تثبیت شده بود را اعلام کردند. سانتوس<sup>۶</sup> و همکاران [۱۹] بیان نمودند افزایش مقدار خاکستر بادی از ۲۰٪ به ۴۰٪ به مراتب بیشتر از افزایش ۴۰٪ به ۶۰٪ در بهبود رفتار خاک تاثیر دارد.

تا کنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پارامترهای مهندسی بر مبنای روش‌های ریاضی و عددی ارائه شده است [۲۰، ۲۱]. طراحی آزمایش (DOE) تکنیکی برای پیش‌بینی نتایج آزمون‌های تجربی با استفاده از متغیرهای مستقل است. مزایای قابل توجه این رویکرد شامل کاهش تعداد آزمایش‌ها، بررسی اندرکنش بین متغیرها و ارزیابی راه‌حل بهینه داده‌های تجربی با توسعه یک مدل تجربی است. برای ارزیابی پاسخ به‌دست‌آمده که با پارامترهای مختلف بیان می‌شود، از یک مدل ریاضی توسط محققان استفاده می‌شود [۲۲، ۲۳]. شاخه‌های DOE تلاش می‌کنند تا با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری، یک طراحی دقیق از آزمایش بسازند. RSM که در سال‌های اخیر به طور فعال در مسائل مهندسی کاربرد داشته است، به عنوان یکی از بخش‌های DOE در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. با ادغام ریاضیات و آمار، RSM همچنین نتیجه‌ای را که شاخص‌ها از آزمایش‌های مختلف دریافت می‌کنند و همچنین تأثیر همبستگی بین متغیرها را با تصاویر سه‌بعدی منعکس می‌کند. ارزیابی خواص مکانیکی خاک و بتن به طور کامل کارا بودن روش را تأیید کرده است [۲۵، ۲۶]. در نهایت، RSM برای ارزیابی CBR خاک‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و Geopet انتخاب شده است.

این مطالعه با هدف استفاده از ورق‌های Geopet با اندازه چشمه‌های مختلف برای اولین بار به دلیل استفاده مجدد از زباله‌های پلاستیکی، علاوه بر استفاده از خاکستر بادی برای بهبود خاک و دستیابی به اهداف توسعه پایدار انجام شده است. با توجه به نتایج، بررسی‌ها به دلیل استفاده از ورق‌های Geopet به اضافه خاکستر بادی با توجه به قرار دادن ورق‌های پلاستیکی در لایه‌های مختلف، بهبود قابل توجهی را در مقادیر CBR نشان می‌دهد. همچنین نتیجه‌گیری می‌شود که تأثیر خاکستر بادی بر چسبندگی و افزایش پیوستگی ذرات خاک و ورق‌های پلاستیکی، عامل اصلی بهبود ظرفیت باربری خاک است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل فعلی از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی تأثیر درصد خاکستر بادی، لایه‌های Geopet و تعامل آنها بر CBR استفاده کرد.

#### جدول ۱ - خلاصه مطالعات انجام شده

Table 1- Summary of Previous Studies

روش	مواد	منبع	نوع خاک	نتایج
تسلیح	ژئوتکستایل	[۲۷]	رس	بهبود مقاومت نمونه در سمت خشک رطوبت بهینه
	ژئوگرید	[۲۸]	-	بهبود عملکرد به واسطه سخت‌شدگی و هندسه ژئوگرید، عمق مدفون ژئوگرید و ضخامت لایه‌ها
	ژئوپلیمر	[۱۶]	رس	افزایش تنش تسلیم و سخت‌شدگی اولیه
	قطعات PET	[13]	ماسه سیلتی	افزایش CBR
	ژئوسنتتیک	[۲۹]	ماسه	کاهش جابجایی‌ها
	ژئوتکستایل و ژئوگرید	[۳۰]	رس	افزایش CBR و UCS و ثابت ماندن مقاومت

گسیختگی و شکل پذیری				
افزایش زاویه اصطکاک داخلی و مدول سکانتی	ماسه	[۳۱]	میکرو گرید	
کاهش نشست با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری و توانایی تحمل رفتارهای غیر پلاستیک	ماسه بد دانه‌بندی شده	[۳۲]	زباله‌های پلاستیکی	
چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و CBR افزایش یافت	شن	[۳۳]	لاستیک و قطعات پلاستیکی	
افزایش ظرفیت باربری	رس	[۱۷]	خاکستر بادی، آهک و آنزیم‌ها	
خاکستر کلاس F نتایج قابل اعتمادی برای مقادیر UCS، CBR، پالس سرعت و تست سه محوری با چسب‌های سنتی داشت.	رس	[۳۴]	خاکستر بادی کلاس F	
افزایش مقاومت، فشرده‌گی و سرعت موج برشی	ماسه سیلتی	[۳۵]	خاکستر بادی	تثبیت با افزودنی‌ها
هفزایش CBR و کاهش حدود آتربرگ، شاخص خمیری، شاخص تورم و UCS	رس	[۳۶]	خاکستر بادی	
افزایش UCS	رس ماسه دار	[۳۷]	خاکستر بادی کلاس F	
UCS نمونه تثبیت شده با سیمان ۱۲ برابر نمونه تثبیت شده با آهک است	ماسه سیلتی	[۱۸]	خاکستر بادی کلاس F، آهک و سیمان	
کاهش CBR	ماسه	[۳۸]	خاکستر بادی	
افزایش CBR و UCS	لاتوسول	[۳۹]	ژئولیت، گلس واتر و ژئوگرید	تسلیح و تثبیت
افزایش چشمگیر در خصوصیات ژئوتکنیکی	رس	[۴۰]	ژئوگرید و آهک	

افزایش خصوصیات مکانیکی	رس کائولینیت	[۴۱]	خاکستربادی و الیاف پلی پروپیلن
افزایش ظرفیت باربری ۲۷٪، نفوذپذیری تقریباً ثابت باقی ماند.	ماسه	[۴۲]	بایندر قلیایی و ژئوتکستایل جوت
افزایش CBR و مدول برشی	رس اشباع	[۴۳]	الیاف و خاکستر بادی

## ۲- روش‌ها

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش از ماسه بندر انزلی استفاده شده است. همچنین از Geopet ها با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتیمتر مربع در ترکیب با مقادیر مختلف خاکستر بادی به میزان ۵ تا ۱۵ درصد استفاده شده است.

### ۲-۱-۱- مشخصات ماسه

براساس سیستم طبقه بندی متحد خاک USCS<sup>۷</sup> و طبق استاندارد ASTM D422-87 ماسه از نوع بد دانه بندی شده (SP) و از نوع ماسه کربناته می‌باشد. انجام آزمایش بر روی این خاک در حالت رطوبت بهینه انجام شده است و نتایج حاصل از آزمایش دانه بندی و برش مستقیم خاک در تراکم نسبی ۷۰ درصد در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۲ آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D422-87 و آزمایش‌های تعیین نسبت منافذ حداکثر و حداقل به ترتیب طبق استاندارد ASTM D4253 و ASTM D4254 انجام شده است.

### جدول ۲- مشخصات فیزیکی ماسه بندر انزلی

Table 2- Physical Properties of Bandar Anzali Sand

$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$(\gamma_d)_{min}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$(\gamma_d)_{max}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	D50 (mm)	$C_u$	$C_c$	C (kPa)	$\phi$ (°)
۲/۶۸	۰/۶۷	۰/۹۴	۱/۲۵	۱/۵۵	۰/۲۸	۱/۲۵	۱/۰۷	۱۴/۶۷	۳۲/۲۱

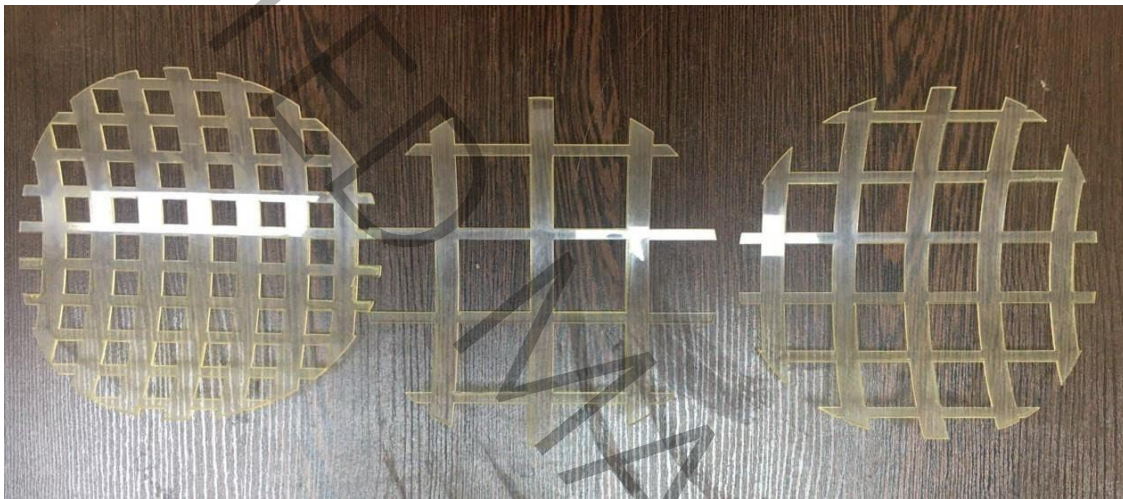
### Geopet-۲-۱-۲

PET رایج ترین شکل زیاله های پلاستیکی است که روی زمین یافت می شود و در واقع یک پلیمر پلی استری با سطح شفاف و مقاوم در برابر مواد شیمیایی است که به راحتی قابل تولید بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است [۴۴]. جدول ۳ برخی از خواص PET را نشان داده است. در این پژوهش از Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتیمتر مربع به ضخامت ۰/۸ میلیمتر استفاده شده است. ورق‌های PET به صورت رول در کارخانه تولید شدند و سپس ورق‌های Geopet با استفاده از تجهیزات برش لیزری با دقت ۰/۱ میلیمتر برش داده شدند، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>7</sup> Unified Soil Classification System

Table 3- Physical and Chemical Properties of PET

مشخصات	توضیحات
ترکیبات شیمیایی	اسید ترفتالیک و اتیلن گلیکول
فرمول شیمیایی	$(C_{10}H_8O_4)_n$
وزن مخصوص ( $g/cm^3$ )	۱/۳۸
نقطه ذوب ( $^{\circ}C$ )	بیشتر از ۲۵۰
نقطه جوش ( $^{\circ}C$ )	بیشتر از ۳۵۰
هدایت گرمایی ( $W/mK$ )	۰/۱۵ - ۰/۲۴



شکل ۱- Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی‌متر

Figure 1- Geopet with grid sizes of 1×1, 2×2, and 3×3 cm

### ۳-۱-۲- خاکستر بادی

در این مطالعه از خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است زیرا مواد افزودنی دیگر از قبیل سیمان به سرعت تجزیه می‌شوند [۴۵]. به طور کلی دو نوع خاکستر بادی وجود دارد. خاکستر کلاس C دارای سطوح پایین از سیلیکات (Si) و سطوح بالای کلسیم (Ca) و خاکستر کلاس F دارای سطوح پایین کلسیم (Ca) و سطوح بالای سیلیکات (Si) است [۴۶]. خاکستر مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C618 دارای ترکیبات شیمیایی کلاس F با حداقل درصد وزنی  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  ۷۰ درصد است. نتایج آنالیز شیمیایی خاکستر بادی در جدول ۴ نشان داده شده است و تایید کرد که خاکستر از نوع کلاس F می‌باشد.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

Table 4- Chemical Composition of Fly Ash

مواد	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	مواد
دیگر	کلسیم	منگنیزیم	گوگرد تری‌اکسید	فریک	آلومینا	سیلیکا	شیمیایی

ASTM C311							استاندارد
۱/۰	۰/۷	۱/۵	۱/۲	۱/۰	۶/۸	۸۷/۸	درصد وزنی

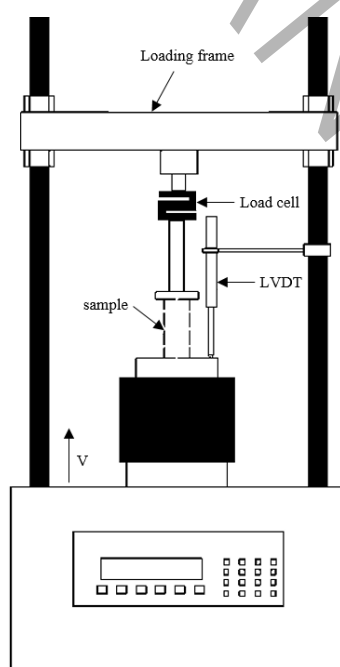
#### ۴-۱-۲- فعال کننده قلیایی

NaOH یا سدیم هیدروکسید به عنوان فعال کننده خاکستر بادی مورد استفاده قرار گرفته است. سدیم هیدروکسید در حالت جامد بوده که در آزمایشگاه به صورت محلول و با غلظت هدف درآمده است. غلظت مورد استفاده در این آزمایش ۸ مولار بوده، که این غلظت در تحقیقات گذشته به عنوان غلظت بهینه برای فعال سازی خاکستر بادی از آن یاد شده است.

#### ۲-۲- آزمایش‌ها

##### ۱-۲-۲- آزمایش CBR

CBR اغلب در جاده سازی برای ارزیابی مقاومت نسبی خاک استفاده می شود. ظرفیت باربری خاک زیر اساس را می توان با استفاده از نتایج و اساس تعیین کرد تا لایه های زیر اساس با توجه به خواص آنها توسعه یابد. آزمایشات CBR بر اساس استاندارد ASTM D1883 بر روی ماسه بندر انزلی برای ارزیابی استحکام نسبی آن در هر دو شرایط مسلح نشده و مسلح شده انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه مجهز به سنسور و لودسل انجام شد. در این آزمایشات، از یک سنسور LVDT با کورس ۱۰۰ میلی متر و دقت ۰/۰۱ میلی متر برای نظارت بر جابجایی عمودی استفاده شد. یک لودسل ۵ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم نیرو، تنش عمودی را با سرعت ۰/۰۲۵ در ثانیه (۱/۲۷ میلی متر در دقیقه) کنترل می کرد و داده ها از طریق یک دیتالاگر ۸ کانالی به رایانه منتقل می شد. داده های خروجی توسط کامپیوتر با کانال جداگانه برای هر یک از سنسورها جمع آوری و پردازش شد.

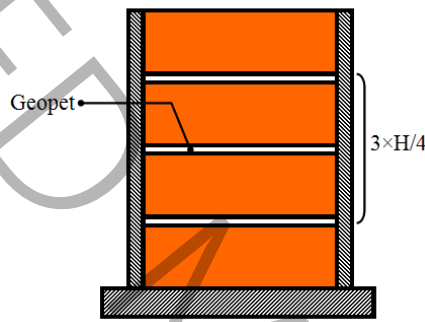


شکل ۲- دستگاه انجام آزمایش CBR

Figure 2- CBR testing apparatus

### ۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

آزمایش CBR بر روی خاکی با رطوبت کمتر از رطوبت بهینه ( $W_{opt}=14/44$  درصد در ترکیب با خاکستر بادی) انجام شد. خاک با متراکم کردن هر لایه تا ۷۰ درصد تراکم خشک در چهار لایه فشرده شد تا جرم کل خاک قرار داده شده در قالب به حجم مشخصی برسد. پس از فشرده سازی هر لایه، صفحه پلاستیکی به صورت افقی در داخل نمونه قرار داده شد. قطر صفحه پلاستیکی کمی کوچکتر از قطر نمونه بود. تمام نمونه های تقویت نشده و تقویت شده تا سطح کرنش ۱۵ درصد با نرخ کرنش ۰/۵ درصد در ساعت پاره شدند. اصلاحاتی برای نفوذپذیری و استحکام غشا، تورم سلولی و سطح مقطع انجام شد. شماتیکی از قرارگیری ورق های Geopet در داخل قالب در شکل ۳ نشان داده شده است. ژئوپت در ابعاد  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  سانتی متر مربع در سه لایه با ارتفاع های مختلف استفاده شد.



شکل ۳- تصویر شماتیک از محل قرار گیری لایه های Geopet

Figure 3- Schematic illustration of the placement of Geopet layers

بالاترین تراکم و بهترین سطح رطوبت برای نمونه خاک اصلی و خاک مخلوط با مقادیر مختلف خاکستر بادی در درصد های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و با استفاده از تست تراکم استاندارد اصلاح شده تعیین می شوند. مقادیر OMC و MDD به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد اصلاح شده برای ساخت نمونه خاک با تراکم ۹۷ درصد برای آزمایش CBR خیس شده استفاده می شود. بر اساس نتایج آزمایش، ما دریافتیم که خاک با مقدار مناسب خاکستر بادی می تواند آن را قوی تر کند، همانطور که در آزمایش CBR خیس شده نیز مشاهده می شود. به عبارت دیگر، برای تعیین بهترین عمق برای قرار دادن Geopet برای حداکثر افزایش استحکام در یک آزمایش، Geopet ها در اعماق مختلف در خاک قرار گرفتند که دارای مقدار بهینه خاکستر بادی بودند. غشای Geopet در اعماق یک چهارم، نیم و سه چهارم از بالای ظرف نمونه قرار گرفتند. این اعماق برای دیدن اینکه کدام یک دارای بالاترین استحکام در آزمایش CBR خیس شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت.

نمونه های خاک برای آزمایش CBR خیس شده با Geopet در اعماق مختلف با استفاده از روش زیر تهیه شد. ارتفاع قالب CBR به چهار سطح  $H/4$ ،  $H/2$  و  $3H/4$  از بالا به پایین تقسیم می شود. برای Geopet که در عمق  $3H/4$  از بالا (عمق  $H/4$  از پایین) قرار گرفته است، وزن خاک نمونه برداری شده در عمق  $H/4$  از پایین بر اساس مقدار MDD و مقدار آب معادل OMC محاسبه شد به وزن این خاک اضافه شد و به عنوان لایه ای از خاک در قالب CBR با ۵۵ ضربه قرار داده شد. سپس یک لایه Geopet در بالای این لایه خاک ( $3H/4$  عمق از بالا به پایین) قرار می گیرد. وزن باقیمانده خاک در عمق  $3H/4$  بر اساس MDD محاسبه شد و مقدار آب



معادل OMC به خاک اضافه شد و این لایه خاک در دولایه و هرلایه ۵۵ ضربه شکل گرفت. روش ساخت لایه‌های دیگر و سپس قرار گیری Geopet در اعماق H/2 و H/4 از بالای نمونه به صورت مشابه انجام شد.

برای تهیه نمونه، خاک با ۵٪، ۱۰٪ یا ۱۵٪ خاکستر بادی مخلوط شد. محلول فعال کننده اضافه شد و مخلوط به مدت ۵ دقیقه به هم زده شد تا یکنواختی کامل حاصل شود. در پایان، نمونه‌ها با جاگیری Geopet همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، آماده شدند. این نمونه‌ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) به مدت هفت روز تحت عمل آوری قرار گرفتند. دلیل انتخاب دمای ۲۵ درجه سانتیگراد این است که در محدوده متوسط تجربه شده در مناطق مختلف در طول فصول مختلف قرار دارد. علاوه بر این، انتخاب دماهای بالاتر چالش‌های عملیاتی را به همراه داشت و منجر به هزینه‌های قابل توجهی می‌شد. شکل ۳ نحوه قرار گیری Geopet را در قالب CBR نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که همه نمونه‌ها تحت آزمایش CBR طبق ASTM D1883 قرار گرفتند.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- اثر خاکستر بادی بر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها

جدول ۵ نشان می‌دهد که افزایش درصد خاکستر بادی، رطوبت بهینه را افزایش می‌دهد که با نتایج به دست آمده از [۴۷] و استانداردهای اداره بزرگراه فدرال ایالات متحده (FHWA) مطابقت دارد، با این حال، حداکثر وزن واحد خشک را کاهش داد زیرا خاکستر بادی می‌تواند آب را نگه دارد و جذب کند. از سوی دیگر، ذرات باردار در خاکستر بادی دانه‌های خاک را جدا می‌کنند و در عین حال مقداری انرژی تراکم را نیز جذب می‌کنند و از تراکم بهتر خاک جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، چگالی شن و ماسه به طور قابل توجهی بیشتر از خاکستر بادی بود که منجر به بیشترین کاهش در چگالی خشک شد. شکل و اندازه کوچک ذرات خاکستر بادی، که فضای موجود بین دانه‌ها را کاهش می‌دهد، باعث کاهش میزان آب مورد نیاز می‌شود. با افزایش محتوای آب، ذرات دیگر نمی‌توانند آن را ذخیره کنند و به سطح مخلوط بالا می‌روند [۴۸، ۴۹].

جدول ۵- مقایسه درصد رطوبت بهینه در خاک مرجع و در حضور درصدهای مختلف خاکستر بادی

**Table 5-** Comparison of Optimum Moisture Content in Reference Soil and in the Presence of Various Percentages of Fly Ash

وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)	درصد رطوبت بهینه (%)	نمونه
۱/۵۵	۱۴	خاک مرجع
۱/۵۳	۱۷	خاک + ۵ درصد خاکستر بادی
۱/۵۱	۱۶٫۵	خاک + ۱۰ درصد خاکستر بادی
۱/۴۹	۱۸	خاک + ۱۵ درصد خاکستر بادی

#### ۳-۲- اثر Geopet بر عملکرد مکانیکی خاک شنی بندر انزلی

اثر Geopet بر عملکرد مکانیکی خاک شنی بندر انزلی از نظر ظرفیت باربری و نفوذ سنبه فولادی تحت بارگذاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۴ نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. خاک شنی با Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی‌متر مربع در ارتفاع‌های H/4، H/2 و 3H/4 از سطح قالب در رطوبت بهینه مسلح شد.

نتایج نشان داد که افزایش نفوذ سنبه فولادی در خاک باعث افزایش کشش؛ در ابتدا با یک نرخ بالا افزایش (تا نفوذ حدود ۴ میلیمتر) و سپس به تدریج شیب منحنی های بار-نفوذ از حدود نفوذ ۴ میلیمتر کاهش می‌یابد. این رفتار نشان دهنده نفوذ تدریجی سنبه به داخل خاک است. منحنی‌های بار-نفوذ نشان می‌دهند که استفاده از Geopet با محدود کردن حرکت دانه‌های خاک از گسیختگی نمونه‌ها جلوگیری می‌کند. با نفوذ بار به سطح خاک، لایه‌های Geopet در ماسه به تدریج به کشش افتاده و به دلیل سختی ژئوپت، لایه‌ها تغییر شکل داده و نیرویی رو به بالا برای تحمل بار اعمال می‌کنند. این بارگذاری متقابل (توسط سنبه فولادی و ژئوپت) به دانه‌های خاک باعث درگیری بیشتر دانه‌های خاک با چشمه‌های ژئوپت شد. علاوه بر این، کشش لایه‌های Geopet نشان می‌دهد که مقاومت آنها در برابر اعمال بار بسیج شده است. شکل ۴ تغییرات فشار را در برابر نفوذ سنبه در ماسه تقویت شده با Geopet را نشان می‌دهد. جدول ۶ CBRs نمونه‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد، ذرات بزرگتر بهتر با روزه‌های Geopet درگیر می‌شوند و ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهند و از آنجایی که خاک مورد استفاده در این مطالعه دارای درجه بندی SP بود، Geopet با اندازه دهانه کوچکتر عملکرد بهتری داشتند و همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است نرخ رشد ظرفیت باربری در Geopet با ابعاد دهانه کوچکتر نیز افزایش محسوسی را نشان داده است.

#### جدول ۶- مقادیر CBR خاک مسلح م خاک غیر مسلح

Table 6- CBR Values of Reinforced and Unreinforced Soil

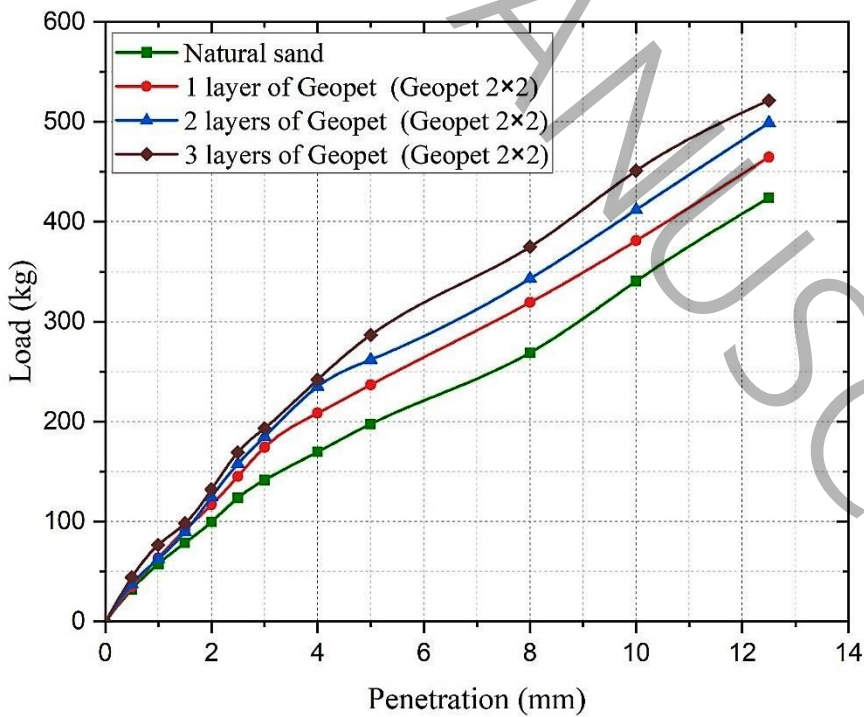
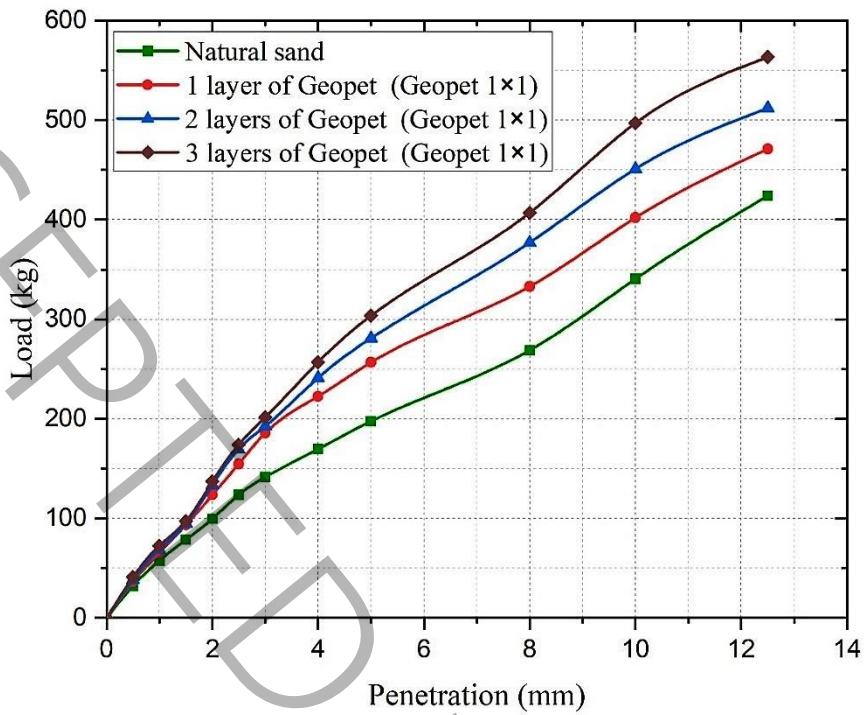
مقدار CBR									نمونه
۱۰/۵۴									خاک غیر مسلح
سه لایه Geopet			دو لایه Geopet			یک لایه Geopet			خاک مسلح
اندازه چشمه (cm <sup>2</sup> )			اندازه چشمه (cm <sup>2</sup> )			اندازه چشمه (cm <sup>2</sup> )			
۳x۳	۲x۲	۱x۱	۳x۳	۲x۲	۱x۱	۳x۳	۲x۲	۱x۱	
۱۳/۹۶	۱۵/۲۹	۱۶/۲	۱۳/۵	۱۳/۹۸	۱۴/۹۹	۱۱/۸۹	۱۲/۶۳	۱۳/۶۹	

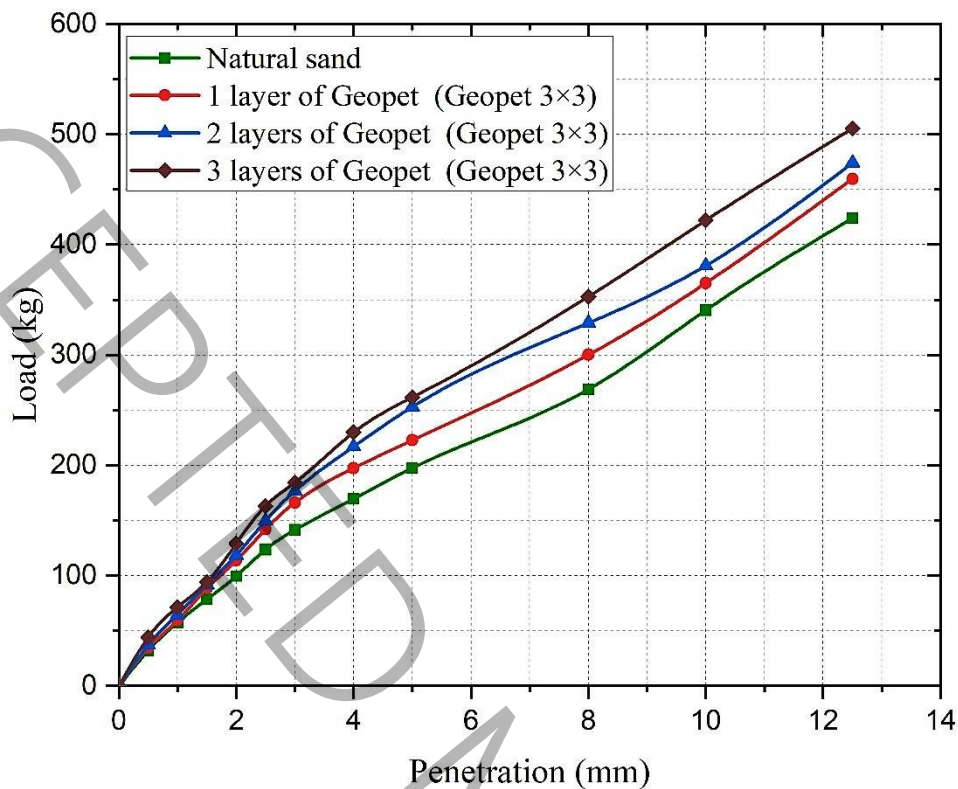
آزمایش‌های Geopet برای مطالعه خواص کششی سه نوع Geopet در محدوده‌های مختلف و تأیید عملکرد تجهیزات آزمایشی توسط ASTM D4595 انجام شد. ویژگی‌های سه ژئوپت مختلف در جدول ۷ آمده است. به دلیل تقارن خواص فیزیکی و مکانیکی ژئوپت، خط مرکزی به عنوان محور تقارن در انتها ثابت Geopet است و از انتهای دیگر کشیده می‌شود.

#### جدول ۷- خصوصیات مکانیکی Geopetها

Table 7- Mechanical Properties of Geopet

مقاومت کششی نهایی (MPa)	ضخامت (میلیمتر)	وزن واحد سطح	اندازه چشمه (سانتیمتر مربع)
۸/۶	۰/۸	۲/۷۱	۱x۱
۹/۰	۰/۸	۱/۹۴	۲x۲
۸/۸	۰/۸	۱/۶۵	۳x۳





ج

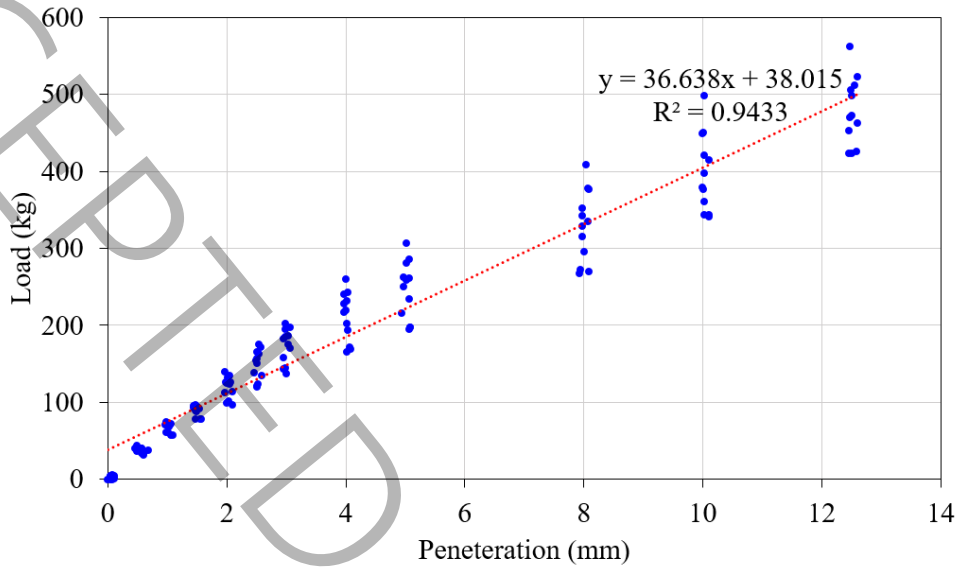
شکل ۴- نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. (ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ (ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

**Figure 4-** Force–penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm<sup>2</sup>, (b) 2×2 cm<sup>2</sup>, and (c) 3×3 cm<sup>2</sup>

جدول ۸- خلاصه نتایج تست‌ها با Geopet

**Table 8-** Summary of Test Results with Geopet

ردیف	اندازه چشمه‌های Geopet (cm)	تعداد لایه‌های Geopet	مقدار CBR (%)
۱	-	-	۱۰/۵۴
۲	۱×۱	۱	۱۳/۶۹
۳	۱×۱	۲	۱۴/۹۹
۴	۱×۱	۳	۱۶/۲۰
۵	۲×۲	۱	۱۲/۶۳
۶	۲×۲	۲	۱۳/۹۸
۷	۲×۲	۳	۱۵/۲۹
۸	۳×۳	۱	۱۱/۸۹

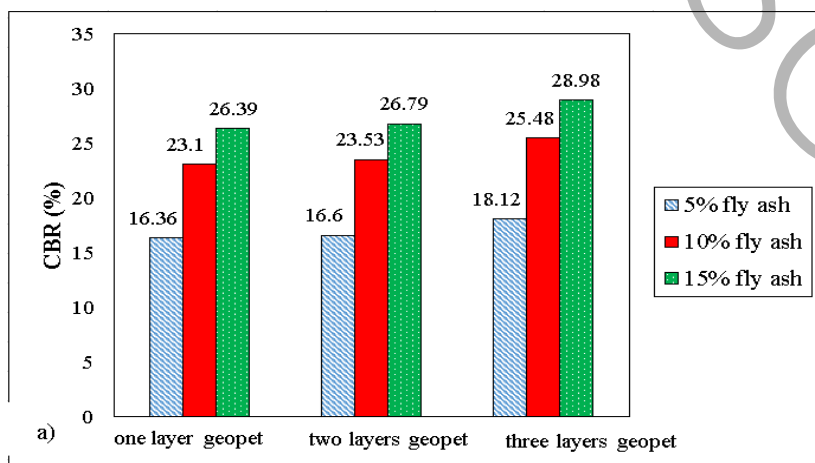


شکل ۵- رابطه میزان نفوذ با ظرفیت باربری ( $R^2 = 0.94$ )

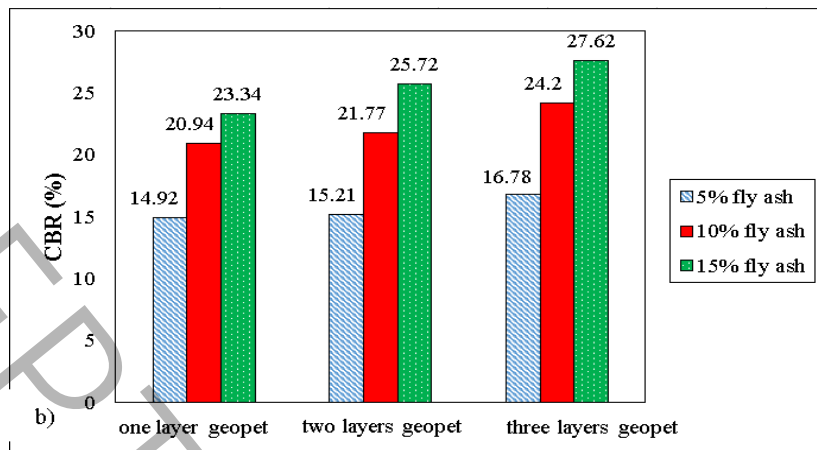
Figure 5- Relationship between penetration and bearing capacity ( $R^2 = 0.94$ )

### ۳-۳- بررسی تاثیر Geopet و خاکستر بادی بر مقادیر CBR

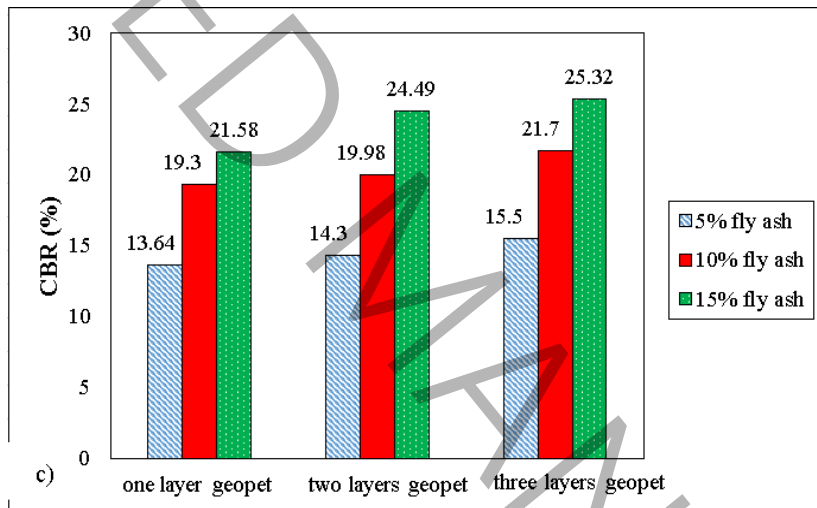
تمام نمونه های ماسه با Geopet تقویت و با خاکستر بادی و یک فعال کننده (هیدروکسید سدیم) در این آزمایش ها تثبیت شدند. نمونه ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) به مدت هفت روز عمل آوری شدند. در این قسمت همانطور که در شکل نشان داده شده است، لایه های تقویت کننده در اعماق  $H/4$ ،  $H/2$  و  $3H/4$  سطح نمونه قرار گرفتند. محتوای خاکستر بادی (بر حسب وزن) ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بود و برای تثبیت خاک با هیدروکسید سدیم مخلوط شد. نتایج آزمون در شکل ۶ ارائه شده است.



الف



ب



ج

شکل ۶- نتایج آزمایش CBR برای نمونه‌های با خاکستر بادی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ در ۷ روز عمل‌آوری با اندازه‌های چشمه: الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع، ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

**Figure 6-** CBR test results for samples with 5%, 10%, and 15% fly ash after 7 days of curing with grid sizes of (a) 1×1 cm<sup>2</sup>, (b) 2×2 cm<sup>2</sup>, and (c) 3×3 cm<sup>2</sup>

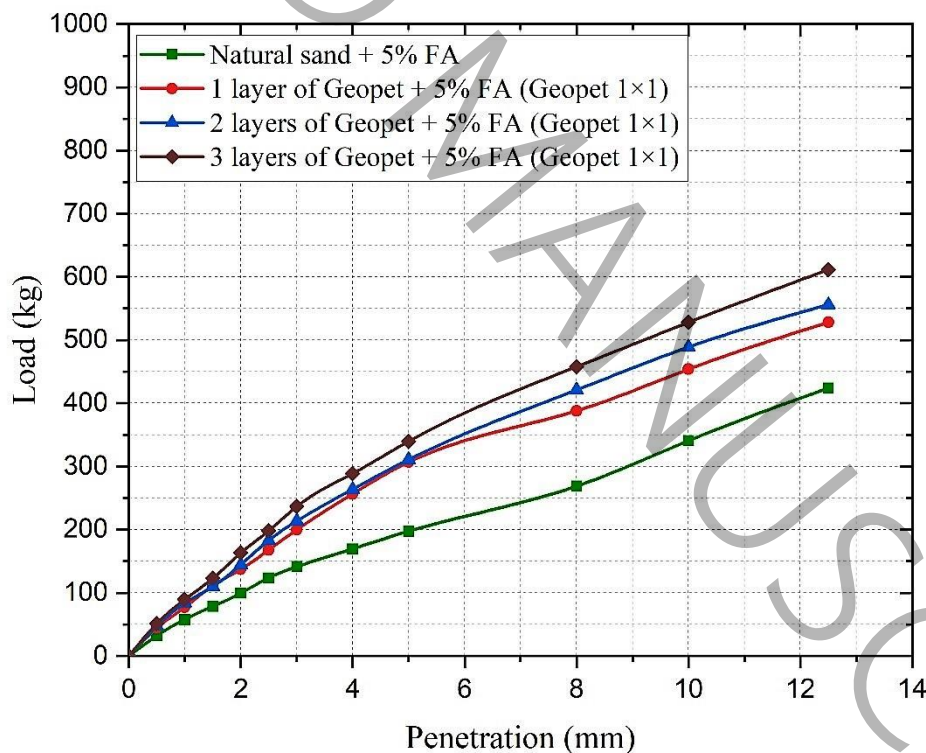
افزودن خاکستر بادی و هیدروکسید سدیم به عنوان یک فعال کننده به نمونه‌ها باعث افزایش فشار نفوذ سنبه بر روی نمونه‌های بدون این افزودنی‌ها شد. این افزایش فشار ناشی از واکنش شیمیایی خاکستر بادی با آب در دمای معمولی اتاق و هیدروکسید سدیم بود که باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر نفوذ و در نتیجه افزایش مقادیر CBR شد.

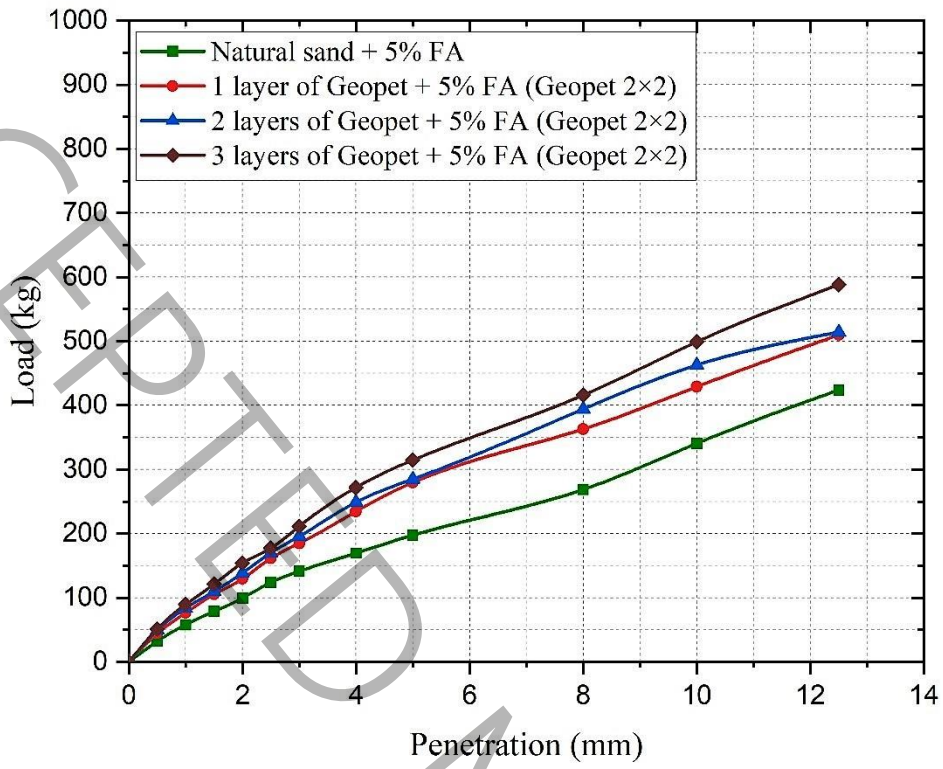
بهترین عملکرد ژئوپت در نمونه‌های خاک شنی تحت آزمایش CBR برای سه لایه ژئوپت با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی‌متر مربع بود. منحنی‌های بار نفوذ، بهبود پارامترهای مقاومت خاک را با افزودن خاکستر بادی نشان دادند. مقادیر CBR افزایش یافت زیرا فضای بین

دانه‌های خاک با خاکستر بادی پر شده بود. افزودن ۵ درصد خاکستر بادی به خاک تقویت شده با سه لایه Geopet با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی متر مربع، CBR را از ۱۰/۵۴ درصد به ۱۸/۱۲ درصد افزایش داد.

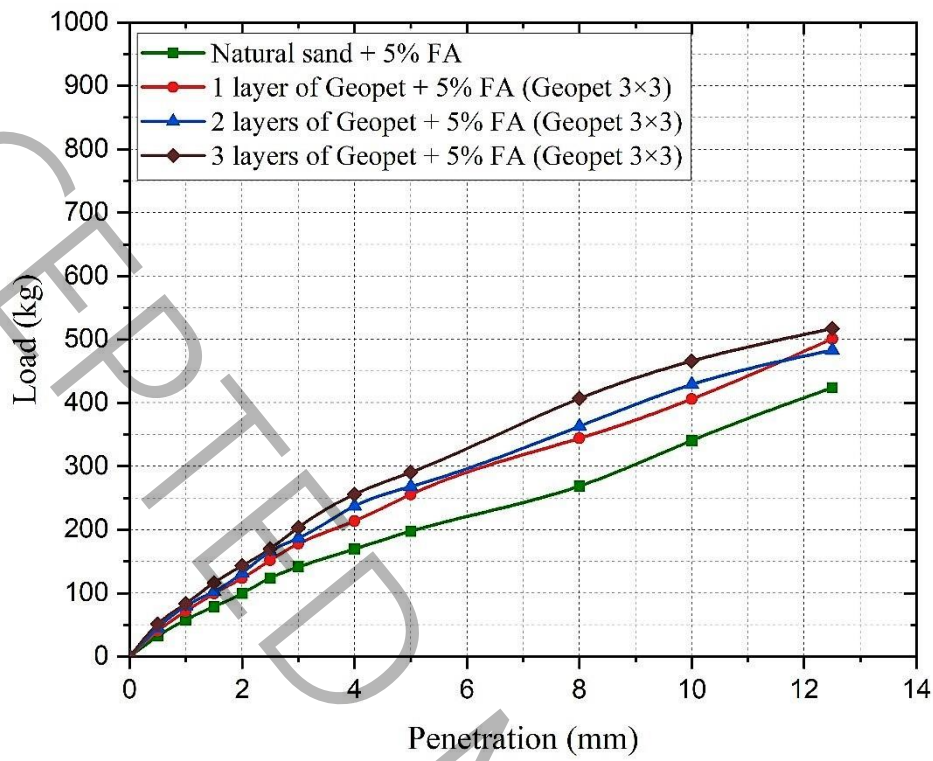
افزودن ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر بادی به نمونه‌ها نیز به طور قابل توجهی CBRs را به ترتیب ۲/۴۱ و ۲/۷۴ برابر نسبت به نمونه مرجع افزایش داد. همانطور که مشخص بود افزودن خاکستر بادی رابطه مستقیمی با افزایش CBR دارد، انتظار می‌رود که افزودن بیش از ۱۵ درصد خاکستر بادی باعث افزایش بیشتر CBR شود. با این حال، این مورد آزمایش قرار نگرفت زیرا افزایش حاصل در حجم نمونه مانع از رسیدن تراکم آن به حداکثر چگالی خشک می‌شود.

در نمونه‌های تقویت شده با Geopet، افزایش درصد خاکستر بادی باعث افزایش CBR شد. افزودن ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر بادی به خاک مرجع همانطور که در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است؛ به ترتیب ۷۱/۹٪، ۱۴۱/۷٪ و ۱۷۴/۹٪ CBR را افزایش داد. طبق استانداردهای FHWA، هنگام استفاده از خاکستر بادی کلاس F باید از یک فعال کننده استفاده شود. در مطالعه حاضر از هیدروکسید سدیم با غلظت ۸ مولار استفاده شد. بهترین نتایج با ۱۵ درصد خاکستر بادی و سه لایه ژئوپت با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی متر مربع به دست آمد. تحقیقات مشابه نشان داده است که افزودن ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪ خاکستر بادی به خاک شنی باعث افزایش CBR ها به میزان ۵۰٪، ۱۴۰٪ و ۲۰۷٪ شد [۵۰]. مطالعه دیگری نشان داد که افزودن ۵٪ و ۲۵٪ خاکستر بادی به خاک شنی باعث افزایش CBRs به ترتیب ۱۲٪ و ۲۵٪ شد [۴۷].





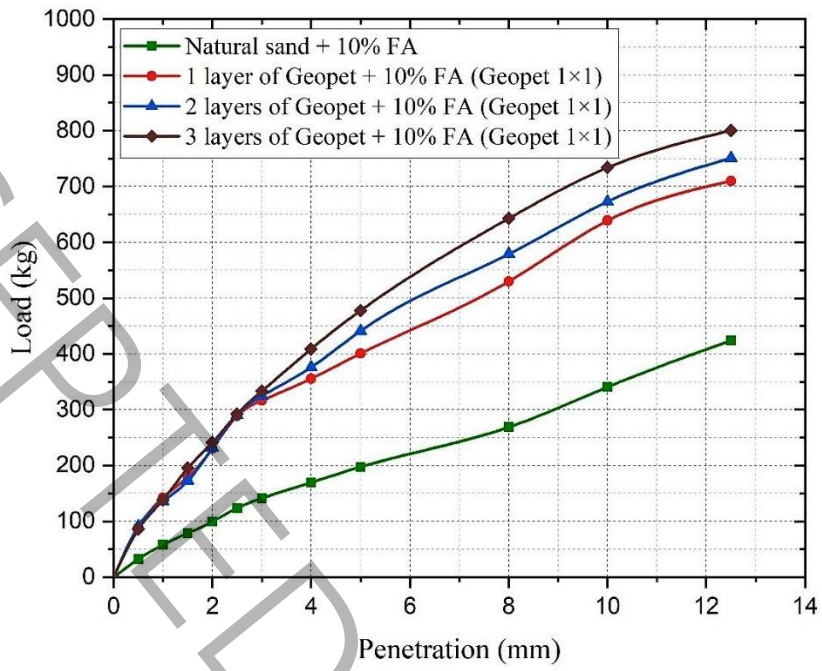




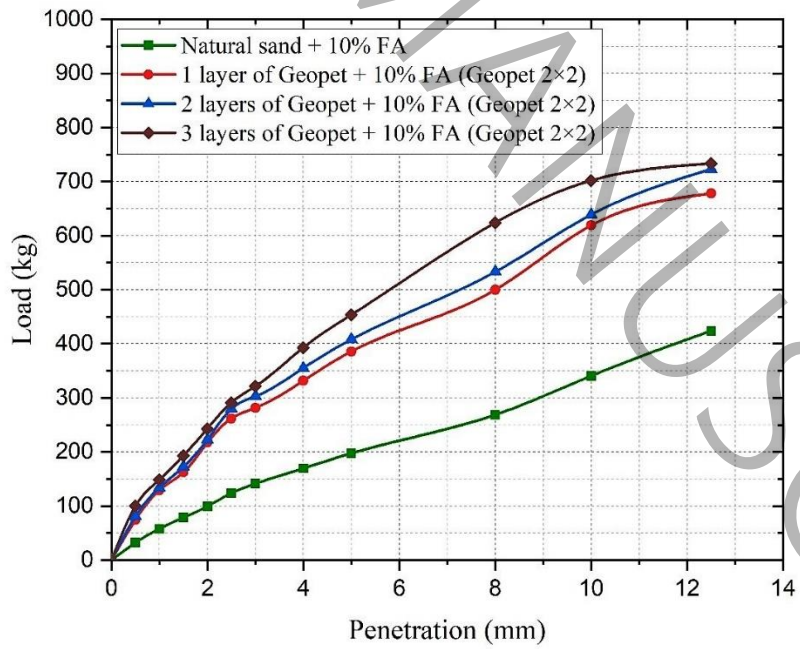
ج

شکل ۷- نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع، ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

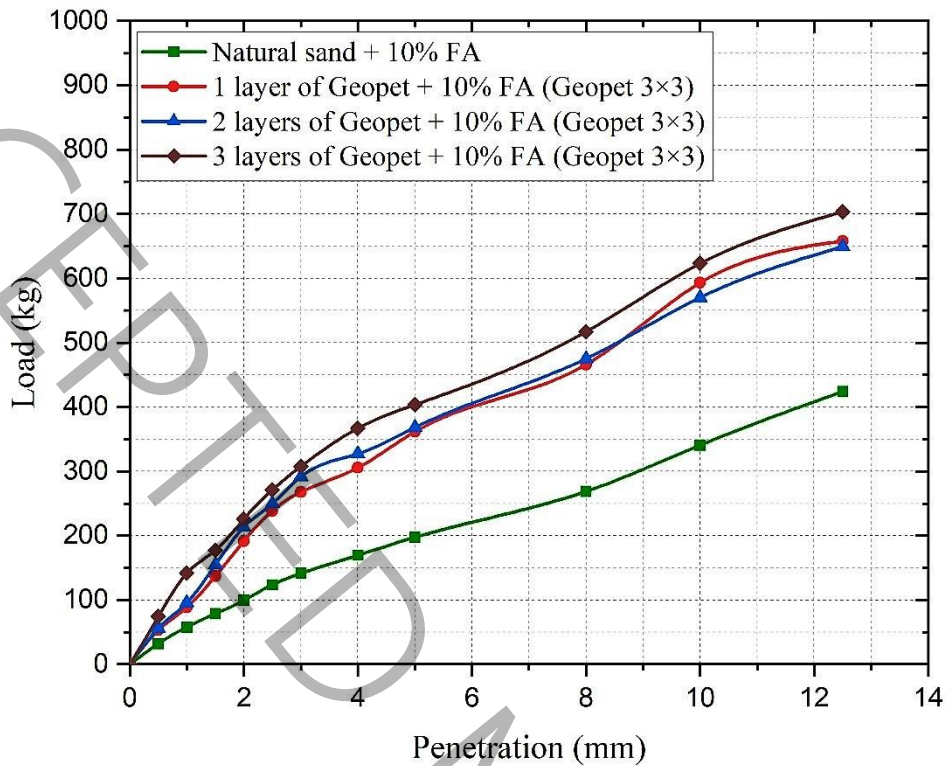
**Figure 7-** Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 5% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm<sup>2</sup>, (b) 2×2 cm<sup>2</sup>, and (c) 3×3 cm<sup>2</sup>



الف



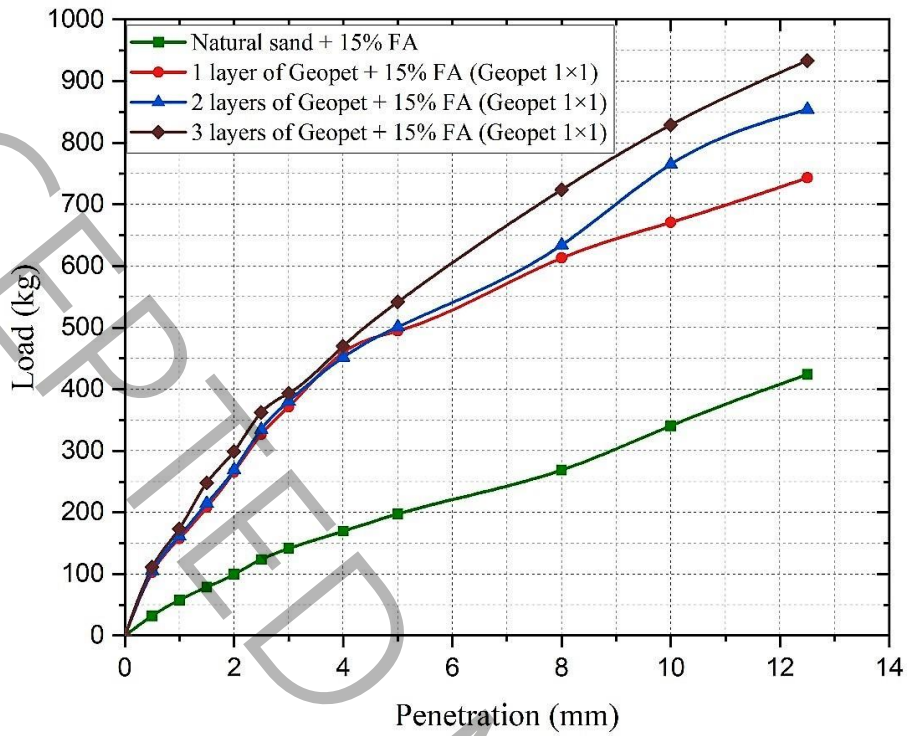
ج



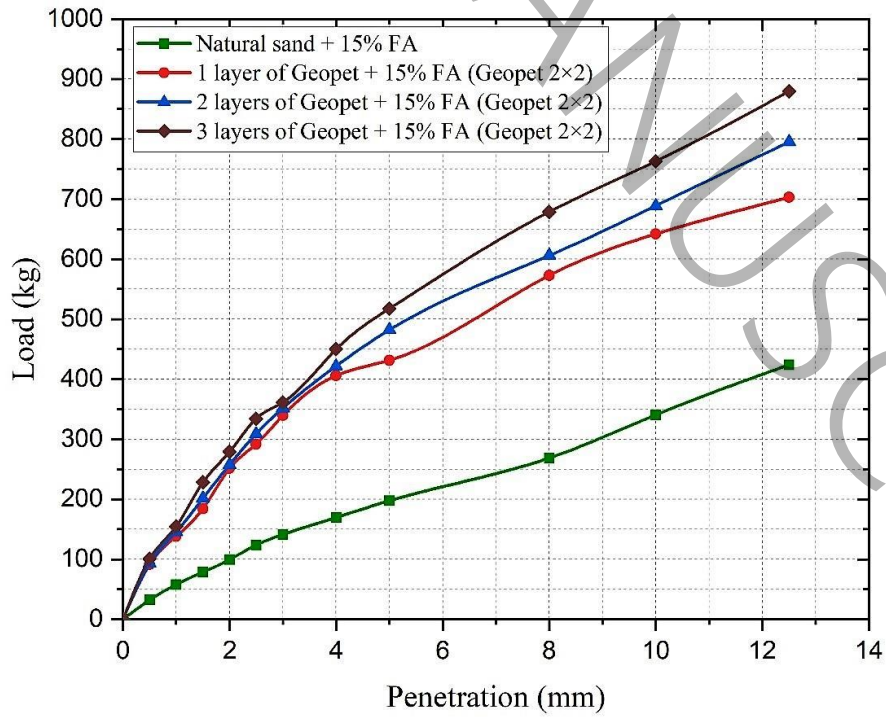
ج

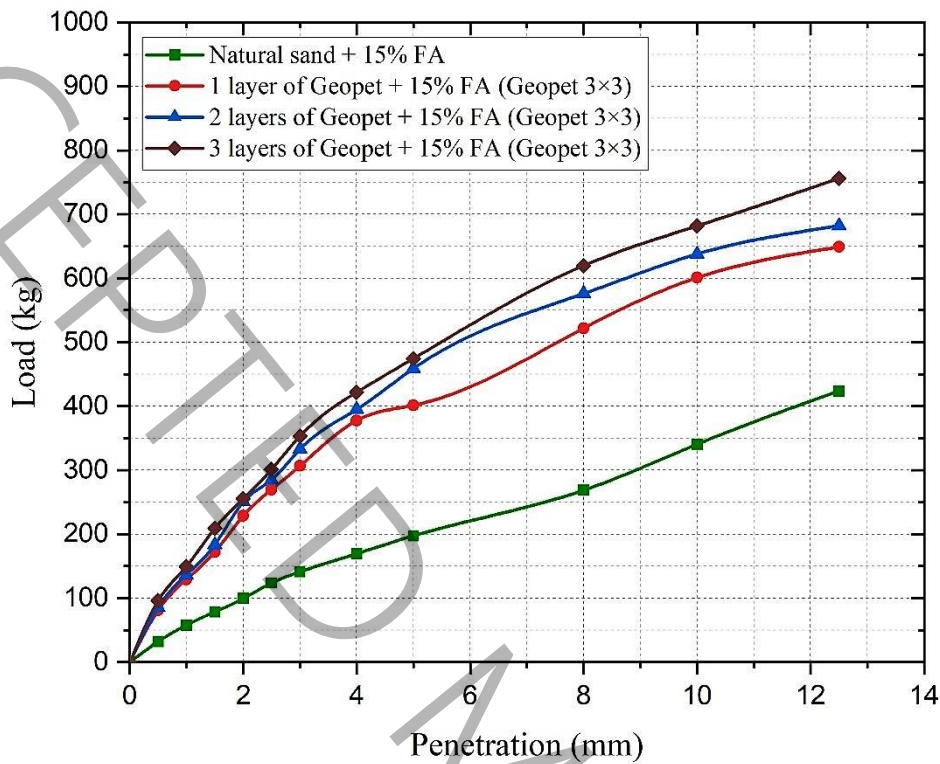
شکل ۸- نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۰ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع، ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع، ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

**Figure 8-** Force–penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 10% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm<sup>2</sup>, (b) 2×2 cm<sup>2</sup>, and (c) 3×3 cm<sup>2</sup>



الف





شکل ۹- نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع، ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع، ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

**Figure 9-** Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 15% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm<sup>2</sup>, (b) 2×2 cm<sup>2</sup>, and (c) 3×3 cm<sup>2</sup>

جدول ۹- خلاصه نتایج تست‌ها با Geopet و خاکستر بادی

**Table 9-** Summary of Test Results with Geopet and Fly Ash

ردیف	اندازه چشمه‌های Geopet (cm)	تعداد لایه‌های Geopet	خاکستر بادی (%)	مقدار CBR (%)
۱	۱×۱	۱	۵	۱۶/۳۶
۲	۱×۱	۲	۵	۱۶/۶۰
۳	۱×۱	۳	۵	۱۸/۱۲
۴	۱×۱	۱	۱۰	۲۳/۱۰
۵	۱×۱	۲	۱۰	۲۳/۵۳
۶	۱×۱	۳	۱۰	۲۵/۴۸
۷	۱×۱	۱	۱۵	۲۶/۳۹

۸	۱×۱	۲	۱۵	۲۶/۷۹
۹	۱×۱	۳	۱۵	۲۸/۹۸
۱۰	۲×۲	۱	۵	۱۴/۹۲
۱۱	۲×۲	۲	۵	۱۵/۲۱
۱۲	۲×۲	۳	۵	۱۶/۷۸
۱۳	۲×۲	۱	۱۰	۲۰/۹۴
۱۴	۲×۲	۲	۱۰	۲۱/۷۷
۱۵	۲×۲	۳	۱۰	۲۴/۲۰
۱۶	۲×۲	۱	۱۵	۲۳/۳۴
۱۷	۲×۲	۲	۱۵	۲۵/۷۲
۱۸	۲×۲	۳	۱۵	۲۷/۶۲
۱۹	۳×۳	۱	۵	۱۳/۶۴
۲۰	۳×۳	۲	۵	۱۴/۳۰
۲۱	۳×۳	۳	۵	۱۵/۵۰
۲۲	۳×۳	۱	۱۰	۱۹/۳۰
۲۳	۳×۳	۲	۱۰	۱۹/۹۸
۲۴	۳×۳	۳	۱۰	۲۱/۷۰
۲۵	۳×۳	۱	۱۵	۲۱/۵۸
۲۶	۳×۳	۲	۱۵	۲۴/۴۹
۲۷	۳×۳	۳	۱۵	۲۵/۳۲

#### ۴-۳- اثر زمان عمل آوری

عمل آوری نیاز به زمان کافی در دمای مناسب دارد و به طور قابل توجهی بر ظرفیت باربری خاک تأثیر می گذارد [۵۱]. مقادیر CBR در نمونه ها پس از هفت روز عمل آوری و در نمونه های عمل آوری نشده در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- اثر تعداد لایه های Geopet بر مقادیر CBR

Table 10- Effect of the Number of Geopet Layers on CBR Values

مقدار CBR			نمونه
سه لایه Geopet	دو لایه Geopet	یک لایه Geopet	بدون عمل آوری
۲۴/۵۲	۲۲/۹۴	۲۲/۶	
سه لایه Geopet	دو لایه Geopet	یک لایه Geopet	با عمل آوری ۷ روزه
۲۸/۹۸	۲۶/۷۹	۲۶/۳۹	

نتایج نشان می دهد که فشار ایجاد شده توسط نفوذ سنبه در نمونه های بدون عمل آوری کمتر از نمونه هایی بود که به مدت هفت روز عمل آوری شدند. زیرا افزایش زمان عمل آوری می تواند به کامل تر شدن واکنش ها کمک کند. علاوه بر این، با گذشت زمان، آب موجود در ژئوپلیمر به تدریج حذف می شود که باعث می شود منافذ مویرگی با ساختار متراکم تر با مقاومت فشاری بیشتر فرو بریزند در نتیجه CBR در نمونه های تقویت شده با سه لایه Geopet با اندازه چشمه ۱×۱ سانتی متر مربع و ۱۵ درصد خاکستر بادی در مقایسه با نمونه مشابه پس از هفت روز عمل آوری، ۱۵/۳ درصد کاهش یافت.

### ۵-۳- آنالیز واریانس (ANOVA)

برای محاسبه مقدار CBR از RSM استفاده شده است. کاربرد مدل ریاضی فوق با استفاده از ارزیابی آماری نرم افزار Design-Expert DX12 مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور کلی، Design-Expert ابزاری جامع برای محققان و دست اندرکارانی است که به دنبال بهینه سازی فرآیندهای آزمایشی خود و اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده بر اساس تجزیه و تحلیل آماری دقیق هستند. این نرم افزار برای تسهیل برنامه ریزی، اجرا و تجزیه و تحلیل آزمایش ها به ویژه در زمینه هایی مانند تولید، توسعه محصول و کنترل کیفیت طراحی شده است. در میان سایر نسخه های پیشنهادی، طراحی کوادراتیک (درجه دوم) برای CBR بهترین نتایج را به همراه داشته است. در نتیجه، در تحلیل، از مدل کوادراتیک برای پیش بینی CBR استفاده شده است. جدول ۵ ANOVA را برای مدل توصیف شده نشان می دهد، از جمله مقادیر احتمال و سر رونالد فیشر (F-value و P-value) که از اهمیت متغیرها و روابط آنها و همچنین اهمیت ضرایب رگرسیون پشتیبانی می کند. آنالیز واریانس یک روش آماری قدرتمند است که برای مقایسه میانگین های سه یا چند گروه استفاده می شود تا مشخص شود که آیا حداقل یک گروه تفاوت معنی داری با سایرین دارد یا خیر. ANOVA واریانس کل مشاهده شده در داده ها را به مؤلفه های قابل انتساب به منابع مختلف تقسیم می کند و به محققان این امکان را می دهد که ارزیابی کنند که آیا تفاوت بین میانگین های گروه به دلیل شانس تصادفی است یا منعکس کننده تفاوت های واقعی در جمعیت های مورد مطالعه است. مقادیر P در این مطالعه به عنوان دارای تأثیر قوی (کمتر از ۰/۰۵) یا ناچیز (بیشتر از ۰/۱) درجه بندی می شوند. معادله CBR در معادله ۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- تجزیه و تحلیل آمار واریانس مدل

Table 11- Analysis of Variance (ANOVA) of the Model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
<b>Model</b>	527.91	8	65.99	624.14	< 0.0001 significant
A-Fly Ash Percentage	371.21	1	371.21	3511.00	< 0.0001
B-GPET Mesh Area	49.78	1	49.78	470.81	< 0.0001
C-GPET Layers	32.35	1	32.35	305.95	< 0.0001
AB	1.75	1	1.75	16.58	0.0008
AC	2.19	1	2.19	20.74	0.0003
A <sup>2</sup>	16.20	1	16.20	153.19	< 0.0001
B <sup>2</sup>	0.7095	1	0.7095	6.71	0.0191
C <sup>2</sup>	1.60	1	1.60	15.09	0.0012
<b>Residual</b>	1.80	17	0.1057		
<b>Cor Total</b>	529.71	25			

معادله ۱:

$$\text{CBR} = +8.12063 + 2.22502 (\text{Fly Ash Percentage}) - 0.464012 (\text{GPET Mesh Area}) - 1.69264 (\text{GPET Layers}) - 0.020271 (\text{Fly Ash Percentage} * \text{GPET Mesh Area}) + 0.085500 (\text{Fly Ash Percentage} * \text{GPET Layers}) - 0.066658 (\text{Fly Ash Percentage}^2) + 0.023345 (\text{GPET Mesh Area}^2) + 0.544548 (\text{GPET Layers}^2)$$

### ۶-۳- مطالعه تشخیصی و نمودارهای مدل

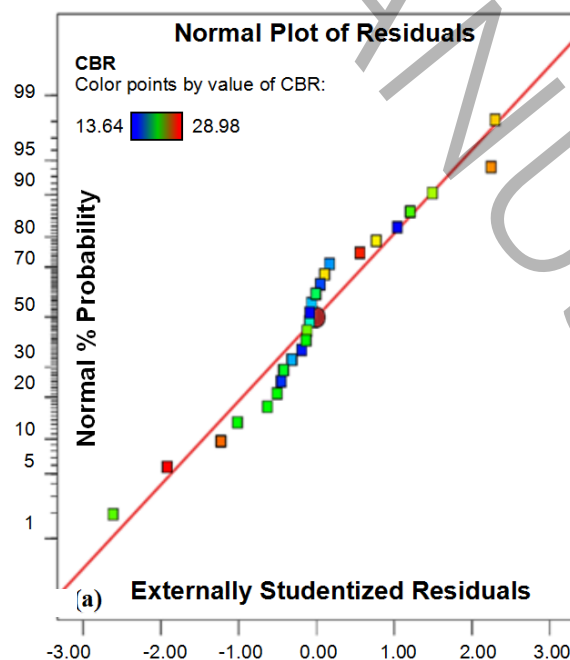
تجزیه و تحلیل تشخیصی در درجه اول از باقیمانده‌های مدل برای شناسایی نقاط پرت در نتایج پاسخ استفاده می‌کند. برای هر پاسخ در نمونه فعلی، سه نمودار تشخیصی ایجاد شده است: نمودار احتمالات عادی، نمودار مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر پاسخ واقعی، و نمودار باقی‌مانده در برابر مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده صعودی.

نمودار احتمالات طبیعی نشان می‌دهد که آیا باقی‌مانده‌ها دارای توزیع منظم هستند یا نه. تجزیه و تحلیل تغییر شکل پاسخ مناسب را می‌توان با الگوهای منحصر به فردی مانند منحنی "S" شکل نشان داد. شکل ۱۰ نمودار توزیع نرمال باقیمانده برای پاسخ CBR را نشان می‌دهد. تمام داده‌ها از یک فرمت ثابت پیروی می‌کنند و اساساً با یک خط مستقیم نشان داده می‌شوند.

نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای نشان دادن مقدار یا مجموعه‌ای از مقادیر که مدل به راحتی نمی‌تواند آن‌ها را پیش‌بینی کند استفاده می‌شود. نمودار مقادیر برآورد شده در مقابل مقادیر واقعی برای CBR در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که نمودار تقریباً یک خط مستقیم ۴۵ درجه است، که نشان دهنده همبستگی قوی بین نتایج واقعی و مورد انتظار است.

نمودار پراکندگی با باقیمانده‌های استیونته خارجی در محور  $Y$  و مقادیر پیش‌بینی‌کننده ( $X$ ) در محور  $X$ ، نمودار باقی‌مانده در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده را ایجاد می‌کند. یک نمودار خوب با یک پرش کاملاً تصادفی اغلب یک نوار تقریباً افقی در امتداد محور باقیمانده استیونته خارجی = صفر ( $0$ ) ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هیچ تفاوتی بین نقطه داده و الگوی تصادفی کلی دیگر باقیمانده‌ها وجود ندارد. شکل ۱۲ توزیع نامنظم داده و نمودار باقیمانده توزیع و مقادیر مورد انتظار (باقی مانده در مقابل پیش‌بینی) CBR را نشان می‌دهد.

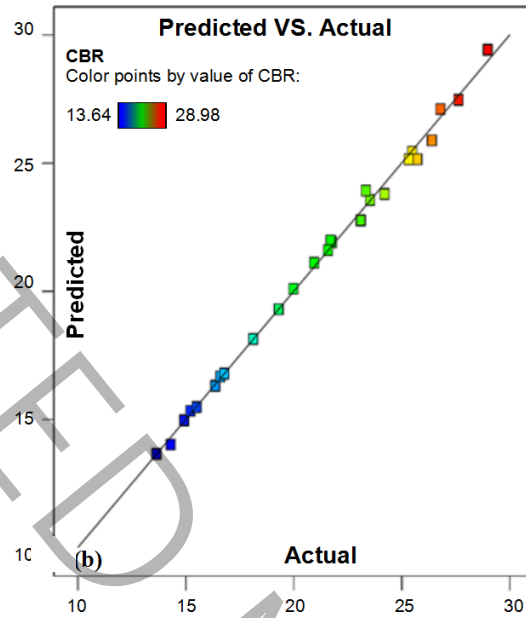
شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان می‌دهد که هر دو مدل دقیق هستند و می‌توانند اندرکنش بین پاسخ‌ها و متغیرها را توضیح دهند و همچنین پیش‌بینی‌های جامع و قابل اعتمادی را انجام دهند.



شکل ۱۰- نمودار احتمالات نرمال توسعه یافته

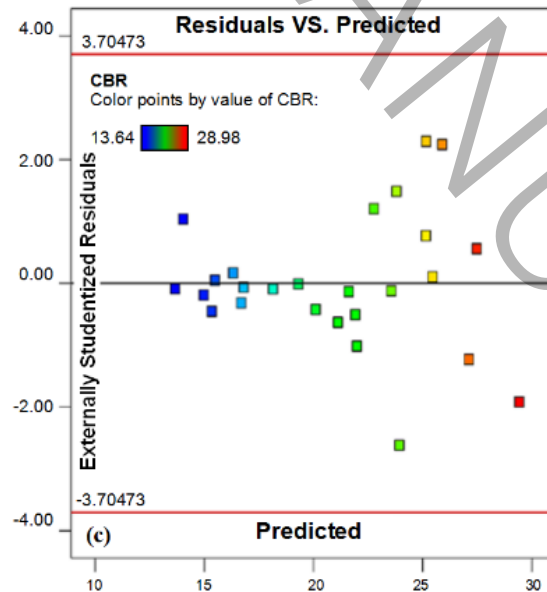


**Figure 10-** Normal probability plot of the developed model



شکل ۱۱- نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی مدل توسعه یافته

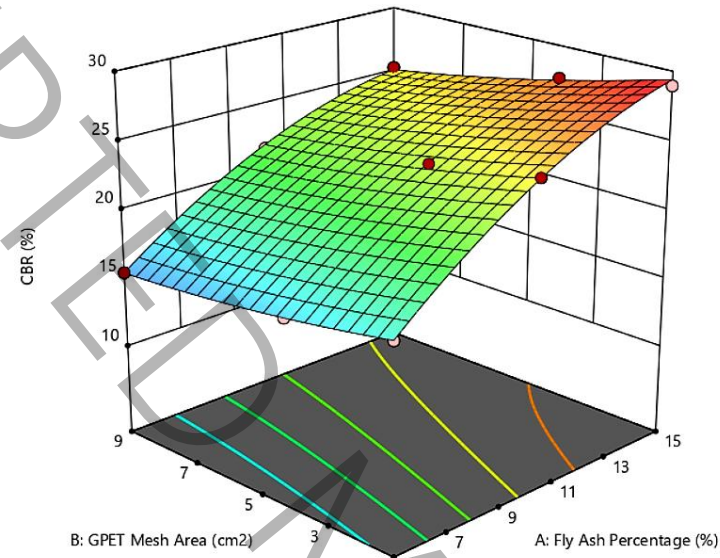
**Figure 11-** Plot of predicted values versus actual values for the developed model



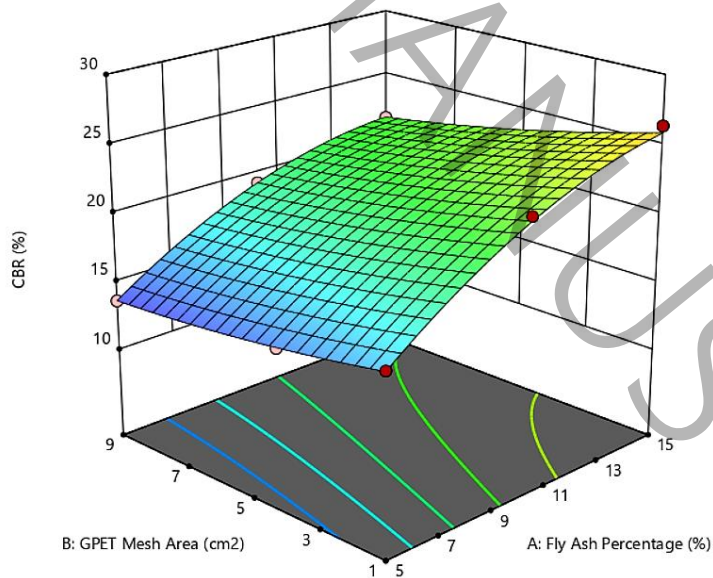
شکل ۱۲- نمودار مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر پیش بینی شده مدل توسعه یافته

**Figure 12-** Plot of residuals versus predicted values for the developed model

نمودار سطح سه بعدی CBR در شکل ۱۳ الف و ب نشان داده شده است که رنگ های قرمز و آبی به ترتیب مقادیر بالا و پایین نتیجه را نشان می دهند. توابع مدل چند جمله ای نمودارهای سطح سه بعدی را ترسیم می کنند که روش های مفیدی برای ارزیابی اندرکنش بین پاسخها و متغیرها هستند. لایه Geopet در شکل ۱۳ الف و ب به ترتیب در حد بالا و پایین آن دیده می شود.



الف



ب

شکل ۱۳- نمودار سطح پاسخ سه بعدی CBR

Figure 13- 3D response surface plot of CBR

استفاده مجدد از زباله های جامد برای تقویت و تثبیت خاک در پروژه های ساختمانی با کاهش میزان زباله در محل های دفن زباله به حفظ محیط زیست کمک می کند؛ زیرا باعث بهبود رفتار مکانیکی خاک می شود. در این مطالعه آزمایش CBR روی ماسه بندر انزلی تقویت شده و تثبیت شده با ژئوپت، خاکستر بادی و هیدروکسید سدیم انجام شد. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- تقویت شن و ماسه با لایه های ژئوپت به دلیل اثر غشایی، اصطکاک با خاک و محصور شدن دانه های خاک، ظرفیت باربری نمونه ها را ۷۱/۹ تا ۱۷۴/۹ درصد افزایش داد. استفاده از سه لایه Geopet چگالی را افزایش داد که با نفوذ سنبه بیش از مقادیر یک یا دو لایه Geopet و خاک بدون تقویت اندازه گیری شد. مقادیر CBR به دلیل اثر غشایی، اصطکاک با خاک، محصور شدن دانه های خاک و افزایش واکنش پوزولانی خاکستر بادی، که در آن با رطوبت واکنش می دهد تا ترکیبات سیمانی ایجاد کند، با کوتاه کردن مسیرهای شکست و زمان عمل آوری، اتصال بین دانه ها را افزایش می دهد. در نتیجه مقاومت فشاری خاک را افزایش می دهد. علاوه بر این، با توجه به مطالعات قبلی روزناک در سال ۱۹۶۸، یک همبستگی خطی قوی بین ظرفیت باربری و مقادیر CBR در OMC وجود دارد که در شکل - نشان داده شده است، در نتیجه، ژئوپت در خاک باعث افزایش مقادیر CBR و در نتیجه بهبود ظرفیت باربری خاک می شود.

- با افزایش درصد خاکستر بادی، میزان رطوبت بهینه کمی افزایش یافت، اما حداکثر چگالی خشک کاهش یافت. کاهش حداکثر وزن واحد خشک را می توان به خواص نگهداری و جذب آب خاکستر بادی نسبت داد. علاوه بر این، ذرات باردار درون خاکستر بادی برای جدا کردن دانه های خاک عمل کردند و بخشی از انرژی تراکم را جذب کردند و مانع از تراکم بهینه خاک شدند. علاوه بر این، با توجه به تراکم قابل توجهی بالاتر شن و ماسه در مقایسه با خاکستر بادی، از دست دادن وزن مخصوص خشک بیشتر بود. همچنین، مقادیر CBR به دلیل واکنش پوزولانی خاکستر بادی، که در آن با رطوبت واکنش می دهد و ترکیبات سیمانی ایجاد می کند، افزایش می یابد و در نتیجه مقاومت فشاری خاک را افزایش می دهد.

- عمل آوری به مدت هفت روز با افزایش مدت زمان عمل آوری، قدرت نفوذ را افزایش داد. واکنش های درون ماده می تواند بیشتر پیشرفت کند و مقاومت نمونه ها را افزایش دهد. علاوه بر این، با گذشت زمان، آب درون ژئوپلیمر به تدریج تبخیر می شود که منجر به فروپاشی منافذ مویرگی و ایجاد ساختار متراکم تر با افزایش مقاومت فشاری می شود و در نتیجه CBRs را بهبود می بخشد. همانطور که نتایج نشان می دهد که CBR برای نمونه بدون پخت در شرایط مشابه ۱۵/۳٪ کمتر بود.

- مدل های ریاضی مبتنی بر RSM یک همبستگی قوی با یافته های تجربی نشان دادند. این نتایج شواهد روشنی را ارائه می دهند که رویکرد پیشنهادی برای تخمین CBR خاک تثبیت شده با خاکستر بادی و Geopet امیدوارکننده و بسیار ارزشمند است.

## منابع

- [۱] S. Siddiqua, P.N. Barreto, Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash, *Construction and Building Materials*, 169 (2018) 364-371.
- [۲] P. Ghadir, N. Ranjbar, Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 361-371.
- [۳] M. Moshtaghi, M. Keramati, O. Ghasemi-Fare, A. Pourdeilami, M. Ebrahimi, Experimental study on thermomechanical behavior of energy piles in sands with different relative densities, *Journal of Cleaner Production*, 403 (2023) 136867.
- [۴] N. YARBAŞI, E. Kalkan, The mechanical performance of clayey soils reinforced with waste PET fibers, *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2(1) (2020) 19-26.
- [۵] S.R. Abdila, M.M.A.B. Abdullah, R. Ahmad, D.D. Burduhos Nergis, S.Z.A. Rahim, M.F. Omar, A.V. Sandu, P. Vizureanu, Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A Review, *Materials*, 15(1) (2022) 375.

[٢٠] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *International Journal of Civil Engineering*, 19 (2019) 1313-1325.

[٢١] M.I. Hoque, M. Hasan, S.D. Datta, Effect of waste plastic strip on the shear strength and permeability characteristics of black cotton soil, *J. Appl. Sci. Eng*, 27 (2023) 2019-2028.

[٢٢] A. Chandra, S. Siddiqua, Sustainable utilization of chemically depolymerized polyethylene terephthalate (PET) waste to enhance sand-bentonite clay liners, *Waste Management*, 166 (2023) 346-359.

[٢٣] T.G.L. Bikoko, J.C. Tchamba, N.K.F. Gildas, S. Amziane, Assessing the mechanical and durability properties of recycled polyethylene terephthalate (PET) plastic soil, in: *International Conference on Bio-Based Building Materials*, Springer, (2023) 3-13.

[٢٤] M. Maher, Y. Ho, Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8) (1994) 1381-1393.

[٢٥] O. Andersland, Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture, in: *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*, (1979).

[٢٦] I. Bozyigit, F. Bulbul, C. Alp, S. Altun, Effect of randomly distributed pet bottle strips on mechanical properties of cement stabilized kaolin clay, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(5) (2021) 1090-1101.

[٢٧] S. Peddaiah, A. Burman, S. Sreedeeep, Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5) (2018) 2907-2920.

[٢٨] Z. Hajiannezhad, M. Keramati, R. Naderi, M. Alinezhad, Evaluation of Shear Strength Behaviour of Anzali Port Sand Reinforced with Polyethylene terephthalate (PET), *Journal of Science and Technology*, (٢٠١٩).

[٢٩] S. Boobalan, P. Anandakumar, M. Sathasivam, Utilization of waste plastic sheets as soil stabilization materials, *Materials Today: Proceedings* (٢٠٢٣).

[٣٠] H.H. Abdullah, M.A. Shahin, M.L. Walske, Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag, *Soils and Foundations*, 59(6) (2019) 1906-1920.

[٣١] H. Karami, J. Pooni, D. Robert, S. Costa, J. Li, S. Setunge, Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades, *Transportation Geotechnics*, 29 (2021) 100585.

[٣٢] S. Arora, A.H. Aydilek, Class F fly-ash-amended soils as highway base materials, *Journal of materials in civil engineering*, 17(6) (2005) 640-649.

[٣٣] F. Santos, L. Li, Y. Li, F. Amini, Geotechnical properties of fly ash and soil mixtures for use in highway embankments, in: *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, May, 2011, 12.

[٣٤] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Bahrami, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, H.F. Isleem, M. Navazani, S. Dessouky, Application of hybridized ensemble learning and equilibrium optimization in estimating damping ratios of municipal solid waste, *Scientific Reports*, 14(1) (2024) 17584.

[٣٥] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Fahimifar, T. Ebadi, S. Siddiqua, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, S. Dessouky, Shear modulus prediction of landfill components using novel machine learners hybridized with forensic-based investigation optimization, *Construction and Building Materials*, 411 (2024) 134443.

[٣٦] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 375-383.

[٣٧] M. Romagnoli, P. Sassatelli, M.L. Gualtieri, G. Tari, Rheological characterization of fly ash-based suspensions, *Construction and Building Materials*, 65 (2014) 526-534.

[٣٨] F. Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, *Geomechanics and Geoengineering*, (2021) 1-16.

[٣٩] X. Long, L. Cai, W. Li, RSM-based assessment of pavement concrete mechanical properties under joint action of corrosion, fatigue, and fiber content, *Construction and Building Materials*, 197 (2019) 406-420.

[٤٠] H.M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays using experimental and artificial methods, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (٢٠٢٤).

[٤١] R. Rezvani, I. Hosseinpour, M. Kavoshmelli, Effect of moisture content on unconfined compressive behavior of geotextile-reinforced clay specimen, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3) (2022) 230.

[٢٨]H. Alimohammadi, J. Zheng, V.R. Schaefer, J. Siekmeier, R. Velasquez, Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021) 100471.

[٢٩]N.E. Rebello, R. Shivashankar, V.R. Sastry, Surface displacements due to tunneling in granular soils in presence and absence of geosynthetic layer under footings, *Geomechanics & engineering*, 15(2) (2018) 739-744.

[٣٠]A. Mittal, S. Shukla, Influence of geotextile and geogrid reinforcement on strength behaviour of soft silty soil, *Applied Mechanics and Materials*, 877 (2018) 264-269.

[٣١]B. Leshchinsky, T.M. Evans, J. Vesper, Microgrid inclusions to increase the strength and stiffness of sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2) (2016) 170-177.

[٣٢]S. Tafreshi, A. Norouzi, Application of waste rubber to reduce the settlement of road embankment, *Geomechanics and Engineering*, 9(2) (2015) 219-241.

[٣٣]D. Prasad, G. Prasada Raju, V. Ramana Murthy, Use of waste plastic and tyre in pavement systems, *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division*, 89(AOU)(٢٠٠٨) ٣٥-٣١

[٣٤]M. Corrêa-Silva, N. Araújo, N. Cristelo, T. Miranda, A.T. Gomes, J. Coelho, Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications, *Road Materials and Pavement Design*, 20(8) (2019) 191.١٩٢٤-٢

[٣٥]S. Rios, N. Cristelo, A. Viana da Fonseca, C. Ferreira, Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains, *International Journal of Geomechanics*, 17(3) (2017) 04016087.

[٣٦]S.K. Mohanty, P.K. Pradhan, C.R. Mohanty, Stabilization of expansive soil using industrial wastes, *Geomechanics and engineering*, 12(1) (2017) 111-125.

[٣٧]N. Cristelo, S. Glendinning, A. Teixeira Pinto, Deep soft soil improvement by alkaline activation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2) (2011) 73-82.

[٣٨]B. Sahu, Improvement in California bearing ratio of various soils in Botswana by fly ash, in: *International Ash Utilization Symposium*, (2001.)

[٣٩]T. Harianto, Performance of subbase layer with geogrid reinforcement and zeolite-waterglass stabilization, *Civil Engineering Journal*, 8(20) (2022) 251-262.

[٤٠]S. Jahandari, S.F. Mojtahedi, F. Zivari, M. Jafari, M.R. Mahmoudi, A. Shokrgozar, S. Kharazmi, B. Vosough Hosseini, S. Rezvani, H. Jalalifar, The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils, *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1) (2022) 269-281.

[٤١]L. Li, J. Zhang, H. Xiao, Z. Hu, Z. Wang, Experimental Investigation of Mechanical Behaviors of Fiber-Reinforced Fly Ash-Soil Mixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019(1) (2019) 1050536.

[٤٢]S. Gupta, A. GuhaRay, A. Kar, V. Komaravolu, Performance of alkali-activated binder-treated jute geotextile as reinforcement for subgrade stabilization, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (٢٠٢١).

[٤٣]R.K. Dutta, V. Sarda, CBR Behaviour of Waste Plastic Strip-Reinforced Stone Dust/Fly Ash Overlying Saturated Clay, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 31(3) (2007)

[٤٤]I. Aghayan, R. Khafajeh, Recycling of PET in asphalt concrete, in: *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete*, Elsevier, (2019) 269-285.

[٤٥]B. Mishra, M.K. Gupta, Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 95-107.

[٤٦]A. Wardhono, Comparison study of class F and class C fly ashes as cement replacement material on strength development of non-cement mortar, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2018) 012019.

[٤٧]R. Brooks, F.F. Udoeyo, K.V. Takkalapelli, Geotechnical properties of problem soils stabilized with fly ash and limestone dust in Philadelphia, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(5) (2011) 711-716.

[٤٨]L.G. Archuleta, P.J. Tikalsky, R. Carrasquillo, Production of concrete containing fly ash for structural applications, *University of Texas at Austin*, (1985).

[٤٩]R.B. Kogbara, A. Al-Tabbaa, Y. Yi, J.A. Stegemann, Cement-fly ash stabilisation/solidification of contaminated soil: Performance properties and initiation of operating envelopes, *Applied Geochemistry*, 33 (2013) 64-75.

[٥٠]F.N. Okonta, T. Manciya, Compaction and strength of lime-Fly ash stabilized collapsible residual sand, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(1976) (2010) e88.

[5] M. Zribi, B. Samet, S. Baklouti, Effect of curing temperature on the synthesis, structure and mechanical properties of phosphate-based geopolymers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 511 (2019) 62-67.

ACCEPTED MANUSCRIPT