ارزیابی رفتار دینامیکی خاک ماسه بندر استحصالی انزلی بهسازی شده با خرده پلی-اتیلن ترفتالات ضایعاتی (PET)

محمد توفیق‌تبریزی[۱] ، محسن کرامتی[۲*] ، امین رامش[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، Tofigh_mohammad@yahoo.com
[۲] استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، Keramati@sharoodut.ac.ir
[۳] کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی ژئوتکنیک، Aminramesh2012@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

کلمات کلیدی:
برش ساده سیکلیک
مدول برشی خاک
میرایی خاک
بندرالمنت
پلی اتیلن ترفتالات(پت)

چکیده

امروزه توسعه بنادر با استفاده از استحصال رسوبات بستر دریا بسیار مرسوم است، که البته با توجه به ماهیت مصالح مورد استفاده و البته روش اجرای آن، اغلب دارای ضعف در خصوصیات مهندسی به ویژه ظرفیت باربری و نشست می‌باشند. برای رفع بسیاری از این مسائل نیاز به بهسازی این خصوصیات در خاک است. یکی از روش‌های مرسوم بهسازی خاک استفاده از روشهای تسلیح خاک است که اغلب دارای هزینه نسبتا بالایی در تامین مصالح و نحوه اجرای آن هستند، در این بین افزودن مواد ضایعاتی به خاک به دلیل وجود مزایای زیست محیطی و البته سهولت اضافه کردن آن در حین اجرای خاکریز، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده که با توجه به افزایش تولید انواع پلاستیک در دهه‌های اخیر، تصمیم گرفته شد در این پژوهش از خرده‌های پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی برای بهسازی خاک استفاده شود. در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی، آزمایش‌های دینامیکی بر روی نمونه‌های خاک ماسه ای اخذ شده از بندر استحصالی انزلی در ۲ حالت بدون الیاف و بهسازی شده با خرده‌های پت تحت اثر ۳ سربار انجام شده و تاثیر افزودن این مواد ضایعاتی بر پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با انجام آزمایش بندر المنت بر روی نمونه‌های مشابه اثر این افزودنی بر سرعت موج برشی و همچنین مقدار مدول برشی حداکثر بررسی شده است.

Investigation of dynamic behavior of Anzali Port sandy soil reinforced with PET fibers

Mohammad Tofigh Tabrizi[1], Mohsen Keramati[2*], Amin Ramesh[3]

[1] Ms.c. Student, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; Tofigh_mohammad@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; Keramati@sharoodut.ac.ir
[3] Master of Civil Engineering, Geotechnical Engineering; Aminramesh2012@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 Dec. 2020
Accepted: 06 Sep. 2021

Keywords:
cyclic simple shear
Soil shear modulus
Damping soil
Bender element
polyethylene terephthalate (PET)

ABSTRACT

Nowadays, the development of ports and the construction of artificial harbors using seabed sediments is widespread. However, due to the nature of the material used and the method of implementation, often have weakness in engineering characteristics, especially bearing capacity and settlement of the soil. To solve many of these problems, this is essential to improve these characteristics in the soil. One of the common soil improvement methods is soil reinforcement methods, which are often costly because of the costs of supply of material and the implementation. The addition of waste materials to the soil is a proper way to reinforce the ground because of its environmental benefits and the ease of adding it during embankment implementation. Moreover, due to the increase in plastics production in recent decades, it was decided to use waste polyethylene terephthalates for soil improvement in this study. After sample preparation, dynamic tests were performed on soil samples (Bandar Anzali sand) in two treated and untreated cases under various vertical loads by the dynamic Simple Shear apparatus. Then the effect of adding this material on dynamic parameters of the soil was investigated. Afterward, by performing the bender element Tests on similar samples, the additive effect on shear wave velocity and maximum shear modulus has been considered.

۱ - مقدمه

گسترش روزافزون ساخت و ساز و توسعه‌ی زیر ساخت های جامعه بشری، ما را ناگزیر به استفاده از زمین‌هایی با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب کرده است. برای به کارگیری زمین‌هایی با این ویژگی‌ها باید به بهسازی و بهینه کردن ویژگی‌های مهندسی آن‌ها مبادرت ورزید. بهبود مقاومت و ویژگی‌های مهندسی خاک از راه‌های گوناگون مانند فرآیندهای مکانیکی، افزودن مواد شیمیایی و یا مسلح‌کردن خاک امکان‌پذیر است. در همین راستا تحقیقات بسیاری در مورد رفتار خاک مسلح شده با الیاف مختلف طبیعی و مصنوعی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به (خطاک و آندرسلند ۱۹۷۹، اوهشی ۱۹۸۳، هو و ماهر ۱۹۹۴، یوجیانگ و وانگ ۱۹۹۹، پارک و تان ۲۰۰۵، تانگ ۲۰۰۷، آکبولوت ۲۰۰۷ و کنسولی ۲۰۰۹)اشاره نمود[۱-۸]. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است تسلیح خاک با الیاف منجر به افزایش مقاومت فشاری خاک، افزایش کرنش شکست و شکل‌پذیری نمونه و افزایش مقاومت برشی خاک شده و به طور کلی موجب بهبود رفتار خاک می‌شود.

در دهه‌های اخیر مسلح کردن خاک و بهسازی ویژگی‌های مهندسی آن با افزودن مصالح به خاک مورد توجه قرار گرفته است که در این بین استفاده از مواد ضایعاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا افزون بر بهینه‌سازی رفتار مصالح خاکی، استفاده‌ی مجدد از آن‌ها سبب کاهش میزان آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از این ضایعات در محیط زیست می‌شود و همانطور که می‌دانیم بطری‌های پلاستیکی یکی از عمده‌ترین زباله‌های جامعه بشری هستند و استفاده از این مواد ضایعاتی در مسلح کردن مصالح خاکی می‌تواند به کاهش مشکلات زیست محیطی بیانجامد. این بطری‌های پلاستیکی از پلی اتیلن ترفتالات ساخته می‌شوند. پلی اتیلن ترفتالات که به طور مختصر به صورت پت (PET) عنوان می‌شود از خانواده پلی استرها است که در ساخت بطری‌های نوشابه، آب معدنی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد[۹, ۱۰].

طبق آخرین بررسی‌های انجام شده تولید پلاستیک در سطح جهان رو به افزایش است، به گونه‌ای که در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ تولید پلاستیک از ۳۲۲ میلیون تن به ۳۳۵ میلیون تن رسیده است[۱۱].

کومار ۲۰۱۲ با افزودن الیاف پروپیلن به خاک با درصد اختلاط وزنی‌های ۰.۱٪ تا ۱٪ وزن خاک خشک و با ۳ نسبت ابعاد ($\frac{l}{d}$) ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ آزمایشات مختلفی از جمله آزمایش برش مستقیم، آزمایش تک محوری خاک و آزمایش CBR را بر روی نمونه‌های خاک انجام داد و در نتیجه این آزمایشات تاثیر مثبت وجود این الیاف در نمونه‌های خاک و افزایش مقاومت برشی، مقاومت فشاری و بهبود رفتار تنش-کرنش در نمونه‌های خاک بهسازی شده مشاهده شد[12].

کومار گوپتا و میشرا (۲۰۱۸) اثر همزمان خاکستر و پت را بر مشخصات مقاومتی خاک در آزمایشات حدود اتربرگ، آزمایش برش مستقیم و آزمایش پروکتور اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند. در آزمایش پروکتور اصلاح شده مقدار رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش پیدا کرد و همچنین اثر مثبت وجود این افزودنی‌ها در خاک بر حدود اتربرگ و همچنین رفتار تنش-کرنش مشاهده گردید[۱۳].

اولووپلومی ۲۰۱۶ تاثیر افزودن خرده‌های پلاستیک ضایعاتی قطعات ۳*۳ میلی‌متر و ۷*۷ میلی‌متر با درصد اختلاط‌های مختلف ۰/۴ ٪ و ۰/۸ ٪ و ۱/۲ ٪ و ۱/۶ ٪ و ۲/۰ ٪ از وزن خاک و مقدار سیمان برابر ۳ ٪ از وزن خاک را مورد بررسی قرار داده است. با انجام آزمایش تراکم اصلاح شده بر نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده مشاهده شد که مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش مقدار پلاستیک ضایعاتی پت، کاهش می یابد که این کاهش به علت وزن سبک مصالح پت می باشد[۱۴].

بوترو ۲۰۱۵ الیاف پت را به خاک لای‌دار افزود تا رفتار تنش-کرنش خاک تسلیح شده به وسیله الیاف پت را مورد بررسی قرار دهد. با رسم منحنی تنش-کرنش منتج از آزمون سه محوری مشاهده شد که پاسخ‌های تنش-کرنش با تغییر مقدار الیاف استفاده شده و مقدار فشار همه جانبه، تغییر می‌کند. همچنین در برخی درصدهای اختلاط الیاف مشاهده شد که نمونه به حد گسیختگی نرسید و این حالت فقط می‌تواند مربوط به مقاومت کششی الیاف باشد که به مقاومت برشی بیشتر خاک کمک می‌کند و سبب می‌شود که ظرفیت تغییر شکل خاک بیشتر شود، بدون آن که ترک تشکیل، یا انتشار پیدا کند[۱۵].

کرامتی ۲۰۱۹، خرده‌های پت را در لندازه‌های ۱*۱ و نوارهای ۱*۵ سانتی متر و همچنین به صورت الیاف به خاک ماسه ای افزود. در نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مشاهده شد، حضور پت به صورت‌های مختلف در خاک باعث افزایش مقاومت برشی ماکزیمم، افزایش شکل‌پذیری خاک، افزایش زاویه اصطکاک داخلی، افزایش چسبندگی خاک و افزایش ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای شده است[۱۶].

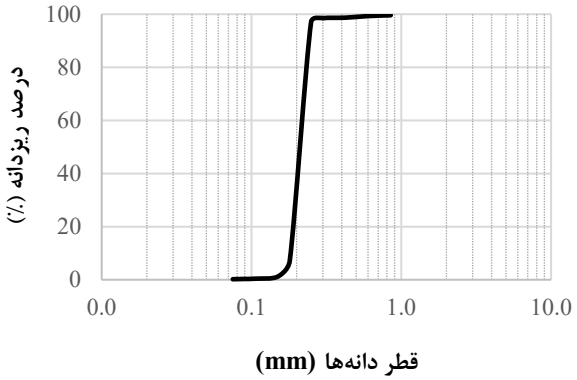
در سال‌های اخیر بررسی‌های زیادی در مورد تاثیر بهسازی خاک بر مشخصات فیزیکی و شکل‌پذیری مصالح ژئوتکنیکی صورت گرفته است. اما با نظر به اینکه ارتقاء دانش لرزه‌ای نیازمند اطلاعات بیشتری در زمینه خواص دینامیکی می‌باشد. در مقاله حاضر در جهت افزایش آگاهی، تاثیرات بهسازی با استفاده از مواد پلیمری بر روی خواص دینامیکی خاک‌های بهسازی شده با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش عملیات بهسازی با استفاده از پلی اتیلن ترفتالات بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای بندرانزلی اجرا شده است. افزودنی مورد استفاده پلی

اتیلن ترفتالات (PET) ضایعاتی می‌باشد. بعد از اتمام اختلاط خاک و پت آزمایش برش ساده دینامیکی در کرنش‌ها و سربارهای مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شده است و پارامترهای مدول برشی و میرایی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین جهت تکمیل دانش دینامیکی در این زمینه، تغییرات سرعت موج برشی نیز با استفاده از سنسورهای بندرالمنت موجود در این دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ – مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک مورد استفاده

در این مطالعه خاک استفاده شده، خاک ماسه‌ای گردگوشه یکنواخت از نوع کربناته بوده و مربوط به بندر استحصالی انزلی می‌باشد. طبق آزمایش تعیین وزن مخصوص مواد جامد خاک بر اساس ASTM D854-87 چگالی ویژه ماسه ۲/۶۵ می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی این ماسه نیز بر اساس استاندارد ASTM D422-87 انجام شده و در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی این خاک رسم شده است. بر اساس نمودار رسم شده مقدار D_{50} (متوسط اندازه‌ی ذرات خاک) ۰/۱۷ میلی‌متر، ضریب انحنای خاک ۱/۰۷ و ضریب یکنواختی آن ۱/۲۵ می‌باشد. لازم به ذکر است ماسه‌ی بندرانزلی در سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار دارد. در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی ماسه بندر انزلی بیان شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی ماسه بندرانزلی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی ماسه بندرانزلی

مشخصه	کد آزمایش ASTM	واحد	مقدار
G_s	D854-87	-	۲/۶۵
e_{min}	-	-	۰.۶۶
e_{max}	-	-	۰.۹۹
$(\gamma_d)_{min}$	D698	gr/cm^3	۱.۳۳
$(\gamma_d)_{max}$	D698	gr/cm^3	۱/۶
D_{50}	D422-87	mm	۰/۱۷
C_u	D422-87	-	۱/۲۵
Cc	D422-87	-	۱/۰۷

۲-۲- مسلح‌کننده مورد استفاده

به منظور مسلح‌کردن خاک از پلی اتلین ترفتالات استفاده شده است. پت یک رزین پلی استر ترموپلاستیک است که از تغلیظ اتیلن گلیکول و ترفتالیک اسید ساخته می‌شود. این ماده دارای سختی بالا، پوشش مقاوم، از لحاظ ابعادی پایدار و عایق الکتریسیته‌ی مناسبی می‌باشد که در جدول ۲ و ۳ به مشخصات فیزیکی و مکانیکی پت اشاره شده است. از جمله مشخصه‌های بارز پت می‌توان به مقاومت در برابر آب، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خردشدگی (بر خلاف شیشه)، اقتصادی و نیز قابل بازیافت بودن اشاره کرد.

مطابق شکل ۲ قطعات مسلح کننده استفاده شده در این آزمایش دارای ابعاد ۱*۱ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۰۲ میلی‌متر است و این قطعات از بطری‌های ضایعاتی پت به دست آمده است.

شکل ۲- تصویری از مسلح‌کننده‌ها (پت) مورد استفاده

جدول ۲- مشخصات فیزیکی پت

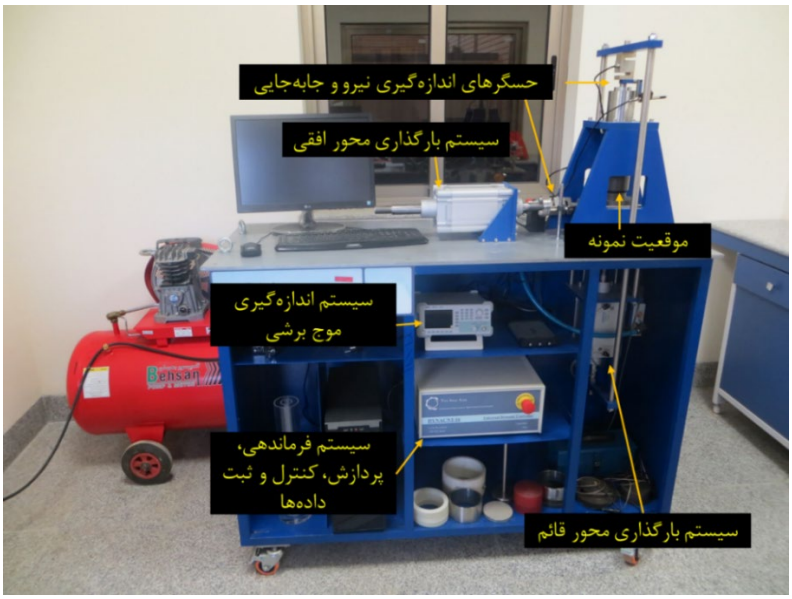
پارامتر	کد آزمایش ASTM	واحد	مقدار
چگالی	D792	lbs/cu in3	۰/۰۴۹۹
جذب آب	D570	%	۰/۱

جدول ۳- مشخصات مکانیکی پت

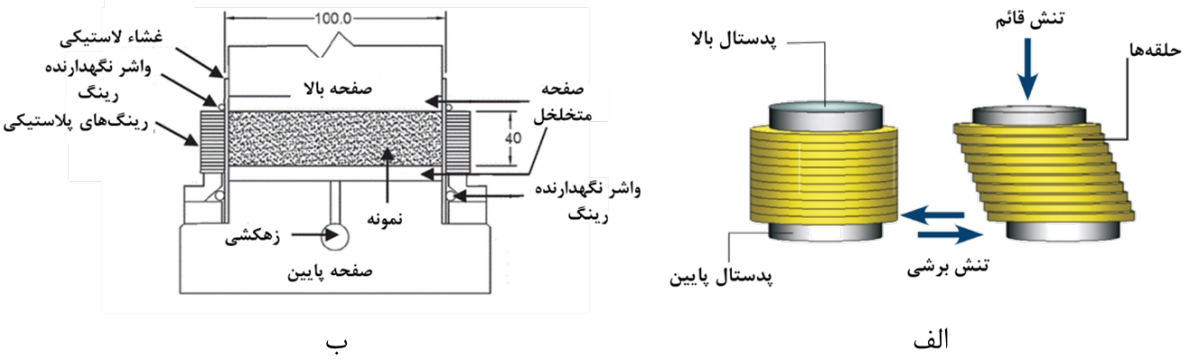
پارامتر	کد آزمایش ASTM	واحد	مقدار
Gs	D792	-	۱/۳۸
مقاومت کششی در هنگام گسیختگی	D638	Psi	۱۱۵۰۰
مدول کششی	D638	Psi	۱۰۵×۴
تغیر طول در هنگام-گسیختگی	D638	%	۷۰
مقاومت خمشی	D790	Psi	۱۵۰۰۰
مدول خمشی	D790	Psi	۱۰۵×۴
استحکام ضربه‌ی ایزوتوپ	D259	ft-lbs/in	۰/۷
سختی راک ول	D785	-	R117
ضریب زاویه‌ی اصطکاک	-	Static-dynamic	۰/۰-۱۹/۲۵

۲-۳- روش انجام و برنامه آزمایش‌ها

در این مطالعه به منظور بررسی اثر مسلح‌کننده‌ها بر پارامترهای دینامیکی از دستگاه برش ساده دینامیکی (به ابعاد نمونه، ارتفاع ۴ و قطر ۱۰ سانتی‌متری) استفاده شده است. این دستگاه شامل دو جک پنوماتیک افقی و قائم است که با فشار باد کنترل شده و به ترتیب به پدستال‌های افقی و قائم متصل بوده و وظیفه اعمال بار افقی و قائم را دارند. همچنین دستگاه شامل دو لودسل افقی و قائم جهت اندازه‌گیری نیروی افقی و قائم، سه سنسور اندازه‌گیری جابجایی (LVDT) شامل دو عدد سنسور با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و کورس ۲۰ میلی‌متر جهت کنترل تغییر شکل‌های دینامیکی افقی و قائم و یک عدد سنسور با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و کورس ۱۰۰ میلی‌متر جهت کنترل تغییرشکل‌های افقی استاتیکی، سیستم بندرالمنت جهت اندازه‌گیری سرعت موج برشی و دیتالاگر جهت ثبت و کنترل داده‌ها می‌باشد. شکل کلی دستگاه مطابق شکل ۳ می‌باشد. ظرفیت هر دو لودسل ۵۰۰ کیلوگرم بوده که به پدستال‌های بالا و پایین مطابق شکل متصل می‌باشند، لودسل پدستال بالا جهت کنترل سربار و لودسل پدستال افقی جهت کنترل بارهای استاتیکی و دینامیکی با فرکانس‌های مختلف در بازه ۰/۰۱ الی ۵ هرتز و در محدوده کرنش‌های برشی ۰/۰۱ الی ۴ درصد می‌باشد. نمونه‌های خاک در داخل غشاهای لاستیکی در بین رینگ‌های ساخته شده از جنس تفلون قرار می‌گیرد و با اعمال بار افقی به صفحه پایین در نمونه کرنش‌های برشی ایجاد می‌گردد. همچنین در هر دو محور سنسورهای کرنش‌سنج با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر برای ثبت داده‌ها تعبیه شده است. شکل ۴ شماتیک عملکرد دستگاه برش ساده دینامیکی و موقعیت نمونه در داخل دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- دستگاه برش حلقه‌ای ساده دینامیکی



شکل ۴- الف) شمایی از عملکرد دستگاه برش ساده ب) جزئیات جعبه برش و محل قرارگیری نمونه

در ادامه نمونه‌های آماده شده در درصد تراکم ۳۰ درصد با ابعاد گفته شده در داخل رینگ‌های این دستگاه قرار گرفته و پس از اعمال بار قائم، نیروی برشی به صورت کرنش کنترل به نمونه‌ها وارد شده است. آزمایشات در محدوده‌ی بارهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده و در هر سربار کرنش‌های برشی ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد به نمونه‌ها اعمال شده است.

در مجموع ۱۰۸ تست برش ساده دینامیکی بر روی نمونه‌های خاک بهسازی نشده و بهسازی شده با پت به صورت کرنش کنترل در محدوده فرکانسی ۰/۱ هرتز و در ۱۵ سیکل انجام شده است. نتایج

آزمایش‌ها به صورت لوپ‌های هیسترزیس استخراج شده و سیکل دهم به عنوان ملاک آزمایش قرار گرفته و برای محاسبه میزان مدول برشی و میرایی مورد استفاده قرار گفته است. در جدول ۴ مشخصات آزمایشات صورت گرفته بر روی نمونه‌ها آورده شده است.

در این جدول پارامتر اول حرف C نشان‌دهنده آزمایش سیکلیک، در پارامتر دوم حرف U به معنی untreated یا بهسازی نشده و حرف T به معنی treated یا بهسازی شده است. همانطور که گفته شد هر نمونه در ۹ دامنه مورد آزمایش واقع شده است که برای اختصار در جدول کدهای آزمایش هر ۹ آزمون در یک گروه آزمایش قرار گرفته و برای ایجاد کد مخصوص هر آزمایش عدد دامنه را پس از یک خط تیره به انتهای کد گروه آن اضافه می‌نماییم.

جدول ۴- برنامه آزمایش‌ها

ردیف	کد گروه آزمایش	درصد اختلاط وزنی پت	مقدار سربار (کیلوپاسکال)	دامنه (میلی‌متر)
1-9	C-U-0-30-100	0	100	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
10-18	C-U-0-30-200	0	200	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
19-27	C-U-0-30-300	0	300	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
28-36	C-T-0/5-30-100	0/5	100	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
37-45	C-T-0/5-30-200	0/5	200	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
46-54	C-T-0/5-30-300	0/5	300	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
55-63	C-T-1-30-100	1	100	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
64-72	C-T-1-30-200	1	200	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
73-81	C-T-1-30-300	1	300	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
82-90	C-T-2-30-100	2	100	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
91-99	C-T-2-30-200	2	200	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4
100-108	C-T-2-30-300	2	300	0/01, 0/02, 0/05, 0/1, 0/5, 1, 2, 3, 4

۲-۴- آزمایشات بندرالمنت

در آزمایش‌های سیکلیک مقدار مدول برشی حداکثر در کرنش‌های پایین به دست می‌آید، اما برای ارزیابی داده‌های دینامیکی حاصل از آزمایش‌های سیکلیک نیازمند مقدار واقعی مدول برشی حداکثر است که این مقدار در کرنش‌های بسیار پایین به دست می‌آید و با توجه به دقت پایین آزمایش‌های سیکلیک در کرنش‌های پایین نیازمند ابزار مورد اعتماد دیگری برای پیدا کردن مقدار مدول برشی حداکثر است. برای این کار از سرعت موج برشی (V_s) که رابطه‌ی مستقیمی با مقدار مدول برشی حداکثر دارد، استفاده شده است. با ارسال موج به درون نمونه و دریافت آن توسط پیزوهای نصب شده روی پدستال-های مخصوص آزمایش بندرالمنت، مقدار سرعت موج برشی محاسبه شده است. بدین ترتیب همانند آزمایش سیکلیک نمونه تحت اثر سربار مورد نظر قرار گرفته و در این حین تک موج سینوسی در ۴ مرحله و با ۴ فرکانس ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز مطابق شکل ۵ از پیزوی بالا وارد نمونه شده و از پایین نمونه توسط پیزوی دوم دریافت گردیده است. سپس با استفاده از ارتفاع نمونه و اختلاف زمانی بین رسیدن موج از پیزوی اول به پیزوی دوم سرعت موج برشی محاسبه گردید. این آزمایش‌ها در ۴ فرکانس و تحت ۳ سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ انجام شده است. همچنین برای محاسبه میزان مدول برشی ماکزیمم از رابطه ۱ استفاده گردید.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \qquad (۱)$$

پارامتر ρ در این رابطه معرف میزان چگالی نمونه خاک می‌باشد و در هر آزمایش با توجه به وزن نمونه و ارتفاع آن (بر اساس نشست نمونه بعد اعمال تنش قائم) محاسبه شده است.

شکل ۵- بندرالمنت و پیزوهای نصب شده بر روی آن

جدول ۵ برنامه آزمایش‌ها بندرالمنت در این مطالعه را نشان می‌دهد. در این جدول عدد انتهایی کد هر آزمایش نشان‌دهنده مقدار فرکانس آزمایش است.

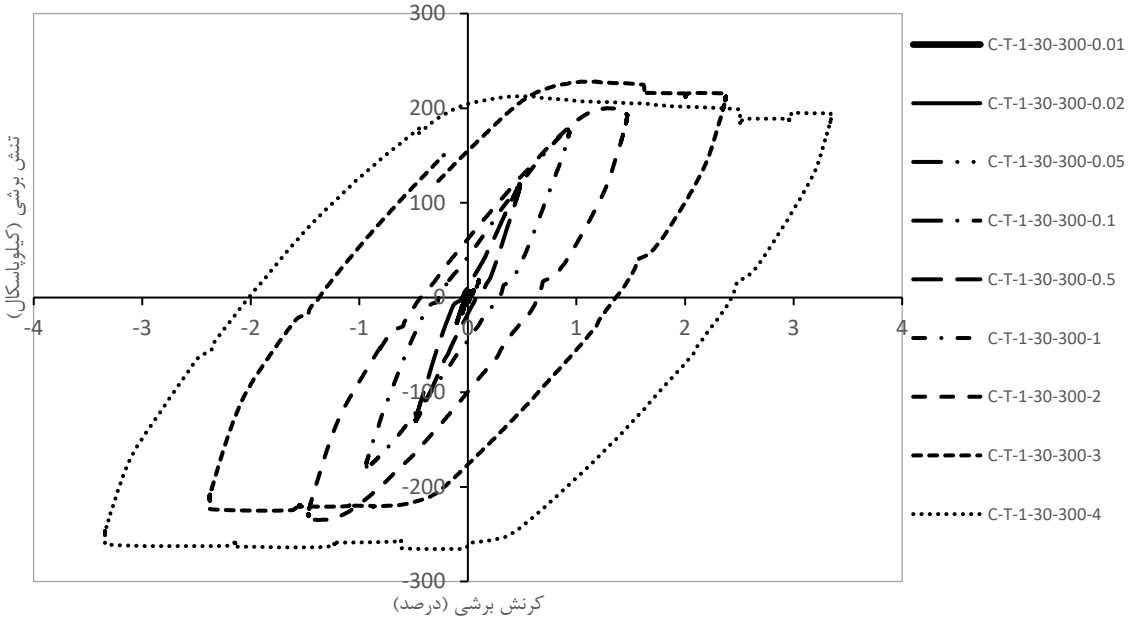
جدول ۵- برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده با بندرالمنت

ردیف	کد گروه آزمایش	درصد اختلاط وزنی پت	مقدار سربار (کیلوپاسکال)	فرکانس (کیلوهرتز)
1-4	C-U-0-30-100	0	100	0/5, 1, 2, 3, 4
5-8	C-U-0-30-200	0	200	0/5, 1, 2, 3, 4
9-12	C-U-0-30-300	0	300	0/5, 1, 2, 3, 4
13-16	C-T-0/5-30-100	0/5	100	0/5, 1, 2, 3, 4
17-20	C-T-0/5-30-200	0/5	200	0/5, 1, 2, 3, 4
21-24	C-T-0/5-30-300	0/5	300	0/5, 1, 2, 3, 4
25-28	C-T-1-30-100	1	100	0/5, 1, 2, 3, 4
29-33	C-T-1-30-200	1	200	0/5, 1, 2, 3, 4
34-37	C-T-1-30-300	1	300	0/5, 1, 2, 3, 4
38-41	C-T-2-30-100	2	100	0/5, 1, 2, 3, 4
41-45	C-T-2-30-200	2	200	0/5, 1, 2, 3, 4
45-48	C-T-2-30-300	2	300	0/5, 1, 2, 3, 4

۳- بحث و تفسیر نتایج

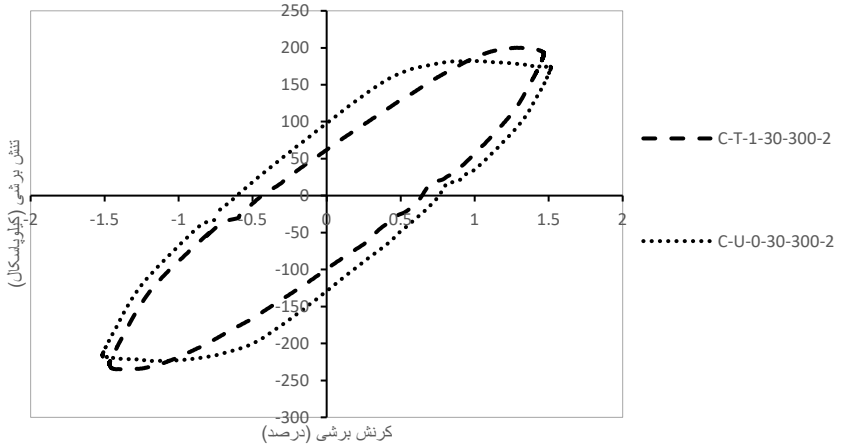
۳-۱- نتایج آزمایش برش ساده سیکلی

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سختی دینامیکی بوسیله کرنش سیکلی، تخلخل، تنش اصلی موثر، ضریب تحکیم یافتگی و تعداد سیکل‌های بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌گیرد[۱۷]. به دلیل طبیعت غیرخطی خاک‌ها، پاسخ دینامیکی این مواد همواره بصورت لوپ‌های تنش-کرنش برشی یا لوپ‌های هیسترزیس ظاهر می‌شود که با بررسی این لوپ‌ها می‌توان پارامترهای دینامیکیِ نسبت میرایی و مدول برشی که از جمله پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای معادل خطی (متداول‌ترین نوع تحلیل پاسخ لرزه‌ای مورد استفاده) است را ارزیابی نمود. در واقع مدول برشی سختی خاک را توصیف می‌کند در حالی که میرایی نشان‌دهنده میزان اتلاف انرژی خاک در حین بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد. به طور کلی مطابق شکل ۶ سختی برشی مربوط به شیب حلقه‌های هیسترزیس رسم شده و میرایی به مساحت حلقه‌های رسم شده بستگی دارد[۱۸]. همانطور که مشخص است، با افزایش کرنش گسیختگی، نمودارها به افق نزدیکتر و سطح داخلی آنها افزایش یافته است، که این نشان دهنده کاهش مدول برشی و افزایش میرایی با افزایش کرنش گسیختگی است.



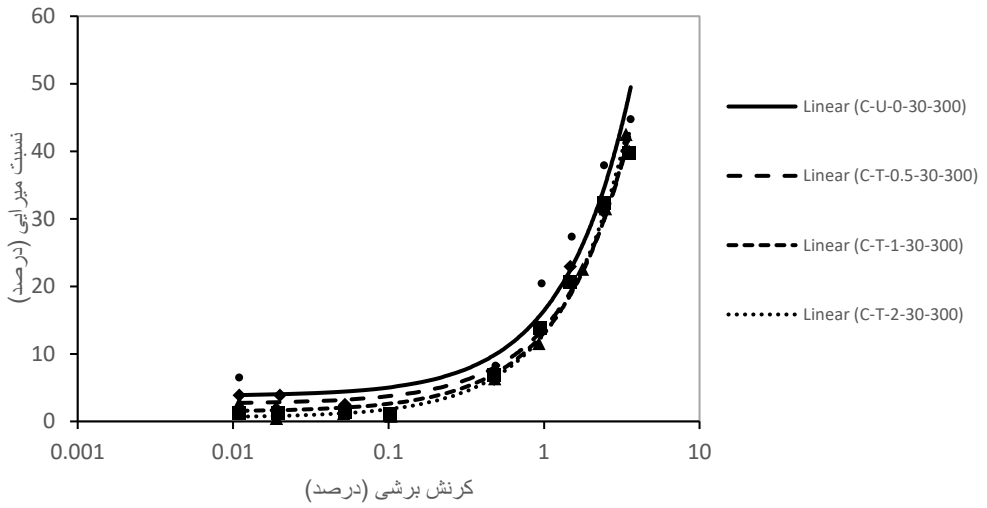
شکل ۶– لوپ‌های تنش کرنش (هیسترزیس) سری آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بهسازی شده با ۱٪ پت و با تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال

در شکل ۷ مقایسه‌ای بین لوپ‌های دو نمونه با شرایط آزمایش مشابه نشان داده شده که یکی از نمونه‌ها خاک بهسازی نشده و دیگری نمونه بهسازی شده با ۱٪ پت می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود عملیات بهسازی با پت بر حلقه‌های هیسترزیس تاثیرگذار است هرچند این تاثیر خیلی ملموس نبوده ولی به طور کلی نشان دهنده افزایش جزئی شیب و کاهش سطح مقطع بوده که نشان دهنده تاثیر بهسازی بر پارامترهای دینامیکی خاک است، لذا جهت ارزیابی میزان تاثیر بهسازی بر نسبت میرایی و مدول برشی مقادیر محاسباتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد.



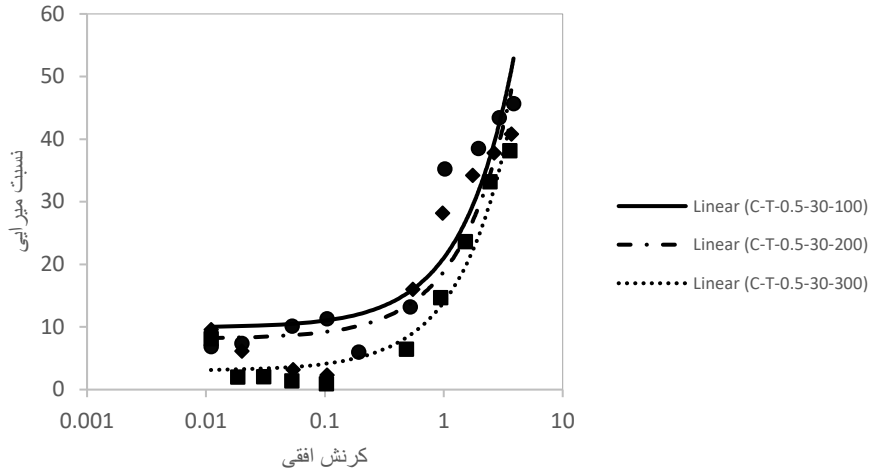
شکل ۷– مقایسه بین لوپ‌های تنش کرنش خاک بهسازی نشده با خاک بهسازی شده با ۱ درصد پت در تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال

نسبت میرایی رابطه مستقیمی با میزان اتلاف انرژی در بارگذاری دینامیکی دارد. هر مقدار حرکت ذرات خاک و لغزیدن آن‌ها بر روی یکدیگر بیشتر باشد باعث افزایش میزان اصطکاک و به دنبال آن افزایش میزان میرایی نمونه‌ها می‌شود. شکل ۸ تغییرات نسبت میرایی را بر حسب نسبت کرنش برشی در تنش سربار یکسان در حالت های معمولی و بهسازی نشده خاک را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار به طور کلی بهسازی خاک به دلیل ایجاد انسداد میان ذرات خاک ماسه‌ای باعث کاهش نسبت میرایی شده است. پیوندی که قطعات پت با زوایای مختلف درون خاک پراکنده شده‌اند مانع حرکت ذرات و ایجاد اصطکاک و اتلاف انرژی شده است. به همین دلیل مقدار میرایی در نمونه‌های بهسازی شده در کرنش‌های مختلف نسبت به نمونه‌های معمولی خاک ماسه‌ای کاهش یافته است.



شکل ۸– تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی در تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال در حالت بهسازی شده (سه مقدار مختلف اختلاط وزنی پت) و بهسازی نشده

اثر سربار بر نسبت میرایی نیز قابل بررسی می‌باشد همانطور که در نمودار شکل ۹ دیده می‌شود افزایش سربار اثر بسزایی در کاهش نسبت میرایی در نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده دارد که البته با وجود الیاف به عنوان المان تسلیح کننده اثر سربار نیز بیشتر خواهد شد چراکه اتصال و درگیری ذرات خاک با الیاف افزایش خواهد یافت که این خود نشان دهنده افزایش اثر تسلیح در میرایی امواج با افزایش عمق می باشد.



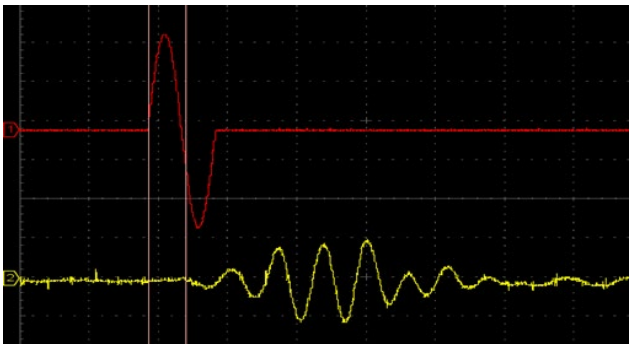
شکل ۹– اثر سربار نسبت به میرایی

۲-۳- نتایج آزمایش بندرالمنت

همانطور که قبلا گفته شد این دستگاه شامل یک سیستم بندرالمنت می‌باشد که برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی از آن استفاده می‌شود.

برای این کار ۲ پدستال مجزا تعبیه شده که پیزوهایی روی این پدستال‌ها نصب شده و یک موج برشی از یک پدستال ارسال و از پدستال دیگر دریافت می‌گردد. در این پژوهش آزمایش بندرالمنت در ۴ فرکانس ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز انجام شده است. اما به این دلیل که دستگاه بندر المنت بیشترین دقت خود را در فرکانس ۱ کیلوهرتز داراست فقط داده های به دست آمده در این فرکانس ملاک عمل قرار گرفته و محاسبات مربوط به مدول برشی حداکثر در این فرکانس انجام می‌گیرد.

شکل ۱۰ نتیجه یک آزمایش بندر المنت بر روی نمونه کد C-T-1-30-300-1 می‌باشد. نمودار موج بالایی نشان دهنده موج ارسالی از پیزومتر اول و نمودار موج پایینی نشان‌دهنده موج دریافتی توسط پیزومتر دوم است.



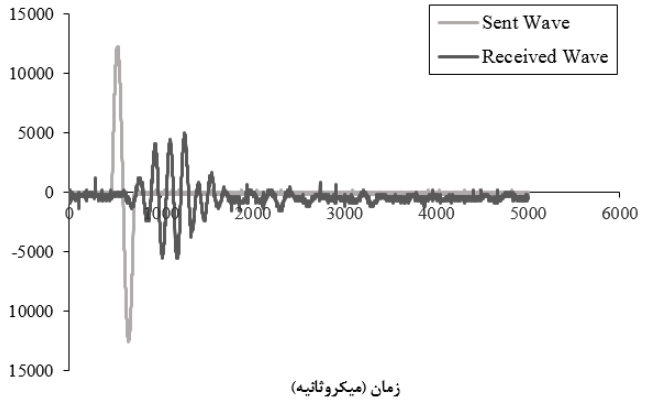
شکل ۱۰- نتایج آزمایش بندرالمنت نمونه C-T-1-30-300-1

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید ۲ خط راهنمای عمودی رسم شده که خط اول نشان‌دهنده زمان ارسال موج توسط پیزومتر اول و خط دوم زمان اولین تحریک پیزومتر دوم یا دریافت موج می‌باشد. با محاسبه این اختلاف زمانی و با داشتن فاصله ۲ پیزومتر از هم سرعت موج برشی محاسبه می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار مدول برشی حداکثر از فرمول $G_{max} = \rho V_s^2$ نیازمند محاسبه وزن مخصوص نسبی همه نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده است. جدول ۶ مقدار وزن مخصوص محاسبه شده نمونه‌های بهسازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقادیر چگالی نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده در درصد تراکم ۳۰ درصد

ردیف	درصد اختلاط وزنی پت	چگالی خشک حداقل	چگالی خشک حداکثر	چگالی نسبی (۳۰ درصد)
۱	۰	۱/۳۲۷۵	۱/۵۹۵۳	۱/۳۹۴۳
۲	۰/۵	۱/۳۱۹۹	۱/۵۹۱۹	۱/۳۸۷۵
۳	۱	۱/۳۰۹۶	۱/۵۸۲	۱/۳۷۵۰
۴	۲	۱/۲۹۶۶	۱/۵۶۷	۱/۳۶۳۷

با توجه به حساسیت بالای نتایج این آزمایش و محاسبه مدول برشی حداکثر، برای انتخاب دقیق نقطه‌های زمانی با استخراج نتایج آزمایش و رسم نمودار مربوطه طبق شکل ۱۱، به طور دقیق نقطه-های زمانی انتخاب شده است.



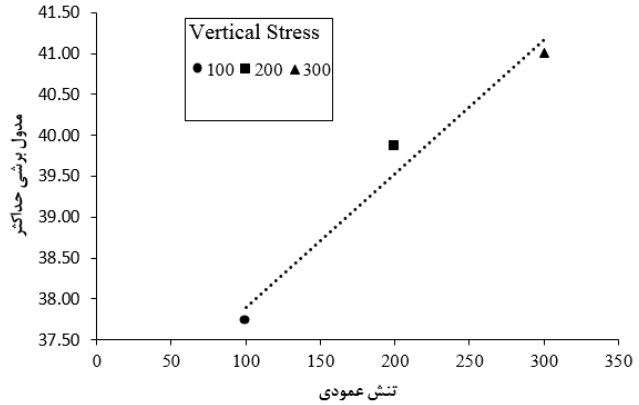
شکل ۱۱- نتایج آزمایش بندرالمنت مربوط به نمونه C-T-1-30-300-1

با توجه به جدول ۷ و محاسبه اختلاف زمانی و با دانستن فاصله دو پیزومتر از هم که برابر با ۱۵/۴۰ میلی‌متر است، سرعت موج برشی و سپس مقدار مدول برشی حداکثر برای نمونه کد C-T-1-30-300-1 محاسبه گردید.

جدول ۷- نتایج سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر مربوط به نمونه کد C-T-1-30-300-1

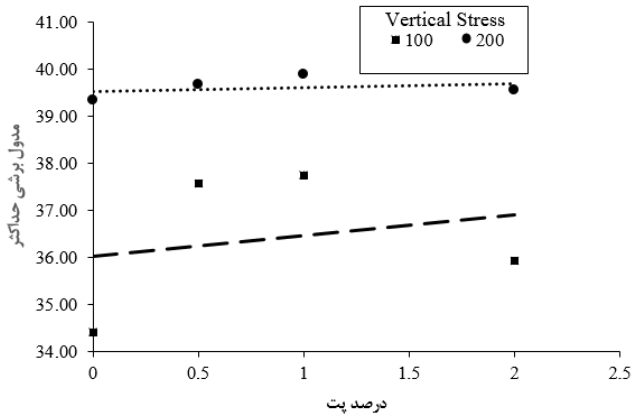
t_1	۴۶۴
t_2	۶۰۵
دلتا t (میکروثانیه)	۲۸/۲
دلتا x (میلی‌متر)	۱۵/۴
سرعت موج برشی (متر/ثانیه)	۵۴۶/۰۹
گاما (گرم بر سانتی-مترمربع)	۱/۳۷۵
گاما x (مگاپاسکال)	۴۱/۰۰

برای بررسی اثر سربار بر مدول برشی حداکثر همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در شرایط یکسان با افزایش سربار، مقدار مدول برشی حداکثر خاک افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش تراکم خاک در سربار های بالاتر می باشد و این خود تایید کننده افزایش اثر بهسازی به روش تسلیح با افزایش عمق است.



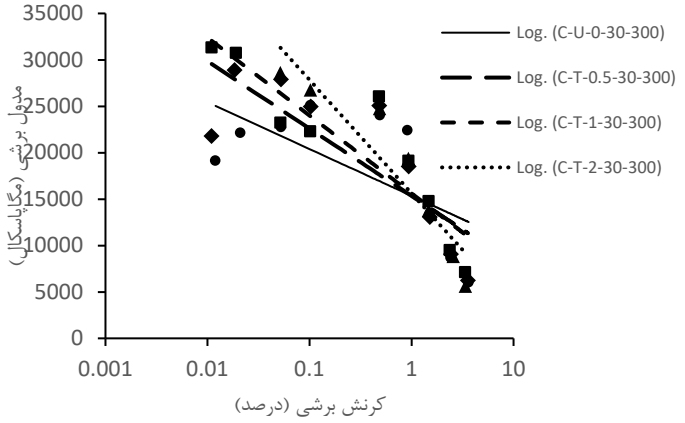
شکل ۱۲- اثر سربار بر مقدار مدول برشی حداکثر نمونه C-T-1-30-300-1

همچنین برای بررسی اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی با رسم نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که حضور خرده‌های پت در خاک باعث افزایش مقدار مدول برشی حداکثر می‌گردد اما با افزایش میزان پت این اثر کمتر می‌گردد و نیز افزایش سربار اثر این افزودنی بر مقدار مدول برشی را کمرنگ‌تر می‌کند.



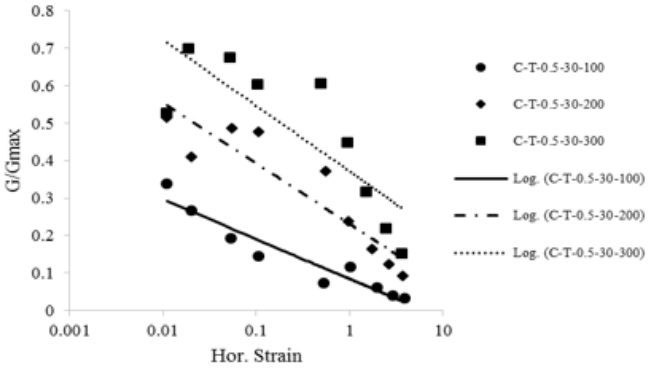
شکل ۱۳- نمودار مقدار مدول برشی حداکثر بر حسب درصد وزنی پت اضافه شده به خاک و بررسی اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی حداکثر

مطابق شکل ۱۴ نمودار مدول برشی بر حسب کرنش برشی را برای نمونه‌های خاک ماسه‌ای در حالت‌های بهسازی شده و معمولی و تنش سربار یکسان ۳۰۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، با افزودن پت به خاک مقدار مدول برشی در درصد کرنش‌های بیشتر از ۱ درصد تغییر محسوسی را تجربه نمی‌کند، اما در کرنش‌های کمتر از ۱ درصد با افزایش درصد پت نسبت مدول برشی به مدول برشی حداکثر نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۴- اثر بهسازی بر مقادیر مدول برشی در کرنش‌های برشی مختلف

همچنین مطابق شکل ۱۵ با بررسی اثر سربار بر نمودار مدول برشی به مدول برشی حداکثر بر حسب کرنش برشی و اثر افزایش سربار بر این مورد مشاهده می‌شود که افزایش سربار باعث افزایش مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در تمامی مقادیر کرنش می‌گردد.



شکل ۱۵- اثر سربار بر مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش‌های برشی مختلف

با استخراج نتایج آزمایش برش ساده سیکلی و آزمایش بندر المنت و مقایسه با نتایج آزمایشات مشابه که در فصل دهم کتاب مهندسی زمین‌لرزه ژئوتکنیکی (۲۰۰۸) [18] تحت عنوان تست‌های آزمایشگاهی بر ویژگی‌های دینامیکی خاک آورده شده است مشاهده گردید که روند کلی آزمایشات و نتایج به دست آمده مطلوب و قابل استناد بوده و نتایج مورد انتظار از این نوع بهسازی خاک، تا حد زیادی حاصل گردیده است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اینکه در مجموع تعداد ۱۵۶ آزمایش سیکلیک و بندرالمنت شامل تعداد ۱۰۸ آزمایش سیکلیک و تعداد ۴۸ آزمایش بندرالمنت انجام شده است، تاثیر مواردی از جمله سربار و بهسازی بر پارامترهای دینامیکی شامل نسبت میرایی، مدول برشی و مدول برشی حداکثر و نرمال شده بررسی گردید. همانطور که در نتایج آزمایشات مشاهده شده است به طور کلی حضور پت در خاک ماسه-ای باعث افزایش مقدار مدول برشی و مدول برشی حداکثر و نیز کاهش نسبت میرایی در نمونه‌ها گردیده است و با توجه به بررسی-های انجام شده این تاثیرات اغلب در کرنش‌های پایین بسیار ملموس‌تر بوده است. بر این اساس به نظر می رسد، استفاده از الیاف خرده پت در بهسازی بنادر استحصالی می تواند در بهبود پارامترهای دینامیکی خاک موثر بوده و با توجه به روش اجرای نسبتا ساده که در حین فرآیند ریزش ماسه امکان پذیر است روشی مقرون به صرفه نیز خواهد بود. در ادامه به طور خلاصه نتایج مستخرج از تحقیق حاضر ارائه شده است:

- اثر سربار در نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده به وضوح قابل مشاهده می‌باشد به طوری که باعث افزایش قابل توجه مدول برشی و نیز کاهش قابل توجه نسبت میرایی گردید، اما در نمونه‌های اصلاح شده این اثر با

درصد پت موجود در نمونه نسبت عکس داشته و با افزایش مقدار پت، اثر سربار مقداری کاهش یافته و این اثر در نمونه‌های بهسازی نشده بیشتر بوده است.

- مقدار افزایش مدول برشی با افزایش سربار در کرنش‌های بالا بین ۴۵ تا ۶۰ درصد و در کرنش‌های پایین بین ۹۵ تا ۱۱۵ درصد بوده است. علاوه بر این مقدار نسبت میرایی با افزایش سربار در کرنش‌های پایین بین ۵۰ تا ۶۵ درصد و در کرنش‌های بالا بین ۵ تا ۱۰ درصد کاهش داشته است.
- همچنین مشاهده گردید که بهسازی و حضور پت در ترکیب خاک باعث افزایش مدول برشی حداکثر خاک گردیده که در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال باعث افزایش مدول برشی به اندازه بین ۵ تا ۱۰ درصد، در سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال باعث افزایش مدول برشی بین ۰/۵ تا ۲ درصد و در سربار ۳۰۰ کیلو تقریبا اثری بر مدول برشی نداشته است.
- بر اساس نتایج آزمایش بندر المنت مشخص گردید افزایش سربار باعث افزایش بین ۵ تا ۱۵ درصدی در مدول برشی حداکثر گردیده است.

کلید واژگان

1- cyclic simple shear test
2- bender element test
3- soil shear modulus
4- maximum shear modulus
5- damping ratio
6- shear wave velocity
7- polyethylene terephthalate (PET)
8- hysteresis loops

۹- فهرست علائم

مدول برشی	G
چگالی ویژه ذرات جامد خاک	G_s
نسبت تخلخل حداکثر	e_{max}
نسبت تخلخل حداقل	e_{min}
حداکثر وزن مخصوص خشک	$(\gamma_d)_{max}$
حداقل وزن مخصوص خشک	$(\gamma_d)_{min}$
ضریب یکنواختی	C_u
ضریب انحناء	Cc
متوسط اندازه‌ی ذرات خاک	D_{50}
طول	L
قطر	d
میزان چگالی نسبی خاک	ρ
زمان	t
سرعت	V
ماسه بد دانه‌بندی شده	SP

مراجع

1. Andersland, O. *Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture*. in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*. 1979.
2. Gray, D.H. and H. Ohashi, *Mechanics of fiber reinforcement in sand.* Journal of geotechnical engineering, 1983. 109(3): p. 335.۳۵۳-
3. Maher, M. and Y. Ho, *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite.* Journal of Geotechnical Engineering, 1994. 120(8): p. 1381-1393.
4. Wang, Y., *Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil.* Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1999. 38(3): p. 533-546.
5. Park, T. and S.A. Tan, *Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber.* Geotextiles and geomembranes, 2005. 23(4): p. 348-361.
6. Tang, C., et al., *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil.* Geotextiles and Geomembranes, 2007. 25(3): p. 194-202.
7. Akbulut, S., S. Arasan, and E. Kalkan, *Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers.* Applied Clay Science, 2007. 38(1-2): p. 23-32.
8. Consoli, N.C., et al., *Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range.* Geotextiles and Geomembranes, 2009. 27(3): p. 196-203.
9. Azhdarpour, A. M., Nikudel, M. R., & Mohammadi, S. D. (2015). *Assessment the Role of Recycled Bottle Fragments and Littered Rubber Fibers on the Sandy Soil Engineering Behaviors.* Journal of Geoscience, 24(95), 135-140.
10. Gooch, J.W., *Encyclopedic dictionary of polymers*. Vol. 1. 2010: Springer Science & Business Media.
11. Przybyłek, M., et al., *Recykling nanokompozytów elastomerowych.* Przetwórstwo tworzyw, 2018. 24.
12. Pradhan, P.K., R.K. Kar, and A. Naik, *Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil.* Geotechnical and Geological Engineering, 2012. 30(1): p. 15-25.
13. Mishra, B. and 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, 2018. 190: p. 95-107.

14. Ojuri, O.O. and A.O. Ozegbe, *Improvement of the Geotechnical Properties of Sandy Soil Using Shredded Polyethylene Terephthalate (PET) Wastes*, in *Geo-Chicago 2016*. 2014. p. 52-60.
15. Botero, E., et al., *Stress–strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET).* Geotextiles and Geomembranes, 2015. 43(4): p. 363-369.
16. Hajiannezhad, Z., et al., *Evaluation of Shear Strength Behaviour of Anzali Port Sand Reinforced with Polyethylene terephthalate (PET).* Journal of Science and Technology, 2019.
17. Alidoust, P., M. Keramati, and N. Shariatmadari, *Laboratory studies on effect of fiber content on dynamic characteristics of municipal solid waste.* Waste Management, 2018. 76: p. 126-137.
18. Towhata, I., *Geotechnical Earthquake Engineering. 2008*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.