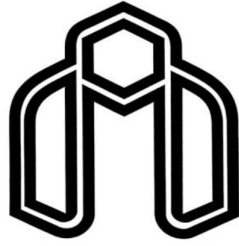


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

# بررسی تاثیر بهسازی با استفاده از خرده‌های ضایعاتی پلی اتیلن ترفتالات (پت)، بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی

نگارنده: محمد توفیق تبریزی

استاد راهنما:

دکتر محسن کرامتی

شهریور ۱۴۰۰

## تقدیم می شود:

به حضرت دوست که حتی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمون مان شد و به بهشتینی رهروان علم و دانش متحرمان نمود.

به پدر و مادر م با بوسه بردستان شان که چراغ علم افروختند و خوشحیی از علم و معرفت را نصیب فرزندان سرزینم نمودند.

به، همسر م بانم که حضورش کرمی بخش و وجودش نشان لطف الهی ست در زندگی من.

## تشکر و قدردانی:

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر محسن کرامتی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب محمد توفیق تبریزی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بررسی تاثیر بهسازی با استفاده از خرده‌های ضایعاتی پلی-اتیلن ترفتالات (پت)، بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای تحت راهنمایی دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ:

امضا دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## 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 و ضعف در خصوصیات دینامیکی 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 هزینه‌ی نسبتاً بالایی در تامین مصالح و نحوه‌ی اجرای آن هستند، در این بین افزودن مواد ضایعاتی به خاک به دلیل وجود مزایای زیست‌محیطی 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 پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی برای بهسازی خاک استفاده شود. در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از دستگاه برش ساده‌ی دینامیکی، آزمایش‌های دینامیکی بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای اخذ شده از بندر استحصالی انزلی در ۲ حالت بدون الیاف و بهسازی شده با خرده‌های پت، در ۲ درصد تراکم متفاوت و 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 بندرالمنت بر روی نمونه‌های مشابه اثر این افزودنی بر سرعت موج برشی و همچنین مقدار مدول برشی حداکثر بررسی شده است و در پایان نیز با انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه‌های مورد آزمایش تاثیر حضور پت بر مقدار خردشدگی و شکستگی دانه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایشات، تحت اثر بهسازی در بهینه‌ترین حالت نمونه، مقدار مدول برشی در کرنش‌های پایین تا ۴۰ درصد و در کرنش‌های بالا تا ۳۰ درصد افزایش، درصد میرایی در کرنش‌های پایین تا ۳۰ درصد و در کرنش‌های بالا تا ۱۵ درصد کاهش و مقدار مدول برشی حداکثر نیز تا ۱۵ درصد افزایش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** برش ساده سیکلی، مدول برشی خاک، میرایی خاک، بندرالمنت، پلی‌اتیلن

ترفتالات(پت)

## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- تعریف مسئله
۳	۲-۱- ضرورت انجام تحقیق
۴	۱-۲-۱- اهمیت بهبود پارامترهای دینامیکی خاک
۵	۲-۲-۱- اهمیت زیست محیطی
۹	۳-۱- اهداف تحقیق
۱۰	۴-۱- روش انجام تحقیق
۱۱	۵-۱- ساختار پایان نامه
۱۳	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۱۴	۱-۲- مبانی نظری
۱۴	۱-۱-۲- پت یا PET (polyethylene terephthalate)
۱۵	۲-۱-۲- پارامترهای دینامیکی خاک
۱۷	۲-۲- روشهای بهسازی خاک
۱۸	۱-۲-۲- عملیات خاکی
۱۹	۲-۲-۲- تراکم
۱۹	۳-۲-۲- تراکم ارتعاشی و ستون شنی

- ۲۰-۲-۲-۴- میخکوبی و انکراژ.....
- ۲۱-۲-۲-۵- اختلاط عمیق و جت گروتینگ.....
- ۲۳-۲-۲-۶- میکروپایل.....
- ۲۴-۲-۲-۷- بهسازی فیزیکی و شیمیایی.....
- ۲۵-۲-۳- بهسازی فیزیکی با خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات.....
- ۲۶-۲-۴- پیشینه تحقیق.....
- ۲۸-۲-۴-۱- استفاده از الیاف در بهسازی.....
- ۳۴-۲-۴-۲- استفاده از الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات (پت) در بهسازی.....
- ۵۳-۲-۴-۳- آزمایش برش ساده سیکلی و بررسی پارامترهای دینامیکی خاک.....
- ۵۷-۲-۴-۴- سرعت موج برشی و روش‌های تعیین آن.....
- ۶۳ فصل ۳: روش تحقیق
- ۶۴-۳-۱- مقدمه.....
- ۶۴-۳-۲- مصالح مورد استفاده.....
- ۶۵-۳-۲-۱- ماسه بندر انزلی.....
- ۶۶-۳-۲-۲- پلی‌اتیلن ترفتالات یا پت (PET).....
- ۶۸-۳-۲-۳- آزمایشات تعیین مشخصات مصالح مصرفی.....
- ۷۲-۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها.....



۳-۴- دستگاه برش ساده دینامیکی ..... ۷۲

۳-۴-۲- محدوده کاربرد دستگاه ..... ۷۵

۳-۵- نحوه انجام آزمایش‌ها ..... ۷۵

فصل ۴: نتایج و تحلیل و بررسی آنها ..... ۸۹

۴-۱- مقدمه ..... ۹۰

۴-۲- نتایج آزمایشات ..... ۹۰

۴-۲-۱- نتایج آزمایشات برش ساده سیکلی ..... ۹۲

۴-۲-۲- نتایج آزمایشات بندر المنت ..... ۱۰۵

۴-۲-۳- نتایج آزمایش دانه‌بندی ..... ۱۱۸

فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها ..... ۱۲۱

۵-۱- مقدمه ..... ۱۲۲

۵-۲- جمع‌بندی ..... ۱۲۲

۵-۳- نوآوری ..... ۱۲۵

۵-۴- پیشنهادها ..... ۱۲۵

مراجع ..... ۱۲۷

پیوست ..... ۱۳۳

دستگاه برش ساده دینامیکی و اجزای آن ..... ۱۳۴

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) بطری‌های ساخته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات ..... ۶
- شکل (۲-۱) آلودگی محیط زیست ناشی از بطری‌های ضایعاتی ..... ۶
- شکل (۳-۱) محل دپوی بطری‌های ضایعاتی ..... ۷
- شکل (۴-۱) مقدار تولید پلاستیک در جهان از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵ (به میلیون تن) [9] ..... ۷
- شکل (۵-۱) مقدار پلاستیک تولید شده در سال ۲۰۱۵ به تفکیک نوع (به میلیون تن) [9] ..... ۸
- شکل (۶-۱) مقدار استفاده از پلاستیک در زمینه‌های مختلف بر حسب درصد [9] ..... ۸
- شکل (۱-۲) فرمول شیمیایی پلی‌اتیلن ترفتالات [3] ..... ۱۵
- شکل (۲-۲) محدوده کاربرد روش‌های مختلف بهسازی خاک [11] ..... ۱۸
- شکل (۳-۲) منحنیهای تنش کرنش برای خاک مسلح‌شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم  
(نسبت اضلاع = ۷۵) [22] ..... ۳۰
- ..... ۳۰
- شکل (۴-۲) منحنیهای تنش کرنش برای خاک مسلح‌شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم  
(نسبت اضلاع = ۱۰۰) [22] ..... ۳۰
- ..... ۳۰
- شکل (۵-۲) منحنیهای تنش کرنش برای خاک مسلح‌شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم  
(نسبت اضلاع = ۱۲۵) [22] ..... ۳۱

- شکل (۶-۲) پاسخ تنش- کرنش برای خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش فشاری محصور نشده
- ۳۳..... [22]
- شکل (۷-۲) مقادیر CBR برای خاک مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف [22]..... ۳۴
- شکل (۸-۲) تغییرات حد روانی، حد خمیری و حد انقباض خاک مسلح شده با ترکیب الیاف پت و خاکستر [23]..... ۳۶
- شکل (۹-۲) مقادیر وزن مخصوص خشک در درصد رطوبت های مختلف همه ی نمونه ها [23]..... ۳۷
- شکل (۱۰-۲) منحنی های تراکم پروکتور اصلاح شده برای مخلوط ماسه - پت - سیمان [24]..... ۳۹
- شکل (۱۱-۲) مخلوط خاک و الیاف [25]..... ۴۰
- شکل (۱۲-۲) منحنی تنش کرنش برای الف) تنش ۶۱/۸۵ کیلو پاسکال، ب) تنش ۱۲۳/۷ کیلو پاسکال و ج) تنش ۱۸۵/۵۶ کیلو پاسکال [25]..... ۴۱
- شکل (۱۳-۲) نمونه ی مسلح، پس از آزمایش [25]..... ۴۲
- شکل (۱۴-۲) تغییرات مدول الاستیسیته برای کرنش ۱۰٪ [25]..... ۴۳
- شکل (۱۵-۲) دواير مور برای خاک غیر مسلح در تغییر شکل های واحد ۱۰٪ [25]..... ۴۴
- شکل (۱۶-۲) دواير مور برای خاک مسلح در مقادیر مختلف الیاف و در تغییر شکل های واحد ۱۰٪ [25]..... ۴۴
- شکل (۱۷-۲) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال ۹/۷۲ نیوتن بر سانتی متر مربع [23]..... ۴۵
- شکل (۱۸-۲) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال ۱۲/۵ نیوتن بر سانتی متر مربع [23]..... ۴۶
- شکل (۱۹-۲) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال ۱۶/۶۷ نیوتن بر سانتی متر مربع [23]..... ۴۶

- شکل (۲-۲۰) نمونه‌های از خرده‌های ضایعاتی پت استفاده‌شده در آزمایش [32]..... ۴۸
- شکل (۲-۲۱) خاک مخلوط‌شده با خرده‌های ضایعاتی پلاستیک [32]..... ۴۸
- شکل (۲-۲۲) نمونه‌های ساخته‌شده [32]..... ۴۸
- شکل (۲-۲۳) نتایج آزمایش فشار محصورنشده در درصدهای مختلف پت در الف) خاک سرخ و ب) خاک ماسه‌ای [32]..... ۴۹
- شکل (۲-۲۴) نمودار نسبت تخلخل بر حسب لوگاریتم تنش برای درصدهای مختلف پت در الف) خاک سرخ و ب) خاک ماسه‌ای [32]..... ۴۹
- شکل (۲-۲۵) نمودارهای تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه‌شده برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح‌شده با درصدهای وزنی مختلف از الف) خرده‌های پت (ب) نوارهای پت (ج) الیاف پت [26]..... ۵۰
- شکل (۲-۲۶) تغییرات مقدار CBR با تغییر درصد افزودن الیاف پت به همراه خاکستر به خاک [23]... ۵۱
- شکل (۲-۲۷) مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های مختلف [23]..... ۵۲
- شکل (۲-۲۸) تغییرات مدول برشی بر اساس تعداد سیکل اعمالی بارگذاری در نمونه‌های مختلف تحت اثر ۲ سربار مختلف [1]..... ۵۴
- شکل (۲-۲۹) حلقه‌های هیستریزس کیسه‌های حاوی خاک تحت اثر بار اعمالی عمودی ۵۰ کیلوپاسکال [27]..... ۵۵
- شکل (۲-۳۰) اثر CSR بر مدول برشی و درصد میرایی خاک [33]..... ۵۶
- شکل (۲-۳۱) اثر درصد تراکم نسبی خاک بر مدول برشی و درصد میرایی [33]..... ۵۶
- شکل (۲-۳۲) اثر تنش تحکیمی وارده بر مدول برشی و درصد میرایی خاک [33]..... ۵۷

- شکل (۲-۳۳) تصویر موج برشی دریافتی تحت اثر پدیده میدان نزدیک [55]..... ۶۰
- شکل (۳-۱) خاک ماسه‌ای مورد استفاده..... ۶۶
- شکل (۳-۲) قطعات خردشده پت استفاده شده برای تسلیح خاک..... ۶۶
- شکل (۳-۳) منحنی دانه بندی ماسه بندر انزلی..... ۶۹
- شکل (۳-۴) نمای کلی دستگاه برش ساده دینامیکی..... ۷۴
- شکل (۴-۱) لوپ های هیستریزیس سری آزمایشات بر روی نمونه های با درصد تراکم ۶۰ درصد، در حالت بهسازی شده با ۰,۵٪ پت تحت تنش سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال..... ۹۳
- شکل (۴-۲) لوپ های هیستریزیس سری آزمایشات بر روی نمونه های با درصد تراکم ۶۰ درصد، در حالت بهسازی نشده تحت تنش سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال..... ۹۳
- شکل (۴-۳) لوپ های هیستریزیس سری آزمایشات بر روی نمونه های با درصد تراکم ۳۰ درصد، در حالت بهسازی شده با ۱٪ پت تحت تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال..... ۹۴
- شکل (۴-۴) لوپ هیستریزیس در نمونه بهسازی نشده و بهسازی شده با ۱ درصد پت..... ۹۵
- شکل (۴-۵) بررسی اثر بهسازی بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی : الف) اثر بهسازی در درصد تراکم ۶۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال ب) اثر بهسازی در درصد تراکم ۳۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال..... ۹۶
- شکل (۴-۶) اثر سربار بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی : الف) اثر سربار در درصد تراکم ۶۰ درصد و نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت ۲ درصد ب) اثر سربار در درصد تراکم ۳۰ درصد و نمونه بهسازی نشده..... ۹۸

- شکل (۷-۴) اثر درصد تراکم بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی : الف) اثر درصد تراکم در نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت ۰/۵ درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلو پاسکال ب) اثر درصد تراکم در نمونه بهسازی نشده تحت سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال ..... ۹۹
- شکل (۸-۴) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-T-2-30-100-0.5 ..... ۱۰۵
- شکل (۹-۴) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-U-0-60-200-2 ..... ۱۰۶
- شکل (۱۰-۴) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-T-1-30-300-1 ..... ۱۰۶
- شکل (۱۱-۴) خروجی گرفته شده از آزمایش بندر المنت مربوط به نمونه کد B-T-1-30-300-1 ..... ۱۰۸
- شکل (۱۲-۴) نمودار مقدار مدول برشی حداکثر بر حسب مقدار فرکانس موج اعمالی برای نمونه B-T-1-30-300 ..... ۱۰۹
- شکل (۱۳-۴) اثر سربار بر مقدار مدول برشی حداکثر : الف) نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت ۰,۵٪ و درصد تراکم ۳۰٪ ب) نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت ۰,۵٪ و درصد تراکم ۶۰٪ ..... ۱۱۱
- شکل (۱۴-۴) نمودار مقدار مدول برشی حداکثر بر حسب درصد وزنی پت اضافه شده به خاک و بررسی اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی حداکثر : الف) بررسی اثر بهسازی و سربار بر مدول برشی حداکثر نمونه در درصد تراکم ۳۰٪ ب) بررسی اثر بهسازی و درصد تراکم بر مدول برشی حداکثر نمونه در سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال ..... ۱۱۳
- شکل (۱۵-۴) اثر بهسازی بر نسبت مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش های برشی مختلف : الف) اثر بهسازی بر نمونه با درصد تراکم ۶۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال ب) اثر بهسازی بر نمونه با درصد تراکم ۳۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال ..... ۱۱۴

شکل (۴-۱۶) اثر سربار بر مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش‌های برشی مختلف : الف)

اثر سربار بر نمونه بهسازی نشده با درصد تراکم ۶۰ درصد ب) اثر سربار بر نمونه بهسازی شده با ۲ درصد

وزنی پت و با درصد تراکم ۳۰ درصد ..... ۱۱۶

شکل (۴-۱۷) اثر درصد تراکم بر مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش‌های برشی مختلف

: الف) اثر درصد تراکم بر نمونه بهسازی شده با درصد وزنی ۰,۵ درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال ب)

اثر درصد تراکم بر نمونه بهسازی شده با درصد وزنی ۲ درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال ..... ۱۱۷

شکل (۴-۱۸) اثر بهسازی بر منحنی دانه بندی خاک ..... ۱۱۹

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) مشخصات الیاف پلی پروپیلن [22]..... ۲۹
- جدول (۲-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۷۵) [22]..... ۳۱
- جدول (۳-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۰۰) [22]..... ۳۲
- جدول (۴-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۲۵) [22]..... ۳۲
- جدول (۵-۲) مشخصات الیاف پت [23]..... ۳۵
- جدول (۶-۲) مشخصات خاکستر [23]..... ۳۵
- جدول (۷-۲) جزئیات نمونه‌های ساخته شده با ترکیب‌های مختلف پت و خاکستر [23]..... ۳۵
- جدول (۸-۲) مشخصات فیزیکی نمونه‌های خاک [23]..... ۳۶
- جدول (۹-۲) نسبت اختلاط مخلوط‌های خاک - پت - سیمان [24]..... ۳۸
- جدول (۱۰-۲) مشخصات الیاف استفاده شده [25]..... ۳۹
- جدول (۱۱-۲) مقادیر فشار همه جانبه [25]..... ۴۰
- جدول (۱۲-۲) مدول الاستیسیته در کرنش‌های پایین [25]..... ۴۳
- جدول (۱۳-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با ترکیب الیاف پت و خاکستر [23]..... ۴۷



- جدول (۲-۱۴) مدول برشی خاک مسلح شده [23]..... ۴۷
- جدول (۲-۱۵) مشخصات خاک استفاده شده در پژوهش [32]..... ۴۷
- جدول (۳-۱) مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده..... ۶۵
- جدول (۳-۲) مشخصات فیزیکی پت ..... ۶۷
- جدول (۳-۳) مشخصات مکانیکی پت ..... ۶۷
- جدول (۳-۴) اطلاعات آزمایش دانه بندی خاک ..... ۶۸
- جدول (۳-۵) تعیین چگالی خشک حداکثر  $(\gamma(d(max))$  و حداقل  $(\gamma(d(min))$  و چگالی خشک در درصد تراکمهای ۳۰ و ۶۰ درصد..... ۷۱
- جدول (۳-۶) برنامه آزمایشات سیکلی انجام شده..... ۷۷
- جدول (۳-۷) برنامه آزمایشات بندر المنت انجام شده..... ۸۵
- جدول (۴-۱) اثر بهسازی بر نسبت میرایی خاک..... ۹۷
- جدول (۴-۲) اثر سربار بر نسبت میرایی خاک..... ۹۸
- جدول (۴-۳) اثر درصد تراکم نسبی بر نسبت میرایی خاک..... ۱۰۰
- جدول (۴-۴) مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی محاسبه شده در نمونه‌های مختلف..... ۱۰۰
- جدول (۴-۵) محاسبات مربوط به سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر مربوط به نمونه کد B-T-1..... ۱۰۸
- جدول (۴-۶) مقادیر مدول برشی حداکثر برای نمونه B-T-1-30-300 با ۴ فرکانس مختلف..... ۱۰۹
- جدول (۴-۷) میزان مدول برشی حداکثر برای تمامی نمونه‌ها با فرکانس ۱ کیلوهرتز..... ۱۱۰

جدول (۸-۴) اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی خاک ..... ۱۱۵

جدول (۹-۴) اثر سربار بر مقدار مدول برشی خاک ..... ۱۱۶

جدول (۱۰-۴) اثر درصد تراکم نسبی بر مقدار مدول برشی خاک ..... ۱۱۸

# فصل ۱ : مقدمه

## ۱-۱- تعریف مسئله

گسترش روزافزون ساخت‌وساز و توسعه‌ی زیرساخت‌های 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. همچنین در دهه‌های اخیر ساخت جزایر مصنوعی در دنیا رو به افزایش بوده و یکی از مسائل غیرقابل چشم پوشی است؛ به خصوص که در ساخت سواحل و بنادر مصنوعی، بارهای دینامیکی بر سازه‌ها و خاک بستر این جزایر و بنادر وارد می‌شود. این بار دینامیکی می‌تواند در اثر عوامل مختلف از جمله زمین‌لرزه، باد و نیروی امواج به زمین وارد شود. لازم به ذکر است که به علت تصادفی بودن امواج محاسبه‌ی نیروی هیدرودینامیکی حاصل از ضربه‌ی امواج بر زمین از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است و دارای نامعینی‌های زیادی می‌باشد. این امواج می‌توانند بر اثر وزش باد، تغییرات تراز آب دریا، تحرکات و لغزش‌های لایه‌های زمین در بستر دریا و... ایجاد گردند. تمامی سازه‌های دریایی تحت اثر اینگونه بارها هستند اما به طور ویژه سازه‌هایی مانند توربین‌های بادی دریایی تحت اثر بارهای دینامیکی باد، موج و نیروی چرخشی سیستم محرک و پره‌های توربین هستند که ممکن است تحت این بارگذاری، فرکانس طبیعی سیستم به فرکانس بارگذاری برسد و باعث ایجاد پدیده رزونانس و در نهایت منجر به آسیب یا تخریب سازه گردد. از این رو آنالیز دینامیکی زمین و پی سازه‌های دریایی و بررسی پارامترهای دینامیکی امری بسیار مهم و اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر این با توجه به محدودیت منابع قرضه در فرآیند ساخت اینگونه جزایر و هزینه‌ی نسبتاً بالا در تامین مصالح مطلوب و الزام استفاده از مصالح و خاک‌های مربوط به نزدیک‌ترین سواحل در این فرآیند، بهبود ویژگی‌های دینامیکی و مهندسی خاک موجود باید مدنظر قرار گیرد. [1,2]

معمولاً بهبود مقاومت و ویژگی‌های مهندسی خاک از راه‌های گوناگون مانند فرآیندهای مکانیکی، افزودن مواد شیمیایی و یا مسلح کردن خاک امکان‌پذیر است. در همین راستا تحقیقات بسیاری در مورد رفتار

خاک مسلح شده با الیاف مختلف طبیعی و مصنوعی انجام شده است. در این پژوهش‌ها تاثیر تسلیح خاک با الیاف بر مقاومت فشاری و برشی خاک، کرنش شکست، شکل پذیری نمونه و بسیاری دیگر از مشخصه‌های خاک بررسی شده است که در فصل دوم به پژوهش‌های انجام شده خواهیم پرداخت.

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 زیست‌محیطی 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 زیست‌محیطی بیانجامد. این بطری‌های پلاستیکی از پلی‌اتیلن ترفتالات ساخته می‌شوند. پلی‌اتیلن ترفتالات که به طور مختصر به صورت پت (PET) عنوان می‌شود از خانواده پلی‌استرها هستند که در ساخت بطری‌های نوشابه، آب معدنی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. [3,4]

در زمینه استفاده از ضایعات پلاستیکی در بهبود رفتار مهندسی مصالح خاکی پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است که هر یک به نوعی از ضایعات پلاستیکی، سرباره‌های صنایع ذوب و ... برای بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک استفاده نموده‌اند. [5]

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

ضرورت انجام این پژوهش از ۲ منظر بررسی می‌شود که بخش اول مربوط به بهبود پارامترهای دینامیکی و بخش دوم در مورد مزیت‌های زیست‌محیطی این پژوهش می‌باشد که در ادامه در مورد آن‌ها بحث خواهد شد.

## ۱-۲-۱- اهمیت بهبود پارامترهای دینامیکی خاک

همانطور که می‌دانیم یکی از حقایقی که بشر به آن دست یافته این است که بیشتر خسارت ناشی از زلزله تحت تاثیر مشخصات یا پارامترهای دینامیکی خاک می‌باشد، علاوه بر این بسیاری از مسائل در مهندسی عمران نیازمند دانشی در مورد پارامترهایی از خاک است که تحت بار اعمالی ناشی از زلزله قرار می‌گیرند. این مسائل شامل ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها، پاسخ پی ماشین‌آلات به بارگذاری سیکلی، اندرکنش خاک-سازه در طول اعمال موج‌های تنش ناشی از زلزله، مقاومت لرزه‌ای سدها و خاکریزها و ... می‌باشد. [6]

همانطور که گفته شد یکی از مسائل موجود در سواحل و بنادر و همچنین به طور کلی سازه‌های دریایی که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه بوده است تحلیل این نوع سازه‌ها در برابر بارهای وارده است. به دلیل وجود امواج و ضربه‌های ناشی از آن‌ها، آنالیز دینامیکی زمین و سازه‌ها اجتناب ناپذیر است. با توجه به اینکه ساخت جزایر مصنوعی یکی از موضوعات مهم این روزها در دنیا و همچنین ایران است، تحلیل دینامیکی مصالح این جزایر و بنادر که غالباً از نزدیک‌ترین سواحل تهیه می‌گردد، امری اجتناب ناپذیر است.

نیروهای دینامیکی وارده می‌توانند بر اثر زمین لرزه باشند اما این نیروها غالباً هیدرودینامیکی و ناشی از امواج هستند که این امواج می‌توانند بر اثر وزش باد، تغییرات تراز آب دریا، حرکات و لغزش‌های لایه‌های زمین در بستر دریا و ... ایجاد گردند. این امواج مدل‌های طیفی مختلفی دارند و معادلات آن‌ها پیچیده و دارای نامعینی‌هایی است که موضوع بحث این پژوهش نمی‌باشد.

به دلیل ضعف معمول در پارامترها و مشخصات دینامیکی خاک مورد استفاده در ساخت جزایر و بنادر مصنوعی، بهبود این پارامترها امری الزامی است. برای بهسازی خاک و بهبود پارامترهای دینامیکی آن روش‌های مختلفی از جمله عملیات خاکی، انواع روش‌های تراکم، میخ‌کوبی و انکراژ اختلاط عمیق و

جت گروتینگ، میکروپایل، اختلاط افزودنی‌های فیزیکی و شیمیایی و ... وجود دارد که در فصل دوم به آن‌ها اشاره خواهد شد. روش مورد نظر در این پژوهش اختلاط افزودنی پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی است که در بخش بعد به تفصیل به آن پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲-۲- اهمیت زیست محیطی

در چند دهه اخیر بطری‌های ضایعاتی ناشی از مصرف آب معدنی و نوشابه و ...، معضلات زیست‌محیطی فراوانی به وجود آورده است. این بطری‌ها از مواد پلی‌اتیلن ترفتالات (پت) ساخته می‌شوند و سال‌های زیادی طول می‌کشد تا در طبیعت تجزیه شوند. بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک‌ها از راه‌های گوناگون از جمله مسلح کردن آن‌ها با مواد مختلف امکان‌پذیر است اما در این بین مسلح کردن خاک به وسیله‌ی مواد ضایعاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا علاوه بر جنبه‌ی اقتصادی، باعث کاهش مشکلات زیست‌محیطی نیز می‌شود [7].

پلاستیک به خاطر ویژگی‌هایی نظیر قیمت پایین، وزن کم، خواص مکانیکی و حرارتی مناسب و قابلیت تولید آسان، به یکی از بخش‌های جدایی‌ناپذیر جوامع بشری امروز تبدیل شده است. در چند دهه‌ی اخیر، استفاده‌ی بدون محدودیت پلاستیک در زمینه‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت بسته‌بندی و حمل‌ونقل، جمع‌آوری و آلودگی آن‌ها به یک مسئله‌ی جدی تبدیل شده است. تجزیه‌ی پلاستیک حدود ۱۰۰۰ سال به طول می‌انجامد. نه تنها مشکل دفع اینگونه زباله‌ها در حال افزایش است بلکه با سوختن پلاستیک CO<sub>2</sub> و دی‌اکسین آزاد می‌شود که باعث ایجاد آلودگی می‌گردد. [8]

در شکل‌های ۱-۱، ۲-۱ و ۳-۱ نمونه‌ای از انواع بطری‌ها، محل دیپوی آن‌ها و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل (۱-۱) بطری های ساخته شده از پلی اتیلن ترفتالات



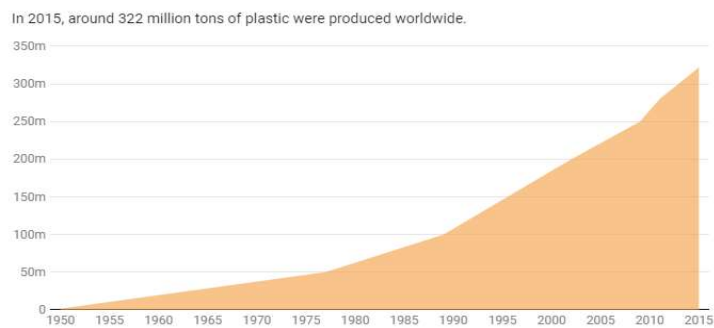
شکل (۲-۱) آلودگی محیط زیست ناشی از بطری های ضایعاتی





شکل (۳-۱) محل دپوی بطری‌های ضایعاتی

طبق آخرین بررسی‌های انجام شده تولید پلاستیک در سطح جهان رو به افزایش است که در نمودار زیر مشهود می‌باشد. [9]



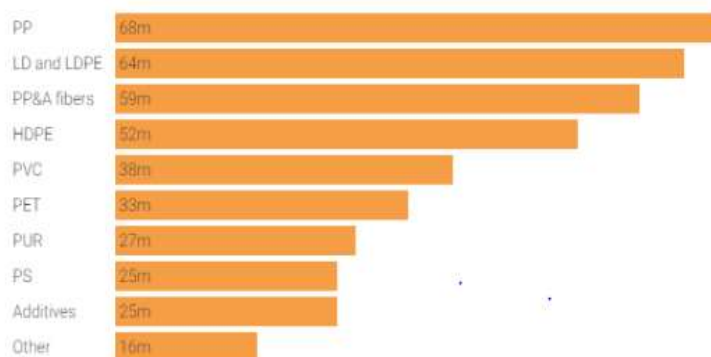
شکل (۴-۱) مقدار تولید پلاستیک در جهان از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵ (به میلیون تن) [9]

همانطور که مشاهده می شود مقدار تولید پلاستیک در سال ۲۰۱۵ به ۳۲۲ میلیون تن رسیده است.

همچنین در سال ۲۰۱۶ این عدد به ۳۳۵ میلیون تن رسیده است. [10]

کلمه "پلاستیک" شامل انواع مختلفی از پلیمرها است که در شکل زیر مقدار تولید این مواد پلاستیکی

در سال ۲۰۱۵ به تفکیک نوع، آورده شده است. [9]

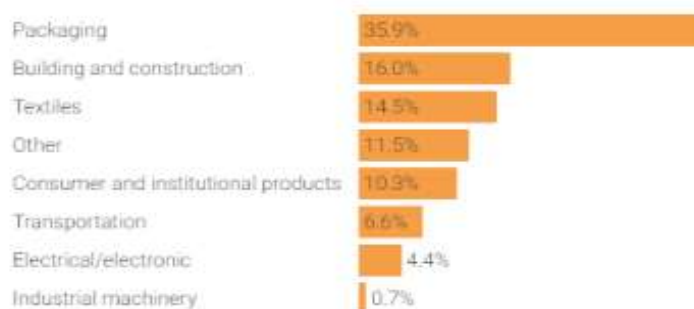


شکل (۵-۱) مقدار پلاستیک تولید شده در سال ۲۰۱۵ به تفکیک نوع (به میلیون تن) [9]

همانطور که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود بیش از ۱۰٪ پلاستیک تولید شده از نوع پلی اتیلن ترفتالات

می باشد و همانگونه که در شکل ۶-۱ مشاهده می شود بیشتر از ۳۰٪ کاربرد این پلاستیک ها در صنعت

بسته بندی می باشد که این گروه بیشترین پسماند را ایجاد می کند.



شکل (۶-۱) مقدار استفاده از پلاستیک در زمینه های مختلف بر حسب درصد [9]

بنابر نمودارها و اطلاعات بالا موضوع استفاده‌ی مجدد از مواد ضایعاتی که تولید آن‌ها در حال افزایش است، گزینه‌ی مناسبی برای بهسازی خاک می‌باشد. زیرا علاوه بر بهبود مشخصات مختلف خاک، از آلودگی بیشتر محیط زیست جلوگیری می‌کند.

### ۱-۳- اهداف تحقیق

هدف از این پژوهش ارزیابی اثر بهسازی خاک ماسه‌ای با استفاده از خرده‌های ضایعاتی پت بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای است. برای این منظور نمونه‌های خاک ماسه‌ای بندر استحصالی آنزلی در ۲ حالت بهسازی شده و بهسازی نشده تحت آزمایش‌های مختلفی قرار گرفته‌اند که در این بخش به طور خلاصه به اهداف این آزمایشات اشاره می‌گردد:

- بررسی خصوصیات پت و پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهسازی خاک با استفاده از آن
- انجام مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات خاک مصرفی از جمله آزمایش دانه-بندی، وزن مخصوص حداقل و حداکثر و چگالی ویژه، همچنین خصوصیات افزودنی مورد استفاده (پت)
- انجام آزمایشات برش ساده سیکلی و بررسی پارامترهای دینامیکی مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌های ساخته شده و آزمایش شده در شرایط مختلف
- انجام آزمایشات بندر المنت و بررسی اثر بهسازی بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر نمونه‌ها
- انجام آزمایشات دانه‌بندی بر نمونه‌های آزمایش شده توسط دستگاه برش ساده دینامیکی و بررسی اثر بهسازی بر میزان شکستگی دانه‌های خاک در حین آزمایش

## ۱-۴- روش انجام تحقیق

در این پژوهش با توجه به اینکه دستگاه برش ساده دینامیکی و تجهیزات بندر المنت آن به تازگی ساخته شده بود، مدت زمانی صرف کالیبره دستگاه گردید و همچنین با توجه به PID Controller بودن دستگاه چند ماه صرف به دست آوردن ضرایب PID با استفاده از روش آزمون و خطا و نیز انجام آزمایشات خارج از پژوهش جهت صحت‌سنجی نتایج خروجی دستگاه و اعتبارسنجی تجهیزات بندر المنت گردید. پس از طی روند ذکر شده آزمایشات اولیه جهت شناخت خصوصیات ماسه و افزودنی آن انجام گردید که در قسمت قبل به آن اشاره شد. پس از انجام آزمایشات اولیه، یک‌سری آزمایشات برش ساده سیکلی در حالت کرنش-کنترل در کرنش‌های برشی پایین و بالا بر نمونه‌های بهسازی‌نشده و بهسازی‌شده انجام گردید و مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها در شرایط مختلف محاسبه گردید و با رسم منحنی-های هیستریزیس و نمودارهای تنش-کرنش برشی اثر بهسازی، سربار قائم اعمالی و درصد تراکم نمونه بر پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. پس از این مرحله با استفاده از تجیزات بندر المنت نصب شده روی دستگاه برش ساده دینامیکی، تعدادی آزمایش بندر المنت نیز انجام شد و با استفاده از این تست‌ها مقادیر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر نمونه‌ها در حالت‌های مختلف محاسبه گردید و اثر پارامترهای ذکر شده بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر بررسی گردید. در نهایت نیز با انجام آزمایشات دانه‌بندی بر نمونه‌های آزمایش‌شده تاثیر بهسازی بر میزان شکستگی دانه‌ها بررسی شد.

## ۱-۵- ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشد:

**فصل اول:** در این فصل به ارائه کلیات و تعریف مسئله، ضرورت انجام تحقیق و روش تحقیق پرداخته شده است.

**فصل دوم:** در این فصل به تعریف مبانی نظری این پژوهش و بررسی تاریخچه و ادبیات فنی موجود در بحث بهسازی با استفاده از الیاف مصنوعی و به طور خاص الیاف و خرده‌های پت، همچنین بررسی پارامترهای دینامیکی خاک پرداخته شده است.

**فصل سوم:** در این فصل شرح دستگاه استفاده شده، خصوصیات مصالح مصرفی، نحوه ساخت نمونه‌ها و چگونگی انجام آزمایشات به طور کامل شرح داده شده است.

**فصل چهارم:** در این فصل نتایج آزمایشات انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است.

**فصل پنجم:** در این فصل به جمع‌بندی نتایج تحقیقات انجام گرفته در این پژوهش پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات بیشتر صورت گرفته است.



## فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی

## ۲-۱- مبانی نظری

در ادامه به بررسی مبانی نظری این پژوهش شامل پلی اتیلن ترفتالات (PET) و پارامترهای دینامیکی خاک، پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱-۱- پت یا PET (polyethylene terephthalate)

پلی اتیلن ترفتالات یکی از پلی استرهای آروماتیک می باشد. پت یک رزین پلی استر ترموپلاستیک است که از تغلیظ اتیلن گلیکول و ترفتالیک اسید ساخته می شود. این ماده سختی بالایی دارد، دارای پوشش مقاوم، از لحاظ ابعادی پایدار و عایق الکتریسیته‌ی مناسبی می باشد. [3]

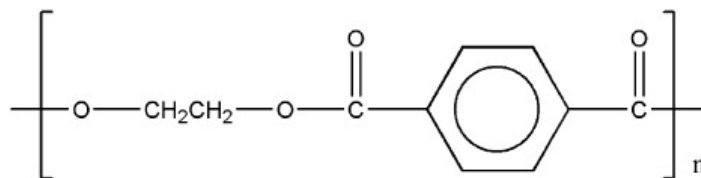
پلی اتیلن ترفتالات پرکاربردترین پلیمر ترموپلاستیک در جهان است. در صنعت نساجی این پلیمر با نام تجاری پلی استر شناخته می شود. پت به طور طبیعی شفاف و پلاستیکی نیمه کریستالی محسوب می گردد. حیطه‌های به کارگیری پت به سه گروه اصلی تقسیم می شوند:

- به عنوان فیبر در تولید پوشاک.
- به عنوان مانع رطوبتی عالی در صنعت بطری سازی و بسته بندی.
- به عنوان پلاستیکی مهندسی که از ترکیب آن با موادی چون فیبر شیشه جهت افزایش استحکام مواد استفاده می شود.

برخی مشخصه‌های بارز پت عبارتند از مقاومت در برابر آب، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خردشدگی (بر خلاف شیشه)، اقتصادی و نیز قابل بازیافت بودن.



فرمول شیمیایی پلی اتیلن ترفتالات به صورت زیر می باشد :



شکل (۱-۲) فرمول شیمیایی پلی اتیلن ترفتالات [3]

پت ابتدا در دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی و در حین تلاشی برای ساخت فیبر نساجی پلیمری، توسط شیمیدانان شرکت DuPont پلیمریزه شد. پت در حقیقت از ادغام اتیلن گلیکول و ترفتالیک اسید به دست می‌آید. [3] حتی بدون افزودنی‌هایی جهت افزایش استحکام آن و با وجود وزن پایین خود از استحکامی فوق‌العاده برخوردار است. این بدان معناست که به عنوان مثال جهت تولید بسته‌های پلاستیکی به فیلم پلاستیکی کمتری نیاز خواهد بود. این نیز به نوبه‌ی خود مصرف سوخت ناشی از جابجایی محموله‌های پت را به شکل مطلوبی تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، اگرچه پت مشتق شده از مواد پتروشیمی است، با این وجود تقریباً ۴۰ درصد از انرژی مصرفی در آن حفظ و پس از بازیافت محصول در دسترس خواهد بود.

## ۲-۱-۲- پارامترهای دینامیکی خاک

یکی از مهم‌ترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک، پیش‌بینی پاسخ زمین و رفتار نهشته‌های خاک تحت اثر بارگذاری‌های دینامیکی به خصوص زلزله است. مدول برشی و نسبت میرایی دو پارامتر دینامیکی مهم خاک هستند که به طرز موثری در پیش‌بینی رفتار خاک تحت اثر بارگذاری‌های دینامیکی مشارکت می‌کنند. برای داشتن یک تحلیل پاسخ دینامیکی معتبر و همچنین مدل‌سازی مناسب رفتار خاک و با

توجه به این امر که رفتار خاک در سطح کرنش‌های مختلف متفاوت است، لازم است تا برآورد صحیحی از این دو پارامتر در سطوح مختلف کرنش داشته باشیم. تا کنون تحقیقات بسیاری در این مورد صورت گرفته است اما بیشتر این تحقیقات بر روی خاک‌های تمیز متمرکز شده است. حال آنکه در طبیعت به ندرت با خاک‌های تمیز روبرو هستیم و خاک‌های طبیعی همواره دارای مقادیر متفاوتی از خاک‌های با دانه‌بندی متفاوت می‌باشند. هدف از این تحقیق به دست آوردن نمودارهای بدون بعد شده مدول برشی و نسبت میرایی برای خاک ماسه‌ای مسلح شده به وسیله‌ی پت در سطوح مختلف کرنش و همچنین محاسبه‌ی سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر می‌باشد.

### • مدول برشی

در علم مواد، مدول برشی (Shear Modulus) یا مدول صلیبیت (Modulus of Rigidity)، بیانگر نسبت تنش برشی به کرنش برشی است. محاسبه‌ی مدول برشی با استفاده از رابطه ۱-۲ زیر صورت می‌گیرد. این پارامتر اغلب با حرف «G» و گاهی اوقات با «S» یا «μ» نمایش داده می‌شود.

رابطه ۱-۲:

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{Fl}{A\Delta x}$$

$\tau_{xy}$ : تنش برشی ( $\tau_{xy}=F/A$ )؛

F: نیروی اعمال شده؛

$\gamma_{xy}$ : کرنش برشی ( $\Delta x/l = \tan\Theta$ )؛

$\Delta x$ : جابجایی عرضی؛

L: طول اولیه

تغییرات ماده در برابر اعمال تنش برشی، به وسیله مدول برشی نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال، نحوه رفتار یک ماده در برابر برش توسط قیچی را می‌توان به وسیله مدول برشی آن پیش‌بینی کرد.

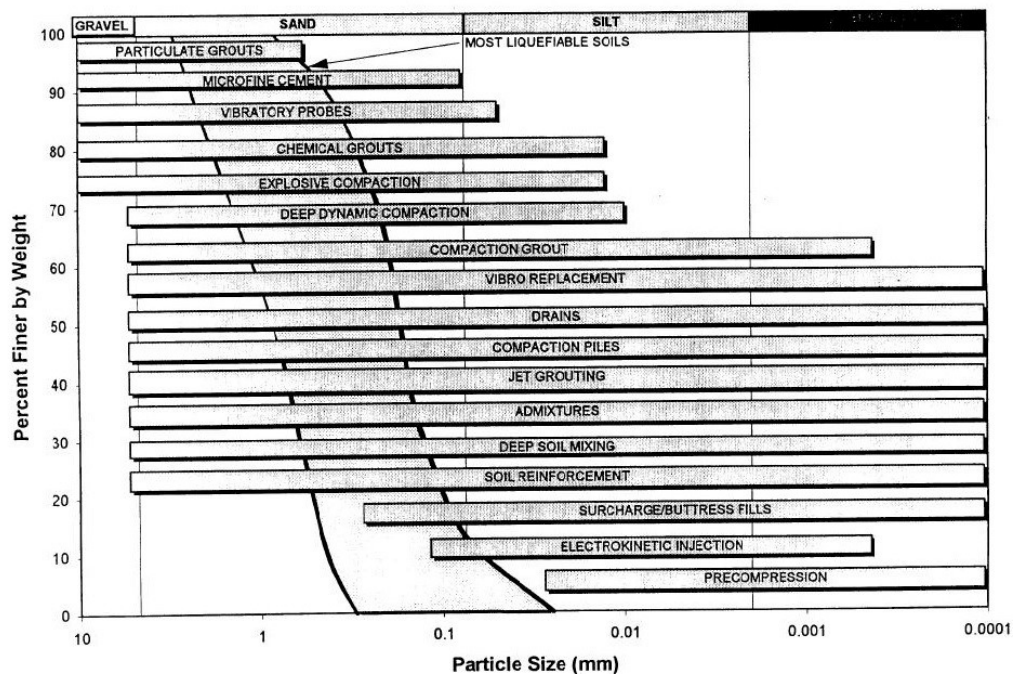
مدول برشی زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که اعمال دو نیروی موازی و مخالف بر دو طرف سطوح یک جسم صلب، منجر به تغییر شکل آن شود. در صورتی که شکل جسم مورد نظر مکعب باشد، پس از اعمال نیروی برشی، به یک متوازی‌السطوح تبدیل خواهد شد. مواد ناهمسانگردی نظیر چوب، کاغذ و اساساً تمام تک‌بلورها، بر اثر اعمال نیرو در جهات مختلف از خود رفتار متفاوتی را بروز می‌دهند. در مواجهه با این مواد باید از تانسور ثابت‌های الاستیک به جای یک مقدار اسکالر استفاده شود.

### • نسبت میرایی

میرایی یا Damping در فیزیک، خاصیتی است که باعث کاهش دامنه‌ی نوسان در سیستم‌های نوسانی به ویژه در نوسانگر هماهنگ می‌شود. به طور کلی عضوی را که انرژی چیزی را مستهلک کند دمپر یا میراگر می‌نامند. این اثر به طور خطی با سرعت نوسانات متناسب است. این قید موجب شکل‌گیری یک معادله دیفرانسیل خطی برای حرکت می‌شود که پاسخ تحلیلی ساده‌ای خواهد داشت. حال پس از تعریف میرایی در تعریف نسبت میرایی یا Damping ratio می‌توانیم بگوییم که نسبت میرایی یا Damping ratio کمیتی بدون بعد در فیزیک است که چگونگی تحلیل یک سیستم نوسانگر را نشان می‌دهد. این کمیت معمولاً با نماد  $\zeta$  (زتا) نمایش داده می‌شود و در بررسی نظریه کنترل کاربرد دارد.

## ۲-۲- روش‌های بهسازی خاک

با شناخت خطرات ناشی از خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌های عمرانی، روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های این نوع خاک‌ها اتخاذ شده است. تمام روش‌های بهسازی اهداف واحدی را دنبال می‌کنند که شامل افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش نشست، افزایش مقاومت برشی و در نهایت افزایش سختی خاک است. در یک طبقه‌بندی کلی می‌توان روش‌های بهسازی را به صورت شکل ۲-۲ طبقه‌بندی نمود:



شکل (۲-۲) محدوده کاربرد روش‌های مختلف بهسازی خاک [11]

## ۲-۲-۱- عملیات خاکی

تمامی عملیات شامل جابجایی و جایگزینی خاک به منظور افزایش مقاومت و ظرفیت باربری و کاهش نشست‌ها عملیات خاکی گفته می‌شود. در شیب‌ها و شیروانی‌ها این عملیات به وسیله‌ی تغییر و اصلاح شکل شیب انجام می‌گیرد. در مواردی که حجم خاک مد نظر جهت بهسازی کم باشد این روش می‌تواند

اقتصادی‌ترین روش باشد. [11]

## ۲-۲-۲- تراکم

از دیگر روش‌های بهسازی خاک‌های مسئله‌دار تراکم است که از طریق اعمال نیرو (دینامیکی و استاتیکی) باعث افزایش دانسیته‌ی خاک و نزدیک شدن دانه‌های آن می‌شود و در نتیجه مقاومت و ظرفیت باربری خاک افزایش پیدا می‌کند و نشست‌ها محدود می‌شوند. [11]

## ۲-۲-۳- تراکم ارتعاشی و ستون شنی

روش تراکم ارتعاشی از حدود سال‌های ۱۹۳۰ در اروپا و ۱۹۷۰ در آمریکا و سایر نقاط جهان جهت اصلاح عمیق خاک‌های دانه‌ای، چسبنده و مخلوط توسط مهندسان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش که ماهیتی فیزیکی - مکانیکی دارد، امروزه توسط پیمانکاران متعددی در سرتاسر جهان به خوبی و با موفقیت اجرا می‌گردد. این روش به حدی در عرصه‌ی مهندسی ژئوتکنیک جا افتاده که علاوه بر اشاره به آن در پژوهش‌های مختلف، در بسیاری از مراجع علمی از آن به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های بهسازی خاک یاد می‌شود.

روش ستون‌های شنی ارتعاشی، تلفیقی از دو روش تراکم ارتعاشی<sup>۱</sup> و جایگزینی ارتعاشی<sup>۲</sup> می‌باشد. در روش تراکم ارتعاشی بدون اضافه کردن مصالح درشت‌دانه سعی بر این است که توده‌ی خاک موجود به کمک ارتعاش، متراکم گردد. از این رو کاربرد این روش به خاک‌های دانه‌ای محدود می‌گردد. چرا که ارتعاش و تراکم حاصل از آن در خاک‌های ریزدانه و یا چسبنده به وقوع نمی‌پیوندد.

از سوی دیگر، در خاک‌های ریزدانه و چسبنده، اضافه شدن و یا جایگزینی مقدار اندکی مصالح درشت - دانه‌ی مناسب، بهبود قابل توجهی را در خواص مکانیکی توده خاک ایجاد می‌نماید. از این رو ترکیب دو

<sup>1</sup> Vibro Compaction

<sup>2</sup> Vibro Replacement

روش فوق به خصوص در مورد خاک‌های لایه‌لایه و یا مخلوط می‌تواند بازدهی عملیات بهسازی خاک را به طور چشمگیری افزایش دهد. [12]

## ۲-۲-۴ - میخ کوبی و انکراژ

میخ کوبی دیواره‌ها یا نیلینگ<sup>۱</sup> به معنای تسلیح برجای توده خاک موجود با نصب میلگردهای فولادی در فواصل نزدیک به هم در یک سطح شیب‌دار و یا در محل گودبرداری به صورت قائم و با اجرای از بالا به پایین<sup>۲</sup> می‌باشد. میلگردها معمولاً داخل گمانه‌هایی در دیواره‌ی خاکی قرار می‌گیرند که به منظور جلوگیری از خوردگی میلگردها و انتقال مناسب‌تر نیروها بین خاک و میلگرد، توسط دوغاب سیمان پر می‌شوند. روش نیلینگ یک مقطع مسلح پایدار ایجاد می‌کند که توانایی نگهداری خاک پشت خود را دارد.

نیلینگ یا میخ کوبی خاک روش جدیدی است که به دلیل اقتصادی بودن و مزایای منحصربه‌فرد خود، به عنوان راه‌حل بسیار مناسبی در موارد مختلف از جمله پایدارسازی شیب‌ها، شیروانی‌ها و ترانشه‌ها، همچنین افزایش ظرفیت باربری و محدود کردن تغییر شکل‌ها با ایجاد حداقل دست‌خوردگی در وضعیت طبیعی زمین کاربردهای فراوانی دارد.

اصول اجرای روش مهارگذاری یا انکراژ<sup>۳</sup> مشابهت‌های فراوانی با روش نیلینگ (میخ کوبی) دارد. تفاوت اصلی در اعمال نیروی پس‌تنیدگی برای المان تسلیح می‌باشد. گام‌های اجرایی مشابه روش میخ کوبی و شامل خاک‌برداری مقطعی، حفاری گمانه‌ها، نصب میلگرد تسلیح، تزریق دوغاب سیمان (در بخشی از طول گمانه)، بتن‌پاشی و نصب صفحه‌ی سرنیل و مهره می‌باشند. پس از گذشت مدت زمان مناسب

1 Nailing

2 Top Down Construction

3 Anchorage

جهت عمل‌آوری دوغاب سیمان، با نصب پایه جک، جک کششی و نیروسنج، نیروی پس‌تنیدگی تا مقدار مورد نظر طراحی به میلگرد تسلیح و دوغاب اطراف آن اعمال می‌شود.

لازم به ذکر است در بعضی از موارد، عملیات حفر چاه وجود نداشته و پروفیل حائل فولادی پس از اتمام عملیات مقطعی خاک‌برداری، حفاری و نصب المان تسلیح در محل مربوطه می‌شود. در نهایت پس از این مرحله عملیات کشش المان تسلیح (اعمال نیروی پس‌تنیدگی) صورت می‌پذیرد. [11]

## ۲-۲-۵- اختلاط عمیق و جت‌گروتینگ

از روش‌های بهسازی خاک که مبتنی بر تزریق مصالح به دورن خاک است که در نهایت ستون‌های خاک سیمانی ایجاد می‌کند روش اختلاط عمیق خاک<sup>۱</sup> است که به اختصار DSM خوانده می‌شود. این روش یکی از کاربردی‌ترین روش‌های بهسازی خاک در جهان محسوب می‌شود که عبارت است از اختلاط خاک با مواد سیمانی و ... که با استفاده از همزن‌هایی در عمق انجام می‌گیرد و منتج به شکل‌گیری ستون‌های خاک سیمان می‌شود.

بطور کلی ستون‌های اختلاط عمیق با اهداف کلی افزایش ظرفیت باربری خاک در فشار و برش، کنترل نشست، مقابله با روان‌گرایی و کاهش نفوذپذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در هر یک از اهداف مذکور مطابق با روابط مربوطه محاسبات صورت می‌گیرد. [12]

روش اختلاط عمیق برای بهسازی محدوده وسیعی از خاک‌های نرم غیرآلی و خاک‌هایی که سایر روش‌های بهسازی در آن‌ها مناسب نیستند کاربرد دارد، البته در مورد خاک‌های آلی نیز می‌توان با در نظر گرفتن تمهیداتی نظیر اضافه کردن ماسه به مخلوط خواص خاک را بهبود بخشید.

<sup>1</sup> Deep Soil Mixing

یکی دیگر از روش‌های نوین و مبتنی بر تزریق روش جت‌گروتینگ است. این روش یکی از شیوه‌های پایدارسازی و افزایش مقاومت و توان باربری خاک به صورت درجا می‌باشد. تکنیک جت‌گروتینگ اولین بار در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. ایده‌ی برش به وسیله‌ی جت آب با فشار بالا در اوایل دهه ۷۰ میلادی برای استفاده در معادن زغال سنگ ایالات متحده و همچنین بریتانیا مطرح شد و پس از آن در اواسط این دهه ژاپنی‌ها (برادران یاماکادو در سال ۱۹۶۵) از این روش نه فقط برای برش و فرسایش خاک بلکه برای تزریق سیمان نیز استفاده کردند.

در روش اجرای جت‌گروتینگ پس از حفاری گمانه تا عمق مورد نظر، دوغاب تزریق به همراه آب و هوای فشرده تحت فشار بسیار زیاد (بین ۲۵۰ تا ۷۰۰ بار) و با سرعت بیش از صد متر بر ثانیه از نازل انتهای میله‌ی حفاری خارج شده و همزمان با دوران میله‌ی حفاری، خاک اطراف محل خروج مخلوط تخریب گشته و با آن آمیخته می‌شود. این عملکرد باعث ایجاد ستونی با مقاومت بالا از جنس خاک سیمانته شده می‌گردد.

در زمان تزریق، فشار زیاد جت تزریق قادر است به داخل خاک دیواره گمانه نفوذ کرده و موجب تغییر ساختار خاک گردد. از ترکیب دوغاب سیمان و خاک، ترکیبی خاک - سیمانی پدید می‌آید که پس از سخت شدن، ستونی مقاوم با مشخصات باربری و ناتراوایی مناسب برای پروژه مورد نظر ایجاد می‌گردد. شعاعی از خاک که تحت تاثیر تزریق جت قرار گرفته، شعاع تاثیر نامیده می‌شود و به عواملی نظیر فشار تزریق، زمان تزریق، مقاومت برشی برجای خاک، اندازه‌ی نازل‌ها و وزن مخصوص دوغاب تزریق بستگی دارد.

جت‌گروتینگ علی‌رغم اینکه به عنوان روشی جدید در زمینه‌ی بهسازی خاک شناخته می‌شود،

کاربردهای بسیار متنوعی دارد که نمونه‌هایی از آن در زیر عنوان شده است. [11]

۱. دوخت به کف (Underpinning)

۲. ترمیم و بازسازی پی‌ها

۳. دیوارهای نگهبان



۴. آببندی گودها و سازه‌های زیر سطح آب زیرزمینی

## ۲-۲-۶ - میکروپایل

دو روش کلی مقابله با خاک‌های مسئله‌دار، یکی استفاده از المان‌های باربر و دیگری اضافه کردن مواد و مصالحی به خاک جهت بهسازی پارامترهای مقاومتی آن می‌باشد. میکروپایل یا ریزشمع روشی است که به نوعی مزایای هر دو روش بالا را در بر می‌گیرد.

لوله‌کوبی یا حفاری و لوله‌گذاری خاک، تزریق و تسلیح، سه مرحله‌ای است که اساس بهسازی خاک به روش استفاده از میکروپایل را تشکیل می‌دهد. میکروپایل ابتدا برای ترمیم پی‌ها و ساختمان‌های موجود به کار گرفته می‌شد. اما با پیشرفت تجهیزات حفاری و تزریق به سرعت ذهن محققین و مهندسان عرصه‌ی ژئوتکنیک را به خود معطوف کرد تا به استفاده بهینه‌تر و کاربردی از این روش دست یابند.

به طور کلی کاربرد میکروپایل‌ها در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش استفاده در بستر پی سازه‌ها و اصلاح و بهسازی برجای خاک می‌باشد. انجام تحقیقات گسترده در مجامع علمی - تخصصی جهان بر روی میکروپایل روز به روز در حال افزایش است. بررسی رفتار استاتیکی، دینامیکی و لرزه‌ای آن‌ها مورد توجه است. در بسیاری از تحقیقات چگونگی رفتار و معیارهای طراحی میکروپایل‌ها در خاک‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین امروزه دامنه‌ی استفاده از میکروپایل گسترش فراوانی یافته است. [13]

## ۲-۲-۷- بهسازی فیزیکی و شیمیایی

در این روش بهسازی خاک به وسیله‌ی اضافه کردن افزودنی‌ها به خاک انجام می‌شود که با توجه به نوع خاک و مواد تشکیل دهنده‌ی خاک نوع افزودنی می‌تواند متفاوت باشد. [13]

### ● تثبیت با سیمان

سیمان به‌طور افزایش‌دهنده‌ای برای تثبیت خاک، به خصوص در احداث شاهراه‌ها و سدهای خاکی به کار گرفته می‌شود. از سیمان می‌توان برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای و رسی استفاده نمود. استفاده از سیمان باعث افزایش حد روانی و نشانه خمیری می‌شود.

### ● تثبیت با آهک

استفاده از آهک جهت تثبیت خاک‌های با شاخص خمیری بزرگ‌تر از ۱۰ توصیه می‌شود. آهک علاوه بر افزایش خصوصیات مقاومتی و کنترل خصوصیات خمیری رس، باعث افزایش مقاومت خاک در برابر عوامل جوی نظیر رطوبت و یخبندان نیز می‌شود.

### ● تثبیت گیاهی

در این روش علاوه بر کاشت درخت در شیب‌ها و شیروانی‌ها برای جلوگیری از فرسایش و لغزش خاک‌ها، می‌توان از پوشش گیاهی نیز استفاده نمود.

### ● تثبیت با قیر

قیر جسمی است هیدروکربوری به رنگ سیاه تا قهوه‌ای تیره که در سولفور کربن کاملاً حل شده و حالت آن با افزایش درجه حرارت از جامد به خمیری و از خمیری به مایع تغییر می‌کند. از مزایای این روش می‌توان به عدم محدودیت زمان تثبیت، ارزان و در دسترس بودن قیر اشاره کرد. کاهش قابل توجه نفوذپذیری از معایب این روش است. استفاده از قیر برای تثبیت در مصالح درشت‌دانه با بخش ریزدانه‌ی

محدود، کاربرد دارد. قیر برای تثبیت خاک‌های شنی، ماسه با دانه‌بندی ضعیف، شن سیلت‌دار و ماسه‌ی سیلت‌دار به کار می‌رود، اما برای تثبیت خاک‌های مرطوب مناسب نیست.

#### ● تثبیت بیولوژیکی

در این روش با استفاده از باکتری اقدام به ساخت بلورهای کربنات، سیلیکات و ... به منظور ساخت محصولات سیمانی‌شده با مقاومت بالا می‌کنند. این فرآیند می‌تواند خاک یا ذرات ریز دیگر (مواد متخلخل) را بدون ازهم‌گسیختگی ساختار اولیه تثبیت کند. این روش دارای کاربردهای فراوانی مانند افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک، بهسازی مقاومت و دوام بتن و ملات، ترمیم ترک‌های ساختمان و ... بوده و از لحاظ سازگاری با محیط زیست نیز مناسب است. از معایب آن می‌توان به پیچیدگی طراحی آن نسبت به سایر روش‌ها اشاره کرد.

### ۲-۳- بهسازی فیزیکی با خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات

بهسازی با خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات (پت) یکی از روش‌های جدید بهسازی فیزیکی است که با توجه به پیشینه تحقیق که در ادامه بحث خواهد شد، مشاهده می‌شود که اثر بهسازی و به ویژه بهسازی با مواد ضایعاتی پلاستیکی بر ویژگی‌های دینامیکی خاک کمتر مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به افزایش تولید پلاستیک در دنیا و افزایش چشمگیر ضایعات و زباله‌های ناشی از آن، در این مطالعه تاثیر پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی که درصد زیادی از تولید پلاستیک را به خود اختصاص می‌دهد بر پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد زیرا علاوه بر بهبود مشخصات مختلف خاک، از آلودگی بیشتر محیط زیست جلوگیری می‌کند.

## ۲-۴- پیشینه تحقیق

در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش ساخت‌وساز برای به کارگیری زمین‌هایی با شرایط نامناسب از لحاظ خصوصیات مهندسی، باید اقدام به بهینه‌سازی ویژگی‌های مهندسی خاک نمود. همانطور که در بخش‌های گذشته اشاره شد بهبود مقاومت و ویژگی‌های مهندسی خاک از روش‌های مختلفی از جمله فرآیندهای مکانیکی، افزودن مواد شیمیایی و یا مسلح کردن 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 (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. [14-21] 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.

به طور خلاصه می‌توان از پژوهش‌های مشابه این پژوهش به صورت زیر یاد کرد:

سپهونگ لیو (۲۰۱۱)، کیسه‌های خاک حاوی ۳ نوع خاک مختلف را به عنوان جداساز لرزه‌ای پی ساختمان استفاده کرد و پارامترهای دینامیکی نمونه‌های مختلف کیسه‌های خاک را با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی مورد ارزیابی قرار داد که نتایج نشان داد که نسبت میرایی بالا و مدول برشی متغیر این مصالح مناسب سیستم جداساز لرزه‌ای در پی ساختمان است. [22]

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 تک‌محوری 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. [23]

بوترو (۲۰۱۵) الیاف پت را به خاک لای دار 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 پاسخ های تنش-کرنش با تغییر مقدار الیاف استفاده شده و مقدار فشار همه جانبه، تغییر می کند. همچنین در برخی درصد های اختلاط الیاف مشاهده شد که نمونه به حد گسیختگی نرسید و این حالت فقط می تواند مربوط به مقاومت کششی الیاف باشد که به مقاومت برشی بیشتر خاک کمک می کند و سبب می شود که ظرفیت تغییر شکل خاک بیشتر شود، بدون آن که ترک تشکیل شود یا انتشار پیدا کند. [24]

اولوپلومی (۲۰۱۶) تاثیر افزودن خرده های پلاستیک ضایعاتی قطعات ۳\*۳ میلی متر و ۷\*۷ میلی متر با درصد اختلاط های مختلف ۰/۴٪ و ۰/۸٪ و ۱/۲٪ و ۱/۶٪ و ۲٪ از وزن خاک همراه با مقدار سیمان برابر ۳٪ از وزن خاک را مورد بررسی قرار داده است. با انجام آزمایش تراکم اصلاح شده بر نمونه های 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. [25]

لیانگ سوئی (۲۰۱۷)، یک سری آزمایشات برش ساده سیکلی بر نمونه های خاک ماسه ای با درصد تراکم های مختلف و تحت سربارهای متفاوت و با دامنه های مختلف انجام داد. در این پژوهش تاثیر کرنش برشی و مقدار درصد تراکم بر کرنش عمودی و تاثیر کرنش برشی، سربار عمودی و درصد تراکم و همچنین تعداد سیکل های بارگذاری بر مدول برشی بررسی گردید و مشاهده شد که: (۱) کرنش عمودی نمونه با کرنش برشی اعمالی رابطه مستقیم، ولی با درصد تراکم نمونه رابطه غیرمستقیم دارد. (۲) در سیکل های ابتدایی مقدار مدول برشی به سرعت افزایش می یابد اما در ادامه نرخ این افزایش کم می شود. (۳) مدول برشی با افزایش تنش عمودی و درصد تراکم زیاد می شود اما مقدار آن با افزایش کرنش برشی، کاهش می یابد. [1]

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 داد. 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. [26]

کرامتی (۲۰۱۹)، خرده‌های پت را در اندازه‌های ۱\*۱ و نوارهای ۱\*۵ سانتی‌متر و همچنین به صورت الیاف به خاک ماسه‌ای 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. [27]

همانطور که گفته شد پژوهش‌های بسیاری در زمینه تسلیح خاک با الیاف مختلف از جمله الیاف طبیعی و مصنوعی انجام شده و با انجام آزمایشات مختلف تاثیر این نوع بهسازی بر ویژگی‌های مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این آزمایشات 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 رفتار خاک بهبود یافته است که در بخش بعد به تفصیل به بررسی برخی از این پژوهش‌ها می‌پردازیم.

## ۲-۴-۱ - استفاده از الیاف در بهسازی

در این قسمت یک نمونه استفاده از الیاف مصنوعی در بهسازی خاک و تاثیر آن بر مشخصات خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، توسط کومار [22] در سال ۲۰۱۲ که در آن الیاف به صورت تصادفی با درصد اختلاط‌های ۰/۱٪ تا ۱٪ وزن خاک خشک و با ۳ نسبت ابعاد  $(\frac{l}{d})$  ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ به آن اضافه

می‌شوند. تاثیر افزودن این الیاف بر رفتار تنش-کرنش، پارامترهای برشی، مقاومت فشاری محصورنشده و مقادیر CBR مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

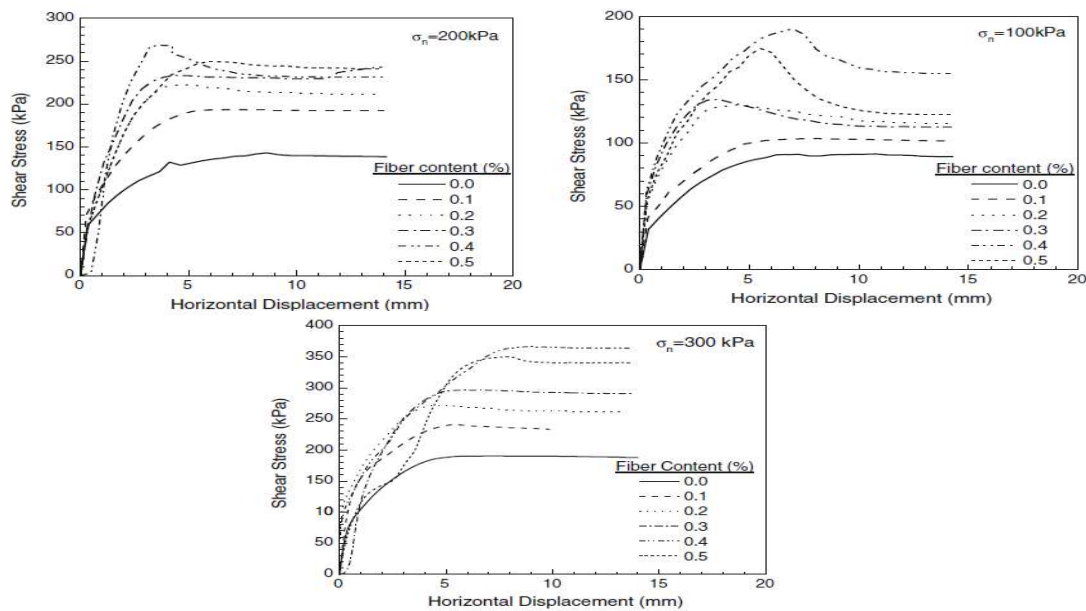
جدول (۱-۲) مشخصات الیاف پلی پروپیلن [22]

Properties	Values
Specific gravity	0.91
Linear density (denier)	260
Young's modulus (GPa)	3
Tensile strength (MPa)	120

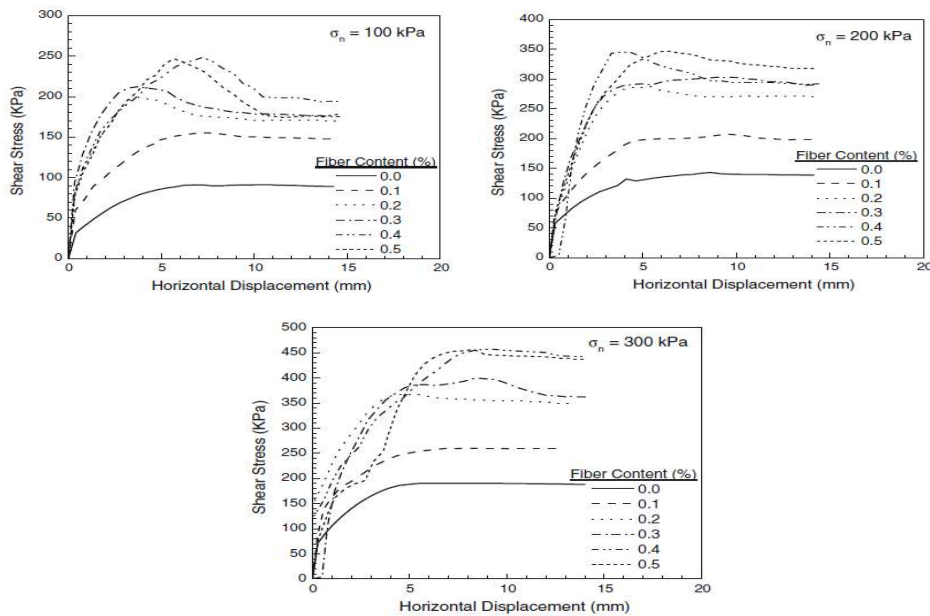
در ادامه به بررسی آزمایشات انجام شده در این پژوهش می‌پردازیم.

#### • آزمایش برش مستقیم :

در شکل‌های ۲-۳، ۲-۴ و ۲-۵ نتایج حاصل از اختلاط الیاف مشهود است. مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند خاک مسلح شده با الیاف، در اکثر موارد در مقدار بالاتری از کرنش افقی، نسبت به خاک غیرمسلح اتفاق می‌افتد. مشاهده‌ی شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تنش نرمال، هردو مقاومت حداکثر و پسماند در خاک مسلح افزایش می‌یابند. همچنین هردو مقاومت حداکثر و پسماند با افزایش مقدار الیاف تا ۰/۴٪، افزایش می‌یابند و صرف نظر از طول الیاف استفاده شده، اگر مقدار الیاف بیش از ۰/۴٪ باشد باعث کاهش مقاومت می‌گردد. بنابراین مقدار الیاف بهینه برابر با ۰/۴٪ به دست آمد.

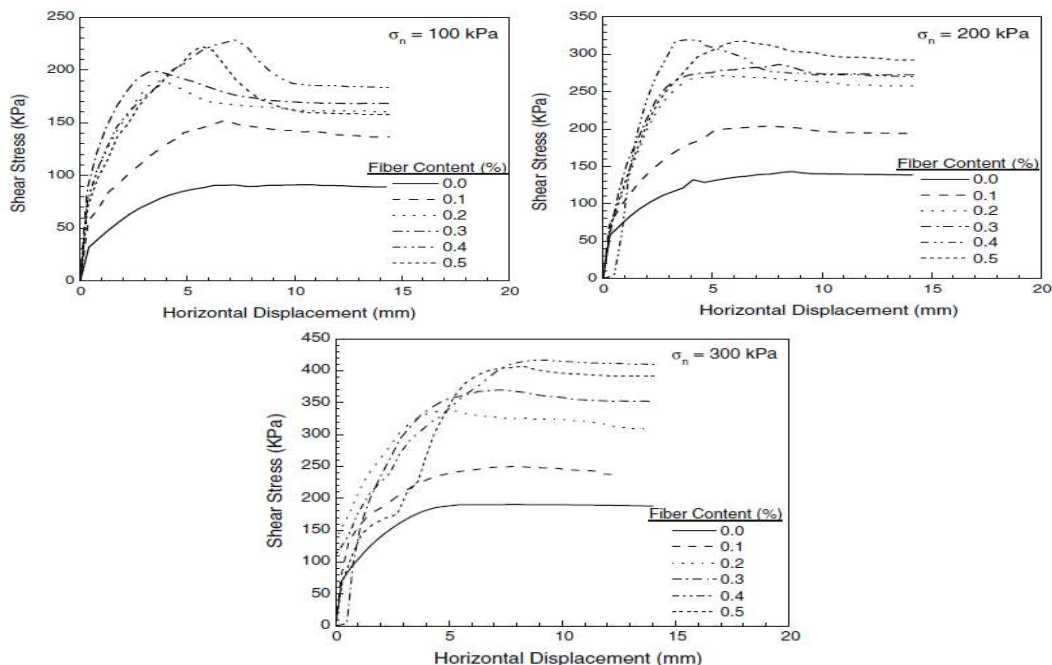


شکل (۲-۳) منحنی‌های تنش کرنش برای خاک مسلح‌شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۷۵) [22]



شکل (۲-۴) منحنی‌های تنش کرنش برای خاک مسلح‌شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۰۰) [22]





شکل (۲-۵) منحنی‌های تنش کرنش برای خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۲۵) [22]

همچنین پارامترهای برشی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم در جدول‌های ۲-۲، ۲-۳ و ۲-۴ مشهود است. این نتایج نشان می‌دهند که خاک مسلح دچار افزایش بیشتری در زاویه‌ی اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی، نسبت به خاک غیرمسلح، می‌گردد. البته این افزایش تا مقدار بهینه الیاف اتفاق می‌افتد و بیش از این مقدار شاهد کاهش جزئی این دو پارامتر هستیم. لازم به ذکر است که این نتایج صرف نظر از طول الیاف می‌باشد.

جدول (۲-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۷۵) [22]

Sl. no.	Fiber content (%)	Cohesion (c), kPa		Angle of internal friction ( $\phi$ ), degrees	
		Peak	Residual	Peak	Residual
1	0.0	45	40	26	26
2	0.1	50	48	33	34
3	0.2	58	53	39	35
4	0.3	68	54	40	38
5	0.4	100	65	42	42
6	0.5	94	52	39	39

جدول (۳-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۰۰) [22]

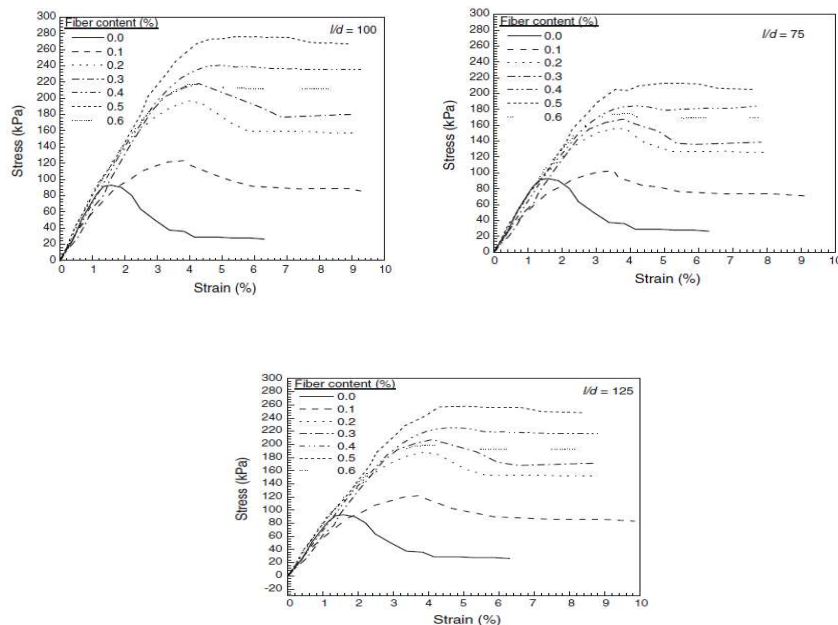
Sl. no.	Fiber content (%)	Cohesion (c), kPa		Angle of internal friction ( $\phi$ ), degrees	
		Peak	Residual	Peak	Residual
1	0.0	45	40	26	26
2	0.1	90	90	30.3	30.1
3	0.2	130	90	38	40.9
4	0.3	130	95	41	44.1
5	0.4	145	96	45.85	44.4
6	0.5	165	50	42	52

جدول (۴-۲) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش برش مستقیم (نسبت اضلاع = ۱۲۵) [22]

Sl. no.	Fiber content (%)	Cohesion (c), kPa		Angle of internal friction ( $\phi$ ), degrees	
		Peak	Residual	Peak	Residual
1	0.0	45	40	26	26
2	0.1	100	85	27.47	27.47
3	0.2	118	92	36.12	37.2
4	0.3	118	92	40	42.1
5	0.4	135	100	42.9	43.97
6	0.5	120	72	43.7	46.85

#### • آزمایش فشار محصورنشده

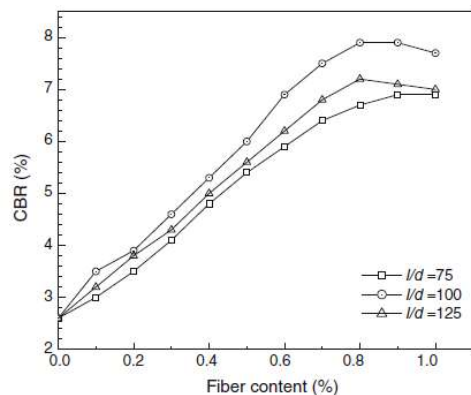
نتایج آزمایش‌های محصورنشده در فرم روابط تنش-کرنش در شکل ۲-۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه شدن الیاف به خاک مقاومت فشاری محصورنشده (qu) و کرنش گسیختگی را افزایش می‌دهد. مشاهده شد که کرنش گسیختگی در خاک مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح، زمانی که مقدار الیاف ۰/۵٪ و با طول ۱۵ میلی‌متر به خاک اضافه شد، به اندازه‌ی ۳/۱ برابر افزایش یافت. به همین ترتیب برای طول‌های ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر الیاف، افزایش کرنش گسیختگی به ترتیب برابر با ۳/۴ و ۳/۳ برابر و افزایش qu متناظر آن به ترتیب به اندازه ۲/۹ و ۲/۷ برابر گردید.



شکل (۲-۶) پاسخ تنش- کرنش برای خاک مسلح شده با الیاف حاصل از آزمایش فشاری محصور نشده [22]

### • آزمایش CBR

نتایج آزمایش CBR در شکل ۲-۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن الیاف تا مقدار ۰/۸-۰/۹٪ برای هر ۳ مقدار نسبت اضلاع، مقادیر CBR افزایش می‌یابد. CBR برای طول الیاف ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۲/۶، ۳ و ۲/۷ برابر خاک غیرمسلح می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر CBR با افزایش طول الیاف تا ۲۰ میلی‌متر افزایش و برای بیشتر از آن کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار بهینه الیاف برابر ۰/۸٪ وزن خشک خاک و با طول ۲۰ میلی‌متر (نسبت اضلاع = ۱۰۰) می‌باشد.



شکل (۷-۲) مقادیر CBR برای خاک مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف [22]

## ۲-۴-۲ - استفاده از الیاف پلی اتیلن ترفتالات (پت) در بهسازی

تا کنون پژوهش‌های مختلفی جهت بررسی تاثیر افزودن پلی اتیلن ترفتالات به نمونه‌های مختلف خاک انجام شده که در ادامه به بررسی این پژوهش‌ها پرداخته خواهد شد.

### • آزمایش حدود اتربرگ

میشرا [23] در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی اثر همزمان خاکستر و پت را بر مشخصات مقاومتی خاک بررسی کرده است.

در جدول‌های ۲-۵ و ۲-۶ مشخصات پت و خاکستر استفاده شده آمده است.

جدول (۲-۵) مشخصات الیاف پت [23]

Properties	Values
Specific gravity	1.22
Moisture Content %	0.4
Young's Modulus (E), M Pa	2800-3100
Tensile Strength (M Pa)	200-400
Length (mm)	20-25
Diameter (mm)	0.20-0.25
Fusion Temperature (°C)	252
Color	White

جدول (۲-۶) مشخصات خاکستر [23]

Properties	Test	Value
Bulk Density in gm/cm <sup>3</sup>	IS: 2386-III-1963	1.22
Specific Gravity	IS: 2386-III-1963	2.2
Water absorption (%)	IS: 2386-III-1963	1.52
Fineness modulus	IS: 2720-IV-1985	2.42
Methylene blue	IS: 2720-XXIV-1976	0.56

برای تعیین حدود اثربرگ، آزمایش با درصد های مختلف پت و خاکستر انجام شد. جدول ۲-۷ مشخصات ۵ نمونه ساخته شده را نشان می دهد.

جدول (۲-۷) جزئیات نمونه های ساخته شده با ترکیب های مختلف پت و خاکستر [23]

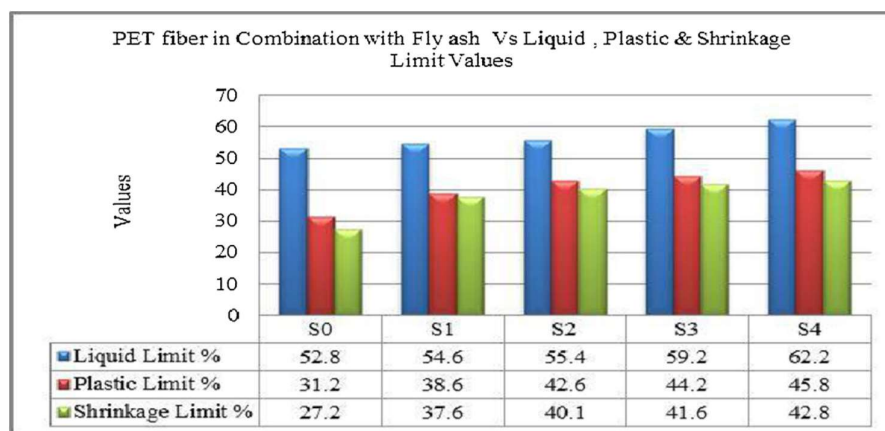
SN	Proportions of Combination by weight of Soil	Sample Designation	Soil(%)	PET Fiber (%)	Fly Ash (%)	Total
1	Soil + PET Fiber 0% + Fly Ash 0%	S0	100	0	0	100
2	Soil + PET Fiber 0.4% + Fly Ash 5%	S1	94.6	0.4	5.0	100
3	Soil + PET Fiber 0.8% + Fly Ash 10%	S2	89.2	0.8	10	100
4	Soil + PET Fiber 1.2% + Fly Ash 15%	S3	83.8	1.2	15	100
5	Soil + PET Fiber 1.6% + Fly Ash 20%	S4	78.4	1.6	20	100

جدول ۲-۸ نیز مشخصات خاک غیرمسلح را نشان می دهد که حدود اثربرگ نیز در بین آنها مشهود است.

جدول (۸-۲) مشخصات فیزیکی نمونه‌های خاک [23]

Properties	Values
Specific gravity	2.75
Percentage of Sand	32
Fine-grained particles percentage	66
USCS Classification	CL
Liquid Limit (%)	28.4
Plastic Limit (%)	21.3
Shrinkage Limit (%)	19
Optimum Moisture Content (OMC) %	16.18
Maximum Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.74

پس از انجام آزمایش حدود اتربرگ، نتایج طبق شکل ۸-۲ حاصل شد که تاثیر این افزودنی‌ها بر خاک بررسی شود.



شکل (۸-۲) تغییرات حد روانی، حد خمیری و حد انقباض خاک مسلح شده با ترکیب الیاف پت و خاکستر [23]

### حد روانی :

طبق شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد ترکیب الیاف پت و خاکستر، حد روانی برای ۴ نمونه‌ی مسلح مورد آزمایش به ترتیب ۱/۰۳، ۱/۰۵، ۱/۱۲ و ۱/۱۸ برابر می‌شود. تغییرات ایجاد شده مربوط به جایجایی دانه‌های خاک به وسیله‌ی افزودنی‌ها است. خاک مسلح نسبت به خاک غیرمسلح پیوسته‌تر باقی می‌ماند و الیاف پت رطوبت را جذب نمی‌کنند که این روند به افزایش حد روانی خاک مسلح منتج می‌گردد. این نتیجه در تقابل با رفتار خاک در پژوهش کینجال [28] در سال ۲۰۱۲ می‌باشد.

### حد خمیری و شاخص خمیری :

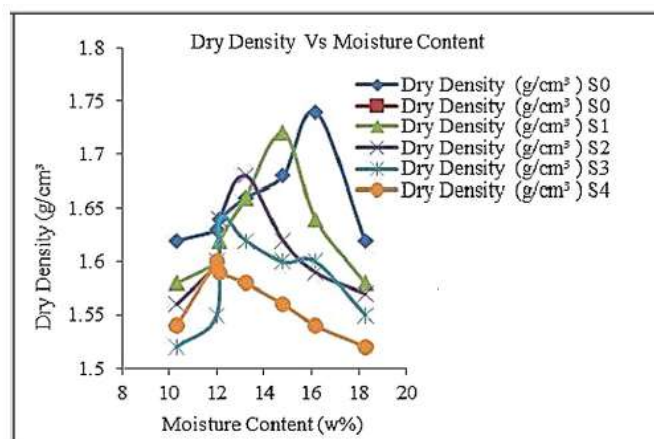
همچنین نتایج در شکل ۲-۸ نشان می‌دهند که با افزایش مقدار افزودنی حد خمیری خاک مسلح افزایش می‌یابد. این مقادیر افزایش برای ۴ نمونه خاک مسلح به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۳۷، ۱/۴۲ و ۱/۴۷ برابر مقدار اولیه است. شاخص خمیری نیز برای ۴ نمونه خاک مسلح کاهش یافته و به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۵۹، ۰/۶۹ و ۱/۰۳ برابر می‌گردد. این نتایج مشابه نتایج فازی [29] در سال ۲۰۱۳ می‌باشد.

### حد انقباض :

همانطور که در شکل ۲-۸ مشهود است با افزایش درصد افزودنی، حد انقباض افزایش می‌یابد. حد انقباض با اضافه کردن افزودنی برای ۴ نمونه‌ی مسلح‌شده به ترتیب به اندازه ۱/۳۸، ۱/۴۷، ۱/۵۳ و ۱/۵۷ برابر افزایش پیدا می‌کند.

### • آزمایش پروکتور اصلاح شده

در پژوهش میشرا [23] که در قسمت قبل در مورد آن صحبت شد برای به دست آوردن وزن مخصوص خشک خاک آزمایش پروکتور اصلاح شده انجام شده است. شکل ۲-۹ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۹) مقادیر وزن مخصوص خشک در درصد رطوبت‌های مختلف همه‌ی نمونه‌ها [23]

همانطور که در شکل ۲-۹ مشهود است با افزایش درصد الیاف پت، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد. وزن مخصوص خشک حداکثر از ۱/۷۴ به ۱/۷۲، ۱/۶۸، ۱/۶۴ و ۱/۶ برای ۴ نمونه مسلح شده کاهش یافته است که این نمونه‌ها به ترتیب دارای ۰/۴٪، ۰/۸٪، ۱/۲٪ و ۱/۶٪ الیاف پت می‌باشند.

این کاهش مربوط به پاسخ الاستیک الیاف پت است که ناشی از کاهش کارایی تراکم در حضور الیاف پت و کم بودن وزن مخصوص پت (۱/۲۲) در مقایسه با وزن مخصوص خاک (۲/۷۵) می‌باشد. همچنین به طور مشابه درصد رطوبت بهینه‌ی خاک از ۱۶/۱۸٪ به ۱۴/۸٪، ۱۳/۲٪، ۱۲/۱۴٪ و ۱۲٪ برای ۴ نمونه‌ی مسلح شده، کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از ظرفیت پایین جذب آب الیاف پت می‌باشد. کاهش رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر مشابه نتایج حاصل از یاداو و ایلماز [30,31] است.

#### • آزمایش تراکم

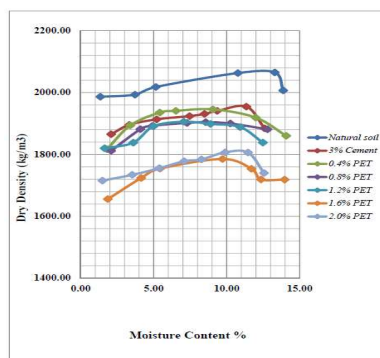
بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای با استفاده از خرده‌های پلاستیک ضایعاتی توسط اولووپلومی [24] انجام شد. در این پژوهش از قطعات پلاستیک با سطح مقطع مربع به ضلع ۰/۳ سانتی‌متر و ۰/۷ سانتی‌متر با درصد اختلاط‌های مختلف ۰/۴٪ و ۰/۸٪ و ۱/۲٪ و ۱/۶٪ و ۲٪ از وزن خاک همراه با مقدار سیمان برابر ۳٪ از وزن خاک، استفاده شد. این اطلاعات در جدول ۲-۹ موجود است.

جدول (۲-۹) نسبت اختلاط مخلوط‌های خاک - پت - سیمان [24]

Type of soil	Percentage of PET strips used with respect to soil	Percentage of Ordinary Portland Cement used with respect to soil
Ogbese Sand	0%	0%
Ogbese Sand	0%	3.0%
Ogbese Sand	0.4%	3.0%
Ogbese Sand	0.8%	3.0%
Ogbese Sand	1.2%	3.0%
Ogbese Sand	1.6%	3.0%
Ogbese Sand	2.0%	3.0%



با انجام آزمایش تراکم اصلاح شده تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر محاسبه شده و نمودار حاصل به صورت شکل ۲-۱۰ می باشد.



شکل (۲-۱۰) منحنی‌های تراکم پروکنور اصلاح شده برای مخلوط ماسه - پت - سیمان [24]

همانطور که در شکل ۲-۱۰ مشهود است مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش مقدار پلاستیک ضایعاتی پت، کاهش می‌یابد که این کاهش به علت وزن سبک مصالح پت می‌باشد.

#### • بررسی رفتار تنش-کرنش

بوترو [25] در سال ۲۰۱۵ الیاف پت که دارای مشخصات ذکر شده در جدول ۲-۱۰ بودند را به خاک لای دار افزود تا رفتار تنش-کرنش خاک تسلیح شده به وسیله الیاف پت را مورد بررسی قرار دهد. این پژوهش از دستگاه سه محوری جهت آزمایش استفاده شده است. در جدول ۲-۱۱ مقادیر فشار همه جانبه آزمایشات آورده شده است.

جدول (۲-۱۰) مشخصات الیاف استفاده شده [25]

PET fiber characteristics.

Fiber type	Color	Length	Diameter	Melting point
15 × 50 SIL	Ivory	50 mm	15 mm	255 °C

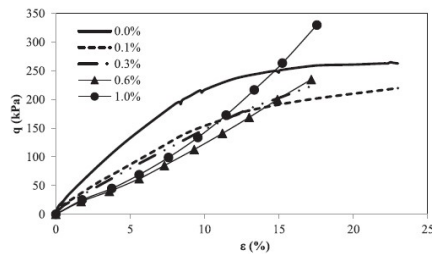
جدول (۱۱-۲) مقادیر فشار همه جانبه [25]

Depth (m)	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_c$ (kPa)
0.0	0.00	0.00
2.5	61.85	61.85
5.0	123.70	123.70
7.5	185.56	185.56

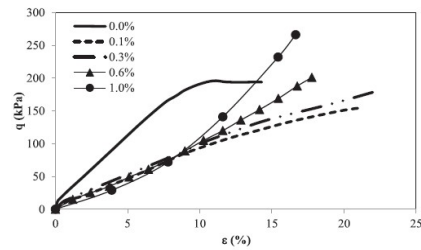
برای بررسی رفتار خاک مسلح و غیرمسلح، منحنی‌های تنش-کرنش از نتایج آزمایش سه‌محوری رسم شد. در کل، شکل ۱۲-۲ نشان می‌دهد که پاسخ‌های تنش-کرنش با تغییر مقدار الیاف استفاده شده و مقدار فشار همه‌جانبه، تغییر می‌کند. در نمودارهای شکل ۱۲-۲ تفاوت‌های مهمی را در رفتار خاک مسلح و غیرمسلح می‌توان مشاهده نمود. شکل ۱۱-۲ مخلوط خاک و الیاف را در این پژوهش نشان می‌دهد.



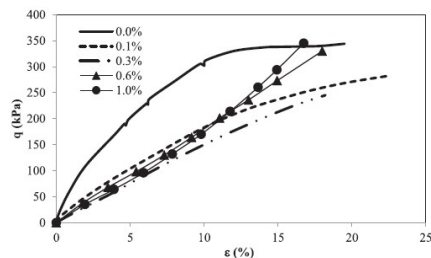
شکل (۱۱-۲) مخلوط خاک و الیاف [25]



ب



الف



ج

شکل (۲-۱۲) منحنی تنش کرنش برای الف) تنش ۶۱/۸۵ کیلوپاسکال، ب) تنش ۱۲۳/۷ کیلوپاسکال و ج) تنش ۱۸۵/۵۶

کیلوپاسکال [25]

خاک غیرمسلح در محدوده‌ی تغییر شکل بین ۰ تا ۱۰٪، یک پاسخ تنش-کرنش تقریباً خطی و مقاومت بالاتری نسبت به خاک مسلح، از خود نشان می‌دهد. در محدوده‌ی کرنش ۱۰ تا ۱۵٪، خاک غیرمسلح یک رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهد اما تا زمانی که به نقطه‌ی گسیختگی برسد، مقاومت آن افزایش پیدا نمی‌کند. در مقابل نمونه‌های مسلح شده یک رفتار تنش-کرنش افزایشی در تمام محدوده‌های کرنش آزمایش شده از خود نشان می‌دهند. این رفتار زمانی که مقدار الیاف افزایش پیدا می‌کند بیشتر نمایان می‌گردد. اگرچه نمونه‌هایی که با مقدار ۰/۶ و ۱٪ الیاف ساخته شده‌اند افزایش مقاومت‌های بیشتری را در کرنش ۱۰٪ از خود نشان می‌دهند. در شکل ۲-۱۳ نمونه‌ی مسلح پس از آزمایش قابل مشاهده است.



شکل (۲-۱۳) نمونه‌ی مسلح، پس از آزمایش [25]

لازم به ذکر است که نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ درصد بر خلاف نمونه‌های غیرمسلح، به حالت گسیختگی نمی‌رسند.

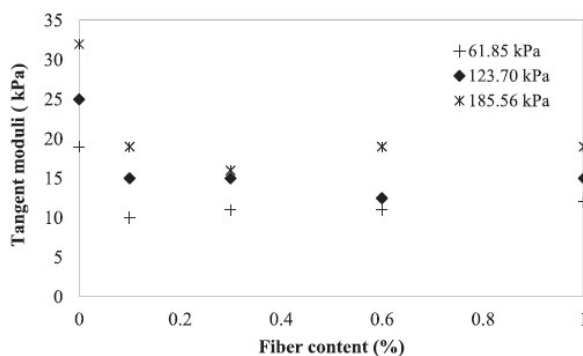
این حالت فقط می‌تواند مربوط به مقاومت کششی الیاف باشد که به مقاومت برشی بیشتر خاک کمک می‌کند و سبب می‌شود که ظرفیت تغییر شکل خاک بیشتر شود، بدون آن که ترک تشکیل شود یا انتشار پیدا کند. علاوه بر این، کرنش نهایی نمونه در هر آزمایش به بیشترین حد ظرفیت جابجایی دستگاه سه‌محوری رسید. لازم به ذکر است دستگاهی که برای خاک مسلح و غیرمسلح استفاده شد، یکسان بود.

جدول ۲-۱۲ مقادیر E منحنی تنش-کرنش که در کرنش‌های پایین محاسبه شده و می‌توان آن‌ها را به عنوان مدول الاستیسیته بیان کرد، را نشان می‌دهد. این مقادیر برای تمامی حالت‌ها محاسبه شده است. اندازه‌ی مدول الاستیسیته‌ی نتیجه نسبت به حالت‌های غیر مسلح مقادیر بیشتری داشته و با فشار همه‌جانبه در همه‌ی حالت‌ها افزایش یافته است.

جدول (۱۲-۲) مدول الاستیسیته در کرنش‌های پایین [25]

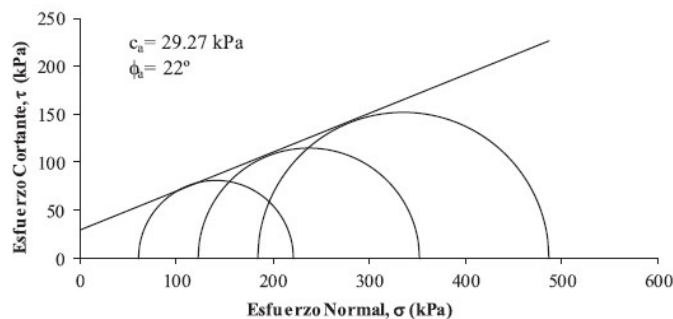
Fiber content	$\sigma_c$ (kPa)	$E$ (kPa)
0%	61.85	1864.45
	123.70	2131.78
	185.56	2975.80
0.10%	61.85	970.45
	123.70	1383.63
	185.56	1659.80
0.30%	61.85	938.22
	123.70	1387.59
	185.56	1596.02
0.6%	61.85	1026.64
	123.70	1259.63
	185.56	1732.77
1.00%	61.85	1103.59
	123.70	1373.47
	185.56	1830.63

نمودار شکل ۱۴-۲ سیر صعودی مدول مماسی بر حسب مقادیر الیاف، در کرنش‌های ۱۰٪ را نشان می‌دهد.

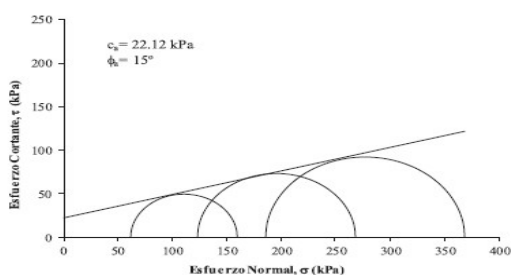


شکل (۱۴-۲) تغییرات مدول الاستیسیته برای کرنش ۱۰٪ [25]

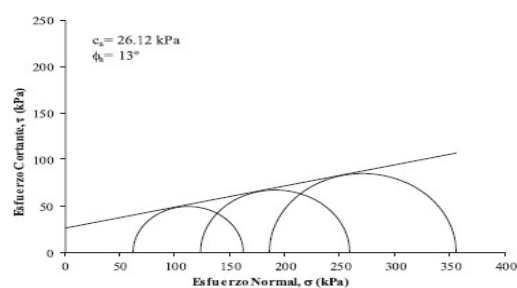
از نمودار شکل ۱۴-۲ می‌توان دریافت که مقادیر مدول مماسی برای خاک غیرمسلح بسیار بیشتر از مقادیر به دست آمده از نمونه‌های مسلح است. برای خاک مسلح، مقدار افزایش مدول مماسی با افزایش مقدار الیاف، ناچیز است و تقریباً بین تنش‌های همه جانبه‌ی مخالف، ثابت می‌ماند. نمودارهای شکل‌های ۱۵-۲ و ۱۶-۲ دوایر مور در کرنش ۱۰٪ برای آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته‌ی زهکشی‌نشده را نشان می‌دهد که برای هر دو حالت مسلح و غیرمسلح انجام شده است.



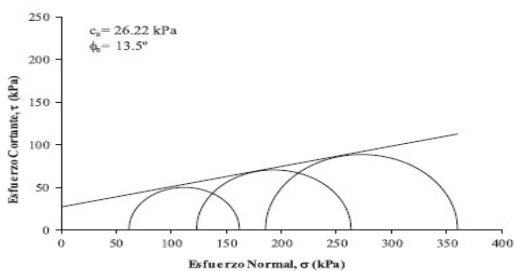
شکل (۲-۱۵) دواير مور برای خاک غیر مسلح در تغییر شکل های واحد ۱۰٪ [25]



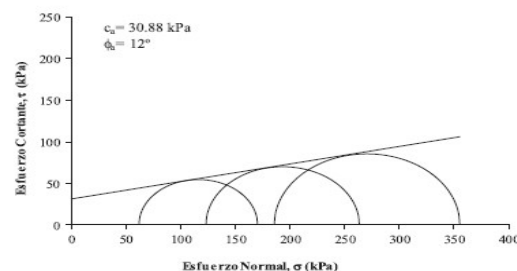
a) 0.1 % of fiber content



b) 0.3 % of fiber content



c) 0.6 % of fiber content



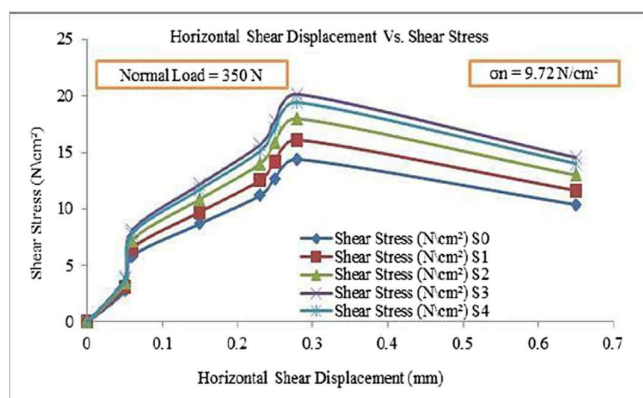
d) 1.0 % of fiber content

شکل (۲-۱۶) دواير مور برای خاک مسلح در مقادير مختلف الیاف و در تغییر شکل های واحد ۱۰٪ [25]

در شکل های ۲-۱۵ و ۲-۱۶ می توان تاثیر آشکار الیاف بر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک را مشاهده کرد. زمانی که مقدار الیاف افزایش می یابد به طور واضح زاویه ی اصطکاک داخلی کاهش می یابد و چسبندگی رو به افزایش میل می کند. مورد اول می تواند مربوط به کاهش تعداد نقاط تماس بین ذرات

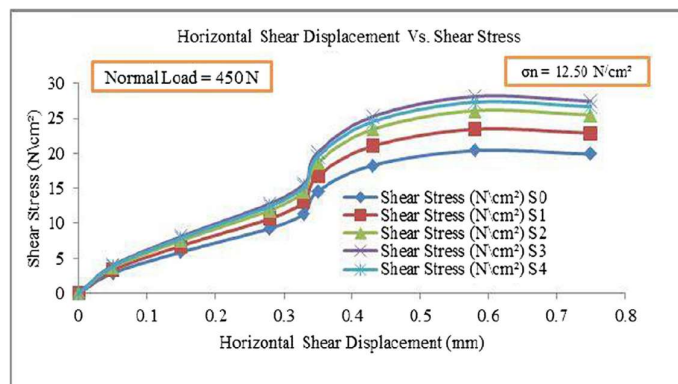
خاک که در اثر حضور الیاف ایجاد شده است، باشد و مورد دوم می‌تواند مربوط به درهم قفل‌شدگی و پیوستگی ذرات خاک و الیاف باشد.

در پژوهشی که توسط میشرا [23] انجام شد و در قسمت‌های قبل در مورد آن توضیح داده شد، برای بررسی رفتار تنش-کرنش آزمایش برش مستقیم انجام شد که نتایج آن طبق شکل‌های ۲-۱۷، ۲-۱۸ و ۲-۱۹ به دست آمد. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در سه مقدار تنش نرمال  $9/72$ ،  $12/5$  و  $16/67$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع انجام شده است.

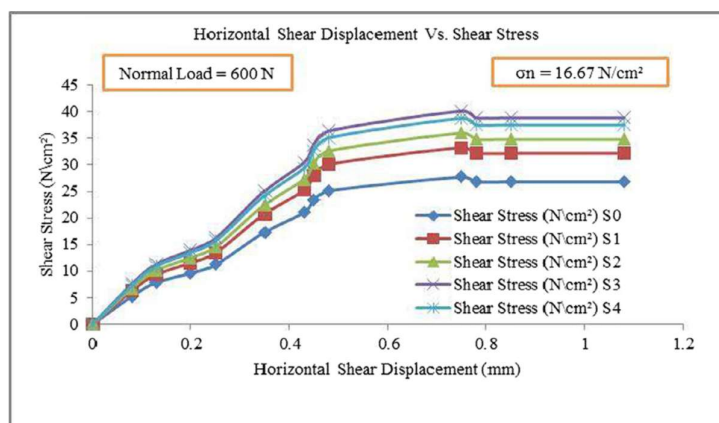


شکل (۲-۱۷) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال  $9/72$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع [23]

نمودار شکل ۲-۱۷ نشان می‌دهد که با افزایش تنش نرمال و درصد افزودنی، مقاومت حداکثر خاک مسلح افزایش می‌یابد. با افزودن الیاف پت در خاک، بیشترین افزایش در مقاومت حداکثر در تنش نرمال  $9/72$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع اتفاق می‌افتد. با افزودن الیاف در تنش نرمال  $9/72$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع تنش برشی حداکثر برای ۴ نمونه مسلح خاک به ترتیب  $1/12$ ،  $1/25$ ،  $1/40$  و  $1/35$  برابر می‌شود. به طور مشابه نتایج آزمایش در تنش نرمال  $12/5$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع و  $16/67$  نیوتن بر سانتی‌مترمربع در نمودارهای زیر مشهود است.



شکل (۱۸-۲) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال ۱۲/۵ نیوتن بر سانتی متر مربع [23]



شکل (۱۹-۲) جابجایی افقی و تنش برشی در تنش نرمال ۱۶/۶۷ نیوتن بر سانتی متر مربع [23]

کاهش مقاومت حداکثر در خاک مسلح حاوی ۱/۶٪ الیاف پت و ۲۰٪ خاکستر مربوط به آرایش‌گیری مجدد ذرات خاک در درصدهای بالاتر اختلاط خاکستر است که با توجه به علت خاصیت سیالاتی خاکستر و طبیعت روان‌پذیر بودن آن است.

پارامترهای برشی در جدول ۲-۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ترکیب الیاف پت با خاکستر باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی می‌گردد. زاویه اصطکاک داخلی برای ۴ نمونه خاک مسلح به ترتیب ۱/۰۸، ۱/۴۵، ۱/۷۳ و ۱/۸۴ برابر و چسبندگی برای آن‌ها به ترتیب ۱/۵، ۱/۵۸، ۱/۷۵ و ۱/۹۱ برابر مقادیر اولیه می‌گردد.



جدول (۲-۱۳) پارامترهای برشی خاک مسلح شده با ترکیب الیاف پت و خاکستر [23]

Samples	Proportions of Combination by weight of Soil	Cohesion (c) K Pa	The angle of internal friction ( $\epsilon^\circ$ )
S0	Soil + PET Fiber 0% + Fly Ash 0%	36	13.2
S1	Soil + PET Fiber 0.4% + Fly Ash 5%	54	14.2
S2	Soil + PET Fiber 0.8% + Fly Ash 10%	57	19.2
S3	Soil + PET Fiber 1.2% + Fly Ash 15%	63	22.8
S4	Soil + PET Fiber 1.6% + Fly Ash 20%	69	24.4

مدول برشی از یک دوم تنش برشی ماکزیمم محاسبه شد. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که با افزایش افزودنی مقدار مدول برشی افزایش می یابد. حداکثر این افزایش در تنش نرمال ۱۶/۶۷ نیوتن بر سانتی متر مربع مشاهده گردید. همانطور که در جدول ۲-۱۴ مشاهده می شود مقدار مدول برشی برای ۴ نمونه خاک مسلح به ترتیب ۱/۱، ۱/۱۸، ۱/۲۳ و ۱/۱۶ برابر مقادیر اولیه می گردد.

جدول (۲-۱۴) مدول برشی خاک مسلح شده [23]

Samples	Proportions of Combination by weight of Soil	Shear Modulus M Pa		
		Normal stress 9.72 N/cm <sup>2</sup>	Normal stress 12.50 N/cm <sup>2</sup>	Normal stress 16.67 N/cm <sup>2</sup>
S0	Soil + PET Fiber 0% + Fly Ash 0%	0.90	1.52	2.01
S1	Soil + PET Fiber 0.4% + Fly Ash 5%	0.98	1.67	2.21
S2	Soil + PET Fiber 0.8% + Fly Ash 10%	1.12	1.81	2.37
S3	Soil + PET Fiber 1.2% + Fly Ash 15%	1.22	1.88	2.48
S4	Soil + PET Fiber 1.6% + Fly Ash 20%	1.18	1.79	2.33

در پژوهشی که توسط بابو [32] در سال ۲۰۱۱ انجام شد مشخصات خاک استفاده شده در پژوهش به صورت جدول ۲-۱۵ بود.

جدول (۲-۱۵) مشخصات خاک استفاده شده در پژوهش [32]

Properties	Values
Liquid limit (%)	39
Plastic limit (%)	26
Shrinkage limit (%)	20
Specific gravity (G)	2.65
Optimum moisture content (%)	17.8
Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	16.9
Silt + clay size (%)	10

در شکل های ۲-۲۰، ۲-۲۱ و ۲-۲۲ المان مسلح کننده خاک، خاک مخلط شده با پت و نمونه های

مسلح و غیرمسلح قابل مشاهده است.



شکل (۲۰-۲) نمونه‌ای از خرده‌های ضایعاتی پت استفاده شده در آزمایش [32]



شکل (۲۱-۲) خاک مخلوط شده با خرده‌های ضایعاتی پلاستیک [32]



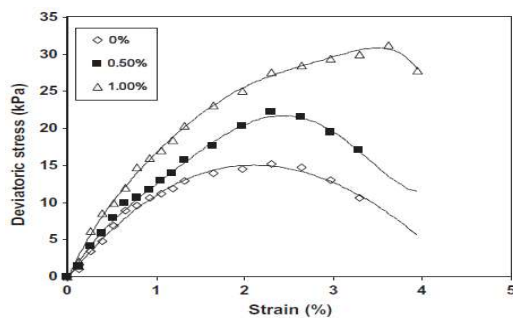
نمونه مسلح شده با پت



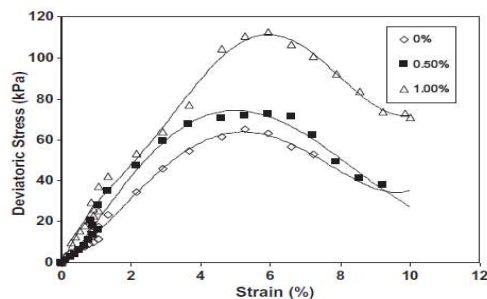
نمونه غیرمسلح

شکل (۲۲-۲) نمونه‌های ساخته شده [32]

برای بررسی رفتار تنش-کرنش آزمایش فشار محصورنشده انجام شد. این آزمایشات روی ۲ نمونه خاک سرخ و ماسه انجام گردید. نتایج آزمایشات روی ۲ نوع خاک با درصد افزودنی مختلف در شکل‌های ۲-۲۳ و ۲-۲۴ مشهود است.

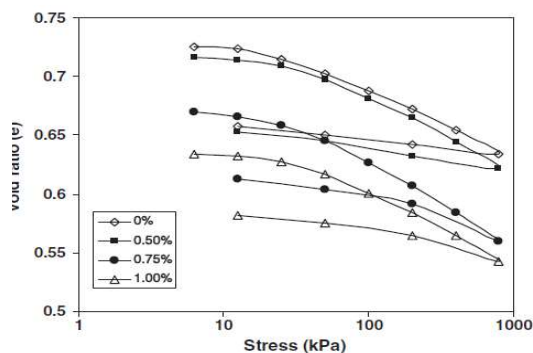


ب

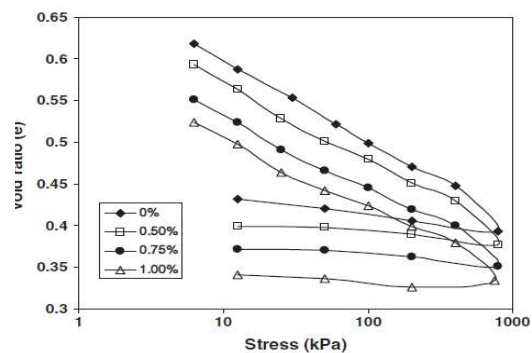


الف

شکل (۲-۲۳) نتایج آزمایش فشار محصورنشده در درصدهای مختلف پت در الف) خاک سرخ و ب) خاک ماسه‌ای [32]



ب



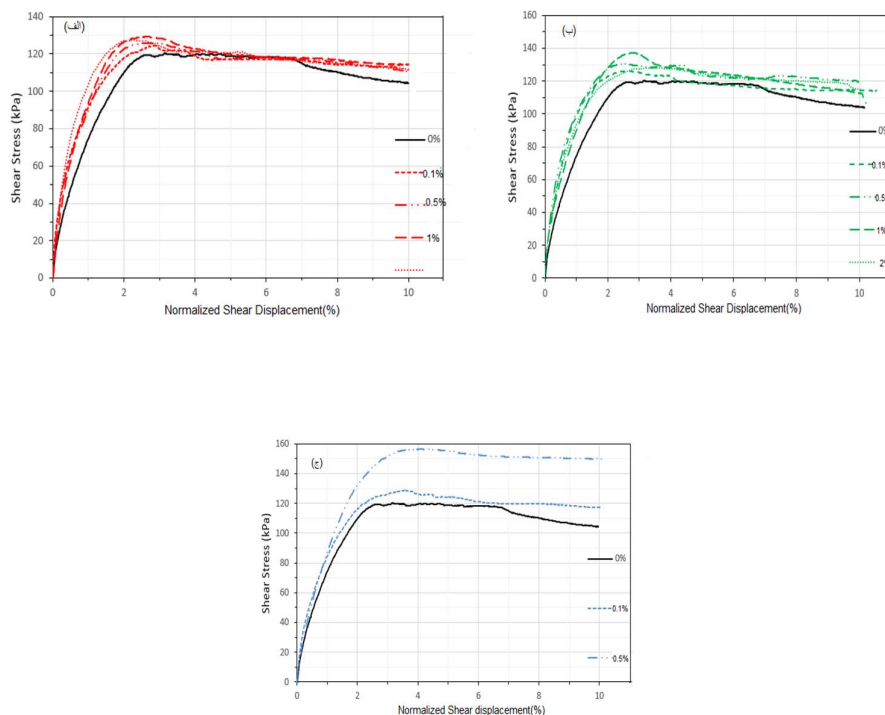
الف

شکل (۲-۲۴) نمودار نسبت تخلخل بر حسب لوگاریتم تنش برای درصدهای مختلف پت در الف) خاک سرخ و ب) خاک ماسه-

ای [32]

با بررسی شکل‌های ۲-۲۳ و ۲-۲۴ اثر مثبت بهسازی نمونه‌های خاک با پت بر رفتار تنش-کرنش و ویژگی‌های خاک کاملاً واضح می‌باشد.

بررسی رفتار تنش- کرنش برشی نمونه‌های خاک ماسه‌ای بهسازی شده با پت توسط کرامتی (۲۰۱۹) [26] انجام گردید که در شکل ۲-۲۵ رفتار این نمونه‌ها که توسط خرده‌ها، نوارها و الیاف پت بهسازی شده‌اند قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۲-۲۵) نمودارهای تنش- تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه‌های غیر مسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از

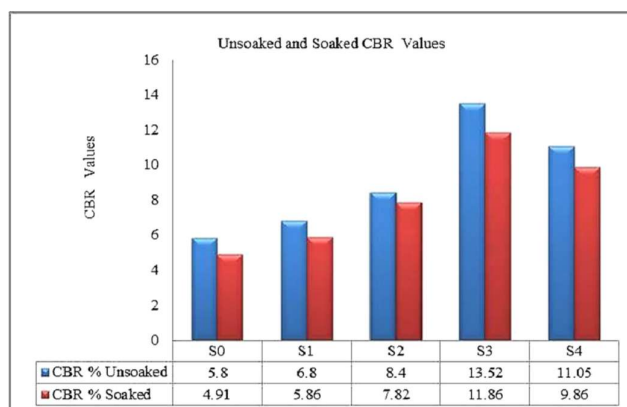
(الف) خرده‌های پت (ب) نوارهای پت (ج) الیاف پت [26]

همان‌طور که در شکل ۲-۲۵ دیده می‌شود، هر یک از منحنی‌های تنش- تغییر شکل برشی نرمالیزه شده دارای یک قله بوده که متناظر با نقطه‌ی گسیختگی نمونه می‌باشد. همچنین رفتار نمونه‌های مسلح شده با توجه به مقدار و ابعاد مسلح‌کننده‌ها متغیر است به طوری که با افزایش درصد وزنی پت در نمونه‌ها (تا ۱٪ برای خرده‌ها و نوارهای پت و ۰/۵٪ برای الیاف) تغییر شکل برشی نرمالیزه شده متناظر با تنش برشی ماکزیمم افزایش یافته‌است. در تغییر شکل‌های برشی نرمالیزه شده بعد از کرنش گسیختگی، تنش

برشی تحمل شده از سوی نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد از نوارها و خرده‌های پت تقریباً با تنش برشی تحمل شده از جانب نمونه‌های مسلح شده با ۱ درصد وزنی از خرده‌ها و نوارهای پت یکسان و یا کمتر از آن بوده است؛ به همین دلیل از افزودن مقادیر وزنی بیشتر پت به خاک صرف نظر شده است. می‌توان گفت بروز این رفتار از سوی نمونه‌ها به دلیل اندرکنش فیزیکی بین ذرات خاک و پت می‌باشد که منجر به افزایش مقاومت خاک و بهبود رفتار مکانیکی آن شده است. به علاوه در شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های مسلح شده با الیاف پت نسبت به نمونه‌هایی که با نوارها و خرده‌های پت مسلح شده بودند، تنش برشی بیشتری را متحمل شدند. می‌توان این گونه توضیح داد که الیاف نسبت به دو شکل دیگر پت دارای مقاومت کششی بیشتری بوده و همچنین قابلیت هم‌بند شدن بهتری با ذرات خاک داشته اند. نکته‌ی قابل توجه این است که افزودن پت به ماسه باعث کاهش سختی ماسه و بروز رفتار شکل پذیرتری از سوی خاک شده است.

### • آزمایش CBR

در پژوهشی که توسط میشر [23] انجام شد و در قسمت‌های قبل در مورد آن توضیح داده شد آزمایش CBR طبق استاندارد ASTM D 1883-94 انجام شد. نتایج این آزمایش برای نمونه خشک و نمونه‌ای که ۴ روز در آب غوطه‌ور بوده، در شکل ۲-۲۶ نشان داده شده است.



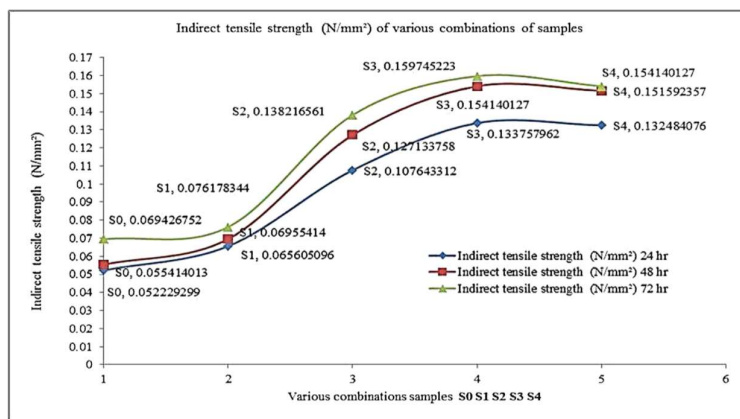
شکل (۲-۲۶) تغییرات مقدار CBR با تغییر درصد افزودن الیاف پت به همراه خاکستر به خاک [23]

همان‌طور که در شکل ۲-۲۶ مشخص است با افزودن ترکیب الیاف پت و خاکستر مقدار CBR برای هردو نمونه غوطه‌ور و غیر غوطه‌ور افزایش می‌یابد. حداکثر مقادیر CBR برای هردو نمونه‌ی غوطه‌ور و غیر غوطه‌ور در حالت ۱/۲ الیاف پت و ۱۵٪ خاکستر اتفاق می‌افتد. این افزایش در مقدار CBR به علت بهبود مقاومت خاک می‌باشد.

### • آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

در پژوهشی که توسط میسرا [23] انجام شد و در قسمت‌های قبل در مورد آن توضیح داده شد آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس نمونه‌سازی بر طبق BS 1377:1975 انجام شد. نمونه با افزودن مقدار مورد نیاز الیاف پت به همراه خاکستر ساخته شد، سپس به مخلوط آب اضافه گردید و اختلاط تا جایی انجام شد که یک مخلوط همگن ایجاد شود. نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد طوبت بهینه ساخته شد.

قطر نمونه ۱۰۰ میلی‌متر، ارتفاع آن ۸۰ میلی‌متر و آزمایش در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد انجام شد. آزمایش‌ها در سه مرحله ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت پس از نمونه‌سازی انجام شد. نتایج این آزمایشات در شکل ۲-۲۷ مشهود است.



شکل (۲-۲۷) مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های مختلف [23]

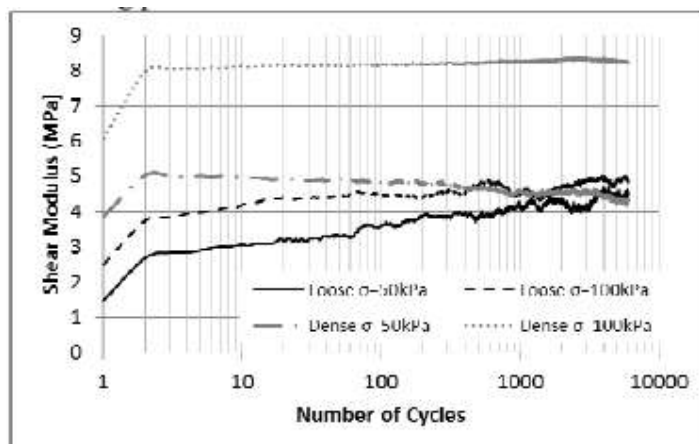
بر طبق شکل ۲-۲۷ مشاهده شد که افزودن ۱/۲٪ الیاف پت در تمامی نمونه‌ها نتایج بهتری به دست می‌دهد. ورود الیاف پت به خاک باعث کاهش تغییر شکل‌های خاک و کاهش گسترش ترک‌های کششی می‌شود. سطح تماس موثر بین الیاف پت و دانه‌های خاک تا مقدار الیاف برابر ۱/۲٪ افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش اصطکاک بین آن‌ها است و باعث افزایش در مقاومت می‌گردد. اما در در مقدار الیاف بیش از ۱/۲٪ اندرکنش بین الیاف پت و دانه‌ها کاهش یافته و اندرکنش الیاف با خودشان غالب می‌شود زیرا حجم نسبی اشغال شده توسط الیاف بیشتر می‌شود و این باعث کاهش مقاومت می‌گردد.

## ۲-۴-۳- آزمایش برش ساده سیکلی و بررسی پارامترهای دینامیکی خاک

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 پلی‌اتیلن ترفتالات بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای بندر انزلی اجرا شده است. افزودنی مورد استفاده پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) ضایعاتی می‌باشد. بعد از اتمام اختلاط خاک و پت و ساخت نمونه‌ها در ۲ درصد تراکم مختلف، آزمایش برش ساده سیکلی در کرنش‌ها و سربارهای مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شده و پارامترهای مدول برشی و میرایی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین علت در ادامه به بررسی پژوهش‌هایی می‌پردازیم که با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی و تجهیزات بندر المنت به بررسی پارامترهای دینامیکی از جمله مدول برشی سکانتی یا نرمال، نسبت میرایی و مدول برشی حداکثر پرداخته‌اند.

آزمایشات برش ساده سیکلی بر خاک ماسه‌ای و بررسی اثر بارگذاری دینامیکی بر توربین‌های بادی ساحلی که توسط لیانگ سوئی [1] انجام شد و اثرات مختلفی از جمله نوع خاک (سخت یا سست)، تعداد

سیکل بارگذاری و مقدار سربار عمودی مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار شکل ۲-۲۸ اثر تعداد سیکل بارگذاری بر مدول برشی خاک در ۲ سربار ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال و ۲ نوع خاک سفت و سست قابل مشاهده است.



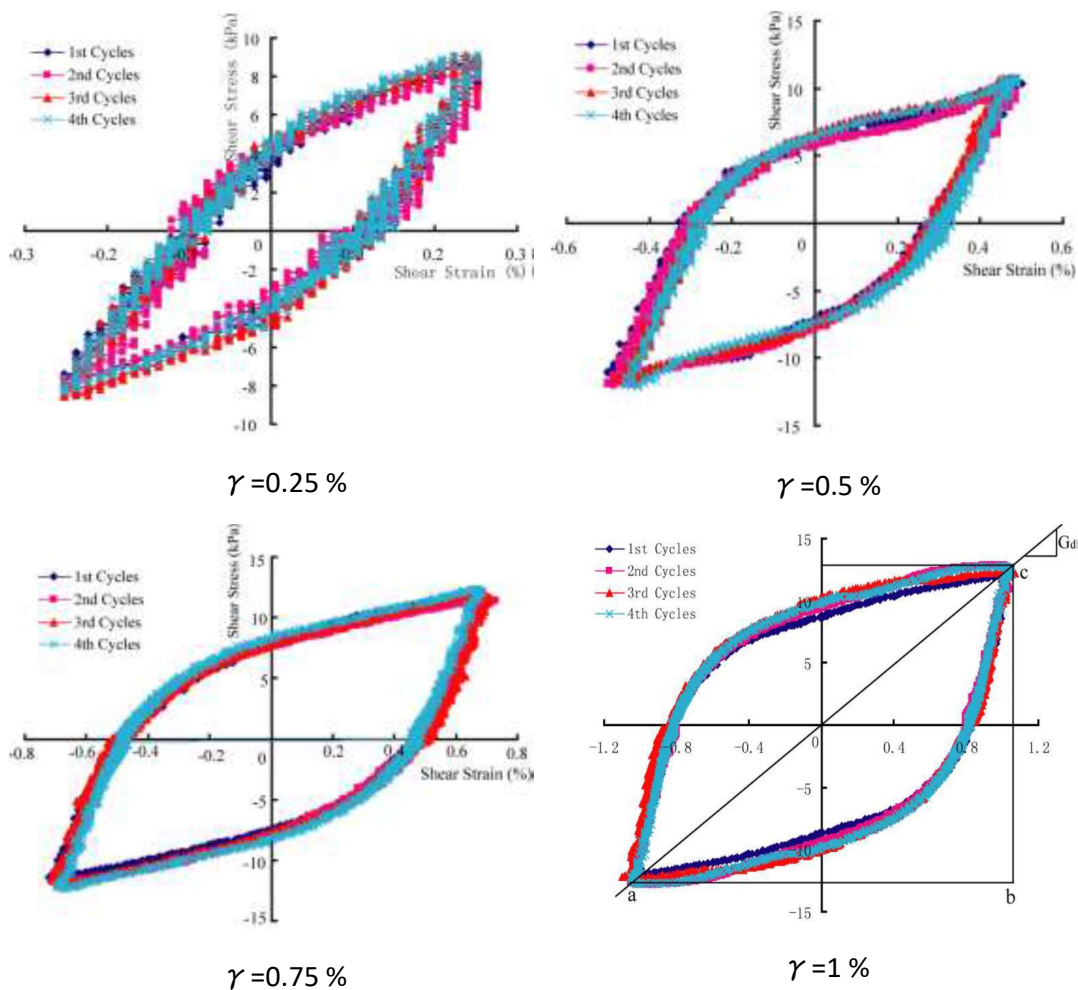
شکل (۲-۲۸) تغییرات مدول برشی بر اساس تعداد سیکل اعمالی بارگذاری در نمونه‌های مختلف تحت اثر ۲ سربار مختلف [1]

همانطور که در شکل ۲-۲۸ مشاهده می‌کنید اثر سربار و سفتی خاک بر مدول برشی خاک کاملاً مشهود بوده و با افزایش سربار و سفتی خاک مقدار مدول برشی افزایش می‌یابد. همچنین اثر تعداد سیکل بارگذاری و رابطه آن با نوع خاک قابل توجه است. این اثر در خاک سست بسیار قابل توجه اما در خاک سفت تقریباً بی‌اثر و در مواردی دارای اثر منفی نیز بوده است و علاوه بر این در سیکل‌های ابتدایی اثر تعداد سیکل بارگذاری مشهود است اما پس از گذشت تعداد مشخصی از سیکل‌های بارگذاری این پارامتر تقریباً بی‌اثر می‌گردد.

در پژوهشی که توسط سیهونگ لیو [27] انجام شد اثر سربار، تعداد سیکل بارگذاری و مقدار کرنش برشی بر پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از کیسه‌های مخصوص حاوی خاک به عنوان جداساز لرزه‌ای پی ساختمان استفاده گردید. با انجام این پژوهش مشخص گردید کیسه‌های حاوی خاک دارای نسبت میرایی بالا و همچنین دارای مدول برشی متنوع در فرکانس‌های مختلف هستند که می‌توانند به عنوان مصالح مناسبی برای جداساز لرزه‌ای در پی ساختمان مورد استفاده



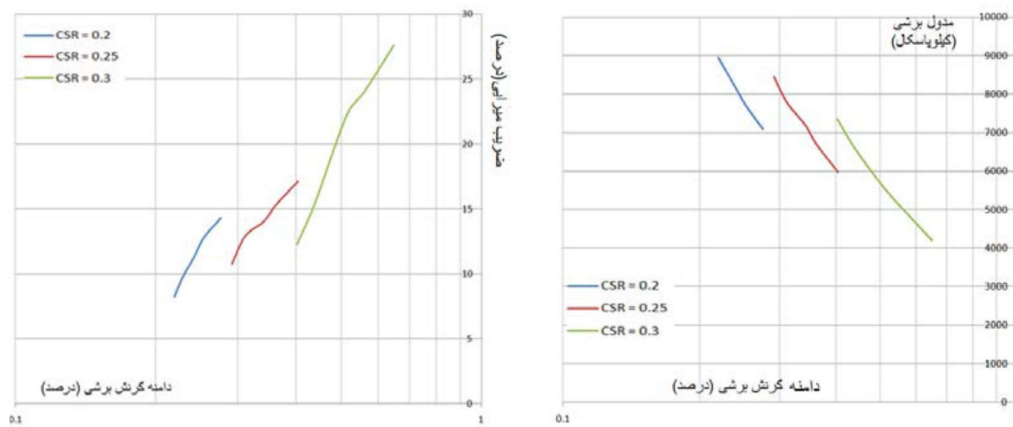
قرار گیرند. در شکل ۲۹-۲ اثر کرنش برشی و تعداد سیکل بارگذاری بر حلقه‌های هیستریزیس مشهود است.



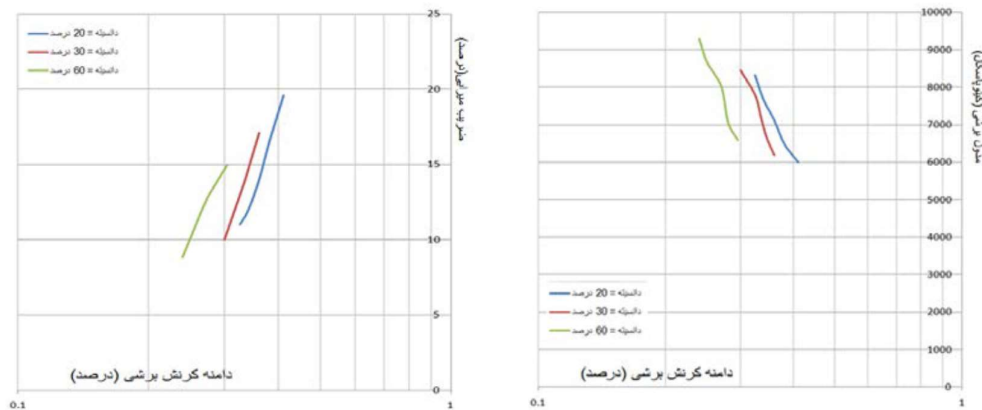
شکل (۲-۲۹) حلقه‌های هیستریزیس کیسه‌های حاوی خاک تحت اثر بار اعمالی عمودی ۵۰ کیلوپاسکال [27]

همانطور که در نمودارهای شکل ۲۹-۲ مشاهده می‌شود با افزایش کرنش برشی سطح زیر نمودار و در نتیجه نسبت میرایی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد سیکل بارگذاری به مقدار ناچیزی شیب حلقه بیشتر شده و در نتیجه مدول برشی افزایش می‌یابد.

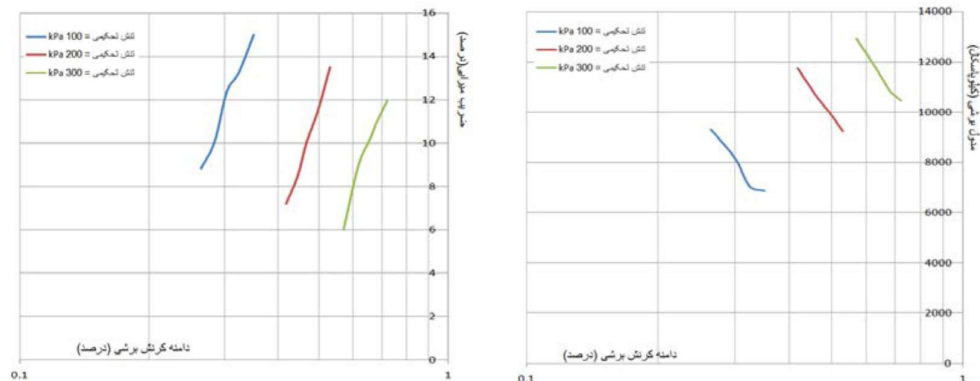
در پژوهش انجام شده توسط فخاریان ۱۳۹۵ [33] عوامل مختلفی از جمله تعداد سیکل بارگذاری، تنش تحکیمی اعمالی، درصد تراکم نسبی خاک و دامنه تنش برشی سیکلی (CSR) بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در نمودارهای شکل‌های ۲-۳۰، ۲-۳۱ و ۲-۳۲ اثر این سه پارامتر بر مدول برشی و درصد میرایی خاک قابل مشاهده است.



شکل (۲-۳۰) اثر CSR بر مدول برشی و درصد میرایی خاک [33]



شکل (۲-۳۱) اثر درصد تراکم نسبی خاک بر مدول برشی و درصد میرایی [33]



شکل (۲-۳۲) اثر تنش تحکیمی وارده بر مدول برشی و درصد میرایی خاک [33]

طبق نمودارهای شکل‌های ۲-۳۰، ۲-۳۱ و ۲-۳۲ با افزایش CSR مدول برشی کاهش و درصد میرایی افزایش یافته است، به این دلیل که با افزایش تنش برشی وارده خاک از خود سختی کمتری نشان داده و در نتیجه میرایی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد تراکم نسبی و تنش تحکیمی مدول برشی افزایش و درصد میرایی کاهش یافته است زیرا با افزایش این ۲ پارامتر مقدار درگیری دانه‌ها بیشتر شده و نمونه سختی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

## ۲-۴-۴- سرعت موج برشی و روش‌های تعیین آن

علاوه بر موارد بررسی شده در زمینه بهسازی با الیاف، تعیین سرعت موج برشی در کرنش‌های کوچک به عنوان یک پارامتر مهم در ارزیابی پتانسیل روانگرایی و بهسازی خاک‌ها و همچنین در طراحی لرزه‌ای فونداسیون‌ها مطرح است که می‌توان آن را در محل و یا از روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری نمود. [34] بنابراین جهت تکمیل دانش دینامیکی در این زمینه، برای محاسبه مقدار مدول برشی حداکثر ( $G_{max}$ )، تغییرات سرعت موج برشی نیز با استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک موجود در سیستم بندرالمنت این

دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تعیین مدول برشی حداکثر در خاک-های ماسه‌ای انجام گرفته است، [35-45] که در این پژوهش‌ها به تاثیر عوامل مختلف بر سرعت موج برشی و مدول برشی پرداخته شده است.

#### • آزمایش ستون تشدید

آزمایش ستون تشدید یکی از اولین و پرکاربردترین روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر است که در آن با اعمال تنش پیچشی در نمونه خاک در کرنش‌های بین  $10^{-2}$  تا  $10^{-4}$ ، فرکانس تشدید خاک شناسایی شده و سپس با استفاده از ابعاد و فرکانس طبیعی نمونه، مدول برشی حداکثر خاک محاسبه می‌شود [46-49] که با توجه به محدوده کم کرنشی، این آزمایش یک آزمایش غیرمخرب تلقی می‌گردد.

#### • آزمایش بندر المنت (المان خمشی)

با پیشرفت در زمینه تولید المان‌های پیزوالکتریک تکنیک‌های ارسال موج در خاک به عنوان راهکار مناسب دیگری برای اندازه‌گیری مدول برشی در کرنش‌های بسیار کوچک خاک معرفی گردید. [34,50] سنسورهای پیزوالکتریک اولین بار توسط لاورنس برای تولید موج‌های فشاری تک‌بعدی استفاده گردید. [50,51] به علت سختی زیاد کریستال‌های پیزوالکتریک و عدم امکان ایجاد تحریک‌های مکانیکی کافی برای انتشار مناسب امواج، اولین بار شیرلی و همپتون [52] استفاده از بندر المنت پیزوسرامیک را راه‌حل مناسب این مشکل بیان نمودند که در آن با استفاده از ارسال موج از یک وجه نمونه (به عنوان فرستنده) و دریافت آن در وجه مقابل (به عنوان گیرنده) سرعت موج برشی تعیین می‌شود. کرنش‌های به وجود آمده در نمونه آزمایشگاهی با استفاده از این روش در حدود  $10^{-5}$  بوده که در مقایسه با محدوده کرنش‌های آزمایش ستون تشدید آزمایش غیرمخرب‌تری محسوب می‌شود و همچنین سادگی، سرعت

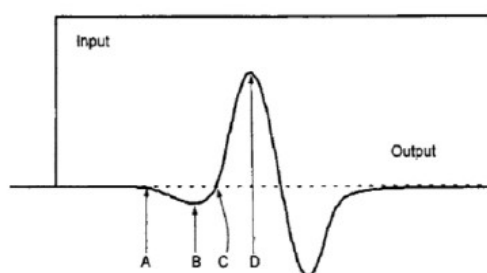
بالای این روش در محاسبه سرعت موج برشی و قابلیت نصب آن روی دستگاه‌های مختلف آزمایشگاهی از مزیت‌های دیگر آن در مقایسه با آزمایش ستون تشدید است. لذا برای محاسبه سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر از دستگاه بندر المنت استفاده گردید. برای این کار مقدار سرعت موج برشی ( $V_s$ ) که رابطه‌ی مستقیمی با مقدار مدول برشی حداکثر دارد، با ارسال موج به درون نمونه و دریافت آن توسط سنسورهای پیزوالکتریک نصب شده روی پدستال‌های مخصوص آزمایش بندرالمنت، محاسبه شده است. بدین ترتیب همانند آزمایش برش ساده سیکلی نمونه تحت اثر سربار مورد نظر قرار گرفته و در این حین تک‌موج سینوسی مطابق شکل ۲-۳۳ از سنسور پیزوالکتریک اول وارد نمونه شده و توسط سنسور پیزوالکتریک دوم دریافت می‌گردد. به طور کلی در این روش با اندازه‌گیری زمان و مسافت طی شده توسط موج برشی با استفاده از رابطه (۲-۲) سرعت موج برشی محاسبه می‌شود.

$$V_s = \frac{L_t}{\Delta T} \quad (2-2)$$

در این رابطه  $L_t$  نشانگر مسافت طی شده توسط موج و برابر ارتفاع نمونه پس از نشست (فاصله نوک تا نوک پیزوالکتریک‌ها)، است و نیز  $\Delta T$ ، زمان رسیدن موج از فرستنده به گیرنده است که شیوه محاسبه‌ی آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

با وجود مطالعه‌های بسیار در ژئوتکنیک با استفاده از بندر المنت همچنان اختلاف در روش‌های تفسیر داده‌های این آزمایش به علت عدم وجود استاندارد مشخص، گاهی منجر به ایجاد تفاوت‌هایی در نتایج و عدم قطعیت‌هایی در آن‌ها می‌گردد. اغلب این اختلاف‌ها به سبب تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری زمان طی شده توسط موج است. [40] پژوهشگران مختلفی به بررسی روش‌های مختلف تفسیر این آزمایش و تفاوت‌های احتمالی در نتایج آن پرداخته‌اند. [51,53,54] مجموعه نظرات این پژوهشگران نشان می‌دهد که یک روش کاملاً ایده‌آل برای تفسیر نتایج وجود ندارد و این نکته همچنان به عنوان یک موضوع قابل بررسی مطرح بوده و مستلزم کمی قضاوت است. [53] به طور کلی زمان طی شده توسط موج برشی، تحت تأثیر منبع تولید موج، نوع خاک و ابعاد نمونه است. [51] در این روش با نمایش موج ارسالی و دریافتی در فضای برحسب زمان و ولتاژ مانند شکل ۲-۳۳ زمان رسیدن موج به صورت فاصله زمانی بین ابتدای

موج ارسالی تا ابتدای موج دریافت شده و یا فاصله زمانی بین نقاط مشخص مانند نقاط بیشینه و یا کمینه موج ارسالی تا نقطه بیشینه و یا کمینه موج دریافتی، محاسبه می‌شود. با توجه به شکل تشخیص زمان رسیدن موج به علت وجود عواملی چون اثر میدان نزدیک خیلی واضح نبوده و هر یک از نقاط A، B، C و D را می‌توان به عنوان نقطه ابتدایی موج دریافتی یا همان اولین نقطه ورود موج در نظر گرفت. در واقع میدان نزدیک، پدیده‌ای است که باعث ظاهر شدن یک تغییر شکل اولیه قبل از تغییر شکل مربوط به موج اصلی می‌شود و اغلب در فواصل نزدیک بین منبع تولید موج و دریافت کننده آشکار می‌شود و با بیشتر شدن فاصله بین فرستنده و دریافت کننده، اثر آن کاهش می‌یابد.



شکل (۲-۳۳) تصویر موج برشی دریافتی تحت اثر پدیده میدان نزدیک [55]

بر اساس یافته‌های ریو [55]، مشخص می‌شود که هر قدر نسبت ارتفاع به قطر نمونه (نسبت لاغری) بیشتر شود، اثر این پدیده به شدت کاهش می‌یابد. اثر انعکاس یا بازتاب موج از جداره‌ها عامل تأثیرگذار دیگر در تفسیر و تشخیص درست زمان موج دریافتی است. انعکاس امواج P از جداره مرزهای نمونه، ممکن است با موج برشی تداخل پیدا کند. [56] شدت این تداخل به ابعاد نمونه بستگی داشته و با انتخاب صحیح آن، می‌توان اثر این موضوع را تا حد زیادی کاهش داد. عامل دیگری که باعث ایجاد اختلال در تفسیر نتایج آزمایش‌های المان خمشی می‌شود، وجود نویز مربوط به تداخل امواج یا همان پدیده cross-talk از امواج الکترومغناطیسی و ارتعاشات محیط است. این پدیده در فاصله بین موج ارسالی و دریافتی و در اثر تداخل این دو موج در محیط‌های رسانا مانند خاک‌های اشباع، به وجود

می‌آید. برای حذف این اثر، می‌توان از روش فیلتر کردن نتایج، استفاده نمود. بدین صورت که با محاسبه نسبت دامنه موج ارسالی و دامنه موج ناشی از cross-talk، می‌توان اثر این پدیده را از موج دریافتی حذف نمود. [55] این فرایند توسط دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال پردازش کننده موج دریافتی صورت می‌پذیرد.

با توجه به موارد بررسی شده در ادبیات فنی مشاهده می‌شود که اثر بهسازی و به ویژه بهسازی با مواد ضایعاتی پلاستیکی بر ویژگی‌های دینامیکی خاک کمتر مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به افزایش تولید پلاستیک در دنیا و افزایش چشمگیر ضایعات و زباله‌های ناشی از آن، در این مطالعه تاثیر پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی که درصد زیادی از تولید پلاستیک را به خود اختصاص می‌دهد بر پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد.





## فصل ۳ : روش تحقیق

### ۳-۱- مقدمه

در این پژوهش از خرده‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن ترفتالات برای بهسازی و تسلیح خاک ماسه‌ای استفاده شده است. در این بخش آزمایش‌هایی برای تعیین ویژگی‌های خاک شامل دانه‌بندی و چگالی ویژه ( $G_s$ ) و همچنین مجموعه آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص خشک خاک ( $\gamma_d$ ) جهت اعمال درصد تراکم نسبی ( $D_r$ ) مورد نظر بر روی خاک انجام گرفته و آزمایش‌های تعیین خصوصیات مسلح‌کننده پت از قبیل چگالی ویژه ( $G_s$ )، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیان شده است. پس از انجام این مراحل خرده‌های پت با اندازه‌های  $1*1$  سانتی‌متر با درصد‌های وزنی مختلف به خاک افزوده شده و نمونه‌های مسلح‌شده و مسلح‌نشده در ۲ درصد تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد ساخته شده و تحت آزمایش‌های برش ساده سیکلی به صورت کرنش کنترل و تحت سربارها و درصد کرنش‌های مختلف قرار گرفته‌اند تا مقادیر پارامترهای دینامیکی خاک در حالت مسلح‌شده و مسلح‌نشده محاسبه گردیده و مقایسه گردند. همینطور در ادامه‌ی این پژوهش با انجام آزمایش‌های بندر المنت سرعت موج برشی در هر نمونه و از آن مقادیر مدول برشی حداکثر محاسبه گردید و با تلفیق با نتایج برش ساده دینامیکی در نتیجه‌گیری نهایی لحاظ گردید. لازم به ذکر است که با انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه‌های مسلح‌شده و مسلح‌نشده پس از اتمام آزمایشات، تاثیر تسلیح خاک ماسه‌ای با پت بر میزان شکستگی دانه‌ها تحت اثر تنش افقی و قائم نیز بررسی گردید.

### ۳-۲- مصالح مورد استفاده

در این پژوهش خاک مورد استفاده خاک ماسه‌ای مربوط به سواحل بندر انزلی و تسلیح‌کننده‌ی مورد استفاده خرده‌های ضایعاتی پت به صورت قطعه‌های بریده‌شده به اندازه‌ی  $1*1$  سانتی‌متر، می‌باشد. در ادامه به بررسی مشخصات و ویژگی‌های خاک و المان تسلیح‌کننده‌ی آن خواهیم پرداخت.

### ۳-۲-۱- ماسه بندر انزلی

در این مطالعه خاک استفاده شده، خاک ماسه‌ای گردگوشه یکنواخت از نوع کربناته بوده و مربوط به بندر استحصالی انزلی در ایران می‌باشد. در پژوهش حاضر تمامی آزمایش‌ها بر روی این خاک در حالت خشک انجام شده است. طبق آزمایش تعیین وزن مخصوص مواد جامد خاک بر اساس ASTM D854-87، چگالی ویژه‌ی ماسه ۲/۶۵ می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی این ماسه نیز بر اساس استاندارد ASTM D422-87 انجام شده و در شکل ۳-۳، نمودار دانه‌بندی این خاک رسم شده است. بر اساس نمودار رسم شده مقدار D50 (متوسط اندازه‌ی ذرات خاک) ۰/۱۷ میلی‌متر، ضریب انحنای خاک ۱/۰۷ و ضریب یکنواختی آن ۱/۲۵ می‌باشد که در قسمت آزمایشات تعیین مشخصات مصالح مصرفی شرح داده خواهد شد. لازم به ذکر است ماسه‌ی مورد استفاده در سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار دارد. در جدول ۱-۳، خصوصیات فیزیکی ماسه‌ی مورد استفاده بیان شده است. همچنین در شکل ۱-۳ خاک مورد استفاده قابل مشاهده است.

جدول (۱-۳) مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

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 <sup>3</sup>	۱/۳۳
$(\gamma_d)_{max}$	D698	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۶
D <sub>50</sub>	D422-87	mm	۰/۱۷
C <sub>u</sub>	D422-87	-	۱/۲۵
C <sub>c</sub>	D422-87	-	۱/۰۷



شکل (۱-۳) خاک ماسه‌ای مورد استفاده

### ۳-۲-۲- پلی اتیلن ترفتالات یا پت (PET)

در این پژوهش از قطعات ضایعاتی پت که غالب آن‌ها را قوطی‌های نوشابه و آب معدنی تشکیل می‌دادند، برای تسلیح خاک استفاده گردید. به دلیل محدودیتی که در ابعاد نمونه مورد آزمایش وجود داشت به ناچار فقط از قطعات برش خورده ۱\*۱ سانتی‌متر برای تسلیح خاک استفاده گردید. همچنین ضخامت این قطعات به اندازه ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. این قطعات در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) قطعات خرد شده پت استفاده شده برای تسلیح خاک

در جدول ۲-۳ و ۳-۳ به مشخصات فیزیکی و مکانیکی پت [57,58] 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 قابل‌بازیافت بودن اشاره کرد.

جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی پت

پارامتر	کد آزمایش ASTM	واحد	مقدار
چگالی	D792	gr/cm <sup>3</sup>	1.3806
جذب آب	D570	%	0.1

جدول (۳-۳) مشخصات مکانیکی پت

پارامتر	کد آزمایش ASTM	واحد	مقدار
Gs	D792	-	1.38
مقاومت کششی در هنگام گسیختگی	D638	MPa	79
مدول کششی	D638	MPa	2.88
تغیر طول در هنگام گسیختگی	D638	%	70
مقاومت خمشی	D790	MPa	103
مدول خمشی	D790	MPa	2.88
استحکام ضربه‌ی ایزوتوپ	D259	J/cm	0.37
سختی راک ول	D785	-	R117
ضریب زاویه‌ی اصطکاک	-	Static-dynamic	0.19-0.25

### ۳-۲-۳- آزمایشات تعیین مشخصات مصالح مصرفی

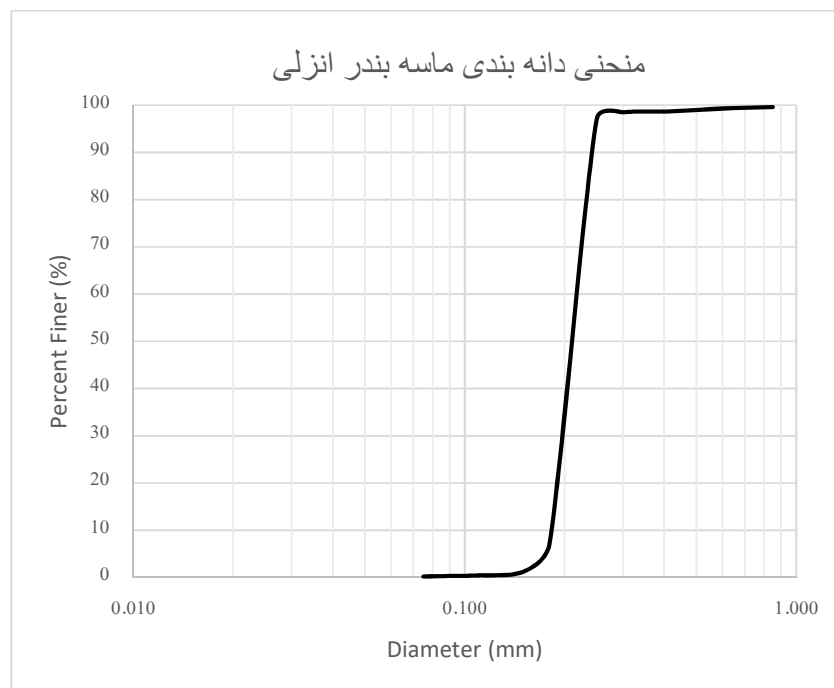
#### ❖ آزمایش دانه‌بندی خاک

این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM D 422-87 انجام پذیرفت. کوچک‌ترین سایز چشمه‌های الک به کار رفته در این آزمایش مربوط به الک مش ۲۰۰ بود و با توجه به اینکه درصد دانه‌های عبوری از این الک بسیار ناچیز بود (حدوداً ۰,۲٪ وزنی خاک)، پس خاک فاقد ریزدانه محسوب می‌گردد. وزن خاک مورد استفاده در آزمایش دانه‌بندی برابر با ۵۰۰ گرم بوده که با توجه به سایز دانه‌ها الک‌های مناسب برای این آزمایش انتخاب گردید و با انجام آزمون نتایج طبق جدول ۳-۴ به دست آمد.

جدول (۳-۴) اطلاعات آزمایش دانه بندی خاک

سایز چشمه های الک (میلی متر)	وزن الک (گرم)	وزن کلی الک و خاک مانده (گرم)	وزن خاک مانده روی الک (گرم)	درصد تجمعی خاک باقیمانده	درصد عبوری از هر الک
0.850	489	491	2	0.4	99.6
0.600	490	491.5	1.5	0.7	99.3
0.425	440	443	3	1.3	98.7
0.300	293	294	1	1.5	98.5
0.250	436.5	443.5	7	2.9	97.1
0.180	299	749	450	92.9	7.1
0.150	287.5	317	29.5	98.8	1.2
0.106	413.5	417.5	4	99.6	0.4
0.090	389.5	390	0.5	99.7	0.3
0.075	280.5	281	0.5	99.8	0.2
Pan	563	564	1	100	0

بر طبق نتایج این آزمایش منحنی دانه‌بندی طبق شکل ۳-۳ به دست آمد.



شکل (۳-۳) منحنی دانه‌بندی ماسه بندر انزلی

همانطور که در منحنی دانه‌بندی مشاهده می‌کنید غالب دانه‌های خاک در یک بازه ابعادی بوده و محدوده توزیع دانه محدود می‌باشد، از این رو این خاک ماسه‌ای در گروه‌بندی یونیفاید<sup>۱</sup> یا متحد در دسته ماسه بد دانه‌بندی شده یا SP قرار می‌گیرد.

همچنین با استفاده از روش دانه‌بندی با ال‌ک مقادیر ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنای ( $C_c$ ) خاک ماسه‌ای نیز به صورت زیر به دست آمد.

$$C_u = 1.25$$

$$C_c = 1.07$$

<sup>1</sup> USCS : Unified Soil Classification System

### ❖ آزمایش تعیین چگالی ویژه خاک ( $G_s$ ):

آزمایش تعیین چگالی ویژه بر اساس استاندارد ASTM D 854-87 و با استفاده از رابطه (۳-۱) محاسبه گردید.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{رابطه (۳-۱):}$$

آزمایش به این صورت انجام شد که وزن مشخصی از خاک درون یک پیکنومتر حاوی آب مقطر ریخته شد که پس از ته نشینی خاک درون آب و خروج هوای موجود در خاک از آن، مقدار افزایش حجم درون پیکنومتر مشاهده و به عنوان حجم خاک در نظر گرفته شد، سپس با داشتن وزن و حجم خاک مقدار  $\gamma_s$  محاسبه گردید و با توجه به اینکه مقدار  $\gamma_w$  برابر ۱ گرم بر سانتی متر مکعب است، مقدار  $G_s$  برابر با ۲/۶۸ محاسبه شد.

### ❖ آزمایش تعیین چگالی خشک حداکثر ( $\gamma_{d(max)}$ ) و حداقل ( $\gamma_{d(min)}$ ) خاک جهت ساخت

نمونه‌های خاک در ۲ درصد تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰:

برای انجام این آزمایش پس از اختلاط مورد نظر مواد افزودنی و آماده کردن مقدار مورد نیاز نمونه، آن را درون یک ظرف مخصوص توده حجمی ریخته شد به این ترتیب که برای محاسبه‌ی وزن مخصوص خشک حداکثر، نمونه در تعداد لایه‌های مختلف ریخته شد و با میزان کوبش‌های مختلف توسط وزنه و چکش مخصوص مقدار حداکثر تراکم را در حالت‌های مختلف محاسبه گردید و میانگین آن‌ها به عنوان وزن مخصوص خشک حداکثر انتخاب شد و همچنین برای محاسبه وزن مخصوص خشک حداقل نیز با بارها تکرار نمونه از ارتفاع‌های مختلف بدون هیچگونه تراکم درون ظرف توده حجمی ریخته شد و پس از پر شدن ظرف توده حجمی، مقادیر وزن مخصوص خشک حداقل را در حالت‌های مختلف محاسبه شده و میانگین آن‌ها به عنوان وزن مخصوص خشک حداقل در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است که در هر دو حالت ظرف کاملاً از نمونه پر شده و سپس وزن کشی گردید و با داشتن وزن خاک و حجم ظرف که به عنوان حجم خاک در نظر گرفته شد، مقدار وزن مخصوص را محاسبه



گردید.

پس از محاسبه وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر خاک مسلح نشده و مسلح شده در درصد اختلاط- های ۰/۵، ۱ و ۲ درصد با استفاده از رابطه (۲-۳) وزن مخصوص خشک در درصد تراکم های ۳۰ و ۶۰ درصد در همهی نمونه های مسلح شده و مسلح نشده به دست آمد.

$$D_r = \frac{\gamma_{d_{max}}}{\gamma_d} * \frac{\gamma_d - \gamma_{d_{min}}}{\gamma_{d_{max}} - \gamma_{d_{min}}} \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

تمامی این مقادیر در جدول (۵-۳) قابل مشاهده است.

جدول (۵-۳) تعیین چگالی خشک حداکثر  $(\gamma(d(max))$  و حداقل  $(\gamma(d(min))$  و چگالی خشک در درصد تراکم های ۳۰ و ۶۰ درصد

چگالی خشک در درصد تراکم ۶۰٪ (گرم بر سانتی- مترمکعب)	چگالی خشک در درصد تراکم ۳۰٪ (گرم بر سانتی- مترمکعب)	چگالی خشک حداکثر (گرم بر سانتی مترمکعب)	چگالی خشک حداقل (گرم بر سانتی- مترمکعب)	درصد اختلاط وزنی پت (٪)	ردیف
۱/۴۶۱	۱/۳۹۴	۱/۵۹۵	۱/۳۲۸	۰	۱
۱/۴۵۵	۱/۳۸۸	۱/۵۹۲	۱/۳۲۰	۰/۵	۲
۱/۴۴۳	۱/۳۷۵	۱/۵۸۲	۱/۳۰۷	۱	۳
۱/۴۳۱	۱/۳۶۴	۱/۵۶۷	۱/۲۹۷	۲	۴

#### ❖ تعیین چگالی ویژه پت

برای این آزمایش نیز همانند چگالی ویژه خاک قطعات برش خورده ۱\*۱ سانتی متر درون پیکنومتر حاوی آب مقطر ریخته شد و با محاسبه افزایش حجم پیکنومتر و با داشتن وزن قطعات پت وزن مخصوص قطعات به دست آمد و طبق رابطه (۳-۳) مقدار چگالی ویژه پت محاسبه شد.

$$G_s = \frac{\gamma_{pet}}{\gamma_w} = 1.38 \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

### ۳-۳- آماده سازی نمونه ها

مقدار مورد نیاز قطعات خردشده پت از قبل آماده شد و همچنین ماسه بندر انزلی تهیه گردید و پس از انجام آزمایشات اولیه بر روی مصالح، ماسه و پت برای نمونه سازی آماده گردید.

پس از محاسبه مقادیر چگالی خشک حداکثر و حداقل و سپس محاسبه مقادیر چگالی خشک در درصد تراکم های ۳۰ و ۶۰ درصد در هر حالت نمونه، مقدار خاک مورد نیاز برای ساخت نمونه با توجه به ابعاد باکس دستگاه (استوانه با قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۴ سانتی متر) به دست آمد. همچنین مقدار وزنی پت مورد نیاز برای هر نمونه در نمونه های مسلح محاسبه گردید. نمونه ها با استفاده از روش های تجربی به این ترتیب ساخته شد که مقدار وزنی هر نمونه به ۴ قسمت وزنی تقسیم شد و تعداد ضربه مورد نیاز در هر قسمت برای رسیدن به درصد تراکم مورد نظر طوری محاسبه گردید که در نهایت ارتفاع هر لایه به ۱ سانتی متر برسد و ارتفاع نهایی نمونه ۴ سانتی متر باشد. سپس هر نمونه در سربارها و درصد کرنش های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت ذرات خردشده نمونه برای انجام آزمایشات دانه بندی، بسته بندی و نگهداری گردید.

لازم به ذکر است که با آزمون و خطا نمونه طوری ساخته شد که پس از اعمال هر سربار و پس از نشست حاصل از آن سربار، ارتفاع نمونه به مقدار مورد نظر آزمایش برش (۴ سانتی متر) برسد و برای ساخت هر نمونه از خاک جدید و خردنشده استفاده گردید.

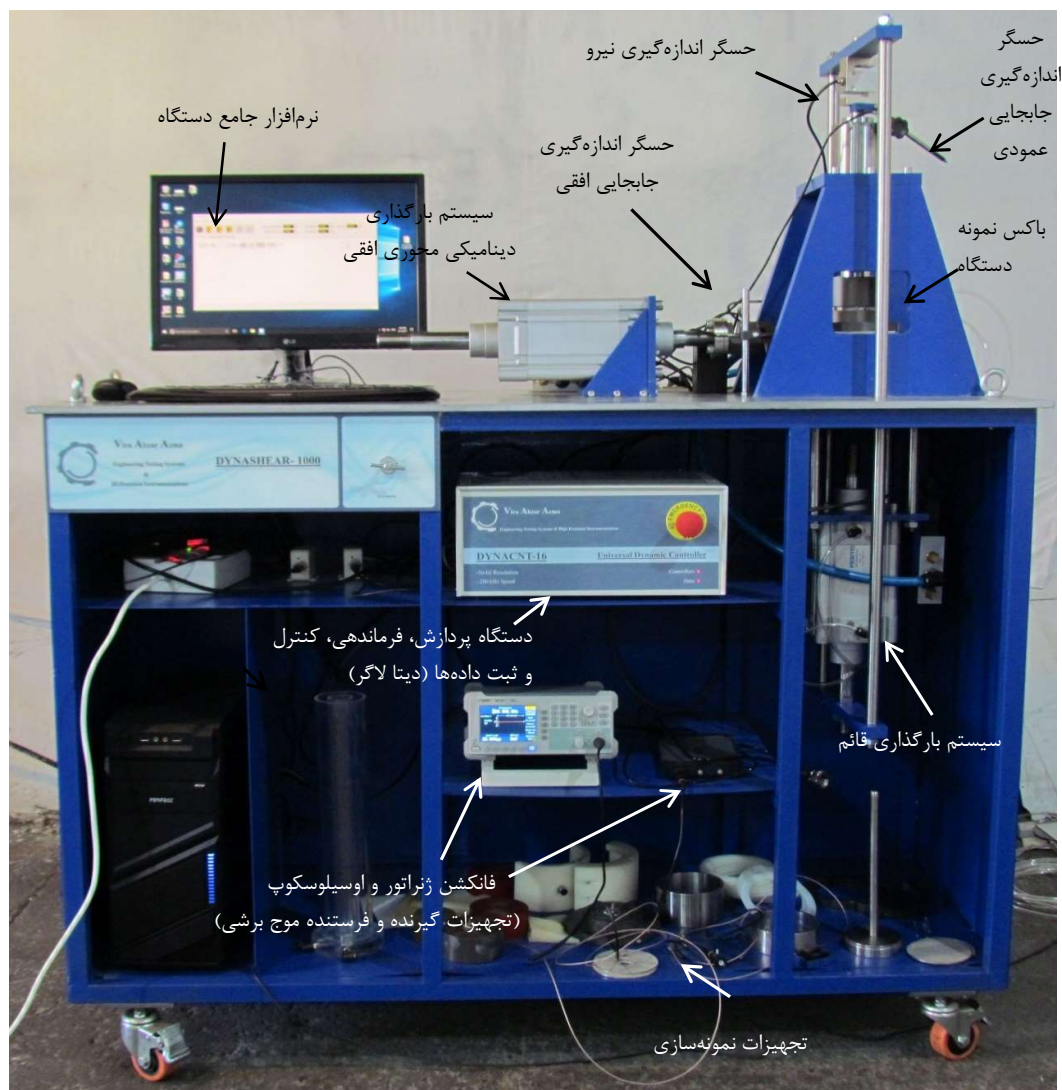
### ۳-۴- دستگاه برش ساده ی دینامیکی

همانطور که گفته شد بسیاری از مسائل در مهندسی عمران نیازمند دانشی در مورد پارامترهایی از خاک است که تحت بار اعمالی ناشی از زلزله قرار می گیرند و متاسفانه در حال حاضر نامعینی های زیادی در رابطه با ویژگی های دینامیکی خاک وجود دارد. در بسیاری از بارگذاری های دینامیکی واقعی در طبیعت

همچون ارتعاش زمین، جهت تنش‌های برشی وارد بر خاک مرتبا در حال تغییر بوده و با استفاده از دستگاه‌های دینامیکی همچون دستگاه سه‌محوری امکان برقراری وضعیتی معادل با وضعیت واقعی تنش‌ها در عمل میسر نمی‌باشد. همچنین در عمل، نمونه تحت شرایط  $K_0$  تحکیم یافته و تغییر شکل‌ها در حالت کرنش صفحه‌ای رخ می‌دهند که این امر نیز قابل مدل‌سازی توسط دستگاه سه‌محوری نمی‌باشد. با استفاده از دستگاه برش ساده امکان مدل‌سازی شرایط مذکور بر روی نمونه‌ی خاک میسر می‌باشد. در دستگاه برش ساده صفحه‌ی لغزش به نمونه خاک تحمیل نشده و امکان تغییر شکل برشی میسر شده و با توجه به اینکه نمونه توسط حلقه‌های با قطر کم (۲ میلی‌متر) مهار شده، گسیختگی با دقت مناسبی می‌تواند در هر ارتفاعی از نمونه رخ دهد. همچنین امکان کنترل و یا اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای و زهکشی آن نیز میسر شده است و امکان بارگذاری نمونه خاک تحت اثر الگوهای مختلف بارگذاری ساده مونتونیک تا الگوهای بارگذاری پیچیده‌تر دینامیکی تا محدوده فرکانس بارگذاری بسیار پایین یا بسیار بالا (تا حداکثر ۲۰ هرتز) فراهم شده است. از جمله ویژگی‌های دیگر این دستگاه امکان انجام انواع آزمایش‌های دینامیکی در شرایط مختلف بر روی خاک‌های غیراشباع با کنترل و یا اعمال مکش بافتی را دارد و علاوه بر این دستگاه برش ساده دینامیکی قادر به بارگذاری دینامیکی نمونه خاک در شرایط با حجم ثابت می‌باشد. به واسطه حلقه‌های دربرگیرنده خاک، قطر نمونه خاک در مرحله بارگذاری دینامیکی ثابت مانده و میزان ارتفاع نمونه خاک را نیز می‌توان با توجه به محور بارگذاری قائم ثابت نگه داشت. رینگ‌های دربرگیرنده باعث شده تا شرایط  $K_0$  برای نمونه خاک فراهم شود و این رینگ‌ها می‌توانند در مرحله بارگذاری دینامیکی بر روی یکدیگر با کمترین اصطکاک حرکت نمایند. همچنین امکان تعبیه حسگرهای ارسال و دریافت امواج (Bender Element) در پدستال‌های بالا و پایین دستگاه وجود دارد تا بتوان رفتار دینامیکی خاک را در محدوده کرنش‌های بسیار کوچک (کمتر از  $10^{-3}$ ) بررسی نمود.

از این رو در این پژوهش با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی سعی شد تعدادی از پارامترهای دینامیکی خاک مورد بررسی قرار گیرد. در این دستگاه به این علت که بارگذاری افقی بر روی نمونه‌ها

به صورت رفت و برگشتی صورت می‌گیرد، نتایج به صورت حلقه‌های بسته‌ای ظاهر خواهد شد که به آن‌ها حلقه‌های هیستریزیس<sup>۱</sup> نیز گفته می‌شود. در این منحنی‌ها شیب، معرف مدول برشی خاک و سطح زیر منحنی، معرف نسبت میرایی خاک می‌باشد. در ادامه در شکل ۳-۴ نمای کلی دستگاه و جزئیات بخش‌های مختلف و نحوه‌ی عملکرد دستگاه شرح داده خواهد شد.



شکل (۳-۴) نمای کلی دستگاه برش ساده دینامیکی

<sup>1</sup> hysteresis loops

### ۳-۴-۲- محدوده کاربرد دستگاہ

- بررسی رفتار دینامیکی خاک‌ها در وضعیت کرنش مسطح
- امکان بارگذاری دینامیکی خاک تا فرکانس ۲۰ هرتز
- امکان بارگذاری دینامیکی خاک در شرایط حجم ثابت
- امکان اعمال الگوهای مختلف بارگذاری دینامیکی به صورت تابعی از تنش و یا تابعی از تغییر

شکل

- امکان اندازه‌گیری و کنترل فشار آب حفره‌ای در انجام آزمایش‌های دینامیکی اشباع
- امکان اندازه‌گیری و یا کنترل پارامترهای مکش بافتی، درجه‌ی اشباع، و انجام آزمایش‌ها بر روی

خاک‌های غیراشباع

- استفاده از Bender Element

### ۳-۵- نحوه انجام آزمایش‌ها

طبق توضیحات بخش‌های گذشته نمونه‌ها آماده شد. باید به این موضوع اشاره کرد که مقدار مورد نیاز نمونه بر اساس وزن محاسبه‌شده‌ی آن تهیه گردید و ساخت نمونه داخل باکس برش دستگاہ انجام شد. بدین ترتیب آزمایش به شرح زیر انجام شد:

۱- ابتدا با توجه به محدودیت فضا در محل قرارگیری باکس برش دستگاہ، صفحه‌ی باکس برش با باز شدن پیچ‌های آن از دستگاہ جدا شده و روی میز دیگری قرار داده شد.

۲- قسمت پایین غشاء لاستیکی دور پله موجود بر پداستال پایین ثابت شد و سپس حلقه فلزی پایین روی غشاء قرار گرفت و با پیچ شدن ۲ قسمت حلقه روی یکدیگر، غشاء کاملاً مهار گردید تا از جای خود خارج نشود.

۳- تعداد مورد نیاز حلقه‌های تفلونی دربرگیرنده‌ی نمونه دور غشاء لاستیکی به طوری که به ارتفاع مورد نظر برسند روی هم قرار داده شد و ۳ میله‌ی پلاستیکی تعبیه شده در ۳ سوراخ موجود بر هر حلقه وارد گردید تا هنگام نمونه‌سازی حلقه‌های تفلونی روی هم تثبیت شوند و جابجا نگردند.

۴- دو تکه مخصوص نمونه‌سازی که به شکل نیم استوانه بودند به دور حلقه‌ها قرار گرفت و با پیچ به یکدیگر متصل گردید. لازم به ذکر است که روی این استوانه یک شیر قرار داده شده که با اتصال شلنگ مخصوص سیستم خلأ یا مکش دستگاه و با ایجاد نیروی مکش، غشاء لاستیکی روی حلقه‌ها چسبیده و هنگام نمونه‌سازی مانع ایجاد خطا توسط غشاء می‌گردد. پس برای ایجاد محیطی آب‌بند برای نیروی مکش، پیچ‌های روی استوانه کاملاً محکم شد. (این استوانه هم برای تثبیت حلقه‌ها و جلوگیری از لغزش و هم برای ایجاد کشش و جذبیت غشاء روی حلقه‌ها استفاده می‌گردد).

۵- نمونه به صورت ذکر شده در قسمت نمونه‌سازی در فضای باکس برش آماده شد و پس از آماده‌سازی نمونه ابتدا استوانه دو تکه از دور نمونه باز شده، سپس میله‌های لاستیکی از سوراخ‌های روی حلقه‌های تفلونی خارج گردید تا در هنگام آزمایش حلقه‌ها بتوانند روی هم بلغزند.

۶- صفحه‌ی پایین دستگاه با پیچ‌های آن روی دستگاه ثابت شد و پس از آن با استفاده از نرم‌افزار دستگاه، باکس برش در نقطه‌ی صفر خود قرار داده شد تا محور جعبه‌ی برش دقیقاً زیر محور اهرم بارگذاری عمودی قرار گیرد و مجدداً با استفاده از نرم‌افزار دستگاه اهرم بارگذاری عمودی به پایین حرکت داده شد و مقدار ناچیزی سربار عمودی روی نمونه قرار گرفت تا نمونه ثابت گردد.

۷- غشاء به بالا کشیده شد و دور پداستال بالا انداخته شد و حلقه‌ی فلزی بالا همانند پداستال پایین روی غشاء انداخته شده و با پیچ کردن دو قسمت آن روی هم قسمت بالای غشاء نیز محکم گردید.

۸- پس از آن به صورت پله‌ای سربار قائم اضافه و به مقدار مورد نظر رسانده شد.

۹- پس از ثابت شدن مقدار سربار قائم روی نمونه ابتدا مقدار بار دینامیکی یا مقدار کرنش مورد نظر (با توجه به تنش کنترل یا کرنش کنترل بودن آزمایش) و فرکانس آزمایش تنظیم، سپس شرایط پایان آزمایش نظیر تعداد سیکل و ... تعیین شد و آزمایش آغاز گردید. لازم به ذکر است در پایان آزمایش

نتایج آزمایش تحکیم و بارگذاری دینامیکی افقی به صورت فایل Excel مستخرج گردید. به منظور اجرای آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی نمونه‌ها، برنامه‌ریزی، مشخص کردن نوع آزمایش و مشخصات آزمایش، هر آزمایش دارای کد مخصوص به خود می‌باشد که در جدول (۳-۶) مشخص شده است.

لازم به ذکر است که کد آزمایش شامل ۶ پارامتر است که پارامتر اول با حرف C<sup>۱</sup> به معنی آزمایش سیکلی، در پارامتر دوم یا حرف U<sup>۲</sup> به معنی بهسازی نشده و حرف T<sup>۳</sup> به معنی بهسازی شده، پارامتر سوم درصد اختلاط وزنی پت، پارامتر چهارم درصد تراکم نمونه، پارامتر پنجم مقدار سربار قائم و پارامتر ششم دامنه افقی رفت و برگشت بارگذاری سیکلی می‌باشد.

به طور مثال C-U-0-60-300-0.1 معرف نمونه بهسازی نشده با درصد تراکم نسبی ۶۰ درصد که تحت سربار قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و در کرنش برشی ۰٫۱ میلی‌متر تحت آزمایش برش ساده سیکلی قرار می‌گیرد.

جدول (۳-۶) برنامه آزمایشات سیکلی انجام شده

ردیف	کد	درصد اختلاط وزنی پت (%)	درصد تراکم (%)	مقدار سربار (Kpa)	دامنه (mm)
۱	C-U-0-30-100-0.01	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۰۱
۲	C-U-0-30-100-0.02	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۰۲
۳	C-U-0-30-100-0.05	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۰۵
۴	C-U-0-30-100-0.1	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۱
۵	C-U-0-30-100-0.5	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۶	C-U-0-30-100-1	۰	۳۰	۱۰۰	۱

Cyclic <sup>۱</sup>Untreated <sup>۲</sup>Treated <sup>۳</sup>

۷	C-U-0-30-100-2	۰	۳۰	۱۰۰	۲
۸	C-U-0-30-100-3	۰	۳۰	۱۰۰	۳
۹	C-U-0-30-100-4	۰	۳۰	۱۰۰	۴
۱۰	C-U-0-30-200-0.01	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۰۱
۱۱	C-U-0-30-200-0.02	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۰۲
۱۲	C-U-0-30-200-0.05	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۰۵
۱۳	C-U-0-30-200-0.1	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۱
۱۴	C-U-0-30-200-0.5	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۱۵	C-U-0-30-200-1	۰	۳۰	۲۰۰	۱
۱۶	C-U-0-30-200-2	۰	۳۰	۲۰۰	۲
۱۷	C-U-0-30-200-3	۰	۳۰	۲۰۰	۳
۱۸	C-U-0-30-200-4	۰	۳۰	۲۰۰	۴
۱۹	C-U-0-30-300-0.01	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۰۱
۲۰	C-U-0-30-300-0.02	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۰۲
۲۱	C-U-0-30-300-0.05	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۰۵
۲۲	C-U-0-30-300-0.1	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۱
۲۳	C-U-0-30-300-0.5	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۲۴	C-U-0-30-300-1	۰	۳۰	۳۰۰	۱
۲۵	C-U-0-30-300-2	۰	۳۰	۳۰۰	۲
۲۶	C-U-0-30-300-3	۰	۳۰	۳۰۰	۳
۲۷	C-U-0-30-300-4	۰	۳۰	۳۰۰	۴
۲۸	C-U-0-60-100-0.01	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۰۱
۲۹	C-U-0-60-100-0.02	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۰۲
۳۰	C-U-0-60-100-0.05	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۰۵
۳۱	C-U-0-60-100-0.1	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۱
۳۲	C-U-0-60-100-0.5	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۳۳	C-U-0-60-100-1	۰	۶۰	۱۰۰	۱
۳۴	C-U-0-60-100-2	۰	۶۰	۱۰۰	۲
۳۵	C-U-0-60-100-3	۰	۶۰	۱۰۰	۳
۳۶	C-U-0-60-100-4	۰	۶۰	۱۰۰	۴



۳۷	C-U-0-60-200-0.01	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۰۱
۳۸	C-U-0-60-200-0.02	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۰۲
۳۹	C-U-0-60-200-0.05	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۰۵
۴۰	C-U-0-60-200-0.1	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۱
۴۱	C-U-0-60-200-0.5	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۴۲	C-U-0-60-200-1	۰	۶۰	۲۰۰	۱
۴۳	C-U-0-60-200-2	۰	۶۰	۲۰۰	۲
۴۴	C-U-0-60-200-3	۰	۶۰	۲۰۰	۳
۴۵	C-U-0-60-200-4	۰	۶۰	۲۰۰	۴
۴۶	C-U-0-60-300-0.01	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۰۱
۴۷	C-U-0-60-300-0.02	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۰۲
۴۸	C-U-0-60-300-0.05	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۰۵
۴۹	C-U-0-60-300-0.1	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۱
۵۰	C-U-0-60-300-0.5	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۵۱	C-U-0-60-300-1	۰	۶۰	۳۰۰	۱
۵۲	C-U-0-60-300-2	۰	۶۰	۳۰۰	۲
۵۳	C-U-0-60-300-3	۰	۶۰	۳۰۰	۳
۵۴	C-U-0-60-300-4	۰	۶۰	۳۰۰	۴
۵۵	C-T-0.5-30-100-0.01	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۰۱
۵۶	C-T-0.5-30-100-0.02	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۰۲
۵۷	C-T-0.5-30-100-0.05	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۰۵
۵۸	C-T-0.5-30-100-0.1	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۱
۵۹	C-T-0.5-30-100-0.5	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۶۰	C-T-0.5-30-100-1	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۱
۶۱	C-T-0.5-30-100-2	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۲
۶۲	C-T-0.5-30-100-3	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۳
۶۳	C-T-0.5-30-100-4	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۴
۶۴	C-T-0.5-30-200-0.01	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۰۱
۶۵	C-T-0.5-30-200-0.02	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۰۲
۶۶	C-T-0.5-30-200-0.05	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۰۵

۶۷	C-T-0.5-30-200-0.1	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۱
۶۸	C-T-0.5-30-200-0.5	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۶۹	C-T-0.5-30-200-1	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۱
۷۰	C-T-0.5-30-200-2	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۲
۷۱	C-T-0.5-30-200-3	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۳
۷۲	C-T-0.5-30-200-4	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۴
۷۳	C-T-0.5-30-300-0.01	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۰۱
۷۴	C-T-0.5-30-300-0.02	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۰۲
۷۵	C-T-0.5-30-300-0.05	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۰۵
۷۶	C-T-0.5-30-300-0.1	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۱
۷۷	C-T-0.5-30-300-0.5	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۷۸	C-T-0.5-30-300-1	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۱
۷۹	C-T-0.5-30-300-2	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۲
۸۰	C-T-0.5-30-300-3	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۳
۸۱	C-T-0.5-30-300-4	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۴
۸۲	C-T-0.5-60-100-0.01	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۰۱
۸۳	C-T-0.5-60-100-0.02	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۰۲
۸۴	C-T-0.5-60-100-0.05	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۰۵
۸۵	C-T-0.5-60-100-0.1	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۱
۸۶	C-T-0.5-60-100-0.5	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۸۷	C-T-0.5-60-100-1	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۱
۸۸	C-T-0.5-60-100-2	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۲
۸۹	C-T-0.5-60-100-3	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۳
۹۰	C-T-0.5-60-100-4	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۴
۹۱	C-T-0.5-60-200-0.01	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۰۱
۹۲	C-T-0.5-60-200-0.02	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۰۲
۹۳	C-T-0.5-60-200-0.05	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۰۵
۹۴	C-T-0.5-60-200-0.1	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۱
۹۵	C-T-0.5-60-200-0.5	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۹۶	C-T-0.5-60-200-1	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۱

۹۷	C-T-0.5-60-200-2	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۲
۹۸	C-T-0.5-60-200-3	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۳
۹۹	C-T-0.5-60-200-4	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۴
۱۰۰	C-T-0.5-60-300-0.01	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۰۱
۱۰۱	C-T-0.5-60-300-0.02	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۰۲
۱۰۲	C-T-0.5-60-300-0.05	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۰۵
۱۰۳	C-T-0.5-60-300-0.1	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۱
۱۰۴	C-T-0.5-60-300-0.5	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۱۰۵	C-T-0.5-60-300-1	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۱
۱۰۶	C-T-0.5-60-300-2	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۲
۱۰۷	C-T-0.5-60-300-3	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۳
۱۰۸	C-T-0.5-60-300-4	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۴
۱۰۹	C-T-1-30-100-0.01	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۰۱
۱۱۰	C-T-1-30-100-0.02	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۰۲
۱۱۱	C-T-1-30-100-0.05	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۰۵
۱۱۲	C-T-1-30-100-0.1	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۱
۱۱۳	C-T-1-30-100-0.5	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۱۱۴	C-T-1-30-100-1	۱	۳۰	۱۰۰	۱
۱۱۵	C-T-1-30-100-2	۱	۳۰	۱۰۰	۲
۱۱۶	C-T-1-30-100-3	۱	۳۰	۱۰۰	۳
۱۱۷	C-T-1-30-100-4	۱	۳۰	۱۰۰	۴
۱۱۸	C-T-1-30-200-0.01	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۰۱
۱۱۹	C-T-1-30-200-0.02	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۰۲
۱۲۰	C-T-1-30-200-0.05	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۰۵
۱۲۱	C-T-1-30-200-0.1	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۱
۱۲۲	C-T-1-30-200-0.5	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۱۲۳	C-T-1-30-200-1	۱	۳۰	۲۰۰	۱
۱۲۴	C-T-1-30-200-2	۱	۳۰	۲۰۰	۲
۱۲۵	C-T-1-30-200-3	۱	۳۰	۲۰۰	۳
۱۲۶	C-T-1-30-200-4	۱	۳۰	۲۰۰	۴

۱۲۷	C-T-1-30-300-0.01	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۰۱
۱۲۸	C-T-1-30-300-0.02	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۰۲
۱۲۹	C-T-1-30-300-0.05	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۰۵
۱۳۰	C-T-1-30-300-0.1	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۱
۱۳۱	C-T-1-30-300-0.5	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۱۳۲	C-T-1-30-300-1	۱	۳۰	۳۰۰	۱
۱۳۳	C-T-1-30-300-2	۱	۳۰	۳۰۰	۲
۱۳۴	C-T-1-30-300-3	۱	۳۰	۳۰۰	۳
۱۳۵	C-T-1-30-300-4	۱	۳۰	۳۰۰	۴
۱۳۶	C-T-1-60-100-0.01	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۰۱
۱۳۷	C-T-1-60-100-0.02	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۰۲
۱۳۸	C-T-1-60-100-0.05	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۰۵
۱۳۹	C-T-1-60-100-0.1	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۱
۱۴۰	C-T-1-60-100-0.5	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۱۴۱	C-T-1-60-100-1	۱	۶۰	۱۰۰	۱
۱۴۲	C-T-1-60-100-2	۱	۶۰	۱۰۰	۲
۱۴۳	C-T-1-60-100-3	۱	۶۰	۱۰۰	۳
۱۴۴	C-T-1-60-100-4	۱	۶۰	۱۰۰	۴
۱۴۵	C-T-1-60-200-0.01	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۰۱
۱۴۶	C-T-1-60-200-0.02	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۰۲
۱۴۷	C-T-1-60-200-0.05	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۰۵
۱۴۸	C-T-1-60-200-0.1	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۱
۱۴۹	C-T-1-60-200-0.5	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۱۵۰	C-T-1-60-200-1	۱	۶۰	۲۰۰	۱
۱۵۱	C-T-1-60-200-2	۱	۶۰	۲۰۰	۲
۱۵۲	C-T-1-60-200-3	۱	۶۰	۲۰۰	۳
۱۵۳	C-T-1-60-200-4	۱	۶۰	۲۰۰	۴
۱۵۴	C-T-1-60-300-0.01	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۰۱
۱۵۵	C-T-1-60-300-0.02	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۰۲
۱۵۶	C-T-1-60-300-0.05	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۰۵

۱۵۷	C-T-1-60-300-0.1	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۱
۱۵۸	C-T-1-60-300-0.5	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۱۵۹	C-T-1-60-300-1	۱	۶۰	۳۰۰	۱
۱۶۰	C-T-1-60-300-2	۱	۶۰	۳۰۰	۲
۱۶۱	C-T-1-60-300-3	۱	۶۰	۳۰۰	۳
۱۶۲	C-T-1-60-300-4	۱	۶۰	۳۰۰	۴
۱۶۳	C-T-2-30-100-0.01	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۰۱
۱۶۴	C-T-2-30-100-0.02	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۰۲
۱۶۵	C-T-2-30-100-0.05	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۰۵
۱۶۶	C-T-2-30-100-0.1	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۱
۱۶۷	C-T-2-30-100-0.5	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۱۶۸	C-T-2-30-100-1	۲	۳۰	۱۰۰	۱
۱۶۹	C-T-2-30-100-2	۲	۳۰	۱۰۰	۲
۱۷۰	C-T-2-30-100-3	۲	۳۰	۱۰۰	۳
۱۷۱	C-T-2-30-100-4	۲	۳۰	۱۰۰	۴
۱۷۲	C-T-2-30-200-0.01	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۰۱
۱۷۳	C-T-2-30-200-0.02	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۰۲
۱۷۴	C-T-2-30-200-0.05	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۰۵
۱۷۵	C-T-2-30-200-0.1	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۱
۱۷۶	C-T-2-30-200-0.5	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۱۷۷	C-T-2-30-200-1	۲	۳۰	۲۰۰	۱
۱۷۸	C-T-2-30-200-2	۲	۳۰	۲۰۰	۲
۱۷۹	C-T-2-30-200-3	۲	۳۰	۲۰۰	۳
۱۸۰	C-T-2-30-200-4	۲	۳۰	۲۰۰	۴
۱۸۱	C-T-2-30-300-0.01	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۰۱
۱۸۲	C-T-2-30-300-0.02	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۰۲
۱۸۳	C-T-2-30-300-0.05	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۰۵
۱۸۴	C-T-2-30-300-0.1	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۱
۱۸۵	C-T-2-30-300-0.5	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۱۸۶	C-T-2-30-300-1	۲	۳۰	۳۰۰	۱

۱۸۷	C-T-2-30-300-2	۲	۳۰	۳۰۰	۲
۱۸۸	C-T-2-30-300-3	۲	۳۰	۳۰۰	۳
۱۸۹	C-T-2-30-300-4	۲	۳۰	۳۰۰	۴
۱۹۰	C-T-2-60-100-0.01	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۰۱
۱۹۱	C-T-2-60-100-0.02	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۰۲
۱۹۲	C-T-2-60-100-0.05	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۰۵
۱۹۳	C-T-2-60-100-0.1	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۱
۱۹۴	C-T-2-60-100-0.5	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۱۹۵	C-T-2-60-100-1	۲	۶۰	۱۰۰	۱
۱۹۶	C-T-2-60-100-2	۲	۶۰	۱۰۰	۲
۱۹۷	C-T-2-60-100-3	۲	۶۰	۱۰۰	۳
۱۹۸	C-T-2-60-100-4	۲	۶۰	۱۰۰	۴
۱۹۹	C-T-2-60-200-0.01	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۰۱
۲۰۰	C-T-2-60-200-0.02	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۰۲
۲۰۱	C-T-2-60-200-0.05	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۰۵
۲۰۲	C-T-2-60-200-0.1	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۱
۲۰۳	C-T-2-60-200-0.5	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۲۰۴	C-T-2-60-200-1	۲	۶۰	۲۰۰	۱
۲۰۵	C-T-2-60-200-2	۲	۶۰	۲۰۰	۲
۲۰۶	C-T-2-60-200-3	۲	۶۰	۲۰۰	۳
۲۰۷	C-T-2-60-200-4	۲	۶۰	۲۰۰	۴
۲۰۸	C-T-2-60-300-0.01	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۰۱
۲۰۹	C-T-2-60-300-0.02	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۰۲
۲۱۰	C-T-2-60-300-0.05	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۰۵
۲۱۱	C-T-2-60-300-0.1	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۱
۲۱۲	C-T-2-60-300-0.5	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۲۱۳	C-T-2-60-300-1	۲	۶۰	۳۰۰	۱
۲۱۴	C-T-2-60-300-2	۲	۶۰	۳۰۰	۲
۲۱۵	C-T-2-60-300-3	۲	۶۰	۳۰۰	۳

۲۱۶	C-T-2-60-300-4	۲	۶۰	۳۰۰	۴
-----	----------------	---	----	-----	---

همچنین برنامه و مشخصات آزمایش‌های بندر المنت مربوط به تعیین سرعت موج برشی و مدول برشی

ماکزیمم  $G_{max}$  نیز به شرح جدول (۷-۳) می‌باشد.

کد آزمایشات بندر المنت نیز همانند آزمایشات سیکلی دارای ۶ پارامتر است که تمامی پارامترها به جز

پارامتر اول و آخر معنی یکسانی دارند. در این کد پارامتر اول یا حرف B<sup>۱</sup> به معنی آزمایش بندر المنت

و پارامتر آخر معرف فرکانس موج ارسالی می‌باشد.

به طور مثال B-T-0.5-30-200-2 معرف آزمایش بندر المنت برای نمونه ساخته‌شده با درصد تراکم

نسبی ۳۰ درصد که با ۰/۵ درصد وزنی پت بهسازی شده و تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و

فرکانس موج برشی اعمالی به آن ۲ کیلوهرتز می‌باشد.

جدول (۷-۳) برنامه آزمایشات بندر المنت انجام‌شده

ردیف	کد	درصد اختلاط وزنی پت (%)	درصد تراکم (%)	مقدار سربار (Kp)	فرکانس (khz)
۱	B-U-0-30-100-0.5	۰	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۲	B-U-0-30-100-1	۰	۳۰	۱۰۰	۱
۳	B-U-0-30-100-2	۰	۳۰	۱۰۰	۲
۴	B-U-0-30-100-4	۰	۳۰	۱۰۰	۴
۵	B-U-0-30-200-0.5	۰	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۶	B-U-0-30-200-1	۰	۳۰	۲۰۰	۱
۷	B-U-0-30-200-2	۰	۳۰	۲۰۰	۲
۸	B-U-0-30-200-4	۰	۳۰	۲۰۰	۴
۹	B-U-0-30-300-0.5	۰	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۱۰	B-U-0-30-300-1	۰	۳۰	۳۰۰	۱
۱۱	B-U-0-30-300-2	۰	۳۰	۳۰۰	۲

۱۲	B-U-0-30-300-4	۰	۳۰	۳۰۰	۴
۱۳	B-U-0-60-100-0.5	۰	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۱۴	B-U-0-60-100-1	۰	۶۰	۱۰۰	۱
۱۵	B-U-0-60-100-2	۰	۶۰	۱۰۰	۲
۱۶	B-U-0-60-100-4	۰	۶۰	۱۰۰	۴
۱۷	B-U-0-60-200-0.5	۰	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۱۸	B-U-0-60-200-1	۰	۶۰	۲۰۰	۱
۱۹	B-U-0-60-200-2	۰	۶۰	۲۰۰	۲
۲۰	B-U-0-60-200-4	۰	۶۰	۲۰۰	۴
۲۱	B-U-0-60-300-0.5	۰	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۲۲	B-U-0-60-300-1	۰	۶۰	۳۰۰	۱
۲۳	B-U-0-60-300-2	۰	۶۰	۳۰۰	۲
۲۴	B-U-0-60-300-4	۰	۶۰	۳۰۰	۴
۲۵	B-T-0.5-30-100-0.5	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۲۶	B-T-0.5-30-100-1	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۱
۲۷	B-T-0.5-30-100-2	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۲
۲۸	B-T-0.5-30-100-4	۰/۵	۳۰	۱۰۰	۴
۲۹	B-T-0.5-30-200-0.5	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۳۰	B-T-0.5-30-200-1	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۱
۳۱	B-T-0.5-30-200-2	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۲
۳۲	B-T-0.5-30-200-4	۰/۵	۳۰	۲۰۰	۴
۳۳	B-T-0.5-30-300-0.5	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۳۴	B-T-0.5-30-300-1	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۱
۳۵	B-T-0.5-30-300-2	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۲
۳۶	B-T-0.5-30-300-4	۰/۵	۳۰	۳۰۰	۴
۳۷	B-T-0.5-60-100-0.5	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۳۸	B-T-0.5-60-100-1	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۱
۳۹	B-T-0.5-60-100-2	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۲
۴۰	B-T-0.5-60-100-4	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۴
۴۱	B-T-0.5-60-200-0.5	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۰/۵



۴۲	B-T-0.5-60-200-1	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۱
۴۳	B-T-0.5-60-200-2	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۲
۴۴	B-T-0.5-60-200-4	۰/۵	۶۰	۲۰۰	۴
۴۵	B-T-0.5-60-300-0.5	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۴۶	B-T-0.5-60-300-1	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۱
۴۷	B-T-0.5-60-300-2	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۲
۴۸	B-T-0.5-60-300-4	۰/۵	۶۰	۳۰۰	۴
۴۹	B-T-1-30-100-0.5	۱	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۵۰	B-T-1-30-100-1	۱	۳۰	۱۰۰	۱
۵۱	B-T-1-30-100-2	۱	۳۰	۱۰۰	۲
۵۲	B-T-1-30-100-4	۱	۳۰	۱۰۰	۴
۵۳	B-T-1-30-200-0.5	۱	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۵۴	B-T-1-30-200-1	۱	۳۰	۲۰۰	۱
۵۵	B-T-1-30-200-2	۱	۳۰	۲۰۰	۲
۵۶	B-T-1-30-200-4	۱	۳۰	۲۰۰	۴
۵۷	B-T-1-30-300-0.5	۱	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۵۸	B-T-1-30-300-1	۱	۳۰	۳۰۰	۱
۵۹	B-T-1-30-300-2	۱	۳۰	۳۰۰	۲
۶۰	B-T-1-30-300-4	۱	۳۰	۳۰۰	۴
۶۱	B-T-1-60-100-0.5	۱	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۶۲	B-T-1-60-100-1	۱	۶۰	۱۰۰	۱
۶۳	B-T-1-60-100-2	۱	۶۰	۱۰۰	۲
۶۴	B-T-1-60-100-4	۱	۶۰	۱۰۰	۴
۶۵	B-T-1-60-200-0.5	۱	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۶۶	B-T-1-60-200-1	۱	۶۰	۲۰۰	۱
۶۷	B-T-1-60-200-2	۱	۶۰	۲۰۰	۲
۶۸	B-T-1-60-200-4	۱	۶۰	۲۰۰	۴
۶۹	B-T-1-60-300-0.5	۱	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۷۰	B-T-1-60-300-1	۱	۶۰	۳۰۰	۱
۷۱	B-T-1-60-300-2	۱	۶۰	۳۰۰	۲

۷۲	B-T-1-60-300-4	۱	۶۰	۳۰۰	۴
۷۳	B-T-2-30-100-0.5	۲	۳۰	۱۰۰	۰/۵
۷۴	B-T-2-30-100-1	۲	۳۰	۱۰۰	۱
۷۵	B-T-2-30-100-2	۲	۳۰	۱۰۰	۲
۷۶	B-T-2-30-100-4	۲	۳۰	۱۰۰	۴
۷۷	B-T-2-30-200-0.5	۲	۳۰	۲۰۰	۰/۵
۷۸	B-T-2-30-200-1	۲	۳۰	۲۰۰	۱
۷۹	B-T-2-30-200-2	۲	۳۰	۲۰۰	۲
۸۰	B-T-2-30-200-4	۲	۳۰	۲۰۰	۴
۸۱	B-T-2-30-300-0.5	۲	۳۰	۳۰۰	۰/۵
۸۲	B-T-2-30-300-1	۲	۳۰	۳۰۰	۱
۸۳	B-T-2-30-300-2	۲	۳۰	۳۰۰	۲
۸۴	B-T-2-30-300-4	۲	۳۰	۳۰۰	۴
۸۵	B-T-2-60-100-0.5	۲	۶۰	۱۰۰	۰/۵
۸۶	B-T-2-60-100-1	۲	۶۰	۱۰۰	۱
۸۷	B-T-2-60-100-2	۲	۶۰	۱۰۰	۲
۸۸	B-T-2-60-100-4	۲	۶۰	۱۰۰	۴
۸۹	B-T-2-60-200-0.5	۲	۶۰	۲۰۰	۰/۵
۹۰	B-T-2-60-200-1	۲	۶۰	۲۰۰	۱
۹۱	B-T-2-60-200-2	۲	۶۰	۲۰۰	۲
۹۲	B-T-2-60-200-4	۲	۶۰	۲۰۰	۴
۹۳	B-T-2-60-300-0.5	۲	۶۰	۳۰۰	۰/۵
۹۴	B-T-2-60-300-1	۲	۶۰	۳۰۰	۱
۹۵	B-T-2-60-300-2	۲	۶۰	۳۰۰	۲
۹۶	B-T-2-60-300-4	۲	۶۰	۳۰۰	۴

## فصل ۴ : نتایج و تحلیل و بررسی آنها

#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج آزمایشات برش ساده سیکلی، آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج برشی و آزمایش‌های دانه‌بندی بر روی تمامی نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده مطرح گردیده و با تحلیل این نتایج مقایسه‌ای میان دو حالت بهسازی شده و بهسازی نشده صورت گرفته است.

لازم به ذکر است که نتایج آزمایشات اولیه انجام شده برای تعیین وضعیت فیزیکی مصالح مصرفی در فصل سوم بیان گردیده است.

نمونه‌ها در حالت‌های بهسازی نشده و بهسازی شده با درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد در ۲ درصد تراکم ۳۰ و ۶۰ درصد ساخته شده و هر نمونه تحت ۳ سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در ۹ دامنه‌ی کرنش برشی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر تحت آزمایش برش ساده سیکلی قرار گرفته است. برای هر حالت نمونه مجزا ساخته شد، همچنین تمامی نمونه‌ها پس از آزمایش جهت آزمایش دانه‌بندی و بررسی اثر بهسازی بر شکستگی دانه‌ها تحت بارگذاری برش سیکلی، نگهداری گردید. علاوه بر این آزمایش بندر المنت برای تمامی این حالات جهت محاسبه‌ی سرعت موج برشی با ۴ فرکانس موج برشی اعمالی به اندازه‌های ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز انجام گردید.

در ادامه به بررسی کلیه‌ی نتایج به تفصیل خواهیم پرداخت.

#### ۴-۲- نتایج آزمایشات

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سختی خاک به وسیله‌ی دامنه‌ی کرنش برش سیکلی، تخلخل، تنش اصلی موثر، ضریب تحکیم یافتگی و تعداد سیکل‌های بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مدول برشی سکانتی، یک المان خاک است که با افزایش دامنه کرنش برشی کاهش می‌یابد. داس در کتاب اصول

دینامیک خاک [59] خود نحوه محاسبه مدول برشی با استفاده از دستگاه برش ساده دینامیکی و منحنی هیستریزس را به صورت رابطه ۴-۱ بیان کرده است.

رابطه ۴-۱ [59]:

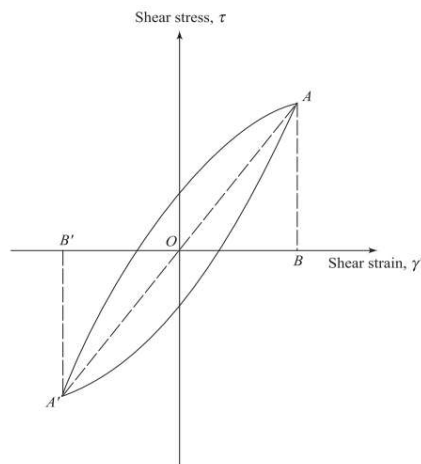
$$G = \frac{\text{Amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{Amplitude of cyclic shear strain, } \gamma'}$$

شواهد تجربی نشان می‌دهد که در کرنش‌های بسیار کوچک مقداری استهلاک انرژی در نمونه خاک صورت می‌گیرد، بنابراین نسبت میرایی همواره بیشتر از صفر خواهد بود. در کرنش‌های بزرگ‌تر پهنای منحنی‌های هیستریزس که در شرایط بارگذاری سیکلی بر خاک ایجاد می‌شود، با افزایش دامنه‌ی کرنش سیکلی افزایش می‌یابد که معرف افزایش ضریب میرایی با افزایش دامنه‌ی کرنش می‌باشد. نحوه‌ی محاسبه‌ی نسبت میرایی نیز در کتاب اصول دینامیک خاک داس [59] به صورت رابطه ۴-۲ بیان شده است.

رابطه ۴-۲ [59]:

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{area of the hysteresis loop}}{\text{area of the triangle } OAB \text{ and } OA'B'}$$

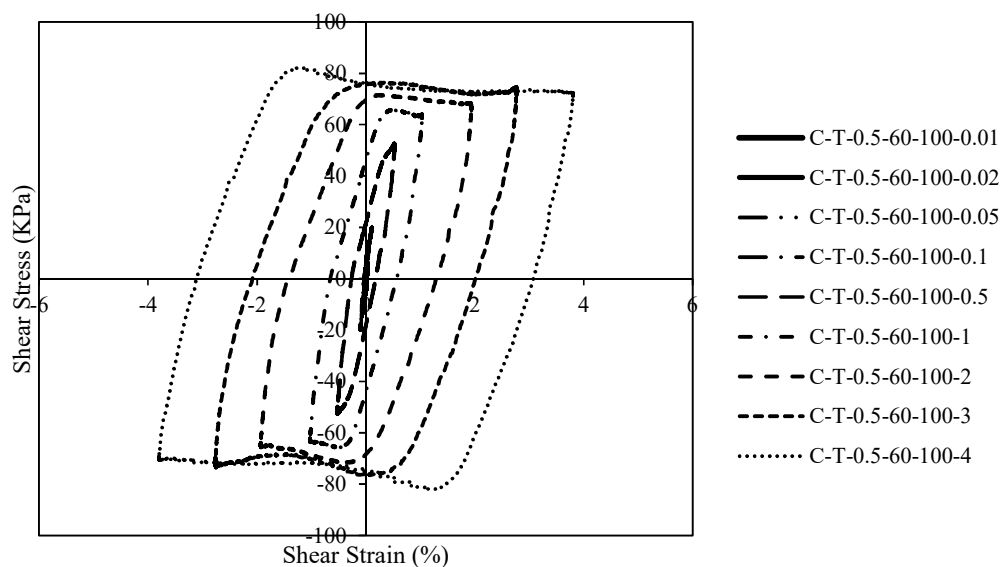
که مثلث‌های  $OAB$  و  $OA'B'$  به این صورت مشخص می‌شوند:



## ۴-۲-۱- نتایج آزمایشات برش ساده سیکلی

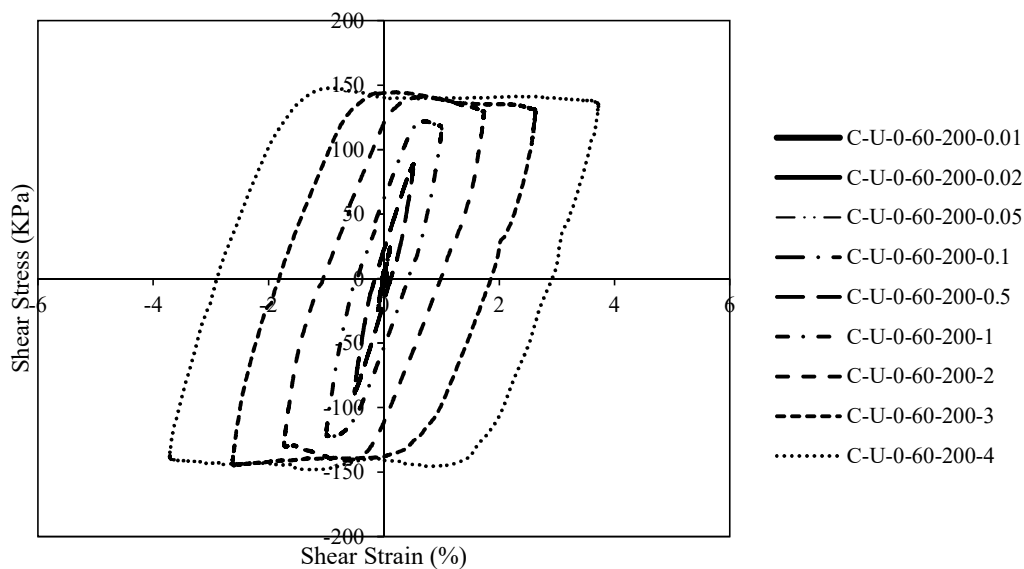
آزمایش برش ساده سیکلی داده‌هایی از قبیل تنش برشی و کرنش برشی را در اختیار ما قرار می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها می‌توان حلقه‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایش شده در کرنش‌ها و سربارهای مختلف را رسم نمود. شکل ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ گراف مربوط به حلقه‌های هیستریزیس در کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد را در حالت‌های بهسازی شده و بهسازی نشده در ۲ درصد تراکم و تحت ۳ سربار نشان می‌دهد. به علت حجم زیاد نتایج به آوردن چند نمونه شامل تمام حالات اکتفا شده است.

به دلیل طبیعت غیرخطی خاک‌ها، پاسخ دینامیکی این مواد همواره به صورت لوپ‌های تنش-کرنش برشی یا لوپ‌های هیستریزیس ظاهر می‌شود که با بررسی این لوپ‌ها می‌توان پارامترهای دینامیکی 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 شکل‌های ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ سختی برشی مربوط به شیب حلقه‌های هیستریزیس رسم شده و میرایی به مساحت حلقه‌های رسم شده بستگی دارد. همانطور که مشخص است، با افزایش کرنش گسیختگی، نمودارها به افق نزدیک‌تر و سطح داخلی آنها افزایش یافته است، که این نشان‌دهنده کاهش مدول برشی و افزایش میرایی با افزایش کرنش گسیختگی است.



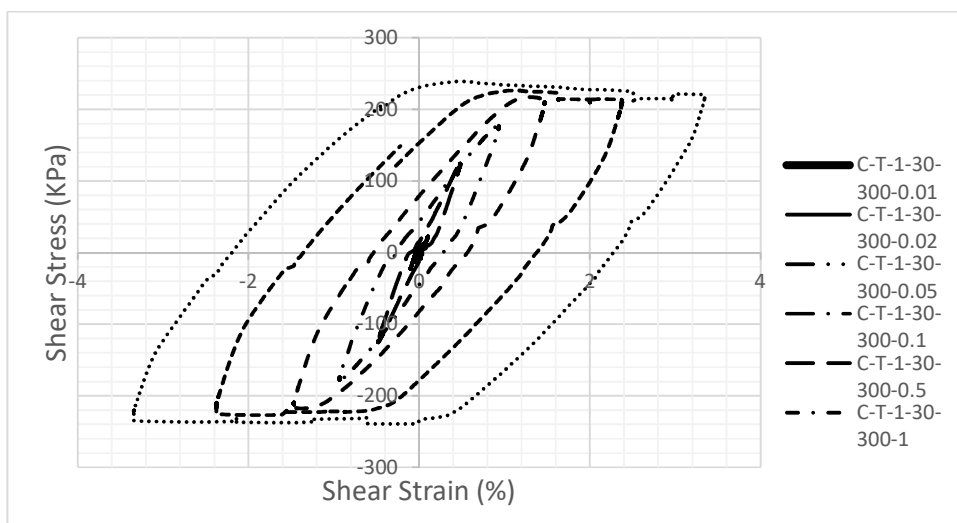
شکل (۱-۴) لوپ های هیستریزس سری آزمایشات بر روی نمونه های با درصد تراکم ۶۰ درصد، در حالت بهسازی شده با ۰.۵٪ پت

تحت تنش سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل (۲-۴) لوپ های هیستریزس سری آزمایشات بر روی نمونه های با درصد تراکم ۶۰ درصد، در حالت بهسازی نشده تحت تنش

سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال

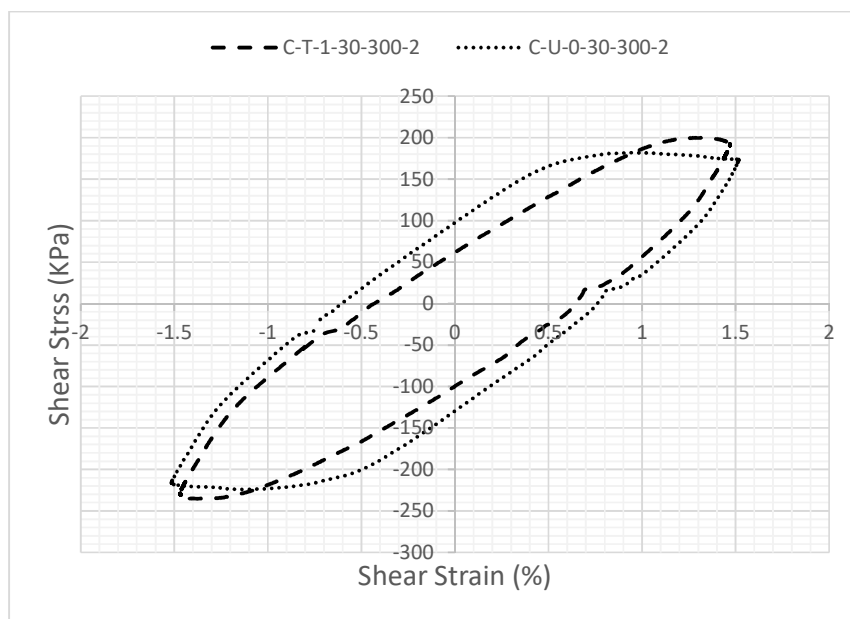


شکل (۳-۴) لوپ های هیستریزیس سری آزمایشات بر روی نمونه‌های با درصد تراکم ۳۰ درصد، در حالت بهسازی شده با ۱٪ پت

تحت تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال

در شکل ۴-۴ نیز 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 هیستریزیس تاثیرگذار است هر چند 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، که در این مورد مشاهده می‌شود که تاثیر چندانی بر مدول برشی نداشته اما نسبت میرایی را مقداری کاهش داده است. لذا جهت ارزیابی میزان تاثیر بهسازی بر نسبت میرایی و مدول برشی، مقادیر محاسباتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد.



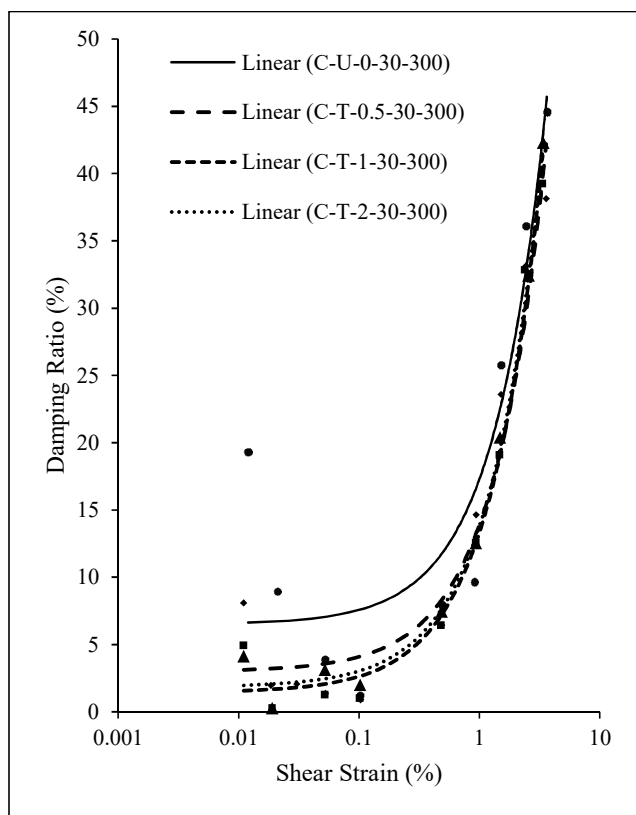


شکل (۴-۴) لوپ هیستریزس در نمونه بهسازی نشده و بهسازی شده با ۱ درصد پت

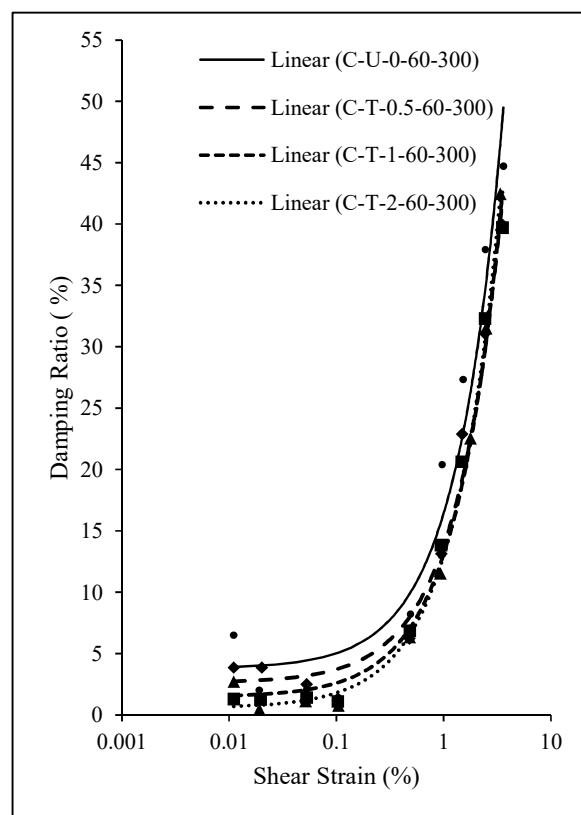
#### • بررسی اثر بهسازی بر نسبت میرایی :

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 موجب افزایش میزان میرایی نمونه‌ها می‌شود. شکل ۴-۵ تغییرات نسبت میرایی را بر حسب کرنش برشی در تنش سربار یکسان در حالت‌های مختلف بهسازی نشده و بهسازی شده‌ی 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. پیوند ایجاد شده بین خاک و قطعات پت که با زوایای مختلف درون نمونه 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. همچنین همانطور که در هر دو نمودار مشاهده می‌شود حضور پت در نمونه باعث کاهش درصد میرایی گردیده اما با افزایش مقدار وزنی پت از ۱ به ۲ درصد مقدار کاهش میرایی تقریباً ناچیز بوده

و در برخی موارد نیز که در نتایج تست‌های دیگر مشهود بوده اثر معکوس داشته است. بنابراین می‌توان گفت، مقدار بهینه درصد افزودن پت به نمونه خاک برابر با ۱ درصد است. در بخش بعد با بررسی تاثیر بهسازی بر مدول برشی می‌توان این نتیجه را صحت سنجی نمود.



ب



الف

شکل (۴-۵) بررسی اثر بهسازی بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی: الف) اثر بهسازی در درصد تراکم ۶۰ درصد و تحت سربار

۳۰۰ کیلوپاسکال ب) اثر بهسازی در درصد تراکم ۳۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال

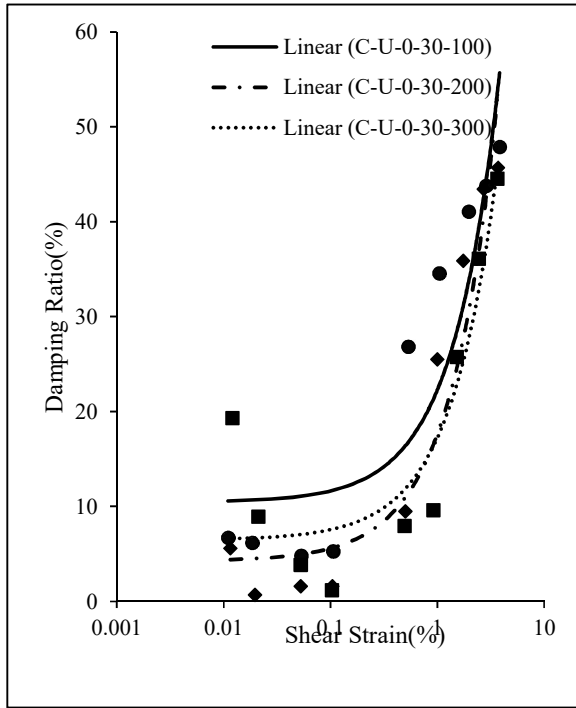
در جدول ۴-۱ بازه و میانگین کاهش نسبت میرایی بر اثر بهسازی نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۴-۱) اثر بهسازی بر نسبت میرایی خاک

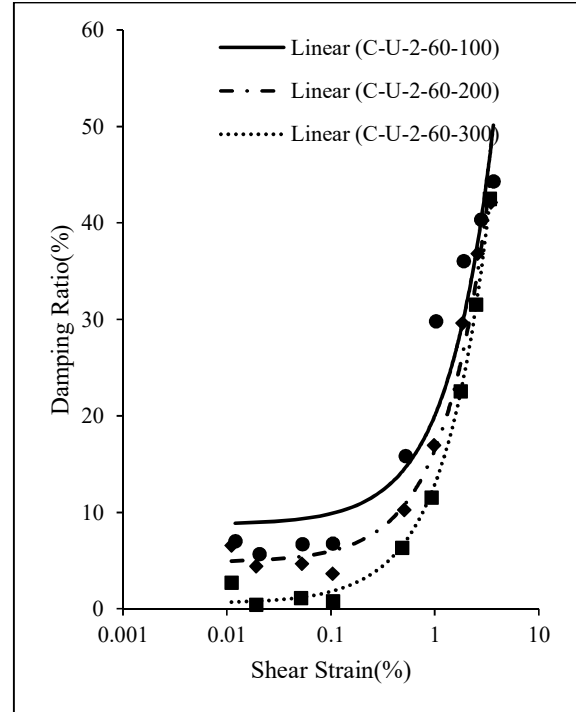
اثر بهسازی بر نسبت میرایی														
درصد تراکم		30%						60%						
		از ۰ به ۰٫۵		از ۰٫۵ به ۱		از ۱ به ۲		از ۰ به ۰٫۵		از ۰٫۵ به ۱		از ۱ به ۲		
مقدار افزایش اختلاط وزنی پت (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		
کرنش برشی (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		
مقدار کاهش نسبت میرایی (درصد)	بازه (درصد)	تا ۰	از ۰ تا ۲۵	از ۰ تا ۲۰	از ۲۰ تا ۵۵	از ۰ تا ۴۰	از ۴۰ تا ۱۵	از ۱۰ تا ۱۵	از ۱۵ تا ۴۵	از ۰ تا ۳۵	از ۳۵ تا ۳۰	از ۳۰ تا ۱۵	از ۱۵ تا ۵	از ۵ تا ۱۰
	میانگین (درصد)	14	8	29	15	1	4	15	13	10	5	0	-4	

• بررسی اثر سربار بر نسبت میرایی :

اثر سربار بر نسبت میرایی نیز قابل بررسی می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-۶ دیده می‌شود افزایش سربار اثر بسزایی در کاهش نسبت میرایی در نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده دارد که البته با وجود خرده‌های پت به عنوان المان تسلیح کننده (شکل الف) اثر سربار نیز بیشتر خواهد شد. زیرا اتصال و درگیری ذرات خاک با الیاف، افزایش خواهد یافت که این خود نشان دهنده‌ی افزایش اثر تسلیح بر میرایی امواج با افزایش عمق می‌باشد. همچنین در نتایج مشاهده شد که اثر همزمان افزایش درصد تراکم و بهسازی باعث کاهش بیشتر درصد میرایی می‌گردد.



ب



الف

شکل (۴-۶) اثر سربار بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی: الف) اثر سربار در درصد تراکم ۶۰ درصد و نمونه بهسازی شده با

درصد وزنی پت ۲ درصد ب) اثر سربار در درصد تراکم ۳۰ درصد و نمونه بهسازی نشده

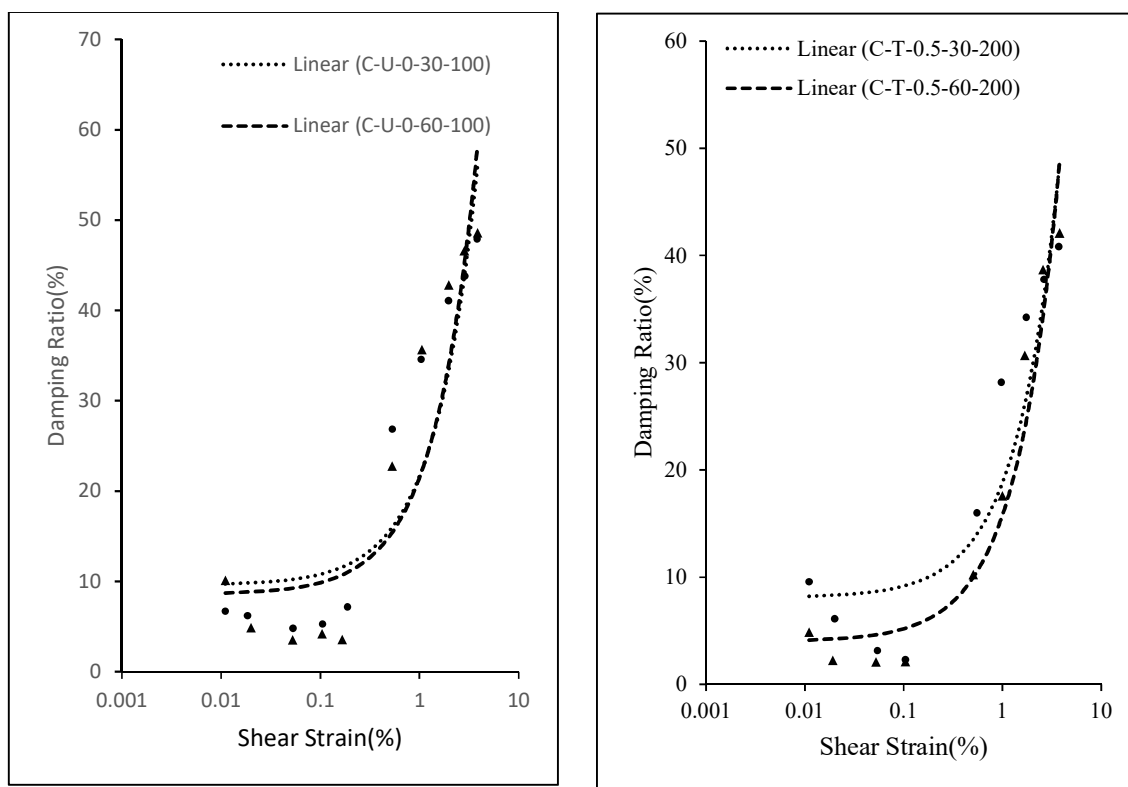
در جدول ۴-۲ بازه و میانگین کاهش نسبت میرایی بر اثر افزایش سربار اعمالی بر نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۴-۲) اثر سربار بر نسبت میرایی خاک

اثر سربار بر نسبت میرایی									
درصد تراکم		30%				60%			
		از ۱۰۰ به ۲۰۰		از ۲۰۰ به ۳۰۰		از ۱۰۰ به ۲۰۰		از ۲۰۰ به ۳۰۰	
مقدار افزایش سربار (کیلو پاسکال)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
کرنش برشی (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
مقدار کاهش نسبت میرایی (درصد)	بازه	از ۵۰ تا	از ۱۰ تا	از ۵۰ تا	از ۵ تا	از ۲۵ تا	از ۵ تا	از ۱۵ تا	از ۵ تا
	(درصد)	۹۰	۷۰	۹۰	۶۰	۸۰	۶۰	۸۰	۶۰
میرایی (درصد)	میانگین	73	32	65	28	46	28	45	25
	(درصد)								

• بررسی اثر درصد تراکم بر نسبت میرایی :

همانطور که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود درصد تراکم باعث کاهش نسبت میرایی در تمامی نمونه‌ها شده و با بررسی اثر درصد تراکم بر نسبت میرایی مشاهده شد که درصد تراکم تاثیر بسزایی بر نسبت میرایی دارد اما در نمونه‌های بهسازی نشده (شکل ب) تاثیر کمتری بر مقدار میرایی نسبت به نمونه‌های بهسازی-شده (شکل الف) دارد و این تاثیر در حضور پت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین در نتایج آزمایش‌ها مشاهده شد که این تاثیر در نمونه‌های با سربار بیشتر افزایش می‌یابد.



ب

الف

شکل (۴-۷) اثر درصد تراکم بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی : الف) اثر درصد تراکم در نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت

۰/۵ درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلو پاسکال ب) اثر درصد تراکم در نمونه بهسازی نشده تحت سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال

در جدول ۳-۴ بازه و میانگین کاهش نسبت میرایی بر اثر افزایش درصد تراکم نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۳-۴) اثر درصد تراکم نسبی بر نسبت میرایی خاک

اثر درصد تراکم نسبی بر نسبت میرایی									
مقدار وزنی افزودنی پت (درصد)		0%		0.5%		1%		2%	
مقدار افزایش درصد تراکم		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%	
کرنش برشی (درصد)		<=0.05	>=0.1	<=0.05	>=0.1	<=0.05	>=0.1	<=0.05	>=0.1
مقدار کاهش نسبت میرایی (درصد)	بازه (درصد)	از ۲۰ تا ۶۵	از ۵ تا ۲۰	از ۳۰ تا ۸۰	از ۵ تا ۵۵	از ۱۰ تا ۳۵	از ۵ تا ۲۵	از ۰ تا ۵۰	از ۰ تا ۳۰
	میانگین (درصد)	35	10	50	15	25	10	10	5

در جدول ۴-۴ مقادیر نسبت میرایی و مدول برشی به دست آمده از آزمایشات برش ساده سیکلی قابل مشاهده است. لازم به ذکر است برای بررسی اثر هریک از پارامترهای ذکر شده (بهسازی، سربار و درصد تراکم) بر مدول برشی سکانتی نمونه، باید ابتدا مقادیر مدول برشی حداکثر ( $G_{max}$ ) از آزمایشات بندر المنت حاصل شود تا با رسم نمودارهای مدول برشی به مدول برشی حداکثر ( $G/G_{max}$ ) بر حسب کرنش برشی، تاثیر هر پارامتر بر مدول برشی خاک بررسی گردد که در قسمت بعد و بخش نتایج آزمایشات بندر المنت این مورد به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول (۴-۴) مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی محاسبه شده در نمونه‌های مختلف

ردیف	کد آزمایش	مدول برشی (GPa)	میرایی (%)	ردیف	کد آزمایش	مدول برشی (GPa)	میرایی (%)
۱	C-U-0-30-100-0.01	۳۲,۲۷	۶,۷۱	۱۰۹	C-T-1-30-100-0.01	۳۵,۴۵	۱,۴۷
۲	C-U-0-30-100-0.02	۱۱,۸۹	۶,۱۹	۱۱۰	C-T-1-30-100-0.02	۲۹,۲۷	۳,۱۵
۳	C-U-0-30-100-0.05	۱۱,۴۲	۴,۸۰	۱۱۱	C-T-1-30-100-0.05	۱۷,۷۶	۴,۴۱

۴	C-U-0-30-100-0.1	۱۴,۷۹	۵,۲۸	۱۱۲	C-T-1-30-100-0.1	۱۴,۱۴	۳,۰۲
۵	C-U-0-30-100-0.5	۸,۴۱	۲۶,۸۳	۱۱۳	C-T-1-30-100-0.5	۱۰,۸۴	۱۵,۷۱
۶	C-U-0-30-100-1	۵,۵۷	۳۴,۵۹	۱۱۴	C-T-1-30-100-1	۶,۶۷	۲۹,۳۳
۷	C-U-0-30-100-2	۳,۲۸	۴۱,۰۷	۱۱۵	C-T-1-30-100-2	۴,۰۷	۳۸,۲۷
۸	C-U-0-30-100-3	۲,۵۸	۴۳,۸۱	۱۱۶	C-T-1-30-100-3	۲,۸۸	۴۰,۳۱
۹	C-U-0-30-100-4	۲,۰۰	۴۷,۸۹	۱۱۷	C-T-1-30-100-4	۱,۶۹	۴۷,۴۶
۱۰	C-U-0-30-200-0.01	۳۴,۳۵	۵,۶۲	۱۱۸	C-T-1-30-200-0.01	۳۱,۳۰	۰,۱۷
۱۱	C-U-0-30-200-0.02	۳۵,۱۳	۰,۶۹	۱۱۹	C-T-1-30-200-0.02	۲۶,۱۵	۰,۷۱
۱۲	C-U-0-30-200-0.05	۲۶,۷۶	۱,۶۱	۱۲۰	C-T-1-30-200-0.05	۲۵,۶۷	۰,۹۱
۱۳	C-U-0-30-200-0.1	۲۲,۷۱	۱,۶۱	۱۲۱	C-T-1-30-200-0.1	۲۳,۸۵	۰,۹۸
۱۴	C-U-0-30-200-0.5	۱۹,۸۲	۹,۵۱	۱۲۲	C-T-1-30-200-0.5	۲۰,۰۷	۹,۶۵
۱۵	C-U-0-30-200-1	۱۲,۲۴	۲۵,۵۱	۱۲۳	C-T-1-30-200-1	۱۲,۷۷	۲۲,۰۹
۱۶	۲-۲۰۰-۳۰۰-C-U	۷,۸۰	۳۵,۹۱	۱۲۴	C-T-1-30-200-2	۸,۹۷	۲۹,۹۱
۱۷	C-U-0-30-200-3	۵,۱۸	۴۳,۴۶	۱۲۵	C-T-1-30-200-3	۶,۶۲	۳۶,۵۸
۱۸	C-U-0-30-200-4	۳,۸۴	۴۵,۷۰	۱۲۶	C-T-1-30-200-4	۴,۸۶	۴۲,۴۶
۱۹	C-U-0-30-300-0.01	۱۹,۱۷	۱۹,۳۳	۱۲۷	C-T-1-30-300-0.01	۳۱,۳۶	۴,۹۵
۲۰	C-U-0-30-300-0.02	۲۲,۱۴	۸,۹۴	۱۲۸	C-T-1-30-300-0.02	۳۰,۷۹	۰,۳۲
۲۱	C-U-0-30-300-0.05	۲۲,۷۶	۳,۸۸	۱۲۹	C-T-1-30-300-0.05	۲۳,۲۷	۱,۲۹
۲۲	C-U-0-30-300-0.1	۲۵,۱۲	۱,۲۱	۱۳۰	C-T-1-30-300-0.1	۲۲,۳۲	۱,۰۲
۲۳	C-U-0-30-300-0.5	۲۴,۰۵	۷,۹۵	۱۳۱	C-T-1-30-300-0.5	۲۶,۱۰	۶,۴۵
۲۴	C-U-0-30-300-1	۲۲,۴۴	۹,۶۴	۱۳۲	C-T-1-30-300-1	۱۹,۱۶	۱۲,۶۱
۲۵	C-U-0-30-300-2	۱۳,۴۰	۲۵,۷۸	۱۳۳	C-T-1-30-300-2	۱۴,۸۱	۱۹,۱۰
۲۶	C-U-0-30-300-3	۸,۷۱	۳۶,۱۴	۱۳۴	C-T-1-30-300-3	۹,۵۴	۳۲,۸۴
۲۷	C-U-0-30-300-4	۶,۰۴	۴۴,۵۷	۱۳۵	C-T-1-30-300-4	۷,۱۵	۳۹,۲۸
۲۸	C-U-0-60-100-0.01	۱۵,۹۱	۱۰,۱۳	۱۳۶	C-T-1-60-100-0.01	۲۶,۸۲	۳,۲۹
۲۹	C-U-0-60-100-0.02	۱۵,۲۵	۴,۹۱	۱۳۷	C-T-1-60-100-0.02	۱۹,۴۹	۲,۷۱
۳۰	C-U-0-60-100-0.05	۱۹,۵۲	۳,۵۳	۱۳۸	C-T-1-60-100-0.05	۱۷,۶۴	۳,۹۸
۳۱	C-U-0-60-100-0.1	۱۷,۸۴	۴,۲۲	۱۳۹	C-T-1-60-100-0.1	۱۶,۳۶	۵,۶۷
۳۲	C-U-0-60-100-0.5	۸,۸۸	۲۲,۸۰	۱۴۰	C-T-1-60-100-0.5	۱۰,۵۷	۱۵,۱۸
۳۳	C-U-0-60-100-1	۵,۲۰	۳۵,۶۷	۱۴۱	C-T-1-60-100-1	۶,۷۶	۲۵,۳۵

۳۴	C-U-0-60-100-2	۳,۴۲	۴۲,۸۳	۱۴۲	C-T-1-60-100-2	۴,۳۸	۳۴,۰۷
۳۵	C-U-0-60-100-3	۲,۵۹	۴۶,۶۴	۱۴۳	C-T-1-60-100-3	۲,۶۵	۴۱,۷۳
۳۶	C-U-0-60-100-4	۱,۹۰	۴۸,۵۸	۱۴۴	C-T-1-60-100-4	۲,۰۹	۴۵,۴۱
۳۷	C-U-0-60-200-0.01	۳۷,۰۸	۷,۴۷	۱۴۵	C-T-1-60-200-0.01	۲۵,۶۵	۶,۳۱
۳۸	C-U-0-60-200-0.02	۲۸,۱۶	۱,۹۷	۱۴۶	C-T-1-60-200-0.02	۲۱,۷۵	۰,۴۶
۳۹	C-U-0-60-200-0.05	۲۳,۰۵	۲,۰۶	۱۴۷	C-T-1-60-200-0.05	۱۸,۳۲	۱,۸۸
۴۰	C-U-0-60-200-0.1	۲۳,۴۳	۲,۲۲	۱۴۸	C-T-1-60-200-0.1	۲۰,۲۹	۳,۲۱
۴۱	C-U-0-60-200-0.5	۱۷,۴۶	۱۱,۵۸	۱۴۹	C-T-1-60-200-0.5	۱۷,۷۰	۸,۲۸
۴۲	C-U-0-60-200-1	۱۲,۲۲	۲۳,۰۰	۱۵۰	C-T-1-60-200-1	۱۲,۰۹	۱۴,۸۷
۴۳	C-U-0-60-200-2	۸,۱۳	۳۳,۶۰	۱۵۱	C-T-1-60-200-2	۷,۸۸	۲۸,۰۹
۴۴	C-U-0-60-200-3	۵,۵۱	۴۱,۰۵	۱۵۲	C-T-1-60-200-3	۵,۵۳	۳۴,۹۵
۴۵	C-U-0-60-200-4	۳,۹۸	۴۶,۳۴	۱۵۳	C-T-1-60-200-4	۴,۸۵	۳۸,۵۹
۴۶	C-U-0-60-300-0.01	۴۲,۷۳	۶,۴۸	۱۵۴	C-T-1-60-300-0.01	۴۰,۰۰	۱,۲۸
۴۷	C-U-0-60-300-0.02	۳۵,۷۹	۲,۰۰	۱۵۵	C-T-1-60-300-0.02	۳۵,۳۸	۱,۲۷
۴۸	C-U-0-60-300-0.05	۳۲,۲۹	۲,۰۴	۱۵۶	C-T-1-60-300-0.05	۲۷,۹۰	۱,۴۲
۴۹	C-U-0-60-300-0.1	۳۱,۲۶	۱,۴۳	۱۵۷	C-T-1-60-300-0.1	۲۷,۸۵	۱,۱۱
۵۰	C-U-0-60-300-0.5	۲۳,۴۷	۸,۲۲	۱۵۸	C-T-1-60-300-0.5	۲۶,۲۷	۶,۸۶
۵۱	C-U-0-60-300-1	۱۶,۶۰	۲۰,۴۰	۱۵۹	C-T-1-60-300-1	۱۹,۵۹	۱۳,۸۵
۵۲	C-U-0-60-300-2	۱۲,۲۹	۲۷,۳۳	۱۶۰	C-T-1-60-300-2	۱۴,۲۱	۲۰,۶۵
۵۳	C-U-0-60-300-3	۸,۲۶	۳۷,۹۲	۱۶۱	C-T-1-60-300-3	۹,۵۸	۳۲,۳۰
۵۴	C-U-0-60-300-4	۵,۷۷	۴۴,۷۱	۱۶۲	C-T-1-60-300-4	۶,۷۲	۳۹,۷۲
۵۵	C-T-0.5-30-100-0.01	۱۲,۷۳	۶,۸۲	۱۶۳	C-T-2-30-100-0.01	۱۱,۸۲	۱۹,۷۱
۵۶	C-T-0.5-30-100-0.02	۱۰,۰۰	۷,۳۸	۱۶۴	C-T-2-30-100-0.02	۱۴,۷۲	۱۴,۹۹
۵۷	C-T-0.5-30-100-0.05	۷,۲۶	۱۰,۱۳	۱۶۵	C-T-2-30-100-0.05	۱۴,۳۴	۶,۰۴
۵۸	C-T-0.5-30-100-0.1	۵,۴۳	۱۱,۲۹	۱۶۶	C-T-2-30-100-0.1	۱۵,۲۶	۴,۷۷
۵۹	C-T-0.5-30-100-0.5	۲,۷۸	۱۳,۱۹	۱۶۷	C-T-2-30-100-0.5	۱۰,۰۹	۱۵,۸۸
۶۰	C-T-0.5-30-100-1	۴,۳۸	۳۵,۲۵	۱۶۸	C-T-2-30-100-1	۶,۷۶	۲۵,۰۷
۶۱	C-T-0.5-30-100-2	۲,۳۰	۳۸,۵۱	۱۶۹	C-T-2-30-100-2	۴,۱۳	۳۶,۱۱
۶۲	C-T-0.5-30-100-3	۱,۵۱	۴۳,۴۰	۱۷۰	C-T-2-30-100-3	۲,۸۷	۴۱,۵۸
۶۳	C-T-0.5-30-100-4	۱,۲۳	۴۵,۶۵	۱۷۱	C-T-2-30-100-4	۲,۲۴	۴۴,۳۱



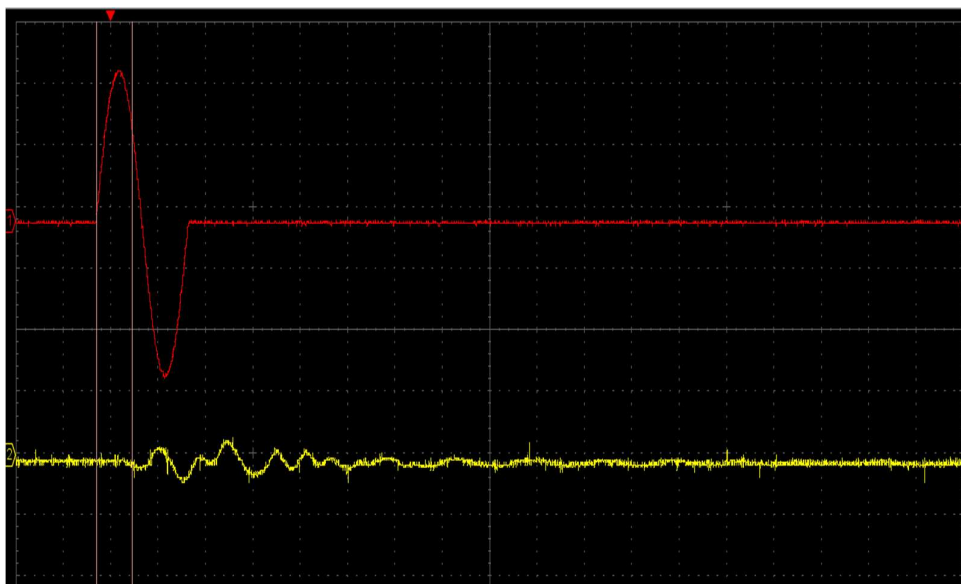
۶۴	C-T-0.5-30-200-0.01	۲۰,۴۵	۹,۵۵	۱۷۲	C-T-2-30-200-0.01	۲۵,۴۵	۹,۱۸
۶۵	C-T-0.5-30-200-0.02	۱۶,۲۵	۶,۱۲	۱۷۳	C-T-2-30-200-0.02	۲۵,۳۸	۳,۵۷
۶۶	C-T-0.5-30-200-0.05	۱۹,۲۶	۳,۱۴	۱۷۴	C-T-2-30-200-0.05	۲۱,۷۱	۲,۴۴
۶۷	C-T-0.5-30-200-0.1	۱۸,۸۹	۲,۳۰	۱۷۵	C-T-2-30-200-0.1	۲۲,۴۸	۲,۰۳
۶۸	C-T-0.5-30-200-0.5	۱۴,۷۸	۱۵,۹۹	۱۷۶	C-T-2-30-200-0.5	۱۹,۳۱	۱۰,۳۲
۶۹	C-T-0.5-30-200-1	۹,۴۸	۲۸,۱۸	۱۷۷	C-T-2-30-200-1	۱۳,۵۴	۱۷,۵۲
۷۰	C-T-0.5-30-200-2	۶,۴۹	۳۴,۲۲	۱۷۸	C-T-2-30-200-2	۸,۸۳	۲۶,۹۷
۷۱	C-T-0.5-30-200-3	۴,۸۶	۳۷,۷۷	۱۷۹	C-T-2-30-200-3	۶,۲۹	۳۵,۴۷
۷۲	C-T-0.5-30-200-4	۳,۶۱	۴۰,۸۲	۱۸۰	C-T-2-30-200-4	۳,۷۲	۴۴,۵۸
۷۳	C-T-0.5-30-300-0.01	۲۱,۸۲	۸,۱۱	۱۸۱	C-T-2-30-300-0.01	۴۹,۵۵	۴,۱۴
۷۴	C-T-0.5-30-300-0.02	۲۸,۹۲	۱,۹۹	۱۸۲	C-T-2-30-300-0.02	۴۵,۰۰	۰,۲۸
۷۵	C-T-0.5-30-300-0.05	۲۷,۹۰	۱,۳۸	۱۸۳	C-T-2-30-300-0.05	۲۸,۶۵	۳,۱۴
۷۶	C-T-0.5-30-300-0.1	۲۵,۰۰	۰,۹۲	۱۸۴	C-T-2-30-300-0.1	۲۶,۷۶	۲,۰۲
۷۷	C-T-0.5-30-300-0.5	۲۵,۰۹	۶,۴۵	۱۸۵	C-T-2-30-300-0.5	۲۴,۷۸	۷,۴۸
۷۸	C-T-0.5-30-300-1	۱۸,۵۴	۱۴,۶۷	۱۸۶	C-T-2-30-300-1	۱۹,۴۱	۱۲,۵۵
۷۹	C-T-0.5-30-300-2	۱۳,۰۹	۲۳,۶۱	۱۸۷	C-T-2-30-300-2	۱۳,۸۰	۲۰,۴۰
۸۰	C-T-0.5-30-300-3	۹,۰۷	۳۳,۱۶	۱۸۸	C-T-2-30-300-3	۸,۸۳	۳۲,۴۵
۸۱	C-T-0.5-30-300-4	۶,۲۵	۳۸,۱۵	۱۸۹	C-T-2-30-300-4	۵,۶۳	۴۲,۳۰
۸۲	C-T-0.5-60-100-0.01	۳۶,۳۶	۴,۷۶	۱۹۰	C-T-2-60-100-0.01	۲۲,۵۰	۷,۰۳
۸۳	C-T-0.5-60-100-0.02	۳۱,۷۹	۱,۳۳	۱۹۱	C-T-2-60-100-0.02	۲۲,۴۴	۵,۶۹
۸۴	C-T-0.5-60-100-0.05	۲۵,۰۹	۴,۵۴	۱۹۲	C-T-2-60-100-0.05	۱۶,۵۱	۶,۷۲
۸۵	C-T-0.5-60-100-0.1	۱۹,۱۰	۴,۹۸	۱۹۳	C-T-2-60-100-0.1	۱۵,۳۶	۶,۷۷
۸۶	C-T-0.5-60-100-0.5	۱۰,۰۹	۱۹,۲۹	۱۹۴	C-T-2-60-100-0.5	۱۰,۱۰	۱۵,۸۵
۸۷	C-T-0.5-60-100-1	۶,۴۱	۳۱,۲۳	۱۹۵	C-T-2-60-100-1	۶,۲۱	۲۹,۸۰
۸۸	C-T-0.5-60-100-2	۳,۷۰	۳۹,۴۷	۱۹۶	C-T-2-60-100-2	۴,۱۹	۳۶,۰۶
۸۹	C-T-0.5-60-100-3	۲,۷۷	۴۲,۸۶	۱۹۷	C-T-2-60-100-3	۲,۸۹	۴۰,۳۵
۹۰	C-T-0.5-60-100-4	۲,۱۶	۴۵,۳۸	۱۹۸	C-T-2-60-100-4	۲,۳۳	۴۴,۳۲
۹۱	C-T-0.5-60-200-0.01	۳۳,۶۴	۴,۸۷	۱۹۹	C-T-2-60-200-0.01	۴۰,۹۱	۶,۵۹
۹۲	C-T-0.5-60-200-0.02	۲۶,۵۸	۲,۲۳	۲۰۰	C-T-2-60-200-0.02	۴۳,۶۸	۴,۴۳
۹۳	C-T-0.5-60-200-0.05	۲۴,۳۳	۲,۱۰	۲۰۱	C-T-2-60-200-0.05	۳۴,۳۸	۴,۶۸

۹۴	C-T-0.5-60-200-0.1	۲۱,۳۰	۲,۱۴	۲۰۲	C-T-2-60-200-0.1	۲۴,۸۳	۳,۶۴
۹۵	C-T-0.5-60-200-0.5	۱۸,۲۹	۱۰,۲۳	۲۰۳	C-T-2-60-200-0.5	۱۸,۲۳	۱۰,۲۸
۹۶	C-T-0.5-60-200-1	۱۲,۹۷	۱۷,۶۰	۲۰۴	C-T-2-60-200-1	۱۳,۳۶	۱۶,۹۷
۹۷	C-T-0.5-60-200-2	۸,۵۵	۳۰,۷۰	۲۰۵	C-T-2-60-200-2	۸,۴۷	۲۹,۶۲
۹۸	C-T-0.5-60-200-3	۶,۰۶	۳۸,۶۹	۲۰۶	C-T-2-60-200-3	۵,۹۵	۳۶,۸۴
۹۹	C-T-0.5-60-200-4	۴,۰۵	۴۲,۱۱	۲۰۷	C-T-2-60-200-4	۴,۶۵	۴۲,۱۳
۱۰۰	C-T-0.5-60-300-0.01	۳۸,۱۸	۳,۸۸	۲۰۸	C-T-2-60-300-0.01	۴۲,۷۳	۲,۷۱
۱۰۱	C-T-0.5-60-300-0.02	۳۴,۷۵	۳,۸۶	۲۰۹	C-T-2-60-300-0.02	۴۱,۳۲	۰,۴۵
۱۰۲	C-T-0.5-60-300-0.05	۲۸,۱۹	۲,۴۹	۲۱۰	C-T-2-60-300-0.05	۲۶,۱۲	۱,۱۴
۱۰۳	C-T-0.5-60-300-0.1	۲۶,۸۸	۱,۱۸	۲۱۱	C-T-2-60-300-0.1	۲۶,۰۶	۰,۷۸
۱۰۴	C-T-0.5-60-300-0.5	۲۶,۸۶	۶,۲۲	۲۱۲	C-T-2-60-300-0.5	۲۵,۶۸	۶,۳۴
۱۰۵	C-T-0.5-60-300-1	۱۹,۷۵	۱۳,۱۴	۲۱۳	C-T-2-60-300-1	۲۰,۲۵	۱۱,۵۳
۱۰۶	C-T-0.5-60-300-2	۱۴,۵۲	۲۲,۹۱	۲۱۴	C-T-2-60-300-2	۱۲,۵۱	۲۲,۵۵
۱۰۷	C-T-0.5-60-300-3	۹,۲۲	۳۱,۰۸	۲۱۵	C-T-2-60-300-3	۹,۴۷	۳۱,۵۲
۱۰۸	C-T-0.5-60-300-4	۶,۵۷	۳۹,۹۴	۲۱۶	C-T-2-60-300-4	۵,۵۶	۴۲,۴۹

## ۴-۲-۲- نتایج آزمایشات بندر المنت

همانطور که قبلاً گفته شد این دستگاه شامل یک سیستم بندر المنت (Bender Elemnt) می‌باشد که برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی از آن استفاده می‌شود. برای این کار ۲ پداستال مجزا تعبیه شده که پیزوهایی روی این پداستال‌ها نصب شده و از یک موج برشی از پداستال ارسال و از پداستال دیگر دریافت می‌گردد. در این پژوهش آزمایش بندر المنت در ۴ فرکانس ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز انجام می‌شود و اثر افزایش فرکانس بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر نیز بررسی می‌گردد.

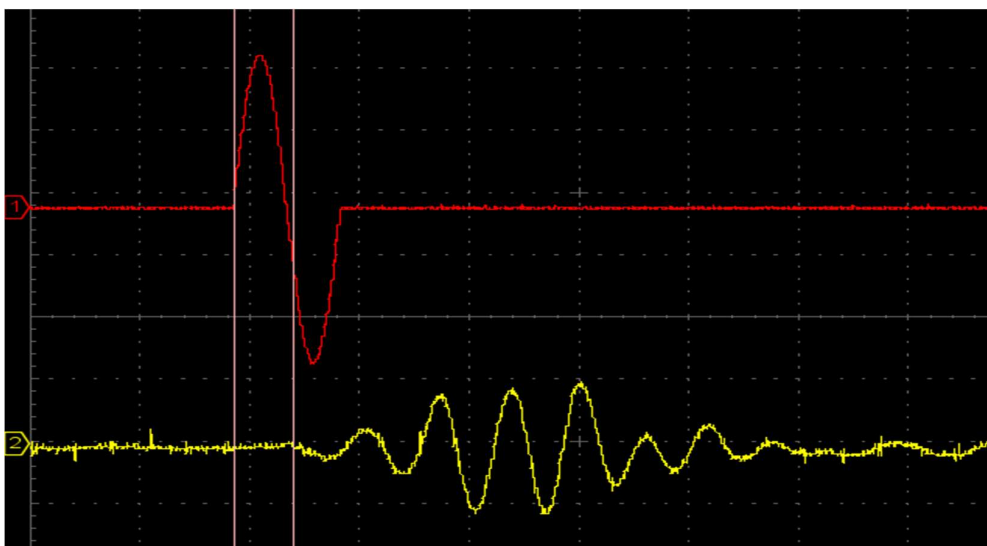
شکل‌های ۴-۸، ۴-۹ و ۴-۱۰ نتیجه آزمایش بندر المنت بر روی نمونه‌های مختلف با ۲ درصد تراکم، ۳ سربار مختلف، ۲ حالت بهسازی شده و بهسازی نشده و با فرکانس‌های مختلف موج ارسالی را نشان می‌دهند. در هر شکل، نمودار موج بالایی نشان دهنده موج ارسالی از سنسور پیزوالکتریک اول و نمودار موج پایینی نشان دهنده موج دریافتی توسط سنسور پیزوالکتریک دوم می‌باشد.



شکل (۴-۸) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-T-2-30-100-0.5



شکل (۹-۴) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-U-0-60-200-2



شکل (۱۰-۴) نتیجه آزمایش بندر المنت نمونه کد B-T-1-30-300-1

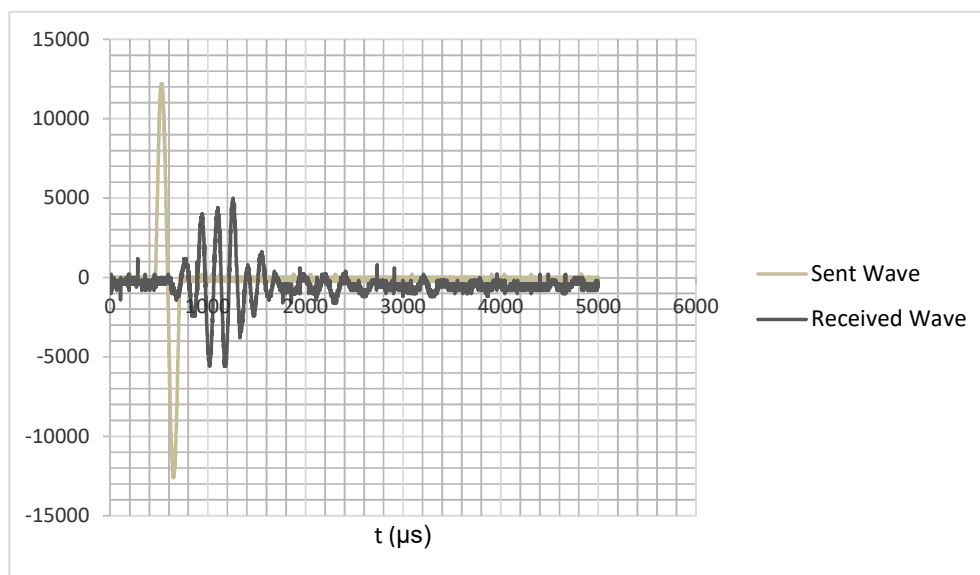
### • محاسبه سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر

همانطور که در بخش ادبیات فنی توضیح داده شد برای محاسبه سرعت موج برشی باید فاصله زمانی بین ارسال موج و تولین تحریک سنسور محاسبه شود. با توجه به اینکه در انجام آزمایشات بندر المنت تجهیزات به کار برده شده دارای دقت بسیار بالا بودند و نیز دقت کافی در حین انجام آزمایشات به کار برده شد و هرگونه نویز و مزاحمت برای سنسورهای پیزو الکتریک حذف گردید و با توجه به اینکه باکس نمونه دستگاه برش ساده تقریباً بزرگ محسوب شده و نسبت ارتفاع به قطر آن مناسب می باشد اثر پدیده میدان نزدیک در این پژوهش در نظر گرفته نشد. همچنین به علت وجود دستگاه اسیلوسکوپ در تجهیزات بندر المنت در این پژوهش، اثر پدیده تداخل امواج یا همان پدیده cross-talk نیز حذف گردید. بنابراین در این پژوهش تصمیم گرفته شد که مکان اولین تحریک سنسور پیزوالکتریک دوم، حدفاصل بین نقاط A و B (در ابتدای اولین پیک مشاهده شده در نمودار) در شکل ۲-۳۳ انتخاب شود.

همانطور که در شکل های ۴-۸، ۴-۹ و ۴-۱۰ مشاهده می کنید ۲ خط راهنمای عمودی به صورت دستی رسم شده که خط اول نشان دهنده زمان ارسال موج توسط سنسور پیزوالکتریک اول و خط دوم زمان اولین تحریک سنسور پیزوالکتریک دوم یا دریافت موج می باشد. با محاسبه این اختلاف زمانی و با داشتن فاصله ۲ پیزوی از هم سرعت موج برشی را محاسبه می شود. برای اندازه گیری مقدار مدول برشی حداکثر از رابطه ۴-۳ نیازمند محاسبه چگالی همه نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده هستیم. این مقادیر در فصل سوم در جدول ۳-۵ آمده است.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \text{رابطه ۴-۳ [59]:}$$

با توجه به حساسیت بالای نتایج این آزمایش و محاسبه ی مدول برشی حداکثر، برای انتخاب دقیق نقطه های زمانی با استخراج نتایج آزمایش و رسم نمودار مربوطه طبق شکل ۴-۱۱، به طور دقیق نقطه های زمانی انتخاب شد.



شکل (۴-۱۱) خروجی گرفته شده از آزمایش بندر المنت مربوط به نمونه کد B-T-1-30-300-1

سپس طبق جدول ۴-۵، اختلاف زمانی محاسبه گردید و با دانستن فاصله دو پیزو از هم که برابر با ۱۵/۴ میلی متر می باشد، سرعت موج برشی و سپس مقدار مدول برشی حداکثر برای نمونه کد B-T-1-30-300-1 محاسبه گردید.

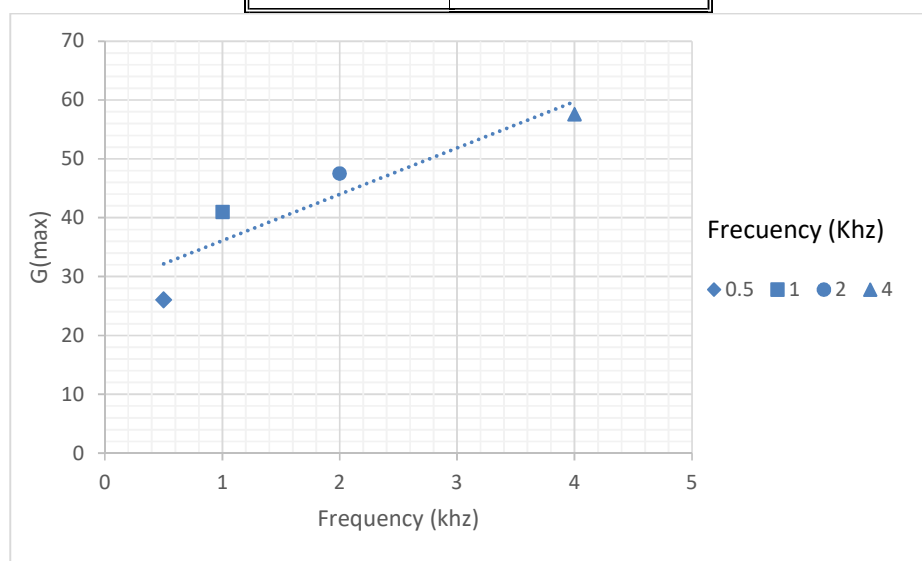
جدول (۴-۵) محاسبات مربوط به سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر مربوط به نمونه کد B-T-1-30-300-1

t1	t2	delta t(micro s)	delta x(mm)	V(m/s)	gama(gr/cm2)	Gmax(Mpa)
۴۶۴	۶۰۵	۲۸/۲	۱۵/۴	۵۴۶/۰۹۹۳	۱/۳۷۵	۴۱/۰۰۵۸۵۹۸۷

با محاسبه مقدار مدول برشی برای ۴ فرکانس ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز برای این نمونه طبق جدول ۴-۶، نمودار شکل ۴-۱۲ حاصل می گردد که نشان می دهد با افزایش مقدار فرکانس، مقدار مدول برشی حداکثر افزایش می یابد.

جدول (۴-۶) مقادیر مدول برشی حداکثر برای نمونه B-T-1-30-300 با ۴ فرکانس مختلف

مدول برشی حداکثر (Gpa)	فرکانس (Kpa)
۲۶/۰۲	۰/۵
۴۱/۰۱	۱
۴۷/۵۱	۲
۵۷/۵۷	۴



شکل (۴-۱۲) نمودار مقدار مدول برشی حداکثر بر حسب مقدار فرکانس موج اعمالی برای نمونه B-T-1-30-300

لازم به ذکر است که با بررسی ادبیات فنی مبنی بر اینکه فرکانس ۱ کیلوهرتز معرف بیشترین دقت در آزمایشات بندر المنت می‌باشد و با بررسی نتایج آزمایشات با پژوهش‌های مشابه، در این پژوهش تصمیم گرفته شد محاسبات مربوط به سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر بر مبنای موج برشی با فرکانس ۱ کیلوهرتز انجام گردد.

بنابراین با انجام این عملیات برای تمامی نمونه‌ها نتایج نهایی آزمایش بندر المنت برای محاسبه‌ی مدول برشی حداکثر طبق جدول ۴-۷ به دست می‌آید.

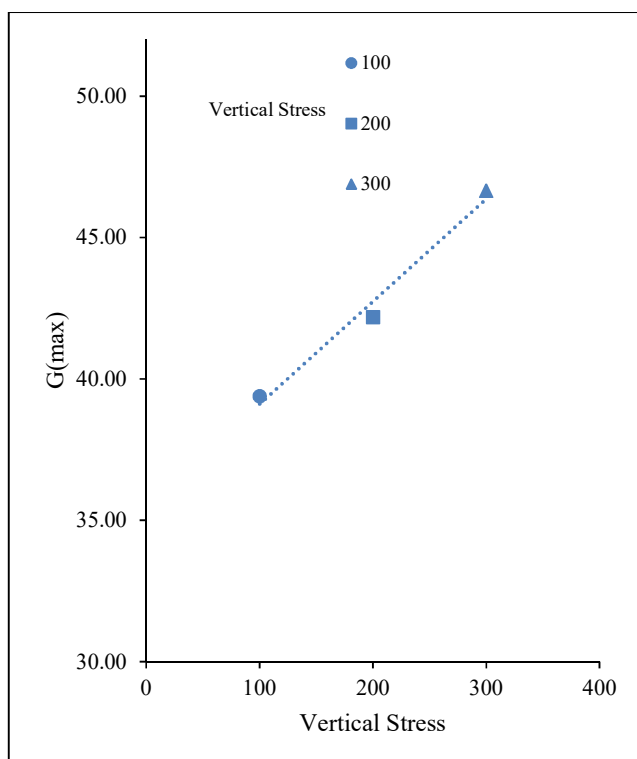
جدول (۷-۴) میزان مدول برشی حداکثر برای تمامی نمونه‌ها با فرکانس ۱ کیلوهرتز

کد آزمایش	مدول برشی حداکثر (Gpa)
B-U-0-30-100-1	۳۴/۴۱
B-U-0-30-200-1	۳۹/۳۲
B-U-0-30-300-1	۴۲/۱۸
B-U-0-60-100-1	۳۴/۷
B-U-0-60-200-1	۴۰/۶۴
B-U-0-60-300-1	۴۸/۲۵
B-T-0.5-30-100-1	۳۷/۵۶
B-T-0.5-30-200-1	۳۹/۶۷
B-T-0.5-30-300-1	۴۱/۳۸
B-T-0.5-60-100-1	۳۹/۳۹
B-T-0.5-60-200-1	۴۲/۱۹
B-T-0.5-60-300-1	۴۶/۶۵
B-T-1-30-100-1	۳۷/۷۳
B-T-1-30-200-1	۳۹/۸۷
B-T-1-30-300-1	۴۱/۰۱
B-T-1-60-100-1	۳۸/۵۴
B-T-1-60-200-1	۴۰/۷
B-T-1-60-300-1	۴۲/۴۳
B-T-2-30-100-1	۳۵/۹۴
B-T-2-30-200-1	۳۹/۵۴
B-T-2-30-300-1	۵۰/۱۳
B-T-2-60-100-1	۳۷/۲
B-T-2-60-200-1	۴۶/۵۵
B-T-2-60-300-1	۴۸/۶۹

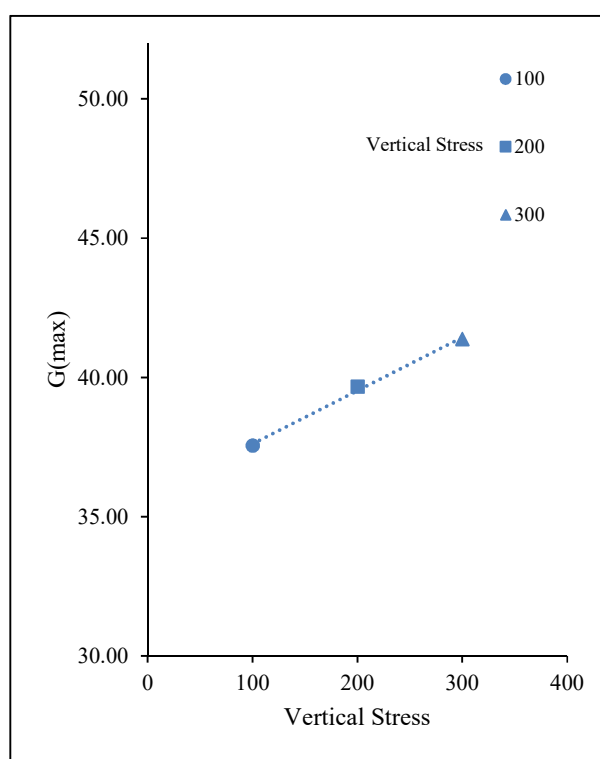


### • بررسی اثر سربار بر مدول برشی حداکثر

برای بررسی اثر سربار بر مدول برشی حداکثر همانطور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود در شرایط یکسان با افزایش سربار، مقدار مدول برشی حداکثر خاک افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش تراکم خاک در سربارهای بالاتر می‌باشد و این خود تاییدکننده افزایش اثر بهسازی به روش تسلیح با افزایش عمق است. همچنین با مقایسه شکل الف و ب مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان با افزایش درصد تراکم شیب نمودار افزایش یافته و با افزایش همزمان درصد تراکم و سربار افزایش بیشتری در مدول برشی حداکثر شاهد خواهیم بود.



ب



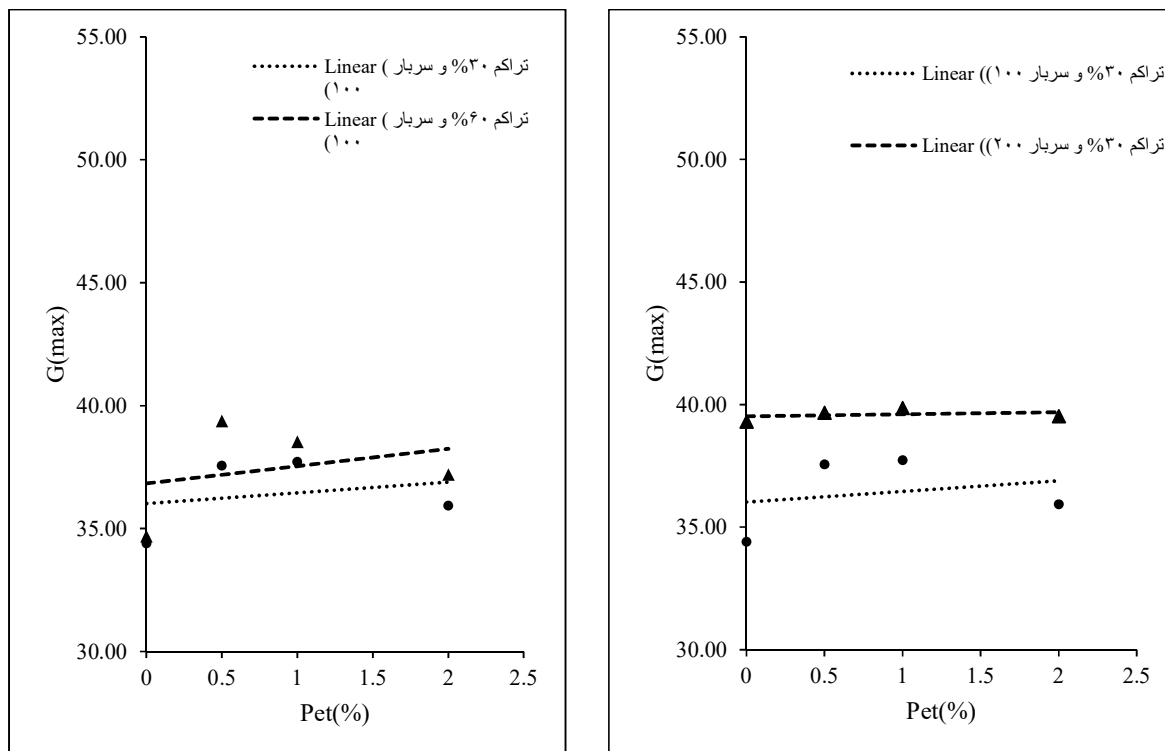
الف

شکل (۴-۱۳) اثر سربار بر مقدار مدول برشی حداکثر: الف) نمونه بهسازی شده با درصد وزنی پت ۰٫۵٪ و درصد تراکم ۳۰٪ ب) نمونه

بهسازی شده با درصد وزنی پت ۰٫۵٪ و درصد تراکم ۶۰٪

### • بررسی اثر بهسازی بر مدول برشی حداکثر

برای بررسی اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی حداکثر نیز با رسم نمودارهای شکل ۴-۱۴ به نظر می‌رسد که حضور خرده‌های پت در خاک باعث افزایش جزئی 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 حداکثر را کم‌رنگ می‌کند. به طور دقیق‌تر، همانند شکل ۴-۵ که در آن اثر بهسازی بر نسبت میرایی را مورد بررسی قرار دادیم نیز می‌توان گفت مقدار مدول برشی حداکثر با افزایش پت از ۱ به ۲ درصد، کاهش می‌یابد و مقدار بهینه درصد وزنی پت در تراکم ۳۰٪ برابر با ۱ درصد می‌باشد. نکته قابل توجه در قسمت ب شکل ۴-۱۴ این است که طبق نمودار با افزایش درصد پت از ۰/۵ به ۱ درصد مقدار مدول برشی حداکثر مقدار ناچیزی کاهش یافته است. البته لازم به ذکر است که در سایر نتایج در درصد تراکم ۶۰ درصد با افزایش درصد وزنی پت از ۰/۵ به ۱ درصد مقدار مدول برشی حداکثر تغییر زیادی نداشته و در برخی موارد افزایش ناچیزی نیز داشته است. برای قضاوت در این مورد در فصل بعدی نتیجه‌گیری نهایی انجام خواهد گرفت. به طور کل طبق شکل ۴-۱۴ می‌توان مشاهده کرد که حضور پت در نمونه‌ی خاک باعث افزایش مدول برشی حداکثر گردیده است و علاوه بر این طبق قسمت الف اثر سربار و طبق قسمت ب اثر درصد تراکم بر مدول برشی حداکثر نیز قابل توجه است که در شکل ۴-۱۳ نیز به آن اشاره شد.



ب

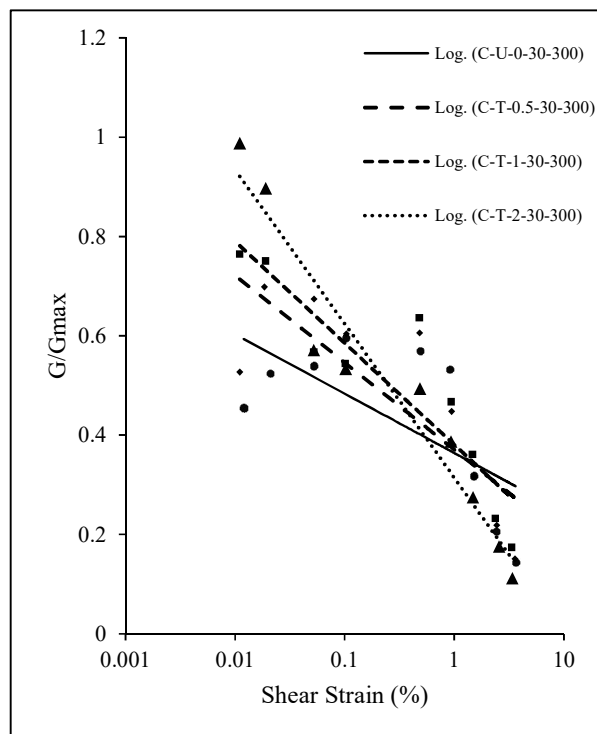
الف

شکل (۴-۱۴) نمودار مقدار مدول برشی حداکثر بر حسب درصد وزنی پت اضافه شده به خاک و بررسی اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی حداکثر: الف) بررسی اثر بهسازی و سربار بر مدول برشی حداکثر نمونه در درصد تراکم ۳۰٪ ب) بررسی اثر بهسازی و درصد تراکم بر مدول برشی حداکثر نمونه در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

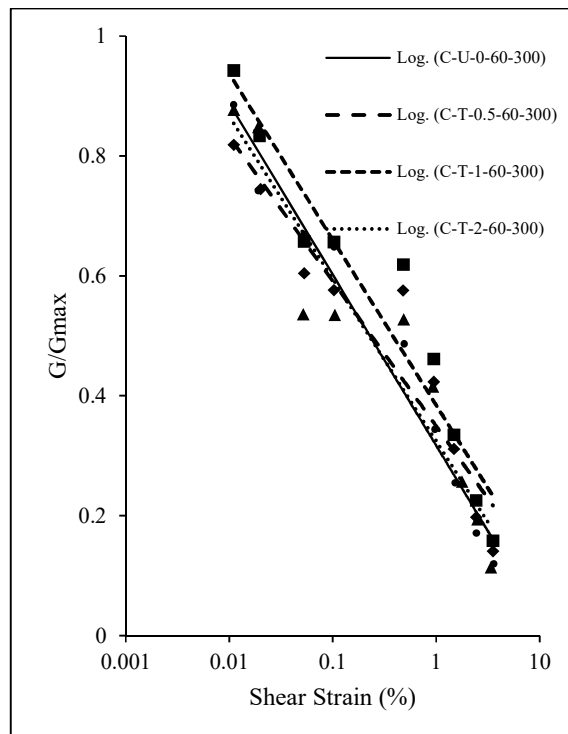
#### • بررسی اثر بهسازی بر نسبت مدول برشی به مدول برشی حداکثر

مطابق شکل ۴-۱۵ نمودار مدول برشی به مدول برشی حداکثر بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های خاک ماسه‌ای در حالت‌های بهسازی شده و بهسازی نشده قابل مشاهده است، 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 مقداری افزایش یافته است زیرا با افزایش کرنش برشی ماسه محکوم به تحمل تنش بالاتری است در نتیجه از خود سختی کمتری نشان می‌دهد و این اثر را کاهش می‌دهد. در نمودارها مشاهده می‌شود که حضور پت در نمونه با

هر درصد وزنی اختلاط باعث افزایش مدول برشی نسبت به حالت بهسازی نشده گردیده است اما همانطور که در بخش قبل نیز مشاهده شد تاثیر بهسازی با افزایش درصد وزنی پت از ۱ به ۲ درصد بر نسبت میرایی مشهود نبوده و در بعضی موارد نتیجه عکس نیز داشته است. بر اساس نتایج می توان گفت در هر دو درصد تراکم ۳۰ و ۶۰ درصد مقدار بهینه افزودنی پت برابر با ۱ درصد وزنی نمونه است. اما تاثیر افزایش درصد وزنی پت از ۰/۵ به ۱ درصد بر پارامترهای دینامیکی در درصد تراکم ۳۰ درصد بیشتر از تاثیر آن در درصد تراکم ۶۰ درصد می باشد و این به این علت است که همانطور که قبلا گفته شد خود عمل تراکم باعث افزایش مدول برشی و کاهش درصد میرایی گردیده و بنابراین با افزایش درصد تراکم از تاثیر افزایش پت در نمونه بر مقدار مدول برشی و نسبت میرایی کمی کاسته می گردد.



ب



الف

شکل (۴-۱۵) اثر بهسازی بر نسبت مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش های برشی مختلف: الف) اثر بهسازی بر نمونه با

درصد تراکم ۶۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال ب) اثر بهسازی بر نمونه با درصد تراکم ۳۰ درصد و تحت سربار ۳۰۰ کیلو

پاسکال

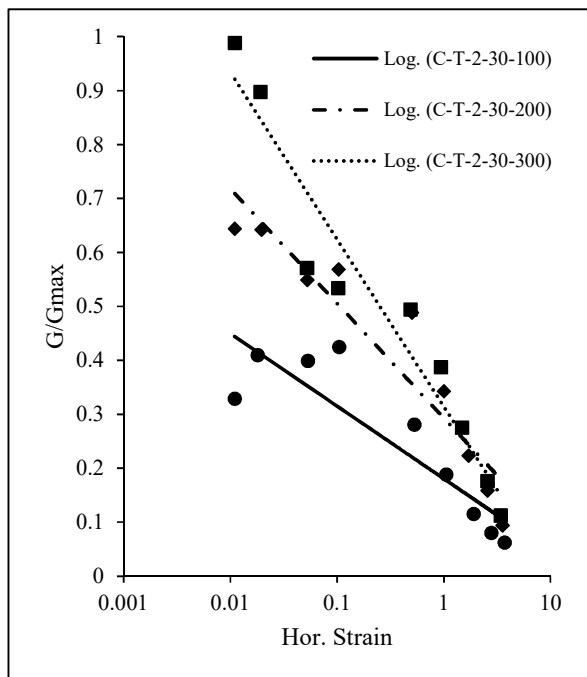
در جدول ۴-۸ بازه و میانگین افزایش مدول برشی بر اثر بهسازی نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۴-۸) اثر بهسازی بر مقدار مدول برشی خاک

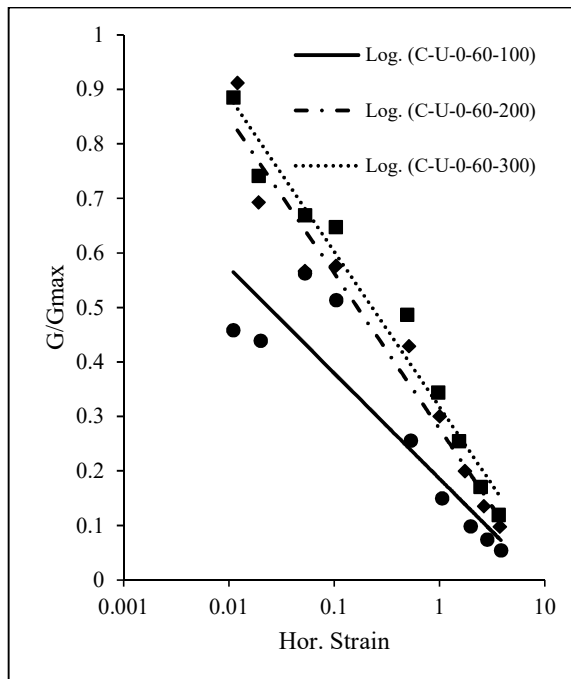
اثر بهسازی بر مدول برشی													
درصد تراکم		30%						60%					
		از ۰ به ۰٫۵		از ۰٫۵ به ۱		از ۱ به ۲		از ۰ به ۰٫۵		از ۰٫۵ به ۱		از ۱ به ۲	
مقدار افزایش اختلاط وزنی پت (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
کرنش برشی (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
مقدار افزایش مدول برشی (درصد)	بازه	تا ۱۵	از ۰ تا	تا ۱۰	از ۵ تا	از ۲۰ تا	از ۵ تا	از ۵ تا	از ۱۰ تا	از ۵ تا	از ۵ تا	از ۱۵ تا	از ۱۰ تا
	میانگین	۲۰	۵	۶۰	۵۰	۲۰	۵۵	۵۰	۲۵	۱۵	۱۵	۲۵	۱۰
برشی (درصد)	میانگین	17	3	40	32	4	1	25	17	4	2	1	0

• اثر سربار بر مدول برشی به مدول برشی حداکثر

مطابق شکل ۴-۱۶ با بررسی اثر سربار بر نمودار مدول برشی به مدول برشی حداکثر بر حسب کرنش برشی مشاهده می‌شود که افزایش سربار باعث افزایش مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در تمامی مقادیر کرنش می‌گردد. همچنین با دقت در نتایج مشاهده می‌شود که اثر این پارامتر در نمونه‌های بهسازی شده (قسمت ب) نسبت به نمونه‌های بهسازی نشده (قسمت الف) بیشتر بوده و در حضور پت تاثیر افزایش سربار بر افزایش مدول برشی بیشتر است.



ب



الف

شکل (۴-۱۶) اثر سربار بر مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش‌های برشی مختلف: الف) اثر سربار بر نمونه بهسازی-

نشده با درصد تراکم ۶۰ درصد ب) اثر سربار بر نمونه بهسازی شده با ۲ درصد وزنی پت و با درصد تراکم ۳۰ درصد

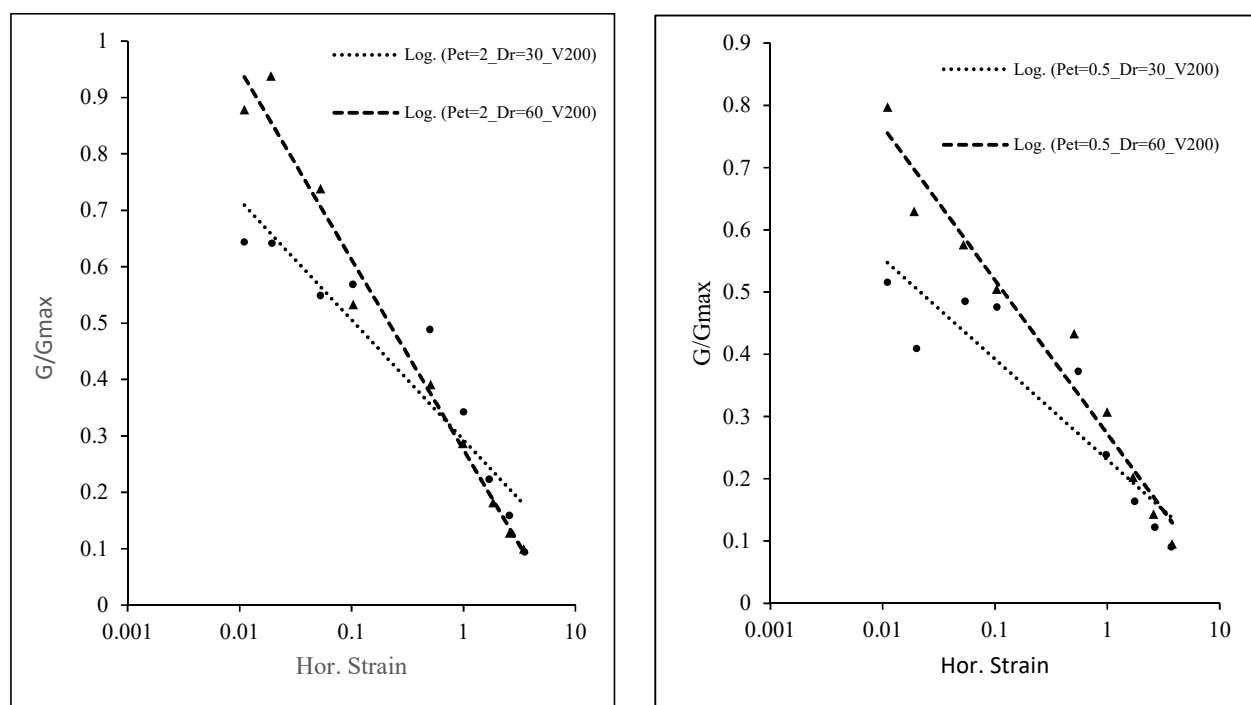
در جدول ۴-۹ بازه و میانگین افزایش مدول برشی بر اثر افزایش سربار اعمالی بر نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۴-۹) اثر سربار بر مقدار مدول برشی خاک

اثر سربار بر مقدار مدول برشی									
درصد تراکم		30%				60%			
		از ۱۰۰ به ۲۰۰		از ۲۰۰ به ۳۰۰		از ۱۰۰ به ۲۰۰		از ۲۰۰ به ۳۰۰	
مقدار افزایش سربار (کیلوپاسکال)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
کرنش برشی		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
مقدار افزایش مدول برشی (درصد)	بازه (درصد)	از ۷۰ تا ۱۹۰	از ۷۰ تا ۱۴۰	از ۴۵ تا ۹۵	از ۳۰ تا ۸۰	از ۸۰ تا ۱۳۰	از ۳۰ تا ۱۳۰	از ۳۰ تا ۶۵	از ۲۰ تا ۸۰
	میانگین (درصد)	115	107	59	54	100	92	48	46

• بررسی اثر درصد تراکم نسبی خاک بر مدول برشی به مدول برشی حداکثر

همانطور که در شکل شماره ۴-۱۷ مشاهده می‌کنید اثر درصد تراکم بر مدول برشی حداکثر قابل توجه بوده و کاملاً مشهود است. اثر این پارامتر نیز در کرنش‌های کمتر از ۱ درصد بیشتر بوده و در مقادیر بیشتر از ۱ درصد کمتر و حتی بی اثر می‌شود، زیرا همانطور که گفته شد با افزایش کرنش برشی ماسه محکوم به تحمل تنش بالاتری است در نتیجه از خود سختی کمتری نشان می‌دهد و این اثر را کاهش می‌دهد.



ب

الف

شکل (۴-۱۷) اثر درصد تراکم بر مقادیر مدول برشی به مدول برشی حداکثر در کرنش‌های برشی مختلف: الف) اثر درصد تراکم بر

نمونه بهسازی شده با درصد وزنی ۵، درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال ب) اثر درصد تراکم بر نمونه بهسازی شده با درصد وزنی ۲

درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال

با انجام آزمایشات برش ساده سیکلی و آزمایشات بندر المنت، تاثیر بهسازی با خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات، افزایش سربار و افزایش درصد تراکم و همچنین اثر همزمان این موارد بر پارامترهای دینامیکی

خاک مورد بررسی قرار گرفت و افزایش مدول برشی سکانتی و مدول برشی حداکثر و همچنین کاهش درصد میرایی مشاهده گردید و با بررسی ادبیات فنی و مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه مشاهده شد که روند کلی نتایج حاصله مطلوب و قابل استناد بوده و به خصوص اثر این نوع بهسازی قابل توجه می‌باشد.

در جدول ۴-۱۰ بازه و میانگین افزایش مدول برشی بر اثر افزایش درصد تراکم نمونه‌ها قابل مشاهده است.

جدول (۴-۱۰) اثر درصد تراکم نسبی بر مقدار مدول برشی خاک

اثر درصد تراکم نسبی بر مدول برشی									
مقدار وزنی افزودنی پت (درصد)		0%		0.5%		1%		2%	
مقدار افزایش درصد تراکم		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%		از ۳۰% به ۶۰%	
گرنش برشی (درصد)		<=0.05		>=0.1		<=0.05		>=0.1	
مقدار افزایش مدول برشی (درصد)	بازه (درصد)	از ۱۰ تا ۷۰	از ۵ تا ۲۵	از ۲۰ تا ۷۵	از ۵ تا ۶۰	از ۱۵ تا ۳۰	از ۱۰ تا ۱۵	از ۱۰ تا ۵۰	از ۱۰ تا ۲۵
	میانگین (درصد)	40	15	45	27	20	5	15	5

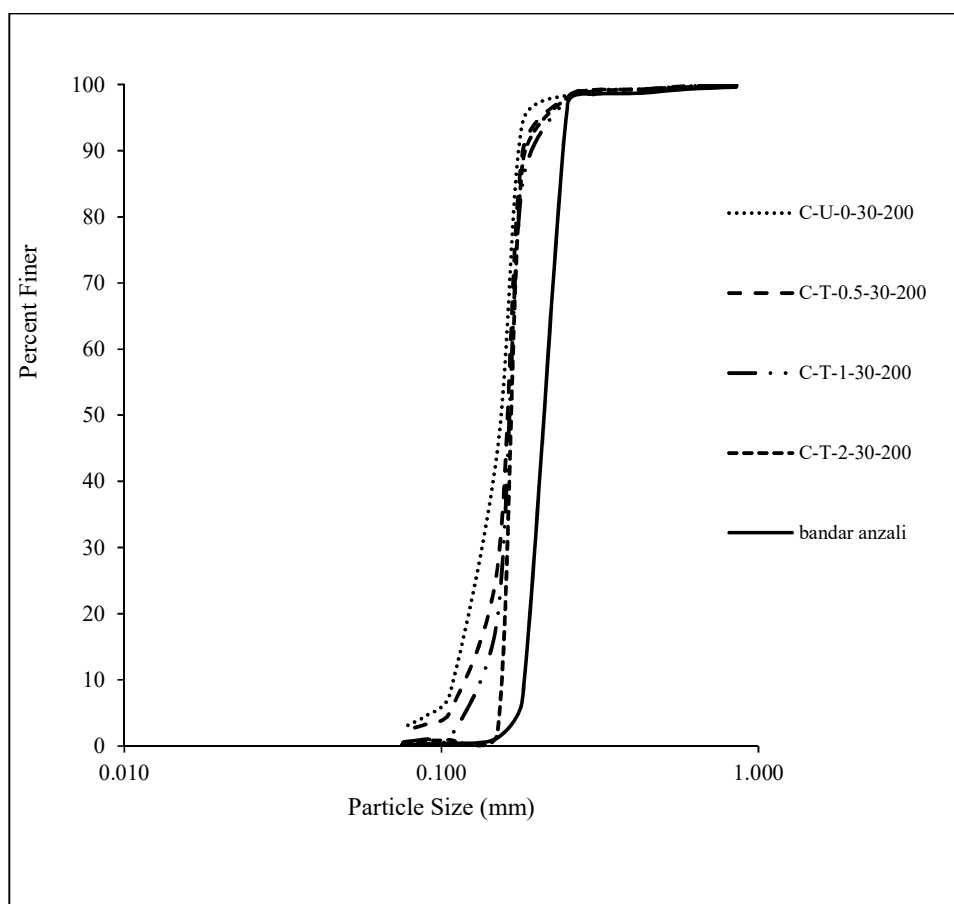
#### ۴-۲-۳- نتایج آزمایش دانه‌بندی

با انجام آزمایش دانه‌بندی با استفاده از الک بر روی تمامی نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده پس از انجام آزمایشات سیکلی و همچنین ماسه بندر انزلی نتایج درخور توجهی در رابطه با میزان شکستگی دانه‌ها در نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده تحت سربارهای مختلف و با درصدهای مختلف افزودنی پت حاصل گردید.

همانطور که در نمودار شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌کنید که در درصد تراکم ۳۰ درصد و تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال، حضور خرده‌های پت باعث کاهش خردشدگی و شکست دانه‌های خاک در حین آزمایش



می‌گردد و با افزایش درصد وزنی اختلاط پت در نمونه خاک شکستگی دانه‌ها کمتر شده و شکل اصلی دانه‌ها بیشتر حفظ شده و به دانه‌بندی ماسه‌ای که تحت بارگذاری قرار نگرفته نزدیک‌تر می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که با در حضور خرده‌های پت در نمونه‌ی خاک، افزایش درصد تراکم و سربار باعث افزایش اثر بهسازی بر دانه‌بندی خاک و کاهش شکستگی دانه‌ها حین اعمال تنش افقی بر نمونه می‌گردد.



شکل (۴-۱۸) اثر بهسازی بر منحنی دانه بندی خاک



## فصل ۵ : جمع‌بندی و پیشنهادها

## ۵-۱- مقدمه

اکثر روش‌های بهسازی خاک پرهزینه، از لحاظ اجرایی دشوار و از نظر زیست‌محیطی خسارات زیادی به طبیعت وارد می‌کند. با توجه به افزایش تولید پلاستیک در دهه‌های اخیر، بهسازی با استفاده از خرده‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن ترفتالات، یکی از روش‌های جدید بهسازی خاک است که مشکلات مذکور را نداشته و به پاکسازی محیط زیست نیز کمک می‌کند. با توجه به هدف اصلی این روش که محافظت از محیط زیست است و اینکه اجرای این نوع بهسازی زمان کمتر و روش آسان‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارد تاثیر کمتر آن بر پارامترهای مقاومتی خاک نسبت به برخی روش‌های دیگر را توجیه می‌نماید. با توجه به مطالب ذکر شده در پیشینه تحقیق و همچنین نتایج حاصل از این پژوهش این روش همواره باعث بهبود ویژگی‌های خاک از جمله رفتار دینامیکی آن می‌گردد.

## ۵-۲- جمع‌بندی:

با توجه به اینکه در مجموع تعداد ۳۱۲ آزمایش برش ساده سیکلی و بندرالمنت شامل تعداد ۲۱۶ آزمایش برش ساده سیکلی و تعداد ۹۶ آزمایش بندرالمنت انجام شده است، تاثیر مواردی از جمله درصد تراکم، سربار و بهسازی بر پارامترهای دینامیکی شامل نسبت میرایی، مدول برشی و مدول برشی حداکثر بررسی گردید. همانطور که در نتایج آزمایشات مشاهده شده است به طور کلی به نظر می‌رسد که حضور پت در خاک ماسه‌ای باعث افزایش جزئی مقدار مدول برشی در کرنش‌های پایین می‌شود همچنین اثر بهسازی بر مدول برشی در کرنش‌های بالا بسیار ناچیز است، همچنین بهسازی باعث افزایش جزئی در مدول برشی حداکثر و نیز کاهش نسبت میرایی در نمونه‌ها گردیده است و با توجه به بررسی‌های انجام شده این تاثیرات اغلب در کرنش‌های پایین بسیار ملموس‌تر بوده است، زیرا در کرنش‌های برشی بالاتر تنش برشی وارده به خاک بیشتر بوده و در نتیجه سختی کمتری از خود نشان می‌دهد و اثر بهسازی

کاهش می‌یابد. بر این اساس به نظر می‌رسد، استفاده از خرده‌های ضایعاتی پت در بهسازی بنادر استحصالی می‌تواند در بهبود پارامترهای دینامیکی خاک موثر بوده و با توجه به روش اجرای نسبتاً ساده که در حین فرآیند ریزش ماسه امکان‌پذیر است، روشی مقرون به صرفه نیز خواهد بود. در ادامه به طور خلاصه نتایج مستخرج از پژوهش حاضر ارائه شده است:

۱. اثر سربار در نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده به وضوح قابل مشاهده می‌باشد به طوری که باعث افزایش مدول برشی و نیز کاهش نسبت میرایی گردیده، همچنین با حضور پت در نمونه‌های بهسازی شده این اثر مقداری بیشتر شده اما با افزایش مقدار پت در نمونه، نرخ افزایش مدول برشی مقداری کاهش یافته و در بعضی موارد افزایش مقدار پت بی‌اثر بوده است، اما به طور کل این اثر در نمونه‌های بهسازی شده بیشتر بوده است. بنابراین این موضوع نشان‌دهنده‌ی افزایش اثر بهسازی با افزایش عمق می‌باشد و این به علت آن است که اتصال ذرات خاک در سربارهای بالاتر افزایش می‌یابد و در نتیجه سختی خاک و مدول برشی افزایش و درصد میرایی کاهش می‌یابد.

۲. با بررسی اثر درصد تراکم بر پارامترهای دینامیکی مشاهده شد که افزایش درصد تراکم باعث کاهش نسبت میرایی و افزایش مدول برشی و مدول برشی حداکثر می‌گردد. لازم به ذکر است که اثر همزمان این مورد با افزایش سربار در اکثر موارد نتیجه بهتری به دست داده و اثر بیشتری را دارد. اما در حضور پت شرایط کمی متفاوت بوده و طبق نمودارهای ارائه شده درصد مقدار بهینه بهسازی ۱ درصد وزنی پت می‌باشد. بر اساس ادبیات فنی افزایش درصد تراکم نسبی خاک باعث افزایش سختی و در نتیجه مدول برشی سکانتی و حداکثر خاک و همچنین درگیری بیشتر دانه‌های خاک در درصد تراکم‌های بالاتر باعث کاهش میرایی خاک می‌گردد.

۳. با بررسی اثر بهسازی بر مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی خاک مشاهده گردید به نظر می‌رسد حضور پت به تنهایی و در هر درصد اختلاط وزنی باعث کاهش نسبت میرایی خاک نسبت به حالت بهسازی نشده آن گردیده است. همچنین بهسازی باعث افزایش مدول برشی حداکثر و مدول برشی نرمال

در کرنش‌های پایین گردیده و اثر بهسازی در کرنش‌های بالا بر مدول برشی نرمال تقریباً ناچیز بوده است. البته لازم به ذکر است که برای حداکثر بهره‌وری از این نوع بهسازی، باید درصد بهینه و مشخصی برای اختلاط قائل باشیم که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

۴. همچنین با بررسی اثر بهسازی بر منحنی دانه‌بندی خاک مشاهده گردید که بهسازی به تنهایی باعث کاهش شکستگی دانه‌های خاک در حین بارگذاری می‌شود و افزایش بهسازی نیز این تاثیر را افزایش می‌دهد. همچنین در صورتی که این بهسازی با افزایش درصد تراکم و سربار همزمان گردد تاثیر آن بر کاهش شکستگی دانه‌ها بیش از پیش خواهد گردید. زیرا همانطور که گفته شد با ایجاد اتصال و درگیری بیشتر بین ذرات خاک لغزش بین دانه‌های خاک در هنگام بارگذاری کمتر شده و ساییدگی و شکستگی دانه‌ها کمتر اتفاق می‌افتد. بنابراین اگر در هنگام اجرای عملیات خاکی خرده‌های ضایعاتی پت به خاک افزوده شده و با روش‌های موجود تراکم بیشتری در خاک ایجاد گردد میزان شکستگی یا Crushing دانه‌ها در حین بارگذاری برشی کمتر خواهد گردید.

۵. نهایتاً با بررسی اثر بهسازی، درصد تراکم و سربار بر مدول برشی، مدول برشی حداکثر، نسبت میرایی و منحنی دانه‌بندی خاک مشاهده گردید که بهسازی در بیشترین درصد وزنی آزمایش شده (۲٪) و در بیشترین سربار (۳۰۰ کیلوپاسکل) و درصد تراکم ۶۰٪ بیشترین اثر مثبت بر منحنی دانه‌بندی خاک را دارد اما با بررسی اثر این موارد بر مدول برشی و نسبت میرایی مشاهده گردید بهینه‌ترین حالت بهسازی با خرده‌های ضایعاتی پت برابر ۱٪ وزنی اختلاط می‌باشد. لذا بنابر نتایج این پژوهش مقدار بهینه‌ی بهسازی با پت برابر با ۱ درصد اختلاط وزنی این افزودنی می‌باشد.

۶. در پایان لازم به ذکر است که بر اساس نتایج آزمایشات، تحت اثر بهسازی در بهینه‌ترین حالت نمونه، مقدار مدول برشی در کرنش‌های پایین تا ۴۰ درصد و در کرنش‌های بالا تا ۳۰ درصد افزایش، درصد میرایی در کرنش‌های پایین تا ۳۰ درصد و در کرنش‌های بالا تا ۱۵ درصد کاهش و مقدار مدول برشی حداکثر نیز تا ۱۵ درصد افزایش یافته است.

### ۵-۳- نوآوری

در این پژوهش برای انجام آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی از دستگاه برش ساده دینامیکی با قطر نمونه ۱۰ سانتی‌متری استفاده شد که در ایران به دلیل محدودیت در دسترسی به این دستگاه، کمتر شاهد استفاده از آن هستیم.

### ۵-۴- پیشنهادات

در ارتباط با این پژوهش و موضوع بهسازی با خرده‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن ترفتالات، پیشنهادهایی برای موضوعات پژوهش‌های آتی به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- ✓ بررسی اثر بهسازی با استفاده از الیاف پت بر پارامترهای دینامیکی خاک
- ✓ بررسی اثر طول خرده‌های پت مورد استفاده بر نتایج این پژوهش
- ✓ بررسی اثر تعداد سیکل بارگذاری بر پارامترهای دینامیکی خاک





## مراجع

- [1] Cui, L., S. Bhattacharya, and G. Nikitas. *Micromechanics of soil responses in cyclic simple shear tests. in EPJ web of conferences. 2017. EDP Sciences.*
- [2] Sorensen, R.M., *Basic coastal engineering. Vol. 10. 2005: Springer Science & Business Media.*
- [3] Gooch, J.W., *Encyclopedic dictionary of polymers. Vol. 1. 2010: Springer Science & Business Media.*
- [4] *Plastics – the Facts 2019 An analysis of European plastics production, demand and waste data*
- [5] اژدرپور . امیر مهیار ، بهار ۹۴ ، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵ ، صفحه ۱۳۵ تا ۱۴۰ (زمین شناسی مهندسی و محیط زیست)
- [6] S. R. García, M. P. Romo, and J. Figueroa-Nazuno, "Soil Dynamic Properties Determination: a Neurofuzzy System Approach," *Control Intell. Syst.*, vol. 34, no. 1, 2006.
- [۷] داود وند . مرضیه ، کنفرانس بین المللی عمران ، معماری و شهرسازی ایران معاصر ایران – تهران ، ۶ مرداد ماه
- [8] R. Koshti, L. Mehta, and N. Samarth, "Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate : A Mini-Review," *J. Polym. Environ.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2018.
- [9] *PlasticsEurope, "Tworzywa sztuczne - Fakty 2017," 2017.*
- [10] *Plastics – the Facts 2014/2015 , An analysis of European plastics production, demand and waste data*
- [11] B. Indraratna, J. Chu, and C. Rujikiatkamjorn, *Ground Improvement Case Histories: Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering. Butterworth-Heinemann, 2015.*
- [12] F. Bell, *Engineering treatment of soils. CRC Press, 1993.*
- [13] P. P. Xanthakos, L. W. Abramson, and D. A. Bruce, *Ground control and improvement. John Wiley & Sons, 1994.*
- [14] Andersland, O. *Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture. in Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement. 1979.*
- [15] Gray, D.H. and H. Ohashi, *Mechanics of fiber reinforcement in sand. Journal of geotechnical engineering, 1983. 109(3): p. 335-353.*
- [16] Maher, M. and Y. Ho, *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. Journal of Geotechnical Engineering, 1994. 120(8): p. 1381-1393.*

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Consoli, N.C., et al., *Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. Geotextiles and Geomembranes*, 2009. 27(3): p. 196-203.
- [22] Liu, S.H., et al., *Cyclic Simple Shear Tests on Base Isolation Using Soilbags. Vol. 243. 2011: Trans Tech Publ.*
- [23] P. Kumar, P. Rabindra, and K. Kar, "Effect of Random Inclusion of Polypropylene Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil," pp. 15–25, 2012.
- [24] 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.
- [25] 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.*
- [26] 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.
- [27] Keramati, et al., *Evaluation of Shear Strength Behaviour of Anzali Port Sand Reinforced with Polyethylene terephthalate (PET). Journal of Science and Technology*, 2019.
- [28] Sh. Kinjal, A.K. Desai, C.H. Solanki, *Experimental study on the Atterberg limits of expansive soil reinforced with polyester triangular fibers, Int. J. Eng. Res. Appl. 2 (4) (2012) 636–639.*
- [29] A. Fauzi, W.M.N. Abdul Rahman, Z. Jauhari, *Utilization waste material as stabilizer on kuantan clayey soil stabilization, J. Process. Eng. 53 (2013) 42–47.*

[30] J.S. Yadav, S.K. Tiwari, *Evaluation of the strength characteristics of cementstabilized clay-crumb rubber mixtures for its sustainable use in Geotechnical applications, Environ. Dev. Sustain. (2017)*

[31] Y. Yilmaz, K. Karatas, B. S. C. E., *Effect of Polyester Fiber on the Strength Characteristics of Lightly Cemented Clayey Soil Mixtures. ASCE. T. Adage, T. Ishada, S. Okawara (1992) An improvement in continuous yarn reinforced sand, in: Proc., Int. Symp. on Earth Reinforcement practice, vol. 1 Balkema 2011 Rotterdam. The Netherlands, pp. 3–8.*

[32] G. L. S. Babu and S. K. Chouksey, "Stress – strain response of plastic waste mixed soil," *Waste Manag., vol. 31, no. 3, pp. 481–488, 2011.*

[۳۳] فخاریان، ک. و. ا. باغبانی (۱۳۹۵). بررسی اثر عوامل مختلف بر روی پارامترهای دینامیکی ماسه چمخاله با کمک

دستگاه برش ساده تناوبی. پنجمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک.

[34] Thomann T. G. & Hryciw R. D. 1990 *Laboratory measurement of small strain shear modulus under K 0 conditions. Geotechnical Testing Journal, 13(2), 97–105.*

[35] Hardin B. & Dmevich V. 1972 *Shear modulus and damping in soils: Design Equations and Curves. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 98(7), 9006–9029.*

[36] Youn J. U., Choo Y. W. & Kim D. S. 2008 *Measurement of small-strain shear modulus Gmax of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests. Canadian Geotechnical Journal, 45(10), 1426–1438.*

[37] Wichtmann T. & Triantafyllidis T. 2009 *Influence of the grain-Size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus Gmax. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10), 1404–1418.*

[38] Iwasaki T. & Tatsuoka F. 2011 *Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. Soils and Foundations, 17(3), 19–35.*

[39] Gu X., Yang J., Huang M. & Gao G. 2015 *Bender element tests in dry and saturated sand: signal interpretation and result comparison. Soils and Foundations, 55(5), 951–962.*

[40] Yang J. & Liu X. 2016 *Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines. Géotechnique, 66(6), 500–514.*

- [41] Wichtmann T. & Triantafyllidis T. 2009 *On the influence of a non-cohesive content of fines on the small strain stiffness of quartz sand. Canadian Geotechnical Journal*, 1(2), 103–114.
- [42] Sadeghzadegan R., Naeini S. A. & Mirzaii A. 2018 *Effect of clay content on the small and mid to large strain shear modulus of an unsaturated sand. European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–19.
- [43] Salgado R., Bandini P. & Karim A. 2002 *Shear Strength and Stiffness of Silty Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 451–462.
- [44] Chien L. K. & Oh Y. N. 2002 *Influence of fines content and initial shear stress on dynamic properties of hydraulic reclaimed soil. Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 242–253.
- [45] Choo H. & Burns S. E. 2015 *Shear wave velocity of granular mixtures of silica particles as a function of finer fraction, size ratios and void ratios. Granular Matter*, 17(5), 567–578.
- [46] Drnevich V. P. 1978 *Resonant-column testing: problems and solutions. ASTM Special Technical Publication*, (654), 384–398.
- [47] Payan M., Senetakis K., Khoshghalb A. & Khalili N. 2017 *Characterization of the small-strain dynamic behaviour of silty sands; contribution of silica non-plastic fines content. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 232–240.
- [48] Hardin B. O. & Kalinski M. E. 2005 *Estimating the shear modulus of gravelly soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 867–875.
- [49] Goudarzy M., Konig D. & Schanz T. 2016 *Small strain stiffness of granular materials containing fines. Soils and Foundations*, 56(5), 756–764.
- [50] Lawrence J. r, Frederick V. 1965 *Ultrasonic shear wave velocities in sand and clay. The Response of Soils to Dynamic Loadings*.
- [51] Leong E. C., Yeo S. H. & Rahardjo H. 2005 *Measuring shear wave velocity using bender elements. Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 488–498.
- [52] Shirley D. J. & Hampton L. D. 1978 *Shear-wave measurements in laboratory sediments. Acoustical Society of America Journal*. 63(2), 607–613.
- [53] Da Fonseca A. V., Ferreira C. & Fahey M. 2008 *A framework interpreting bender element tests, combining time-domain and frequency-domain methods. Geotechnical Testing Journal*, 32(2), 91–107.

- [54] Marjanovic, J. & Germaine, J. T. 2013 *Experimental study investigating the effects of setup conditions on bender element velocity results. Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 187–197.
- [55] Rio J. F. M. E. 2006 *Advances in laboratory geophysics using bender elements. University of London.*
- [56] Lee J. S. & Santamarina J. C. 2005 *Bender elements: performance and signal interpretation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1063–1070.
- [57] *Physical and Mechanical Properties of Recycled PET Composites*
- [58] *Concepts in Physical Metallurgy Concise lecture notes CHAPTER 5 Mechanical properties of materials A Lavakumar*
- [59] Das, B. and Luo, Z., 2017. *Principles of soil dynamics. Australia: Cengage Learning.*

# پیوست

## دستگاه برش ساده دینامیکی و اجزای آن

### بدنه‌ی اصلی دستگاه:

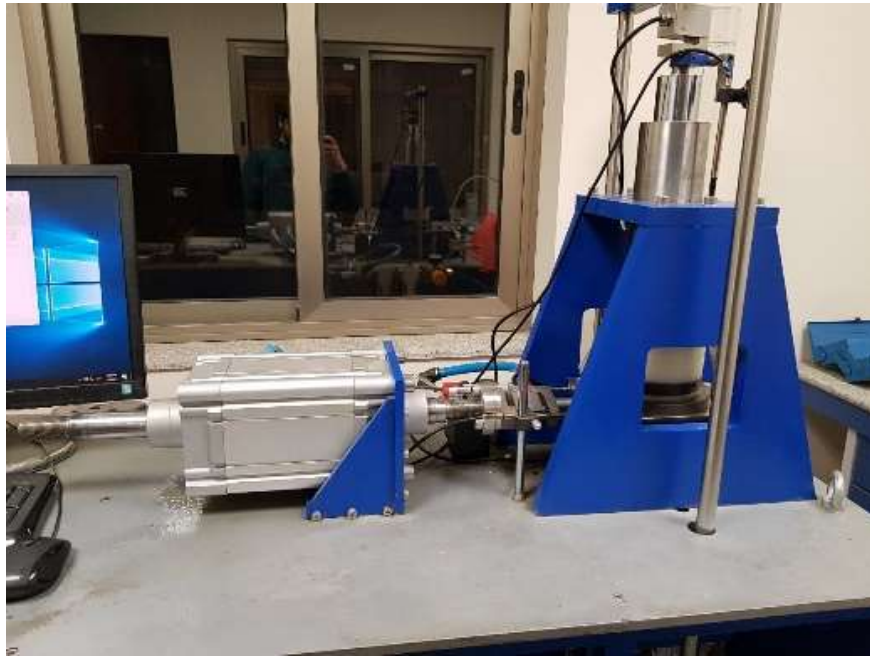
تمامی اجزای دستگاه بر روی بدنه‌ی دستگاه متصل شده‌اند. همچنین بدنه‌ی دستگاه به عنوان تکیه‌گاه مطلوب برای بارگذاری‌های دینامیکی افقی و قائم استفاده می‌شود.

### • سیستم‌های بارگذاری دینامیکی افقی و قائم:

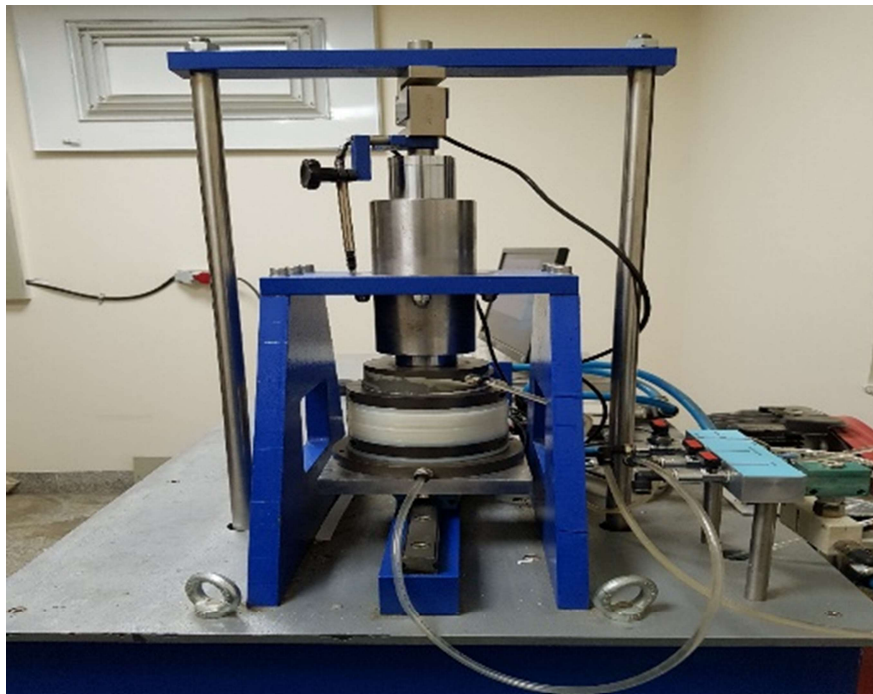
در این دستگاه امکان بارگذاری الگوهای مختلف بارهای مونوتونیک و دینامیکی به طور مستقل در دو راستای محوری قائم و محوری افقی میسر شده است. حداکثر فرکانس بارگذاری بر روی نمونه‌های خاک برابر مقدار ۲۰ هرتز و حداکثر نیروی قابل اعمال برابر ۵ کیلونیوتن می‌باشد. سیستم‌های بارگذاری سیکلی افقی و قائم دستگاه دارای قابلیت انجام بارگذاری به صورت تنش کنترل و یا کرنش (جابجایی) کنترل بوده و قابلیت انجام الگوهای متداول بارگذاری سیکلی همچون بارگذاری سینوسی و یا مثلثی را دارا بوده و دارای قابلیت انجام الگوهای بارگذاری دلخواه توسط کاربر با ارتقای نرم‌افزار دستگاه می‌باشد. با توجه به همبستگی رفتار سیستم‌های بارگذاری محوری افقی و قائم و قابلیت فرمان‌پذیری آن‌ها با توجه به وضعیت تنش و یا کرنش‌های اعمالی بر نمونه‌ی خاک، امکان انجام آزمایش برش ساده سیکلی در حجم ثابت نمونه فراهم شده است.

برای اعمال انواع الگوهای بارگذاری دینامیکی، از سیلندرهای بدون اصطکاک ویژه این امر استفاده می‌شود. همچنین برای اعمال بارهای مورد نیاز تا محدوده ۵ کیلونیوتن به صورت دینامیکی در این دستگاه از سیلندرهای ویژه این امر با ویژگی سطح مقطع بالا و حجم کم طراحی و استفاده شده است.





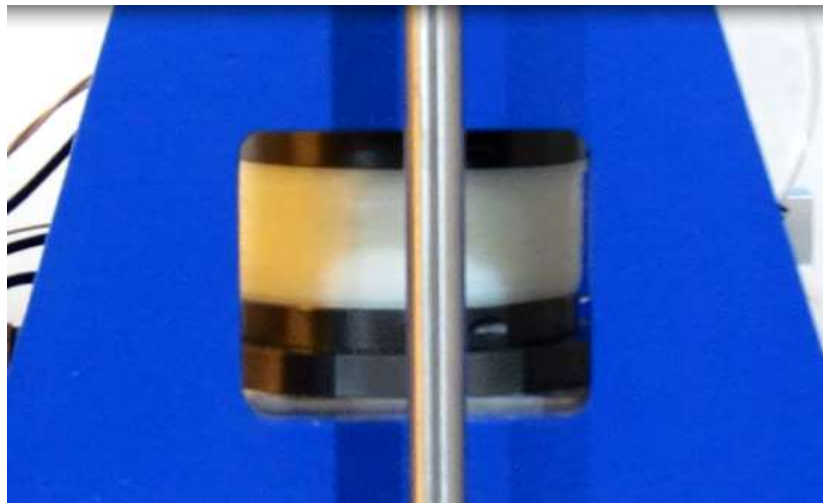
شکل ۱- سیستم بارگذاری افقی دستگاه



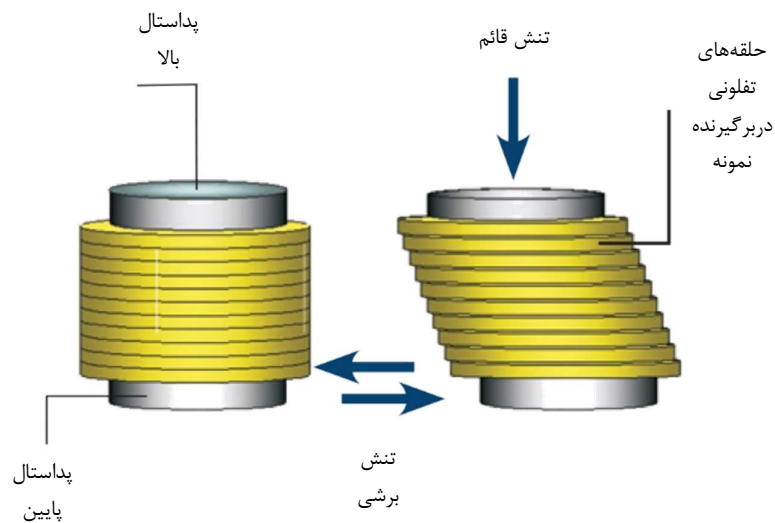
شکل ۲- سیستم بارگذاری عمودی دستگاه

- **جعبه‌ی برش:**

جعبه‌ی برش دستگاه دارای قابلیت انجام آزمایش‌های برش ساده‌ی سیکلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و حداکثر ارتفاع ۴۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین امکان اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای نمونه خاک فراهم شده است. همانطور که گفته شد، برای ایجاد شرایط بارگذاری  $K_0$ ، نمونه در حلقه‌های تهیه شده از جنس تفلون قرار داده می‌شود که حلقه‌ها می‌توانند با کمی روغن کاری، بر روی یکدیگر با کمترین اصطکاک حرکت نمایند. با توجه به قابلیت‌های جعبه‌ی برش دستگاه، امکان انجام آزمایش‌های زهکشی نشده‌ی سیکلی برشی در شرایط حجم ثابت همراه با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای میسر شده است. همچنین با استفاده از جعبه‌ی برش این دستگاه امکان انجام آزمایش تحکیم مطابق با استاندارد ASTM- D2435 و یا تحکیم تحت اثر مسیرهای مختلف تنش فراهم شده است. همچنین در بالا و پایین نمونه ۲ حلقه فلزی صلب قرار می‌گیرد که غشاء داخل آن‌ها قرار گرفته و تثبیت می‌گردد. در شکل ۳ نمای جعبه‌ی برش دستگاه و در شکل ۴ نیز تصویر شماتیک جعبه‌ی برش دستگاه قابل مشاهده است.



شکل ۳- نمایی از جعبه‌ی برش دستگاه



شکل ۴- شکل شماتیک جمعی برش دستگاه

- دستگاه پردازش، کنترل، فرمان‌دهی و ثبت داده‌ها (دیتا لاگر):

این قسمت از دستگاه شامل ۸ کانال ورودی و با دقت ۱۶ بیت و سرعت داده‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز برای هر کانال بوده و با استفاده از آن می‌توان خروجی حسگرهای مختلف را پردازش، اندازه‌گیری، مشاهده و ثبت نمود. همچنین این دستگاه دارای ۲ کانال خروجی با دقت ۱۶ بیت و سرعت ۲۰۰ کیلوهرتز برای کنترل و فرمان‌دهی سیستم‌های بارگذاری سیکلی محوری افقی و قائم می‌باشد. برای انجام کلیه مراحل آزمایش برش ساده سیکلی یک نرم‌افزار جامع طراحی شده است.

با استفاده از این نرم‌افزار امکان کالیبراسیون حسگرهای مختلف فراهم شده است. همچنین از جمله قابلیت‌های دیگر این نرم‌افزار شامل تعریف الگوهای مختلف بارگذاری سیکلی افقی و قائم، کنترل و فرمان‌دهی سیستم‌های محرک سیکلی افقی و قائم، پردازش، مشاهده و ثبت داده‌های خروجی حسگرهای مختلف در طول آزمایش و به صورت لحظه‌ای و نیز تهیه خروجی‌های آزمایش در قالب فایل با فرمت نرم‌افزار Excel می‌باشد.

- ابزار دقیق:

اندازه‌گیری و یا کنترل جابجایی محوری افقی و قائم نمونه‌های خاک توسط یک حسگر جابجایی با دقت ۰/۱ میلی‌متر و بازه جابجایی ۴۵ میلی‌متر برای بارگذاری مونوتونیک و دو حسگر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و بازه جابجایی ۴۰ میلی‌متر در دو راستای افقی و قائم برای بارگذاری سیکلی و دینامیکی میسر شده است. همچنین مقادیر نیروهای محوری قائم و افقی نیز توسط دو حسگر نیرو با دقت ۱ نیوتن و بازه اندازه‌گیری ۵ کیلونیوتن اندازه‌گیری و یا کنترل می‌شوند.



شکل ۶- حسگرهای نیرو و کرنش افقی



شکل ۷- حسگرهای نیرو و کرنش عمودی

• **تجهیزات بندر المنت برای ارسال و دریافت موج برشی:**

مدول برشی ( $G$ ) در ارزیابی انتشار امواج لرزه‌ای در طول لایه‌های خاک در پاسخ دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی در معرض لرزش یا در معرض انفجار مانند فونداسیون‌ها، دیوارهای حائل و همچنین سازه‌های زیرزمینی و خاکی یک پارامتر کلیدی است. کرنش‌ها در سازه‌های ژئوتکنیکی ناشی از بارهای دینامیکی بسیار کوچک هستند و مدول برشی اندازه‌گیری شده در کرنش‌های کوچک (کمتر از  $10^{-3}$ ) به عنوان مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) در نظر گرفته می‌شود. مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ )، حالت الاستیک در کرنش‌های کوچک را تا زمانی که میزان افت در تماس‌های جزئی ناچیز است و تغییر شکل‌ها با رفتار الاستیک کنترل می‌شود بیان می‌کند.

مدول برشی ماکزیمم را می‌توان هم در محل و هم در آزمایشگاه و با استفاده از آزمایش‌های مختلف محاسبه کرد. فاکتورهای مختلفی از جمله نسبت تخلخل، نسبت پیش‌تحکیمی ( $OCR$ )، تاریخچه‌ی تنش-کرنش و میزان تنش موثر، بر مقدار مدول برشی تاثیرگذار هستند. روش بندر المنت (المان

خمشی) و آزمایش ستون تشدید پرکاربردترین روش‌های آزمایشگاهی در اندازه‌گیری  $G_{max}$  در خاک‌های غیراشباع است. البته لازم به ذکر است هر دو روش برای حالت اشباع هم کاربرد دارند. در این پژوهش با اندازه‌گیری سرعت موج برشی و استفاده از روابط، مدول برشی ماکزیمم محاسبه شده است.

بخش‌های مختلف دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج برشی که جزء متعلقات دستگاه برش ساده دینامیکی می‌باشد، به شرح زیر است:

**پداستال بالا و پایین:** دو عدد پداستال که یکی برای بالای نمونه و دیگری برای پایین نمونه در نظر گرفته شده است همانند پداستال‌های معمولی دستگاه هستند، با این تفاوت که هرکدام دارای یک سنسور پیزوالکتریک برای ارسال و دریافت موج برشی می‌باشد. این دو پداستال به جای پداستال‌های معمولی در دستگاه قرار می‌گیرند و هرکدام به وسیله‌ی کابل به اوسیلوسکوپ متصل می‌گردند. این پداستال‌ها در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۸- پداستال‌های مخصوص آزمایش بندر المنت

**اوسیلوسکوپ:** این دستگاه وظیفه تولید و ارسال موج به هر شکل و فرکانس به سنسور پیزوالکتریک بالا و دریافت موج از طریق سنسور پیزوالکتریک پایین را بر عهده دارد. نمای این دستگاه در شکل ۹ نشان داد شده است.



شکل ۹- اوسیلوسکوپ

**فانکشن ژنراتور:** دستگاه فانکشن ژنراتور مستقیماً با اوسیلوسکوپ در ارتباط است و رابط میان کاربر و اوسیلوسکوپ محسوب می‌شود. فرامین کاربر از جمله نوع موج، فرکانس، و دامنه و بسیاری فرمان دیگر از طریق فانکشن ژنراتور به اوسیلوسکوپ منتقل می‌گردد. نمای این دستگاه را می‌توانید در شکل ۱۰ مشاهده کنید.



شکل ۱۰- فانکشن ژنراتور

نرم افزار کامپیوتری: نرم افزار کامپیوتری به منظور نمایش و دریافت داده ها استفاده می شود. در نرم افزار شکل ظاهری امواج قابل ملاحظه است. شکل ۱۱ تصویری از محیط نرم افزار را نشان می دهد.



شکل ۱۱- محیط نرم افزار

- **تجهیزات نمونه سازی:**

از جمله تجهیزات جانبی پیش بینی شده برای دستگاه کلیدی تجهیزات لازم جهت ساختن نمونه های خاک است که شامل پداستال بالا و پایین، حلقه های فلزی صلب بالا و پایین، حلقه های تفلونی جانبی نمونه، چکش تراکم مخصوص قطر ۱۰۰ میلی متر، غشاء لاستیکی قطر ۱۰۰ میلی متر و تجهیزات



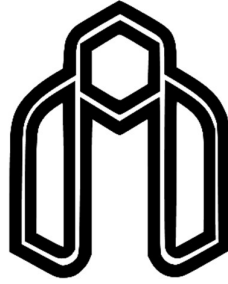
مخصوص آزمایش بندر المنت می باشد.

لازم به ذکر است با توجه به آن که دستگاه مذکور از نوع سروو الکترو پنوماتیکی می باشد، برای تامین فشار بخش های مختلف آن از یک دستگاه کمپرسور هوا با ظرفیت کاری ۸-۱۰ اتمسفر استفاده شده است.

## 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 in 2 different relative densities 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. And finally, soil gradation tests performed using sieves on every specimen to investigate the additive effect on aggregate crushing value. based on the experimental results, under the effect of improvement in the most optimal state of the sample, the amount of shear modulus in low strains increased up to 40% and in high strains, up to 30%, the amount of damping ratio in low strains reduced up to 30 % and in high strains, up to 15% and the amount of maximum shear modulus is increased up to 15%.

**Keywords:** Cyclic simple shear test, Shear modulus, Damping ratio, Bender element, Polyethylene terephthalate (PET)



**Shahrood University of Technology**  
**Civil Engineering Department**

**Study the effect of improvement using shredded  
polyethylene terephthalate (PET) wastes on the  
dynamic properties of sandy soil**

**A Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering**

**By:**  
**Mohammad Tofiqh Tabrizi**

**Supervisor:**  
**Dr. Mohsen Keramati**

**September 2021**