

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

در این تحقیق تأثیر خصوصیات دانه‌بندی از جمله درصد شن، تحکیم ناهمسان، روش ساخت نمونه، تنش همه‌جانبه و دانسیته نسبی بر روی مدول یانگ خاک دانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه شدن شن به ماسه میزبان در یک سطح تنش و دانسیته نسبی خاص، مقدار مدول یانگ خاک در سطوح کرنش‌های کوچک افزایش یافته است، ولی تأثیر آن در سطوح کرنش بزرگ تقریباً ناچیز است. از طرف دیگر با افزایش تنش همه‌جانبه، اثر مقدار شن اضافه شده بر روی تغییرات مدول یانگ کاسته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدول یانگ روند افزایشی با افزایش تنش همه‌جانبه و دانسیته نسبی دارد. همچنین نتایج آزمایش‌های ناهمسان نشان می‌دهد که در نمونه‌های تحکیم یافته تحت تحکیم ناهمسان با افزایش تنش انحرافی اولیه در زمان تحکیم نسبت به نمونه‌های تحکیم یافته در حالت همسان، مقدار مدول یانگ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در نمونه‌های تحکیم یافته در حالت تحکیم ناهمسان با کاهش تنش انحرافی اولیه نسبت به حالت همسان مقدار مدول یانگ کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که روش‌های متفاوت ساخت نمونه‌های دست‌خورده تأثیر مهمی بر روی تغییرات مدول یانگ دارد.

واژگان کلیدی: مدول یانگ، خاک دانه‌ای، تحکیم ناهمسان، روش آماده‌سازی نمونه، آزمایش سه‌محوری تناوبی

مطالعه آزمایشگاهی مدول یانگ خاک‌های دانه‌ای با استفاده از آزمایش سه‌محوری سیکلیک با اندازه‌گیری موضعی کرنش

میشم بیات

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد،
دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران،
bayat.m@pci.iaun.ac.ir

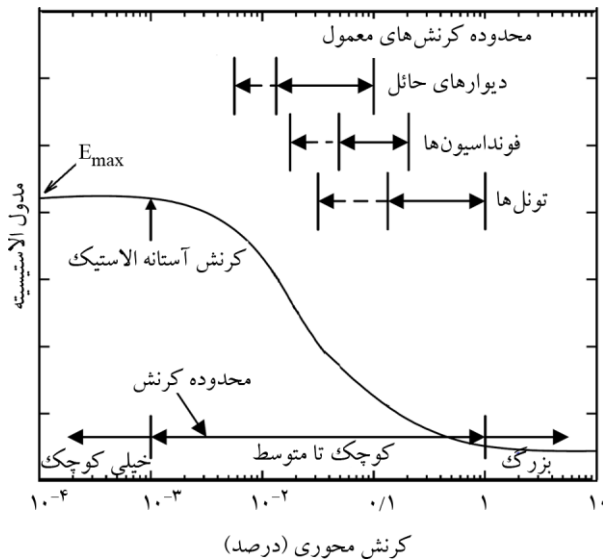
۱- مقدمه

مدول یانگ (E_{50}) مقدار شیب خط عبوری از مرکز نمودار و نقطه متناظر با q_{50} در نمودار تنش-کرنش است. مدول الاستیک دینامیکی (E_d) را می‌توان از طریق اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در آزمایش‌های انتشار موج در محل یا با استفاده از المان‌های خمشی در آزمایش‌های المانی به دست آورد.

مطالعات انجام شده در گذشته نشان می‌دهد که دو مدول یانگ استاتیکی و دینامیکی در انواع خاک‌ها با یکدیگر رابطه تقریباً مستقیمی دارند [۲-۳]. مقدار به‌دست‌آمده از طریق آزمایش انتشار موج در محل یا در آزمایشگاه، مقادیر مدول یانگ محدود در سطوح کرنش خیلی کوچک (حدود 10^{-6}) را نشان می‌دهد. با استفاده از آزمایش‌هایی همچون سه‌محوری تناوبی نیز می‌توان این پارامتر را در سطوح کرنش مختلف به دست آورد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی سختی خاک و

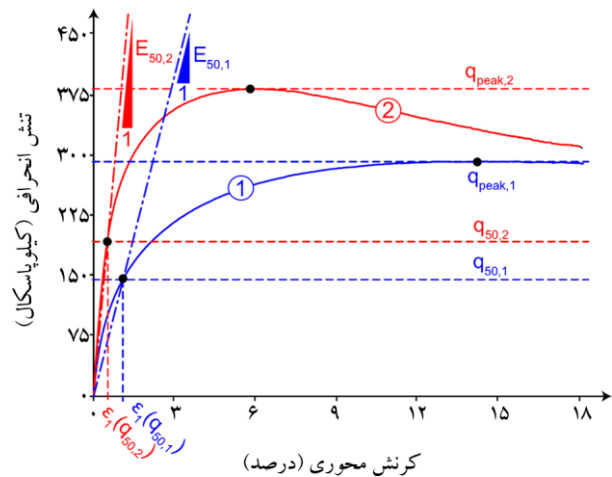
مدول یانگ (E) یکی از پارامترهای مهم در مکانیک خاک است که معمولاً در پروژه‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. این پارامتر دارای اهمیت بالایی است، زیرا به صورت مستقیم سختی مصالح را نشان می‌دهد. ثابت‌های الاستیک (مدول یانگ و ضریب پواسون (ν)) به عنوان پارامترهای اصلی خصوصیات مکانیکی خاک جهت استفاده در تحلیل‌ها و طراحی‌ها پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دو روش رایج برای استخراج مدول یانگ مصالح خاکی عبارت است از روش استاتیکی و روش دینامیکی. در روش استاتیکی، مدول یانگ (E_{50}) که معمولاً از منحنی تنش-کرنش در آزمایش‌های المانی همچون آزمایش سه‌محوری مطابق با شکل (۱) به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، q_{50} مقدار تنش انحرافی معادل نصف تنش انحرافی ماکزیمم (q_{peak}) است و

سطوح مختلف کرنش انجام شده است [۱۱، ۱۵-۲۰] که نتایج این تحقیق‌ها نشان می‌دهد، پارامترهای تأثیرگذار بر روی سختی خاک در سطوح مختلف کرنش برشی در خاک‌های دانه‌ای عبارتند از تنش مؤثر همه‌جانبه، دانسیته نسبی، همسان یا ناهمسانی تنش وارده، دست‌خوردگی خاک، خصوصیات دانه‌بندی و شکل دانه‌ها [۲۱].



شکل (۲): تغییرات مدول یانگ در مقابل کرنش و محدوده کرنش‌های معمول در پروژه‌های عمرانی [۲۲].

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که تاکنون در زمینه شناخت پارامترهای مؤثر بر روی منحنی تغییرات مدول یانگ (E) در مقابل (ϵ_a) مطالعات کمی انجام شده است. انوموتو [۲۳] با اعمال سیکل‌های بارگذاری از طریق آزمایش سه‌محوری اثرات مقدار ریزدانه، ضریب یکنواختی و زبری دانه‌ها را بر روی مدول یانگ خاک‌های دانه‌ای در کرنش‌های کوچک را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مدول یانگ مستقل از مقدار ماکزیمم و متوسط اندازه ذرات است، همچنین با افزایش مقدار ضریب یکنواختی (C_u) مقدار آن کاهش می‌یابد و اثر مقدار ریزدانه اضافه شده و شکل دانه‌ها به‌خوبی مشخص نیست. ماداسوهان و سنتاکیس [۸] تغییرات مدول یانگ نسبت به سطح کرنش را با استفاده از آزمایش ستون تشدید بررسی نمودند که نتایج کاهش غیرخطی مدول یانگ در مقابل افزایش سطح کرنش را نشان می‌دهد. همچنین افزایش دانسیته نسبی یا تنش



شکل (۱): تعیین مدول یانگ خاک از طریق منحنی تنش-کرنش به‌دست آمده از آزمایش سه‌محوری [۱].

سطوح کرنش‌های خیلی کوچک، مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) یا مدول الاستیک ماکزیمم (E_{max}) با استفاده از آزمایش‌های ژئوفیزیکی یا ستون تشدید انجام شده است [۴-۱۲]. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که با افزایش سطح کرنش، مقدار سختی خاک نیز کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال، شکل (۲) تغییرات سختی یک نوع خاک را در مقابل سطح کرنش نشان می‌دهد. مطابق شکل (۲)، بسته به نوع پروژه و یا سطح کرنش ایجاد شده، مقدار مدول یانگ خاک مورد استفاده، متفاوت است. قابل ذکر است که تغییرات غیرخطی سختی در سطوح کرنش‌های متوسط تا بزرگ به دلیل ماهیت رفتار غیرخطی خاک است.

در زمینه عوامل مؤثر بر روی سختی خاک‌های دانه‌ای، گودرزی و همکاران [۱۳-۱۴]، اثر اضافه شدن ریزدانه غیرخمیری بر روی سختی ماسه در کرنش‌های کوچک را بررسی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که اضافه شدن لای به ماسه میزبان موجب کاهش سختی خاک می‌شود. کای و همکاران [۵] سختی خاک را با استفاده از سه آزمایش المان خمشی^۱، ستون تشدید^۲ و برش پیچشی در خاک‌های دانه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تنش مؤثر و دانسیته نسبی باعث افزایش غیرخطی در مقادیر سختی به‌دست آمده در هر سه آزمایش می‌شود.

تاکنون مطالعات زیادی بر روی تغییرات سختی خاک در

ترانسفورماتوری با یک سیم‌پیچ اولیه و دو سیم‌پیچ ثانویه است که به‌طور متفاوتی به یکدیگر اتصال داده شده‌اند. در صورتی که سیم‌پیچ اولیه LVDT توسط یک ولتاژ متناوب تغذیه شود، به دلیل وجود هسته مغناطیسی در میان سیم‌پیچی‌ها و جابه‌جایی هسته که توسط یک واسط غیر مغناطیسی به جسم متحرک متصل است و باعث تغییر در شارژ عبوری و در نتیجه تغییر در ولتاژ القایی سیم‌پیچی‌های ثانویه شده و ولتاژ خروجی که تفاضل ولتاژ القایی دو سیم‌پیچ ثانویه است نیز تغییر می‌کند. ولتاژ مؤثر خروجی به‌طور خطی با موقعیت هسته مغناطیسی نسبت به ترانسفورماتور تغییر می‌کند [۲۹]. دقت اندازه‌گیری این حس‌گرها وابسته به حساسیت آنهاست. در دو دهه اخیر، در آزمایش‌های المانی در ژئوتکنیک برای اندازه‌گیری کرنش در سطوح کوچک و خیلی کوچک از این حس‌گرها استفاده شده است. از جمله موارد مورد استفاده این حس‌گرها در آزمایش سه‌محوری سیکلیک برای اندازه‌گیری کرنش در سطوح کوچک و بسیار کوچک است. در این تحقیق با استفاده از دو کرنش‌سنج موضعی، کرنش‌های سطوح کوچک نمونه خاک در دستگاه سه‌محوری به دست آمده است.

یکی از پارامترهای مهم در تغییرات سختی مصالح دانه‌ای، اثر بارگذاری ناهمسان است. شرایط تنش در خاک محل همیشه به‌سادگی شرایط تنش موجود در سطح زمین نیست. المان‌های خاک در حین ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های مختلف دچار پدیده چرخش تنش‌های اصلی می‌شوند. به‌علاوه جهت این تنش‌ها از یک المان به المان دیگر تغییر می‌یابد. در واقع خاک در پروژه‌های عمرانی بیشتر متحمل تنش‌های ناهمسان است. نمونه‌ای از اعمال بارگذاری سیکلی در شرایط همسان و ناهمسان در شکل (۳) نشان داده شده است.

تاکنون محققین زیادی نشان داده‌اند که رفتار زهکشی نشده خاک‌ها متأثر از جهت بارگذاری است [۳۰-۳۶]. در یک آزمایش سه‌محوری در یک مقدار فشار همه‌جانبه مشخص در زمان تحکیم همسان، با افزایش تنش انحرافی ($q > 0$) برای حالت تنش انحرافی اضافی به‌صورت افزایشی و کاهش تنش انحرافی ($q < 0$) برای

همه‌جانبه باعث افزایش غیرخطی مدول یانگ شده است. سید و همکاران [۲۴] با استفاده از آزمایش‌های المانی، کاهش سختی برای سنگ شکسته و شن گرد در تراز کرنش حدود $10^{-6} \times 5$ را گزارش کردند که کمتر از مقادیر نظیر برای ماسه‌های تمیز است. آزمایش‌های مشابهی توسط کوکوشو [۲۵] روی سنگ شکسته انجام شد. نتایج آنها نیز شروع سریع‌تر کاهش نسبت سختی مصالح سنگی را نسبت به خاک‌های ماسه‌ای را نشان می‌دهد. تاناکا و همکاران [۲۶] نیز اثر تنش محصورکننده را بر روی پارامترهای دینامیکی مصالح دانه‌ای حاوی شن بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش محدودکننده، منحنی نسبت سختی به سمت بالا حرکت کرده است و برای یک سطح تنش ثابت، گروه خاکی با ۵۰ درصد شن داری نرخ کاهش بیشتر در نسبت سختی نسبت به نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد شن است. هاردین [۲۷] خصوصیات دینامیکی مخلوط شن و ماسه را با استفاده از دستگاه ستون تشدید مورد بررسی قرار داد. این نتایج نشان می‌دهد که خصوصیات دینامیکی خاک‌های شنی مخلوط با ماسه تابعی از نسبت منافذ، فشار همه‌جانبه و خصوصیات دانه‌بندی است. لین و همکاران [۲۸] با استفاده از آزمایش سه‌محوری بزرگ‌مقیاس خصوصیات دینامیکی خاک‌های شنی مخلوط با ماسه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درصد شن اثر مهمی بر روی رفتار غیرخطی خاک‌های مخلوط شن و ماسه در کرنش‌های بزرگ دارد.

یکی از عوامل مهم در آزمایش‌های سیکلیک در سطوح کرنش‌های کوچک، دقت ابزار اندازه‌گیری تنش و کرنش است. ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT)، نوعی از ترانسفورماتور الکتریکی مورد استفاده برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی است. LVDTs مبدل‌های قوی و مطلق موقعیت خطی و جابه‌جایی هستند که به‌طور ذاتی بدون اصطکاک هستند. LVDT ابزار الکترومکانیکی است که دارای خروجی الکتریکی متناسب با جابه‌جایی یک هسته مغناطیسی متحرک است. این ابزار متشکل از یک هسته مغناطیسی و

آزمایشگاهی جامع بر روی پارامترهای تأثیرگذار از جمله روش ساخت نمونه و تحکیم ناهمسان انجام نشده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای مؤثر همچون تنش همه‌جانبه، دانسیته نسبی، روش ساخت نمونه، اضافه شدن مقدار شن به ماسه میزبان و تحکیم ناهمسان بر روی منحنی تغییرات مدول یانگ خاک ماسه‌ای در مقابل کرنش محوری با استفاده از آزمایش سه‌محوری سیکلیک بررسی شده است. قابل ذکر است که در تمامی تحقیق‌های گذشته اثر تحکیم ناهمسان فقط در حالت تنش ناهمسان با تنش انحرافی اولیه بزرگ‌تر از صفر بررسی شده است، ولی در این تحقیق اثر تحکیم ناهمسان در دو حالت تنش ناهمسان در دو حالت با تنش انحرافی اولیه کوچک‌تر و بزرگ‌تر از صفر مورد بررسی قرار گرفته است.

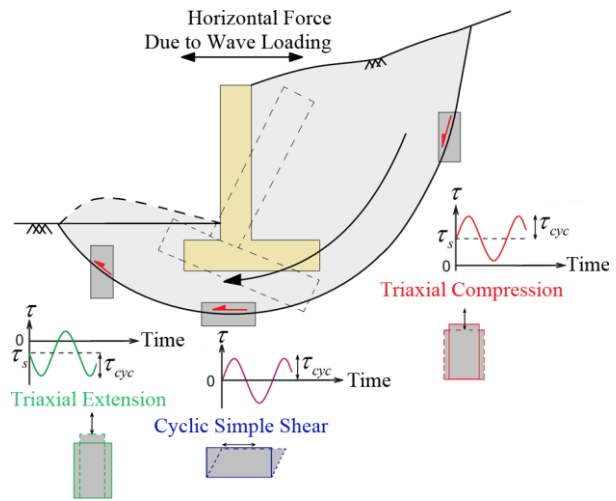
۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از دستگاه سه‌محوری تناوبی بر روی گروه‌های خاک دانه‌ای که ترکیبی از درصدهای مختلف شن و ماسه بوده‌اند، تغییرات مدول یانگ خاک در سطح وسیعی از کرنش مورد مطالعه واقع شده است. در ادامه مشخصات دستگاه مورد استفاده، روند انجام آزمایش‌ها و در نهایت نتایج به‌دست آمده ارائه شده است.

۲-۱- دستگاه سه‌محوری تناوبی

با استفاده از بارگذاری تناوبی و بررسی لوپ تنش-کرنش مانند آنچه در شکل (۴) ارائه شده است، می‌توان تغییرات مدول یانگ سکانت و یا تانژانت مصالح را بررسی کرد.

در این مقاله با استفاده از اندازه‌گیری موضعی کرنش، تغییرات مدول یانگ سکانت مصالح دانه‌ای بررسی شده است. در دستگاه‌های معمول سه‌محوری، خطاهای صفحات بارگذاری و اثرات قابلیت سیستم، معمولاً اندازه‌گیری کرنش‌های برشی را به مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۰۱ درصد محدود می‌کند، گرچه با اندازه‌گیری کرنش موضعی می‌توان اندازه‌گیری‌های دقیقی از کرنش‌های کوچک تا حدود ۰/۰۰۰۱ درصد را نیز انجام داد.

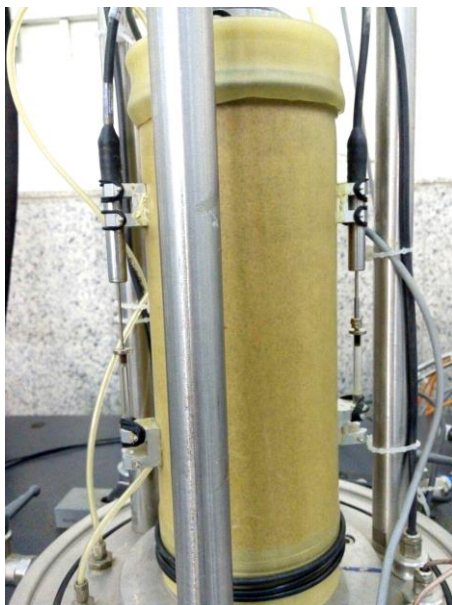


شکل (۳): نمونه‌ای از بارگذاری همسان و ناهمسان.

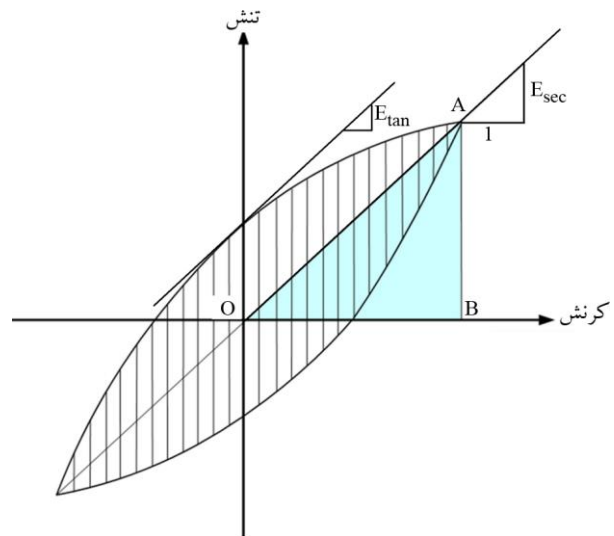
حالت تنش انحرافی اضافی به‌صورت کاهشی، می‌توان آزمایش را تحت تحکیم ناهمسان انجام داد. در حالت اول ($q > 0$)، تنش اصلی بزرگ‌تر به‌صورت عمودی است و در حالت دوم ($q < 0$) تنش اصلی به‌صورت افقی است. می‌توان در این زمینه به کار واید و همکاران [۳۶] اشاره نمود که آزمایش‌های ناهمسان در حالت تنش انحرافی اولیه بزرگ‌تر از صفر و کوچک‌تر از صفر را بر روی نمونه‌های ماسه‌ای انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های خاکی مشابه دارای رفتار متفاوتی در این دو نوع آزمایش هستند، به طوری که اضافه فشار آب حفره‌ای بیشتری در نمونه‌های تحت تنش تحکیمی ناهمسان در حالت تنش انحرافی اولیه کوچک‌تر از صفر نسبت به نمونه‌های تحت تنش تحکیمی ناهمسان در حالت تنش انحرافی اولیه بزرگ‌تر از صفر مشاهده می‌شود. برای بررسی اثر بافت خاک، محققین در آزمایش‌های المانی از روش‌های متفاوت ساخت نمونه استفاده کرده‌اند. از جمله این روش‌های ساخت می‌توان به روش کوبش مرطوب^۳، رسوب در آب^۴ و ریزش خشک^۵ اشاره کرد [۳۷-۳۸]. تحقیق‌های گذشته نشان می‌دهد که روش ساخت نمونه بر روی رفتار استاتیکی، مقاومت سیکلی، سختی و ظرفیت باربری خاک تأثیر مهمی دارد [۳۹-۴۱].

اگرچه تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر روی مدول یانگ انجام شده است، ولی تاکنون مطالعه

اجزای دستگاه است، به عبارت دیگر پیستون بارگذاری و سلول در طول مرحله بارگذاری دچار تغییر شکل می‌شوند. دومین عامل خطای بستر است، به طوری که نمونه در محل اتصال با کپ بالا یا پایه پایین دستگاه ممکن است صاف و هموار نباشد. در این تحقیق با استفاده از یک دستگاه سه‌محوری با قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌های محوری در سطوح کرنش‌های کوچک تا بزرگ با استفاده از کرنش‌سنج‌های اندازه‌گیری موضعی (مطابق شکل ۵)، تغییرات مدول یانگ در سطح وسیعی از کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. کرنش‌سنج‌های مورد استفاده از نوع RPD Group ساخته شرکت بوده است که دقتی در حدود 320mV/V دارد؛ و قابل ذکر است که دقت اندازه‌گیری کرنش‌سنج‌های موضعی در سطوح کرنش‌های کوچک با استفاده از آزمایش ستون تشدید بر روی نمونه‌های مشابه در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه نتایج ستون تشدید و سه‌محوری در سطوح کرنش‌های مشترک نشان می‌دهد که آزمایش سه‌محوری همراه با کرنش‌سنج‌های موضعی از دقت مناسبی جهت اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها برخوردار است. در این تحقیق تمامی منحنی‌ها با استفاده از کرنش‌سنج‌های موضعی به دست آمده است و از کرنش‌سنج خارجی استفاده نشده است.



شکل (۵): اندازه‌گیری موضعی کرنش با استفاده از کرنش‌سنج‌های موضعی در این تحقیق.



شکل (۴): نمونه لوپ بارگذاری تناوبی بر روی مصالح و محاسبه مدول یانگ سکانت و تانژانت.

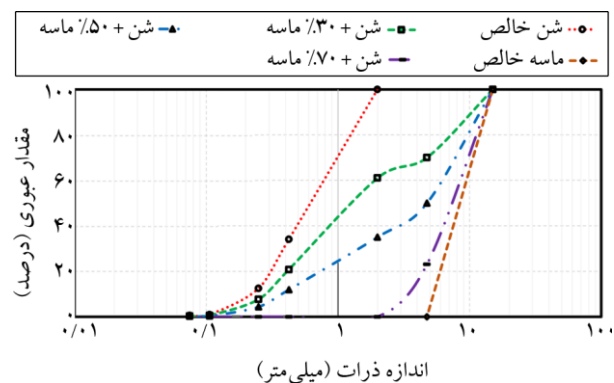
گسترش دانش در شناخت خصوصیات سختی خاک در سطوح پایین کرنش برای اولین بار توسط بورلند و سایمز [۴۲] معرفی شد. آنها برای این کار، استفاده از حس‌گرهای اندازه‌گیری کرنش به صورت موضعی را در آزمایش‌های سه‌محوری برای اندازه‌گیری کرنش محوری پیشنهاد دادند. در این زمینه، اسکولی و همکاران [۴۳] تمامی ابزارهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری کرنش در سطوح پایین را بررسی کردند. نمونه‌ای از این ابزارها، کرنش‌سنج‌های اثر هال^۶ است که اولین بار توسط کلایتون و همکاران [۴۴] معرفی شده است. از خصوصیات مهم این کرنش‌سنج، وزن کم، سادگی، دقت بالا و دسترسی آسان است. استفاده از ابزارهای کرنش‌سنج در آزمایش‌های سه‌محوری توسط بورلند و سایمز [۴۲] به طور کامل شرح داده شده است. آنها دریافتند که اندازه‌گیری‌های موضعی نسبت به حالتی که از ابزارهای معمولی جهت اندازه‌گیری کرنش در کرنش‌های کمتر از 10^{-1} درصد استفاده می‌شود، سختی بیشتری به ما می‌دهد.

در دستگاه‌های سه‌محوری معمولی، تغییر شکل محوری نمونه خاک بیرون از سلول سه‌محوری انجام می‌شود. این روش خطای فراوانی در محاسبه کرنش دارد. در واقع در این روش دو عامل مهم برای ایجاد خطا وجود دارد. اولین خطا مرتبط با

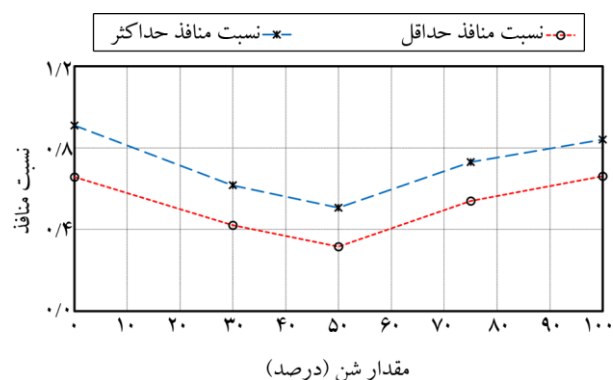
۲-۲- خصوصیات مصالح مورد استفاده

مصالحی که در تحقیق پیش روی مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل ماسه سیلیسی شکسته ۱۶۱ فیروزکوه به همراه شن معدن متوساک بوده است. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی بوده و دارای دانه‌بندی یکنواخت است. در شکل (۶) دانه‌بندی مخلوط‌های مختلف شن و ماسه به کار رفته در این تحقیق نشان داده شده است.

تغییرات نسبت منافذ ماکزیمم و مینیمم در گروه‌های خاکی مورد استفاده در شکل (۷) ارائه شده است. واضح است که با اضافه کردن ماسه به شن خالص، نسبت تخلخل حداقل و حداکثر آن تغییر خواهد کرد. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، نیازمند داشتن این مقادیر برای خاک‌های مخلوط هستیم. از این روی می‌بایست نسبت تخلخل حداقل و حداکثر خاک در درصد شن‌های متفاوت به دست آید. نسبت تخلخل



شکل (۶): منحنی دانه‌بندی گروه‌های خاکی مورد استفاده در این تحقیق.



شکل (۷): تغییرات نسبت منافذ حداقل و حداکثر در گروه‌های مختلف خاکی.

حداقل (متراکم‌ترین حالت) بر اساس ASTM D-4253 و نسبت تخلخل حداکثر (سست‌ترین حالت) بر اساس ASTM D-4254 به دست می‌آیند [۴۵-۴۶]. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد شن نسبت تخلخل حداقل و حداکثر به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این روند تا درصد وزنی حدود ۵۰ درصد ادامه یافته و بعد از آن با کاهش میزان ماسه، افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق این است که در ابتدا با اضافه کردن شن به ماسه خالص، دانه‌های ماسه در لابه‌لای حفرات موجود در بین دانه‌های شن قرار گرفته و بیشترین فضاهای خالی بین دانه‌های شن را پر می‌کنند، در نتیجه حجم فضاهای خالی کاهش یافته و نسبت تخلخل نیز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر مقدار شن و کم شدن مقدار ماسه، پس از پر شدن بیشترین فضاهای خالی حفرات بین دانه‌های شن (نزدیک به ۵۰ درصد شن)، کم‌کم دانه‌های شن با افزایش ماسه از یکدیگر فاصله گرفته و به صورت غوطه‌ور درون ماسه قرار می‌گیرند. با این روند فضای خالی بین ذرات شن شروع به افزایش می‌کند. به عبارت دیگر با یک انرژی تراکم یکسان در تمامی گروه‌های خاکی مورد مطالعه، در مخلوط ماسه همراه با مقدار تقریبی نزدیک به ۵۰ درصد شن می‌توان به کمترین مقدار فضای خالی در مخلوط رسید.

۲-۳- روند انجام آزمایش‌ها و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های بازسازی شده در این تحقیق بیشتر بر اساس روش کوبش مرطوب (WT) ساخته شده‌اند. قابل ذکر است که برای بررسی روش ساخت در مرحله آخر دو نمونه با روش رسوب در آب (WP) و روش رسوب در هوا یا ریزش خشک (AP) نیز بررسی شده است. در روش کوبش مرطوب، یک رطوبت اولیه (حدود ۳ درصد) به خاک اضافه می‌شود و خاک مرطوب شده در ۱۰ لایه (هر لایه ۲ سانتی‌متر) درون قالب ریخته شده و متراکم می‌شود. با استفاده از این روش در نهایت نمونه‌های به دست آمده با نسبت ارتفاع به قطر ۲ (ارتفاع نمونه ۲۰ سانتی‌متر و قطر آن ۱۰ سانتی‌متر) مورد بارگذاری قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این روش نمونه‌سازی سعی شده است برای

۲-۱/۰ هر ترز باشد که در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق فرکانس ۱ هر ترز انتخاب شد [۵۰]. نتایج بارگذاری‌های اولیه در این تحقیق نشان می‌دهد که دستگاه سه‌محوری مورد استفاده در فرکانس ۱ هر ترز بهترین شکل بارگذاری را داشته است و در فرکانس‌های کمتر و بیشتر از این مقدار، فرم سینوسی بارگذاری از حالت نرمال کمی خارج شده است. در مرحله بارگذاری، بزرگی تنش انحرافی (q) در طول آزمایش تغییر خواهد کرد. تغییرات تنش انحرافی در روند آزمایش به این صورت است که در گام اول کم‌ترین مقدار ممکن که توسط دستگاه سه‌محوری به‌درستی قابل‌اعمال باشد (در آزمایش‌های انجام‌شده برابر ۲/۵ و یا ۵ کیلو پاسکال) در ۴۰ سیکل ذکر شده به نمونه اعمال شده و در طول این ۴۰ سیکل تنش انحرافی مطابق همین مقدار ثابت و به‌صورت سیکلی بکخواخت به نمونه اعمال می‌شود. بعد از اعمال ۴۰ سیکل بارگذاری در هر مرحله با باز کردن شیرهای زهکشی نمونه، به نمونه اجازه داده می‌شود تا زهکشی کاملاً صورت گیرد. بعد از این دو مرتبه شیرهای بالا و پایین نمونه بسته شده و مرحله بعدی بارگذاری یعنی ۴۰ سیکل بعدی اعمال می‌شود. تنش انحرافی در هر مرحله نسبت به مرحله قبلی افزایش می‌یابد و این روند تا کرنش‌های بزرگ و یا گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. از آنجا که اکثر محققین، لوپ دهم را جهت به دست آوردن سختی در نظر گرفته‌اند [۵۱-۵۷]، در اینجا نیز از لوپ دهم تمامی مراحل بارگذاری جهت محاسبه مدول یانگ خاک استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، با استفاده از آزمایش‌های انجام شده اثر دانسیته نسبی، اثر تنش مؤثر متوسط، اثر اضافه شدن شن، اثر ناهمسانی در تنش اعمالی و روش ساخت نمونه بر روی منحنی مدول یانگ در مقابل کرنش محوری به‌صورت زیر قابل دستیابی است. لازم به ذکر است که تغییرات مدول برشی و میرایی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش سه‌محوری، ستون تشدید و المان خمشی در مطالعات گذشته نویسنده ارائه شده است [۵۸-۵۹].

رسیدن به نمونه‌ای همگن، لایه‌های پایین کمتر از لایه‌های بالا کوبیده شود [۴۷-۴۸]. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها مرحله اشباع‌سازی، تحکیم و بارگذاری است. در ادامه مراحل مختلف انجام آزمایش به تفصیل بیان خواهد شد.

اشباع‌سازی نمونه‌ها شامل سه مرحله به ترتیب زیر است: مرحله اول عبارتست از عبور دادن گاز دی‌اکسید کربن از نمونه. پس از اتمام مرحله عبور گاز، آب مقطر هواگیری شده از پایین به بالای نمونه عبور داده می‌شود. مرحله بعدی اعمال پس فشار به نمونه است. کنترل درجه اشباع به‌وسیله پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون (B) انجام شده است. در آزمایش‌های اشباع انجام شده، مقدار پارامتر اسکمپتون بالای ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است (مطابق با استاندارد ASTM D-4767 [۴۹]). بعد از آن که نمونه خاک به حالت اشباع رسید، فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه را با توجه به پس فشار و مقدار تنش تحکیمی مؤثر افزایش می‌دهیم. با توجه به نوع آزمایش‌های سه‌محوری انتخاب‌شده در این تحقیق در مرحله تحکیم اجازه زهکشی به آب حفره‌ای داده می‌شود. با گذشت زمان حجم آب خروجی از داخل نمونه خاک در یک مقدار معین ثابت می‌شود. پایان مرحله تحکیم زمانی است که هیچ‌گونه اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه وجود نداشته باشد. در زمان اعمال بار دینامیکی، امکان زهکشی آب حفره‌ای درون خاک وجود ندارد و فقط در زمان بین مراحل بارگذاری اجازه زهکشی داده می‌شود. به عبارت دیگر بعد از هر مرحله بارگذاری اجازه می‌دهیم اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده از بین برود. در هر مرحله از بارگذاری ۴۰ سیکل بارگذاری به‌صورت تنش کنترل با شرایط زهکشی نشده اعمال می‌شود و بعد از هر مرحله اجازه زهکشی داده می‌شود تا زمانی که تمامی اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده از بین برود. دامنه تنش در مراحل بارگذاری از مقادیر کوچک آغاز شده و مرحله به مرحله افزایش یافته است تا نمونه دچار گسیختگی شود. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در شرایط کنترل تنش و با اعمال بار سینوسی بکخواخت انجام می‌شوند. طبق استاندارد ASTM D3999 فرکانس بارگذاری سینوسی بکخواخت در آزمایش‌های کنترل تنش می‌بایست بین

جدول (۱): جزئیات آزمایش‌های انجام شده.

گروه آزمایش	متغیر مورد بررسی	خاک مورد بررسی	دانشیته نسبی	تنش مؤثر متوسط	روش ساخت نمونه
۱	دانشیته نسبی	ماسه خالص	۱۰٪، ۳۰٪، ۶۰٪	۶۰۰ کیلوپاسکال	کوبش مرطوب
۲	تنش مؤثر متوسط	ماسه با ۵۰٪ شن خالص	۶۰٪	۱۰۰ کیلوپاسکال ۳۰۰ کیلوپاسکال ۶۰۰ کیلوپاسکال	کوبش مرطوب
۳	مقدار شن	ماسه خالص ماسه مخلوط با ۳۰٪ ماسه مخلوط با ۵۰٪ ماسه مخلوط با ۷۵٪ شن خالص	۶۰٪	۱۰۰ کیلوپاسکال ۳۰۰ کیلوپاسکال ۶۰۰ کیلوپاسکال	کوبش مرطوب
۴	تنش ناهمسان	ماسه خالص	۶۰٪	۳۰۰ کیلوپاسکال	کوبش مرطوب
۵	روش ساخت نمونه	ماسه خالص	۶۰٪	۳۰۰ کیلوپاسکال	کوبش مرطوب ریزش خشک رسوب در آب

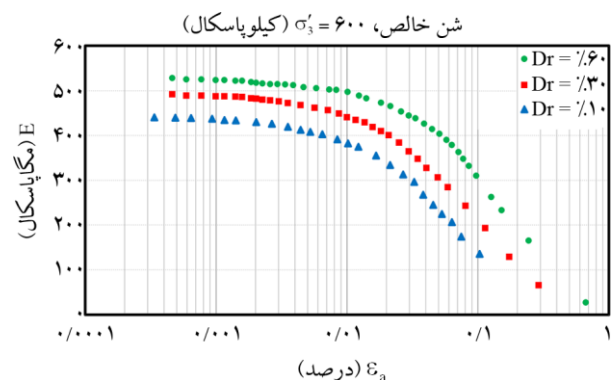
۳-۱- اثر دانشیته نسبی

بررسی شده است، ولی در اینجا برای نشان دادن این اثر فقط برای ماسه خالص، ماسه مخلوط با ۵۰ درصد شن و شن خالص انتخاب شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که هر سه گروه خاکی، افزایش تنش باعث افزایش مدول یانگ شده است که این اثر در سطوح کرنش کوچک نسبت به سطوح کرنش بزرگ بیشتر است. در واقع با افزایش سطح کرنش اثر تنش محصور کننده کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثر دانشیته نسبی بر روی پارامترهای دینامیکی، خاک ماسه خالص تحت سه دانشیته نسبی ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد تحت تنش همه‌جانبه ۶۰۰ کیلوپاسکال مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مربوط به این سه آزمایش در شکل (۸) ارائه شده است. مطابق شکل (۸)، افزایش دانشیته نسبی باعث افزایش مدول یانگ در سطوح مختلف کرنش شده است.

۳-۳- اثر اضافه شدن شن

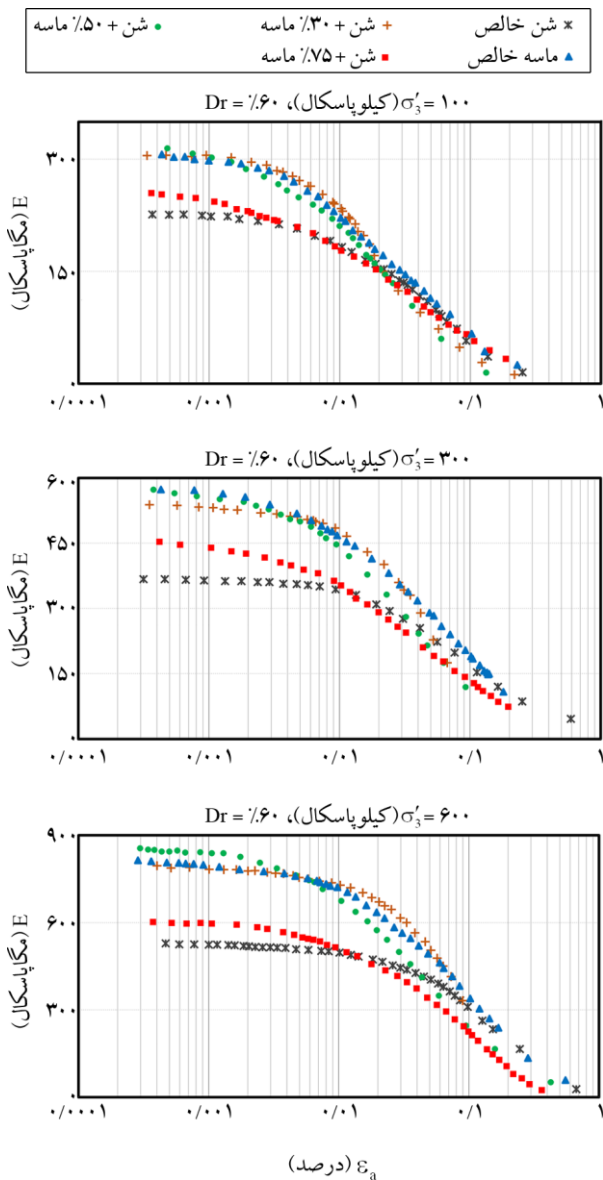
اثر اضافه شدن شن به ماسه میزبان در سه سطح تنش ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال در دانشیته نسبی ثابت ۶۰ درصد بررسی شده است. نتایج این مرحله از تحقیق در شکل (۱۰) ارائه شده است. قابل ذکر است که رفتار خاک‌های مخلوط مثل شن و ماسه یا ماسه و لای تابعی از نسبت اندازه ذرات، شکل دانه‌ها و گسترگی اندازه ذرات است. مطابق شکل (۱۰)، تغییرات مدول یانگ در مقابل درصد شن تابعی از سطح کرنش است. مثلاً در سطوح کرنش‌های کوچک، ماسه مخلوط با ۵۰ درصد شن بیشترین مقدار مدول یانگ را دارد. نتایج مربوط به شن و ماسه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در این نوع خاص از شن و ماسه،



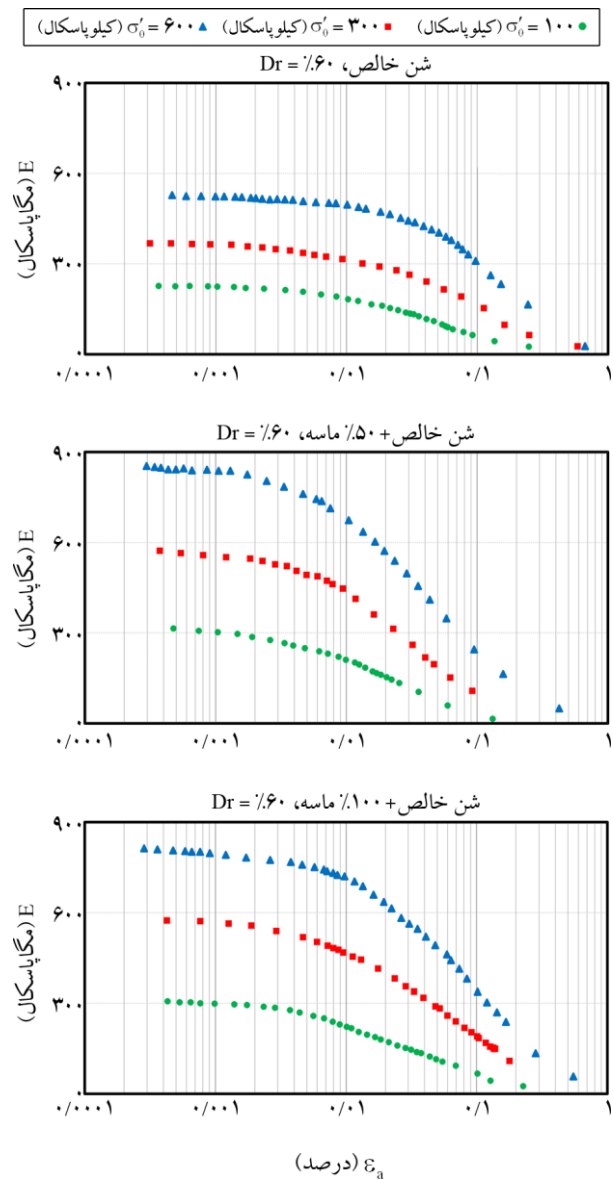
شکل (۸): اثر دانشیته نسبی بر روی تغییرات مدول یانگ.

۳-۲- اثر تنش مؤثر متوسط

برای بررسی اثر تنش همه‌جانبه بر روی منحنی تغییرات مدول یانگ در مقابل کرنش اگرچه در هر پنج گروه خاکی



شکل (۱۰): اثر مقدار شن بر روی تغییرات مدول یانگ.



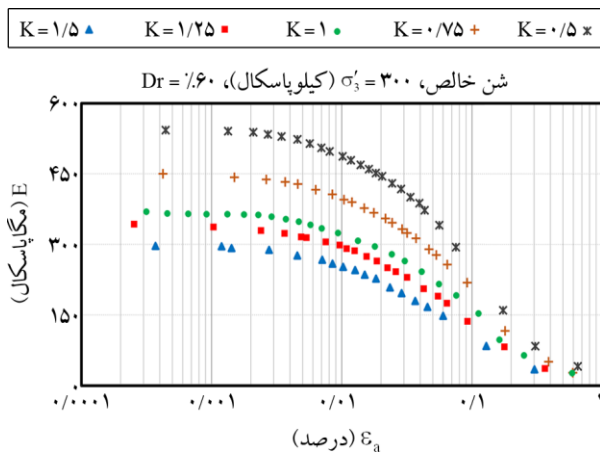
شکل (۹): اثر تنش همه‌جانبه بر روی تغییرات مدول یانگ.

از طرف دیگر منحنی‌های مربوط به تمامی نمونه‌ها با درصد شن‌های مختلف، در کرنش‌های متوسط تا بزرگ همگرا شده است که سطح کرنش مربوط به این همگرایی تابعی از سطح تنش است. با کاهش تنش، منحنی‌ها در سطح کرنش کوچک‌تری همگرا شده‌اند.

۳-۴- اثر ناهمسانی در تنش اعمالی

در بیشتر مطالعه‌های گذشته، آزمایش‌های المانی همچون سه‌محوری در حالت همسان انجام شده است. درحالی که در

ماسه مخلوط با ۵۰ درصد شن، بیشترین مقدار تنزل در سختی را دارد. این نشان می‌دهد که در این میزان شن، ترکیب ماسه و شن به صورتی است که بیشترین لغزش یا غلتش بین دانه‌ها رخ می‌دهد که این اتفاق باعث کاهش بیشتر سختی می‌شود. دلیل این اتفاق به دلیل خاص بودن چیدمان دانه‌های شن و ماسه در نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد شن است. در واقع در نمونه‌های ۵۰ درصد شن، دانه‌های ماسه همانند ساچمه‌های ریز بین دانه‌های شن قرار گرفته و اعمال نیرو باعث حرکت و لغزش دانه‌های شن می‌شود.



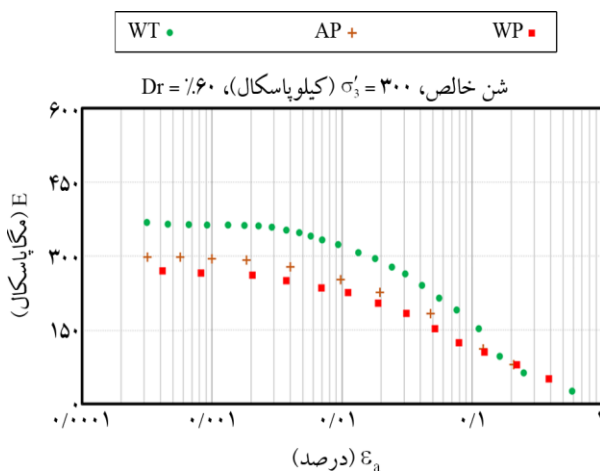
شکل (۱۱): اثر تحکیم ناهمسان بر روی تغییرات مدول یانگ.

تحکیمی ناهمسان با تنش انحرافی اولیه کمتر نسبت به حالت همسان ($K > 0$) موجب کاهش مدول یانگ نسبت به حالت همسان شده است.

۳-۵- اثر روش ساخت

اثر روش ساخت نمونه بر روی منحنی تغییرات مدول یانگ در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های ماسه خالص در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این مرحله از تحقیق از سه روش ساخت نمونه، یعنی روش کوبش مرطوب، ریزش خشک و رسوب در آب استفاده شده است.

در این مرحله از آزمایش‌ها، اثر روش ساخت نمونه بر روی نمونه‌های ماسه خالص با دانسیته نسبی ۶۰ درصد و تحت تنش همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال بررسی شده است.



شکل (۱۲): اثر روش ساخت نمونه بر روی تغییرات مدول یانگ.

واقعیت بیشتر حالت‌های خاک ناهمسان است. در این مرحله با استفاده از بارگذاری اولیه در زمان تحکیم، تغییرات منحنی مدول یانگ در مقابل کرنش در حالت ناهمسان بررسی شده است. قابل ذکر است تمامی آزمایش‌های این مرحله با تراکم نسبی ثابت ۶۰ درصد انجام شده است. هدف از این گروه آزمایش‌ها، بررسی تأثیر تحکیم ناهمسان بر روی مدول یانگ خاک‌های دانه‌ای است. با توجه به توانایی دستگاه سه‌محوری، آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و به‌صورت تحکیم همسان ($q=0$)، ناهمسان با تنش انحرافی اولیه بیشتر نسبت به حالت همسان ($q>0$) و ناهمسان با تنش انحرافی اولیه کمتر نسبت به حالت همسان ($q<0$) انجام شده است. در این قسمت برای بررسی اثر تحکیم ناهمسان از پارامتر نسبت تنش تحکیمی استفاده شده که با ضریب K به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1)$$

که در آن σ_h تنش افقی و σ_v تنش عمودی در مرحله تحکیم است. $K = 1$ نشان‌دهنده‌ی حالت همسان، $K > 1$ نشان‌دهنده‌ی حالت ناهمسان در حالت تنش انحرافی اولیه کوچک‌تر از صفر ($q < 0$) و $K < 1$ نشان‌دهنده‌ی حالت ناهمسان در حالت تنش انحرافی اولیه بزرگ‌تر از صفر ($q > 0$) است. در واقع با اعمال تنش انحرافی در زمان تحکیم به‌صورت ($q < 0$) یا ($q > 0$)، حالت تحکیم ناهمسان در نمونه‌ها ایجاد شده است. مثلاً برای تنش تحکیمی ۳۰۰ کیلوپاسکال در حالت تحکیم ناهمسان برای $K = 0.75$ ، مقدار تنش افقی ۳۰۰ کیلوپاسکال و مقدار تنش عمودی کل ۴۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. در واقع در این حالت برای تحکیم ناهمسان، مقدار تنش انحرافی فشاری معادل ۱۰۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه اعمال شده است. نتایج مربوط به این مرحله از آزمایش‌ها در شکل (۱۱) ارائه شده است که تمامی این آزمایش‌ها در تنش همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. مطابق شکل (۱۱)، اعمال تنش انحرافی به‌صورت فشاری ($K < 1$) باعث افزایش بیشتر مدول یانگ خاک نسبت به حالت همسان شده است. از طرف دیگر، اعمال تنش

اعمال تنش انحرافی به صورت فشاری ($K < 1$) باعث افزایش بیشتر مدول یانگ خاک نسبت به حالت همسان شده است. از طرف دیگر، اعمال تنش تحکیمی ناهمسان با تنش انحرافی اولیه کمتر نسبت به حالت همسان ($K > 1$) موجب کاهش مدول یانگ نسبت به حالت همسان شده است که دلیل آن می‌تواند ناشی از افزایش تنش مؤثر میانگین در حالت تنش ناهمسان فشاری و کاهش آن در حالت تنش ناهمسان تنش تحکیمی ناهمسان با تنش انحرافی اولیه کمتر نسبت به حالت همسان ($K > 1$) نسبت به حالت همسان باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه‌ای ساخته شده با روش‌های متفاوت نشان می‌دهد که روش ساخت می‌تواند تأثیر مهمی بر روی پارامتر سختی خاک داشته باشد، به طوری که در سه روش بررسی شده (کوبش مرطوب، ریزش خشک و رسوب در آب)، روش کوبش مرطوب بیشترین مقدار سختی و روش رسوب در آب کمترین مقدار سختی را دارد. قابل ذکر است که اثر روش ساخت تنها در سطوح کرنش کوچک تا متوسط اثرگذار است و در سطوح کرنش بزرگ مقدار سختی تقریباً مستقل از روش ساخت است. در نهایت نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که انتخاب صحیح سختی خاک تابعی از شرایط اعمال تنش، سطح کرنش، شرایط رسوب و خصوصیات فیزیکی خاک دارد.

مراجع

1. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2009) On the correlation of "static" and "dynamic" stiffness moduli of non-cohesive soils. *Bautechnik*, **86**(1), 28-39.
2. Asef, M.R. and Farrokhrouz, M. (2017) A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **157**, 359-363.
3. Wichtmann, T., Kimmig, I., and Triantafyllidis, T. (2017) On correlations between "dynamic" (small-strain) and "static" (large-strain) stiffness moduli – An experimental investigation on 19 sands and gravels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **98**, 72-83.

همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، روش ساخت نمونه تأثیر مهمی بر روی نتایج داشته است، به طوری که نمونه‌های ساخته شده با روش کوبش مرطوب (WT) بیشترین مقدار سختی و بعد از آن نمونه‌های ساخته شده با روش ریزش خشک (AP) را داشته است. نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار سختی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با روش رسوب در آب (WP) است. اگرچه نتایج سه روش ساخت در سطوح کرنش‌های کوچک تا متوسط باهم تفاوت دارند ولی در سطوح کرنش‌های بزرگ مقادیر سختی تقریباً مستقل از روش ساخت نمونه است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی بر روی نمونه‌های بازسازی شده خاک‌های دانه‌ای مخلوط شن و ماسه انجام شده است. بر اساس نتایج اثر دانسیته نسبی، تنش همه‌جانبه، مقدار شن و اعمال تنش تحکیمی به صورت ناهمسان بر روی منحنی مدول یانگ خاک در مقابل کرنش بررسی شده است. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

در تمامی سطوح کرنش، افزایش دانسیته نسبی و تنش همه‌جانبه باعث افزایش سختی خاک شده است. اضافه شدن شن به ماسه میزبان باعث تغییر مدول یانگ خواهد شد، به طوری که در سطوح کرنش‌های کوچک، ماسه مخلوط با ۵۰ درصد شن بیشترین مقدار مدول یانگ را دارد. در حالی که ماسه مخلوط با ۵۰ درصد شن در کرنش‌های متوسط تا بزرگ، بیشترین مقدار تنزل در سختی را نسبت به سایر گروه‌های خاکی دارد. در واقع در مخلوط‌های شن و ماسه، دانه‌های ماسه بین دانه‌های شن قرار گرفته و اعمال سیکل‌های بارگذاری بر روی خاک باعث غلظت و لغزش دانه‌های شن به دلیل وجود دانه‌های ماسه بین آنها، بر روی یکدیگر شده است که این امر موجب کاهش بیشتر نسبت سختی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شن یا ماسه خالص شده است. نتایج آزمایش‌های ناهمسان نیز نشان می‌دهد که

14. Goudarzy, M., Rahemi, N., Rahman, M.M., and Schanz, T. (2017) Predicting the maximum shear modulus of sands containing nonplastic fines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**(9), 06017013.
15. Chien, L.K. and 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.
16. Zhu, S., Yang, G., Wen, Y., and Ou, L. (2014) Dynamic shear modulus reduction and damping under high confining pressures for gravels. *Geotechnique Letters*, **4**, 179-186.
17. Biglari, M. and Ashayeri, I. (2012) An empirical model for shear modulus and damping ratio of unsaturated soils. *5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, **2**(C1), 499-503.
18. Kallioglou, P., Tika, T., Koninis, G., Papadopoulos, S., and Pitilakis, K. (2009) Shear modulus and damping ratio of organic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**(2), 217-235.
19. Maher, M.H., Ro, K.S., and Welsh, J.P. (1994) High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13**(2), 131-138.
20. Zhang, J., Andrus, R.D., and Juang, C.H. (2005) Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(4), 453-464.
21. Ishihara, K. (1997) Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. *Clarendon Press*.
22. Atkinson, J.H., Coop, M.R., Stallebrass, S.E., and Viggiani, G. (1993) Measurement of stiffness of soils and weak rocks in laboratory tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**(5), 277.
23. Enomoto, T. (2016) Effects of grading and particle characteristics on small strain properties of granular materials. *Soils and Foundations*, **56**(4), 745-750.
24. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1986) Moduli and damping factors
4. Camacho-Tauta, J. (2013) Shear modulus reduction curves of Guayuriba sands by cyclic triaxial and bender element tests. *Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, Nagoya, Japan, 3-9.
5. Cai, Y., Dong, Q., Wang, J., Gu, C., and Xu, C. (2015) Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **76**, 100-110.
6. Kawaguchi, T., Mitachi, T., Shibuya, S., and Sano, Y. (2001) Evaluation of elastic shear modulus G in laboratory bender element test. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **1**(694), 195-207.
7. Camacho-Tauta, J.F., Reyes-Ortiz, O.J., and Álvarez, J.D.J. (2013) Comparison between resonant-column and bender element tests on three types of soils. *Dyna* (Colombia), **80**(182), 163-172.
8. Madhusudhan, B.N. and Senetakis, K. (2016) Evaluating use of resonant column in flexural mode for dynamic characterization of Bangalore sand. *Soils and Foundations*, **56**(3), 574-580.
9. Souto, A., Hartikainen, J., and Özüdoğru, K. (1994) Measurement of dynamic parameters of road pavement materials by the bender element and resonant column tests. *Geotechnique*, **44**(3), 519-526.
10. Cabalar, A.F. (2010) Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands. *Engineering Geology*, **112**(1-4), 21-28.
11. Cherian, A.C. and Kumar, J. (2016) Effects of vibration cycles on shear modulus and damping of sand using resonant column tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **142**(12), 1-6.
12. Moayerian, S. (2012) *Effect of Loading Frequency on Dynamic Properties of Soils Using Resonant Column*. Civil Engineering (Master's thesis, University of Waterloo).
13. Goudarzy, M., Rahman, M.M., König, D., and Schanz, T. (2016) Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials. *Soils and Foundations*, **56**(6), 973-983.

36. Vaid, Y.P., Chung, E.K.F., and Kuerbis, R.H. (1990) Stress path and steady state. *Canadian Geotechnical Journal*, **27**(1), 1-7.
37. Zhou, W., Chen, Y., Ma, G., Yang, L., and Chang, X. (2017) A modified dynamic shear modulus model for rockfill materials under a wide range of shear strain amplitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **92**, 229-238.
38. Stahl, M. and Konietzky, H. (2011) Discrete element simulation of ballast and gravel under special consideration of grain-shape, grain-size and relative density. *Granular Matter*, **13**(4), 417-428.
39. Wang, Y.H. and Mok, C.B. (2008) Mechanisms of small-strain shear-modulus anisotropy in soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(10), 1516-1530.
40. Yamamuro, J.A., Wood, F.M., and Lade, P. V. (2008) Effect of depositional method on the microstructure of silty sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(11), 1538-1555.
41. Yamashita, S., Hori, T., and Suzuki, T. (2005) Effects of initial and induced anisotropy on initial stiffness of sand by triaxial and bender elements tests. *Geomechanics: Testing, modeling, and simulation*, 350-369.
42. Burland, J.B. and Symes, M. (1982) A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, **32**(1), 62-65.
43. Scholey, G.K., Frost, J.D., Lo Presti, D.C.F., and Jamiolkowski, M. (1995) A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. *Geotechnical Testing Journal*, **18**(2), 137-156.
44. Clayton, C.R.I., Khatrush, S.A., Bica, A. V.D., and Siddique, A. (1990) Discussion on "the use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation." *Geotechnical Testing Journal*, **13**(1), 63-67.
45. ASTM D4254 (2006) Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. *ASTM International*.
46. ASTM D 4253 (2013) Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, **112**(11), 1016-1032.
25. Kokusho, T. (1980) Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. *Soils and Foundations*, **20**(2), 45-60.
26. Tanaka, Y., Kudo, K., Yoshida, Y., and Ikemi, M. (1987) A study on the mechanical properties of sandy gravel-dynamica properties of reconstituted sample. *Report of Central Research Institute of Electric Power Industry*.
27. Hardin, B. (1973) Shear Modulus of Gravels. *Report TR74-73- CE19, Civil Engineering Department, University of Kentucky*.
28. Lin, S.-Y., Lin, P.S., Luo, H.-S., and Juang, C.H. (2000) Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(3), 638-651.
29. Cuccovillo, T. and Coop, M.R. (1997) The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs. *Geotechnique*, **47**(1), 167-171.
30. De Gennaro, V., Canou, J., Dupla, J.C., and Benahmed, N. (2004) Influence of loading path on the undrained behaviour of a medium loose sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(1), 166-180.
31. Wichtmann, T., Niemunis, A., and Triantafyllidis, T. (2007) On the influence of the polarization and the shape of the strain loop on strain accumulation in sand under high-cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(1), 14-28.
32. Finge, Z., Doanh, T., and Dubujet, P. (2006) Undrained anisotropy of Hostun RF loose sand: New experimental investigations. *Canadian Geotechnical Journal*, **43**(11), 1195-1212.
33. Sivathayalan, S. and Vaid, Y.P. (2002) Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, **39**(1), 63-76.
34. Benahmed, N. (2001) *Comportement Mécanique D'un Sable Sous Cisaillement Monotone Et Cyclique*. Ph.D. Dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
35. Uthayakumar, M. and Vaid, Y.P. (1998) Static liquefaction of sands under multiaxial loading. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(2), 273-283.

Engineering.

57. Wang, G.X. and Kuwano, J. (1999) Modeling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**(6), 463-471.
58. Bayat, M. and Ghalandarzadeh, A. (2018) Stiffness degradation and damping ratio of sand-gravel mixtures under saturated state. *International Journal of Civil Engineering*, **16**(10), 1261-1277.
59. Bayat, M. and Ghalandarzadeh, A. (2019) Influence of depositional method on dynamic properties of granular soil. *International Journal of Civil Engineering*, **17**(6), 907-920.

واژه‌نامه

Bender Elements	۱- المان خمشی
Resonant Column	۲- ستون تشدید
Wet Tamping	۳- کوبش مرطوب
Water Pluviation	۴- رسوب در آب
Air Pluviation	۵- ریزش خشک
Hall Effect Gages	۶- کرنش سنج‌های اثر هال

 using a vibratory table. *ASTM International*.

47. Borhani, A. and Fakharian, K. (2016) Effect of particle shape on dilative behavior and stress path characteristics of Chamkhaleh sand in undrained triaxial tests. *International Journal of Civil Engineering*, **14**(4), 197-208.
48. Selig, E. and Ladd, R (1978) Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, **1**(1), 16.
49. ASTM D 4767 (2011). Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. *ASTM International*.
50. ASTM (2013) Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. *ASTM International*.
51. Yasuda, Y., Matsumoto, N., Yoshioka, R., and Takahashi, M. (1997) Undrained monotonic and cyclic strength of compacted rockfill material from triaxial and torsional simple shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**(3), 357-367.
52. Kumar, S.S., Krishna, A.M., and Dey, A. (2017) Evaluation of dynamic properties of sandy soil at high cyclic strains. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **99**(May), 157-167.
53. Ghodrati, A. and Araei, A.A. (2017) Artificial neural networks for modeling shear modulus and damping behavior of gravelly materials. *International Journal of Geomechanics*, **17**(2), 4016060.
54. Yamada, S., Hyodo, M., Orense, R.P., Dinesh, S. V., and Hyodo, T. (2008) Strain-dependent dynamic properties of remolded sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(7), 972-981.
55. Puzrin, A.M. and Shiran, A. (2000) Effects of the constitutive relationship on seismic response of soils. Part I. Constitutive modeling of cyclic behavior of soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**(5), 305-318.
56. Yoshida, N., Yasuda, S., Kiku, H., and Sawada, S. (2004) Laboratory test for deformation characteristics of sand under level 2 ground motion. *13th World Conference on Earthquake*

Laboratory Study of Young Modulus of Granular Soils Using Cyclic Triaxial Test with Local Strain Measurement

Meysam Bayat

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran,
email: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

Young's modulus (E) is one of the important parameters in soil mechanics that is commonly used in geotechnical projects. This parameter is very important because it directly indicates the hardness of the material. Elastic constants (Young's modulus and Poisson's ratio (ν)) are used as the main parameters of soil mechanical properties for the analysis and design in construction projects. Two common methods for extracting the Young's modulus of soil materials are the static method and the dynamic method. In the static method, the Young's modulus (E_{50}), which is usually obtained from the stress-strain curve in element tests such as the triaxial test. The dynamic elastic modulus (E_d) can be obtained by measuring the compressional wave velocity (V_p) *in situ* wave propagation experiments or by using bender element in element tests. In this study, using a triaxial device, Young's modulus over a wide range of strains have been studied. The effect of grading characteristics such as gravel content, anisotropic consolidation, sample preparation method, confining stress and relative density on the Young's modulus of granular soil has been evaluated. Using local strain measurements, the Young's modulus of granular materials is investigated. In conventional triaxial machines, load plate errors and system capability effects usually limit shear strain measurements to values greater than 0.01%, although local strain measurements can be used to make accurate measurements. The materials used in the present study were 161 Firoozkooh silica sand and Mesutak gravel. Firoozkooh sand 161 has a golden yellow color and has a uniform granulation. The reconstructed specimens in this study are mainly based on the wet tamping (WT) method. It is noteworthy that in order to evaluate the fabrication method in the last stage, two samples with water deposition (WP) method and air deposition or dry precipitation (AP) method have also been studied. The results show that the Young's modulus increases at small strain levels with the addition of gravel to the host sand at a certain stress level and relative density, but its effect at large strain levels is almost negligible. On the other hand, as the confining stress increases, the effect of gravel content on the Young's modulus decreases. The results show that the Young's modulus has an increasing trend with increasing confining stress or relative density. At small strain levels, sand mixed with 50% gravel has the highest Young's modulus. The results related to the studied sand show that in this particular type of sand, sand mixed with 50% gravel has the highest degradation in hardness. This indicates that in this amount of sand, the combination of sand and gravel is such that the most slippage or rolling occurs between the grains, which further reduces the hardness. The reason for this is due to the special arrangement of sand grains in samples containing 50% gravel. In fact, in 50% gravel samples, the grains of sand are placed between the grains of sand like tiny balls, and the application of force causes the grains of sand to move and slip. Also, the results of anisotropic tests show that in the consolidated specimens under anisotropic consolidation, the Young's modulus increases with increasing the initial deviatoric stress compared to the consolidated specimens in the isotropic condition. The results show that different methods of samples preparation have a significant effect on Young's modulus.

Keywords: Elastic Modulus, Granular Soil, Anisotropic Consolidation, Specimen Preparation Method, Cyclic Triaxial Test.