بررسی اثر مدول الاستیسیته، مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی در تحلیل دینامیکی خاک

مقاله پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
رضا فتحی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
مازیار شیرخانی چشمه شفیع، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v. ghiasi@malayeru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵- پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵
صفحه ۱۰۰-۸۷

چکیده

هدف از انجام این مقاله بررسی نقش پارامترهای دینامیکی خاک شامل نسبت میرایی، مدول برشی، مدول الاستیسیته و بررسی سرعت موج برشی در بخش‌های مختلف، آشنایی با روش‌های اندازه‌گیری هر یک از این پارامترها و تاثیر شرایط مختلف بر روی این پارامترها در دینامیک خاک می‌باشد. روش پژوهش مروری بر منابع و ماخذ موجود بر پارامترهای دینامیکی خاک شامل نسبت میرایی، مدول برشی، مدول الاستیسیته و سرعت موج برشی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش ساختار خاک تاثیر مستقیمی بر روی خواص دینامیکی خاک دارد و هرچه مقدار سرعت موج برشی بیشتر باشد، خاک ساختگاه سخت‌تر و از کیفیت بیشتری برخوردار هست.تقریبا تمامی پروژه‌های عمرانی بر روی خاک احداث می‌شوند. بنابراین، شناخت دقیق و صحیح از خاک و مشخص کردن رفتار پارامترهای دینامیکی خاک می‌تواند در جهت ارائه یک طراحی ایمن و اقتصادی تاثیرگذار باشد. از میان خاصیت‌های دینامیکی خاک مدول برشی، نسبت میرایی و مدول الاستیسیته از اهمیت بیشتری برخوردار هستند و همچنین روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری این پارامترها وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های دینامیکی خاک، مدول برشی، نسبت میرایی

۱- مقدمه

بررسی رفتار دینامیکی خاک یک امر مهم برای اجرای پروژه‌های عمرانی می‌باشد به همین دلیل پیش‌بینی رفتار دینامیکی خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هست. خاصیت‌های دینامیکی خاک‌ها شامل مدول برشی و نسبت میرایی از پارامترهای بسیار مهم جهت بررسی رفتار دینامیکی و همچنین مدل‌سازی رفتار مصالح هستند. هدف از این مقاله بررسی پارامترهای ذکر شده در شرایط مختلف و یافتن درک بهتری از این پارمترها می‌باشد. رفتار دینامیکی خاک همانند رفتار استاتیکی تابع سطح تنش بوده ولی تنش و کرنش آن وابسته به زمان می‌باشد. بنابراین عوامل زیر در ماهیت بارهای دینامیکی خاک و در نتیجه رفتار دینامیکی خاک تاثیر می‌گذارد (گرمرودی، ۱۳۹۳):۱- تعداد یا تکرار بارگذاری ۲- رفت و برگشتی بودن بارگذاری۳-زمان تناوب. نوع بارگذاری دینامیکی وابسته به منبع آن می‌باشد. دو نوع بارگذاری دینامیکی در

شکل ۱ نمایش داده شده است. نمودار پایینی که همراه با کاهش و افزایش‌های متناوب، بارگذاری سیکلیک است و نمودار بالایی بارگذاری را نشان می‌دهد که در اثر افزایش به یک مقدار حداکثری رسیده سپس کاهش یافته است که به باگذاری مونوتونیک معروف است. این بارگذاری در ادامه می‌تواند به صورت سیکلیک نیز ادامه یابد (گرمرودی، ۱۳۹۳).

پاسخ تنش-کرنش برای خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده تحت بارهای مونوتونیک ملایم‌تر از خاک‌های تحت بارگذاری سیکلی می‌باشد (پرستی و همکاران، ۱۹۹۷). خاصیت‌های دینامیکی خاک عبارت است از (میرمحمدحسینی، ۱۳۸۸):

-مقاومت برشی برحسب سرعت تغییرشکل نسبی

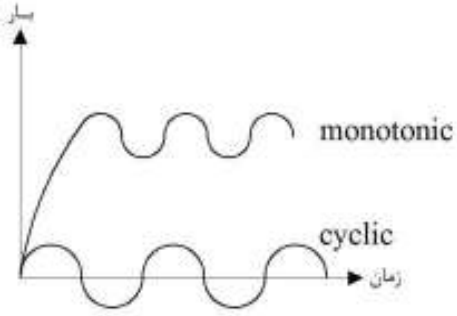
- ضریب‌های دینامیکی شامل مدول الاستیسیته و مدول برشی

-ضریب پواسون

- میرایی و یا استهلاک نوسانات در خاک

-تغییرشکلی سیکلی و واکنش فشار حفره‌ای

۲- بررسی پارامترهای مدول برشی، مدول الاستیسیته، نسبت میرایی و سرعت موج برشی



شکل ۱. نمودار بارگذاری دینامیکی (گرمرودی، ۱۳۹۳)

۲-۱- مدول الاستیسیته

آن را با نماد E نشان می‌دهیم روش‌های مختلفی جهت تعیین مدول الاستیسیته در خاک وجود دارد. که عبارتند از: روش آزمایشگاهی و صحرایی و رابطه‌های تجربی، لازم به ذکر است که بیشتر رابطه‌های تجربی ارائه شده مربوط به خاک‌های دانه‌ای هستند (قنبری، ۱۳۸٦). از جمله کاربردهای مدول الاستیسیته تعیین Ks (ضریب عکس‌العمل بستر) که به‌طور گسترده در طراحی انواع شالوده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (امینی آهی دشتی و حداد، ۱۳۹٤). طی تحقیقات صورت گرفته راهکارهایی برای افزایش مدول الاستیسیته خاک وجود دارد. از جمله این راهکارها مسلح‌سازی خاک با استفاده از ژئوگریدها می‌باشد، ژئوگریدها یکی از اعضای پرکاربرد خانواده ژئوسنتیک‌ها هستند که از خصوصیات مهم آن‌ها می‌توان به تغییرشکل کم در برابر نیروی کششی زیاد، مقاومت کششی نهایی بالا، رفتار بلند مدت مناسب به‌دلیل کرنش کم اشاره کرد. حضور ژئوگریدها در خاک باعث افزایش مدول الاسستیسیته خاک می‌گردد (مهرپروژه، آقائی و مقدس تفرشی، ۱۳۹٤). نکته قابل توجه درخصوص استفاده از ژئوگریدها این است که در خاک غیرمسلح افزایش تراکم باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود، در خاک مسلح با ژئوگریدها با افزایش تراکم کاهش مقاومت نیز می‌شود از این جهت باید رعایت شود که قرار دادن لایه ژئوگرید در بین لایه‌های خاکی به‌هر دلیلی که باشد مقاومت را تا حدودی کاهش می‌دهد (آقائی، مهرپروژه و اسماعیلی، ۱۳۹٤). یکی دیگر از انواع ژئوسنتیک‌ها ژئوسل می‌باشد. در خصوص استفاده از ژئوسل افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مدول الاستیسیته خاک به‌وجود می‌آید (لکی روحانی و عباسیان، ۱۳۹٤).

۲-۲- نسبت میرایی

آن را با نماد D نمایش می‌دهیم از جمله پارامترهای مهم برای آنالیزهای دینامیکی می‌باشد نکته قابل توجه درخصوص میرایی این است که هنگامی که خاک در حالت اشباع قرار دارد با افزایش دامنه کرنش برشی و در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای تولید شده کاهش می‌یابد (بهادری و فرضعلی‌زاده،

۱۳۹۷). میرایی به مفهوم جذب انرژی است و در اجسام انعطاف‌پذیرتر میرایی بیشتر است. به این ترتیب هرچقدر خاک شل‌تر باشد میرایی بیشتری خواهد داشت (شعاری شعار، ۱۳۹٦).

۲-۳- مدول برشی

آن را با نماد G نمایش می‌دهیم این پارامتر وابسته به ساختار خاک بوده به‌طوری که اگر خاک مسلح باشد دارای مدول برشی بالاتری نسبت به خاک غیر مسلح می‌باشد. از جمله مصالحی که برای مسلح‌سازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد الیاف ژئوتکستایل می‌باشد (غیاثیان و همکاران، ۱۳۸۷). یکی از نسبت‌هایی که با استفاده از آن می‌توان مدول برشی را تعیین کرد، نسبت G/Gmax می‌باشد. از جمله کاربردهای این نسبت تعیین سختی خاک می‌باشد در صورتی که این نسبت افزایش یابد یعنی کاهش سختی کمتری در خاک رخ داده است (شعاری شعار، ۱۳۹٦). از عوامل تاثیرگذار بر نسبت G/Gmax، شاخص خمیری می‌باشد که در صورت افزایش آن، مقدار نسبت مدول برشی افزایش می‌یابد (جعفری، رزم‌خواه و شغیعی، ۱۳۸۱). برای تعیین مقدار مناسب مدول برشی G و نسبت میرایی D به منظور طراحی باید به نکات زیر توجه نمود (شعاری شعار، ۱۳۹٦):

-نوع آزمایشی که باید پارامتر را از آن بدست آورد.

-بزرگی دامنه کرنش برشی که این پارامترها باید در آن محدوده اندازه‌گیری شوند.

به طور کلی مدول برشی G و نسبت میرایی D خاک‌ها تابع چندین فاکتور می‌باشند که شامل نوع خاک، فشار همه‌جانبه، میزان کرنش دینامیکی، درصد اشباع خاک، فرکانس و تعداد سیکل‌های بارگذاری دینامیکی، بزرگی تنش دینامیکی و پیش کرنش دینامیکی هستند (شعاری شعار، ۱۳۹٦). همچنین اثر گذر زمان برای پیش‌بینی تکامل مشخصات دینامیکی به‌دست انسان مهم می‌باشد. پیش‌بینی تغییرات مدول برشی با گذر زمان برای یک طراحی واقعی و دائمی سازه‌های خاکی، تحقق شرایط ایمنی و اقتصادی مهم می‌باشد (ترونکوسو و گارسس، ۲۰۰۰).

۲-٤- سرعت موج برشی:

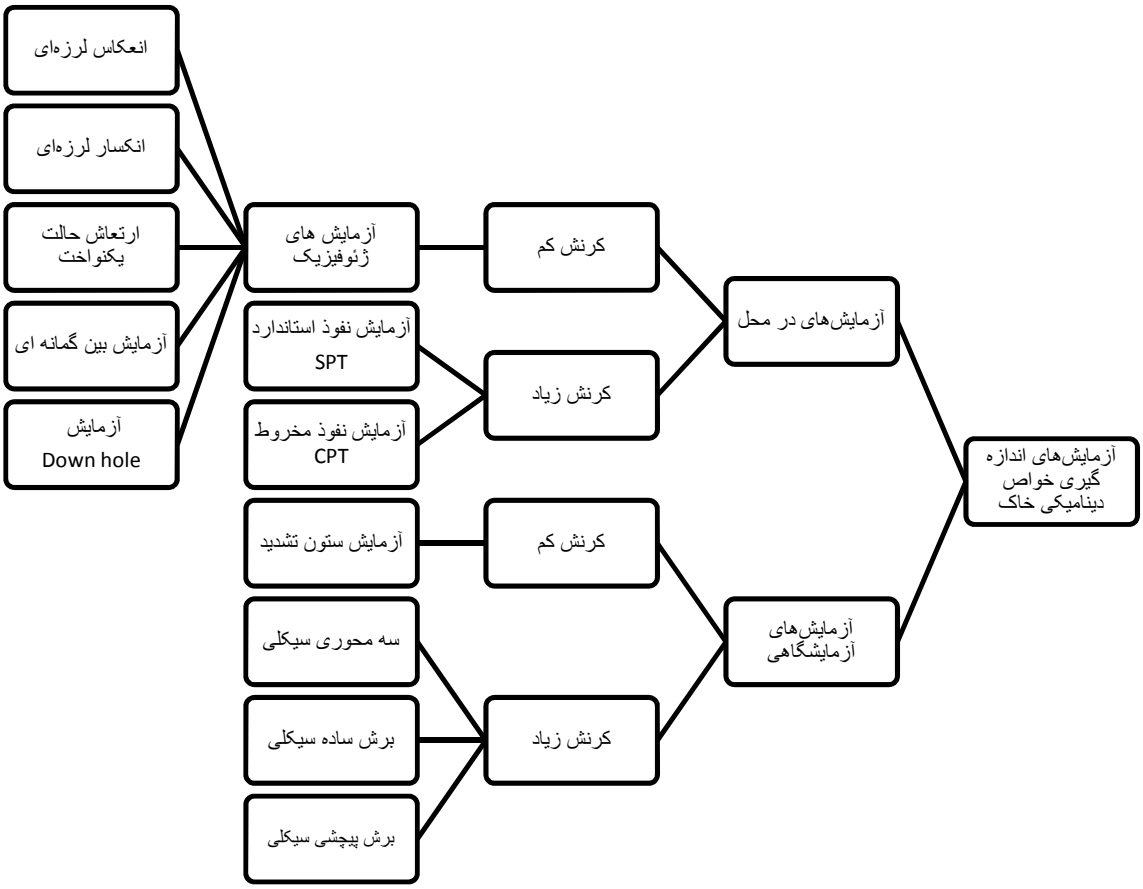
سرعت موج برشی را با نماد Vs نمایش می‌دهیم. عوامل تاثیرگذار بر این پارامتر عبارت است از: چگالی، رسوبی بودن، آبرفتی بودن، رطوبت و ساختار خاک (غفارپور جهرمی و محمدی، ۱۳۹۸). از جمله کاربردهای سرعت موج برشی در تعیین نوع زمین در استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشد (هاشمی طباطبایی، سلامت و محمدی، ۱۳۹۰).

۳- انواع آزمایش‌های بررسی خاصیت‌های دینامیکی خاک

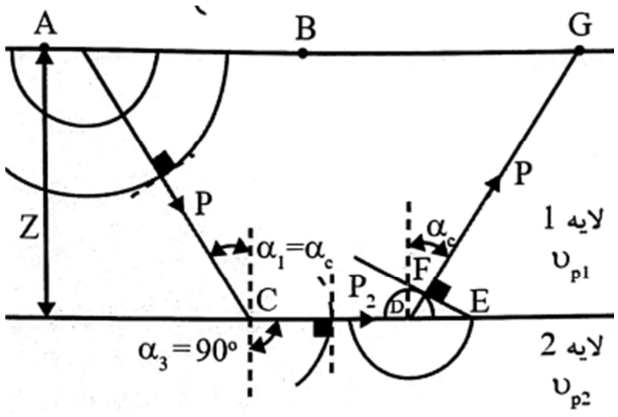
در شکل ۲ برخی از آزمایش‌هایی که به وسیله آن خاصیت‌های دینامیکی خاک مشخص میگردد دسته بندی گردیده است.

۳-۱- آزمایش انکسار لرزه‌ای

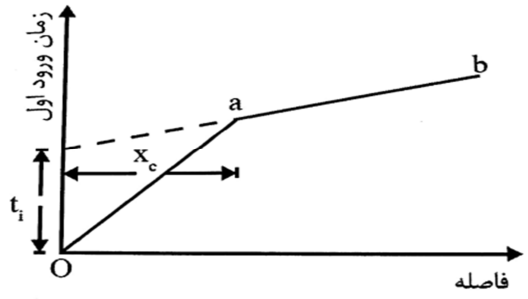
حالتی را در نظر بگیرید که دو لایه خاک به صورت افقی بر روی هم قرار دارند و سرعت موج فشاری در لایه پایینی بیشتر است. مطابق شکل ۳ در نقطه A موج ضربه‌ای تولید می‌شود و در فاصله‌ای دورتر مثل نقطه G به کمک ژئوفن موج دریافت می‌شود. مشاهده می‌شود که موج P مطابق شکل ۳ مسیر ACDG را طی می‌کند تا به ژئوفن برسد (شعاری شعار، ۱۳۹٦). بر اساس منحنی زمان-مسافت مطابق شکل ٤ می‌توان سرعت موج فشاری در هر دو لایه تحتانی، فوقانی و همچنین ضخامت لایه اول را به دست آورد (شعاری شعار، ۱۳۹٦).



شکل ۲. آزمایش‌های اندازه‌گیری خاصیت‌های دینامیکی خاک



شکل ۳. مسیر طی شده موج P (شعاری شعار، ۱۳۹۶)



شکل ٤. نمودار زمان–مسافت (شعاری شعار، ١٣٩٦)

به منظور تخمین ضخامت لایه اول از رابطه ۱ استفاده می‌شود. که در آن Xc فاصله افقی بین نقاط a و O می‌باشد، vp سرعت موج و z ضخامت لایه می‌باشد (شعاری شعار، ١٣٩٦).

$$Z = \frac{X_C}{۲}\sqrt{\frac{VP_{۲}-VP_{۱}}{VP_{۲}+VP_{۱}}} \qquad (۱)$$

۳-۲- آزمایش انعکاس لرزه‌ای

از بررسی انعکاس امواج نیز می توان در بدست آوردن اطلاعات و خواص لایه‌های خاک استفاده نمود. مطابق شکل ۵ یک پروفایل دو لایه خاک را نقطه تولید ارتعاش A نشان می‌دهد. اگر در نقطه C به فاصله X از A یک گیرنده قرار دهیم، زمان طی مسافت امواج P بر اساس رابطه شماره ۲ خواهد بود (شعاری شعار، ١٣٩٦).

$$t=\frac{AB+BC}{VP۱} \qquad (۲)$$

در رابطه۲، t زمان کل حرکت در مسیر ABC و VP سرعت موج می‌باشد. با استفاده از رابطه ۲ ضخامت لایه اول را می‌توان طبق رابطه ۳ به دست آورد (شعاری شعار، ١٣٩٦):

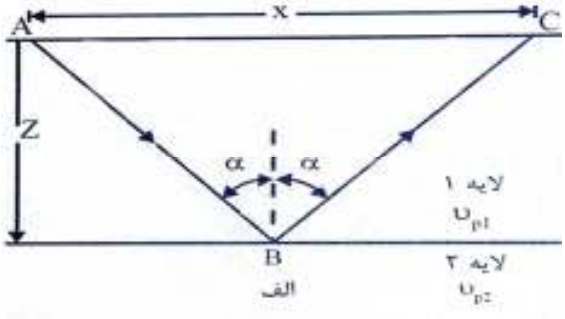
$$Z=\frac{۱}{۲}\sqrt{(VP_{۱}t)^{۲}-x^{۲}} \qquad (۳)$$

در رابطه ۳، z ضخامت لایه اول، VP سرعت موج، t زمان کل حرکت و x فاصله نقطه تولید ارتعاش تا گیرنده می‌باشد (شعاری شعار، ١٣٩٦).

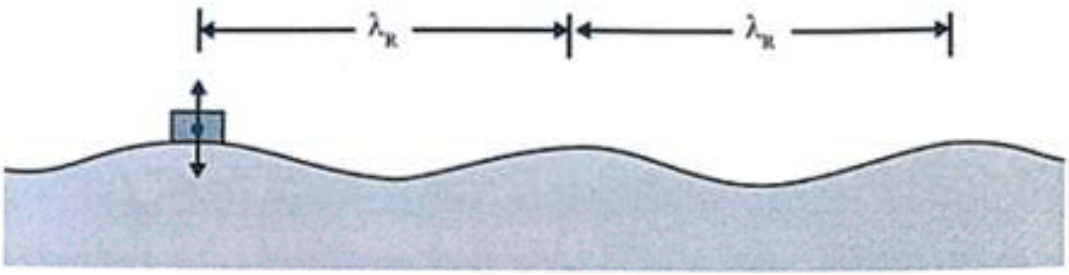
۳-۳- آزمایش ارتعاش حالت یکنواخت (موج رایلی)

این آزمایش برای تعیین موج برشی نزدیک به سطح زمین مناسب می‌باشد. از روی سرعت موج رایلی، ضریب پواسون خاک و نموداری که این دو را به هم مرتبط می‌کند سرعت موج برشی قابل تعیین خواهد بود که برای بسیاری از خاک‌ها VR=۱/۰۹VS می‌باشد (شعاری شعار، ١٣٩٦).

تغییرمکان سطحی در مجاورت یک پی دایره‌ای که به صورت قائم مرتعش می‌شود به وسیله امواج رایلی تولید خواهد شد. از آنجایی که امواج رایلی تغییرمکان‌های قائم و افقی را تولید می‌نمایند سطح زمین همانند شکل ٦ تغییرشکل خواهد داد (شعاری شعار، ١٣٩٦).



شکل ۵. مسیر حرکت موج انعکاسی (شعاری شعار، ١٣٩٦)



شکل ٦. موج رایلی موجب تغییرمکان سطح زمین در مجاورت یک پی که به طور قائم ارتعاش می‌کند شده است (شعاری شعار، ١٣٩٦)

با قرار دادن یک گیرنده در مرکز پی و جابجا کردن گیرنده دیگری در نقاطی با فواصل مختلف از گیرنده اول، موقعیت نقاطی که در وضعیت هم‌فاز حرکت می‌کنند قابل تعیین خواهد بود (شعاری شعار، ١٣٩٦).

٣-٤- آزمایش ستون تشدید

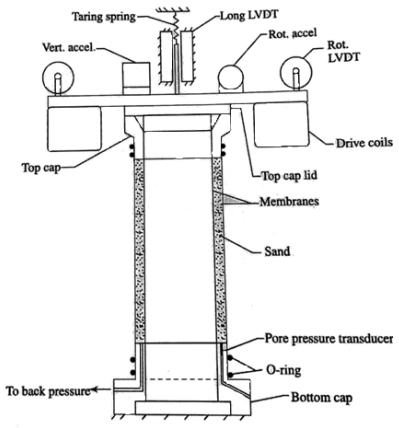
در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری دینامیکی محوری یا پیچشی قرار می‌گیرند. باید آنقدر فرکانس باگذاری را تغییر داد تا فرکاس تشدید در نمونه خاک به‌دست آید. کوچکترین فرکانس تشدید فرکانس اصلی نمونه خواهد بود. سپس سرعت موج برشی مطابق رابطه ٤ محاسبه می‌شود (شعاری شعار، ١٣٩٦).

$$VS=f_1\times 4H \qquad (٤)$$

در رابطه ٤، VS سرعت موج برشی، f_1 فرکانس تشدید و H ارتفاع نمونه می‌باشد (شعاری شعار، ١٣٩٦). اگر بارگذاری محوری باشد سرعت موج میله و مدول الاستیسیته به دست می‌آید و اگر بارگذاری پیچشی باشد سرعت موج برشی و مدول برشی به دست می‌آید. این آزمایش در کرنش‌های کم استفاده می‌شود (شعاری شعار، ١٣٩٦). دستگاه ستون تشدید در شکل ٧ نمایش داده شده است همچنین برای به دست آوردن مدول برشی از رابطه ٥ استفاده می‌کنیم (شعاری شعار، ١٣٩٦).

$$G_{max}=\rho vs^2 \qquad (٥)$$

در رابطه ٥، G_{max} مدول برشی حداکثر، ρ چگالی و VS سرعت موج می‌باشد (شعاری شعار، ١٣٩٦).



شکل ٧. دستگاه ستون تشدید با نمونه توخالی (شعاری شعار، ١٣٩٦)

یکی از دستگاه‌هایی که آزمایش ستون تشدید را انجام می‌دهد دستگاه مدل Seiken هست. این دستگاه شامل سیستم کنترل و ثبت نتایج سلول بارگذاری و سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی می‌باشد و از دقت بسیار بالایی در ثبت نتایج برخوردار هست (جعفریان و جاودانیان، ۱۳۹۶).

۳-۵- آزمایش سه محوری سیکلی

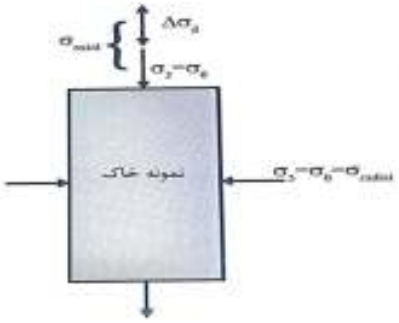
این آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته و میرایی خاک انجام می‌شود. در این آزمایش ابتدا نمونه خاک تحت فشار همه‌جانبه قرار می‌گیرد بعد از آن یک تنش محوری سیکلی مطابق شکل ۸ به نمونه وارد می‌شود (شعاری شعار، ۱۳۹۶).

این آزمایش متداول‌ترین آزمایش در کرنش‌های زیاد می‌باشد ولی شرایط تنشی در مسائلی که انتشار موج لرزه‌ای وجود دارد را نمی‌تواند مدل کند. کرنش‌های برشی اندازه‌گیری شده در این آزمایش بزرگتر از ٤-^۱۰ هستند (شعاری شعار، ۱۳۹۶). مدول برشی و نسبت میرایی با دامنه فشار برشی تحت بارگذاری چرخه به‌طور قابل توجهی متفاوت هست (وانگ و کووانو، ۱۹۹۹). مدول الاستیسیته و مدول برشی به ترتیب براساس رابطه‌های ٦ و ۷ به دست می‌آیند (شعاری شعار، ۱۳۹۶).

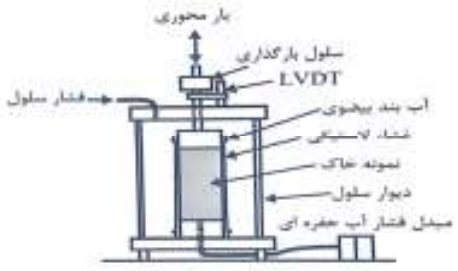
$$E=\frac{\Delta\sigma d}{\varepsilon} \quad (٦)$$

$$G=\frac{E}{٢(١+\mu)} \quad (٧)$$

در رابطه ٦، E مدول الاستیسیته، $\Delta\sigma d$ تنش محوری سیکلی، ε کرنش می‌باشد و در رابطه ۷، G مدول برشی و μ ضریب پواسون خاک می‌باشد (شعاری شعار، ۱۳۹۶). دستگاه سه محوری سیکلی و اجزاء تشکیل دهنده آن به طور کامل در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۸. بارگذاری در آزمایش سه محوری سیکلی (شعاری شعار، ۱۳۹۶)



شکل۹. دستگاه سه محوری سیکلی (شعاری شعار، ۱۳۹۶)

همچنین در صورت استفاده از Gap-Sensor بر روی دستگاه سه محوری سیکلی تعیین مدول برشی و نسبت میرایی با دقت بهتری انجام می‌شود (آقایی آرایی، ۱۳۹۵).

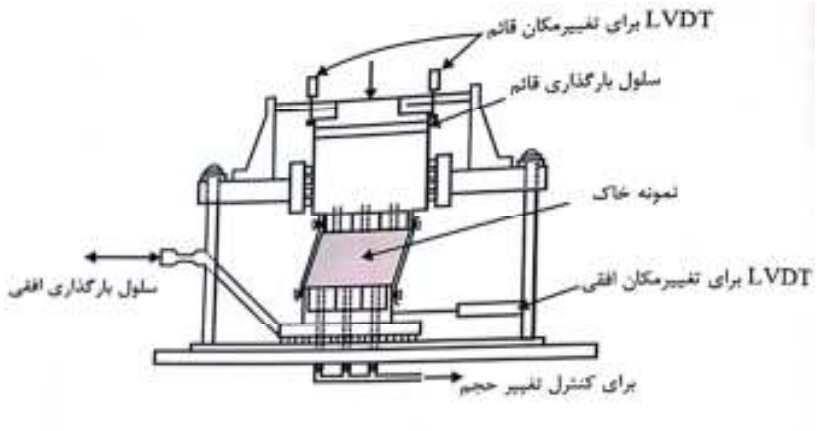
Gap-Sensor وسیله‌ای برای اندازه‌گیری سرعت موج (در زمان اعمال ضربه) و همچنین اندازه‌گیری کرنش در مکان‌های مناسب روی نمونه هنگام آزمایش سه‌محوری سیکلی هست (آقایی آرایی، ۱۳۹۵).

۳-۶- آزمایش برش ساده سیکلی

این آزمایش روش مناسب برای تعیین مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌هاست همچنین یک دستگاه مناسب برای مطالعه روانگرایی خاک‌های دانه‌ای اشباع می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ که دستگاه آزمایش برش ساده سیکلی به نمایش گذاشته شده است، در این آزمایش معمولاً ارتفاع نمونه ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر و قطر نمونه ٦۰ تا ۸۰ میلیمتر است که در معرض تنش موثر قائم و یک تنش برشی سیکلی قرار می‌گیرد. بار مورد نظر به منظور تغییرشکل نمونه با بارسنج و تغییرشکل برشی نمونه با «ترانسفورماتور تفاضلی متغیر خطی»[1] اندازه‌گیری می‌شود. مدول برشی با رابطه ۸ به دست می‌آید (شعاری شعار، ۱۳۹٦).

$$G=\frac{\tau}{\gamma'} \qquad (۸)$$

در رابطه ۸، τ تنش برشی سیکلی و γ' کرنش برشی می‌باشد (شعاری شعار، ۱۳۹٦).



شکل ۱۰. دستگاه برش ساده سیکلی (شعاری شعار، ۱۳۹٦)

۳-٦-۱- روش انجام آزمایش برش ساده سیکلی (شعاری شعار، ۱۳۹٦)

یک نمونه استوانه‌ای کوتاه با غشاء لاستیکی مسلح که در مقابل اتساع جانبی مقاوم می‌باشد. با اعمال تنش برشی افقی سیکلی به بالا یا پایین نمونه، نمونه آزمایش بسیار شبیه یک المان خاک در اثر انتشار قائم امواج S تغیرشکل می‌دهد و دچار کرنش برشی می‌شود در این آزمایش اثرات غیر یکنواختی تنش‌ها از طریق افزایش نسبت قطر به ارتفاع نمونه قابل کاهش می‌باشد.

۳-٦-۲- مزایای آزمایش برش ساده سیکلی (شعاری شعار، ۱۳۹٦)

-شرایط موجود در زمین را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

-برخلاف دستگاه ستون تشدید فشار آب حفره‌ای را اندازه‌گیری می‌کند.

۳-۷- آزمایش برش پیچشی سیکلی

در این آزمایش خاک در معرض تنش موثر قائم، یک تنش موثر افقی داخلی و خارجی و یک گشتاور برشی سیکلی قرار می‌گیرد. در این آزمایش جهت افزایش یکنواختی شعاعی در کرنش‌های برشی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی ابداع شد (شعاری شعار، ۱۳۹٦). در این آزمایش برای به دست آوردن کرنش برشی و مدول برشی به ترتیب از رابطه‌های ۹ و ۱۰ استفاده می‌کنیم (شعاری شعار، ۱۳۹٦).

$$\gamma'=\frac{r\theta}{h} \qquad (۹)$$

$$G=\frac{\tau}{\gamma'} \qquad (۱۰)$$

در رابطه ۹، $r\theta$ زاویه شعاع، h ارتفاع نمونه و در رابطه ۱۰، τ تنش برشی سیکلی و γ' کرنش برشی می‌باشد (شعاری شعار، ۱۳۹٦). در جدول شماره ۱ توانایی برخی از آزمایش‌ها برای به بررسی پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول۱. بررسی توانایی برخی از آزمایش‌ها برای به بررسی پارامترهای مختلف

انواع آزمایش	مدول برشی	مدول الاستیسیته	میرایی مصالح	کاهش دامنه موج
ستون تشدید	خوب	خوب	خوب	-
سه محوری سیکلی	-	خوب	خوب	-
برش ساده سیکلی	خوب	-	خوب	-
برش ساده پیچشی	خوب	-	خوب	-
ژئوفیزیکی	-	-	-	خوب

جدول۲. مروری بر مطالعات پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول الاستیسیته، مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی

ردیف	نام نویسنده و سال	پارامتر مورد مطالعه	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۱	(جعفری، رزم‌خواه و شفیعی، ۱۳۸۱)	مدول برشی	مطالعات آزمایشگاهی	باآزمایش‌هایی که درباره خصوصیات دینامیکی خاک ریزدانه جنوب تهران انجام گرفت به این نتیجه رسیدند که برای PI کوچکتر از ۱۲ تاثیر چندان مهمی بر روی نسبت مدول برشی و نسبت میرایی ندارد و با افزایش PI نسبت مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش می‌یابد.	PI تاثیر به سزایی در خواص دینامیکی خاک دارد.
۲	(قنبری، ۱۳۸٦)	مدول الاستیسیته	مطالعات آزمایشگاهی	ارتباط معناداری بین مدول الاستیسیته و عدد SPT در آبرفت جنوب تهران وجود دارد. در این تحقیق خاک‌ها به سه ناحیه تقسیم‌بندی شدند در ناحیه ۱ که جنس خاک مخلوط ریزدانه و درشت‌دانه بین ۵۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در ناحیه ۲ بین ۵۰۰ تا ۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در ناحیه ۳ که بیشترین ریزدانه را دارد بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.	با افزایش ریزدانه مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد.
۳	(غیاثیان و همکاران، ۱۳۸۷)	مدول برشی	مطالعات آزمایشگاهی	باافزایش درصد وزنی ژئوتکستایل مدول برشی افزایش می‌یابد.	مسلح کردن خاک تاثیر مثبتی بر خواص دینامیکی خاک دارد.
٤	(میرمحمد حسینی، ۱۳۸۸)	آزمایش های تعیین رفتار دینایکی خاک،خواص دینامیکی خاک‌ها	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	رفتار دینامیکی خاک تابعی از خواص مختلف از جمله تخلخل، دانسیته نسبی، سابقه تنش، فشار پیش تحکیمی، شکل بار دینامیکی، میزان تنش استاتیکی اولیه و تعداد سیکل‌ها خواهد بود.	رفتار دینامیکی خاک تابع پارامترهای مختلفی است.

۵	(هاشمی طبابایی، سلامت و محمدی، ۱۳۹۰)	سرعت موج برشی	مطالعات آزمایشگاهی	با استفاده از سرعت موج برشی می‌توان نوع خاک را در استاندارد ۲۸۰۰ تعیین کرد.	از کاربردهای مهم سرعت موج برشی تعیین نوع زمین در آیین نامه ۲۸۰۰ است.

ادامه جدول ۲. مروری بر مطالعات پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول الاستیسیته، مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی

ردیف	نام نویسنده و سال	پارامتر مورد مطالعه	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۵	(هاشمی طبابایی، سلامت و محمدی، ۱۳۹۰)	سرعت موج برشی	مطالعات آزمایشگاهی	با استفاده از سرعت موج برشی می‌توان نوع خاک را در استاندارد ۲۸۰۰ تعیین کرد.	از کاربردهای مهم سرعت موج برشی تعیین نوع زمین در آیین نامه ۲۸۰۰ است.
٦	(گرمرودی، ۱۳۸۳)	آزمایش‌های تعیین رفتار دینامیکی خاک، خواص دینامیکی خاک‌ها	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	روش‌های اندازه‌گیری و رفتار دینامیکی خاک در شرایط مختلف مشخص گردید.	ساختار خاک تاثیر مستقیمی بر روی خواص دینامیکی خاک دارد.
۷	(امینی آهی دشتی و حداد، ۱۳۹٤)	Ks(ضریب عکس‌العمل بستر)	مطالعات آزمایشگاهی	Ks (ضریب عکس‌العمل بستر) با سختی خاک رابطه مستقیم دارد.	Ks (ضریب عکس‌العمل بستر) در ارتباط مستقیم با خواص دینامیکی خاک است.
۸	(لکی روحانی و عباسیان، ۱۳۹٤)	آلفا به صورت نسبت تنش برشی حداکثر در سطح مشترک خاک و ژئوگرید به تنش برشی حداکثر در خاک(غیرمسلح)	مطالعات آزمایشگاهی	در خاک مسلح با ژئوگرید با افزایش تراکم کاهش مقاومت بیشتر می‌شود.	افزایش تراکم در خاک‌های مسلح با ژئوگرید تاثیر عکس روی مقاومت خاک دارد.
۹	(مهرپروژه، آقائی و مقدس تفرشی، ۱۳۹٤)	مدول الاستیسیته، چسبندگی و سختی	مطالعات مروری	در صورت مسلح‌سازی خاک با ژئوگرید مدول الاستیسیته، چسبندگی و سختی خاک افزایش می‌یابد.	ژئوگرید باید پس از بررسی مناسب خاک استفاده شود.
۱۰	(آقائی، مهرپروژه و اسماعیلی، ۱۳۹٤)	مدول الاستیسیته، سختی و چسبندگی	مطالعات مروری	در صورت مسلح‌سازی خاک با ژئوسل مدول الاستیسیته، چسبندگی و سختی خاک افزایش می‌یابد.	با استفاده از ژئوسل می‌توان مدول الاستیسیته را افزایش داد.

۱۱	(آقایی آرایی، ۱۳۹۵)	مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی ماسه و شن داسیتی	مطالعات آزمایشگاهی	تشخیص آسان زمان رسیدن امواج و مقادیر مدول برشی داسیت شنی در دانسیته خشک حداکثر نصف مقادیر نظیر داسیت ماسه‌ای در دانسیته خشک حداکثر مربوطه هست.	در صورت استفاده از این روش دقت افزایش و هزینه کاهش می‌یابد.
۱۲	(جعفریان و جاودانیان، ۱۳۹۶)	فشار محدودکننده و نشانه خمیری	مطالعات آزمایشگاهی	مطالعه بر روی ماسه کربناتی شهر بوشهر فشار محدود کننده و نشانه خمیری مهم‌ترین عوامل موثر بر تغییر پارامترهای دینامیکی خاک هستند.	کانی‌های تشکیل دهنده خاک نقش مهمی در رفتار دینامیکی خاک دارد.
۱۳	(شعاری شعار، ۱۳۹۶)	آزمایش‌های تعیین رفتار دینامیکی خاک، خواص دینامیکی خاک‌ها	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	روش‌های اندازه‌گیری و رفتار دینامیکی خاک در شرایط مختلف مشخص گردید.	ساختار خاک تاثیر مستقیمی بر روی خواص دینامیکی خاک دارد.
۱٤	(بهادری و فرضعلی‌زاده، ۱۳۹۷)	مدول برشی، میرایی	مطالعات آزمایشگاهی	با افزایش درصد وزنی پودر الاستیک دامنه کرنش برشی کاهش یافته و نسبت میرایی میانگین و مدول برشی افزایش یافته است.	مسلح کردن خاک تاثیر مثبتی بر رفتار خاک دارد.
۱۵	(غفارپور جهرمی و محمدی، ۱۳۹۸)	شتاب بیشینه سطح زمین	مطالعات نرم‌افزاری	در صورت کم بودن چگالی، رسوبی بودن، لایه لایه بودن و آبرفتی بودن ساختار خاک یا وجود رطوبت زیاد سرعت موج برشی کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت موج برشی شتاب بیشینه افقی در سطح زمین کاهش می‌یابد.	نتایج این تحقیق فقط برای متغیرها و فرضیات اشاره شده در این تحقیق معتبر هست.
۱٦	(پرستی و همکاران، ۱۹۹۷)	مدول برشی و میرایی	مطالعات آزمایشگاهی	مدول برشی و میرایی ماسه‌های خشک تقریبا نسبت به فرکانس‌های بارگذاری حساس نیستند. در مورد رس‌ها، مدول برشی و میرایی به سختی تحت تأثیر N (عدد نفوذ استاندارد) قرار می‌گیرند، اما در برابر نرخ کرنش حتی کرنش‌های خیلی کم بسیار حساس هستند. با	ممکن است در بعضی علاوه بر نتیاج به دست آمده، در مورد ماسه‌های اشباع آزمایش‌های مورد نظر نیاز به تکرار دارند.

				این حال، با افزایش سطح کرنش برشی، مدول برشی افزایش می‌یابد.	
۱۷	(وانگ و کووانو، ۱۹۹۹)	مدول برشی و میرایی در ماسه‌های رس‌دار	مطالعات آزمایشگاهی	به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای در آزمایش برشی سیکلی زهکشی نشده مدول برشی با بارگذاری سیکلی کاهش می‌یابد و نسبت میرایی ماسه‌های رس‌دار برای خاک‌های حاوی ریزدانه مخصوصا در کرنش‌های متوسط تا بزرگ کمتر هست.	کرنش‌های موجود می‌تواند بر نسبت میرایی خاک‌ها موثر باشد.
۱۸	(ترونکوسو و گارسس،۲۰۰۰)	مدول برشی	مطالعات عددی	به طور کلی تنش نرمال و نسبت منافذ پارامترهایی هستند که مدول برشی را مشخص می‌نمایند.	نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که اثرات زمانی نیز باید در نظر گرفته شود تا الگوهای واقعی‌تری برای رفتار خاک ایجاد شود.

٤- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت فراوان مشخص‌نمودن پارامترهای دینامیکی خاک تحت شرایط مختلف برای پروژه‌های گوناگون، مروری بر پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول الاستیسیته، مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی گردید که به نتایج زیر دست یافتیم:

-خواص دینامیکی خاک ارتباط مستقیم با کانی‌های تشکیل‌دهنده دارد.

-در صورت افزایش شاخص خمیری خاک نسبت مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش می‌یابد.

-هرچه مقدار سرعت موج برشی بالاتر باشد، خاک ساختگاه سخت و با کیفیت‌تر می‌باشد.

-هرچقدر مقدار ریزدانه خاک بیشتر باشد مدول الاستیسیته یا به عبارتی مقاومت خاک در برابر تغییرشکل کاهش می‌یابد.

-خاک مسلح با ژئوسنتتیک‌ها از جمله ژئوگرید و ژئوسل در مقایسه با خاک غیر مسلح دارای مدول الاستیسیته بیشتری هست.

در نهایت پیشنهاد می‌گردد که برای مشخص نمودن پارامترهای دینامیکی خاک باید تمام عوامل مختلف از جمله نسبت تخلخل، کرنش‌های به وجود آمده تحت بارهای دینامیکی، فشار آب حفره‌ای و نسبت دانسیته مورد بررسی قرار گیرد و به ساختار خاک توجه ویژه‌ای گردد.

٥- پی‌نوشت‌ها

1-LVDT: (Linear Variable Differential Transformer)

٦- مراجع

-جعفری، م. رزم‌خواه، ا. و شفیعی، ع.، (۱۳۸۱)، "خصوصیات دینامیکی خاک‌های ریزدانه جنوب تهران"، نشریه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دوره چهارم، شماره۱، ص. ۲۵-۳٦.

-قنبری، ع.، (۱۳۸٦)، "مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران"، نشریه علوم زمین، سال هجدهم، شماره۷۱، ص. ۳-۸.

-غیاثیان، ح. جمشیدی چناری، ر. شاه‌نظری، ح. و طبرسا، ع.، (۱۳۸۷)، "بررسی رفتار دینامیکی ماسه ریز مسلح شده با الیاف

ژئوتکستایل در جعبه"، نشریه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال دهم، ص. ۱۹۵-۲۰۳.

-میر محمد حسینی، م. (۱۳۸۸)، "اصول و مبانی دینامیک خاک"، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

-هاشمی طباطبایی، س. سلامت، ا. و محمدی، ا.، (۱۳۹۰)، "رده‌بندی نوع زمین با استفاده از سرعت موج برشی در گستره شهر شیراز بر اساس آیین‌نامه‌های ساختمانی"، نشریه علوم زمین، سال بیست و یکم، شماره۸۲، ص. ۲۱۵-۲۲۲.

-گرمرودی، ر.، (۱۳۹۳)، "دینامیک خاک"، تهران، www.Icivil.ir.

-امینی آهی دشتی، ر. و حداد، ع.، (۱۳۹٤)، "پیش‌بینی ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از سختی برشی در کرنش‌های کوچک"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، دوره چهل و هفت، شماره۲، ص. ٦۷-۷۹.

-لکی روحانی، ع. و عباسیان، م.، (۱۳۹٤)، "تحقیق بر روی مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوگرید با استفاده از آزمایش برش مستقیم"، نشریه مجله، دوره بیست و سوم، شماره ۸۱، ص. ٤۹-٥٦.

-مهرپروژه، ا. آقائی، ج. و مقدس تفرشی، ن.، (۱۳۹٤)، "بررسی اثر تسلیح خاک با ژئوگرید برپارامترهای مقاومتی بستر راه"، نشریه جاده، دوره بیست و سوم، شماره ۸٤، ص. ۲۱۹-۲۳۱.

-آقائی، ج. مهرپروژه، ا. و اسماعیلی، م.، (۱۳۹٤)، "بررسی عملکرد و مبانی طراحی خاکریز مسلح با ژئوسل"، نشریه جاده، دوره بیست و سوم، شماره ۸۵، ص. ۲٤۷-۲٥٦.

-آقایی آرایی،ع.، (۱۳۹٥)، "مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی ماسه و شن داسیتی" نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد۱۰، شماره۱، ص.۳۲٤٤-۳۲۲۷.

-جعفریان، ی. و جاودانیان، ح.، (۱۳۹٦)، "ارزیابی رفتار دینامیکی ماسه های کربناتی"، نشریه علوم و مهندسی زلزله، سال چهارم، شماره۱، ص. ۲۷-۳٦.

-شعاری شعار، م.، (۱۳۹٦)، "دینامیک خاک"، تهران، نوآور.

-بهادری، ه. و فرضعلی‌زاده، ر.، (۱۳۹۷)، "تاثیر پودر لاستیک بر رفتار دینامیکی و مقاومت روانگرایی ماسه‌های اشباع"، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد۱۲، شماره۳، ص. ٤۰۹-٤۲۸.

-غفارپور جهرمی، س. و محمدی، س.، (۱۳۹۸)، "بررسی تاثیر مشخصات دینامیکی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای و تحلیل و طراحی ساختمان‌ها" مجله ژئوفیزیک ایران، جلد۱۳، شماره۱، ص. ٥٦-۷۱.

-Presti, D. C. F. LO., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A. and Pedroni, S., (1997), “shear modulus and damping of soils”, Journal of Geotechnique, Vol. 47, No. 3, pp. 603-617.

-WANG, G. X. and KUWANO, J., (1999), “Shear Modulus and Damping of Clayey Sands”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No, 2, pp. 271-285.

-Troncoso, J.H. and Garces, E., (2000), “Ageing effects in sher modulus of soils”, Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 19, pp. 595-601.

Evaluation on Effect of Modulus of Elasticity, Shear Modulus, Damping Ratio and Shear Wave Velocity on Soil Dynamic

Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Malayer, Malayer, Iran.

Reza Fathi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, University of Malayer, Malayer, Iran.

Mazyar Shirkhani Cheshmeh Shafie, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, University of Malayer, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: September 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluation the dynamic parameters of soil including damping ratio, shear modulus, elasticity modulus, and investigation of shear wave velocity in different sections, acquaintance with the methods of measuring each of these parameters and the effect of different conditions on these parameters. The research method is an overview of sources and references on soil dynamic parameters including damping ratio, shear modulus, modulus of elasticity and shear wave velocity. According to the results of this study, soil structure has a direct effect on soil dynamic properties and with increasing shear wave velocity the bed soil becomes harder and quality of soil will be better. Almost all construction projects are built on soil, so correct recognition of soil and identification dynamic parameters behavior of soil can be effective to providing a safe and economical design. Among the dynamic properties of soil, shear modulus, damping ratio and modulus of elasticity are more important and also there are various methods for measuring these parameters.

Keywords: Soil Dynamic Tests, Shear Modulus, Damping Ratio