

ارزیابی مدول برشی ماسه کربناتی بوشهر با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی

یاسر جعفریان^{۱*}، عبدالحسین حداد^۲، حامد جاودانیان^۳

۱- استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

yjafarianm@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۸/۱۱]

چکیده- مدول برشی یکی از مهم‌ترین ویژگیهای نهشته‌های خاکی است، که برای انجام تحلیل‌های دینامیکی باید مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. از سویی دیگر مناطق وسیعی از کره زمین، از جمله بخش‌های وسیعی از مناطق جنوبی ایران، پوشیده از خاک‌های کربناتی است. این خاک‌ها بسیاری از میدان‌های عظیم نفتی و گازی جهان را در خود جای داده و همواره مورد ساخت و سازهای گسترده‌ای نیز قرار دارند. از این‌رو بررسی کامل رفتار این خاک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر فشار محدود کننده و دانسیته‌ی نسبی بر تغییرات مدول برشی این ماسه مطالعه شده است. مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در دو حالت همسان و غیرهمسان انجام گرفته تا چگونگی اثر شرایط تنش حاکم اولیه بر رفتار خاک در رفتار آن مشخص شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش فشار محدود کننده می‌تواند میانگین و همچنین دانسیته‌ی نسبی، افزایش مدول برشی خاک را به دنبال دارد. همچنین نتایج بیانگر آن است که ناهمسانی تنش تحکیم اولیه در مقایسه با سایر پارامترها اثر کمتری بر رفتار خاک دارد. نتایج با بازه‌ها و مدل‌های پیشنهادی پژوهشگران مقایسه شده و در نهایت مدلی برای ارزیابی منحنی تغییرات نسبت مدول برشی خاک کربناتی بوشهر در برابر کرنش برشی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: ماسه کربناتی، مدول برشی، ناهمسانی تنش، ستون تشدید، سه‌محوری سیکلی.

۱- مقدمه

صورت گرفته نیز برای شناسایی عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاک‌ها بوده است [۲ و ۳]. در ادامه با انجام مطالعات آماری روی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و به کارگیری مهمترین پارامترهای مؤثر بر رفتار خاک، مدل‌هایی برای ارزیابی دقیق‌تر نسبت مدول برشی (G/G_{max}) خاک‌ها ارائه شدند [۴ و ۵]. طبق مطالعات زمین‌شناسی، حدود ۴۰ درصد سطح کف و مجاور اقیانوس‌ها و دریاها در نواحی گرمسیری را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل می‌دهند [۶]. بسیاری از این نواحی که شامل ساخت و سازهای گسترده‌ای نیز هست، دارای خطر لرزه‌خیزی بالایی است. بنابراین، طراحی سازه‌ها در این نواحی

مدول برشی و تغییرات این پارامتر با کرنش برشی یکی از مهمترین پارامترهای لازم برای پاسخ لایه‌های خاک به بارهای دینامیکی است. ارزیابی صحیح این پارامتر هم برای درک اساسی از رفتار خاک و هم برای استفاده در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون مطالعات بسیاری به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف برای بررسی رفتار دینامیکی ماسه‌های سیلیکاته تحت شرایط متفاوت و به روش تجربی صورت گرفته است [۱]. برخی از مطالعات

در این پژوهش، مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر، از شهرهای بزرگ جنوبی ایران در ساحل خلیج فارس، در کرنش-های برشی کوچک و بزرگ با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر فشار محدود کننده میانگین (P'_0) و دانسیته‌ی نسبی (D_r) به-عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار خاک‌های دانه‌ای، بر تغییرات مدول برشی (G) و همچنین نسبت مدول برشی (G/G_{max}) این خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌های این پژوهش در دو حالت همسان و ناهمسان انجام شده تا اثر شرایط تنش حاکم بر المان خاک در رفتار آن مشخص شود. نتایج آزمایشگاهی این مطالعه با مرزهای پیشنهادی و همچنین مدل هیپربولیک ارائه شده برای پیش‌بینی تغییرات مدول برشی در برابر کرنش برشی مقایسه می‌شود. در نهایت مدلی برای ارزیابی منحنی تغییرات مدول برشی ماسه کربناتی بوشهر ارائه شد.

۲- خاک مورد آزمایش

خاک مورد استفاده در این پژوهش ماسه‌ی کربناتی بوشهر است که از جنوب ایران و سواحل خلیج فارس جمع‌آوری شد. بندر بوشهر یکی از بنادر بزرگ تجاری و دارای موقعیت استراتژیک است. خطر لرزه‌خیزی مناطق جنوبی کشور نیز با بروز زلزله-های سال‌های اخیر (از جمله زلزله‌های کاکلی و شنبه در استان بوشهر) و خسارت‌های ناشی از آنها بر کسی پوشیده نیست. به منظور بررسی کانی خاک مورد استفاده، آزمایش پراش اشعه ایکس^۱ (XRD) بر روی خاک صورت گرفت. نتایج حاصل نشان از کربناته بودن این خاک داشت. این آزمایش در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد. آزمایش XRD برای تعیین عناصر موجود در مصالح مختلف از جمله خاک [۱۴] انجام می‌شود. نتیجه‌ی آزمایش نشان می‌دهد که عنصر غالب در این خاک کربنات کلسیم ($CaCO_3$) است.

مستلزم بررسی و مطالعات بیشتر این نوع خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی است. نتایج آزمون‌های مکانیک خاک صحرایی و آزمایشگاهی بر روی خاک‌های کربناتی تفاوت تراکم‌پذیری و تغییرحجم، قابلیت خردشوندگی ذرات، و نفوذپذیری خاک‌های کربناتی و غیرکربناتی را روشن ساخته است [۷]. نتایج آزمایش‌های برش ساده بر روی ماسه‌ی کوارتزی نوادا و ماسه‌های کربناتی جزایر هاوایی نشان از تفاوت رفتاری این خاک‌ها داشته است [۸]. این تفاوت رفتاری به تفاوت در نوع کانی ماسه‌های مورد آزمایش نسبت داده شد.

نتایج پژوهش‌های انجام شده و همچنین مشکلات اساسی رخ داده در پروژه‌های عمرانی در نواحی دارای خاک‌های کربناتی مانند فروریزش خاک در طی عملیات شمع‌کوبی سکوه‌های نفتی در جزیره‌ی لاوان (از جزایر واقع در خلیج فارس) لزوم بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌های کربناتی این نواحی را روشن ساخت [۹].

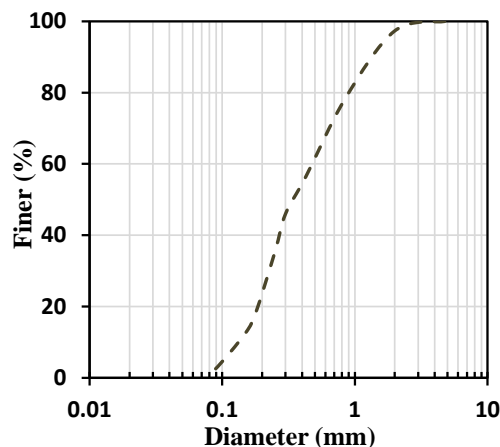
اثر پارامترهای مختلف مانند فشار محدود کننده، دانسیته‌ی نسبی، و کرنش محوری بر خردشوندگی ذرات ماسه‌های کربناتی با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مطالعه شد [۱۰ و ۱۱]. نتایج بیانگر آن است که کرنش محوری در مقایسه با سایر پارامترها اثر بیشتری بر خردشوندگی ذرات ماسه‌های کربناتی داشته است.

یکی از عواملی که می‌تواند پارامترهای دینامیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد شرایط تنش مؤثر اولیه بر المان خاک می‌باشد. محیط خاک در طبیعت می‌تواند تحت شرایط تنش پیچیده‌ای قرار داشته باشد. یکی از شرایط ممکن حضور المان‌های خاک در مجاورت سازه‌ها، در شیب‌ها و یا شرایطی است که تحت تنش برشی اولیه قرار داشته باشند. اثر تنش برشی اولیه بر خاک سیلت با انجام آزمون‌های سه محوری روی نمونه‌های دست-نخورده مورد مطالعه قرار گرفت [۱۲]. نتایج بیانگر اثر قابل ملاحظه‌ی نسبت تنش برشی اولیه بر رفتار تنش-کرنش خاک است. اثر تنش برشی اولیه بر انرژی کرنشی با انجام آزمون‌های سیکلی بر روی ماسه‌ی توپورا بررسی شده که نتایج آن بیانگر اثر این پارامتر بر رفتار سیکلی خاک است [۱۳].

لایه به درون یک قالب استوانه‌ای با پوشش غشای لاستیکی ریخته شد.

جدول (۲) برنامه آزمایش‌های ستون تشدید و سهمحوری سیکلی انجام شده در این پژوهش

آزمایش No.	B value (%)	P' ₀ (kPa)	D _r (%)	β (=Δσ'/۲σ'ₐ)
۱	۹۷/۱	۴۰	۵۰/۵	۰
۲	۹۸/۶	۴۰	۴۹/۷	۰/۲
۳	۹۷/۱	۴۰	۴۹/۸	۰/۴
۴	۹۵/۳	۴۰	۸۳/۹	۰
۵	۱۰۰	۴۰	۸۳/۱	۰/۲
۶	۹۶/۷	۴۰	۸۱/۲	۰/۴
۷	۱۰۰	۲۰۰	۴۹/۹	۰
۸	۹۸/۵	۲۰۰	۵۰/۴	۰/۲
۹	۹۸/۶	۲۰۰	۵۰/۱	۰/۴
۱۰	۹۹/۴	۲۰۰	۸۱/۶	۰
۱۱	۹۹/۸	۲۰۰	۸۱/۲	۰/۲
۱۲	۹۷/۱	۲۰۰	۸۰/۵	۰/۴
۱۳	۱۰۰	۴۰۰	۵۲/۱	۰
۱۴	۹۷/۱	۴۰۰	۵۱/۴	۰/۲
۱۵	۹۸/۶	۴۰۰	۵۰/۸	۰/۴
۱۶	۹۹/۲	۴۰۰	۸۲/۷	۰
۱۷	۱۰۰	۴۰۰	۷۹/۶	۰/۲
۱۸	۹۷/۱	۴۰۰	۸۰/۱	۰/۴
۱۹	۹۷/۵	۴۰	۵۲/۱	۰
۲۰	۹۸/۱	۴۰	۴۷/۴	۰/۲
۲۱	۹۵/۷	۴۰	۵۲/۷	۰/۴
۲۲	۹۵/۰	۴۰	۸۲/۵	۰
۲۳	۹۷/۸	۴۰	۸۳/۹	۰/۲
۲۴	۹۸/۵	۴۰	۸۰/۹	۰/۴
۲۵	۹۸/۷	۲۰۰	۵۰/۶	۰
۲۶	۹۸/۵	۲۰۰	۴۹/۷	۰/۲
۲۷	۹۷/۸	۲۰۰	۵۱/۰	۰/۴
۲۸	۹۹/۷	۲۰۰	۸۰/۳	۰
۲۹	۹۸/۳	۲۰۰	۸۱/۸	۰/۲



شکل (۱) منحنی دانه‌بندی ماسه کرنباتی مورد آزمایش

نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل (۱) ارائه شده است. این خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) است. مشخصات خاک شامل چگالی ویژه (G_s)، وزن مخصوص کمینه (γ_{min}) و بیشینه (γ_{max})، اندازه میانگین ذرات (D_{50})، و ضریب یکنواختی (C_u) در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱) مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

خاک	G_s	γ_{max} (g/cm ^۳)	γ_{min} (g/cm ^۳)	D_{50} (mm)	C_u
ماسه بوشهر	۲/۷۰	۱/۶۱۶	۱/۴۳۴	۰/۳۵	۳/۴۳

۳- برنامه‌ی آزمایش‌ها

برنامه‌ی آزمایشگاهی این پژوهش با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) ارائه می‌شود. آزمایش‌ها در فشارهای میانگین ۴۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ kPa، و دانسیته‌های نسبی ۵۰٪ و ۸۰٪، و در دو حالت تحکیم همسان و ناهمسان صورت گرفت.

۴- چگونگی ساخت نمونه‌ها

نمونه‌سازی به روش پاشش خشک صورت گرفت. با توجه به اینکه باید نمونه‌ها در پایان مرحله تحکیم به تراکم مورد نظر می‌رسیدند، تراکم اولیه کمتر از مقدار نهایی در نظر گرفته می‌شد. مقدار تغییر نسبت تخلخل نمونه به فشار محدود کننده وابسته بوده که با انجام تست‌های اولیه حدود تقریبی آن برای تنش‌های محدودکننده‌ی مختلف حاصل شد. ماسه در چندین

ادامه‌ی جدول (۲)

آزمایش	No.	B value (%)	P' ₀ (kPa)	D _r (%)	β = (Δσ'/۲σ' _p)
سه محوری سیکلی	۳۰	۹۶/۸	۲۰۰	۷۹/۴	۰/۴
	۳۱	۹۸/۳	۴۰۰	۵۰/۰	۰
	۳۲	۹۸/۷	۴۰۰	۴۹/۳	۰/۲
	۳۳	۹۹/۷	۴۰۰	۵۲/۷	۰/۴
	۳۴	۹۶/۰	۴۰۰	۸۳/۷	۰
	۳۵	۹۶/۸	۴۰۰	۷۶/۶	۰/۲
	۳۶	۹۸/۹	۴۰۰	۷۶/۸	۰/۴

B: پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون
P'₀: فشار محدود کننده‌ی مؤثر میانگین
D_r: دانسیته‌ی نسبی پس از تحکیم
σ'_p: تنش مؤثر محدود کننده حداقل
σ'_۱: تنش مؤثر حداکثر
Δσ': تنش انحرافی مؤثر (σ'_۱ - σ'_p)
β: نسبت تنش انحرافی اولیه

و دامنه تحریکات اعمالی قابل کنترل بوده است. نمونه در مقادیر مختلف دامنه و با فرکانس متغیر بارگذاری شده و پاسخ نمونه به این تحریکات به وسیله شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس متناظر با پاسخ بیشینه شتاب‌سنج را فرکانس تشدید می‌نامند. سرعت موج برشی به کمک فرکانس تشدید، و کرنش برشی به کمک شتاب ماکزیمم حاصل شد [۱۵]. سپس مدول برشی خاک با استفاده از رابطه‌ی:

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

محاسبه شد. در این رابطه، V_s سرعت موج برشی و ρ جرم حجمی نمونه است. در آزمایش‌های ستون تشدید، مدول برشی خاک در بازه‌ی کرنش برشی 10^{-2} - 10^{-4} اندازه‌گیری شده است.

۵-۲- سه محوری سیکلی

آزمایش‌های سه محوری سیکلی این پژوهش با استفاده از دستگاه مدل GDS و در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه سمنان انجام گرفت. این دستگاه شامل سلول سه محوری، سیستم بارگذاری محوری، سه دستگاه کنترل کننده پیشرفته فشار و حجم، و سیستم ثبت نتایج است. مدول برشی در آزمایش‌های سه محوری سیکلی در بازه‌ی کرنش برشی 10^{-2} - 10^{-4} اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با کنترل کرنش و به صورت چندمرحله‌ای انجام شد. پس از هر مرحله بارگذاری یک مرحله تحکیم صورت گرفته و سپس مرحله بعدی بارگذاری ادامه داده می‌شد. تا قبل از مرحله‌ی آخر، فشار آب منفذی ایجاد شده کم بوده و اثر دست‌خوردگی حاصل از تحکیم نمونه بر نتایج مراحل بعدی بارگذاری بسیار ناچیز بوده است. در هر مرحله از آزمایش ۱۰ سیکل بارگذاری انجام شد. نیروها نیز به کمک نیروسنج درون سلول اندازه‌گیری می‌شد. تنش‌ها و کرنش‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه مدول برشی خاک به کار برده شد. با توجه به اینکه نمونه‌ها در حالت زهکشی نشده بارگذاری شدند نسبت پواسون برابر $\nu=0/5$ در نظر گرفته شد. از اینرو مقادیر کرنش برشی $1/5$ برابر کرنش محوری محاسبه شد. پس از انجام آزمایش‌های سیکلی، رابطه تنش برشی-

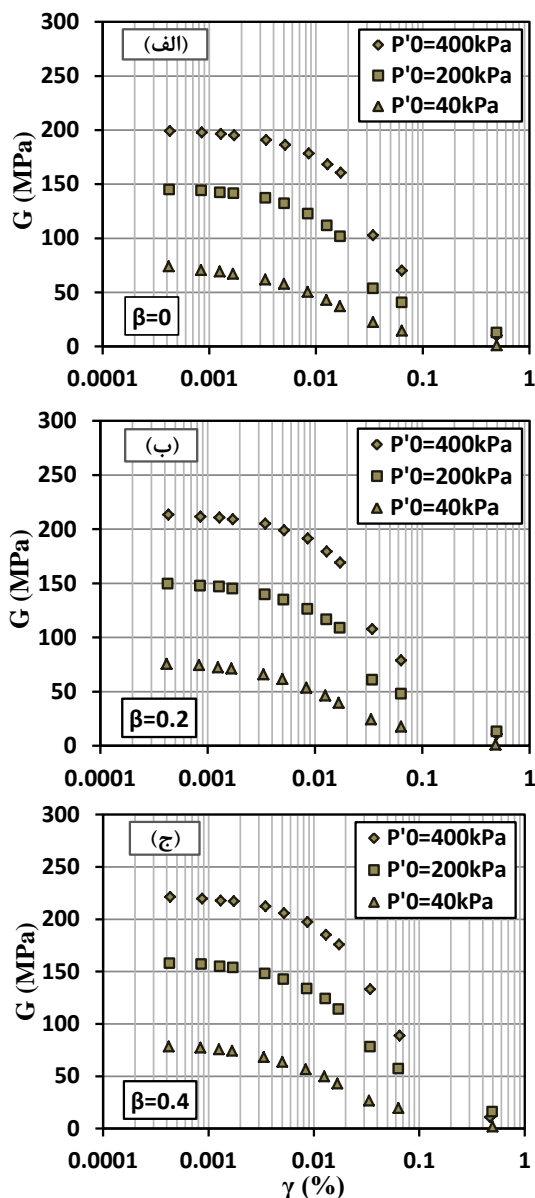
پس از پایان نمونه‌سازی برای اشباع کردن نمونه‌ها، گاز دی اکسیدکربن (CO_2) و سپس آب هواگیری شده از نمونه‌ها عبور داده شد. سپس برای رسیدن به درجه اشباع بالای ۹۵٪ پس-فشار^۱ به نمونه‌ها اعمال شد.

در پایان، نمونه‌ها در فشارهای میانگین مختلف و با نسبت تنش برشی اولیه متفاوت مورد تحکیم قرار گرفته و سپس بارگذاری چند مرحله‌ای در حالت زهکشی نشده اعمال شد. در حالت تحکیم ناهمسان نمونه تحت فشار محدودکننده σ'_p و با یک تنش انحرافی مشخص $\Delta\sigma'$ مورد تحکیم قرار گرفت.

۵- دستگاه‌های آزمایش

۵-۱- ستون تشدید

آزمایش‌های ستون تشدید این پژوهش در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران و با دستگاه مدل Seiken انجام شدند. این دستگاه شامل سیستم کنترل و ثبت نتایج، سلول بارگذاری و سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی است. در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای خاک به وسیله یک سیستم الکترومغناطیسی تحت تحریکات پیچشی قرار می‌گیرد. فرکانس



شکل (۳) اثر فشار محدود کننده‌ی میانگین بر مدول برشی ماسه‌ی کرنباتی بوشهر در $D_r=50\%$ (الف، $\beta=0$ ، ب $\beta=0.2$ ، ج $\beta=0.4$)

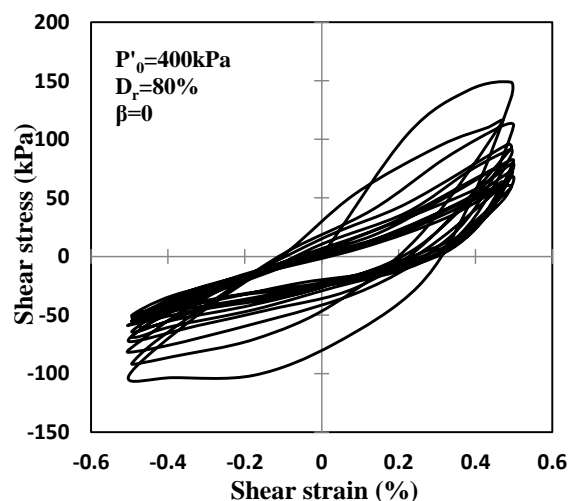
افزایش P'_0 از ۲۰۰ تا ۴۰۰ kPa موجب افزایش مدول برشی از ۳۳٪ (شکل ۳-الف) تا ۴۸٪ (شکل ۴-ج) در کرنش‌های کوچک شده است.

افزایش D_r موجب افزایش مدول برشی خاک ماسه‌ای شده است (شکل ۵). باید توجه نمود که میزان افزایش مدول برشی در اثر افزایش D_r بستگی به میزان P'_0 داشته و با افزایش P'_0 اثر دانسیته‌ی نسبی نیز افزایش یافته است.

کرنش برشی (حلقه‌ی هیستریزیس) در سیکل دهم ترسیم و مدول برشی سکانت به صورت شیب خط واصل نقاط انتهایی این منحنی محاسبه شد:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

در این رابطه τ تنش برشی و γ کرنش برشی است. به عنوان نمونه، منحنی تنش برشی-کرنش برشی (حلقه‌های هیستریزیس) مربوط به آزمایش با $P'_0=400$ kPa، $D_r=50\%$ و $\beta=0$ در شکل (۲) نشان داده شده است.



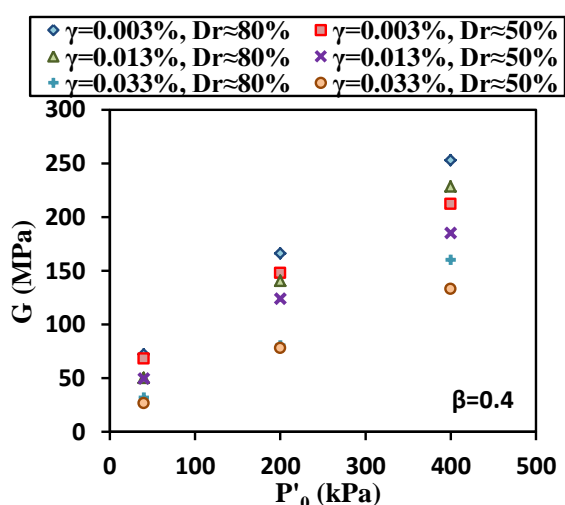
شکل (۲) منحنی هیستریزیس در آزمایش سه محوری سیکلی

۶- تحلیل نتایج

۶-۱- مدول برشی

همان‌گونه که در شکل‌های (۳ و ۴) مشاهده می‌شود، مدول برشی خاک با افزایش کرنش برشی کاهش می‌یابد. این کاهش که اساساً به واسطه‌ی رفتار غیرخطی خاک صورت می‌گیرد، در همه‌ی آزمایش‌های این پژوهش مشاهده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش P'_0 ، مدول برشی افزایش می‌یابد. اثر این پارامتر بر منحنی‌های مدول برشی ماسه‌ی کرنباتی بوشهر در حالت تحکیم همسان ($\beta=0$) و ناهمسان ($\beta=0.4$)، برای دانسیته‌های نسبی ۵۰٪ و ۸۰٪ به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

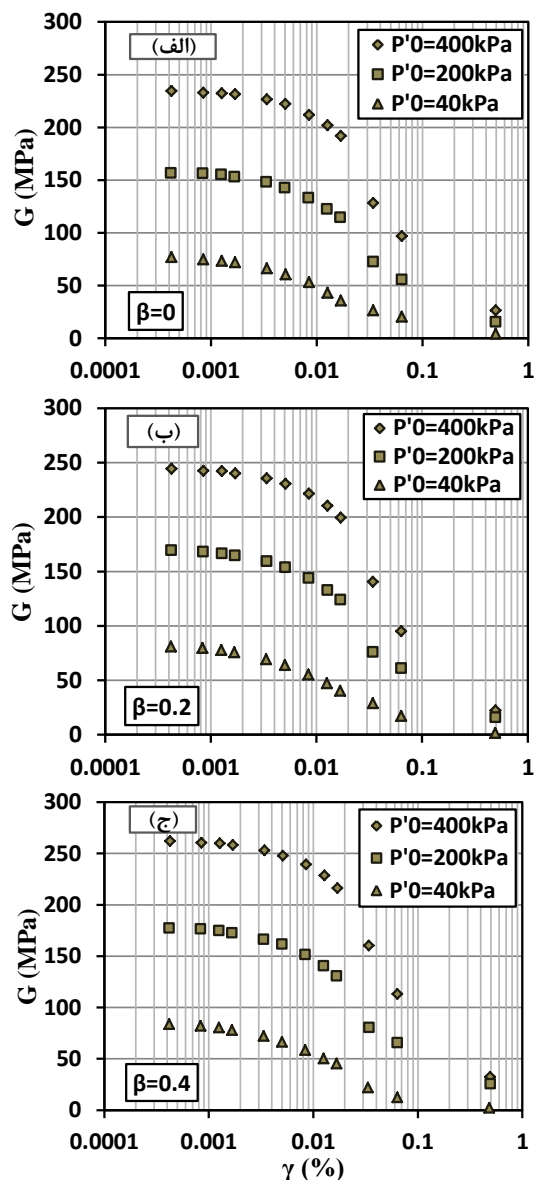
اگرچه افزایش D_r از ۵۰٪ تا ۸۰٪ در فشار $P'_0=40\text{kPa}$ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مدول برشی نداشته اما این افزایش دانسیته‌ی نسبی در فشارهای میانگین 200kPa و 400kPa به ترتیب افزایش ۹٪ و ۱۸٪ در مدول برشی در کرنش‌های کوچک را به دنبال داشته است. اثر دانسیته‌ی نسبی بر تغییرات G در حالت تحکیم ناهمسان و در دامنه‌های مختلف کرنش برشی در شکل (۶) ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در حالت ناهمسان نیز با افزایش P'_0 اثر دانسیته‌ی نسبی بر مدول برشی افزایش یافته است.



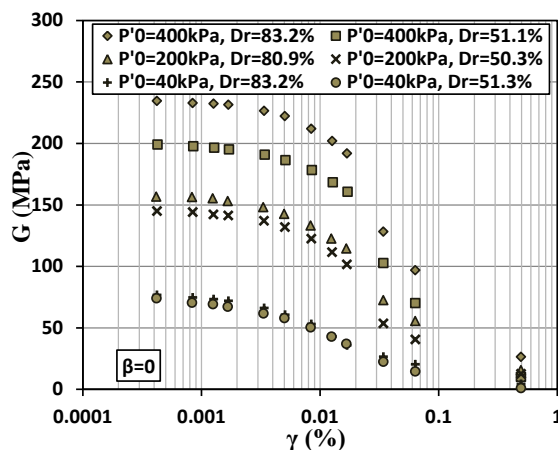
شکل (۶) اثر دانسیته‌ی نسبی بر مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در $\beta=0.4$ دامنه‌های مختلف کرنش برشی در $\beta=0.4$

اثر ناهمسانی تنش بر منحنی مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در فشارهای محدود کننده‌ی مختلف و در دانسیته‌ی نسبی $D_r=80\%$ در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش نسبت تنش برشی اولیه ($\beta=0$) تا $\beta=0.4$ ، مدول برشی افزایش یافته است. این روند افزایشی با مطالعات پژوهشگران [۱۶] و [۱۷] روی اثر تنش ناهمسان بر رفتار خاک هماهنگ است.

پژوهشگران [۱۶] با انجام آزمایش‌های خمش پیزوالکتریک به بررسی اثر شرایط تنش بر سرعت موج برشی (V_s) پرداختند که نتایج بیانگر افزایش سرعت موج برشی در اثر ناهمسانی تنش است. اثر نسبت تنش اولیه بر روی مدول الاستیک (E) نیز به روش عددی و با مدل‌سازی شرایط تنش ناهمسان بررسی شد [۱۷] که نتایج حاصل بیانگر وابستگی مدول الاستیک در

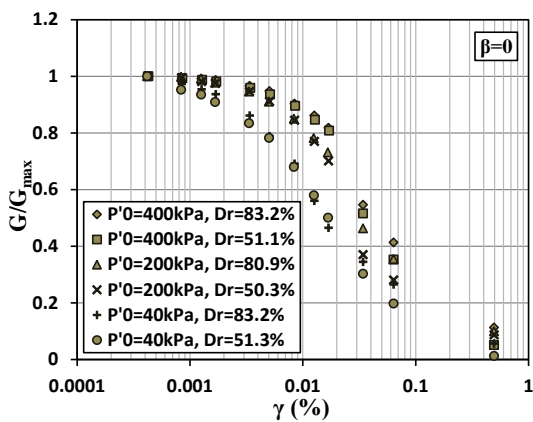


شکل (۴) اثر فشار محدود کننده‌ی میانگین بر مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در $D_r=80\%$ (الف، $\beta=0$ ؛ ب، $\beta=0.2$ ؛ ج، $\beta=0.4$)

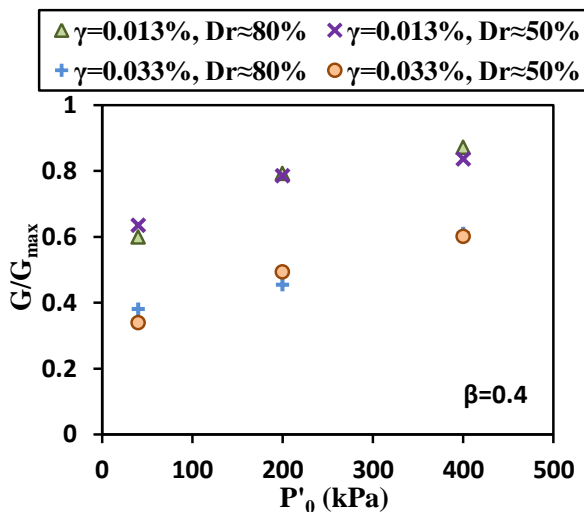


شکل (۵) اثر دانسیته‌ی نسبی بر مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر

که شروع رفتار غیرخطی خاک است را کرنش آستانه می‌نامند [۱۵].



شکل (۸) اثر P'_0 و D_r بر نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر



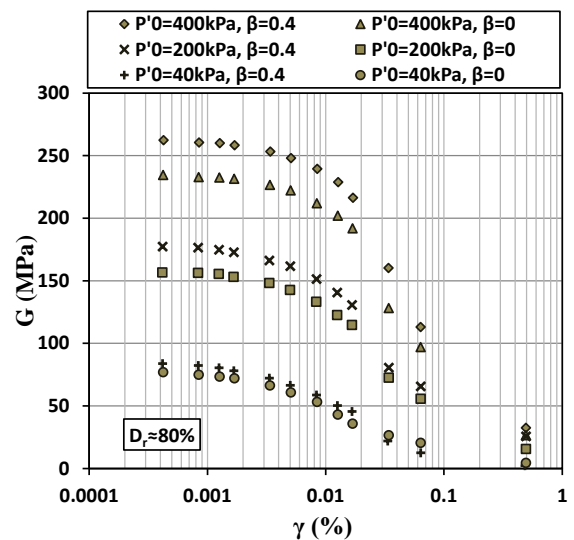
شکل (۹) اثر P'_0 و D_r بر نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در دامنه‌های مختلف کرنش برشی در $\beta=0/4$

همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش P'_0 کرنش آستانه نیز افزایش یافته است. مقدار این کرنش برای فشار میانگین 40 kPa و 400 kPa به ترتیب برابر $5 \times 10^{-4}\%$ و $1/5 \times 10^{-3}\%$ است.

اثر P'_0 و D_r بر نسبت مدول برشی در حالت ناهمسان $\beta=0/4$ و در دامنه‌های مختلف کرنش برشی در شکل (۹) نشان داده شده است. در حالت تحکیم ناهمسان نیز با وجود اثر افزایشی P'_0 بر تغییرات نسبت مدول برشی، اما D_r تأثیر چندانی بر G/G_{max} ندارد.

منحنی‌های نسبت مدول برشی $(G/G_{max}-\gamma)$ در فشارهای مختلف و دانسیته‌ی نسبی 50% و به ازای مقادیر $0/4$ و $\beta=0$ در

هر جهت (E_i) به مؤلفه تنش در آن جهت (σ'_i) بوده و نسبت تنش اثر قابل ملاحظه‌ای بر این پارامتر داشته است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش P'_0 اثر ناهمسانی تنش بر مدول برشی نیز رو به افزایش است.



شکل (۷) اثر ناهمسانی تنش بر مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر

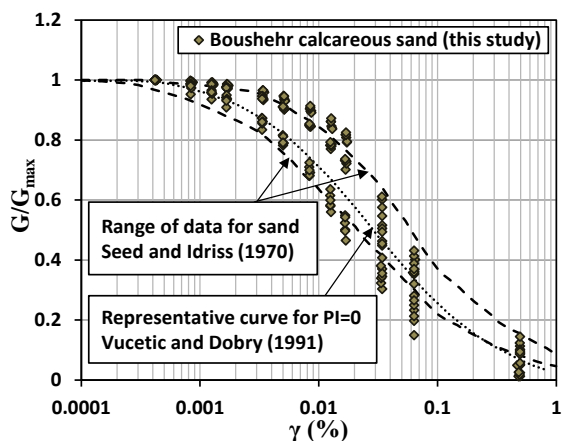
۲-۶- نسبت مدول برشی

شکل (۸) بیانگر اثر فشار محدود کننده مؤثر میانگین و دانسیته‌ی نسبی بر منحنی‌های نسبت مدول برشی (G/G_{max}) ماسه‌ی کربناتی بوشهر است. G_{max} مدول برشی ماکزیم یعنی مدول برشی اندازه‌گیری شده در کوچکترین کرنش که از درجه‌ی 10^{-6} است. افزایش فشار محدود کننده مؤثر میانگین (P'_0) موجب افزایش نسبت مدول برشی شده و با افزایش فشار نرخ افزایش G/G_{max} کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، تغییرات منحنی‌های نسبت مدول برشی $(G/G_{max}-\gamma)$ در $P'_0=200-400\text{ kPa}$ کمتر از $P'_0=40-200\text{ kPa}$ است. همچنین شکل (۸) نشان می‌دهد که، منحنی‌های نسبت مدول برشی تقریباً بی‌تأثیر از تغییرات دانسیته‌ی نسبی نمونه‌ی ماسه‌ی کربناتی است.

خاک در کرنش‌های کوچک دارای رفتار الاستیک خطی بوده و مدول برشی دارای مقدار ماکزیمم است. با افزایش دامنه‌ی کرنش برشی خاک رفتار غیرخطی از خود نشان داده و به عبارتی رفتار تنش-کرنش خاک غیرخطی خواهد شد. کرنشی

شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی‌های G/G_{max} - γ تحت تأثیر تغییرات نسبت ناهمسانی تنش نیست. نتایج تغییرات G/G_{max} با افزایش β برای دانسیته‌ی نسبی ۸۰٪ و در دامنه‌های مختلف کرنش برشی (شکل ۱۱) نیز بیانگر آن است که با وجود تأثیر نسبت ناهمسانی تنش در افزایش مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر، مقادیر G/G_{max} در شرایط همسان و ناهمسان تفاوت چندانی با هم ندارند.



شکل (۱۲) مقایسه نتایج آزمایش‌ها با منحنی‌های پیشنهادی پژوهشگران

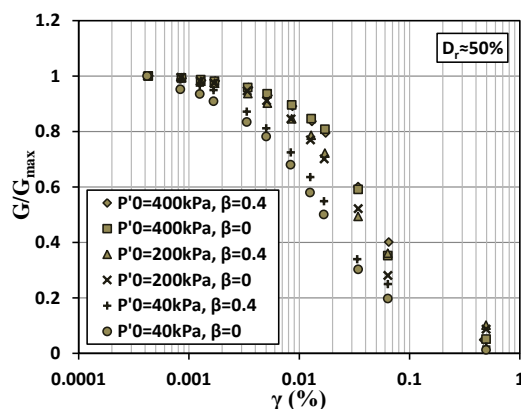
همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، بخشی از نتایج نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در $P'_0=40\text{ kPa}$ فراتر از مرزهای پیشنهادی قرار گرفته است. این امر بیانگر آن است که منحنی‌های G/G_{max} - γ ماسه‌ی مورد آزمایش برای فشارهای بالا در بازه‌های ارائه شده قرار نمی‌گیرد. برای دامنه‌های کرنش برشی فراتر از ۰/۰۳٪ نیز نتایج برای فشارهای کم از مرزهای پیشنهادی پژوهشگران تبعیت نکرده است. موارد یاد شده لزوم اصلاح بازه‌های ارائه شده [۱۸ و ۱۹] را برای ماسه‌ی کربناتی بوشهر روشن می‌سازد.

پژوهشگران [۲۰] مدل هیپربولیک (رابطه‌ی ۳) را برای مدلسازی رفتار خاک ارائه نمودند:

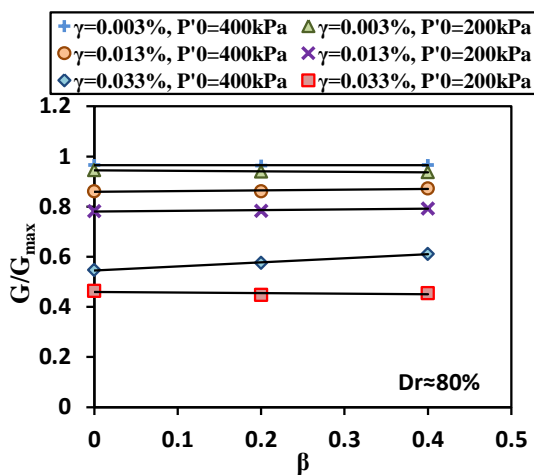
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

که در این رابطه، γ_r کرنش مرجع برابر با دامنه‌ی کرنش متناظر با $G/G_{max}=0/5$ است. در واقع اثر نوع خاک و همچنین اثر پارامترهای مختلف در قالب کرنش مرجع (γ_r) در این مدل لحاظ شد. اگرچه مدل هیپربولیک نمی‌تواند همه‌ی عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاک را منعکس نماید اما خود گامی بزرگ در توصیف رفتار خاک تلقی خواهد شد. این مدل به وفور

شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی‌های G/G_{max} - γ تحت تأثیر تغییرات نسبت ناهمسانی تنش نیست. نتایج تغییرات G/G_{max} با افزایش β برای دانسیته‌ی نسبی ۸۰٪ و در دامنه‌های مختلف کرنش برشی (شکل ۱۱) نیز بیانگر آن است که با وجود تأثیر نسبت ناهمسانی تنش در افزایش مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر، مقادیر G/G_{max} در شرایط همسان و ناهمسان تفاوت چندانی با هم ندارند.



شکل (۱۰) اثر ناهمسانی تنش بر نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی



شکل (۱۱) اثر ناهمسانی تنش بر نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در سطوح مختلف کرنش برشی و $D_r=80\%$

۲- مقایسه با مدل‌های پیشین و اصلاح آنها

مجموعه‌ی نتایج آزمایشگاهی این پژوهش برای نسبت مدول برشی G/G_{max} ماسه‌ی کربناتی بوشهر و همچنین بازه‌های ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران [۱۸ و ۱۹] برای خاک ماسه-ای نیز برای مقایسه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. وستیک و دابری [۱۹] مجموعه‌ای از منحنی‌های G/G_{max} - γ را

عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای، رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش را استفاده نمود.

۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

ارزیابی دقیق منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها از مراحل مهم و اساسی در حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین است. مرور مطالعات گذشته بر روی پارامترهای دینامیکی نشان می‌دهد که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاته صورت گرفته است. مطالعات زمین‌شناسی بیانگر آن است که بخش وسیعی از سطح زمین در نواحی گرمسیری پوشیده از خاک‌های کربناتی است. بخش زیادی از نواحی جنوبی کشورمان، که زلزله‌های سال‌های اخیر لرزه‌خیزی آن را اثبات نموده، پوشیده از خاک‌های کربناتی است. از طرفی تفاوت در نوع کانی و شکل ذرات این خاک‌ها تفاوت رفتاری آنها را بیشتر نمایان می‌سازد. از اینرو در این پژوهش، مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر با انجام آزمایش‌های ستون تشدید و سه محوری سیکلی مورد مطالعه قرار گرفت. اثر فشار میانگین و دانسیته‌ی نسبی بر مدول برشی این خاک بررسی شد. آزمایش‌ها در دو حالت همسان و ناهمسان انجام شد تا اثر شرایط تنش اولیه بر رفتار دینامیکی خاک مشخص شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدود کننده‌ی میانگین، مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر افزایش یافته است. همچنین کرنش آستانه‌ی خاک مورد آزمایش نیز با افزایش فشار محدود کننده افزایش یافته است.

افزایش دانسیته‌ی نسبی نیز افزایش مدول برشی را به دنبال داشته است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش فشار محدود کننده‌ی میانگین اثر دانسیته‌ی نسبی بر منحنی‌های مدول برشی افزایش یافته، به گونه‌ای که تغییرات دانسیته‌ی نسبی از ۵۰٪ تا ۸۰٪ در فشارهای محدود کننده‌ی میانگین ۴۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۴۰۰ kPa به ترتیب موجب افزایش ۹٪، ۱۸٪ و ۱۸٪ در مدول برشی ماکزیمم شده است. مدول برشی ماسه‌ی کربناتی در حالت تحکیم ناهمسان بزرگتر از آزمایش‌های با تحکیم همسان بوده و با افزایش نسبت تنش برشی اولیه، مدول برشی افزایش یافته است.

برای تشریح رفتار غیر خطی خاک‌ها تحت بارهای سیکلی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. همچنین رابطه‌ی (۳) پایه و اساس بسیاری از الگوها و مدل‌های تجربی ارائه شده برای خاک‌های سیلیکاته به وسیله‌ی پژوهشگران [۴ و ۲۱] است. همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده، مدل هیپربولیک [۲۰] منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر را کمتر از مقادیر واقعی ارزیابی نموده و این اختلاف با افزایش P'_0 افزایش یافته است. در این مطالعه، با پیشنهاد فرم اصلاح شده‌ی مدل هیپربولیک (۴) سعی شده تا ارزیابی منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی مورد مطالعه با دقت بالاتری صورت گیرد. با توجه به اینکه کرنش مرجع تحت تأثیر افزایش P'_0 است، از اینرو مقادیر $\gamma_r = \gamma_{G/G_{max}} = 0.5$ برای همگی نتایج $G/G_{max} - \gamma$ حاصل از آزمایش‌های این پژوهش محاسبه شد. سپس این پارامتر به صورت تابعی از P'_0 و در قالب رابطه‌ی (۵) ارائه شد:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + a \left(\frac{\gamma_r}{\gamma'_r} \right)^b} \quad (4)$$

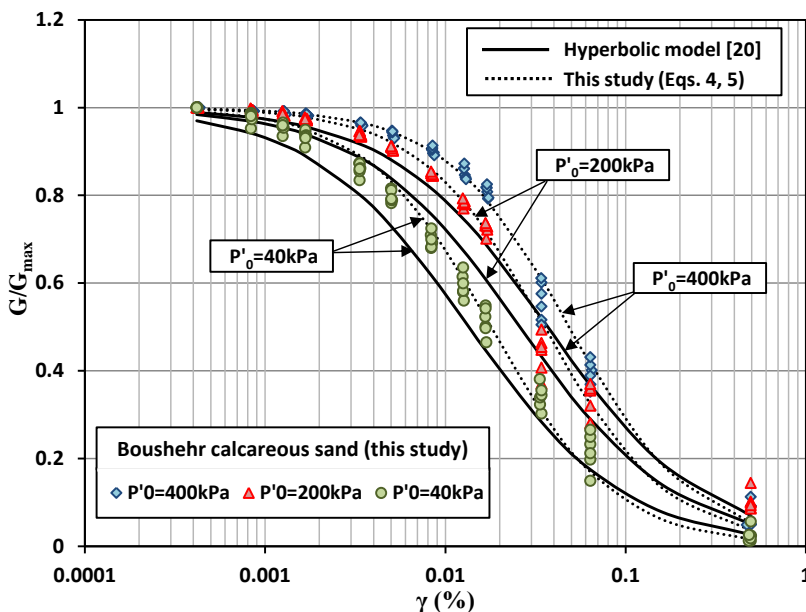
$$\gamma'_r = c \left(\frac{P'_0}{P_a} \right)^d \quad (5)$$

توجه شود که در رابطه‌ی (۵)، P'_0 با واحد kPa و پارامتر γ'_r به صورت درصد محاسبه خواهد شد. همچنین $P_a = 100 \text{ kPa}$ می‌باشد. بر اساس مقادیر نسبت مدول برشی به دست آمده از آزمایش‌ها و بهترین منحنی‌های متناظر با این نتایج، ضرایب موجود در روابط ۴ و ۵ به صورت جدول (۳) حاصل شد.

جدول (۳) ضرایب موجود در روابط ۴ و ۵

ضریب	a	b	c	d
مقدار	۰/۶۷	۱/۲۵	۰/۰۱۹	۰/۴۴۳

منحنی‌های $G/G_{max} - \gamma$ حاصل از روابط (۴) و (۵) در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه‌ی پیشنهادی می‌تواند منحنی‌های $G/G_{max} - \gamma$ مربوط به ماسه‌ی کربناتی مورد آزمایش را با دقت بالایی ارزیابی نماید. از اینرو، می‌توان برای ارزیابی دقیق‌تر منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر برای استفاده در مسائل



شکل (۱۳) مقایسه نتایج آزمایش‌ها با منحنی‌های مبتنی بر مدل هیپربولیک [۲۰] و مدل پیشنهادی

مدل لحاظ شد. همچنین ضرایبی نیز برای ارزیابی دقیق‌تر منحنی‌های G/G_{max} - γ خاک مورد آزمایش اعمال شد. رابطه‌ی ارائه شده را می‌توان برای برآورد منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه-ای از جمله تحلیل پاسخ مورد استفاده قرار داد.

۹- قدردانی

این مقاله در راستای پروژه پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۳ و کد پروژه ۵۴۵ صورت گرفت. همچنین آزمایش‌های سیکلی در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه سمنان انجام شده که بدین وسیله از همکاران گرامی قدردانی به عمل می‌آید.

۱۰- مراجع

- [1] Ishibashi, I., Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations* 33(1): 182-191.
- [2] Stokoe, K.H.II., Darendeli, M.B., Andrus, R.D., Brown, L.T. (1999). Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies. Proc. of 2nd Int. Conf. on Geotech. Earthquake Eng., Lisbon, Portugal, 3: 811-845.
- [3] Zhang, J., Andrus, R.D., Juang, C.H. (2005) Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. *J of Geotech Geoenviron Eng.*, ASCE, 131(4): 453-464.

این روند افزایشی بیانگر وابستگی مدول برشی به مؤلفه‌ی تنش در جهت اندازه‌گیری این پارامتر است. اثر ناهمسانی تنش با افزایش فشار محدود‌دهی کننده افزایش یافته است. با نرمال نمودن تغییرات مدول برشی به مدول برشی ماکزیمم (G_{max})، منحنی‌های نسبت مدول برشی ترسیم شد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش فشار محدود کننده‌ی میانگین مقادیر G/G_{max} افزایش یافته است. قابل ذکر است که با افزایش P'_0 ، نرخ افزایش نسبت مدول برشی کاهش یافته است. با وجود تأثیر دانسیته‌ی نسبی و نسبت ناهمسانی تنش بر منحنی‌های مدول برشی اما این پارامترها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرات نسبت مدول برشی نداشته است.

نتایج آزمایشگاهی این پژوهش برای نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر با مرزها پیشنهادی پژوهشگران برای ماسه‌ی سیلیکاته مقایسه شد. بخشی از نتایج در دامنه‌های مختلف کرنش برشی فراتر از بازه‌های پیشنهادی قرار گرفته که این خود لزوم اصلاح این مرزها را برای تعمیم به منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌های کربناتی روشن می‌سازد. در نهایت به کمک نتایج آزمایشگاهی این پژوهش و بر اساس مدل هیپربولیک رابطه‌ای برای ارزیابی منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی بوشهر ارائه شد. اثر فشار محدود کننده‌ی میانگین به-عنوان مهمترین پارامتر مؤثر بر رفتار خاک‌های دانه‌ای در این

- Jafarian, Y., Towhata, I., Baziar, M.H., Noorzad, A., Bahmanpour, A. (2012). Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments. *Soil Dyn Earthq Eng*, 35: 13–28.
- [13] Moore, D.M., Reynolds, R.C. (1997). *X-ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals*, Oxford University Press, UK.
- [14] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Publ. Prentice Hall, 670 p.
- [15] Hao, G., Lok, T.M.H. (2008). Study of shear wave velocity of macao marine clay under anisotropic stress condition. The 14th World Conf. on Earthquake Engineering, WCEE, October 12-17, Beijing, China.
- [16] Gu, X.Q., Yang, J., Huang, M. (2013). DEM simulations of the small strain stiffness of granular soils: effect of stress ratio. *Granular Matter*, 15: 287–298.
- [17] Seed, H.B. Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic analysis. Report No. EERC 70-10, University of California.
- [18] Vucetic, M., Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J Geotech Eng., ASCE*, 117(1): 89-107.
- [19] Hardin, B.O., Drenvich, V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils; measurement and parameter effects. *J Soil Mech Found Div, ASCE*, 98(6): 603–624.
- [20] Senetakis K, Anastasiadis A, Pitilakis K, Coop MR (2013) The dynamics of a pumice granular soil in dry state under isotropic resonant column testing. *Soil Dyn Earthq Eng*, 45: 70–79.
- [4] Jafarian, Y., Haddad, A., Javdanian, H. (2014). Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils. *Acta Geodyn Geomater*, 11(1): 89–100.
- [5] Javdanian, H., Jafarian, Y., Haddad, A. (2014). Predicting damping ratio of fine-grained soils using soft computing methodology. *Arab J Geosci*, DOI: 10.1007/s12517-014-1493-9.
- [6] Holmes, A. (1978). *Principles of Physical Geology*. Nelson, London, 730.
- [7] Coop, M., Sorensen, K.K., Freitas, T.B., Georgoutsos, G. (2004). Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Geotechnique*, 54(3): 157–164.
- [8] Brandes, H.G. (2011). Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29: 113–126.
- [9] Hassanlourad, M., Salehzadeh, H., Shahnazari, H., (2008). Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects. *Int J Civil Eng*, 6(2):108–119.
- [10] Shahnazari, H., Rezvani, R. (2013). Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study. *Eng Geology*, 159: 98–105.
- [11] Shahnazari, H., Salehzadeh, H., Rezvani, R., Dehnavi, Y., (2014). The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior. *KSCE J Civil Eng*, 18(4): 975-983.
- [12] Wang, Z., Luo, Y., Guo, H., Tian, H. (2012). Effects of initial deviatoric stress ratios on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in China. *Eng. Geology*, 144: 43–50.

Estimating the shearing modulus of Bushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments

Y. Jafarian^{1*}, A.H. Haddad², H. Javdanian³

1- Assistant Prof., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

2- Assistant Prof., Faculty of Civil Engineering, Semnan University

3- Ph.D Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

*yjafarianm@iiees.ac.ir

Abstract:

Shear modulus is one of the most important properties of soil deposit that should be evaluated as a preliminary step for site response analysis. Although numerous studies have been conducted to evaluate this parameter for silicate soils, there are considerably less studies on calcareous soils. However, extensive regions of the earth is covered with calcareous soils. This type of soil is typically observed near offshore hydrocarbon industries, such as the Persian Gulf. Calcareous sand is the accumulation of pieces of carbonate materials, originated from reworked shell fragments and skeletal debris of marine organism. These soils typically include huge oil and gas reservoirs which are continuously under an extending construction. Therefore, assessment of dynamic behavior of calcareous soils is a vital step for engineering projects. In this study, shear modulus of calcareous sand are investigated in the range of small and large strains using resonant column and cyclic triaxial tests, respectively. Bulk samples of Bushehr sand were collected from the North bank of the Persian Gulf near the Bushehr port. Preliminary mineralogy tests were conducted in order to estimate carbonate content of the samples. The sand contains considerable level of carbonate content and skeletal structure of the soil can be observed easily. Remolded samples of this sand were prepared via dry deposition method for either triaxial or resonant column tests. The results are presented in terms of shear modulus versus shear strain. The effects of confining pressure and relative density on the shear modulus of the calcareous soil are investigated. Moreover, for evaluating the effect of stress anisotropy on the shear modulus of calcareous soil, dynamic and cyclic tests were conducted under both isotropic and anisotropic conditions. The experimental results confirm that confining pressure has an important influence on the shear modulus of the tested samples. Increase of the mean confining pressure and relative density increases the shear modulus of the sand, as previously reported for the other sands. The results indicate that the effect of stress anisotropy on dynamic properties of calcareous sand is less important than those of mean confining pressure and relative density. With increasing mean confining pressure, the effect of relative density and initial stress anisotropy on the shear modulus increases. The normalized shear modulus are compared with the G-reduction ranges proposed for silicate sand by the previous researchers. This comparison show the need for some modification of the previous proposed ranges for normalized shear modulus curves. Finally, a modified hyperbolic model is presented for estimating the normalized shear modulus of Bushehr calcareous sand. It is demonstrated that the proposed model has more capability for prediction of the experimental G-reduction curves, compared with the models recommended for silicate soils. One advantage of the proposed model is the simple correlation developed for the reference shear strain in terms of initial effective confining pressure. The modified hyperbolic model presented in this study can be employed for site response analysis of the calcareous deposits of the Bushehr city.

Keywords: Calcareous Sand, Shear Modulus, Stress Anisotropy, Resonant Column, Cyclic Triaxial.