

## چکیده

ارزیابی دقیق منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها از مراحل مهم و اساسی در حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین می‌باشند. مطالعات بسیاری جهت ارزیابی این منحنی‌ها که شامل منحنی‌های سختی برشی و نسبت میرایی هستند، صورت گرفته است. اکثر این مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاتی انجام پذیرفته است. مطالعات زمین‌شناسی حاکی از آن است که بخش وسیعی از سطح زمین در نواحی گرمسیری از جمله نواحی جنوبی کشور ایران پوشیده از خاک‌های کربناتی است. از این‌رو بررسی رفتار خاک‌های کربناتی تحت بارهای دینامیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله مطالعات تحلیلی، تجربی و آماری انجام شده بر روی منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها بررسی و اثر پارامترهای مختلف بر این منحنی‌ها شرح داده می‌شود. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی چرخه‌ای و دینامیکی انجام شده در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین ۴۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و دانسیته‌ی نسبی ۵۰ و ۸۰ درصد بر روی ماسه کربناتی بوشهر گزارش می‌شوند. در نهایت پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی این تحقیق با مطالعات گذشته مقایسه شد که نتایج حاصل نشان از تفاوت رفتاری ماسه‌ی کربناتی بوشهر با الگوهای مبتنی بر ماسه‌های سیلیکاتی داشته است.

**واژگان کلیدی:** سختی برشی، نسبت میرایی، ماسه کربناتی، ماسه سیلیکاتی

## ارزیابی رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی

یاسر جعفریان (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

yjafarianm@iiees.ac.ir

حامد جاودانیان

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه شهرکرد

## ۱- مقدمه

رفتار دینامیکی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله فشار محدود کننده، نسبت تخلخل و شاخص خمیری خاک می‌باشند [۲]. از این‌رو به منظور انعکاس اثر پارامترهای مذکور در رفتار خاک جهت کاهش عدم قطعیت نتایج تحلیل‌های دینامیکی، مطالعات وسیعی صورت گرفته است. مطالعات اخیر نشان از اثر نوع کانی در رفتار خاک داشته [۳]؛ بنابراین لزوم بررسی رفتار انواع خاک‌ها با منشأ مختلف از جمله خاک‌های کربناتی را روشن می‌سازد که مناطق وسیع و با خطر لرزه‌خیزی بالایی را در جنوب کشورمان تشکیل داده‌اند.

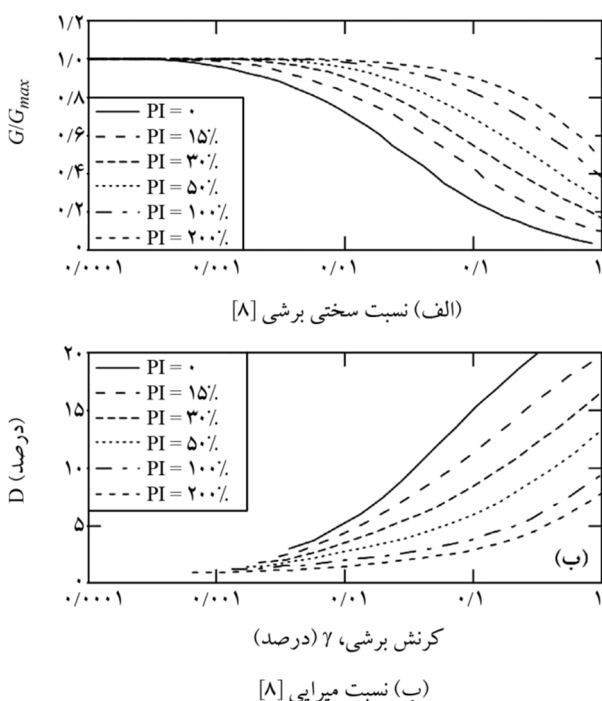
## ۲- منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها

خاک محصول طبیعت بوده و رفتار و عملکرد خاک‌های مختلف متفاوت است. از این‌رو جهت تعیین منحنی‌های رفتار

مهم‌ترین خصوصیات مصالح ژئوتکنیکی که جهت تحلیل‌های دینامیکی بایستی مورد ارزیابی قرار گیرند شامل سختی برشی (G) و نسبت میرایی (D) می‌باشند. در مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای، پاسخ مصالح خاکی به تحریکات برشی تناوبی (مانند زلزله) از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو، ارزیابی دقیق این پارامترها و تغییرات آنها با کرنش برشی که به‌عنوان منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها شناخته شده‌اند، در حل مسائل مختلفی چون تحلیل پاسخ نهشته‌های خاکی، اندرکنش خاک-سازه و به‌طور کلی مدل‌سازی رفتار سیستم‌های ژئوتکنیکی در برابر زلزله از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. این منحنی‌ها در دو بخش کرنش کوچک و کرنش بزرگ به ترتیب با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه محوری چرخه‌ای قابل ارزیابی می‌باشند [۱].

مطالعات آزمایشگاهی حاکی از آن است که منحنی‌های

نتایج آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی نمونه‌های خاک چسبنده نشان از اثر قابل ملاحظه‌ی نشانه‌ی خمیری (PI) بر رفتار دینامیکی خاک‌های چسبنده داشته است [۶-۷]. همان‌طور که در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است، با افزایش خاصیت خمیری خاک نسبت سختی برشی و نسبت میرایی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند [۸].



شکل (۲): اثر نشانه خمیری بر منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها

مطالعات ادريس [۹] نیز حاکی از آن است که با افزایش PI، خاک رفتار خطی بیشتری از خود نشان داده و به عبارتی کرنش آستانه خطی<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. آزمون‌های چرخه‌ای بر روی خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد که نسبت سختی برشی خاک ( $G/G_{max}$ ) تقریباً مستقل از دانسیته‌ی نسبی ( $D_r$ ) خاک است [۱۰].

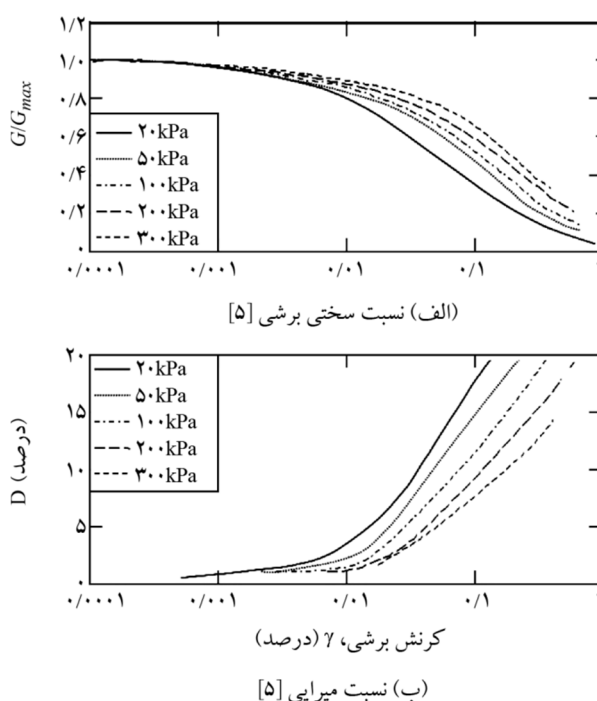
ایوازکی و تاتسوکا [۱۱] اثر دانه‌بندی خاک بر سختی برشی و نسبت میرایی را با انجام آزمون‌های ستون تشدید بررسی نمودند. نتایج ایشان بیانگر آن است که علی‌رغم اثر قابل ملاحظه‌ی دانه‌بندی خاک بر سختی برشی، نسبت میرایی خاک چندان تحت تأثیر این پارامتر نیست. نتایج مطالعات رولینز و همکاران [۱۲] علاوه بر تأیید اثر دانه‌بندی خاک بر سختی

دینامیکی خاک‌های مختلف و همچنین میزان تأثیر پارامترهای گوناگون، مطالعات بسیاری توسط محققین انجام شده است. در ادامه مروری بر این مطالعات صورت خواهد گرفت.

## ۲-۱- مطالعات تجربی

ایوازکی و همکاران [۴] با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و برشی پیچشی به بررسی تغییرات سختی برشی و نسبت میرایی خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. نتایج نشان داده که با افزایش کرنش برشی ( $\gamma$ )، مقدار سختی برشی و نسبت میرایی به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

نتایج مطالعات آزمایشگاهی کوشو [۵] بر روی ماسه توپورا در شکل (۱-الف) و (۱-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نسبت سختی برشی ( $G/G_{max}$ ) و نسبت میرایی (D) با افزایش فشار محدود کننده به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. سختی برشی در کرنش‌های برشی کوچک (حدود  $10^{-4}$ ) که خاک دارای رفتار خطی می‌باشد بیشترین مقدار خود را دارا بوده و آن را سختی برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) می‌نامند.



شکل (۱): اثر فشار محدود کننده بر منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه‌ها

[۱۳، ۱۵] سازگاری خوبی داشته، اما مقادیر نسبت میرایی در کرنش‌های برشی فراتر از ۰/۶٪ کمتر از مرزهای پیشنهادی به دست آمد. لی و همکاران [۱۶] پارامترهای دینامیکی ماسه فوتنبلو<sup>۲</sup> را با انجام آزمون‌های سانتریفیوژ بررسی و با اصلاح ضرایب روابط (۲ و ۳)، معادلاتی تجربی برای محاسبه پارامترهای دینامیکی ماسه‌ی مذکور ارائه دادند. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که فشار محدود کننده اثر قابل توجهی بر سختی برشی و نسبت میرایی خاک ماسه‌ای داشته است.

## ۲-۲- مطالعات آماری

منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تحلیل‌های پاسخ زمین داشته و دقت بالای این منحنی‌ها عدم قطعیت نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی را کاهش خواهد داد. از این رو محققین با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات تجربی بر روی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه، سعی در ارزیابی دقیق‌تر رفتار این مصالح تحت بارهای وارده داشتند. اوزتوپارک و بولتون [۱۷] با تجزیه و تحلیل نتایج سختی برشی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های ماسه‌ای، و واردانگا و بولتون [۱۸] با جمع‌آوری نتایج آزمایش‌ها بر روی خاک‌های رس و سیلت مدل‌هایی را جهت ارزیابی منحنی‌های کاهش سختی این خاک‌ها ارائه دادند. مقایسه‌ی این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی نشان از دقت بالای آنها در مقایسه با مدل‌ها و روابط موجود داشته است.

جعفریان و همکاران [۱۹] و جاودانیان و همکاران [۲۰-۲۱] به ترتیب نسبت سختی برشی و نسبت میرایی خاک‌های ریزدانه را با تجزیه و تحلیل مجموعه‌ی وسیعی از نتایج پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، مدل‌هایی برای ارزیابی منحنی‌های رفتار دینامیکی (تغییرات نسبت سختی برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی) خاک‌های ریزدانه ارائه دادند. این محققین [۱۹-۲۱] از نتایج آزمون‌های سانتریفیوژ نیز جهت بررسی صحت عملکرد مدل‌های پیشنهادی خود استفاده نمودند.

برشی، نشان می‌دهد که منحنی نسبت سختی برشی کمتر تحت تأثیر دانه‌بندی خاک قرار دارد.

ایشیاشی و ژانگ [۱۳] با جمع‌آوری و تحلیل مجموعه‌ای از نتایج آزمایشگاهی، روابطی را جهت ارزیابی منحنی‌های رفتار دینامیکی شامل تغییرات نسبت سختی برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی ارائه نمودند. این روابط به صورت تابعی از فشار محدود کننده مؤثر و نشانه‌ی خمیری بوده است. ایشان نسبت سختی برشی را به صورت رابطه‌ی (۱) پیشنهاد دادند:

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma) \sigma_m'^{m(\gamma)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\sigma_m'$  فشار محدود کننده مؤثر بوده و ضرایب  $K$  و  $m$  را به صورت تابعی از کرنش برشی (روابط ۲ و ۳) ارائه نمودند:

$$K(\gamma) = 0.5 \left[ 1 + \tan h \left\{ \ln \left( \frac{0.000102}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right] \quad (2)$$

$$m(\gamma) = 0.272 \left[ 1 - \tan h \left\{ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] \quad (3)$$

ایشیاشی و ژانگ [۱۳] همچنین رابطه‌ی زیر را برای نسبت میرایی ارائه دادند:

$$D = 0.333 \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right) + 1 \right] \quad (4)$$

رولینز و همکاران [۱۲] نیز بر اساس مجموعه‌ای از نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک‌های دانه‌ای، نسبت سختی برشی و نسبت میرایی را بر اساس کرنش برشی و به صورت روابط (۵) و (۶) ارائه دادند:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{[1.2 + 16\gamma(1 + 10^{-20\gamma})]} \quad (5)$$

$$D = 0.8 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75} \quad (6)$$

که در این روابط  $\gamma$  کرنش برشی می‌باشد.

سختی برشی حاصل از آزمون‌های سانتریفیوژ [۱۴] بر روی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه، با منحنی‌های پیشنهادی دیگر محققین

### ۳-۲- رفتار ماسه‌های کربناتی

با نگاهی به تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاتی<sup>۳</sup> صورت گرفته است. نوع کانی تشکیل دهنده‌ی خاک نیز می‌تواند رفتار دینامیکی خاک‌ها را تحت تأثیر قرار دهد [۲۲]. سنتاکیس و همکاران [۲۲] با انجام آزمون‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌های آتش‌فشانی و همچنین ماسه‌های کوارتزی نشان دادند که سختی برشی و نسبت میرایی ماسه‌های آتش‌فشانی متفاوت از ماسه‌های کوارتزی می‌باشد. این تفاوت رفتاری به بحث کانی‌شناسی<sup>۴</sup> این خاک‌ها نسبت داده شده است. از این رو خاک‌های کربناتی<sup>۵</sup> نیز می‌توانند از این قاعده مستثنا نباشند.

طبق مطالعات زمین‌شناسی انجام شده، حدود ۴۰٪ سطح کف و مجاور اقیانوس‌ها و دریاها در نواحی گرمسیری را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل می‌دهند [۲۳]. بسیاری از این نواحی که شامل ساخت‌وسازهای گسترده‌ای نیز هستند، دارای خطر لرزه‌خیزی بالایی می‌باشند. نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک صحرائی و آزمایشگاهی تفاوت تراکم‌پذیری و تغییر حجم، قابلیت خرد شونده‌ی ذرات، و نفوذپذیری خاک‌های کربناتی و غیر کربناتی را روشن ساخته است [۲۴-۲۵]. نتایج آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی خاک‌های کربناتی ماسه کربناتی سواحل شمال شرقی استرالیا نشان داده که تغییرات سختی برشی ماسه‌های کربناتی متفاوت از ماسه‌های غیر کربناتی می‌باشد [۲۶-۲۷]. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها نرخ کاهش سختی برشی ماسه‌های کربناتی بیشتر بوده و نسبت میرایی آنها نیز پایین‌تر از ماسه غیر کربناتی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل آزمایش‌های برش ساده بر روی ماسه کوارتزی نوادا (Nevada) و ماسه کربناتی جزایر هاوایی که محدود به بازه‌ی کوچکی از کرنش‌های بزرگ بوده، نمودارهای نسبت سختی برشی و نسبت میرایی ماسه کوارتزی نوادا در بازه‌ی کرنش ۰/۰۵٪ تا ۱٪ بالاتر از ماسه‌های کربناتی قرار گرفته است و به‌طور کلی نشانگر تفاوت رفتار چرخه‌ای خاک‌های مذکور بوده است [۲۸].

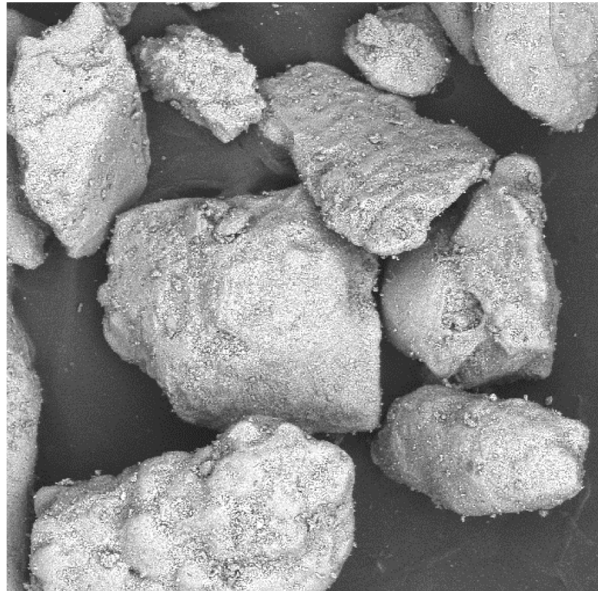
به دلیل وابسته بودن خصوصیات فیزیکی و مهندسی خاک‌های کربناتی به جانداران محل تشکیل این نوع نهشته‌ها، رفتار خاک‌های کربناتی مناطق مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشند [۲۹]. این موضوع لزوم انجام تحقیقات گسترده بر روی خاک‌های کربناتی در نواحی مختلف را روشن می‌سازد. از طرفی مسائل و مشکلات اساسی رخ داده در پروژه‌های عمرانی واقع در نواحی دارای خاک‌ها و رسوبات کربناتی مانند فروریزش خاک در طی عملیات شمع‌کوبی سکوه‌های نفتی در جزیره‌ی لاوان (از جزایر جنوبی کشورمان در خلیج فارس) لزوم بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌های کربناتی این نواحی را روشن ساخت [۳۰-۳۲].

محققین با انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اثر شکل ذرات و همچنین قابلیت خرد شونده‌ی ذرات بر رفتار ماسه کربناتی بوشهر (از بندرهای بزرگ تجاری در جنوب کشورمان و در ساحل خلیج فارس) پرداختند [۳۳-۳۴]. جعفریان و همکاران [۳۵-۳۶] نیز با انجام آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌ای و ستون تشدید، مقاومت روانگرایی و پارامترهای دینامیکی ماسه‌های کربناتی بوشهر و جزیره هرمز (در جنوب بندرعباس و در خلیج فارس) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان بیانگر تفاوت رفتاری ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی بوده است.

مرور مختصر مطالعات انجام شده بر روی خصوصیات خاک‌های کربناتی نشان از اهمیت بررسی رفتار چرخه‌ای این خاک‌ها دارد. ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع خاک‌ها مانند نوع کانی تشکیل دهنده و شکل ذرات، رفتار این مصالح را در شرایط مختلف بسیار تحت تأثیر قرار خواهد داد. از طرفی مناطق وسیعی از کره‌ی زمین (از جمله بخش‌های وسیعی از مناطق جنوبی کشورمان که زلزله‌های یک سال اخیر خطر بالای لرزه‌خیزی آنها را اثبات نموده) پوشیده از خاک‌های کربناتی می‌باشند. از این رو بررسی کامل رفتار این خاک‌ها در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

### ۳- برنامه‌ی آزمایشگاهی

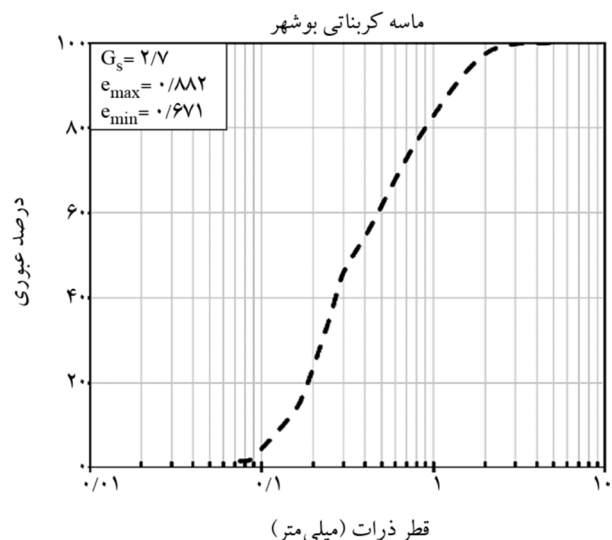
مورد آزمایش بررسی شود. سختی برشی و نسبت میرایی ماسه کربناتی بوشهر با انجام آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری چرخه‌ای در بازه‌ی کرنش برشی  $10^{-4}$ ٪ تا ۱٪ اندازه‌گیری شدند.



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه کربناتی بوشهر

آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق 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 می‌باشد و از دقت بسیار بالایی در ثبت نتایج برخوردار است. در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای خاک به وسیله‌ی یک سیستم الکترومغناطیسی تحت تحریکات پیچشی قرار می‌گیرد. فرکانس و دامنه‌ی تحریکات اعمالی قابل کنترل بوده است. نمونه در مقادیر مختلف دامنه و با فرکانس متغیر بارگذاری شده و پاسخ نمونه به این تحریکات به وسیله‌ی شتاب‌سنج اندازه‌گیری شد. فرکانس متناظر با پاسخ حداکثر شتاب‌سنج را فرکانس تشدید می‌نامند. سرعت موج برشی به کمک فرکانس تشدید، و کرنش برشی به کمک شتاب ماکزیمم حاصل شد [۱]. آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق در محدوده‌ی دامنه‌های کرنش برشی  $10^{-4}$ ٪ تا  $10^{-2}$ ٪ و بر اساس

در این مطالعه، منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه کربناتی بوشهر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ی آزمایش XRD بر روی این ماسه نشان داده که عنصر غالب در ماسه بوشهر، کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) می‌باشد. مقادیر سختی برشی و نسبت میرایی ماسه کربناتی بوشهر در کرنش‌های برشی کوچک و بزرگ به ترتیب با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری چرخه‌ای محاسبه شد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات ماسه مورد آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است.

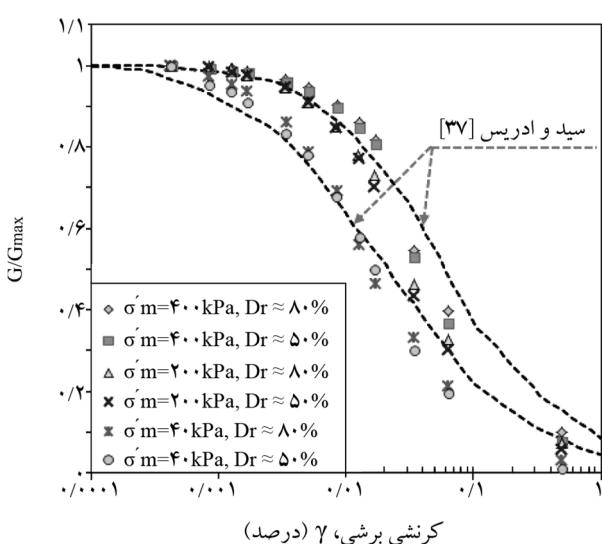


شکل (۳): نمودار دانه‌بندی و مشخصات ماسه مورد آزمایش

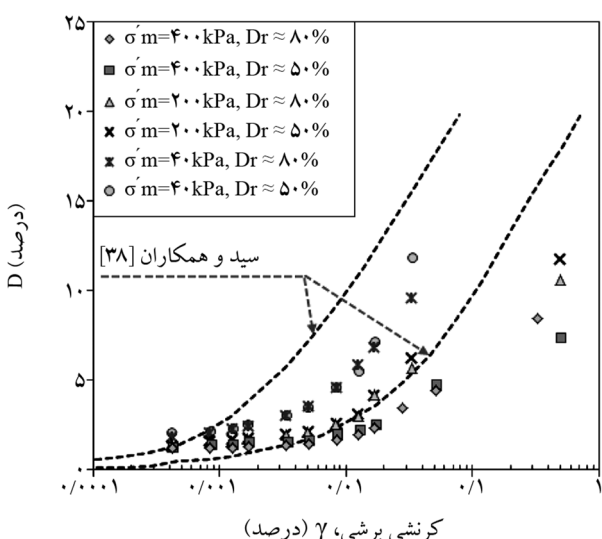
خاک‌های کربناتی به لحاظ شکل و همچنین ساختار ذرات با خاک‌های سیلیکاتی متفاوت می‌باشند. به منظور بررسی شکل و ساختار ظاهری ذرات ماسه کربناتی بوشهر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از ذرات خاک‌های مذکور تصویربرداری شده است. تصویر SEM ماسه بوشهر در شکل (۴) نشان داده شده است.

آزمایش‌های چرخه‌ای و دینامیکی این تحقیق در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین مؤثر ۲۰۰، ۴۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و دانسیته‌های نسبی ۵۰ و ۸۰ درصد انجام شده تا اثر فشار محدود کننده و دانسیته‌ی نسبی بر منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه

برشی ماسه‌ی مورد آزمایش با افزایش فشار محدود کننده‌ی میانگین مؤثر ( $\sigma'_m$ ) افزایش یافته است. با افزایش فشار میانگین، نرخ افزایش  $G/G_{max}$  کاهش یافته و تغییرات منحنی‌های نسبت سختی برشی در بازه‌ی فشار محدود کننده‌ی میانگین مؤثر ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال کمتر از ۴۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که منحنی‌های نسبت سختی برشی تقریباً بی‌تأثیر از تغییرات دانسیته‌ی نسبی ( $D_r$ ) نمونه‌ی ماسه کربناتی می‌باشد.



شکل (۵): اثر فشار محدود کننده و دانسیته نسبی بر نسبت سختی برشی ماسه کربناتی بوشهر و مقایسه با بازه‌های موجود



شکل (۶): اثر فشار محدود کننده و دانسیته نسبی بر نسبت میرایی ماسه کربناتی بوشهر و مقایسه با بازه‌های موجود

استاندارد ASTM-D۴۰۱۵ انجام شدند.

آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی این تحقیق با استفاده از دستگاه مدل GDS و در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه سمنان انجام گرفت. این دستگاه شامل سلول سه‌محوری، سیستم بارگذاری محوری، سه دستگاه کنترل کننده‌ی پیشرفته‌ی فشار و حجم، و سیستم ثبت نتایج می‌باشد. سختی برشی در آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌ای در بازه‌ی کرنش برشی  $10^{-2}$  تا ۱٪ اندازه‌گیری شد. برای رسیدن به درجه‌ی اشباع بالای ۹۵٪ پس فشار به نمونه‌ها اعمال شد. آزمایش‌ها با کنترل کرنش و به صورت چندمرحله‌ای انجام گردید. پس از هر مرحله بارگذاری یک مرحله تحکیم صورت گرفته و سپس مرحله بعدی بارگذاری ادامه داده شد. 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 آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌ای، فرکانس بارگذاری برابر ۰/۰۳ هرتز و میزان جابجایی‌های تک دامنه در سطوح بارگذاری مختلف به ترتیب برابر با ۰/۱۳، ۰/۲۹ و ۰/۲۳۰ میلی‌متر می‌باشد. در هر مرحله از آزمایش ۱۰ سیکل بارگذاری انجام گردید. نیروها نیز به کمک نیروسنج درون سلول اندازه‌گیری می‌شد. تنش‌ها و کرنش‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه‌ی سختی برشی خاک به کار برده شد. پس از انجام آزمایش‌های چرخه‌ای، رابطه‌ی تنش برشی-کرنش برشی (حلقه‌ی هیستریزس) در سیکل دهم (که اثر ناچیز تعداد سیکل‌های بارگذاری نیز از بین رفته) ترسیم و سختی برشی سکانتی و نسبت میرایی محاسبه شد [۲]. آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D۳۹۹۹ انجام شدند.

#### ۴- منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه کربناتی

منحنی‌های رفتار دینامیکی ( $G/G_{max}$ - $\gamma$  و  $D$ - $\gamma$ ) ماسه کربناتی بوشهر در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، نسبت سختی

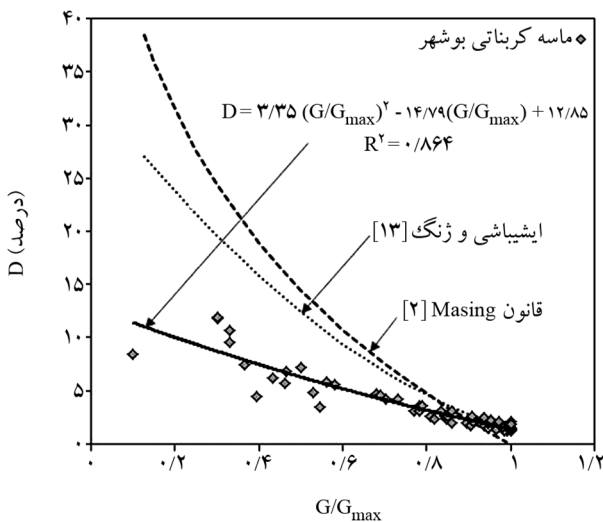
$$D = \frac{4}{\pi \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right)} \left[ 1 - \frac{\frac{G}{G_{\max}}}{1 - \frac{G}{G_{\max}}} \ln \frac{G}{G_{\max}} \right] - \frac{2}{\pi} \quad (7)$$

تغییرات نسبت میرایی مبتنی بر این مدل رفتاری در شکل (۷) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای و دینامیکی، رابطه‌ی  $D-G/G_{\max}$  برای ماسه کرنباتی بوشهر به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$D = 3.35 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 14.79 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right) + 12.85 \quad (8)$$

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، رفتار ماسه کرنباتی بوشهر با مدل‌ها و روابط موجود متفاوت است. تفاوت رفتاری ماسه کرنباتی مورد آزمایش و الگوهای مبتنی بر رفتار ماسه‌های سیلیکاتی را می‌توان به نوع کانی و شکل ذرات خاک‌های مذکور نسبت داد. این امر لزوم بررسی بیشتر رفتار خاک‌های کرنباتی و ارائه‌ی مدل‌ها و الگوهای رفتاری برای این خاک‌ها را روشن می‌سازد.



شکل (۷): مقایسه‌ی تغییرات  $D-G/G_{\max}$  ماسه کرنباتی بوشهر با مدل‌ها و روابط موجود

## ۵- نتیجه‌گیری

منحنی‌های رفتار دینامیکی از فاکتورهای مهم و اساسی در

در شکل (۵) نتایج نسبت سختی برشی ماسه کرنباتی بوشهر با بازه‌های پیشنهادی سید و ادریس [۳۷] مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بخشی از نتایج نسبت سختی برشی ماسه‌ی کرنباتی بوشهر در فشار میانگین ۴۰۰ کیلو پاسکال فراتر از مرزهای پیشنهادی قرار گرفته است. برای دامنه‌های کرنش برشی فراتر از ۰/۰۳٪ نیز نتایج برای فشارهای کم از مرزهای پیشنهادی محققین تبعیت نکرده و با افزایش دامنه‌ی کرنش برشی نیز این اختلاف بیشتر شده است.

شکل (۶) نشانگر نتایج نسبت میرایی ماسه کرنباتی بوشهر می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فشار میانگین مقدار نسبت میرایی کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نسبت میرایی تحت تأثیر تغییرات دانسیته‌ی نسبی واقع نشده است. بازه‌های پیشنهادی سید و همکاران [۳۸] نیز به منظور مقایسه در شکل (۶) آمده است. مقایسه‌ی مقادیر نسبت میرایی ماسه‌ی مورد آزمایش با بازه‌های مذکور نشان می‌دهد که منحنی‌های  $D-\gamma$  ماسه کرنباتی بوشهر خارج از بازه‌های سید و همکاران [۳۸] قرار می‌گیرند. قابل ذکر است که با افزایش فشار محدود کننده و همچنین دامنه‌ی کرنش برشی این اختلاف افزایش یافته است (شکل ۶).

مقایسه‌ی منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه کرنباتی بوشهر با بازه‌های پیشنهادی [۳۷-۳۸] برای این منحنی‌ها، لزوم اصلاح این بازه‌ها را جهت تعمیم به رفتار دینامیکی ماسه کرنباتی بوشهر روشن می‌سازد.

مقایسه‌ی تغییرات  $D-G/G_{\max}$  حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری چرخه‌ای بر روی ماسه کرنباتی بوشهر با قانون میسینگ و همچنین رابطه‌ی پیشنهادی ایشیاشی و ژنگ [۱۳] در شکل (۷) نشان داده شده است. ایشیاشی و ژنگ [۱۳] به کمک مجموعه‌ای از نتایج آزمایشگاهی خاک‌های سیلیکاتی، رابطه‌ای برای تغییرات نسبت میرایی بر اساس نسبت سختی برشی ارائه کردند (رابطه ۴).

ارتباط بین نسبت سختی برشی و نسبت میرایی بر اساس قانون میسینگ و به صورت رابطه (۷) ارائه شد [۲]:

یافته است. افزایش  $\sigma'_m$ ، کاهش نسبت میرایی را به دنبال داشته است. دانسیته‌ی نسبی اثر قابل توجهی بر تغییرات نسبت میرایی نداشته است. نتایج حاصل با بازه‌ها، مدل‌های پیشنهادی محققین برای ماسه سیلیکاتی مقایسه شد. بخشی از نتایج  $G/G_{max}$  ماسه‌ی بوشهر در فشار میانگین ۴۰۰ کیلو پاسکال فراتر از مرزهای پیشنهادی قرار گرفته و برای دامنه‌های کرنش برشی فراتر از ۰/۰۳٪ نیز نتایج برای فشارهای کم از مرزهای پیشنهادی محققین تبعیت نکرده و با افزایش دامنه‌ی کرنش برشی نیز این اختلاف بیشتر شده است.

نتایج حاصل بیانگر تفاوت رفتاری ماسه‌های سیلیکاتی و کربناتی می‌باشد که این تفاوت را می‌توان به نوع کانی و شکل ذرات خاک‌های مذکور نسبت داد. این موضوع لزوم اصلاح بازه‌ها و همچنین روابط موجود را جهت تعمیم به رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی روشن می‌سازد که این خود نیازمند انجام مطالعات بیشتر بر روی رفتار چرخه‌ای و دینامیکی ماسه‌های مذکور است.

### سپاسگزاری

آزمایش‌های این مقاله در راستای پروژه‌ی پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۳ و کد پروژه ۵۴۵ صورت گرفت.

### مراجع

1. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Delhi (India): Pearson Education Ptd. Ltd. [Reprinted 2003].
2. Ishihara, K. (1996) *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science Publications, 350 p.
3. Senetakis, K., Anastasiadis, A., Pitilakis, K., and Coop, M.R. (2013) The dynamics of a pumice granular soil in dry state under isotropic resonant column testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **45**, 70-79.
4. Iwasaki, T., Tatsuoka F., and Takagi, Y. (1978) Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and Foundations*, **18**, 39-56.

حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای می‌باشند که ارزیابی دقیق‌تر آنها کاهش عدم قطعیت نتایج تحلیل‌های دینامیکی را به دنبال خواهد داشت. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده که فشار محدود کننده و نشانه‌ی خمیری مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات پارامترهای دینامیکی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه می‌باشند. لزوم ارائه‌ی مدل‌ها و روابط جهت ارزیابی دقیق پاسخ نهشته‌های خاکی به بارهای دینامیکی باعث شد تا محققین با گردآوری و تحلیل نتایج مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از روش‌های جدید آماری، مدل‌هایی را جهت برآورد منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌ها ارائه دهند.

مرور مطالعات حاکی از آن است که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاته صورت گرفته است. مختصر مطالعات انجام شده بر روی اثر نوع کانی در رفتار خاک نشانگر تفاوت رفتاری خاک‌های با کانی‌ها و ساختار مختلف بوده است. بخش‌های زیادی از نواحی جنوبی کشورمان نیز پوشیده از خاک‌های کربناتی است. از طرفی ساختار خاص این خاک‌ها در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی تفاوت رفتاری آنها تحت بارهای دینامیکی را بیشتر نمایان می‌سازد. از این رو در این تحقیق به بررسی پارامترهای دینامیکی ماسه کربناتی بوشهر پرداخته شد. ارزیابی دقیق‌تر منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌های کربناتی هم برای درک اساسی از رفتار این خاک‌ها و هم جهت استفاده در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای در نواحی پوشیده با خاک‌های کربناتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

سختی برشی و نسبت میرایی ماسه مذکور در کرنش‌های کوچک و بزرگ و با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری چرخه‌ای محاسبه شد. آزمایش‌ها در فشارهای محدود کننده‌ی میانگین ۴۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و دانسیته‌های نسبی ۵۰ و ۸۰ درصد صورت گرفت تا اثر این پارامترها بر منحنی‌های رفتار دینامیکی ماسه کربناتی بوشهر مشخص شود. سختی برشی و همچنین نسبت سختی برشی ماسه‌ی کربناتی مورد آزمایش با افزایش  $\sigma'_m$  افزایش یافته است. با افزایش فشار محدود کننده، نرخ افزایش سختی برشی کاهش



- properties: Application to Fontainebleau sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **52**, 77-87.
17. Oztoprak, S. and Bolton, M.D. (2013) Stiffness of sands through a laboratory test database. *Geotechnique*, **63**, 54-70.
  18. Vardanega, P.J., Bolton, M.D. (2013) Stiffness of clays and silts: normalizing shear modulus and shear strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**, 1575-1589.
  19. Jafarian, Y., Haddad, A. and Javdanian, H. (2014) Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, **11**, 89-100.
  20. Javdanian, H., Jafarian, Y., and Haddad, A. (2015) Predicting damping ratio of fine-grained soils using soft computing methodology. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 3959-3969.
  21. Javdanian, H., Haddad, A., and Jafarian, Y. (2015) Evaluation of dynamic behavior of fine-grained soils using group method of data handling. *Transportation Infrastructure Engineering*, **1**(3), 77-92.
  22. Senetakis, K., Anastasiadis, A. and Ptilakis, K. (2012) The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands. *Geotechnical Testing Journal*, **35**, 964-980.
  23. Holmes, A. (1978) *Principles of Physical Geology*. Sunbury-on-Thames, Nelson, London, 730 p.
  24. Coop, M.R. and Airey, D.W. (2003) 'Carbonate sands.' In: *Characterization and engineering properties of natural soils*, Tan, T.S., Phoon, K.K., Hight, D.W., and Leroueil, S. (eds), 1049-1086.
  25. Coop, M.R., Sorensen, K.K., Freitas, T.B., and Georgoutsos, G. (2004) Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Geotechnique*, **54**, 157-163.
  26. Sharma, S.S. and Fahey, M. (2004) Deformation characteristics of two cemented calcareous soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 1139-1151.
  27. Lenart, S. (2006) Deformation characteristics of lacustrine carbonate silt in the Julian Alps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 131-142.
  5. Kokusho, T. (1980) Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and Foundations*, **20**, 45-60.
  6. Kokusho, T., Yoshida, Y., and Esashi, Y. (1982) Dynamic soil properties of soft clay for wide strain range. *Soils and Foundations*, **22**, 1-18.
  7. Sun, J.I., Golesorkhi, R., and Seed, H.B. (1988) *Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils*. Report, UCB/EERC-88/15, University of California at Berkeley, 48 p.
  8. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991) Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**, 89-107.
  9. Idriss, I.M. (1990) Response of soft soil sites during earthquakes. *Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium*, **2**, 273-289.
  10. Kim, Y.S., Ha, T.G., Choi, J.J., and Chung, C.K. (2007) The influence of dynamic properties of ground soil on vibration characteristics of rigid body on sand ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **11**, 81-91.
  11. Iwasaki, I. and Tatsuoka, F. (1977) Effects of grain size and grading on dynamic shear modulus of sands. *Soils and Foundations*, **38**, 19-35.
  12. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., and Daily, W.D. (1998) Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 396-405.
  13. Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, **33**, 182-191.
  14. Brennan, A.J., Thusyanthan, N.I., and Madabhushi, S.P.G. (2005) Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 1488-1497.
  15. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972) Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, **98**, 667-692.
  16. Li, Z., Escoffier, S., and Kotronis, P. (2013) Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil

37. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970) *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*. Report No. EERC-70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.
38. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986) Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **112**, 1016-1032.
28. Brandes, H.G. (2011) Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**, 113-126.
29. Jewell, R.J. (1993) *An Introduction to Calcareous Sediments*. Research Report No. G1075, Department of Civil Engineering, The University of Western Australia, 45 p.
30. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H., and Shahnazari, H. (2008) Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects. *International Journal of Civil Engineering*, **6**, 108-119.

### واژه‌نامه

Linear Threshold Strain	۱- کرنش آستانه خطی
Fontainebleau	۲- فونتنبلو
Siliceous Soils	۳- خاک‌های سیلیکاتی
Mineralogy	۴- کانی‌شناسی
Calcareous Soils	۵- خاک‌های کربناتی

31. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H., and Shahnazari, H. (2011) Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands. *International Journal of Civil Engineering*, **9**, 307-314.
32. Dehnavi, Y., Shahnazari, H., Salehzadeh, H., and Rezvani, R. (2010) Compressibility and undrained behavior of Hormuz calcareous sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **15**, 1684-1702.
33. Shahnazari, H. and Rezvani, R. (2013) Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study. *Engineering Geology*, **159**, 98-105.
34. Shahnazari, H., Salehzadeh, H., Rezvani, R., and Dehnavi, Y. (2014) The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **18**, 975-983.
35. Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H. (2016) Estimating the shearing modulus of Boushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments. *Modares Civil Engineering Journal*, **15**(4), 9-19 (in Persian).
36. Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H. (2015) Comparing the shear stiffness of calcareous and silicate sands under dynamic and cyclic straining. *7<sup>th</sup> International Conference of Seismology and Earthquake Engineering (SEE7)*, 18 May, Tehran, Iran (in Persian).

## Dynamic Behavior of Calcareous Sands

Yaser Jafarian<sup>1\*</sup> and Hamed Javdanian<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Iran,

\* Corresponding Author, email: yjafarianm@iiees.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord University

Reliable and accurate assessment of dynamic soil behavior curves is necessary for the solution of many soil dynamic problems, such as the site response analysis. The shear modulus and damping curves of silicate soils under different conditions have been investigated by many geotechnical researchers.

Carbonate sediments are located in temperate and tropical areas and cover approximately 40% of the ocean surface. This type of soil is typically observed near offshore hydrocarbon industries, such as the Persian Gulf. Carbonate sand is the accumulation of pieces of carbonate materials; it usually originates from reworked shell fragments and skeletal debris of marine organism. Foundation problems associated with carbonate soil deposits, particularly as experienced by the offshore hydrocarbon industry have led to significant research focused on understanding the behavior of these soils.

This study focuses on evaluation of dynamic properties of Bushehr calcareous sand. The shear modulus and damping ratio of the tested sand was measured at small to large shear strains using resonant column and cyclic triaxial tests. The calcareous sand specimens were tested by a fixed-free type of resonant column apparatus (SEIKEN model). By using the resonant column apparatus, shear modulus and damping ratio of the calcareous sand for the shear strain amplitude ranging from about 10-4 % to 10-2 % were measured. The cyclic triaxial tests were conducted using a fully automated GDS triaxial testing apparatus. The cyclic tests were done on samples with shear strain amplitudes ranging from about 10-2 % to 1 %. The procedure used to perform the dynamic and cyclic tests was the multi-stage strain-controlled loading under undrained condition.

The tests were conducted in three levels of initial effective mean confining pressure equal to 40, 200, and 400 kPa. The sand specimens were constructed in relative densities lower than 50 or 80 percent, depends on the initial effective stress, in order to acquire the target relative densities (i.e. 50 or 80 percent) after consolidation.

The experimental results indicate that with an increased shear strain amplitude, shear modulus decreases and damping ratio increases. This trend, which was observed for all the tests, is typical behavior of soils under dynamic loading, as observed in the previous studies.

The effect of mean effective confining pressure and relative density on the normalized shear modulus ( $G/G_{max}$ ) curves of the Bushehr calcareous sand was investigated.  $G_{max}$  is the small-strain shear modulus measured at shear strain amplitude about 10-4 %. The increase in mean effective confining pressure causes the normalized shear modulus to increase; however, it is more pronounced in low effective confining pressure. Changes of the normalized shear modulus curves ( $G/G_{max}-\gamma$ ) at the range of  $\sigma'_m=200-400$  kPa is less than that at the range of  $\sigma'_m=40-200$  kPa. Normalized shear modulus curves are almost independent of the changes in relative density of the sand.

The results also indicate that the increased amount of initial mean effective confining pressure leads to the smaller damping ratio for the tested sand. It is also observed that damping ratio curves ( $D-\gamma$ ) are not affected strongly by relative density changes.

Comparison of the tests results with the ranges and models recommended by the previous researchers reveals that the normalized shear modulus and damping ratios of the studied calcareous sand are somewhat inconsistent. In fact, there might be a necessity to modify the previous recommendations for accurate prediction of the dynamic behavior curves of calcareous sands.

**Keywords:** Shear Modulus; Damping Ratio; Carbonate Sand; Silicate Sand.