

چکیده

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که بخش زیادی از تحقیقات صورت گرفته بر رفتار خاک‌های سیلیکاتی متمرکز بوده و خاک‌های کربناتی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از طرفی بخش‌های وسیعی از کره زمین از جمله نواحی جنوبی کشورمان پوشیده از خاک‌ها و رسوبات کربناتی است. از این رو ارزیابی رفتار این نهشته‌ها در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، پارامترهای دینامیکی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر تحت شرایط یکسان و با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌های مذکور در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ به ترتیب با انجام آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی محاسبه گردید. بر اساس نتایج حاصل، افزایش فشار محدودکننده، افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی را به دنبال داشته است. مقایسه‌ی پارامترهای دینامیکی ماسه‌های مورد آزمایش بیانگر آن است که مدول برشی ماسه‌ی هرمز بیشتر از ماسه‌ی بابلسر است. همچنین در شرایط یکسان، نسبت میرایی ماسه‌ی بابلسر فراتر از ماسه‌ی هرمز حاصل شده است. نتایج آزمایش‌ها با روابط محققین برای ارزیابی رفتار دینامیکی ماسه‌ها مقایسه شدند. این مقایسه حاکی از آن است که روابط موجود قادر به ارزیابی دقیق رفتار دینامیکی ماسه‌ی کربناتی هرمز نبوده و نیاز برای ارائه‌ی روابط ویژه برای این خاک وجود دارد.

کلمات کلیدی: ماسه‌ی کربناتی، ماسه‌ی سیلیکاتی، مدول برشی، نسبت میرایی، مطالعات آزمایشگاهی

مقایسه رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر در شرایط یکسان

یاسر جعفریان (نویسنده مسئول)

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
yja.farianm@iiees.ac.ir

حامد جاودانیان

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه
شهرکرد

عبدالحسین حداد

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۱- مقدمه

تجربی، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی رفتار این مصالح تحت بارهای وارده ارائه شدند [۳-۵]. برخی محققین نیز بازه‌هایی را برای تغییرات پارامترهای مدول برشی [۶-۷] و نسبت میرایی [۷] خاک‌ها ارائه دادند.

اثر نوع کانی تشکیل‌دهنده‌ی خاک نیز می‌تواند رفتار دینامیکی خاک‌ها را تحت تأثیر قرار دهد [۸]. تفاوت رفتاری مشاهده شده در نتایج آزمایش‌های دینامیکی انجام شده بر روی ماسه‌های آتش‌فشانی و کوارتزی به تفاوت در شکل ذرات و همچنین تفاوت در کانی تشکیل‌دهنده‌ی ماسه‌های مذکور نسبت داده شده است [۹].

ارزیابی دقیق پارامترهای دینامیکی خاک از گام‌های اساسی در حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین، اندرکنش خاک-سازه و به‌طور کلی مدل‌سازی رفتار سیستم‌های ژئوتکنیکی در برابر زلزله به شمار می‌آیند. تاکنون مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول برشی و نسبت میرایی صورت گرفته است [۱]. با نگاهی به تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاتی صورت گرفته است [۲]. در این مطالعات، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاک‌ها توسط محققین شناسایی شده و در ادامه با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مطالعات

است. ماسه‌های مذکور با دانه‌بندی مشابه مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های این تحقیق در نسبت تخلخل (e) یکسان و در فشارهای محدودکننده مؤثر (σ'_0) مختلف انجام شدند. پس از تشریح روند انجام آزمایش‌های سیکلی و دینامیکی، اثر فشار محدودکننده مؤثر بر مدول برشی و همچنین نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر بررسی شد. رفتار ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی در شرایط مشابه مقایسه شدند. در ادامه پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های سیکلی و دینامیکی انجام شده در این مطالعه با روابط موجود مقایسه می‌شوند.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش‌های سیکلی و دینامیکی این تحقیق بر روی دو ماسه‌ی کربناتی و سیلیکاتی با دانه‌بندی یکسان انجام شدند. این آزمایش‌ها در نسبت تخلخل یکسان ($e \approx 0.537$) و در فشارهای محدودکننده مؤثر ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال صورت گرفتند. ماسه‌های مورد استفاده، ساخت نمونه‌های آزمایش و روند انجام آزمایش‌ها در ادامه شرح داده شده است.

۲-۱- ماسه‌های مورد آزمایش

خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر است. هرمز، جزیره‌ای در ۳۰ کیلومتری جنوب بندرعباس و در مجاورت تنگه‌ی هرمز در خلیج فارس واقع شده است. بابلسر یکی از شهرهای استان مازندران در شمال ایران است که در سواحل جنوبی دریای خزر واقع شده است. تصاویر ماسه‌های مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

در این مطالعه، ماسه‌های هرمز و بابلسر با دانه‌بندی یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۲). خاک‌های مورد آزمایش بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشند.

به منظور ارزیابی کربناته بودن ماسه‌ی هرمز، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی این خاک صورت گرفت.

خاک‌های کربناتی به لحاظ ساختار، شکل ذرات و نوع کانی با خاک‌های سیلیکاتی متفاوت می‌باشند. از طرفی مطالعات زمین‌شناسی [۱۰] نشانگر آن است که بخش وسیعی از کوه‌ی زمین شامل کف و مجاور اقیانوس‌ها و دریاها در نواحی گرمسیری را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل داده است. از این رو بررسی و مطالعه‌ی رفتار این خاک‌ها تحت بارهای سیکلی از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً خاک‌های کربناتی شامل باقی‌مانده‌هایی از گیاهان و جانوران دریایی هستند.

نتایج مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی نشان از تفاوت تراکم‌پذیری و تغییر حجم، قابلیت خردشدگی ذرات و همچنین نفوذپذیری خاک‌های کربناتی و غیر کربناتی داشته است [۱۱-۱۴]. تفاوت رفتار سیکلی ماسه‌ی کربناتی سواحل استرالیا با ماسه‌های سیلیکاتی در کارهای پژوهشی گزارش شده است [۱۵-۱۶]. بر اساس مطالعات انجام شده [۱۷-۱۸]، تیز گوشه بودن و همچنین قابلیت خردشدگی ذرات خاک‌های کربناته از مهم‌ترین عواملی هستند که رفتار این خاک‌ها را در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی تحت تأثیر قرار می‌دهند.

بخش‌های وسیعی از نواحی جنوبی کشورمان از جمله سواحل خلیج فارس پوشیده از رسوبات کربناتی است [۱۹]. لرزه‌خیزی این نواحی که از موقعیت راهبردی بالایی برخوردار هستند با بروز زلزله‌های سال‌های اخیر (از جمله زلزله‌ی کاکلی بوشهر) بر کسی پوشیده نیست. جعفریان و همکاران [۲۰-۲۱] با انجام مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که ارزیابی رفتار سیکلی و دینامیکی ماسه‌ی کربناتی بوشهر بر اساس روابط و مدل‌های موجود، نتایج غیر محافظه‌کارانه‌ای را به دنبال خواهد داشت. موارد مذکور لزوم انجام تحقیقات گسترده جهت بررسی رفتار دینامیکی خاک‌های کربناتی نواحی جنوبی کشورمان در مقایسه با ماسه‌های سیلیکاتی را روشن می‌سازد.

در این مقاله، مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته



(ب)



(الف)

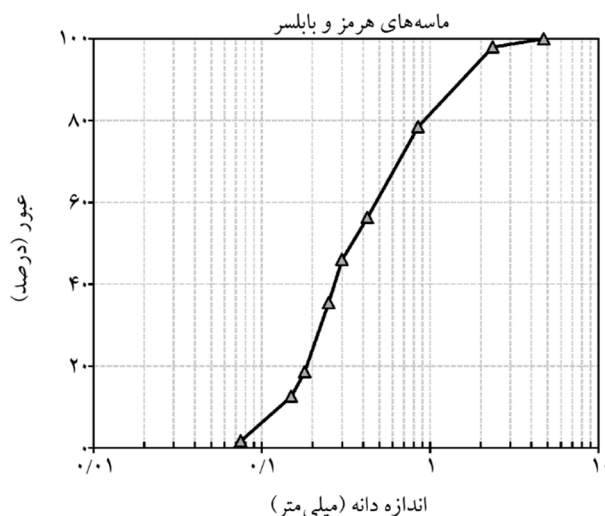
شکل (۱): خاک‌های مورد آزمایش، الف) ماسه‌ی هرمز، ب) ماسه‌ی بابلسر

جدول (۱): مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

پارامتر	ماسه هرمز	ماسه بابلسر
G_s	۲/۷۳	۲/۶۵
$\gamma_{min} (g/cm^3)$	۱/۶۱	۱/۶۶
$\gamma_{max} (g/cm^3)$	۱/۸۰	۱/۸۲
$D_{50} (mm)$	۰/۳۵	۰/۳۵
C_u	۳/۴۳	۳/۴۳
C_c	۰/۸	۰/۸

۲-۲- ساخت نمونه‌های آزمایش

نمونه‌سازی به روش پاشش خشک صورت گرفت. با توجه به اینکه بایستی نمونه‌ها در پایان مرحله‌ی تحکیم به تراکم مورد نظر می‌رسیدند، تراکم اولیه کمتر از مقدار نهایی در نظر گرفته می‌شد. مقدار تغییر نسبت تخلخل نمونه به فشار محدودکننده وابسته بوده که با انجام آزمایش‌های اولیه حدود تقریبی آن برای تنش‌های محدودکننده‌ی مختلف حاصل گردید. ماسه در چندین لایه به درون یک قالب استوانه‌ای با پوشش غشای لاستیکی ریخته شد. پس از پایان نمونه‌سازی و جهت اشباع کردن نمونه‌ها، گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) و سپس آب هواگیری شده از نمونه‌ها عبور داده شد. سپس برای رسیدن به درجه اشباع بالای ۹۵٪ پس فشار به نمونه‌ها اعمال شد. در پایان، نمونه‌ها در فشارهای



شکل (۲): نمودار دانه‌بندی ماسه‌های مورد آزمایش

نتایج حاصل نشان از کربناته بودن این خاک داشته است. این آزمایش در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد. نتیجه‌ی آزمایش نشان می‌دهد که عنصر غالب در این خاک کربنات کلسیم ($CaCO_3$) است. مشخصات ماسه‌ی کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر شامل چگالی ویژه (G_s)، وزن مخصوص حداقل (γ_{min}) و حداکثر (γ_{max})، اندازه‌ی میانگین ذرات (D_{50})، ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب خمیدگی (C_c) در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی در بازه‌ی کرنش برشی ۱٪ تا ۱۰^{-۲}٪ اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با کنترل کرنش و به‌صورت 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 ایجادشده کم بوده و اثر دست‌خوردگی حاصل از تحکیم نمونه بر نتایج مراحل بعدی بارگذاری بسیار ناچیز بوده است. در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی، فرکانس بارگذاری برابر ۰/۰۳ هرتز و میزان جابه‌جایی‌های تک‌دامنه در سطوح بارگذاری مختلف به ترتیب برابر با ۰/۱۳، ۰/۲۹ و ۰/۲۳۰ میلی‌متر است. 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 مدول برشی خاک به کار برده شد. با توجه به اینکه نمونه‌ها در حالت زهکشی نشده بارگذاری شدند نسبت پواسون برابر ۰/۵=ν در نظر گرفته شد. از این رو مقادیر کرنش برشی ۱/۵ برابر کرنش محوری محاسبه شد.

پس از انجام آزمایش‌های سیکلی، رابطه‌ی تنش برشی - کرنش برشی (حلقه‌ی هیستریزس) در سیکل دهم (که اثر ناچیز تعداد سیکل‌های بارگذاری نیز از بین رفته) ترسیم و مدول برشی سکانت به‌صورت شیب خط واصل نقاط انتهایی این منحنی محاسبه گردید [۱]:

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

که در این رابطه، τ تنش برشی و γ کرنش برشی می‌باشند. میرایی نیز به‌صورت نسبت انرژی اتلاف‌شده (ΔW) به انرژی ذخیره‌شده (W) در یک سیکل بارگذاری و به‌صورت زیر محاسبه شد [۱]:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (3)$$

۳- نتایج

منحنی‌های تغییرات مدول برشی (G-γ) حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی بر روی ماسه‌های کربناتی

میانگین مختلف مورد تحکیم قرار گرفته و سپس بارگذاری چند مرحله‌ای در حالت زهکشی‌نشده اعمال گردید.

۲-۳- آزمایش ستون تشدید

آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله 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 به‌وسیله‌ی 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 به‌وسیله‌ی شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس متناظر با پاسخ حداکثر شتاب‌سنج را فرکانس تشدید می‌نامند. سرعت موج برشی به کمک فرکانس تشدید و کرنش برشی به کمک شتاب بیشینه حاصل شد [۲۲]. سپس مدول برشی خاک با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید:

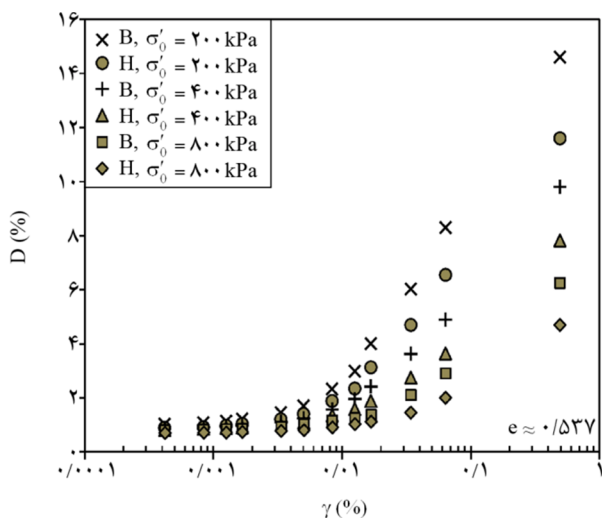
$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

در این رابطه، V_s سرعت موج برشی و ρ جرم حجمی نمونه است. در آزمایش‌های ستون تشدید، مدول برشی و همچنین نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر در بازه‌ی کرنش برشی ۱۰^{-۲}٪ تا ۱۰^{-۴}٪ اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش‌ها، نسبت میرایی با استفاده از کاهش دامنه‌ی ارتعاشات نمونه در حالت ارتعاش آزاد محاسبه شد.

۲-۴- سه‌محوری سیکلی

آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی این تحقیق با استفاده از دستگاه سیکلی مدل GDS و در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه سمنان انجام گرفت. این دستگاه شامل سلول سه‌محوری، سیستم بارگذاری محوری، سه دستگاه کنترل‌کننده‌ی پیشرفته‌ی فشار و حجم و سیستم ثبت نتایج آزمایش است. مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر در

(شکل ۳). این موضوع با نتایج مطالعات چو و همکاران [۲۳] بر روی اثر شکل ذرات بر رفتار خاک سازگاری دارد. نتایج مطالعات ایشان [۲۳] نشان داده که در خاک‌های تیز گوشه نرخ افزایش تماس ذرات و به دنبال آن نرخ افزایش مدول برشی در اثر افزایش فشار محدود کننده بیشتر از خاک‌های گرد گوشه است. منحنی‌های میرایی ($D-\gamma$) ماسه‌های هرمز و بابلسر در نسبت تخلخل اولیه برابر و در فشارهای محدود کننده مؤثر مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فشار محدود کننده نسبت میرایی کاهش یافته است.

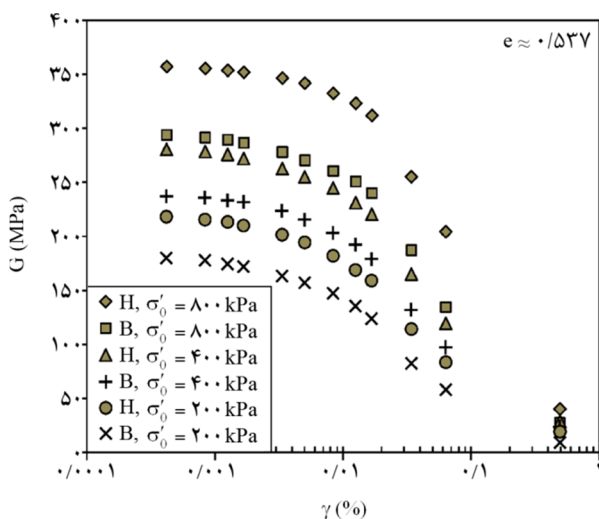


شکل (۴): اثر فشار محدود کننده بر نسبت میرایی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر

این روند تغییرات با مطالعات پیشین بر روی ماسه‌های سیلیکاتی [۲۴-۲۵] تطبیق دارد. کاهش نسبت میرایی در اثر افزایش فشار محدود کننده، به علت کاهش اتلاف انرژی در طی انتشار موج ناشی از افزایش تماس‌های بین ذره‌ای و به دنبال آن ایجاد مسیرهای انتقال موج بیشتر صورت می‌گیرد.

اثر فشار محدود کننده در کاهش نسبت میرایی با افزایش دامنه کرنش برشی افزایش یافته است (شکل ۴). همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نسبت میرایی ماسه‌ی کربناتی هرمز کمتر از نسبت میرایی ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر است. از این رو ارزیابی نسبت میرایی ماسه‌های کربناتی بر اساس نتایج، روابط و مدل‌های مبتنی بر

هرمز و سیلیکاتی بابلسر در نسبت تخلخل اولیه حدود 0.537 و در فشارهای محدود کننده مؤثر 200 ، 400 و 800 کیلو پاسکال در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدول برشی ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی مورد آزمایش با افزایش دامنه‌ی کرنش برشی کاهش می‌یابد. این کاهش که اساساً به واسطه‌ی رفتار غیرخطی خاک صورت می‌گیرد، در همه‌ی آزمایش‌های انجام شده بر روی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر مشاهده شده است.



شکل (۳): اثر فشار محدود کننده بر مدول برشی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار محدود کننده (σ'_0)، مدول برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر افزایش یافته است. همچنین نتایج بیانگر آن است که منحنی‌های مدول برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز بالاتر از منحنی‌های $G-\gamma$ ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر قرار گرفته است (شکل ۳). علت این تفاوت رفتاری را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار ماسه‌های کربناتی در مقایسه با ماسه‌های سیلیکاتی مرتبط دانست. افزایش فشار محدود کننده مؤثر از 400 تا 800 کیلو پاسکال برای نمونه‌های ماسه‌ی هرمز و بابلسر به ترتیب افزایش $28/5$ و 23 درصدی مدول برشی در کرنش‌های کوچک را به دنبال داشته است. نرخ افزایش مدول برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز در اثر افزایش فشار محدود کننده، بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر است

روی ماسه‌های کرناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر با برخی از روابط و مدل‌های موجود مقایسه شده است (جدول ۲).

مقادیر نسبت مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلر در فشارهای محدودکننده مؤثر ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال و در نسبت تخلخل اولیه حدود ۰/۵۳۷ با منحنی‌های G/G_{max} و $D-\gamma$ حاصل از روابط پیشنهادی محققین، ارائه شده در جدول (۲) در شکل‌های (۵) تا (۸) مقایسه شده است.

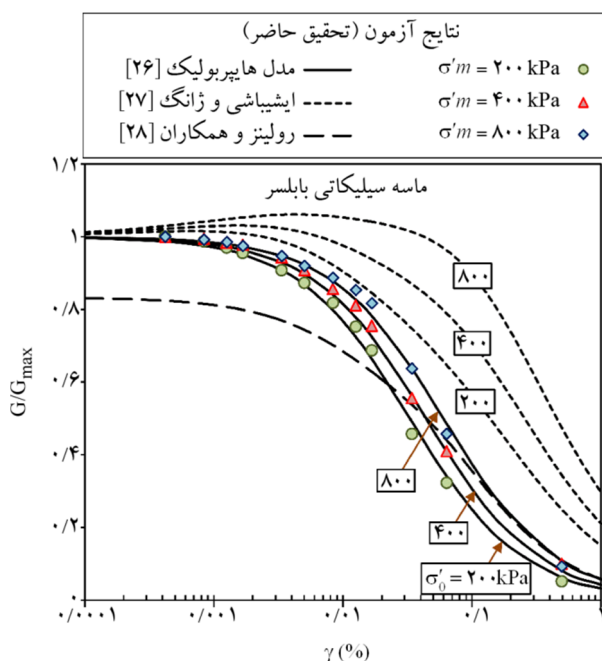
رفتار دینامیکی ماسه‌های سیلیکاتی جهت استفاده در مسائل دینامیکی از جمله تحلیل پاسخ زمین نتایج غیر محافظه کارانه‌ای را به همراه خواهد داشت.

۴- مقایسه با مطالعات پیشین

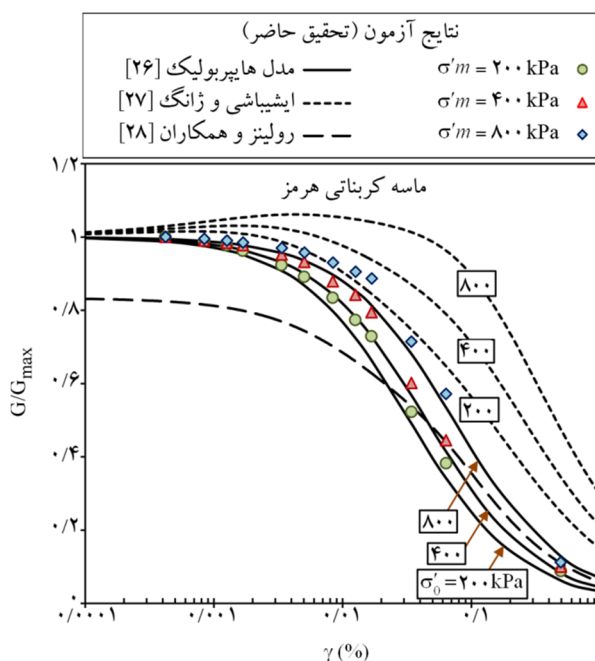
در این بخش، نتایج نسبت مدول برشی (G/G_{max}) و همچنین نسبت میرایی (D) حاصل از آزمایش‌های دینامیکی و سیکی بر

جدول (۲): روابط موجود جهت ارزیابی نسبت مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌ها

مرجع	نسبت مدول برشی	نسبت میرایی
Hardin and Drnevich [26], Ishihara [1]	$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}$	$D = \frac{4}{\pi} \left[1 + \frac{1}{\gamma/\gamma_r} \right] \left[1 - \frac{\ln(1 + \gamma/\gamma_r)}{\gamma/\gamma_r} \right] - \frac{2}{\pi}$
Ishibashi and Zhang [27]	$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma) \sigma_m^{m(\gamma) - m_0}$ $K(\gamma) = 0.5 \left[1 + \tan h \left\{ \ln \left(\frac{0.000102}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right]$ $m(\gamma) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tan h \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right]$	$D = 33.3 \left\{ 0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\}$
Rollins et al. [28]	$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{[1.2 + 16\gamma(1 + 10^{-20\gamma})]}$	$D = 0.8 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75}$



شکل (۶): مقایسه نسبت مدول برشی ماسه سیلیکاتی بابلر با روابط موجود



شکل (۵): مقایسه نسبت مدول برشی ماسه کرناتی هرمز با روابط موجود

مرجع است که به صورت کرنش برشی متناظر با $G/G_{max} = 0.5$ تعریف شده است.

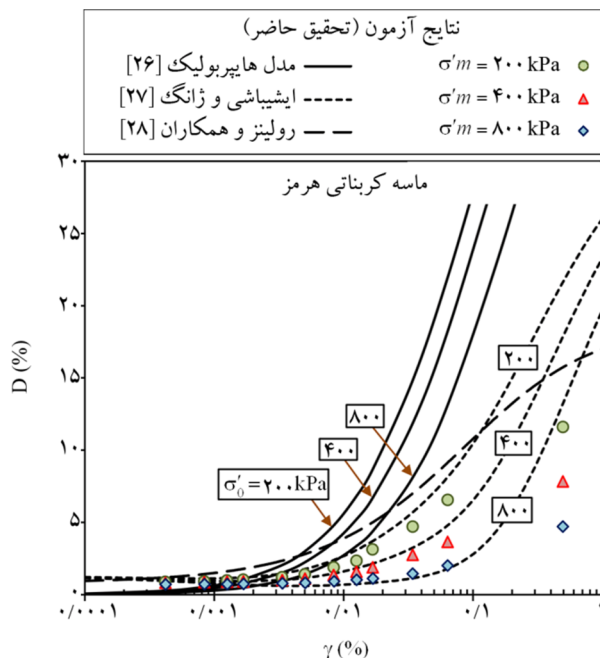
مقایسه‌ی ارائه‌شده در شکل (۶) بیانگر آن است که مدل هایپربولیک [۲۶] از دقت قابل قبولی در ارزیابی منحنی‌های $G/G_{max}-\gamma$ ماسه سیلیکاتی بابلسر برخوردار است. رابطه‌ی ایشیاشی و ژنگ [۲۷] و همچنین ماسه‌ی بابلسر در شکل (۶) را به مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر حاصل از آزمایش‌های سیکلی و دینامیکی ارزیابی می‌کند و با افزایش σ'_0 نیز دقت این رابطه کاهش می‌یابد.

مقایسه‌ی صورت گرفته در شکل‌های (۵) و (۶) حاکی از آن است که رابطه‌ی رولینز [۲۸] از دقت پایینی در ارزیابی منحنی‌های نسبت مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌های مورد آزمایش برخوردار است. علت این امر عدم لحاظ نکردن فشار محدودکننده در رابطه‌ی مذکور جهت ارزیابی رفتار دینامیکی خاک است. در صورتی که نتایج آزمایش‌های سیکلی و دینامیکی این مطالعه بیانگر اثر قابل توجه فشار محدودکننده در رفتار ماسه‌های کرنباتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر می‌باشند.

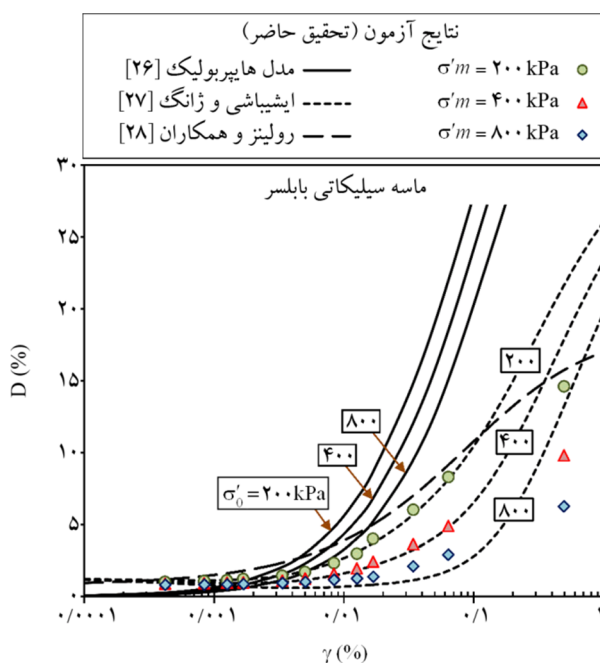
همان‌طور که در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است، مدل هایپربولیک [۱] مقادیر نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر را به‌طور چشمگیری بیشتر از نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی ارزیابی می‌کند. چنین نتایجی می‌تواند منجر به ارزیابی غیر محافظه‌کارانه‌ای در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین شوند.

اگرچه رابطه‌ی ایشیاشی و ژنگ [۲۷] در پیش‌بینی نسبت میرایی ماسه‌های هرمز در شکل (۷) و بابلسر در شکل (۸) این رابطه منحنی‌های نسبت میرایی $(D-\gamma)$ ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر را با دقت قابل قبولی ارزیابی می‌کند.

قابل ذکر است که رابطه‌ی ایشیاشی و ژنگ [۲۷] مقادیر نسبت میرایی ماسه‌ی کرنباتی هرمز در شکل (۷) را کمتر از مقادیر آزمایشگاهی ارائه می‌دهد و این اختلاف نتایج در فشارهای ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال بیشتر است.



شکل (۷): مقایسه نسبت میرایی ماسه کرنباتی هرمز با روابط موجود



شکل (۸): مقایسه نسبت میرایی ماسه سیلیکاتی بابلسر با روابط موجود

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مدل هایپربولیک [۲۶] منحنی‌های نسبت مدول برشی $(G/G_{max}-\gamma)$ ماسه‌ی کرنباتی هرمز را کمتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند و دقت مدل مذکور با افزایش فشار محدودکننده مؤثر (σ'_0) نیز کاهش می‌یابد. پارامتر γ_r در مدل هایپربولیک کرنش

تفاوت رفتاری را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و همچنین ساختار ماسه‌های کربناتی در مقایسه با ماسه‌های سیلیکاتی مرتبط دانست.

نتایج آزمایشگاهی این تحقیق بیانگر آن است که با افزایش فشار محدودکننده میانی مقادیر G/G_{max} ماسه‌های هرمز و بابلسر افزایش یافته است. نتایج برای نسبت مدول برشی و همچنین نسبت میرایی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر با روابط پیشنهادی محققین برای ارزیابی منحنی‌های رفتاری دینامیکی خاک‌های دانه‌ای مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل هایپربولیک از دقت کافی جهت تخمین منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر برخوردار است. این مدل منحنی‌های نسبت مدول برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز را کمتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند و دقت آن با افزایش فشار محدودکننده مؤثر نیز کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی نتایج G/G_{max} حاصل از آزمایش‌های سیکی و دینامیکی با مقادیر مبتنی بر رابطه‌ی ایشیاشی و ژنگک [۲۷] نشان می‌دهد که رابطه‌ی مذکور (که یکی از پرکاربردترین روابط موجود جهت ارزیابی رفتاری دینامیکی خاک‌ها به شمار می‌آید) مقادیر نسبت مدول برشی ماسه‌های مورد بررسی را به مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی ارزیابی می‌کند و با افزایش نیز دقت این رابطه کاهش می‌یابد.

مدل هایپربولیک مقادیر نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر را به‌طور چشمگیری بیشتر از نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکی ارزیابی می‌کند. چنین نتایجی می‌تواند منجر به ارزیابی غیر محافظه‌کارانه‌ای در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین شوند. رابطه‌ی ایشیاشی و ژنگک [۲۷] در پیش‌بینی نسبت میرایی ماسه‌های هرمز و بابلسر در دامنه‌های کرنش بزرگ از دقت کمی برخوردار است اما این رابطه منحنی‌های نسبت میرایی ($D-7$) ماسه سیلیکاتی بابلسر را با دقت قابل قبولی ارزیابی می‌کند. به‌طور کلی مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی این مطالعه بر روی ماسه‌های هرمز و بابلسر با روابط موجود بیانگر آن است که این

مقایسه‌ی نتایج پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکی با روابط موجود حاکی از تفاوت رفتاری ماسه‌های کربناتی با ماسه‌های سیلیکاتی و همچنین مدل‌ها و الگوهای مبتنی بر رفتار خاک‌های سیلیکاتی است. این تفاوت‌های رفتاری که ریشه در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار خاص خاک‌های کربناتی در مقایسه با خاک‌های غیر کربناتی دارد، لزوم انجام تحقیقات گسترده و به دنبال آن انعکاس اثر موارد ذکر شده را در الگوهای رفتاری خاک روشن می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

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 این رو در این مطالعه، پارامترهای دینامیکی (مدول برشی و نسبت میرایی) ماسه‌ی کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ به ترتیب با انجام آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکی مورد مطالعه قرار گرفت. ماسه‌ها با دانه‌بندی مشابه و در نسبت تخلخل یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. اثر فشار محدودکننده (به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر رفتار خاک‌های دانه‌ای) بر رفتار ماسه‌های هرمز و بابلسر مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدودکننده میانی، مدول برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر افزایش یافته است. مقایسه‌ی پارامترهای دینامیکی ماسه‌های مورد آزمایش نشان داده که مقادیر مدول برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز در شرایط یکسان بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر است. همچنین نتایج نشان داده که نسبت میرایی ماسه‌ی کربناتی هرمز کمتر از نسبت میرایی ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر است. علت این

7. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1986) Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *J. Geotech. Eng., ASCE*, **112**(11), 1016-1032.
8. Clayton, C.R.I. (2011) Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*, **61**(1), 5-37.
9. Senetakis, K., Anastasiadis, A., and Ptilakis, K. (2012) The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **35**(6), 964-980.
10. Holmes, A. (1978) *Principles of Physical Geology*. Nelson, London, pp. 730.
11. Kwag, J.M., Ochiai, H., and Yasufuku, N. (1999) Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength. *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering for Soil Sediments, Bahrain*, **1**, 79-86.
12. Ong, S.E., Joer, H.A., and Randolph, M.F. (1999) Frictional behavior in calcareous soils. *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering for Soil Sediments, Bahrain*, **1**, 219-228.
13. 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., Leroueil, S. (eds), pages 1049-1086.
14. Coop, M.R., Sorensen, K.K., Freitas, T.B., and Georgoutsos, G. (2004) Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Geotechnique*, **54**(3), 157-163.
15. Sharma, S.S. and Fahey, M. (2004) Deformation characteristics of two cemented calcareous soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 1139-1151.
16. Lenart, S. (2006) Deformation characteristics of lacustrine carbonate silt in the Julian Alps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 131-142.
17. Shahnazari, H. and Rezvani, R. (2013) Effective

روابط قادر به ارزیابی دقیق رفتار دینامیکی ماسه‌های کرنباتی نیستند. از این رو کاربرد این روابط در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای در نواحی دارای نهشته‌های کرنباتی نتایج غیر ایمن را به دنبال خواهد داشت. این امر لزوم اصلاح روابط مذکور برای تعمیم به منحنی‌های رفتار دینامیکی خاک‌های کرنباتی را روشن می‌سازد.

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. Ishihara, K. (1996) *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science Publications, pp. 350.
2. Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H. (2015) Comparing the shear stiffness of calcareous and silicate sands under dynamic and cyclic straining. *7th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering (SEE7)*, Tehran, Iran.
3. Zhang, J., Andrus, R.D., and Juang, C.H. (2005) Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **131**(4), 453-464.
4. Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H. (2014) Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, **11**(1), 89-100.
5. Javdanian, H., Jafarian, Y., and Haddad, A. (2015) Predicting damping ratio of fine grained soils using soft computing methodology. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**(6), 3959-3969.
6. Seed H.B. and Idriss I.M. (1970) *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis*. Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.

26. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972) Shear modulus and damping in soils; measurement and parameter effects. *J. Soil Mech. Found Div., ASCE*, **98**(6), 603-624.
27. Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, **33**(1), 182-191.
28. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., and Daily, W.D. (1998) Shear modulus and damping relationships for gravels. *J. Geotech. Geoenviron. Engineering, ASCE*, **124**(5), 398-405.
- parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study. *Engineering Geology*, **159**, 98-105.
18. 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. *KSCE J. Civil Eng.*, **18**(4), 975-983.
19. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H., and Shahnazari, H. (2008) Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects. *Int J Civil Engineering*, **6**(2), 108-119.
20. Jafarian, Y. and Rakhshandeh, M. (2014) Laboratory study on cyclic behaviour and pore water pressure generation of Boushehr calcareous sand. *Modares Civil Engineering Journal*, **15**(3), 37-50.
21. Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H. (2016) Estimating the shearing modulus of Bushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments. *Modares Civil Engineering Journal*, **15**(4), 9-19.
22. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 670p.
23. Cho, G.C., Dodds, J., and Santamarina, J.C. (2006) Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(5), 591-602.
24. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2013a) Effect of uniformity coefficient on G/G_{max} and damping ratio of uniform to well-graded quartz sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **139**(1), 59-72.
25. Senetakis, K., Anastasiadis, A., and Ptilakis, K. (2013a) Normalized shear modulus reduction and damping ratio curves of quartz sand and rhyolitic crushed rock. *Soils and Foundations*, **53**(6), 879-893.

Comparing Dynamic Behavior of Hormuz Calcareous and Babolsar Siliceous Sands under Identical Conditions

Yaser Jafarian^{1*}, Hamed Javdanian², Abdolhosein Haddad³

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, Iran

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Iran

Knowledge of the dynamic behavior curves of soils is important for designing various geotechnical structures subjected to different kinds of vibrations, including earthquakes. Reviewing the previous studies on soil dynamic behavior shows that most of the studies have focused on the siliceous soils. Geological studies suggest that vast areas of the earth in the tropical regions are covered by calcareous deposits. Large areas of the southern Iran, which are seismic-prone based on the recent earthquake activities, are also covered by calcareous soils. 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. Origination of calcareous soils from processes and minerals different than those known for the silicate soils clarifies the necessity for comprehensive research on geotechnical properties of such soils. The wide variation of the origin of calcareous soils, due to their offshore locations and the related fauna that make their formation, merit more research into the behavior of these soils from various regions.

In the current research, shear modulus and damping ratio of Hormuz calcareous sand and Babolsar siliceous sand were measured and compared. An identical grains size distribution curve was synthetically attained for the tested sands. The soils are classified as poorly graded sand (SP) according to the USCS (ASTM D2487). The shear modulus and damping ratio values were calculated at small and large shear strains using resonant column and cyclic triaxial tests. The calcareous and siliceous soil 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 and siliceous sands were measured for the shear strain amplitude ranging from about 10^{-4} % to 10^{-2} %. The cyclic triaxial tests were conducted using a fully automated GDS triaxial testing apparatus. The cyclic tests were done on the samples with shear strain amplitudes ranging from about 10^{-2} % to 1 %. The procedure used to perform the resonant column and cyclic triaxial tests was the multi-stage strain-controlled loading under undrained condition.

The results for both calcareous and siliceous sands indicate that the shear modulus (G) decreases and damping ratio (D) increases with an increase in shear strain amplitude (γ), as expected. Moreover, the shear modulus of tested soils increases with the increase of effective confining pressure (σ'_0). Further, the tests results indicate that the increased amount of effective confining pressure leads to the smaller damping ratio for the Hormuz and Babolsar sands. The shear modulus of Hormuz calcareous sand is higher than that of the Babolsar siliceous sand while grains size distribution, effective confining pressure, and void ratio of both soils were identical. It is evident from the resonant column and cyclic triaxial tests that the Hormuz calcareous sand has lower values of damping ratio (D) in comparison to the Babolsar siliceous sand. Finally, dynamic behavior curves of the studied sands are compared with the available relationships. These comparisons indicate that the available relationships are unable to accurately assess behavior of the tested calcareous sand.

Keywords: Calcareous Sand; Siliceous Sand; Shear Modulus; Damping Ratio; Experimental Studies