

## مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی: مطالعه‌ی آزمایشگاهی

حامد جاودانیان (نویسنده مسئول)، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد،

javdanian@eng.sku.ac.ir

یاسر جعفریان، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

عبدالحسین حداد، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

**چکیده:** مدول برشی ماکزیمم یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئوتکنیکی در تحلیل‌های دینامیکی به شمار می‌آید. محققین با انجام مطالعات آزمایشگاهی و لحاظ اثر فاکتورهای مختلف سعی در ارزیابی دقیق‌تر این پارامتر داشته‌اند. اکثر این مطالعات بر روی ماسه‌های سیلیکاتی صورت گرفته است. از طرفی نتایج برخی مطالعات گذشته حاکی از آن است که نوع کانی و شکل ذرات از عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاک‌ها می‌باشند. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، بخش وسیعی از مناطق جنوبی کشورمان که خطر لرزه‌خیزی بالایی دارند، پوشیده از خاک‌ها و رسوبات کربناتی است که به لحاظ نوع کانی و شکل ذرات تفاوت بسیاری با خاک‌های سیلیکاتی دارند. از این‌رو ارزیابی مدول برشی دینامیکی خاک‌های کربناتی این نواحی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، تحقیقات صورت گرفته بر روی مدول برشی ماکزیمم، عوامل مؤثر بر تغییرات این پارامتر، و روش‌ها و روابط موجود جهت ارزیابی آن بررسی شده است. در ادامه نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده بر روی ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی ارائه و نتایج با مطالعات گذشته مقایسه شده است.

**واژگان کلیدی:** مدول برشی ماکزیمم، ماسه کربناتی، ماسه سیلیکاتی، مطالعه آزمایشگاهی

### ۱- مقدمه

می‌شود. در این آزمایش‌ها نیز مدول برشی به کمک سرعت موج برشی و با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

در این رابطه،  $V_s$  و  $\rho$  به ترتیب سرعت موج برشی و جرم حجمی نمونه‌ی خاک می‌باشند.

مدول برشی خاک در دامنه‌های کرنش برشی کوچک (حدود  $10^{-4}$  درصد) را مدول برشی ماکزیمم ( $G_{\max}$ ) می‌نامند. این کمیت از پارامترهای اساسی در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌آید. مدول برشی ماکزیمم هم به روش صحرائی و هم با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشد.

مدول برشی ماکزیمم در روش صحرائی به‌طور مستقیم و با اندازه‌گیری سرعت موج برشی و به‌طور غیرمستقیم با استفاده از نتایج آزمون‌های نفوذ استاندارد (SPT) و نفوذ مخروط (CPT) قابل محاسبه می‌باشد. در روش آزمایشگاهی بیشتر از آزمون‌های ستون تشدید به این منظور استفاده

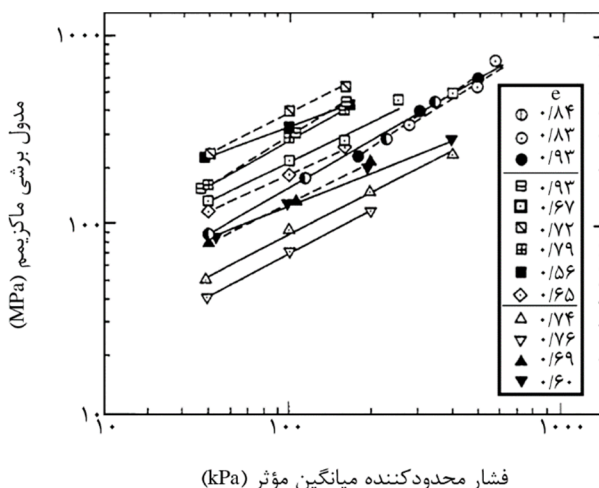
### ۲- ارزیابی مدول برشی ماکزیمم

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر ( $\sigma'_m$ ) و نسبت تخلخل ( $e$ ) از عوامل بسیار مؤثر بر مدول برشی ماکزیمم به شمار می‌آیند [۱-۲]. اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر بر مدول برشی

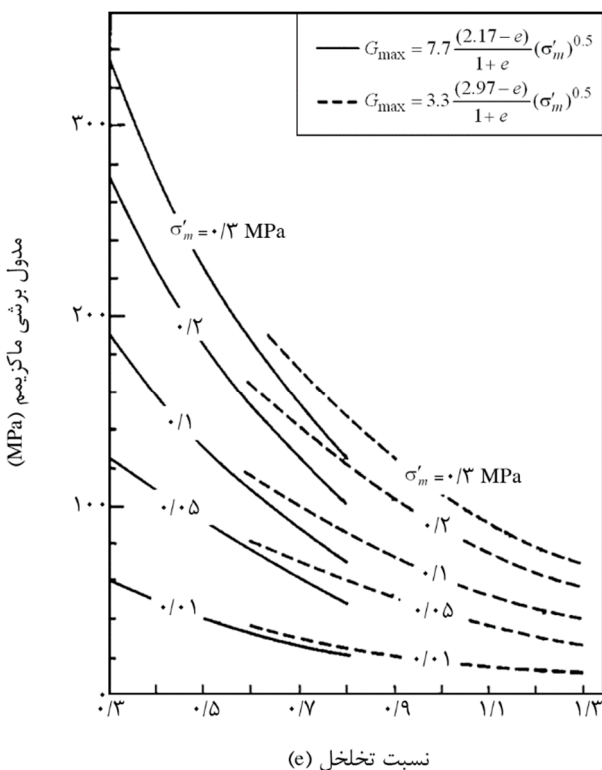
جدول (۱): برخی از روابط موجود برای ارزیابی مدول برشی ماکزیمم خاک‌های ماسه‌ای

مرجع	A	F(e)	n
[۱]	۳/۳	$\frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۵
[۵]	۳/۲	$\frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۵
[۶]	۰/۰۳۲	$\frac{(32.17 - 14.8e)^2}{(1 + e)}$	۰/۵
[۷]	۱۴/۱	$\frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۴
[۸]	۹	$\frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۳۸
[۹]	۸/۴	$\frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۵
[۱۰]	۷	$\frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$	۰/۵

ماکزیمم حاصل از مطالعات آزمایشگاهی کوکوشو و تاناکا [۳] بر روی خاک‌های دانه‌ای از نواحی مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است [۴]. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، فشار محدودکننده اثر قابل‌توجهی بر تغییرات مدول برشی ماکزیمم داشته است.



شکل (۱): اثر فشار محدودکننده بر مدول برشی ماکزیمم [۴].



شکل (۲): تغییرات مدول برشی ماکزیمم در مقابل نسبت تخلخل [۴].

## ۲-۱- اثر دانه‌بندی خاک

محققین با بررسی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی مختلف به بررسی اثر دانه‌بندی بر مدول برشی ماکزیمم پرداختند [۱۲]. از این‌رو

فرم کلی رابطه‌ی (۲) که بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های ماسه‌ای حاصل گردید، توسط بسیاری از محققین مورد تأیید واقع شده است:

$$G_{\max} = AF(e)(\sigma'_m)^n \quad (2)$$

در این رابطه، A و n ضرایبی است که به نوع خاک بستگی دارند و F(e) تابعی از نسبت تخلخل می‌باشد. همچنین  $G_{\max}$  و  $\sigma'_m$  دارای واحد یکسان می‌باشند.

خلاصه‌ای از روابط ارائه شده بر اساس رابطه‌ی (۲)، در جدول (۱) ارائه شده است. برای مثال تغییرات مدول برشی ماکزیمم در مقابل نسبت تخلخل مبتنی بر برخی روابط پیشنهادی [۱] در شکل (۲) نشان داده شده است.

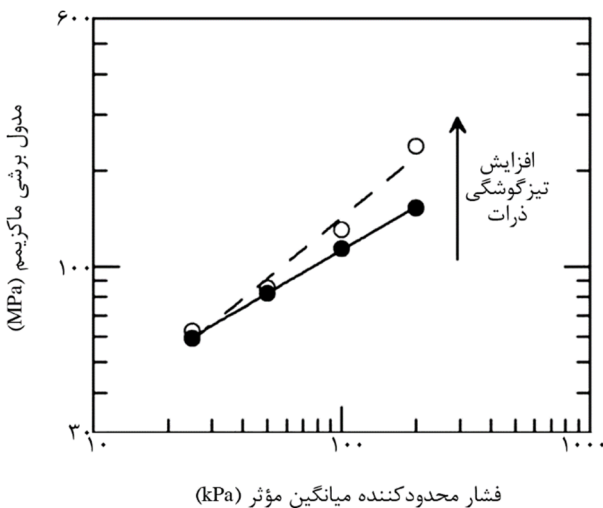
در ادامه‌ی مطالعات انجام شده، سید و ادریس [۱۱] رابطه‌ی زیر را برای مدول برشی ماکزیمم ارائه نمودند:

$$G_{\max} = 218.8K_{2,\max}(\sigma'_m)^n \quad (3)$$

در این رابطه،  $G_{\max}$  و  $\sigma'_m$  دارای واحد kPa بوده و  $K_{2,\max}$  ضریبی است که با توجه به نسبت تخلخل خاک تعیین می‌شود.

که انعکاس اثر آن در محاسبات، به درک بهتر رفتار این مصالح کمک خواهد کرد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی اثر شکل ذرات بر فشار خاک جانبی [۲۲]، مطالعات آزمایشگاهی بر روی مخلوط شن‌های گردگوشه و تیزگوشه با خاک رس تحت بارهای استاتیکی و سیکی [۲۳]، و همچنین مطالعات عددی به روش المان‌های گسسته [۲۴] نیز مؤید این موضوع بوده است.

سنتاکیس و همکاران [۱۸، ۲۵] با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید به بررسی اثر نوع کانی و دانه‌بندی خاک بر مدول برشی ماکزیمم پرداختند. ایشان در مطالعات آزمایشگاهی خود از ماسه‌های کوارتزی و ماسه‌های آتش‌فشانی استفاده کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان از تفاوت پارامترهای دینامیکی این دو نوع خاک داشته که آن را به تفاوت در نوع کانی، شکل و ساختار ذرات این خاک‌ها نسبت داده‌اند. تغییرات مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های مذکور در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل، ماسه‌ی آتش‌فشانی که دارای ذرات تیز گوشه بوده، مدول برشی بزرگ‌تری داشته است.



شکل (۳): اثر شکل ذرات ماسه بر مدول برشی ماکزیمم [۱۸].

مرور مطالعات انجام شده بر روی اثر شکل ذرات و نوع کانی خاک‌ها بر رفتار آنها (که از نظر گذشت) و از طرف دیگر متفاوت بودن شکل و ساختار ذرات خاک‌هایی مانند

منک [۱۳] اثر ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و اندازه‌ی متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) خاک ماسه‌ای را در محاسبه‌ی مدول برشی ماکزیمم لحاظ نمود:

$$G_{\max} = (67.1 \times C_u^{-0.02}) \times e^{-1 - \left(\frac{D_{50}}{20}\right)^{0.75}} \times \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{0.48 \times C_u^{0.09}} \quad (4)$$

در این رابطه،  $e$  نسبت تخلخل نمونه و  $P_a$  فشار اتمسفر (برابر  $100 \text{ kPa}$ ) می‌باشند.

ویچمن و همکاران [۱۴-۱۶] با انجام آزمایش‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌های کوارتزی با دانه‌بندی‌های مختلف به بررسی اثر دانه‌بندی خاک بر مدول برشی ماکزیمم پرداختند. ایشان با ارائه‌ی رابطه‌ی (۵) دقت تخمین مدول برشی ماکزیمم را افزایش دادند [۱۷]:

$$G_{\max} = (1563 + 3.13 C_u^{2.98}) \times \frac{(1.94 \exp(-0.066 C_u) - e)^2}{1 + e} \times \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{0.4 \times C_u^{0.08}} \quad (5)$$

سنتاکیس و همکاران [۱۸] با انجام آزمایش‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌ی کوارتزی، رابطه‌ی (۶) را برای مدول برشی ماکزیمم ارائه دادند. ایشان با لحاظ اثر ضریب یکنواختی خاک ( $C_u$ ) در رابطه‌ی پیشنهادی، سعی در انعکاس اثر دانه‌بندی خاک در ارزیابی  $G_{\max}$  داشته‌اند.

$$G_{\max} = (-5.88 C_u + 57.01) \times \frac{1}{e^{0.28 C_u + 0.98}} \times \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{0.47} \quad (6)$$

در این رابطه،  $\sigma'_m$  دارای واحد  $\text{kPa}$  و  $G_{\max}$  دارای واحد  $\text{MPa}$  می‌باشند.

## ۲-۲- اثر شکل ذرات

مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی اثر شکل ذرات بر رفتار خاک، حاکی از آن است که شکل ذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خاک دارد [۱۹-۲۰]. مطالعات چو و همکاران [۲۱] نشان داده که شکل ذرات خاک (به‌ویژه خاک‌های دانه‌ای) یکی از ویژگی‌های شاخص خاک می‌باشد

محققین با انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اثر شکل ذرات و همچنین قابلیت خردشوندگی ذرات بر رفتار ماسه‌ی کربناتی بوشهر (از بندرهای بزرگ تجاری در جنوب کشورمان و در ساحل خلیج فارس) پرداختند [۳۳-۳۴]. جعفریان و همکاران [۳۵-۳۷] نیز با انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و ستون تشدید، مقاومت روانگرایی و پارامترهای دینامیکی ماسه‌های کربناتی نواحی جنوبی ایران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان بیانگر تفاوت رفتاری ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی بوده است.

مرور مختصر مطالعات انجام شده بر روی خاک‌های کربناتی نشان از اهمیت بررسی رفتار سیکلی 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 این‌رو بررسی کامل رفتار این خاک‌ها در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

#### ۴- برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این مطالعه، پس از مرور تحقیقات گذشته بر روی مدول برشی کرنش-کوچک ماسه‌ها و همچنین رفتار ماسه‌های کربناتی، مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. این ماسه‌ها در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. نتیجه‌ی آزمایش‌های پراش اشعه ایکس ( $XRD$ ) بر روی این ماسه‌ها نشان داده که عنصر غالب در ماسه‌های هرمز و بابلسر به ترتیب کلسیت ( $CaCO_3$ ) و سیلیس ( $SiO_2$ ) می‌باشد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات ماسه‌های هرمز و بابلسر در شکل (۴) نشان داده شده است. ماسه‌های مذکور با دانه‌بندی یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند.

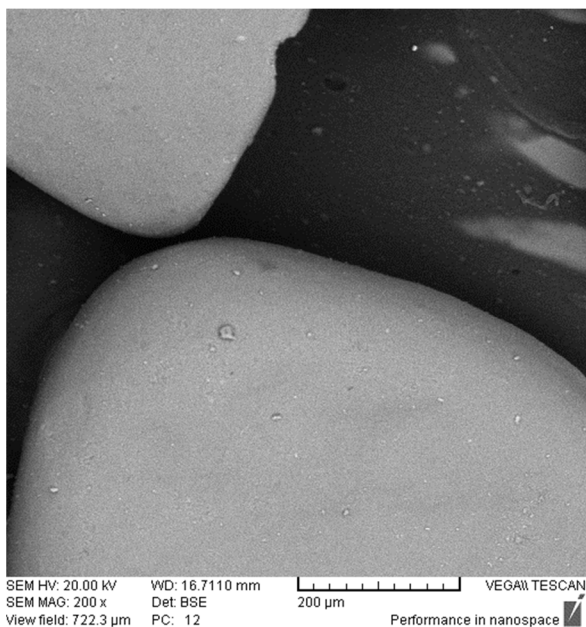
خاک‌های کربناتی، احتمال تفاوت رفتاری خاک‌های کربناتی نسبت به خاک‌های دیگر را بیشتر نمایان می‌سازد که این خود لزوم انجام مطالعات بیشتر بر روی این نوع خاک‌ها را روشن می‌سازد.

#### ۳- ماسه‌های کربناتی

مرور تحقیقات گذشته حاکی از آن است که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاتی صورت گرفته است. نوع کانی تشکیل دهنده‌ی خاک نیز می‌تواند رفتار دینامیکی خاک‌ها را تحت تأثیر قرار دهد [۲۶]. سنتاکیس و همکاران [۲۷] با انجام آزمون‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌های آتش‌فشانی و همچنین ماسه‌های کوارتزی نشان دادند که مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌های آتش‌فشانی متفاوت از ماسه‌های کوارتزی می‌باشد. این تفاوت رفتاری به بحث کانی‌شناسی این خاک‌ها نسبت داده شده است. از این‌رو خاک‌های کربناتی نیز می‌توانند از این قاعده مستثنی نباشند.

طبق مطالعات زمین‌شناسی انجام شده، حدود ۴۰ درصد سطح کف و مجاور اقیانوس‌ها و دریاها در نواحی گرمسیری را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل می‌دهند [۲۸]. بسیاری از این نواحی که شامل ساخت‌وسازهای گسترده‌ای نیز می‌باشند، دارای خطر لرزه‌خیزی بالایی هستند.

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 فرو ریزش 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].

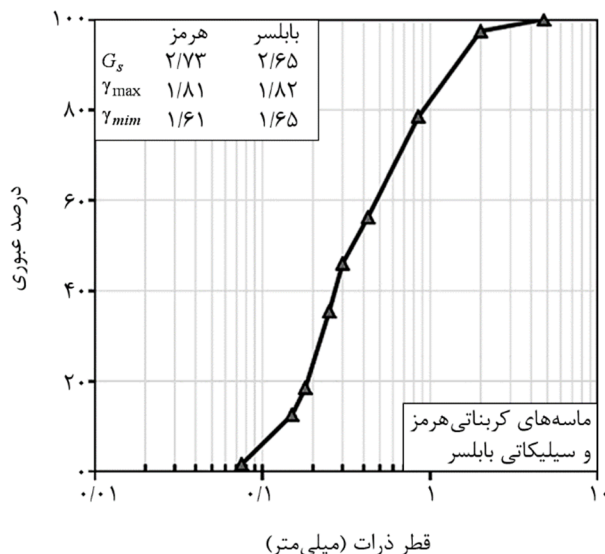


شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر.

آزمایش‌های این تحقیق در فشارهای میانگین ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال و در نسبت تخلخل (پس از تحکیم) یکسان  $e \approx 0.537$  انجام شدند تا اثر فشار محدود کننده بر  $G_{max}$  ماسه‌های مورد آزمایش در شرایط یکسان بررسی شود. مدول برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر با انجام آزمایش‌های ستون تشدید در دامنه‌ی کرنش برشی حدود  $10^{-4}$  درصد اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق 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 به‌وسیله‌ی یک سیستم الکترومغناطیسی تحت تحریکات پیچشی قرار گرفته و فرکانس و دامنه‌ی تحریکات اعمالی قابل کنترل بوده است. سرعت موج برشی به کمک فرکانس تشدید و کرنش برشی به کمک شتاب ماکزیمم حاصل شد [۳۸]. آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM-D۴۰۱۵ انجام شدند.

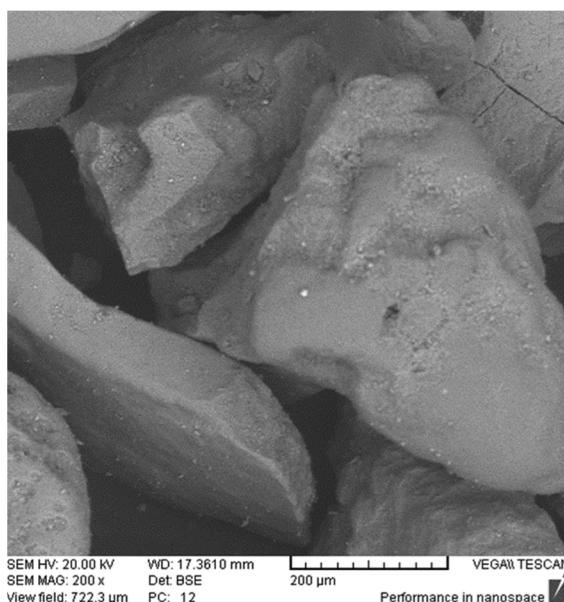
##### ۵- مقایسه‌ی $G_{max}$ ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی

مقادیر مدول برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌های



شکل (۴): نمودار دانه‌بندی و مشخصات ماسه‌های مورد آزمایش.

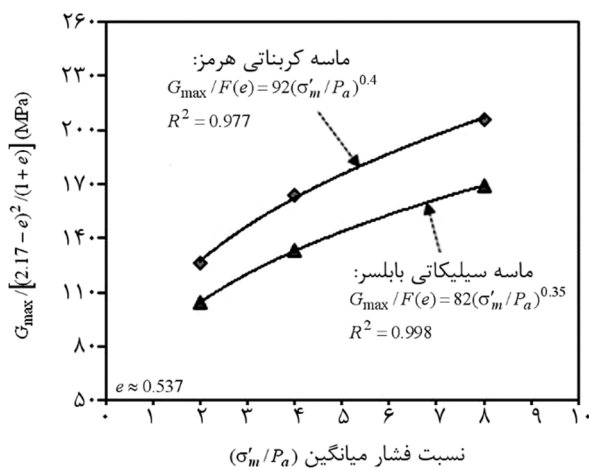
خاک‌های کربناتی به لحاظ شکل و همچنین ساختار ذرات با خاک‌های سیلیکاتی متفاوت می‌باشند. به‌منظور بررسی شکل و ساختار ظاهری ذرات ماسه کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از ذرات خاک‌های مذکور تصویربرداری شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ماسه‌های هرمز و بابلسر به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، ماسه‌ی هرمز دارای ذرات تیز گوشه و ماسه‌ی بابلسر دارای ذرات گرد گوشه می‌باشند.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه‌ی کربناتی هرمز.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز در شرایط یکسان بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاتی بابلر می‌باشد. این موضوع با مطالعات آزمایشگاهی سنتاکیس و همکاران [۱۸] و همچنین شین و سانتامارینا [۳۹] سازگاری دارد. این محققین نشان دادند که  $G_{max}$  خاک‌های دانه‌ای تیز گوشه بزرگ‌تر از خاک‌های دانه‌ای گرد گوشه است و این اختلاف با افزایش تیز گوشگی ذرات خاک افزایش پیدا می‌کند.

در این مطالعه با لحاظ رابطه‌ی نسبت تخلخل گذشته مورد قبول واقع شده) و بر اساس نتایج آزمایش‌های ستون تشدید و ترسیم تغییرات  $G_{max}/F(e)$  در مقابل نسبت فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر، مقادیر ضرایب  $A$  و  $n$  برای ماسه‌ی کربناتی هرمز و همچنین ماسه‌ی سیلیکاتی بابلر محاسبه شد (شکل ۸).

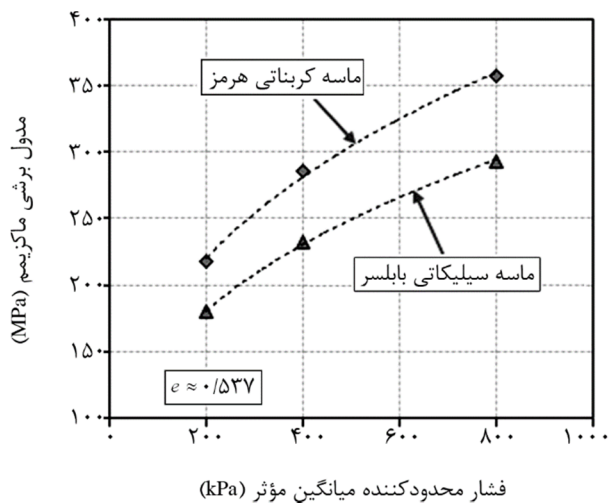


شکل (۸): تغییرات  $G_{max}/F(e)$  ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر در مقابل نسبت فشار میانگین.

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده، ضرایب  $A$  و  $n$  برای ماسه‌ی کربناتی هرمز به ترتیب برابر ۹۲ و ۰/۴ و برای ماسه‌ی سیلیکاتی بابلر به ترتیب برابر ۸۲ و ۰/۳۵ حاصل شدند. از این‌رو، جهت ارزیابی مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر به ترتیب روابط (۷) و (۸) پیشنهاد می‌شود:

ستون تشدید بر روی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین مؤثر ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال و در نسبت تخلخل اولیه ۰/۵۳۷ در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های هرمز و بابلر به شکل قابل توجهی تحت تأثیر افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر می‌باشند.

افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین از  $\sigma'_m = 200 \text{ kPa}$  تا  $\sigma'_m = 800 \text{ kPa}$  در ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر به ترتیب موجب افزایش ۶۵/۱ و ۵۹/۲ درصد مدول برشی ماکزیمم شده است (شکل ۷). همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین، نرخ تغییرات مدول برشی ماکزیمم کاهش یافته است.

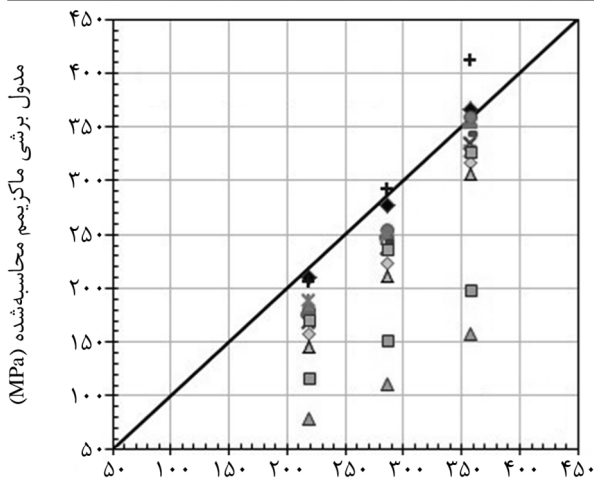


شکل (۷): اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین بر مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلر.

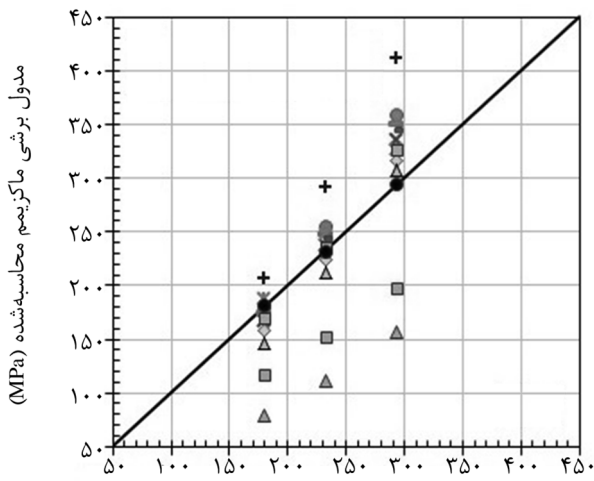
در آزمایش‌های ستون تشدید انجام شده بر روی ماسه‌ی کربناتی هرمز، افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر از ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال و از ۴۰۰ تا ۸۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب افزایش ۳۱/۳ و ۲۴/۷ درصد مدول برشی ماکزیمم را به دنبال داشته است. قابل ذکر است که مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز در فشارهای محدودکننده‌ی مختلف به میزان ۱۸ الی ۲۳/۴ درصد بیشتر از مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی سیلیکاتی بابلر می‌باشد.

از روابط موجود (ارائه شده در جدول (۱) و روابط (۴)، (۵) و (۶)) و همچنین روابط پیشنهادی این تحقیق (روابط ۷ و ۸) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. قابل ذکر است که روابط موجود بر اساس مطالعات تجربی بر روی ماسه‌های سیلیکاتی پیشنهاد شدند.

● در این تحقیق (رابطه ۸)	◆ در این تحقیق (رابطه ۷)
◇ ویچمن و تراپتافلیس [۱۷]	■ سنکاکیس و همکاران [۱۸]
- یو و ریچارد [۱۰]	▲ منک [۱۳]
■ ایواسکی و همکاران [۸]	+ کوکوشو [۹]
× درنویچ و ریچارد [۶]	× ایواسکی و تاتسوکا [۷]
▲ هاردین و بلک [۵]	- سید و ادیس [۱۱]
	● هاردین و ریچارد [۱]



مدول برشی ماکزیمم اندازه‌گیری شده (MPa)  
مدول برشی ماکزیمم محاسبه شده (MPa)  
(الف) ماسه کربناتی هرمز



مدول برشی ماکزیمم اندازه‌گیری شده (MPa)  
مدول برشی ماکزیمم محاسبه شده (MPa)  
(ب) ماسه سیلیکاتی بابلسر

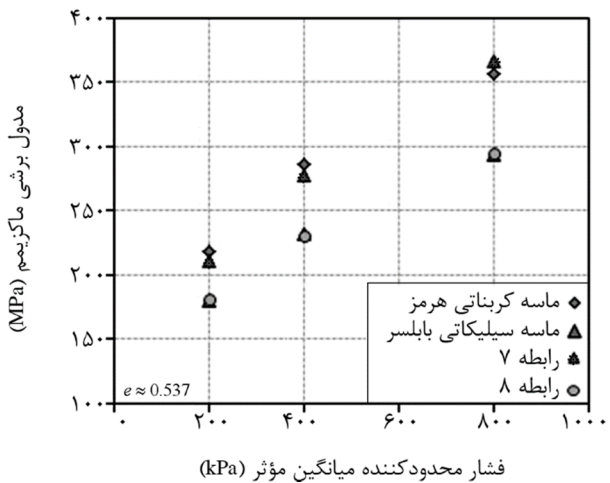
شکل (۱۰): مقایسه مدول برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید با نتایج حاصل از روابط موجود.

$$G_{\max} = 92 \times \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \times \left( \frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0.4} \quad (7)$$

$$G_{\max} = 82 \times \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \times \left( \frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0.35} \quad (8)$$

در این روابط،  $\sigma'_m$  دارای واحد  $kPa$ ،  $G_{\max}$  دارای واحد  $MPa$ ، و  $P_a$  فشار اتمسفر ( $100 kPa$ ) می‌باشند.

مقادیر مدول برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید بر روی دو نوع خاک مورد آزمایش با مقادیر حاصل از روابط پیشنهادی این تحقیق (روابط ۷ و ۸) برای ماسه‌های کربناتی و سیلیکاتی در شکل (۹) مقایسه شده است. مقادیر پارامترهای خطا شامل ضریب همبستگی ( $R^2$ )، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، و ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE) برای ارزیابی دقت روابط پیشنهادی محاسبه شده است. مقادیر  $R^2$ ، MAE و RMSE برای رابطه‌ی پیشنهادی بر اساس نتایج ماسه‌ی کربناتی هرمز (رابطه ۷) به ترتیب برابر  $0.977$ ،  $8/485$  و  $8/533$ ، و برای رابطه‌ی پیشنهادی بر اساس نتایج ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر (رابطه ۸) به ترتیب برابر  $0.998$ ،  $1/132$  و  $1/159$  می‌باشد.



شکل (۹): مقایسه‌ی مدول برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید با نتایج حاصل از روابط (۷) و (۸).

مقایسه‌ی مقادیر مدول برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر در نسبت تخلخل  $0.537$  با مقادیر حاصل

که فشار محدود کننده‌ی میانگین و نسبت تخلخل از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات مدول برشی ماکزیمم خاک‌های دانه‌ای می‌باشند. محققین با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک‌های مختلف، روابطی جهت ارزیابی مدول برشی ماکزیمم آنها ارائه دادند. اثر دانه‌بندی را در محاسبه‌ی  $G_{max}$  خاک‌های ماسه‌ها لحاظ نمودند تا ارزیابی این کمیّت با دقت بالاتری صورت گیرد. همچنین نتایج تحقیقات نشانگر اثر شکل ذرات بر مدول برشی ماکزیمم خاک‌های دانه‌ای بوده است. مرور تحقیقات گذشته حاکی از آن است که اکثر مطالعات بر روی خاک‌های سیلیکاتی صورت گرفته است. مختصر مطالعات انجام شده بر روی اثر نوع کانی بر رفتار خاک بیانگر تفاوت رفتاری خاک‌های با کانی‌ها و ساختار مختلف بوده است. خاک‌های کربناتی به لحاظ نوع کانی، شکل و ساختار ذرات متفاوت از خاک‌های سیلیکاتی می‌باشند. از طرفی بخش‌های زیادی از نواحی جنوبی کشورمان، که لرزه‌خیزی آن با بروز زلزله‌های بسیار در سال‌های اخیر اثبات شده، نیز پوشیده از خاک‌های کربناتی است. مختصر مطالعات انجام شده بر روی خاک‌های کربناتی نیز نشان از تفاوت رفتاری این خاک‌ها با خاک‌های سیلیکاتی داشته است. از این‌رو بررسی رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی و مقایسه با ماسه‌های سیلیکاتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این تحقیق پس از مرور و بحث در مورد مطالعات گذشته به بررسی مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر پرداخته شد. این ماسه‌ها با دانه‌بندی یکسان و در نسبت تخلخل برابر مورد آزمایش قرار گرفتند. مدول برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر در دامنه‌ی کرنش برشی حدود  $10^{-4}$  درصد و با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید محاسبه گردید. آزمایش‌ها در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین مختلف صورت گرفت تا اثر این پارامتر بر مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های مورد آزمایش بررسی شود.

قابل ذکر است که مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز در فشارهای محدودکننده‌ی مختلف به میزان ۱۸ الی

همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود، روابط موجود قادر به ارزیابی دقیق مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز به‌خصوص در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین پایین نمی‌باشند. نتایج بیانگر آن است که بسیاری از روابط موجود مقادیر  $G_{max}$  ماسه کربناتی هرمز را به مقدار قابل توجهی کمتر از مقادیر آزمایشگاهی ارائه می‌دهند.

روابط پیشنهادی هاردین و بلک [۵] و همچنین ایواساکی و همکاران [۸] مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های مورد آزمایش را با اختلاف بسیار و کمتر از مقادیر حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید ارزیابی می‌کنند (شکل ۱۰). همچنین رابطه‌ی پیشنهادی کوکوشو [۹] نیز در فشارهای میانگین بالا از دقت پایینی برخوردار است. اگرچه اثر دانه‌بندی خاک در برخی از روابط موجود برای مدول برشی ماکزیمم خاک‌های ماسه‌ای [۱۳، ۱۷، ۱۸] لحاظ شده اما مقایسه‌ی انجام شده در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که روابط مذکور نیز قادر به پیش‌بینی رفتار ماسه‌ی کربناتی نمی‌باشند.

اختلاف نتایج حاصل از روابط پیشین با نتایج مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش بر روی ماسه کربناتی هرمز را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار خاک‌های کربناتی و سیلیکاتی مرتبط دانست.

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی این مطالعه از دقت بالایی در پیش‌بینی مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر برخوردار است.

## ۶- نتیجه‌گیری

مدول برشی ماکزیمم خاک‌ها از فاکتورهای مهم و اساسی در حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله تحلیل پاسخ زمین به شمار می‌آید. ارزیابی دقیق‌تر این پارامتر کاهش عدم قطعیت نتایج تحلیل‌های دینامیکی را به دنبال خواهد داشت. نتایج مطالعات آزمایشگاهی بیانگر آن است



- freezing sampling. *Proceedings of Sessions on Ground Failures under Seismic Conditions*, ASCE, Special Publications, **44**, 120-140.
4. Ishihara, K. (1996) *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science Publications, 350p.
  5. Hardin, B.O. and Black, W.L. (1966) Sand stiffness under various triaxial stresses. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, **92**, 27-42.
  6. Drnevich, V.P. and Richart, F.E. (1970) Dynamic prestraining of dry sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, **96**, 451-469.
  7. Iwasaki, I. and Tatsuoka, F. (1977) Effects of grain size and grading on dynamic shear modulus of sands. *Soils and Foundations*, **38**, 19-35.
  8. Iwasaki, T., Tatsuoka F., and Takagi, Y. (1978) Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and Foundations*, **18**(1), 39-56.
  9. Kokusho, T. (1980) Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and Foundations*, **20**, 45-60.
  10. Yu, P.J. and Richart, J.F.E. (1984) Stress ratio effects on the shear modulus of dry sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **110**, 331-345.
  11. 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.
  12. Menq, F.Y. and Stokoe, K.H. (2003) Linear dynamic properties of sandy and gravelly soils from large-scale resonant tests. *Deformation characteristics of geomaterials*, Taylor and Francis, 63-71.
  13. Menq, F.Y. (2003) *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, Texas, USA.
  14. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2013a) Effect of uniformity coefficient on  $G/G_{max}$  and
- ۲۳/۴ درصد بیشتر از مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ی سیلیکاتی بابلسر می‌باشد. این اختلاف نتایج را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار خاک‌های کربناتی و سیلیکاتی مرتبط دانست. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، روابطی جهت برآورد مدول برشی ماکزیمم ماسه‌های هرمز و بابلسر ارائه شد.
- نتایج حاصل از مطالعه‌ی آزمایشگاهی این تحقیق با روابط موجود جهت ارزیابی مدول برشی ماکزیمم ماسه‌ها مقایسه شد. نتایج بیانگر آن است که روابط موجود در ارزیابی مدول برشی ماکزیمم ماسه کربناتی هرمز از دقت پایینی برخوردار هستند؛ بنابراین روابط موجود که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک‌های سیلیکاتی ارائه شدند قابل استفاده برای نهشته‌های کربناتی نمی‌باشند.
- تفاوت رفتاری ماسه‌های سیلیکاتی و کربناتی را می‌توان به نوع کانی و شکل ذرات خاک‌های مذکور نسبت داد. این موضوع لزوم اصلاح روابط موجود را جهت تعمیم به رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی روشن می‌سازد که این خود نیازمند انجام مطالعات بیشتر بر روی رفتار دینامیکی این خاک‌ها می‌باشد.

## سپاسگزاری

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.

## مراجع

1. Hardin, B.O. and Richart, F.E. (1963) Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **89**, 33-65.
2. Hardin, B.O. and Black, W.L. (1968) Vibration modulus of normally consolidated clay. *Journals of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **94**, 353-69.
3. Kokusho, T. and Tanaka, Y. (1994) Dynamic Properties of gravel layers investigated by in-situ

- M.K., Mohri, Y., Ghahramani, A., and Chang, C.S. (2008) Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, **32**, 501-518.
24. Das, N., Thomas, S., Kopmann, J., Donovan, C., Hurt, C., Daouadji, A., Ashmawy, A.K., and Sukumaran, B. (2011) Modeling granular particle shape using discrete element method. *GeoFrontiers: Advances in Geotechnical Engineering*, ASCE, VA, 4293-4302.
25. Senetakis, K., Anastasiadis, A., Ptilakis, 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.
26. Clayton, C.R.I. (2011) Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*, **61**, 5-37.
27. 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.
28. Holmes, A. (1978) *Principles of physical geology, Sunbury-on-Thames, Nelson*. London, 730p.
29. Jewell, R.J. (1993) *An Introduction to Calcareous Sediments*. Research Report No. G1075, Department of Civil Engineering, University of Western Australia, 45p.
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.
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 damping ratio of uniform to well-graded quartz sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **139**, 59-72.
15. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2013b) Small-strain constrained elastic modulus of clean quartz sand with various grain size distribution. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **55**, 130-139.
16. Wichtmann, T., Hernandez, M.N., and Triantafyllidis, T. (2015) On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **69**, 103-114.
17. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2009) Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus  $G_{max}$ . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**, 1404-1418.
18. 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**, 964-980.
19. Santamarina, J.C. and Cho, G.C. (2004) Soil behaviour: The role of particle shape. *Skempton Conference, Advances in Geotechnical Engineering*, London, **1**, 604-617.
20. Janoo, V., Bayer, J.J., and Benda, C.C. (2004) Effect of aggregate angularity on base material properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **16**, 614-622.
21. Cho, G.C., Dodds, J., and Santamarina, C. (2006) Particle shape on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **132**, 591-602.
22. Guo, P.J. and Stolle, D.F.E. (2006) Fabric and particle shape influence on  $k_0$  of granular materials. *Soils and Foundations*, **46**, 639-652.
23. Meidani, M., Shafiee, A., Habibagahi, G., Jafari,

- 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. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**, 975-983.
۳۵. جعفریان، یاسر و رخشنده، مهران (۱۳۹۴) مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار سیکی و پتانسیل تولید فشار آب حفره‌ای ماسه کربناتی بوشهر. *مجله عمران مدرس*، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحات ۳۷ تا ۵۰.
۳۶. جعفریان، یاسر، حداد، عبدالحسین، و جاودانیان، حامد (۱۳۹۴) ارزیابی مدول برشی ماسه کربناتی بوشهر با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکی. *مجله عمران مدرس*، دوره ۱۵، شماره ۴، صفحات ۹ تا ۱۹.
۳۷. جعفریان، یاسر، جاودانیان، حامد، و حداد، عبدالحسین (۱۳۹۵) مقایسه رفتار دینامیکی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاتی بابلسر. *فصلنامه علوم و مهندسی زلزله*، دوره ۳، شماره ۳، صفحات ۱ تا ۱۰.
38. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Delhi (India): Pearson Education Ptd. Ltd. [Reprinted 2003].
39. Shin, H. and Santamarina, J.C. (2013) Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **139**, 353-355.