

## مقایسه سختی برشی ماسه‌های کربناتی و سیلیکاته با استفاده از آزمایش‌های دینامیکی و سیکی

یاسر جعفریان

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
yjafarianm@iuees.ac.ir

عبدالحسین حداد

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
ahadad@semnan.ac.ir

حامد جاودانیان

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
h.javdanian@semnan.ac.ir

کلید واژه‌ها: سختی برشی، ماسه کربناتی، ماسه سیلیکاته، مطالعه آزمایشگاهی

### چکیده

مطالعات زمین‌شناسی حاکی از آن است که بسیاری از مناطق حاره‌ای کره‌ی زمین از جمله نواحی جنوبی ایران پوشیده از خاک‌ها و رسوبات کربناتی است. تفاوت در نوع کانی و شکل ذرات خاک‌های کربناتی در مقایسه با خاک‌های سیلیکاته بیانگر احتمال تفاوت رفتاری این خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی می‌باشد. در این تحقیق، سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه سیلیکاته بابلسر در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. ماسه‌ها با دانه‌بندی مشابه و در نسبت تخلخل یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. اثر فشار محدود کننده بر سختی برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که سختی برشی ماسه‌های مورد آزمایش با افزایش فشار محدود کننده افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد. مقادیر سختی برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌ها با روابط موجود مقایسه شد. نرخ افزایش سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز در اثر افزایش فشار محدود کننده بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاته بوده است.

### مقدمه

سختی برشی خاک یکی از پارامترهای اساسی در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک از جمله تحلیل پاسخ زمین می‌باشد. مطالعات بسیاری جهت ارزیابی سختی برشی خاک‌های سیلیکاته صورت گرفته است (به عنوان مثال Jafarian et al., 2014; Towhata, 2008). برخی از مطالعات صورت گرفته نیز در جهت شناسایی عوامل مؤثر بر این پارامتر بوده است (Zhang et al., 2005). مطالعات بر روی اثر شکل ذرات بر رفتار خاک، حاکی از آن است که شکل ذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خاک دارد (Santamarina and Cho, 2004). مطالعات (Cho et al., 2006) نشان داده که شکل ذرات خاک (خصوصاً خاک‌های دانه‌ای) یکی از ویژگی‌های شاخص خاک می‌باشد که لحاظ اثر آن در محاسبات به درک بهتر رفتار این مصالح کمک خواهد کرد. از اینرو، Shin and Santamarina (2013) با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو نوع خاک ماسه‌ای گردگوشه و تیزگوشه به بررسی اثر شکل ذرات بر مدول برشی ماکزیمم این خاک‌ها پرداختند. ایشان نشان دادند که با افزایش درصد ذرات تیزگوشه، سختی برشی ماکزیمم خاک افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی (Senetakis et al., 2012) که با انجام آزمون‌های ستون تشدید بر روی ماسه‌های کوارتزی و ماسه‌های آتشفشانی همراه بوده، بیانگر تفاوت سختی برشی این خاک‌ها بوده است. آنها تفاوت رفتاری مشاهده شده را به تفاوت در نوع کانی و ساختار ذرات خاک‌های مورد آزمایش نسبت داده‌اند.

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی حدود چهل درصد سطح کف و مجاور اقیانوس‌ها و دریاها در نواحی گرمسیری را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل داده است. بسیاری از این نواحی دارای خطر لرزه‌خیزی بالایی می‌باشد که پتانسیل آسیب‌پذیری آنها در زلزله‌های سال‌های اخیر



در سراسر جهان اثبات شده است. بنابراین، طراحی سازه‌ها در این نواحی مستلزم بررسی و مطالعات بیشتر این نوع خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام شده و همچنین مسائل و مشکلات اساسی رخ داده در پروژه‌های عمرانی در نواحی دارای خاک‌ها و رسوبات کربناتی از جمله نواحی جنوبی کشورمان در سواحل خلیج فارس و همچنین جزایر لزوم بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌های کربناتی این نواحی را روشن ساخت (Hassanlourad et al., 2008).

مرور مطالعات انجام شده بر روی اثر شکل ذرات و نوع کانی خاک‌ها بر رفتار آنها و از طرف دیگر متفاوت بودن شکل و ساختار ذرات خاک-های کربناتی (Shahnazari and Rezvani, 2013; Shahnazari et al., 2014)، احتمال تفاوت رفتاری خاک‌های کربناتی نسبت به خاک‌های دیگر را بیشتر نمایان می‌سازد. از اینرو ارزیابی و مقایسه‌ی رفتار خاک‌های کربناتی با خاک‌های سیلیکاتی که به لحاظ نوع کانی و شکل ذرات متفاوت می‌باشند نیازمند بررسی دقیق می‌باشد.

در این تحقیق، سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه سیلیکاته بابلسر در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. ماسه‌ها با دانه‌بندی مشابه مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های این تحقیق در نسبت تخلخل (e) یکسان و در فشارهای محدود کننده مؤثر ( $P'_0$ ) مختلف انجام شد. اثر فشار محدود کننده مؤثر بر سختی برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر بررسی شد. مقادیر سختی برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش‌ها با روابط موجود مقایسه شد. منحنی‌های سختی برشی ماسه کربناتی هرمز و ماسه سیلیکاته بابلسر در فشارهای مختلف مقایسه گردید.

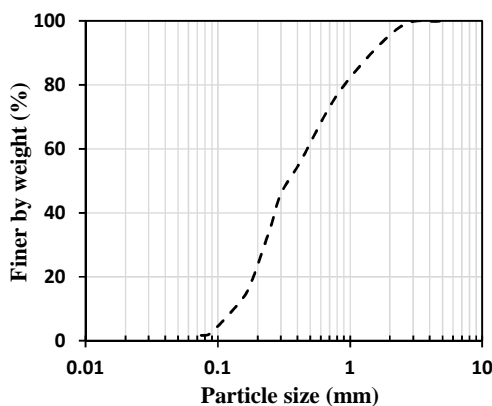
## خاک‌های مورد آزمایش

خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد. 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 می‌باشد که در سواحل جنوبی دریای خزر واقع شده است.

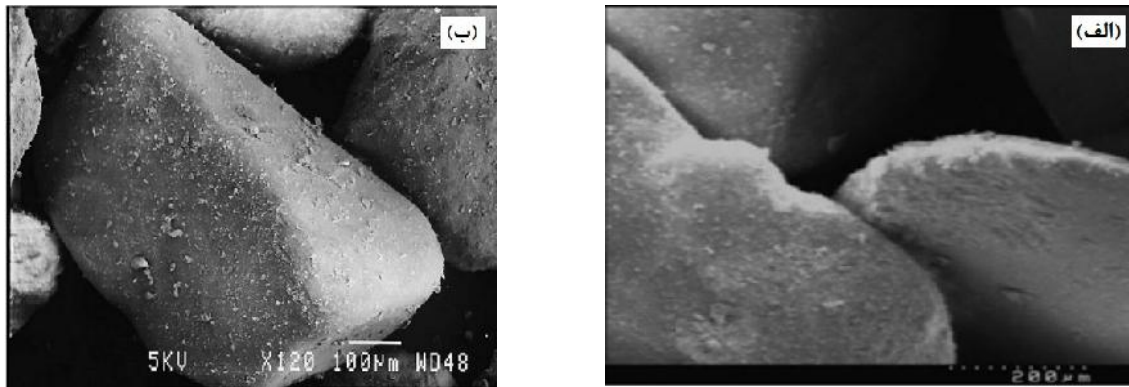
به منظور ارزیابی کربناته بودن ماسه‌ی هرمز، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی این خاک صورت گرفت. نتایج حاصل نشان از کربناته بودن این خاک داشت. این آزمایش در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد. نتیجه‌ی آزمایش نشان می‌دهد که عنصر غالب در این خاک کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) می‌باشد. در این تحقیق ماسه‌های هرمز و بابلسر با دانه‌بندی یکسان (شکل ۱) مورد آزمایش قرار گرفتند. این خاک‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. همچنین مشخصات خاک‌ها شامل چگالی ویژه ( $G_s$ )، وزن مخصوص حداقل ( $\gamma_{\min}$ ) و حداکثر ( $\gamma_{\max}$ )، اندازه میانگین ذرات ( $D_{50}$ )، ضریب یکنواختی (Cu)، و ضریب دانه‌بندی ( $C_c$ ) در جدول (۱) آمده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاته بابلسر در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

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



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مورد آزمایش



شکل ۲: تصاویر SEM خاک‌های مورد آزمایش، الف) ماسه هرمز (Shahnazari et al., 2014)، ب) ماسه بابلسر (Ahmadi and Paydar, 2014)

## برنامه‌ی آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) انجام شد. آزمایش‌ها در نسبت تخلخل  $0.537$  و فشارهای محدود کننده مؤثر  $200$ ،  $400$  و  $800$  kPa، و با دستگاه‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی صورت گرفت.

جدول ۲: برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

شماره آزمایش	ماسه	دستگاه آزمایش	B	e	P' <sub>0</sub>
۱	هرمز	ستون تشدید	۰/۹۵	۰/۵۴۱	۲۰۰
۲	هرمز	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۶	۰/۵۳۷	۲۰۰
۳	هرمز	ستون تشدید	۰/۹۹	۰/۵۳۳	۴۰۰
۴	هرمز	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۷	۰/۵۳۸	۴۰۰
۵	هرمز	ستون تشدید	۰/۹۵	۰/۵۳۷	۸۰۰
۶	هرمز	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۵	۰/۵۴۰	۸۰۰
۷	بابلسر	ستون تشدید	۰/۹۹	۰/۵۳۹	۲۰۰
۸	بابلسر	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۸	۰/۵۳۷	۲۰۰
۹	بابلسر	ستون تشدید	۱	۰/۵۳۵	۴۰۰
۱۰	بابلسر	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۵	۰/۵۳۸	۴۰۰
۱۱	بابلسر	ستون تشدید	۰/۹۹	۰/۵۳۶	۸۰۰
۱۲	بابلسر	سه‌محوری سیکلی	۰/۹۶	۰/۵۳۷	۸۰۰

نمونه‌سازی به روش پاشش خشک صورت گرفت. تراکم اولیه کمتر از مقدار نهایی در نظر گرفته می‌شد. مقدار تغییر نسبت تخلخل نمونه به فشار محدود کننده وابسته بوده که با انجام تست‌های اولیه حدود تقریبی آن برای تنش‌های محدود کننده‌ی مختلف حاصل گردید. پس از پایان نمونه‌سازی جهت اشباع کردن نمونه‌ها، گاز دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) و سپس آب هواگیری‌شده از نمونه‌ها عبور داده شد. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، ملاک اشباع شدن نمونه رسیدن به ضریب فشار آب حفره‌ای اسکمپتون  $B > 0.95$  بوده است. در پایان، نمونه‌های ماسه‌ی هرمز و بابلسر در نسبت تخلخل یکسان و در فشارهای محدود کننده‌ی مختلف مورد تحکیم قرار گرفته و سپس بارگذاری چند مرحله‌ای در حالت زهکشی نشده اعمال گردید. نمونه‌های مورد آزمایش دارای قطر  $70$  mm و ارتفاع  $100$  mm بوده است.

آزمایش‌های ستون تشدید در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران و با دستگاه مدل Seiken انجام شدند. در آزمایش ستون تشدید نمونه‌های استوانه‌ای خاک به وسیله‌ی یک سیستم الکترومغناطیسی تحت تحریکات پیچشی قرار می‌گیرد. نمونه در مقادیر مختلف دامنه و با فرکانس متغیر بارگذاری شده و پاسخ نمونه به این تحریکات به وسیله‌ی 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 شتاب‌ماکزیمم حاصل شد (Kramer, 1996). سپس مدول برشی خاک با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید. در آزمایش‌های ستون تشدید، مدول برشی خاک در بازه‌ی کرنش برشی  $10^{-4}$  تا  $10^{-2}$  اندازه‌گیری شده است.

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

در این رابطه،  $V_s$  سرعت موج برشی و جرم حجمی نمونه می‌باشد.

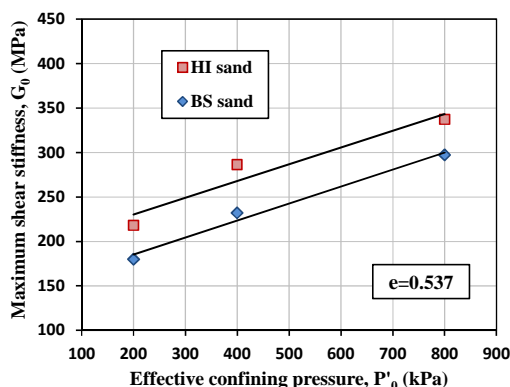
آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی این تحقیق با استفاده از دستگاه مدل GDS و در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان انجام گرفت. در آزمایش سه‌محوری سیکلی، نمونه به وسیله نیروی انحرافی سیکلی بارگذاری می‌شود. آزمایش‌ها با کنترل کرنش و به‌صورت چندمرحله‌ای انجام گردید. در هر مرحله از آزمایش ۱۰ سیکل بارگذاری انجام گردید. مدول برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی در بازه‌ی کرنش برشی ۱٪-۱۰<sup>-۱</sup> اندازه‌گیری شده است. سیستم بارگذاری نیروها نیز به کمک نیروسنج درون سلول اندازه‌گیری می‌شد. تنش‌ها و کرنش‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه مدول برشی خاک بکار برده شد. با توجه به اینکه نمونه‌ها در حالت زهکشی نشده بارگذاری شدند نسبت پواسون برابر ۰/۵ = در نظر گرفته شد. از اینرو مقادیر کرنش برشی ۱/۵ برابر کرنش محوری محاسبه شد. پس از انجام آزمایش‌های سیکلی، رابطه‌ی تنش برشی-کرنش برشی (حلقه‌ی هیستریزیس) در سیکل دهم ترسیم و مدول برشی سکانت به‌صورت شیب خط واصل نقاط انتهایی این منحنی و از رابطه‌ی (۲) محاسبه گردید.

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

که در این رابطه، تنش برشی و کرنش برشی می‌باشد.

### سختی برشی ماکزیمم

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار محدود کننده مؤثر ( $P'_0$ )، سختی برشی ماکزیمم ( $G_0$ ) افزایش می‌یابد. با افزایش فشار محدود کننده میانگین نرخ تغییرات سختی برشی ماکزیمم کاهش یافته است به‌طوری‌که در آزمایش‌های انجام شده (با  $e=0/537$ ) بر روی ماسه‌ی کربناتی هرمز، افزایش فشار محدود کننده مؤثر از ۲۰۰ تا ۴۰۰ kPa و از ۴۰۰ تا ۸۰۰ kPa به ترتیب افزایش ۳۱/۳٪ و ۱۷/۷٪ سختی برشی ماکزیمم را به دنبال داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سختی برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد (شکل ۳). نتایج حاصل با مطالعات آزمایشگاهی (Shin and Santamarina (2013) که به بررسی اثر تیزگوشگی ذرات خاک بر رفتار آنها پرداختند در تطابق می‌باشد.

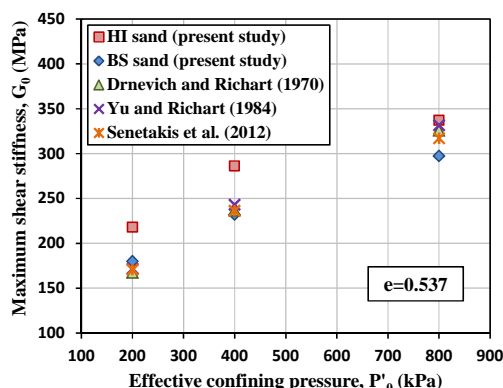


شکل ۳: اثر فشار محدود کننده مؤثر بر سختی برشی ماکزیمم

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار محدود کننده مؤثر ( $P'_0$ )، سختی برشی ماکزیمم ( $G_0$ ) افزایش می‌یابد. با افزایش فشار محدود کننده میانگین نرخ تغییرات سختی برشی ماکزیمم کاهش یافته است به‌طوری‌که در آزمایش‌های انجام شده (با  $e=0/537$ ) بر روی ماسه‌ی کربناتی هرمز، افزایش فشار محدود کننده مؤثر از ۲۰۰ تا ۴۰۰ kPa و از ۴۰۰ تا ۸۰۰ kPa به ترتیب افزایش ۳۱/۳٪ و ۱۷/۷٪ سختی برشی ماکزیمم را به دنبال داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سختی برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز بیشتر از ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد (شکل ۳). نتایج حاصل با مطالعات آزمایشگاهی (Shin and Santamarina (2013) که به بررسی اثر تیزگوشگی ذرات خاک بر رفتار آنها پرداختند در تطابق می‌باشد. قابل توجه است که سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز در فشارهای محدود کننده مختلف به میزان ۱۵ الی ۲۳ درصد بیشتر از سختی برشی ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد.

مقایسه تغییرات سختی برشی بیشینه در مقابل فشار محدود کننده حاصل از آزمایش‌های این تحقیق با نتایج حاصل از روابط محققین (Drnevich and Richart, 1970; Yu and Richart, 1984; Senetakis et al., 2012) در شکل (۴) نشان داده شده است. (Senetakis et al., 2012) با لحاظ اثر دانه‌بندی خاک در رابطه‌ی سختی برشی ماکزیمم سعی در افزایش دقت ارزیابی این پارامتر را داشتند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، روابط موجود مقادیر سختی برشی ماکزیمم ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر را نسبت به ماسه کربناتی هرمز با دقت بالاتری ارائه می‌دهند (شکل ۴). مقادیر این پارامتر را برای ماسه‌ی هرمز کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های ستون تشدید این تحقیق تخمین می‌زنند (شکل ۴).

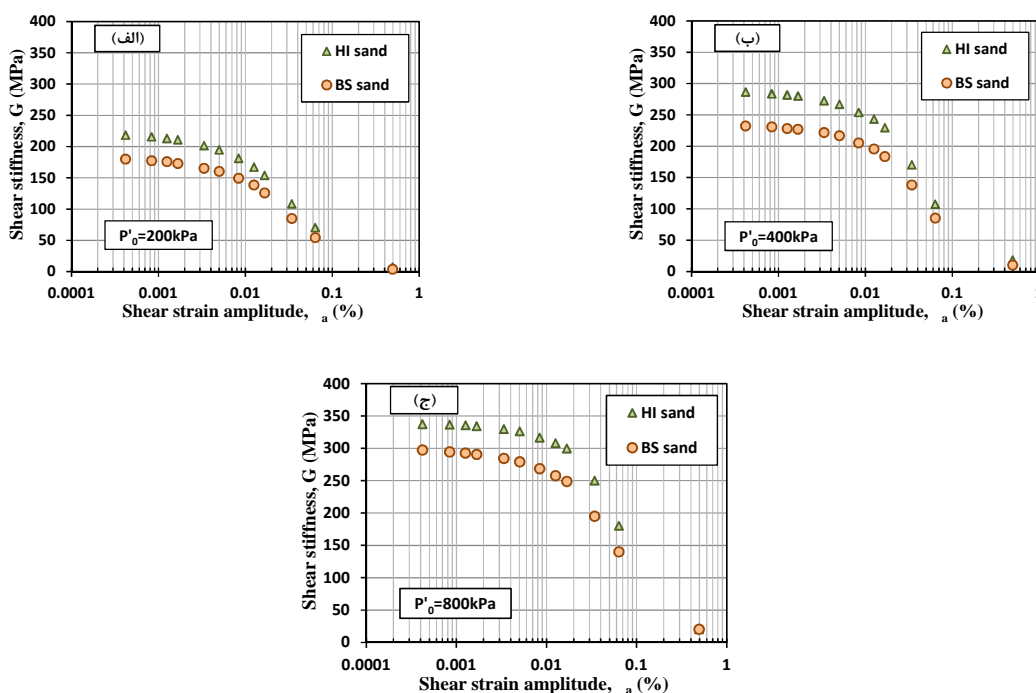
البته بایستی توجه نمود که دقت روابط پیشین برای ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر نیز در فشار محدود کننده‌ی ۸۰۰ kPa کاهش یافته است. با توجه به اینکه روابط موجود بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی ماسه‌های سیلیکاته ارائه شدند، اختلاف نتایج حاصل از روابط پیشین با نتایج مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق بر روی ماسه‌ی کربناتی هرمز را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار خاک‌های کربناتی و سیلیکاتی مرتبط دانست.



شکل ۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی این تحقیق با نتایج حاصل از روابط موجود

### منحنی‌های سختی برشی

منحنی‌های تغییرات سختی برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید و سهم‌محوری سیکی در نسبت تخلخل  $e=0.537$  و در فشارهای محدود کننده مؤثر ۲۰۰، ۴۰۰، و ۸۰۰ kPa در اشکال ۵ (الف-ج) نشان داده شده است. همانطور که در اشکال ۵ (الف-ج) مشاهده می‌شود، مدول برشی خاک (G) با افزایش دامنه کرنش برشی ( $\gamma_a$ ) کاهش می‌یابد. این کاهش که اساساً به واسطه‌ی رفتار غیرخطی خاک صورت می‌گیرد، در همه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مشاهده شده است. مقایسه‌ی منحنی‌های سختی برشی ماسه‌های کربناتی هرمز و سیلیکاته بابلسر در شرایط یکسان نشان می‌دهد که منحنی‌های مربوط به ماسه‌ی هرمز بیشتر از ماسه‌ی بابلسر می‌باشد (شکل ۵ الف-ج). علت این تفاوت رفتاری را می‌توان به تفاوت در نوع کانی و همچنین شکل ذرات ماسه‌های مورد آزمایش نسبت داد. نتایج حاصل بیانگر آن است که بایستی تفاوت رفتاری ماسه‌های کربناتی و سیلیکاته که در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد توجه قرار نگرفته، در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ گردد.



شکل ۵: منحنی‌های سختی برشی ماسه‌های هرمز و بابلسر با  $e=0.537$  (الف)  $P'_0=200kPa$  (ب)  $P'_0=400kPa$  (ج)  $P'_0=800kPa$



در این تحقیق، سختی برشی ماسه‌ی کربناتی هرمز و ماسه سیلیکاته بابلسر در دامنه‌های کرنش برشی کوچک و بزرگ و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. ماسه‌ها با دانه‌بندی مشابه و در نسبت تخلخل یکسان مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی این تحقیق در فشارهای محدود کننده‌ی مؤثر ( $P'_0$ ) مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که سختی برشی ماسه‌های مورد آزمایش با افزایش فشار محدود کننده افزایش یافته با افزایش فشار محدود کننده میانگین نرخ تغییرات سختی برشی ماکزیمم کاهش یافته است که این تغییرات با مطالعات پیشین در تطابق می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش‌های این تحقیق، سختی برشی ماکزیمم ماسه‌ی کربناتی هرمز در فشارهای محدود کننده‌ی ۲۰۰ تا ۸۰۰ kPa به میزان ۱۵ الی ۲۳ درصد بیشتر از سختی برشی ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر می‌باشد. مقادیر سختی برشی ماکزیمم ماسه‌های مورد آزمایش با نتایج حاصل از روابط محققین مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که روابط موجود مقادیر  $G_0$  مربوط به ماسه‌ی سیلیکاته بابلسر را با دقت بیشتری نسبت به ماسه کربناتی هرمز ارزیابی می‌کنند. مقایسه‌ی منحنی‌های سختی برشی ماسه‌های مورد آزمایش نشان داده که منحنی مربوط به ماسه‌ی هرمز در فشارهای محدود کننده‌ی مختلف بالاتر از منحنی  $G_a$  مربوط به ماسه‌ی بابلسر قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که بایستی تفاوت رفتاری ماسه‌های کربناتی و سیلیکاته که ناشی از تفاوت در نوع کانی و شکل ذرات این خاک‌ها می‌باشد و در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد توجه قرار نگرفته، در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ گردد.

## تشریح و قدردانی

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

## مراجع

- Ahmadi MM and Paydar NA (2014) Requirements for soil-specific correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance of sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57: 152-163
- Cho GC, 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(5): 591-602
- Drnevich VP and Richart FE (1970) dynamic prestraining of dry sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96(SM2): 451-469
- 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(2):108-119
- 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
- Kramer SL (1996) *Geotechnical earthquake engineering*, Publ Prentice Hall, 670 p
- Santamarina JC and Cho G C (2004) *Soil behaviour: The role of particle shape*, Skempton Conference, Advances in Geotechnical Engineering, London, 1: 604-617
- Senetakis K, Anastasiadis A and Pitilakis K (2012) the small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 35(6): 1-17
- Shahnazari H and Rezvani R (2013) Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study, *Engineering Geology*, 159: 98-105
- 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(4): 975-983
- Shin H and Santamarina JC (2013) Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 139: 353-355



Towhata I (2008) *Geotechnical earthquake engineering*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 698 p

Yu PJ and Richart JFE (1984) Stress ratio effects on the shear modulus of dry sands, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110(3): 331–345

Zhang J, Andrus RD and Juang CH (2005) Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 131(4): 453-464