

# مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر مدول برشی دینامیکی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر

یاسر جعفریان\* (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

حامد جاودانیان (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

عبدالحسین حداد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)  
دوره‌ی ۲-۱۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۴۵-۵۲

رفتار دینامیکی مصالح کربناتی جنوب ایران علی‌رغم خطر بالای لرزه‌خیزی و موقعیت استراتژیک آن مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید مورد مطالعه قرار گرفته است. مدول برشی بیشینه، یکی از مهم‌ترین کمیت‌های ژئوتکنیکی در تحلیل‌های دینامیکی است. اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین و نسبت تخلخل در روند تغییرات این کمیت بررسی شده است. آزمایش‌ها در دو حالت همسان و غیرهمسان انجام شده‌اند، تا اثر ناهمسانی تنش در رفتار خاک مشخص شود. نتایج نشان داده‌اند که افزایش فشار میانگین و کاهش نسبت تخلخل، افزایش مدول برشی ماسه را به دنبال دارد. ناهمسانی تنش تحکیم اولیه نیز موجب افزایش مدول برشی بیشینه شده است. براساس نتایج پژوهش حاضر، رابطه‌ی برای مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر ارائه و سپس با مدل‌های پیشنهادی پژوهشگران مقایسه شده است. در نهایت، اثر ناهمسانی تنش در تغییرات مدول برشی بیشینه لحاظ شده است.

واژگان کلیدی: مدول برشی بیشینه، ماسه‌ی کربناتی، ماسه‌ی سیلیکاته، ناهمسانی تنش، ستون تشدید.

## ۱. مقدمه

مدول برشی خاک در کرنش‌های برشی کوچک ( $\gamma < 10^{-5}$ ) را مدول برشی بیشینه<sup>۱</sup> ( $G_{max}$ ) می‌نامند. این کمیت از کمیت‌های اساسی در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌یی از جمله بررسی اثرات ساختگاهی به شمار می‌آید.<sup>[۱]</sup> مدول برشی بیشینه هم به روش صحرایی و هم به روش آزمایشگاهی قابل محاسبه است.<sup>[۲]</sup> در روش آزمایشگاهی معمولاً از آزمون‌های ستون تشدید استفاده می‌شود. براساس مطالعات آزمایشگاهی پژوهشگران، فشار محدودکننده‌ی مؤثر میانگین ( $\sigma'_c$ ) و نسبت تخلخل ( $e$ ) از عوامل بسیار مؤثر در مدول برشی بیشینه به شمار می‌آیند.<sup>[۳]</sup> فرم کلی رابطه‌ی ۱، که براساس آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های ماسه‌یی حاصل شده است، توسط بسیاری از پژوهشگران مورد تأیید واقع شده است.<sup>[۴،۵]</sup>

$$G_{max} = A.F(e).(\sigma'_c)^n \quad (۱)$$

که در آن،  $F(e)$  تابعی از نسبت تخلخل،  $A$  ضریبی است که به نوع خاک بستگی دارد، و  $n$  ضریبی است که به رابطه‌ی  $G_{max} - \sigma'_c$  بستگی دارد. در ادامه،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۶/۱۸، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۱۴.

yjafarianm@iiees.ac.ir  
javadanian@eng.sku.ac.ir  
ahadad@semnan.ac.ir

پژوهشگران رابطه‌ی ۲ را برای مدول برشی بیشینه ارائه کرده‌اند:<sup>[۶]</sup>

$$G_{max} = 218.8 K_{\tau, max} (\sigma'_c)^n \quad (۲)$$

که در آن،  $G_{max}$  و  $\sigma'_c$  دارای واحد kPa هستند و  $K_{\tau, max}$  ضریبی است که با توجه به نوع خاک تعیین می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان از اثر شکل ذرات در رفتار مکانیکی مصالح از جمله تغییرات مدول برشی بیشینه خاک ماسه‌یی دارد.<sup>[۷]</sup> در سال ۲۰۱۲، با انجام آزمایش‌های ستون تشدید به بررسی مدول برشی بیشینه ماسه‌های کوارتزی و آتشفشانی پرداخته شده و نتایج به‌دست‌آمده نشان از تفاوت  $G_{max}$  دو نوع خاک مورد آزمایش داشته است، که آن را به تفاوت در نوع کانی و ساختار این خاک‌ها نسبت داده‌اند و سپس برای  $G_{max}$  خاک‌های مورد آزمایش روابطی ارائه شده است.<sup>[۸]</sup>

بخش وسیعی از کره‌ی زمین را خاک‌ها و رسوبات کربناتی تشکیل داده است.<sup>[۹]</sup> بسیاری از این نواحی که شامل ساخت و سازه‌های گسترده‌یی نیز است، خطر لرزه‌خیزی بالایی دارند. از این رو، ارزیابی دقیق‌تر رفتار خاک‌های کربناته، اهمیت بالایی دارد. نتایج آزمون‌های مکانیک خاک صحرایی و آزمایشگاهی بر روی

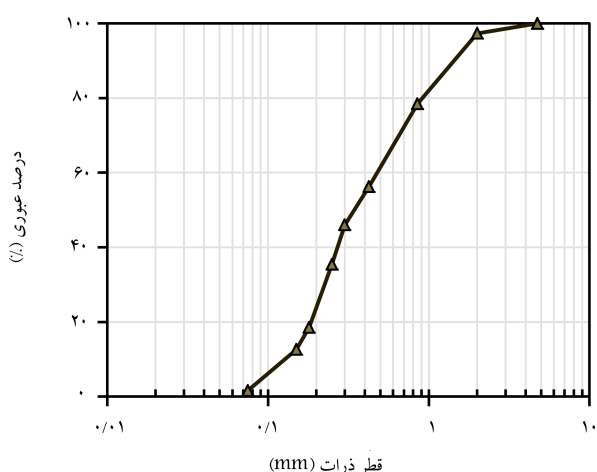
جغرافیایی ۲۸/۹ درجه تهیه شده است. بندر بوشهر یکی از بنادر بزرگ تجاری ایران و با موقعیت استراتژیک و همچنین مخازن نفتی و گازی بسیار است. خطر لرزه‌خیزی مناطق مذکور نیز با بروز زلزله‌های بسیار در سال‌های اخیر از جمله زلزله‌های رخ داده در شهرهای کاکلی، شنبه، و بوشکان در استان بوشهر و خسارت‌های ناشی از آنها اثبات شده است.

به منظور بررسی کانی خاک مورد استفاده در این پژوهش، آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)<sup>۷</sup> بر روی خاک صورت گرفته و نتایج حاصل از آزمایش مذکور، که در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی دانشکده‌ی مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شده است، نشان از کربناته بودن این خاک داشته است. آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس برای تعیین عناصر موجود در مصالح مختلف از جمله خاک انجام می‌شود.<sup>[۱۴]</sup> نتیجه‌ی آزمایش نشان داده است که عنصر غالب در ماسه‌ی بوشهر، کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) است.

نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. این خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) بوده و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۲.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۲ انجام شده است. آزمایش‌ها در فشارهای میانگین ۴۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ (kPa) با چگالی‌های نسبی ۵۰٪ و ۸۰٪ و در دو حالت تحکیم همسان<sup>۸</sup> و ناهمسان<sup>۹</sup> صورت گرفته است.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی کربناتی مورد آزمایش.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌ها.

کمیت	
$G_s = ۲٫۷۰$	چگالی ویژه
$e_{max} = ۰٫۸۸۳$	نسبت تخلخل بیشینه
$e_{min} = ۰٫۶۷۱$	نسبت تخلخل کمینه
$D_{۵۰} = ۰٫۳۵$ mm	اندازه‌ی متوسط ذرات
$D_{۱۰} = ۰٫۱۴$ mm	اندازه‌ی مؤثر ذرات
$C_u = ۳٫۴۳$	ضریب یکنواختی
$C_c = ۰٫۸$	ضریب دانه‌بندی

خاک‌های کربناتی و غیرکربناتی نشان از تفاوت رفتاری این خاک‌ها داشته است.<sup>[۱۵]</sup> نتایج مطالعات انجام‌شده و همچنین اهمیت پروژه‌های عمرانی در نواحی با خاک‌ها و رسوبات کربناتی، لزوم بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌های کربناتی این نواحی را روشن می‌سازد.<sup>[۱۶]</sup> جهت حصول نتایج نزدیک به واقعیت باید آزمون‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی کامل شرایط تنش صحرایی صورت گیرد. محیط خاک در طبیعت می‌تواند تحت شرایط تنش پیچیده‌ی قرار داشته باشد، که یکی از آن شرایط ممکن، المان‌های تحت تنش برشی اولیه است.

در مطالعاتی اثر تنش برشی اولیه در انرژی کرنشی با انجام آزمون‌های سیکلی بر روی ماسه‌ی توپورا بررسی شده است، که نتایج آن بیانگر اثر قابل ملاحظه‌ی کمیت مذکور بر رفتار سیکلی خاک است.<sup>[۱۷]</sup> پژوهشگران با انجام آزمون‌های سه‌محوری سیکلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ی توخالی خاک سیلت به بررسی اثر تنش برشی اولیه پرداخته‌اند،<sup>[۱۸]</sup> که نتایج آن بیانگر اثر قابل ملاحظه‌ی نسبت تنش برشی اولیه<sup>۲</sup> در منحنی‌های تنش - کرنش خاک است.

در پژوهش حاضر، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر، از بنادر بزرگ جنوبی ایران و در ساحل خلیج فارس، در کرنش برشی کوچک با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ستون تشدید<sup>۳</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین<sup>۴</sup> ( $\sigma'_c$ ) و نسبت تخلخل<sup>۵</sup> ( $e$ ) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در رفتار خاک‌های دانه‌ی، در مدول برشی بیشینه‌ی ( $G_{max}$ ) خاک کربناتی بوشهر بررسی شده است. مطالعات آزمایشگاهی در دو حالت همسان و ناهمسان انجام شده است، تا اثر شرایط تنش حاکم بر المان خاک در رفتار کرنش - کوچک آن نیز مشخص شود؛ لذا براساس نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده، رابطه‌ی جهت ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر ارائه و با مدل‌های پیشنهادی پژوهشگران مقایسه شده است. در نهایت، انعکاس اثر ناهمسانی تنش<sup>۶</sup> با اعمال ضریبی در رابطه‌ی ارائه‌شده صورت گرفته است، تا مدل پیشنهادی این پژوهش جهت پیش‌بینی مدول برشی بیشینه در شرایط تنش ناهمسان نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

### ۲.۱. خاک مورد آزمایش

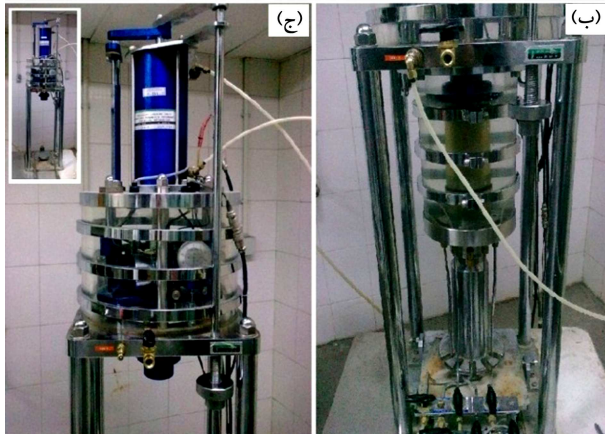
خاک مورد آزمایش در این پژوهش، ماسه‌ی بوشهر بوده است (شکل ۱)، که از جنوب ایران و در سواحل خلیج فارس در موقعیت طول جغرافیایی ۵۰/۸ درجه و عرض



شکل ۱. ماسه‌ی کربناتی بوشهر.



الف) سیستم کنترل و ثبت نتایج؛



ج) سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی.

ب) سلول بارگذاری؛

شکل ۳. دستگاه ستون تشدید.

اعمال شده است. نمونه‌های مورد آزمایش به قطر ۷۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm بوده‌اند.

#### ۴.۲. دستگاه ستون تشدید

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران و با دستگاه ستون تشدید مدل SEIKEN انجام شده‌اند. دستگاه ذکر شده شامل سیستم کنترل و ثبت نتایج، سلول بارگذاری، و سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی است (شکل ۳) و دقت بسیار بالایی در ثبت نتایج دارد و نیز از نوع برش پیچشی با شرایط انتهایی گیردار - آزاد است و قابلیت انجام آزمایش در محدوده دامنه‌های کرنش برشی  $2^{\circ}$  تا  $10^{\circ}$  دارد. آزمایش‌های ستون تشدید این پژوهش براساس استاندارد ASTM D40۱۵ انجام شده است.

در آزمایش ستون تشدید، نمونه‌های استوانه‌ای خاک به وسیله یک سیستم الکترومغناطیسی تحت تحریکات پیچشی قرار می‌گیرند و بسامد و دامنه‌ی تحریکات اعمالی به وسیله دستگاه قابل کنترل است. نمونه در مقادیر مختلف دامنه و با بسامد متغیر بارگذاری و پاسخ نمونه به این تحریکات به وسیله شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. سپس بسامد بارگذاری تدریجاً افزایش می‌یابد، تا اینکه پاسخ نمونه به مقدار بیشینه برسد (شکل ۴). بسامد متناظر با پاسخ بیشینه‌ی شتاب‌سنج ( $A_T$ ) را بسامد تشدید ( $f_T$ ) می‌نامند.

جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های ستون تشدید انجام شده در پژوهش حاضر.

نوع تحکیم	$B$ (%)	$\sigma'_c$ (kPa)	$e$	$\beta$
همسان	۹۷٫۱	۴۰	۰٫۷۷۶	۰
ناهمسان	۹۸٫۶	۴۰	۰٫۷۷۸	۰٫۲
ناهمسان	۹۷٫۱	۴۰	۰٫۷۷۷	۰٫۴
همسان	۹۵٫۳	۴۰	۰٫۷۰۵	۰
ناهمسان	۱۰۰	۴۰	۰٫۷۰۷	۰٫۲
ناهمسان	۹۶٫۷	۴۰	۰٫۷۱۱	۰٫۴
همسان	۱۰۰	۲۰۰	۰٫۷۷۷	۰
ناهمسان	۹۸٫۵	۲۰۰	۰٫۷۷۶	۰٫۲
ناهمسان	۹۸٫۶	۲۰۰	۰٫۷۷۷	۰٫۴
همسان	۹۹٫۴	۲۰۰	۰٫۷۱۰	۰
ناهمسان	۹۹٫۸	۲۰۰	۰٫۷۱۱	۰٫۲
ناهمسان	۹۷٫۱	۲۰۰	۰٫۷۱۲	۰٫۴
همسان	۱۰۰	۴۰۰	۰٫۷۷۳	۰
ناهمسان	۹۷٫۱	۴۰۰	۰٫۷۷۴	۰٫۲
ناهمسان	۹۸٫۶	۴۰۰	۰٫۷۷۵	۰٫۴
همسان	۹۹٫۲	۴۰۰	۰٫۷۰۸	۰
ناهمسان	۱۰۰	۴۰۰	۰٫۷۱۴	۰٫۲
ناهمسان	۹۷٫۱	۴۰۰	۰٫۷۱۴	۰٫۴

$B$ : کمیت فشار آب منفذی اسکمپتون [۱۵]

$\sigma'_c$ : فشار محدودکننده مؤثر میانگین

$e$ : نسبت تخلخل پس از تحکیم

$\beta$ : نسبت تنش برشی اولیه ( $\Delta\sigma'_1 / 2\sigma'_p$ )

$\Delta\sigma'_1$ : تنش انحرافی مؤثر ( $\sigma'_1 - \sigma'_p$ )

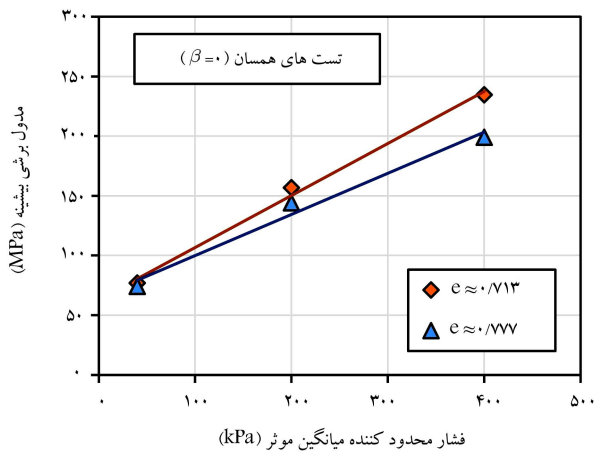
$\sigma'_1$ : تنش مؤثر بیشینه

$\sigma'_p$ : تنش مؤثر محدودکننده کمیته

#### ۳.۲. روش ساخت نمونه‌ی آزمایش

در پژوهش حاضر، نمونه‌سازی به روش پاشش خشک و به صورت ریختن ماسه در چندین لایه به درون یک قالب استوانه‌ای با پوشش غشای لاستیکی انجام شده است. با توجه به اینکه باید نمونه‌ها در پایان مرحله‌ی تحکیم به تراکم موردنظر می‌رسیدند، تراکم اولیه برای نمونه‌سازی کمتر از مقدار نهایی در نظر گرفته شده است. مقدار تغییر نسبت تخلخل نمونه به فشار محدودکننده وابسته بوده است، که با انجام آزمون‌های اولیه، حدود تقریبی آن برای تنش‌های محدودکننده‌ی مختلف حاصل شده است. پس از قراردادن نمونه درون سلول آزمایش و به منظور تسریع در اشباع‌کردن نمونه، گاز دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) و سپس آب هواگیری‌شده از نمونه عبور داده شده است. سپس به نمونه پس فشار<sup>۱</sup> اعمال شده است. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، ملاک اشباع‌شدن نمونه، رسیدن به ضریب فشار آب حفره‌ی اسکمپتون  $B > 95\%$  بوده است.

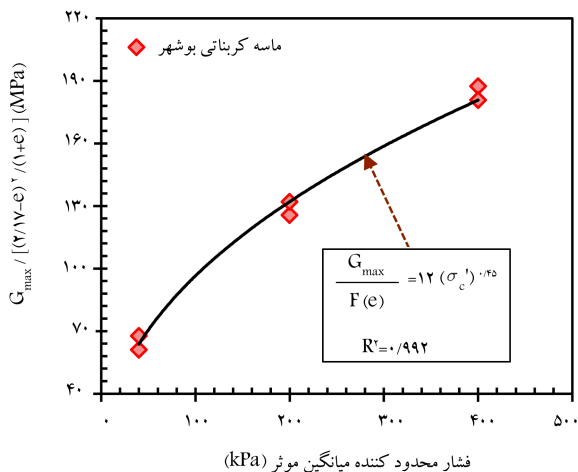
در پایان، نمونه‌ها در تنش‌های محدودکننده‌ی میانگین مختلف و با چگالی‌های نسبی متفاوت در دو حالت تنش همسان و ناهمسان با نسبت‌های تنش برشی اولیه متفاوت مورد تحکیم قرار گرفته و سپس بارگذاری در حالت زهکشی‌نشده



شکل ۵. اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین و نسبت تخلخل در مدول برشی بیشینه.

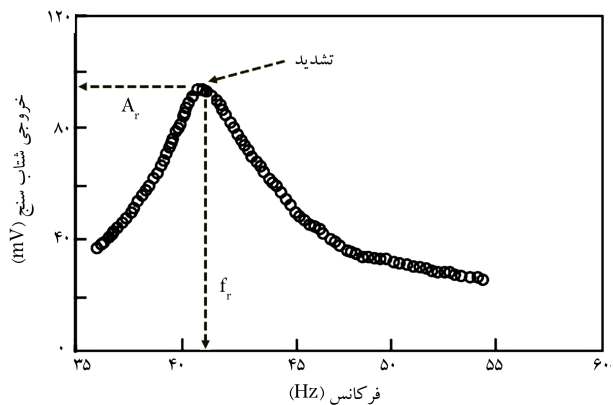
جدول ۳. ضرایب رابطه‌ی مدول برشی بیشینه (رابطه‌ی ۱).

n	F(e)	A	مرجع
۰٫۵	$\frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$	۳٫۳	[۱۷]
۰٫۵	$\frac{(22,17-12,8e)^2}{(1+e)}$	۰٫۳۲	[۱۸]
۰٫۴	$\frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$	۱۴٫۱	[۱۹]
۰٫۳۸	$\frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$	۹	[۲۰]
۰٫۵	$\frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$	۸٫۴	[۲]
۰٫۵	$\frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$	۷	[۲۱]



شکل ۶. تغییرات مدول برشی بیشینه‌ی نرمال‌شده با فشار محدودکننده‌ی میانگین.

در پژوهش حاضر با قبول رابطه‌ی نسبت تخلخل  $F(e) = [(2,17 - e)^2 / (1 + e)]$  و با استفاده از نتایج آزمایش‌های ستون تشدید در حالت همسان و ترسیم تغییرات  $G_{max}/F(e)$  در مقابل فشار محدودکننده‌ی میانگین، مقدار ضرایب  $A$  و  $n$  برای ماسه‌ی کربناتی بوشهر به ترتیب برابر ۱۲ و ۰٫۴۵ حاصل شده است (شکل ۶). بنابراین رابطه‌ی ۴، برای ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر پیشنهاد شده است:



شکل ۴. منحنی پاسخ بسامد.

سرعت موج برشی به کمک بسامد تشدید و کرنش برشی به کمک شتاب بیشینه حاصل می‌شود.<sup>[۲]</sup> سپس مدول برشی بیشینه ( $G_{max}$ ) خاک با استفاده از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (3)$$

که در آن،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $\rho$  جرم حجمی نمونه است. در آزمون‌های آزمایش‌های ستون تشدید پژوهش حاضر، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر در کرنش برشی حدود  $10^{-2}$ ٪ اندازه‌گیری شده است.

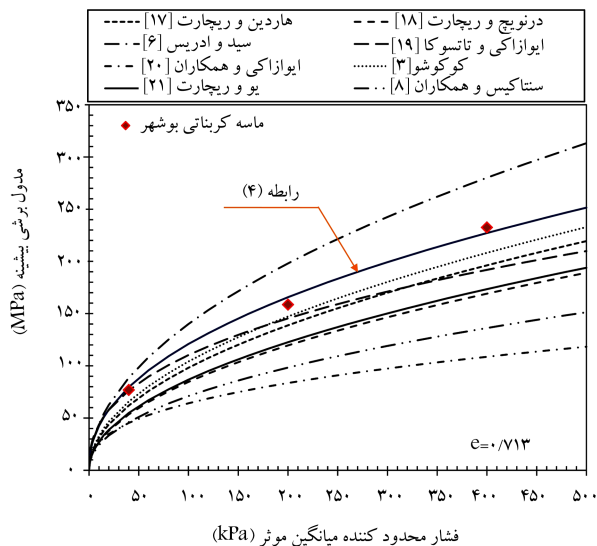
### ۳. تحلیل نتایج

#### ۳.۱. اثر فشار میانگین و نسبت تخلخل بر $G_{max}$

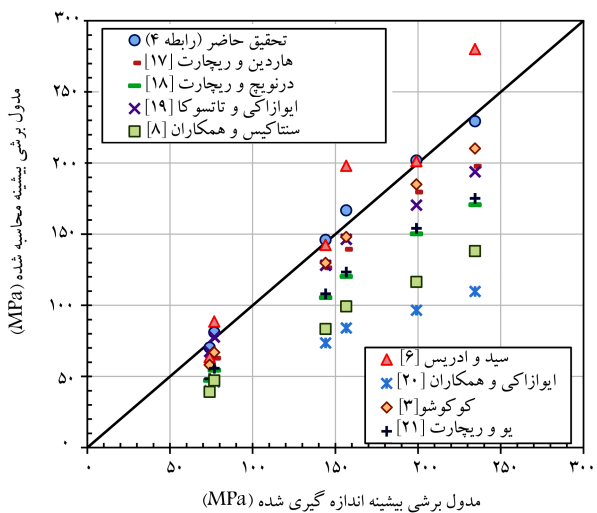
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر ( $\sigma'_c$ )، مدول برشی بیشینه افزایش یافته است. با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین نرخ تغییرات مدول برشی بیشینه کاهش یافته است، به طوری که در آزمایش‌های با چگالی نسبی ۵۰٪ ( $e = 0,777$ )، افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین از ۴۰ تا ۲۰۰ (kPa) و از ۲۰۰ تا ۴۰۰ (kPa) به ترتیب افزایش ۹۴٫۷٪ و ۳۸٫۱٪ مدول برشی بیشینه را به دنبال داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت تخلخل، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر کاهش یافته است. باید توجه کرد که میزان تأثیر نسبت تخلخل در تغییرات مدول برشی بیشینه به میزان فشار محدودکننده‌ی میانگین بستگی داشته و با افزایش  $\sigma'_c$  اثر کاهش نسبت تخلخل در افزایش  $G_{max}$  بیشتر شده است. اگرچه تغییر نسبت تخلخل از ۰٫۷۷۷ تا ۰٫۷۱۳ در فشار  $\sigma'_c = 40$  kPa تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر نداشته است، اما این کاهش نسبت تخلخل در فشارهای میانگین ۲۰۰ و ۴۰۰ (kPa) به ترتیب افزایش ۸٫۸٪ و ۱۷٫۹٪ در مدول برشی بیشینه را به دنبال داشته است. همچنین، اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین و نسبت تخلخل در روند تغییرات مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر با نتایج مطالعات دیگر پژوهشگران مطابقت داشته است.<sup>[۱۶]</sup>

#### ۳.۲. پیشنهاد ضرایب و مقایسه با روابط پیشین

پژوهشگران با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های ماسه‌یی و با استفاده از فرم کلی رابطه‌ی مدول برشی بیشینه (رابطه‌ی ۱)، ضرایب  $A$  و  $n$  و همچنین عبارت  $F(e)$  را به صورت جدول ۳ ارائه کرده‌اند.



شکل ۷. مقایسه‌ی تغییرات  $G_{max} - \sigma'_c$  حاصل از روابط موجود و همچنین رابطه‌ی پیشنهادی.



شکل ۸. مقایسه‌ی مدول برشی بیشینه حاصل از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از روابط.

پیزوالکتریک به بررسی اثر شرایط تنش در سرعت موج برشی ( $V_s$ ) پرداخته‌اند، [۲۲] که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر افزایش سرعت موج برشی در اثر ناهمسانی تنش بوده است. اثر نسبت تنش اولیه بر روی مدول کشسانی ( $E$ ) نیز به روش عددی و با مدل‌سازی شرایط تنش ناهمسان مورد بررسی قرار گرفته است، [۲۳] که نتایج حاصل بیانگر وابستگی مدول کشسانی در هر جهت ( $E_i$ ) به مؤلفه‌ی تنش در آن جهت ( $\sigma'_i$ ) بوده و نسبت تنش، اثر قابل ملاحظه‌ی در این کمیت داشته است و نیز با افزایش  $\sigma'_e$ ، اثر ناهمسانی تنش در مدول برشی بیشینه نیز رو به افزایش بوده است. در نسبت تخلخل  $e = 0.777$  ( $D_r = 50\%$ )، افزایش ضریب ناهمسانی تنش از  $\beta = 0$  تا  $\beta = 0.4$  در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین  $400$  و  $200$ ،  $40$  (kPa) به ترتیب افزایش  $5.7\%$ ،  $9.6\%$  و  $11.5\%$  مدول برشی بیشینه را به دنبال داشته است (شکل ۹). همچنین نتایج نشان می‌دهند که کاهش نسبت تخلخل (افزایش چگالی نسبی) موجب افزایش اثر ناهمسانی تنش در تغییرات مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر شده است، به طوری که در حالت  $kPa \sigma'_e = 40$

$$G_{max} = 12 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma'_c)^{0.25} \quad (4)$$

که در آن،  $\sigma'_c$  واحد kPa و  $G_{max}$  واحد MPa دارند.

مقایسه‌ی تغییرات مدول برشی بیشینه در مقابل فشار محدودکننده‌ی میانگین  $(G_{max} - \sigma'_c)$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی پژوهش حاضر (رابطه ۴) و همچنین روابط دیگر پژوهشگران برای نسبت تخلخل  $e = 0.713$  در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشتر روابط پیشنهادی پژوهشگران، تغییرات مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر در مقابل فشار محدودکننده‌ی میانگین را کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. روابط موجود براساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک‌های سیلیکاتی ارائه شده‌اند. ساختار خاک‌های کربناتی (مانند ماسه‌ی کربناتی بوشهر) متفاوت از خاک‌های سیلیکاتی است. شکل ذرات و زبری سطح ذرات از تفاوت این خاک‌ها هستند. تیرگوشه‌بودن و زبری سطح ذرات موجب افزایش مدول برشی بیشینه‌ی ماسه خواهد شد. به همین دلیل تفاوت رفتاری ماسه‌ی کربناتی مورد آزمایش با روابط موجود را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات و ساختار خاص ماسه‌های کربناتی در مقایسه با ماسه‌های سیلیکاتی نسبت داد.

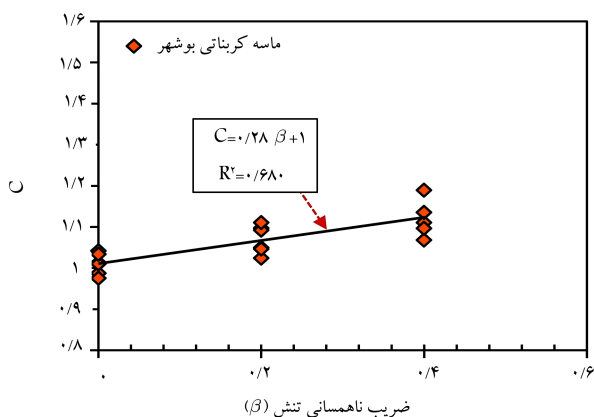
رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی سید و ادريس، [۶] تغییرات  $G_{max} - \sigma'_c$  ماسه‌ی کربناتی بوشهر را به مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. قابل توجه است که اختلاف روابط موجود با نتایج آزمایشگاهی بر روی ماسه‌ی کربناتی بوشهر و همچنین رابطه‌ی پیشنهادی پژوهش حاضر (رابطه ۴)، با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین افزایش یافته است (شکل ۷).

عملکرد روابط پیشنهادی پژوهشگران و همچنین رابطه‌ی ارائه‌شده در پژوهش حاضر (رابطه ۴)، در ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر با مقایسه‌ی مقادیر حاصل از روابط مذکور و مقادیر حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید در شرایط تحکیم همسان بر روی این خاک، در شکل ۸ نشان داده شده است.

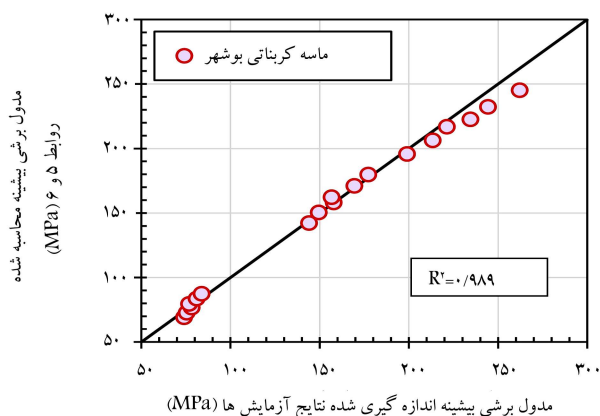
رابطه‌ی ایوازکی و همکاران، [۲۰] اگرچه براساس نتایج آزمایش‌های ستون تشدید بر روی ۱۱ نوع ماسه‌ی سیلیکاته ارائه شده است، اما بیشترین اختلاف در ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر را داشته است. رابطه‌ی سنتاکیس و همکاران، [۸] علی‌رغم لحاظ اثر دانه‌بندی در محاسبه‌ی مدول برشی بیشینه، مقادیر این کمیت را برای ماسه‌ی کربناتی بوشهر به مقدار قابل توجهی کمتر از نتایج آزمون‌های ستون تشدید ارائه داده است. رابطه‌ی کوکوشو، [۳] نسبت به سایر روابط، دقت بالاتری در ارزیابی  $G_{max}$  خاک مورد آزمایش دارد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش، دقت بالایی در پیش‌بینی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر دارد. اختلاف نتایج حاصل از روابط پیشین با نتایج مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات، و ساختار خاک‌های کربناتی و سیلیکاتی مرتبط دانست.

### ۳.۳. اثر ناهمسانی تنش بر $G_{max}$ و رابطه‌ی پیشنهادی

اثر ناهمسانی تنش بر مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین  $400$ ،  $200$ ،  $40$  (kPa) و  $\sigma'_c = 40$  و نسبت‌های تخلخل  $e = 0.777$ ،  $0.713$  در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش نسبت تنش برشی اولیه ( $\beta = 0$  تا  $\beta = 0.4$ )، مدول برشی بیشینه افزایش یافته است. این روند افزایشی با مطالعات دیگر پژوهشگران، [۲۲، ۲۳] بر روی اثر تنش ناهمسان در رفتار خاک مطابقت دارد. برخی پژوهشگران با انجام آزمایش‌های خمش



شکل ۱۰. تغییرات ضریب  $C$  در مقابل نسبت ناهمسانی تنش.



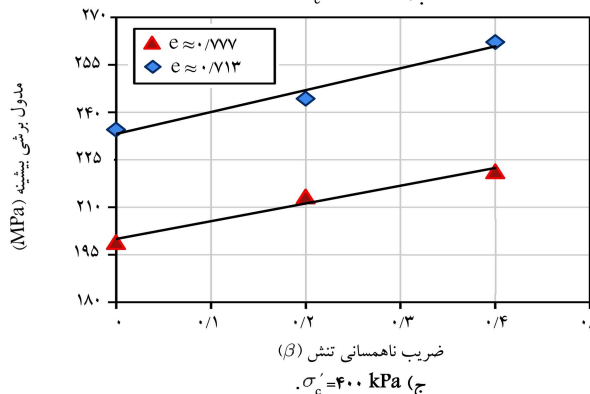
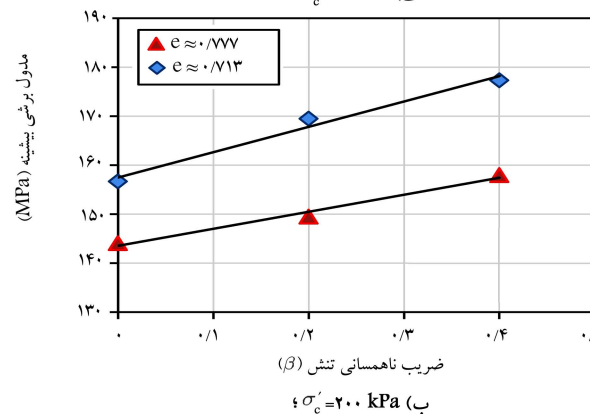
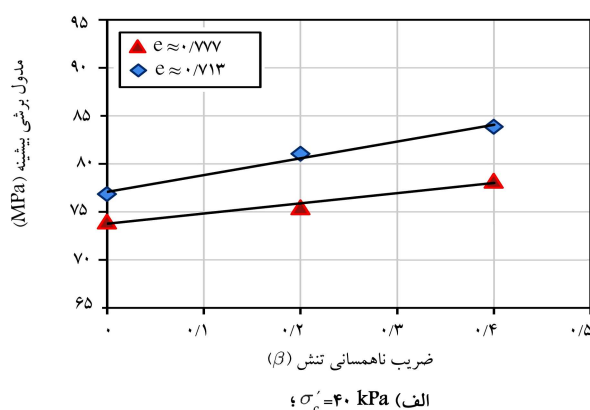
شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج مدول برشی بیشینه حاصل از آزمایش‌ها با نتایج حاصل روابط ۵ و ۶.

کربناتی بوشهر در شرایط همسان و ناهمسان (روابط ۵ و ۶) با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید و مقادیر مدول برشی بیشینه‌ی حاصل از روابط ۵ و ۶ در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، رابطه‌ی پیشنهادی دقت قابل قبولی در ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر در حالت همسان و ناهمسان دارد. بنابراین می‌توان جهت ارزیابی دقیق‌تر مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر برای استفاده در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ی، رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش را استفاده کرد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدول برشی بیشینه، یکی از کمیت‌های مهم و اساسی در حل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ی است. مرور مطالعات پیشین حاکی از آن است که روابط ارائه‌شده برای مدول برشی بیشینه براساس آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک‌های سیلیکاته حاصل شده است. براساس مطالعات زمین‌شناسی، مناطق زیادی از کره‌ی زمین پوشیده از خاک‌ها و رسوبات کربناتی است. بخش‌های زیادی از نواحی جنوبی کشورمان، که لرزه‌خیزی آن با بروز زلزله‌های بسیار در سال‌های اخیر اثبات شده است، پوشیده از خاک‌های کربناتی است. از این رو در این پژوهش، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر با انجام آزمایش‌های ستون تشدید مورد



شکل ۹. اثر ناهمسانی تنش در  $G_{max}$  ماسه‌ی کربناتی بوشهر.

افزایش ضریب ناهمسانی تنش از  $\beta = 0$  تا  $\beta = 0.4$  در نسبت‌های تخلخل  $e = 0.777$  و  $e = 0.713$  به ترتیب افزایش  $5.7\%$  و  $9.6\%$  در مقدار مدول برشی بیشینه را به همراه داشته است (شکل ۹الف).

برای انعکاس اثر ناهمسانی تنش در تغییرات مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر، ضریب  $C$  در رابطه‌ی ۴ لحاظ شده است (رابطه‌ی ۵). سپس این ضریب برای آزمایش‌های همسان و ناهمسان محاسبه شده است. اثر ناهمسانی تنش در تغییرات ضریب  $C$  در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ضریب  $C$  به صورت رابطه‌ی ۶ پیشنهاد می‌شود:

$$G_{max} = 12C \frac{(2717 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma'_c)^{0.25} \quad (5)$$

$$C = 0.28\beta + 1 \quad (6)$$

عملکرد رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش جهت ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی

ترتیب افزایش ۵/۷٪، ۹/۶٪ و ۱۱/۵٪ مدول برشی بیشینه را به دنبال داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که کاهش نسبت تخلخل (افزایش چگالی نسبی) موجب افزایش اثر ناهمسانی تنش در تغییرات مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر شده است، به طوری که در حالت  $\sigma'_e = 40 \text{ kPa}$ ، افزایش ضریب ناهمسانی تنش از  $\beta = 0$  تا  $\beta = 0.4$  در نسبت‌های تخلخل ۷۷۷/۰ و ۷۱۳/۰ به ترتیب افزایش ۵/۷٪ و ۹/۱٪ در مقدار مدول برشی بیشینه را به همراه داشته است.

براساس نتایج آزمایش‌ها در حالت همسان بر روی ماسه‌ی کربناتی بوشهر، ضرایب رابطه‌ی کلی مدول برشی بیشینه اصلاح شده است (رابطه‌ی ۴). مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های همسان با نتایج حاصل از روابط مطالعات پیشین بر روی خاک‌های سیلیکاته نشان داده است که روابط مذکور، قابلیت ارزیابی دقیق مقادیر مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر را ندارند. علت آن را می‌توان به تفاوت در نوع کانی، شکل ذرات، و ساختار خاک‌های کربناتی و سیلیکاته مرتبط دانست.

در ادامه، با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های ناهمسان تحکیم یافته، ضریبی (رابطه‌ی ۵) جهت انعکاس اثر ناهمسانی تنش در رابطه‌ی  $G_{max}$  اعمال شده است، تا رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش قابل تعمیم به شرایط تنش ناهمسان نیز باشد. مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی (رابطه‌ی ۵) با نتایج آزمایش‌های ستون تشدید در شرایط همسان و ناهمسان، نشانگر دقت بالای آن در ارزیابی مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر است. لذا این رابطه را می‌توان جهت ارزیابی  $G_{max}$  ماسه‌ی کربناتی بوشهر تحت شرایط تنش همسان و ناهمسان در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ی مورد استفاده قرار داد.

## تقدیر و تشکر

این پژوهش در راستای پروژه‌ی پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۳ و کد پروژه ۵۴۵ انجام شده است.

مطالعه قرار گرفته و اثر فشار محدودکننده‌ی میانگین و نسبت تخلخل بر مدول برشی بیشینه این خاک بررسی شده است. آزمایش‌ها در دو حالت همسان و ناهمسان انجام شده است، تا اثر شرایط تنش اولیه بر این کمیت مشخص شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین و کاهش نسبت تخلخل، مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر افزایش یافته است، که این روند تغییرات با مطالعات گذشته در تطابق است. نرخ تغییرات مدول برشی بیشینه با افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین کاهش یافته است، به طوری که در آزمایش‌های با چگالی نسبی  $e = 0.777$ ، افزایش فشار محدودکننده‌ی میانگین مؤثر از ۴۰ تا ۲۰۰ (kPa) و از ۲۰۰ تا ۴۰۰ (kPa) به ترتیب موجب افزایش ۹۴/۷٪ و ۳۸/۱٪ مدول برشی بیشینه شده است. نتایج بیانگر آن است که میزان تأثیر نسبت تخلخل در تغییرات مدول برشی بیشینه به میزان فشار محدودکننده‌ی میانگین بستگی داشته و با افزایش  $\sigma'_e$  اثر کاهش نسبت تخلخل در تغییرات  $G_{max}$  بیشتر شده است. اگرچه تغییر نسبت تخلخل از ۷۷۷/۰ تا ۷۱۳/۰ در فشار  $\sigma'_e = 40 \text{ kPa}$  تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مدول برشی بیشینه ماسه‌ی کربناتی بوشهر نداشته است، اما این کاهش نسبت تخلخل در فشارهای میانگین ۲۰۰ و ۴۰۰ (kPa) به ترتیب افزایش ۸/۸٪ و ۱۷/۹٪ در مدول برشی بیشینه این خاک را به دنبال داشته است.

مدول برشی بیشینه ماسه‌ی مورد آزمایش با افزایش ناهمسانی تنش افزایش یافته است. این روند افزایشی بیانگر وابستگی مدول برشی بیشینه به مؤلفه‌ی تنش در جهت اندازه‌گیری این کمیت است. براساس نتایج پژوهش حاضر، با افزایش  $\sigma'_e$  اثر ناهمسانی تنش در مدول برشی بیشینه رو به افزایش است. در نسبت تخلخل  $e = 0.777$  ( $D_r = 50\%$ )، افزایش ضریب ناهمسانی تنش از  $\beta = 0$  تا  $\beta = 0.4$  در فشارهای محدودکننده‌ی میانگین ۴۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ (kPa) به

## پانویس‌ها

1. maximum shear modulus
2. initial shear stress
3. resonant column
4. mean effective confining pressure
5. void ratio
6. stress anisotropy
7. X-ray diffraction
8. isotropic
9. anisotropic
10. back pressure

## منابع (References)

1. Jafarian, Y., Haddad, A. and Javdanian, H. "Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils", *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, **11**(1), pp. 89-100 (2015).

2. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall Inc., 670 p. (1996).
3. Kokusho, T. "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range", *Soils and Foundations*, **20**(2), pp. 45-60 (1980).
4. Ishihara, K., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press Inc. (1996).
5. Jafarian, Y., Ghorbani, A. and Ahmadi, O. "Simplified dynamic analysis to evaluate liquefaction-induced lateral deformation of earth slopes: A computational fluid dynamics approach", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **13**(3), pp. 555-568 (2014).
6. Seed, H.B. and Idriss, I.M., *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*, Technical Report, EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 82 p. (1970).
7. Bui, M., Clayton, C. and Priest, J. "Effects of particle shape on  $G_{max}$  of geomaterials", *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechni-*

- cal Engineering*, Thessaloniki, Greece, Paper No. 1536 (2007).
8. Senetakis, K., Anastasiadis, A. and Pitilakis, K. "The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands", *Geotech Testing Journal, ASTM*, **35**(6), pp. 964-980 (2012).
  9. Holmes, A., *Principles of Physical Geology*, Nelson, London, 730 p. (1978).
  10. Brandes, H.G. "Simple shear behavior of calcareous and quartz sands", *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**(1), pp. 113-126 (2011).
  11. Shahnazari, H. and Rezvani, R. "Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study", *Engineering Geology*, **159**, pp. 98-105 (2013).
  12. Jafarian, Y., Towhata, I., Baziar, M.H., Noorzad, A. and Bahmanpour, A. "Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **35**, pp. 13-28 (2012).
  13. Wang, Z., Luo, Y., Guo, H. and Tian, H. "Effects of initial deviatoric stress ratios on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in China", *Engineering Geology*, **143-144**, pp. 43-50 (2012).
  14. Srodon, J., Drits, V.A., McCarty, D.K., Hsieh, J.C. Eberl, D.D. "Quantitative X-ray diffraction analysis of clay-bearing rocks from random preparations", *Clays and Clay Minerals*, **49**(6), pp. 514-528 (2001).
  15. Skempton, A.W. "The pore pressure coefficients A and B", *Geotechnique*, **4**(4), pp. 143-147 (1954).
  16. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. "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**(10), pp. 1404-1418 (2009).
  17. Hardin, B.O. and Richart, F.E. "Elastic wave velocities in granular soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **89**(SM1), pp. 33-65 (1963).
  18. Drnevich, V.P. and Richart, F.E. "Dynamic prestraining of dry sand", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **96**(SM2), pp. 451-469 (1970).
  19. Iwasaki, I. and Tatsuoka, F. "Effects of grain size and grading on dynamic shear modulus of sands", *Soils and Foundations*, **38**(1), pp. 19-35 (1977).
  20. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading", *Soils and Foundations*, **18**(1), pp. 39-56 (1978).
  21. Yu, P.J. and Richart, J.F.E. "Stress ratio effects on the shear modulus of dry sands", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **110**(3), pp. 331-345 (1984).
  22. Hao, G. and Lok, T.M.H. "Study of shear wave velocity of macao marine clay under anisotropic stress condition", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE*, Beijing, China (12-17 October 2008).
  23. Gu, X.Q., Yang, J. and Huang, M. "DEM simulations of the small strain stiffness of granular soils: Effect of stress ratio", *Granular Matter*, **15**(3), pp. 287-298 (2013).