

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر اندازه دانه بر مدول برشی کرنش - کوچک خاک‌های دانه‌ای\*

محمد شریفی پور<sup>(۱)</sup> ابوالحسن شریفی<sup>(۲)</sup> امیر ریزه بندی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در محدوده کرنش‌های کوچک سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی یکی از پارامترهای مهم شناخت خواص دینامیکی خاک است. در این راستا موضوع شناخت تأثیر اندازه دانه‌ها خاک بر سرعت موج برشی یکی از مسائل مهم است. برر سی محققین در گذشته نشان‌دهنده تأثیر متفاوت اندازه دانه‌های خاک بر مدول برشی است. هدف این پژوهش بررسی اثرات طیف گسترده‌ای از اندازه دانه‌های روی مدول برشی در خاک‌های خشک شن و ماسه با استفاده از دستگاه المان خمشی تعبیه شده در سلول سه محوری است. نتایج نشان‌دهنده حساسیت مدول برشی به تغییرات اندازه دانه‌های خاک است، به طوری که در بازه‌ای از اندازه دانه‌های خاک با افزایش اندازه قطر دانه‌ها، مدول برشی افزایش و در بازه دیگر با افزایش اندازه قطر دانه‌ها مدول برشی کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی** سرعت موج برشی، خاک دانه‌ای، آزمایش المان خمشی، مدول برشی، رفتار کرنش کوچک.

## An Experimental Study on the Influences of Particle Size on Small-Strain Shear Modulus of Granular Soils

M. Sharifipour A. Sharifi A. Rizvandy

**Abstract** Under small strains, the shear-wave velocity ( $V_s$ ) and its resultant maximum shear modulus ( $G_{max}$ ) are important parameters in geotechnical engineering soil dynamics analyses. In this regard, the evaluation of the influences of soil particle size on the dynamic behavior of soils during wave propagation has been an important issue in geotechnical engineering. According to the relevant literature, the influences of grain size on shear wave velocity of soil were—completely different in various research studies. This research aims to experimentally examine the effects of a wider range of particle sizes, on maximum shear modulus in dry sandy soils, using a bender element apparatus embedded in a triaxial cell. The results indicated that maximum shear modulus of sand was considerably affected by changes in grain size so that in a particular range of grain size, shear modulus increased as the diameter of soil grains rose, while, in the other range, maximum shear modulus diminished with increasing grain diameter.

**Key Words** Shear Wave Velocity, Granular Soil, Bender Element Test, Maximum Shear Modulus, Small-Strain Behavior.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۳/۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۲/۲۵ می‌باشد.

Email: sharifipour@razi.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.  
 (۲) دانشجوی دوره دکتری خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.  
 (۳) دانشجوی دوره کارشناسی ارشد خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

## مقدمه

روش‌های زیادی جهت اندازه‌گیری خواص دینامیکی خاک وجود دارد. معمولاً این دسته‌بندی از لحاظ نحوه اندازه‌گیری به روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی تقسیم می‌شوند. پارامترهای محاسبه‌شده از روش‌های فوق را می‌توان مبنایی برای بیان خواص دینامیکی در کرنش‌های کوچک و بزرگ نامید.

مدول برشی یک پارامتر بسیار مهم در توصیف رفتار خاک در محدوده کرنش‌های کوچک و بزرگ است. همچنین سرعت موج برشی یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای تعیین مدول برشی است. سرعت موج برشی تابعی از عوامل مختلف نظیر ۱- خصوصیات فیزیکی ذرات، شامل: شکل ظاهری، دانه‌بندی و اندازه آن ۲- حالت قرارگیری ذرات، شامل: تخلخل، دانسیته ۳- خصوصیات مکانیکی ذرات، شامل: نقاط تماس دانه‌ها، تنش‌های همه‌جانبه و دیگر پارامترها است. [1]

رفتار کرنش کوچک خاک در بازه کرنش کمتر از  $10^{-5}$  تعریف می‌شود. جهت مطالعه خصوصیات دینامیکی خاک در محدوده کرنش‌های کوچک، از آزمایش‌های محلی و یا آزمایشگاهی استفاده می‌شود. [2] آزمایش‌های ستون تشدید و المان‌های خمشی به‌عنوان آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های انعکاس و انکسار لرزه‌ای، آنالیز طیفی موج‌ها سطحی، انتشار موج‌ها بین‌چاهی و درون‌چاهی به‌عنوان مهم‌ترین آزمایش‌های سایت یا برج‌ها مورد استفاده محققین است.

یکی از موارد قابل بحث، تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی در خاک و متعاقب آن مدول برشی است. همان‌طور که در رابطه پیشنهادی هاردین و ریچارد [3] برای مدول برشی مشاهده می‌شود (رابطه ۱)، ضریب  $A$  و  $n$  به عوامل مختلفی از جمله ضریب یکنواختی، اندازه و شکل دانه‌ها بستگی دارد.

$$G_{\max} = A \times f(e) \times \left(\frac{p'}{p_a}\right)^n \quad (1)$$

در این رابطه:  $p'$  فشار مؤثر،  $p_a$  فشار اتمسفر و

$f(e)$  تابع تخلخل خاک است.

محققین نظرهای متفاوتی در خصوص تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی و مدول برشی دارند. در ادامه به برخی از این دیدگاه‌ها اشاره می‌شود. آیواساکی و تاتسوکا با استفاده از آزمایش ستون تشدید اثر اندازه دانه‌های محلی ژاپن و ماسه توپورا را روی مدول برشی ماسه بررسی نمودند. نتایج حاکی از عدم وابستگی مدول برشی به اندازه دانه‌های خاک است [4].

دلیا و لنزو مدول برشی سه نمونه خاک در ایتالیا را اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان‌دهنده افزایش مدول برشی با افزایش اندازه دانه‌های خاک است [5].

شانگ یو لین و همکاران مدول برشی خاک‌های شنی تایوان در اندازه‌های مختلف را با استفاده از آزمایش‌های سه محوری دینامیکی بزرگ‌مقیاس، ستون تشدید و انتشار موج‌ها اندازه‌گیری و نشان داد، در تنش همه‌جانبه ثابت با افزایش قطر دانه‌های خاک، مدول برشی خاک افزایش می‌یابد [6].

منک و استوکونه با استفاده از دستگاه ستون تشدید دریافتند در تخلخل و فشار همه‌جانبه ثابت با افزایش اندازه میانگین دانه‌های خاک ماسه‌ای مقادیر مدول برشی نیز اندکی افزایش می‌یابد [7].

شریفی پور و دانو در سال ۲۰۰۶ با به‌کارگیری تکنیک المان خمشی در سلول سه محوری و انتشار موج‌ها در گوی‌های شیشه‌ای به اندازه ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر نشان دادند، با افزایش قطر گوی‌های شیشه‌ای، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد [8].

سهاپول و میورا مدول برشی ماسه توپورا و خاک-های آتش‌فشانی ژاپن را با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکلی و المان خمشی اندازه‌گیری نمودند. با این‌که اندازه متوسط دانه‌های خاک توهورو (خاک محلی) درشت‌تر از ماسه توپورا است، اما مدول برشی آن کمتر از ماسه توپورا محاسبه گردید [9].

هاردین و کالینسکی نسبت به اندازه‌گیری مدول

مختلف استفاده نمودند. در حالت تراکم هردو آزمایش المان خمشی و ستون تشدید تا اندازه دانه‌های ۱ میلی‌متر، مدول برشی کاهش نامحسوس (مخصوصاً تحت فشارهای همه‌جانبه کم) و پس از آن به صورت جزئی افزایش می‌یابد. در حالت تراکم متوسط تا ۱ میلی‌متر باز هم در هردو آزمایش المان خمشی و ستون تشدید مدول برشی به صورت جزئی کاهش و از آن به بعد در المان خمشی مدول برشی کاهش و در ستون تشدید مدول برشی افزایش می‌یابد. در حالت تراکم کم، در هردو آزمایش ستون تشدید و المان خمشی با افزایش اندازه قطر متوسط دانه‌ها، مدول برشی خاک کاهش می‌یابد.

گو و همکاران مقدار مدول برشی سه نوع ماسه خشک را با استفاده از دستگاه المان خمشی اندازه‌گیری کردند. نتایج حاکی از کاهش مدول برشی با افزایش قطر دانه‌ها در تنش‌های همه‌جانبه یکسان است [17].

کنگ و همکاران تأثیر عوامل مؤثر بر سرعت موج‌برشی (اندازه ذرات و تنش‌های اعمالی) را در سال ۲۰۱۴ بررسی و عنوان نمودند، با افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج‌برشی نیز افزایش می‌یابد [18].

لیو و یانگ تأثیر ریزدانه بر مدول برشی به وسیله دستگاه ستون تشدید و المان خمشی را روی ماسه تمیز توپورا و سیلیکات خردشده به همراه درصد‌های مختلف ریزدانه از ۵ تا ۳۰ درصد انجام دادند، نتایج منجر به کاهش مدول برشی با افزایش ریزدانه گردید [19].

چو و برن افزایش اندازه دانه‌های خاک را موجب کاهش میزان مدول برشی دانستند [20].

سنتاکیس و مادهوسدهان مدول برشی خاک‌های مختلف را با استفاده از المان خمشی اعلام نمودند، اندازه دانه‌ها روی مدول برشی مؤثر نیست [21].

پرادهان و یو مقدار سرعت موج‌ها برشی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از المان خمشی و روش المان گسسته اندازه‌گیری نمودند. در این مطالعه از سه نمونه دانه‌های سیلیکا، گوی‌های شیشه‌ای و خاک ماسه‌ای استفاده نمودند، نتایج تأثیر شکل، اندازه و نوع مصالح را روی

برشی خاک‌های مختلف (سنگ‌آهک شنی خردشده، شن رودخانه‌ای، ماسه اوتاوا، سنگ‌آهک ماسه‌ای خردشده و مخلوط ماسه-شن-سیلت) با استفاده از ستون تشدید اقدام نمودند. نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد، با افزایش اندازه قطر متوسط دانه‌های خاک مقدار مدول برشی بیشتر می‌شود [10].

اندازه‌گیری سرعت موج‌ها برشی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از دستگاه المان خمشی در سال ۲۰۰۵ توسط کیوون و چو حاکی از افزایش سرعت موج‌برشی با افزایش قطر دانه‌های خاک است [11].

بارتاک و سینگ ۰۰۷ با استفاده از دستگاه المان خمشی افزایش اندازه دانه‌های ماسه خشک را موجب کاهش مدول برشی دانستند [12].

طبق نتایج اعلامی پاتل و همکاران در سال ۲۰۰۸ افزایش قطر گوی‌های شیشه‌ای ۰،۵، ۱،۵ و ۲،۵ میلی‌متری در دستگاه المان خمشی موجب کاهش سرعت موج‌برشی می‌شود [13].

ایکاسونوی و همکاران مقدار سرعت موج‌برشی ماسه توپورا و شن‌هایم را با استفاده از آزمایش المان خمشی اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاکی از عدم تغییر سرعت موج‌برشی با افزایش اندازه دانه‌های خاک است [14].

پاتل و همکاران باز هم با استفاده از دستگاه المان خمشی سرعت موج‌برشی سه نمونه خاک با اندازه ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر، در دو حالت خشک و اشباع اندازه‌گیری کردند. نتایج حاکی از کاهش سرعت موج‌برشی با افزایش قطر دانه‌ها در هر دو حالت خشک و اشباع است [13].

ویچمن و تریانتافیلیدیس عنوان نمودند با تغییر اندازه دانه‌های خاک در تخلخل و ضریب یکنواختی ثابت، مدول برشی خاک ثابت می‌ماند [15].

یانگ و گو [16] وابستگی مدول برشی به اندازه دانه‌های خاک را با استفاده از المان خمشی و ستون تشدید در تراکم‌های مختلف خاک بررسی نمودند. در این مطالعه از گوی‌های شیشه‌ای با اندازه قطرهای

مکانیکی به بارهای الکتریکی و بالعکس را دارند. در یک سلول المان خمشی و کششی یک جفت المان پیزو الکتریک استفاده می‌شود. یک المان پیزو الکتریک به‌عنوان فرستنده موج برشی و همچنین گیرنده موج فشاری و دیگری به‌عنوان فرستنده موج فشاری و گیرنده موج برشی به کار گرفته می‌شود. دستگاه المان خمشی از قطعه‌ها و کاربردهای زیر تشکیل شده است:

- ۱- سلول فشار: برای نگهداری نمونه و اعمال فشار همه-جانبه
  - ۲- تیغه‌های فرستنده و گیرنده موج: برای ارسال و دریافت موج‌ها برشی و فشاری.
  - ۳- دستگاه سازنده تابع موج‌ها: این دستگاه برای ایجاد انواع موج‌های سینوسی، مربعی، مثلثی و ... به‌صورت پیوسته و تک‌پالس با قابلیت تعیین فرکانس‌های مختلف و طول موج‌های دلخواه استفاده می‌شود.
  - ۴- دستگاه اوسیلوسکوپ: این دستگاه جهت نمایش موج‌های دریافتی و نیز تجزیه و تحلیل بصری موج و محاسبه زمان سفر موج به کار می‌رود.
  - ۵- تقویت‌کننده موج‌ها: از آنجایی که در اثر میرایی، موج‌ها دچار کاهش دامنه می‌شوند لازم است به وسیله این دستگاه دامنه موج‌های تشدید شده تا به‌خوبی توسط دستگاه گیرنده درک شوند.
- دستگاه سه محوری مورد استفاده متعلق به شرکت استارنت آلمان و مجموعه المان خمشی ساخت شرکت آبرفت پی آژند ایران است. در شکل (۱) دستگاه المان خمشی که روی دستگاه سه محوری نصب گردیده مشاهده می‌شود.

سرعت موج برشی را نشان می‌دهد [22]. پایان و همکاران ضمن اصلاح فرمول مرجع [2] اثر شکل و اندازه دانه‌ها را روی مقدار مدول برشی مؤثر دانستند [23].

دستاوردهای محققین مذکور تقریباً به چهار بخش مجزاً به‌صورت ذیل قابل دسته‌بندی است:

- ۱- با افزایش اندازه دانه‌های خاک، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد.
  - ۲- با افزایش اندازه دانه‌های خاک، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.
  - ۳- سرعت موج برشی مستقل از در اندازه دانه‌های خاک است.
  - ۴- در یک محدوده از اندازه دانه‌ها، با افزایش قطر متوسط دانه‌های خاک سرعت موج برشی افزایش و در محدوده دیگر با افزایش آن‌ها سرعت موج برشی در خاک کاهش می‌یابد.
- وجه تمایز این پژوهش با سایر پژوهش‌ها بررسی دامنه گسترده‌ای از اندازه دانه‌ها به همراه بررسی ساختار و شکل فیزیکی آن‌ها با استفاده از دستگاه المان خمشی است. در پژوهش‌های گذشته تنها به اندازه خاصی محدود بوده و با توجه به اهمیت مدول برشی به‌عنوان مبنای محاسبات نظری و عملی و جایگاه ویژه‌ی این پارامتر در ژئوتکنیک، رویکرد این پژوهش رسیدن به وضعیتی بهینه از نظر فنی و اقتصادی برای دست یافتن به مدول برشی دقیق‌تر و متناسب برای دانه‌بندی‌های مختلف خاک است.

### دستگاه مورد استفاده، مصالح و روش‌ها دستگاه آزمایش

استفاده از آزمایش المان‌های خمشی در راستای بررسی رفتار دینامیکی خاک‌ها گسترش یافته است. المان‌های خمشی دارای دو قطعه پیزوالکتریکی متصل به یک صفحه فلزی مرکزی هستند. با توجه به خصوصیات پیزو الکتریکی، این قطعه‌ها توانایی تبدیل ارتعاش‌های

دارای بازه مشخصی هستند، در نمودارها از یک اندازه به عنوان نماینده رنج مورد نظر استفاده شده است. موضوع در ستون آخر جدول (۱) ذکر شده است.

### روش انجام آزمایش

در بررسی‌ها نسبت تخلخل و رفتار خاک بستگی زیادی به روش نمونه‌سازی و بافت خاک دارد. همگن و یکسان بودن تخلخل خاک نقش مهمی در نمونه‌سازی دارد، لذا باید تمهیداتی اتخاذ شود که بتوان به بیشترین میزان همگنی در نمونه‌سازی دست یافت. در آزمایشگاه روش‌های مختلفی از قبیل: روش‌های بارش خشک، تراکم مرطوب، رسوب‌گذاری در آب و تراکم کاهش‌یافته وجود دارد.

در روش نمونه‌سازی آزمایش‌ها با ریختن هر لایه و کوبش آن لایه پایینی کمی متراکم‌تر می‌گردد، در انتهای کار چگالی نمونه مدل ساخته‌شده با عمق متغیر و مدل غیر همگن می‌شود. راه‌حل جلوگیری از این مشکل استفاده از روش تراکم کاهش‌یافته ارائه شده توسط لاد است [24]. در تحقیق حاضر این روش استفاده‌شده است. وقتی خاک در چند لایه متراکم می‌شود، تراکم لایه-های بعدی باعث افزایش دانسیته خاک موجود در زیر آن لایه می‌گردد. تراکم لایه دوم باعث تراکم بیشتر لایه اول و تراکم لایه سوم باعث افزایش تراکم لایه‌های اول و دوم می‌شود. لذا جهت ساخت نمونه‌های با تراکم یکنواخت، روش تراکم کاهش‌یافته مطرح شده است. در این روش به‌طور کلی هر لایه با دانسیته کمتر از آنچه در نهایت مورد نظر است، کوبیده می‌شود.

با توجه به رابطه (۱) تخلخل خاک نقش اساسی و مهمی در تعیین مدول برشی خاک در حالت کرنش کوچک ایفا می‌کند. در این پژوهش تمامی نمونه‌ها حتی‌الامکان با تخلخلی یکسان و به‌صورت همگن ساخته شده‌اند. برای تمام اندازه‌دانه‌ها مقادیر تخلخل کمینه و بیشینه اندازه‌گیری و برای کلیه نمونه‌ها تخلخل میانگین  $e_0 = 0.8$  در نظر گرفته شد.

نمونه‌های ساخته شده تحت تنش همه‌جانبه در گام‌های ۵۰ کیلوپاسکال تا تنش نهایی ۵۰۰ کیلوپاسکال



شکل (۱): دستگاه المان خمشی مورد استفاده

### مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده ماسه‌ی رودخانه‌ای مربوط به بخش دینور واقع در شمال شرقی شهرستان کرمانشاه کشور ایران بوده که به‌وسیله الک‌های استاندارد ASTM تجزیه و دسته‌بندی گردید. دانه‌ها پس از تجزیه در ۱۰ دسته با قطرهای مشخص مطابق جدول (۱) و شکل (۲) طبقه‌بندی شدند.

جدول (۱): دسته‌بندی دانه‌ها

ردیف	نام دسته	اندازه دانه‌ها (mm)	سایز معرف (mm)
۱	R1	۰/۰-۱۵/۳۰	۰/۲۳
۲	R2	۰/۰-۳۰/۴۲	۰/۳۶
۳	R3	۰/۰-۴۲/۶۰	۰/۵۱
۴	R4	۰/۰-۶۰/۸۵	۰/۷۳
۵	R5	۰/۱-۸۵/۱۸	۱/۰۲
۶	R6	۱/۱-۱۸/۴۰	۱/۲۹
۷	R7	۱/۲-۴۰/۱۰۰	۱/۷۰
۸	R8	۲/۲-۰۰/۳۶	۲/۱۸
۹	R9	۲/۴-۳۶/۷۵	۳/۵۶
۱۰	R10	۴/۹-۷۵/۵۳	۷/۱۴

برای هر دسته از ذرات با اندازه مشخص، به‌صورت جداگانه آزمایش‌های توده‌ی ویژه و تخلخل بیشینه و کمینه و المان خمشی انجام که نتایج در جدول شماره (۲) نشان داده شده است.

با توجه به این‌که اندازه‌های قطر خاک بین دو الک

قرار داده و سرعت موج برشی در فرکانس های مختلف ساخته شده جهت انجام آزمایش نشان داده شده است. برای هر گام اندازه گیری شد. در شکل (۳) یک نمونه



شکل (۲): تصویر نمونه های ماسه با استفاده از میکروسکوپ نوری (2000X)

جدول (۲): مشخصات مصالح و نمونه های مورد استفاده

تعداد نمونه های تکراری	تراکم نسبی	توده ویژه	تخلخل مورد آزمایش	دامنه تخلخل		دامنه وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)		قطر متوسط (میلی متر)	نام گروه
				کمینه	بیشینه	حداقل	حداکثر		
۳	۱۰۲	۲/۶۵۹	۰/۸	۰/۸	۱/۱۲	۱/۲۵	۱/۴۷	۰/۲۲۵	R1
۳	۸۷/۸	۲/۶۵۹	۰/۸	۰/۷۶	۱/۰۶	۱/۲۹	۱/۵۱	۰/۳۶۳	R2
۳	۷۶	۲/۶۴۸	۰/۸	۰/۷۴	۱	۱/۳۳	۱/۵۳	۰/۵۱۳	R3
۳	۶۸/۳	۲/۶۵۴	۰/۸	۰/۷۲	۰/۹۸	۱/۳۴	۱/۵۵	۰/۷۲۵	R4
۳	۶۲/۱	۲/۶۴۹	۰/۸	۰/۷۱	۰/۹۶	۱/۳۶	۱/۵۶	۱/۰۱۵	R5
۳	۴۵/۷	۲/۶۴۹	۰/۸	۰/۶۷	۰/۹۱	۱/۳۹	۱/۵۹	۱/۲۹	R6
۳	۵۲/۴	۲/۶۳۸	۰/۸	۰/۶۹	۱/۹۳	۱/۳۷	۱/۵۷	۱/۷	R7
۳	۴۹/۸	۲/۲۴۵	۰/۸	۰/۶۹	۰/۹۱	۱/۳۸	۱/۵۷	۲/۱۸	R8
۳	۲۲/۳	۲/۲۴۶	۰/۸	۰/۶۳	۱/۸۵	۱/۴۳	۱/۶۲	۳/۵۶	R9
۳	۳۷	۲/۶۵۹	۰/۸	۰/۶۷	۰/۸۸	۱/۴۱	۱/۵۹	۷/۱۴	R10

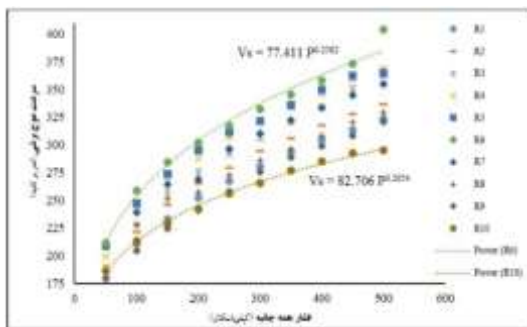
برشی و طولی ارائه می‌دهد. با استفاده از این روش به راحتی می‌توان سیگنال‌های حوزه‌ی زمان را به حوزه‌ی فرکانس تبدیل نمود. تجزیه‌ی سیگنال‌ها دسته‌ای از موج-های هارمونیک با دامنه و فرکانس مشخص را تولید می‌نماید. به‌طور ایده‌آل حداکثر تابع همبستگی متقابل باید بر اولین قله‌ی مثبت سیگنال دریافت شده که بیشترین مقدار را هم دارد، منطبق باشد.

برای رسیدن به نتیجه مطلوب و کاهش خطای آزمایش هر ترکیب چند بار تکرار گردید.

### نتایج و بحث

در این تحقیق بنا بر هدف مقایسه‌ای نتایج تمامی نمونه‌ها با تخلخل ثابت و یکسان ( $e_0=0/8$ ) است. از آنجایی که برای هر دسته از دانه‌ها مقادیر تخلخل بیشینه و کمینه یکسان نیست. تراکم نسبی نمونه‌ها نیز با یکدیگر برابر نبوده و هر دسته از دانه‌ها دارای تراکم نسبی متفاوت اما نسبت تخلخل یکسانی می‌باشند.

تغییر مدول برشی ماکزیمم برای ۱۰ نوع دانه‌بندی مختلف از قطر ۰/۲۲۵ میلی‌متر تا ۷/۱۴ میلی‌متر و از فشار ۵۰ کیلوپاسکال تا ۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴): تغییرات مدول برشی با فشار همه‌جانبه برای نمونه‌های مختلف

همان‌گونه که از شکل (۴) استنباط می‌گردد، برای تمامی اندازه‌ی دانه‌ها با افزایش فشار همه‌جانبه مدول برشی افزایش می‌یابد. علت عمده آن بیشتر شدن نقاط تماسی



شکل (۳): نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش

اندازه‌گیری‌ها به وسیله دستگاه المان خمشی در سلول سه محوری با استفاده از یک منبع مولد سیگنال و یک اوسیلوسکوپ صورت گرفته است. زمان سفر موج ( $\Delta t$ ) به روش همبستگی متقابل از روش‌های حوزه‌ی زمان است. از طریق فرمول  $v = L_{tt}/\Delta t$  سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و میزان مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) را از طریق رابطه  $G_{max} = \rho V_s^2$  محاسبه گردید.

روش‌های محاسبه زمان سفر موج به زیر بخش‌های: الف) روش شروع تا شروع، ب) روش نقطه اوج تا نقطه اوج و ج) روش تابع همبستگی متقابل تقسیم می‌شوند. روش شروع تا شروع رایج‌ترین روش تفسیر موج است. این روش اولین انحراف مثبت سیگنال دریافت شده از دامنه صفر را به عنوان زمان ورود موج برشی ( $t_0$ ) در نظر می‌گیرد. از ایرادهای اصلی این روش، عدم معلوم بودن نقطه‌ی سیگنال ورودی به علت اثر حوزه نزدیک است.

در روش نقطه اوج تا نقطه اوج زمان سفر موج برشی به عنوان فاصله‌ی زمانی بین قله‌ی مثبت سیگنال ارسال شده و اولین قله بزرگ روی سیگنال دریافت شده تعریف می‌شود. با توجه به اثر پراکندگی ناشی از هندسه‌ی نمونه و جذب انرژی طبیعت خاک، سیگنال دریافت شده با افزایش فاصله ضعیف می‌شود. این امر در تفسیر این روش مشکل ایجاد می‌کند.

روش تابع همبستگی متقابل، برگرفته شده از روش-های تجزیه و تحلیل معمولی سیگنال‌ها؛ برای تحلیل نتایج آزمایش المان خمشی در خاک‌ها معرفی و استفاده شد. روش همبستگی متقابل به عنوان یک روش ریاضی، تخمین قابل قبولی را در خصوص زمان سفر موج‌های

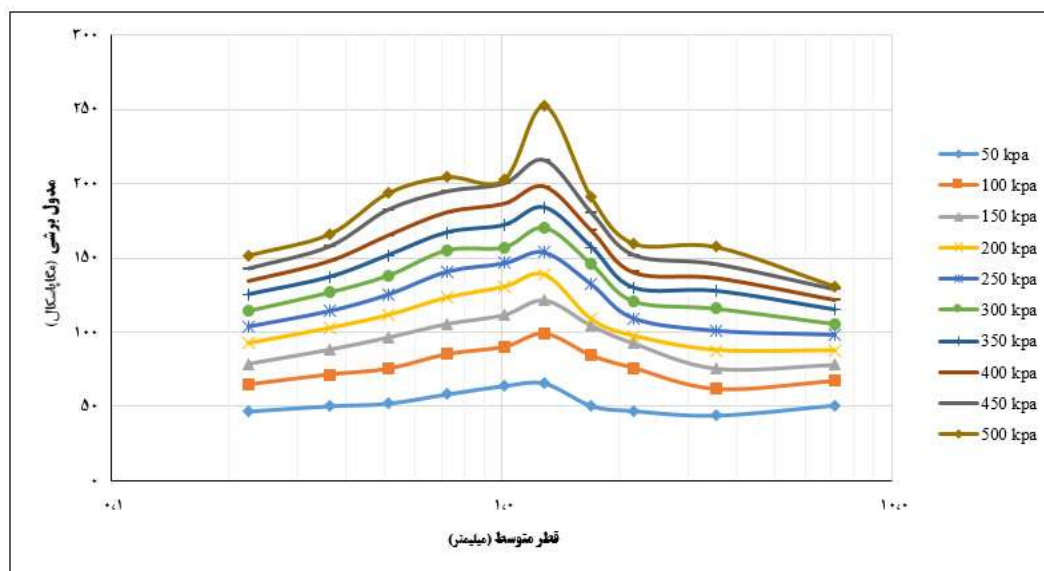
از عوامل تأثیرگذار در این پدیده می‌توان به کاهش قفل و بست دانه‌ها و اصطکاک داخلی اشاره کرد. برخلاف انتظار علیرغم افزایش اندازه دانه‌ها و در نتیجه افزایش قفل بست بین آن‌ها، سرعت موج برشی کاهش یافته که این امر ناشی از حذف دانه‌های پرکننده و طولانی شدن مسیر انتشار موج است.

در جدول (۳) نتایج این تحقیق با یافته‌های دیگر محققین مقایسه گردیده است. در بعضی دامنه‌ها این نتایج با نتایج دیگران مطابقت داشته و در دامنه‌ی دیگر تناقض دارد. نتایج این پژوهش با یافته‌های منک و استوکروه (۲۰۰۳)، شریفی‌پور و دانو (۲۰۰۶)، هاردین و کالینسکی (۲۰۰۵) و کنگ و همکاران (۲۰۱۴) تا اندازه ۱/۲۹ میلی‌متر از نظر رفتاری مطابقت و با افزایش اندازه دانه‌ها مدول برشی نیز افزایش می‌یابد؛ و همچنین نتایج بارتاک و سینگ (۲۰۰۷)، پاتل و همکاران (۲۰۰۹)، یانگ و گو (۲۰۱۳) و لیو و یانگ (۲۰۱۴) حاکی از کاهش مدول برشی با افزایش اندازه دانه‌ها است که نتایج این پژوهش در شاخه نزولی نمودار با یافته‌های آن‌ها مطابقت دارد اما در قسمت صعودی با نتایج آنان در تضاد است.

و اصطکاک میان دانه‌ای ذرات در فشارهای بالاتر است. در شکل (۵) نتایج تغییرات سرعت موج با افزایش اندازه دانه‌های خاک مشاهده می‌شود. در بازه‌ای از ابعاد با افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج برشی افزایش و در بازه دیگر سرعت موج برشی کاهش یافته است. به طوری که برای قطر ۲۲۵/۰ م.م تا ۱/۲۹ م.م با افزایش قطر متوسط دانه‌ها سرعت موج برشی افزایش و از قطر ۱/۲۹ م.م تا قطر ۷/۱۴ م.م با افزایش قطر متوسط دانه‌ها سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.

در شاخه صعودی شکل (۵) از اندازه با افزایش قطر دانه‌ها برای تمامی فشارهای همه‌جانبه سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که می‌دانیم این افزایش اندازه میانگین دانه‌ها موجب کاهش ضریب یکنواختی و به دنبال آن باعث افزایش سرعت موج برشی و مدول برشی می‌شود. از دیگر توجهات این افزایش می‌توان به افزایش نقاط تماسی بین دانه‌ها و تئوری تماسی هرتز اشاره کرد [8].

در شاخه نزولی شکل (۵) با افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج برشی و مدول برشی کاهش می‌یابد.



شکل (۵): تغییرات سرعت موج برشی نسبت به ابعاد دانه‌ها در فشارهای همه‌جانبه مختلف



جدول (۳): مقایسه کلی نتایج این پژوهش با یافته‌های دیگر محققین

منک و استوکونه ۲۰۰۳	D(mm)	۰/۳۳	۲/۶	-	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۱۰۳/۹۶	۱۴۱/۵۵	-	-	-	-	-	-	-	-
هاردین و کالینسکی ۲۰۰۵	D(mm)	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۹۴	۳/۶	۷/۹	-	-	-	-
	Gmax	۳۴۸	۴۳۰/۶۹	۴۶۳/۷۶	۶۷۲/۲۳	۷۷۳/۳۸	۸۳۶/۰۲	-	-	-	-
بارتاک و سینگ ۲۰۰۷	D(mm)	۰/۳۳	۰/۶۵	۱/۲۵	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۱۳۱/۶	۱۱۸/۱۳	۹۲/۲۲	-	-	-	-	-	-	-
پاتل و همکاران ۲۰۰۸	D(mm)	۰/۵	۱/۵	۲/۵	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۲۰۸/۳	۱۴۷/۷۳	۱۱۰/۹۸	-	-	-	-	-	-	-
شریفی پور و دانو ۲۰۰۶	D(mm)	۱	۲	۳	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۱۲۴/۱	۱۴۱/۷	۱۶۶/۴	-	-	-	-	-	-	-
یانگ و گو ۲۰۱۳	D(mm)	۱/۱۹۵	۰/۹۲	۱/۷۵	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۲۱۶	۱۹۹/۱۱	۱۷۹/۵۵	-	-	-	-	-	-	-
لیو و یانگ ۲۰۱۴	D(mm)	۰/۲۴۶	۰/۴۲۷	۰/۹۶	-	-	-	-	-	-	-
	Gmax	۱۳۱	۱۲۰/۷۵	۸۱/۱۲	-	-	-	-	-	-	-
کنگ و همکاران ۲۰۱۴	D(mm)	۰/۰۶	۰/۲۶	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۷۳	۳	۶	-	-	-
	Gmax	۵۰/۲۶	۱۸۵/۱۲	۱۴۰/۵۲	۱۳۰/۰۸	۱۴۷/۹۸	۱۵۲/۱۴	۲۷۸/۱۸	-	-	-
تحقیق حاضر	D(mm)	۰/۲۲۵	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۷۲۵	۱/۰۱۵	۱/۲۹	۱/۷۰	۲/۱۸	۳/۵۶	۷/۱۴
	Gmax	۱۰۳/۸۲	۱۱۴/۰۴	۱۲۵/۲۲	۱۳۹/۷۲	۱۴۲/۳۴	۱۴۶/۵۶	۱۲۸/۶۳	۱۰۹/۲۷	۱۰۰/۱	۱۰۱/۹

### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در قطر متوسط دانه‌ها از ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی‌متر با افزایش قطر، مدول برشی افزایش و برای قطر متوسط دانه‌ها از ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی‌متر با افزایش قطر مدول برشی کاهش می‌یابد. کاهش مدول برشی درشت‌دانه‌ها ناشی از حذف دانه‌های پرکننده و طولانی شدن مسیر انتشار موج است.

این تغییر مدول برشی در دامنه‌های مختلف به دو صورت افزایشی و کاهش خود را نشان می‌دهد. به طوری که بیشترین نرخ افزایش مدول برشی برای فشار ۵۰۰ کیلوپاسکال به میزان ۵۶/۸۸ درصد و بیشترین نرخ

کاهش مدول برشی برای همین فشار به میزان ۴۳/۲۲ درصد است.

مقایسه نتایج این تحقیق با یافته‌های پژوهش‌های گذشته حاکی از آن است که تحقیق حاضر در دامنه گسترده‌تری انجام گردیده است، مطابق جدول شماره (۳) نتایج این تحقیق با یافته‌های دیگر محققین مقایسه گردیده است و همان‌گونه که دیده می‌شود، از نظر سیر صعودی یا نزولی بودن مقدار مدول برشی با تغییر اندازه دانه‌ها، در بعضی دامنه‌ها این نتایج با نتایج دیگران مطابقت داشته و در دامنه‌ی دیگر تناقض دارد. از دلایل اختلاف این تحقیق با برخی محققین دیگر می‌توان به نوع

و به نظر می‌رسد که جنس ذرات، شکل ذرات و ویژگی‌های سطوح آن‌ها نیز می‌توانند نقش‌هایی را ایفا کنند. بررسی نتایج این تحقیق حاکی از تأثیر تغییر اندازه دانه‌ها روی مدول برشی خاک است. مدول برشی  $G_{max}$  مبنای بسیاری از محاسبات نظری، آزمایشگاهی و طراحی‌های ژئوتکنیکی مانند محاسبات تغییرشکل‌ها، پایداری شیب‌ها و ارزیابی روانگرایی و تحلیل پاسخ حرکات زمین و بسیاری از اندازه‌گیری‌ها است؛ بنابراین نتایج حاصله از این پژوهش می‌تواند به‌خوبی در زمینه‌های ذکر شده مورد استفاده قرار گیرد.

در انجام آزمایش‌ها فرضیه‌ها و محدودیت‌های مانند اعمال محیط الاستیک و رفتار خطی برای خاک، عدم توانایی دستگاه در اندازه‌گیری دانه‌های درشت شنی و همچنین تغییر تخلخل یکسان نمونه‌ها در هنگام فشار همه‌جانبه وجود داشت.

دانه‌های خاک (مصنوعی یا طبیعی بودن دانه‌ها) و اختلاف در میزان تخلخل خاک اشاره نمود.

اکثر محققین دامنه محدودی از اندازه دانه‌های خاک را برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها روی سرعت موج برشی و یا مدول برشی مورد مطالعه قرار داده‌اند. عدم مطالعه دامنه گسترده از ذرات مانع از اظهار نظر قطعی در خصوص تأثیر اندازه دانه‌ها روی سرعت موج برشی یا مدول برشی خاک شده است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه المان خمشی نسبت به بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها در دامنه وسیعی از آن‌ها بر روی سیگنال‌های دریافتی، محتوی فرکانس سیگنال‌های دریافتی و سرعت موج برشی در فشار همه‌جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال اقدام شد.

در این پژوهش به تأثیر اندازه دانه‌ها پرداخته شده است اما صرفاً این عامل به‌تنهایی نقش تعیین‌کننده نداشته

## مراجع

1. Kramer, S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, New York, (1996).
2. Atkinson, J. H., & Salfors, G., "Experimental Determination of Soil Properties", Proc. 10<sup>th</sup> ECSMFE, Folorance, Vol. 3, pp. 915-956, (1991).
3. Hardin, B. O., & Richart, F. E., "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", *J. Soil Mech. Found. Engng Div.*, Vol. 89, No. SM1, pp. 39-56, (1963).
4. Iwasaki, T., & Tatsuka, F., "Effect of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sand", *Soil and foundations*, Vol. 17, No. 3, (1977).
5. Delia, B., & Lanzo, G., "Laboratory and Field Determinations of Small-Strain Shear Modulus of Natural Soil Deposits", *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, (1996).
6. Lin, S-Y., Lin, S. P., Luo, H. S., & Juang, C. H., "Shear Modulus and Damping Ratio Characteristics of Gravelly Deposits", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 3, pp. 638-651, (2000).
7. Menq. F. Y., & Stokoe. K. H., "Linear Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils from Large-Scale Resonant Tests". Di Benedetto et al., editor, *Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 63-71, (2003).
8. Sharifipour, M. & Dano, C., "Effect of Grains Roughness on Waves Velocities in Granular Packings",

- First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures – Hammamet 3-5 May Tunisia, (2006).
9. Sahaphol, T., & Miura, S., "Shear Moduli of Volcanic Soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 157–165, (2004).
  10. Hardin, B. O., & Kalinski, M. E., "Estimating the Shear Modulus of Gravelly Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, pp. 867-875, (2005).
  11. Kwon, T. H., & Cho, G. C., "Smart Geophysical Characterization of Particulate Materials in a Laboratory", *Smart Structures and Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 217-233, (2005).
  12. Bartake, P. P., & Singh, D. N., "Studies on the Determination of Shear Wave Velocity in Sands", *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 41–49, (2007).
  13. Patel, A., Bartake, P. P., & Singh, D. N., "An Empirical Relationship for Determining Shear Wave Velocity in Granular Materials Accounting for Grain Morphology" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 1, pp. 1–10, (2008).
  14. Wicaksono, R. I., Tsutsum, Y., Takeshi, S., Koseki, J., & Reiko, K., "Laboratory Wave Measurements on Toyoura Sand and Hime Gravel", *Bulletin of ERS*, No. 41, (2008).
  15. Wichtmann, T., & 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*, Vol. 135, No. 10, pp. 1404-1418, (2009).
  16. Yang, J., & GU, X., "Shear Stiffness of Granular Material at Small Strains: does it depend on grain size? ", *Geotechnique*, Vol. 63, No. 2, pp. 165–179, (2013).
  17. Gu, X., Yang, J., & Huang, M., "Laboratory Measurements of Small Strain Properties of Dry Sands by Bender Element", *Soils and Foundations*, Vol. 53, No.5, pp. 735–745, (2013).
  18. Kang, X., Bate, B., & Ge, L., "Characterization of Shear Wave Velocity and Its Anisotropy in Uniform Granular Materials", *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, GSP 234 © ASCE, pp. 2029-2041, (2014).
  19. Liu, X., & Yang, J., "Shear Wave Velocity and Shear Modulus of Silty Sand", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, pp. 907-910, (2014).
  20. Choo, H., & Burns, S. E., "Effect of Overconsolidation Ratio on Dynamic Properties of Binary Mixtures of Silica Particles", *Soil Dynamic sand earthquake engineering* Vol. 60, pp. 44-50, (2014).
  21. Senetakis, K., & Madhusudhan, B. N., "Dynamics of Potential Fill–Backfill Material at Very Small Strains" *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, pp. 1196–1210, (2015).
  22. Pradhan, A., & Yu, X., "Bender Element Testing and Discrete Element Modeling of Shear Wave in Granular Media", *IFCEE 2015*, San Antonio, Texas, the University of Texas, pp. 1993-2002, (2015).

23. Payan, M., Khoshghalb, A., Senetakis, K., & Khalili, N., "Effect of Particle Shape and Validity of Gmax Models for Sand: A critical review and a new expression", *Computers and Geotechnics*, Vol. 72, pp. 28-41, (2016).
24. Ladd, R., "Preparing Test Specimens Using Undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23, (1978).