

### چکیده

در محدوده کرنش‌های کوچک ( $\epsilon \leq 10^{-3}\%$ )، سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و متعاقب آن مدول برشی حداکثر ( $G_{max}$ ) یکی از مؤلفه‌های اساسی برای انجام محاسبات ژئوتکنیکی و تحلیل دینامیکی خاک‌ها می‌باشد. تأثیر اندازه دانه‌ها در هنگام انتشار امواج بر رفتار دینامیکی خاک، یکی از مسائل مهم و مورد بحث محققین است. در گذشته تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی، معمولاً در دامنه محدودی از اندازه دانه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه نتایج این تحقیقات، تأثیرهای متفاوت اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی را نشان می‌دهد، اما نتیجه‌ای قطعی از تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی ارائه نگردیده است. در این تحقیق به روش آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه المان خمشی، تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی در دامنه وسیعی از اندازه دانه‌های خاک ماسه‌ای خشک، تحت فشارهای همه‌جانبه از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال در دستگاه سه‌محوری بررسی شد. به کمک الگ‌های استاندارد ASTM خاک ماسه‌ای در ۱۰ گروه تفکیک شد. از هر گروه، نمونه‌های سه‌محوری به روش تراکم کاهش‌یافته و با رعایت نسبت تخلخل یکسان تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت موج برشی به اندازه‌ی دانه‌ها وابسته است، به طوری که در قطر متوسط دانه‌ها از ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی‌متر با افزایش قطر، سرعت موج برشی افزایش و برای قطر متوسط دانه‌ها از ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی‌متر با افزایش قطر سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** سرعت موج برشی، خاک دانه‌ای، آزمون المان خمشی، مدول برشی، رفتار کرنش کوچک.

## بررسی وابستگی سرعت موج برشی به اندازه دانه‌های خاک ماسه‌ای

ابوالحسن شریفی

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه رازی

محمد شریفی پور (نویسنده مسئول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه رازی  
 sharifipour@razi.ac.ir

### ۱- مقدمه

کننده آرایش دانه‌ها و نقاط تماس ذرات خاک می‌باشد [۱]. سرعت موج برشی در خاک‌ها، یک پارامتر مهم برای برآورد پاسخ دینامیکی خاک‌ها و همچنین یک شاخص مهم در تعیین مقاومت روانگرایی خاک‌های مستعد روانگرایی می‌باشد [۲-۴].

از طرفی رابطه پیشنهادی هاردین و ریچارد برای مدول برشی به صورت رابطه (۲) می‌باشد که در آن ضرایب  $A$  و  $n$  می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله ضریب یکنواختی، اندازه متوسط و شکل دانه‌ها بستگی داشته باشد [۵].

$$G_{max} = A \times f(e) \times \left( \frac{p'}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

مدول برشی یک پارامتر بسیار مهم در توصیف رفتار دینامیکی خاک‌ها می‌باشد. از طرفی سرعت موج برشی یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای تعیین مدول برشی است. رابطه کلاسیک تعیین مدول برشی بر اساس سرعت موج برشی در محدوده کرنش‌های کوچک ( $\epsilon \leq 10^{-3}\%$ ) به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

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

که در آن  $\rho$  دانسیته نسبی و  $V_s$  سرعت متوسط انتشار امواج برشی در توده خاک است. سرعت موج برشی تابعی از خصوصیات فیزیکی، حالت قرارگیری و خصوصیات مکانیکی ذرات و همچنین بیان

شریفی پور و همکاران [۱۲] با به کارگیری تکنیک المان خمشی و انتشار امواج در نمونه‌های سه‌محوری از گوی‌های شیشه‌ای با قطر متوسط ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر نشان دادند، با افزایش قطر گوی‌های شیشه‌ای سرعت موج برشی نیز افزایش می‌یابد.

سهاپول و میورا [۱۳] مدول برشی ماسه توپورا و خاک‌های آتش‌فشانی ژاپن را با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و المان خمشی اندازه‌گیری نمودند، آنها نشان دادند، با اینکه اندازه متوسط دانه‌های خاک محلی توهورو<sup>۱</sup> درشت‌تر از ماسه توپورا<sup>۲</sup> می‌باشد، اما مدول برشی آن به مراتب کمتر از ماسه توپورا است. همچنین بارتاک و سینگ [۳] با استفاده از دستگاه المان خمشی آزمایش‌هایی بر روی سه نوع ماسه خشک انجام دادند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش اندازه‌ی متوسط دانه‌ها، مدول برشی کاهش می‌یابد. پاتل و همکاران [۱۴] نیز سرعت موج برشی را در مجموعه دانه‌های شیشه‌ای با اندازه‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که با افزایش اندازه قطر گوی‌های شیشه‌ای، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد. در این راستا گو و همکاران [۱۵] 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 می‌باشد. همچنین چو و برنز [۱۶] افزایش اندازه دانه‌های خاک را موجب کاهش میزان مدول برشی دانستند.

برخی محققین نیز عامل اندازه دانه‌های خاک را در تغییرات مدول برشی مؤثر ندانسته‌اند، از آن جمله ایواساکی و تاتسوکا [۱۷] با انجام آزمایش‌های متعدد ستون تشدید بر روی خاک دانه‌ای تمیز نشان دادند، مدول برشی به اندازه دانه‌های ماسه وابستگی ندارد. در این زمینه ویچمن و تریانتافیلیدیس [۱۸] عنوان نمودند در تخلخل و ضریب یکنواختی ثابت، مدول برشی با تغییر قطر دانه‌های خاک ثابت می‌ماند. سنتاکیس و مادوسودان [۱۹] نیز مدول برشی خاک‌های مختلف را با استفاده از دستگاه المان خمشی محاسبه نمودند. نتایج حاکی از آن است که عامل تخلخل تأثیر زیادی بر مقدار مدول برشی دارد ولی عامل اندازه دانه‌ها

در این رابطه:  $p'$  فشار مؤثر،  $p_a$  فشار اتمسفر و  $f(e)$  تابع تخلخل خاک می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خواص دینامیکی خاک وجود دارد. آزمون‌های ستون مرتعش و المان خمشی به عنوان آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های انعکاس و انکسار لرزه‌ای، تحلیل طیفی امواج سطحی، انتشار امواج درون‌چاهی به عنوان مهم‌ترین آزمون‌های صحرایی یا برج‌مورد استفاده محققین می‌باشد.

بر اساس معادله (۱) با اندازه‌گیری سرعت موج برشی توده خاک می‌توان مدول برشی ساختمان ذرات خاک را تعیین نمود. در این زمینه والتون [۶] معادله مدول برشی ذرات کروی شکل هم‌اندازه را بررسی نمود. ژونگ و جیان-سین [۷] برای تعیین مدول برشی تابع توزیع تصادفی تماس بین ذرات در حالت ایزوتروپیک را معرفی کردند. بر اساس فرضیه تئوری دینامیک ذرات در حالت الاستیک، چانگ و همکاران [۸] نشان دادند که حد بالای مدول برشی ذرات دانه‌ای در تماس با همدیگر هنگامی است که تمامی ذرات در تماس با یکدیگر تحت کرنش‌های کوچک واقع شوند. به علاوه، آنها نشان دادند که حد پایین مدول برشی ذرات در تماس با یکدیگر در حالت استاتیکی خواهد بود. لین و همکاران [۹] مدول برشی خاک‌های شنی را به کمک آزمایش‌های سه‌محوری دینامیکی بزرگ‌مقیاس، ستون تشدید و انتشار امواج در سایت محاسبه نمودند. نتایج حاکی از آن است که در تنش همه‌جانبه ثابت با افزایش قطر دانه‌های خاک، مدول برشی افزایش می‌یابد. در همین راستا، منک و استوکونه [۱۰] با استفاده از دستگاه ستون تشدید آزمایش‌هایی بر روی پنج گروه شن و ماسه سست، متوسط و متراکم فاقد ریزدانه انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه‌ی میانگین دانه‌ها، مقادیر مدول برشی به صورت جزئی مخصوصاً در نسبت تخلخل‌های کم افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۵ هاردین و کالینسکی [۱۱] مدول برشی خاک‌های مختلف را با استفاده از ستون تشدید بزرگ‌اندازه‌گیری کرد. نتایج نشان داد که برای خاک‌های یکنواخت با افزایش قطر دانه‌ها مدول برشی افزایش می‌یابد.

پرادهان و یو [۲۱] سرعت امواج برشی در خاک‌های دانه‌ای را با استفاده از المان خمشی اندازه‌گیری نمودند. در این مطالعه از نمونه‌های دانه‌ای سیلیکا، گوی‌های شیشه‌ای و خاک ماسه‌ای استفاده نمودند، آنها نشان دادند که سرعت موج برشی متأثر از شکل، اندازه و نوع مصالح می‌باشد. همین روند نیز در مطالعات پایان و همکاران [۲۲] با اصلاح فرمول مرجع [۵] مشاهده می‌شود. نتایج تحقیقات گذشته در خصوص تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر مدول برشی ( $G_0$ ) تحت کرنش‌های کوچک در جدول (۱) آمده است. با بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۱)، دستاورد محققین در چهار بخش مجزا و گاهی متضاد به صورت زیر قابل دسته‌بندی است:

- ۱- با افزایش اندازه دانه‌ها، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش اندازه دانه‌ها، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.
- ۳- سرعت موج برشی مستقل از اندازه دانه‌های خاک می‌باشد.
- ۴- در یک محدوده از اندازه دانه‌ها، با افزایش قطر متوسط دانه‌ها سرعت موج برشی افزایش و در محدوده دیگر رفتار معکوس است.

نمی‌تواند در تغییر مقدار مدول برشی مؤثر باشد. علاوه بر موارد فوق نتایج دیگری نیز در این مورد ارائه شد، از جمله یانگ و گو [۲۰] وابستگی مدول برشی به اندازه دانه‌های خاک در تراکم‌های مختلف را با استفاده از دستگاه المان خمشی و ستون تشدید بررسی نمودند. در این مطالعه از گوی‌های شیشه‌ای با قطرهای ۰/۱۹۵، ۰/۹۲ و ۱/۷۵ میلی‌متر استفاده نمودند. نتایج حاکی از آن است که در حالت متراکم، در هر دو آزمایش المان خمشی و ستون تشدید، مدول برشی از قطر ۰/۱۹۵ تا ۱ میلی‌متر کاهش نامحسوس (مخصوصاً تحت فشارهای همه‌جانبه کم) و از قطر ۱ میلی‌متر بیشتر به صورت جزئی افزایش می‌یابد. در حالت تراکم متوسط از قطر ۰/۱۹۵ تا ۱ میلی‌متر باز هم در هر دو آزمایش بندر المنت و ستون تشدید، مدول برشی به صورت جزئی کاهش و از آن به بعد در المان خمشی مدول برشی کاهش و در ستون تشدید افزایش می‌یابد. در حالت تراکم کم، در هر دو آزمایش ستون تشدید و المان خمشی با افزایش قطر متوسط دانه‌ها، مدول برشی کاهش می‌یابد.

جدول (۱): نتایج بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها بر مدول برشی ( $G_{max}$ ) تحت کرنش‌های کوچک.

نتایج	مشخصات مصالح			دستگاه آزمایش	محققین
	ضریب یکنواختی	قطر متوسط (میلی‌متر)	نام مصالح		
افزایش قطر ذرات موجب افزایش مدول برشی می‌شود	۱/۲	۱۲/۷-۵۰/۸	شن	سه محوری	لین و همکاران [۹]
	-	۰/۳۳-۱۷/۸	ماسه و شن	ستون تشدید	منک و استوکوتنه [۱۰]
	-	۰/۰۵-۷/۹	ماسه و شن	ستون تشدید	هاردین و کالینسکی [۱۱]
افزایش قطر ذرات موجب کاهش مدول برشی می‌شود	-	۳ و ۲، ۱	گوی شیشه‌ای	المان خمشی	شریفی پور و دانو [۱۲]
	۱/۴-۱/۹۷	۰/۳۲-۵/۱	ماسه و شن	سه محوری	سافول و میورا [۱۳]
	۱/۴۱ و ۱/۶۷	۰/۲۹-۱/۹۵	ماسه	المان خمشی	بارتاک و سینگ [۳]
	۱/۳۹-۱/۴۵	۰/۵-۳	گوی شیشه‌ای	المان خمشی	پاتل و همکاران [۱۴]
	-	۰/۲۱۶-۰/۸۴	ماسه	ستون تشدید و المان خمشی	گو و همکاران [۱۵]
قطر ذرات خاک روی مقدار مدول برشی اثر ندارد	۱/۳-۱/۸	۰/۰۱-۰/۷۲	ماسه	المان خمشی	جو و بورنز [۱۶]
	۱/۵	۱/۶-۳/۲	ماسه	ستون تشدید	ایواساکی و تاتسوکا [۱۷]
	۱/۰۳-۱۲/۵	۰/۱-۶	ماسه	ستون تشدید	ویچمن و تریانتالیفیدیس [۱۸]
تغییرات ناچیز است	۱/۲۱-۱/۲۵	۱/۳۳-۱۰/۱	ماسه	ستون تشدید و المان خمشی	سنتاکیس و مادهوسدهان [۱۹]
اندازه دانه‌ها روی مقدار مدول برشی خاک مؤثر است (بدون ذکر نوع تأثیر)	۱/۲۱-۱/۲۵	۰/۲-۱/۷۵	ماسه	ستون تشدید و المان خمشی	یانگ و گو [۲۰]
	۱/۱۸-۸/۲۲	۲/۸-۳	دانه سیلیکا و شیشه‌ای	المان خمشی	پرادهان و یو [۲۱]
	۱/۱۸-۸/۲۲	۰/۲۴-۱/۹۴	ماسه	ستون تشدید	پایان و همکاران [۲۲]

همه جانبه، تیغه‌های فرستنده و گیرنده‌ی امواج، دستگاه سازنده‌ی توابع مختلف امواج و دستگاه اوسیلوسکوپ جهت نمایش امواج می‌باشد.



شکل (۱): (۱) دستگاه سازنده‌ی موج؛ (۲) دستگاه سه‌محوری دیجیتال همراه سلول سه‌محوری؛ (۳) مجموعه تیغه‌های دستگاه المان خمشی؛ (۴) دستگاه اوسیلوسکوپ.

در این مطالعه، موج سینوسی با محدوده فرکانس ۵ تا ۱۲ کیلوهرتز و دامنه ۲۲ میلی‌ولت توسط دستگاه تولید کننده موج در نمونه‌های ماسه منتشر شد. در آزمایش‌های تجربی، زمان تأخیر موج دریافتی ناشی از اتصالات سیم‌کشی بین اجزای المان خمشی مطابق شکل (۲) محاسبه و در نتایج مورد توجه قرار گرفته است [۲۴]. شایان ذکر است به‌منظور محاسبه دقیق فاصله نوک تا نوک تیغه‌های المان خمشی و تأثیر آن بر اندازه‌گیری سرعت موج برشی در تمامی مراحل آزمایش جابه‌جایی‌های عمودی نمونه‌ها توسط سیستم کنترل دیجیتال سه‌محوری ضبط و محاسبه گردید [۱۵، ۲۵-۲۹].

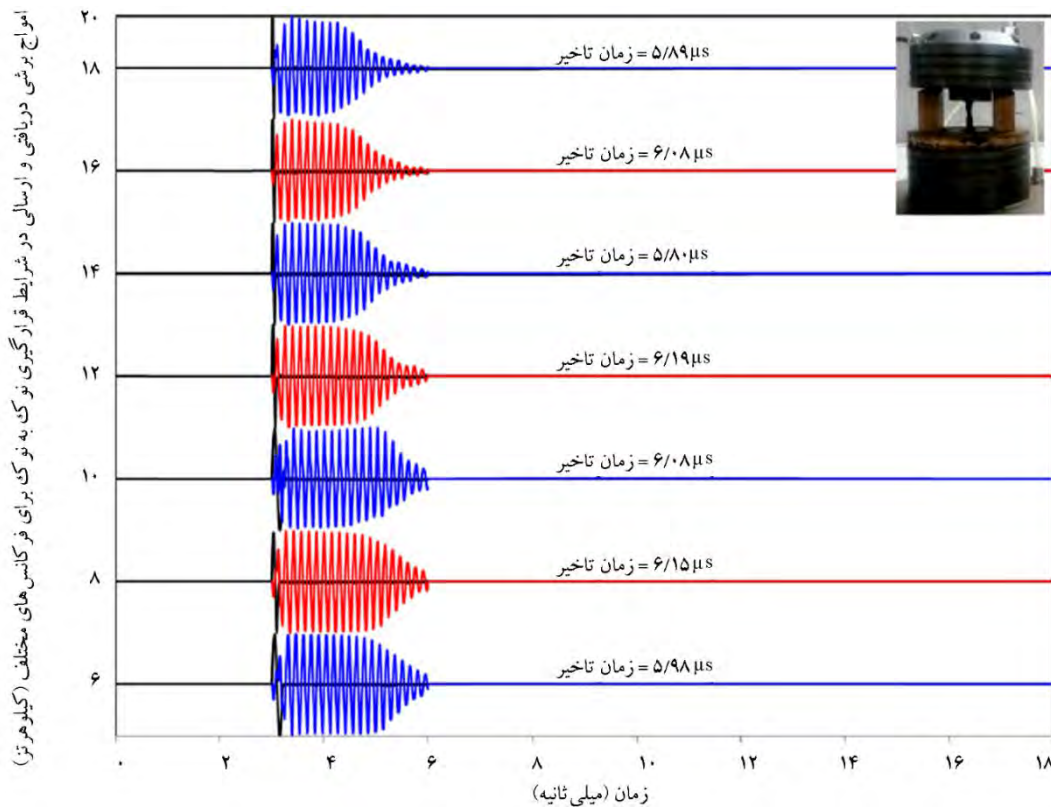
دستگاه سه‌محوری می‌تواند فشار همه‌جانبه قابل کنترل را به‌صورت دیجیتالی تا ۲۰۰۰ کیلو پاسکال ایجاد کند. به‌منظور جلوگیری از القاء الکترومغناطیسی در حین ارسال امواج، از سیستم اتصال گسترده مجموعه دستگاه سه‌محوری و المان خمشی به زمین استفاده گردید. علاوه بر این نرم‌افزار گرافیکی جهت دقت در مشاهده و تحلیل امواج ارسالی و دریافتی به کار گرفته شد.

در جدول (۱) مشخصات مصالح مورد بررسی توسط محققین آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، آزمایش‌ها بر روی دامنه محدودی از اندازه دانه‌های خاک صورت گرفته است و در برخی تحقیقات نیز از مصالح مصنوعی استفاده شده است. با این حال، اگرچه اکثر نتایج وابستگی سرعت موج برشی و همچنین مدول برشی به دانه‌های خاک را گزارش نموده‌اند، اما بنا بر دلایل ذکر شده نمی‌توان در خصوص نحوه وابستگی اظهار نظر قطعی نمود. لذا در این تحقیق به‌منظور شناخت بیشتر تأثیر اندازه دانه‌ها بر سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی، آزمایش‌های المان خمشی روی طیف وسیعی از اندازه دانه‌های خاک انجام شد. برای این کار، ابتدا خاک ماسه‌ای طبق استاندارد ASTM در ۱۰ گروه جداسازی شدند. سپس با تهیه نمونه‌های سه‌محوری از گروه‌های ده‌گانه، آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج برشی تحت فشار همه‌جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال (به‌ازای هر ۵۰ کیلو پاسکال) انجام شد. در ادامه بر اساس مدل پیشنهادی هوانگ و همکاران [۲۳] دلایل توجیهی تأثیر اندازه دانه‌ها بر سرعت موج برشی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- دستگاه مورد استفاده، مصالح و روش‌های انجام آزمایش

### ۲-۱- دستگاه آزمون

در دو دهه اخیر، استفاده از آزمون المان‌های خمشی جهت اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج در خاک‌ها از استقبال خوبی برخوردار شده است. المان‌های خمشی از دو قطعه پیزو الکتریک تشکیل شده که یکی جهت ارسال و دیگری برای دریافت موج می‌باشد. با توجه به خصوصیات پیزو الکتریکی این قطعات، توانایی تبدیل ارتعاشات مکانیکی به بارهای الکتریکی و بالعکس را دارند. در این تحقیق سعی بر آن است که تأثیر اندازه ذرات بر روی سرعت موج برشی یک نوع خاک ماسه‌ای بررسی شود. برای این منظور از یک دستگاه سه‌محوری دیجیتال مجهز به دستگاه المان خمشی استفاده شد. مجموعه دستگاه المان خمشی مطابق شکل (۱) شامل سلول فشار جهت اعمال فشار



شکل (۲): اندازه‌گیری زمان‌های تأخیری در شرایط قرارگیری مستقیم نوک به نوک تیغه‌های بندر المنت در فرکانس‌های مختلف [۲۴].

جدول (۲): مشخصات فیزیکی گروه‌های ده‌گانه ماسه تجزیه شده توسط

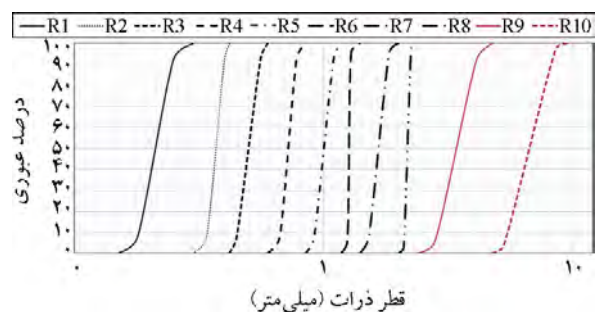
الک‌های استاندارد (ASTM).

نام گروه	محدوده اندازه دانه‌ها (میلی‌متر)	شماره الک (#)	حداقل قطر متوسط (میلی‌متر)	ضریب یکنواختی	ضریب خمیدگی
R1	۰/۳-۰/۱۵	۵۰-۱۰۰	۰/۲۲۵	۱/۱۹	۰/۹۳
R2	۰/۴۲-۰/۳	۴۰-۵۰	۰/۳۶۳	۱/۱۶	۰/۹۳
R3	۰/۶-۰/۴۲	۳۰-۴۰	۰/۵۱۳	۱/۱۱	۱/۰۲
R4	۰/۸۵-۰/۶	۲۰-۳۰	۰/۷۲۵	۱/۰۶	۰/۹۷
R5	۱/۱۸-۰/۸۵	۱۶-۲۰	۱/۰۱۵	۱/۲۱	۰/۹۶
R6	۱/۴۰-۱/۱۸	۱۴-۱۶	۱/۲۹	۱/۰۲	۱
R7	۲/۰-۱/۴۰	۱۰-۱۴	۱/۷	۱/۱۱	۰/۹۸
R8	۲/۳۶-۲/۰	۸-۱۰	۲/۱۸	۱/۰۵	۱
R9	۴/۷۵-۲/۳۶	۴-۸	۳/۵۶	۱/۲۸	۰/۹۵
R10	۹/۵۳-۴/۷۵	۳/۸-۴	۷/۱۴	۱/۲۷	۰/۹۷

## ۲-۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده ماسه رودخانه دینور واقع در شمال شرقی

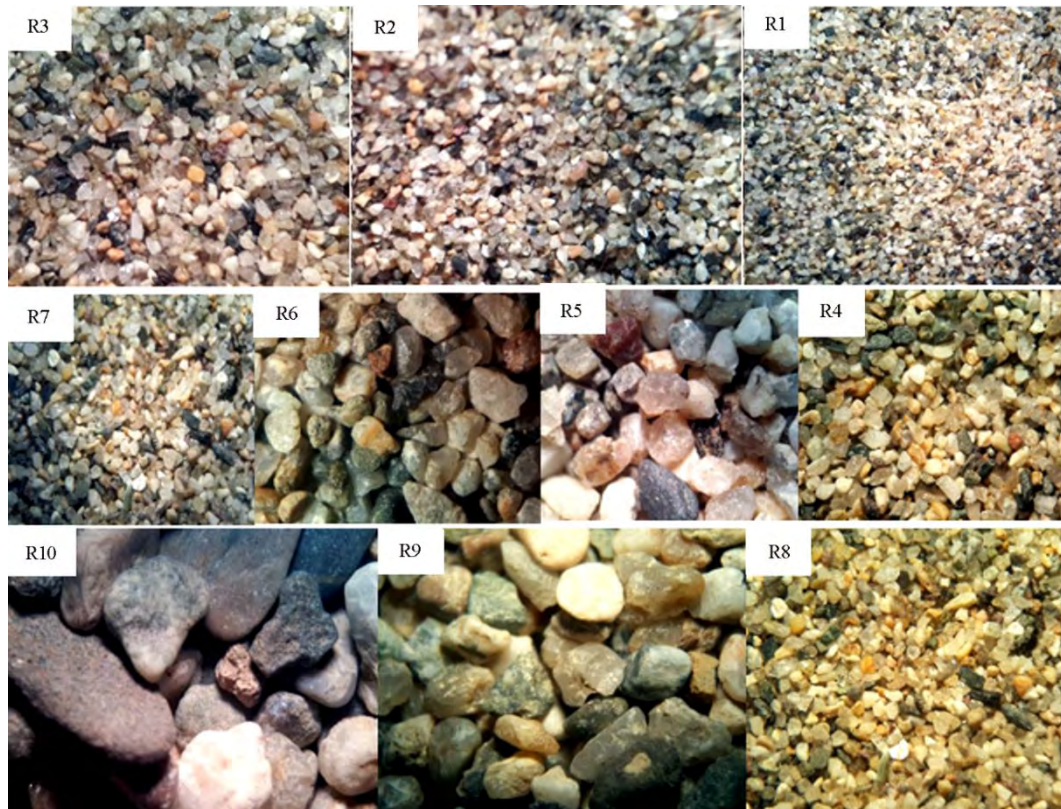
کرماتشاه است که به وسیله الک‌های استاندارد (ASTM) تجزیه و در ۱۰ گروه با ابعاد مشخص مطابق جدول (۲) و شکل (۳) طبقه‌بندی شدند. شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری (2000X) از ذرات ماسه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اندازه‌های قطر دانه‌های خاک بین دو الک دارای بازه مشخصی هستند، در نمودارها از قطر میانگین (d50) به‌عنوان نماینده گروه استفاده شده است.



شکل (۳): منحنی توزیع اندازه ذرات دانه‌های ماسه مورد استفاده در این تحقیق.

ضریب تخلخل کمینه و بیشینه تعیین شد. برای آنکه امکان مقایسه فراهم شود، کلیه نمونه‌های خاک با تخلخل یکسان و برابر  $0/8$  که برای همه نمونه‌های خاک قابل دستیابی می‌باشد، ساخته شدند. در جدول (۳) مشخصات فیزیکی خاک‌ها در گروه‌های ده گانه آورده شده است.

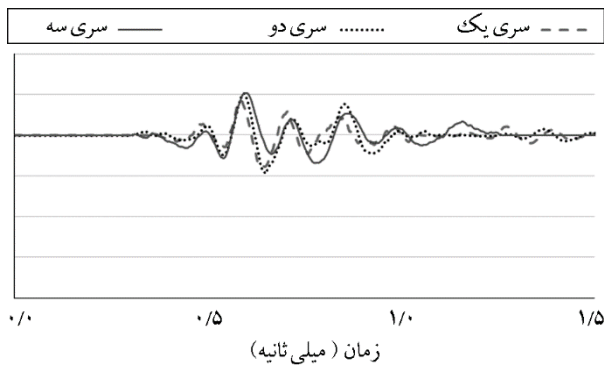
با توجه به رابطه (۲)، تخلخل نقش اساسی و مهمی را در تعیین مدول برشی کرنش کوچک خاک ایفا می‌کند. به همین دلیل در این پژوهش سعی گردید که تمامی نمونه‌ها تا حد امکان با تخلخلی یکسان و به صورت همگن ساخته شوند. لذا برای تمام ابعاد دانه‌ها، مقادیر



شکل (۴): تصویر نمونه‌های ماسه با استفاده از میکروسکوپ نوری (200X).

جدول (۳): مشخصات مصالح و نمونه‌های مورد استفاده.

تعداد نمونه‌های 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	۱R
۳	۸۷/۸	۲/۶۵۹	۰/۸	۰/۷۶	۱/۰۶	۱/۲۹	۱/۵۱	۰/۳۶۳	۲R
۳	۷۶	۲/۶۴۸	۰/۸	۰/۷۴	۱	۱/۳۳	۱/۵۳	۰/۵۱۳	۳R
۳	۶۸/۳	۲/۶۵۴	۰/۸	۰/۷۲	۰/۹۸	۱/۳۴	۱/۵۵	۰/۷۲۵	۴R
۳	۶۲/۱	۲/۶۴۹	۰/۸	۰/۷۱	۰/۹۶	۱/۳۶	۱/۵۶	۱/۰۱۵	۵R
۳	۴۵/۷	۲/۶۴۹	۰/۸	۰/۶۷	۰/۹۱	۱/۳۹	۱/۵۹	۱/۲۹	۶R
۳	۵۲/۴	۲/۶۳۸	۰/۸	۰/۶۹	۱/۹۳	۱/۳۷	۱/۵۷	۱/۷	۷R
۳	۴۹/۸	۲/۲۴۵	۰/۸	۰/۶۹	۰/۹۱	۱/۳۸	۱/۵۷	۲/۱۸	۸R
۳	۲۲/۳	۲/۲۴۶	۰/۸	۰/۶۳	۱/۸۵	۱/۴۳	۱/۶۲	۳/۵۶	۹R
۳	۳۷	۲/۶۵۹	۰/۸	۰/۶۷	۰/۸۸	۱/۴۱	۱/۵۹	۷/۱۴	۱۰R



شکل (۶): سیگنال‌های دریافتی نمونه R9 تحت فشار همه‌جانبه ۲۵۰ کیلو پاسکال بعد از سه بار تکرار آزمایش.

### ۳- روش‌های مختلف تخمین زمان سفر موج

سرعت موج بر اساس نسبت طول مسیر حرکت موج به زمان سفر موج (L/T) محاسبه می‌شود [۲۵، ۲۸]. طول سفر موج در المان خمشی را برابر فاصله نوک تیغه فرستنده موج تا نوک تیغه گیرنده موج در نظر می‌گیرند [۲۹]. به همین منظور در این تحقیق، هر گونه تغییر در فاصله بین تیغه‌های المان خمشی که ممکن است ناشی از تغییر حجم نمونه به علت اعمال فشار همه‌جانبه باشد، به‌طور مستمر و در هر مرحله از فشار همه‌جانبه ثبت می‌شود. به هر حال، تعیین دقیق زمان سفر موج در المان خمشی بین محققین مختلف به علت عدم قطعیت و سیستم‌های مختلف المان خمشی متفاوت است [۱۵، ۲۸-۳۲]. توضیح دقیق‌تر اینکه یک موج برشی تولید شده در المان خمشی معمولاً با یک موج ناخواسته فشاری که در اثر تحریک دانه‌های مجاور تیغه تولید می‌شوند همراه است. این موضوع تشخیص دقیق زمان دریافت موج برشی را پیچیده می‌کند. تأثیر این پدیده در ادبیات مربوط به المان خمشی به‌عنوان اثر حوزه نزدیک<sup>۳</sup> نام برده می‌شود [۳۳-۳۴]. به‌طور کلی در اثر پدیده حوزه نزدیک، زمان دقیق رسیدن موج برشی به علت حضور امواج فشاری قابل تشخیص نیست. علاوه بر این باید در اینجا اشاره کرد که اثر حوزه نزدیک یک رخداد وابسته به فرکانس است و می‌توان تأثیرات آن را با تغییر فرکانس کاهش داد [۲۹]. پیش از این، مطالعات متعددی به‌منظور مشخص کردن ریشه‌ها و اثرات حوزه نزدیک در آزمایش‌های المان خمشی

### ۲-۳- روش انجام آزمایش

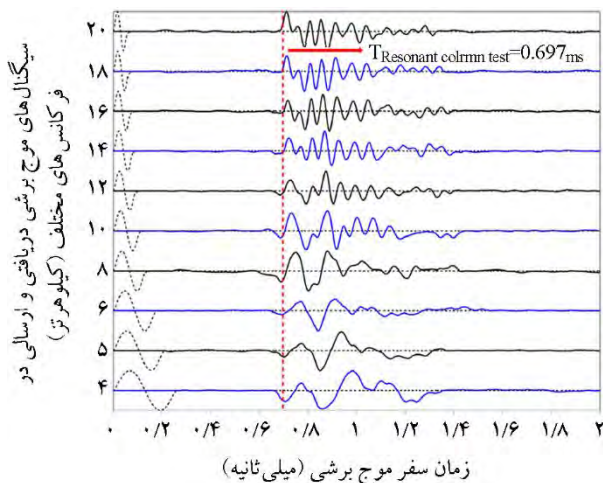
از آنجایی که همگن بودن و حفظ تخلخل نقش مهمی در نمونه‌سازی دارد، باید تمهیداتی اتخاذ شود که بتوان تا حد امکان به نمونه‌های همگن دست یافت. در آزمایشگاه روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های بارش خشک، تراکم مرطوب، رسوب‌گذاری در آب و تراکم کاهش یافته وجود دارد. در این تحقیق از روش تراکم کاهش یافته استفاده گردید. تمام نمونه‌ها به روش تمیز و خشک تهیه و در سه لایه با استفاده از قیف و ارتفاع رها سازی صفر و با تراکم مشخص جهت رسیدن به تخلخل مورد نظر آماده شدند. در شکل (۵) یک نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش نشان داده شده است. بدیهی است در نمونه‌های ماسه‌ای، برای سرپا نگه داشتن نمونه قبل از اعمال فشار همه‌جانبه، فشار مکشی به نمونه اعمال گردید. در این بررسی برای آماده‌سازی نمونه‌ها از فشار مکش ۳۰ کیلو پاسکال استفاده شد. هم‌زمان با اعمال فشار همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال، به تدریج فشار مکش نمونه کاسته شد. برای هر نمونه از ۱۰ گروه دسته‌بندی شده، امواج برشی در تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال در خاک منتشر و زمان سفر موج اندازه‌گیری شد.



شکل (۵): نمونه ماسه نگه داشته شده تحت فشار مکشی ۳۰ کیلو پاسکال.

در این تحقیق آزمایش المان خمشی برای هر گروه سه بار تکرار شد. در شکل (۶) سیگنال‌های دریافتی نمونه R9 تحت فشار همه‌جانبه ۲۵۰ کیلو پاسکال را برای سه بار آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تکرارپذیری قابل قبولی بین سیگنال‌های دریافتی جهت سه بار آزمایش مشاهده می‌شود. ضمناً این موضوع برای سایر نمونه‌ها نیز مراعات گردید.

یکسان است و این زمان با زمان رسیدن در دستگاه ستون تشدید نیز همخوانی دارد؛ در صورتی که اولین زمان ورود موج در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ کیلوهرتز متفاوت می‌باشد که این موضوع مربوط به اثر حوزه نزدیک در فرکانس‌های پایین است و با نظر محققین دیگر نیز مطابقت دارد [۲۹].



شکل (۷): سیگنال‌های انتقالی موج برشی در آزمایش بندر المنت برای ماسه اوتاوا تمیز و خشک شده تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال، تخلخل ۰/۷۱۵؛ و فرکانس‌های مختلف ۴ تا ۲۰ کیلوهرتز [۲۴].

در تحقیقات انجام شده، چندین روش برای محاسبه زمان سفر موج برشی از جمله روش‌های محاسبه سفر موج در حوزه زمان، روش‌های ریاضی و روش محاسبه زمان سفر موج در حوزه فرکانس پیشنهاد شده است. روش‌های زمانی بر اساس شرایط استفاده کاربر به دو روش فاصله شروع موج ارسالی تا شروع موج دریافتی<sup>۴</sup> و فاصله نقطه اوج موج ارسالی تا نقطه اوج موج دریافتی<sup>۵</sup> تقسیم می‌شود. با توجه به زمان‌های مختلف سفر موج یک روش ریاضی جایگزین، به نام تابع همبستگی متقابل<sup>۶</sup> نیز پیشنهاد شده است. این روش اولین بار توسط ویجیانی و اتکینسون [۲۸] در سال ۱۹۹۵ به منظور تحلیل نتایج آزمایش‌های المان خمشی پیشنهاد گردید. سپس مانکوزو و همکاران [۳۹] در سال ۱۹۸۹ برای آزمایش امواج عبوری استفاده نمودند. بر اساس مطالعات تجربی انجام شده توسط ویجیانی و اتکینسون [۲۸] و تأیید آن توسط محققین دیگر، بیشترین مقدار تابع همبستگی

انجام شده است [۲۶-۲۸، ۳۳-۳۸]. در این راستا سعی شده با راهکارهای عملی، پیشنهادهایی برای کاهش اثر حوزه نزدیک در آزمایش‌های المان خمشی ارائه گردد. برای این هدف یک قاعده پیشنهادی جویسیج و همکاران [۲۶] که توسط برینیولی و همکاران [۳۴] و لو پرستی و همکاران [۳۷] تأیید گردیده، استفاده می‌شود. در این راهکار پیشنهاد می‌شود، شکل موج دریافتی از المان خمشی را می‌توان با نسبت طول سفر موج به طول موج در فرکانس مشخص توصیف کرد ( $R_d=L/\lambda$ ). به طور دقیق این محققین اظهار داشتند، برای نسبت‌های  $R_d$  بین ۰/۲۵ و ۴ به ویژه نزدیک به ۱/۰ اثر حوزه نزدیک بسیار واضح و آشکار می‌باشد. با این حال برای مقادیر بیشتر ( $R_d \leq 4$ )، تأثیرات پدیده حوزه نزدیک به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت محققین قادر به محاسبه زمان دقیق سفر موج برشی خواهند بود. سانچز-سالینرو [۳۸] برای کنترل اثر حوزه نزدیک مقدار ۲ را برای  $R_d$  پیشنهاد داده‌اند. آرویو و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد کردند که  $R_d$  باید به بالاتر از ۱/۶۰ برسد تا اثر حوزه نزدیک کاهش یابد. علاوه بر این، لئونگ و همکاران [۳۶] پیشنهاد دادند برای کاهش اثرات حوزه نزدیک، طراحی آزمایش‌های المان خمشی طوری صورت گیرد که مقدار  $R_d$  بیشتر از ۳/۳۳ گردد. در مجموع، لازم به ذکر است که  $R_d$  ممکن است توسط فرکانس موج تحریک و خواص مصالح تحت تأثیر قرار گیرد و همین موضوع اثرات حوزه نزدیک را در مطالعات مختلف دچار پیچیدگی می‌کند.

شکل (۷) سیگنال‌های ارسالی و دریافتی امواج برشی در آزمایش المان خمشی را برای ماسه اوتاوا تمیز و خشک شده نشان می‌دهد. نمونه تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال، تخلخل ۰/۷۱۵ و فرکانس‌های مختلف ۴ تا ۲۰ کیلوهرتز توسط رجبی و شریفی پور [۲۴] در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه رازی مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، برای فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۱۰ کیلوهرتز اولین زمان رسیدن موج به دریافت کننده برای تمامی فرکانس‌ها



سرعت موج برشی و مقایسه روش‌های محاسبه زمان سفر موج موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

(۱) به نظر می‌رسد مقادیر سرعت موج برشی محاسبه شده با استفاده از هر یک از روش‌ها، وابسته به فرکانس است؛ یعنی سرعت موج برشی برآورد شده به فرکانس تحریک وابسته است. به طوری که با افزایش فرکانس تحریک دامنه تفاوت سرعت برآورد کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش فرکانس، سرعت برآورد شده توسط روش‌های مختلف همگرا می‌شود.

(۲) مقادیر سرعت موج برشی برآورد شده برای یک فرکانس مشخص با تغییر قطر متوسط ذرات تغییر می‌کند. به عنوان مثال دامنه سرعت موج برشی برآورد شده در R9 گسترده‌تر از نمونه R6 و R3 می‌باشد؛ و برعکس این دامنه در R3 فشرده‌تر از R6 و R9 می‌باشد.

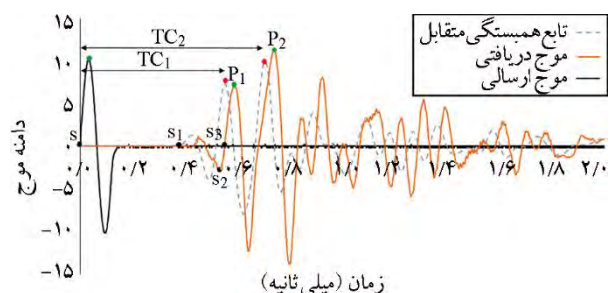
(۳) سرعت موج برشی در روش شروع تا شروع با تمرکز روی نقطه S1 همیشه مقادیر غیرقابل پذیرشی نسبت به بقیه روش‌های تعیین زمان سفر موج ارائه می‌دهد؛ و این امر نشان‌دهنده آن است که S1 نمی‌تواند گویای زمان صحیح موج برشی باشد، بلکه شاید نشانه‌ای از دریافت موج فشاری باشد. البته این تفاوت در بیان مقدار سرعت موج برشی در فرکانس‌ها کمتر مشهود است و این امر احتمال اثر پدیده حوزه نزدیک در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ کیلوهرتز را تقویت می‌کند؛ اما در مقایسه با نتایج آزمایش ستون تشدید نقاط S1 و S2 به علت امکان تأثیر حوزه نزدیک، نمی‌تواند زمان دقیق حرکت موج برشی باشند.

(۴) مقادیر سرعت موج برشی به دست آمده از روش‌های TC1 و TPP1 نسبت به سایر روش‌ها قابلیت پذیرش بیشتری دارد. مقدار سرعت موج برشی به دست آمده از روش TC1 برای تمامی فرکانس‌های مختلف هر گروه تقریباً یکسان است.

(۵) سرعت موج برشی برآورد شده بر اساس نقاط TPP2 و TC2 نیز جواب‌های غیرقابل قبولی را ارائه می‌دهند.

متقابل بین امواج ارسالی و دریافتی را زمان سفر موج معرفی کردند [۲۶-۲۷، ۳۱-۳۲، ۳۵-۳۶، ۴۰].

شکل (۸) موج برشی ارسالی با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز، سیگنال‌های دریافتی و همچنین منحنی تابع همبستگی متقابل را برای نمونه R2، تحت فشار همه‌جانبه ۵۰۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. برای تعیین زمان سفر موج برشی نقاط خاصی روی سیگنال‌های فرستاده شده و دریافتی قرار گرفته است. از جمله نقطه S و P بر روی موج تولیدشده، فواصل TC1 و TC2 برای تابع همبستگی متقابل و نقاط S1، S2، S3، P1 و P2 روی موج تابع همبستگی مشخص شده‌اند. بر این اساس علامت‌های TSS1، TSS2 و TSS3 جهت زمان شروع تا شروع موج، TPP1 و TPP2 برای حالت حداکثر موج ارسالی تا حداکثر موج دریافتی و TC1 و TC2 برای زمان سفر معادل حالت حداکثر تابع همبستگی متقابل در نظر گرفته شده است. به عبارت دقیق‌تر تمامی نقاط مذکور می‌توانند یک مبنا برای محاسبه زمان سفر موج باشند؛ بنابراین، در ادامه باید بهترین و دقیق‌ترین زمان سفر موج برشی را از میان این نقاط استخراج نمود.



شکل (۸): امواج ارسالی، دریافتی و تابع همبستگی متقابل برای نمونه R2 تحت فشار همه‌جانبه ۵۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز.

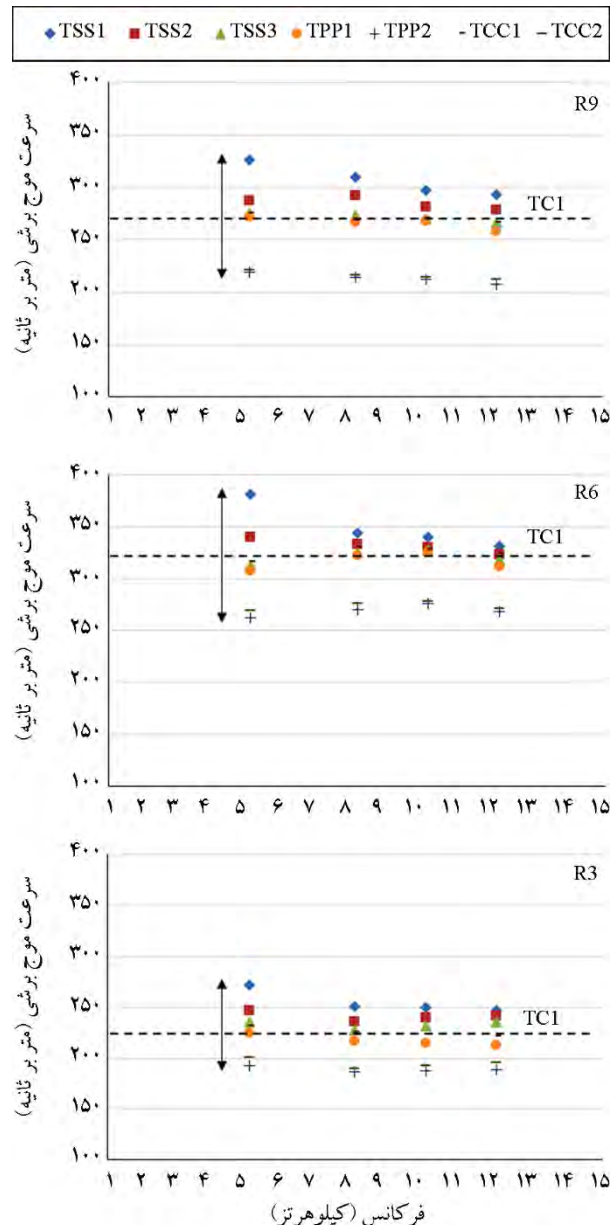
در این تحقیق مبنای محاسبه سفر موج برشی فرکانس‌های ۵ تا ۱۲ کیلوهرتز می‌باشند. بر اساس روش‌هایی که در بالا عنوان شد، مقادیر سرعت موج برشی برای نمونه‌های R3 و R6، R9 تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال، تخلخل ۰/۸ در شکل (۹) آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای محاسبه دقیق

می‌سازد. خط‌چین عمودی نشان‌دهنده‌ی زمان سفر موج بر اساس روش تابع همبستگی متقابل است؛ و مثلث صعودی بیانگر ورود اولین موج در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد. بدیهی است، با افزایش فرکانس تحریک، سیگنال دریافتی حاوی مقادیر بیشتر فرکانس بالا می‌باشد. همچنین سیگنال‌های رسیده از نظر شکل ظاهری مشابه هستند.

این تشابه نیز در نمونه R6 با قطر متوسط ۱/۲۹ میلی‌متر، تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس‌های مختلف ۸، ۱۰ و ۱۲ کیلوهرتز در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود. در مقایسه با امواج نشان داده شده در شکل (۱۰) در هر فرکانس متناظر سیگنال دریافت شده دارای محتوی فرکانس بالاتری است؛ بدین معنا که تغییر در اندازه ذرات می‌تواند بر محتوای فرکانس سیگنال دریافت شده تأثیر بگذارد. شکل (۱۲) امواج دریافتی در خاک ریزتر R3 (قطر متوسط ۰/۵۱۲ میلی‌متر) را در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس‌های تحریک مشابه حالات R6 و R9 نشان می‌دهد.

با مقایسه شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ملاحظه می‌شود که امواج دریافتی در دانه‌های ریزتر و درشت‌تر از ۱/۲۹ میلی‌متر (R6) از محتوای فرکانس کمتری برخوردارند. به بیان دیگر این روند نشان می‌دهد که در قطر متوسط ۱/۲۹ میلی‌متر احتمالاً امواج با فرکانس بالاتر بهتر انتشار پیدا می‌کنند؛ به گونه‌ای که امواج دریافتی از دامنه فرکانسی بالاتری برخوردارند.

با توجه به اینکه هر سه نمونه فوق تحت شرایط نمونه‌گیری، تخلخل، فشار همه‌جانبه و فرکانس ارسالی یکسانی قرار گرفتند، اما امواج دریافتی دارای سیگنال‌های متفاوتی هستند. این احتمال وجود دارد که این رفتار به تغییر اندازه دانه‌ها وابسته است، هرچند به‌طور یقین برای محققین به اثبات نرسیده است. لذا می‌بایست بیشتر مورد توجه قرار گیرد. به عقیده مؤلفین این موضوع می‌تواند ناشی از پدیده پراکندگی<sup>۷</sup> در دانه‌های ریزتر و درشت‌تر از ۱/۲۹ میلی‌متر باشد.

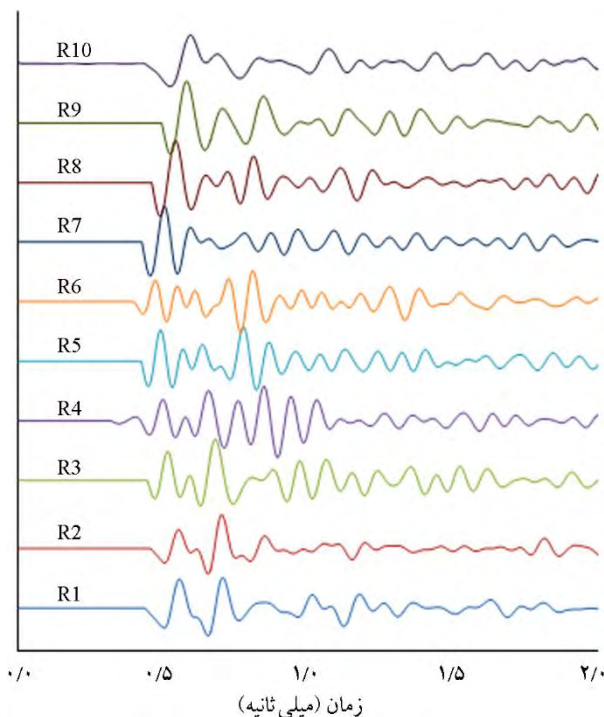


شکل (۹): مقادیر سرعت موج برشی برآورد شده در فرکانس‌های مختلف برای سه نمونه R9، R6 و R3 تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.

#### ۴- بررسی اثر فرکانس روی شکل امواج دریافتی

شکل (۱۰) سیگنال‌های دریافتی ناشی از امواج ارسالی تک‌پالسی از نوع سینوسی، با فرکانس‌های ارتعاش ۸، ۱۰ و ۱۲ کیلوهرتز را برای نمونه ماسه با قطر متوسط ۳/۵۶ میلی‌متر (R9) تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. این طیف فرکانس‌ها امکان تحلیل اثر فرکانس روی شکل امواج را فراهم

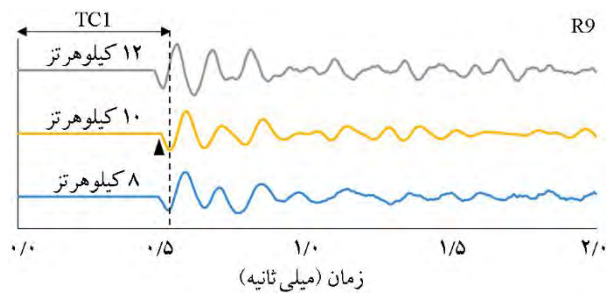
سیگنال‌های دریافتی برای گروه‌های ده گانه (R1 تا R10) تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال ناشی از موج تحریک سینوسی ۱۰ کیلوهرتز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر اندازه دانه‌ها شکل امواج دریافتی نیز متفاوت می‌باشد. گروه R6 که از سرعت موج برشی بالاتری نسبت به سایر گروه‌ها برخوردار است، دامنه نوسانات موج دریافتی کمتری را نشان می‌دهد. ضمناً فرم ظاهری امواج دریافتی در گروه‌های کنار هم مشابه همدیگر هستند؛ و همچنین ضمن اینکه محتوای فرکانس گروه‌های دورتر از R6 مشابه‌اند، از فرکانس کمتری نیز برخوردارند؛ و برعکس محتوای فرکانس امواج دریافتی R6 و گروه‌های مجاور آن از فرکانس بالاتری برخوردارند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیر اندازه دانه‌ها روی شکل امواج دریافتی و سرعت موج برشی می‌باشد.



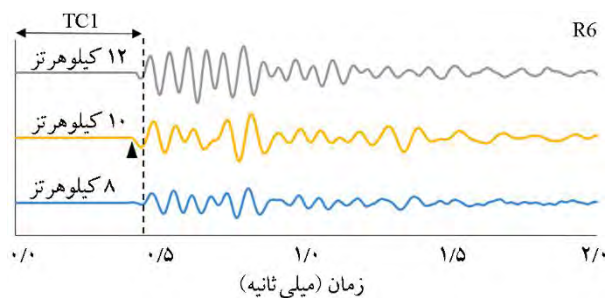
شکل (۱۳): سیگنال‌های دریافتی موج برشی برای گروه‌های ده گانه (R1 تا R10) تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال برای فرکانس موج سینوسی ارسالی ۱۰ کیلوهرتز.

### ۶- بررسی تأثیر فشار همه‌جانبه روی سرعت موج برشی با استفاده از تابع همبستگی متقابل

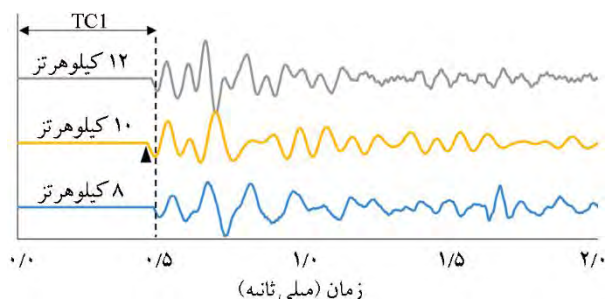
تغییرات سرعت موج برشی محاسبه شده به روش تابع



شکل (۱۰): سیگنال‌های دریافتی موج برشی در ماسه R9 (قطر متوسط ۳/۵۶ میلی‌متر)، تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ کیلوهرتز.



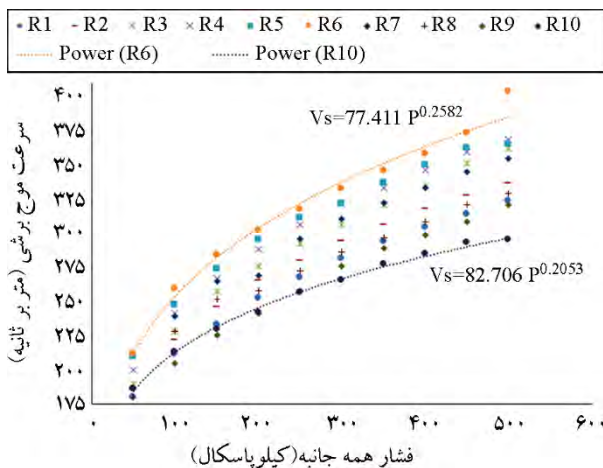
شکل (۱۱): سیگنال‌های دریافتی موج برشی در ماسه R6 (قطر متوسط ۱/۲۹ میلی‌متر)، تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ کیلوهرتز.



شکل (۱۲): سیگنال‌های دریافتی موج برشی در ماسه R3 (قطر متوسط ۰/۵۱۲ میلی‌متر)، تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ کیلوهرتز.

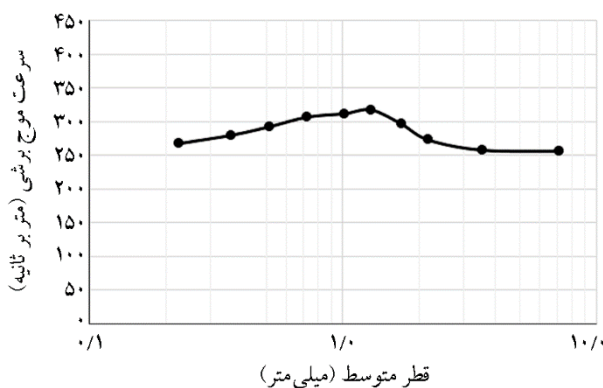
### ۵- بررسی اثر اندازه ذرات روی شکل امواج دریافتی

در مبحث قبل نشان داده شد که اندازه ذرات روی شکل امواج دریافتی بی‌تأثیر نیست، لذا در ادامه اثر اندازه دانه‌های خاک بر روی شکل امواج دریافتی ناشی از یک سیگنال تحریک واحد، تحت فشار همه‌جانبه یکسان مقایسه و مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۱۵): تغییرات سرعت موج برشی با فشارهای همه جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه‌های مختلف.

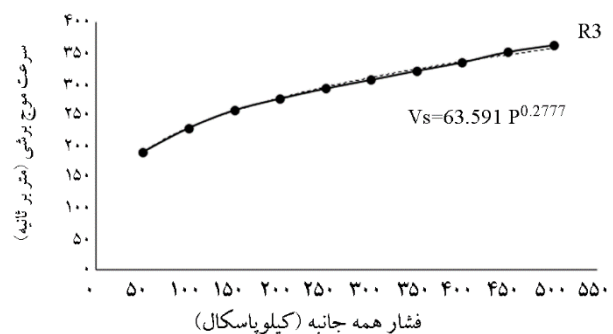
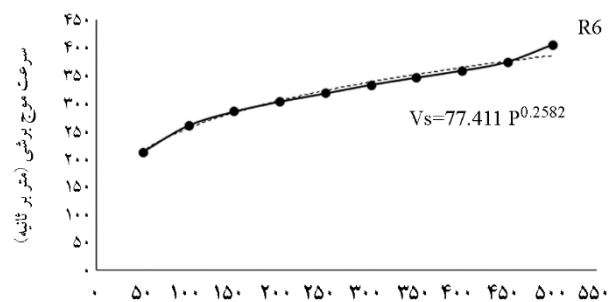
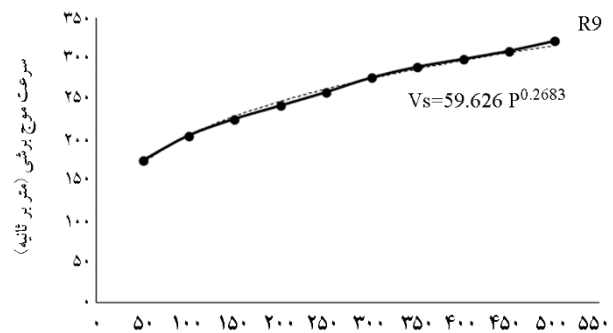
نتایج تغییرات سرعت موج برشی برای دانه‌های مختلف ماسه تحت فشار همه جانبه ۲۵۰ کیلو پاسکال در شکل (۱۶) ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود رابطه سرعت موج برشی با اندازه دانه‌های خاک دارای رفتار دو گانه است. به طوری که قطر دانه‌ها در بازه‌ی ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی متر، با افزایش اندازه دانه‌های خاک سرعت موج برشی افزایش و در بازه قطر ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی متر با افزایش قطر متوسط دانه‌ها، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.



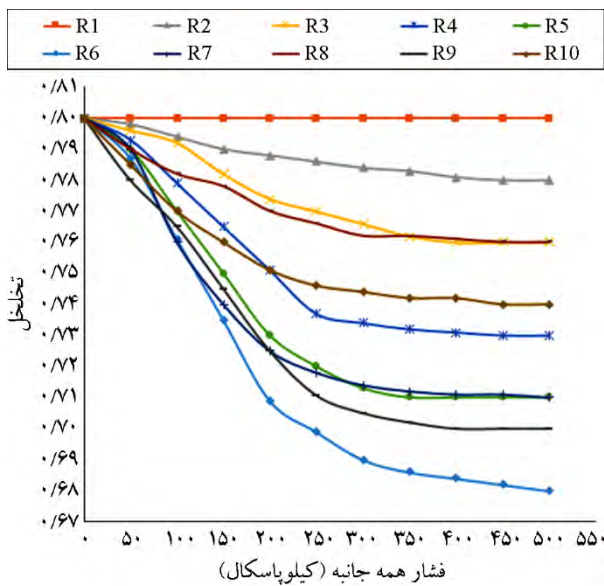
شکل (۱۶): تغییرات سرعت موج برشی نسبت به ابعاد دانه‌ها در فشار همه جانبه ۲۵۰ کیلو پاسکال.

شکل (۱۷) تغییرات سرعت موج برشی تحت فشار همه جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای تمامی گروه‌های ده گانه را نشان می‌دهد. با افزایش قطر متوسط دانه‌ها از ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی متر

همبستگی متقابل بر حسب فشارهای همه جانبه از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای سه نمونه خاک R3، R6، R9 در شکل (۱۴) و تغییرات سرعت موج برشی برای تمامی گروه‌های مورد مطالعه در شکل (۱۵) ارائه گردیده است. همان طور که از شکل (۱۵) استنباط می‌شود، رابطه وابستگی سرعت موج برشی به فشار همه جانبه از رابطه  $V_s=A(P)^n$  تبعیت می‌کند؛ که در آن ضریب A بین ۷۷/۴ تا ۸۲/۷ و ضریب n بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۶ متغیر است. برای تمامی ابعاد دانه‌ها با افزایش فشار همه جانبه سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. علت عمده آن بیشتر شدن نقاط تماسی و اصطکاک میان دانه‌های ذرات در فشارهای بالاتر می‌باشد.

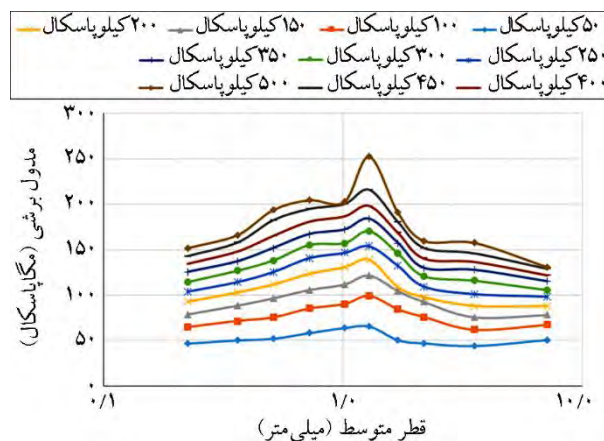


شکل (۱۴): تغییرات سرعت موج برشی با فشار همه جانبه مختلف برای نمونه‌های R3 و R6، R9.



شکل (۱۸): تغییرات ضریب تخلخل بر حسب فشار همه‌جانبه مختلف.

شکل (۱۹) تغییرات مدول برشی تحت فشار همه‌جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای تمامی گروه‌های ده‌گانه را نشان می‌دهد. با افزایش قطر متوسط دانه‌ها از ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی‌متر برای تمامی فشارهای همه‌جانبه مدول برشی افزایش می‌یابد؛ و از قطر متوسط ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی‌متر این روند معکوس است.



شکل (۱۹): تغییرات مدول برشی نسبت به ابعاد دانه‌ها در فشارهای همه‌جانبه مختلف.

## ۸- نتیجه‌گیری

همان‌طور که بحث شد، اکثر محققین دامنه محدودی از اندازه دانه‌های خاک را برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها روی

برای تمامی فشارهای همه‌جانبه سرعت موج برشی افزایش می‌یابد؛ و از قطر متوسط ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی‌متر این روند معکوس می‌باشد. افزایش اولیه سرعت موج برشی احتمالاً به افزایش نقاط تماسی بین دانه‌ها و تئوری تماسی هرتر مرتبط است. ضمناً در این بازه شکل ذرات از گرد گوشگی سطوح صاف به سمت تیز گوشگی و سطوح زبرتر پیش می‌رود که خود همین امر نیز می‌تواند موجب ایجاد قفل و بست‌های بیشتر و افزایش مدول برشی شود؛ و این روند در بازه ۱/۲۹ تا ۷/۱۴ میلی‌متر تا حدودی معکوس است.



شکل (۱۷): تغییرات سرعت موج برشی نسبت به ابعاد دانه‌ها در فشارهای همه‌جانبه مختلف.

## ۷- بررسی تأثیر فشار همه‌جانبه روی مدول برشی

در این تحقیق تمامی نمونه‌ها با تخلخل اولیه یکسان تهیه و سرعت موج برشی تحت فشارهای همه‌جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از اعمال فشار همه‌جانبه تغییر حجم و متعاقب آن تخلخل نمونه‌ها محاسبه گردید. شکل (۱۸) تغییرات تخلخل نمونه‌ها تحت فشار همه‌جانبه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار همه‌جانبه میزان تخلخل کاهش می‌یابد.

میلی متر با افزایش قطر سرعت موج برشی کاهش می یابد.  
 ۶- در این پژوهش به تأثیر اندازه دانه ها پرداخته شده است، اما صرفاً این عامل به تنهایی نقش تعیین کننده نداشته و به نظر می رسد که جنس، شکل و ویژگی های سطوح دانه های خاک نیز می توانند در مقدار سرعت موج برشی مؤثر باشد.  
 ۷- مقایسه نتایج این تحقیق با یافته های پژوهش های گذشته (مطابق جدول ۱) حاکی از آن است که تحقیق حاضر در دامنه گسترده تری انجام شده است و همچنین با نتایج برخی از محققین از جمله یافته های منک و استوکوه [۱۰]، شریفی پور و همکاران [۱۲] و هاردین [۱۱] تا اندازه قطر متوسط ۱/۲۹ میلی متر مطابقت داشته، به طوری که با افزایش اندازه دانه ها مدول برشی نیز افزایش می یابد؛ و در مقایسه با نتایج بارتاک و سینگ [۳]، پاتل و همکاران [۱۴]، گو و همکاران [۱۵] و چو و برنز [۱۶] که حاکی از کاهش مدول برشی با افزایش اندازه دانه ها است نتایج این تحقیق مطابقت ندارد.

۸- نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان داد که سرعت برشی به اندازه ی دانه ها وابسته است و از آنجایی که مدول برشی  $G_{max}$  مبنای بسیاری از محاسبات نظری و آزمایشگاهی و طراحی های ژئوتکنیکی مانند محاسبات تغییر شکل ها، پایداری شیب ها و ارزیابی روانگرایی و تحلیل پاسخ حرکات زمین و بسیاری از اندازه گیری ها می باشد، بنابراین نتایج حاصله از این پژوهش می تواند به خوبی در زمینه های ذکر شده مورد استفاده قرار گیرد.

برای محاسبه نتایج دقیق تر و روند کلی پژوهش، در آینده می توان تأثیر اندازه ی ذرات خاک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، با استفاده از دستگاه های آزمایش دیگر مانند ستون تشدید و ساترفیوژ را نیز بررسی کرد.

### مراجع

1. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering Prentice Hall*. Upper Saddle River, New York.

سرعت موج برشی و یا مدول برشی مورد مطالعه قرار داده اند. عدم مطالعه دامنه گسترده از ذرات مانع از اظهار نظر قطعی در خصوص تأثیر اندازه دانه ها روی سرعت موج برشی یا مدول برشی خاک شده است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه المان خمشی نسبت به بررسی تأثیر اندازه دانه ها در دامنه وسیعی از آنها بر روی سیگنال های دریافتی، محتوای فرکانس سیگنال های دریافتی و سرعت موج برشی در فشار همه جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال اقدام شد، مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر خلاصه شده است:

۱- نتایج حاصله در بحث روش های مختلف تخمین زمان سفر موج نشان داد که در فرکانس های پایین به علت وجود اثر حوزه نزدیک محاسبه زمان سفر موج به روش شروع به شروع (به ویژه استفاده نقطه S1) نمی تواند گویای زمان صحیح موج رسیده باشد. با توجه به نتایج، روش تابع همبستگی متقابل و روش قله به قله می تواند نتایج معقول تری از سرعت موج برشی ارائه دهند.

۲- نتایج نشان داد در یک نمونه خاک با افزایش فرکانس تحریک سیگنال های دریافتی حاوی مقادیر بیشتری از فرکانس بالا بوده و جالب تر آنکه این سیگنال ها از نظر شکل ظاهری مشابه هستند.

۳- اندازه دانه ها روی شکل امواج دریافتی مؤثر است، به نحوی که محتوای فرکانس امواج دریافتی در گروه های ریزدانه و درشت دانه تقریباً یکسان بوده، اما در گروه های میانی ضمن افزایش سرعت موج برشی از محتوای فرکانس بالاتری نیز برخوردارند.

۴- با افزایش تنش همه جانبه در گروه های ده گانه سرعت موج برشی نیز افزایش می یابد؛ و وابستگی سرعت موج برشی به فشار همه جانبه از رابطه  $V_s = A(P)^n$  تبعیت می کند؛ که در آن ضریب A بین ۷۷/۴ تا ۸۲/۷ و ضریب n بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۶ متغیر است.

۵- نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در قطر متوسط دانه ها از ۰/۲۲۵ تا ۱/۲۹ میلی متر با افزایش قطر، سرعت موج برشی افزایش و برای قطر متوسط دانه ها از ۱/۲۹ تا ۷/۱۴

12. Sharifipour, M. and Dano, C. (2006) Effect of grains roughness on waves velocities in granular packings. *First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures*, Tunisia.
13. Sahaphol, T. and Miura, S. (2005) Shear moduli of volcanic soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(2), 157-165.
14. Patel, A. Bartake, P. and Singh, D. (2008) An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology. *Geotech. Test. J.*, **32**(1), 1-10.
15. Gu, X. Yang, J. and Huang, M. (2013) Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element. *Soils and Foundations*, **53**(5), 735-745.
16. Choo, H. and Burns, S. (2014) Effect of overconsolidation ratio on dynamic properties of binary mixtures of silica particles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **60**, 44-50.
17. Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977) Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. *Soils and Foundations*, **17**(3), 19-35.
18. 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**(10), 1404-1418.
19. Senetakis, K. and Madhusudhan, B. (2015) Dynamics of potential fill-backfill material at very small strains. *Soils and Foundations*, **55**(5), 1196-1210.
20. Yang, J. and Gu, X. (2013) Shear stiffness of granular material at small strains: Does it depend on grain size? *Géotechnique*, **63**(2), 165.
21. Pradhan, A. and Yu, X. (2015) Bender Element Testing and Discrete Element Modeling of Shear Wave in Granular Media. *IFCEE 2015*, GSP 256, 1993-2002 the University of Texas, San Antonio, Texas.
22. Payan, M., Khoshghalb, A., Senetakis, K., and Khalili, N. (2016) Effect of particle shape and validity of  $G_{max}$  models for sand: A critical review and a new expression. *Computers and Geotechnics*, **63**, 1-10.
2. Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A.D., Tanaka, Y., and Tokimatsu, K. (2013) Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(3), 407-419.
3. Bartake, P. and Singh, D. (2007) Studies on the determination of shear wave velocity in sands. *Geomechanics and Geoengineering*, **2**(1), 41-49.
4. Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N. (2011) Empirical estimation of shear wave velocity from in situ tests on soil formations in Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **70**(2), 291-297.
5. Hardin, B.O. and Richart, Jr., F. (1963) Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, **89** (Proc. Paper 3407), 39-56.
6. Walton, K. (1987) The effective elastic moduli of a random packing of spheres. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **35**(2), 213-226.
7. Zhong, X.-X. and Jian-xin, Y. (1992) Microfabrics and constitutive relations of granular materials. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **14**(sup.), 39-48.
8. Chang, C.S., Chao, S.J., and Chang, Y. (1995) Estimates of elastic moduli for granular material with anisotropic random packing structure. *International Journal of Solids and Structures*, **32**(14), 1989-2008.
9. Lin, S.-Y. Lin, P.S. Luo, H.-S. and Juang, C.H. (2000) Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(3), 638-651.
10. Menq, F.-Y. and Stokoe, K. (2003) 'Linear dynamic properties of sandy and gravelly soils from large-scale resonant tests'. In: *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Di Benedetto et al., editors, 63-71.
11. Hardin, B.O. and Kalinski, M.E. (2005) Estimating the shear modulus of gravelly soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(7), 867-875.

- 637-649.
33. Arroyo, M., Muir Wood, D., Greening, P.D., Medina, L., and Rio, J. (2006) Effects of sample size on bender-based axial G<sub>0</sub> measurements. *Geotechnique*, **56**(1), 39-52.
34. Brignoli, E.G., Gotti, M., and Stokoe, K.H. (1996) Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, **19**(4), 384-397.
35. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Riemer, M. (1998) Analysis of bender element tests. *Geotech Test J.*, **21**, 120-131.
36. Leong, E.C., Cahyadi, J., and Rahardjo, H. (2009) Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**(7), 792-812.
37. Lo Presti, D., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A., and Pedroni, S. (1998) Shear modulus and damping of soils. *Geotechnique*, **47**, 603-617.
38. Sanchez-Salinerio, I. (1987) *Analytical Investigation of Seismic Methods Used for Engineering Applications*. University of Texas at Austin.
39. Mancuso, C., Simonelli, A., and Vinale, F. (1989) Numerical analysis of in situ S-wave measurements. *Proc., 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 277-280.
40. Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S. (2001) Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, **1**, Balkema Publishers, Istanbul.
- 72, 28-41.
23. Huang, B., Xia, T., Qiu, H., Zhou, X., and Chen, W. (2017) Shear wave velocity in sand considering the effects of frequency based on particle contact theory. *Wave Motion*, **72**, 173-186.
24. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2017) An Experimental Characterization of Shear Wave Velocity (V<sub>s</sub>) in Clean and Hydrocarbon-Contaminated Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**(6), 2727-2745.
25. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985) 'Lab Measurements of G<sub>max</sub> Using Bender Elements'. In: *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, ASCE, 186-196.
26. Jovičić, V., Coop, M., and Simić, M. (1996) Objective criteria for determining G<sub>max</sub> from bender element tests. *Geotechnique*, **46**(2), 357-362.
27. Lee, J.-S. and Santamarina, J.C. (2005) Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(9), 1063-1070.
28. Viggiani, G., and Atkinson, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, **8**(32), 373A.
29. Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., and Shibuya, S. (2009) Interpretation of international parallel test on the measurement of G<sub>max</sub> using bender elements. *Soils and Foundations*, **49**(4), 631-650.
30. Cai, Y., Dong, Q., Wang, J., Gu, C., and Xu, C. (2015) Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **76**, 100-110.
31. Kumar, J. and Madhusudhan, B. (2010) A note on the measurement of travel times using bender and extender elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(7), 630-634.
32. Murillo, C., Sharifipour, M., Caicedo, B., Thorel, L., and Dano, C. (2011) Elastic parameters of intermediate soils based on bender-extender elements pulse tests. *Soils and Foundations*, **51**(4),

#### واژه‌نامه

- Touhoro ۱- توهورو
- Toyoure ۲- توپورا
- Near-Field Effect (NFE) ۳- اثر حوزه نزدیک
- Start-to-Start ۴- فاصله شروع موج ارسالی تا



	شروع موج دریافتی
Peak-to-Peak	۵- فاصله نقطه اوج موج ارسالی تا نقطه اوج موج دریافتی
Cross-Correlation	۶- تابع همبستگی متقابل
Dispersion	۷- پراکندگی

## Investigating the Interrelationships Between Shear-Wave Velocity and Particle Size of a Sandy Soil

Abolhasan Sharifi<sup>1</sup> and Mohammad Sharifipour<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran,  
\*Corresponding Author, email: sharifipour@razi.ac.ir

Under small strains ( $\epsilon \leq 10^{-3}\%$ ), the shear-wave velocity ( $V_s$ ) and its resultant maximum shear modulus ( $G_{max}$ ) are important parameters in geotechnical engineering calculations and soil dynamics analyses. At present, the shear wave velocity of sand is typically determined using measurement and theoretical analysis methods. The measurement methods include in-situ and laboratory tests. In-situ tests are commonly conducted using a borehole method or a surface wave dispersion analysis method. Laboratory tests include bender element tests, resonant column tests, ultrasonic tests, and dynamic triaxial tests. In this regard, the evaluation of the influences of soil particle size on the dynamic behaviour of soils during wave propagation has been an important issue in geotechnical engineering. Heretofore, the effects of particle size on shear-wave velocities in soils have been examined using various experimental techniques. Most of this research was carried out over a limited range of particle sizes, and the results indicated various effects of particle size on shear-wave velocity: there has been no comprehensive and unambiguous outcome describing the influences of particle size on shear-wave velocity in soils. This research focused on the influences of particle size on shear-wave parameters in a particular type of sandy soil. A digitally controlled triaxial testing machine equipped with bender elements was used. A significant advantage of bender element test is that it can be incorporated in standard soil mechanics apparatuses such as triaxial and oedometer devices, and the approaches for data interpretation are relatively simple. This research aims to experimentally examine the effects of a wider range of particle sizes on shear-wave velocity and other shear-wave parameters, transmitted in dry sandy soils, using a bender element apparatus embedded in a triaxial testing machine under confining pressures of 50-500 kpa. In this research, the sandy soil was initially categorized into 10 different groups using ASTM standard sieves, and all triaxial samples were prepared with an identical void ratio. The void ratio plays a vital role in the determination of the maximum shear modulus of soil. For all ranges of particle size, the maximum and minimum void ratios were determined, in order to provide an acceptable level of comparison among the results, all samples were prepared with a single void ratio of 0.80. In this study, homogeneously identical samples were assumed as a prerequisite for all experiments. Therefore, it was necessary to take practical measures to ensure this crucial prerequisite in all specimens. In this regard, various experimental methods may be used to achieve a desirable void ratio, including the wet and dry tamping method, dry pouring technique, and water precipitation methods. In this study, the dry tamping method was carried out to prepare similar specimens with an identical void ratio. To measure the shear-wave travel time, the frequencies between 5 and 12 kHz were used. The significant results obtained in this study were as follows. 1) With reference to different methods of determining the shear-wave travel time, the results of this research showed that the cross-correlation and peak-to-peak methods gave the most reasonable values of the shear-wave velocity. 2) The outcomes revealed that, in a particular soil sample, as the excitation frequency increases, the received signals possess significant amounts of higher frequency components, and surprisingly, these signals are similar in shape. 3) Particle size influences the shape of the received signals, such that the

frequency content of received signals in both fine and coarse grained soils are quite similar, but medium-sized soils increased with increasing confining pressure. 5) The results showed that the increasing size of soil grains leads to increased shear-wave velocity in a particular range of particle sizes, and decreased shear-wave velocity in the other range. 6) Although the effects of particle size on shear-wave velocity were the main subject of this study, it seems that this factor alone cannot dominate, and other factors must also be considered, such as the type and shape of particles and the surface roughness.

**Keywords:** Shear-Wave Velocity, Soil Particle Size, Bender Elements Test, Shear Modulus, Small-Strain Behaviour.