

چکیده

تعیین مدول برشی حداکثر کرنش کوچک خاک‌های تثبیت شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و یکی از اساسی‌ترین ویژگی‌های خاک در زلزله و بارگذاری‌های دینامیکی است. برآورد دقیق پارامترهای دینامیکی خاک از جمله مدول برشی حداکثر در تحلیل رفتار سازه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. در این مطالعه با استفاده از دستگاه المان خمشی، تأثیر مقادیر مختلف آهک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) با میزان آب (۴۵٪، ۶۵٪ و ۸۵٪) در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه بر مدول برشی حداکثر خاک رس نرم تثبیت شده با آهک ارزیابی گردیده است. مقدار آب در ترکیب خاک رس و آهک حدوداً به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲ برابر درصد رطوبت حد روانی خاک رس انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مدول برشی حداکثر خاک رس نرم تثبیت شده، تابع مقادیر آهک و آب است، با افزایش میزان آب بیش از حد روانی خاک، مدول برشی حداکثر به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و افزایش میزان آهک تا سطح معینی باعث افزایش مدول برشی حداکثر می‌شود و پس از آن کاهش می‌یابد. افزودن میزان آهک و آب بیشتر از مقادیر تعیین شده موجب ناکارآمدی فرایند تثبیت می‌گردد.

واژگان کلیدی: مدول برشی حداکثر، کرنش کوچک، دستگاه المان خمشی، رس نرم تثبیت شده، آهک.

تعیین مدول برشی حداکثر محصور نشده خاک رس تثبیت شده با آهک به‌وسیله دستگاه المان خمشی

صید حسن جعفری

دانش‌آموخته دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران،
واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

سید حمید لاجوردی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک،
sh-lajevardi@iau-arak.ac.ir، ایران

محمد شریفی پور

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی،
کرمانشاه، ایران

محسن کمالیان

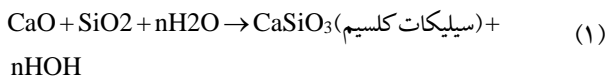
استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی
و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

امواج زلزله در بستر سنگی به لایه‌های سطحی زمین می‌رسد، خصوصیات خاک بر ماهیت ارتعاش‌ها در سطح زمین تأثیر می‌گذارد و در برخی موارد ارتعاش‌ها را در فرکانس خاصی مستهلک و در فرکانس‌های دیگر تشدید می‌کند [۱۷-۱۸]. حال به نظر می‌رسد ارزیابی رفتار خاک تثبیت شده تحت نیروهای لرزه‌ای ضروری و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، برآورد دقیق پارامترهای دینامیکی خاک در تحلیل رفتار سازه‌ها و در نتایج تنش و کرنش نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. از این پارامترها مدول دینامیکی برشی حداکثر کرنش کوچک (G_{max}) از اساسی‌ترین ویژگی‌های خاک در زلزله و بارگذاری‌های دینامیکی است و در محدوده خیلی کوچکی از کرنش ($< 10^{-6}$) خواهد بود. مدول برشی حداکثر در این محدوده با اندازه‌گیری سرعت انتشار موج برشی در خاک و بر اساس روابط پایه‌ای انتشار امواج در خاک به دست می‌آید (شکل ۱).

حضور گسترده خاک‌های رسی در سطح دنیا مشکلات زیادی را در پایدارسازی بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد کرده که نیازمند تثبیت قبل از ساخت‌وساز است. عموماً تصور می‌شود که تثبیت به هر روشی که انجام شود موجب بهبود خواص عمومی خاک‌ها می‌گردد، ولی مسلم است که تثبیت و بهسازی باید با تسلط و آگاهی کامل صورت پذیرد و هرگونه خطایی در این مورد باعث بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیری می‌گردد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تثبیت خاک‌ها با استفاده از افزودنی‌های متعارف از جمله آهک و سیمان در خصوص بررسی مقاومت و خواص مکانیکی خاک [۱-۵] و بهسازی خاک در محل به‌منظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیرین زمین با استفاده از روش اختلاط عمیق [۶-۱۰] و روش تزریق [۱۱-۱۶] انجام گردیده که عمدتاً در زمینه بهبود خواص مکانیکی و کنترل حدود اتربرگ می‌باشد. هنگامی که مسیر

زیست محیطی و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌گردد، به‌عنوان مثال کروم مهم‌ترین فلز سمی و تجزیه‌ناپذیر در سیمان پرتلند می‌باشد که انتشار آن در خاک تأثیرات منفی بر گیاهان دارد. استفاده از آهک هم از نظر مقاومتی و هم از نظر زیست محیطی گزینه مناسبی برای جایگزینی سیمان در تثبیت خاک‌های رسی می‌باشد. آهک زنده مرسوم‌ترین و مؤثرترین آهکی است که برای پایدار نمودن خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که آهک با خاک رس مخلوط می‌شود، واکنش‌های متعددی از جمله واکنش‌های پوزولانی و واکنش‌های تبادل کاتیونی ایجاد می‌شود و باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت مخلوط می‌شود، با افزودن آهک به خاک، pH مخلوط افزایش یافته و باعث حل شدن سیلیکات موجود در خاک شده و با آزاد شدن این ترکیب از خاک رس با کلسیم واکنش می‌دهد، از ترکیب سیلیکات با آهک ماده کریستالی سیلیکات کلسیم تشکیل می‌شود [۲۷-۲۸]:

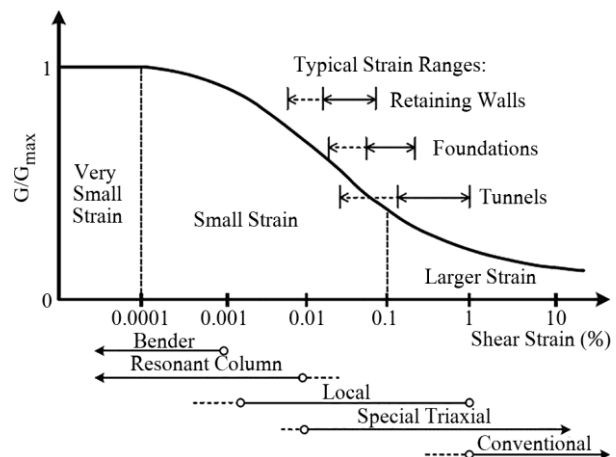


در این مطالعه جهت بررسی رفتار خاک‌های رسی تثبیت شده، ۲۴ نمونه ساخته شده از خاک رس نرم تثبیت یافته با مقادیر مختلف آهک و درصد‌های متفاوت آب در زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه در دستگاه المان خمشی مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مدول برشی حداکثر ارزیابی شده با آهک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- خصوصیات مصالح و روش آزمایش

۲-۱- خصوصیات مصالح

نمونه‌های مورد مطالعه در این آزمایش مخلوطی از خاک رس نرم و آهک می‌باشند. خاک رس نرم از ساختگاه پتروشیمی ایلام که به‌طور طبیعی و گسترده در محل وجود دارد برداشت گردیده که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۲) و خصوصیات فیزیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد

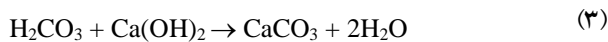


شکل (۱): مصادیق بارگذاری در کرنش‌های مختلف با تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی در هر محدوده [۱۹].

مطابق مطالعات گذشته تاکنون تحقیقات اندکی بر روی خصوصیات دینامیکی خاک رس تثبیت شده از جمله مدول برشی حداکثر صورت گرفته است [۲۰-۲۶]. در مطالعات انجام گرفته توسط چیانگ و چانه [۲۰] مدول برشی حداکثر نمونه‌های رسی تثبیت شده با نسبت‌های متغیری از سیمان نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده افزایش قابل توجهی داشته‌اند. بر اساس تحقیقات فام و سانتامارینا [۲۱] مشاهده می‌گردد که افزایش درصد سیمان باعث افزایش سرعت موج برشی می‌شود. بر اساس مطالعات فتاحی و خباز [۲۲] افزایش سیمان پرتلند نوع ۱ به دو نوع خاک رس کائولینیت و بتونیت موجب افزایش قابل توجهی بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر شده است. بر اساس آزمایش‌های کای [۲۳] تأثیر سیمان و میزان آب بر روی مدول برشی حداکثر ارزیابی شده است، بر اساس این مطالعات با افزایش میزان آب به مخلوط خاک رس و درصد ثابت سیمان مدول برشی کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش نسبت سیمان در میزان ثابت آب، مدول برشی افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اغلب تثبیت‌های انجام گرفته در تکنیک‌های اصلاح زمین مانند سیستم تزریق و اختلاط عمیق با تزریق سیمان انجام می‌گردد که اصلاح خاک با این روش‌ها و تزریق فراوان دوغاب سیمان در عمق زمین باعث می‌شود که مقادیر زیادی از سیمان وارد آب و خاک گردد که موجب مشکلات

۲-۲- روش انجام آزمایش

جهت تهیه نمونه‌ها ابتدا مقدار خاک مورد نظر تهیه شده از ساختگاه از حالت کلوخه‌ای خارج شده و به منظور جداسازی خرده‌سنگ‌ها از الک شماره ۴۰ عبور داده می‌شود. خاک عبوری درون گرمخانه قرار گرفته تا کاملاً خشک شود، سپس اندازه مشخصی از خاک با مقادیر مختلف آهک و آب (به نسبت وزنی خشک خاک) برای ساخت نمونه‌ها به طور دقیق توزین می‌شود. خاک رس با مقادیر آب (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درصد) مخلوط نموده سپس دوغاب آهک با نسبت آب به آهک برابر ۰/۶ به مخلوط خاک رس درون جام میکسر برقی اضافه و به مدت یک دقیقه با دور کند به هم زده می‌شود. ترکیب خاک-آب-آهک را درون جام با دست به هم زده و در نهایت به مدت ۳۰ ثانیه با دور تند کاملاً یکنواخت می‌گردد. مخلوط کردن خاک و آهک باید در کمترین زمان انجام شود زیرا منجر به ایجاد پدیده کرناسیون می‌شود. در واقع کرناسیون یک پدیده نامطلوب است که در نتیجه عدم انجام واکنش خاک با آهک به وجود می‌آید. در طی این واکنش آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث ایجاد یک ماده چسبنده ضعیف و بازگشت آهک به حالت غیرفعال می‌گردد [۲۹]:

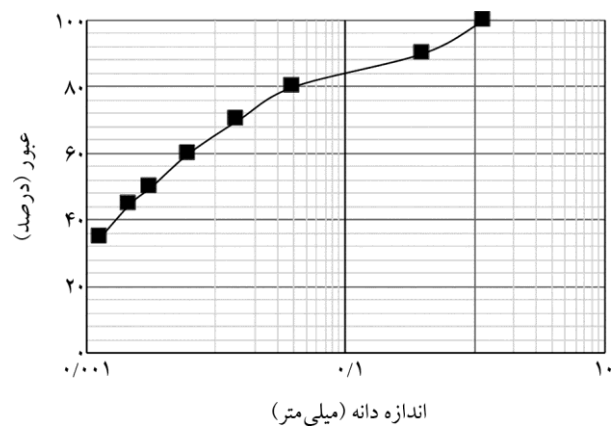


۲-۳- تهیه نمونه‌های تثبیت شده

در این مطالعه تعداد ۲۴ نمونه با مقادیر متغیر آهک (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰) و میزان آب (۴۵، ۶۵ و ۸۵) به ترتیب ۱ و ۱/۵ و ۲ برابر حد روانی خاک رس نرم ساخته شده است. نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در پنج لایه با تمهیدات خاص جهت انجام آزمایش با دستگاه المان خمشی تولید و پس از عایق‌بندی ابتدا و انتهای آن با محفظه‌های پلاستیکی درون کیسه‌های نایلونی در شرایط رطوبت و دما نگهداری می‌گردند. زمان‌های عمل‌آوری در این تحقیق ۲۸ و ۵۶ روزه در نظر گرفته شده‌اند. افزایش فشار همه‌جانبه بر نمونه‌ها تا

خاک در رده CL قرار می‌گیرد. منحنی دانه‌بندی نشان می‌دهد که ۴۵ درصد مصالح از رس تشکیل شده است.

آهک مورد استفاده در این پژوهش از نوع آهک آب‌دیده به صورت پودر سفید شیری‌رنگ می‌باشد و جهت استفاده در آزمایش‌ها از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شده است. این آهک از کارخانه صدف یزد تهیه شده و pH آن بین ۱۱ تا ۱۲ می‌باشد. نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس^۲ در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): منحنی دانه‌بندی خاک رس.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک رس نرم.

مقدار	مشخصات
۲/۶۶	چگالی ویژه
۱۹	رطوبت طبیعی (درصد)
۴۲	حد روانی
۲۱	حد خمیری (درصد)
۲۱	شاخص خمیری (درصد)
۴۵	درصد رس (درصد)
۴۰	درصد سیلت (درصد)
۱۸/۲۵	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۷/۲۵	pH

جدول (۲): مشخصات آهک مورد استفاده.

مقدار (درصد)	مواد
۹۶/۵	Ca(OH) ₂
۱/۵	CaCO ₃
۱	CaO
۱	Other

۲-۴- دستگاه المان خمشی^۳

آزمایش المان خمشی برای اندازه گیری سرعت موج برشی از طریق انتشار امواج در نمونه‌های ساخته شده و با استفاده از خواص پیزوالکتریک‌ها در آزمایشگاه به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیزوالکتریک‌ها در اثر ارتعاش، اختلاف پتانسیل تولید می‌کند و بالعکس در اثر ایجاد اختلاف پتانسیل مرتعش می‌گردند. در این آزمایش با دستگاه تولید کننده موج، موجی الکتریکی به‌صورت اختلاف پتانسیل به پیزوالکتریک‌ها منتقل شده و این موج باعث ایجاد ارتعاش در المان خمشی فرستنده می‌گردد. با رسیدن این موج به المان گیرنده ولتاژی در آن ایجاد می‌شود که توسط دستگاه اسیلوسکوپ قابل مشاهده است (شکل ۳-الف). مطابق مطالعات گذشته، محققین آزمایش با دستگاه المان خمشی را فقط بر روی نمونه‌های نرم (تثبیت نشده) به دلیل ساختار آسیب‌پذیر تیغه‌های پیزوالکتریک انجام می‌دادند. به این معنی که شاید تاکنون مطالعاتی بر روی خصوصیات کرنش کوچک نمونه‌ها پس از فرآیند تثبیت انجام نشده است. در این مطالعه برای تعیین سرعت موج برشی در نمونه‌های سخت شده راهکار جدیدی اتخاذ شده است. برای این منظور حفره‌ای مطابق شکل (۳-ب) در ابتدا و انتهای نمونه ایجاد می‌گردد، سپس به جهت تماس تیغه‌ها با نمونه، حفره با دوغاب گچ پر می‌شود و تیغه‌ها به آرامی درون شیار قرار داده و ۳۰ دقیقه پس از خشک شدن گچ، آزمایش انجام می‌گردد (شکل ۳-پ).

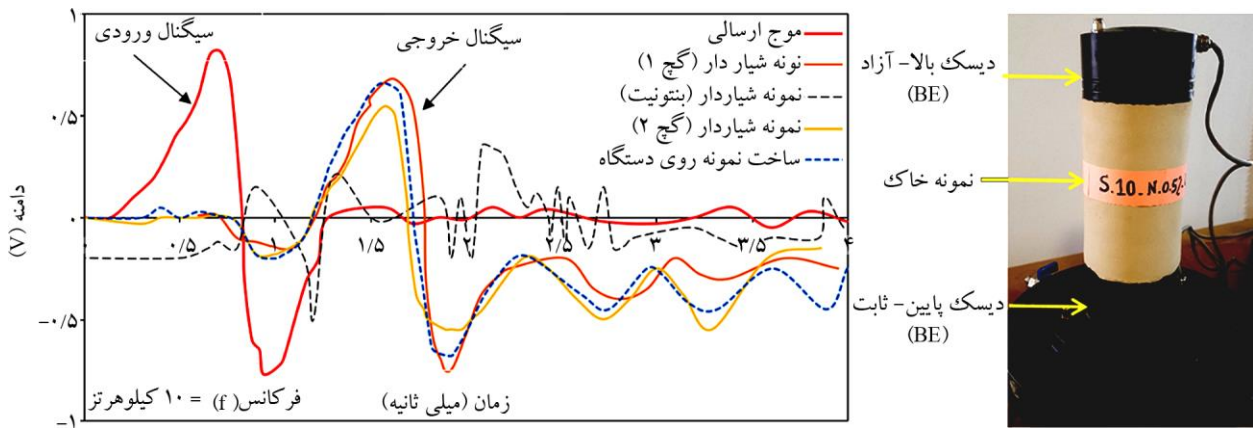
قبل از تنش تسلیم (py) مؤثر نیست، بر اساس مطالعات گذشته تأثیر فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه‌های سخت شده قابل توجه نیست [۲۴، ۳۰]. مطابق مطالعات انجام شده توسط ترلیکوا و همکاران [۳۰]، مقادیر اندازه گیری شده مدول برشی حداکثر نمونه‌های رسی تثبیت شده با سیمان مستقل از فشار همه‌جانبه می‌باشند. یانگ [۲۴] نشان داد که فشار همه‌جانبه اعمالی به نمونه‌ها تأثیر خیلی کمی بر میزان مدول برشی حداکثر خاک رس تثبیت شده با سیمان دارد؛ بنابراین نمونه‌ها بر اساس مطالعات قبلی در فشار همه‌جانبه صفر آزمایش شده‌اند. برنامه آزمایش در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): برنامه کلی آزمایش.

شماره نمونه	درصد آهک	درصد آب
۱ و ۲	۵	۴۵
۳ و ۴		۶۵
۵ و ۶		۸۵
۷ و ۸	۱۰	۴۵
۹ و ۱۰		۶۵
۱۱ و ۱۲		۸۵
۱۳ و ۱۴	۱۵	۴۵
۱۵ و ۱۶		۶۵
۱۷ و ۱۸		۸۵
۱۹ و ۲۰	۲۰	۴۵
۲۱ و ۲۲		۶۵
۲۳ و ۲۴		۸۵

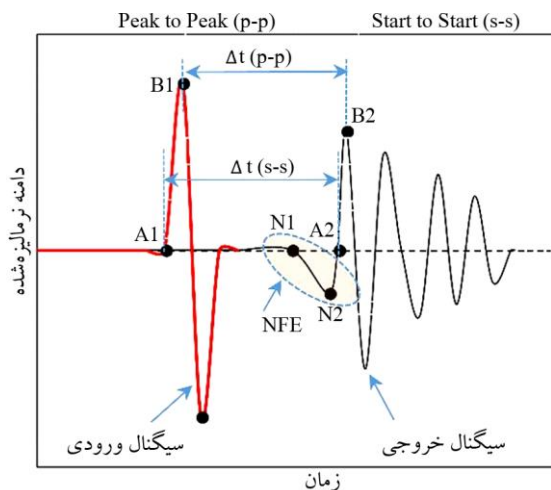


شکل (۳): (الف) سیستم‌های مرتبط با آزمایش المان خمشی، (ب) نمونه شیار خورده و (پ) نمونه آماده آزمایش.

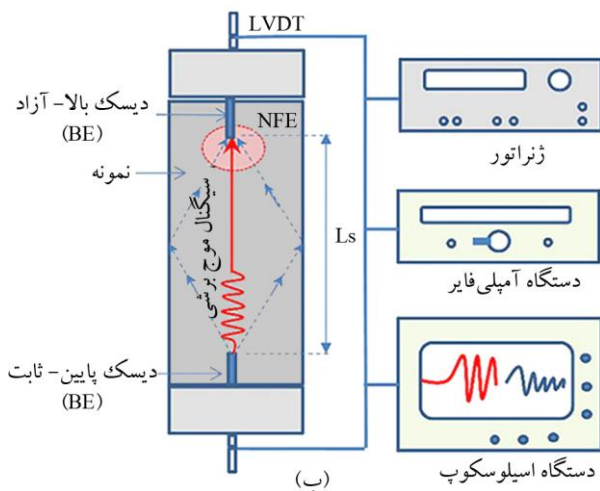


شکل (۴): مقایسه انتشار امواج در نمونه‌های تثبیت شده با شیار و پرکننده‌های مختلف بنتونیت و گچ تازه.

است [۳۱]. نحوه اتصال تجهیزات جانبی دستگاه به صورت شماتیک در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف) روش اندازه‌گیری زمان ارسال و دریافت امواج و (ب) تصویر شماتیک از سیستم المان خمشی.

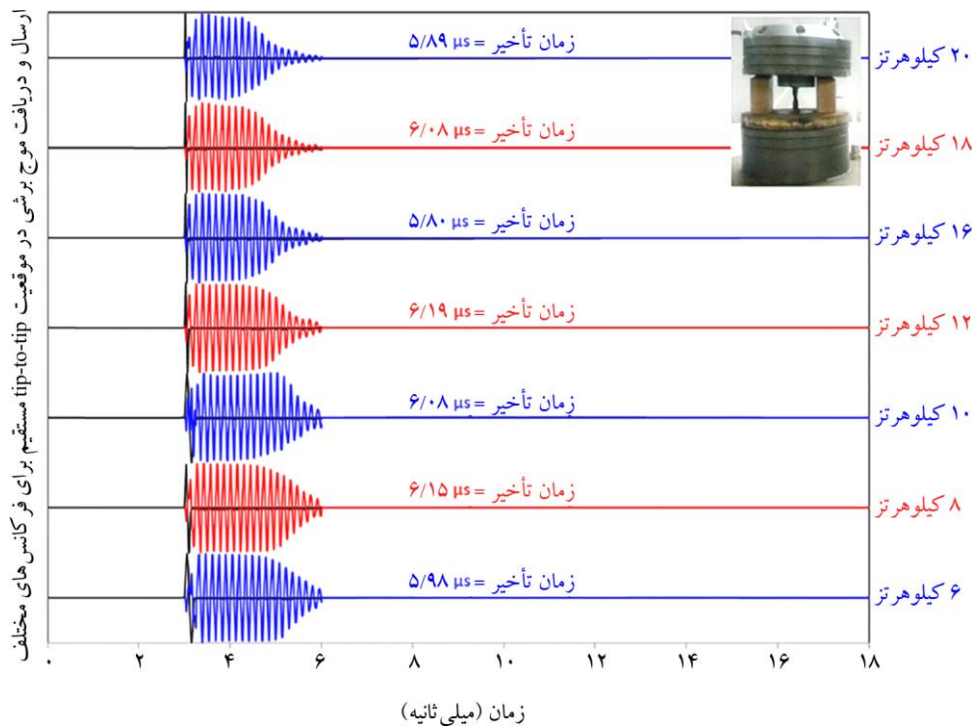
جهت اطمینان از صحت روش آزمایش، امواج با فرکانس معینی در یک نمونه ساخته شده درون دستگاه المان خمشی منتشر و امواج خروجی ثبت شده است، حال بر روی همین نمونه حفره‌هایی در ابتدا و انتها ایجاد و در چند مرحله با مصالح بنتونیت و گچ پر شده و امواج در آنها منتشر و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد تطابق کاملاً مناسبی بین امواج خروجی نمونه ساخته شده درون دستگاه با نمونه‌های شیاردار و پر شده با گچ وجود دارد.

امواج منتشر شده توسط پیزو الکتریک‌های فرستنده و گیرنده موجب ارتعاش و کرنش کم در محدوده 10^{-4} درصد در نمونه خاک شده و با تعیین فاصله دو المان (L_{tt}) و همچنین تعیین زمان ارسال موج (Δt)، سرعت موج برشی (V_s) و بر اساس روابط پایه‌ای انتشار امواج در محیط‌های الاستیک، مدول برشی حداکثر (G_{max}) بر اساس روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌گردد:

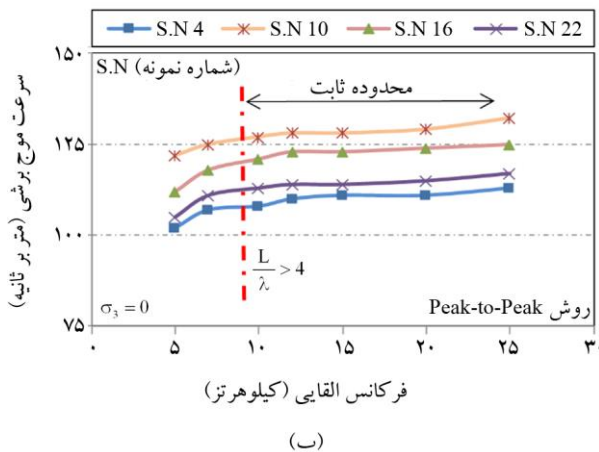
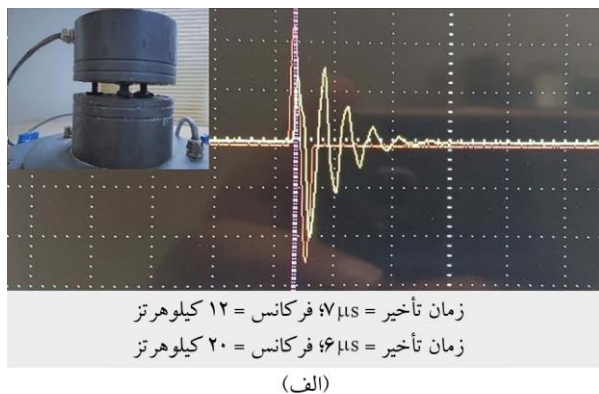
$$V_s = \frac{L_{tt}}{\Delta t} \quad (4)$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (5)$$

در این روابط ρ دانسیته نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تعیین دقیق زمان ارسال و دریافت امواج از جمله peak-to-peak و start-to-start استفاده شده و این روش‌ها با هم مقایسه گردیده‌اند (شکل ۵-الف). نتایج اکثر این مطالعات نشان می‌دهد که روش peak-to-peak مطمئن‌تر



شکل (۶): تعیین خطای تأخیر زمان ارسال و دریافت امواج دستگاه المان خمشی [۳۲].



شکل (۷): (الف) محاسبه خطای تأخیر زمان ارسال و دریافت امواج و (ب) تعیین محدوده ثابت فرکانس القایی.

به منظور اندازه گیری میزان خطای زمان تأخیر و تعیین جهت امواج دستگاه تیغه‌های فرستنده و گیرنده در حالت مماس قرار داده می‌شوند و در این وضعیت زمان ارسال و دریافت اندازه گیری می‌گردد. بر اساس مطالعات رجبی و شریفی پور [۳۲] با این دستگاه (شکل ۶) و همچنین آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه (شکل ۷-الف) مشاهده می‌شود که جهت امواج ارسالی و دریافتی همسو بوده و خطای تأخیر زمان در محدوده قابل قبولی می‌باشد. در این مطالعه فرکانس القایی ۱۰ کیلوهرتز بر اساس محدوده ثابت فرکانسی (شکل ۷-ب) و همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های تطبیقی ستون تشدید انتخاب شده‌اند.

در دو دهه اخیر استفاده از آزمایش‌های المان‌های خمشی از استقبال خوبی برخوردار بوده است که روی دستگاه‌های متعارف آزمایشگاهی مکانیک خاک مانند دستگاه سه‌محوری، ستون مرتعش و ساترفیوژ و ... قابل نصب است. این آزمایش دقیق، ساده، غیر مخرب و غالباً ارزان بوده و به نسبت آزمایش‌های صحرائی سرعت بهتری دارد. در این مطالعه به منظور تأیید نتایج دستگاه المان خمشی آزمایشگاه دانشگاه رازی کرمانشاه، یک سری

لئونگ و همکاران [۳۴] تأثیر پدیده میدان نزدیک بر اساس نسبت طول مسیر انتشار امواج (L) به طول موج (λ) سنجیده می‌شود. آریو و همکاران [۳۵] نشان دادند هنگامی که نسبت L/λ بزرگ‌تر از $1/6$ شود تأثیر میدان نزدیک کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در این مطالعه این نسبت بزرگ‌تر از ۴ منظور شده است (شکل ۷-ب).

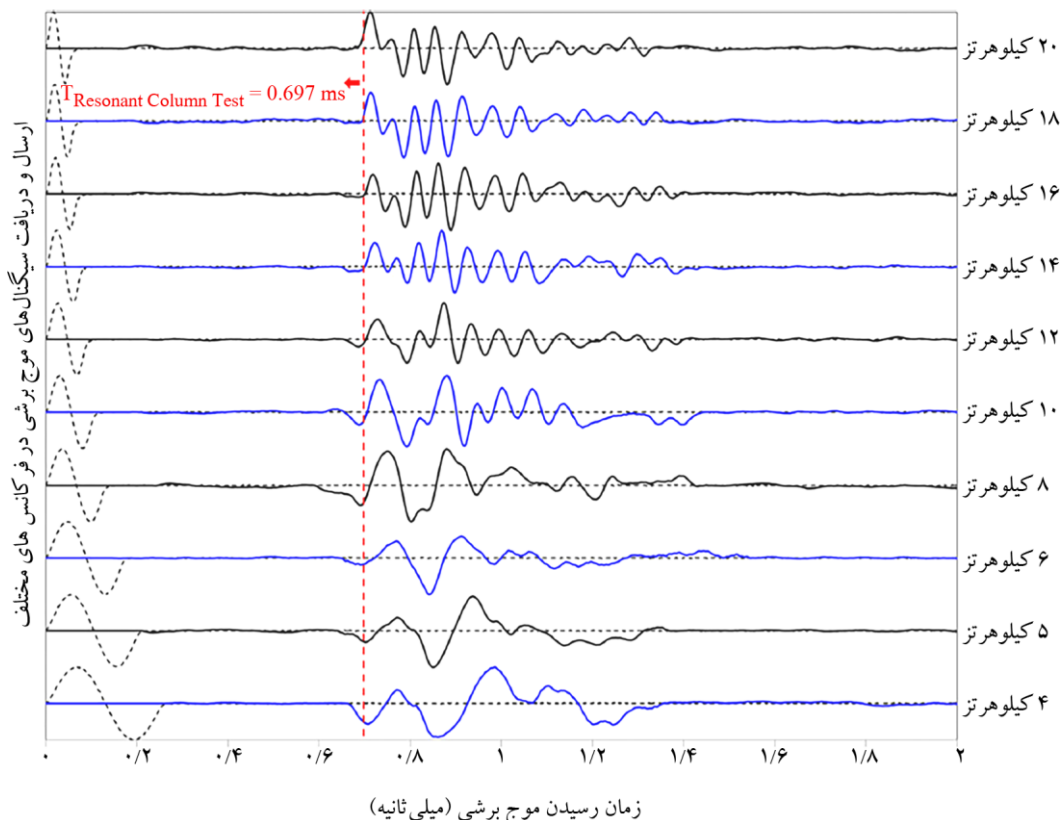
۳- تحلیل و بررسی نتایج آزمایش

مشخصات فیزیکی نمونه‌های تثبیت شده در پایان دوره‌های عمل آوری قبل از انجام آزمایش‌های المان خمشی به شرح جدول (۴) می‌باشد.

نمودار تغییرات مدول برشی حداکثر در زمان‌های عمل آوری ۲۸ و ۵۶ روز با میزان ثابت آهک ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و درصدهای متفاوت آب ۴۵، ۶۵ و ۸۵ درصد در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که می‌توان تغییرات مدول برشی دینامیکی حداکثر با درصد آهک را بر اساس یک رابطه غیرخطی ارائه نمود ($y = a^x$).

آزمایش‌های تطبیقی با دستگاه ستون تشدید در آزمایشگاه پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بر روی ماسه خشک اوتاوا در شرایط یکسان در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال و نسبت تخلخل ۰/۷۱۵ در فرکانس‌های ۴ تا ۲۰ کیلوهرتز توسط رجیبی و شریفی پور [۳۳] انجام شده است. نتایج حاصل از دستگاه ستون تشدید بر نمودار نتایج المان خمشی به صورت زمان دریافت موج در شکل (۸) منطبق شده است. بر اساس این مطالعات در فرکانس‌های ۴ تا ۸ کیلوهرتز نتایج دو دستگاه یکسان نیستند ولی در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز کاملاً منطبق می‌باشند. مغایرت نتایج دو دستگاه در فرکانس‌های کمتر از ۸ کیلوهرتز ناشی از تأثیر میدان نزدیک^۴ در دستگاه المان خمشی می‌باشد (شکل ۵).

این پدیده به این صورت ظاهر می‌گردد که اولین پاسخ در امواج دریافتی متناظر با رسیدن موج برشی نیست (نقاط N_1 و N_2 در شکل (۵-الف)) و به شکل یک تغییر شکل اولیه قبل از ایجاد تغییر شکل اصلی در موج دریافتی ظاهر می‌شود. بر اساس مطالعات

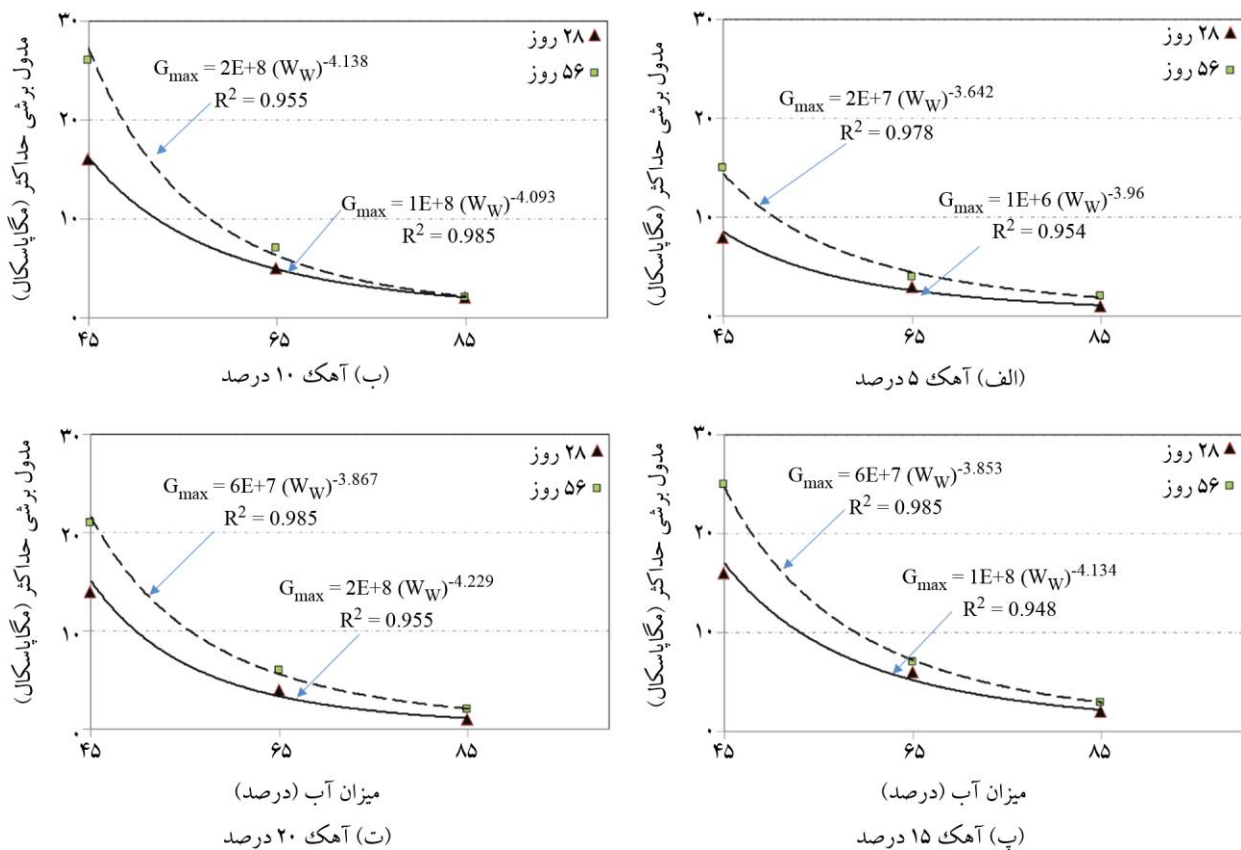


شکل (۸): نتایج آزمایش المان خمشی و ستون تشدید در فرکانس‌های ۴ تا ۲۰ کیلوهرتز [۳۳].

جدول (۴): مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش.

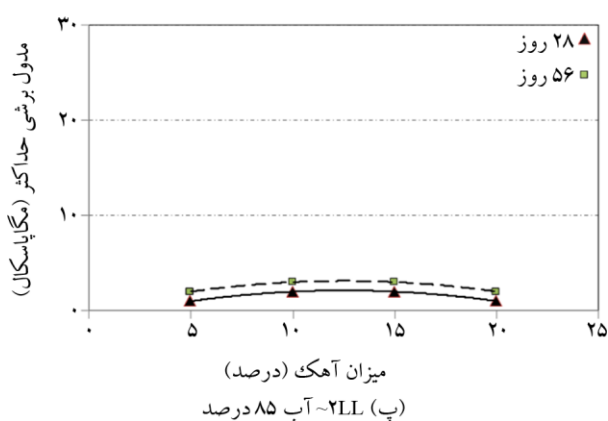
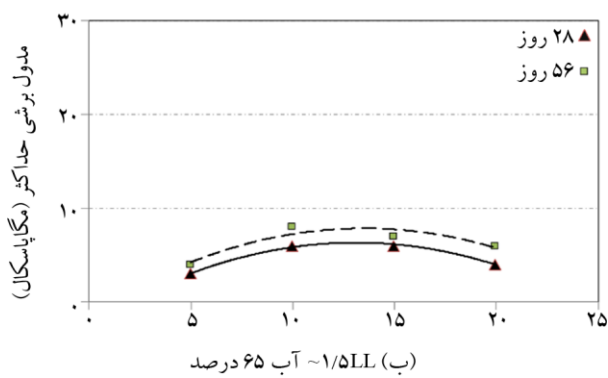
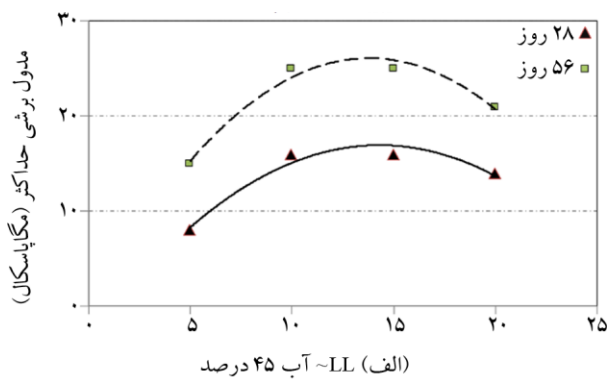
عمل آوری ۵۶ روزه			عمل آوری ۲۸ روزه			ترکیب نمونه‌ها
تخلخل n (درصد)	وزن واحد حجم (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	درصد رطوبت (درصد)	تخلخل n (درصد)	وزن واحد حجم (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	درصد رطوبت (درصد)	
۴۵/۹	۱۶/۹	۲۱	۴۷/۱	۱۷/۹۴	۲۸	$0.5L + 0.45C_w$
۵۰/۱	۱۶/۸	۲۴	۵۱	۱۷/۹۰	۳۱	$0.5L + 0.65C_w$
۵۲	۱۶/۷۵	۲۶	۵۳/۲	۱۷/۸۳	۳۹	$0.5L + 0.85C_w$
۴۵	۱۶/۶	۱۷	۴۶/۱	۱۷/۲۲	۲۳	$0.1L + 0.45C_w$
۴۶/۹	۱۶/۵۵	۲۰	۴۷/۵	۱۷/۱۵	۲۹	$0.1L + 0.65C_w$
۵۰/۱	۱۶/۴۸	۲۲	۵۰/۲	۱۷/۰۵	۳۴	$0.1L + 0.85C_w$
۴۴/۸	۱۶/۳۰	۱۳	۴۶/۱	۱۶/۹	۱۸	$0.15L + 0.45C_w$
۴۷/۱	۱۶/۲۵	۱۶	۴۷/۹	۱۶/۸۱	۲۳	$0.15L + 0.65C_w$
۴۹/۹	۱۶/۱۵	۲۰	۵۰	۱۶/۷۳	۲۷	$0.15L + 0.85C_w$
۴۶/۱	۱۶/۰۵	۱۰	۴۷/۲	۱۶/۳	۱۶	$0.2L + 0.45C_w$
۴۸	۱۵/۹۰	۱۳	۵۰	۱۶/۰۵	۲۰	$0.2L + 0.65C_w$
۵۲	۱۵/۲۰	۱۹	۵۳	۱۵/۹۵	۲۴	$0.2L + 0.85C_w$

*C_w: آب کل



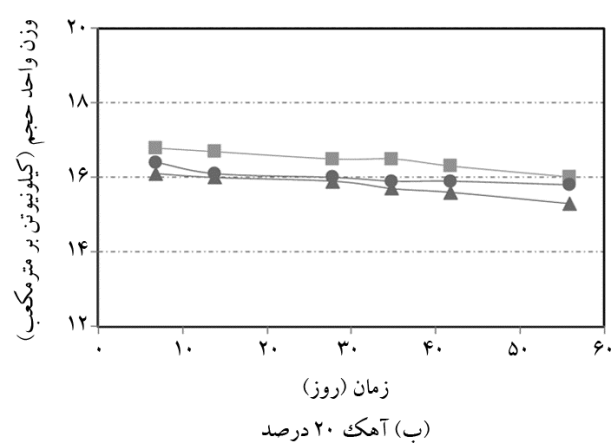
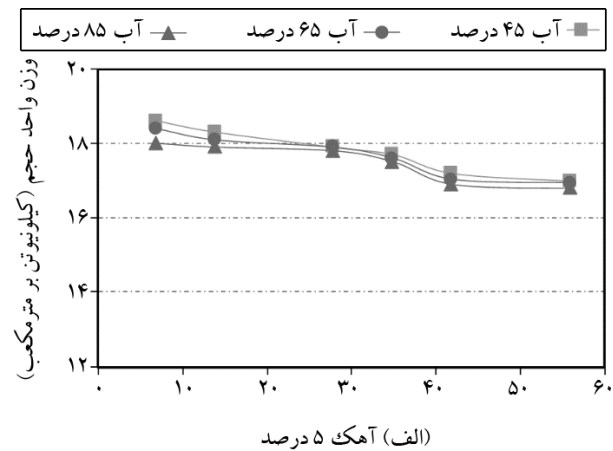
شکل (۹): تغییرات مدول برشی حداکثر با درصد‌های مختلف آب.

آهک ۱۰ درصد و مقدار آب ۴۵ درصد است، افزودن آهک و آب بیش از این مقادیر موجب کاهش قابل توجه مدول برشی حداکثر می‌شود. دلیل این تغییرات کاهش وزن واحد حجم نمونه‌ها در مقادیر بالای میزان آهک است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد آب به بیش از میزان رطوبت حد روانی خاک موجب کاهش در مدول برشی حداکثر می‌شود. به طوری که افزایش ۱/۵ و ۲ برابری میزان رطوبت حد روانی به ترتیب موجب کاهش ۷۰ و ۹۰ درصدی مدول برشی حداکثر می‌گردد. بر اساس این نتایج مصرف آب هنگام تثبیت، خصوصاً روش اختلاط عمیق^۵ و تزریق^۶ دارای حساسیت ویژه‌ای است و نیاز به کنترل دقیق دارد.



شکل (۱۱): تغییرات مدول برشی حداکثر با درصدهای مختلف آهک.

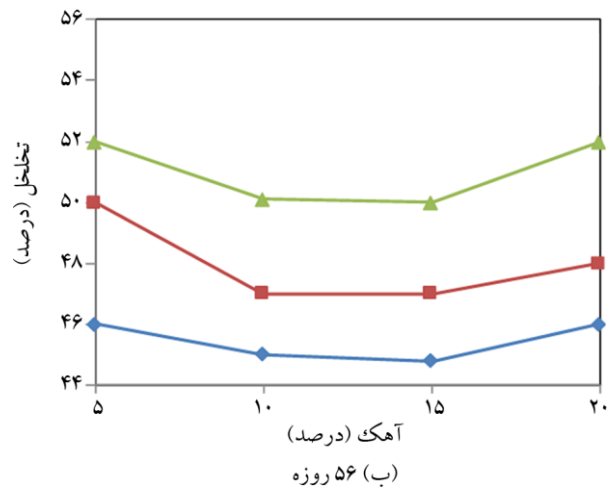
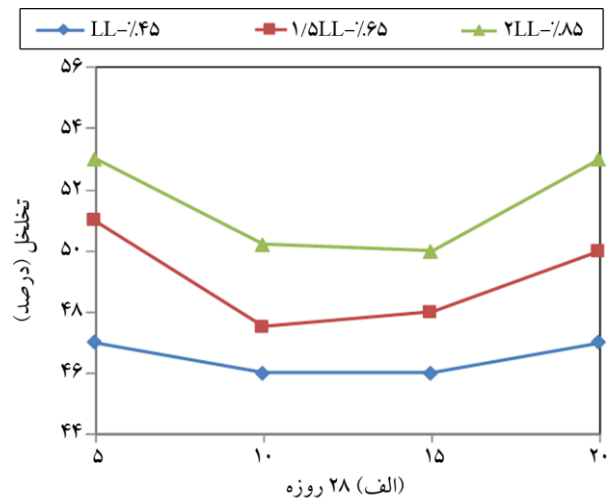
همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار آب در میزان مشخصی از آهک موجب تضعیف پیوندهای داخلی می‌گردد [۲۳، ۱۶] و مدول برشی حداکثر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. دلیل کاهش مدول برشی حداکثر، افزایش نسبت تخلخل و کاهش وزن واحد حجم نمونه‌ها می‌باشد (شکل ۱۰). مطابق مطالعات محققین افزایش نسبت تخلخل موجب کاهش سرعت موج برشی و به تبع آن موجب کاهش مدول برشی حداکثر می‌شود [۲۰]. این روند کاهشی برای دوره‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه یکسان است. همچنین تغییرات مدول برشی حداکثر نمونه‌های تثبیت شده در مقادیر مختلف آهک و مقادیر ثابت آب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۲) نشان می‌دهد با افزایش میزان آهک نسبت تخلخل نمونه‌ها تا محدوده میزان آهک ۱۰ درصد کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. بر اساس این نمودارها مقادیر بهینه مدول برشی حداکثر،



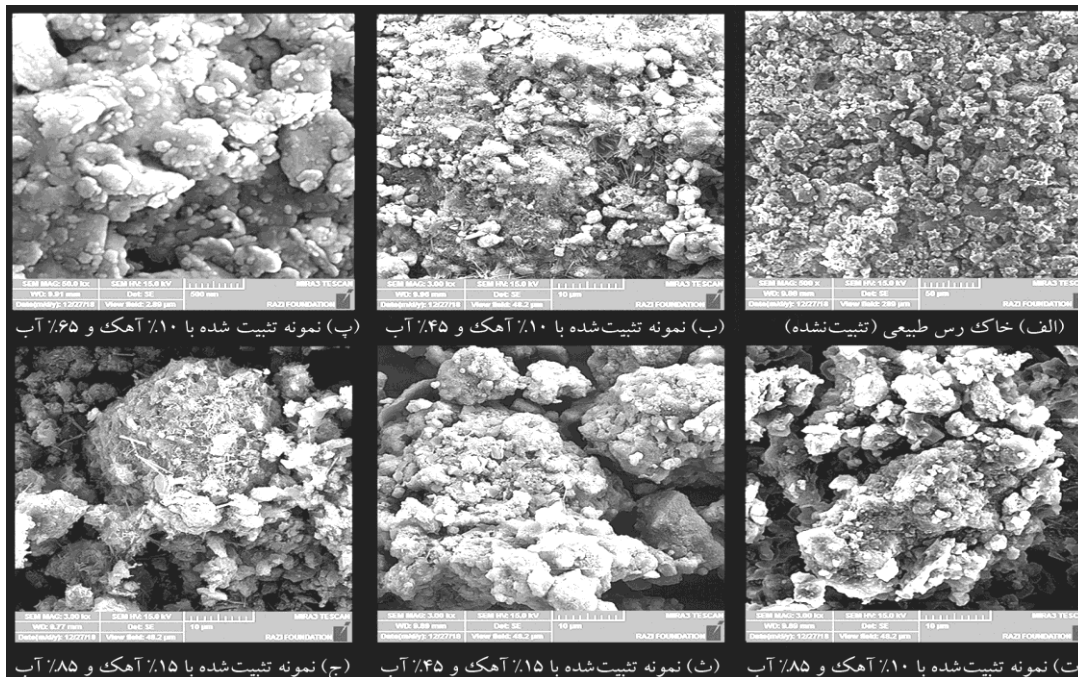
شکل (۱۰): تغییرات وزن واحد حجم نمونه‌های تثبیت شده در درصدهای مختلف آهک و آب با زمان عمل‌آوری.

۴- مطالعه ریز ساختاری

مطالعه ریز ساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی^۷ برای تأیید نتایج آزمایش انجام می‌گردد. در شکل (۱۳) تصاویر SEM نمونه‌های رسی با درصدهای مختلف آهک و آب در عمل آوری ۵۶ روزه نشان داده شده است. خاک طبیعی بدون مواد افزودنی در شکل (۱۳-الف) قابل مشاهده است. مطابق شکل (۱۳-ب) در عمل آوری ۵۶ روزه با افزودن ۱۰ درصد آهک که بهینه است سطح نمونه‌ها از تراکم بیشتری برخوردار است، آنچه در این تصویر به وضوح مشخص است بافت و ساختار ریز نمونه می‌باشد که بیانگر تکمیل و عملکرد مناسب واکنش‌های پوزولانی است، زیرا با افزودن آهک ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت مجتمع تغییر یافته است. با افزودن آب به این ترکیب فضای خالی و حفره‌ها بیشتر می‌شود (شکل ۱۳-پ). افزایش آهک به بالاتر از ۱۰ درصد ساختار خاک مجدداً باز شده و بیانگر آن است که آهک اضافی قادر به تغییر ساختار خاک نبوده و رسوب می‌گردد، بنابراین اضافه کردن آهک بیش از ۱۰ درصد نه تنها سودمند نیست بلکه اغلب موارد مضر نیز می‌باشد (شکل ۱۳-ت، ث و ج). به عبارت بهتر میزان آهک ۱۰ درصد و رطوبت برابر حد روانی خاک نسبت‌های بهینه در تثبیت خاک می‌باشند.



شکل (۱۲): تغییرات میزان تخلخل با درصدهای مختلف آهک.



شکل (۱۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی.

نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده و همچنین از هم‌پاشیدگی ساختار نمونه‌ها در میزان آهک‌های بالاتر مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی نشان از بهینه بودن آهک ۱۰ درصد می‌باشد.

مطابق این نتایج، میزان آهک ۱۰ درصد و مقدار آب برابر رطوبت حد روانی خاک برای حصول بیشترین مقدار مدول برشی حداکثر و کمترین میزان تخلخل برای تشکیل پیوندهای سیمانته توصیه می‌گردد. نتایج به دست آمده در این مطالعه مقادیری با اندازه‌گیری مستقیم برای مدول برشی حداکثر و قابل استفاده جهت طراحی زمین‌های نرم رسی در فرایند تثبیت با آهک تحت نیروهای دینامیکی مانند زلزله می‌باشد.

مراجع

- Croft, J. (1967) The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, **17**(2), 119-135.
- Bell, F. (1996) Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, **42**(4), 223-237.
- Basma, A.A. and Tuncer, E.R. (1991) Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation Research Record* (1295).
- Xiao, H., Lee, F.H., and Chin, K.G. (2014) Yielding of cement-treated marine clay. *Soils and Foundations*, **54**(3), 488-501.
- Lee, F.H., Lee, Y., Chew, S.H., and Yong, K.Y. (2005) Strength and modulus of marine clay-cement mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(2), 178-186.
- Gallavresi, F. (1992) *Grouting Improvement of Foundation Soils, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*. ASCE, 1-38.
- Kauschinger, J., Perry, E., and Hankour, R. (1992) *Jet Grouting: State-of-the-Practice, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE. 169-181.
- Chia, B. and Tan, T. (1993) The use of jet grouting in the construction of drains in soft soils, Innovation in infrastructure development. *Proc., 11th Conf. of ASEAN Fed. of Eng. Organisations*, 20-26.
- Yong, D., Hayashi, K., and Chia, B. (1996) Jet

نتایج آزمایش‌های ریزساختاری عکس‌های میکروسکوپ الکترونی، هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایش‌ها دارد.

۵- جمع‌بندی

به منظور بررسی و اندازه‌گیری مقادیر مدول برشی حداکثر در مخلوط رس-آهک، تعداد ۲۴ آزمایش با دستگاه المان خمشی انجام گردید. در این مطالعه تأثیر آهک با مقادیر متغیر (۰.۵٪، ۱.۰٪، ۱.۵٪ و ۲.۰٪) و مقدار آب (۰.۴۵٪، ۰.۶۵٪ و ۰.۸۵٪) بر مدول برشی حداکثر خاک رس در دوره‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه در مدت دو ماه بررسی گردیده است. مقدار آب حدوداً ۱، ۱/۵ و ۲ برابر میزان رطوبت حد روانی (LL) خاک منظور شده است. نمونه‌های تثبیت شده تحت اثر فرکانس القایی ۱۰ کیلوهرتز قرار گرفتند. بر اساس تلفیق اطلاعات نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج فرکانس‌های القایی ۲ تا ۸ کیلوهرتز به نمونه‌های تثبیت شده به دلیل بروز پدیده میدان نزدیک قابل اعتماد نیستند. محدوده ثابت فرکانسی مطابق نتایج آزمایش‌ها ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد.
- در نمونه‌های تثبیت شده به میزان آب برابر حد روانی خاک و افزایش آهک از ۵ به ۱۰ درصد موجب افزایش ۶۷ درصد در مدول برشی حداکثر می‌گردد، همچنین افزایش آهک تا ۱۵ درصد تأثیری بر افزایش مدول برشی نسبت به ۱۰ درصد آهک ندارد و افزایش میزان آهک بیش از آن برای عمل تثبیت سودمند نخواهد بود.
- مدول برشی حداکثر نمونه‌ها در مقادیر میزان آب ۱/۵ و ۲ برابر حد روانی خاک و در میزان آهک ۱۰ درصد به دلیل افزایش تخلخل و کاهش وزن واحد حجم نمونه‌ها به ترتیب ۶۰ و ۷۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.
- نتایج بیانگر آن است که با افزایش زمان عمل‌آوری، مدول برشی افزایش می‌یابد، اما روند تغییرات برای دوره‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه یکسان است.
- تغییر ساختار و بافت نمونه‌های خاک رس با آهک ۱۰ درصد

19. Atkinson, J. and Sallfors, G. (1991) Experimental determination of soil properties (stress-strain-time). *Proc. 10th Eur. Conf: Soil Mech.*, Florence, p. 915.
20. Chiang, Y.C. and Chae, Y.S. (1972) Dynamic properties of cement treated soils. *Highway Research Record*, **379**, 39-51.
21. Fam, M. and Santamarina, J. (1996) Study of clay-cement slurries with mechanical and electromagnetic waves. *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(5), 365-373.
22. Fatahi, B., Le, T., and Khabbaz, H. (2013) Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International*.
23. Kai, Y. (2017) *Small Strain Behaviour of Cement Treated Singapore Marine Clay*. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore.
24. Yang, L. (2008) *Shear Stiffness Modeling of Cemented Sand and Cemented Clay*. Ph.D. Thesis, Department of University of Notre Dame, United States of America.
25. Hoyos, L.R., Puppala, A.J., and Chainuwat, P. (2004) Dynamic properties of chemically stabilized sulfate rich clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(2), 153-162.
26. Puppala, A.J., Kadam, R., Madhyannapu, R.S., and Hoyos, L.R. (2006) Small-strain shear moduli of chemically stabilized sulfate-bearing cohesive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(3), 322-336.
27. Bengt, B. (1993) *Ground Improvement*. John Wiley and Sons Publishing Company.
28. Oates, J. (1998) *Lime and Limestone*. John Wiley and Sons Publishing Company.
29. Christensen, A. (1969) Cement modification of clay soils. *Portland Cement Assoc. R & D Lab Bull*.
30. Trhlíková, J., BOHáč, J., and MAŠÍN, D. (2012) Small-strain behaviour of cemented soils. *Géotechnique*, **62**(10), 943.
31. Viggiani, G. and Atkinson, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Abstracts, p. 373A.
10. Sugawara, S., Shigenawa, S., Gotoh, H., and Hosoi, T. (1996) Large-scale jet grouting for pre-strutting in soft clay. *Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems: Grouting and Deep Mixing*. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 353-356.
11. Yahiro, T. and Yoshida, H. (1973) Induction grouting method utilizing high speed water jet. *Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 359-362.
12. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjo, Y. (1981) Deep mixing method using cement hardening agent. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 721-724.
13. Saitoh, S., Suzuki, Y., Nishioka, S., and Okumura, R. (1996) Required strength of cement improved ground. *Grouting and Deep Mixing*, Balkema, 557-562.
14. Liao, H., Kao, T., Chen, M., and Wu, Z. (1992) Grouting for retaining wall movement control of a deep excavation in soft clay, Grouting in the ground. *Proceedings of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineers*, Thomas Telford Publishing, 1994, 403-416.
15. Bergado, D., Ruenkairergsa, T., Taesiri, Y., and Balasubramaniam, A. (1999) Deep soil mixing used to reduce embankment settlement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **3**(4), 145-162.
16. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D. (2004) Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(10), 1096-1105.
17. Atkinson, J. (2000) Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, **50**(5), 487-508.
18. Clayton, C. and Heymann, G. (2001) Stiffness of geomaterials at very small strains. *Géotechnique*, **51**(3), 245-255.

32. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2017) An Experimental Characterization of Shear Wave Velocity (V_s) in Clean and Hydrocarbon-Contaminated Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**(6), 2727-2745.
33. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2018) Influence of weathering process on small-strain shear modulus (G_{max}) of hydrocarbon-contaminated sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **107**, 129-140.
34. 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.
35. Arroyo, M., Muir Wood, D., and Greening, P. (2003) Source near-field effects and pulse tests in soil samples. *Géotechnique*, **53**(3), 337-345.

واژه نامه

Unified Soil Classification System (USCS)	سیستم طبقه بندی متحد
X-Ray Fluorescence (XRF)	طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس
Bender Element	دستگاه المان خمشی
Near Filed Effect (NFE)	تأثیر میدان نزدیک
Deep Soil Mixing	اختلاط عمیق
Jet-Grouting	تزریق
Scanning Electron Micrograph (SEM)	تصویر میکروسکوپ الکترونی

Evaluation of the Unconfined Maximum Shear Modulus of Lime-Stabilized Clay with Bender Element Experiments

Seyed Hassan Jafari¹, Seyed Hamid Lajevardi^{2*}, Mohammad Sharifipour³,
and Mohsen Kamalian⁴

1. Ph.D. Graduate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran,
*Corresponding Author, email: sh-lajevardi@iau-arak.ac.ir
4. Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Soil dynamic properties play fundamental roles in the analysis and design of various earth structures. Shear modulus and damping ratio are two important dynamic properties. In particular, shear modulus, especially at the level of very small strains typically denoted as G_{max} , is a dynamic property of great significance, which is frequently implemented in the seismic design of geo-structures against the destructive earthquakes. The shear modulus reveals the resistance of geo-structure to the deformations imposed by the external loading. On the other hand, one of the commonly used methods to increase the strength and stiffness properties of soft soils is to stabilize them using either cement or lime. Addition of these stabilizing agents to the parent soil strengthens the bonding among particles, thus resulting in the overall increase in the shear stiffness of the mixture. Therefore, the stabilization technique is always considered as an efficient method of soil improvement. In the current study, the small strain shear modulus of soft clay stabilized with various lime contents is thoroughly evaluated using the results of a comprehensive series of bender elements tests under isotropic stress states. Bender element is a nondestructive experiment commonly used to estimate the velocity of shear waves propagating through the soil samples. Using the shear wave velocity obtained, the small strain shear modulus of the specimens could be easily evaluated with a simple equation in soil dynamics. The applicability of the bender element test to measure the shear wave velocity for the stiff stabilized samples in this study was extended using a new innovative method. The influence of input frequency on the shear wave velocity measurements was also rigorously examined and it was concluded that it barely affects the received signals. Based on the bender elements experimental results, the influence of lime inclusion (5%, 10%, 15% and 20%), water content (45%, 65% and 85%) and curing time (28 and 56 days) on the small strain shear modulus is thoroughly investigated. The amount of water in the soft clay-lime mixture was selected to be about 1, 1.5 and 2 times of the liquid limit moisture of the parent clay. According to the experimental results, it is observed that the small strain shear modulus decreases dramatically with the increase in the water content over the liquid limit. The addition of lime to the clay, up to a particular level, leads to a considerable increase in the small strain shear modulus. However, beyond this optimum value, the shear modulus shows a declining trend with the increase in the lime content, which is an indicative of the inefficiency of the stabilization process. Thus, it is a common practice to limit the lime content to a specific percentage so as to obtain the maximum possible value of shear stiffness. The general trends of shear modulus variation for the samples stabilized at different curing periods are also observed to be quite similar. In general, the small strain shear modulus increases with the increase in the curing time, as more chemical reactions could occur within the mixture. Finally, a microstructural analysis was also conducted using the scanning electron microscopy (SEM) images of the treated specimens so as to somehow justify the trends of variation in small strain shear modulus obtained from the bender element experiments. Utilizing the results obtained in the course of this study, useful information is provided for the prediction of the small strain shear modulus of the clays stabilized with lime using deep mixing or grouting methods.

Indeed, the results of this study could be effectively used in different geotechnical construction projects to improve the parent soil strength and stiffness properties and ensure about the serviceability and efficient performance of the underlying soil deposit.

Keywords: Maximum Shear Modulus, Small Strain, Bender Elements, Stabilized Soft Clay, Lime.