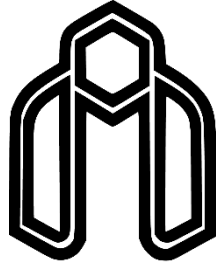


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٣٨



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

بررسی اثر بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای

نگارنده

مهران لالوئی

استاد راهنما:

دکتر محسن کرامتی

دکتر مهدی میرزائی

بهمن ۱۳۹۸

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات

کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم

و بهترین دوست و همراهم

که در سایه همیاری و همدلی او به این منظور نائل شدم

و برادرم

که وجودش شادی بخش و پایه آرامش من است.

شکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بخاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می کند و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جل":

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریمانه از کنار غفلت ما می گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محسن کرامتی و جناب آقای دکتر مهدی میرزائی که در کمال سع صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ گلی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از جناب آقای مهندس محمدی مسئول آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود و سرکار خانم فاضلی مسئول آزمایشگاه گشت میکروپ دانشگاه لوم پزشکی شاهرود به دلیل همکاری های صمیمانه و همراهی با تواضعشان سپاس گزارم.

در پایان از دوستان عزیزم مهندس سلیمان سبزه کار و مهندس محمد توفیق تبریزی که در مراحل مختلف دوره کارشناسی ارشد و بخصوص انجام این پژوهش بی منت و با قلبی مهربان یاری رسان بنده بوده، بی نهایت سپاسگزارم و از خداوند متعال آرزوی تندرستی، موفقیت و سربلندی دارم.

تعهدنامه

اینجانب مهران لالوئی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود

نویسنده پایان نامه « بررسی اثر بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای »

تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محسن کرامتی و جناب آقای دکتر مهدی میرزائی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققین دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در چند سال اخیر با گسترش زیرساخت های عمرانی، و نیز کمبود مناطق دارای خصوصیات ژئوتکنیکی مناسب جهت ساخت و ساز، بهسازی خاک اهمیت زیادی پیدا کرده است. وجود مشکلاتی از قبیل نیاز به صرف انرژی بالا به لحاظ اجرا، محدودیت در عمق بهسازی و گران بودن تجهیزات مورد نیاز در روش های موجود از جمله پیش بارگذاری، استفاده از مسلح کننده ها و یا مواد افزودنی نظیر آهک، سیمان و دیگر مواد شیمیایی محققان را به استفاده از روش های کم هزینه سوق داده است. همچنین ایجاد آلودگی در محیط زیست در برخی روش های بهسازی از جمله استفاده از مواد شیمیایی مانند آهک و سیمان موجب بروز برخی مشکلات زیست محیطی نظیر آلودگی شده است. استفاده از برخی روش های بهسازی خاک نیز باعث تغییر مسیر سفره های آب زیر زمینی نیز شده است که با توجه به ارتباط انسان با آب های زیر زمینی می تواند سلامت آن را به خطر اندازد. لذا استفاده از روش های نوین بهسازی و سازگار با محیط زیست ضروری می باشد.

ژئوتکنولوژی میکروبی شاخه ای جدید از مهندسی ژئوتکنیک است که به مطالعه امکان بهسازی خاک های مسئله دار با استفاده از روش های میکروبیولوژیکی می پردازد. در حال حاضر، اکثر مطالعات ژئوتکنیک میکروبی در مرحله آزمایشگاهی می باشد و با توجه به پیچیدگی آن، کاربرد ژئوتکنولوژی میکروبی نیاز به مطالعه میان رشته ای بین رشته های میکروبیولوژیکی، محیط زیست، ژئوشیمی با مهندسی ژئوتکنیک دارد. در این پژوهش با استفاده از باکتری اسپورسار سیناپاستوری اقدام به بهسازی بیولوژیکی خاک ماسه ای سیلیکاته فیروزکوه شده است با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلیک آزمایش های دینامیکی بر روی نمونه های خاک با ارتفاع ۴ cm و قطر ۱۰ cm در سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ kPa انجام شده است. در نتیجه آزمایشات افزایش مدول برشی در حدود ۲۳٪ در کرنش های پایین و حدود ۱٪ در کرنش های بالا، کاهش میرایی به صورت جزئی، افزایش سرعت موج برشی در حدود ۱۸ الی ۲۰ درصد و مدول برشی ماکزیمم در حدود ۳۵ الی ۴۵ درصد و کاهش مدول برشی نرمال شده مشاهده شده است.

واژه های کلیدی: بهسازی بیولوژیکی خاک، میکروارگانیزم، رسوب کلسیم کربنات، آنزیم اوره آز

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۱-۱-۱	مقدمه
۱-۲-۱	تشریح مساله و اهمیت موضوع
۱-۳-۱	ضرورت انجام تحقیق
۱-۴-۱	اهداف تحقیق
۱-۵-۱	روش انجام تحقیق
۱-۶-۱	ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۱-۲-۱	مقدمه
۱-۲-۲	روشهای بهسازی خاک
۱-۲-۲-۲	عملیات خاکی
۱-۲-۲-۳	تراکم
۱-۲-۲-۴	تراکم ارتعاشی و ستون شنی
۱-۲-۲-۵	میخکوبی و انکراژ
۱-۲-۲-۶	اختلاط عمیق و جتگروتینگ
۱-۲-۲-۷	میکروپایل
۱-۲-۲-۸	بهسازی فیزیکی و شیمیایی
۱-۲-۳	بهسازی بیولوژیکی
۱-۳-۲-۱	باکتریهای خاک
۱-۳-۲-۲	نقش میکرواورگانیسرها در فرآیند بهسازی بیولوژیکی
۱-۳-۲-۳	مراحل بهسازی بیولوژیکی
۱-۳-۲-۴	مزایا و معایب بهسازی بیولوژیکی
۱-۳-۲-۵	بررسی اثر عوامل مختلف بر فرآیند بهسازی بیولوژیکی
۱-۴-۲	ادبیات فنی مرتبط با بهسازیهای روش MICP
۱-۴-۲-۱	اثر بهسازی بیولوژیکی بر سرعت موج برشی خاک
۱-۴-۲-۲	اثر بهسازی بیولوژیکی بر نفوذپذیری خاک
۱-۴-۲-۳	اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت برشی خاک
۱-۴-۲-۴	اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت فشاری
۱-۴-۲-۵	اثر بهسازی بیولوژیکی بر نشست خاک

- ۳۴-۲-۴-۶- اثر بهسازی بیولوژیکی بر pH خاک..... ۳۴
- ۳۴-۲-۵- جمع بندی نتایج ادبیات فنی..... ۳۴

فصل ۳: روش تحقیق

- ۳۷
- ۳-۱-۱- مقدمه..... ۳۸
- ۳-۲- مواد و مصالح مصرفی..... ۳۸
- ۳-۲-۱- ماسه فیروز کوه..... ۳۸
- ۳-۲-۲- باکتری اسپورسارسیناهی پاستوری..... ۴۱
- ۳-۲-۳- محلول سیمانتاسیون..... ۴۳
- ۳-۳- آمادهسازی نمونه..... ۴۵
- ۳-۳-۱- طراحی و ساخت قالب..... ۴۵
- ۳-۳-۲- ساخت نمونه خاک..... ۴۸
- ۳-۳-۳- کشت باکتری..... ۴۹
- ۳-۳-۴- محلول سیمانتاسیون..... ۴۹
- ۳-۳-۵- تزریق به خاک..... ۵۱
- ۳-۳-۶- عملآوری نمونهها..... ۵۲
- ۳-۳-۷- محدودیتهای اجرا..... ۵۴
- ۳-۴- متعلقات دستگاه برش ساده سیکلیک و نحوه انجام آزمایشها..... ۵۴
- ۳-۴-۱- کمپرسور تامین فشار باد..... ۵۶
- ۳-۴-۲- اکچوریتهورهای افقی و قائم اعمال نیرو..... ۵۷
- ۳-۴-۳- سنسورهای ابزار دقیق..... ۵۸
- ۳-۴-۴- دیتالاگر ثبت و پردازش دادهها..... ۵۹
- ۳-۴-۵- کامپیوتر و نرمافزار ارسال فرامین و ثبت دادهها..... ۶۰
- ۳-۴-۶- بندر المنت جهت تعیین سر موج برشی و مدول برشی حداکثر (Bender Element)..... ۶۱
- ۳-۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM..... ۶۵
- ۳-۶- آزمایش طیف سنجی پراش پرتو ایکس XRD..... ۶۶
- ۳-۷- برنامه آزمایشها..... ۶۸

فصل ۴:

۷۳

نتایج و تفسیر آنها

- ۷۳
- ۴-۱- مقدمه..... ۷۴
- ۴-۲- آزمایشهای مرجع..... ۷۴

۷۴	۴-۲-۱-مدول برشی و میرایی
۸۰	۴-۲-۲-سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر
۸۵	۴-۲-۳-مدول برشی نرمال شده
۸۶	۴-۳-بهبودی بیولوژیکی خاک
۹۱	۴-۳-۱-اثر بهبودی بیولوژیکی بر مدول برشی
۹۶	۴-۳-۲-اثر بهبودی بیولوژیکی بر میرایی
۱۰۱	۴-۳-۳-اثر بهبودی بیولوژیکی بر سرعت موج برشی
۱۰۳	۴-۳-۴-اثر بهبودی بیولوژیکی بر مدول برشی حداکثر و مدول برشی نرمال شده
۱۰۹	۴-۴-نتایج آزمایش SEM
۱۲۱	۴-۵-نتایج آزمایش XRD
۱۲۲	۴-۶-نتیجه‌گیری

فصل ۵: ۱۲۵

جمع بندی و پیشنهاد ها ۱۲۵

۱۲۶	۵-۱-مقدمه
۱۲۶	۵-۲-جمع‌بندی
۱۲۷	۵-۳-نوآوری
۱۲۷	۵-۴-پیشنهاد ها

مراجع ۱۲۹

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) محدوده کاربرد روشهای مختلف بهسازی خاک..... ۹
- شکل (۲-۲) مقایسه بین اندازه ذرات خاک و میکروارگانیزم ها [۲۴]..... ۱۶
- شکل (۳-۲) فرآیند رسوب بیولوژیکی کلسیم کربنات بهوسیله هیدرولیز اوره..... ۱۸
- شکل (۴-۲) تاثیر زمان بر مقاومت فشاری تک محوره [۳۴]..... ۲۱
- شکل (۵-۲) اثر pH بر فعالیت هیدرویز اوره [۳۱]..... ۲۲
- شکل (۶-۲) نمودار تغییرات سرعت موج برشی نسبت به زمان [۴۰]..... ۲۴
- شکل (۷-۲) نمایی شماتیک از آزمایش انجام شده توسط دیانگ و همکاران ۲۰۱۰ [۴۱]..... ۲۴
- شکل (۸-۲) نمایی شماتیک از قالب ساخت نمونه در آزمایش ویفین و همکاران ۲۰۰۷ [۴۲]..... ۲۵
- شکل (۹-۲) میزان نفوذپذیری نمونه در طول نمونه ۵ متری در آزمایش ویفین و همکاران ۲۰۰۷ [۴۲]..... ۲۶
- شکل (۱۰-۲) نتایج آزمایش سه محوری انجام شده توسط دیانگ و همکاران ۲۰۰۶ [۴۰]..... ۲۷
- شکل (۱۱-۲) خاک بهسازی شده به روش بیولوژیکی توسط ونپاسن ۲۰۱۱ [۴]..... ۲۸
- شکل (۱۲-۲) نتایج آزمایشات ونپاسن و همکاران ۲۰۱۱ [۴]..... ۲۹
- شکل (۱۳-۲) نتایج آزمایش برش مستقیم توسط لی لین و فرشاد امینی [۴۳]..... ۳۰
- شکل (۱۴-۲) مقاومت فشاری ■ مقاومت فشاری پسماند بعد از شکست □ [۴۲]..... ۳۱
- شکل (۱۵-۲) نمونه بهسازی شده در آزمایش یوسوها را و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]..... ۳۲
- شکل (۱۶-۲) اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت فشاری - یوسوها را و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]..... ۳۲
- شکل (۱۷-۲) اثر بهسازی بیولوژیکی بر نشست بستر یک پی منفرد [۴۱]..... ۳۳
- شکل (۱۸-۲) اثر بهسازی بیولوژیکی بر PH خاک در آزمایش یوسوها را و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]..... ۳۴
- شکل (۱-۳) الکها و شیکر برای آزمایش دانه بندی..... ۳۹
- شکل (۲-۳) منحنی دانه بندی خاک..... ۴۰
- شکل (۳-۳) آمپول حاوی باکتری اسپورسارینا پاستوری..... ۴۲
- شکل (۴-۳) اوره..... ۴۴
- شکل (۵-۳) کلسیم کلراید دوآبه..... ۴۵
- شکل (۶-۳) پروفیل تفلون PTFE..... ۴۶
- شکل (۷-۳) فیتینگ ۶ میلیمتری..... ۴۷
- شکل (۸-۳) نمای بالا و زیر قالبهای ساخته شده..... ۴۷
- شکل (۹-۳) نمونههای آماده شده برای تزریق..... ۴۸

- شکل (۳-۱۰) محلول باکتری آماده شده برای تزریق..... ۴۹
- شکل (۳-۱۱) محلول سیمان تاسیون آماده شده برای تزریق..... ۵۰
- شکل (۳-۱۲) تزریق ثقلی به خاک با استفاده از سرنگ..... ۵۱
- شکل (۳-۱۳) نمونه ها پس از تزریق..... ۵۲
- شکل (۳-۱۴) نگهداری نمونه ها در دمای مناسب در طول دوره عملآوری..... ۵۳
- شکل (۳-۱۵) نمونه خارج شده از قالب..... ۵۴
- شکل (۳-۱۶) نمای کلی دستگاه برش ساده سیکلیک..... ۵۵
- شکل (۳-۱۷) کمپرسور تامین فشار باد..... ۵۶
- شکل (۳-۱۸) نمایی از جک قائم دستگاه..... ۵۷
- شکل (۳-۱۹) نمایی از جک افقی دستگاه..... ۵۸
- شکل (۳-۲۰) سنسور اندازه گیری جابهجایی قائم..... ۵۹
- شکل (۳-۲۱) دیتالاگر متصل به دستگاه برش ساده سیکلیک..... ۶۰
- شکل (۳-۲۲) نمایی از بخش کامپیوتری دستگاه..... ۶۱
- شکل (۳-۲۳) پداستال های Bender Element..... ۶۲
- شکل (۳-۲۴) اوسیلاتور..... ۶۳
- شکل (۳-۲۵) فانکشن ژنراتور..... ۶۴
- شکل (۳-۲۶) محیط نرم افزار..... ۶۴
- شکل (۳-۲۷) نمایی از دستگاه SEM..... ۶۶
- شکل (۳-۲۸) نمایی از دستگاه XRD..... ۶۸
- شکل (۴-۱) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک با دامنه ۱۰۰ kPa..... ۷۶
- شکل (۴-۲) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک با دامنه ۲۰۰ kPa..... ۷۶
- شکل (۴-۳) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک با دامنه ۳۰۰ kPa..... ۷۷
- شکل (۴-۴) اثر سربار بر مقدار مدول برشی در کرنش های مختلف..... ۷۹
- شکل (۴-۵) اثر سربار بر مقدار نسبت میرایی در کرنش های مختلف..... ۸۰
- شکل (۴-۶) اثر فشار محدود کننده بر مدول برشی ماکزیمم [۴۷]..... ۸۱
- شکل (۴-۷) اثر نسبت تخلخل بر مدول برشی ماکزیمم [۴۷]..... ۸۲
- شکل (۴-۸) گراف امواج در نمونه BE-U-V100..... ۸۳
- شکل (۴-۹) گراف امواج در نمونه BE-U-V200..... ۸۳
- شکل (۴-۱۰) گراف امواج در نمونه BE-U-V300..... ۸۴

شکل (۴-۱۱) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک نمونههای بهسازی شده با دامنه ۱۰۰ kPa.....	۸۷
شکل (۴-۱۲) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک نمونههای بهسازی شده با دامنه ۲۰۰ kPa.....	۸۸
شکل (۴-۱۳) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک نمونههای بهسازی شده با دامنه ۳۰۰ kPa.....	۸۸
شکل (۴-۱۴) مقایسه حلقه های هیستریزس نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده در کرنش ۳٪ و سربار kPa ۳۰۰.....	۸۹
شکل (۴-۱۵) مقایسه حلقه های هیستریزس نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده در کرنش ۴٪ و سربار kPa ۳۰۰.....	۸۹
شکل (۴-۱۶) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار ۱۰۰ kPa.....	۹۴
شکل (۴-۱۷) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار ۲۰۰ kPa.....	۹۵
شکل (۴-۱۸) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار ۳۰۰ kPa.....	۹۶
شکل (۴-۱۹) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۱۰۰ kPa.....	۹۹
شکل (۴-۲۰) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۲۰۰ kPa.....	۹۹
شکل (۴-۲۱) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۳۰۰ kPa.....	۱۰۰
شکل (۴-۲۲) گراف امواج در نمونه BE-T-V100.....	۱۰۱
شکل (۴-۲۳) گراف امواج در نمونه BE-T-V200.....	۱۰۱
شکل (۴-۲۴) گراف امواج در نمونه BE-T-V300.....	۱۰۲
شکل (۴-۲۵) نمودار مقایسه سرعت موج برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در سربار های مختلف.....	۱۰۳
شکل (۴-۲۶) نمودار مقایسه مدول برشی ماکزیمم در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در سربار های مختلف.....	۱۰۴
شکل (۴-۲۷) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۱۰۰ kPa.....	۱۰۶
شکل (۴-۲۸) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۲۰۰ kPa.....	۱۰۷
شکل (۴-۲۹) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۳۰۰ kPa.....	۱۰۷
شکل (۴-۳۰) از بین رفتن بافت بهسازی شده خاک در اثر آزمایشات سیکلیک.....	۱۰۹
شکل (۴-۳۱) بزرگنمایی ۱۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده.....	۱۱۰
شکل (۴-۳۲) بزرگنمایی ۱۰۰ برابری نمونه بهسازی شده.....	۱۱۰

- شکل (۳۳-۴) بزرگنمایی ۲۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۱
- شکل (۳۴-۴) بزرگنمایی ۲۰۰ برابری نمونه بهسازی شده..... ۱۱۱
- شکل (۳۵-۴) بزرگنمایی ۵۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۲
- شکل (۳۶-۴) بزرگنمایی ۵۰۰ برابری نمونه بهسازی شده..... ۱۱۲
- شکل (۳۷-۴) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۳
- شکل (۳۸-۴) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابری نمونه بهسازی شده..... ۱۱۳
- شکل (۳۹-۴) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۴
- شکل (۴۰-۴) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابری نمونه بهسازی شده..... ۱۱۵
- شکل (۴۱-۴) موقعیت نقطه شماره ۱ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۶
- شکل (۴۲-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۱ از نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۶
- شکل (۴۳-۴) موقعیت نقطه شماره ۳ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۷
- شکل (۴۴-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۲ از نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۷
- شکل (۴۵-۴) موقعیت نقطه شماره ۳ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۸
- شکل (۴۶-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۳ از نمونه بهسازی نشده..... ۱۱۸
- شکل (۴۷-۴) موقعیت نقطه شماره ۱ آنالیز EDS در نمونه بهسازی شده..... ۱۱۹
- شکل (۴۸-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۱ از نمونه بهسازی شده..... ۱۱۹
- شکل (۴۹-۴) موقعیت نقطه شماره ۲ آنالیز EDS در نمونه بهسازی شده..... ۱۲۰
- شکل (۵۰-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۲ از نمونه بهسازی شده..... ۱۲۰
- شکل (۵۱-۴) نتایج طیف XRD نمونه بهسازی نشده..... ۱۲۱
- شکل (۵۲-۴) نتایج طیف XRD نمونه بهسازی شده..... ۱۲۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) لیست آزمایشهای انجام شده در این پژوهش..... ۵
- جدول (۱-۲) طبقه بندی میکرواورگانیزمها [۲۹]..... ۱۷
- جدول (۲-۲) مشخصات خاک استفاده شده توسط دیانگ و همکاران ۲۰۰۶ [۴۰]..... ۲۳
- جدول (۳-۲) مشخصات خاک مورد استفاده توسط ویفین و همکاران ۲۰۰۷ [۴۲]..... ۲۵
- جدول (۴-۲) جمع بندی نتایج ادبیات فنی..... ۳۵
- جدول (۱-۳) مشخصات و ضرایب دانه بندی خاک..... ۴۰
- جدول (۲-۳) نتایج آزمایش وزن مخصوص حداقل و حداکثر..... ۴۱
- جدول (۳-۳) محیط کشت باکتری..... ۴۲
- جدول (۴-۳) برنامه اجرای آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی..... ۶۹
- جدول (۵-۳) برنامه آزمایشات سرعت موج برشی..... ۷۱
- جدول (۱-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۱۰۰ kPa..... ۷۷
- جدول (۲-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۲۰۰ kPa..... ۷۸
- جدول (۳-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۳۰۰ kPa..... ۷۸
- جدول (۴-۴) اطلاعات برداشت شده از گراف موج های برشی..... ۸۴
- جدول (۵-۴) سرعت موج برشی و مدول برشی ماکزیمم نمونه خاک ماسهای..... ۸۵
- جدول (۶-۴) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۱۰۰ kPa..... ۸۵
- جدول (۷-۴) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۲۰۰ kPa..... ۸۶
- جدول (۸-۴) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۳۰۰ kPa..... ۸۶
- جدول (۹-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونههای بهسازی شده با سربار ۱۰۰ kPa..... ۹۰
- جدول (۱۰-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونههای بهسازی شده با سربار ۲۰۰ kPa..... ۹۰
- جدول (۱۱-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونههای بهسازی شده با سربار ۳۰۰ kPa..... ۹۱
- جدول (۱۲-۴) مقایسه نتایج مدول برشی با سربار ۱۰۰ kPa..... ۹۲
- جدول (۱۳-۴) نتایج تحلیل داده های آزمایش با سربار ۲۰۰ kPa..... ۹۲
- جدول (۱۴-۴) نتایج تحلیل داده های آزمایش با سربار ۳۰۰ kPa..... ۹۳
- جدول (۱۵-۴) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۱۰۰ kPa..... ۹۷
- جدول (۱۶-۴) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۲۰۰ kPa..... ۹۷
- جدول (۱۷-۴) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۳۰۰ kPa..... ۹۸

- جدول (۴-۱۸) نتایج آزمایش تعیین سرعت موج برشی.....۱۰۲
- جدول (۴-۱۹) مقادیر مدول برشی ماکزیمم برای نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده.....۱۰۴
- جدول (۴-۲۰) محاسبه مدول برشی نرمال شده برای سربار 100 kPa۱۰۵
- جدول (۴-۲۱) محاسبه نسبت مدول برشی نرمال شده برای سربار 200 kPa۱۰۵
- جدول (۴-۲۲) محاسبه نسبت مدول برشی نرمال شده برای سربار 300 kPa۱۰۵

فصل ۱:

کلیات

۱-۱- مقدمه

در بسیاری از مناطق، خاک‌ها خصوصیات مکانیکی و یا دینامیکی مورد نیاز مهندسان را تأمین نمی‌کنند و به دلیل افزایش جمعیت در مناطق شهری و کاهش فزاینده‌ی مکان‌های مناسب برای ساخت و ساز نیاز به توسعه‌ی روش‌های بهسازی در بین جامعه‌ی مهندسان ژئوتکنیک در طول دهه‌های گذشته افزایش یافته است [۱]. به عنوان یک تعریف از بهسازی در مهندسی ژئوتکنیک می‌توان گفت بهسازی وسیله‌ای است که مهندس برای رفع موانع و مشکلات زمین‌های سست و نامناسب به کار می‌بندد [۲]. بر اساس تحقیقات انجام شده بیش از ۴۰۰۰۰ پروژه اصلاح خاک با هزینه‌های بیش از ۶ میلیارد دلار در سال در سرتاسر دنیا در حال اجرا می‌باشد [۱].

۱-۲- تشریح مساله و اهمیت موضوع

توجه کافی به رعایت مشخصات ژئوتکنیکی و پارامترهای مقاومتی خاک از بروز بسیاری از مشکلات فنی و مهندسی نظیر ریزش، ترک خوردگی، نشست‌های تفاوتی و ... در زمان اجرا و بهره‌برداری پروژه‌های عمرانی جلوگیری می‌نماید. تأمین این هدف اغلب منجر به افزایش هزینه ناشی از جابجایی زیاد خاک احجام منابع قرصه می‌گردد. محدود بودن بودجه و زمان اجرای کار در ساخت انواع سازه‌های خاکی نظیر راه، سد، راه آهن و فرودگاه سبب می‌گردد تا مهندسان به بهسازی خاک و اصلاح آن اقدام نمایند [۳]. انواع مختلف اصلاح خاک به صورت تثبیت مکانیکی، دینامیکی، الکتریکی، حرارتی و شیمیایی می‌باشد. از مهمترین روش‌های سنتی اصلاح، تثبیت به روش زهکشی، تثبیت با آهک، سیمان و قیر است، که با هدف افزایش مقاومت و خواص ژئوتکنیکی، افزایش توان باربری خاک، تغییر در نفوذپذیری و کاهش درصد جذب آب، جلوگیری از تورم و نشست می‌باشد.

انتخاب نوع و روش تثبیت خاک تحت تاثیر عوامل گوناگونی همچون کلیه مسائل فنی، اقتصادی، نیروی انسانی و ماشین‌آلات، تجربه‌ی شخصی و نتایج آزمایشات می‌باشد. بدین جهت مهندس ژئوتکنیک می‌بایست با توجه کافی به تمام این عوامل روش بهینه را انتخاب و برای انجام عملیات بهسازی به کار گیرد [۴]. اکثر روش‌های موجود در بهسازی خاک از قبیل استفاده از ذرات چسباننده، اپوکسی‌ها، فنوپلاستیک، سیلیکات‌ها و پلی‌اورتان بسیار پر هزینه می‌باشد [۵]. هزینه‌های اجرای بهسازی خاک بوسیله تزریق اغلب به دلیل غلظت بالای مواد مصرفی و نفوذپذیری کم آن‌ها دارای شعاع تاثیر کمی می‌باشند، این مهم منجر به حفر چاه‌های

تزریق به تعداد لازم می‌شود. همچنین استفاده از دستگاه‌های بزرگ برای ایجاد فشار مناسب جهت تزریق ممکن است موجب نشست در خاک شود [۶]. از سوی دیگر روش‌های تزریق که باعث آلودگی خاک می‌شوند، نگرانی‌هایی را برای محیط زیست ایجاد کرده‌اند. ممنوعیت استفاده از تمامی دوغاب‌های شیمیایی در کشور ژاپن در سال ۱۹۷۴ و همچنین قرار گرفتن همه مواد تزریقی (به جز سیلیکات سدیم) در زمره مواد سمی و خطرناک، در ایالات متحده شواهدی بر این نگرانی‌ها می‌باشد [۷]. بعلاوه در این روش‌ها، وارد کردن یک ماده خارجی به داخل خاک نه تنها بر محیط زیست منطقه اثر منفی می‌گذارد، بلکه با ایجاد یک منطقه نفوذناپذیر در خاک (از طریق تزریق)، باعث تغییر در مسیر آب‌های زیرزمینی شده که این مسئله می‌تواند کل شرایط زیستی منطقه را دگرگون نماید [۸]. عدم اطمینان به اجرا و در پی آن محافظه‌کاری در طراحی باعث گردیده تا تقاضا برای روش‌های جدید اقتصادی با کارایی بالاتر و سازگار با محیط زیست به صورت قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش باشد [۱].

تحقیقات اخیر در زمینه بهسازی زیستی خاک کارایی آن را از نظر عملکردی و حفظ و پایداری محیط زیست به اثبات رسانده است [۹]. بهسازی زیستی خاک روشی نوین و خلاقانه در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود که برای جلوگیری از روانگرایی و رانش ماسه‌های سست که معمولاً باعث تغییر شکل و فروپاشی فونداسیون‌ها می‌شود می‌توان از آن استفاده کرد [۱۰]. این روش دارای کاربردهای زیادی مانند افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک [۶] [۱۱]، بهسازی مقاومت و دوام بتن و ملات، ترمیم ترک‌های ساختمان [۱۲]، [۱۳]، بهسازی ویژگی‌های مهندسی خاک و سیمانی شدن ستون‌های ماسه‌ای می‌باشد. منظور از بهسازی زیستی خاک واکنشی شیمیایی است که در خاک باعث ایجاد رسوب کلسیتی و اصلاح برخی ویژگی‌های مهندسی خاک می‌شود. اخیراً شاخه‌ای از علم متشکل از مهندسی عمران، شیمی و میکروبیولوژی برای تغییر ویژگی‌های مهندسی خاک زیرسطحی به وجود آمده است. این تکنیک شامل پروسه‌های میکروبی خاک می‌باشد که از نظر تکنیکی ایجاد رسوب کلسینی به وسیله میکروبی‌ها (MICP^۱) نامیده شده و در طی آن کریستال کلسیم در خاک رسوب می‌کند [۱۴]. کریستال کلسیم ذرات خاک را به یکدیگر چسبانده و در نتیجه سیمانی شدن و چسبیدن خاک باعث افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) آن می‌شود، از این روش می‌توان به عنوان روشی جایگزین برای بهسازی خاک در سازه‌های جدید و قدیمی استفاده کرد و در موارد زیادی از مهندسی عمران مانند روانگرایی دپوهای ماسه‌ای، پایدارسازی شیب و بهسازی لایه‌های زیرسطحی نیز به کار می‌رود [۱۲].

مشخص گردیده است که میکروارگانیسم‌ها بر تشکیل خاک‌های ریزدانه (نرم) تأثیر داشته و رفتار خاک‌های

¹ Microbial Induced Calcite Precipitation

درشت دانه مانند مقاومت و نفوذپذیری آن‌ها را تغییر دهند. میکروارگانیزم‌ها همچنین در واکنش‌های شیمیایی خاک را تسهیل نمود. مقاومت آن را در برابر هوازگی افزایش داده و خصوصیات شیمیایی و مکانیکی نمونه‌ها را تغییر می‌دهند. با این وجود هنوز تأثیر این میکروارگانیزم‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی خاک در زمینه مهندسی ژئوتکنیک به طور کامل شناخته نشده است.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

بهسازی خاک و بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی آن به روش ایجاد خاصیت سیمانی در میان ذرات خاک از جمله موضوعاتی است که سال‌هاست مورد توجه محققین قرار گرفته است. همچنین بررسی این‌گونه روش‌ها از نقطه نظر زیست محیطی، مهم ارزیابی شده است. به طور معمول در صنعت برای تثبیت و بهبود مقاومت خاک از ۱۰٪ سیمان یا آهک استفاده می‌گردد که این مواد لایه بر تحمیل هزینه‌های بالا و صرف انرژی زیاد با انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد [۳]. استفاده از سیمان در سراسر جهان به تنهایی باعث تولید ۵-۷٪ از کل CO₂ تولید شده توسط انسان شده است [۱۵]. به همین گونه استفاده از اکثر مواد شیمیایی برای تثبیت خاک اثرات زیان باری بر سلامت بشریت داشته است [۴][۱۶]. بهسازی بیولوژیکی روشی نوین برای تثبیت و بهسازی خاک می‌باشد که چند سالی است مورد توجه محققین و دانشمندان قرار گرفته است که علاوه بر بی‌خطر بودن برای محیط زیست روشی ارزان قیمت می‌باشد [۱۷].

بر طبق مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف نتیجه می‌شود که بهسازی به روش بیولوژیکی موثر و کارآمد بوده برای بهبود خواص مکانیکی و مهندسی خاک‌ها بویژه خاک‌های ماسه‌ای میتوان از این روش استفاده کرد. حال این سوال مطرح می‌گردد که با وجود اهمیت بالای پارامترهای دینامیکی در مطالعات ژئوتکنیکی و ساخت سازه‌های مختلف و پی ماشین‌آلات آیا این روش بهسازی تأثیری بر پارامترهای دینامیکی خاک دارد و در صورت مثبت بودن این میزان چقدر است. در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های مربوط به پارامترهای دینامیکی به این موضوع پرداخته می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که بهسازی بیولوژیکی تأثیر مثبتی بر روی پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای داشته باشد.

۴-۱- اهداف تحقیق

در سال‌های اخیر روش بهسازی بیولوژیکی خاک‌ها بسیار مورد توجه محققین در سراسر جهان بوده است و آزمایش‌های گوناگونی در زمینه‌های میکروبیولوژی و مهندسی ژئوتکنیک در ارتباط با این موضوع صورت گرفته است. در پایان نامه حاضر برای اولین بار به بررسی اثر بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای پرداخته شده است. هدف از این تحقیق بررسی میزان تاثیر بهسازی به روش رسوب بیولوژیکی (MICP) بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های دانه‌ای نظیر مدول برشی، میرایی، سرعت موج برشی، مدول برشی حداکثر و مدول برشی نرمال شده خاک ماسه فیروزکوه به عنوان یک ماسه استاندارد است.

۵-۱- روش انجام تحقیق

در این پژوهش از خاک ماسه‌ای سیلیکاته فیروزکوه به عنوان خاک نمونه استفاده شده است. به منظور اجرای عملیات بهسازی بیولوژیکی به دو محلول به عنوان محلول باکتری و محلول سیمان‌تاسیون نیاز است. در محلول باکتری از باکتری اسپورسارسینا پاستوری و در محلول سیمان‌تاسیون از اوره و کلرید کلسیم استفاده شده است. پروتکل کشت و تزریق نمونه‌ها با توجه به مطالعات محققین پیشین تعیین و مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه پارامترهای متغیر میزان سربار و دامنه نوسان دستگاه برش ساده سیکلیک می‌باشد و پارامترهای مربوط به کشت و عمل آوری و تراکم نسبی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در جدول ۱-۱ لیستی از آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه آورده شده است.

جدول (۱-۱) لیست آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

ردیف	نام آزمایش
۱	آزمایش دانه بندی خاک - ASTM D422
۲	آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر - ASTM D4253
۳	آزمایش برش ساده سیکلیک
۴	آزمایش بندر المنت و تعیین سرعت موج برشی
۵	آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۶	آزمایش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس XRD

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

فصل اول: در این فصل ضمن ارائه مقدمه‌ای از موضوع به تشریح مساله و اهمیت موضوع، بررسی ضرورت انجام و اهداف پژوهش و روش انجام تحقیق پرداخته شده است.

فصل دوم: در این فصل ابتدا به بررسی اصول و مبانی روش‌های بهسازی خاک پرداخته و بعد از آن روش بهسازی بیولوژیکی به روش هیدرولیز اوره به عنوان یک روش نوین در بهسازی خاک پرداخته شده است. در ادامه تاریخچه و نتایج ادبیات فنی مرتبط با زمینه بهسازی به روش MICP مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم: در این فصل خصوصیات و جزئیات مصالح مصرفی شرح داده شده است. در ادامه به آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، دستگاه‌های استفاده شده، و روش انجام کار پرداخته شده است.

فصل چهارم: در این فصل ضمن ارائه نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های بهسازی نشده و بهسازی شده به روش MICP و تحلیل آن‌ها به مقایسه نتایج و تحلیل و بررسی اثر این روش بهسازی بر روی خاک ماسه فیروزکوه پرداخته شده است.

فصل پنجم: در این فصل به عنوان آخرین فصل از پایان‌نامه حاضر، به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پژوهش پرداخته شده و در انتها پیشنهاداتی راهبردی به منظور ادامه تحقیق حاضر ارائه شده است.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات فنی

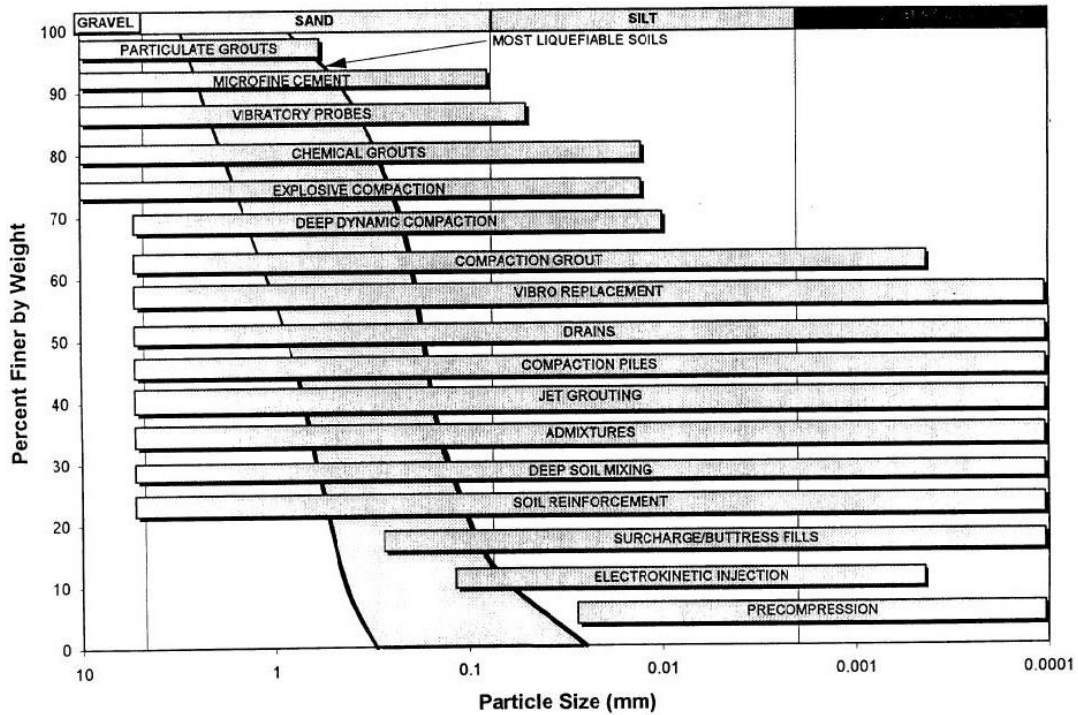
۲-۱- مقدمه

راهکارهای مقاوم سازی و در واقع بهسازی خاک یکی از معضلات اساسی در ساخت سازه‌ها می‌باشد. با افزایش جمعیت و مشاهده خسارات ناشی از زلزله و سایر عوامل طبیعی این معضل و نیاز بشر به ایجاد سازه‌هایی مقاوم و مستحکم و تقویت و بهسازی سازه‌های قدیمی به طور روزافزون گسترش یافته است [۱۸]. بعنوان مثال خاکریزهای اجرا شده بر روی خاک‌های نرم (رس‌های حساس)، دیوارهای حائل رودخانه‌ها که بر ماسه‌های بسیار سست بنا می‌شوند و یا سازه‌های دریایی که بر روی رسوبات سست واقع بر گسل‌های قاره‌ای بنا شده‌اند. عدم شناخت رفتار خاک‌های روانگرا یا حساس، ممکن است یکپارچگی سازه‌های واقع شده بر آن‌ها را مورد تهدید قرار دهد.

از مهم‌ترین مسائل در این زمینه بهسازی خاک بوده که در واقع بازسازی کنترل شده خاک در جا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی و یا بهبود وضعیت ساختار فعلی مدنظر می‌باشد. در اینجا نگاهی اجمالی به روش‌های نوین بهسازی زمین و زمینه‌های کاربردی آن‌ها خواهد شد که هدف نهایی تمامی آن‌ها، بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه، کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره‌برداری بوده و به منظور تغییر خصوصیات خاک و در نهایت کاهش نشست سازه، بهبود مقاومت برشی خاک، از بین بردن فضای خالی زیاد در بافت مصالح خاکی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن، افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی خاکریزها و سدهای خاکی، کاهش خصوصیات فشرده شدن و تورم خاک انجام می‌شوند [۱۹].

۲-۲- روش‌های بهسازی خاک

با شناخت خطرات ناشی از خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌های عمرانی، روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های این نوع خاک‌ها اتخاذ شده است. تمام روش‌های بهسازی اهداف واحدی را دنبال می‌کنند که شامل افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش نشست، افزایش مقاومت برشی و در نهایت افزایش سختی خاک است. در یک طبقه‌بندی کلی می‌توان روش‌های بهسازی را به صورت شکل (۲-۱) طبقه‌بندی نمود:



شکل (۱-۲) محدوده کاربرد روش‌های مختلف بهسازی خاک

۲-۲-۲- عملیات خاکی

تمامی عملیات شامل جابجایی و جایگزینی خاک به منظور افزایش مقاومت و ظرفیت باربری و کاهش نشست‌ها عملیات خاکی گفته می‌شود. در شیب‌ها و شیروانی‌ها این عملیات بوسیله تغییر و اصلاح شکل شیب انجام می‌گیرد. در مواردی که حجم خاک مد نظر جهت بهسازی کم باشد این روش می‌تواند اقتصادی‌ترین روش باشد [۲۰].

۲-۲-۳- تراکم

از دیگر روش‌های بهسازی خاک‌های مسئله دار تراکم است که از طریق اعمال نیرو (دینامیکی و استاتیکی) باعث افزایش دانسیته خاک و نزدیک شدن دانه‌های می‌شود و در نتیجه مقاومت و ظرفیت باربری خاک افزایش پیدا می‌کند و نشست‌ها محدود می‌شوند [۲۰].

۲-۲-۴- تراکم ارتعاشی و ستون شنی

روش تراکم ارتعاشی از حدود سال‌های ۱۹۳۰ در اروپا و ۱۹۷۰ در آمریکا و سایر نقاط جهان جهت اصلاح عمیق خاک‌های دانه‌ای، چسبنده و مخلوط توسط مهندسان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش که ماهیتی فیزیکی - مکانیکی دارد، امروزه توسط پیمانکاران متعددی در سرتاسر جهان به خوبی و با موفقیت اجرا می‌گردد. این روش به حدی در عرصه مهندسی ژئوتکنیک جا افتاده که علاوه بر اشاره به آن در بسیاری از مراجع علمی به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های بهسازی خاک می‌باشد.

روش ستون‌های شنی ارتعاشی تلفیقی از دو روش تراکم ارتعاشی^۱ و جایگزینی ارتعاشی^۲ می‌باشد. در روش تراکم ارتعاشی بدون اضافه کردن مصالح درشت دانه سعی بر این است که توده خاک موجود به کمک ارتعاش، متراکم گردد. از اینرو کاربرد این روش به خاک‌های دانه‌ای محدود می‌گردد. چرا که ارتعاش و تراکم حاصل از آن در خاک‌های ریزدانه و یا چسبنده به وقوع نمی‌پیوندد.

از سوی دیگر، در خاک‌های ریزدانه و چسبنده اضافه شدن و یا جایگزینی مقدار اندکی مصالح درشت دانه مناسب، بهبود قابل توجهی را در خواص مکانیکی توده خاک ایجاد می‌نماید. از این رو ترکیب دو روش فوق بخصوص در مورد خاک‌های لایه لایه و یا مخلوط می‌تواند بازدهی عملیات بهسازی خاک را به طور چشمگیری افزایش دهد [۲۱].

۲-۲-۵- میخ کوبی و انکراژ

میخ کوبی دیواره‌ها یا نیلینگ^۳ به معنای تسلیح برجای توده خاک موجود با نصب میلگرد های فولادی در فواصل نزدیک به هم در یک سطح شیبدار و یا در محل گودبرداری به صورت قائم و با اجرای از بالا به پایین^۴ می‌باشد. میلگردهای معمولاً داخل گمانه‌هایی که در دیواره خاکی قرار می‌گیرند که به منظور جلوگیری از خوردگی میلگرد ها و انتقال مناسبتر نیروها بین خاک و میلگرد توسط دوغاب سیمان پر می‌شوند. روش نیلینگ یک مقطع مسلح پایدار ایجاد می‌کند که توانایی نگهداری خاک پشت خود را دارند.

¹ Vibro Compaction

² Vibro Replacement

³ Nailing

⁴ Top Down Construction

نیلینگ یا میخ‌کوبی خاک روش جدیدی است که به دلیل اقتصادی بودن و مزایای منحصر بفرود خود، به عنوان راه‌حل بسیار مناسبی در موارد مختلف از جمله پایدارسازی شیب‌ها، شیروانی‌ها، ترانشه‌ها، افزایش ظرفیت باربری و محدود کردن تغییر شکل‌ها با ایجاد حداقل دست‌خوردگی در وضعیت طبیعی زمین کاربردهای فراوانی دارد.

اصول اجرای روش مهارگذاری یا انکراژ^۱ مشابهت‌های فراوانی با روش نیلینگ (میخ‌کوبی) دارد. تفاوت اصلی در اعمال نیروی پس‌تنیدگی برای المان تسلیح می‌باشد. گام‌های اجرایی مشابه روش میخ‌کوبی و شامل خاکبرداری مقطعی، حفاری گمانه‌ها، نصب میلگرد تسلیح، تزریق دوغاب سیمان (در بخشی از طول گمانه)، بتن‌پاشی و نصب صفحه سر نیل و مهره می‌باشند. پس از گذشت مدت زمان مناسب جهت عمل‌آوری دوغاب سیمان، با نصب پایه جک، جک کششی و نیروسنج، نیروی پس‌تنیدگی تا مقدار مورد نظر طراحی به میلگرد تسلیح و دوغاب اطراف آن اعمال می‌شود.

لازم بذکر است در بعضی از موارد عملیات حفر چاه وجود نداشته و پروفیل حائل فولادی پس از اتمام عملیات مقطعی خاکبرداری، حفاری و نصب المان تسلیح در محل مربوطه می‌شود. در نهایت پس از این مرحله عملیات کشش المان تسلیح (اعمال نیروی پس‌تنیدگی) صورت می‌پذیرد [۲۰].

۲-۲-۶- اختلاط عمیق و جت‌گروتینگ

از روش‌های بهسازی خاک که مبتنی بر تزریق مصالح به دورن خاک است که در نهایت ستون‌های خاک سیمانی ایجاد می‌کند روش اختلاط عمیق خاک^۲ است که به اختصار DSM خوانده می‌شود. این روش یکی از کاربردی‌ترین روش‌های بهسازی خاک در جهان محسوب می‌شود که عبارت است از اختلاط خاک با مواد سیمانی و ... که با استفاده از همزن‌هایی در عمق انجام می‌گیرد و منتج به شکلگیری ستون‌های خاک سیمان می‌شود.

بطور کلی ستون‌های اختلاط عمیق با اهداف کلی افزایش ظرفیت باربری خاک در فشار و برش، کنترل نشست، مقابله با روانگرایی و کاهش نفوذپذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در هر یک از اهداف مذکور مطابق با روابط مربوطه محاسبات صورت می‌گیرد. [۲۱]

¹ Anchorage

² Deep Soil Mixing

روش اختلاط عمیق برای بهسازی محدوده و سیعی از خاک های نرم غیر آلی و خاک هایی که سایر روش های بهسازی در آن ها مناسب نیستند کاربرد دارد، البته در مورد خاک های آلی نیز می توان با در نظر گرفتن تمهیداتی نظیر اضافه کردن ماسه به مخلوط خواص خاک را بهبود بخشید.

یکی دیگر از روش های نوین و مبتنی بر تزریق روش جت گروتینگ است. این روش یکی از شیوه های پایدار سازی و افزایش مقاومت و توان باربری خاک به صورت درجا می باشد. تکنیک جت گروتینگ اولین بار در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. ایده برش بوسیله جت آب با فشار بالا در اوایل دهه ۷۰ میلادی برای استفاده در معادن زغال سنگ ایالات متحده و همچنین بریتانیا مطرح شد و پس از آن در اواسط این دهه ژاپنی ها (برادران یاماگادو در سال ۱۹۶۵) از این روش نه فقط برای برش و فرسایش خاک بلکه برای تزریق سیمان نیز استفاده کردند.

در روش اجرای جت گروتینگ پس از حفاری گمانه تا عمق مورد نظر، دوغاب تزریق به همراه آب و هوای فشرده تحت فشار بسیار زیاد (بین ۲۵۰ تا ۷۰۰ بار) و با سرعت بیش از یکصد متر بر ثانیه از نازل انتهای میله حفاری خارج شده و همزمان با دوران میله حفاری، خاک اطراف محل خروج مخلوط تخریب گشته و با آن آمیخته می شود. این عملکرد باعث ایجاد ستونی با مقاومت بالا از جنس خاک سیمانته شده می گردد. در زمان تزریق، فشار زیاد جت تزریق قادر است به داخل خاک دیواره گمانه نفوذ کرده و موجب تغییر ساختار خاک گردد. از ترکیب دوغاب سیمان و خاک، ترکیبی خاک - سیمانی پدید می آید که پس از سخت شدن، ستونی مقاوم با مشخصات باربری و ناتراوایی مناسب برای پروژه مورد نظر ایجاد می گردد. شعاعی از خاک که تحت تاثیر تزریق جت قرار گرفته، شعاع تاثیر نامیده می شود و به عواملی نظیر فشار تزریق، زمان تزریق، مقاومت برشی برجای خاک، اندازه نازل ها و وزن مخصوص دوغاب تزریق بستگی دارد. جت گروتینگ علیرغم اینکه به عنوان روشی جدید در زمینه بهسازی خاک شناخته می شود، کاربردهای بسیار متنوعی دارد که نمونه هایی از آن در زیر عنوان شده است [۲۰].

۱. دوخت به کف (Underpinning)

۲. ترمیم و بازسازی پی ها

۳. دیوار های نگهبان

۴. آب بندی گود ها و سازه های زیر سطح آب زیرزمینی

۲-۲-۷- میکروپایل

دو روش کلی مقابله با خاک‌های مسئله دار، یکی استفاده از المان‌های باربر و دیگری اضافه کردن مواد و مصالحی به خاک جهت بهسازی پارامترهای مقاومتی آن می‌باشد. میکروپایل یا ریزشمع روشی است که به نوعی مزایای هر دو روش بالا را در بر می‌گیرد.

لوله کوبی یا حفاری و لوله گذاری خاک، تزریق و تسلیح، سه مرحله ای است که اساس بهسازی خاک به روش استفاده از میکروپایل را تشکیل می‌دهد. میکروپایل ابتدا برای ترمیم پی‌ها و ساختمان‌های موجود به کار گرفته می‌شود. اما با پیشرفت تجهیزات حفاری و تزریق به سرعت ذهن محققین و مهندسان عرصه ژئوتکنیک را به خود معطوف کرد تا به استفاده بهینه تر و کاربردی از این روش دست یابند.

بطور کلی کاربرد میکروپایل‌ها در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش استفاده در بستر پی سازه‌ها و اصلاح و بهسازی برجای خاک می‌باشد. انجام تحقیقات گسترده در مجامع علمی - تخصصی جهان بر روی میکروپایل روز به روز در حال افزایش است. بررسی رفتار استاتیکی، دینامیکی و لرزه‌ای آن‌ها مورد توجه است. در بسیاری از تحقیقات چگونگی رفتار و معیارهای طراحی میکروپایل‌ها در خاک‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین امروزه دامنه استفاده از میکروپایل گسترش فراوانی یافته است. [۵]

۲-۲-۸- بهسازی فیزیکی و شیمیایی

در این روش بهسازی خاک بوسیله اضافه کردن افزودنی‌ها به خاک انجام می‌شود که با توجه به نوع خاک و مواد تشکیل دهنده خاک نوع افزودنی می‌تواند متفاوت باشد [۵].

• تثبیت با سیمان

سیمان به‌طور افزاینده‌ی برای تثبیت خاک، بخصوص در احداث شاهراه‌ها و سدهای خاکی به کار گرفته می‌شود. از سیمان می‌توان برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای ورسی استفاده نمود. استفاده از سیمان باعث افزایش حد روانی و نشانه خمیری می‌شود.

• تثبیت با آهک

استفاده از آهک جهت تثبیت خاک‌های با شاخص خمیری بزرگ‌تر از ۱۰ توصیه می‌شود. آهک علاوه بر افزایش خصوصیات مقاومتی و کنترل خصوصیات خمیری رس، باعث افزایش مقاومت خاک در برابر عوامل

جوی نظیر رطوبت و یخبندان نیز می‌شود.

• تثبیت گیاهی

در این روش علاوه بر کاشت درخت در شیب‌ها و شیروانی‌ها برای جلوگیری از فرسایش و لغزش خاک‌ها می‌توان از پوشش گیاهی نیز استفاده نمود.

• تثبیت با قیر

قیر جسمی است هیدروکربوری به رنگ سیاه تا قهوه‌ای تیره که در سولفور کربن کاملاً حل شده و حالت آن با افزایش درجه حرارت از جامد به خمیری و از خمیری به مایع تغییر می‌کند. از مزایای این روش می‌توان به عدم محدودیت زمان تثبیت، ارزان و در دسترس بودن قیر اشاره کرد. کاهش قابل توجه نفوذپذیری از معایب این روش است. استفاده از قیر برای تثبیت در مصالح درشت‌دانه با بخش ریزدانه محدود، کاربرد دارد. قیر برای تثبیت خاک‌های شنی، ماسه با دانه‌بندی ضعیف، شن سیلت دار و ماسه سیلت دار به کار می‌رود، اما برای تثبیت خاک‌های مرطوب مناسب نیست.

• تثبیت بیولوژیکی

در این روش با استفاده از باکتری اقدام به ساخت بلورهای کربنات، سیلیکات و ... به منظور ساخت محصولات سیمانی‌شده با مقاومت بالا می‌کنند. این فرآیند می‌تواند خاک یا ذرات ریز دیگر (مواد متخلخل) را بدون ازهم‌گسیختگی ساختار اولیه تثبیت کند. این روش دارای کاربردهای فراوانی مانند افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک، بهسازی مقاومت و دوام بتن و ملات، ترمیم ترک‌های ساختمان و ... بوده و از لحاظ سازگاری با محیط‌زیست نیز مناسب است. از معایب آن می‌توان به پیچیدگی طراحی آن نسبت به سایر روش‌ها اشاره کرد.

۲-۳- بهسازی بیولوژیکی

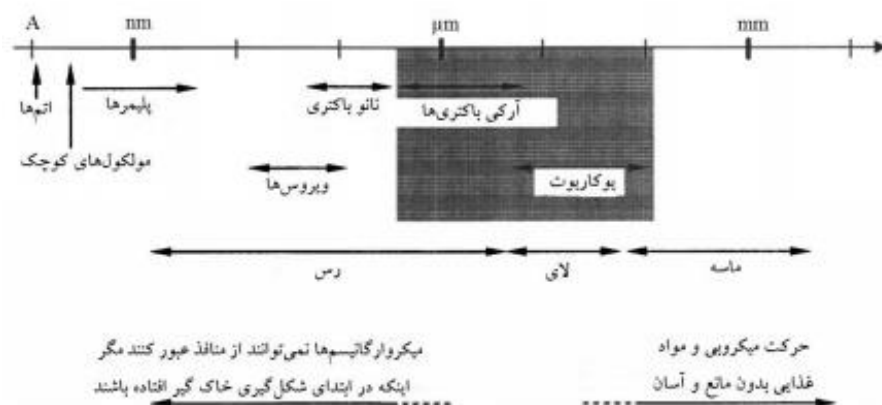
خاک به دلیل فراوانی عناصر مغذی و وجود مایع (آب) در خلل و فرج آن نسبت به سایر زیستگاه‌های میکروبی، محل زندگی میکروارگانیسم‌های مختلفی است. به دلیل عدم توزیع برابر عوامل ضروری برای بقا و رشد میکروارگانیسم‌ها در عمق لیتوسفر، برخی از میکروارگانیسم‌ها به تعداد زیاد و برخی دیگر از آن‌ها بسیار کم یافت می‌شوند. میکروارگانیسم‌ها سازگاری بالایی با شرایط متغیر ژنتیکی و فیزیولوژیکی دارند زیرا قدمت آن‌ها به بیش از ۳/۵ میلیارد سال می‌رسد [۲۲]. تقریباً 10^9 تا 10^{12} میکروارگانیسم در هر

کیلوگرم خاک نزدیک به سطح زمین وجود دارد. شناسایی و طبقه‌بندی میکروارگانیسم‌ها معمولاً با استفاده از نوع دیواره سلولی، شکل، عناصر مغذی، نوع تبدیل بیوشیمیایی و رشته‌های DNA و RNA انجام می‌شود. [15][23]. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک شامل انواع باکتری‌ها، آرکه‌ها و یوکاریوت‌ها می‌باشند. باکتری و آرکه از یک ساختار سلولی ساده بدون غشاء خارجی تشکیل شده و دارای بیش از یک کروموزوم و ترکیب شیمیایی خاص است. یوکاریوت‌ها دارای یک هسته بوده که شامل جلبک‌ها، قارچ‌ها، تک سلولی‌ها و کپک‌های چسبناک می‌باشند [24].

۲-۳-۱- باکتری‌های خاک

فراوان‌ترین میکروارگانیسم موجود خاک، باکتری است. به دلیل اینکه باکتری‌ها ساختمان ساده‌ای دارند می‌توان به آسانی بسیاری از آن‌ها را در شرایط آزمایشگاه کشت داد و تحت کنترل درآورد. باکتری‌ها هسته‌ی سازمان‌یافته ندارند و DNA و پروتئین‌های همراه آن‌ها درون ناحیه هسته مانند بی‌هسته نام ناحیه نوکلئوئیدی قرار گرفته و اجزای سلولی آن‌ها در سیتوپلاسم پراکنده هستند [25]. تولید مثل باکتری‌ها به دو صورت جنسی (آمیختگی) و غیرجنسی (جوانه زدن، قطعه قطعه شدن و تقسیم دوتایی) صورت می‌گیرد. باکتری‌ها، میکروارگانیسم‌های حاکم در خاک می‌باشند. آن‌ها حتی در عمق زیادی از سنگ‌کره زمین نیز به تعداد کمی یافت می‌شوند [26]. برخی از باکتری‌ها به منظور مقابله با شرایط محیطی نامساعد، تولید هاگ می‌کنند. قطر سلول باکتری‌ها بین ۰/۵ تا ۳ میکرومتر متغیر بوده و اسپورها می‌توانند به اندازه ۰/۲ میکرومتر کوچک باشند (شکل ۲-۲). باکتری می‌تواند در محیطی با محدوده pH کمتر از ۲ تا بیشتر از ۱۰ و شوری بیشتر از آب دریا زنده بماند. آن‌ها همچنین فشار تا چند صد بار و دمای زیر انجماد تا بالای جوش آب را تحمل کنند [24].

باکتری‌ها در طیف وسیعی از حرارت رشد می‌کنند و از لحاظ تحمل حرارت به سه دسته مزوفیل (میان‌دوست)، ترموفیل (حرارت دوست) و ساکروفیل (سرما دوست) تقسیم می‌شوند. همچنین از لحاظ تنفسی به سه دسته هوازی، بی‌هوازی و اختیاری (هم هوازی هم بی‌هوازی) تقسیم می‌شوند [27]. اکثریت سلول‌های باکتریایی دارای بار سطحی منفی، برای مقادیر pH آب زیرزمینی بین ۵ و ۷ است که در خاک نزدیک سطح زمین زندگی می‌کنند و بار سطح منفی با افزایش غلظت و ظرفیت یون‌ها در سیال منفذی کاهش می‌یابد [28].



شکل (۲-۲) مقایسه بین اندازه ذرات خاک و میکروارگانیسم‌ها [۲۴]

برخی از سویه های باکتری ها مانند *Spolactobacillus* , *Sporosarcina*, *Clostridium* و *Desulfotomaculum* و *Bacillus* قادر به تولید آنزیم اوره‌آز بوده و در روش اصلاح بیولوژیکی استفاده می‌شوند. میکروارگانیسم‌های تولیدکننده اوره‌آز را می‌توان به دو دسته بر اساس پاسخ آن‌ها به غلظت بالای آمونیوم تقسیم نمود. اولین گروه شامل باکتری‌هایی هستند که فعالیت اوره‌آز آن‌ها به دلیل غلظت آمونیوم بالا (مطابق جدول ۲-۱) متوقف نمی‌شود. دومین گروه شامل باسیلوس مگاتریوم، الکالیژن یوتروفوس، کلبزیلا ارگانز و زئودوموناس ارگیونزوا است، که فعالیت اوره‌آز آن‌ها با غلظت بالای آمونیوم متوقف می‌شود. از این روی میکروارگانیسم‌هایی که فعالیت اوره‌آز آن‌ها با غلظت بالای آمونیوم متوقف نمی‌شود، در اصلاح بیولوژیکی خاک ارجح‌تر هستند، باکتری‌های تولیدکننده اوره‌آز برای کاربردهای اصلاح بیولوژیکی ناپایستی پاتوژنیک (بیماری‌زا) بوده و یا دارای عناصر اصلاح‌شده‌ای باشند که موجب بیماری‌زایی میکروبه‌های محیطی شوند [۲۹].

جدول (۱-۲) طبقه بندی میکرواورگانیسم‌ها [۲۹]

بیماری‌زا نبودن و اصلاح شده ژنتیکی	عدم مهار شدن با آمونیوم	فعالیت اوره‌آز بالا	میکرواورگانیسم
بله	بله	بله	<i>Sporosarcina pasteurii</i>
به‌طور متوسط	بله	نامشخص	<i>Proteus vulgaris</i>
خیر	بله	نامشخص	<i>Proteus mirabilis</i>
خیر	بله	بله	<i>Helicobacter pylori</i>
خیر	بله	بله	<i>Ureplasma (Mollicutes)</i>

۲-۳-۲- نقش میکرواورگانیسم‌ها در فرآیند بهسازی بیولوژیکی

میکرواورگانیسم‌ها با شرکت در واکنش اکسیداسیون-احیاء، انرژی را از طریق احیاء یا اکسایش مواد شیمیایی به دست می‌آورند و از این انرژی برای رشد، نگهداری، تحرک و دیگر فعالیت‌ها استفاده می‌کنند. ناسون^۱ در نیمه دوم قرن ۱۹ پی برد که میکروباها نقش مهمی در ایجاد رسوب کلسیم کربنات (CaCO₃) دارند [۳۰]. هیدرولیز اوره یکی از اولین فرآیندهایی است که در اواخر قرن نوزدهم با رسوب کربنات ناشی از فعالیت‌های میکروبی همراه شد [۲۳]. بیشتر مطالعات انجام شده بر روی بهسازی بیولوژیکی خاک بر اساس هیدرولیز اوره است. باکتری‌ها از طریق تولید آنزیم اوره‌آز تولید کلسیم کربناتی را افزایش می‌دهند. این آنزیم، سرعت هیدرولیز اوره را افزایش می‌دهد. در نتیجه pH و غلظت کربنات در محیط باکتری افزایش می‌یابد [۳۱]. برای تشکیل کلسیم کربنات با استفاده از باکتری دو روش پیشنهاد شده است :

۱. در روش اول با اضافه کردن مواد مغذی مورد نیاز به خاک باعث باکتری‌های رسوب‌زا فعال شده و می‌توان محیط کشت و رشد آن‌ها را در داخل خاک فراهم نمود.

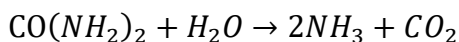
۲. در روش دوم می‌توان با کشت و رشد باکتری‌های رسوب‌زا در محیط آزمایشگاه، مقدار آن‌ها را در داخل خاک افزایش داد.

روش اول به دلیل مشکلات فراوان در تأمین محیط کشت از نظر اجرایی دشوار است [۱]. در روش دوم که رسوب بیولوژیکی کلسیم کربنات گفته می‌شود از باکتری‌های خاصی که دارای قابلیت هیدرولیز اوره بوده، استفاده می‌شود. این گونه باکتری از نوع هوازی بوده و به همین دلیل در محیط‌های اشباع قابلیت رسوب زایی ندارد. این واکنش در حضور اوره و کلرید کلسیم در خاک اتفاق می‌افتد و باعث افزایش خاصیت

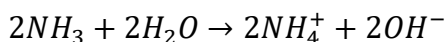
¹ Nadson

قلیایی خاک می‌شود که در طی آن رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده و باعث چسبندگی ذرات به یکدیگر می‌شود. این روش به‌طور کلی شامل مراحل زیر است [۳۲]:

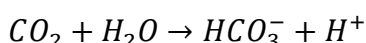
۱. اوره به‌وسیله باکتری‌های اوره‌آز هیدرولیز شده و دی‌اکسید کربن و آمونیاک تولید می‌کند:



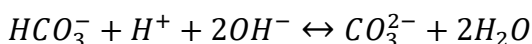
۲. یون‌های هیدروکسیل تولیدشده از تبدیل آمونیاک به آمونیوم باعث افزایش pH می‌شوند.



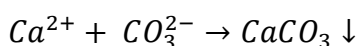
۳. دی‌اکسید کربن سریعاً در حضور آب به بی‌کربنات تجزیه می‌شود.



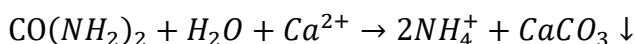
۴. یون‌های هیدروکسیل تولیدشده از تبدیل آمونیاک به آمونیوم موجب تجزیه بی‌کربنات به یون‌های کربنات خواهد شد.



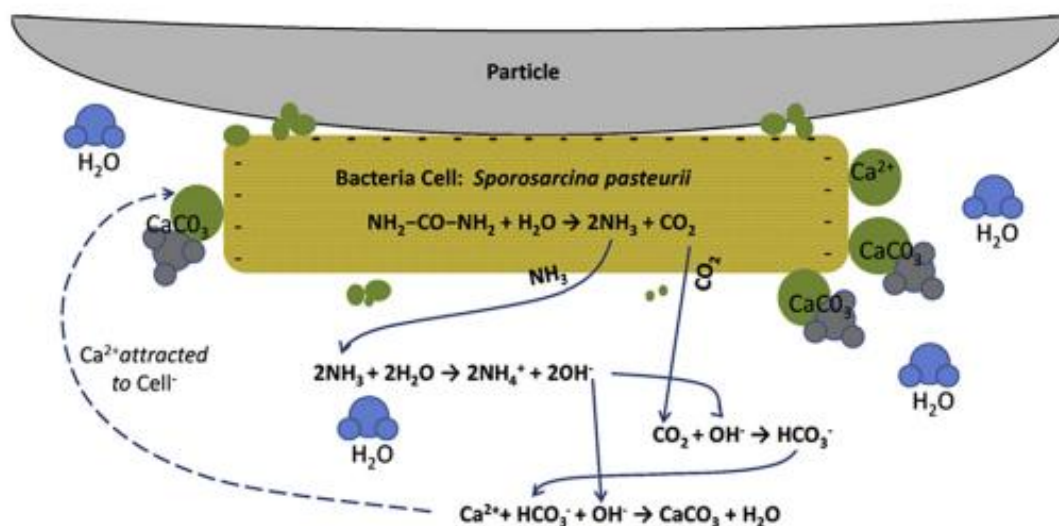
۵. یون‌های کربنات تشکیل شده با یون کلسیم واکنش داده و بلورهای کلسیم کربنات رسوب می‌کنند.



۶. فرآیند هیدرولیز اوره و تشکیل کلسیم کربنات به شکل زیر است.



جزئیات واکنش هیدرولیز اوره برای رسوب کلسیم کربنات به‌وسیله *Sporosarcina pasteurii* در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) فرآیند رسوب بیولوژیکی کلسیم کربنات به‌وسیله هیدرولیز اوره

۲-۳-۳- مراحل بهسازی بیولوژیکی

یک فرآیند بهسازی بیولوژیکی عموماً شامل مراحل زیر است [۳۳]:

۱. کشت و پرورش میکروارگانیسم‌ها در آزمایشگاه یا در زیر سطح.
۲. تزریق میکروارگانیسم‌ها و مواد غذایی به خاک و انتقال آن‌ها به محل مطلوب.
۳. تأمین مواد غذایی مناسب برای میکروارگانیسم‌ها که باعث یک تغییر و تبدیل بیوشیمیایی و در نتیجه رسوب کلسیم کربنات شود.
۴. جداسازی و حذف محصولات باقی‌مانده.

۲-۳-۴- مزایا و معایب بهسازی بیولوژیکی

عمده مزایای و معایبی که می‌توان برای سیمانی شدن بیولوژیکی در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی خاک ذکر کرد شامل موارد زیر است [۲۹]:

• مزایای استفاده از روش بهسازی بیولوژیکی:

۱. در دمای نسبتاً کمتری انجام می‌شود.
۲. این فرآیند از لحاظ انرژی به انرژی کمتری نیاز دارد. بنابراین گازهای گلخانه‌ای کمتری نسبت به تولید مصالح ساختمانی دیگر تولید می‌کند.
۳. فرآیند سیمانی شدن بیولوژیکی می‌تواند درجا و بدون هیچ تغییری در ساختار اصلی خاک انجام شود.
۴. سیمانی شدن بیولوژیکی قابلیت استفاده در محیط‌های اشباع و غیراشباع از جمله در اعماق دریا را دارد.
۵. ساختار و رنگ اصلی ذرات تا حد زیادی حفظ می‌شود.
۶. جلوگیری از فرسایش سریع خاک توسط آب و حفظ نفوذپذیری خاک.
۷. نیاز به فشار کمتر جهت تزریق واکنش‌دهنده‌های بهسازی بیولوژیکی برخلاف دوغاب و ترکیبات پلیمری.
۸. امکان استفاده مجدد از آنزیم‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌ها.
۹. غیرسمی بودن بهسازی برخلاف روش‌های معمول تزریق مواد شیمیایی.

• از معایب این روش نیز می‌توان موارد زیر اشاره کرد:

۱. پیچیده بودن فرآیند میکروبی به دلیل وابستگی فعالیت‌های میکروبی به فاکتورهای محیطی بسیاری

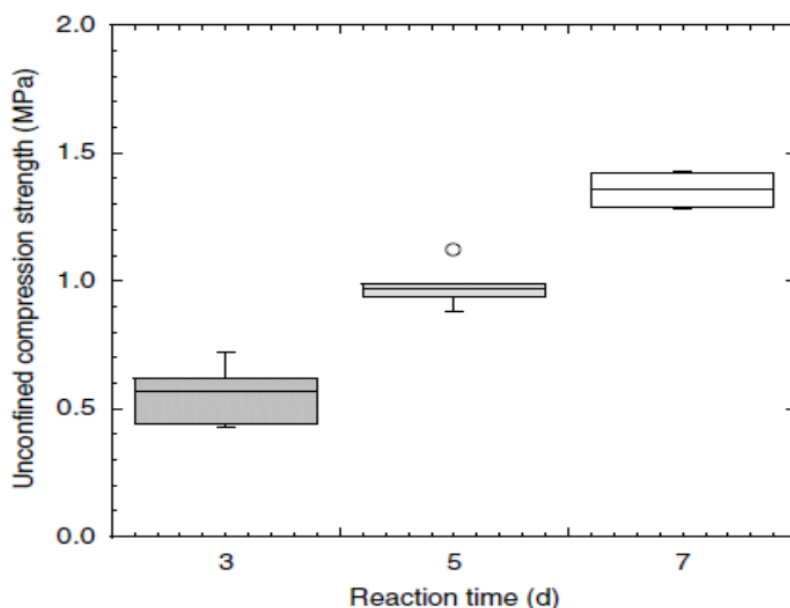
مانند دما، pH، تجمع و نرخ نفوذ مواد غذایی و میکروارگانیسم‌ها.
 ۲. نیاز به ترکیب علوم مختلف از جمله میکروبیولوژی، بوم‌شناختی (اکولوژی)، زمین‌شناسی و مهندسی ژئوتکنیک.

۳. سرعت پایین فرآیند میکروبی نسبت به بقیه روش‌های بهسازی.

۲-۳-۵- بررسی اثر عوامل مختلف بر فرآیند بهسازی بیولوژیکی

۲-۳-۵-۱- زمان عمل‌آوری

مدت زمان عمل‌آوری یکی از عوامل مهم در بهسازی بیولوژیکی است. ژائو و همکارانش به منظور بررسی اثر زمان بر میزان تشکیل رسوب و فرآیند واکنش آزمایشی بر روی نمونه‌های شن و ماسه انجام دادند. نمونه آماده شده پس از یک روز حتی استحکام کافی برای بیرون آوردن از قالب را نداشت. نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۳، ۵ و ۷ روز مورد آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفتند. شکل (۲-۴) نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری تک محوره از مقدار ۰/۵۶ تا ۰/۹۸ مگاپاسکال از ۳ تا ۵ روز و در نهایت تا مقدار ۱/۳۶ تا ۷ روز است. همانطور که مشخص است نرخ افزایش مقاومت فشاری تک محوری در طول زمان کاهش می‌یابد و این ممکن است به دلیل تشکیل رسوب و گرفتگی تدریجی منافذ خاک و کاهش حجم حفرات خاک باشد که باعث کاهش ارتباط موثر بین مواد سیمان‌تاسیون و اوره شده است [۳۴].



شکل (۲-۴) تاثیر زمان بر مقاومت فشاری تک محوره [۳۴]

۲-۳-۵-۲- غلظت باکتری

در سال ۲۰۱۰ اوکوآدها با انجام آزمایشاتی عنوان کرد هر چه در نمونه خاک غلظت باکتری افزایش یابد باعث افزایش مقدار کلاسیت طی فرآیند MICP^۱ می شود [۳۵]. همچنین طبق تحقیقات لی و همکارانش در سال ۲۰۱۱، غلظت بالای باکتری منجر به تولید اوره‌آز بیشتر می‌گردد تا هیدرولیز اوره را آغاز کند [۳۶]. ژائو و همکارانش در آزمایشاتشان نشان دادند هرچه میزان غلظت باکتری افزایش یابد فعالیت اوره‌آز به تدریج افزایش پیدا می‌کند. گزارش آن‌ها نشان می‌دهد هنگامی که مقدار OD₆₀₀^۲ از مقدار ۰/۳ به ۰/۶ افزایش می‌یابد، فعالیت اوره‌آزی با سرعت بالایی افزایش پیدا می‌کند و پس از این که به مقدار ۰/۶ رسید، نرخ افزایش فعالیت کاهش پیدا می‌کند. [۳۴]

۲-۳-۵-۳- دما

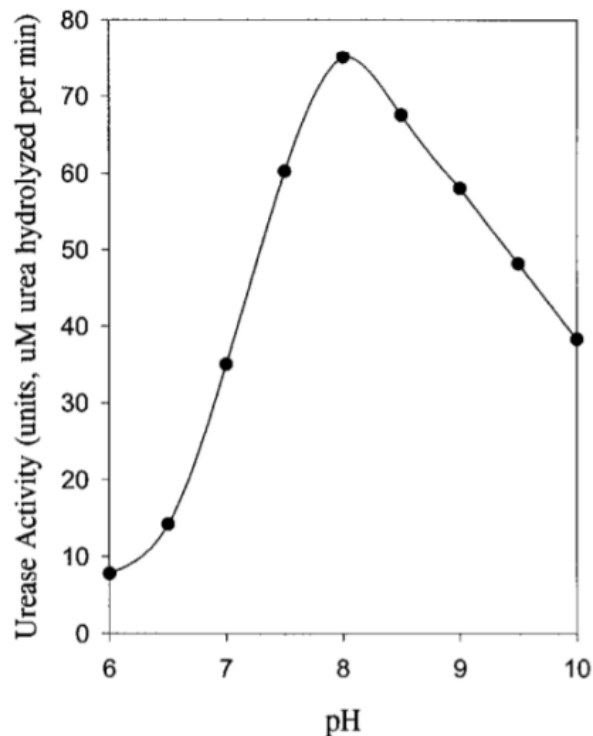
ژائو و همکارانش در سال ۲۰۱۴ آزمایشاتی برای بررسی تاثیر دما بر فرآیند بهسازی بیولوژیکی انجام دادند. طبق تحقیقات آن‌ها تاثیر درجه حرارت بر مقاومت فشار تک محوره ماسه بهسازی شده به روش MICP کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد [۳۴]. فعالیت و رشد میکروبی حساسیتی نسبت به دما در بازه دمایی ۲۰-۳۰ درجه سانتیگراد ندارد. این در حالی است که میزان واکنش و هیدرولیز اوره در دمای ۲۰ درجه نسبت به دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر است. اما افزایش دما پس از ۳۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت هیدرولیز اوره را افزایش نمی‌دهد [۳۷].

۲-۳-۵-۴- اثر PH

طبق تحقیقاتی که فیشر و همکارانش در سال ۱۹۹۹ بر روی فرآیند بهسازی بیولوژیکی انجام دادند، دریافته‌اند که بهترین بازه برای مقدار pH برای آنزیم اوره در محدوده ۷/۵ تا ۸/۰ می‌باشد. طبق گزارش آن‌ها فعالیت اوره‌آز از pH ۶ تا ۸ افزایش می‌یابد که در pH=8 بیشترین مقدار خود می‌رسد و در pH بالاتر به تدریج کاهش می‌یابد. با این وجود انجام فرآیند در pH=9 هم انجام شدنی است. شکل (۲-۵) روند مقدار فعالیت اوره‌آزی بر حسب pH را نشان می‌دهد. [۳۱]

¹ Microbial Induced Calcite Precipitation

² Optical Density



شکل (۲-۵) اثر pH بر فعالیت هیدرویز اووره [۳۱]

۲-۳-۵-۵- اثر روش تزریق

در بسیاری از تحقیقاتی که در روش بهسازی MICP صورت گرفته است، روش تزریق مشابه تزریق دیگر مواد افزودنی به خاک انتخاب شده است. در همین زمینه مارتینز و همکاران تحقیقاتی انجام دادند که نشان می‌دهد تزریق محلول سیمان‌تاسیون با توقف جریان در سطح ستون شن، رسوب کربنات کلسیم را در طول ستون خاک تا نیم متر امکان پذیر می‌کند [۳۱]. در روش تزریق مداوم، باعث افزایش رسوب کربنات کلسیم در نزدیکی محل تزریق می‌گردد. ضمن این که مقدار رسوب در نقاط دورتر از محل تزریق کمتر دیده می‌شود. در صورتی که مراحل تزریق در حین نمونه سازی افزایش یابد می‌تواند میزان رسوب را در نقاط دورتر از سطح تزریق را افزایش دهد [۳۸]. همچنین چشمی و همکارانش تحقیقاتی را در سال ۲۰۱۸ بوسیله آزمایش برش مستقیم انجام دادند که بر طبق نتایج آن‌ها تزریق دو مرحله‌ای اثر بهتری نسبت به تزریق در یک مرحله و سه مرحله داشته است [۳۹].

۲-۴- ادبیات فنی مرتبط با بهسازی‌های روش MICP

۲-۴-۱- اثر بهسازی بیولوژیکی بر سرعت موج برشی خاک

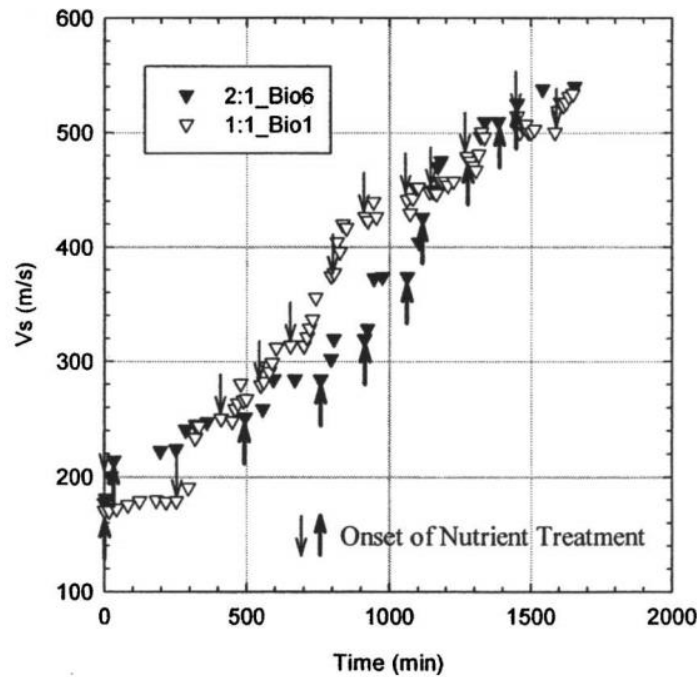
در سال ۲۰۰۶ دیانگ و همکاران [۴۰] روشی جدید برای رسوب کلسیت به صورت طبیعی جهت بهسازی و تثبیت ماسه‌های سست و ریزشی با استفاده از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری و محیط کشت لازم به همراه اوره و کلرید کلسیم ارائه نمودند. مشخصات خاک مورد آزمایش به شرح جدول (۲-۲) است:

جدول (۲-۲) مشخصات خاک استفاده شده توسط دیانگ و همکاران [۴۰] ۲۰۰۶

Soil type	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	G _s	e _{min}	e _{max}	Mineralogy	Shape	Hardness
Ottawa 50-70	0.12	1.6	2.65	2.65	0.55	0.87	Quartz	Round	7

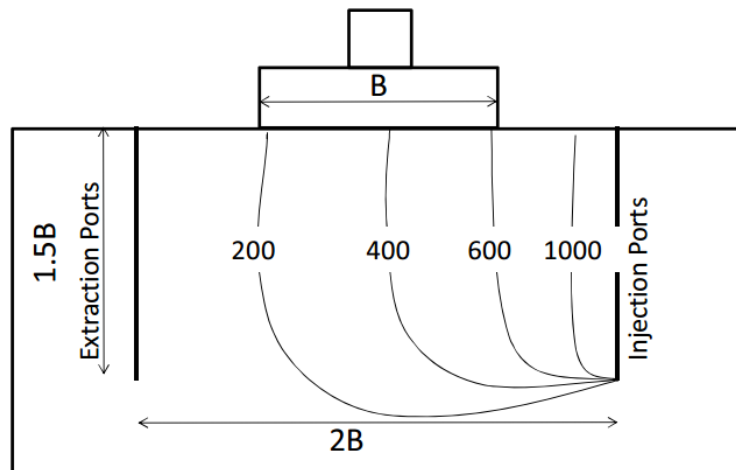
آزمایش سه محوری زهکشی نشده بر روی دو نمونه به قطر ۷۲ میلی‌متر و نسبت ارتفاعی ۱:۱ و ۲:۱ بعد از انجام عملیات بهسازی و تزریق مواد به داخل نمونه و بوسیله Bender elemnt صورت گرفته است. نتایج آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

با توجه به شکل (۲-۶) عملیات سیمانی شدن بلافاصله پس از شروع تزریق آغاز شده و دو نمونه با نسبت ارتفاعی متفاوت روند صعودی در سرعت موج برشی از خود نشان داده‌اند و تقریباً دارای روند یکسانی می‌باشند. آزمایش تا زمانی که روند افزایش سرعت متوقف شود ادامه یافته و مشخص می‌شود که هر دو نمونه نهایتاً بعد از ۱۷۰۰ دقیقه به سرعت موج برشی معادل ۵۴۰ m/s رسیده‌اند. لازم به ذکر است که مدت زمان انجام عملیات بهسازی به عوامل متعددی وابسته است که می‌تواند زمان عملیات را افزایش یا کاهش دهد.



شکل (۶-۲) نمودار تغییرات سرعت موج برشی نسبت به زمان [۴۰]

در سال ۲۰۱۰ دیانگ و همکاران به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک در مقیاس صحرایی پرداختند. آن‌ها خاک بستر یک پی منفرد را به روش بیولوژیکی مطابق شکل (۷-۲) بهسازی کردند. [۴۱]



شکل (۷-۲) نمایی شماتیک از آزمایش انجام شده توسط دیانگ و همکاران ۲۰۱۰ [۴۱]

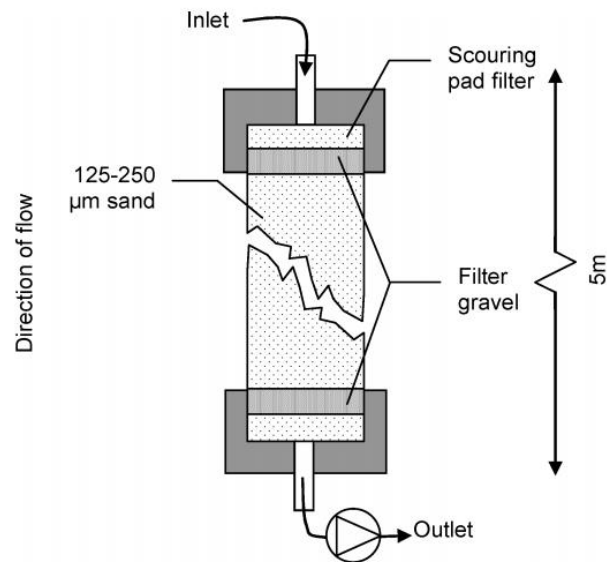
با توجه به این که میزان سرعت موج برشی اولیه خاک زیر پی ۱۶۰ m/s گزارش شده است و با توجه به شکل (۷-۲) نتیجه می‌شود که تزریق باکتری و بهسازی بیولوژیکی باعث افزایش سرعت موج برشی در خاک حتی تا مقدار ۱۰۰۰ m/s شده است.

۲-۴-۲- اثر بهسازی بیولوژیکی بر نفوذپذیری خاک

در سال ۲۰۰۷ ویفین و همکاران عملیات بهسازی بیولوژیکی را بر روی نمونه‌ای به طول ۵ متر انجام دادند [۴۲]. باکتری مورد استفاده در این آزمایش از نوع اسپورسارسیناپاستوری بوده و بعد از تزریق و بهسازی آزمایش سه محوری و نفوذپذیری مطابق شکل شماتیک (۲-۸) بر روی نمونه خاک انجام گرفت. مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش به شرح جدول (۲-۳) می‌باشد:

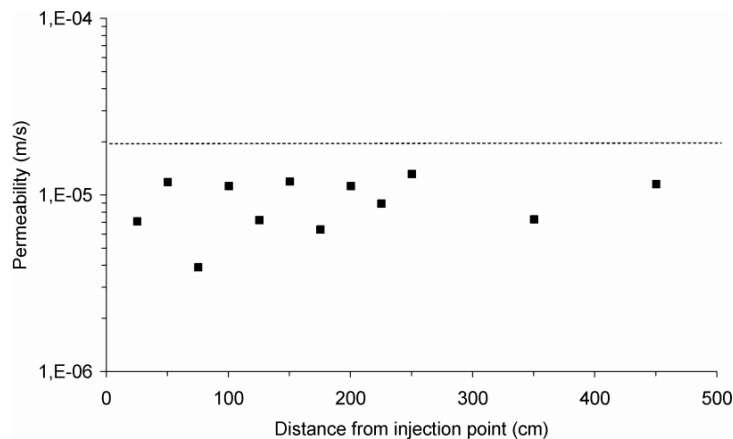
جدول (۲-۳) مشخصات خاک مورد استفاده توسط ویفین و همکاران ۲۰۰۷ [۴۲]

Soil type	$D_{10}(\mu m)$	$D_{50}(\mu m)$	$D_{90}(\mu m)$	$\gamma_d(\text{gr}/\text{cm}^3)$	$n(\%)$
Itterbeck	۱۱۰	۱۶۵	۲۷۵	۱/۶۵	۳۷/۸



شکل (۲-۸) شماتیک از قالب ساخت نمونه در آزمایش ویفین و همکاران ۲۰۰۷ [۴۲]

نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها مطابق شکل (۲-۹) است:

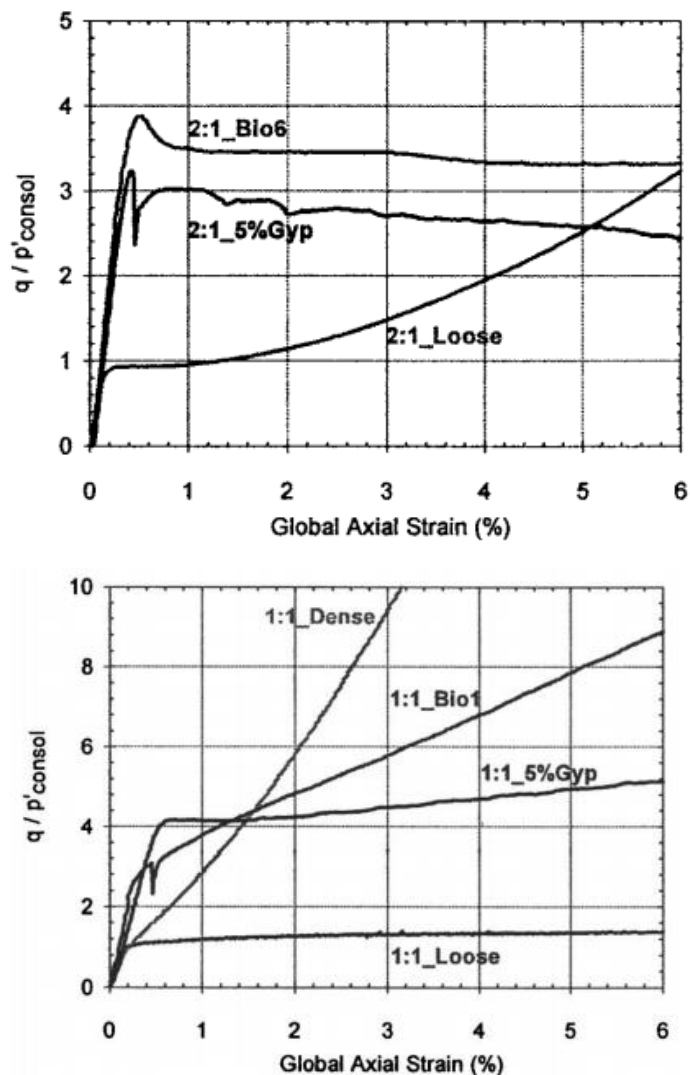


شکل (۲-۹) میزان نفوذپذیری نمونه در طول نمونه ۵ متری در آزمایش ویفین و همکاران [۴۲]۲۰۰۷

با توجه به داده‌های بالا و اینکه مقدار نفوذپذیری نمونه اولیه قبل از بهسازی با خط‌چین مشخص شده است، نتیجه می‌شود که در طی بهسازی به روش بیولوژیکی از میزان نفوذپذیری خاک ماسه‌ای کاسته می‌شود.

۲-۴-۳- اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت برشی خاک

دیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ با انجام آزمایش سه محوری زهکشی نشده بر روی خاک ماسه‌ای جدول (۲-۲) دریافتند که عملیات بهسازی بیولوژیکی بر روی مقاومت برشی نمونه خاک تاثیر گذار بوده و می‌تواند مقاومت برشی را تا ۳، ۴ برابر افزایش دهد [۴۰]. همچنین آزمایش یکسانی بر روی خاک مشابه که بو سیله رسوب القایی سنگ آهک بهسازی شده بود انجام گرفت که نتایج آن مطابق شکل (۲-۱۰) است:



شکل (۲-۱۰) نتایج آزمایش سه محوری انجام شده توسط دیانگ و همکاران ۲۰۰۶ [۴۰]

با توجه به نمودارهای بدست آمده از آزمایش که بر روی دو نمونه با ارتفاع های متفاوت صورت گرفته، نمونه شاهد پس از ۱۵٪ کرنش دچار شکست شده و در ادامه رفتار کرنش سخت شونده از خود نشان می‌دهد. ماسه بهسازی شده توسط گچ مطابق انتظار مقاومت برشی سخت‌تری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان می‌دهد ($q/p=3/2$). این نمونه پس از رسیدن به مقاومت بیشینه دچار شکست مختصری شده و در ادامه رفتار کرنش نرم شونده از خود نشان می‌دهد. ماسه بهسازی شده به روش بهسازی بیولوژیکی به وضوح مقاومت قابل توجهی نسبت به دو نمونه دیگر داشته ($q/p=3/9$) و پس از رسیدن به مقاومت بیشینه، شکست پیوندهای بین ذرات اتفاق افتاده و در ادامه از خود رفتار کرنش نرم‌شونده نشان می‌دهد.

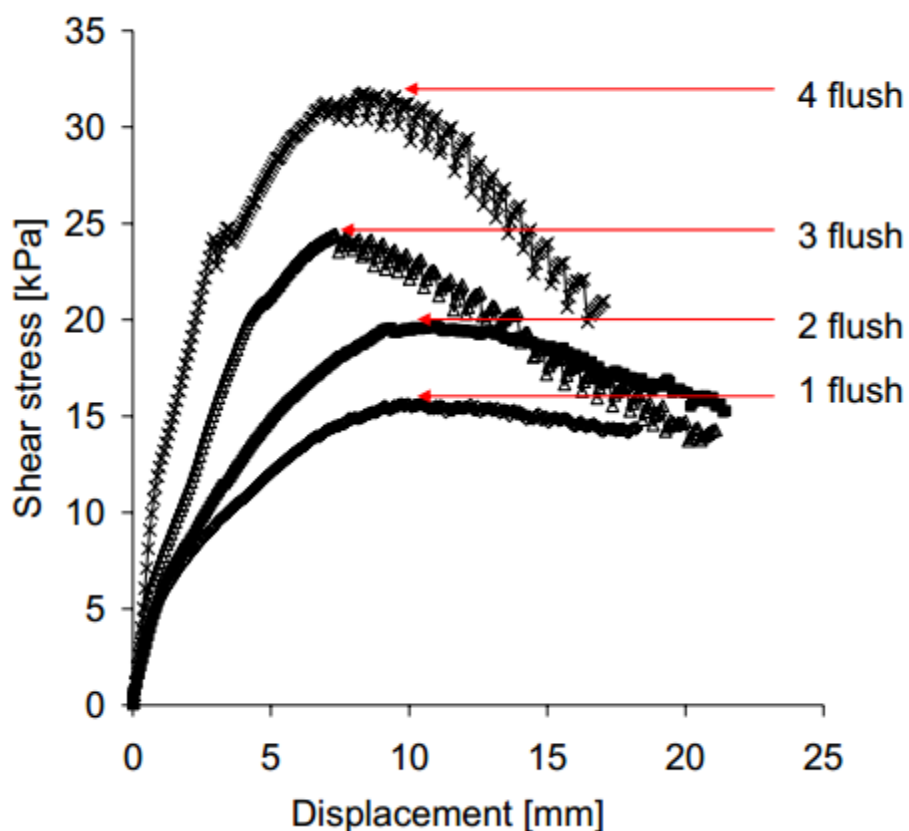
در سال ۲۰۱۱ ون پاسن و همکاران با مدلسازی حالت سه بعدی بر روی نمونه های ۱ و ۱۰۰ متر مکعبی

عملکرد روش بهسازی بیولوژیکی را مورد ارزیابی قرار دادند [۴].



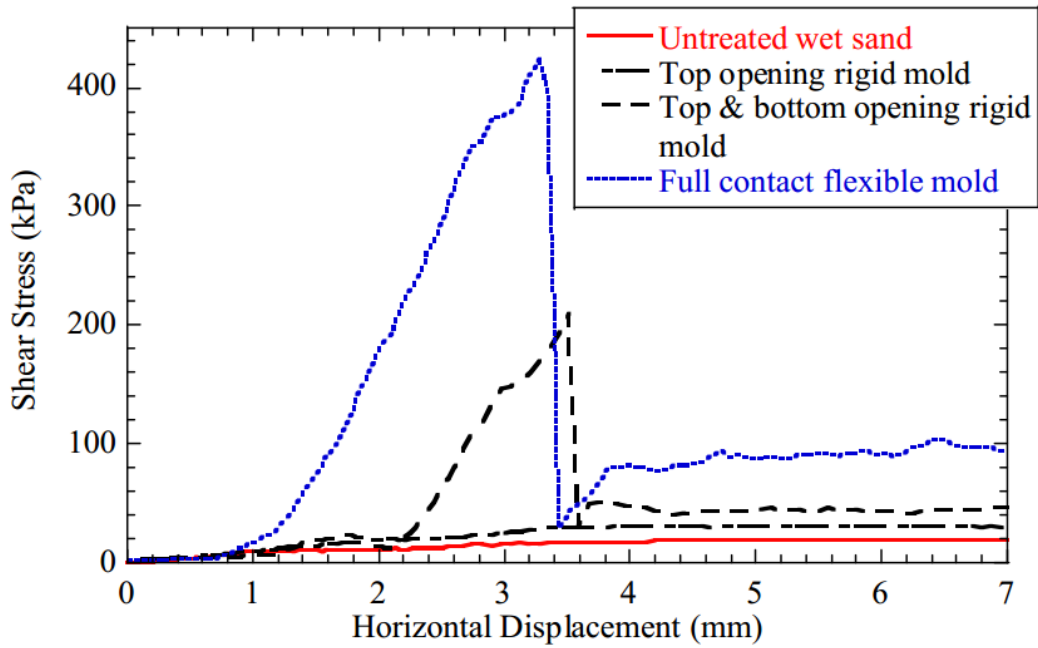
شکل (۲-۱۱) خاک بهسازی شده به روش بیولوژیکی توسط ون پاسن ۲۰۱۱ [۴]

تحقیقات ون پاسن نشان می‌دهد تعداد دفعات تزریق مواد بیولوژیکی بر شکل‌پذیری و میزان مقاومت برشی تاثیر می‌گذارد. به طوری که هر چه تعداد دفعات تزریق بیشتر شود نمونه تردتر می‌شود و میزان مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۱۲) نتایج آزمایشات ون پاسن و همکاران ۲۰۱۱ [۴]

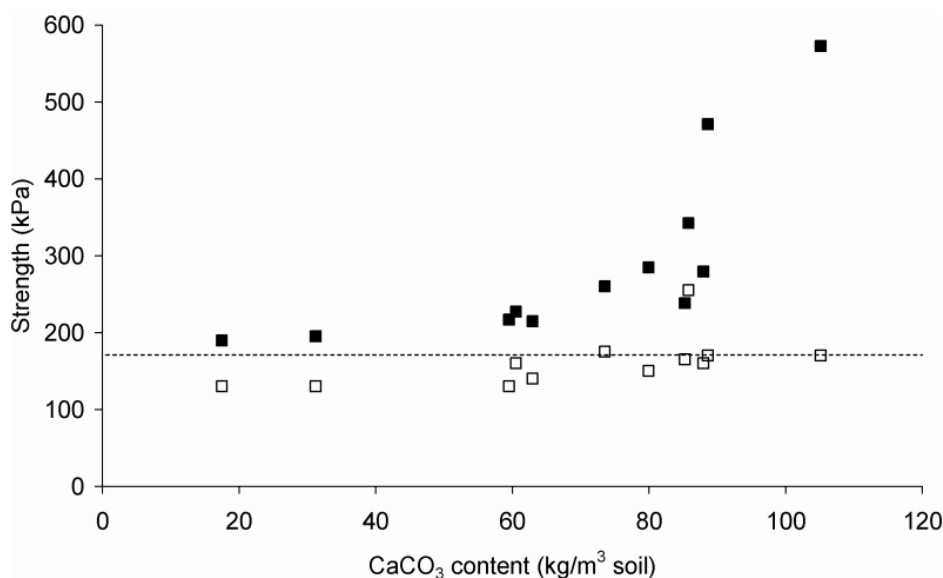
در سال ۲۰۱۵ لین لی و فر شاد امینی طی آزمایشاتی بر روی انواع قالب های تزریق موفق به ساخت قالبی انعطاف پذیر شدند که بهینه‌ترین حالت ممکن برای تزریق یکنواخت را فراهم می‌کند. همچنین در این تحقیق آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های بدست آمده از قالب‌های مختلف انجام گرفت که نشان دهنده تاثیر بسزای روش بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت برشی خاک های ماسه‌ای است [۴۳].



شکل (۲-۱۳) نتایج آزمایش برش مستقیم توسط لی لین و فرشاد امینی [۴۳]

۲-۴-۴-۲ اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت فشاری

در سال ۲۰۰۷ ویفین و همکاران با انجام آزمایش سه محوره بر روی نمونه خاک جدول (۲-۳) به نتایج زیر دست پیدا کردند [۴۲]:



شکل (۲-۱۴) مقاومت فشاری ■ مقاومت فشاری پسماند بعد از شکست □ [۴۲]

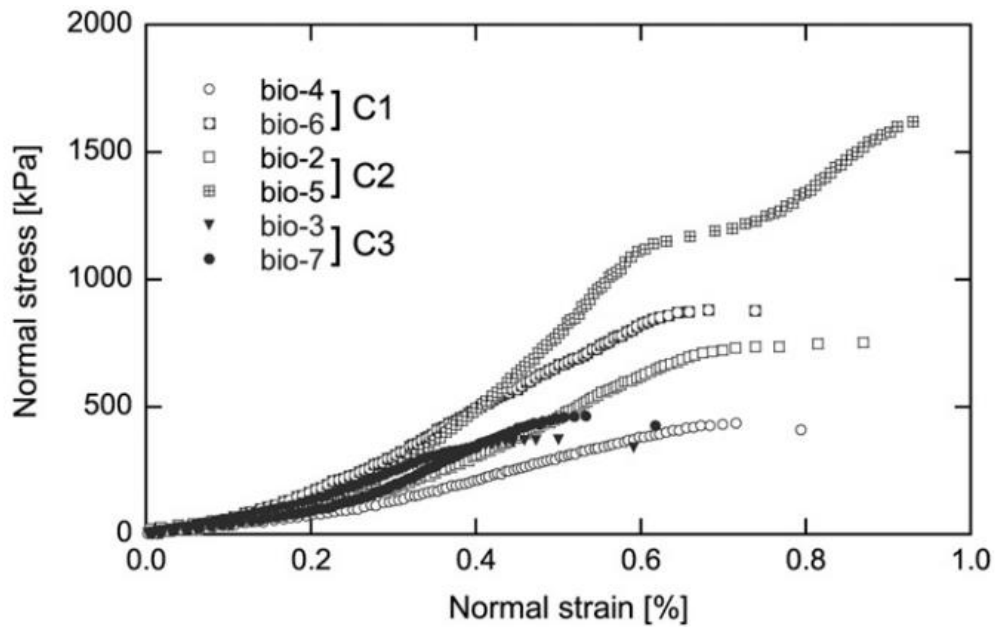
با توجه به این که میزان مقاومت فشاری نمونه بهسازی نشده ۱۶۷ kPa می‌باشد (که با خط چین در شکل (۲-۱۴) مشخص شده است) چنین نتیجه می‌شود که مقدار کلسیم کربنات کمتر از 60 kg/m^3 تاثیر چندانی در بهبود مقاومت نمونه‌ها ندارد. مقادیر بیشتری از از رسوب کلسیم کربنات تاثیر چشمگیری در مقاومت نمونه‌های بهسازی شده دارد، به طوری که بیشترین مقاومت بدست آمده ۵۷۰ kPa می‌باشد که در مقابل نمونه بهسازی نشده افزایش مقاومت ۳ برابری داشته‌است.

در سال ۲۰۱۲ یوسوها و همکاران آزمایشاتی بر روی نمونه خاک ماسه‌ای که به روش بیولوژیکی بهسازی شده بود انجام دادند [۴۴]. در این آزمایش از باکتری اسپوروسار سیناپاستوری برای عملیات بهسازی استفاده شده بود. نمونه بهسازی شده در آزمایش آن‌ها مطابق شکل (۲-۱۵) می‌باشد.



شکل (۲-۱۵) نمونه بهسازی شده در آزمایش یوسوهارا و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]

در این تحقیق اثر این روش بهسازی بر روی مقاومت فشاری مطابق شکل (۲-۱۶) مورد ارزیابی قرار گرفت.

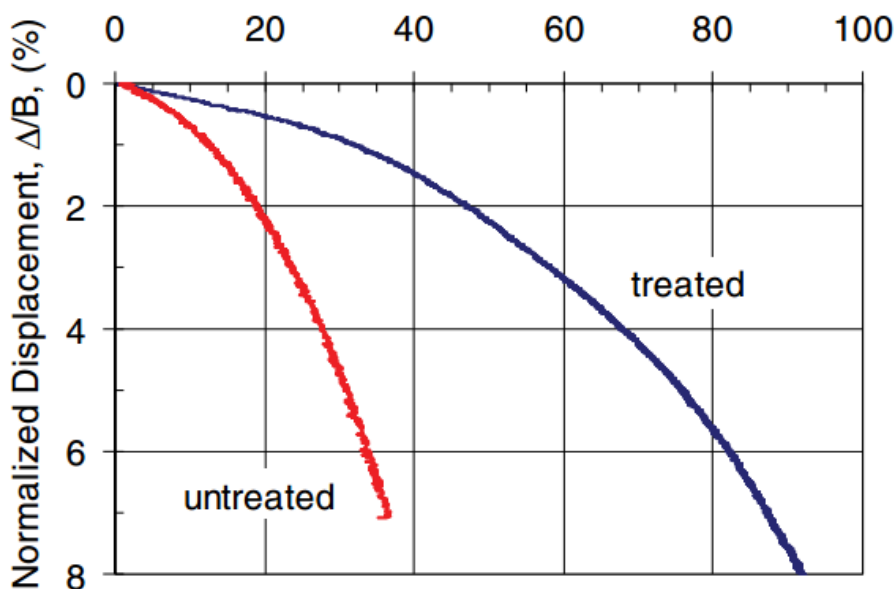


شکل (۲-۱۶) اثر بهسازی بیولوژیکی بر مقاومت فشاری - یوسوهارا و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]

با توجه به نمودار بالا نتیجه می‌شود که بهسازی بیولوژیکی تاثیر چشمگیری در مقاومت فشاری خاک بهسازی شده دارد. مقاومت فشاری نمونه بهسازی نشده خاک ۴۰۰ kPa گزارش شده در حالی که میزان مقاومت فشاری یکی از نمونه های آزمایش شده تا ۱۶۰۰ kPa افزایش داشته است که نشان دهنده تاثیر بسیار مطلوب این روش بهسازی بر خاک است.

۲-۴-۵- اثر بهسازی بیولوژیکی بر نشست خاک

در سال ۲۰۱۰ دیانگ و همکاران به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک در مقیاس صحرایی پرداختند. آن‌ها خاک بستر یک پی منفرد را بوسیله روش بیولوژیکی بهسازی کردند [۴۱].

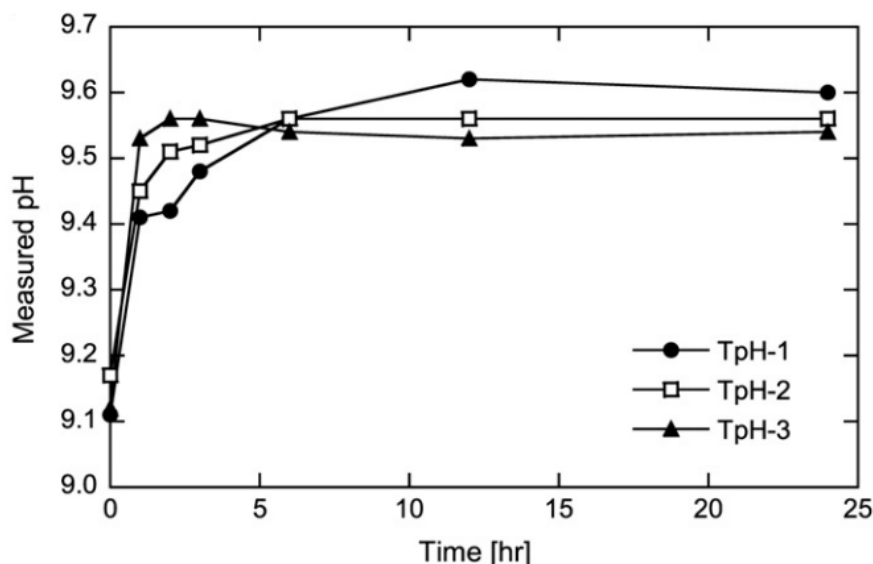


شکل (۲-۱۷) اثر بهسازی بیولوژیکی بر نشست بستر یک پی منفرد [۴۱]

با توجه به شکل (۲-۱۷) نتیجه می‌شود که بهسازی بیولوژیکی خاک تاثیر چشمگیری در کاهش نشست های زیر پی سازه دارد.

۲-۴-۶- اثر بهسازی بیولوژیکی بر pH خاک

در سال ۲۰۱۲ یوسوها را و همکاران [۴۴] با استفاده از باکتری اسپرو سار سیناپا ستوری اقدام به بهسازی خاک ماسه‌ای کردند و اثر این روش بهسازی را بر pH خاک مورد ارزیابی قرار دادند.



شکل (۲-۱۸) اثر بهسازی بیولوژیکی بر PH خاک در آزمایش یوسوها را و همکاران ۲۰۱۲ [۴۴]

با توجه به نتایج آزمایش مشخص می‌شود که عملیات بهسازی بیولوژیکی باعث افزایش pH خاک می‌شود و خواص قلیایی خاک را افزایش می‌دهد.

۲-۵- جمع بندی نتایج ادبیات فنی

همانطور که شرح داده شد، بهسازی بیولوژیکی به روش MICP تقریباً از سال ۲۰۰۱ مورد توجه محققین و پژوهشگران در سراسر دنیا بوده است. استفاده از افزودنی‌ها مانند سیمان بر محیط زیست و آلودگی خاک اثر می‌گذارد به همین جهت اهمیت استفاده از روش‌های نوین و دوست‌دار محیط زیست بیشتر مورد توجه محققین قرار می‌گیرد. بهسازی بیولوژیکی به روش تشکیل رسوب کربنات کلسیم (MICP) یک روش نوین در امر بهسازی خاک و متناسب با استانداردهای محیط زیست می‌باشد. همانطور که در این فصل گفته شد، بهسازی بیولوژیکی به روش MICP در آزمایشات و پژوهش‌های انجام شده به عنوان روشی موثر و

موفقیت‌آمیز در امر تثبیت و بهسازی خاک نشان داده شده است. جدول (۲-۴) حاوی نتایج آزمایشات انجام شده بر روی خاک بهسازی شده به روش MICP است.

جدول (۲-۴) جمع‌بندی نتایج ادبیات فنی

نتیجه تحقیق	محقق
طی تحقیقات انجام شده بر روی ماسه اوتاوا بوسیله دستگاه سه محوری و Bender Element افزایش سرعت موج برشی و مقاومت برشی نشان داده شد	دیانگ و همکاران (۲۰۰۶)
تزریق از پایین به بالای ستون ماسه اتریک افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری خاک را نشان داد	ویفین و همکاران (۲۰۰۷)
بهسازی خاک در مقیاس صحرایی و بر بستر یک پی منفرد کاهش بسیار زیاد نشست را نشان داد	دیانگ و همکاران (۲۰۱۰)
افزایش دفعات تزریق به خاک افزایش مقاومت خاک و کاهش شکل‌پذیری خاک را نشان داد	ون پاسن و همکاران (۲۰۱۱)
بهسازی بیولوژیکی به روش MICP باث افزایش مقاومت فشاری نمونه های ماسه شد	یوسوهارا و همکاران (۲۰۱۲)
با انجام آزمایش برش مستقیم روی نمونه های ماسه بهسازی شده به روش MICP افزایش مقاومت برشی خاک مشاهده شد	لین لی و همکاران (۲۰۱۵)

فصل ۳:

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این تحقیق از روش آزمایشگاهی جهت بررسی تاثیر روش بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای استفاده شده است. در این پژوهش از خاک ماسه فیروزکوه (D₁₁) با تراکم نسبی کم برای اجرای فرآیند MICP استفاده گردید و نمونه‌های خاک در دو دسته بهسازی شده و بهسازی نشده بوسیله دستگاه برش ساده سیکلیک مورد آزمایش قرار گرفت، از داده‌های خروجی دستگاه پارامترهای مورد نیاز استخراج شد. در این فصل مصالح مورد استفاده، نوع و روش کشت باکتری، آزمایش‌های انجام شده و مسائل مربوط به نحوه انجام آزمایش‌ها مورد بحث قرار گرفته است. بر این اساس ابتدا مصالح استفاده شده و خصوصیات آن‌ها و سپس نحوه انجام آزمایش توضیح داده شده است.

۳-۲- مواد و مصالح مصرفی

محلول باکتری، محلول سیمان‌تاسیون و خاک ماسه فیروزکوه مواد و مصالح به کار برده شده در این پژوهش می‌باشند. در ادامه به بررسی این مواد و مصالح و توضیح خواص آن‌ها پرداخته شده است.

۳-۲-۱- ماسه فیروزکوه

خاک مورد استفاده در این پژوهش خاک سیلیکاته ماسه فیروزکوه (D₁₁) می‌باشد که یکی از خاک‌های بسیار پر کاربرد و استاندارد در پژوهش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. این خاک از منطقه فیروزکوه در استان تهران تهیه شده و مشخصات و خواص فیزیکی این خاک طی انجام آزمایشاتی از قبیل دانه بندی، تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر مشخص گردید که به شرح زیر ارائه شده است.

۳-۲-۱-۱- آزمایش دانه بندی

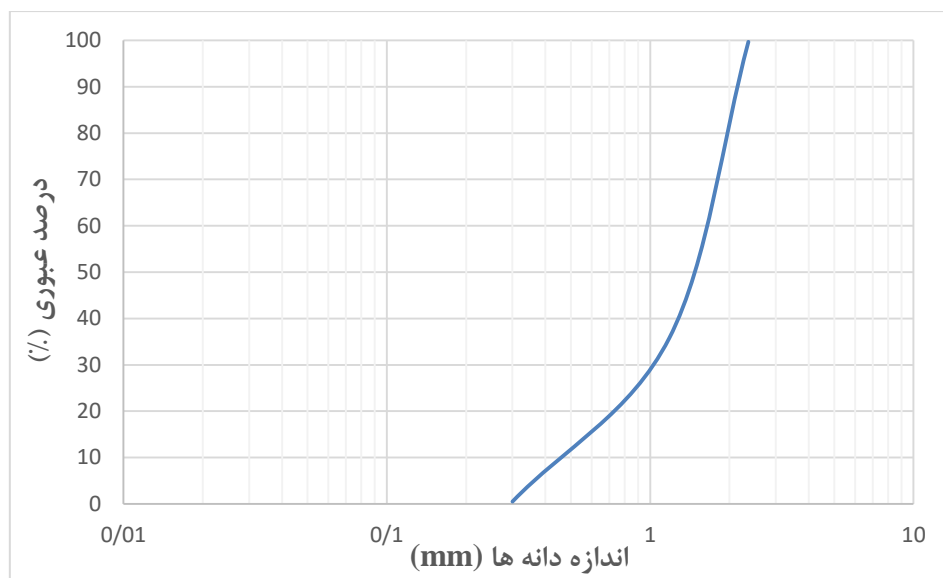
آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D422 بر روی خاک ماسه فیروزکوه برای تعیین اندازه ذرات خاک

انجام گرفت. روش انجام این آزمایش به گونه است که ابتدا الک‌ها را به ترتیب نمره از درشت‌ترین به ریز‌ترین الک مطابق شکل (۱-۳) روی هم قرار داده، سپس مقدار یک کیلوگرم از خاک مورد نظر در حالت خشک را بر روی بالاترین الک ریخته و سری الک‌ها را بر روی ویبراتور میگذاریم. بعد از این که الک‌ها به اندازه کافی لرزانده شد باید مقدار خاک موجود بر روی هر الک را وزن کرده و نتایج را یادداشت نمود.



شکل (۱-۳) الک‌ها و شیکر برای آزمایش دانه‌بندی

نتایج آزمایش دانه‌بندی مطابق جدول (۱-۳) و منحنی دانه‌بندی مطابق شکل (۲-۳) می‌باشد.



شکل (۲-۳) منحنی دانه‌بندی خاک

جدول (۱-۳) مشخصات و ضرایب دانه‌بندی خاک

نام خاک	ماسه فیروز کوه - D ₁₁
نام خاک در سیستم یونیفاید	SP
D ₁₀	۰/۵
D ₃₀	۱
D ₅₀	۱/۵
D ₆₀	۱/۷
C _u	۳/۴
C _c	۱/۱۷

۲-۱-۲-۳- تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر

برطبق استاندارد ASTM D4253 و برای تعیین میزان دانسیته نسبی خاک وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک را محاسبه شده است. برای این آزمایش یک استوانه با حجم مشخص، وزنه و چکش مورد نیاز است. روش انجام این آزمایش به این صورت است که ابتدا استوانه را وزن نموده و از فاصله ۲/۵ سانتی متری خاک را در داخل استوانه ریخته می‌شود. زمانی که استوانه پر شد سطح خاک را صاف نموده و وزن استوانه اندازه گیری می‌شود. با کم کردن وزن استوانه خالی وزن خاک داخل استوانه بدست می‌آید. این آزمایش را برای سه بار تکرار شده و در انتها با داشتن حجم استوانه وزن مخصوص حداقل خاک قابل شده است. برای بدست آوردن وزن مخصوص حداکثر، خاک را در ۵ لایه داخل استوانه ریخته و در هر مرحله با استفاده

از چکش و وزنه، ۲۵ ضربه به سطح خاک زده می‌شود تا به خوبی متراکم گردد. پس از پرسیدن استوانه مانند آزمایش قبل میزان وزن مخصوص حداکثر محاسبه شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش به شرح جدول (۲-۳) می‌باشد.

جدول (۲-۳) نتایج آزمایش وزن مخصوص حداقل و حداکثر

وزن مخصوص حداقل		
شماره آزمایش	وزن خاک (g)	وزن مخصوص (g/cm^3)
۱	۳۱۷۶	۱/۴۹
۲	۳۱۰۵	۱/۴۶
۳	۳۱۹۶	۱/۵
وزن مخصوص حداکثر		
۱	۳۶۱۰	۱/۷
۲	۳۶۶۴	۱/۷۲
۳	۳۷۵۷	۱/۷۷

طبق جدول ۳-۳ با محاسبه میانگین نتایج بدست آمده مقدار وزن مخصوص حداقل برابر $1/48 \text{ g/cm}^3$ و مقدار وزن مخصوص حداکثر برابر $1/73 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شد.

۳-۲-۲- باکتری اسپورسارسینای پاستوری

باکتری مورد استفاده در این پژوهش باکتری اسپورسارسینا پاستوری^۱ (*Basillus Pasteurii* PTCC1645) از خانواده باسیلوس‌ها می‌باشد. این باکتری به صورت پودر جامد لیوفلیزه در داخل آمپول مخصوص مطابق شکل (۳-۳) از مرکز کلکسیون میکرواورگانیزم‌های صنعتی تهیه شد و در دمای ۵۰- سانتی‌گراد تا زمان مصرف نگهداری شد. مرکز کلکسیون میکرواورگانیزم‌های صنعتی ایران، که از سال ۱۳۶۱ در پژوهشکده زیست فناوری در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران^۲ فعالیت می‌کند، میکرواورگانیزم‌های مورد نیاز مراکز آموزشی، تحقیقاتی و صنعتی بویژه صنایع غذایی و داروسازی را تامین می‌کند.

^۱ *Basillus Pasteurii* (PTCC1645)

^۲ IROST



شکل (۳-۳) آمپول حاوی باکتری اسپورسارینا پاستوری

۳-۲-۲-۱- محیط کشت

برای تعیین محیط کشت باکتری ابتدا مطالعات پیشین در زمینه بهسازی بیولوژیکی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت با مشورت و همکاری بخش آزمایشگاه کشت میکروبی دانشگاه علوم پزشکی شاهرود پروتکل کشت تعیین گردیده است که اطلاعات مواد مصرفی مطابق جدول (۳-۳) می‌باشد.

جدول (۳-۳) محیط کشت باکتری

مقدار	ماده	ردیف
3gr	Nutrient Broth	۱
20gr	اوره	۲
10gr	کلرید آمونیوم	۳
2.12gr	بیکربنات سدیم	۴

مقادیر قید شده در جدول بالا میزان مواد حل شده در یک لیتر آب مقطر می‌باشد. ضمن این که pH محلول

کشت باکتری ۶ بوده و غلظت سلول‌های باکتری در $OD_{600}=1.2$ بوده که برابر با 10^8 cell/ml می‌باشد.

۳-۲-۳- محلول سیمان‌تاسیون

به جهت انجام فرآیند MICP و رسوب کربنات کلسیم از دو ماده اوره و کلرید کلسیم استفاده شده است. غلظت مورد نیاز از این مواد برای درست کردن محلول سیمان‌تاسیون بر اساس پروتکل مشخص شده است. به طوری که غلظت مواد استفاده شده از اوره ۲ مول و کلسیم کلراید ۱ مول می‌باشد. پس از تعیین حجم مورد نیاز از محلول سیمان‌تاسیون با توجه به حجم حفرات خالی نمونه‌های خاک، مقدار اوره و کلسیم کلراید مورد نیاز وزن گردید و در آب مقطر حل شد.

با توجه به این که مقدار چگالی ویژه ذرات خاک ماسه‌ای فیروزکوه $2/65 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد و این که در هر قالب 487 g گرم خاک ریخته شده است، حجم اشغال شده توسط ذرات خاک $183/8 \text{ cm}^3$ محاسبه شده است. با کم نمودن حجم ذرات خاک از حجم کلی نمونه ($314/16 \text{ cm}^3$) مقدار حجم فضای خالی نمونه cm^3 $130/36$ محاسبه شده است.

اوره^۱ یا کاربامید^۲ یک ترکیب آلی با فرمول شیمیایی $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ است. این مولکول دارای دو گروه آمین NH_2 و یک CO که گروه عاملی کربونیل است می‌باشد. این ماده برای نخستین بار در سال ۱۷۷۳ میلادی توسط شیمیدان فرانسوی هیلاری رول^۳ درون ادرار کشف گردید. نمونه مورد استفاده در آزمایشگاه‌ها در شکل (۳-۴) قابل مشاهده است.

¹ urea

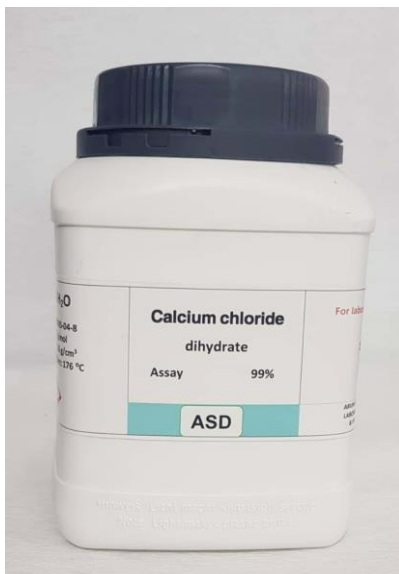
² carbamide

³ Hilaire Rouelle



شکل (۳-۴) اوره

کلسیم کلراید (شکل (۳-۵)) یک ترکیب شیمیایی متشکل از کلسیم و کلر است. این ماده در آب بسیار محلول بوده و از موارد استفاده از کلرید کلسیم در ساخت بتن‌های زودگیر می‌باشد. به این ترتیب که کلرید کلسیم در ساخت این بتن‌ها نقش تسریع‌کننده را دارد. این ماده شیمیایی ابتدا با آب بتن مخلوط و سپس به مخلوط شن و ماسه و سیمان اضافه می‌شود. به این ترتیب برای ساخت بتن‌های زودگیر می‌توان بجای استفاده از سیمان زودگیر، از سیمان معمولی (پرتلند نوع I) همراه با کلرید کلسیم استفاده نمود. بتن ساخته شده به این روش در مقابل فرسایش مقاومت بیشتری از خود نشان داده اما در مقابل حمله سولفات‌ها آسیب‌پذیرتر بوده و افت بتن نیز حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش یافته، اما در هر حال بدترین ضرر این ماده اثر آن بر روی آرماتورها و ایجاد خوردگی در آن‌ها است. به این ترتیب با توجه به بند ۹-۳-۵-۱ از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران استفاده از این ماده تنها در بتن‌های بدون فولاد مجاز بوده و میزان مصرف آن به ۲ درصد وزنی سیمان محدود می‌شود.



شکل (۳-۵) کلسیم کلراید دوآبه

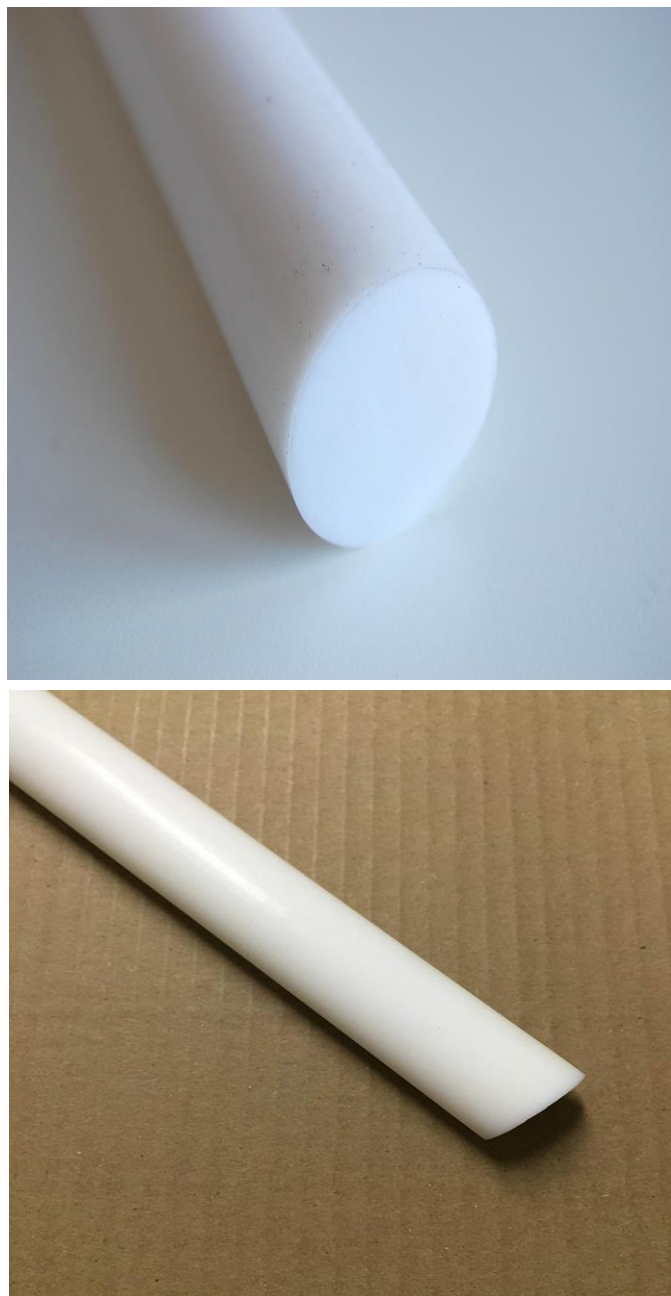
۳-۳- آمادگی سازی نمونه

آماده سازی نمونه ها جهت بررسی تاثیر بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی شامل ساخت قالب و تهیه نمونه ماسه با درجه تراکم یکسان، کشت باکتری، آماده سازی محلول سیمانتاسیون و تزریق محلول ها به خاک است که این مراحل در ادامه شرح داده شده است.

۳-۳-۱- طراحی و ساخت قالب

به منظور ساخت نمونه ها و تزریق مواد و محلول ها به خاک قالب هایی طراحی و ساخته شده است. پروفیل توپر ۱ متری از جنس تفلون^۱ مطابق شکل (۳-۶) با قطر بیرونی ۱۱ cm خریداری شد و توسط دستگاه برش CNC به ۱۷ قطعه به طول ۵ سانتی متر تبدیل شده است.

¹ PTFE



شکل (۳-۶) پروفیل تفلون PTFE

داخل تمامی قطعات متنا سب با ابعاد نمونه‌های دستگاه برش ساده سیکلیک (10 cm قطر و 4 cm ارتفاع) خالی گردیده و به منظور ایجاد مجرای خروجی مایعات فیتینگ 6 mm (شکل (۳-۷)) در زیر قالب‌ها تعبیه شده که امکان اتصال لوله را هم دارا می‌باشد.



شکل (۷-۳) فیتینگ ۶ میلی متری

در نهایت قالب های ساخته شده برای استفاده در این پژوهش مطابق شکل (۸-۳) می باشد.



شکل (۸-۳) نمای بالا و زیر قالب های ساخته شده

۳-۳-۲- ساخت نمونه خاک

همانطور که گفته شد در این پژوهش از خاک ماسه‌ای فیروزکوه استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی خاک در حالت تراکم نسبی ۴۰٪ انجام شده است. علت استفاده از این تراکم نسبی سست بودن خاک در این حالت می‌باشد که با اجرای عملیات بهسازی، اثر بهسازی راحت‌تر و بهتر قابل تشخیص خواهد بود. همانطور که پیشتر گفته شد نمونه‌های دستگاه برش ساده سیکلیک دارای ۱۰ سانتی متر قطر و ۴ سانتی متر ارتفاع می‌باشد. از این رو نمونه دارای حجمی برابر $314/16 \text{ cm}^3$ می‌باشد و با توجه به تراکم نسبی ۴۰٪، میزان g ۴۸۷ خاک برای نمونه سازی مورد نیاز است. و با توجه به چگالی ویژه ذرات خاک مقدار حجم اشغالی از طرف ذرات خاک $183/8 \text{ cm}^3$ و حجم فضای خالی $130/36 \text{ cm}^3$ محاسبه شده است. با توجه به محاسبات انجام شده مقدار خاک مورد نیاز برای هر قالب پس از شسته شدن و خشک شدن خاک مطابقه شکل (۳-۹) در قالب‌ها ریخته شده است.



شکل (۳-۹) نمونه‌های آماده شده برای تزریق

۳-۳-۳- کشت باکتری

باکتری اسپور سار سینای پاستوری پس از شکسته شدن آمپول حاوی باکتری، مورد کشت قرار گرفته است. محیط کشت این باکتری بر اساس مطالعه پژوهش‌های پیشین و مشورت با متخصصین آزمایشگاه کشت باکتری مطابق پروتوکلی که شرح داده شد انتخاب و باکتری کشت داده شده است. محلول‌های باکتری آماده شده مطابق شکل (۳-۱۰) می‌باشد.



شکل (۳-۱۰) محلول باکتری آماده شده برای تزریق

۳-۳-۴- محلول سیمان‌تاسیون

با توجه به حجم فضای خالی و به منظور تزریق محلول سیمان‌تاسیون به داخل نمونه، حجم مورد نیاز از

محلول سیمان‌تاسیون محاسبه شده است. غلظت مواد محلول در محلول سیمان‌تاسیون که اوره و کلرید کلسیم است به ترتیب ۲ M و ۱ M می‌باشد که این محلول نیز همانند محلول باکتری توسط آزمایشگاه کشت میکروب دانشگاه علوم پزشکی شاهرود تهیه شده است. در شکل (۳-۱۱) محلول سیمان‌تاسیون مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۱) محلول سیمان‌تاسیون آماده شده برای تزریق

۳-۳-۵- تزریق به خاک

برای تعیین روش تزریق، مقالات و پژوهش‌های پیشین مورد مطالعه قرار گرفت و مناسب‌ترین روش انتخاب شد. همانطور که اشاره شد حجم حفرات خالی خاک $130/36 \text{ cm}^3$ محاسبه شده است. از آنجایی که در زیر قالب‌ها مجرای برای خروج مواد تعبیه شده و محلول‌ها میبایست به تمام نقاط خاک برسد در مرحله اول مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول باکتری مطابق شکل (۳-۱۲) با استفاده از سرنگ با سرعت ۳۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت بر روی تمام سطح نمونه‌ها ریخته شد. بعد از گذشت ۳۰ دقیقه، مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول سیمان‌تاسیون با همان سرعت به خاک تزریق گردید و در مرحله آخر پس از گذشت ۳۰ دقیقه ۵۰ میلی‌لیتر محلول باکتری به خاک تزریق شد تا اطمینان حاصل شود هر دو محلول با تمام نقاط خاک رسیده باشد.



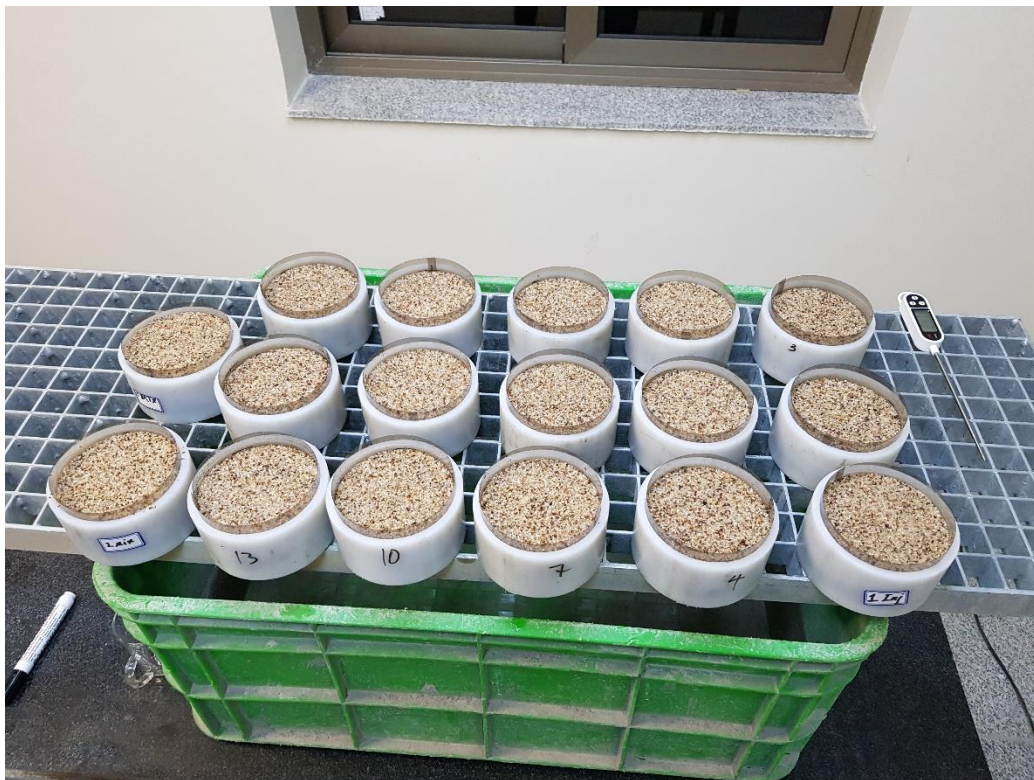
شکل (۳-۱۲) تزریق ثقلی به خاک با استفاده از سرنگ

بعد از گذشت ۲۴ ساعت سیکل دوم تزریق محلول سیمان‌تاسیون به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر انجام شد تا با

اتمام تزریق محلول‌ها به خاک عملیات واکنش‌های شیمیایی و تشکیل رسوب در خاک شروع گردد.

۳-۳-۶- عمل آوری نمونه‌ها

پس از اتمام مراحل تزریق، نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز در دمای 28 ± 2 درجه سانتی‌گراد به صورت شکل (۳-۳-۱۴) نگهداری شد تا دوره عمل‌آوری نمونه‌ها سپری گردد.



شکل (۳-۳-۱۴) نمونه‌ها پس از تزریق



شکل (۳-۱۴) نگهداری نمونه‌ها در دمای مناسب در طول دوره عمل‌آوری

پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها به جهت متوقف کردن فرآیند میکروبی قالب‌ها را به مدت دو روز در گرم کن با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و پس از دو روز خاک‌های سخت شده از قالب‌ها خارج گردید (شکل (۳-۱۵)).



شکل (۳-۱۵) نمونه خارج شده از قالب

۳-۳-۷- محدودیت‌های اجرا

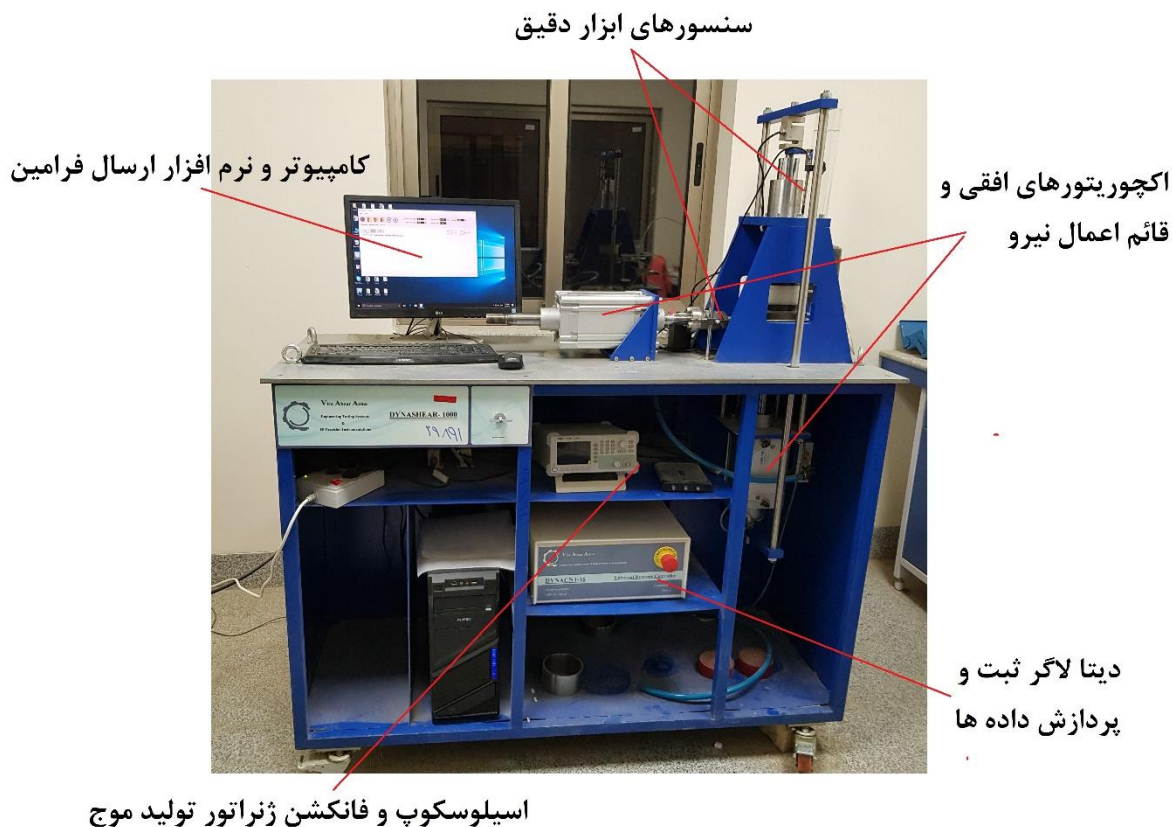
انجام تزریقات و ساخت نمونه‌ها به گونه‌ای است که نمی‌توان آن‌ها را در داخل دستگاه برش ساده سیکلیک و بر روی پداستال‌ها انجام داد. چون هم به دلیل زمان‌بر بودن دوره عمل‌آوری امکان اشغال دستگاه وجود ندارد و هم تزریق محلول‌های باکتری و سیمان‌تاسیون می‌تواند به گرفتگی و مسدود شدن لوله‌ها و منافذ دستگاه منجر شود. همچنین با توجه به شرایط محیطی برای عمل‌آوری نمونه‌ها نمی‌توان در هر مکانی با هر شرایط دمایی این کار را انجام داد.

۳-۴- متعلقات دستگاه برش ساده سیکلیک و نحوه انجام آزمایش‌ها

رفتار دینامیکی خاک‌ها از حدود ۳۵ سال پیش تا کنون مطالعه شده، به دلیل پیچیدگی‌ها و وسعت موضوع همچنان زمینه بسیاری از مطالعات ژئوتکنیکی است، چراکه هنوز نیاز به شناخت بیشتر آن کاملاً حس می‌شود. به طور کلی برای بررسی رفتار خاک تحت بار دینامیکی ابتدا باید منحنی تنش - کرنش آن رسم

گردد. با توجه به این که در بارگذاری دینامیکی بار به صورت تناوبی کم و زیاد می‌شود منحنی τ - γ آن به صورت یک حلقه‌ی بسته خواهد بود که منحنی هیستریزیس خاک نام دارد. حلقه‌های هیستریزیس از دو جهت اهمیت دارند، یکی شیب و دیگری مساحت آن‌ها. در واقع شیب این منحنی معرف سختی خاک بوده و با پارامتر مدول برشی بررسی می‌گردد. همچنین سطح حلقه‌ها نیز معرف انرژی جذب شده در خاک بوده و مابقی تاثیر کمتری دارند. به همین منظور در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی جهت تعیین و مطالعه این دو پارامتر دینامیکی صورت گرفته است.

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر بهسازی بیولوژیکی بر پارامترهای دینامیکی از دستگاه برش ساده سیلیک استفاده شده است. ساز و کار این دستگاه به این گونه است که نمونه خاک در بین رینگ‌هایی جای می‌گیرد و به دو صورت تنش کنترل و کرنش کنترل نمونه خاک مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این دستگاه از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. شکل (۳-۱۶) نمای کلی دستگاه برش ساده سیلیک را نشان داده است.



شکل (۳-۱۶) نمای کلی دستگاه برش ساده سیلیک

۳-۴-۱- کمپرسور تامین فشار باد

به منظور تامین نیرو برای دستگاه از یک کمپرسور فشار باد استفاده شده است که این کمپرسور به صورت شکل (۳-۱۷) در پشت دستگاه قرار دارد و از طریق لوله های اتصال باد را به دستگاه منتقل می کند.



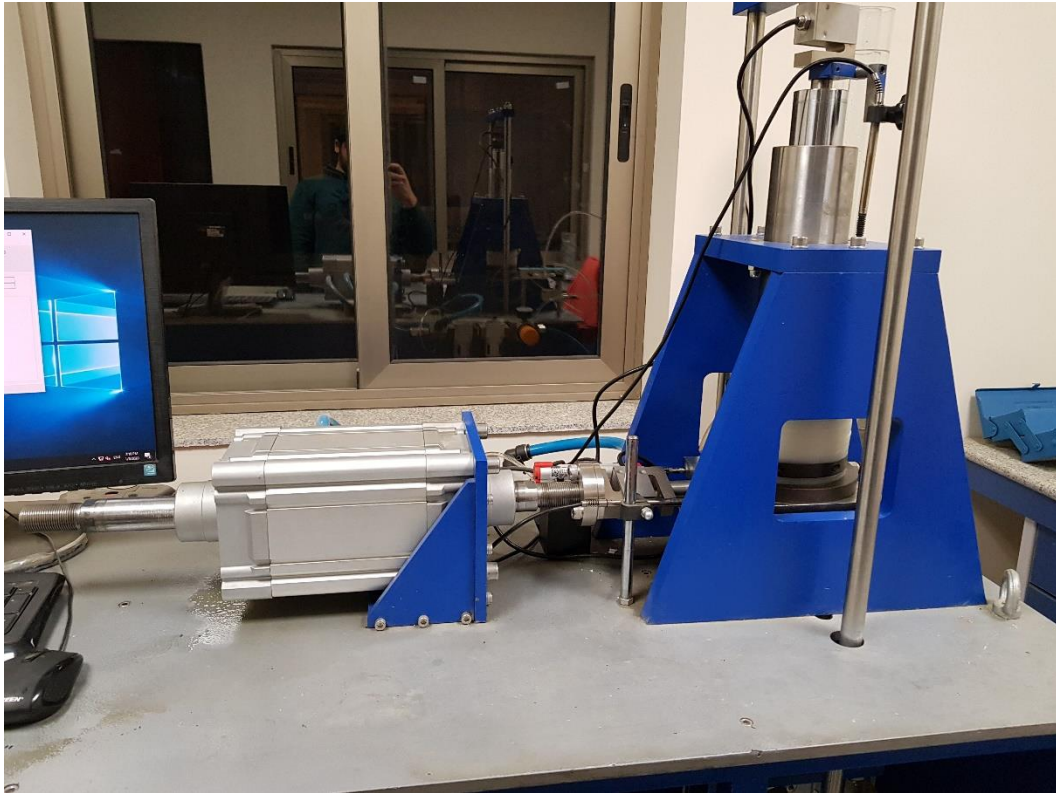
شکل (۳-۱۷) کمپرسور تامین فشار باد

۳-۴-۲- اکچوریتهورهای افقی و قائم اعمال نیرو

دستگاه برش ساده سیکلیک توانایی اعمال نیرو از دو جهت را دارد که این نیرو توسط پمپ باد تامین می‌شود و به دو جک قائم و افقی منتقل می‌شود. در محور قائم مطابق شکل (۳-۱۸) جک اعمال نیرو، پداستال، کرنش سنچ با دقت $0/001$ میلی‌متر برای اعمال بار ثابت و تحکیم نمونه قرار گرفته است. در محور افقی نیز به صورت شکل (۳-۱۹) جک اعمال نیرو، پداستال و دو کرنش سنچ با دقت های متفاوت برای اعمال بار های سیکلیک و مونوتونیک قرار گرفته است.



شکل (۳-۱۸) نمایی از جک قائم دستگاه



شکل (۳-۱۹) نمایی از جک افقی دستگاه

۳-۴-۳- سنسورهای ابزار دقیق^۱

در هر دو جهت افقی و قائم سنسورهایی با دقت بالا و در حد 0.001 میلیمتر جهت ثبت داده‌های مربوط به جابجایی محورها تعبیه شده است که امر ثبت داده‌ها را با دقت بسیار خوبی ممکن می‌سازد. این سنسورها در شکل (۳-۲۰) قابل مشاهده می‌باشد.

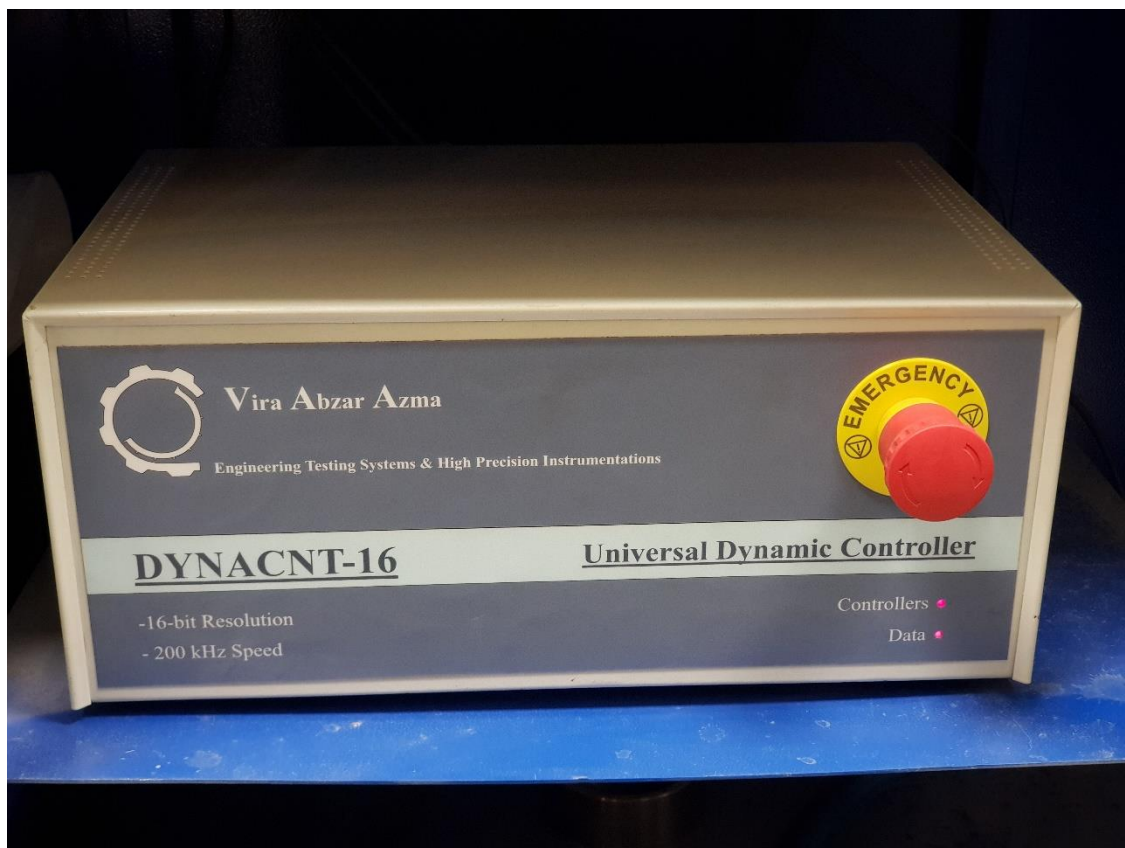
¹ LVDT



شکل (۳-۲۰) سنسور اندازه گیری جابه‌جایی قائم

۳-۴-۴- دیتالاگر ثبت و پردازش داده‌ها

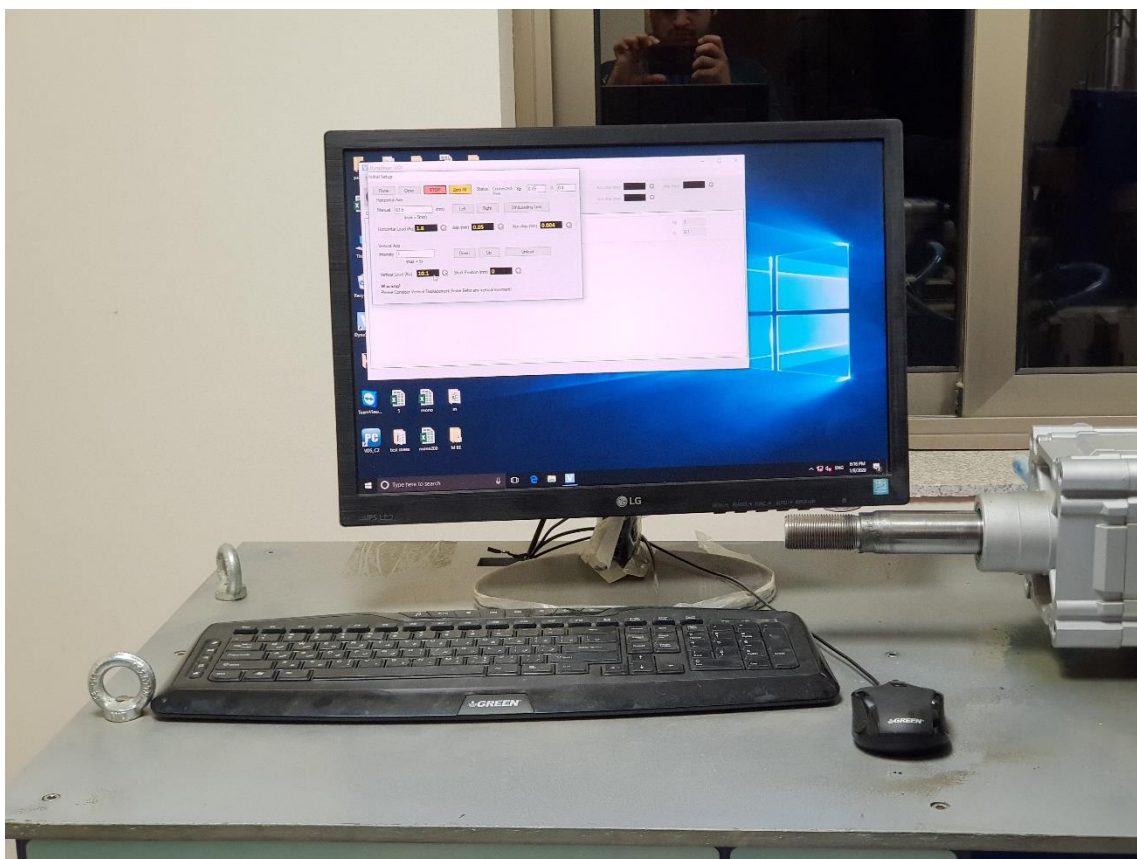
ثبت‌کننده داده یا دیتالاگر وسیله‌ای الکترونیکی است که داده‌هایی را که به وسیله حسگرهای تعبیه شده در دستگاه تأمین می‌شوند را در طول زمان یا در رابطه با مکان ذخیره می‌کند. اکثر دیتالاگرها بر پایه یک پردازنده دیجیتال (یا رایانه) طراحی و ساخته می‌شوند. آن‌ها عموماً به یک ریزپردازنده مجهز بوده و دارای حافظه داخلی جهت ذخیره‌سازی داده و تعدادی حسگر می‌باشند. برخی از دیتالاگرها به رایانه متصل می‌شوند و می‌توان با استفاده از نرم‌افزار آن‌ها را فعال کرده و داده‌های کنترل شده را مشاهده و تجزیه و تحلیل کرد، در حالی که بقیه دارای رابط محلی (مانند صفحه کلید و صفحه نمایش) بوده و می‌توانند از آن‌ها به صورت و وسیله‌ای مستقل استفاده کرد. دیتالاگر استفاده در این دستگاه (شکل (۳-۲۱)) مستقیماً به سیستم کامپیوتر متصل است و داده‌ها توسط نرم‌افزار خوانده و ذخیره می‌شوند.



شکل (۳-۲۱) دیتالاگر متصل به دستگاه برش ساده سیکلیک

۳-۴-۵- کامپیوتر و نرم‌افزار ارسال فرامین و ثبت داده‌ها

به جهت افزایش سرعت پردازش داده‌های دستگاه و همچنین دقت و صحت آزمایش‌های انجام شده از سیستم کامپیوتری استفاده شده است. سیستم نرم‌افزاری قادر به کنترل بارگذاری مونوتونیک با میزان و سرعت معین و همچنین اعمال بار دینامیکی با فرکانس و دامنه مشخص می‌باشد. دریافت داده‌ها از طریق سنسورهایی با دقت بالا و البته توانایی ذخیره‌سازی سریع از دلایل استفاده از سیستم ثبت دیتای کامپیوتری می‌باشد. ضمن این‌که قرائت دستی خطاهای آزمایش را زیاد می‌کند.



شکل (۳-۲۲) نمایی از بخش کامپیوتری دستگاه

۳-۴-۶- بندر المنت جهت تعیین سر موج برشی و مدول برشی حداکثر (Bender Element)

مدول برشی (G) در ارزیابی انتشار امواج لرزه‌ای در طول لایه‌های خاک در پاسخ دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی در معرض لرزش یا در معرض انفجار مانند فونداسیون‌ها، دیوارهای حائل و همچنین سازه‌های زیر زمینی و خاکی یک پارامتر کلیدی است. کرنش‌ها در سازه‌های ژئوتکنیکی ناشی از بارهای دینامیکی بسیار کوچک هستند و مدول برشی اندازه‌گیری شده در کرنش‌های کوچک (کمتر از ۰.۰۱٪) به عنوان مدول برشی ماکزیمم Gmax در نظر گرفته می‌شود. مدول برشی ماکزیمم، Gmax حالت الاستیک در کرنش‌های کوچک را تا زمانی که میزان افت در تماس‌های جزئی ناچیز است و تغییر شکل‌ها با رفتار الاستیک کنترل می‌شود بیان می‌کند.

مدول برشی ماکزیمم را می‌توان هم در محل و هم در آزمایشگاه و با استفاده از آزمایش‌های مختلف

محاسبه کرد. فاکتور ها مختلفی از جمله نسبت تخلخل، نسبت پیش تحکیمی (OCR)، تاریخچه تنش کرنش و میزان تنش موثر در مقدار مدول برشی تاثیرگذار هستند. روش المان خمشی و آزمایش ستون تشدید پر کاربرد ترین روش های آزمایشگاهی در اندازه گیری G_{max} در خاک های غیر اشباع است. البته لازم به ذکر است هردو روش برای حالت اشباع هم کاربرد دارند. در این پژوهش با اندازه گیری سرعت موج برشی و استفاده از روابط، مدول برشی ماکزیمم محاسبه شده است.

۳-۴-۶-۱- بخش های دستگاه اندازه گیری G_{max}

بخش های مختلف دستگاه اندازه گیری سرعت موج برشی که جز متعلقات دستگاه برش ساده سیکلیک می باشد به شرح زیر می باشد:

پداستال بالا و پایین: دو عدد پداستال که یکی برای بالای نمونه و دیگری برای پایی نمونه در نظر گرفته شده است همانند پداستال های معمولی دستگاه هستند، با این تفاوت که هرکدام دارای پیروئی برای ارسال و دریافت موج برشی میباشد. این دو پداستال به جای پداستال های معمولی در دستگاه قرار میگیرند و هرکدام بوسیله کابل به اوسیلاتور متصل میگردد. در شکل (۳-۲۳) پداستال های بالا و پایین به همراه پیرو نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۳) پداستال های Bender Element

اوسیلاتور: این دستگاه وظیفه تولید و ارسال موج به هر شکل و فرکانس به پیزو بالا و دریافت از طریق پیزو پایین را بر عهده دارد. اسیلاتور دستگاه در شکل (۳-۲۴) نشان داده شده است.



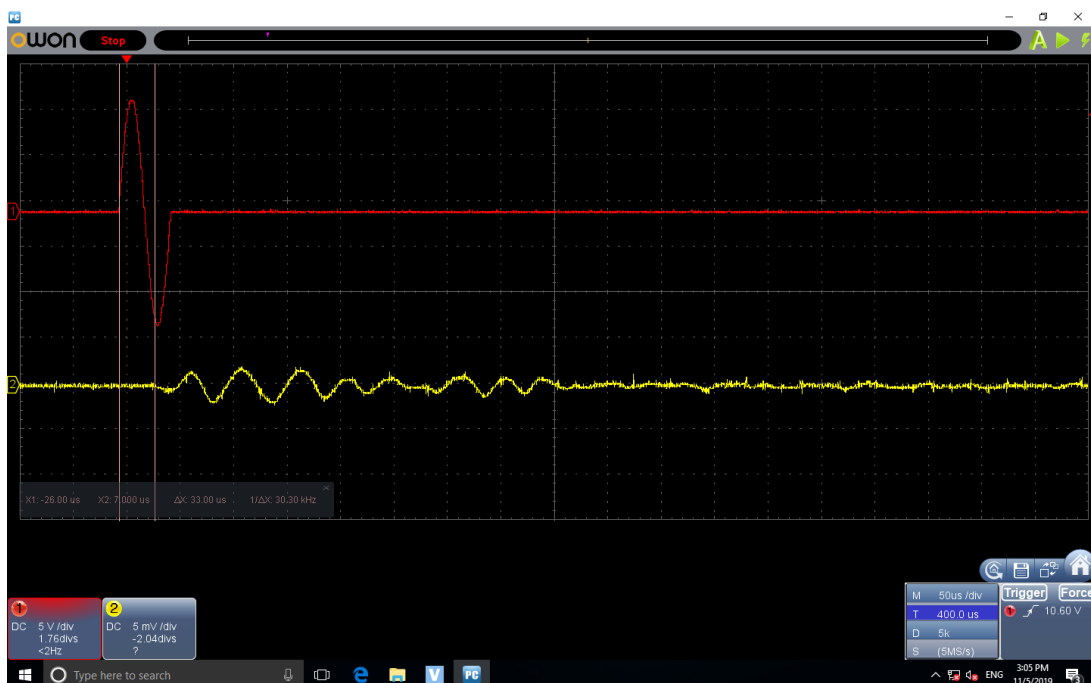
شکل (۳-۲۴) اوسیلاتور

فانکشن ژنراتور: دستگاه فانکشن ژنراتور مستقیماً با اوسیلاتور در ارتباط است و رابط میان کاربر و اوسولاتور محسوب می‌شود. فرامین کاربر از جمله نوع موج، فرکانس، و دامنه و بسیاری فرمان دیگر از طریق فانکشن ژنراتور به اوسیلاتور منتقل می‌گردد.



شکل (۳-۲۵) فانکشن ژنراتور

نرم‌افزار کامپیوتری: نرم‌افزار کامپیوتری به منظور نمایش و دریافت داده‌ها استفاده می‌شود. در نرم افزار شکل ظاهری امواج قابل ملاحظه است. در شکل (۳-۲۶) محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۶) محیط نرم افزار

۳-۴-۲- نحوه انجام آزمایش

آزمایش تعیین سرعت موج برشی به این صورت است که ابتدا نمونه خاک در داخل رینگ ها و روی پداستال پایین قرار می‌گیرد. بوسیله فک قائم میزان سربار مورد نیاز برای انجام آزمایش بر روی نمونه اعمال می‌گردد. باید دقت گردد که پیروه‌های بالا و پایین هردو داخل خاک و در تماس کامل با ذرات خاک باشند. پس از اتصال کابل های فک پایین و بالا به اوسیلاتور، توسط فانکشن ژنراتور یک تک موج سینوسی با فرکانس ۱ کیلوهرتز طراحی کرده و بوسیله اوسیلاتور این موج را ایجاد می‌گردد. بوسیله نرم‌افزار گراف موج ار سالی از پیرو بالا و موج دریافتی توسط پیرو پایین ثبت می‌شود. از طریق گراف یا اکسل خروجی داده‌ها فاصله زمانی میان تولید موج از پیرو بالا و دریافت موج توسط پیرو پایین محاسبه می‌گردد و با توجه به فاصله میان دو پیرو سرعت موج برشی تعیین می‌شود. با کمک رابطه زیر می‌توان مقدار مدول برشی ماکزیمم را محاسبه کرد [45].

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

در این پژوهش این آزمایش هم برای نمونه‌های بهسازی نشده خاک و هم برنمونه‌های بهسازی شده خاک انجام گرفت.

۳-۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM^۱

میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس‌برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد. میکروسکوپ الکترونی روبشی، از مناسب‌ترین وسایل در دسترس برای آزمایش و آنالیز مورفولوژی نانو ساختارها و شناسایی ترکیبات شیمیایی است. توانایی SEM برای بررسی سطح مواد بی نظیر بوده و حائز برتری‌های فراوانی نسبت به میکروسکوپ‌های نوری است. در میکروسکوپ نوری تشکیل تصویر با استفاده از نورهای منعکس شده از سطح نمونه صورت می‌گیرد، در حالی که در SEM این مهم با بکارگیری الکترون‌ها میسر می‌شود. در واقع این میکروسکوپ یکی از روش‌های تولید تصاویر با روبش یک پرتو الکترونی روی سطح نمونه است. طول موج الکترون‌ها از فوتون‌های نور کوتاه‌تر بوده و طول موج کوتاه‌تر باعث ایجاد وضوح،

¹ Scanning Electron Microscope

قدرت تفکیک و حصول اطلاعات مناسب تر می‌شود. در حقیقت در SEM هیچ سیستم نوری-الکترونی برای تشکیل تصویر و بزرگ نمائی وجود ندارد، بلکه تصویر از مشاهده نقطه به نقطه پدیده‌های سطح منتج از اثر متقابل پرتوی الکترونی با سطح نمونه تشکیل می‌شود. با این روش تصاویر سه بعدی از ساختار، نمونه به دست می‌آید.

در این پژوهش از آزمایش SEM برای بررسی تشکیل رسوبات بر روی ذرات خاک و ایجاد پیوند میان آنها استفاده شده است. این آزمایش در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد و با همکاری تیم آزمایشگاهی دانشگاه انجام گرفت.



شکل (۳-۲۷) نمایی از دستگاه SEM

۳-۶- آزمایش طیف سنجی پراش پرتو ایکس^۱ XRD

پراش اشعه X برای مطالعه‌ی ساختار مواد بلوری استفاده می‌شود. ناحیه پرتو X در طیف الکترومغناطیس در محدوده‌ی بین پرتو و فرابنفش قرار دارد. با استفاده از این ناحیه ی طیفی می‌توان اطلاعاتی در خصوص ساختار، جنس ماده و نیز تعیین مقادیر عناصر به دست آورد. از این روش‌های پراش پرتو X در شیمی تجزیه کاربرد زیادی دارند. برای یک ماده خالص، الگوی پراش پرتو X، همانند اثر انگشت برای آن ماده

¹ X-Ray Diffraction

است. تا کنون الگوی پراش بیش از ۷۵۰۰۰ ترکیب معدنی و آلی جمع‌آوری شده است. با استفاده از این پایگاه داده و با کمک روش جستجو و تطبیق می‌توان ترکیب هر ماده را مشخص نمود.

پراش اشعه ایکس در مشخصه‌یابی ساختار بلوری مواد، از جمله در اندازه‌گیری میانگین فواصل بین لایه‌ها و سری‌های اتمی، تعیین موقعیت تک بلور یا دانه و ترکیب اتم‌ها... بررسی ساختار کریستالی مواد ناشناخته، تعیین مشخصات ساختاری شامل پارامتر شبکه، اندازه و شکل دانه، در روش XRD با استفاده از رابطه‌ی شرر می‌توان در شرایط خاص اندازه بلورک‌ها را تعیین کرد.

هم‌چنین در تشخیص فازهای کریستالی و موقعیت آن‌ها و اندازه‌گیری ضخامت، فیلم‌های نازک و چند لایه استفاده می‌شود. اگرچه دستگاه پراش پرتو ایکس کاربردهای فراوانی دارد، مهم‌ترین کاربرد آن در تخمین اندازه بلورک‌ها در ساختارهای بلوری است که در اینجا به چگونگی آن اشاره می‌کنیم.

دستگاه پراش از یک دایره فلزی به نام دایره پراش تشکیل شده است که چشمه‌ی پدیدآورنده پرتو ایکس و آشکارساز روی محیط آن و نمونه مورد نظر در مرکز آن قرار دارند.

این آزمایش بر روی نمونه خاک ماسه‌ای فیروزکوه جهت کانی‌شناسی در محل آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.



شکل (۳-۲۸) نمایی از دستگاه XRD

۳-۷- برنامه آزمایش‌ها

به منظور اجرای آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی نمونه‌ها، برنامه ریزی، مشخص کردن نوع آزمایش و مشخصات آزمایش، هر آزمایش دارای کد مخصوص به خود می‌باشد که در جدول (۳-۴) مشخص شده است.

لازم به ذکر است حرف U^۱ برای بهسازی نشده، حرف T^۲ برای بهسازی شده، حرف V^۳ برای تنش قائم و حرف A^۴ برای دامنه افقی می‌باشد.

جدول (۳-۴) برنامه اجرای آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی

ردیف	کد	وضعیت نمونه	سربار (kPa)	دامنه (mm)
۱	U-V100-A0.01	بهسازی نشده	۱۰۰	۰/۰۱
۲	U-V100-A0.02	بهسازی نشده	۱۰۰	۰/۰۲
۳	U-V100-A0.05	بهسازی نشده	۱۰۰	۰/۰۵
۴	U-V100-A0.1	بهسازی نشده	۱۰۰	۰/۱
۵	U-V100-A0.5	بهسازی نشده	۱۰۰	۰/۵
۶	U-V100-A1	بهسازی نشده	۱۰۰	۱
۷	U-V100-A2	بهسازی نشده	۱۰۰	۲
۸	U-V100-A3	بهسازی نشده	۱۰۰	۳
۹	U-V100-A4	بهسازی نشده	۱۰۰	۴
۱۰	U-V200-A0.01	بهسازی نشده	۲۰۰	۰/۰۱
۱۱	U-V200-A0.02	بهسازی نشده	۲۰۰	۰/۰۲
۱۲	U-V200-A0.05	بهسازی نشده	۲۰۰	۰/۰۵
۱۳	U-V200-A0.1	بهسازی نشده	۲۰۰	۰/۱
۱۴	U-V200-A0.5	بهسازی نشده	۲۰۰	۰/۵
۱۵	U-V200-A1	بهسازی نشده	۲۰۰	۱
۱۶	U-V200-A2	بهسازی نشده	۲۰۰	۲
۱۷	U-V200-A3	بهسازی نشده	۲۰۰	۳
۱۸	U-V200-A4	بهسازی نشده	۲۰۰	۴
۱۹	U-V300-A0.01	بهسازی نشده	۳۰۰	۰/۰۱
۲۰	U-V300-A0.02	بهسازی نشده	۳۰۰	۰/۰۲
۲۱	U-V300-A0.05	بهسازی نشده	۳۰۰	۰/۰۵
۲۲	U-V300-A0.1	بهسازی نشده	۳۰۰	۰/۱
۲۳	U-V300-A0.5	بهسازی نشده	۳۰۰	۰/۵

¹ Untreated

² Treated

³ Vertical Stress

⁴ Amplitude

۲۴	U-V300-A1	بهسازی نشده	۳۰۰	۱
۲۵	U-V300-A2	بهسازی نشده	۳۰۰	۲
۲۶	U-V300-A3	بهسازی نشده	۳۰۰	۳
۲۷	U-V300-A4	بهسازی نشده	۳۰۰	۴
۲۸	T-V100-A0.01	بهسازی شده	۱۰۰	۰/۰۱
۲۹	T-V100-A0.02	بهسازی شده	۱۰۰	۰/۰۲
۳۰	T-V100-A0.05	بهسازی شده	۱۰۰	۰/۰۵
۳۱	T-V100-A0.1	بهسازی شده	۱۰۰	۰/۱
۳۲	T-V100-A0.5	بهسازی شده	۱۰۰	۰/۵
۳۳	T-V100-A1	بهسازی شده	۱۰۰	۱
۳۴	T-V100-A2	بهسازی شده	۱۰۰	۲
۳۵	T-V100-A3	بهسازی شده	۱۰۰	۳
۳۶	T-V100-A4	بهسازی شده	۱۰۰	۴
۳۷	T-V200-A0.01	بهسازی شده	۲۰۰	۰/۰۱
۳۸	T-V200-A0.02	بهسازی شده	۲۰۰	۰/۰۲
۳۹	T-V200-A0.05	بهسازی شده	۲۰۰	۰/۰۵
۴۰	T-V200-A0.1	بهسازی شده	۲۰۰	۰/۱
۴۱	T-V200-A0.5	بهسازی شده	۲۰۰	۰/۵
۴۲	T-V200-A1	بهسازی شده	۲۰۰	۱
۴۳	T-V200-A2	بهسازی شده	۲۰۰	۲
۴۴	T-V200-A3	بهسازی شده	۲۰۰	۳
۴۵	T-V200-A4	بهسازی شده	۲۰۰	۴
۴۶	T-V300-A0.01	بهسازی شده	۳۰۰	۰/۰۱
۴۷	T-V300-A0.02	بهسازی شده	۳۰۰	۰/۰۲
۴۸	T-V300-A0.05	بهسازی شده	۳۰۰	۰/۰۵
۴۹	T-V300-A0.1	بهسازی شده	۳۰۰	۰/۱
۵۰	T-V300-A0.5	بهسازی شده	۳۰۰	۰/۵
۵۱	T-V300-A1	بهسازی شده	۳۰۰	۱
۵۲	T-V300-A2	بهسازی شده	۳۰۰	۲
۵۳	T-V300-A3	بهسازی شده	۳۰۰	۳
۵۴	T-V300-A4	بهسازی شده	۳۰۰	۴

همچنین برنامه و مشخصات آزمایش‌های مربوط به تعیین سرعت موج برشی و مدول برشی ماکزیمم G_{max} نیز به شرح جدول (۴-۴) می‌باشد.

جدول (۳-۵) برنامه آزمایشات سرعت موج برشی

ردیف	کد آزمایش	وضعیت نمونه	سربرار	فرکانس موج (kHz)
۱	BE-U-V100	بهسازی نشده	۱۰۰	۱
۲	BE-U-V200	بهسازی نشده	۲۰۰	۱
۳	BE-U-V300	بهسازی نشده	۳۰۰	۱
۴	BE-T-V100	بهسازی شده	۱۰۰	۱
۵	BE-T-V200	بهسازی شده	۲۰۰	۱
۶	BE-T-V300	بهسازی شده	۳۰۰	۱

فصل ۴:

نتایج و تفسیر آنها

۴-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج آزمایش‌های برش ساده سیکلیک، آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج برشی، تحلیل نتایج و مقایسه آنها در وضعیت‌های بهسازی شده و بهسازی نشده نمونه‌های خاک، نتایج آزمایش XRD و SEM که در فصل سوم روش انجام آنها شرح داده شده‌اند، ارائه خواهد شد و در هر بخش نتایج آزمایش‌ها مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است.

لازم به ذکر است کلیه آزمایش‌ها در تراکم نسبی ۴۰٪ که معرف خاک دانه‌ای سست می‌باشد، صورت گرفته است.

۴-۲- آزمایش‌های مرجع

پیش از انجام عملیات بهسازی بیولوژیکی بر روی نمونه‌های خاک ما سه‌ای فیروزکوه ابتدا تمامی آزمایشات مورد نظر بر روی خاک بهسازی نشده صورت گرفته و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مرجع برای خاک فیروزکوه با تراکم نسبی ۴۰٪ که معرف خاک دانه‌ای سست می‌باشد انجام گرفته است.

۴-۲-۱- مدول برشی و میرایی

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سختی خاک بوسیله دامنه کرنش سیکلی، تخلخل، تنش اصلی موثر، ضریب تحکیم یافتگی و تعداد سیکل‌های بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مدول برشی سکانتی یک المان خاک است که با افزایش دامنه کرنش برشی کاهش می‌یابد. داس در کتاب اصول دینامیک خاک خود نحوه محاسبه مدول برشی با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلیک و منحنی هیستریزیس را به صورت زیر بیان کرده است [۴۶].

فرمول ۴-۱:

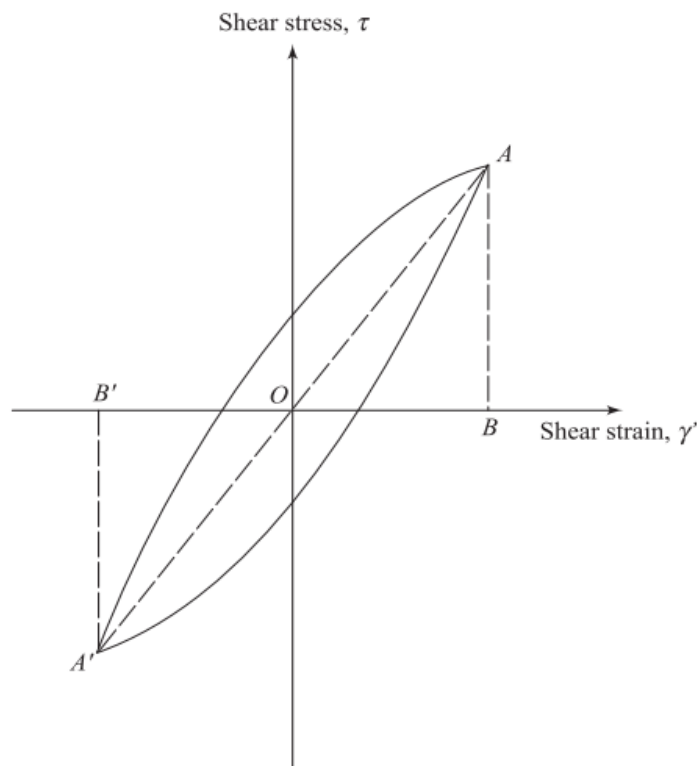
$$G = \frac{\text{Amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{Amplitude of cyclic shear strain, } \gamma'}$$

شواهد تجربی نشان می‌دهد که در کرنش‌های بسیار کوچک مقداری استهلاک انرژی در نمونه خاک صورت می‌گیرد، بنابراین نسبت میرایی همواره بیشتر از صفر خواهد بود. در کرنش‌های بزرگ‌تر پهنای منحنی‌های هیستریزیس که در شرایط بارگذاری سیکلی بر خاک ایجاد می‌شود، با افزایش دامنه کرنش سیکلی افزایش می‌یابد که معرف افزایش ضریب میرایی با افزایش دامنه کرنش می‌باشد. نحوه محاسبه نسبت میرایی نیز در کتاب اصول دینامیک خاک داس به صورت فرمول (۴-۲) بیان شده است [۴۶].

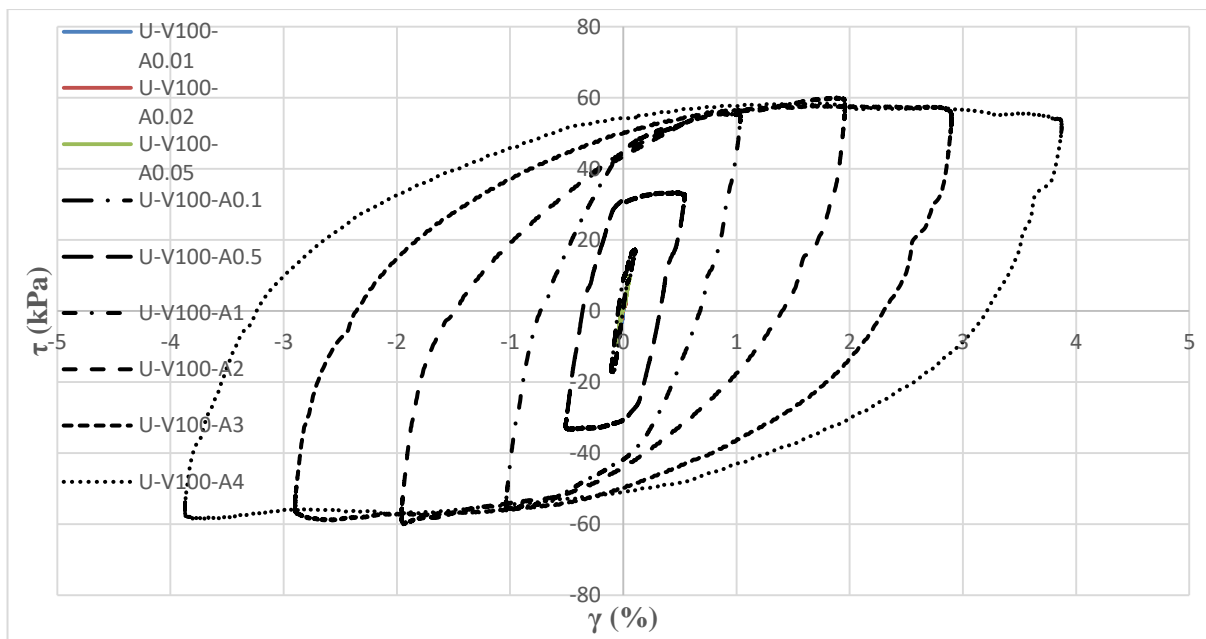
فرمول ۴-۲:

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{area of the hysteresis loop}}{\text{area of the triangle } OAB \text{ and } OA'B'}$$

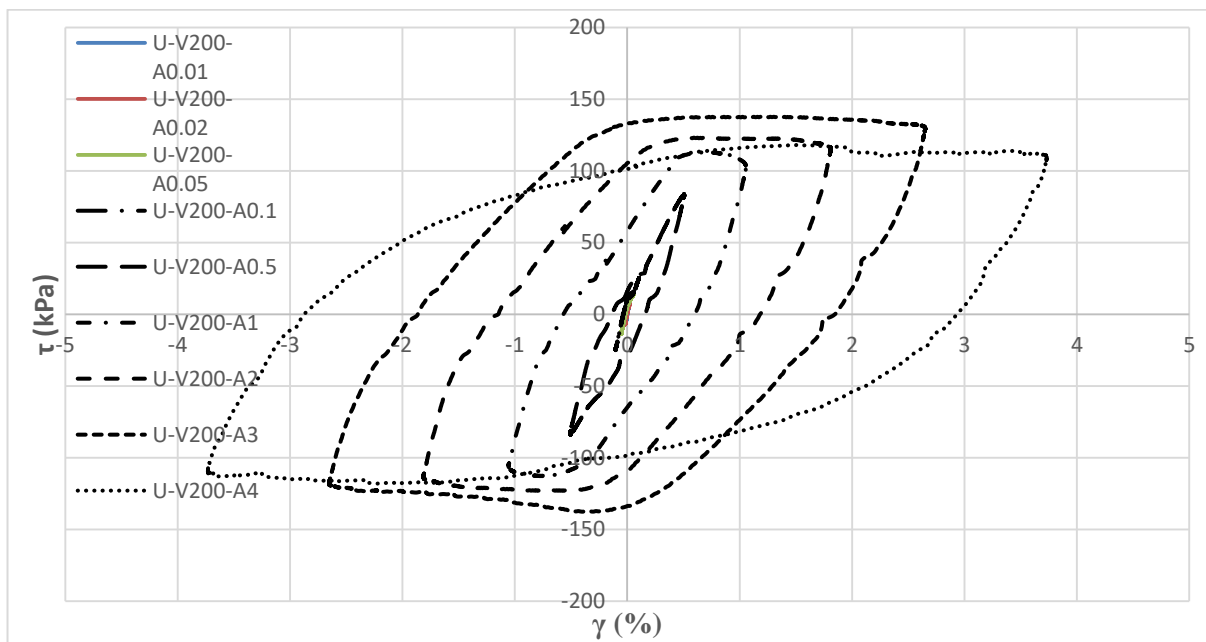
که مثلث‌های OAB و $OA'B'$ به این صورت مشخص می‌شوند:



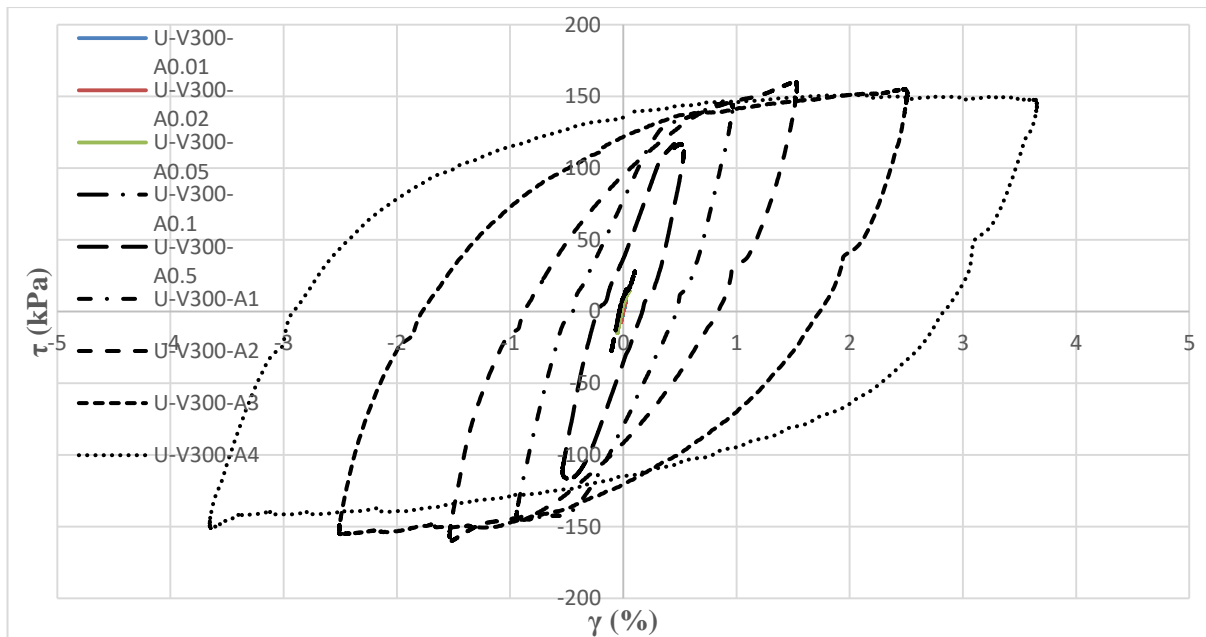
آزمایش برش ساده سیکلیک داده‌هایی از قبیل تنش برشی و کرنش برشی را در اختیار ما قرار می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها می‌توان حلقه‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایش شده در کرنش‌ها و سربارهای مختلف را رسم نمود. شکل‌های (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) گراف مربوط به حلقه‌های هیستریزیس در کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد را سه سربار ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک با دامنه ۱۰۰ kPa



شکل (۲-۴) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک با دامنه ۲۰۰ kPa



شکل (۳-۴) حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های سیکلیک با دامنه ۳۰۰ kPa

همانطور که در گراف‌ها مشاهده می‌شود مدول برشی سکانتی و نسبت میرایی به میزان کرنش وابسته است. با افزایش میزان کرنش، حلقه‌های هیستریزس، با کاهش شیب، کاهش مدول برشی سکانتی را نشان می‌دهند. ضمن این که در حین افزایش مقدار کرنش، پهن‌تر شدن این حلقه‌ها نشان دهنده افزایش نسبت میرایی است. اثر سربار نیز به راحتی با مقایسه ماکزیمم و مینیمم تنش برشی در حلقه‌های با دامنه یکسان قابل مقایسه است. برای مثال با در نظر گرفتن کرنش ۴ میلی‌متر به عنوان بزرگترین حلقه، میزان تنش برشی در سربار ۱۰۰ kPa مقدار ۵۸ kPa، در سربار ۲۰۰ kPa مقدار ۱۳۰ kPa و در سربار ۳۰۰ kPa مقدار ۱۵۰ kPa مشاهده شده است که به خوبی نشان دهنده این موضوع است که با افزایش سربار مقدار تنش برشی افزایش داشته است. با انجام محاسبات و تحلیل نتایج، مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی بدست آمده که در جداول (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) آورده شده است.

جدول (۱-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۱۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی $G(MPa)$	میرایی %
۱	U-V100-A0.01	۰/۰۱۱۵	۲۶/۰۸۶	۱/۵۱
۲	U-V100-A0.02	۰/۰۲	۱۳/۲۴۹	۶/۹۷
۳	U-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۱۸/۲۰۷	۲/۷۲

۴	U-V100-A0.1	۰/۱۰۵	۱۶/۴۲۸	۱/۷۵۷
۵	U-V100-A0.5	۰/۵۲	۶/۳۵۹	۳۶/۶۴
۶	U-V100-A1	۱/۰۳۴	۵/۳۹۳	۳۹/۰۳۶
۷	U-V100-A2	۱/۹۶	۳/۰۶۶	۴۰/۱۹
۸	U-V100-A3	۲/۸۹	۲/۰۳۲	۴۵/۷۵
۹	U-V100-A4	۳/۸۷۲	۱/۵۱۲	۴۸/۴۶

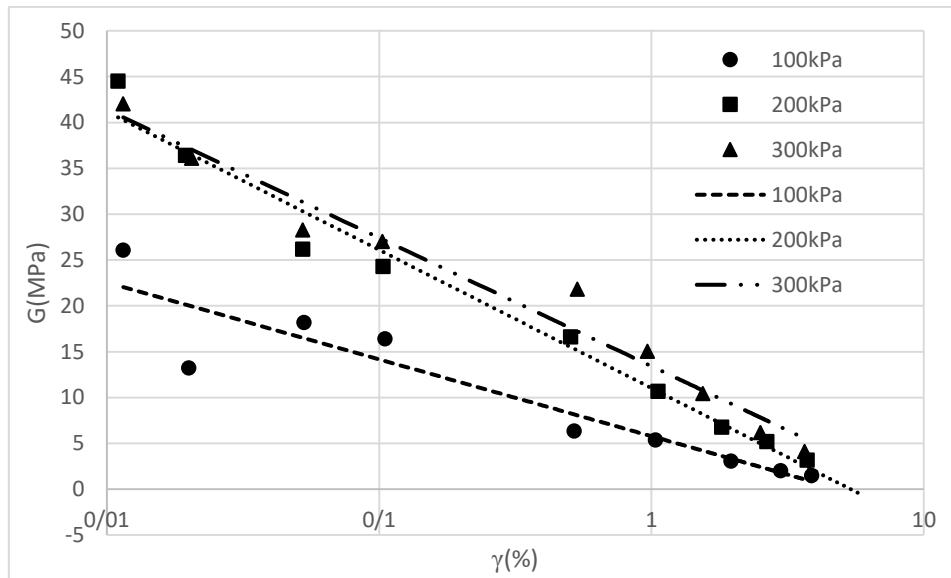
جدول (۲-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۲۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	میرایی %
۱	U-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۴/۵۴۵	۰/۳۴
۲	U-V200-A0.02	۰/۰۱۹۵	۳۶/۴۱۰	۰/۵۱
۳	U-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۶/۱۹۰	۱/۸۳
۴	U-V200-A0.1	۰/۱۰۳۵	۲۴/۲۹۹	۱/۰۰
۵	U-V200-A0.5	۰/۵۰۵۵	۱۶/۶۲۷	۱۲/۰۱
۶	U-V200-A1	۱/۰۵۶	۱۰/۶۹۱	۲۷/۸۵
۷	U-V200-A2	۱/۸۱۲	۶/۷۹۳	۳۶/۶۹
۸	U-V200-A3	۲/۶۵۱	۵/۱۹۵	۳۹/۷۱
۹	U-V200-A4	۳/۷۳۱	۳/۱۶۴	۴۱/۱۴

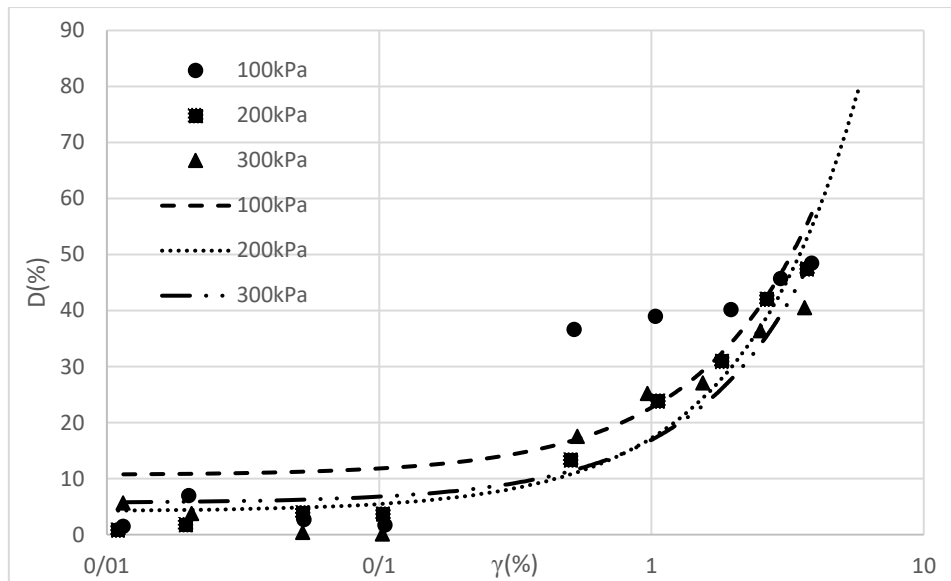
جدول (۳-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی با سربار ۳۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	میرایی %
۱	U-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۳۳/۹۱۳	۵/۷
۲	U-V300-A0.02	۰/۰۲۰۵	۳۶/۰۹۷	۳/۷۷
۳	U-V300-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۸/۲۸۵	۰/۴۴
۴	U-V300-A0.1	۰/۱۰۳	۲۷/۰۳۸	۰/۱۶
۵	U-V300-A0.5	۰/۵۳۵	۲۱/۸۳۹	۱۷/۵۶
۶	U-V300-A1	۰/۹۶۸	۱۵/۰۳۶	۲۵/۱۹
۷	U-V300-A2	۱/۵۴۳	۱۰/۴۵۳	۲۷/۰۷
۸	U-V300-A3	۲/۵۱	۶/۱۸۵	۳۶/۴
۹	U-V300-A4	۳/۶۵۳	۴/۱۳۷	۴۰/۵۶

همانطور که از نتایج محاسبات مدول برشی و نسبت میرایی دریافت می‌شود، در سربار ثابت با افزایش کرنش برشی مقدار مدول برشی کاهش یافته است به صورتی که در سربار ۱۰۰ kPa با افزایش مقدار کرنش از ۰/۰۱ به ۴ میلی‌متر، مقدار مدول برشی از ۲۶/۰۸۶ MPa به ۱/۵۱۲ MPa کاهش یافته است که این روند در سربارهای ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa قابل ملاحظه است. همچنین با افزایش کرنش برشی مقدار نسبت میرایی افزایش داشته است که این موضوع در افزایش سطح حلقه‌های هیستریزس نیز پیشتر قابل مشاهده بود. به عنوان مثال در سربار ۲۰۰ kPa با افزایش مقدار کرنش از ۰/۰۱ به ۴ میلی‌متر مقدار نسبت میرایی از ۰/۳۴ به ۰/۴۱/۱۴ افزایش پیدا کرده است. همچنین با تحلیل داده‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار سربار از ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa مقدار مدول برشی در کرنش ثابت افزایش یافته و نسبت میرایی نیز کاهش داشته است. نمودار شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) مقایسه نتایج بدست آمده را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴) اثر سربار بر مقدار مدول برشی در کرنش‌های مختلف



شکل (۴-۵) اثر سربار بر مقدار نسبت میرایی در کرنش های مختلف

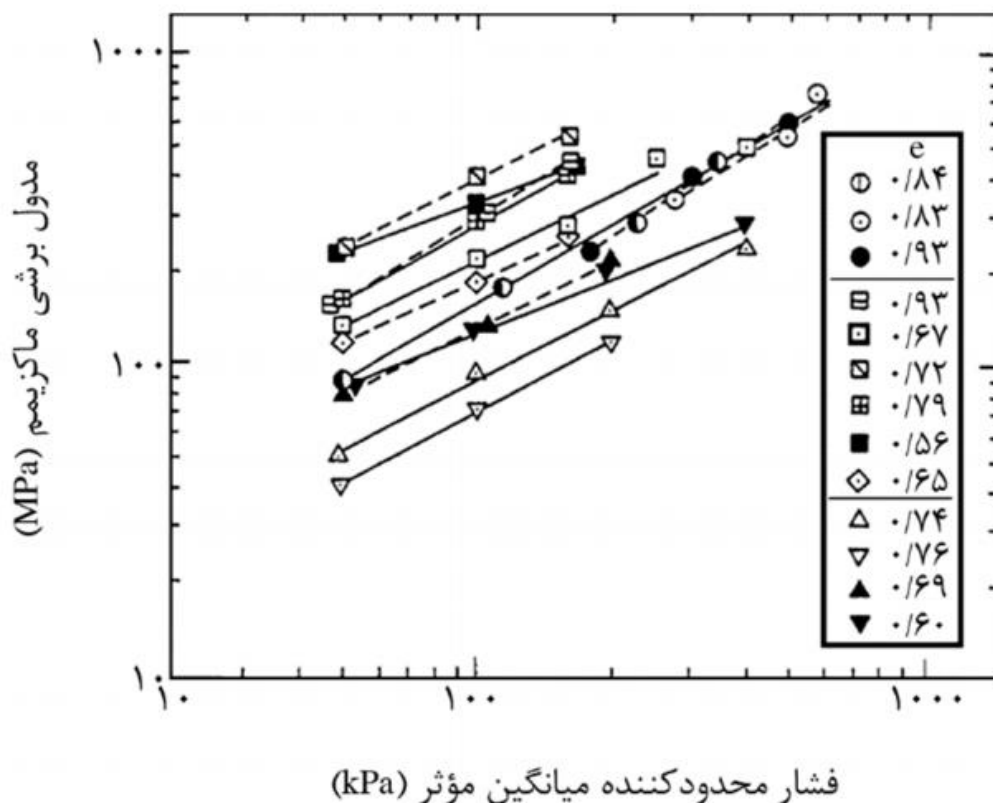
همانطور که در شکل‌های (۴-۴) و (۴-۵) ملاحظه می‌شود با افزایش سربار در کرنش‌های ثابت مقدار مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش یافته‌است. اما افزایش مدول برشی از سربار ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa نسبت به تغییر سربار از ۲۰۰ kPa به ۳۰۰ kPa بیشتر بوده است. علت این امر اینگونه تعبیر می‌شود که با افزایش سربار از ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa اثر بیشتری بر تراکم کردن و ایجاد درگیری میان ذرات خاک داشته است. همچنین ملاحظه می‌شود اثر سربار در کرنش‌های کم بر روی میرایی ناچیز است و با افزایش کرنش تاثیر بیشتر شده و مقدار افت میرایی افزایش می‌یابد که این امر از یک سو به دلیل افزایش تراکم خاک و از سوی دیگر به دلیل درگیری بیشتر ذرات خاک با یکدیگر می‌باشد که باعث کاهش استهلاک انرژی می‌گردد.

۴-۲-۲- سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر

مدول برشی خاک در دامنه‌های کرنش برشی کوچک (حدود 10^{-4} درصد) را مدول برشی ماکزیمم G_{max} می‌نامند. این کمیت از پارامترهای اساسی در تحلیل ژئوتکنیک لرزه‌ای به‌شمار می‌آید. مدول برشی ماکزیمم، هم به روش صحرایی و هم با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشد.

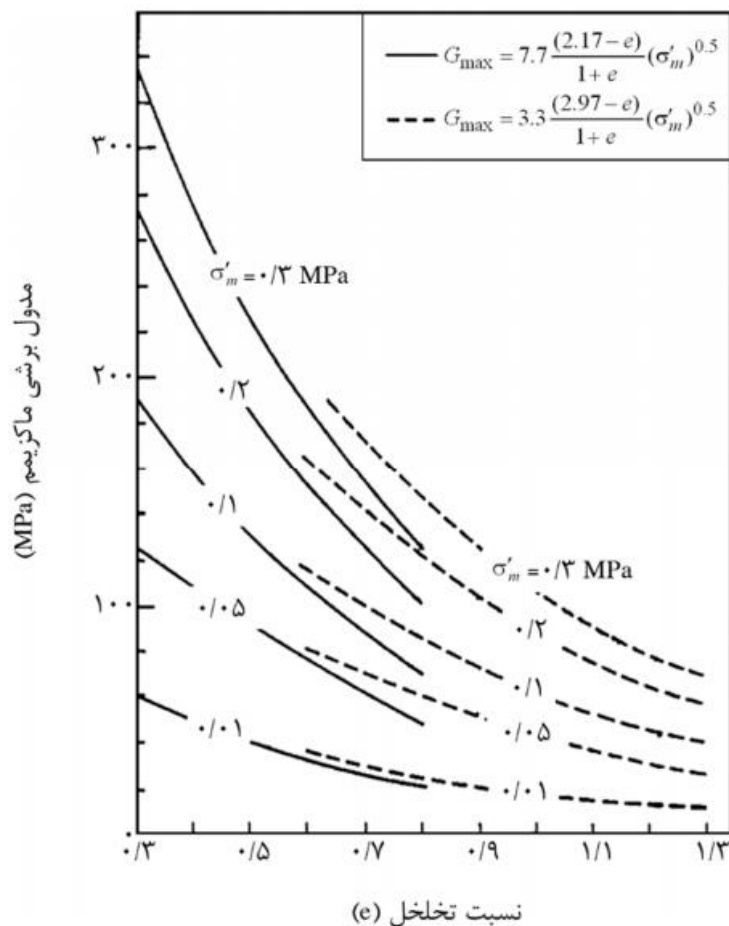
بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، فشار محدود کننده میانگین موثر و نسبت تخلخل از عوامل موثر بر مدول برشی ماکزیمم به‌شمار می‌آیند. بر اساس شکل (۴-۶)، افزایش فشار محدود کننده باعث افزایش مدول

برشی ماکزیمم می‌باشد. این امر به دلیل افزایش تراکم و افزایش درگیری ذرات خاک می‌باشد [47].



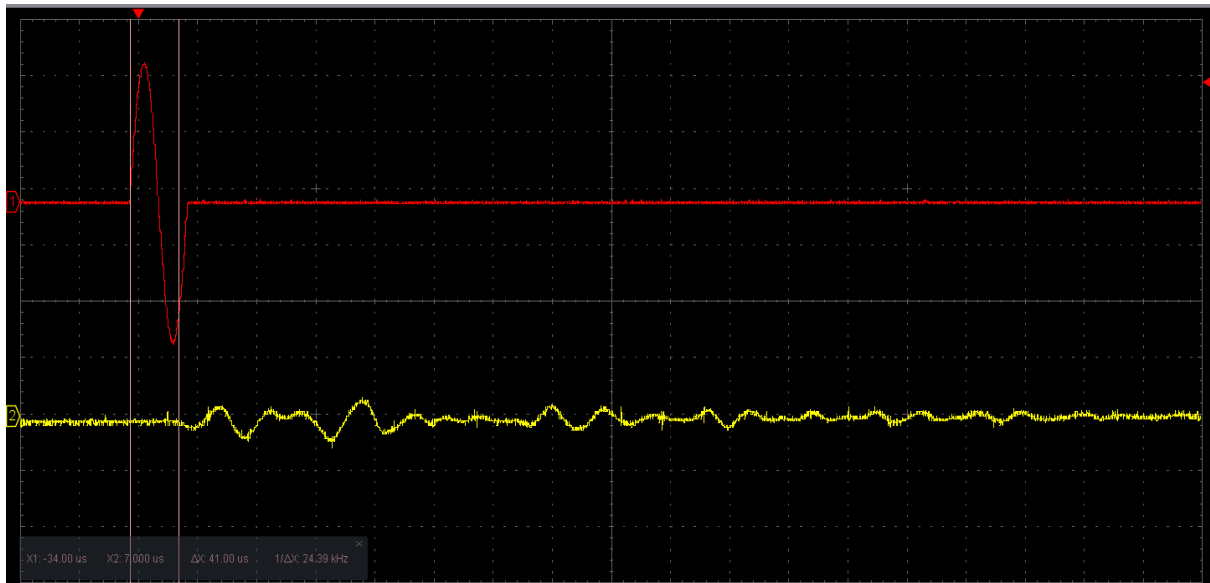
شکل (۴-۶) اثر فشار محدود کننده بر مدول برشی ماکزیمم [۴۷]

همچنین با توجه به شکل (۴-۷) که اثر نسبت تخلخل بر مدول برشی ماکزیمم را نشان می‌دهد این موضوع دریافت می‌شود که با افزایش نسبت تخلخل مقدار مدول برشی ماکزیمم (G_{max})، به دلیل ایجاد فضای خالی میان ذرات خاک کاهش پیدا می‌کند.

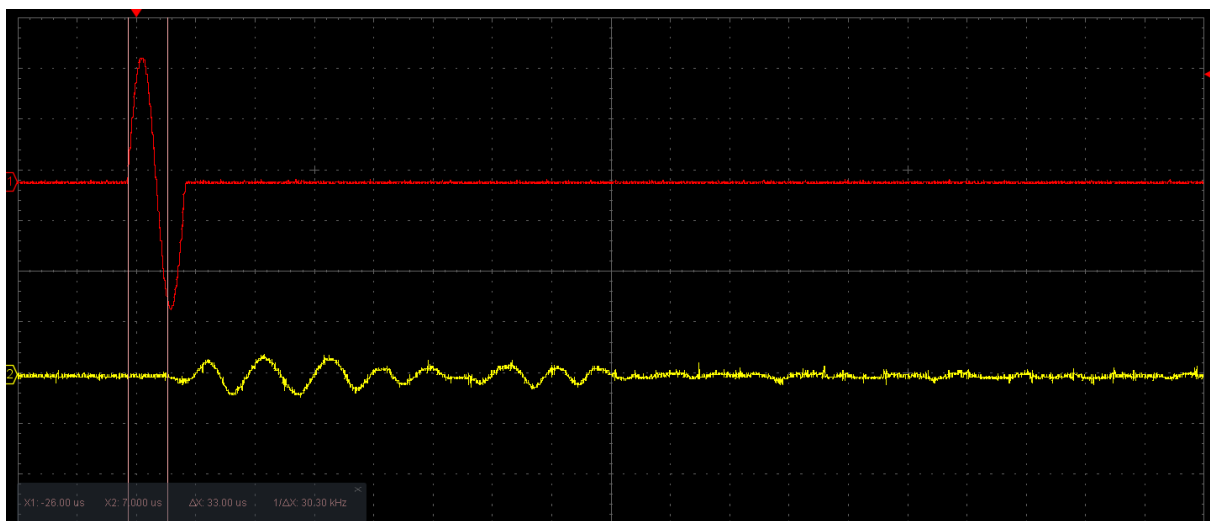


شکل (۴-۷) اثر نسبت تخلخل بر مدول برشی ماکزیمم [۴۷]

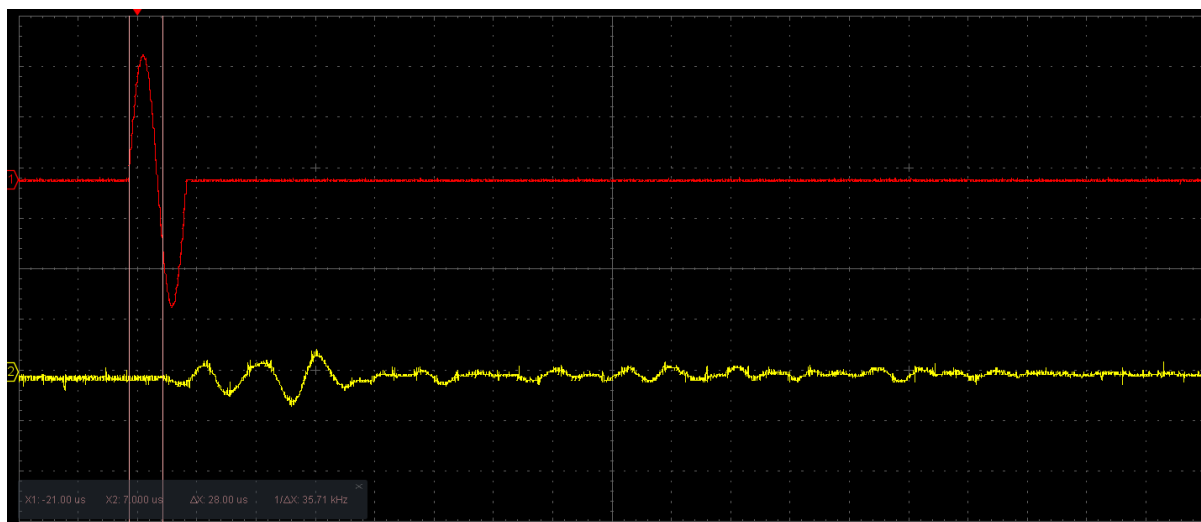
در این پژوهش، سرعت موج برشی نمونه‌های خاک در سه سر بار ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa به دلیل مقایسه نتایج آزمایش برش ساده سیکلیک و محاسبه نیروی برشی نرمال شده به وسیله سنسور بندر المنت نصب شده در دستگاه برش ساده سیکلیک اندازه‌گیری شد. گراف تک موج‌های سینوسی که با فرکانس kHz ۱ از پیزو بالا به سمت پیزو پایین ارسال شده به صورت شکل‌های (۴-۸)، (۴-۹) و (۴-۱۰) می‌باشد. در این گراف‌ها، موج ارسالی با رنگ قرمز و موج دریافتی با رنگ زرد مشخص شده است.



شکل (۸-۴) گراف امواج در نمونه BE-U-V100



شکل (۹-۴) گراف امواج در نمونه BE-U-V200



شکل (۴-۱۰) گراف امواج در نمونه BE-U-V300

با بررسی گراف‌های امواج، اطلاعاتی که برای محاسبه سرت موج برشی مورد نیاز هست برداشت می‌شود که به شرح جدول (۴-۴) می‌باشد.

جدول (۴-۴) اطلاعات برداشت شده از گراف موج‌های برشی

ردیف	کد آزمایش	فاصله پیژوها (mm)	زمان (μs)
۱	BE-U-V100	۱۶/۶۸۴	۳۷/۸
۲	BE-U-V200	۱۶/۴۲۵	۳۰/۴
۳	BE-U-V300	۱۶/۱۵۵	۲۸/۴

با استفاده از اختلاف زمان بین ارسال موج از پیژو بالا و دریافت موج از پیژو پایین و فاصله بین آنها مطابق جدول (۴-۴) و معادله زیر میتوان به ترتیب سرعت موج برشی در خاک و مدول برشی ماکزیمم را محاسبه نمود.

فرمول ۴-۳: [۴۵]

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

نتایج بدست آمده از محاسبات مربوط به سرعت موج برشی و مدول برشی ماکزیمم به شرح جدول (۴-۴) می‌باشد.

جدول (۴-۵) سرعت موج برشی و مدول برشی ماکزیمم نمونه خاک ماسه‌ای

ردیف	کد آزمایش	سرعت موج برشی (m/s)	G _{max} (MPa)
۱	BE-U-V100	۴۳۴/۵۲	۲۹/۲۶
۲	BE-U-V200	۵۳۵/۳۶	۴۵/۲۴
۳	BE-U-V300	۵۶۶/۵۵	۴۹/۷۵

همانطور که در جدول (۴-۵) ملاحظه می‌شود افزایش سربار باعث افزایش سرعت موج برشی و افزایش مدول برشی ماکزیمم شده است که این امر به دلیل افزایش تراکم و چگالی نمونه‌های خاک در اثر افزایش سربار می‌باشد.

۴-۲-۳- مدول برشی نرمال شده

مدول برشی نرمال شده برابر است با نسبت مدول برشی سکانتی به مدول برشی ماکزیمم که در پژوهش‌ها از آن به عنوان پارامتری جهت مقایسه استفاده می‌شود. در این پژوهش با هر سربار مقدار مدول برشی ماکزیمم محاسبه شد و با استفاده از مدول برشی سکانتی در جداول (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳)، مقدار مدول برشی نرمال شده طبق جداول (۴-۶)، (۴-۷) و (۴-۸) بدست آورده شده است.

جدول (۴-۶) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۱۰۰ kPa

ردیف	G _{max} =29.26 MPa			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	G/G _{max}
۱	U-V100-A0.01	۰/۰۱۱۵	۲۶/۰۸۶	۰/۸۹
۲	U-V100-A0.02	۰/۰۲	۱۳/۲۴۹	۰/۴۵
۳	U-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۱۸/۲۰۷	۰/۶۲
۴	U-V100-A0.1	۰/۱۰۵	۱۶/۴۲۸	۰/۵۶
۵	U-V100-A0.5	۰/۵۲	۶/۳۵۹	۰/۲۱
۶	U-V100-A1	۱/۰۳۴	۵/۳۹۳	۰/۱۸
۷	U-V100-A2	۱/۹۶	۳/۰۶۶	۰/۱۰۴
۸	U-V100-A3	۲/۸۹	۲/۰۳۲	۰/۰۷
۹	U-V100-A4	۳/۸۷۲	۱/۵۱۲	۰/۰۵

جدول (۷-۴) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۲۰۰ kPa

ردیف	$G_{max}=45.24 \text{ MPa}$			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی $G(\text{MPa})$	G/G_{max}
۱	U-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۴/۵۴۵	۰/۹۸
۲	U-V200-A0.02	۰/۰۱۹۵	۳۶/۴۱۰	۰/۸
۳	U-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۶/۱۹۰	۰/۵۸
۴	U-V200-A0.1	۰/۱۰۳۵	۲۴/۲۹۹	۰/۵۴
۵	U-V200-A0.5	۰/۵۰۵۵	۱۶/۶۲۷	۰/۳۷
۶	U-V200-A1	۱/۰۵۶	۱۰/۶۹۱	۰/۲۴
۷	U-V200-A2	۱/۸۱۲	۶/۷۹۳	۰/۱۵
۸	U-V200-A3	۲/۶۵۱	۵/۱۹۵	۰/۱۱
۹	U-V200-A4	۳/۷۳۱	۳/۱۶۴	۰/۰۷

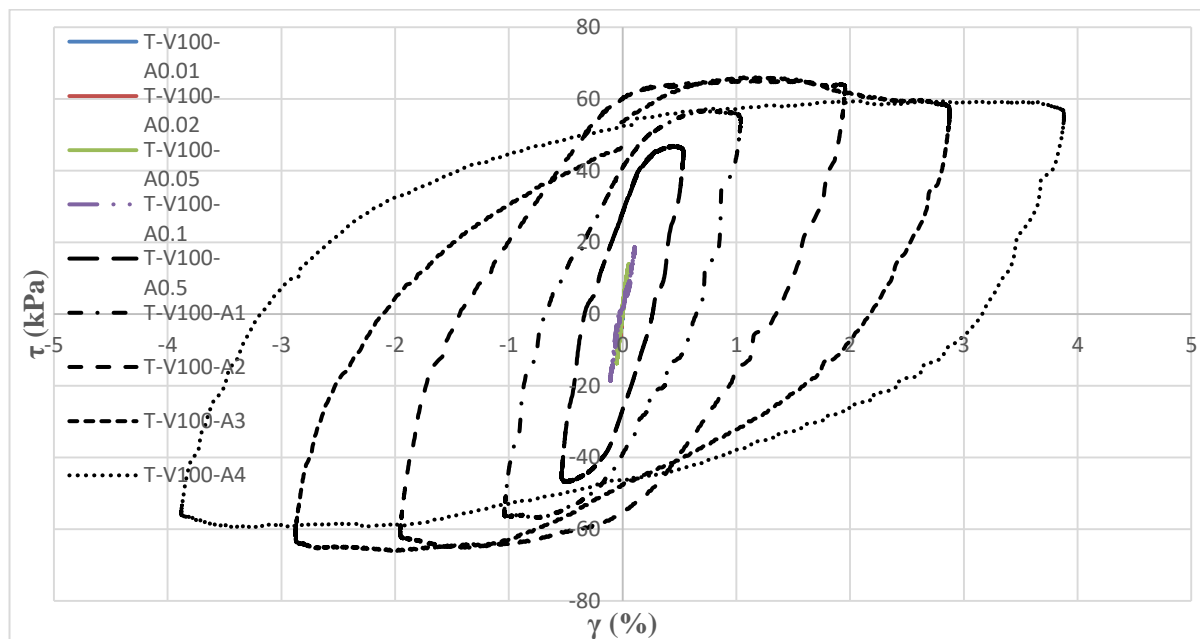
جدول (۸-۴) مدول برشی نرمال شده برای سربار ۳۰۰ kPa

ردیف	$G_{max}=49.75 \text{ MPa}$			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی $G(\text{MPa})$	G/G_{max}
۱	U-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۳۳/۹۱۳	۰/۸۵
۲	U-V300-A0.02	۰/۰۲۰۵	۳۶/۰۹۷	۰/۷۳
۳	U-V300-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۸/۲۸۵	۰/۵۷
۴	U-V300-A0.1	۰/۱۰۳	۲۷/۰۳۸	۰/۵۴
۵	U-V300-A0.5	۰/۵۳۵	۲۱/۸۳۹	۰/۴۴
۶	U-V300-A1	۰/۹۶۸	۱۵/۰۳۶	۰/۳
۷	U-V300-A2	۱/۵۴۳	۱۰/۴۵۳	۰/۲۱
۸	U-V300-A3	۲/۵۱	۶/۱۸۵	۰/۱۲
۹	U-V300-A4	۳/۶۵۳	۴/۱۳۷	۰/۰۸

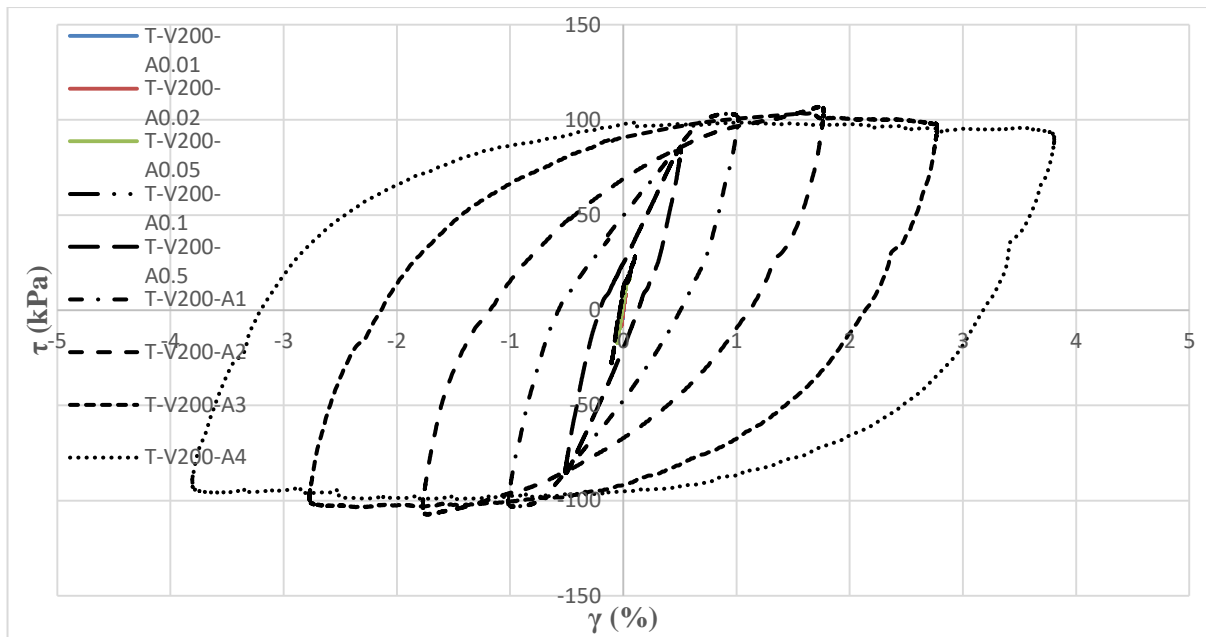
۳-۴- بهسازی بیولوژیکی خاک

پس از کشت باکتری و تهیه محلول سیمان‌تاسیون، با روشی که در فصل سوم شرح داده شد تزریق به خاک

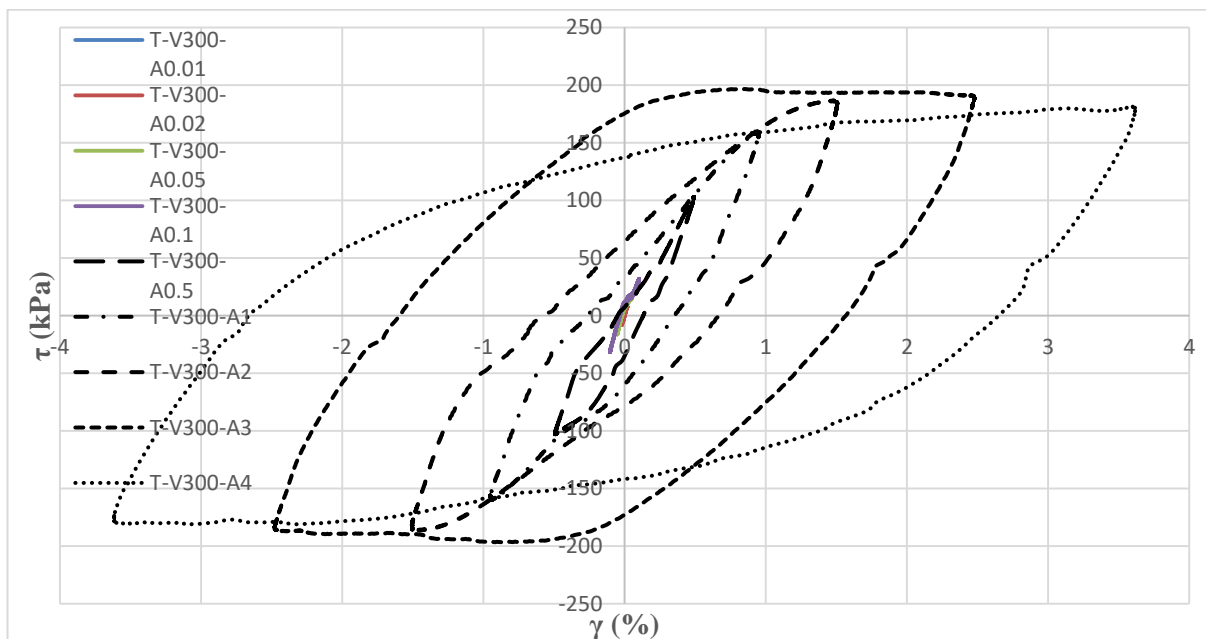
انجام گرفته است. بعد از گذشت دوره عمل‌آوری، نمونه خاک از داخل قالب خارج شده و مورد تست و آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها و بحث و تحلیل آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش برش ساده سیکلیک بر روی نمونه‌های بهسازی شده به روش بیولوژیکی انجام شده و با استفاده از داده‌های خروجی دستگاه حلقه‌های هیستریزیس بر اساس سه سربار ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa در کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد به صورت شکل‌های (۴-۱۱)، (۴-۱۲) و (۴-۱۳) رسم شده است.



شکل (۴-۱۱) حلقه‌های هیستریزیس آزمایش‌های سیکلیک نمونه‌های بهسازی شده با دامنه ۱۰۰ kPa



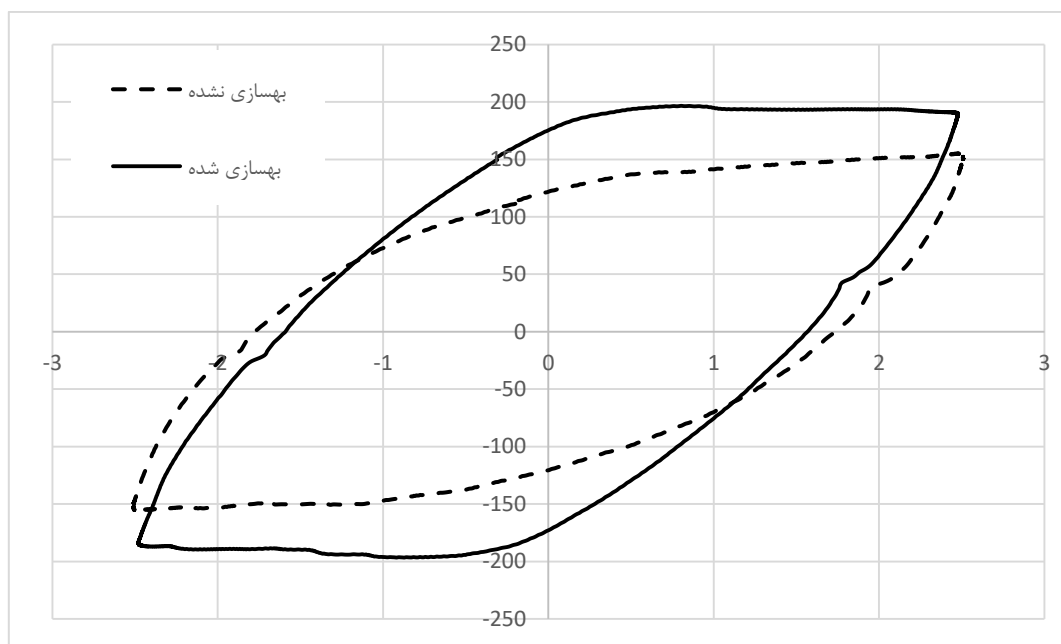
شکل (۴-۱۲) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک نمونه های بهسازی شده با دامنه ۲۰۰ kPa



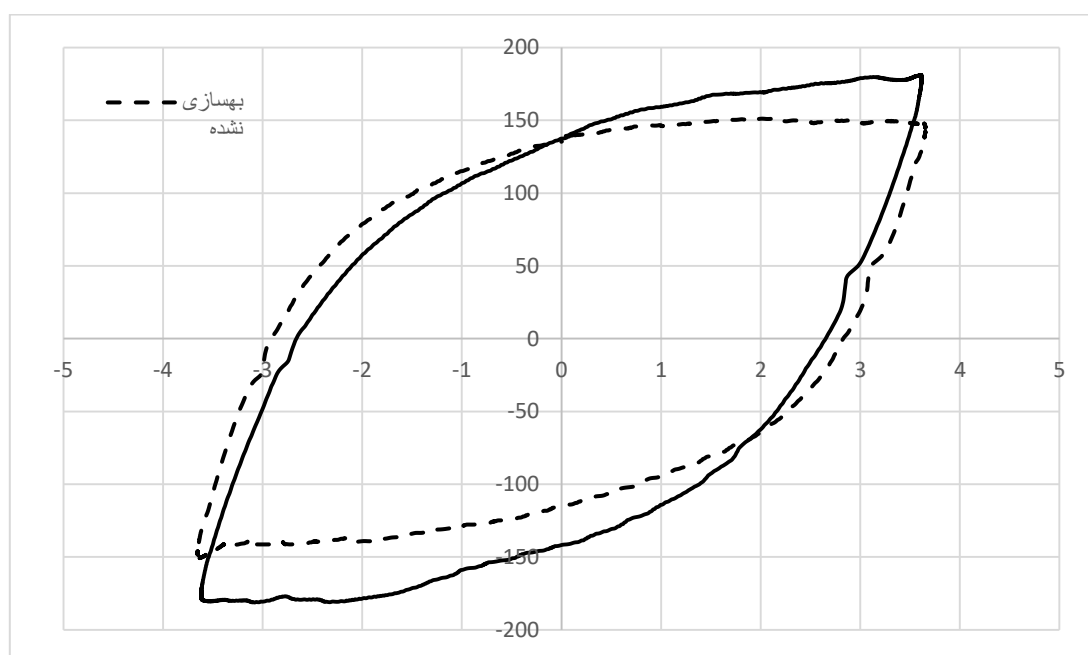
شکل (۴-۱۳) حلقه های هیستریزس آزمایش های سیکلیک نمونه های بهسازی شده با دامنه ۳۰۰ kPa

همانطور که در گراف های رسم شده مشخص است، افزایش کرنش همانند حالت بهسازی نشده در مقدار مدول برشی سکانتی و نسبت میرایی تاثیر گذاشته است به صورتی که با افزایش کرنش شیب حلقه های هیستریزس کاهش یافته و مدول برشی نیز کاهش یافته است. همچنین مساحت حلقه ها افزایش داشته که

به معنای افزایش نسبت میرایی می‌باشد. منحنی‌های تنش برشی نسبت به کرنش برشی در دامنه ثابت در دو حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) رسم شده است.



شکل (۴-۱۴) مقایسه حلقه‌های هیستریزس نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده در کرنش ۳٪ و سربار ۳۰۰ kPa



شکل (۴-۱۵) مقایسه حلقه‌های هیستریزس نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده در کرنش ۴٪ و سربار ۳۰۰ kPa

همانطور که در گراف‌های شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) مشاهده می‌شود عملیات بهسازی بیولوژیکی بر

حلقه‌های هیستریزس تاثیر گذاشته و باعث افزایش شیب حلقه که معرف مدول برشی بوده، شده است. منتها در مورد سطح زیر نمودار تاثیر محسوسی قابل مشاهده نیست. لذا تاثیر بر نسبت میرایی بوسیله محاسبات مشخص شده است.

در ادامه بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات برش ساده سیکلیک مقدار مدول برشی سکانتی و نسبت میرایی نمونه‌های بهسازی شده، محاسبه شده است که درجداول (۹-۴)، (۱۰-۴) و (۱۱-۴) آورده شده است.

جدول (۹-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌های بهسازی شده با سربار ۱۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	میرایی %
۱	T-V100-A0.01	۰/۰۱۲	۳۲/۹۱۶	۲/۰۶۱
۲	T-V100-A0.02	۰/۰۲۱	۳۰/۹۹	۰/۸۴۲
۳	T-V100-A0.05	۰/۰۵۴	۲۵/۷۹۴	۴/۲۷۲
۴	T-V100-A0.1	۰/۱۰۷	۱۷/۵۱۱	۳/۸۳۳
۵	T-V100-A0.5	۰/۵۳۵	۸/۷۶۶	۳۱/۱۹۴
۶	T-V100-A1	۱/۰۳۹	۵/۴۶۸	۳۴/۴۸۲
۷	T-V100-A2	۱/۹۵۷	۳/۳۲۹	۴۱/۹۷۱
۸	T-V100-A3	۲/۸۷۵	۲/۲۹۷	۳۷/۴۲۱
۹	T-V100-A4	۳/۸۷۱	۱/۵۳۲	۴۲/۲۱۱

جدول (۱۰-۴) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌های بهسازی شده با سربار ۲۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	میرایی %
۱	T-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۷/۷۲۷	۰/۸۱۱
۲	T-V200-A0.02	۰/۰۱۹	۴۳/۶۸۴	۱/۷۹۲
۳	T-V200-A0.05	۰/۰۵۳	۳۲/۳۸۰	۳/۹۳۱
۴	T-V200-A0.1	۰/۱۰۳	۲۷/۱۹۸	۳/۷۲۱
۵	T-V200-A0.5	۰/۵۰۹	۱۶/۸۹۵	۱۳/۳۲۳
۶	T-V200-A1	۱/۰۱۶	۱۰/۱۶۷	۲۳/۸۴۲
۷	T-V200-A2	۱/۷۷	۶/۰۵۹	۳۰/۹۴۱
۸	T-V200-A3	۲/۷۷۱	۳/۷۳۶	۴۲/۰۳۶
۹	T-V200-A4	۳/۸۰۷	۲/۶۰۵	۴۷/۴۲۴

جدول (۴-۱۱) نتایج محاسبات مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌های بهسازی شده با سربار ۳۰۰ kPa

ردیف	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	میرایی %
۱	T-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۴۵/۲۱۷	۱/۰۳۸
۲	T-V300-A0.02	۰/۰۱۹	۴۱/۸۴۲	۳/۰۵
۳	T-V300-A0.05	۰/۰۵۲	۳۱/۱۵۳	۲/۵
۴	T-V300-A0.1	۰/۱۰۲۵	۳۰/۷۳۱	۱/۳۵۵
۵	T-V300-A0.5	۰/۴۹۰۵	۲۰/۹۷۸	۹/۵۶
۶	T-V300-A1	۰/۹۵۳	۱۶/۸۲۰	۱۴/۰۱
۷	T-V300-A2	۱/۵۰۶۵	۱۲/۳۷۳	۱۹/۴۶
۸	T-V300-A3	۲/۴۷۸	۷/۹۳۳	۳۶/۵۸
۹	T-V300-A4	۳/۶۱۶۵	۵/۰۱۰	۳۷/۳۷

همانطور که جداول (۴-۹)، (۴-۱۰) و (۴-۱۱) نشان می‌دهند، در نمونه‌های بهسازی نیز اثر سربار بر مقدار مدول برشی و میرایی قابل ملاحظه است. با افزایش سربار در کرنش ثابت مقدار مدول برشی افزایش یافته است و به طور کلی با کاهش میرایی نمونه‌ها شده است. اما اثر سربار بر مقادیر مدول برشی در نمونه‌های بهسازی شده نسبت به نمونه‌های بهسازی نشده کمتر است. به گونه‌ای که با مقایسه درصد افزایش مدول برشی بین سربارهای ۱۰۰ kPa و ۲۰۰ kPa مشاهده شده است که به طور میانگین در نمونه‌های بهسازی نشده با افزایش سربار از ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa، مقادیر مدول برشی ۱۰۹٪ افزایش داشته‌اند و نمونه‌های بهسازی شده به طور میانگین با افزایش مقدار سربار، ۶۲٪ افزایش در مدول برشی داشته‌اند. علت این امر را می‌توان کاهش تراکم پذیری نمونه‌های بهسازی شده نسبت به نمونه‌های بهسازی نشده عنوان کرد.

۴-۳-۱- اثر بهسازی بیولوژیکی بر مدول برشی

برای بررسی اثر بهسازی بیولوژیکی بر مدول برشی و مقایسه آن با حالت بهسازی نشده، مقادیر مدول برشی در نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده در جدول (۴-۱۲)، (۴-۱۳) و (۴-۱۴) آورده شده است.

جدول (۴-۱۲) مقایسه نتایج مدول برشی با سربار ۱۰۰ kPa

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)
۱	U-V100-A0.01	۰/۰۱۱۵	۲۶/۰۸۶	T-V100-A0.01	۰/۰۱۲	۳۲/۹۱۶
۲	U-V100-A0.02	۰/۰۲۶	۱۳/۲۴۹	T-V100-A0.02	۰/۰۲۱	۳۰/۹۹۳
۳	U-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۱۸/۲۰۷	T-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۲۵/۷۹۴
۴	U-V100-A0.1	۰/۱۰۵	۱۶/۴۲۸	T-V100-A0.1	۰/۱۰۶	۱۷/۵۱۱
۵	U-V100-A0.5	۰/۵۲۱	۶/۳۵۹	T-V100-A0.5	۰/۵۳۵	۸/۷۶۶
۶	U-V100-A1	۱/۰۳۴	۵/۳۹۳	T-V100-A1	۱/۰۳۹۵	۵/۴۶۸
۷	U-V100-A2	۱/۹۶۲	۳/۰۶۶	T-V100-A2	۱/۹۵۶۵	۳/۳۲۹
۸	U-V100-A3	۲/۸۹	۲/۰۳۲	T-V100-A3	۲/۸۷۴۵	۲/۲۹۷
۹	U-V100-A4	۳/۸۷۲	۱/۵۱۲	T-V100-A4	۳/۸۷۰۵	۱/۵۳۲

جدول (۴-۱۳)

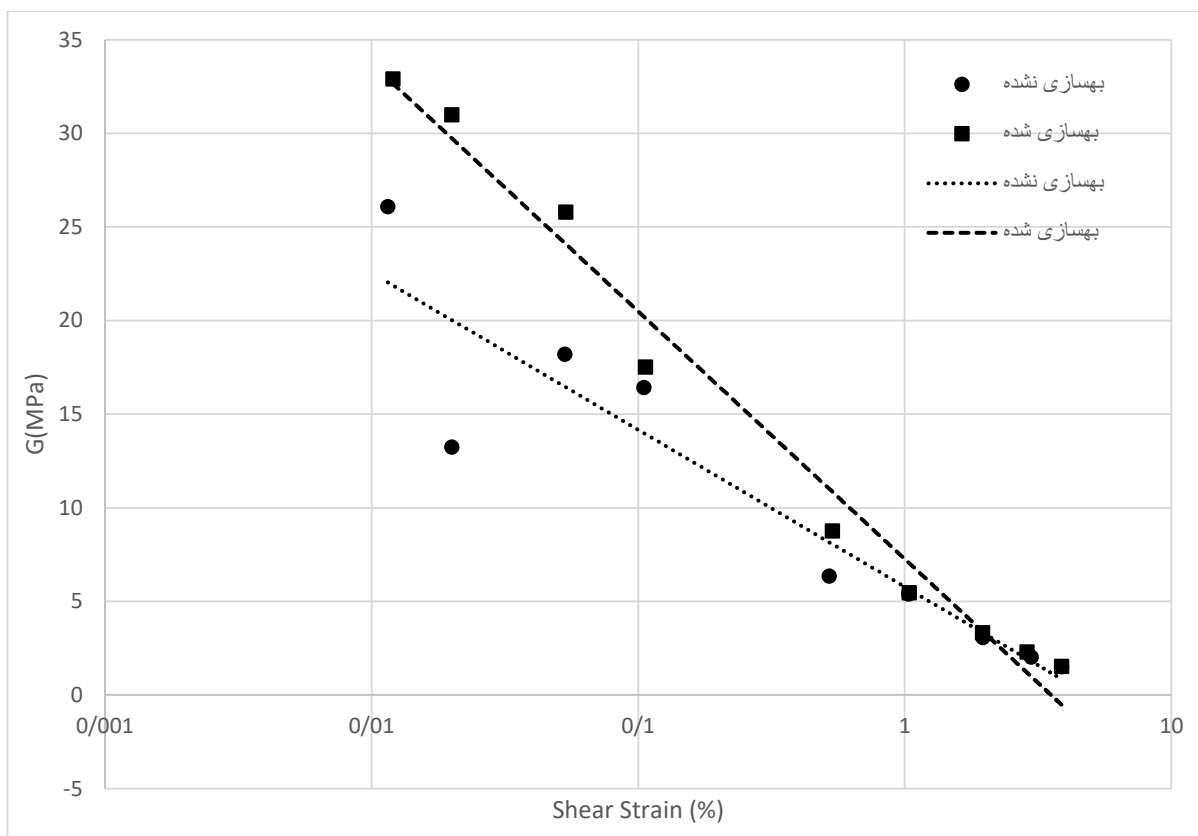
جدول (۴-۱۴) نتایج تحلیل داده های آزمایش با سربار ۲۰۰ kPa

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G(MPa)
۱	U-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۴/۵۴۵	T-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۷/۷۲۷
۲	U-V200-A0.02	۰/۰۱۹۵	۳۶/۴۱۰	T-V200-A0.02	۰/۰۱۹	۴۳/۶۸۴
۳	U-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۶/۱۹۰	T-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۳۲/۳۸۰
۴	U-V200-A0.1	۰/۱۰۳۵	۲۴/۲۹۹	T-V200-A0.1	۰/۱۰۳۴	۲۷/۱۹۸
۵	U-V200-A0.5	۰/۵۰۵۵	۱۶/۶۲۷	T-V200-A0.5	۰/۵۰۹	۱۶/۸۹۵
۶	U-V200-A1	۱/۰۵۶	۱۰/۶۹۱	T-V200-A1	۱/۰۱۶۵	۱۰/۱۶۷
۷	U-V200-A2	۱/۸۱۲	۶/۷۹۳	T-V200-A2	۱/۷۷	۶/۰۵۹
۸	U-V200-A3	۲/۶۵۱	۵/۱۹۵	T-V200-A3	۲/۷۷۱۵	۳/۷۳۶
۹	U-V200-A4	۳/۷۳۱	۳/۱۶۴	T-V200-A4	۳/۸۰۷	۲/۶۰۵

جدول (۴-۱۵) نتایج تحلیل داده های آزمایش با سربار 300 kPa

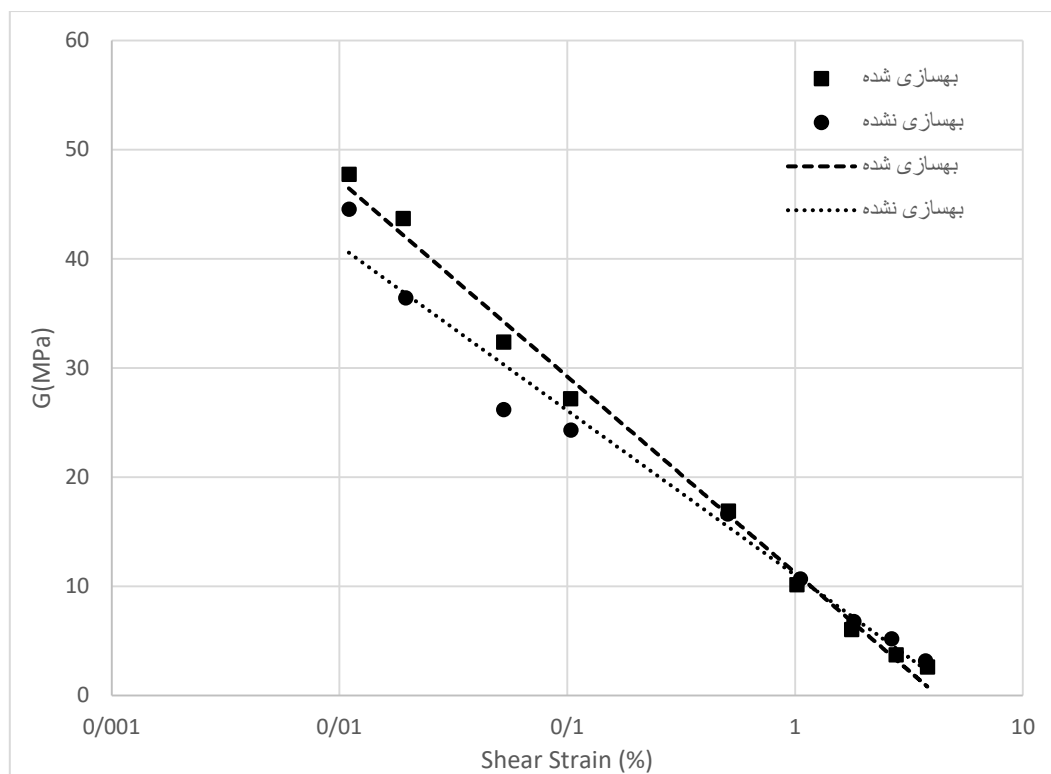
ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی $G(\text{MPa})$	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی $G(\text{MPa})$
۱	U-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۴۲/۰۵۴	T-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۴۵/۲۱۷
۲	U-V300-A0.02	۰/۰۲۰۵	۳۶/۰۹۷	T-V300-A0.02	۰/۰۱۹	۴۱/۸۴۲
۳	U-V300-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۸/۲۸۵	T-V300-A0.05	۰/۰۵۲	۳۱/۱۵۳
۴	U-V300-A0.1	۰/۱۰۳	۲۷/۰۳۸	T-V300-A0.1	۰/۱۰۲۵	۳۰/۷۳۱
۵	U-V300-A0.5	۰/۵۳۵	۲۱/۸۳۹	T-V300-A0.5	۰/۴۹۰۵	۲۰/۹۷۸
۶	U-V300-A1	۰/۹۶۸	۱۵/۰۳۶	T-V300-A1	۰/۹۵۳	۱۶/۸۲۰
۷	U-V300-A2	۱/۵۴۳	۱۰/۴۵۳	T-V300-A2	۱/۵۰۶۵	۱۲/۳۷۳
۸	U-V300-A3	۲/۵۱	۶/۱۸۵	T-V300-A3	۲/۴۷۸	۷/۹۳۳
۹	U-V300-A4	۳/۶۵۳	۴/۱۳۷	T-V300-A4	۳/۶۱۶۵	۵/۰۱۰

همانطور که از مقادیر محاسبه شده مشخص است بهسازی بیولوژیکی، اثر مثبتی در مدول برشی نمونه های خاک گذاشته است به گونه‌ای که باعث افزایش مقدار مدول برشی نسبت به حالت بهسازی نشده شده است. اما به جهت تحلیل اثر بهسازی بیولوژیکی نمودارهای تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش در شکل های (۴-۱۶)، (۴-۱۷) و (۴-۱۸) رسم شده است.



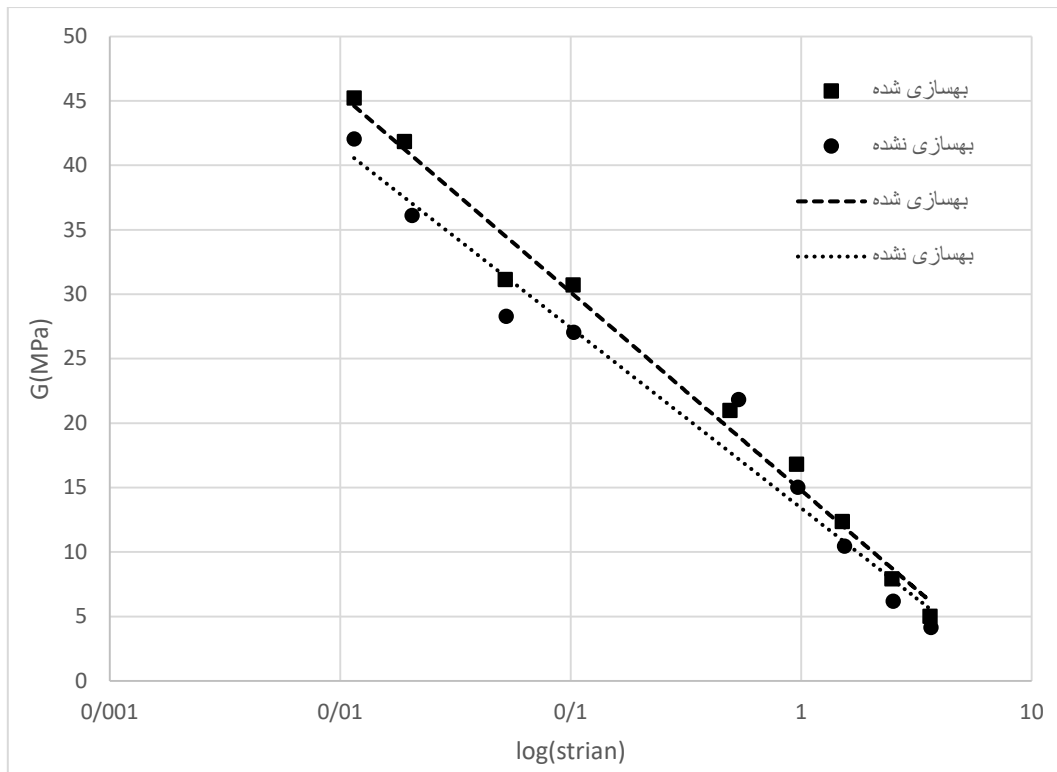
شکل (۴-۱۶) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار ۱۰۰ kPa

همانطور که در شکل (۴-۱۶) مشخص است در سربار ۱۰۰ kPa مقدار مدول برشی در پایین ترین کرنش در حالت بهسازی نشده برابر ۲۶ MPa و در حالت بهسازی شده برابر ۳۲ MPa است که نشان دهنده افزایش ۲۳ درصدی مقدار مدول برشی می باشد. همچنین میتوان دریافت که با افزایش کرنش آهنگ افزایش مدول برشی به تدریج کاهش می یابد به طوری که در کرنش های بالا تقریباً بهسازی تاثیری چندانی (حدود ۱/۳٪ افزایش) در مدول برشی نداشته است که علت این امر را می توان از بین رفتن ر سوب کربنات کلسیم در کرنش های بالاتر دانست.



شکل (۴-۱۷) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار ۲۰۰ kPa

در شکل (۴-۱۷) که گراف نتایج محاسبات مدول برشی را نشان می‌دهد، در سربار ۲۰۰ kPa در کرنش‌های کم باز هم در اثر بهسازی بیولوژیکی افزایش مدول برشی را از مقدار ۴۴/۵۴ تا مقدار ۴۷/۷۳ kPa شاهد هستیم. اما نکته قابل توجه این است که در این سری از آزمایشات میزان افزایش و تاثیر بهسازی بیولوژیکی نسبت به حالتی که با سربار ۱۰۰ kPa آزمایش شده کاهش یافته و به مقدار ۷/۵ درصد افزایش در مدول برشی مشاهده شده است. علت این امر را میتوان تخریب و از بین رفتن بافت رسوب کلسیم کربنات در خاک در اثر افزایش سربار عنوان کرد. همچنین باز هم در این شکل مشخص است که با افزایش کرنش میزان تاثیر بهسازی در مدول برشی به دلیل تغییر در بافت خاک کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۱۸) نمودار مقایسه مدول برشی بر حسب کرنش با سربار 300 kPa

شکل (۴-۱۸) نمودار مدول برشی خاک ماسه فیروز کوه در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مانند آزمایش‌های سربار 200 kPa بهسازی اثر قابل توجهی بر روی مدول برشی خاک در کرنش‌های پایین گذاشته است به طوری که در کرنش 0.01% مقدار مدول برشی 7.5% افزایش یافته است. اما با افزایش میزان کرنش‌ها این اثر کاهش یافته به طوری که در کرنش‌های ۳ و ۴ درصد این افزایش به حدود ۱ درصد (به علت از بین رفتن پیوند کربنات کلسیم) رسیده است.

۴-۳-۲- اثر بهسازی بیولوژیکی بر میرایی

پس از محاسبه مقدار نسبت میرایی با استفاده از فرمول (۴-۲) در دو حالت بهسازی شده و بهسازی نشده، این مقادیر در جداول برای مقایسه و بررسی اثر بهسازی بیولوژیکی آورده شده است.

جدول (۴-۱۶) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شه و بهسازی نشده با سربار ۱۰۰kPa

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %
۱	U-V100-A0.01	۰/۰۱۱۵	۱/۵	T-V100-A0.01	۰/۰۱۲	۲/۰۶
۲	U-V100-A0.02	۰/۰۲	۶/۹۷	T-V100-A0.02	۰/۰۲	۰/۸۴
۳	U-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۲/۷۲	T-V100-A0.05	۰/۰۵۳۵	۴/۲۷
۴	U-V100-A0.1	۰/۱۰۵	۱/۷۵۷	T-V100-A0.1	۰/۱۰۶۵	۳/۸۳
۵	U-V100-A0.5	۰/۵۲	۳۶/۶۴	T-V100-A0.5	۰/۵۳۵	۳۱/۱۹
۶	U-V100-A1	۱/۰۳۴	۳۹/۰۳۶	T-V100-A1	۱/۰۳۹۵	۳۴/۴۸
۷	U-V100-A2	۱/۹۶	۴۰/۱۹	T-V100-A2	۱/۹۵۶۵	۴۱/۹۷
۸	U-V100-A3	۲/۸۹	۴۵/۷۵	T-V100-A3	۲/۸۷۴۵	۳۷/۴
۹	U-V100-A4	۳/۸۷۲	۴۸/۴۶	T-V100-A4	۳/۸۷۰۵	۴۲/۲۱

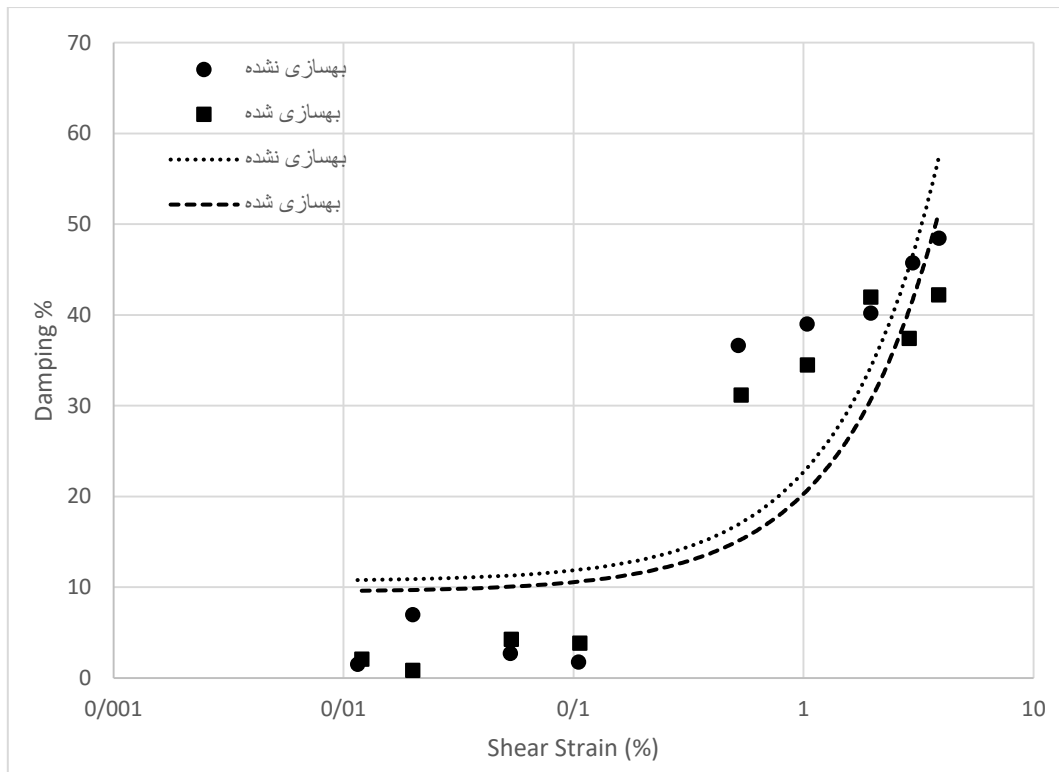
جدول (۴-۱۷) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شه و بهسازی نشده با سربار ۲۰۰kPa

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %
۱	U-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۰/۸۱	T-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۰/۳۴
۲	U-V200-A0.02	۰/۰۱۹۵	۱/۷۹	T-V200-A0.02	۰/۰۱۹	۰/۵۱
۳	U-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۳/۹۳	T-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۱/۸۳
۴	U-V200-A0.1	۰/۱۰۳۵	۳/۷	T-V200-A0.1	۰/۱۰۳۴	۱/۰۰
۵	U-V200-A0.5	۰/۵۰۵۵	۱۳/۳۲	T-V200-A0.5	۰/۵۰۹	۱۲/۰۱
۶	U-V200-A1	۱/۰۵۶	۲۳/۸۴	T-V200-A1	۱/۰۱۶۵	۲۷/۸۵
۷	U-V200-A2	۱/۸۱۲	۳۰/۹۴	T-V200-A2	۱/۷۷	۳۶/۶۹
۸	U-V200-A3	۲/۶۵۱	۴۲/۰۳۶	T-V200-A3	۲/۷۷۱۵	۳۹/۷۱
۹	U-V200-A4	۳/۷۳۱	۴۷/۴۴	T-V200-A4	۳/۸۰۷	۴۱/۱۴

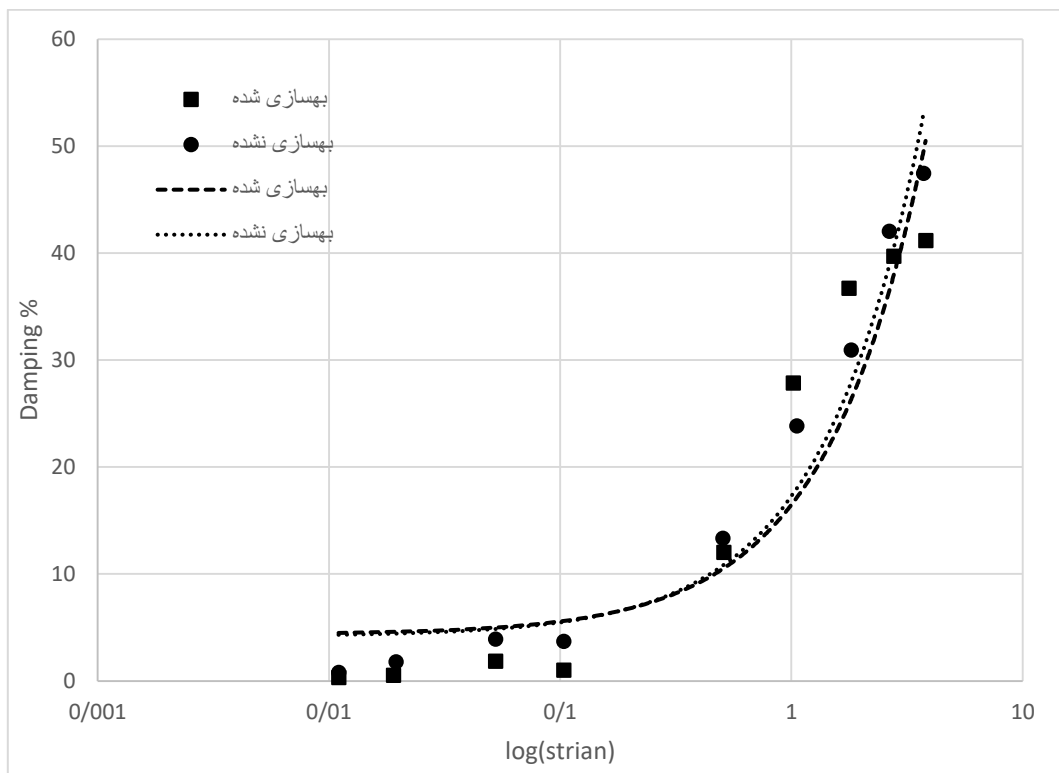
جدول (۴-۱۸) مقایسه مقدار نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شه و بهسازی نشده با سر بار ۳۰۰kPa

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %	کد آزمایش	دامنه واقعی	میرایی %
۱	U-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۵/۷	T-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۱/۰۳۸
۲	U-V300-A0.02	۰/۰۲۰۵	۳/۷۷	T-V300-A0.02	۰/۰۱۹	۳/۰۵
۳	U-V300-A0.05	۰/۰۵۲۵	۰/۴۴	T-V300-A0.05	۰/۰۵۲	۲/۵
۴	U-V300-A0.1	۰/۱۰۳	۰/۱۶	T-V300-A0.1	۰/۱۰۲۵	۱/۳۵۵
۵	U-V300-A0.5	۰/۵۳۵	۱۷/۵۶	T-V300-A0.5	۰/۴۹۰۵	۹/۵۶
۶	U-V300-A1	۰/۹۶۸	۲۵/۱۹	T-V300-A1	۰/۹۵۳	۱۴/۰۱
۷	U-V300-A2	۱/۵۴۳	۲۷/۰۷	T-V300-A2	۱/۵۰۶۵	۱۹/۴۶
۸	U-V300-A3	۲/۵۱	۳۶/۴	T-V300-A3	۲/۴۷۸	۳۶/۵۸
۹	U-V300-A4	۳/۶۵۳	۴۰/۵۶	T-V300-A4	۳/۶۱۶۵	۳۷/۳۷

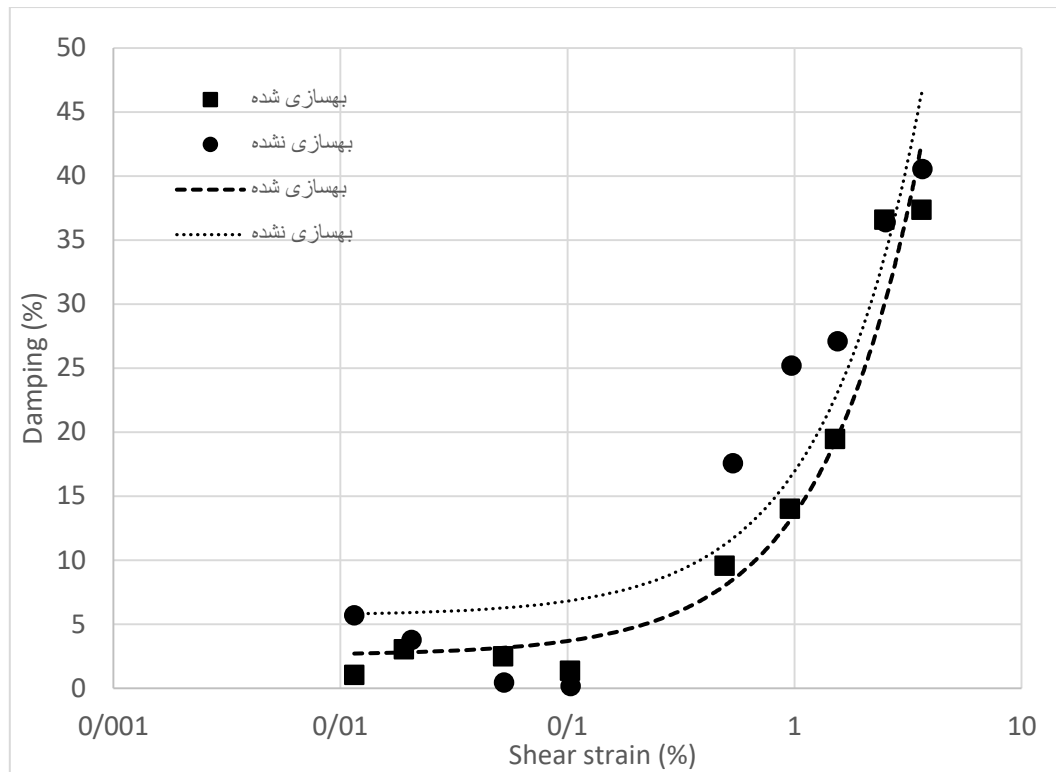
با مقایسه مقادیر جداول بالا این نتیجه حاصل می‌گردد که بهسازی بیولوژیکی باعث کاهش نسبت میرایی در نمونه های بهسازی شده نسبت به نمونه های بهسازی نشده، شده است. همچنین برای مقایسه آسان تر اثر بهسازی بیولوژیکی نمودار تغییرات نسبت میرایی بر حسب تغییرات کرنش در سر بار های مختلف در شکل‌های (۴-۱۹)، (۴-۲۰) و (۴-۲۱) رسم شده است.



شکل (۴-۱۹) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۱۰۰ kPa



شکل (۴-۲۰) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۲۰۰ kPa



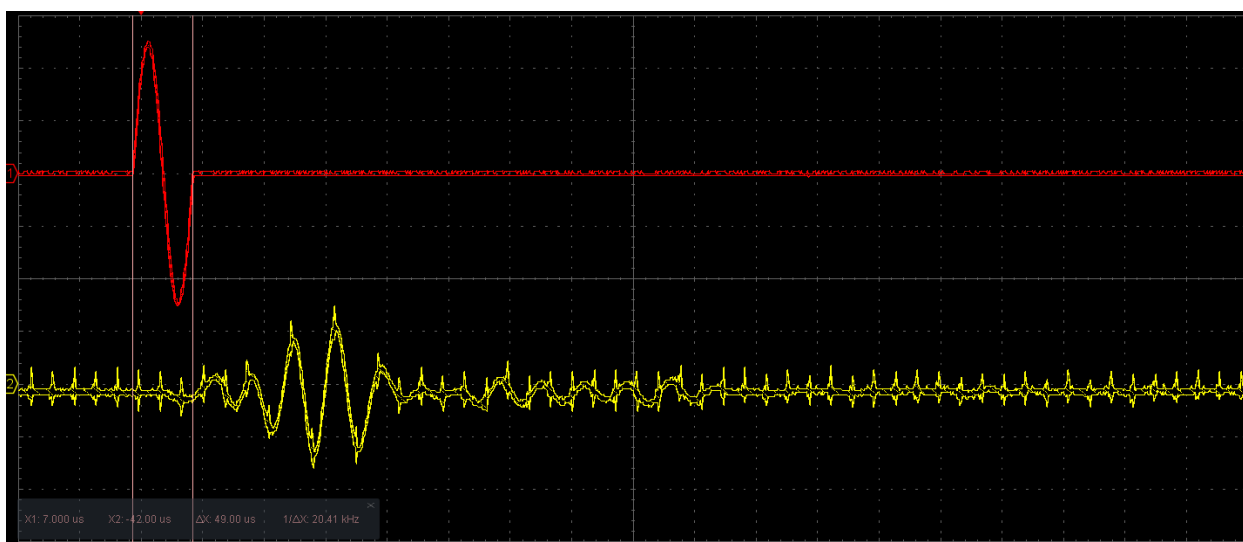
شکل (۴-۲۱) نمودار مقایسه درصد میرایی بر حسب کرنش با سربار ۳۰۰ kPa

نتایج تحلیل مقدار درصد میرایی نمونه‌ها در نمودار شکل‌های (۴-۱۹)، (۴-۲۰) و (۴-۲۱) قابل ملاحظه است. برطبق این نمودارها، بهسازی بیولوژیکی بر روی خاک ماسه‌ای فیروزکوه باعث کاهش میرایی نمونه‌ها در کرنش‌های مختلف شده است. این اختلاف به راحتی در نتایج مربوط به آزمایش‌های با سربار ۳۰۰ kPa قابل مشاهده است. همچنین با مقایسه این سه نمودار با افزایش سربار اثر بهسازی بیولوژیکی بر نسبت میرایی بیشتر شده است.

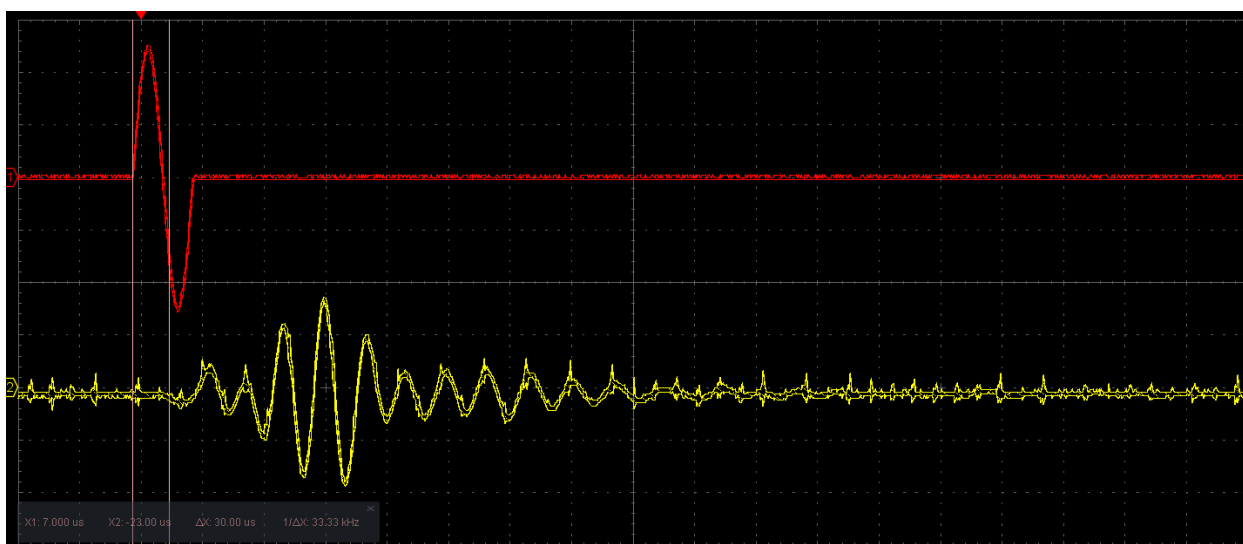
لازم به توضیح است که همواره در تست‌های آزمایشگاهی امکان خطا در اندازه‌گیری‌ها وجود دارد، آزمایش‌های این پژوهش نیز از این قاعده مستثنا نبوده و دارای خطاهایی در اندازه‌گیری می‌باشد. ازین جهت امکان وجود خطا در ترسیم حلقه‌های هیستریزیس کاملاً طبیعی بوده که همین امر منجر به ایجاد خطا در محاسبه مساحت و تبع آن در محاسبه مقدار میرایی نمونه‌ها می‌باشد. برای کاهش این خطاها در این پژوهش با تکرار آزمایشات و میانگین‌گیری سعی شده تا نتایج دقیق‌تری بدست آید.

۳-۳-۴- اثر بهسازی بیولوژیکی بر سرعت موج برشی

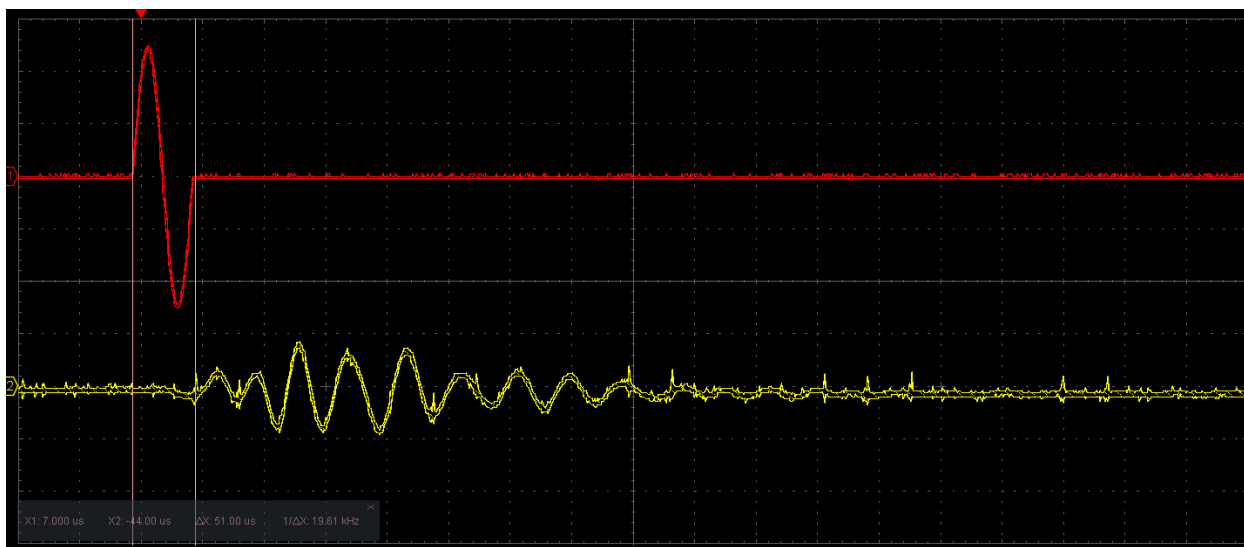
همانند نمونه‌های بهسازی نشده، آزمایش تعیین سرعت موج برشی با ارسال یک تک موج سینوسی به داخل خاک و دریافت موج انجام گرفت. گراف موج‌های ارسال شده در داخل نمونه‌های بهسازی شده به صورت شکل‌های (۲۲-۴)، (۲۳-۴) و (۲۴-۴) می‌باشد.



شکل (۲۲-۴) گراف امواج در نمونه BE-T-V100



شکل (۲۳-۴) گراف امواج در نمونه BE-T-V200

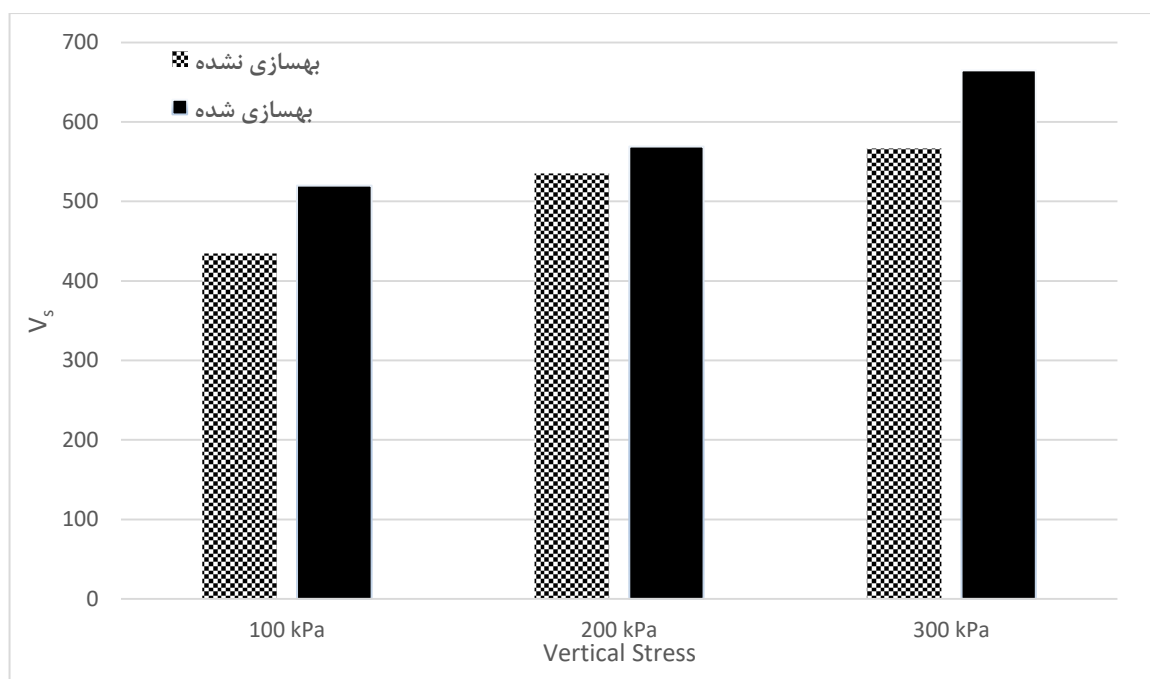


شکل (۴-۲۴) گراف امواج در نمونه BE-T-V300

با استفاده از اختلاف زمانی در ارسال و دریافت موج توسط پیزوهای تعبیه شده بر روی پداستال‌ها، سرعت موج برشی در نمونه‌های بهسازی شده قابل اندازه‌گیری می‌باشد. جدول (۴-۱۹) مقادیر محاسبه شده سرعت موج برشی در سه سربار ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa، برای نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده ذکر شده است.

جدول (۴-۱۹) نتایج آزمایش تعیین سرعت موج برشی

ردیف	بهسازی نشده		بهسازی شده	
	کد آزمایش	سرعت موج برشی (m/s)	کد آزمایش	سرعت موج برشی (m/s)
۱	BE-U-V100	۴۳۴/۵۲	BE-T-V100	۵۱۹/۷۸
۲	BE-U-V200	۵۳۵/۳۶	BE-T-V200	۵۶۹
۳	BE-U-V300	۵۶۶/۵۵	BE-T-V300	۶۶۴/۸۷



شکل (۴-۲۵) نمودار مقایسه سرعت موج برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در سربارهای مختلف

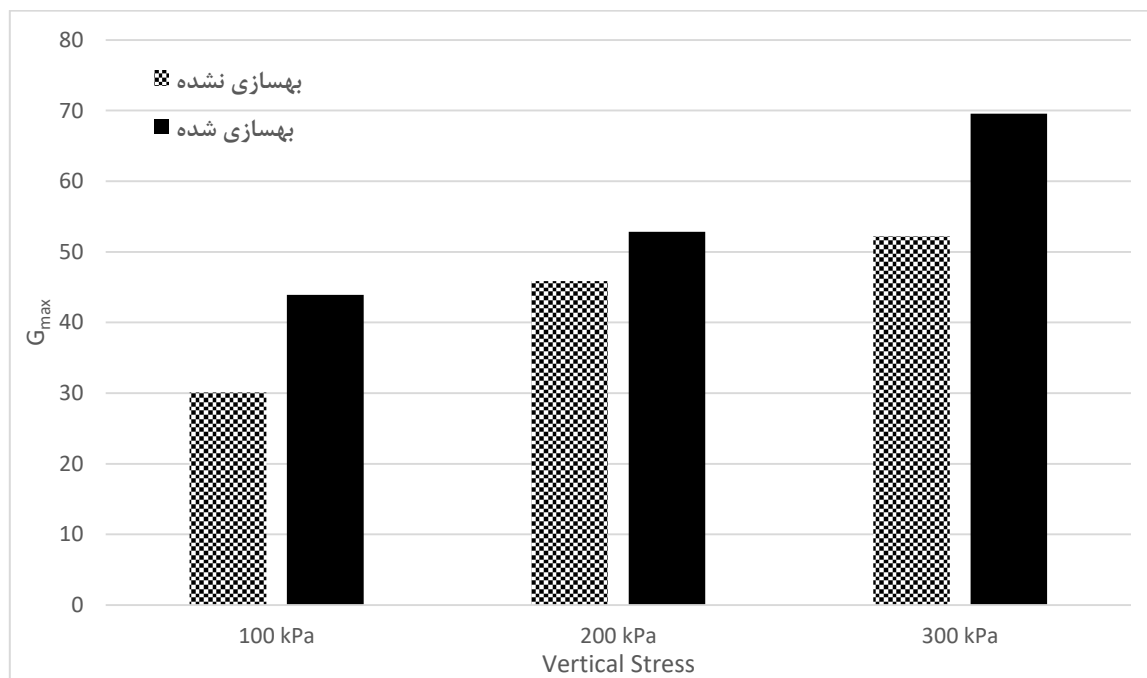
همانطور که در نمودار شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود، بهسازی بیولوژیکی باعث افزایش سرعت موج برشی شده به طوری که در سربار ۱۰۰ kPa از مقدار ۴۳۴/۵۲ به ۵۱۹/۷۸ متر بر ثانیه (۲۰٪ افزایش)، در سربار ۲۰۰ kPa از مقدار ۵۳۵/۳۶ به ۵۶۹ متر بر ثانیه (۸٪ افزایش) و در سربار ۳۰۰ kPa از مقدار ۵۶۶/۵۵ به ۶۶۴/۸۷ متر بر ثانیه (۱۸٪ افزایش) یافته است. علت این افزایش در سرعت موج برشی اتصال بیشتر دانه‌های خاک به دلیل وجود رسوبات کربنات کلسیم است که باعث عبور بهتر و سریع‌تر امواج شده است.

۴-۳-۴- اثر بهسازی بیولوژیکی بر مدول برشی حداکثر و مدول برشی نرمال شده

پس از محاسبه مقدار سرعت موج برشی برای نمونه‌های بهسازی شده می‌توان مقدار مدول برشی ماکزیمم را با استفاده از فرمول ۳-۴ نیز محاسبه کرد. مقادیر مدول برشی ماکزیمم در جدول (۴-۲۰) همراه با مقادیر این پارامتر در نمونه‌های بهسازی نشده به منظور مقایسه نتایج ذکر شده است. همچنین با توجه به نشستی که در اثر اعمال سربار قائم بر نمونه‌ها اتفاق افتاده است، میزان چگالی هر نمونه محاسبه شده که در فرمول ۳-۴ برای بدست آوردن میزان مدول برشی ماکزیمم استفاده شده است. مقدار چگالی نمونه‌ها نیز در جدول ۴-۲۰ ذکر شده است.

جدول (۴-۲۰) مقادیر مدول برشی ماکزیمم برای نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده

ردیف	بهسازی نشده			بهسازی شده		
	کد آزمایش	چگالی نمونه (g/cm ³)	G _{max} (MPa)	کد آزمایش	چگالی نمونه (g/cm ³)	G _{max} (MPa)
۱	BE-U-V100	۱/۵۹۴	۳۰/۰۹۰	BE-T-V100	۱/۶۲۵	۴۳/۹۲۴
۲	BE-U-V200	۱/۶۰۰	۴۵/۸۶۲	BE-T-V200	۱/۶۳۲	۵۲/۸۳۴
۳	BE-U-V300	۱/۶۲۶	۵۲/۱۹۶	BE-T-V300	۱/۶۴۱	۶۹/۵۵۷



شکل (۴-۲۶) نمودار مقایسه مدول برشی ماکزیمم در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در سربار های مختلف

با بررسی نمودار (۴-۲۶) می‌توان افزایش مدول برشی ماکزیمم G_{max} را مشاهده کرد به صورتی که در سربار ۱۰۰ kPa از مقدار ۳۰/۰۹۰ به ۴۳/۹۲۴ MPa (۴۵٪ افزایش)، در سربار ۲۰۰ kPa از مقدار ۴۵/۸۶۲ به ۵۲/۸۳۴ MPa (۱۵٪ افزایش) و در سربار ۳۰۰ kPa از مقدار ۵۲/۱۹۶ به ۶۹/۵۵۷ MPa (۳۳٪ افزایش) افزایش داشته است. از این آزمایش می‌توان موفقیت‌آمیز بودن روش بهسازی بیولوژیکی را استناد نمود. همچنین تغییر در چگالی نمونه‌ها که در جدول ۴-۲۰ ذکر شده باعث تاثیر در مقدار مدول برشی ماکزیمم شده است و این پارامتر را افزایش داده است.

پس از محاسبه مقدار مدول برشی ماکزیمم (G_{max})، می‌توان مقدار مدول برشی نرمال شده در هر آزمایش را بدست آورد. مقادیر این نسبت در هر آزمایش مطابق جداول (۴-۲۱)، (۴-۲۲) و (۴-۲۳) می‌باشد.

جدول (۴-۲۱) محاسبه مدول برشی نرمال شده برای سربار ۱۰۰ kPa

ردیف	بهسازی نشده $G_{max}=30.090$ MPa				بهسازی شده $G_{max}=43.924$ MPa			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}
۱	U-V100-A0.01	۰/۰۱۱۵	۲۶/۰۸۶	۰/۸۹	T-V100-A0.01	۰/۰۱۲	۳۲/۹۱۶	۰/۸
۲	U-V100-A0.02	۰/۰۲	۱۳/۲۴۹	۰/۴۵	T-V100-A0.02	۰/۰۲	۳۰/۹۹	۰/۷۶
۳	U-V100-A0.05	۰/۰۵۳	۱۸/۲۰۷	۰/۶۲	T-V100-A0.05	۰/۰۵۳۵	۲۵/۷۹۴	۰/۶۳
۴	U-V100-A0.1	۰/۱۰۵	۱۶/۴۲۸	۰/۵۶	T-V100-A0.1	۰/۱۰۶۵	۱۷/۵۱۱	۰/۴۳
۵	U-V100-A0.5	۰/۵۲	۶/۳۵۹	۰/۲۱	T-V100-A0.5	۰/۵۳۵	۸/۷۶۶	۰/۲۱
۶	U-V100-A1	۱/۰۳۴	۵/۳۹۳	۰/۱۸	T-V100-A1	۱/۰۳۹۵	۵/۴۶۸	۰/۱۳
۷	U-V100-A2	۱/۹۶	۳/۰۶۶	۰/۱۰۴	T-V100-A2	۱/۹۵۶۵	۳/۳۲۹	۰/۰۸
۸	U-V100-A3	۲/۸۹	۲/۰۳۲	۰/۰۷	T-V100-A3	۲/۸۷۴۵	۲/۲۹۷	۰/۰۶
۹	U-V100-A4	۳/۸۷۲	۱/۵۱۲	۰/۰۵	T-V100-A4	۳/۸۷۰۵	۱/۵۳۲	۰/۰۴

جدول (۴-۲۲) محاسبه نسبت مدول برشی نرمال شده برای سربار ۲۰۰ kPa

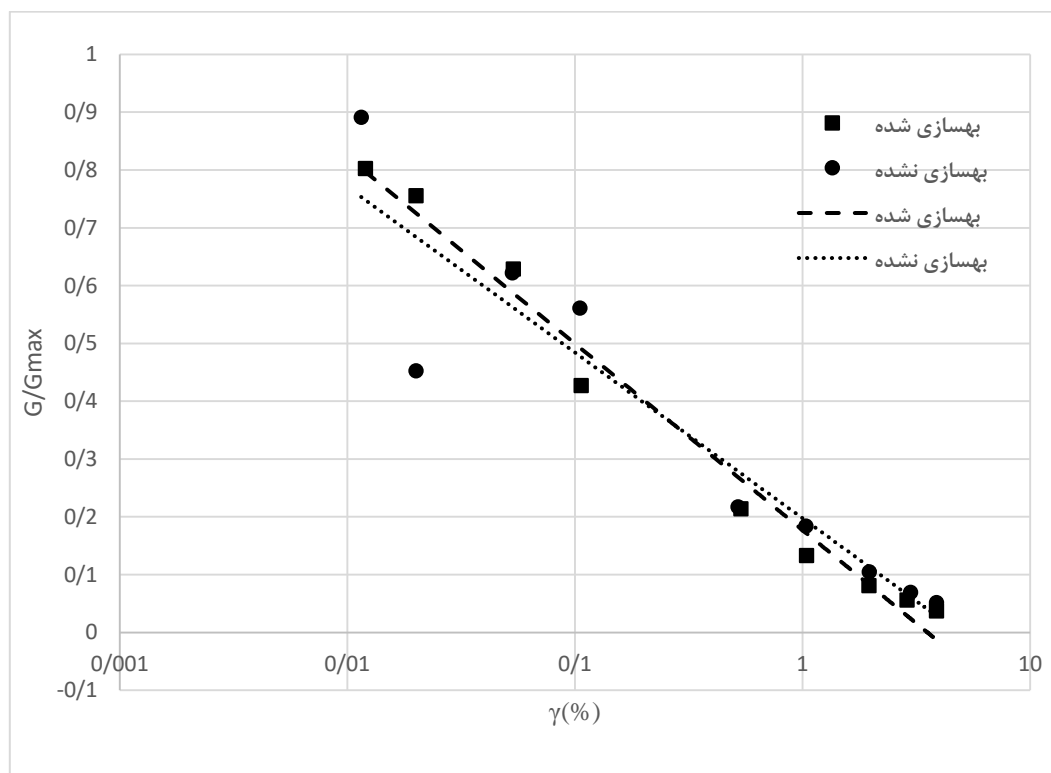
ردیف	بهسازی نشده $G_{max}=45.862$ MPa				بهسازی شده $G_{max}=52.834$ MPa			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}
۱	U-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۴/۵۴۵	۰/۹۸	T-V200-A0.01	۰/۰۱۱	۴۷/۷۲۷	۰/۹۵
۲	U-V200-A0.02	۰/۰۱۹۵	۳۶/۴۱۰	۰/۸	T-V200-A0.02	۰/۰۱۹	۴۳/۶۸۴	۰/۸۷
۳	U-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۶/۱۹۰	۰/۵۸	T-V200-A0.05	۰/۰۵۲۵	۳۲/۳۸۰	۰/۶۵
۴	U-V200-A0.1	۰/۱۰۳۵	۲۴/۲۹۹	۰/۵۴	T-V200-A0.1	۰/۱۰۳۴	۲۷/۱۹۸	۰/۵۴
۵	U-V200-A0.5	۰/۵۰۵۵	۱۶/۶۲۷	۰/۳۷	T-V200-A0.5	۰/۵۰۹	۱۶/۸۹۵	۰/۳۴
۶	U-V200-A1	۱/۰۵۶	۱۰/۶۹۱	۰/۲۴	T-V200-A1	۱/۰۱۶۵	۱۰/۱۶۷	۰/۲
۷	U-V200-A2	۱/۸۱۲	۶/۷۹۳	۰/۱۵	T-V200-A2	۱/۷۷	۶/۰۵۹	۰/۱۲
۸	U-V200-A3	۲/۶۵۱	۵/۱۹۵	۰/۱۱	T-V200-A3	۲/۷۷۱۵	۳/۷۳۶	۰/۰۷
۹	U-V200-A4	۳/۷۳۱	۳/۱۶۴	۰/۰۷	T-V200-A4	۳/۸۰۷	۲/۶۰۵	۰/۰۵

جدول (۴-۲۳) محاسبه نسبت مدول برشی نرمال شده برای سربار ۳۰۰ kPa

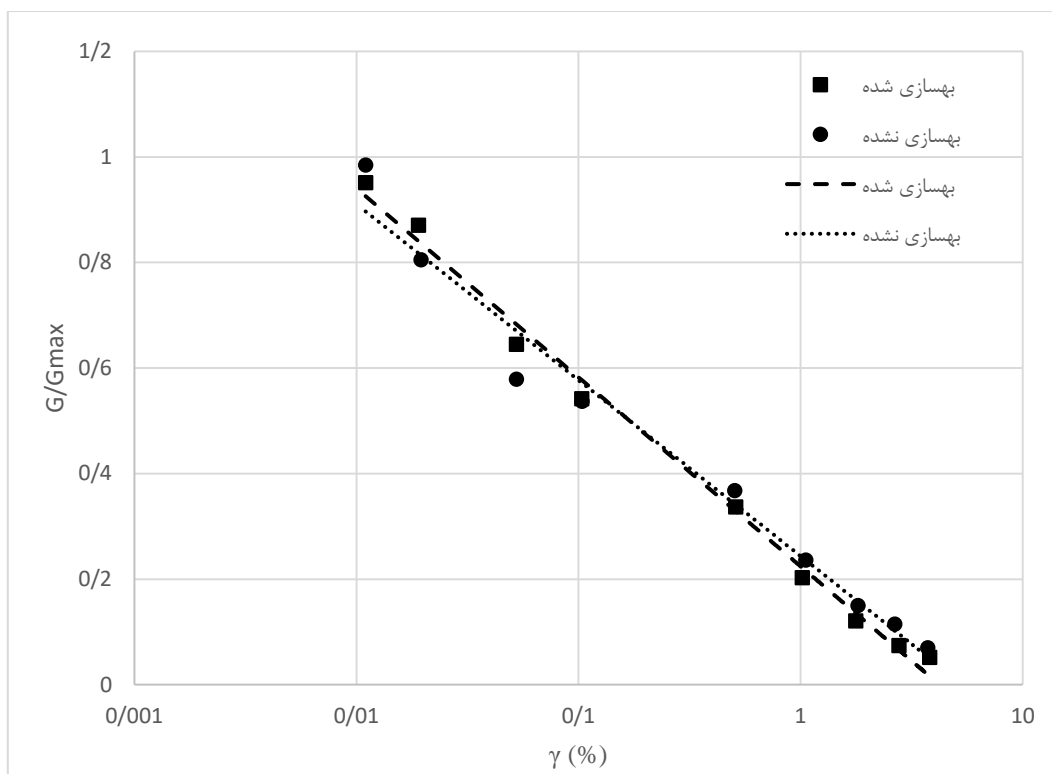
ردیف	بهسازی نشده $G_{max}=52.196$ MPa				بهسازی شده $G_{max}=69.557$ MPa			
	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}	کد آزمایش	دامنه واقعی	مدول برشی G (MPa)	G/G_{max}
۱	U-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۳۳/۹۱۳	۰/۸۵	T-V300-A0.01	۰/۰۱۱۵	۴۵/۲۱۷	۰/۶۶

۲	U-V300-A0.02	۰/۰۲۰۵	۳۶/۰۹۷	۰/۷۳	T-V300-A0.02	۰/۰۱۹	۴۱/۸۴۲	۰/۶۱
۳	U-V300-A0.05	۰/۰۵۲۵	۲۸/۲۸۵	۰/۵۷	T-V300-A0.05	۰/۰۵۲	۳۱/۱۵۳	۰/۴۵
۴	U-V300-A0.1	۰/۱۰۳	۲۷/۰۳۸	۰/۵۴	T-V300-A0.1	۰/۱۰۲۵	۳۰/۷۳۱	۰/۴۴
۵	U-V300-A0.5	۰/۵۳۵	۲۱/۸۳۹	۰/۴۴	T-V300-A0.5	۰/۴۹۰۵	۲۰/۹۷۸	۰/۳۱
۶	U-V300-A1	۰/۹۶۸	۱۵/۰۳۶	۰/۳	T-V300-A1	۰/۹۵۳	۱۶/۸۲۰	۰/۲۵
۷	U-V300-A2	۱/۵۴۳	۱۰/۴۵۳	۰/۲۱	T-V300-A2	۱/۵۰۶۵	۱۲/۳۷۳	۰/۱
۸	U-V300-A3	۲/۵۱	۶/۱۸۵	۰/۱۲	T-V300-A3	۲/۴۷۸	۷/۹۳۳	۰/۱۲
۹	U-V300-A4	۳/۶۵۳	۴/۱۳۷	۰/۰۸	T-V300-A4	۳/۶۱۶۵	۵/۰۱۰	۰/۰۷

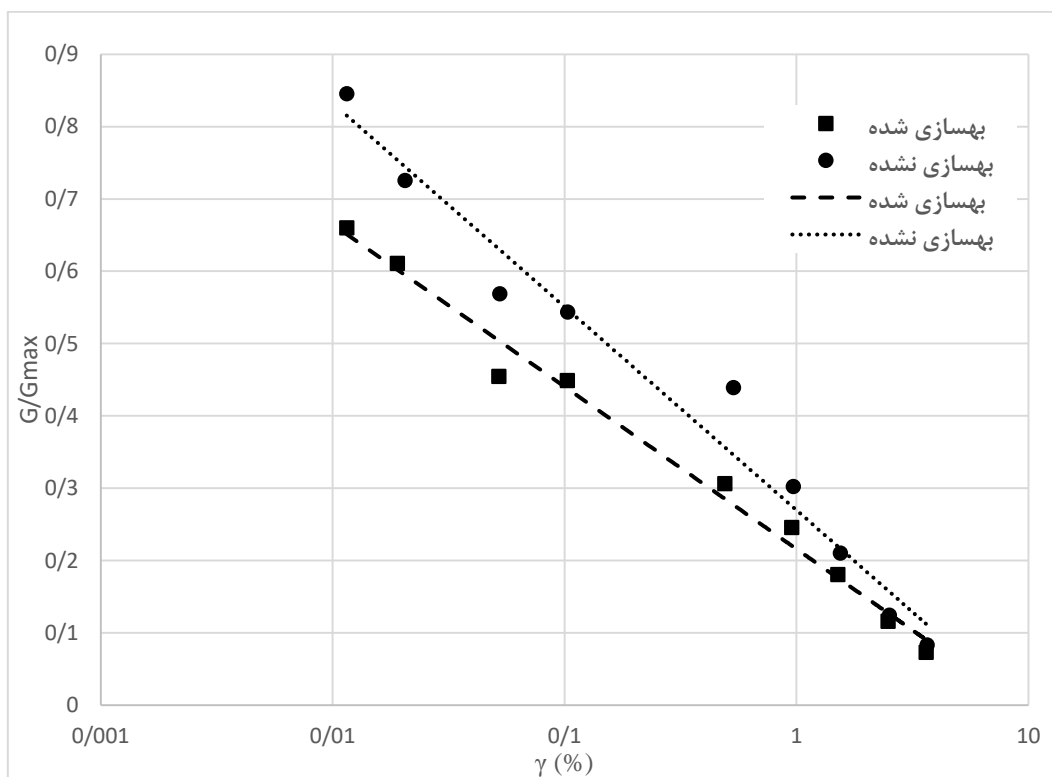
پس از محاسبه مدول برشی نرمال شده، برای تحلیل نتایج و مقایسه آنها نمودارهای مدول برشی نرمال شده برحسب کرنش برشی رسم شده است. شکل‌های (۴-۲۷)، (۴-۲۸) و (۴-۲۹) نمودارهای رسم شده را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۷) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۱۰۰kPa



شکل (۴-۲۸) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۲۰۰ kPa



شکل (۴-۲۹) نمودار مدول برشی نرمال شده نسبت به کرنش برشی در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده با سربار ۳۰۰ kPa

پیش‌تر از طریق نتایج محاسبات مدول برشی و مدول برشی ماکزیمم مشخص شد که بهسازی بیولوژیکی اثر مثبت و بسزایی در افزایش مقدار مدول برشی و مدول برشی ماکزیمم داشته است. اما با مشاهده نمودار شکل‌های (۴-۲۷)، (۴-۲۸) و (۴-۲۹) این نکته دریافت می‌شود که مقدار مدول برشی نرمال شده در حالت بهسازی نشده نسبت به حالت بهسازی شده بیشتر است. با مقایسه اعداد و نتایج ملاحظه می‌شود که با اعمال بار افقی به نمونه‌ها مقدار مدول برشی در حالت بهسازی شده با افت بسیار شدیدی نسبت به مدول برش ماکزیمم مواجه شده است که این امر به دلیل تخریب و تغییر در بافت رسوبی نمونه بهسازی شده می‌باشد. این افت در نمونه‌های بهسازی شده نسبت به افت در نمونه‌های بهسازی نشده بسیار زیاد بوده و باعث کاهش نسبت G/G_{max} شده است. شکل (۴-۳۰) بوضوح تغییر در بافت یکپارچه خاک را در اثر انجام آزمایشات سیکلیک نشان می‌دهد.





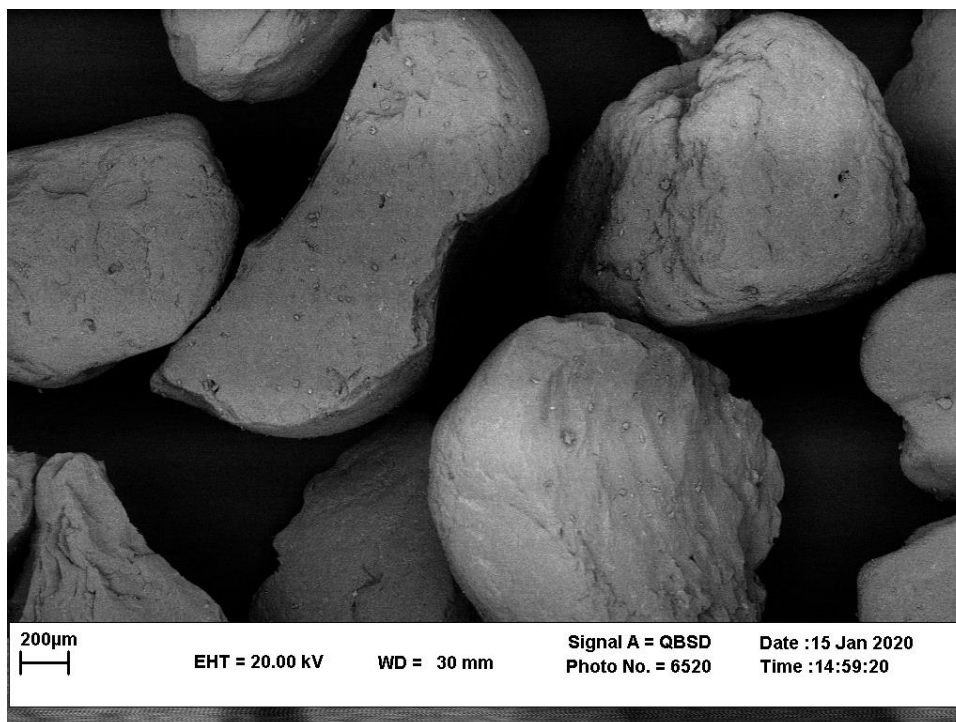
شکل (۴-۳۰) از بین رفتن بافت بهسازی شده خاک در اثر آزمایشات سیکلیک

۴-۴- نتایج آزمایش SEM

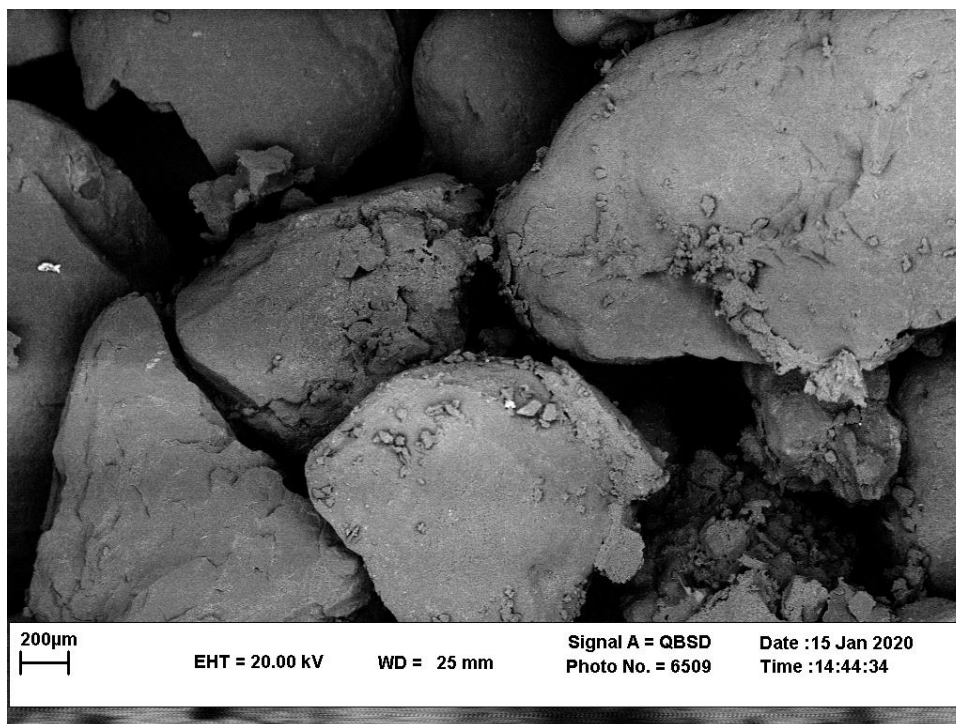
در این پژوهش، آزمایش SEM در مرکز آزمایشگاه‌های دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. دستگاه مورد استفاده در این مرکز از برند LEO سری VP 1450 ساخت کشور آلمان بوده که قابلیت تهیه تصویر با بزرگنمایی ۲۰ تا ۳۰۰۰۰۰ برابر را دارا بوده و مجهز به آشکارساز EDS می‌باشد.

نمونه‌های آزمایش شده از نوع بهسازی شده و بهسازی نشده بوده و پس از آماده سازی مخصوص دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد تصویربرداری قرار گرفته است. در این آزمایش تصویربرداری‌ها با بزرگنمایی ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ برابر انجام شده است.

شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲) تصاویر با بزرگنمایی ۱۰۰ برابری از نمونه بهسازی نشده و بهسازی شده را نشان داده است.



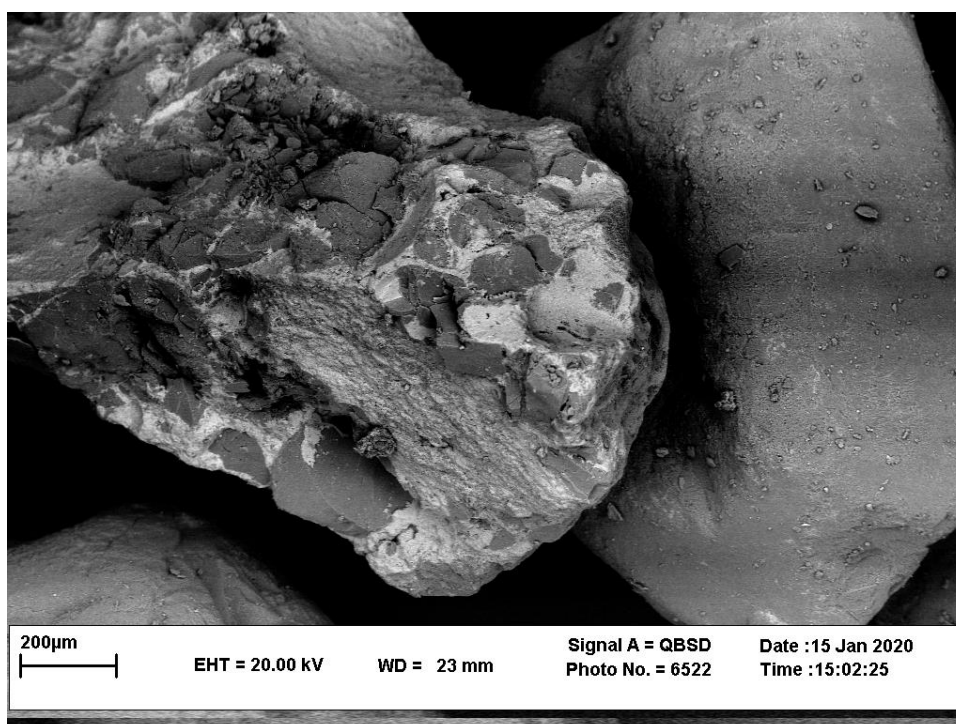
شکل (۴-۳۱) بزرگنمایی ۱۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده



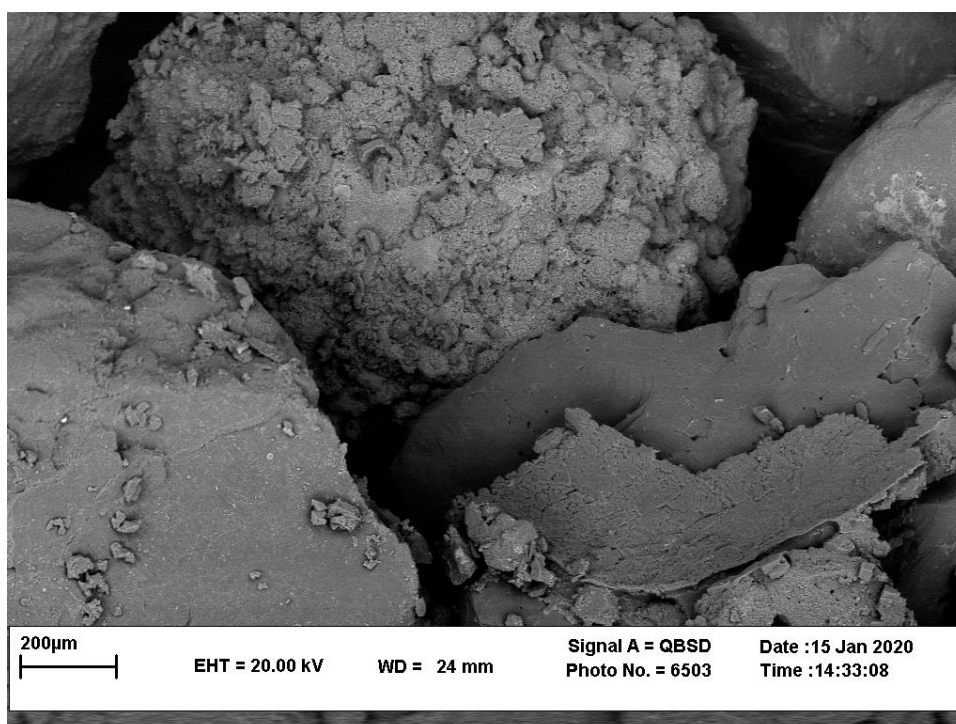
شکل (۴-۳۲) بزرگنمایی ۱۰۰ برابری نمونه بهسازی شده

همانطور که در شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲) مشخص است، در نمونه‌های بهسازی شده رسوبات کلاسیم

کرینات در سطح ذرات خاک ملاحظه شده است.

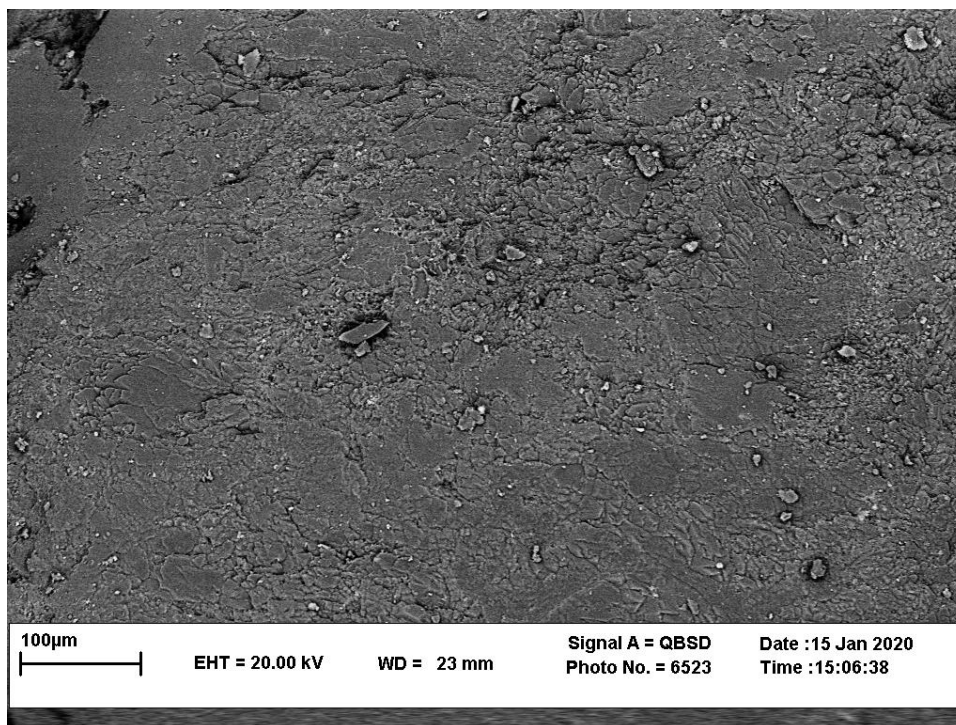


شکل (۴-۳۳) بزرگنمایی ۲۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده

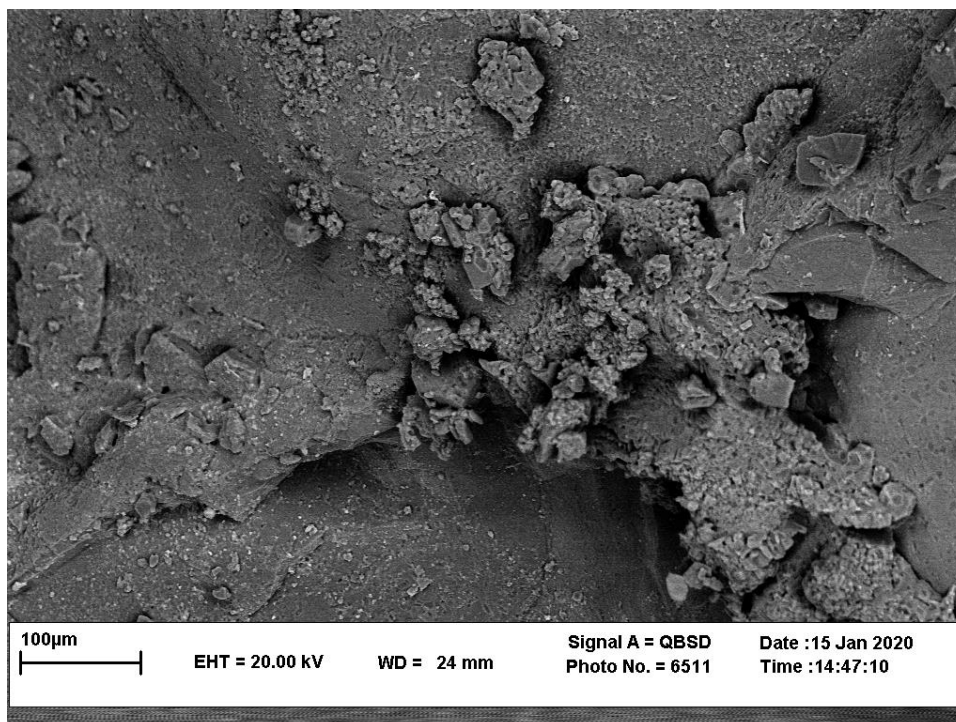


شکل (۴-۳۴) بزرگنمایی ۲۰۰ برابری نمونه بهسازی شده

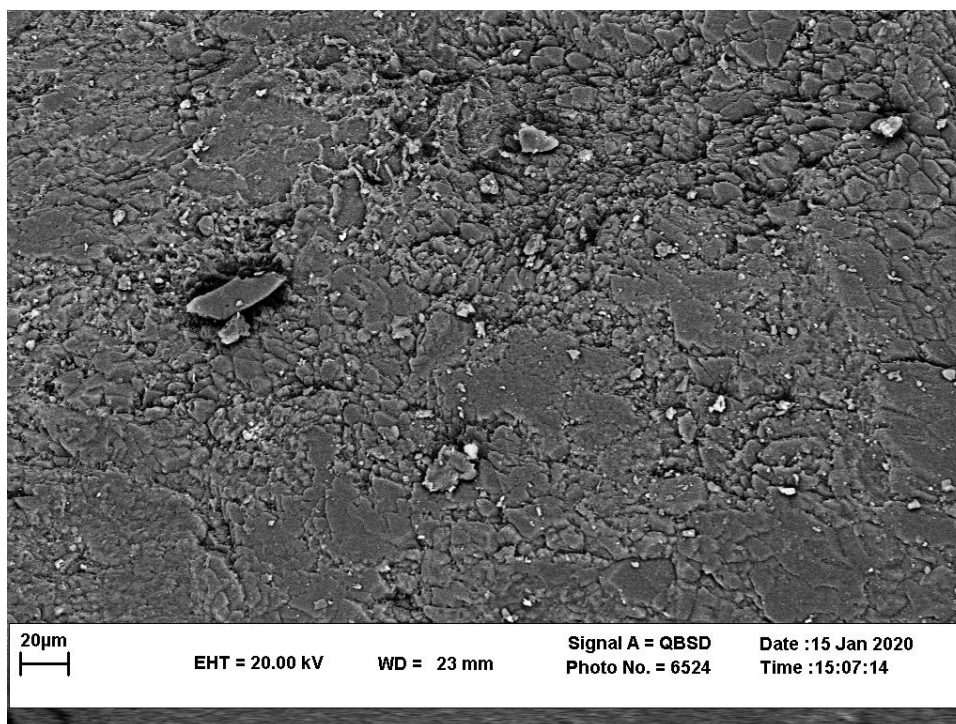
شکل‌های (۳۳-۴) و (۳۴-۴) تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابری را نشان داده است که در این تصاویر هم وجود ذرات کربنات کلسیم بر روی ذرات خاک به راحتی قابل مشاهده است.



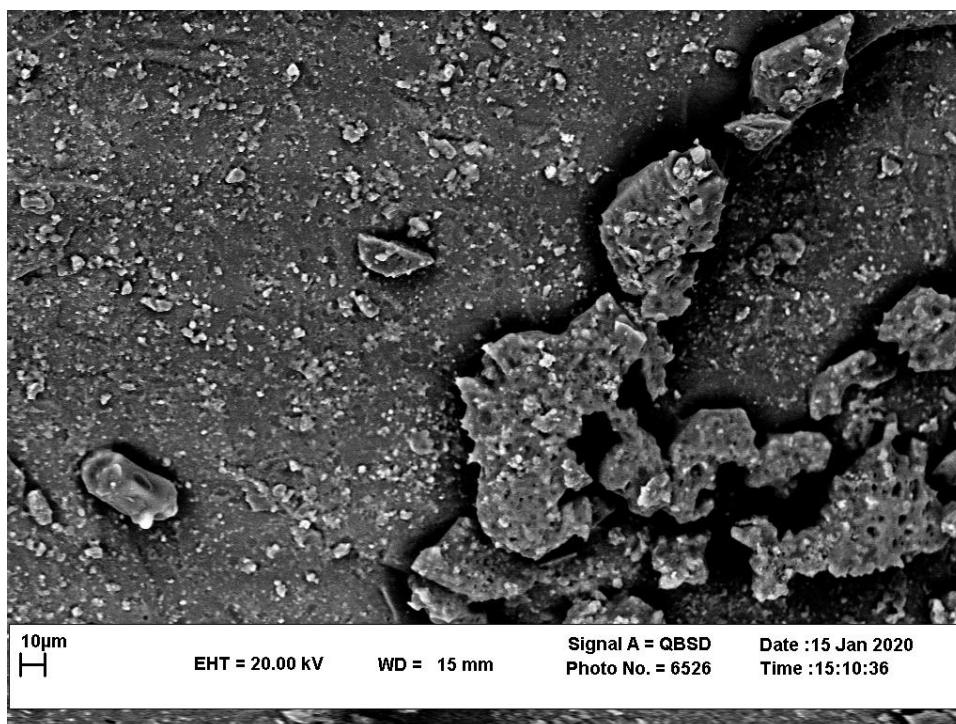
شکل (۳۵-۴) بزرگنمایی ۵۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده



شکل (۳۶-۴) بزرگنمایی ۵۰۰ برابری نمونه بهسازی شده

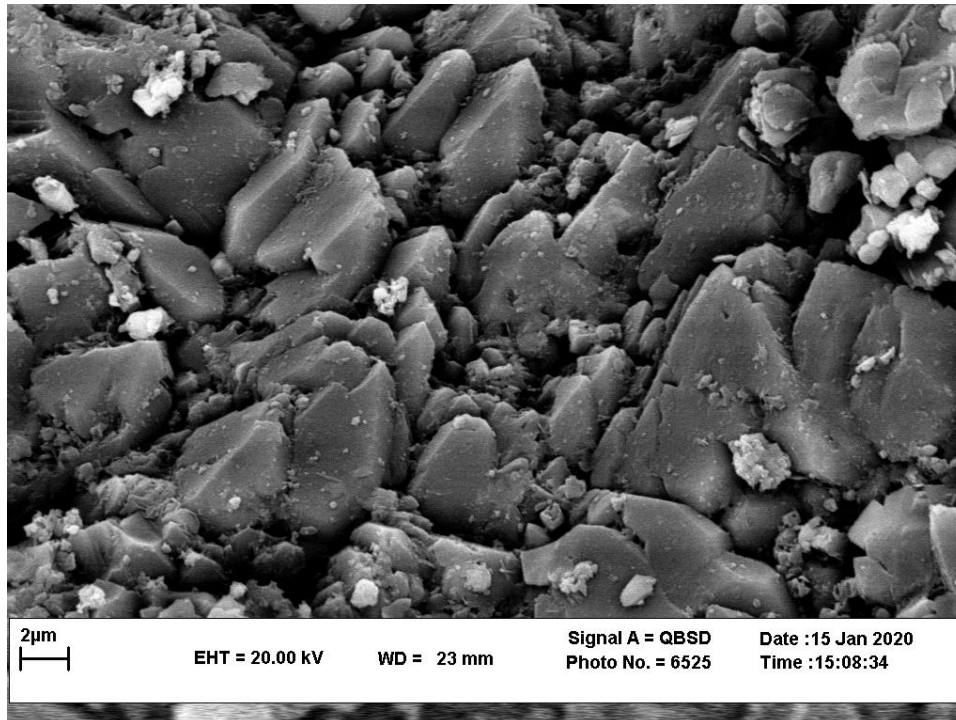


شکل (۴-۳۷) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده

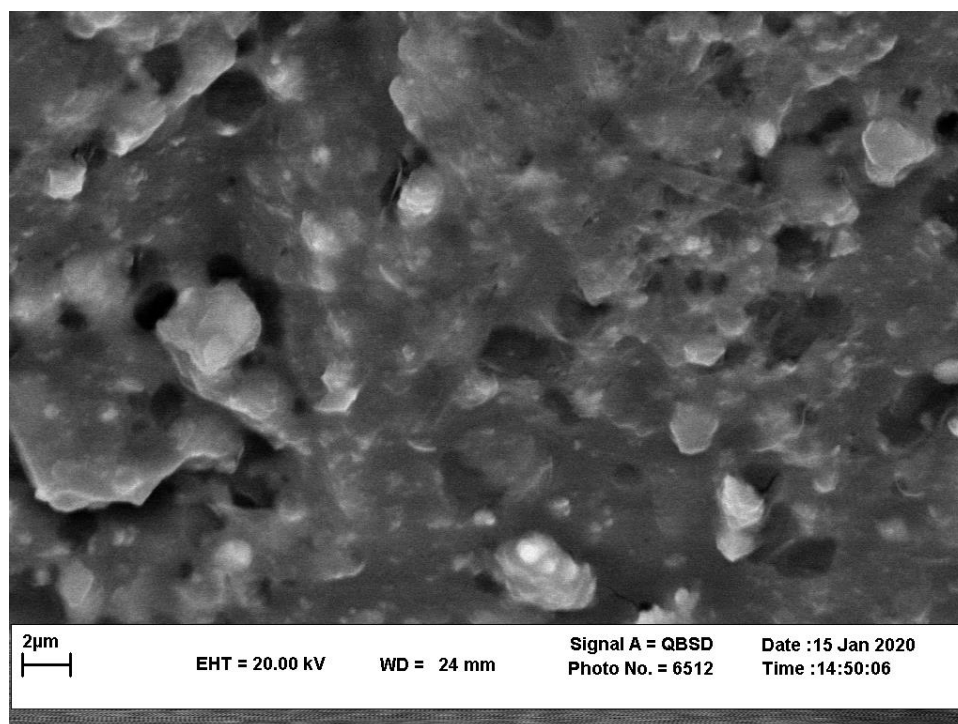


شکل (۴-۳۸) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابری نمونه بهسازی شده

در شکل‌های (۳۵-۴) و (۳۶-۴) تصاویر نمونه‌های خاک با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و شکل‌های (۳۷-۴) و (۳۸-۴) نیز تصاویر SEM با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابری را نشان داده شده است که مانند تصاویر قبل تفاوت میان نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده را به خوبی قابل مشاهده است که می‌توان به راحتی رسوبات تشکیل شده بر روی ذرات خاک را ملاحظه کرد.



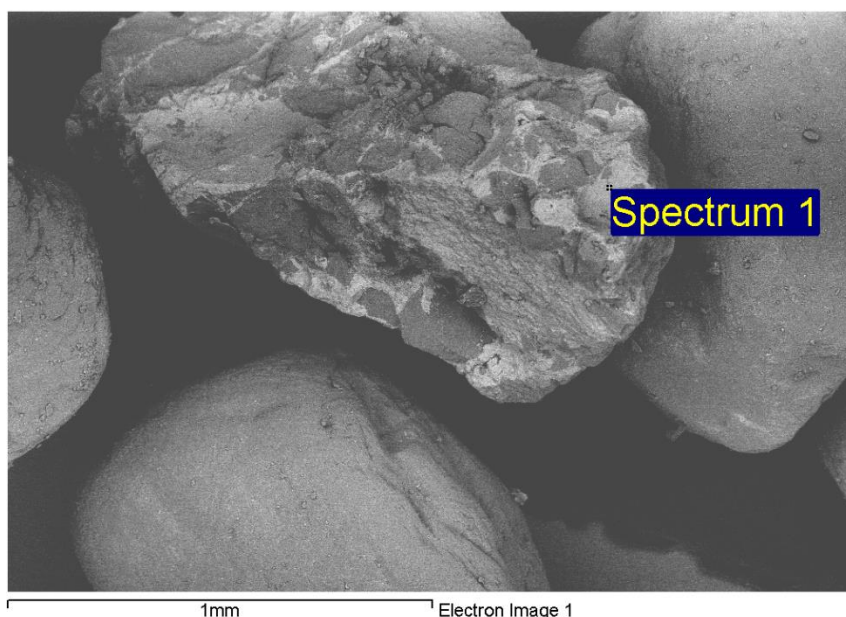
شکل (۳۹-۴) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابری نمونه بهسازی نشده



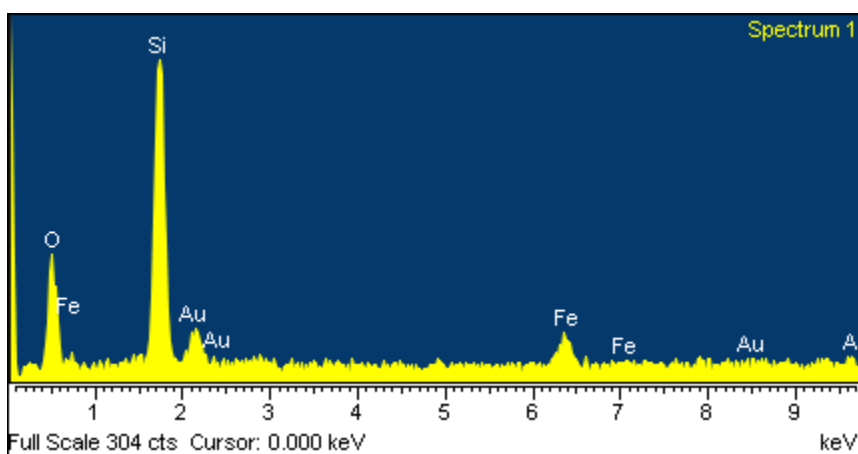
شکل (۴-۴۰) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابری نمونه بهسازی شده

در تصاویر شکل‌های (۴-۳۹) و (۴-۴۰) که تصاویر سطح ذرات خاک با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر نشان داده شده است. سطح ذرات خاک ماسه‌ای فیروزکوه در حالت بهسازی شده و بهسازی نشده در این تصاویر با بزرگنمایی بسیار بالایی نمایش داده شده است که تفاوت این دو حالت به راحتی قابل تشخیص است و رسوب کربنات کلسیم تمام سطح خاک را پوشانده است.

همانطور که گفته شد، این دستگاه دارای قابلیت انجام تست EDS نیز بوده که در این تست، عناصر موجود در تصاویر گرفته شده توسط آزمایش SEM مورد آنالیز و ارزیابی قرار می‌گیرد. در یکی از تصاویری که از نمونه بهسازی نشده عکس برداری شد، در سه نقطه آنالیز EDS صورت گرفت که نتایج آن در ادامه مطابق شکل‌های (۴-۴۱) و (۴-۴۲) شرح داده شده است.

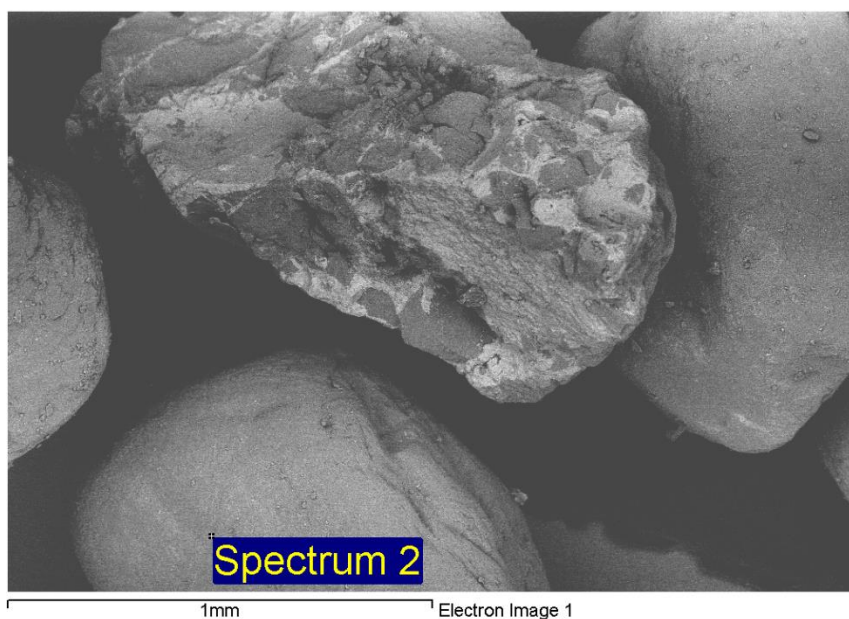


شکل (۴-۴۱) موقعیت نقطه شماره ۱ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده

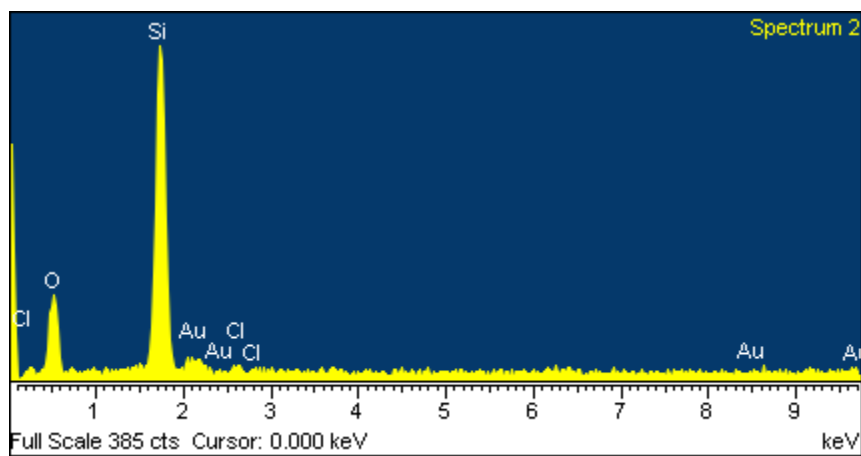


شکل (۴-۴۲) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۱ از نمونه بهسازی نشده

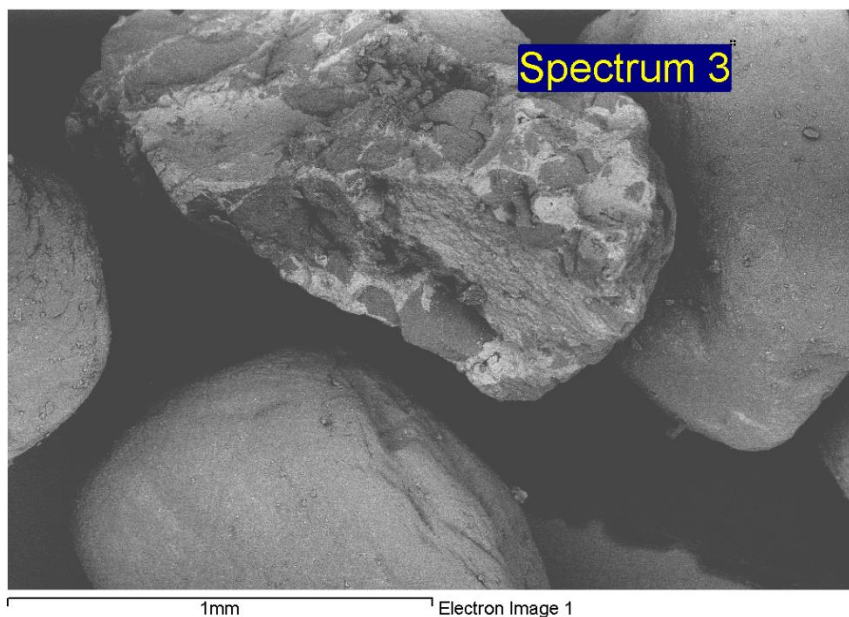
همانطور که در شکل (۴-۴۲) که نتیجه آنالیز نقطه شماره ۱ از نمونه بهسازی نشده نشان داده شده است مقدار عنصر سیلیسیم در این نقطه بسیار زیاد می‌باشد و از آنجایی که این ماسه از نوع سیلیکاته می‌باشد این امر کاملاً صحیح است. همچنین در این نقطه رنگ دانه خاک با باقی نقاط متفاوت است که با توجه به نتیجه تست EDS علت آن به دلیل وجود عنصر آهن تعیین میگردد.



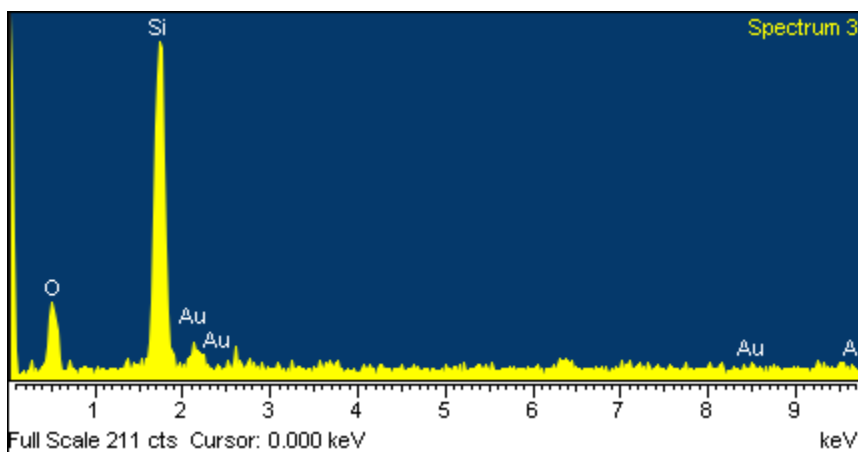
شکل (۴-۴۳) موقعیت نقطه شماره ۳ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده



شکل (۴-۴۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۲ از نمونه بهسازی نشده



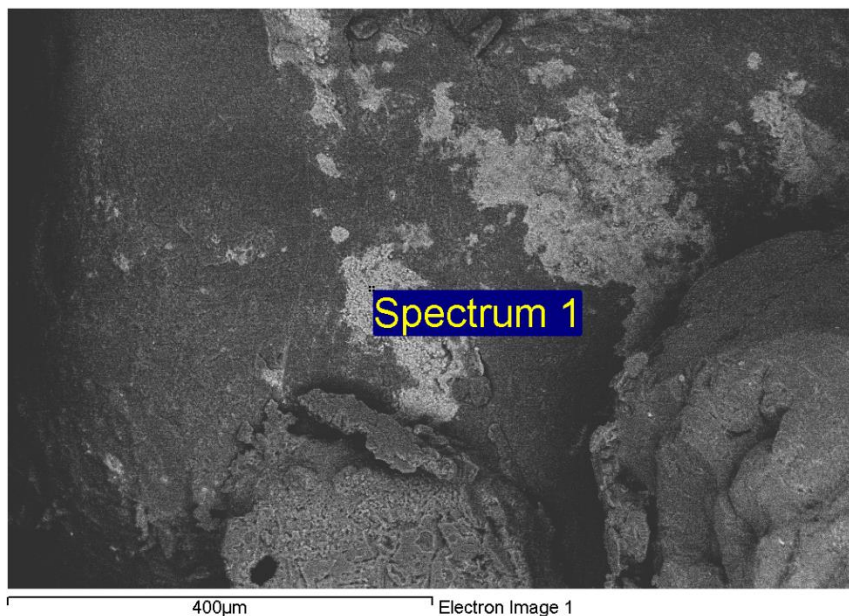
شکل (۴-۴۵) موقعیت نقطه شماره ۳ آنالیز EDS در نمونه بهسازی نشده



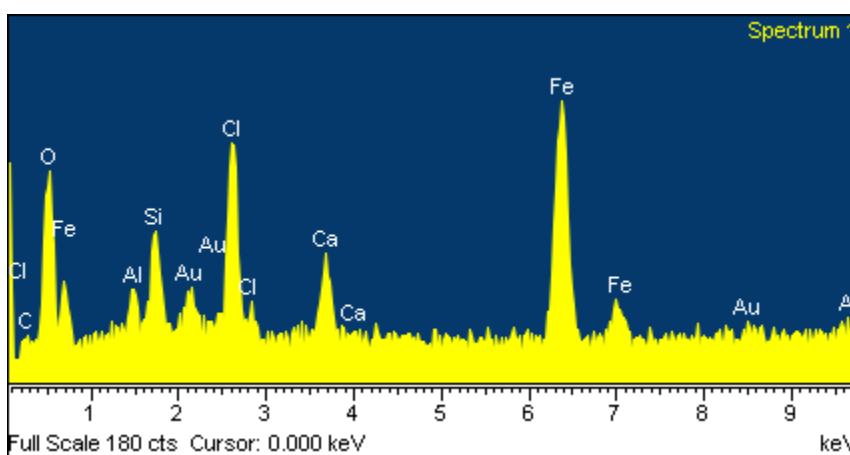
شکل (۴-۴۶) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۳ از نمونه بهسازی نشده

شکل‌های (۴-۴۳) و (۴-۴۴) به ترتیب موقعیت نقطه شماره ۲ و نتیجه آنالیز آن نقطه و شکل‌های (۴-۴۵) و (۴-۴۶) نیز به ترتیب موقعیت نقطه ۳ بر روی ذرات خاک و نتیجه آنالیز آن نقطه را نشان داده است. نتایج تست این دو نقطه تقریباً مشابه یکدیگر بوده و مقدار بسیار زیاد عنصر سیلیسیم را نشان داده است. با این تفاوت که در این نقاط خبری از عنصر آهن نبوده است.

همانند حالت بهسازی نشده، در یکی از تصاویری که از نمونه بهسازی شده عکس برداری شد، در سه نقطه آنالیز EDS صورت گرفت که نتایج آن در ادامه شرح داده شده است.



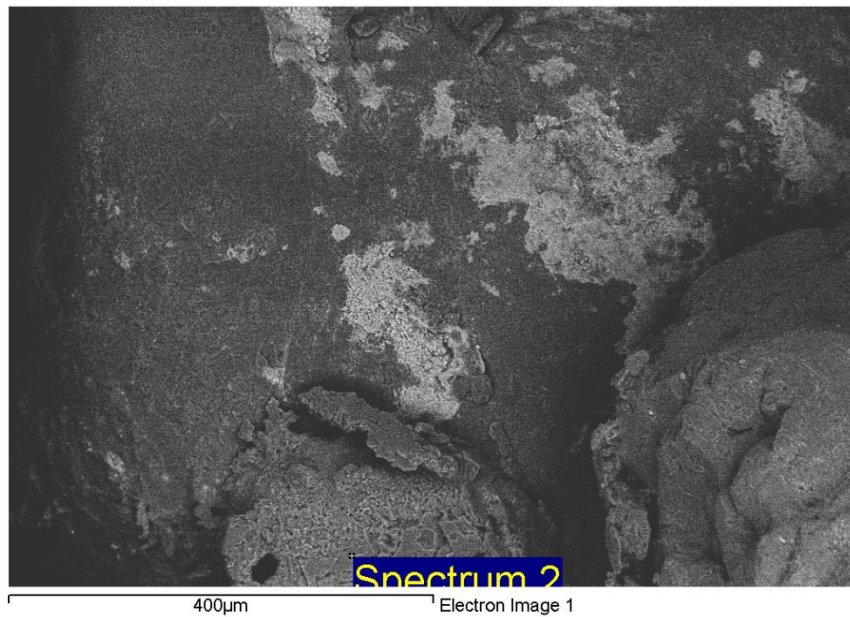
شکل (۴۷-۴) موقعیت نقطه شماره ۱ آنالیز EDS در نمونه بهسازی شده



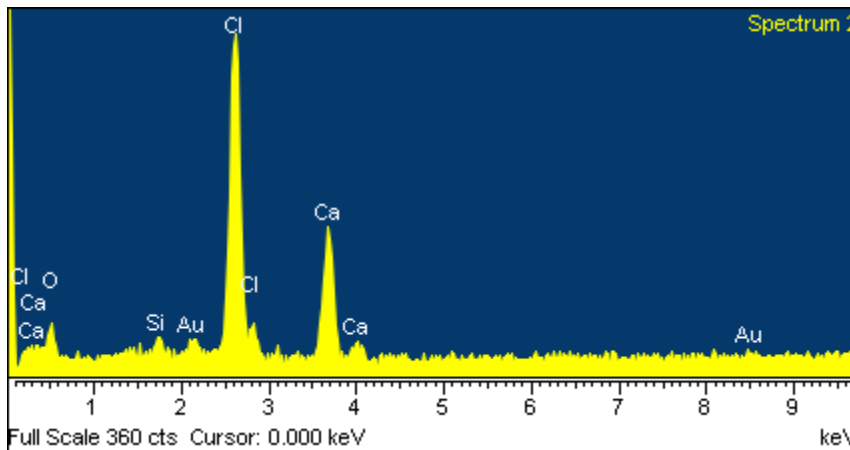
شکل (۴۸-۴) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۱ از نمونه بهسازی شده

همانطور که در شکل‌های (۴۷-۴) و (۴۸-۴) نشان داده شده است، در نمونه بهسازی شده مقادیر عناصر کلسیم و کلر به شدت زیاد شده و این نشان از تشکیل رسوبات کلسیم کربنات بر روی سطح خاک است.

همچنین باز هم لکه‌های سفید نشان دهنده وجود عنصر آهن است.



شکل (۴-۴۹) موقعیت نقطه شماره ۲ آنالیز EDS در نمونه بهسازی شده

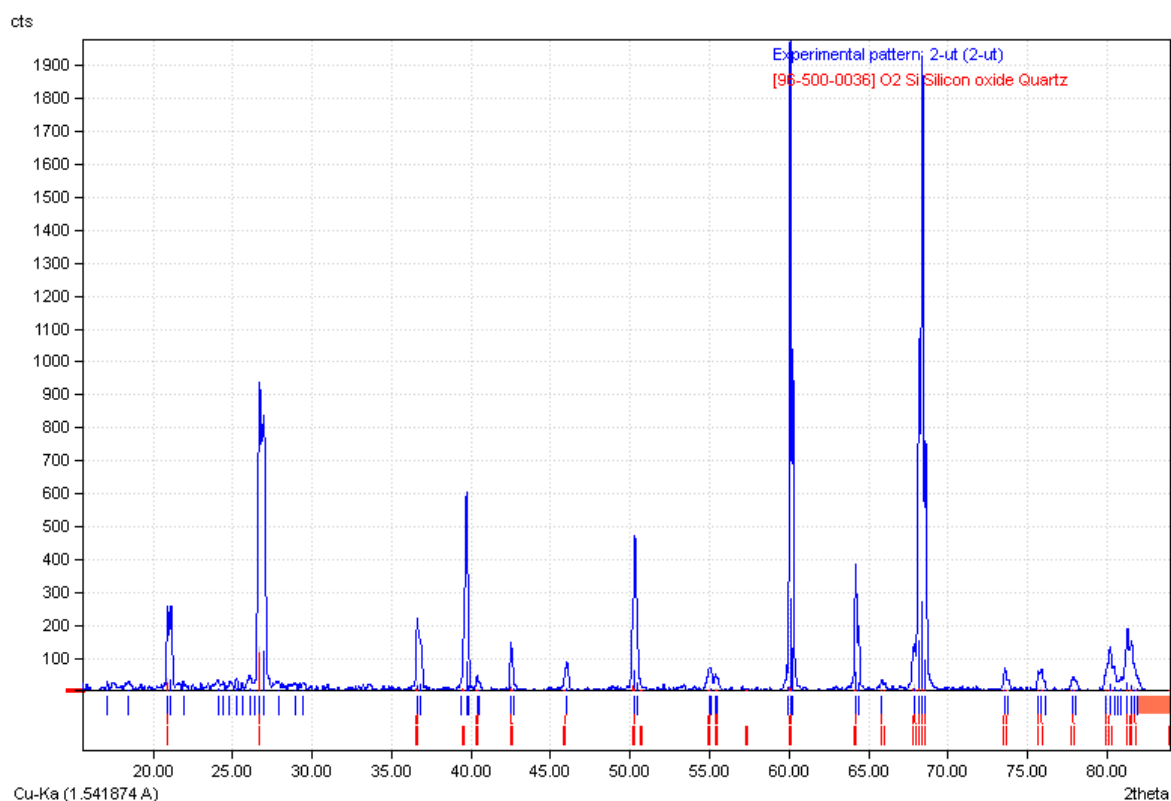


شکل (۴-۵۰) نتایج آنالیز EDS در نقطه شماره ۲ از نمونه بهسازی شده

شکل (۴-۵۰) آنالیز عناصر موجود در نقطه شماره ۲ که در شکل (۴-۴۹) مشخص شده را نشان داده است. بر طبق این آنالیز علاوه بر وجود عنصر سیلیسیم، عناصر کربن و کلسیم مشاهده شده است که نشان دهنده تشکیلی رسوب بر روی ذرات خاک است.

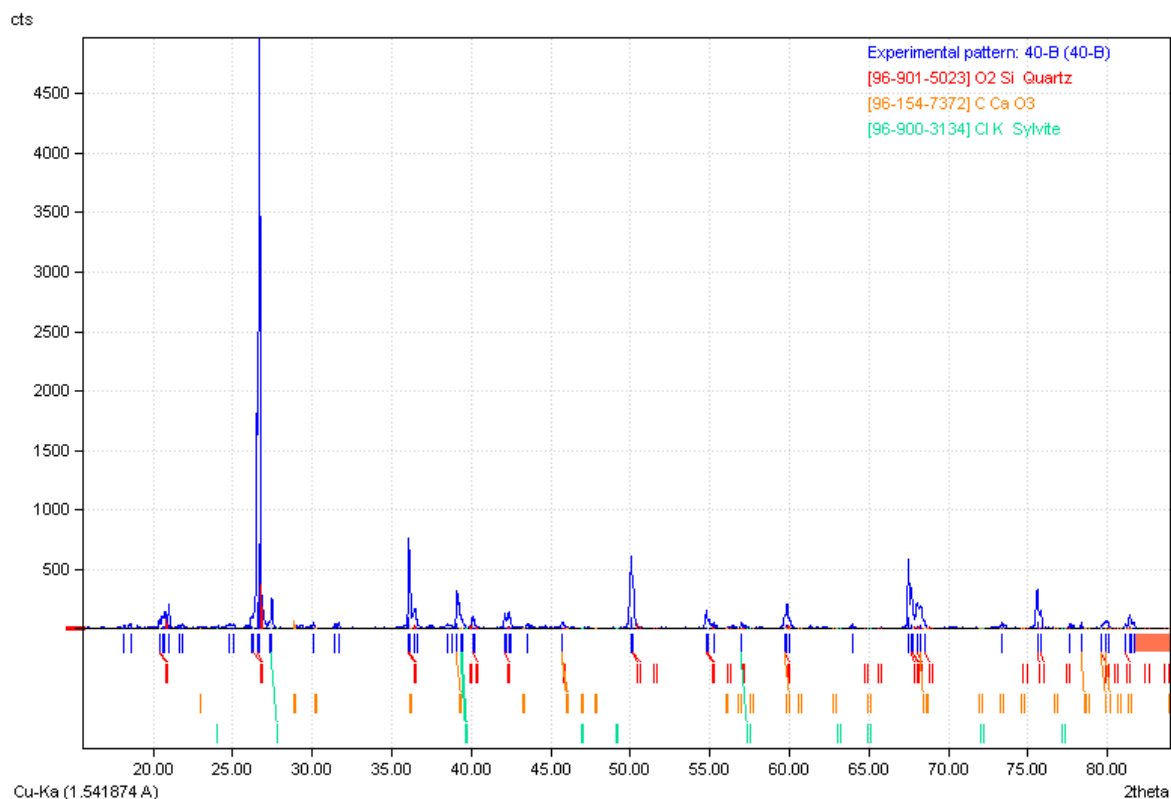
۴-۵- نتایج آزمایش XRD

در این پژوهش، همانند آزمایش SEM، آزمایش XRD نیز در مرکز آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. نتایج آزمایش XRD به صورت داده‌های درصد وزنی عناصر موجود در نمونه و گراف طیف XRD در دو نمونه بهسازی شده و بهسازی نشده در ادامه آورده شده است.



شکل (۴-۵) نتایج طیف XRD نمونه بهسازی نشده

همانطور که در شکل (۴-۵) مشخص شده است در طیف XRD فقط پیک کوارتز SiO_2 مشاهده شده است که با توجه به سلیکاته بودن ماسه فیروزکوه این امر کاملاً طبیعی می‌باشد. در تفسیر نمونه بهسازی نشده هم میزان درصد وزنی پیک کوارتز SiO_2 حدود ۱۰۰٪ عنوان شده است.



شکل (۴-۵۲) نتایج طیف XRD نمونه بهسازی شده

شکل (۴-۵۲) نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه بهسازی شده به روش بیولوژیکی را نشان داده است. طبق این طیف بر روی نمونه علاوه بر ترکیب SiO_2 ، ترکیبات رسوبی کربنات کلسیم CaCO_3 و کلر نیز مشاهده شده است. در صد وزنی گزارش شده در تفسیر طیف XRD بیانگر وجود ۹۱٪ ترکیب SiO_2 و مقدار ۸/۵٪ ترکیب CaCO_3 بوده است.

نتایج آزمایش XRD به خوبی تشکیل رسوبات کربنات کلسیم بر روی نمونه‌های خاک را با انجام ملیات بهسازی بیولوژیکی اثبات کرده است.

۴-۶- نتیجه گیری

همانطور که ملاحظه شد، در این فصل به بررسی نتایج آزمایشات مختلف که بر روی نمونه های خاک هم در حالت بهسازی نشده و هم در حالت بهسازی شده پرداخته شد. نتایج محاسبات ذکر، مقایسه و تحلیل گردید. به طور کلی، از نتایج آزمایشات چنین دریافت می‌گردد که بهسازی بیولوژیکی اثر مثبت و قابل توجهی بر

پارامترهای دینامیکی خاک مانند مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی داشته است. همانطور که شرح داده شد عملیات بهسازی بیولوژیکی باعث افزایش مدول برشی، کاهش میرایی و به طور کلی کاهش مدول برشی نرمال شده در کرنش‌های ثابت و افزایش سرت موج برشی و مدول برشی ماکزیمم در سربار ثابت شده است و می‌توان از این روش برای بهبود این خواص بهره برد.

فصل ۵:

جمع بندی و پیشنهاد ها

۵-۱- مقدمه

اکثر روش‌های بهسازی خاک پرهزینه، از لحاظ اجرایی دشوار و از نظر زیست محیطی خسارات زیادی به طبیعت وارد می‌کند. بهسازی بیولوژیکی یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک است که خیلی از مشکلات مذکور را ندارد. یکی از مشکلات روش‌های بهسازی عمومی خاک، تخریب محیط زیست است. با توجه به هدف اصلی این روش که محافظت از محیط زیست است زمان بر بودن آن را توجیه می‌کند و در مقایسه با زمان گیرش مصالح سنتی، تنها کشت باکتری در این روش زمان بر است و پس از آن، زمان اجرای مورد انتظار سایر روش‌ها در این روش وجود دارد. با توجه به مطالب فصل دو، استفاده از این روش همواره باعث بهبود خصوصیات خاک می‌باشد.

۵-۲- جمع بندی

در این پژوهش خاک ماسه فیروزکوه به روش بیولوژیکی مورد بهسازی قرار گرفت. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایشات برش ساده سیکلیک برای تعیین مدول برشی و میرایی، آزمایش بندر المنت برای تعیین سرعت موج برشی و تعیین مدول برشی ماکزیمم و آزمایشات SEM و XRD برای عکس‌برداری از ذرات خاک و تعیین مواد موجود در نمونه خاک انجام گرفت که در فصل چهارم نتایج آزمایشات مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. آماده سازی نمونه‌ها با تراکم نسبی ثابت ۴۰٪ که معرف خاک دانه‌ای سست می‌باشد در سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ kPa انجام شده است.

نتایج پژوهش انجام شده به شرح زیر می‌باشد:

- ✓ بهسازی بیولوژیکی بر روی ماسه سیلیکاته فیروزکوه، باعث افزایش ۲۳٪ در مدول برشی سکانتی در کرنش‌های پایین شده است که این مقدار افزایش در کرنش‌های بالا به دلیل تخریب پیوند ر سوب کربنات کلسیم میان ذرات خاک تا مقدار ۱٪ کاهش داشته است.
- ✓ این روش بهسازی، نسبت میرایی در کرنش‌های بالا را کاهش داد اما در استهلاک انرژی در کرنش‌های پایین تاثیر چشم‌گیری نداشته است. همچنین اثر کاهش بهسازی بیولوژیکی در سربارهای بالا بیشتر قبل مشاهده بوده است.

- ✓ بهسازی بیولوژیکی باعث افزایش سرعت موج برشی در حدود ۱۸ الی ۲۰ درصد شده است.
- ✓ عملیات بهسازی بیولوژیکی بر روی ماسه سیلیکاته فیروزکوه باعث افزایش مدول برشی ماکزیمم در حدود ۳۵ الی ۴۵ درصد شده است.
- ✓ در نمونه های بهسازی شده به روش بیولوژیکی مشاهده شد که مدول برشی نرمال شده نسبت به حالت بهسازی نشده کاهش یافته است و علت این امر افت شدید مدول برشی به دلیل اعمال نیروی برشی و تخریب بافت رسوبی کلیسم کربنات عنوان شده است.

۵-۳- نوآوری

در این پژوهش برای انجام آزمایشات تعیین مدول برشی و میرایی از دستگاه برش ساده سیکلیک با قطر نمونه ۱۰ سانتی متری استفاده شد که در ایران به دلیل محدودیت در دسترسی به این دستگاه، کمتر شاهد استفاده از آن هستیم.

۵-۴- پیشنهاد ها

در ارتباط با این پژوهش و موضوع بهسازی بیولوژیکی، پیشنهاداتی برای موضوعات پژوهش‌های آتی به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- ✓ بررسی اثر غلظت مواد تشکیل دهنده محلول سیمان‌تاسیون
- ✓ بررسی اثر اشباع سازی بر دوام بهسازی به روش بیولوژیکی
- ✓ امکان سنجی استفاده از این روش در مقیاس صنعتی
- ✓ امکان سنجی استفاده از این روش برای تثبیت ماسه های بیابانی به جهت جلوگیری از انتشار ریزگردها
- ✓ بررسی عوامل تاثیر گذار در عمل‌آوری و یافتن شرایط بهینه

مراجع

- [1] J. T. DeJong, B. M. Mortensen, B. C. Martinez, and D. C. Nelson, "Bio-mediated soil improvement," *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 197–210, 2010.
- [2] G. A. Munfakh and D. C. Wyllie, "Ground improvement engineering-issues and selection," in *ISRM International Symposium*, 2000.
- [3] O. S. B. Al-Amoudi, A. A. Al-Homidy, M. Maslehuddin, and T. A. Saleh, "Method and mechanisms of soil stabilization using electric arc furnace dust," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 46676, 2017.
- [4] L. a. van Paassen, "Bio-mediated ground improvement-From laboratory experiment to pilot applications," *Geo-Frontiers*, pp. 4099–4108, 2011.
- [5] P. P. Xanthakos, L. W. Abramson, and D. A. Bruce, *Ground control and improvement*. John Wiley & Sons, 1994.
- [6] M. P. Harkes, L. A. Van Paassen, J. L. Booster, V. S. Whiffin, and M. C. M. van Loosdrecht, "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement," *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 112–117, 2010.
- [7] M. Alexander and H. E. Schlichting, *Introduction to soil microbiology*, vol. 17. John Wiley and Sons, Inc., 1961.
- [8] F. Hammes and W. Verstraete, "Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–7, 2002.
- [9] B. P. Degens and J. A. Harris, "Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 29, no. 9–10, pp. 1309–1320, 1997.
- [10] D. Alvarado, "Bio-mediated soil improvement: cementation of unsaturated sand samples." Ph D thesis, Arizona State University, 2009.
- [11] L. A. Van Paassen, "Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications," in *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 4099–4108.
- [12] C. Qian, R. Wang, L. Cheng, and J. Wang, "Theory of Microbial Carbonate Precipitation and Its Application in Restoration of Cement-based Materials Defects," *Chinese J. Chem.*, vol. 28, no. 5, pp. 847–857, 2010.
- [13] V. Achal, A. Mukerjee, and M. S. Reddy, "Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1–5, 2013.
- [14] B. C. Martinez and J. T. DeJong, "Bio-mediated soil improvement: load transfer mechanisms at the micro-and macro-scales," in *Advances in ground improvement: research to practice in the United States and China*, 2009, pp. 242–251.
- [15] R. Bao *et al.*, "Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation on Surface Erosion and Scour of Granular Soils: Proof of Concept," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2657, no. 1, pp. 10–18, 2017.
- [16] A. P. Kousgaard, *Material Durability in the Anastylis of Ancient Structures*. The University of Nebraska-Lincoln, 2016.
- [17] V. Ivanov, J. Chu, and Æ. J. Chu, "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ," *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 139–153, 2008, doi: 10.1007/s11157-007-9126-3.
- [18] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, and M. A. Shahin, "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation," *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 1, pp. 81–90, 2013.
- [19] B. M. Mortensen and J. T. DeJong, "Strength and stiffness of MICP treated sand subjected to various stress paths," in *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 4012–4020.

- [20] B. Indraratna, J. Chu, and C. Rujikiatkamjorn, *Ground Improvement Case Histories: Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [21] F. Bell, *Engineering treatment of soils*. CRC Press, 1993.
- [22] J. T. DeJong, M. B. Fritzges, and K. Nüsslein, “Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 132, no. 11, pp. 1381–1392, 2006.
- [23] H. L. Ehrlich, “Geomicrobiology: its significance for geology,” *Earth-Science Rev.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 45–60, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0012-8252(98)00034-8.
- [24] J. K. Mitchell, J. C. Santamarina, H. M. Asce, J. C. Santamarina, and M. Asce, “Biological considerations in geotechnical engineering,” *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, vol. 131, no. 10, pp. 1222–1233, 2005.
- [25] A. Gurbuz, Y. D. Sari, Z. N. Yuksekdog, and B. Cinar, “Cementation in a matrix of loose sandy soil using biological treatment method,” *African J. Biotechnol.*, vol. 10, no. 38, pp. 7432–7440, 2011.
- [26] R. W. Bartlett, *Solution mining: Leaching and fluid recovery of materials*. Psychology Press, 1998.
- [27] G. F. Brooks, K. C. Carroll, J. Butel, S. A. Morse, and T. Mietzner, *Medical Microbiology*. 2013.
- [28] F. Chapelle, *Ground-water microbiology and geochemistry*. John Wiley & Sons, 2001.
- [29] V. S. Whiffin, “Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement.” Murdoch University, 2004.
- [30] G. A. Nadson, “Microorganisms as geologic agents. I,” *Tr. Komissii Isslect. Min. Vodg. Slavyanska, St. Petersburg.*, 1903.
- [31] S. Stocks-Fischer, J. K. Galinat, and S. S. Bang, “Microbiological precipitation of CaCO₃,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 31, no. 11, pp. 1563–1571, 1999.
- [32] R. A. Burne and Y.-Y. M. Chen, “Bacterial ureases in infectious diseases,” *Microbes Infect.*, vol. 2, no. 5, pp. 533–542, 2000.
- [33] L. A. Van Paassen, “Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation.” TU Delft, Delft University of Technology, 2009.
- [34] Q. Zhao, L. Li, C. Li, M. Li, F. Amini, and H. Zhang, “Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 12, p. 4014094, 2014.
- [35] G. D. O. Okwadha and J. Li, “Optimum conditions for microbial carbonate precipitation,” *Chemosphere*, vol. 81, no. 9, pp. 1143–1148, 2010.
- [36] W. Li, L.-P. Liu, P.-P. Zhou, L. Cao, L.-J. Yu, and S.-Y. Jiang, “Calcite precipitation induced by bacteria and bacterially produced carbonic anhydrase,” *Curr. Sci.*, pp. 502–508, 2011.
- [37] M. Nemati, E. A. Greene, and G. Voordouw, “Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymic option,” *Process Biochem.*, vol. 40, no. 2, pp. 925–933, 2005.
- [38] W.-S. Ng, M.-L. Lee, and S.-L. Hii, “An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement,” *World Acad. Sci. Eng. Technol*, vol. 62, no. 2, pp. 723–729, 2012.
- [39] A. Cheshomi, S. Mansouri, and M. A. Amoozegar, “Improving the shear strength of quartz sand using the microbial method,” *Geomicrobiol. J.*, vol. 35, no. 9, pp. 749–756, 2018.
- [40] K. N. JT DeJong, MB Fritzges, “Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 132, no. 5, pp. 591–602, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132.

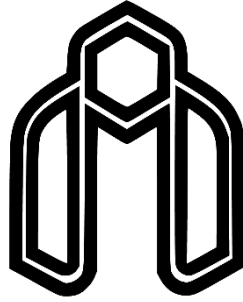
- [41] J. T. DeJong *et al.*, “Upscaling of bio-mediated soil improvement,” in *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5–9 October 2009, Alexandria, Egypt*, pp. 2300–2303. Rotterdam, The Netherlands: Millpress Science Publishers, 2009.
- [42] V. S. Whiffin, L. A. van Paassen, and M. P. Harkes, “Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique,” *Geomicrobiol. J.*, vol. 24, no. 5, pp. 417–423, 2007.
- [43] L. Li *et al.*, “Development of a Flexible Mold for Bio-Mediated Soil Materials,” *IFCEE 2015*, pp. 2339–2348, Mar. 2015, doi: 10.1061/9780784479087.217.
- [44] H. Yasuhara, D. Neupane, K. Hayashi, and M. Okamura, “Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation,” *Soils Found.*, vol. 52, no. 3, pp. 539–549, 2012.
- [45] S. Kramer, “L.(1996). Geotechnical Earthquake Engineering,” *Pren-tice Hall, New Jersey*, 2005.
- [46] B. M. Das and Z. Luo, *Principles of soil dynamics*. Cengage Learning, 2016.
- [47] K. Ishihara, “Soil Behavior in Earthquake Geotechnics Oxford Science Publication UK,” 1996.

Abstract

In recent years, with the expansion of civil infrastructure, as well as the lack of areas with suitable geotechnical characteristics for construction, soil improvement has become very important. Problems such as the need to spend high energy in terms of performance, limited depth of improvement and the cost of equipment required in existing methods such as preloading, the use of reinforcements or additives such as lime, cement and other chemicals, Has led researchers to use low-cost methods. Also, pollution in the environment in some improvement methods, including the use of chemicals such as lime and cement has caused some environmental problems such as pollution. The use of some soil improvement methods has also changed the direction of groundwater aquifers, which due to human contact with groundwater can endanger its health. Therefore, it is necessary to use new methods of improvement and environmentally friendly.

Microbial geotechnology is a new branch of geotechnical engineering that studies the possibility of improving problematic soils using microbiological methods. Currently, most microbial geotechnical studies are in the laboratory stage and due to its complexity, the application of microbial geotechnology requires interdisciplinary study between microbiological disciplines, environment, geochemistry with geotechnical engineering. In this research, biological improvement of Firoozkooch silicate sandy soils have been performed using *Sporosarcina pasteurii* bacteria. Using a dynamic simple shear test device, dynamic experiments were performed on soil samples with a height of 4 cm and a diameter of 10 cm at three surcharge of 100, 200 and 300 kPa. As a result of experiments, the shear modulus increases by about 23% at low strains and by about 1% at high strains, the damping decreases slightly, the shear wave velocity increases by about 18 to 20% and the maximum shear modulus by about 35 to 45 percentage and reduction of normalized shear modulus is observed.

Keywords: Soil Biological Improvement, Microorganism, Calcium Carbonate Sediment, Urease Enzyme



Shahrood University of Technology
Civil Engineering Department

Effect of biologic improvements on dynamic parameters of sandy soils

By:

Mehran Lalouee

Supervisor:

Dr. Mohsen Keramati

Dr. Mahdi Mirzaei

January 2020